

**KIVRAK BACAĞLI ROBOTLARDA GÜRBÜZ GÖRSEL
ALGININ İŞİTSEL ALGI DESTEĞİNDE GELİŞTİRİLMESİ VE
OTONOM NAVİGASYON AMAÇLI UYGULANMASI**

Proje No: 110E120

Doç. Dr. Afşar Saranlı
Yrd. Doç. Dr. Yiğit Yazıcıoğlu

EKİM 2013
ANKARA

Önsöz

Bu proje, otonom olarak dış ortamlarda ve karmaşık yüzeylerde yüksek performanslı hareketlilik gösterebilen bacaklı robotlarda, görsel algı'nın (kamera verileri) maruz kaldığı sorunların irdelenmesi ve görsel algının iyileştirilmesi yolunda çözümler geliştirilmesini, yardımcı nitelikte ise işitsel algı'nın kullanımı yolunda bazı olasılıkların araştırılmasını hedeflemektedir. Tübitak tarafından 1 Ekim 2010 – 1 Ekim 2013 tarihleri arasında 110E120 numarası ile desteklenmiş olan bu projenin sonuç raporu olarak hazırladığımız bu dokümanda, projemiz kapsamında geliştirilen mühendislik çözümlerinin tüm detayları yanında projemiz kapsamında yaptığımız bilimsel katkıları ve neticesinde gerçekleşen bilimsel çıktılarını da detaylarını da bilgilerinize sunuyoruz. Önceki projemize göre mühendislik çıktılarından daha fazla bilimsel çıktının öne çıktığı projemiz kapsamında kayda değer sayıda uluslararası yayın ortaya çıkmış ve önümüzdeki yılları kapsayacak çalışmalar için de verimli açılımlar tespit edilmiştir.

ÖNEMLİ NOT: Tübitak web sayfasındaki, 3Mb dosya boyut sınırı sebebiyle Final Raporumuz parçalara bölünmek durumunda kalmıştır. Raporun parçaları "Final Raporu" kısmına, pdf çıktılar olarak yüklenmiştir.

NOT: Proje raporumuzun ekinde yer alan büyük boyutlu multimedya dosyalarına (düzenek ve deney videoları ile düzenek fotoğrafları) DropBox web servisi üzerinde aşağıdaki link ile ulaşılabilir. Önemli sonuçlara ilgili bölümde ayrı linkler de verilmiştir.

<https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/cxplTmlmRY>

Özet

Mobil robotların arazi şartlarında kullanımı birçok zor problemi bünyesinde barındırmaktadır. Bu doğrultuda bacaklı robotlar en yüksek performansı gösterebilme yetisine sahiptir. Ancak bacaklı robotların arazide hareketi sırasında, üzerlerinde bulunan algılayıcılar açısından pekçok zorluk söz konusudur. Özellikle görsel algılamaya yönelik olan kamera ve türevi algılayıcılar, robotun hareketi sırasındaki sarsıntılardan olumsuz etkilenmekte, bu algılayıcılardan elde edilen verilerin “robot görme” yordamları tarafından kullanılabilirliği azalmaktadır. Bu kapsamda özellikle karşımıza çıkan, harekete bağlı “hareket bulanıklığı” (motion blur) türü bozulmadır. Projemiz kapsamında, hareket bulanıklığı bozukluğu başta olmak üzere görme yordamlarını olumsuz etkileyen bozulmalar, hızlı hareket eden robotların doğal hareketleri sırasında ortaya çıktığı biçimiyle anlaşılmaya ve ölçülmeye çalışılmış, bu bozulmaları gidermek için birden fazla bağımsız yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, algoritmik-elektronik ve elektro-mekanik yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Algoritmik yöntemler, kameranın robot ile doğal hareketine mekanik olarak müdahale etmeden doğal görüntü alım süreci ile elde edilen kamera verileri üzerinden gerçekleştirilen ters-süzgeçleme yöntemleri ile kameranın görüntü alım sürecine donanım destekli algoritmik müdahalelerden oluşmuştur. Elektro-mekanik yaklaşım ise bir “robot kafası” tasarımı ile kamerayı robot üzerinde hareket ettirme ve kontrollü hareketler yoluyla kameranın maruz kaldığı bozucu hareketlerin azaltılması biçiminde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan 3 eksenli kafa sisteminin öncelikle düzlemsel bir örneğinin, daha sonra ise 3 eksenli tam halinin kuramsal analizi projemizin önemli bir çabasını oluşturmuş ve uluslararası bilimsel makaleler şeklinde önemli akademik çıktılar vermiştir. Bu kuramsal çalışmaların deneysel çalışmalar ile birleştirilmesi alanında da hem düzlemsel hem de 3 eksenli durum için önemli sonuçlar alınmıştır ve bu çalışmaların bir kısmı da yayınlanmıştır.

Bu çalışmaların yanında, projemizin önemli bir yönü, bacaklı robotlarda görsel algıya yardımcı donanımlar geliştirilmesi ve işitsel algının yardımcı bir rolde kullanılabileceği tezinin ispatı olmuştur. Bu hedefler doğrultusunda robotik görme alanında önemli bir rolü olan ancak işlemsel yükü çok ağır olan “optik akış” algoritması, donanım destekli olarak FPGA donanımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, deneysel robot platformumuz SensorHex’in doğal adım seslerinin platform üzerinde stereo bir mikrofon ile yakalanması ve işlenmesi yoluyla üzerinde yürünen yüzeyin yüksek başarımla belirlenebileceği ispat edilmiş ve bu yolla akustik algının robot’un otonom davranışlarına katkı yapabileceği gösterilmiştir.

Robot otonom davranışlarını mümkün kılan ve robotik algının önemli bir paçasını istatistiksel durum ve çevre algılama yordamları oluşturmaktadır. Bu yordamların temelinde yatan “Bayes süzgeci”nin ana isterlerinden birisi ise istatistiksel hareket modelleridir. Projemiz kapsamında bacaklı robotlar için önemli zorluklar içeren bu alanda özgün bir katkı hedeflenmiş ve kestirimsel hareket modelleri geliştirilmesi yolunda ilerleme sağlanmıştır. Öncelikli olarak tek eksen hareket varsayımı altında modeller önerilmiş ve bunların durum kestirimi ve eş zamanlı konumlandırma (durum kestirimi) ve haritalama performansına katkı yaptığı gösterilebilmiştir. Bu çalışmalar ise yayın aşamasına yaklaşmıştır. Projemizin mühendislik faaliyetleri içinde yer alan robot görme yazılım kütüphanesi tamamlanmış ve proje faaliyetlerinde rutin olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Akademik çalışmalarımız sonunda elde edilen ve kullanılabilir hale gelen çıktılar sürekli olarak bu kütüphaneye dahil edilmektedir.

Sonuç olarak, projemiz ana hedeflerinin tümüne ulaşmış, bu hedeflerin bazıları ise doğrudan Y.Lisans tezleri ve uluslararası bilimsel makaleler haline gelmiş ve kabul görmüştür. Ucu açık ve uzun vadeli çalışmalarımızı oluşturan bazı hedeflerimizde ise proje

faaliyetleri kapsamında önemli ilerleme sağlanmış, tez ve yayın aşamasına yaklaşılmıştır. Çoğunlukla Doktora tezleri kapsamında devam eden bu çalışmalarda önümüzdeki bir yıl içinde önemli çıktılar gerçekleşecektir.

Tübitak tarafından sağlanan araştırma desteği, donanım ve deneysel ögeler içeren projemiz için kritik katkı sağlamıştır. ğrencilerimize sağlanan destek kadar, deneylerimizi yrtebilmemiz için gerekli ihtiyaçlar, proje kapsamında temin edilmiş ve bilimsel çıktılar mümkün olmuştur.

Abstract

Usage of mobile robots on a rough terrain embodies many complex problems. Legged robots are capable of displaying the highest performance on such terrains. However, sensors mounted on legged robots are subject to many disturbances during the locomotion of robot on a rough terrain. Especially, sensors related with visual perception and their variants are adversely affected from the body oscillations that are caused by robot locomotion. Also, the usability of data acquired from those sensors significantly reduces in “robot vision” methods. Within this scope, sensor motion caused “motion blur” is the most pronounced degradation. In this project, motion blur being in the first place, distortions negatively affecting vision methods have been tried to be measured and analyzed in a way they occur during natural movements of agile robots. Many independent solution methods are developed to overcome such disturbances. Proposed approaches can be divided into two main groups, namely, algorithmic-electronic and electro-mechanic solutions. Algorithmic methods does not mechanically interfere the motion of an onboard camera and they include applying reverse-filtering methods to images that are captured with regular image acquisition techniques and enhancing image capture method with external hardware supported algorithmic approaches. On the other hand, electro-mechanical approach involves moving camera with a “robot head” design and cancelling/decreasing disturbances on camera that originates from robot body oscillations, by controlling movements of the robot head. Theoretic analyses of the planar version of our designed head system and the full 3 DOF (Degree Of Freedom) head system have been a significant effort of our project and they gave crucial academic outputs such as international scientific journal articles. Fusion of theoretical work and experiments on the real platform in both planar and 3 DOF versions of robot head resulted in critical outcomes and are partially published.

In addition to visual perception improvements, designing and developing supplementary hardware to improve visual perception and proving the thesis on supplementary usage of acoustic perception in legged robots have been important aspects of our project. In line with those objectives, “optic flow” algorithm which has a crucial role on visual perception, but, is computationally very expensive have been implemented on a FPGA hardware. Moreover, it is proven that the surface robot walks on can be accurately determined by recording natural step sounds of our experimental robot platform, SensoRHex, with an onboard stereo microphone and processing the recorded sound, and, thus, it is shown that acoustic perception can improve the robot’s autonomous behaviors.

Statistical state and environment perception methods are among of the most important parts of robotic perception that enables autonomous robot behaviors. “Bayes filter” forms a base for such methods and one of its main requirements is a statistical motion model. In the scope of our project, an original contribution was aimed in this field, that involves particularly complex problems, and improvements obtained through deriving a predictive motion model. Primarily, models are proposed for 1 DOF motion assumption and it is shown that predictions of proposed methods are able to boost performance of simultaneous localization and mapping. Our work in this field is almost ready to be published. Robot vision software library, which is a part of engineering activities of our project, is completed and routinely used in various project activities. Outcomes that are obtained as a result of our academic studies and become functional are constantly added to our Robot vision software library.

As a result, our project achieved all of its aims and some of these achievements resulted in M.S. theses and international scientific articles, hence, academically accepted. In the context of our project, remarkable progresses have been made on some of our goals that consist of open ended and long term studies and obtained results are pretty close to the

thesis and publication phase. These efforts are mostly shown for Ph.D. theses and they will be finalized and significant outcomes will be published within a single year.

Research support granted by Tubitak has been a critical contribution for our project that involves hardware and experimental elements. Scholarships for our students working in this project and required needs for sustaining our experiments have been provided in the scope of this project, thus, academic outcomes have been possible.

İçindekiler

1	Motivasyon ve Genel Bilgiler.....	15
1.1	Projenin Temel Motivasyonu ve Diğer Çalışmalar İle İlişkisi ve Temel Katkıları	15
1.2	Mobil Robotlar, Otonom Davranışlar ve Hareketlilik	17
1.3	Bacaklı Robotlar, Dinamik Denge ve SensoRHex Platformu	17
1.4	Mobil Robotlarda ve Bacaklı Kıvrak Robotlarda Görsel ve İşitsel Algı.....	21
2	Robot Kafa Tasarımı, Kuramsal Analizi ve Kontrolü	26
2.1	Kafa Tasarım ve Üretimi	26
2.2	Kafa Tasarımının Kuramsal Modellemesi	33
2.3	Kafa Tasarımının Matlab-SimMechanics ile Benzetimi.....	46
2.4	Düzlemsel (1-DOF) Kafa Tasarımı ile Deneysel Çalışmalar	49
2.5	Uzaysal (3-DOF) Kafa Tasarımı ile Deneysel Çalışmalar	56
2.6	Sonuç.....	68
3	Hareket Bulanıklığı Analizi ve Giderilmesine Yönelik Donanım Destekli Algoritmik Yöntemler	69
3.1	Hareket Bulanıklığı ve Etkilerinin Karakterizasyonu.....	69
3.1.1	Hareket Bulanıklığı Modelleri	70
3.1.2	Deneysel Veri Seti	71
3.1.3	Performans Kriterleri	72
3.1.4	Ele Alınan Görsel Öznitelikler	73
3.1.5	Harris Köşe Bulucu Sonuçları	74
3.1.6	Canny Kenar Bulucu Sonuçları	76
3.1.7	SIFT Özniteliği Başarım Sonuçları	78
3.2	Ters-Filtreleme ve Görüntü İnterpolasyonu ile Giderim	81
3.2.1	Ters Filtreleme Yaklaşımları İle Giderim	81
3.2.2	Görüntü Karesi İnterpolasyon Yaklaşımı	82
3.2.3	Karşılaştırmalı Deneysel Sonuçlar	84
3.3	Hareket Bulanıklığı Matlab Benzetim Çalışması	88
3.4	Donanım Destekli Kamera Tetikleme İle Giderim	92
3.5	Sonuç.....	99
4	FPGA Destekli Optik Akış	99
4.1	Motivasyon ve Genel Yaklaşım.....	99
4.2	Optik Akış Algoritması ve Donanım Tasarımı	100
4.3	Deneysel Performans Değerlendirmesi	103
4.4	Sonuç.....	106
5	İşitsel Algı Yoluyla Yüzey Tanıma.....	106
5.1	İlk incelemeler	108
5.2	Akustik Öznitelikler ve Genel Yaklaşım.....	110
5.3	Örüntü Tanıma - Sınıflama Yaklaşımı	112
5.4	Performans Kriterleri	113
5.5	Deneysel Yapı ve Temel Deneysel Parametreler	114
5.6	Deney Sonuçları.....	115
5.7	Sonuç.....	117
6	İstatistiksel Hareket Modelleri ve Navigasyon Amaçlı Uygulamalar	118
6.1	Bacaklı Robotlar için İstatistiksel Hareket Modelleri.....	118
6.1.1	Genel Prensipler	119
6.1.2	Görsel Veriler (Ölçümler) ile Durum Kestirimi	121
6.1.3	Hareket Modeli – Tek Bacak Kodlayıcı Verileri ile	121
6.1.4	Hareket Modeli – 6 Bacak Kodlayıcı Verileri İle Geliştirilmiş.....	124
6.1.5	Hareket Modeli – Yere değme/Havalanma Bilgisi ile Geliştirilmiş.....	124
6.2	Navigasyon Amaçlı Merdiven Takibi	125

6.2.1	Kamera Kalibrasyonu ve Genel Yaklaşım	126
6.2.2	Model-Görüntü Uzaklık Maliyet Fonksyonu ve Optimizasyon.....	127
6.2.3	Optimizasyon yoluyla Durum Kestirim Sonuçları	129
6.3	Hareket Modelinin Kestirimde Kullanımı	130
7	Robot Görme Kütüphanesi	133
8	Projemiz Kapsamında Yapılan Diğer Çalışmalar	136
8.1	Ataletsel Güdüm Algılayıcı Karakterizasyon ve Kalibrasyonu.....	136
8.2	SensoRHex Yarım Daire Bacaklarının SimMechanics ile Modellenmesi ve Benzetim Çalışmaları.....	138
8.3	SensoRHex Yarım Daire Bacaklarının Dinamik Modellemesi ve Tek-Bacak Zıplayan Robot üzerinde Optimal Kontrolü	147
9	Projemiz Hedefleri ve Hedeflere Göre Değerlendirme.....	150
10	Sonuç.....	153
11	Gelecekte Yapılacak Çalışmalar.....	154
12	Projemiz Çıktısı Tamamlanmış Tez Çalışmaları, Ulusal ve Uluslararası Yayınlar ..	155
12.1	Tez Çalışmaları	155
12.2	Makale Çalışmaları	156
13	Kaynakça	158

Şekiller

Şekil 1: 110E120 no'lu projemizin daha önce tamamlanan 106E089 no'lu proje ve diğer çalışmalar ile gelecekte yapılacak çalışmalar ile ilişkilendirilmesi.....	16
Şekil 2: I-Robot firması tarafından geliştirilen Pack-Bot ve robotun boyutları ile personel tarafından arazi kullanımını gösterir canlandırma.....	17
Şekil 3: ABD'de RHex robot tasarımının son hali (Saranli et al., 2001).....	18
Şekil 4: 106E089 no'lu Tübitak projemiz kapsamında geliştirilen SensoRhex platformu. (a) Esnek kaplaması çıkarılmış ve (b) giydirilmiş durumda.....	18
Şekil 5: 106E089 no'lu geçmiş projemiz kapsamında ortaya çıktığı biçimiyle SensoRHex sistem tasarımı.....	20
Şekil 6: Boston Dynamics firmasının ABD ordusu için geliştirdiği (a) BigDog, (b) LS3 ve (c) henüz laboratuvar ortamında üzerinde çalışılan Cheetah robotları (Boston Dynamics Inc., 2013).....	21
Şekil 7: (a) 6-eksen paralel eyleyicili Stewart platformu, (b) Çalışmamız kapsamında önerilen 3-eksenli sadece açısız harekete sahip kafa konfigürasyonlarından bir tanesi	26
Şekil 8: Faulhaber doğrusal motor ve motor sürücüsü.....	27
Şekil 9: Kamera taşıyıcı robot kafasının dört değişik tasarım konfigürasyonu.....	29
Şekil 10: Kafa platformu parçalarının katı model resimleri.....	30
Şekil 11: Kafa platformunun imal edilmiş parça resimleri.....	31
Şekil 12: Düzlemsel hareket için tasarlanan ve üretilen parçalar.....	32
Şekil 13: Bütünleşmiş düzlemsel mekanizma ve kinematik analizde kullanılan değişkenler	32
Şekil 14: Uzaysal mekanizmanın değişik hallerde bütünleşmiş görüntüleri.....	33
Şekil 15: Üç eyleyicili kafa yapısının kinematik analizi için gerekli koordinat sistemleri ve matematiksel değişkenler.....	34
Şekil 16: Platform Euler açılarının gerçek ve tersine kinematik çözüm yoluyla bulunan değerlerinin karşılaştırması.....	36
Şekil 17: Kamera platformunu oluşturan paralel mekanizma.....	37
Şekil 18: Geliştirilen analitik yöntem kullanılarak yapılan kinematik analizler.....	39
Şekil 19: Düzlemsel mekanizmanın gerçek ve şematik görünümü.....	40
Şekil 20: Düzlemsel mekanizmanın kinematik analizinin deneysel olarak doğrulanması.....	41
Şekil 21: Düzlemsel mekanizmanın Simulink modelinden bir bölüm.....	43
Şekil 22: Düzlemsel mekanizmanın kendi ağırlığının etkisi ile yaptığı hareket simülasyonu (Simulink) ve deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	44
Şekil 23: Düzlemsel mekanizmanın eyleyici kuvveti etkisi ile yaptığı sürtünmesiz hareket simülasyonu ve analitik model ile Simulink modelinin karşılaştırılması.....	45
Şekil 24: Düzlemsel mekanizmanın eyleyici kuvveti etkisi ile yaptığı sürtümlü hareket simülasyonu ve analitik model ile Simulink modelinin karşılaştırılması.....	45
Şekil 25: Düzlemsel mekanizmanın eyleyici kuvveti etkisi ile yaptığı sürtünmesiz hareket simülasyonu - tek gövdeli ve üç gövdeli modellerin karşılaştırılması.....	45
Şekil 26: Mekanizmanın SimMechanics Modeli.....	47
Şekil 27: Görsel amaçlı olarak kullanılan mekanizmanın sanal modeli.....	48
Şekil 28: Kamera platformunun sinüsoidal bir açı sinyalinin takip simülasyonu.....	48
Şekil 29: Kamera platformunun sinüsoidal bir bozucu için stabilizasyon simülasyonu.....	49
Şekil 30: Çalışmalarda kullanılan deney düzeneği. İlk aşamada tek eksenli montaj yapılarak, daha sonra ise 3 eksenli montaj yapılarak kullanılmıştır.....	50
Şekil 31: Eyleyici konum kontrolü gecikmeleri üzerine tek eksenli düzeneğe ile yapılan deneyler.....	51
Şekil 32: Değiştirilmiş eyleyici kontrolcü parametreleri ile yapılan deneyler.....	52
Şekil 33: Düzlemsel mekanizma ve açısız konum algılayıcısı ile yapılan deneyler.....	53
Şekil 34: Kafa kontrolü düzlemsel deneysel düzeneğin genel görünümü.....	53
Şekil 35: Kinematik konum hesabı ile IMU'den ölçülen açısız pozisyon.....	54

Şekil 36: Kafa kontrolü düzlemsel deneysel düzeneğinin tek eksenli açısal hareket girdisi verilebilmesi için dairesel elemanlar üzerine yerleştirilmiş hali. Alt iki fotoğraf kontrol deneyleri sırasında çekilmiştir.....	54
Şekil 37: İki değişik hızda pozisyon kontrol deney sonuçları. IMU'den alınan pozisyon geri beslemesi ile hesaplanan şaft düzeltme uzunlukları, motora şaft uzunluğu referans sinyali olarak verilmiş ve bu sinyal bağımsız PD kontrol ile takip edilmiştir.	55
Şekil 38: PointGrey Flea2 kamera ve objektifi kalibrasyon parametreleri.	56
Şekil 39: İki değişik hızda pozisyon kontrolü sonucu ortaya çıkan ortalama ve maksimum hareket bulanıklığı benzetim sonuçları. (a) Düşük hızda bozucu işaret, (b) Yüksek hızda bozucu işaret.....	56
Şekil 40: 3-eksenli ve 3 serbestlik dereceli kafa düzeneği. (a) Montaj öncesi elektronik ve mekanik bileşenler, (b-c) Montaj sonrası platform görünümü	57
Şekil 41: 3-serbestlik-dereceli kamera stabilizasyon platformuna monte edilmiş 75 [gr] ağırlığındaki yük etkisi altında, motorların sırası ile sürülmesi sırasında 1. Motorun pozisyon davranışı.	59
Şekil 42: 3-serbestlik-dereceli kamera stabilizasyon platformuna monte edilmiş 75 [gr] ağırlığındaki yük etkisi altında, motorların sırası ile sürülmesi sırasında 2. Motorun pozisyon davranışı.	60
Şekil 43: 3-serbestlik-dereceli kamera stabilizasyon platformuna monte edilmiş 75 [gr] ağırlığındaki yük etkisi altında, motorların sırası ile sürülmesi sırasında 3. Motorun pozisyon davranışı.	60
Şekil 44: Yuvarlanma eksenine verilen adım cevabının 1. Motor pozisyon cevabı üzerinden incelemesi.	61
Şekil 45: Yuvarlanma eksenine verilen adım cevabının 2. Motor pozisyon cevabı üzerinden incelemesi.	62
Şekil 46: Yuvarlanma eksenine verilen adım cevabının 3. Motor pozisyon cevabı üzerinden incelemesi.	62
Şekil 47: Yuvarlanma eksenine verilen değişken frekanslı referans sinyaline kontrol sisteminin cevabının 1. Motor pozisyonu üzerinden incelemesi.	64
Şekil 48: Yuvarlanma eksenine verilen değişken frekanslı referans sinyaline kontrol sisteminin cevabının 2. Motor pozisyonu üzerinden incelemesi.	64
Şekil 49: Yuvarlanma eksenine verilen değişken frekanslı referans sinyaline kontrol sisteminin cevabının 3. Motor pozisyonu üzerinden incelemesi.	65
Şekil 50: İki eksende faz farklı düşük frekanslı sinus ve üçüncü eksende artan frekanslı değişken sinus altında 1. motor şaft uzunluk değişimi.....	66
Şekil 51: İki eksende faz farklı düşük frekanslı sinus ve üçüncü eksende artan frekanslı değişken sinus altında 2. motor şaft uzunluk değişimi.....	67
Şekil 52: İki eksende faz farklı düşük frekanslı sinus ve üçüncü eksende artan frekanslı değişken sinus altında 3. motor şaft uzunluk değişimi.....	67
Şekil 53: Doğrusal Hareket bulanıklığı işlemi blok şeması	70
Şekil 54: SensoRHex platformu üzerinde kontrollü bir hedeften toplanmış hareket bulanıklığı örnekler. (a) Tripod üzerinde sabit görüntü, (b) yatay bozulmuş, (c) dikey bozulmuş ve (d) dönüşel bozulmuş.....	71
Şekil 55: SensoRHex platformu üzerinde görsel veri toplamada kullanılan PointGrey Flea2 kamerası ve robot platformu üzerindeki yerleşimi.....	72
Şekil 56: SensoRHex platformu ile kamera verisi toplanmasında kullanılan düzeneğin. Robot değişik hızlarda belli bir düz mesafe katetmekte ve karşısına yerleştirilen özel bir görsel hedef üzerinden veri toplamaktadır.....	73
Şekil 57: SensoRHex platformu ile yürüyüş deneyleri sırasında toplanan ve hareket bulanıklığı içeren video dizilerine bir örnek.	73
Şekil 58: Harris Köşe bulucu genel yordamsal adımları.	74
Şekil 59: Canny kenar bulucu genel yordamsal adımları	75

Şekil 60: Dört değişik yürüme hızı ile elde edilen video verileri üzerinde video karesine bağlı Harris Köşe bulma kayıpları. Damalı alan içerisinde toplam 18 köşe bulunmaktadır. ...	76
Şekil 61: Örnek video karesinin ilgili bölgesinde Canny kenar bulucu sonuçları.	77
Şekil 62: Dört değişik yürüme hızı ile elde edilen video verileri üzerinde video karesine bağlı Canny kenar bulma yordamı sonuçları.	77
Şekil 63: Durağan robot video verilerinde SIFT yordamının ardışık kareler arası eşleştirme performansı.	78
Şekil 64: Dört değişik yürüme hızı ile elde edilen video verileri üzerinde SIFT noktalarının kareler arası örtüşmesinin video kare indeksine bağlı değişimi.	79
Şekil 65: 0.1 hız katsayısında 25'inci kare ile ardışığı kare arasındaki SIFT öznelik eşleştirmeleri. İkinci karedeki yoğun hareket bozulumu gözükmemekte.	79
Şekil 66: 0.8 hız katsayısında tüm SIFT öznelik eşleştirmelerinin kaybedildiği örnekler. ...	80
Şekil 67: 0.4 hız katsayısı için en yoğun bozuluma uğramış video karesi üzerinde en iyi Harris köşe bulucu eşik değerinin aranması.	80
Şekil 68: M1, M2 ölçütlerinin vide kare indeksine bağlı olarak değişimi.	83
Şekil 69: M3, M4 ölçütlerinin vide kare indeksine bağlı olarak değişimi.	83
Şekil 70: Video karesi interpolasyon işleminin sembolik gösterimi.	85
Şekil 71: Deneysel çalışma için SensoRHex üzerinde alınmış iki ardışık video diziniden 3-karelik örnek dizinler. Burada A ve B dizinlerinde ortada bulunan 2 no'lu kare, tüm tartışılan yöntemler ve önerilen Kare interpolasyon yöntemi ile kestirilmeye çalışılmaktadır.	85
Şekil 72: Örnek: Richardson-Lucy algoritması ile onarım sonucunda Köşe Bulucu sonuçlarının durumu.	86
Şekil 73: Örnek: Wiener Filtre algoritması ile onarım sonucunda Köşe Bulucu sonuçlarının durumu.	86
Şekil 74: Yukarıdaki iki video dizininin ilk ve son karesinden elde edilen optik akış vektör alanının gösterimi. Bu optik akış alanı, Görüntü Karesi İnterpolasyon yöntemi önerimizde kullanılmaktadır.	86
Şekil 75: Bozulmuş kareler ve Kare İnterpolasyon tekniği ile düzeltilmiş kareler orta video resim karesi üzerinde Harris Köşe Bulucu ile elde edilen sonuçlar.	87
Şekil 76: Hareket bozunumunu da içeren perspektif dönüşümünün kavramsal gösterimi ...	88
Şekil 77: Benzetim çalışmaları: Sentetik sahnenin resim düzlemi üzerinde görüntü oluşturma.	89
Şekil 78: Benzetim çalışmaları: Kameranın tümleşik kayma ve dönü hareketi sonucu oluşan hareket bulanıklığı. İlk resim hareket olmayan durumu göstermektedir.	89
Şekil 79: Kamera resim alma (obtüratör) hızının doğrusal ve dönüsel hareket ile ortaya çıkan hareket bulanıklığına etkisi.	90
Şekil 80: Değişken resim alma anı tetikleme hareket bulanıklığı üzerine etkisini inceleyen benzetim sonuçları. FPS=25kare/saniye, SS(resim alma hızı)=1/60 sn.	91
Şekil 81: Değişken resim alma anı tetikleme hareket bulanıklığı üzerine etkisini inceleyen benzetim sonuçları. FPS=25kare/saniye, SS(resim alma hızı)=1/500sn.	91
Şekil 82: Ardışık görüntülerin yakalama zamanlaması.	92
Şekil 83: Kamera ve Dünya koordinat sistemleri ile kamera dönüş açılarının gösterimi.	93
Şekil 84: Kamera ile alınan ardışık iki görüntü.	94
Şekil 85: (a) Optik akış algoritması sonucunu göstermekte kullanılan renk haritası ve (b) Şekil 84'te görülen iki kare arasındaki optik akış hesabı.	95
Şekil 86: Kamera yunuslama hareket yaptığıında MMBM ve AMOF'un karşılaştırılması.	95
Şekil 87: Kamera karmaşık hareket yaptığıında MMBM ve AMOF'un karşılaştırılması.	96
Şekil 88: "Riemann Sum" yaklaşımında kullanılmak üzere kamera sensörünün aralıklara bölünmesi.	96
Şekil 89: Ölçevimizin numerik ve yaklaşımsal hesaplanması arasındaki yüzdesel fark.	97
Şekil 90: Kamera görüntüsü tetiklemede kullanılan donanımın yapısı.	97
Şekil 91: Robot yürüyüşü sırasında hesaplanan MMBM.	97

Şekil 92: (a) Dışardan ve (b) SensoRHex'in görüş açısından deney alanı.....	98
Şekil 93: (a) Sabit frekanslı, (b) MMBM kullanan akıllı kamera tetikleme ile yapılan deneylerin sonucunda alınan en fazla hareket bulanıklığına uğrayan kareler.	98
Şekil 94: Planlanan FPGA yapısı üst seviye blok şeması	100
Şekil 95: FPGA destekli Optik Akış veri akış şeması	101
Şekil 96: FPGA temelli Optik Akış tasarımı fonksiyonel donanım modülleri ve giriş/çıkış bağlantıları	102
Şekil 97: Optik akış hesabını yapan OF_COMPUTER modulunun boru hattı mimarisine sahip yapısı.....	103
Şekil 98: Test amacıyla kullanılan "Rubic's Cube" ve "Hamburg Taxi" video dizinleri.....	104
Şekil 99: "Rubic's Cube" video dizini üzerinde FPGA ile hesaplanmış optik akış vektör alanı	104
Şekil 100: "Rubic's Cube" video dizini üzerinde optik akış (u,v) vektör bileşenlerinin hata dağılımı	105
Şekil 101: FPGA gerçekleştirilmesinde kullanılan sabit nokta sayısal temsiliğin nokta yerine göre hassasiyet ve referans PC gerçekleştirilmesine göre oluşan hatalar	105
Şekil 102: FPGA güç tüketiminin modüllere göre dağılımı	106
Şekil 103: (a) Olympus LS-10 Doğrusal PCM kayıt cihazı. Bu cihaz 44100 örnek/saniye hızında 24 bit çözünürlük ile kayıt yapabilmektedir. (b) Sony ECM-DS70P mikrofonu.	107
Şekil 104: (a) 106E089 no'lu Tübitak 1001 projesi kapsamında geliştirilen SensoRHex bacaklı robot platformumuzun çimen yüzeyi üzerindeki görüntüsü (b) Platform üzerinde mikrofon yerleşimi.	107
Şekil 105: Akustik deney veri tabanımızı oluşturan 7 değişik yüzey: halı, marley, mermer karo, parke, küçük beton bloklar (sonbahar yaprakları), beton karo ve çimen.	108
Şekil 106: Bir ses analiz programı ile SensoRHex platformundan halı üzerinde yürüyüş sırasında toplanan ses örneği ve kısa bir parçanın Spektrogram zaman-frekans analizi ile manuel incelenmesi.....	109
Şekil 107: Akustik yüzey tanıma yordamsal yaklaşımı ve alt bileşenleri	111
Şekil 108: Band geçiren spektrum süzgeçleri örneği. Örnekte süzgeç sayısı 6, incelenen frekans aralığı ise 0-10KHz'dir.....	111
Şekil 109: Akustik öznelik vektörünün içerik ve boyutsal oluşumu.	112
Şekil 110: 6 Sınıf için örnek Karıştırma Matrisi.....	114
Şekil 111: Sınıflayıcıların performans-işlem yükü düzleminde üç değişik robot hızı için genel değerlendirmesi.....	115
Şekil 112: NB ve FT sınıflayıcılarının frekans analizindeki band sayısına göre ve değişik robot hızlarındaki performansları	116
Şekil 113: FT sınıflayıcısı için temel frekans band enerjilerinden oluşan temel özneliklere, sıfır kesme oranı ve temel özneliklerin zaman farkının eklenmesi sonuçları	116
Şekil 114: Test verisinden elde edilen deney jetonu (ses parçası) sayısına bağlı performans. Jeton sayısı arttıkça parçalar küçülmekte ve buna bağlı her jetonun sınıflanmasında performans düşüşü görülmektedir.	117
Şekil 115: Sınıf sayısına bağlı sınıflama performansı değişimi.	117
Şekil 116: SensoRHex hareket deney düzeneği ve koordinat sistemi. Robotun düzlemsel hareketi (x,y,θ) değişkenleri ile modellenmektedir. Projemiz kapsamında yaptığımız çalışmalarda ilk aşamada tek eksenli (x) -ekseni bir harekete ait bir hareket modeli geliştirilmiştir.	118
Şekil 117: Tekerlekli robotlar için geometrik Hız Hareket Modeli (Thrun, 2005).....	119
Şekil 118: Sol ve Sağ ön bacaklara ait encoder ölçümlerinin açığa çevrilmiş halleri. Ortadaki daha az eğimli (yavaş) ve doğrusal olmayan bölge, temelde bacağın yer ile temas halinde olduğu zamana karşılık gelmektedir.....	120
Şekil 119: Uzun vadede planlanan hareket modelinde bacak encoder'ları ile hareket tahmini arasındaki ilişki	120

Şekil 120: RoLab bünyesinde kurduğumuz yeni görme temelli durum ölçümü sistemi ve SensoRHex robotunun arkadan görünümü. Üstteki çıkıntı lazer tarayıcıya aittir ve kamera ise robotun önünde bulunmaktadır.	121
Şekil 121: Robotun bacaklı hareketine ait, lazer tarayıcı ile ölçülen “hedefe mesafe” durumu. (a) Yarı periyodik yapıya sahip gerçek hareket, (b) Alt-geçirgen süzgeç ile elde edilen “sabit hız” bileşeni	122
Şekil 122: Tek bacağın encoder ölçümleri üzerinden hesaplanan bacak açısı ile robotun o adımdaki görelî hareketi arasındaki ilişki	122
Şekil 123: Matlab ortamında geliştirilen ve deney verilerinin hareket modeli içinde kullanılacak kısımlarını elde etmeyi sağlayan yardımcı yazılım.....	123
Şekil 124: Çok sayıda adım verilerinin model uzayında üst üste çizdirilmiş hali. Bu davranışların “ortalama” hali, herhangi bir adımda hareket modeli'nin tahminini yansıtmaktadır.	123
Şekil 125: Çok sayıda adım verilerinin ortalanarak elde edilen genellenmiş hareket modeli'nin model uzayında görünümü	124
Şekil 126: SensoRHex senkron hareket kontrol işareti. Sol uçayak (solda iki ayak ve sağda bir ayak) ve sağ uçayak için motorlara yollanan referans işaretinin zamana göre değişimi gözlenmektedir.	125
Şekil 127: Kamera kalibrasyon yazılımı ve kalibrasyon sırasında kullanılan dama desenli plaka	126
Şekil 128: Koordinat sistemleri, 3B Merdiven modeli ve merdivene göreceli kamera konumu. Önerdiğimiz yöntemde gerçek merdivenin tek görüntüsünden bu modeldeki kamera konum ve yönelimi çıkartılmaktadır.....	126
Şekil 129: (a) Merdiven görsel özneliklerinden yatay ve dikey çizgilerin Hough dönüşümü ile çıkartılması, (b) Yatay çizgilerin ayıklanması ve kesilmiş çizgi parçalarının birleştirilmesi	127
Şekil 130: Kamera resim düzlemine izdüşürülmüş merdiven modeli (mavi) ile resimden elde edilen yatay çizgiler (kırmızı) arası uzaklık ölçümü. Bu ölçüm için resimde bulunan her çizgi için eşit aralıklı üç nokta belirlenmekte ve bu noktalar ile en yakın model çizgisi arasındaki dik uzaklıklar hesaplanmaktadır.	128
Şekil 131: Ele alınan Tip1 Maliyet Fonksiyonunun iki parametre'lik kesitleri. Bu üç kesit, tanımlanan fonksiyonun tek bir çukur noktasına sahip olduğu konusunda olumlu bir izlenim vermektedir.	129
Şekil 132: Maliyet fonksiyonu'nun eniyileme iterasyonlarına bağlı değişimi	129
Şekil 133: Eniyileme sonucunda resimdeki merdiven ile çakıştırılmış merdiven modeli (a) ilk durum, (b) Kesitirim sonrası durum.....	129
Şekil 134: Sabit hız hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçlar. Burada mavi renk ölçümleri, yeşil renk gerçek hareketi ve kırmızı renk de süzgeç tahminlemesini göstermektedir	131
Şekil 135: Önerilen üç hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçların gerçek hareket ve sabit hız modeli ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.....	132
Şekil 136: Önerilen üç hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçlar. Gerçek hareket ve model kestirimi arası mutlak farkların gösterimi	132
Şekil 137: Önerilen üç hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçlar. Gerçek hareket ve model kestirimi arası mutlak farkların alt geçirgen süzgeç ile gösterimi. Ortalama davranış görüntülebilmektedir.	133
Şekil 138: VisLib robot görme kütüphanesi genel veri akış yapısı	134
Şekil 139 Kütüphane'nin eklenti mimarisi	135
Şekil 140: Ataletsel algılayıcı ivmeölçer ve dönüölçer kalibrasyon prosedürleri.....	137
Şekil 141: “Rate Transfer Test”: Belli bir eksende gerçek dönü miktarı ile algılayıcı eksen çıkışları arasındaki ilişkinin kontrollü dönü uygulanması yolu ile bulunması.	138

Şekil 138: (a) 106E089 no'lu Tübitak 1001 projesi kapsamında geliştirilen SensoRHex bacaklı robot platformumuz (b) Platform bacaklarından birinin ve eyleyici motorun katı model çizimi.	139
Şekil 139: 106E089 no'lu Tübitak 1001 projesi kapsamında geliştirilen SensoRHex kinematik bacak modeli.....	140
Şekil 140: Castigliano Theoremi'nden yararlanarak gurubumuz tarafından geliştirilen ve C noktasında uygulanan bir kuvvete karşı bacakta meydana gelen esnemeyi veren esnek bacak modeli.....	140
Şekil 141: Quanser doğrusal olmayan ters sarkaç modeli'nin Simulink modeli.	141
Şekil 142: Quanser doğrusal olmayan ters sarkaç modeli'nin SimMechanics modeli. Bir diğer detay seviyesinde	142
Şekil 143: Quanser doğrusal olmayan ters sarkaç modeli ile Simulink ve SimMechanics ile aynı kontrolcü altında elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmaktadır.	142
Şekil 144: (Evers'08) Çalışmasında ele alınan çok tekerlekli araç modeli.	143
Şekil 145: (Evers'08) Çalışmasında ele alınan çok tekerlekli araç için SimMechanics ile benzetim ve araçtan ölçüm sonuçları karşılaştırması	143
Şekil 146: SensoRHex esnek bacak modellemesinde değişik sayıda eklem içeren yaklaşık sonlu elemanlar yaklaşımı	144
Şekil 147: 4 parçalı, 2-SD'li bacak modeli örneği	144
Şekil 148: 6 Bacaklı Hexapod modeli'nin iç yapısı	145
Şekil 149: Çalışmamızda kullandığımız zemin Simulink modeli.....	146
Şekil 150: Düşeyde bırakılan tek bacaklı kütleli ağırlık merkezinin düşeyde gösterdiği hareket. Verilen esneklik parametre değeri ile sistem iki kere yerden sıçramakta, daha sonra ise yere temas halinde salınmaktadır.	147
Şekil 151: Castigliano Teoremi'nin uygulaması için tanımlar. (a) Esneyen bacakta toplam esneme enerjisini hesaplamak için kullanılan bacak üzerine etkiyen dikey ve yatay kuvvetler ve buna karşılık gelen kesitsel momentler; (b) Esnememiş ve esnemiş bacak konfigürasyonu. Buarada bacak H noktasından gövdeye bağlıdır ve robot gövdesi kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu çalışmamızın detayları, eklerimizden biri olan ve kontrol alanında bir uluslararası dergide olumlu bir değerlendirme aşamasında bulunan makalemizde bulunabilir. Yapılan kuramsal analiz sonucunda bacağın esneme modeli (bacağa değme noktasından etki eden kuvvetler ile ortaya çıkan esneme).....	148
Şekil 152: Dinamik sistem modeli için serbest gövde (Free-Body) şeması	149
Şekil 153: Dinamik Yatay hız kontrol sonuçlarına bir örnek. 1.5m/sn hızla koşma hareketi sırasında kontrolcü yatay hızı istenen değere getirebilmektedir. Bu sırada sistemin doğal dinamiğinin sonucu olarak zıplama yüksekliğinin de bir limit değere yakınsadığı görülmektedir.	150

Giriş

Bu sonuç raporunda, Tübitak tarafından 1 Ekim 2010 ile 31 Eylül 2013 tarihleri arasında, 1001 programı bünyesinde 110E120 numarası ile desteklenmiş olan, “Kıvrak bacaklı robotlarda gürbüz görsel algının işitsel algı desteğinde geliştirilmesi ve otonom navigasyon amaçlı uygulanması” başlığına sahip projemiz ile ilgili tüm teknik ve bilimsel çalışmaları özetlemekteyiz. Bu bağlamda çalışmalarımızın anlatımını en uygun mantıksal akış içerisinde sekiz ana başlık altında yapmayı uygun gördük.

Öncelikle, 1. bölümde, ülkemizde çok yeni olan ve bu konudaki çalışmaların göreceli olarak çok az olduğu bacaklı otonom mobil robotlar ve robot görme üzerine gerekli motivasyon ve literatür bilgilerini vereceğiz. Bunun yanında projemizi uzun vadeli bilimsel çalışmalarımız içinde konumlandıracağız. Bunu takiben, iş paketlerimiz ile paralellik içerisinde 2. Bölümde, proje bünyesinde hareket bulanıklığının giderilmesine yönelik ana bir yaklaşım olan robot kafa tasarımını ve bu kafa mekanizmasının kuramsal analizi ve kontrolü ile ilgili çalışmalardan (II no’lu iş paketi) bahsedeceğiz. 3. Bölümde ise robot platformumuz üzerinde harekete bağlı görsel algı bozulmalarını ve bu bozulmaların görsel özniteliklere olan etkilerini ele alarak bu bozulmaları gidermek için önerdiğimiz algoritmik ve donanım destekli algoritmik yaklaşımları sunacağız (I no’lu iş paketi). 4. Bölümde donanım destekli optik akış için geliştirdiğimiz FPGA donanımını ve karakterizasyonunu (VI no’lu iş paketi), 5. Bölümde ise akustik algı ile yüzey tanıma problemine getirdiğimiz çözümü (IV no’lu iş paketi) ele alacağız. 6. Bölümde ise bacaklı robotlar için istatistiksel hareket modelleri geliştirilmesi alanındaki çalışmalarımızı sunarak bu modellerin robot konumlandırma ve haritalama alanında performans katkılarını (III ve V no’lu iş paketleri) ele alacağız. 7. Ve 8. Bölümlerde projemizdeki robot görme kütüphanesi entegrasyonu ve ardından projemiz ile ilgili diğer çalışmaları aktardıktan sonra son olarak 9. Bölümde proje çıktılarımızı ve sonuçlarımızı net bir şekilde ortaya koyacağız.

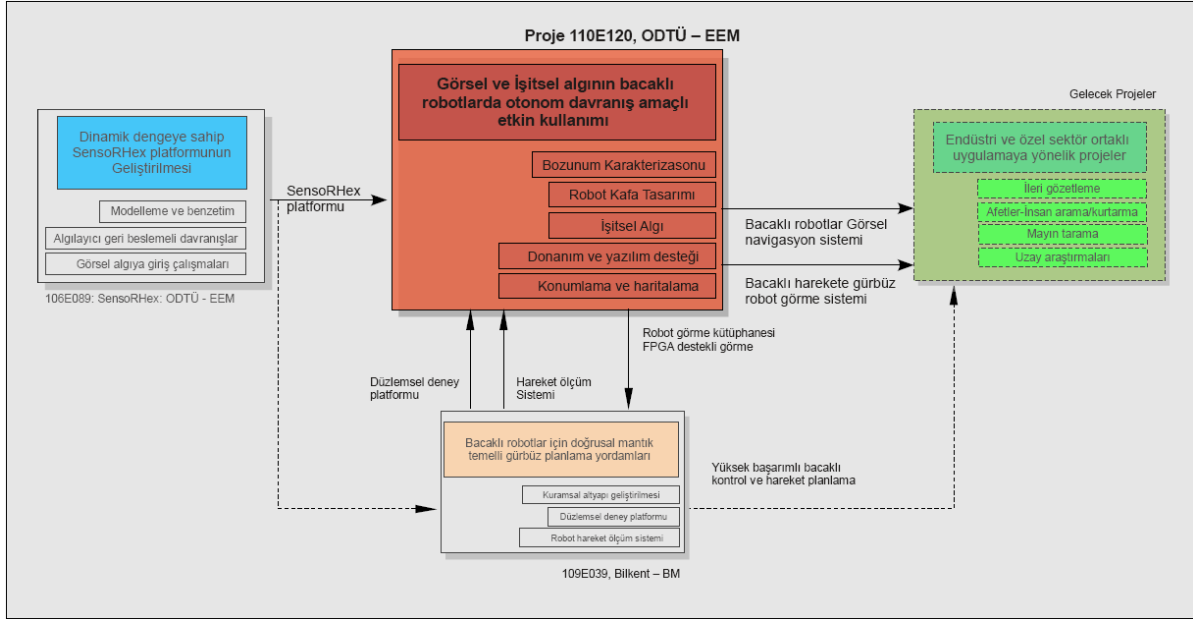
Bu bölümlerde verilen bilgilere ek olarak, yapmış olduğumuz çalışmaların bazıları ile ilgili ile yapılmış yayınları da bu raporun eklerinde bulabilirsiniz. Daha önceki raporların ekinde verilmiş olan teknik raporlar bu raporun ekinde sunulmamıştır.

1 Motivasyon ve Genel Bilgiler

1.1 Projenin Temel Motivasyonu ve Diğer Çalışmalar İle İlişkisi ve Temel Katkıları

Projemiz, daha önce başarı ile tamamladığımız ve deneysel platformumuzun iki eş kopyasının ortaya çıkmasını sağlayan 106E089 no’lu Tübitak – EEEAG 1001 projesinin çıktıları üzerine kurgulanmıştır. Temel motivasyonumuz, mobil robotlar üzerinde görsel algının önemi ve bu algıyı hızla hareket eden bacaklı robotlar üzerinde zorlaştıran, kimi zaman imkansız kılan problemler ile mücadele etmek olmuştur. Projemizin temel hedeflerini, önceki ve beraberindeki diğer projeler ile gelecekteki çalışmalar ile olan ilişkisini tanımlayan bir şema, Şekil 1’de gösterilmiştir. Projemiz, öncesinde ortaya çıkarılan deneysel platform ve bu proje kapsamında geliştirilen donanımlar ile yapılan deneysel çalışmaları ağırlıklı olarak içermektedir. Projemiz çıktıları, uygulamaya yönelik robot sistemlerinin ortaya çıkabilmesi için önemli katkılarda bulunmuştur ve bu katkılar, gelecekte yapılacak bazı bilimsel çalışmaların da önünü açacaktır. Raporumuzun ileriki bölümlerinde bu katkıları detaylandıracağız.

Projemizi motive eden bu zorluklar, çözülmesi gereken pekçok akademik ve bilimsel problem olarak ortaya çıkmış ve bilimsel literatürde açık kalmış, katkı yapılabilecek alanlar tanımlamıştır. Projemiz bu yönüyle 106E089 no'lu projemizden farklı bir çizgi izlemiştir. *Bilimsel katkılar yoğun olmuş ve oldukça hızlı gelmiştir.* Proje sonunda daha çok mühendislik çıktılarının ortaya çıktığı ve bilimsel çıktıların proje süresi içinde tamamlanması için yeterli zaman bulamadığımız önceki projemizin aksine, 110E120 no'lu bu projemizde yaptığımız çalışmalar, daha teklif aşamasında başlamış, proje sürecinde hızla ilerletilmiş, pekçok noktada uluslararası bilimsel makaleler halinde çıktı vermiştir.



Şekil 1: 110E120 no'lu projemizin daha önce tamamlanan 106E089 no'lu proje ve diğer çalışmalar ile gelecekte yapılacak çalışmalar ile ilişkilendirilmesi

Projemizin en öne çıkan katkıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Bacaklı robotlarda görme işlevini tehdit eden en önemli bozulma olan “hareket bulanıklığı” karakterize edilmiş, bu bozunumun görsel öznitelik vektörlerine olan etkileri incelenmiş ve ölçülmüştür.
- 3 serbestlik dereceli (3-DOF) bir robot kafası tasarlanmış ve üretilmiş, bu kafanın bilimsel deneyler için kolaylık sağlayan 1-DOF düzlemsel bir sürümü de ortaya çıkarılmıştır.
- Bu deneysel donanım ile ilgili modelleme ve kontrol çalışmaları yapılmış, platformun kinematik ve dinamik modeli ortaya çıkarılmıştır. Bu modeller desteğinde düzlemsel ve 3-DOF sistemin kontrolü yapılmıştır.
- Robot görme için önemli bir algoritmik bileşen olan “optik akış” için bir FPGA donanımı tasarlanmış ve performansı karakterize edilmiştir.
- Bacaklı robotlarda işitsel algı için önemli bir işlev tanımlanmış, geliştirilen başarılı ses işaret analizi ve örüntü tanıma yaklaşımı ile robotun yüksek başarımla üzerinde yürüdüğü yüzeyi tanıması sağlanmıştır.
- Robotikte rastlantısal yöntemler ve Bayes Süzgeci için temel taşlardan birisi olan “rastlantısal hareket modeli” geliştirilmesi çalışması tek eksenle tamamlanmış ve bu modelin robot durum kestirimine olan katkısı gösterilmiştir.

Heyecanla belirtmek isteriz ki bu katkılarımız uluslararası kabul görmüş ve yayınlanmış 3 uluslararası dergi makalesi ve 8 uluslararası kongre makalesi olarak çıktı vermiştir. Bunun yanında yayınlanmaya kabul edilmiş bir diğer dergi makalesi ile bir kongre makalesi bulunmaktadır. Tam olarak tamamlanmamış bazı çalışmalarımız da yayın aşamasına oldukça yaklaşmıştır.

1.2 Mobil Robotlar, Otonom Davranışlar ve Hareketlilik

Mobil robotlar son yıllarda birçok uygulama alanında kullanım potansiyeline sahip olmaları nedeniyle robotik araştırmacıları tarafından ilgi gören bir alan haline gelmiştir. Özellikle arama kurtarma, mayın temizleme, istihbarat gibi konularda otonom olarak görev yapabilen, veya en azından uzaktan bir operatör tarafından kumanda edilebilen robotların geliştirilmesi için birçok şirket ve araştırma grubu yoğun çaba göstermişlerdir (Murphy, 2004). Örneğin, bu konuda kısıtlı da olsa başarılı olmuş ürünlerden biri olan Packbot (Yamuchi, 2004), Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: I-Robot firması tarafından geliştirilen Pack-Bot ve robotun boyutları ile personel tarafından arazi kullanımını gösterir canlandırma.

Günümüzde bu tür robotların yaygın olarak kullanımını engelleyen en önemli unsurlardan bir tanesi, olgunluğa erişmiş olan paletli ve tekerlekli yapıdaki robot platformlarının karmaşık ortamlardaki hareketliliklerinin çok kısıtlı olmalarıdır. Bu tür robotlar karmaşık ve doğal bir zeminde geçemedikleri engeller ile karşılaştıkları zaman veya bir engele takıldıkları zaman, insan müdahalesine ihtiyaç duymaktadırlar ki, bu da otonom ve kendine yeterli davranış amaçları ile temelde çelişen bir durum yaratmaktadır (Dawkins, 1996; Labarbera, 1983). Bu sorunlara çözüm olabilecek en uygun çözümlerden bir tanesi, doğada da evrensel olarak kullanımı göze çarpan bacaklı yapıları benimsemek olacaktır.

1.3 Bacaklı Robotlar, Dinamik Denge ve SensoRHex Platformu

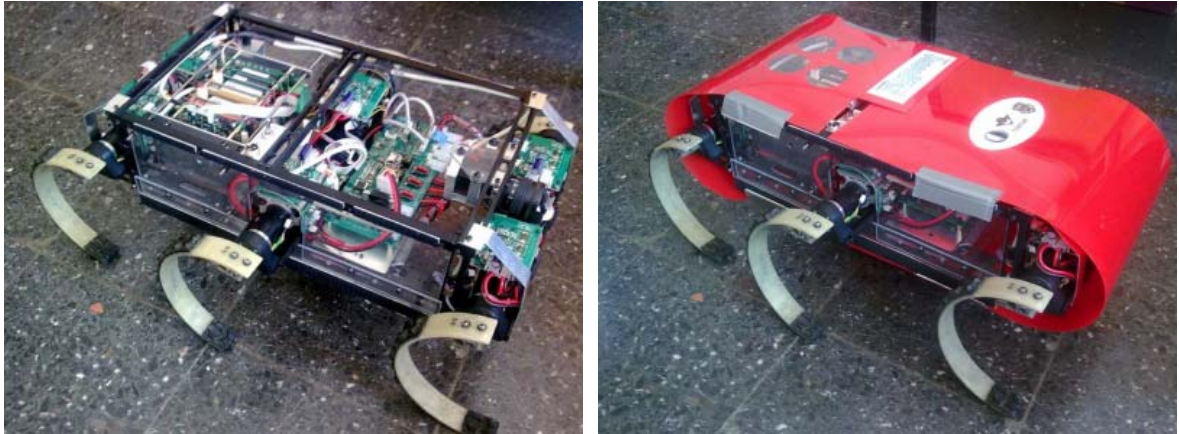
Ne yazık ki, bacaklı robotlar konusundaki araştırmalar nispeten yenidir ve gerek robot tasarımları, gerekse bu platformlar üzerinde kullanılacak algılayıcıları verilerinin başarılı biçimde işlenmesi için henüz katedilmesi gereken çok fazla mesafe vardır. Dünyada bile nispeten yeni olan bu konuların Türkiye'deki yansımaları daha da az sayıdadır ki, otonom mobil robotların geleceğini oluşturan bacaklı robot platformları konusunda edinilecek tecrübe ve bilgi birikiminin gelecekte getireceği faydalar azımsanamaz. Daha önceki yıllara tamamladığımız 106E089 no'lu projemizin önemli çıktılarından bir tanesinin yüksek başarılı bacaklı bir platform tasarımı olarak SensoRHex robotu olması bu sebeptir. SensoRHex robotu, araştırma ortağımız ve 106E089 no'lu projemizin araştırmacılarından

Doç.Dr. Uluç Saranlı'nın Doktora çalışmaları kapsamında geliştirilen RHex robot morfolojisine ve mimarisine dayanmaktadır.

RHex robotu, 1998 yılında ABD'deki Michigan Üniversitesinde, DARPA desteği ile başlamış ve 5 yıl sürmüş olan bir araştırma projesinin sonucunda tasarlanmış olan altı bacaklı otonom bir robot platformudur (Saranlı, 2001). Şu ana kadar bacaklı robotlar arasında otonom olarak en yüksek hıza ulaşabilmiş olan bir platform olarak, hala karmaşık yüzeylerde gösterdiği davranış performansı açısından üstünlüğünü korumaktadır (Altendorfer, 2001; McMordie, 2002; Moore, 2002; Neville, 2005; Skaff, 2003). Orjinal robotun elektromekanik tasarımının eskiliği ve bu konudaki araştırma desteğinin ABD'de devam edememiş olması dolayısı ile oluşan fırsatı değerlendiren gurubumuz 106E089 no'lu Tübitak projesi kapsamında ve konudaki araştırmalara bir başlangıç noktası oluşturacak şekilde yenilenmiş bir tasarım ile SensoRHex robotunu geliştirerek bir araştırma platformu olarak kullanmaya başlamıştır.



Şekil 3: ABD'de RHex robot tasarımının son hali (Saranli et al., 2001).



Şekil 4: 106E089 no'lu Tübitak projemiz kapsamında geliştirilen SensoRhex platformu. (a) Esnek kaplaması çıkarılmış ve (b) giydirilmiş durumda.

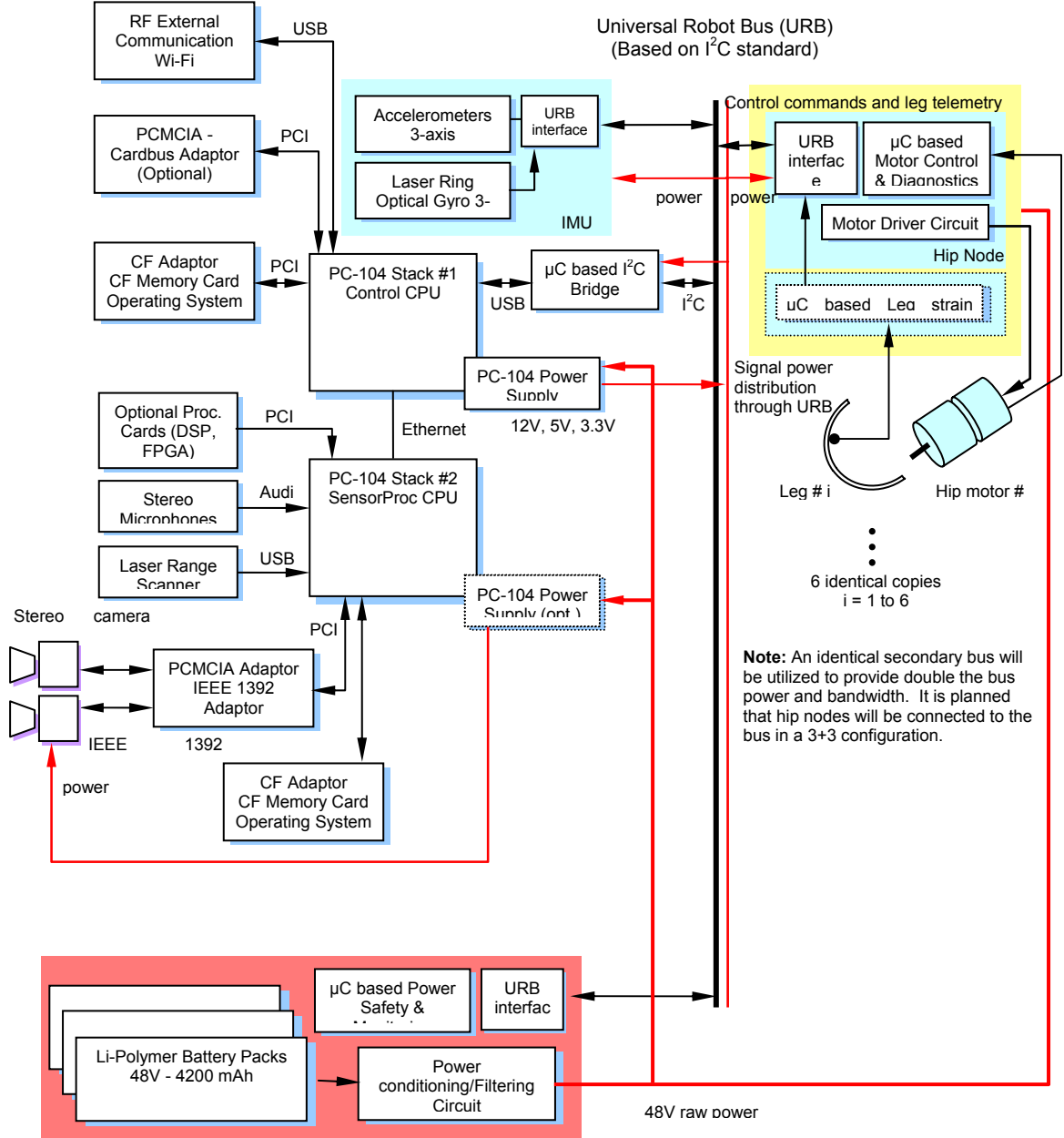
Şekil 3'de, eski RHex tasarımının son noktasından bir görüntü verilmektedir. Eski RHex tasarımı, kısıtlı bir algılayıcı yelpazesini destekleyecek şekilde merkezi bir işlemci ve iletişim altyapısına sahip olduğundan, dinamik davranışlar ve daha karmaşık algı algoritmalarını destekleyecek kapasitede bir robot platformu değildi. Nispeten yavaş, 366MHz hızında tek bir işlemciye bağlı, düşük güçte motor ve kontrol üniteleri, hem işlemci gücünün, hem de robotun ağırlığı göz önüne alındığında destekleyebileceği algılayıcı sayısını ciddi bir şekilde kısıtlamaktaydı. Bunun sonucu olarak lazer mesafe algılayıcıları, ataletsel güdüm algılayıcıları, değişik özelliklere sahip kamera üniteleri, aktif olarak stabilize edilen bir kafa ünitesi veya olası ek bir gövde eklemine destekleyecek kadar genişletilebilir bir tasarım değildi. Bu kısıtlamalara rağmen göstermiş olduğu performans temel mekanik tasarımın

korunması ve bacaklı robotlar konusundaki araştırmalarımız için kullanılması konusunda ikna edici olmuştur. Ancak bu temel prensipler korunurken robotun i tasarımı ve özelliklerinde önemli değişiklikler olmuştur. Araştırma platformumuzun ortaya çıkan elektromekanik altyapı tasarımı Şekil 5'de görülebilir. Bu tasarımda projemiz kapsamında bazı yenileme ve iyileştirmeler de yapılmış olmakla birlikte bunlar mevcut projemizin bilimsel yönü açısından çok önemli değişiklikler değildir. Temel mimariyi oluşturan beş önemli öğe bulunmaktadır:

1. İki adet 500MHz AMD Geode tabanlı, Intel x86 uyumlu işlemci ünitesi ve bunlara bağlı olan kablosuz iletişim, sabit depolama, güç çevirici ve Firewire arayüz kartları
2. Evrensel Robot Ağı (Universal Robot Bus, URB) adını verdiğimiz ve tamamen tarafımızdan geliştirilmiş modüler ve gerçek zamanlı bir iletişim ağının kullanımı için gereken köprü devreleri ve bağlantı üniteleri
3. Yüksek performanslı, geri beslemeli motor kontrolünü yerel olarak gerçekleştirebilecek olan ve ana işlemci ünitesi ile URB mimarisi aracılığı ile bağlantı kuracak olan ve tamamen tarafımızdan geliştirilmiş motor kontrol devreleri.
4. Yine gurubumuz tarafından geliştirilen, Lithium-Polymer pil ünitelerinin güvenliğini sağlayarak, aynı zamanda dışarıdan bir güç bağlantısına da izin veren, ayrıca robotun toplam voltaj ve akım kullanım değerlerini URB aracılığı ile ana işlemciye bildirebilen bir güç dağıtım devre ünitesi.
5. Tüm robot bileşenlerini güvenli bir Şekilde birarada tutacak, aynı zamanda da robotun pasif dinamik özelliklerini istenen ve en hafif Şekilde elde edebilecek olan bir mekanik tasarım. Bu tasarım bir ölçüde daha önceki RHex tasarımlarına benzemekle birlikte, önemli birçok değişikliği de bünyesinde barındırmaktadır.

Bacaklı robotların üstün başarım özellikleri ve arazide yüksek performans potansiyelleri, SensorHex robotumuzu Türkiye imkanları ile ortaya çıkardığımız süre içerisinde, uluslararası ve özellikle de ABD'deki çalışmaların ilerleyişi ile bağımsız olarak ispat şansı bulmuştur. Bu çalışmaların en önde gelenleri bu alanda önder bir konumda olan ABD'li Boston Dynamics firması tarafından gerçekleştirilmektedir. 40'ın üzerinde Doktora sahibi araştırmacı ile bu konuda adeta bir "Üniversite" gücüne sahip firmanın önemli olumsuz bir özelliği ise çalışmalarını bilimsel camiia ile paylaşmaktan kaçınıyor olmasıdır. Bu aynı zamanda bağımsız ve açık araştırma için bir fırsat yaratmaktadır. Bahsedilen firma, RHex projesinin içerisinde de yer almış ancak son yıllarda ABD ordusunun destekleri ile özellikle dört pacaklı "quaruped" ve iki bacaklı "biped" yapılarına yönelmiştir.

Boston Dynamics firmasının artan giderek ticari başarısı ve savunma sanayii alanında aldığı büyük projeler, bacaklı robotların performans potansiyelinin giderek yaygın kabul gördüğünü ve araştırma aşamasından ürünlere dönüşmeye başladığını göstermektedir. Bu gelişmeler, projemiz ve sonuçları açısından önemli ve heyecan vericidir. Robotik alanında kamera kullanımı ile görsel algı ile ses işaretlerinin işlenmesi yoluyla işitsel algı, son derece önemli ve çalışılan konular olmasına rağmen yüksek hareket kabiliyetli bu tür robotlar üzerinde görsel algıyı zora sokan etkenler ve bunları giderme yöntemleri açık bir konu olmaya devam etmektedir. Bacaklı robotlarda işitsel algı da neredeyse hiç çalışılmamış bir konudur. Bir sonraki bölümde, mobil robotikte bu konuların literatürdeki durumu ele alınacaktır.



Şekil 5: 106E089 no'lu geçmiş projemiz kapsamında ortaya çıktığı biçimiyle SensoRHex sistem tasarımı



Şekil 6: Boston Dynamics firmasının ABD ordusu için geliştirdiği (a) BigDog, (b) LS3 ve (c) henüz laboratuvar ortamında üzerinde çalışılan Cheetah robotları (Boston Dynamics Inc., 2013)

1.4 Mobil Robotlarda ve Bacaklı Kıvrak Robotlarda Görsel ve İşitsel Algı

Bacaklı robotlarda algı konusu, robotiğin diğer alanlarına göre daha erken bir evrededir. Algıyı birkaç şekilde kategorize edebiliriz. Durum kestirimi veya öz durum algılama olarak ele aldığımız konu, temelde robotun algılayıcılar yardımı ile kendi durumunu (state) kestirmesi olarak açıklanabilir (Thrun vd., 2005). Bu alanın önemi, durum kestiriminin kontrol ve kumanda için vazgeçilmez olmasından gelmektedir. Bunun tamamlayıcısı niteliğindeki diğer konu ise çevre algılamadır. Burada ise robotun çevresindeki unsurları, özellikle de hareketine etki eden (merdiven, ağaç, engel gibi), yön bulmasını sağlayan (doğal veya insan ürünü işaret taşları, bina gibi) veya görev amaçları açısından önem gösteren unsurları tespit etmesi, sınıflaması anlaşılmaktadır. Bu alanın önemi açıktır ve robotun çevresi ile ilişkisinin tümünü tanımlamaktadır. Mobil robotların ve genel olarak mobil sistemlerin öz durum ve çevre algılaması amacıyla kullanabildikleri belli başlı algılayıcılar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları (örneğin Radar) büyük boyut, yüksek güç ihtiyacı ve yüksek fiyatlar sebebiyle küçük ve orta ölçekte mobil robotlarda kullanılamamaktadır. Yaygın kullanım alanı bulan algılayıcılar ise değişik mesafe algılayıcıları, mesafe profili çıkartabilen düzlemsel lazer tarayıcılar ve kameralardır.

Görsel algının canlıların otonom yaşantısındaki önemi, otonom mobil sistemlerde kameranın kullanımını önemli bir araştırma alanı haline getirmektedir. Robotik görsel algı, kamera algılayıcısından alınan verilerin işlenmesi yoluyla robotun öz durumunu ve çevresi ile ilgili bilgileri çıkartabilmesi anlamına gelecektir. Bunun yapılabilmesi birden fazla disiplinin bir araya gelmesi ile mümkün olmaktadır: Bunlar arasında görüntü işleme, izdüşümsel geometri (projective geometry), dönüşümsel teknikler (transform domain techniques) ve örüntü tanıma alanları sayılabilir. Robot görme alanı oldukça gelişmiş olmasına ve pek çok önemli metodun varlığına rağmen, yüksek hareket kabiliyetine sahip hızlı hareketli sistemlerde, özellikle de ani sarsıntılara maruz kalan bacaklı robotlarda görsel algı konusunda önemli zorluklar ve çözülmemiş problemler bulunmaktadır. Bunlar arasında, hareket bulanıklığı (motion blur) olarak adlandırılan veri bozulmaları, kameranın ölçme ve çıkarım amaçlı kullanımı amacıyla görsel öz niteliklerin elde edilmesinde önemli performans kaybına sebep olmaktadır. Bu alanda literatürde bulunan açıklar, projemizin önemli motivasyonlarını oluşturmuş ve katkılarına hedef teşkil etmiştir ve aşağıda özetlenecektir. Projemiz kapsamında bu amaçla görsel veri alım sürecini iyileştirmek ve kamera verilerini robot görme algoritmalarında başarılı şekilde kullanabilmek için farklı yöntemler geliştirilmektedir.

Geliştirdiğimiz deneysel platform SensoRHex'in daha önceki sürümleri üzerinde yurt dışında yapılan çalışmalar zengin bir literatür oluşturmaktadır. Ancak bu çalışmaların çok sınırlı bir kısmı kamera kullanımı ve görme üzerinedir (Skaff, 2003). Dinamik dengeye sahip bacaklı robotların diğer yaklaşımlara göre kıyaslamalı olarak oldukça yeni olması, görme probleminde ortaya çıkan zorlukların daha önce literatürde dikkatle ele alınmaması sonucunu doğurmuştur.

Doğrudan bu uygulama problemi üzerindeki literatürün azlığına rağmen, çalışma konumuz, disiplinler arası yapısı dolayısı ile birbiri ile yakın ilişkili ama kendi içlerinde zengin bir literatürün bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Bunlardan ilki, farklı uygulama alanlarında görüntülerde hareket ile oluşan bozulmaların kuramsal-yordamsal yöntemler ile düzeltilmesidir.

Bu alandaki çalışmalar kendi içlerinde temel bir ayrım göstermektedir. Video dengeleme (Video stabilization) alanında yapılan çalışmalar(Matsushita 2005, Morimoto 1996) video görüntü dizisini oluşturan karelerin içerdiği bilginin düzeltilmesinden çok karenin içerisindeki nesnelerin kamera hareketinden bağımsız konumlanmasını, dolayısı ile kamera hareketi altında video karesinin sabitmiş gibi görünmesini sağlamaya yöneliktir. Genelde tüketici ürünlerine yönelik bu iyileştirme, her karedeki verinin keskinliğini sağlamak ile dolaylı olarak ilgilenmektedir ve dolayısı ile çalışmamız için katkı yapacak yordamları büyük ölçüde içermemekte veya bunlar üzerine odaklanmamaktadır.

Doğrudan ilgili bir literatür gurubunu ise, tek veya çoklu görüntüler kullanılarak her görüntüdeki verinin keskinliğini, yani yüksek frekanslı veri içeriğini arttırma ve dolayısı ile hareketin yarattığı alt geçirgen filtre etkisini tersine çevirmeye yönelik çalışmalar oluşturmaktadır. Bunların önemli bir kısmı kendilerini tek bir görüntü karesine sınırlayarak yapılabilecek en iyi iyileştirmeye odaklanmaktadır. Oldukça eski bir tarihçesi olan ve çok geniş bir yelpazede araştırmacıların katkıda bulunduğu bu alan Kör ters-süzgeçleme (Blind Deconvolution) olarak anılmakta ve çok iyi bilinen Richardson-Lucy [Richardson, 1972; Lucy 1974] ve Wiener süzgeçleme (Wiener, 1964) yöntemlerinin yanısıra Kundur ve Hatzinakos (1996) tarafından yapılan erken çalışmalar ile de başlamaktadır. Yakın tarihli kapsamlı bir literatür özeti Gonzalez ve Woods (2001) ile Hansen'in (2006) çalışmalarında bulunabilir. Bu çalışmalardaki ortak özellik, verilen tek kare görüntü verisinin hem bozuluma yol açan bulanıklaştırma süzgecinin kestiriminde, hem de resmin bu süzgecin tersi ile onarımında kullanılmasıdır. Bu guruptaki çalışmaların ortak bir problemi, tek karedeki verilerin tam bir geri dönüşüm için yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple onarılmış görüntünün yansıma (ringing) ve benzeri yan etkiler göstermesi söz konusu olmaktadır. Bu yan etkilerin bazı ek kısıtlar altında optimizasyon yöntemleri ile giderilmesi yolunda yakın tarihleri de içeren pek çok çalışma bulunmasına rağmen bunların çoğu ardışık video kareleri ile ilgilenmediklerinden ve tek kare üzerinde çalıştıklarından proje konumuzun yapısına uygun çözümler içermemektedir (Shan vd., 2008; Agrawal ve Raskar, 2007; Jia 2007; Fergus vd., 2006).

Dinamik hareket içeren robotik problemimizde, bozuluma yol açan hareketin kestirimi için yardımcı ölçüm unsurlarının kullanılmasını öngörüyoruz. Bunlar arasında ardışık hızlı alınmış video karelerinden elde edilebilecek Görsel (Optik) Akış (Lucas ve Kanade, 1981) gibi bilgiler yanında platformun sahip olduğu ataletsel ölçüm algılayıcılarının doğrudan ölçebildiği hareket verileri olacaktır. Projemize yakınlık gösteren yaklaşımlar arasında hızlı ve düşük çözünürlüklü bir kamera ile Görsel akış hesabı yoluyla hareketi ve bozucu süzgeci kestiren, daha sonra bu süzgecin tersi ile daha yüksek çözünürlüklü bir görüntü iyileştirme hedefleyen etkili bir çalışma dizisi sayılabilir (Ben-Ezra ve Nayar, 2003; 2004). Bu çalışmalar kamera'nın hareketini kestirmek amacıyla önemli bir katkı yapmasına rağmen görüntü ters-süzgeçlemenin temel problemi olan veri kaybını ele almamaktadır. Bu problemi

ele alan ve bizim için çok önemli gözükten yakın tarihli bir çalışma ise Agrawal ve Raskar (2009) tarafından yapılmıştır ve daha önceki bazı öncül çalışmalara dayanmaktadır [Schultz ve Stevenson, 1996; Basclé vd., 1996; Levin vd., 2008]. Bu çalışmaların en önemli özelliği, video'nun ardışık karelerinin pozlama zamanları ile oynayarak toplanan verilerden bulanıklaştırıcı süzgecin sıfır noktalarını yok eden ve dolayısı ile tam çözülebilir bir ters süzgeçleme problemi tanımlayabilen bir yaklaşım önermeleridir. Bu çalışmalardaki önemli eksik ise sabit kamera ile çalışılması ve hareketin kestiriminin sadece görüntü üzerinden yapılmasıdır. Proje çalışmalarımız kapsamında tam olarak bu çalışmalar ekseninde ilerlememiş olsak da, bu çalışmaların hareketli bir kamera durumuna genişletilmesi ve harici hareket algılayıcılarından gelen hareket kestirimi ile iyileştirilmesi bizim için uzun vadeli araştırma hedefleri arasında yer almaya devam etmektedir. Proje çalışmalarımız kapsamında kamera pozlama zamanının değiştirilmesi yerine sürekli değişen kamera hareketi altında ardışık video görüntü karelerinin alınma zamanlarının dinamik olarak ayarlanması yoluyla özgün bir yöntem önermemiz mümkün oldu.

Yukarıda değindiğimiz görüntü işleme ve süzgeçleme tabanlı yöntemlere ek olarak, proje kapsamında ele aldığımız ikinci konu olan robot kafa tasarımı ve kontrolü, bacaklı robotlar alanında henüz neredeyse hiç ele alınmamış olmasına rağmen havada ve arazide hareket eden çok daha büyük platformlar için uzun süredir çalışılan bir konudur. Kameranın üzerinde bulunduğu platformun stabilizasyonu [Algrain, 1994; Shtessel, 1995] elde edilecek görsel verilerin kalitesini artırmada önemli rol oynayacağına inanıyoruz. Bu konu ile ilgili örnekler atış kontrol sistemleri ile ilgili askeri alanlardan başlayarak doğadaki canlıların kafa stabilizasyonu hakkındaki araştırmalara kadar uzanmaktadır. Oldukça geniş bir alanı kapsayan bu problem için önemli bazı örnekler verilebilir.

Askeri uygulamalarda hareketli platformlardan atış yapan sistemlerde taretlerin hedefe göre sabit kalması problemi (turret stabilization) hedefi vurma kabiliyeti açısından önem göstermiştir ve konumuzla yakından ilgilidir [Kumar vd., 2009; McCall, 2001]. Yine askeri sistemlerdeki görüş, arayıcı, hedef işaretleyici gibi sistemlerin hedef yönüne bakışının stabilizasyonu (line of sight stabilization) da literatürde ele alınmış yakın ilgili bir problemdir [Kennedy and Kennedy, 2003; Lee vd., 1996; 1998]. Bu yaklaşımların projemizde ele alınan çalışmadan en önemli farkları, platformun (veya kamera'nın) bakış açısının tek bir noktaya sabitlenmeye çalışılmasıdır. Bu projemiz kapsamında izlenecek yaklaşımda ise bakış noktası üzerine yumuşak kısıtlar konulmakta, ancak görsel verilerin bozulumunda en önemli rolü oynayan bakış açısının açılma hızının sıfırda tutulmaya çalışılmaktadır.

Bu konu ile ilgili spektrumun diğer tarafında ise koşan ve yürüyen hareketli canlılarda kafa stabilizasyonu [Pozzo vd., 1990; Whitcome, 2008; Guitton vd., 1986] ve kafa-göz koordinasyonu [Hirasaki ve Kumakura, 2004; Solomon ve Cohen 1992] ile ilgili modeller ve deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar biyolojik sistemler için yapıldıklarından doğrudan mühendislik yöntemleri önermemekte, ancak çalışmamızda ortaya koyduğumuz yaklaşımlar ve ilerideki çalışmalarımız açısından ilham kaynağı oluşturmaktadırlar.

Yine proje kapsamında ele alınmış önemli bir unsuru oluşturan hareketli robotlarda akustik algı konusu, literatürde henüz oldukça yenidir ve bu alanda önemli bir katkı yaptığımız inancındayız. Projemiz ile ilk adımlarını attığımız ve bacaklı robotlar alanındaki doldurmayı umduğumuz önemli boşluğa rağmen yine de akustik işaretlerin çevre ile etkileşim ile aktif olarak yaratılması ve bu sinyallerden çevre, süreç veya parametrelerin tanınması konusundaki kullanımının örnekleri literatürde bulunmaktadır. Mekanik sistemler ile ilgili akustik analizin temel kuramsal alt yapısı Newland'ın kitabında (Newland, 1996) bulunabilir. Bunun yanında İşaret İşleme alanından temel referansların yanında (Oppenheim ve Schafer, 2009) oldukça ileri tekniklerin geliştirilmiş olduğu insan ses akustiği ve genel ses analizi alanındaki kuramsal tekniklerin toplandığı çalışmaların (Rabiner ve Schafer, 1978;

McLoughlin, 2009) dikkate alınması gereklidir. Ele aldığımız örnek problem gurubunu oluşturan akustik yüzey tanınması açısından gerekli örüntü tanıma alanındaki kuramsal teknikler ise bu alanın öncülerinden Duda ve Hart tarafından kitaplarında (Duda ve Hart, 2000) kapsamlı biçimde ele alınmıştır.

Bu önemli temel referansların ötesinde akustik algı ve tanıma alanında yapılan öncü çalışmalar ağırlıklı olarak insan akustik algısının çevre'deki sesleri işleyişini ve tanınmasını anlamak amacıyla şekillenmiştir (Gaver, 1988; Li vd., 1991). Bu yaklaşıma sahip çalışmalar gelişerek ilerlemeye devam etmiştir (Klatzky vd., 2000; Giordano ve McAdams, 2006; 2008; Lutfi ve Stoelinga, 2010). Yine de darbe akustiği verilerini kullanarak çevre'nin otomatik olarak algılanması ve sınıflanması konusu 1993 yılında Durst ve Krotkov tarafından yapılan öncü çalışmalara ait bir teknik rapor ile başlamaktadır (Durst ve Krotov, 1993; 1995). Yürüme işleminin yarattığı akustik sinyallerin insan ve bilgisayar tarafından tanıma amaçlı kullanımı, konumuzla yakından ilgili olmasına rağmen sadece insanların ürettiği akustik sinyaller ile yapılan çalışmalar ile sınırlı kalmış (Li vd, 1991; Ekimov ve Sabatier, 2006; Giordano ve McAdams, 2006), dinamik bacaklı robotlar alanındaki çalışmaların yeniliğinden dolayı robotik alanında bir çalışmaya yol açmamıştır.

Darbe akustiğinin robotik alanında kullanımı ise 1995 yılında ilk defa yine Krotkov tarafından ele alınmıştır (Krotov, 1995). Bu çalışma ve sonrasında projemiz açısından bu alanda ilginç ve önemli çalışmalar yer almıştır. Örneğin Krotkov'un çalışmasında kontrollü robotik bir düzenek kullanılarak nesnelere aktif olarak sesli etkileşime girilmiş ve akustiğin yanında güç ve kamera bilgilerinin de tanıma amaçlı etkileri ele alınmıştır. Bunu takiben Krotkov; Klatzky ve Zumel ile işbirliği yapmış ve çalışmalarını akustik tanıma alanına odaklayarak nesnelere şekillerinden bağımsız akustik özelliklerini modelleyecek unsurlar üzerine çaba göstermiştir (Krotov vd., 1996). Bu alanda geniş bir zaman aralığını takiben Richmond Y.Lisans tezinde temelde gerçekçi darbe sesleri üretmek ve bunları yapay gerçeklik uygulamalarında kullanmak üzere akustik darbe ses sentezi konusunu ele almış, bu kapsamda modelleme probleminde de kısmen değinmiştir (Richmond, 2000). Araştırmacı, kullandıkları robotik kontrollü test düzeneğini de ön plana çıkartarak bu çalışmasını aynı yıl bir konferans makalesi olarak yayınlamıştır (Richmond ve Pai, 2000). Bunu takiben 2005 yılında Torres-Jara ve çalışma arkadaşları bir humanoid robot kullanarak, yeri ve varlığı bilinmeyen nesnelere robotun parmağı ile dokunarak çıkardıkları seslerden nesnenin tanınması konusunu ele almışlardır (Torres-Jara vd., 2005). Bu çalışmada kuvvet algılayıcı verileri ile akustik sinyaller arasındaki ilişki de incelenmekte ve bu bilgi akustik verilerin kesileceği noktaların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Son olarak 2008 ve 2009 yıllarında Iowa State Üniversitesi'nden bir ekip ardışık iki konferans makalesinde bir robot kol kullanarak darbe sesleri üretmiş ve bunları kesikli Fourier dönüşümü ve zaman-frekans örüntülerinin işlenmesi ile oluşturulan çok boyutlu öznelik vektörleri yardımı ile tanıma ve sınıflama işlemine tabii tutmuştur (Sinapov vd., 2008; 2009).

Robotik alanında yapılan tüm bu ilgili çalışmaların projemiz kapsamında önerdiğimiz problemden en önemli farklarından ilki hareketli bacaklı bir robot ile bağlantılı olmamaları, ikincisi ise hareketli bir platforma ait başa çıkılması gereken gürültü unsurlarının hiçbirini dikkate almamış olmalarıdır. Uyguladığımız yöntemleri anlatacağımız kısımda da değindiğimiz üzere SensorHex robotunda akustik sinyallerin işlenmesinde motor gürültülerinin ve değişken darbe noktalarının varlığında otomatik olarak çalışan bir yöntem geliştirilmesi gerekmiş ve bunda başarılı olunmuştur.

Ele aldığımız gerçekçi bir uygulama alanı olan eş zamanlı konumlandırma ve haritalama problemi'nin kuramsal temelleri ve farksal-sürüm (differential drive) kullanan çift tekerlekli robotlar için uygulamaları Thrun tarafından detaylı biçimde ele alınmaktadır (Thrun, 2005). Bu problemin çözümünün önemli bir unsuru, istatistiksel hareket modelleri ve bu modellerin

bacaklı deneysel platformumuz için geliştirilmesidir. İstatistiksel ve rastlantısal robotik çalışmaları son yıllarda büyük başarımlara imza atmışlar ve rastlantısallığın göz ardı edilemediği, robot ile donanımı ve çevresel faktörleri arasında karmaşık bir etkileşimin yaşandığı gerçek ortamlarda alternatif yaklaşımlara göre üstün performans gösterdiklerini ispat etmişlerdir (Thrun 2005). Bu başarılar özellikle tekerlekli robotlar alanında hissedilmiş, iç mekan tekerlekli robotlar ile yapılan uzun süreli başarılı çalışmaları takiben, bir milyon dolar ödüllü DARPA Grand Challenge'ın Stanford Üniversitesi'nden Thrun ve ekibi tarafından kazanılması ile geniş yankı uyandırmıştır (Thrun vd., 2006). Bu başarıyı takip eden yıllarda rastlantısal yaklaşımların robotikteki yeri artan bir önemde devam etmektedir. Tekerlekli robotların şehir içi trafiğinde araba kullanabilmesine yönelik DARPA Urban Challenge ile birlikte tekerlekli robotlar alanında bu çalışmalar yoğun olarak devam etmiştir (Thrun, 2007; Montemerlo vd., 2008). Büyük ölçekli Tekerlekli robotlar alanındaki bu katkıların topluma faydası büyük ve yaygın etkileri kayda değerdir.

Bunun yanında bacaklı robotlar alanında rastlantısal yöntemleri kullanılması konusunda çalışmalar çok daha sınırlı kalmıştır (Go vd., 2006; Gabman vd., 2005). Bu yaklaşımların kullanılabilmesi için özellikle gereken unsurlardan birisi robotun istatistiksel hareket modelinin çıkartılabilmesidir. Düz zeminde tekerlekli robotlarda yaygın biçimde kullanılan bu modellerin sürtünme etkileri altında arazi robotları ve bacaklı robotlar için çıkartılması ise oldukça yeni ve açıklara sahip bir konudur (Thrun 2005; Ozgelen vd., 2007; Vasquez vd., 2009).

Eş zamanlı konumlandırma ve haritalama problemi'nin görsel verilere dayalı olarak çözülmesi alanında yapılan çalışmalar ise oldukça yenidir. Görsel verilere dayalı olarak EKH uygulamaları'nın Se, Lowe ve Little tarafından ölçekten bağımsız görsel öznitelikler (SIFT) alanındaki çalışmalarla birlikte başlatıldığını görüyoruz (Se vd., 2002). Bunu takip eden yıllarda mono kamera kullanımının yarattığı sorunlara odaklanan bazı çalışmalar literatürde yer almıştır (Davison, 2003; Civera vd., 2008]. Bir başka çalışma olan (Lemaire, 2007)'de ise hem stereo hem mono kamera kullanımı altında EKH problemi karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır. Ancak bu çalışmalarda platformların özelliklerinden kaynaklanan sorunların ve özellikle bacaklı robotlara özel unsurların tartışılmadığını söyleyebiliriz. Bacaklı robotlar alanında yapılan çalışmalar ise ağırlıklı olarak statik dengeye sahip robotlar üzerine ve özellikle RoboCup'da kullanılan Sony AIBO robotları üzerine sınırlı kalmıştır: Yakın tarihli çalışmalar arasında sadece konumlandırma problemini (Sridharan, 2005) veya global yönlendirme problemini ele alan (Strum ve Visser 2009) çalışmalar sayılabilir. Bu çalışmaların projemizde ele aldığımız yaklaşımdan temel farkı, rastlantısal bir hareket modeli kullanılarak Görsel EKH problemi ile ilgilenilmemiş olmalarıdır. Diğer taraftan bacaklı dinamik hareket altında hibrid durum kestirimi konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmış (Lin vd.,2006; 2006], ancak bu çalışmalar da sadece temas ve ataletsel güdüm algılayıcıları kullanımında gerçekleştirilmiş ve görsel algı konusuna eğilmemiştir.

Yukarıdaki literatür özetinde de görülebileceği üzere dinamik hareket sahip bacaklı robotlar üzerinde hem görsel hem işitsel algı probleminin çözümünde önemli açık noktalar bulunmaktadır. Bunun yanında konuyu çevreleyen literatür oldukça zengin ve uygulanabilecek yaklaşımlar konusunda önemli fikirler bulunmaktadır. Bu ortam, proje konumuzu ve hedeflediğimiz çalışma kapsamını hem akademik anlamda hem de bacaklı robotların geleceği bakımından son derece önemli kılmıştır. Varolan açık noktalar projemiz için önemli fırsatlar yaratmış ve projemiz kapsamında bu araştırma fırsatlarının bir kısmı değerlendirilebilmiştir. Bunu, projemiz kapsamında ortaya çıkardığımız uluslararası kongre bildirileri ve dergi makaleleri yoluyla görebiliyoruz.

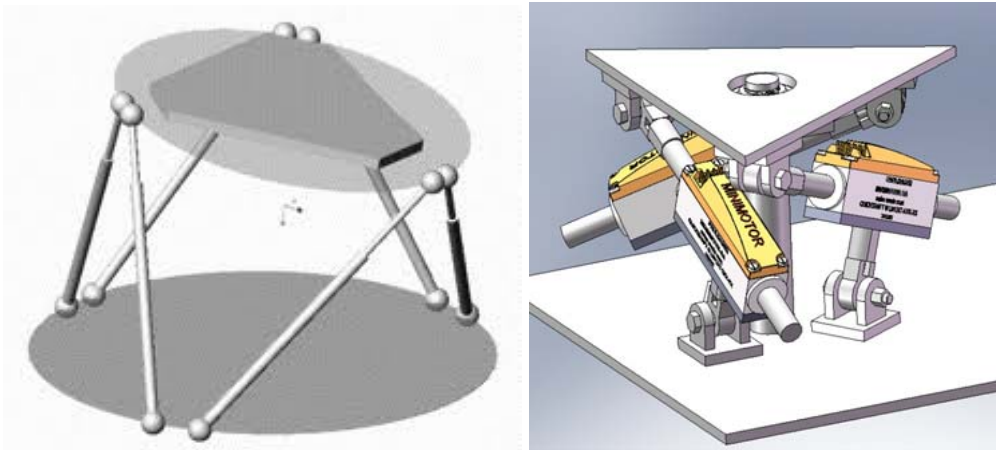
Takip eden bölümlerde, projemizin yukarıda özetlenen kısımları ve bu alanlarda gerçekleştirdiğimiz çalışmalar ile ilgili detaylı bilgileri sunmaya çalışacağız. Proje

raporumuza eklediğimiz yayınlarımız, bu açıklamaları destekleyici ek bilgiler de içerebilecektir.

2 Robot Kafa Tasarımı, Kuramsal Analizi ve Kontrolü

2.1 Kafa Tasarım ve Üretimi

Kamera platformu stabilizasyonu için önerilen mekanizma genel prensip olarak aslen literatürde yaygın olarak rastlanan Stewart platform (Şekil 7-a) olarak bilinen altı serbestlik dereceli (üç doğrusal ve üç açısallık hareket kabiliyeti olan) paralel manipülatörün bir adaptasyonudur. Açısallık hareketin görsel veriler üzerinde ağırlıklı olarak sahip olduğu etki dikkate alınarak doğrusal serbestlik dereceleri bir küresel mafsallık ile sabitlenerek sadece üç açısallık serbestlik derecesine sahip bir hale getirilmiştir. (Şekil 7-b). Bu mekanizma ile canlılarda bulunan kafaya benzer bir tasarım çözümüne ulaşılması hedeflenmektedir. Kamera platformunun açısallık hareketleri için, projemiz devam ettiği sırada piyasaya çıkan üç adet minyatür doğrusal eyleyici tasarım kararlarımızı önemli biçimde etkilemiştir. Yer kısıtları sebebiyle oldukça minyatür olması gereken eyleyiciler için yapılan piyasa araştırmaları sonucunda Faulhaber-Minimotor marka eyleyiciler bu tasarım için en uygun çözüm olarak belirlenmiştir.



Şekil 7: (a) 6-eksen paralel eyleyicili Stewart platformu, (b) Çalışmamız kapsamında önerilen 3-eksenli sadece açısallık harekete sahip kafa konfigürasyonlarından bir tanesi

Tasarlanan mekanizmada kamera platformunu robot gövdesine bağlayan mafsalların ve doğrusal eyleyicileri kamera platformuna ve robot gövdesine bağlayan mafsalların piyasada bulunabilirlik ve kolay uygulanabilirlik açısından değerlendirildiklerinde ilk başta küresel mafsallar olarak seçilmesine karar verilmişti. Doğrusal motor gövdesi ile motor mili arasında da silindirik mafsallık bulunmaktadır. Bu şekilde elde edilecek üç boyutlu uzaysal mekanizma robot gövdesine bağlanacak olan alt plaka, kamera platformu, üçer adet motor gövdesi ve mili de hesaba katıldığında sekiz gövde, üç adet silindirik mafsallık ve yedi adet küresel mafsaldan oluşmaktadır. Bu durumda mekanizmanın serbestlik derecesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$n = 8, f_2 = 3, f_3 = 7, \text{ ve } f_1 = f_4 = f_5 = 0$$
$$f = 6(n - 1) - 5f_1 - 4f_2 - 3f_3 - 2f_4 - f_5 = 9$$

Görüldüğü üzere sistemin toplamda dokuz adet serbestlik derecesi bulunmakla beraber bunlardan faydalı olanları kamera platformunun üç eksendeki açısız hareketi olup, diğeri altı adedi doğrusal motorların ve motor millerinin kamera platformuna ve alt plakaya bağlandıkları küresel mafsallar arasında oluşan eksenler etrafında dönüştürme serbestlikleridir. Bu gereksiz serbestlik dereceleri motorların kendi ağırlıkları ile bir tarafa doğru yaslanmalarına sebep olacaktır. Bu hareketleri engellemek için düşünülen çözüm motorları komşu gövdelere bağlamak için küresel mafsal yerine kardan mafsallar kullanmaktır. Temin edilen minyatür boyutlu kardan mafsallar ile de bir tasarım iterasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçekleşen tasarım çalışmaları sonucunda Tablo 1’de listelenen parçaların tasarımları, üretimleri ve teminleri yapılmıştır.

Tablo 1: Tahrik mekanizması parça listesi

#	Parça İsmi	Ade t	Temin	Malzeme/Model	Durum
1	Alt Plaka	1	İmalat	Aluminyum	Üretildi
2	Dikey Bağlantı	1	İmalat	Aluminyum	Üretildi
3	Kamera Platformu	1	İmalat	Aluminyum	Üretildi
4	Küresel Rulman	1	Standard	SKF GE 10 E	Satın Alındı
5	Küresel Rulman Yatağı	1	İmalat	Aluminyum	Üretildi
6	Silindirik Yatak	6	İmalat	Aluminyum	Üretildi
7	Küresel Mafsal	6	Standard	M3 Female	Satın Alındı
8	Motor Bağlantısı	3	İmalat	Aluminyum	Üretildi
9	Motor Gövdesi	3	Standard	Faulhaber LM1247-20-01	Satın Alındı
10	Motor Mili	3	Standard	Faulhaber LM1247-20-01	Satın Alındı
11	Motor Sürücüsü	3	Standart	Faulhaber	
12	Adaptör Saplama	3	İmalat	M2/M3	Üretildi
13	Segman	1	Standard	M10	Satın Alındı
14	Bağlantı Elemanları	50	Standard	M1.6 ve M3 vida ve somun	Satın Alındı
15	Düzlemsel Dikey Bağlantı	1	İmalat	Aluminyum	Üretildi
16	Düzlemsel Mafsal	1	İmalat	Aluminyum	Üretildi
17	Kardan Mafsal	6	Standart	SDP-SI 2.5 mm	Satın Alındı

Yukarıda gösterilen ve doğrusal eyleyicilerini kontrol eden Faulhaber firmasına ait motor sürücü ürünü robot dışında yapılacak deneylerimiz için uygun bulunmuş ve bu üründen 5 adet alınmıştır. Son durumda temini yapılan motorların sürücüleri projedeki iş yükünü artırmamak amacıyla hazır olarak kullanılmıştır (Şekil 8). Ancak daha sonra anlatılacağı üzere bu sürücüler ile ilgili zorluklar çalışmalarımızı oldukça yavaşlatmıştır. Yine de yeni sürücüler tasarlanması ile kıyaslandığında zaman avantajı olduğunu düşünüyoruz.



Şekil 8: Faulhaber doğrusal motor ve motor sürücüsü

Üç boyutlu kamera stabilizasyon platformu tasarım iterasyonu üzerine bir kaç alternatif daha geliştirilerek en kompakt ve en başarılı olacağı değerlendirilen alternatifler üretilmiştir. Önerilen üç boyutlu mekanizma alternatiflerinden herhangi biri kullanılarak hem iki boyutlu düzlemsel deneyler hem de üç boyutlu uzaysal deneyler yapılabileceği düşünülmüştür. Tasarım buna izin vermektedir. Ancak daha sonra, diğer eksenlerin etkilerini sıfırlayabilmek için düzlemsel bir düzeneğin de üretilmesine karar verilmiştir. Bu düzlemsel düzeneğin kinematik yapısının 3-eksenli yapıya mümkün olduğunca yakın turulması prensibi benimsenmiştir. Bu şekilde proje önerisinde sunulmuş olan faaliyet planına uygun ve hatta daha fazla hareket kabiliyetine sahip bir çözüme ulaşmak mümkün olmuştur.

Tasarım alternatiflerinden biri doğrusal eyleyicilerin robotun doğrusal ekseni boyunca birbirine paralel şekilde konumlandırıldığı üç eksenli tahrik mekanizmasıdır. Bu konfigürasyonda tahrik mekanizmasının asimetric yapısı sebebiyle bazı açısız yönlere diğerlerinden daha iyi veya kötü performans gösterebileceği öngörülmüştü. Örnek olarak kamera platformunun yunuslama hareketi sırasında üç eyleyici de aktif olarak hareket ederken yuvarlanma ve dönme hareketleri sırasında çoğunlukla iki eyleyici harekete katkıda bulunabilecektir. Ayrıca ilk tasarım iterasyonu sırasında doğrusal eyleyicilerin taban platforma ve kamera platformuna o aşamada piyasadan temin edilmiş olan küresel mafsallarla bağlanması planlanmaktaydı. Bu mafsallar kullanıldığında sistemin istenmeyen bir takım serbestlik dereceleri ortaya çıkmaktaydı. Bu mafsallar kullanılarak oluşan uzaysal mekanizmanın doğrusal eyleyicileri küresel mafsalların merkezlerini birleştiren eksen etrafında serbestçe dönebilecek durumda olacaktı. Bu durumda eyleyicilerin esnek elemanlarla birbirlerine veya yere bağlanarak sorunun çözülmesi düşünülmekteydi.

Yukarıda bahsi geçen lüzumsuz serbestlik derecelerinden kurtulmak için mekanizmanın boyutlarına uygun minyatür kardan mafsallar için yapılan piyasa araştırması sonucu 2.5 mm nominal boyutlu boşluksuz kardan mafsallar (SDP-SI Zero Backlash Miniature Universal Joint) yurtdışından temin edilmiştir. Bu sayede eyleyicilerin uçlarındaki küresel mafsallar kardan mafsallar ile değiştirilerek sistemin serbestlik derecesi eyleyici sayısı ile aynı olacak şekilde üçe indirgenebilmiştir. Bu durumda hareketli kamera platformunun uzaydaki her bir konumu için sahip olduğu Euler açı setine karşılık gelen durumda eyleyicilerin de özgün bir açısız ve boy konfigürasyonunda sabit olması gerekmektedir. Bu durumda mafsal sürtünmelerinin eyleyicilerin itme gücünü kısıtlamaması önem kazanmaktadır.

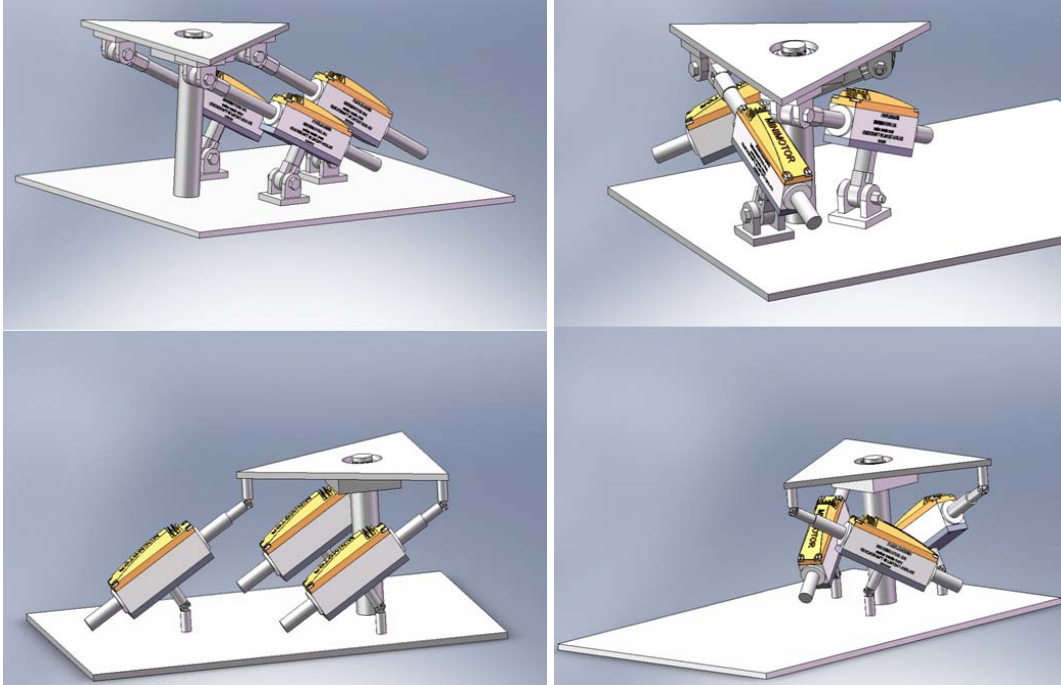
Yukarıda bahsi geçen mafsal seçenekleri (küresel ve kardan mafsal) ve eyleyici yerleşimleri (paralel ve simetrik) ile beraber geçen dönemde aşağıda listelenen toplam dört tasarım alternatifi ortaya çıkmıştır. (Şekil 9)

- Küresel mafsallar ile paralel konumlandırılmış eyleyiciler
- Küresel mafsallar ile simetrik konumlandırılmış eyleyiciler
- Kardan mafsallar ile paralel konumlandırılmış eyleyiciler
- Kardan mafsallar ile simetrik konumlandırılmış eyleyiciler

Eldeki dört konfigürasyon içinden kinematik olarak en uygun olanını seçebilmek için parçaların tasarıldığı katı modelleme programının kinematik analiz, animasyon ve çakışma tespit kabiliyetleri kullanılarak uzaysal mekanizmanın yunuslama, yuvarlanma ve dönme eksenleri etrafındaki açısız hareket sınırları tespit edilmiştir. Tablo 2'de sunulmakta olan ilgili analiz sonuçlarına göre yukarıda maddeler halinde verilmiş tasarım alternatiflerinden kardan mafsalı simetrik konumlandırılmış eyleyicilerden oluşan konfigürasyon en geniş açısız hareket kabiliyetine sahip olduğu ortaya çıkmış ve bu tasarımın kullanılmasına karar verilmiştir. Yine de bu alternative mekanizmaların birbirleri ile

sınanması, devam etmekte olan bir Makina Mühendisliği doktora tezi kapsamında ele alınacaktır. Sunulmuş olan analiz sonuçlarına göre hareketli kamera platformunun hareketleri yuvarlanma ve yunuslama eksenleri etrafında platformu sabit bağlantı elemanına bağlayan küresel mafsallın açısal sınırları tarafından $\pm 13^\circ$ ile sınırlanmaktadır. Dönme eksenini etrafındaki açısal sınırlar ise mekanizmayı oluşturan parçaların çakışması belirlemektedir.

Bahsi geçen tasarım alternatiflerinin parça istekleri birbirlerinin çok benzeri olduğu için gerektiği durumda dört konfigürasyonun da deneysel olarak birbirleri ile karşılaştırılabilmesi amacıyla hepsinin gerçekleşmesine izin verecek bütün parçalar üretilmiştir. Bütün parçalarda her konfigürasyona uygun bağlantı delikleri ve ara parçaları tek seferde üretilmiş ve bu sayede yeniden üretim gereği ortadan kalkarak işgücü ve maliyet azaltılmıştır. Her dört konfigürasyonun bütünlenmesine izin verecek şekilde tasarlanmış, detaylandırılmış ve hassas işleme tezgahlarında üretilmiş parçaların resimleri aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır.



Şekil 9: Kamera taşıyıcı robot kafasının dört değişik tasarım konfigürasyonu

Tablo 2: Dört kafa tasarım alternatifi için kinematik hareket açısal sınırları (derece)

Versiyonlar	Yuv(+)	Yuv(-)	Yun(+)	Yun(-)	Dön(+)	Dön(-)
Küresel mafsallı paralel	13	13	13	13	9.5	9.5
Küresel mafsallı simetrik	13	13	13	13	16	2
Kardan mafsallı paralel	13	13	13	13	8.5	8.5
Kardan mafsallı simetrik	13	13	13	13	11	11

Parçaların katı model ve üretilmiş halleri aşağıda Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir. Bu parçalar kullanılarak mekanizma bütünlenmiştir. Eldeki düzeneği kullanarak üç eyleyici yardımı ile sadece düzlemsel deneyler yapılabileceği gibi sadece bir eyleyici kullanarak düzlemsel deneyler yapabilmek için kamera platformunun sadece tek eksenle açısal hareketine izin veren iki adet parça tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 12).

Şekil 13'de düzlemsel deneyler için oluşturulmuş mekanizma bir adet eyleyici ile birlikte bütünleşmiş halde ve düzlemsel kinematik analiz için tanımlanmış değişkenler ve koordinat eksenleri ile beraber görülmektedir. Robotumuz için tasarladığımız kafa düzeneğinin Faulhaber firmasından satın alınan doğrusal eyleyiciler ile birlikte değişik konfigürasyonlarda bütünleşmiş hali Şekil 14'de verilmektedir. Doğrusal motorların sürülmesi ile ilgili mühendislik problemleri aşılmıştır ve bu gelişmeler deneysel kısımda detayları ile anlatılacaktır. Üretimi tamamlanmış düzenekler kullanılarak tek eksenli ve çok eksenli deneyler yapılmış, geliştirilen teorik kinematik ve kinetik formülasyonlar kullanılarak teori ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması yapılmıştır. İleride değişik mekanizma konfigürasyonlarının birbirleri ile karşılaştırılması da amaçlanmaktadır.



Şekil 10: Kafa platformu parçalarının katı model resimleri

İki boyutlu ve tek eksenli deneylerde tek doğrusal motor kullanılarak sadece yunuslama açısının dengelenmesi şeklindeki bir senaryo üzerinde çalışılmak mümkün olmaktadır. Bu konfigürasyonda mekanizmanın kinematik bağıntıları analitik olarak hem doğrudan hem tersine elde edilebildiğinden stabilizasyon performansına yoğunlaşmak mümkün olmaktadır. BU alandaki kuramsal çalışmalar bir sonraki bölümde ele alınacaktır. Problem kamera platformunun yere göre pozisyonunun sabitlenmesi, yere göre hızının sabitlenmesi, robot gövdesi açısız pozisyonunun veya hızının tersini takip etmesi şeklinde ele alınabilir. Mekanizmanın kinematik bağıntıları mevcut olduğu durumda eyleyici uzunlukları ve hızları kullanılarak platform açısız konumu ve açısız hızı platform üzerinde dönüölçer veya açıölçer bulunmasına gerek kalmadan (ama robot gövdesinde bulunacak algılayıcılar kullanılarak) hesaplanabilmektedir.

Hareket bulanıklığının giderilmesinde doğrusal motorların performansı önemli bir parametredir. Motorların kamera platformunu ne kadar hızlı hareket ettirebildikleri ile hangi frekans ve genlikte bozucu robot gövdesi hareketleri sırasında hareket bulanıklığının önlenebileceği arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Doğrusal motor seçimi yapılırken eldeki Rhex robotunun yürüyüş hızlarında maruz kalacağı bozucu hareketler gözönünde bulundurulmuştur. Temin edilen doğrusal motorların uyumlu sürücülerle beraber yapılan deneylerde katalog değerlerinin ancak %25'ine ulaşabildiği görülmüştür. Bu durum hareket bulanıklığının azaltılmasında öngörülenden daha az başarı elde edilmesine sebep olabilecektir.

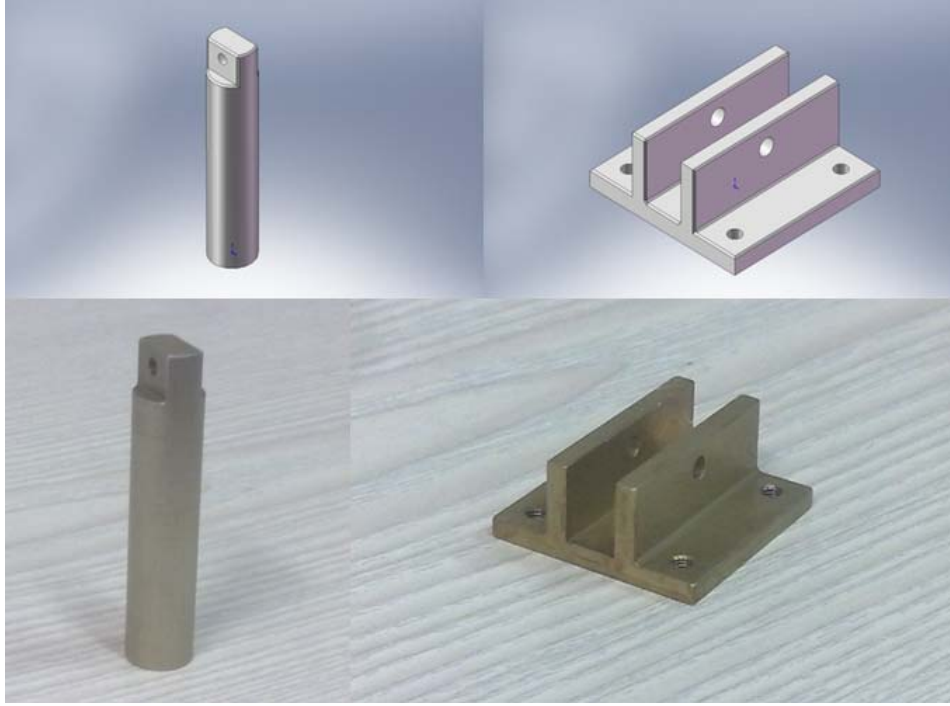
Kamera platformunun tek eksen etrafında iki boyutta hareket etmesine izin verecek konfigürasyonda sadece bir adet doğrusal eyleyici yeterli olmaktadır. Normalde tek eksen

hareket için doğrusal eyleyiciler tercih edilmemekle beraber bu konfigürasyon üç boyutlu mekanizmanın basitleştirilmiş hali olduğu için çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu konfigürasyon için bütün kinematik ve kinetik bağıntılar analitik olarak elde edilmiştir. Tek eksenli bozucu hareketlerin varlığında en yüksek performansın bu konfigürasyonda elde edilmesi beklenmektedir. Bu düzlemsel mekanizma ile yapılan çalışmalar Kabul edilmiş bir dergi makalesi olarak çıktı vermiştir.

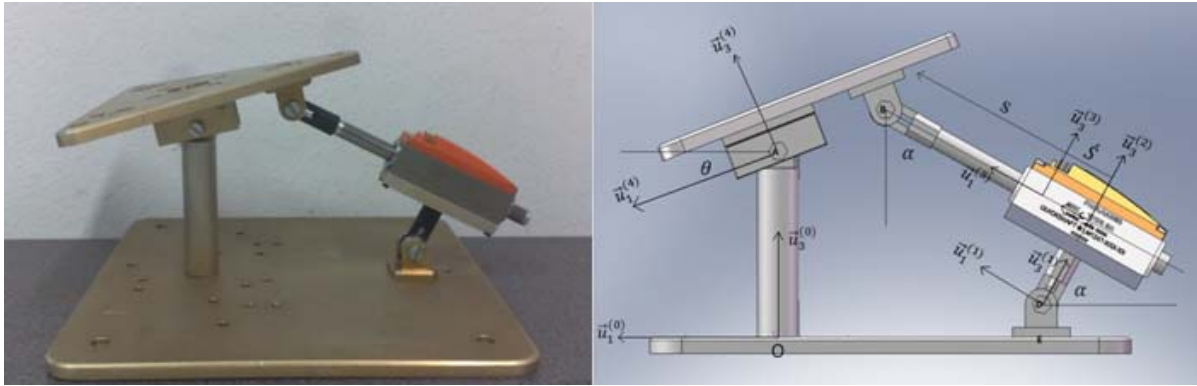
Üç boyutlu ve üç serbestlik dereceli mekanizmada eyleyiciler iki değişik konfigürasyonda kamera platformuna bağlanabilmekte ve bu şekilde değişik hareket alanları elde edilebilmektedir. İki durum için de doğrudan kinematik bağıntılar analitik olarak elde edilebilmekte olup tersine kinematik bağıntılar sayısal olarak çözülebilmektedir. Tersine kinematik bağıntıların da analitik olarak bulunabilmesi için uzaysal analitik geometri kullanılarak formülasyon çalışmaları yapılmıştır. Tersine kinematik bağıntılar sayesinde kamera platformunda dönüölçerler ve ivmeölçerler yerine robot gövdesine göre açısal konumlar eyleyici uzunlukları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu bilgiler de gerçek zamanlı elde edildikleri takdirde kontrol döngüsü içerisinde kullanılabilirlerdir.



Şekil 11: Kafa platformunun imal edilmiş parça resimleri



Şekil 12: Düzlemsel hareket için tasarlanan ve üretilen parçalar



Şekil 13: Bütünleşmiş düzlemsel mekanizma ve kinematik analizde kullanılan değişkenler



Şekil 14: Uzaysal mekanizmanın değişik hallerde bütünlümlü görüntüleri

Bir sonraki bölümde, hem düzlemsel, hem de 3 eksenli ve 3 boyulu kafa tasarımlarımızın analizi konusunda projemiz kapsamında yapılan çalışmalar ele alınacaktır.

2.2 Kafa Tasarımının Kuramsal Modellemesi

(a) SensoRHex Kafa Modeli ve Kinematik Analizi

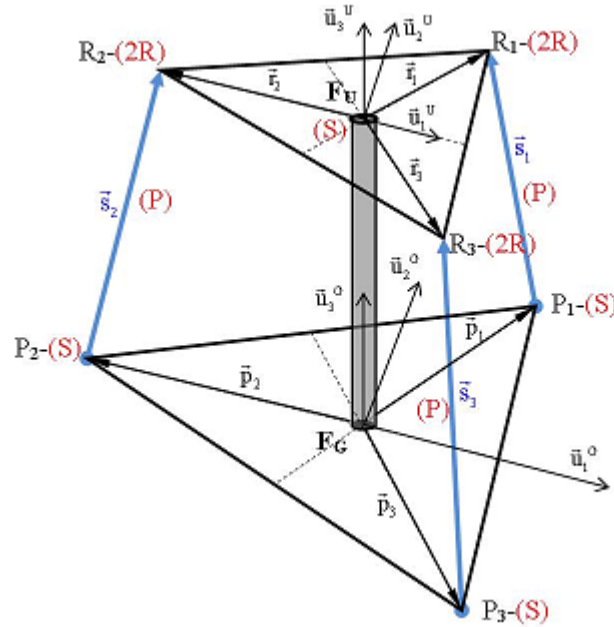
Çok bacaklı robot platformunda kameranın elde edeceği görüntülerdeki hareket bulanıklığını azaltmak için kameranın yere göre daha az hareketli olmasını sağlamak üzere robot gövdesine göre hareket edebilen bir platform üzerine konumlandırılması bu iş paketinin önemli bir motivasyonunu oluşturmaktadır. Burada oluşan paralel mekanizma kamera platformunun küresel bir mafsal ile robot gövdesine göre üç adet açısız serbestliğinin olmasını sağlamaktadır. Robot platformu ile kamera platformu arasında bulunan üç adet doğrusal eyleyici de çeşitli konfigürasyonlarda yerleştirilerek bu açısız serbestliklerin belirlenmesini sağlamaktadırlar.

Paralel mekanizmalarda eyleyicilerin konum değişkenleri ile hareket ettirilen gövdelerin konum değişkenleri arasında mekanizma üzerinden yazılan vektör döngü denklemleri ile bir bağıntı oluşturulabilmektedir. Bu bağıntılar genelde bir yönde analitik ve az sayıda çözümü olan tersine bağıntılar olup ileri yönde ise çok çözümlü ve analitik olarak hesaplaması daha zor olmaktadır. Bu projede kullanılan kamera platformunu hareket ettiren paralel mekanizmada kamera platformunu belirli bir açısız konuma getirmek için gerekli olan eyleyici uzunluklarını hesaplamak analitik olarak mümkün olmaktadır. Bu hesaplama gerçek zamanlı da yapılabilmektedir. Bu durum hem tek eksenli iki boyutlu mekanizma için hem de üç eksenli üç boyutlu mekanizma için geçerlidir. Ters yöndeki hesaplama ise eyleyici boyları bilindiği durumda platform açısız konumunun bulunması ile ilgilidir. İki boyutlu mekanizma için analitik olarak yapılabilen bu hesaplama üç boyutlu mekanizma için ortaya çıkan çok bilinmeyenli doğrusal olmayan denklem sistemi sebebiyle sadece sayısal olarak yapılabilmekte ve gerçek zamanlı olarak hesaplanamamaktadır.

Uzaysal kamera platformunun hareketinin modellenmesi çalışmaları için öncelikle temel kinematik analiz çalışmaları yürütülmüştür. Öncelikle mekanizmanın doğrudan ve ters kinematik analizleri basit bir yaklaşımla yapılmıştır. İlk yapılan analizlerde mafsallarda bir takım değişik elemanlar kullanılmış olmasına rağmen eyleyici uzunlukları ve platform açıları arasındaki doğrudan ve tersine bağıntılar değişmemektedir ve çalışmaların devamında aynı şekilde kullanılmıştır.

Analizlerde kullanılan değişkenler ve koordinat sistemleri Şekil 15'te görülmektedir. Şekilde görülen sistematik yaklaşım kullanılarak önerilen tasarım alternatiflerinin her biri için kamera platformu Euler açıları ile eyleyici uzunlukları arasındaki ilişkiler incelenebilmektedir. Bu mekanizmanın doğal olarak sahip olduğu mimari sebebiyle kamera platformunu herhangi bir Euler açı kombinasyonuna konumlandırmak için gerekli olan eyleyici uzunluklarını bulmak kolay olmaktadır. Tersine kinematik bağıntı olarak adlandırılan bu matematiksel bağıntı analitik olarak elde edilebilmektedir. Buna ilave olarak bu ilişkinin günümüzde kullanılmakta olan kontrol bilgisayar altyapısı ile gerçek zamanlı olarak hesaplanması oldukça kolay olmaktadır.

Öncelikle paralel uzaysal mekanizmada hareketli platformu istenilen yuvarlanma-yunuslama-dönme açılarına yönlerecek olan eyleyici uzunluklarını hesaplamak için kullanılan tersine kinematik bağıntılar aşağıda verilmektedir.



Şekil 15: Üç eyleyicili kafa yapısının kinematik analizi için gerekli koordinat sistemleri ve matematiksel değişkenler

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma & c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\beta \\ s\alpha s\gamma - c\alpha s\beta c\gamma & s\alpha c\gamma + c\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{33} & c_{33} \end{bmatrix}$$

$$s_1 = \sqrt{\left(c_{11} \frac{r}{2} + c_{12} \frac{\sqrt{3}}{2} r - \frac{p}{2}\right)^2 + \left(c_{21} \frac{r}{2} + c_{22} \frac{\sqrt{3}}{2} r - \frac{\sqrt{3}p}{2}\right)^2 + \left(c_{31} \frac{r}{2} + c_{32} \frac{\sqrt{3}}{2} r + h\right)^2}$$

$$s_2 = \sqrt{(-c_{11}r + p)^2 + (c_{21}r)^2 + (c_{31}r + h)^2}$$

$$s_3 = \sqrt{\left(c_{11} \frac{r}{2} - c_{12} \frac{\sqrt{3}}{2} r - \frac{p}{2}\right)^2 + \left(c_{21} \frac{r}{2} - c_{22} \frac{\sqrt{3}}{2} r + \frac{\sqrt{3}p}{2}\right)^2 + \left(c_{31} \frac{r}{2} - c_{32} \frac{\sqrt{3}}{2} r + h\right)^2}$$

Burada ilk denklemde C matrisi kamera platformunun açısız konumuna bağılı olan dönüşüm matrisini ifade etmektedir. Bu matrisin elemanları kullanılarak s_1 , s_2 ve s_3 ile ifade edilen eyleyici uzunlukları bulunabilmektedir. Pratik bir kontrol problemi olarak ele alındığında kamera platformunu herhangi bir açısız konuma getirmek için platformun sahip olması istenen Euler açıları kullanılarak yukarıdaki formüller ile gerekli eyleyici uzunlukları bulunabilmektedir. Kontrol döngüsü bu şekilde hesaplanan eyleyici uzunlukları üzerinden kapatıldığında kamera platformu istenen açısız konuma gelmiş olacaktır.

Tersine kinematik analiz yönteminden daha karmaşık olan doğrudan kinematik analiz yönteminde eyleyici uzunlukları kullanılarak platform Euler açılarının hesaplanması için öncelikle sayısal analize dayanan iki yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden ilkinde yukarıda verilen eyleyici uzunlukları formülleri ile dönüşüm matrisi elemanları arasında bulunan ve aşağıdaki denklemler ile verilen birimlilik bağıntıları kullanılarak doğrusal olmayan bir denklem sisteminin sayısal çözümünün yapılması gerekmektedir.

$$c_{11}^2 + c_{21}^2 + c_{31}^2 = 1$$

$$c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2 = 1$$

$$c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2 = 1$$

$$c_{11}c_{12} + c_{21}c_{22} + c_{31}c_{32} = 0$$

$$c_{11}c_{13} + c_{21}c_{23} + c_{31}c_{33} = 0$$

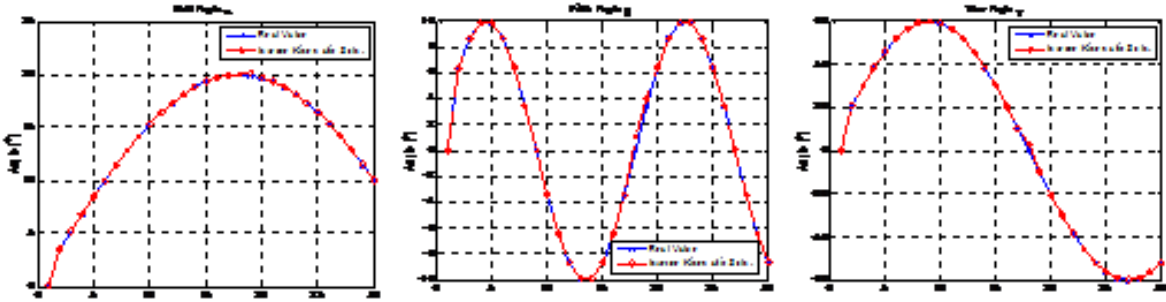
$$c_{12}c_{13} + c_{22}c_{23} + c_{32}c_{33} = 0$$

Dönüşüm matrisinin elemanları bulunduğunda hareketli kamera platformunun robot gövdesine göre açısız konumunu ifade eden Euler açılarını bulmak aşağıdaki ters trigonometrik ifadeler kullanılarak mümkün olmaktadır. Bahsedilen bu bağıntılar kullanılarak yapılan örnek tersine ve doğrudan analiz çalışmasının sonuçları Şekil 16'te gösterilmektedir.

$$\alpha = a \tan 2(-c_{23}, c_{33})$$

$$\beta = a \tan 2\left(c_{13}, \sigma_1 \sqrt{1 - c_{13}^2}\right)$$

$$\gamma = a \tan 2(-c_{12}, c_{11})$$

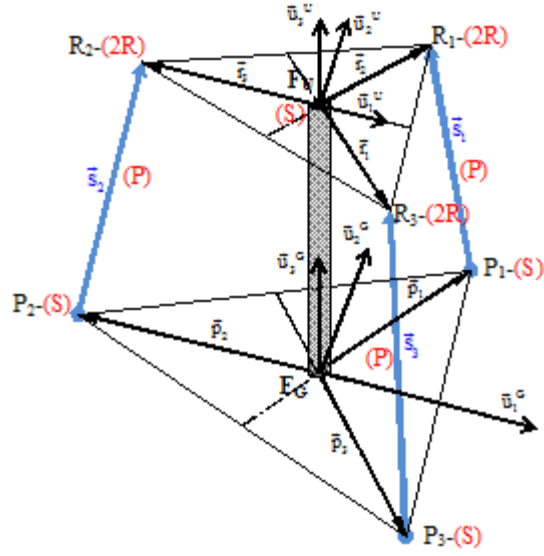


Şekil 16: Platform Euler açılarının gerçek ve tersine kinematik çözüm yoluyla bulunan değerlerinin karşılaştırması

Önerilen alternatif sayısal çözüm yönteminde ise her bir eyleyicinin robot gövdesine göre açısal konumunu bulmak da mümkün olmaktadır. Ancak daha büyük bir doğrusal olmayan denklem sistemini çözmek gerekeceği için bu metod daha yavaş çalışmaktadır. Zaten hareketli platformun açısal konumu platformun açısal kontrolü açısından eyleyicilerin açısal konumuna göre ikinci derecede önem arz etmektedir. Burada bahsedilen tersine kinematik analiz gerçek zamanlı çözülebilecek halde olduğu takdirde hareketli kamera platformu üzerinde dönüölçer bulundurmaya bir alternatif oluşturabilir. Kullanılan eyleyicilerin üzerinde bulunan Hall etkisi ile çalışan uzunluk ölçerler ile hareketli platformun açısal konumunu hesaplamak mümkün olmaktadır. Yine de dönüölçerler, doğrudan performans kriterini oluşturan dönüsel açı hızlarını ölçtüklerinden platform üzerinde bulunmaları daha yüksek performans elde edilmesini sağlamaktadır.

Çok bacaklı robot platformunda kameranın elde edeceği görüntülerdeki hareket bulanıklığını azaltmak için kameranın yere göre daha az hareketli olmasını sağlamak üzere robot gövdesine göre hareket edebilen bir platform üzerine konumlandırılması bu iş paketinin önemli bir motivasyonunu oluşturmaktadır. Burada oluşan paralel mekanizma kamera platformunun küresel bir mafsal ile robot gövdesine göre üç adet açısal serbestliğinin olmasını sağlamaktadır. Robot platformu ile kamera platformu arasında bulunan üç adet doğrusal eyleyici de çeşitli konfigürasyonlarda yerleştirilerek bu açısal serbestliklerin belirlenmesini sağlamaktadırlar.

Genelde büyük bölümü sadece sayısal olarak çözülebilen tersine kinematik bağıntıların mümkün olabildiğince analitik olarak elde edilmesi için çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada uzaysal analitik geometri yöntemleri kullanılarak paralel mekanizma bağlantı parçalarının uzayda taradığı koordinatlar bir küre yüzeyini ifade ettiği için kinematik bağıntılar bu kürelerin kesişimi sonucu oluşan çemberler üzerinde aranmıştır. Bahsi geçen paralel mekanizmada kamera platformu robot gövdesine bağlandığı küresel mafsal etrafında sabit yarıçaplı bir küre yüzeyi tanımlamaktadır. Eyleyiciler de robot gövdesine ve kamera platformuna bağlandıkları noklatalar arasında değişen uzunlukları ile yarıçapları değişken olan üç adet küre yüzeyi tanımlamaktadırlar. Mekanizmanın kinematik analizi bu dört kürenin ikişerli kesişimleri sonucu oluşan üç adet uzaysal çember üzerine oturan eşkenar üçgen biçimli kamera platformunun tanımlanması ile açıklanabilir. Üç boyutlu uzayda oluşan kesişim çemberleri arasındaki uzaklığın kamera platform üçgeninin kenar uzunluğuna eşit olan noktaları ters kinematik analizin çözümlerini oluşturmaktadır. Aşağıda denklemleri verilen analizde öncelikle mekanizma boyutları ve eyleyici uzunluklarından yola çıkılarak elde edilen uzaysal kürelerin denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemlerde kullanılan değişkenler Şekil 17'de görülmektedir.



Şekil 17: Kamera platformunu oluşturan paralel mekanizma

$$\left(x - \frac{p}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}p\right)^2 + z^2 = s_1^2$$

$$(x + p)^2 + y^2 + z^2 = s_2^2$$

$$\left(x - \frac{p}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{\sqrt{3}}{2}p\right)^2 + z^2 = s_3^2$$

Uzaydaki dört kürenin ikili kesişimleri sonucu oluşan çemberlerin yer aldıkları düzlemler, merkez koordinatları ve yarıçapları da bulunabilmektedir.

$$a_1x + b_1y + c_1z = d_1$$

$$C_1 = \left(\frac{p}{2} + a_1t_1, \frac{\sqrt{3}}{2}p + b_1t_1, c_1t_1\right)$$

$$R_1 = \sqrt{s_1^2 - (a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)t_1^2}$$

$$a_2x + b_2y + c_2z = d_2$$

$$C_2 = (-p + a_2t_2, b_2t_2, c_2t_2)$$

$$R_2 = \sqrt{s_2^2 - (a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)t_2^2}$$

$$a_3x + b_3y + c_3z = d_3$$

$$C_3 = \left(\frac{p}{2} + a_3 t_3, -\frac{\sqrt{3}}{2} p + b_3 t_3, c_3 t_3 \right)$$

$$R_3 = \sqrt{S_3^2 - (a_3^2 + b_3^2 + c_3^2) t_3^2}$$

Uzayda konumlanmış çemberler arası uzaklıkların hesaplanabilmesi için çemberlerin denklemleri parametrik olarak yazılmıştır.

$$X_1 = C_1 + R_1(U_1 \cos \theta_1 + V_1 \sin \theta_1) =: C_1 + R_1 W_1(\theta_1) \quad \text{and} \quad \theta_1 \in [0, 2\pi)$$

$$X_2 = C_2 + R_2(U_2 \cos \theta_2 + V_2 \sin \theta_2) =: C_2 + R_2 W_2(\theta_2) \quad \text{and} \quad \theta_2 \in [0, 2\pi)$$

$$X_3 = C_3 + R_3(U_3 \cos \theta_3 + V_3 \sin \theta_3) =: C_3 + R_3 W_3(\theta_3) \quad \text{and} \quad \theta_3 \in [0, 2\pi)$$

Bu denklemlerde kullanılan vektörlerin çemberlerin düzlem bilgisine göre elde edilebilmesi için Gram-Schmidt algoritması kullanılmıştır. Bu şekilde parametrik olarak yazılabilen çemberlerin arasındaki uzaklıkların kamera platform üçgeninin kenarına eşit olduğu noktalar kinematik bağıntısının çözümünü vermektedir.

$$F(\theta_1, \theta_2) = d^2 = |C_2 - C_1 + R_2 W_2(\theta_2) - R_1 W_1(\theta_1)|^2$$

$$F(\theta_2, \theta_3) = d^2 = |C_3 - C_2 + R_3 W_3(\theta_3) - R_2 W_2(\theta_2)|^2$$

$$F(\theta_3, \theta_1) = d^2 = |C_1 - C_3 + R_1 W_1(\theta_1) - R_3 W_3(\theta_3)|^2$$

Bu denklem sisteminin analitik çözümü için Bezout metodu olarak bilinen eski bir analitik yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle bir eyleyici uzunluk konfigürasyonu için çok sayıda hareketli platform açısı çözüm olarak elde edilmektedir. Bunun için aşağıdaki trigonometrik ifadeler kullanılarak denklemler polinomlara çevrilmektedir.

$$\cos(\theta_i) = \frac{1-x_i^2}{1+x_i^2}$$

$$\sin(\theta_i) = \frac{2x_i}{1+x_i^2}$$

$$x_i = \tan\left(\frac{\theta_i}{2}\right)$$

$$(I_1 x_2^2 + I_2 x_2 + I_3) x_1^2 + (I_4 x_2^2 + I_5 x_2 + I_6) x_1 + I_7 x_2^2 + I_8 x_2 + I_9 = 0$$

$$(J_1 x_3^2 + J_2 x_3 + J_3) x_1^2 + (J_4 x_3^2 + J_5 x_3 + J_6) x_1 + J_7 x_3^2 + J_8 x_3 + J_9 = 0$$

$$(K_1x_3^2 + K_2x_3 + K_3)x_2^2 + (K_4x_3^2 + K_5x_3 + K_6)x_2 + K_7x_3^2 + K_8x_3 + K_9 = 0$$

Bu denklemlerden x_1 , x_2 ve x_3 sistematik olarak elenerek çözülebilmektedir. Bu çözümde sayısal tek çözüm eleme sırasında elde edilen matrislerin özdeğerlerini bulmak için yapılmaktadır. Detayları yayınlanmak üzere çok yakında bilimsel bir dergiye gönderilecek olan bu formülasyon sonucunda Euler açıları aşağıdaki matrisin elemanları olarak elde edilebilmektedir.

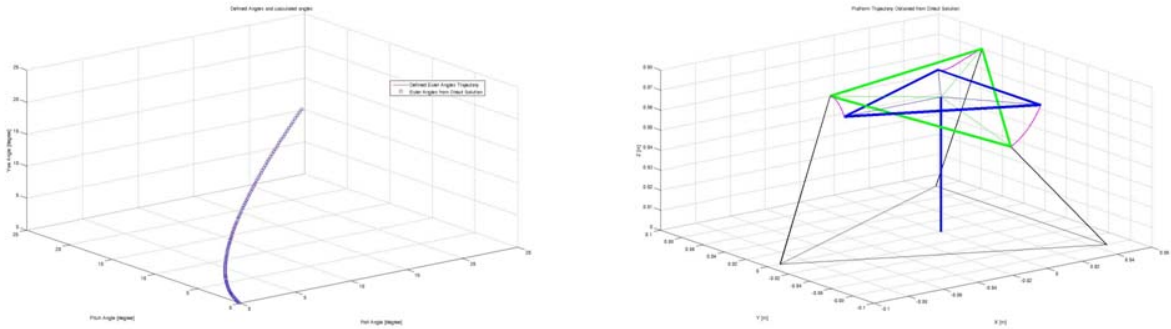
$$C = \begin{bmatrix} \overline{U}_1^{(U)} & \overline{U}_2^{(U)} & \overline{U}_3^{(U)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \text{atan2}(c_{13}, \sigma\sqrt{1 - c_{13}^2}) \quad \text{with} \quad \sigma = \pm 1$$

$$\alpha = \text{atan2}(-c_{23}, c_{33})$$

$$\gamma = \text{atan2}(-c_{12}, c_{11})$$

Bu denklemlerden elde edilen çok sayıda çözümden kompleks sayı cinsinden olanlar ve tekrarlananlar elenerek mekanizmanın ayna görüntüsü olan iki adet çözüme ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu çözümlerden son konuma en yakın olanı seçilerek kinematik analiz tamamlanmaktadır. Bu yöntem kullanılarak yapılmış hesaplamaların sonuçları örnek bir çözüm patikası üzerinde Şekil 18'de görülmektedir.



Şekil 18: Geliştirilen analitik yöntem kullanılarak yapılan kinematik analizler.

Çözüm süresi sadece sayısal olan bir kinematik analiz metoduna göre daha kısa ve istikrarlı olan bu metodu uygun bir örnekleme zamanı ile çalışan kontrol döngüsünde gerçek zamanlı olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

Platform açısız konumu ile eyleyici uzunlukları arasındaki bağıntılara ek olarak platform açısız hızları ile eyleyici hızları arasındaki bağıntılar da elde edilmiştir. Hareket bulanıklığı probleminin çözülmesinde kamera platformunun stabilizasyonunun açısız hızlar cinsinden yapılması açısız pozisyon cinsinden yapılmasından daha kolay olabilmektedir çünkü kamera platformunun veya robot platformunun üzerine yerleştirilen algılayıcılar genellikle

dönüölçerler olmaktadır. Dönüölçerler hareket bulanıklığı probleminin çözülmesinde iki şekilde kullanılabilir. Örnek olarak birinci durumda hem kamera platformu üzerinde hem de robot gövdesi üzerinde bulunan dönüölçerlerin ölçtüğü açısal hızlar kullanılarak kamera platformunun robot gövdesine göre sahip olması gereken açısal konum hesaplanabilir. İkinci bir alternatif ise robot gövdesinin üzerindeki dönüölçerler robotun yere göre açısal hızlarını ölçmek için kullanılıp ölçülen bu açısal hızların tersi kamera platformunun açısal hızları olacak şekilde bunun için gerekli olan eyleyici hızları bulunabilir. Aşağıda bu çalışmaların sonuç bağıntıları verilmektedir. Bu bağıntıların ters yönde de elde edilmesi ve eyleyici hızlarından kamera platformu açısal hızlarının hesaplanması da mümkündür.

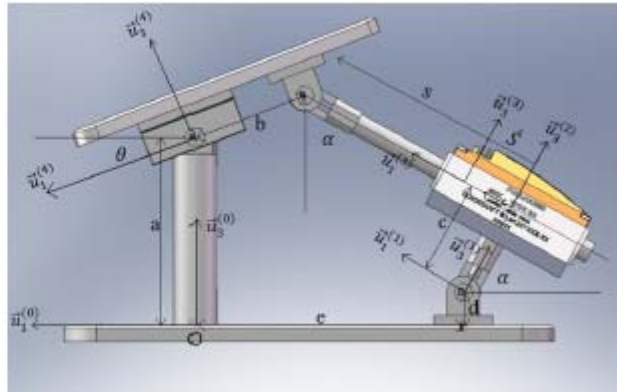
$$\vec{W}_1 = \bar{u}_1(B_1\dot{\beta} + C_1\dot{\gamma}) + \bar{u}_2(A_2\dot{\alpha} + B_2\dot{\beta} + C_2\dot{\gamma}) + \bar{u}_3(A_3\dot{\alpha} + B_3\dot{\beta} + C_3\dot{\gamma})$$

$$\vec{W}_2 = \bar{u}_1(H_1\dot{\beta} + L_1\dot{\gamma}) + \bar{u}_2(G_2\dot{\alpha} + H_2\dot{\beta} + L_2\dot{\gamma}) + \bar{u}_3(G_3\dot{\alpha} + H_3\dot{\beta} + L_3\dot{\gamma})$$

$$\vec{W}_3 = \bar{u}_1(L_1\dot{\beta} + N_1\dot{\gamma}) + \bar{u}_2(K_2\dot{\alpha} + L_2\dot{\beta} + N_2\dot{\gamma}) + \bar{u}_3(K_3\dot{\alpha} + L_3\dot{\beta} + N_3\dot{\gamma})$$

(b) SensorHex Kafa Modeli Dinamik Analizi

Bacaklı bir robotta hareketli kafa platformu olarak kullanılabilen uzaysal paralel mekanizmanın düzlemsel dinamik bir model geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak örneğin eyleyicilerin kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılabilmektedir. Sonuçları yurtdışı bir dergide bilimsel makale olarak yayınlanmış olan bu çalışma aşağıda özetlenecektir. Bahsi geçen bu çalışmada kafa mekanizmasının düzlemsel versiyonu eyleyici kütlelerinin hesaba katıldığı ve ihmal edildiği durumlar karşılaştırılmaktadır. Mekanizmanın düzlemsel halde bütünlüğü ve tanımlanan eksen ve değişkenler Şekil 19'de gösterilmektedir.



Şekil 19: Düzlemsel mekanizmanın gerçek ve şematik görünümü.

Düzlemsel mekanizmanın dinamik analizi Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Öncelikle mekanizmanın düzlemsel kinematik analizi konum mertebesinde gerçekleştirilmiştir. Eyleyici uzunluğu olarak adlandırılmış olan S hareketli platform açısı θ cinsinden ifade edilmiştir.

$$S = \sqrt{A - B \cos(\theta) + C \sin(\theta)}.$$

$$A = e^2 - c^2 + (a - d)^2 + b^2,$$

$$B = 2eb,$$

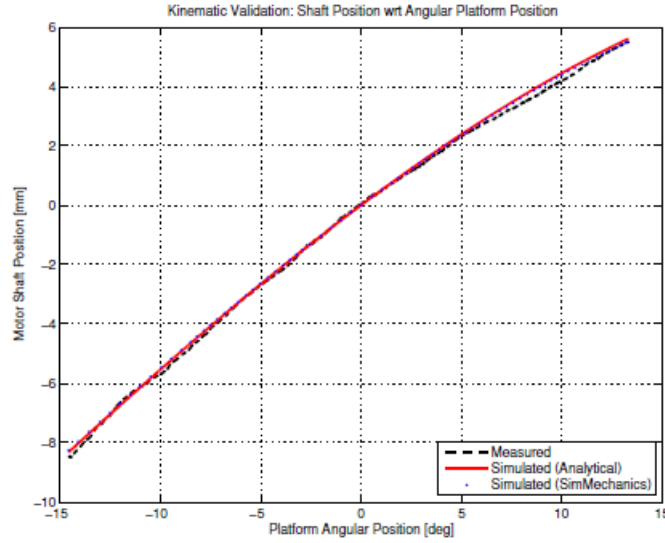
$$C = 2b(a - d).$$

Aynı şekilde eyleyici açısı olan α ile hareketli platform açısı θ arasında da aşağıda verilen trigonometrik bağıntılar bulunmaktadır.

$$\sin \alpha = \frac{-Sb \cos \theta + ac + bc \sin \theta + Se - dc}{S^2 + c^2},$$

$$\cos \alpha = \frac{bc \cos \theta + aS + bS \sin \theta - ec - dS}{S^2 + c^2}.$$

Yukarıda anlatılan kinematik çalışmanın doğrulanması gerçek düzenek kullanılarak deneysel olarak yapılmıştır. Analitik modelden elde edilen ve platform açısına karşılık gelen eyleyici şaft uzunlukları deneysel düzende hareketli platform üzerindeki mikroeletromekanik dönüölçer ile ölçülen platform açısı ile ve Hall etkisi algılayıcıları ile ölçülen eyleyici şaft uzunlukları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 20).



Şekil 20: Düzlemsel mekanizmanın kinematik analizinin deneysel olarak doğrulanması

Mekanizmanın hareketini tanımlayan değişkenlerin Lagrange formülasyonunda gerekli olan hız mertebesindeki kinematik bağıntıları aşağıdaki şekilde matris formunda verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} (c \sin \alpha + S \cos \alpha) & \sin \alpha \\ (c \cos \alpha - S \sin \alpha) & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b\dot{\theta} \sin(\theta) \\ b\dot{\theta} \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Düzlemsel mekanizmanın hareket denklemlerini elde etmek için kullanılan ve Lagrange yaklaşımından elde edilen ifade aşağıdaki gibidir.

$$\overset{\perp}{\dot{P}}_{\theta} - \frac{\partial K}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial U}{\partial \theta} = Q_{\theta}.$$

Bu formülasyon öncelikle sadece hareketli platformun kütesinin olduğu, bu kütenin kütle merkezinin platformun dönme eksenini üzerinde olduğu ve eyleyici kütesinin ihmal edildiği durum için yapılmıştır. Bu durumda yukarıdaki denklemden genelleştirilmiş momentum P_{θ} , kinetik enerji K , genelleştirilmiş kuvvet Q_{θ} , ve sönümlenme terimi D aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$\overset{\perp}{\parallel} P_{\theta} = \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} = J_{p22} \dot{\theta}.$$

$$\overset{\perp}{\parallel} K = \frac{1}{2} \vec{\omega}_p \cdot \check{J}_p \cdot \vec{\omega}_p = \frac{1}{2} J_{p22} \dot{\theta}^2.$$

$$Q_{\theta} = F \frac{B \sin(\theta) + C \cos(\theta)}{2S}.$$

$$\overset{\perp}{\parallel} D = \frac{1}{2} c_1 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} c_2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} c_3 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} c_4 \dot{S}^2.$$

Sonuçta sadece hareketli platformun kütesinin dikkate alındığı durum için hareket denklemini aşağıdaki diferansiyel denklemin çözümü ile elde edilmektedir.

$$J_{p22} \ddot{\theta} = F \frac{B \sin(\theta) + C \cos(\theta)}{2S} - \left(c_3 \dot{\theta} + (c_1 \dot{\alpha} + c_2 \dot{\alpha}) \frac{\partial \dot{\alpha}}{\partial \dot{\theta}} + (c_4 \dot{S}) \frac{\partial \dot{S}}{\partial \dot{\theta}} \right)$$

Hareketli platformun ve eyleyici gövdesi ile şaftının kütesi de hesaba katıldığında kinetik enerji K , genelleştirilmiş momentum P_{θ} , potansiyel enerji U , terimleri aşağıdaki hale gelmektedir.

$$\overset{\perp}{\parallel} K = \frac{1}{2} m_m |\vec{v}_m|^2 + \frac{1}{2} \vec{\omega}_m \cdot \check{J}_m \cdot \vec{\omega}_m + \frac{1}{2} m_{sh} |\vec{v}_{sh}|^2 + \frac{1}{2} \vec{\omega}_{sh} \cdot \check{J}_{sh} \cdot \vec{\omega}_{sh} \\ + \frac{1}{2} m_p |\vec{v}_p|^2 + \frac{1}{2} \vec{\omega}_p \cdot \check{J}_p \cdot \vec{\omega}_p.$$

$$K = \frac{1}{2} m_m c^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_{m22} \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_{sh} [(c \dot{\alpha} - \dot{S})^2 + (S - S_0)^2 \dot{\alpha}^2] + \frac{1}{2} J_{sh22} \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_{p22} \dot{\theta}^2.$$

$$P_{\theta} = \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial K}{\partial \dot{\alpha}} \frac{\partial \dot{\alpha}}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial K}{\partial \dot{S}} \frac{\partial \dot{S}}{\partial \dot{\theta}},$$

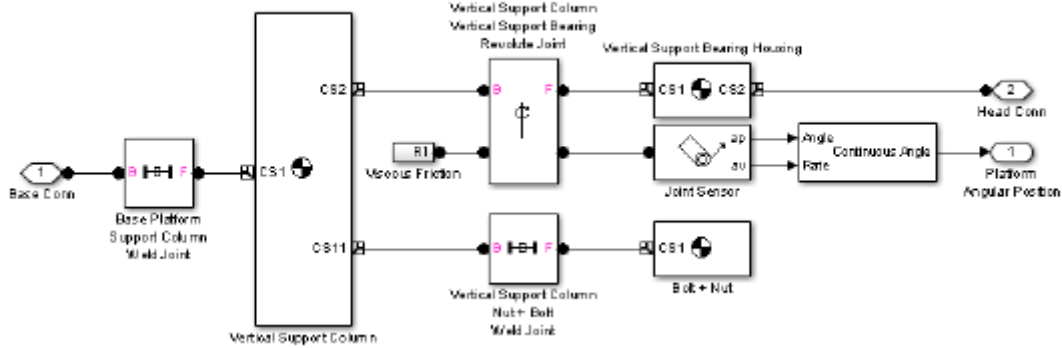
$$P_{\theta} = J_{p22} \dot{\theta} + [m_m c^2 \dot{\alpha} + J_{m22} \dot{\alpha} + m_{sh} c (c \dot{\alpha} - \dot{S}) + m_{sh} (S - S_0)^2 \dot{\alpha} + J_{sh22} \dot{\alpha}] \frac{\partial \dot{\alpha}}{\partial \dot{\theta}} + [-m_{sh} (c \dot{\alpha} - \dot{S})] \frac{\partial \dot{S}}{\partial \dot{\theta}}$$

$$U = (d + c \sin(\alpha)) m_m g + [d + c \sin(\alpha) + (S - S_0) \cos(\alpha)] m_{sh} g.$$

Bu denklemlerin kullanılması ile oldukça karışık hale gelen hareket denklemleri genel formu aşağıdaki şekilde ifade edilebilen bir diferansiyel denkleme dönüşmektedir.

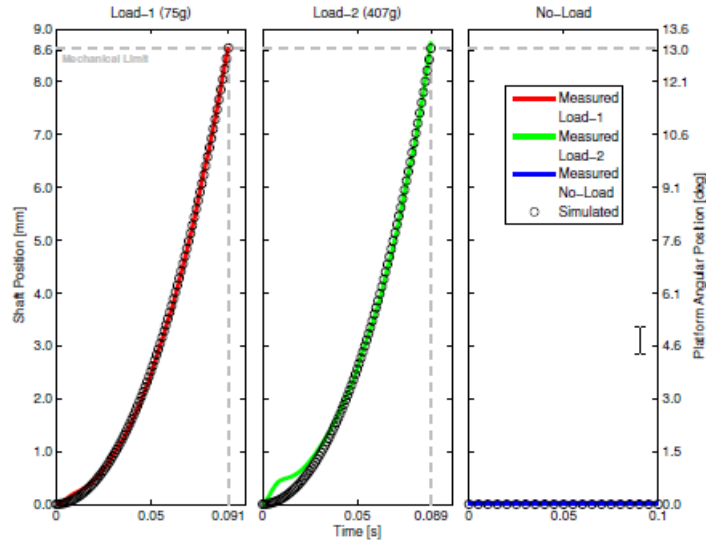
$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}, F, t).$$

Elde edilen dinamik model ile karşılaştırma ve doğrulama yapabilmek için ayrıca bir de detaylı Matlab-Simulink modeli geliştirilmiştir. Bu modelin dikey kolon hareketli platform bağlantısı kısmı Şekil 21'de gösterilmektedir.



Şekil 21: Düzlemsel mekanizmanın Simulink modelinden bir bölüm

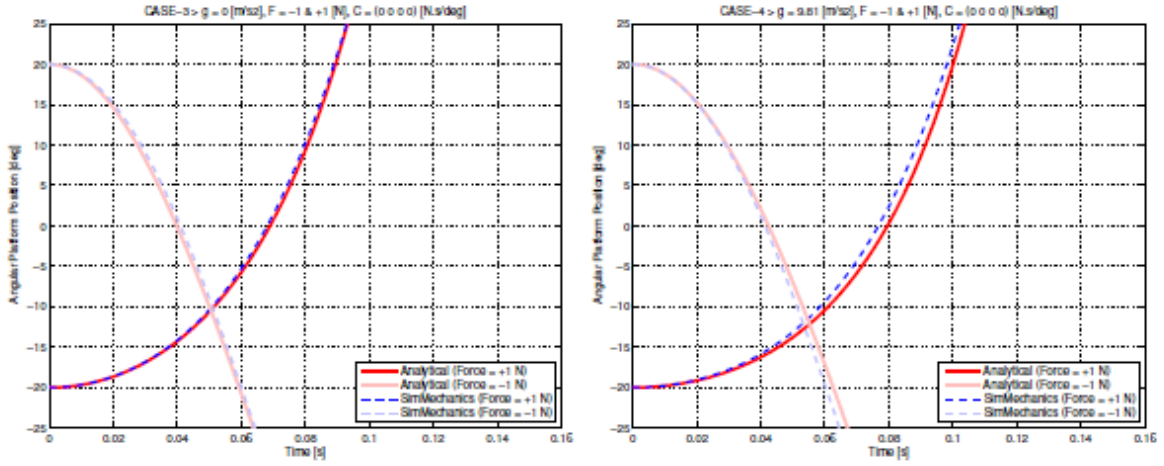
Geliştirilen bu modeller kullanılarak düzlemsel mekanizmanın kendi ağırlığının etkisi altında ve/veya eyleyici kuvvetinin etkisi altında karşılaştırmalı hareket simülasyonları yapılmıştır. Şekil 22'de Simulink ile simülasyonu yapılan model gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Bu şekildeki simülasyon hareketli platformun kendi ağırlığı altında yaptığı hareketler ile ilgilidir. Simülasyonda hareketli platform üzerinde nötr yüke ek olarak iki değişik yük kullanılmıştır. Bu çalışma ile geliştirilen Simulink modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu anlaşılmıştır.



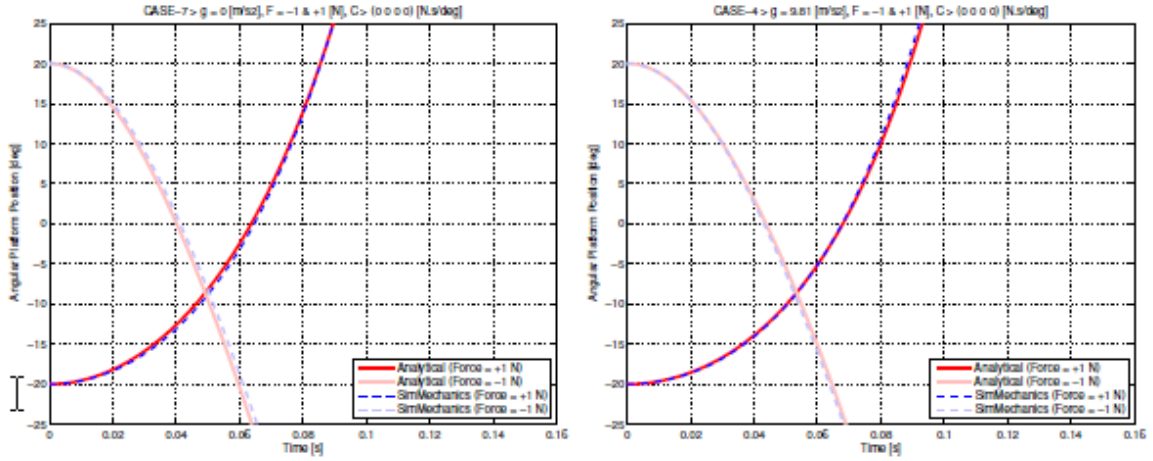
Şekil 22: Düzlemsel mekanizmanın kendi ağırlığının etkisi ile yaptığı hareket simülasyonu (Simulink) ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 23’de ise analitik formülasyon ve Simulink modelleri kullanılarak yerçekimi olan ve olmayan durumlarda, mafsal sürtünmesiz kabul edilerek eyleyici kuvvetinin etkisi altında yapılan simülasyonlar karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmış olan Simulink modeli ile analitik modelin uyumu analitik modelin de doğrulanması yapılmıştır. Bu şekildeki iki aşamalı doğrulama süreci deneysel çalışmada eyleyici kuvvetlerini yeterince hassas ölçememekten dolayı gerekli olmuştur. Mekanizmanın kendi ağırlığı ile yaptığı hareket sırasında elde edilen deneysel veriler Simulink modelinde aynı koşullardaki hareket ile karşılaştırılıp Simulink modeli doğrulanmış olmaktadır. Daha sonra analitik model ile Simulink modelinde mekanizmaya istenilen eyleyici kuvveti uygulanarak analitik model de doğrulanmıştır. Simulink modeli ve analitik modelde istenilen miktarda sürtünme etkisi de sisteme eklenebilmektedir. Şekil 23’deki karşılaştırmada hesaba katılmamış olan sürtünme etkisinin de mevcut olduğu karşılaştırma Şekil 24’te sunulmuştur.

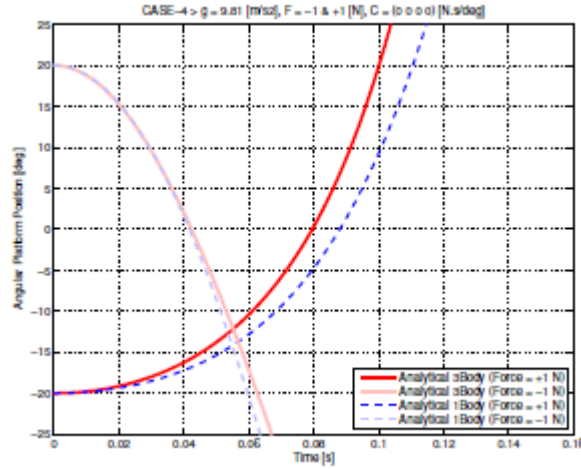
Son olarak, Şekil 25’te düzlemsel mekanizmanın sadece hareketli platform kütesinin hesaba katıldığı analizi ile bütün gövdelerin kütesinin hesaba katıldığı analizi, yerçekimi etkisi ve eyleyici kuvveti etkisi altında karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Hareket açısının ve süresinin kısıtlı olduğu durumlarda sadece platform kütlesi ile hesap yapılabileceği, daha uzun ve büyük açılardaki hareketlerde ise eyleyici gövde ve milinin de kütlelerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmış olup, eyleyici kontrolcüsü tasarımında bu modellerin kullanılması yeterli olmaktadır.



Şekil 23: Düzlemsel mekanizmanın eyleyici kuvveti etkisi ile yaptığı sürtünmesiz hareket simülasyonu ve analitik model ile Simulink modelinin karşılaştırılması



Şekil 24: Düzlemsel mekanizmanın eyleyici kuvveti etkisi ile yaptığı sürtüneli hareket simülasyonu ve analitik model ile Simulink modelinin karşılaştırılması



Şekil 25: Düzlemsel mekanizmanın eyleyici kuvveti etkisi ile yaptığı sürtünmesiz hareket simülasyonu - tek gövdeli ve üç gövdeli modellerin karşılaştırılması

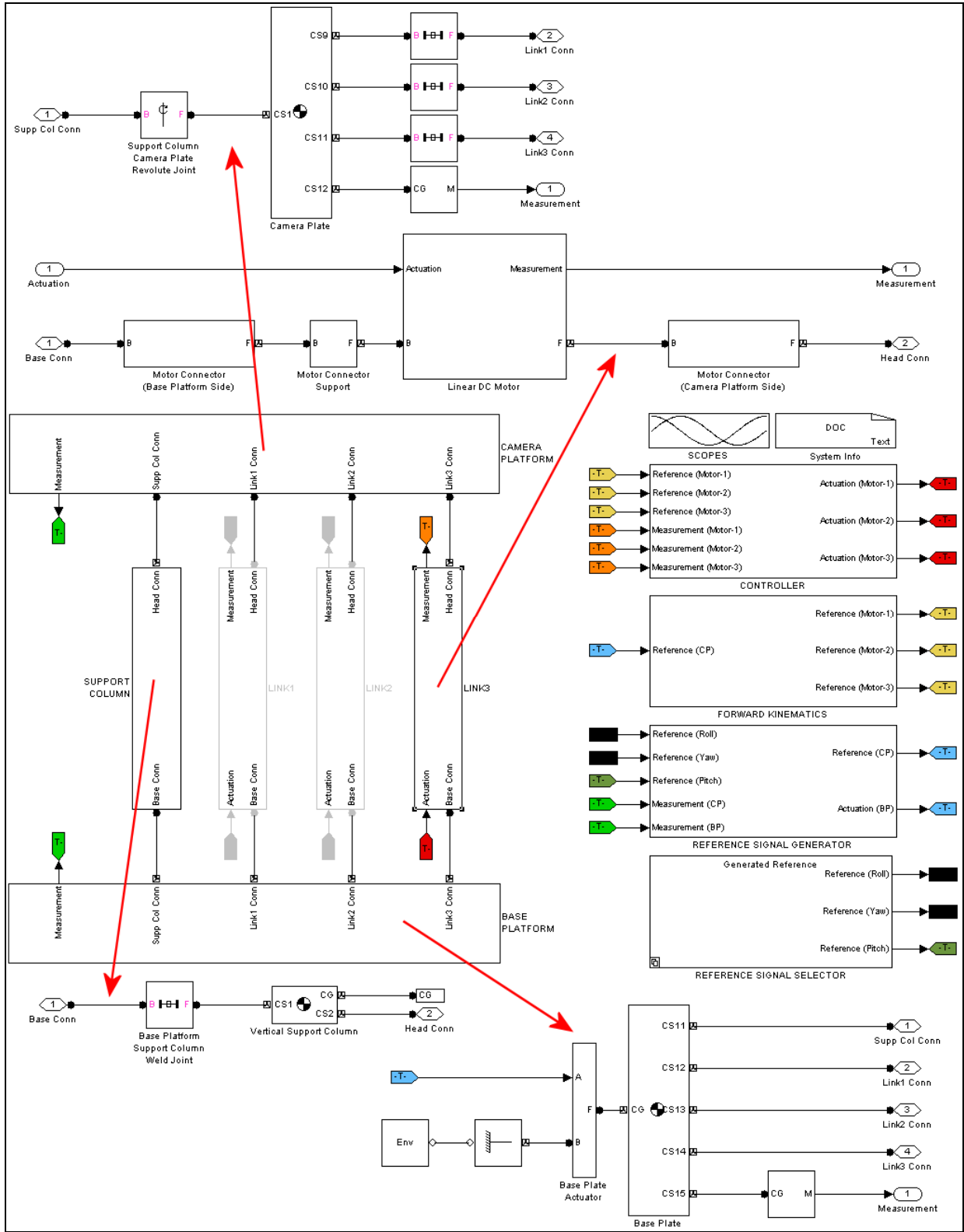
2.3 Kafa Tasarımının Matlab-SimMechanics ile Benzetimi

Projemiz kapsamında geliştirilen kafa tasarımının kuramsal modellemesi çalışmaları devam ederken, Matlab-Simulink nümerik analiz programı kapsamında geliştirilmiş olan SimMechanics altyapısı ile mekanik sistemlerin modellemesinin mümkün olduğu ve bu yolla bir benzetim modeli geliştirilmesinin, paralel ve doğrulama amaçlı çalışmalarına hizmet edeceğini farkettilik. Bu yolla geliştirilen bir benzetim modeli, kuramsal bir model olmadığından o alanda bir katkı sağlamamakla birlikte, bir model geliştirme sırasında kaçınılmaz olan bazı varsayımları yapmaksızın sistemin davranışını nümerik olarak benzetme imkanı verdiği için, donanım tasarım ve üretimimiz tamamlanıncaya kadar bize algoritmalarımızı deneme imkanı verecekti. Gerçekten de aşağıda detaylandıracağımız çalışma sonucunda ortaya çıkan model, çok daha sonraları, mekanik düzeneğin üretim ve montajında da hataları bulma ve düzeltme konusunda bize çok yardımcı oldu. Karşılaştırmalı benzetim çalışmalarımızın bir kısmı (düzlemsel düzenek ile) saygın uluslararası bir Matematik dergisine kabul edilerek yayın şansı yakaladı. Daha sonra 3 eksenli donanım deneyleri ile de birleştirilerek başka yayınlar çıkmasını da sağlayacağını düşünüyoruz.

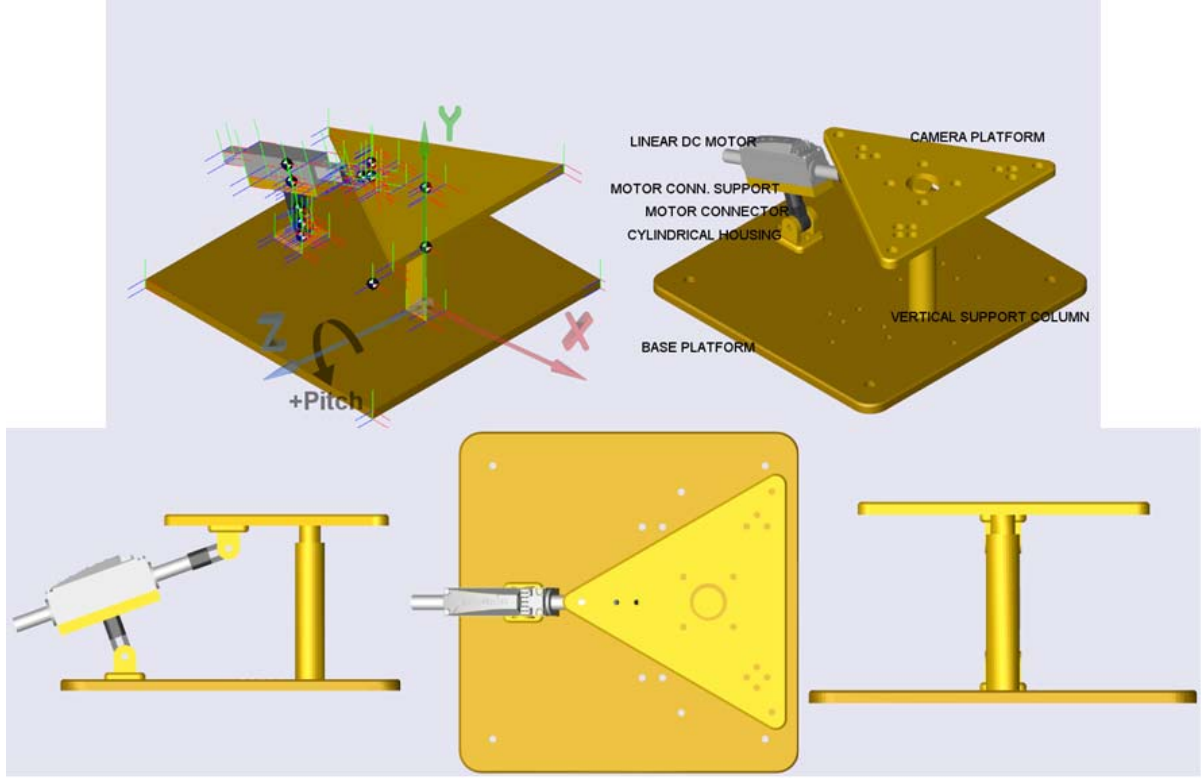
Proje önerisinde bahsedildiği üzere çalışmalar iki boyutlu ve üç boyutlu kamera platformu stabilizasyonu alanında ilerlemek üzere planlanmıştır. Her iki problem de üretim maliyet ve işgücünü azaltmak maksadı ile ortak bir platform tasarımı üzerinde yürümek üzere planlanmıştır. Normalde tek eksenli bir platform stabilizasyon probleminin doğrusal bir eyleyici kullanılarak çözülmesi gerekmeyele beraber üç eksenli problemin basit bir hali olduğu için bu şekilde bir ara adım olarak bu çalışmalar yapılmıştır ve bizim için çok öğretici olmuştur. Bu çalışmalar bize üç eksenli sistemin bir ön çalışmasını yapma ve kullanılacak eyleyicileri sınaama şansı vermiştir. Genel olarak üç boyut için geliştirdiğimiz modellerimizin bu basit problemde sağlamasını yapmış olmaktadır.

Problemin mekanizma analizlerini yapmak üzere MATLAB SimMechanics yazılım paketinde sistemin bir modeli oluşturulmuştur. Bu modelde kullanılacak tüm hareketli parçaların kütsel özellikleri malzeme özellikleri kullanılarak katı model dosyalarından elde edilmiştir. Mekanizmanın Sim Mechanics modeli Şekil 26'de görülmektedir. SimMechanics yazılım paketi ile görsel amaçlı olarak sistemin katı modeli animasyon yapmak için etkileşimli olarak kullanılabilir. Bu amaçla sistemin parçalarının katı modelleri kullanılarak üç boyutlu bir görsel bir çalışma da yapılmıştır. Böylece simulasyon sonuçlarını görsel olarak değerlendirmek de mümkün olmaktadır (Şekil 27).

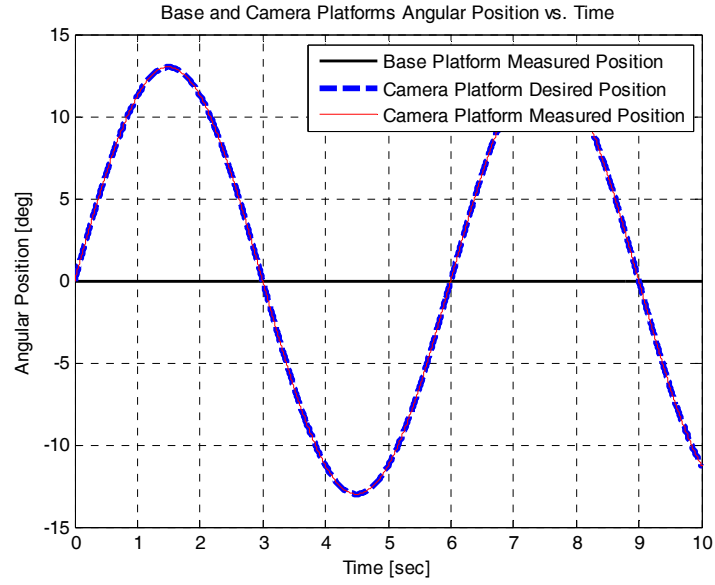
Geliştirilen kinematik modeller ve SimMechanics modeli kullanılarak takip (Tracking) ve stabilizasyon (Stabilization) simulasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda kontrolcü geliştirilmesinden ziyade kinematik denklemlerin doğrulamasının yapılması amaçlanmıştır. Örnek olarak verilen Şekil 28'de görüldüğü üzere kamera platformuna verilen sinüs dalgası şeklindeki açı komutu kinematik bağıntılar kullanılarak eyleyici boyu komutuna dönüştürülmekte ve kamera platformu bu şekilde istenen açığa konumlandırılmaktadır. Stabilizasyon simulasyonunda ise kamera platformu tahrik mekanizmasının bağlı olduğu alt plakaya verilen açı komutunun tersi kamera platformuna komut olarak gönderilerek kamera platformunun yere göre nötr konumda kalması sağlanmaktadır (Şekil 29). Bu simulasyonda da geliştirilen kinematik bağıntılar kullanılarak platforma verilen açı komutu eyleyici komutuna dönüştürülmektedir.



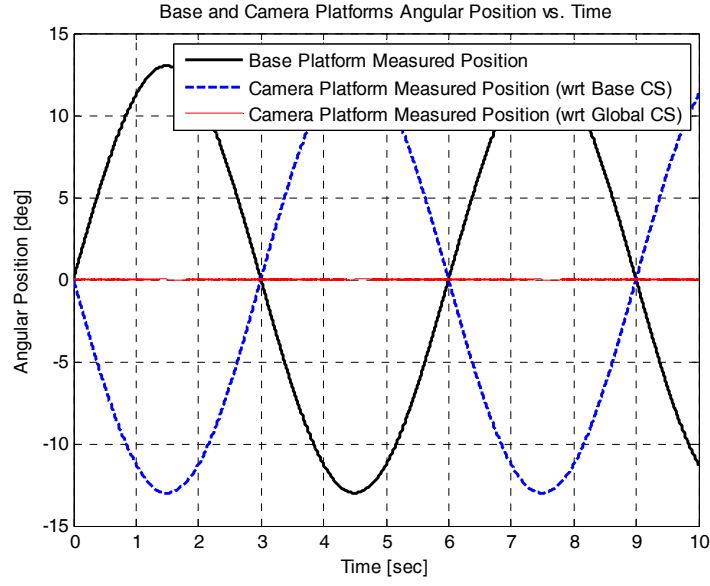
Şekil 26: Mekanizmanın SimMechanics Modeli



Şekil 27: Görsel amaçlı olarak kullanılan mekanizmanın sanal modeli



Şekil 28: Kamera platformunun sinüsoidal bir açı sinyalinin takip simülasyonu



Şekil 29: Kamera platformunun sinüsoidal bir bozucu için stabilizasyon simülasyonu

2.4 Düzlemsel (1-DOF) Kafa Tasarımı ile Deneysel Çalışmalar

(a) Deney Düzeneği ve ilk deneyler

Matematiksel çalışmaların doğrulamasını yapabilmek için bir deney düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 30). Bu düzenek üretilen mekanizma parçaları, temin edilen eyleyici ve muhtelif bağlantı parçalarından oluşmaktadır. Eyleyici kendine özgü bir motor sürücüsü tarafından sürülmekte ve bu motor sürücüsü ile seri protokol (RS-232) üzerinden veya analog komut girişinden haberleşilebilmektedir. Burada sunulan deneyler seri protokol üzerinden yapılan haberleşme kullanılarak yapılan deneyler olacaktır. RS232 protokolü üzerinden doğrusal eyleyiciye konum komutu gönderilebilmekte, eyleyicinin mil konumu okunabilmekte, bir takım kontrolcü parametreleri değiştirilebilmekte ve bunun gibi bir takım bilgi alışverişi yapılabilmektedir. Fakat seri haberleşme protokolünün yapısından kaynaklanan bir takım gecikmelerin varlığının kafa platformu kontrolü performansını olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu durumu sınamak için eyleyici değişik periyodlu kare dalga sinyallerle sürülerek elde edilen mil konumu gözlenmiştir (Şekil 31).

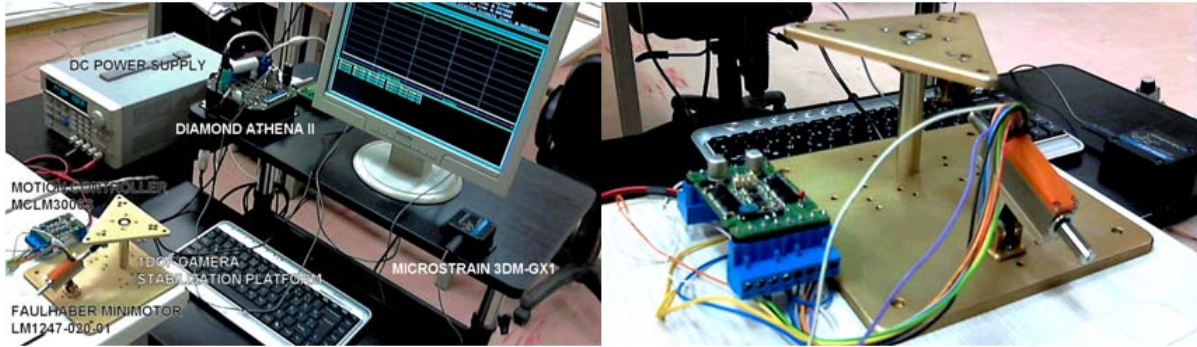
Bu deneylerde anlaşıldığı üzere eyleyicileri seri protokol üzerinden kontrol etmek oldukça düşük bir örnekleme hızı ile mümkün olabilmektedir. Ancak robot platformumuzun hareketinin de 10Hz gibi bir bant genişliği ile sınırlı olduğunu, daha yüksek frekansların ise sadece "titreşim" ögelerinden oluştuğunu ve pasif süzgeçleme yaklaşımları ile süzülebileceğini düşünüyoruz. Yine de daha sonraki çalışmalarımızda daha yüksek bir frakansta örnekleme yapabilmek için motor sürücüsünün analog haberleşme kanalından konum komutlarının gönderilmesi yapılmış, eyleyicilerin konum bilgilerinin okuması için ise seri haberleşme kanalının işgali yerine doğrudan hall-etkisi sensörlerinin voltaj değerlerinin okunarak konum hesaplanması için gerekli hesapsal altyapı geliştirilmiştir.

Kullanılan doğrusal eyleyiciler fırçasız doğru akım motorları ile aynı prensipte çalışmaktadır. Bu sebeple konum kontrolü amacıyla kullanabilmek için kendi sürücülerini de temin edilmiştir. Bu sürücüler üzerinde tümleşik olarak kendi PID kontrolcülerini bulmaktadır. PID kontrolcü

parametreleri üretici firma tarafından genel kullanım için ayarlanmış durumdadır fakat gerektiği durumda (mesela eyleyicinin hareket ettirdiği yükün durumuna göre) kontrolcü katsayıları kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Bu konuda da muhtelif çalışmalar yapılmış ve değişik kontrolcü parametreleri ile deneyler yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir örnek Şekil 32'de verilmektedir. Daha ileride, PID kontrolcu parametrelerinin daha kontrollu deneyler ile optimize edilmesi çalışması sunulacaktır.

(b) Ataletsel Algılayıcı ile Kapalı Döngü Konum Kontrol İlk Deneyleri

Son olarak şu ana kadar yapılmış çalışmaların bir birleşimi olarak düzlemsel mekanizmanın bir açısız konum algılayıcısından gelen sinyallerle sürülmesi ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır (Şekil 33). Bu çalışmanın amacı mekanizmanın ilerideki kullanımı ile ilgili bir benzerlik taşımasıdır. Robot platformu üzerine bağlı olan kafa platformu bu platformlara bağlı açısız hız veya açısız konum algılayıcılarından elde edilen sinyallere göre hesaplanan komutlarla sürülecektir. Bu deneyde kullanılan açısız konum algılayıcısından elde edilen sinyalin kafa platformu tarafından takip edilmesi senaryosu gerçekleştirilmiştir. Platformun takip edebileceği sinyalin bant genişliği kabaca bertaraf edebileceği bozucu sinyalin bant genişliğine eşit olacaktır. Burada seri haberleşme protokolünün gecikmeleri sebebiyle yüksek hızlara çıkılmamış olsa da daha sonraki çalışmalarımızda bu işlemi eyleyicinin fiziksel sınırlarına ulaştırmak üzere çalışmalar analog haberleşme opsiyonunu kullanarak MATLAB xPC Target gerçek zamanlı kontrol donanımı ile yapılmıştır.



Şekil 30: Çalışmalarda kullanılan deney düzeneği. İlk aşamada tek eksenli montaj yapılarak, daha sonra ise 3 eksenli montaj yapılarak kullanılmıştır.

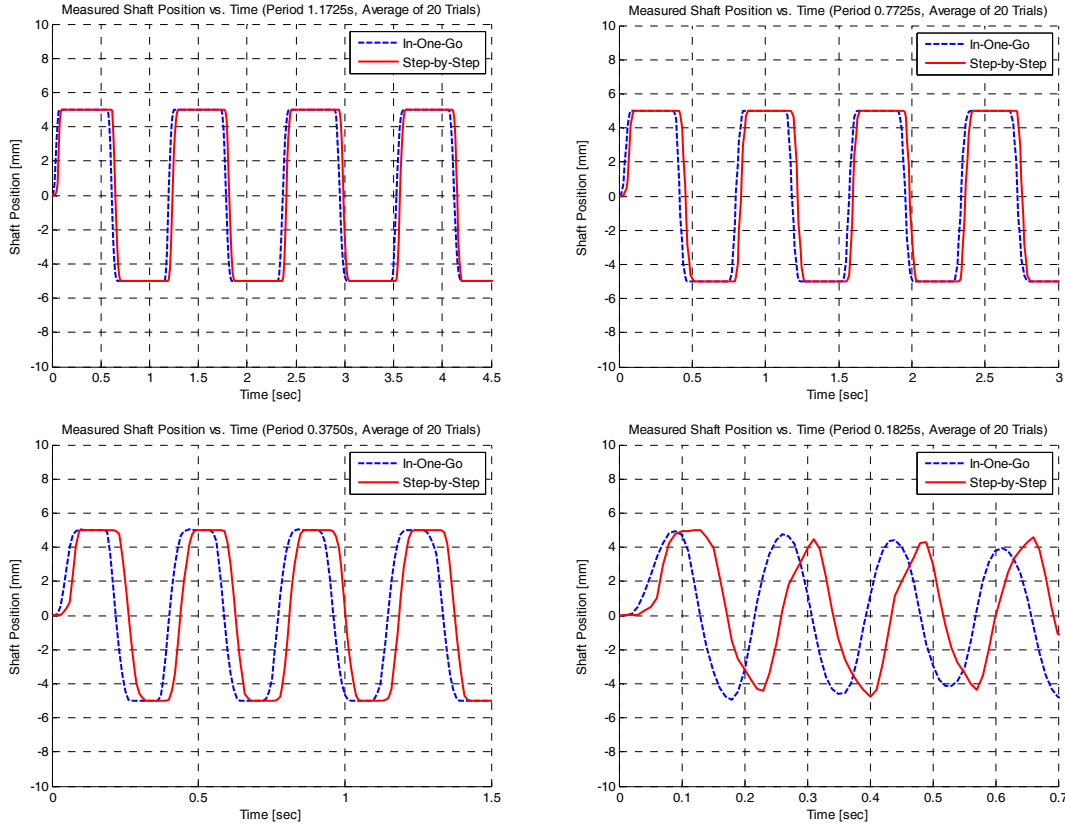
(c) Düzlemsel Kinematiğin Geçerlenmesi

Düzlemsel düzeneğimiz ile yaptığımız önemli çalışmalardan bir tanesi, düzlemsel kinematiğin kuramsal analizinin deneysel çalışmalarla geçerlenmesi olmuştur. Kuramsal formülasyon, benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmaların karşılaştırmalı bir çalışması, bir uluslararası dergiye kabul edilerek yayın şansı bulmuştur ve raporumuza eklidir.

Şekil 34'de, düzlemsel kafa kontrolü için kurduğumuz ve Motor-Platform-IMU mekanizması, motor kontrolcüsü, gerçek zamanlı XPC Target işletim sistemini koşturan PC-104 gömülü bilgisayar ve güç kaynağından oluşan deney düzeneği görülmektedir.

Kafa kontrolüne yönelik donanım ile yaptığımız deneysel çalışmalardan ilki, kuramsal olarak elde ettiğimiz düzlemsel kinematik modelin geçerlenmesi olmuştur. Bu amaçla düz bir zemin üzerine yerleştirilen düzeneğin kontrol edilen platformuna açısız limitleri içerisinde artan açısız bir hareket yaptırılmış ve bu açısız konum IMU ile ölçülmüştür. Yavaş verilen hareketlerde IMU'nun, ivme ölçerlerin yerçekimi ivme vektörünün bileşenlerini kullanarak

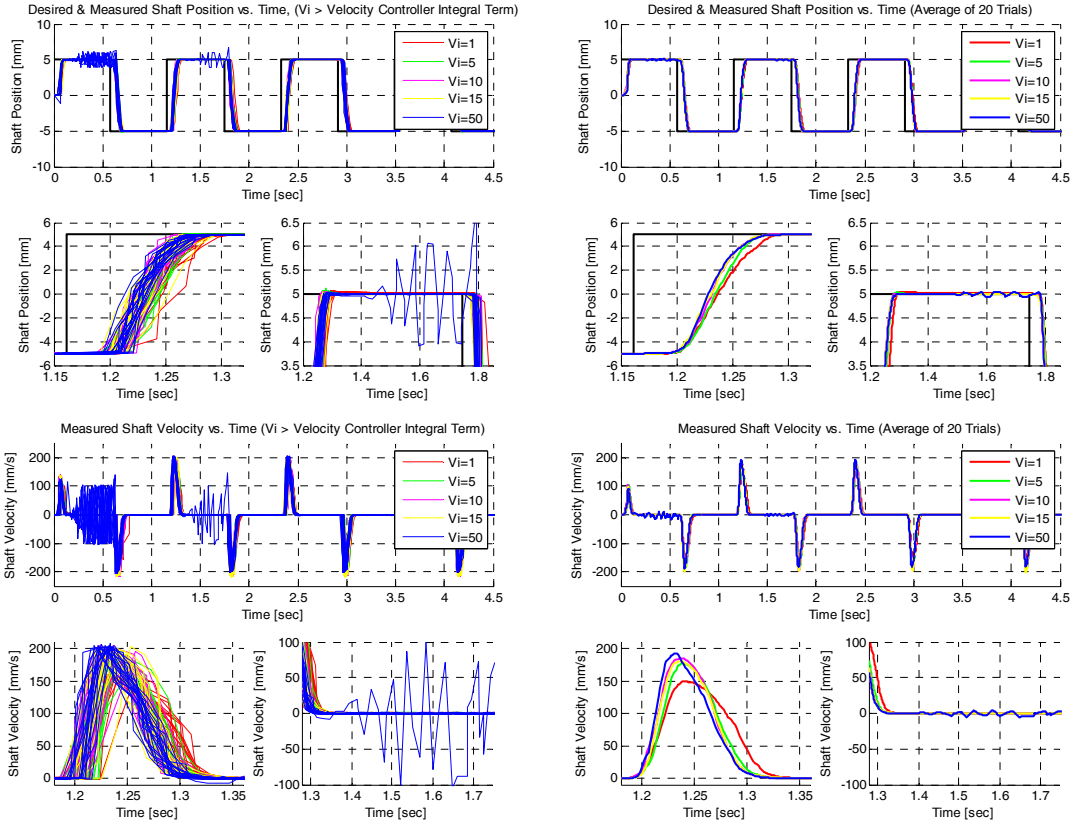
olduğu hassas biçimde açısal konum verebildiği söylenebilir. Platformun bazının hareket etmediği varsayımı altında IMU'den okunan açı, kinematik denklemler yardımı ile motor şaft uzunluğuna çevrilmiş aynı zamanda motor şaft uzunluğu Hall effect algılayıcıları yoluyla hesaplanmıştır (aynı zamanda seri arabirim üzerinden kontrocudan da okunmuştur). Bu iki şekilde elde edilen şaft uzunlukları karşılaştırıldığında, Şekil 35'deki sonuçlar elde edilmektedir. Burada, sabit bir bias dışında (ki bu bias değeri masaki eğrilik veya IMU'de bulunan bir bias olabilir) çok düzgün bir biçimde örtüşmektedir. Bu örtüşme kinematik modelimizin doğruluğunu ortaya koymaktadır.



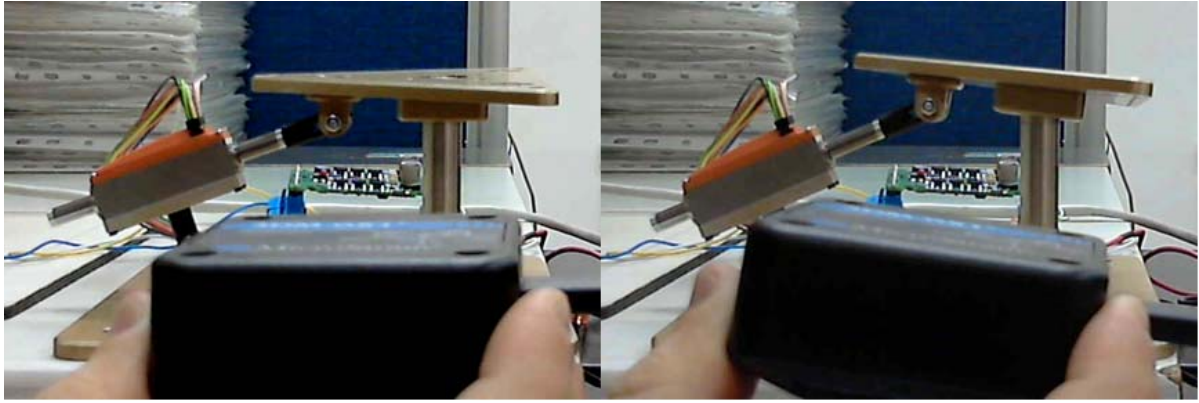
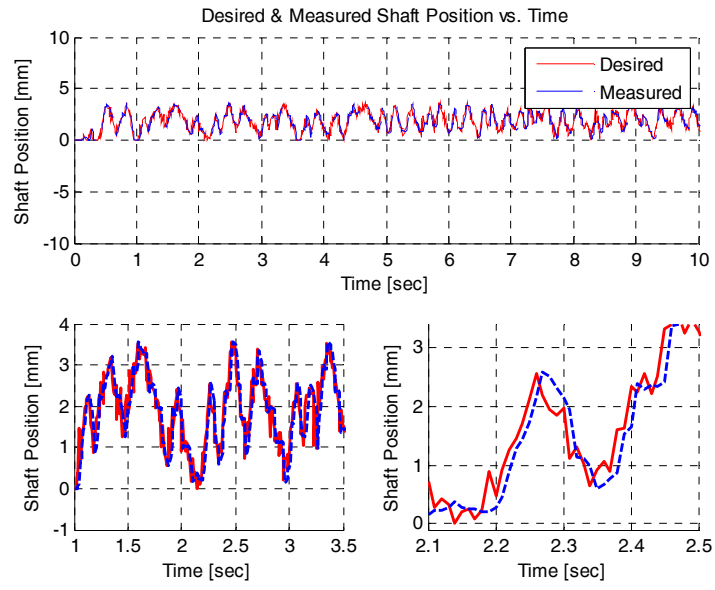
Şekil 31: Eyleyici konum kontrolü gecikmeleri üzerine tek eksenli düzeneğe yapılan deneyler

(d) İki değişik hızda ilk aşama açısal pozisyon kontrol deneyleri

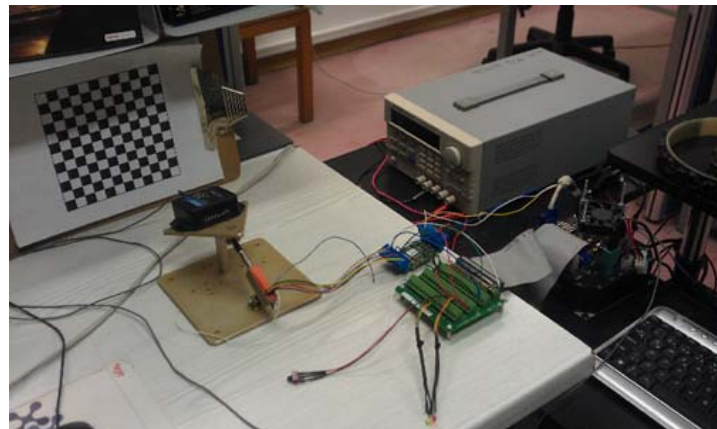
Bunun ardından çalışmamızda, geçerlenen bu kinematik modeli kullanarak yavaş ve yüksek hızlarda IMU'dan okunan açısal pozisyon tahminini geri besleyerek motor'un alması gereken şaft uzunluklarını belirledik ve bu şekilde bağımsız eklem bir pozisyon kontrol yaklaşımının performansını değerlendirdik. Bu amaçla masa üzerinde açısal hareket gösterebilecek dairesel elemanlar üzerine (robotumuzun kompozit bacakları) yerleştirilen kafa düzeneği yaklaşık periyodik bir harekete tabii tutulmuştur. Şekil 36'de, deneysel kafa düzeneğimizin bu kontrol deneylerinde kullanılmak üzere dairesel elemanlar üzerinde açısal harekete maruz bırakılması gösterilmektedir.



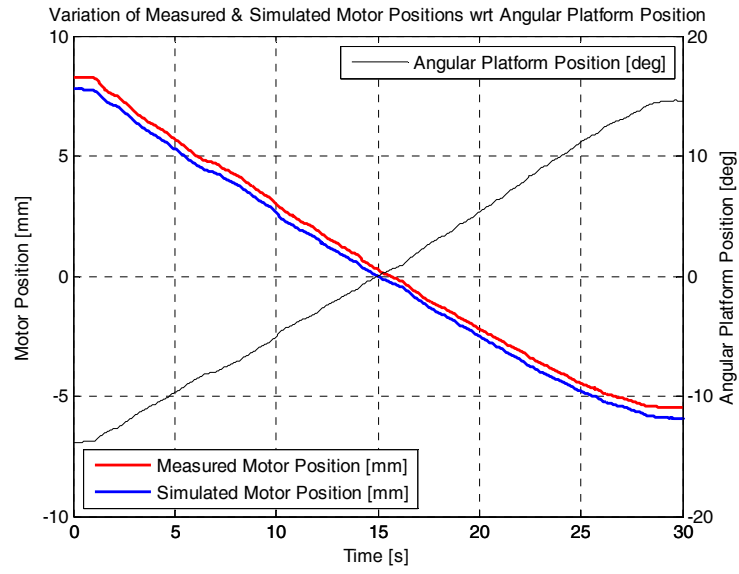
Şekil 32: Değiştirilmiş eyleyici kontrolcü parametreleri ile yapılan deneyler



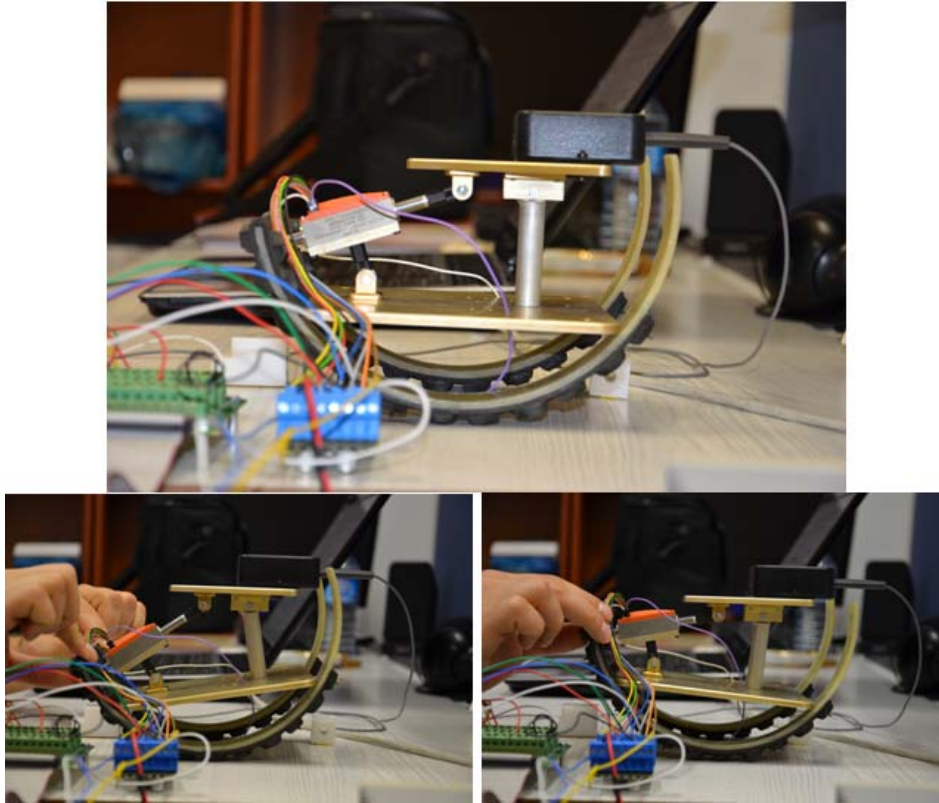
Şekil 33: Düzlemsel mekanizma ve açisal konum algılayıcısı ile yapılan deneyler



Şekil 34: Kafa kontrolü düzlemsel deneysel düzeneği genel görünüm

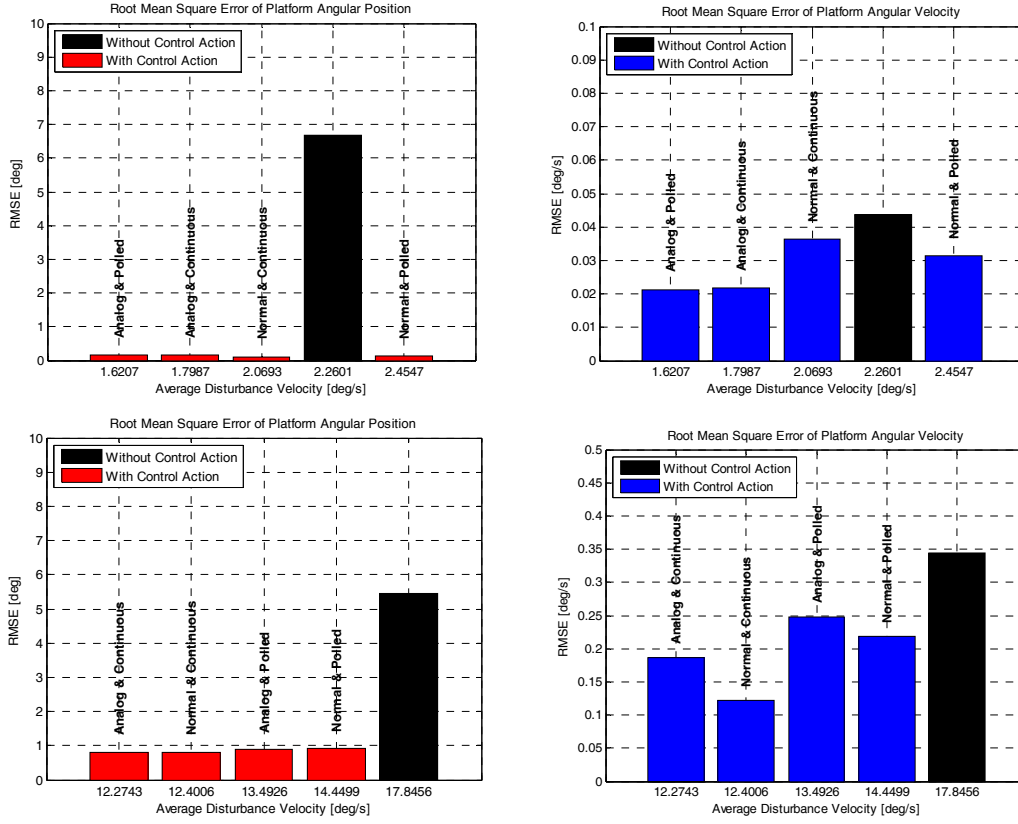


Şekil 35: Kinematik konum hesabı ile IMU'den ölçülen açıl pozisyon



Şekil 36: Kafa kontrolü düzlemsel deneysel düzeneğinin tek eksenli açıl hareket girdisi verilebilmesi için dairesel elemanlar üzerine yerleştirilmiş hali. Alt iki fotoğraf kontrol deneyleri sırasında çekilmiştir.

Elde ettiğimiz sonuçlar, Şekil 37’de özetlenmiştir.



Şekil 37: İki değişik hızda pozisyon kontrol deney sonuçları. IMU’den alınan pozisyon geri beslemesi ile hesaplanan şaft düzeltme uzunlukları, motora şaft uzunluğu referans sinyali olarak verilmiş ve bu sinyal bağımsız PD kontrol ile takip edilmiştir.

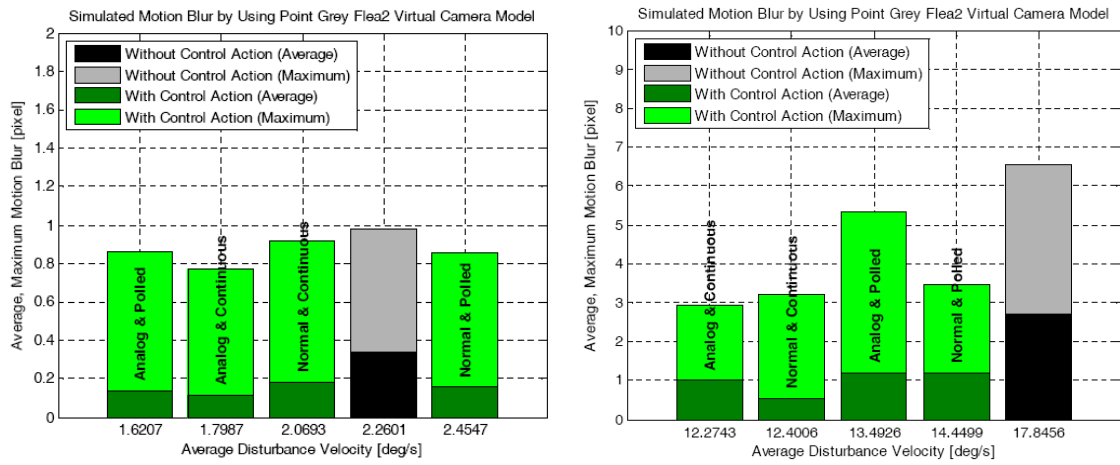
Yukarıda verilen şekilde ilk iki grafik yavaş hız için, son iki grafik de artırılmış bir hızda verilen bozucu işaretin kontrolcu tarafından nasıl takip edilebildiğini ve konum hatalarının bu şekilde nasıl azaltılabildiğini göstermektedir. Bu kontrol yaklaşımı bir ilk deneme olmakla birlikte önemli birkaç sorunu vardır: İlk olarak, çıplak motor şaftının kontrolü ile tune edilmiş PD kontrolcunun, entegre platforma bağlı olarak çalıştırılması söz konusudur. Entegre sistemin dinamiği tamamen farklı ve dolayısı ile gerektirdiği kontrolcu parametreleri tamamen farklıdır. Nihai bir pozisyon kontrolcusunun ya sistemin doğrusallaştırılmış modeli üzerinden tasarlanması ya da kapalı döngü bir optimizasyon süreci ile elde edilmesi gereklidir. Dolayısı ile (ortalama) pozisyon hatalarının çok daha başarılı azaltılması mümkün olabilir.

Yapılan fiziksel kontrolcu deneylerinin ortaya çıkan hareket bulanıklığına etkisini anlamak amacı ile geliştirilen kamera benzetim ortamı kullanılmıştır. Bu benzetim ortamı tüm kamera kalibrasyon parametrelerini içermekte hareket bulanıklığı ile ilgili oldukça gerçekçi sonuçlar vermektedir. Projemizde kullandığımız PointGrey Flea2 kamerasının tarafımızdan çıkartılan kalibrasyon parametreleri Şekil 38’de verilmiştir.

Intrinsic Parameters	
Model	Point Grey Flea2
Focal Length [pixel]	[466.3875, 465.6849]
Principle Point [pixel]	[306.3135, 235.5128]
Skew Coefficient	0
Distortion Coefficient	[-0.3513, 0.1250, 0.0013, 0.0023, 0]
Resolution	640x480 (4:3)
Radiometric Parameters	
Frame Rate [1/s]	25
Shutter Speed [1/s]	60

Şekil 38: PointGrey Flea2 kamera ve objektifi kalibrasyon parametreleri.

Yukarıdaki kontrolcu performans sonuçlarının, benzetim ortamında hareket bulanıklığı olarak verdikleri sonuçlar ise Şekil 39'de sunulmuştur.



Şekil 39: İki değişik hızda pozisyon kontrolü sonucu ortaya çıkan ortalama ve maksimum hareket bulanıklığı benzetim sonuçları. (a) Düşük hızda bozucu işaret, (b) Yüksek hızda bozucu işaret.

Bu sonuçlarda hareket bulanıklılığının kamera pozisyon kontrolü altında hem ortalama, hem maksimum değerlerde azalma gösterdiği ve hareket hızı ve sonucundaki bozulma miktarı arttıkça kazanımların artmakta olduğu gözlemi yapılmıştır.

(e) Düzlemsel Düzenek PID Kontrol Optimizasyonu

İlk denemelerimizi takiben, motor kontrolcuları üzerinde bulunan PID kontrolcülerinin manuel deneyler ile ayarlanması (tuning) için deneyler yapılmış ve tek eksenli kinematik bağlı düzeneğin adım cevabı eniyilenmeye çalışılmıştır. Bunun için hem Ziegler-Nichols metodundan, hem de manuel olarak ayarlama yöntemlerinden yararlanılmıştır (Ogata, 1997). PID kontrolcünün optimize edilmesinden sonra sonuçlarda daha da iyileşme gözlenmiştir.

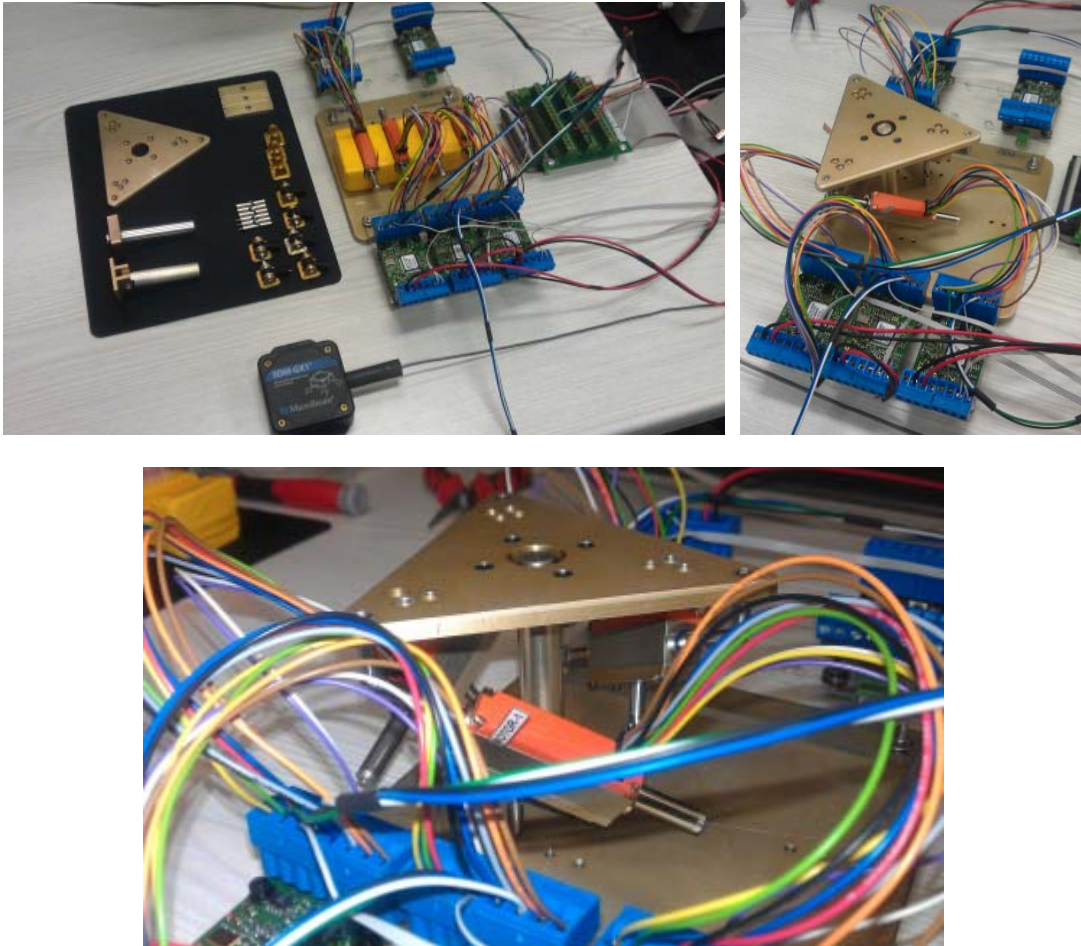
2.5 Uzaysal (3-DOF) Kafa Tasarımı ile Deneysel Çalışmalar

Düzlemsel kafa düzeneği ile yapılan deneyler sırasında 3-eksenli düzeneğimizin kinematik (açısal pozisyon ve hız) analizleri devam etmiş ve sonuçlandırılmıştır. Bu sonuçlar ile bir makale hazırlığı devam etmektedir. 3-eksenli mekanizmanın dinamik analizi ise bir doktora tezi kapsamında henüz devam etmektedir. Sonuçlanan kinematik analiz, bize her eksene ait

bağımsız bir PID kontrolcüsü ile deneyler yapma olanağı sağlamıştır. Bu deneyler, proje süremizin son günlerine kadar devam etmiştir ve bu bölümde bazı sonuçlarımız özetlenecektir.

Burada, fiziksel platform ile deneyler yapmaya başladığımızda karşılaştığımız bazı önemli zorluklara değinmek yerinde olacaktır. Bu sorunları aşmak bizim için hem önemli ölçüde öğretici olmuş, hem de araştırma konularımızın gelecekteki ilerlemesi için önemli ölçüde yol açmıştır. Zorluklardan ilki, fırçasız doğrusal motorların kontrolü ve ölçülmesi ile ilgilidir. Dairesel fırçasız motorlara benzer olarak doğrusal fırçasız motorlar da üç fazda sürülen üç ayrı sargıya gerekli zamanlamaya ve genliğe sahip kontrol sinyallerinin verilmesi ile kontrol edilir. Fırçalı motorlardan farklı olarak bu kontrol, hem genlik, hem de zamanlama içeren daha karmaşık bir yöntemdir. Projemizde bu işaretleri üretebilen bir kontrolcü kartı kullandık. Ancak ileriki çalışmalarımızda kontrolcü kartının kullanılabilmesi için kuramsal bir modelinin Matlab-Simulink ortamında geliştirilmesi ve Sistem Tanıma yaklaşımları ile parametrelerinin tespit edilmesi gerekmiştir. Bu çalışma tahmin ettiğimiz ötesinde zamanımızı aldı.

3-eksenli platformumuzun montaj öncesi tüm elektromekanik bileşenleri (kontrol bilgisayarı hariç) ve platformun monte edilmiş hali Şekil 40'da gösterilmiştir.



Şekil 40: 3-eksenli ve 3 serbestlik dereceli kafa düzeneği. (a) Montaj öncesi elektronik ve mekanik bileşenler, (b-c) Montaj sonrası platform görünümü

İkinci zorluk, referans işaretlerinin karta verilmesi için kullanılması gereken iki yöntem: seri iletişim ve referans voltajı yöntemlerinin kullanılması ve çıktıdaki şaft uzunluklarının ölçülmesinde yaşandı. Hem referans işaretinin verilmesi, hem de çıktı işaretinin ölçülmesinde seri iletişimin kullanılması, kontrol döngüsünün hedefimizin çok altında hızlarda kapanabilmesine sebep oldu. Bu durumu aşabilmek için şaft uzunluklarının ölçülmesi için motor üzerindeki hall-etkisi algılayıcıları Matlab modellerimizi koşturan ve XPCTarget gömülü işletim sistemi kullanan gömülü bilgisayar katımız üzerindeki Analog-Sayısal dönüştürücü kanallarına doğrudan bağlayarak bu algılayıcıların analog voltaj değerlerinin şaft pozisyon değerlerine dönüştürmek için gerekli kuramsal dönüşümleri elde etmemiz ve kullanmamız gerekti. Başarılı sonuçlar elde ettik. Ancak güçlü motorlara yakın yerlerden ayrı bir kart ile voltaj değerlerinin ölçülmesi belli oranda gürültü artışını ve bu gürültü ile baş edebilmek için bazı süzgeçleme tedbirleri almayı gerektirdi. Bunun yanında motorlara referans emirlerinin verilmesi sonucunda kontrolcu cevabında dahili bir gecikme gözlemlendi. Bu gecikme, seri iletişim altında daha büyük, analog voltaj olarak verilen emirlerde ise daha küçük olarak ortaya çıktı. Bu gecikmeler, mevcut sonuçlarımızda biraz daha düşük bir kontrolcu performansı olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürmekte olan doktora çalışmasının ileriki adımlarında bu gecikmeyi dikkate alan kontrolcular ile deneyler yapmayı planlıyoruz.

Motorlarımızın mekanizmaya montajı öncesinde derbest hareketinin görüntülediği video verilerine aşağıdaki linkler ile ulaşılabilir:

https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/xt49hJybL0/2013_09_Kafa_Deney_Videoları/motor_bosta_deneyleri_1_degisken_genlikli_kare_dalga.mp4

https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/LFu5XJrzBL/2013_09_Kafa_Deney_Videoları/motor_bosta_deneyleri_2_faz_farkli_sinus_sinyali.mp4

(a) Bağımsız 3-eklemin Adım Cevap İncelemesi

Bu deneyde bağımsız PID kontrolcular ile sürülmekte olan bağımsız eksenlerin kare dalga cevapları incelenmiştir. Sıra ile üç motordan ikisi kontrolcülerin elverdiği ölçüde sıfır konumunda tutulmaya çalışılırken, diğer motor [-5, +5] [mm] arasında değer alan kare dalga ile sürülmüştür. Her üç motorun da başlangıç konumu sıfırdır.

Her bir motor kare dalga ile sürüldüğü sırada, yükselme zamanı, yerleşme zamanı, maksimum aşım gibi zaman tanım bölgesi başarımları kriterleri gözlemlenmiş, sıfır konumunda tutulmaya çalışılırken ise bozuculara karşı koyma performansı test edilmiştir.

Kamera platformunun mekanik limitlerinde, motorların yaklaşık olarak [-7,+7] [mm] arasında değer aldığı düşünüldüğünde, bu deney hareket aralığının büyük bir kısmında gözlem imkanı sunmuştur.

Bu deneyde, kontrolör parametreleri, tek serbestlik dereceli platform için optimize edilmiş değerler ile aynı olacak şekilde ayarlanmıştır.

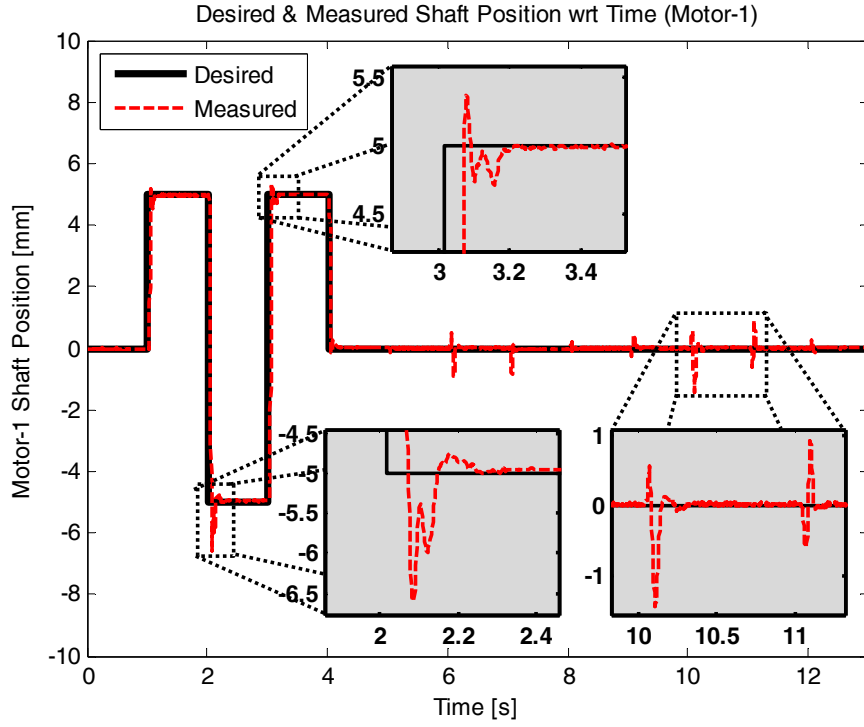
PD-tipi pozisyon kontrolörü için; $P = 40$, $D = 40$

PI-tipi hız kontrolörü için; $P = 40$, $I = 1$

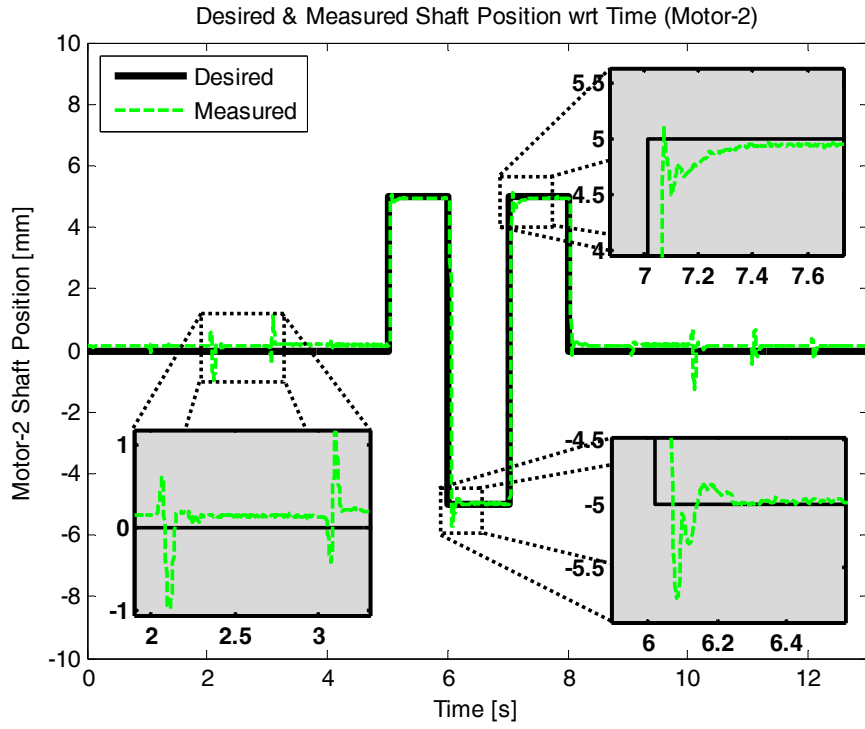
NOT-1: Tüm deneyler "Symmetrical Layout with Universal Joint" konfigürasyonu kullanılarak yapılmıştır.

NOT-2: Tüm deneyler, kamera platformunun üzerine MicroStrain 3DM-GX1 serisi IMU monte edilmiş halde iken yapılmıştır. Ağırlığı yaklaşık 75 [gr] dir.

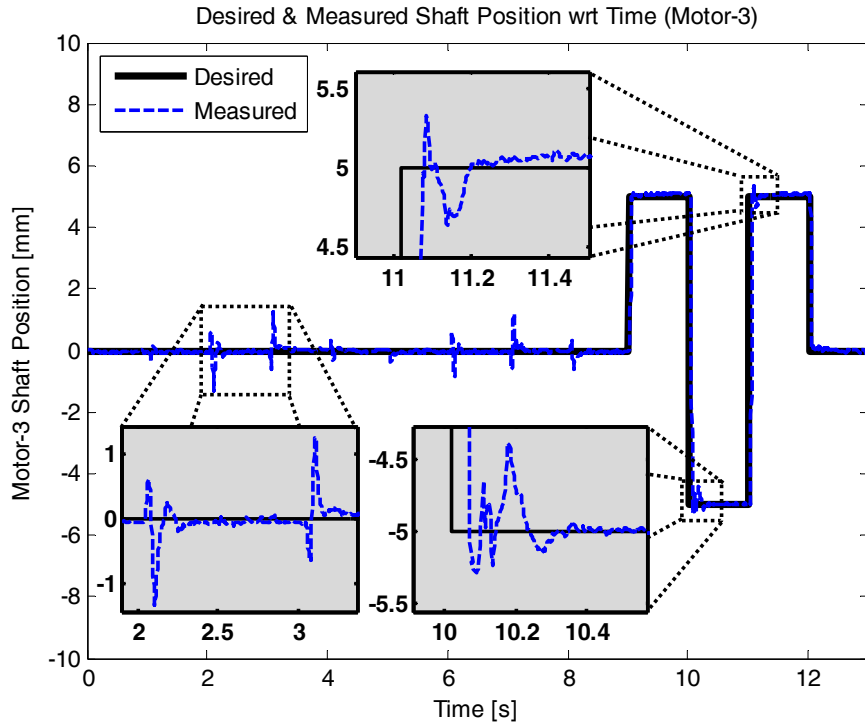
Şekil 41-Şekil 43'da 1-3 motorların sırası ile kare dalga referansı ile sürülmesi sonucunda ortaya çıkan motor pozisyon eğrileri gösterilmiştir. 0-13 saniye aralığında kare dalga referans motorlara sırası ile uygulanmakta, bu sırada diğer motorlar sıfır konumunu muhafaza etmeye çalışmaktadır. Dolayısı ile her şekilde hem doğrudan sürülen motora air adım cevabı ve kontrolcu performansı gözlenebilmekte, hem de diğer motorların hareket ettirilen motorun uyguladığı bozucu etkiyi reddetme performansı gözlenebilmektedir.



Şekil 41: 3-serbestlik-dereceli kamera stabilizasyon platformuna monte edilmiş 75 [gr] ağırlığındaki yük etkisi altında, motorların sırası ile sürülmesi sırasında 1. Motorun pozisyon davranışı.



Şekil 42: 3-serbestlik-dereceli kamera stabilizasyon platformuna monte edilmiş 75 [gr] ağırlığındaki yük etkisi altında, motorların sırası ile sürülmesi sırasında 2. Motorun pozisyon davranışı.



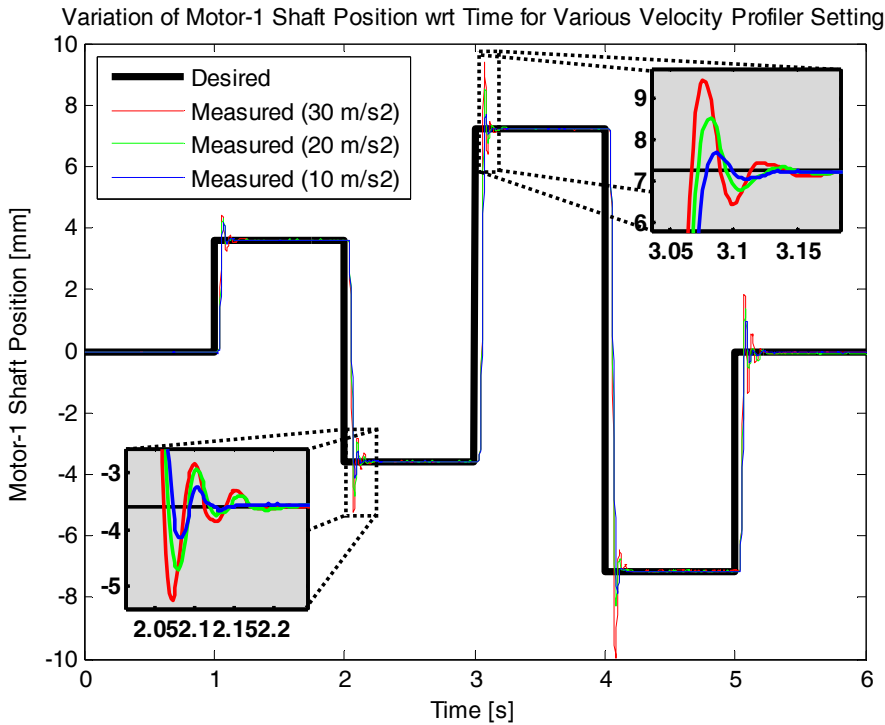
Şekil 43: 3-serbestlik-dereceli kamera stabilizasyon platformuna monte edilmiş 75 [gr] ağırlığındaki yük etkisi altında, motorların sırası ile sürülmesi sırasında 3. Motorun pozisyon davranışı.

Bu deneye ait video görüntüsüne , projeye ait web depolama alanından ulaşılabilir:
https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/UijvSDZ4Lo/2013_09_Kafa_Deney_VideoLari/2.5.a_bagimsiz_3_eklemin_adim_cevap_incelemesi.mp4

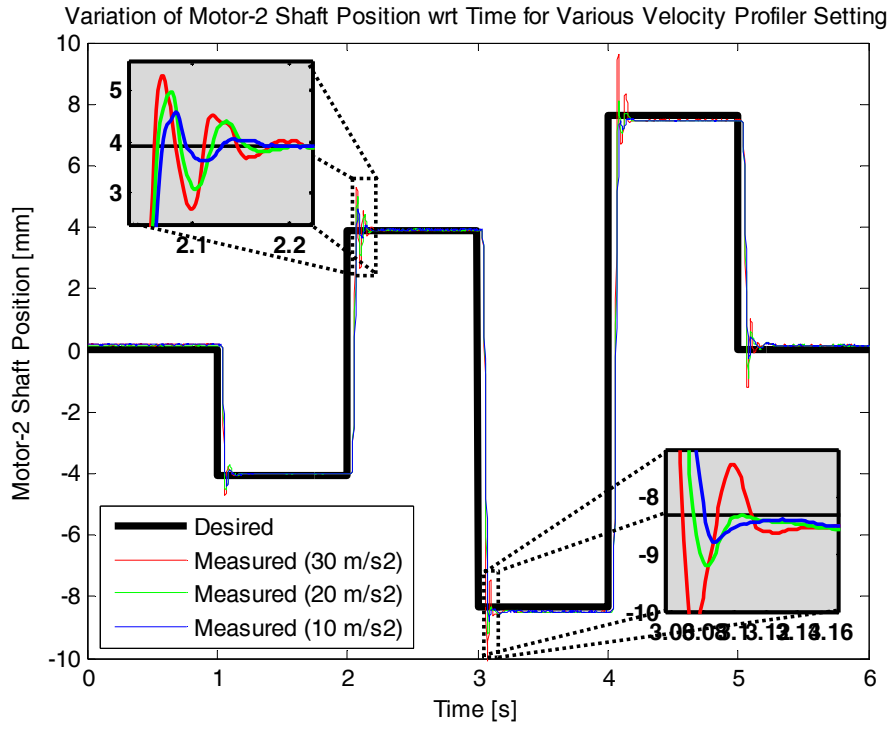
Yukarıdaki deneye ilave olarak, referans adım işaretinin motor uzunlukları yerine çıktı açılarına verildiği durumlar da deneysel olarak incelenmiştir. Doğrusal motorlar ile çıktı açıları arasındaki kinematik ilişki sebebiyle, çıktı açılarından sadece bir tanesi bile kare dalga ile sürülse, üç motor da etkin olmakta ve hareket etmektedir.

Bu deney sırasında ayrıca motora verilen adım referansına belli bir eğim verilerek bir "profil" oluşturulmaya çalışılmış ve bu yolla kontrolcü parametreleri değiştirilmeden maksimum aşım değerinin azaltılmasına çalışılmıştır. Maksimum aşım'ı azaltmak için bu yolun tercih edilme sebebi, anlık bir adım referansı verildiğinde, kontrol performansını ciddi ölçüde etkilemeden maksimum aşım'ı azaltmanın deneylerde mümkün görünmemesi olmuştur.

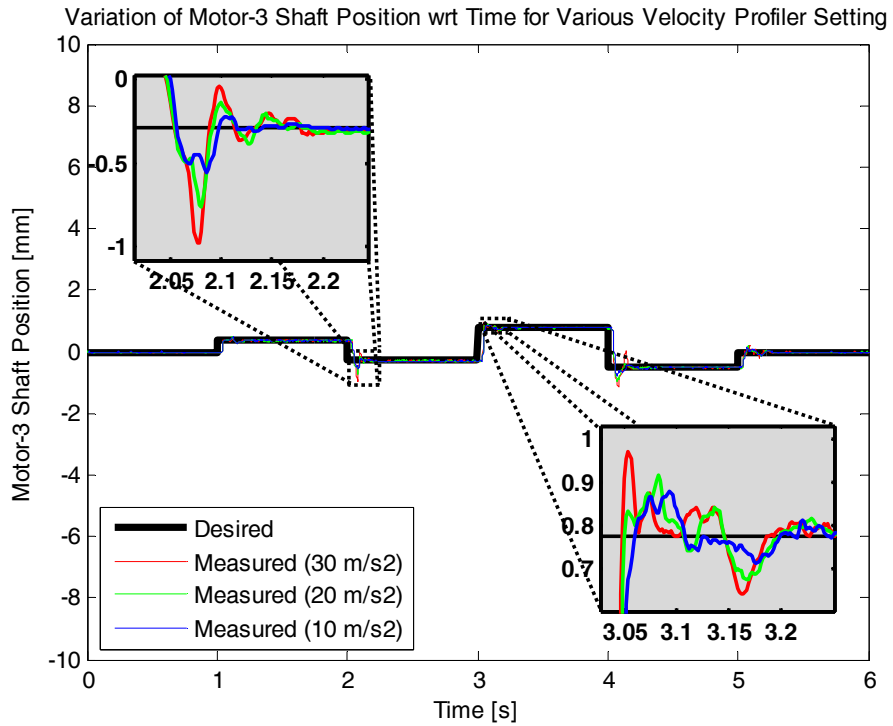
Şekil 44 - Şekil 46 arası sonuçlarda, yvarlanma (roll) açısına verilen adım referansı altında değişik ivme eğim profilleri ile performans özetlenmektedir. Şekillerden görüleceği üzere sistemin yükselme hızı önemli ölçüde etkilenmeden maksimum aşım değerini aşağıya çekmek mümkün olmuştur. Lacivert eğri bu durumu göstermektedir.



Şekil 44: Yuvarlanma eksenine verilen adım cevabının 1. Motor pozisyon cevabı üzerinden incelemesi.



Şekil 45: Yuvarlanma eksenine verilen adım cevabının 2. Motor pozisyon cevabı üzerinden incelemesi.



Şekil 46: Yuvarlanma eksenine verilen adım cevabının 3. Motor pozisyon cevabı üzerinden incelemesi.

Bu sonuçlar, motorlarımızın PID kontrol altında istenen adım referanslarını makul performans ve hızda takip edebildiklerini, diğer eksenlerden gelen bozucu etkileri de bir

ölçüde bertaraf edebildiklerini göstermiştir. Kinematik denklemlerimizin doğru sonuçlar verdiğini de geçerleme imkanımız oldu. Ancak şu anda çıktı açıları ancak MEMS ataletsel ölçer yardımı ile ölçebildiğimizden mutlak çıktı açıları bağımsız bir algılayıcı ile ölçme imkanına sahip değiliz. Bu imkanı kazanmak için bir ölçme sistemi kurma çalışmalarımız devam etmektedir.

Bu deneye ait video görüntülerine , projeye ait web depolama alanından ulaşılabilir:

https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/ya504AVuyn/2013_09_Kafa_Deney_Videolari/2.5.a_hiz_profile_uretecinin_etkisi_10ms2.mp4

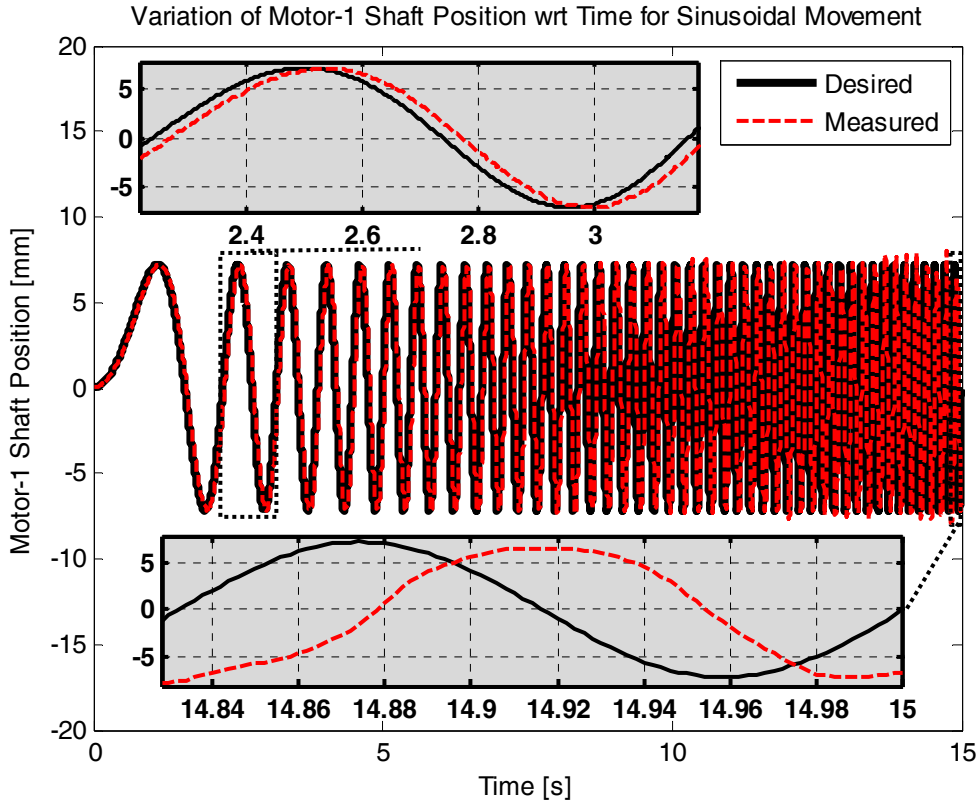
https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/pBqIDKVKUf/2013_09_Kafa_Deney_Videolari/2.5.a_hiz_profile_uretecinin_etkisi_20ms2.mp4

https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/15TFp39wC-/2013_09_Kafa_Deney_Videolari/2.5.a_hiz_profile_uretecinin_etkisi_30ms2.mp4

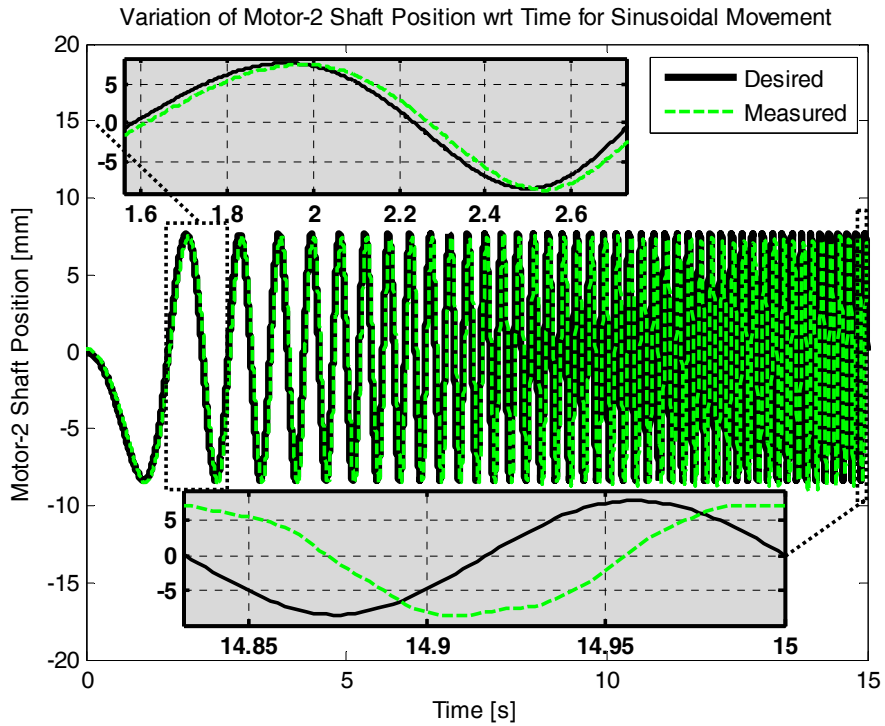
(b) Tek Eksen Değişken Frekanslı Sinus Takip Performansı

Motorlarımızın kontrolcu altında adım cevabını inceledikten sonra, kontrolcu-motor-platform düzeneğinin giderek artan frekansda sinus referans sinyaline cevabını inceledik. “Chirp” adını alan ve giderek artan frekansa sahip tek bir referans sinyalinin yuvarlanma eksenine verilmesi üzerinden performans sonuçları aşağıda Şekil 47 - Şekil 49 arasında verilmiştir. Bu örnek deneyde kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir. Deneyler tüm eksenler için de tekrarlanmıştır.

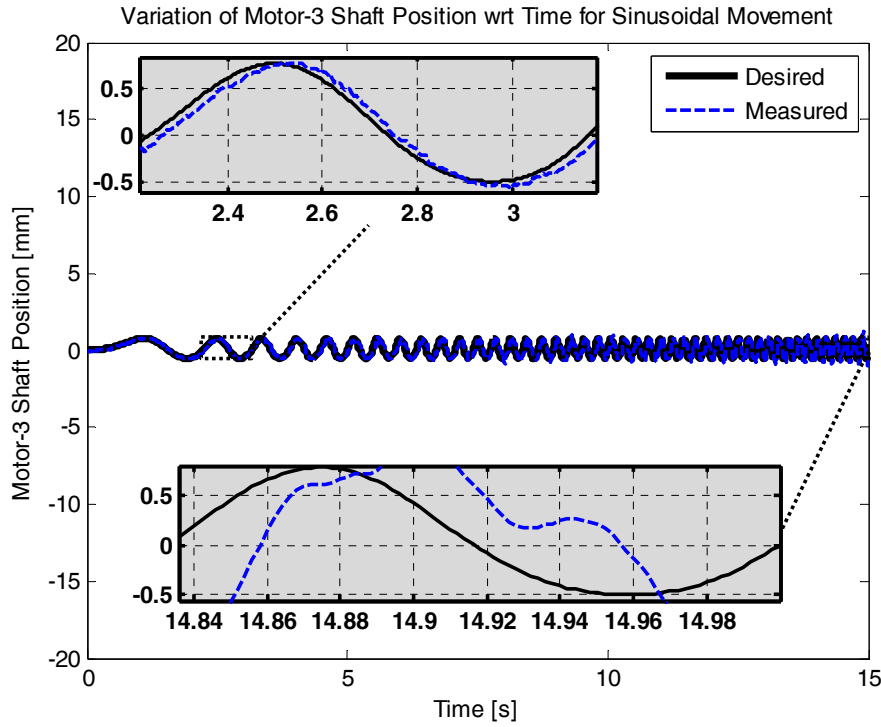
Configurasyon	: 3DOF Layout4 (Symmetric Layout with Universal Joints)
Yük	: MicroStrain 3DM-GX1 (75 gr)
Kontrolcu	: PD+PI
Kontrolcu Parametreleri	: PP = 40, PD = 10, POR = 20, I = 10, AC = 30000, DEC = 20000, SP = 10000
Senaryo	: Chirp Sinyali @ Sadece Yuvarlanma Eksen
Genlik	: [10 0 0] [deg] (Roll, Yaw, Pitch)
Frekans Kazancı	: [0.02 0 0] [-] (Roll, Yaw, Pitch)



Şekil 47: Yuvarlanma eksenine verilen değişken frekanslı referans sinyaline kontrol sisteminin cevabının 1. Motor pozisyonu üzerinden incelemesi.



Şekil 48: Yuvarlanma eksenine verilen değişken frekanslı referans sinyaline kontrol sisteminin cevabının 2. Motor pozisyonu üzerinden incelemesi.



Şekil 49: Yuvarlanma eksenine verilen değişken frekanslı referans sinyaline kontrol sisteminin cevabının 3. Motor pozisyonu üzerinden incelemesi..

Burada doğrusal kontrolcunun artan frekanslara karşı genlikte çok fazla kayba uğramadığı (referans sinyalin kontrolcunun bant genişliğinin içerisinde kaldığı) ancak doğrusal kontrolcunun artan frekanslara karşılık artan faz kaymasının sonuçlarda gözlemlendiği söylenebilir. Bu durum bize yüksek frekanslı bozulmaları başarıyla giderebilmek için ileriye dönük referans işareti tahminlemesi yapabilen model tabanlı tahminleme prensibine dayanan kontrolculardan yararlanmamız gerektiğini göstermektedir.

Bu deneye ait video görüntülerine , projeye ait web depolama alanından ulaşılabilir:
https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/ycERIPvXnw/2013_09_Kafa_Deney_Video/ari/2.5.b_tek_eksen_degisken_frekansli_sinus_takip_performansi.mp4

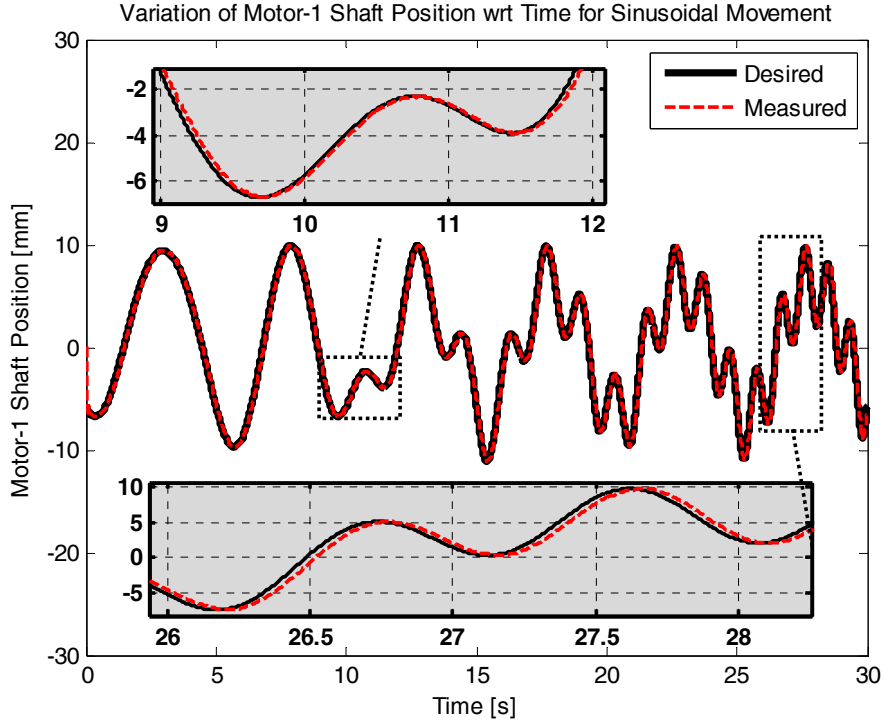
(c) 3-Eksen Sinus Takip Performansı

Bu deney için iki açılı eksenine (Yuvarlanma, Yönelim) faz farkı ile 0.2 Hz frekansında sinus uygulanırken Yunuslama eksenine ise artan frekansa sahip değişken bir sinus uygulanmıştır. Deneyin amacı, tüm eksenleri etkileyen değişken bir yörüngede sinus takip performansı hakkında bir fikir sahibi olmaktır. Deney parametreleri aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir:

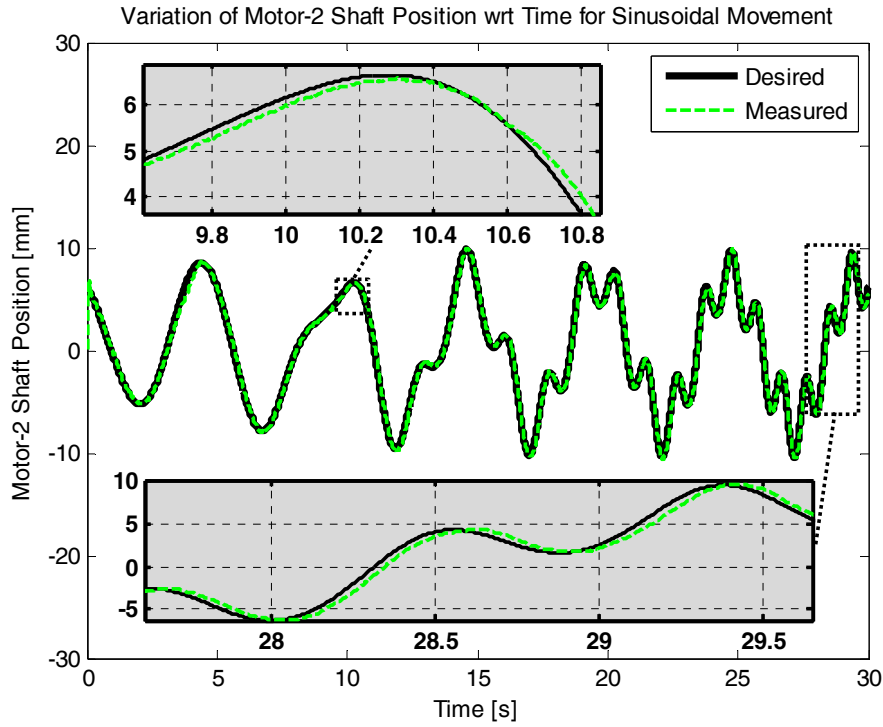
Konfigurasyon	: 3DOF Layout4 (Symmetric Layout with Universal Joints)
Yük	: MicroStrain 3DM-GX1 (75 gr)
Kontrolcu	: PD+PI
Kontrol parametreleri	: PP = 40, PD = 10, POR = 20, I = 10, AC = 30000, DEC = 20000, SP = 10000
Senaryo	: Sinusoidal Signal with Phase Difference (Roll, Yaw) & Chirp Signal (Pitch)
Genlik	: [8 8] [deg] (Roll, Yaw)
Frekans	: [0.2 0.2] [Hz] (Roll, Yaw)

Faz : [-pi/2 0] [Rad] (Roll, Yaw)
Genlik : 8 [deg] (Pitch)
Frekans değişim kazancı : 0.02 [-] (Pitch)

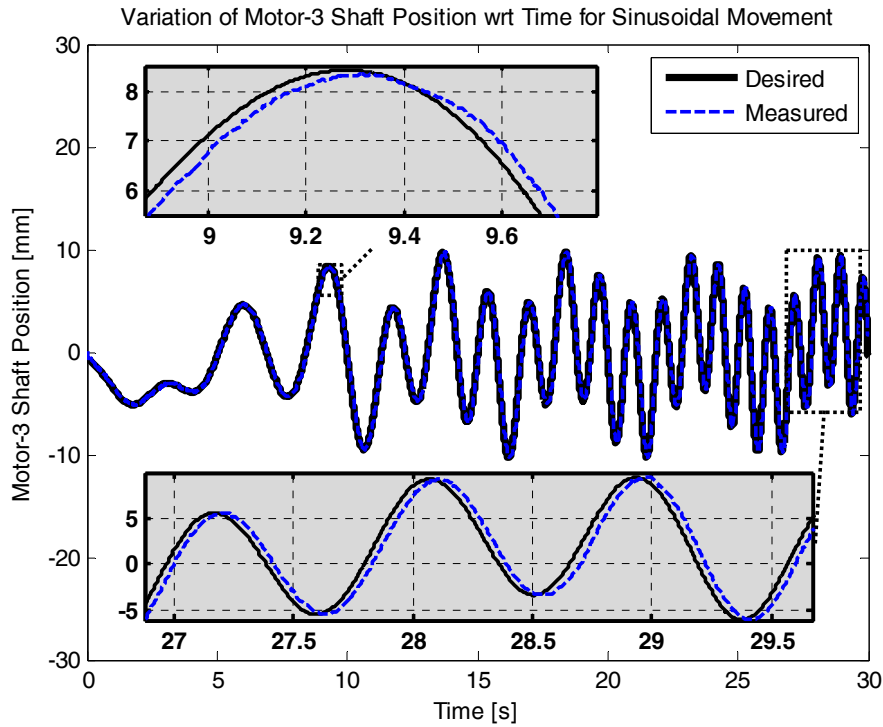
Deney şartlarında tüm motor eksenlerinde üst üste binmiş değişken frekanslı sinus bileşenlerinden oluşan karmaşık bir işaret ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar



Şekil 50: İki eksenle faz farklı düşük frekanslı sinus ve üçüncü eksenle artan frekanslı değişken sinus altında 1. motor şaft uzunluk değişimi



Şekil 51: İki eksen de faz faklı düşük frekanslı sinus ve üçüncü eksen de artan frekanslı değişken sinus altında 2. motor şaft uzunluk değişimi



Şekil 52: İki eksen de faz faklı düşük frekanslı sinus ve üçüncü eksen de artan frekanslı değişken sinus altında 3. motor şaft uzunluk değişimi

Bu deneye ait video görüntülerine , projeye ait web depolama alanından ulaşılabilir:
https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/tZzeA5DWOi/2013_09_Kafa_Deney_VideoIari/2.5.c_uc_ksen_sinus_takip_performansi.mp4

(d) Ataletsel Güdüm Algılayıcısı ile Kapalı Döngü Deney Sonuçları

Ataletsel güdüm algılayıcısı ile kapalı döngü kontrol deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla kamera platformunu, ataletsel güdüm algılayıcısı verileri dikkate alınarak tüm açısal eksenlerde sıfır noktasında tutmak üzere kontrolcu referans sinyali tüm eksenlerde sıfır olarak verilmiş, alt platform el ile hareket ettirilerek bozucu işaret verilmiştir. Kontrolcunun st platformu sıfır noktasında tutma performansı irdelenmiştir. Burada karşımıza çıkan ilk zorluk, platforma bağımsız şekilde ölçebildiğimiz bir bozucu işaret veremiyor olmamızdır. Gerçekte verilen bu bozucu işareti ölçebilmek için çalışmalarımız devam etmektedir. İkinci zorluk ise ataletsel güdüm algılayıcısının açısal durum kestirim çıktısının, özellikle de yönelim ekseninde zaman içerisinde kaymaya maruz kılmasıdır. Nispi lmler veren tüm ataletsel algılayıcılarda zaman içerisinde değişen bias sebebiyle karşı karşıya kaldığı bu durum, MEMS teknolojisine sahip düşük maliyetli algılayıcılarda daha da derin bir problemidir.

Projemizin son dönem deneylerini oluşturan ve bir kameranın platform üzerine monte edilmesi ile karşıda bir optik hedefe bakması sırasında açısal yönelimini konumasını içeren kapalı döngü dengeleme ile yapılan deneye ait video dosyalarına aşağıdaki link ile ulaşılabilir:

https://www.dropbox.com/sh/xd2z6avezzksvq9/kq-0a195RD/2013_09_Kafa_Deney_Videolari?lst

2.6 Sonuç

Genel olarak değerlendirdiğimizde robot görsel algısının kafa tasarım ve kontrol ile iyileştirilmesi yönünde projemiz kapsamında önemli adımlar attığımızı ve proje desteğinin bize bu anlamda büyük katkı yaptığını düşünüyoruz. Hem dzelmsel, hem de 3-eksenli platformlarımızı tasarladık, ürettik ve deneylerde kullanmaya başladık. Düzlemsel platformun tüm kuramsal incelemelerini tamamladık. 3-eksenli platformun kuramsal incelemelerinde ise kinematik analizleri tamamlayıp dinamik modelleme için önemli ölçüde ilerledik. Deneysel yönde sayısal kontrol yapabileceğimiz kontrolcu altyapımızı kurduk, bunun için gerekli gerçek zamanlı gömülü bilgisayar ve işletim sistemi altyapısını kurarak deneysel çalışmalarda önemli ölçüde ilerledik. Modelleme, sistem tanıma ve kontrol için karşılaştığımız zorluklardan önemli bir kısmını aşmayı başardık. Bağımsız PID kontrolclar ile iki düzenek ile de kontrolcu deneyleri yaptık ve başarılı sonuçlar aldık.

Ancak ucu açık olan bu konuda yapabileceğimiz şeyleri bitirdiğimiz söylenemez. Konu üzerinde devam etmekte olan iki doktora tezinin sonlanmasına bir yılı aşkın bir süre bulunmaktadır ve bu tezler kapsamında gelecekte tamamlanacak pekçok çalışma bulunmaktadır. Bir doktora tezi kapsamında modelleme çalışmalarımız tamamlanacak ve yayınlanacaktır. Diğer doktora tezi kapsamında, hem durum uzayı temelli kontrolclar ile çalışmalar yapılacak, hem de model tabanlı tahminlemeye dayanan kontrolclar ile sistemdeki gecikme dikkate alınarak kontrolcu performansı yükseltilecektir. Deneysel olarak bu kontrol performanslarının kamera üzerinden doğrudan ölçülmesi yoluyla hareket bulanıklığındaki iyileşme son çıktı üzerinden yeniden sınılanacaktır.

Projemizin önemli bir donanım ögesini oluşturan “robot kafası”nı proje kapsamında ortaya çıkarabilmek bize bu alanda önemli ufuklar açmıştır ve proje desteğinin bu alandakış akademik çıktılara etkisi çok olumlu olmuştur/olacaktır.

3 Hareket Bulanıklığı Analizi ve Giderilmesine Yönelik Donanım Destekli Algoritmik Yöntemler

Projemiz kapsamında bu alanda yapılan çalışmalar tüm proje süresine yayılarak devam etmiştir ve temel olarak üç alanda sonuçlar alınmıştır. İlk aşamada, hareket bulanıklığı bozucu etkisinin deneysel robot platformumuz üzerinde görüntü alım süreçlerine yaptığı etkiler incelenmiş, bu etkinin temel robot görme yaklaşımlarına temel olan görsel öznitelikler üzerine etkileri incelenmiştir. Bunu takiben bu bozucu etkinin giderilmesine klasik yaklaşımlar incelenmiş, ardından buna yönelik iki yenilikçi yaklaşım geliştirilmiştir. Bu alandaki klasik ve yaygın yaklaşım, tek görüntü karesi üzerinden kör ve kör olmayan (blind/non-blind) ters filtreler ile görüntü bulanıklığı filtresinin etkisini yok etme çalışmasıdır. Çalışmamız kapsamında bu yaklaşımlardan kabul görenleri incelenmiş ve karşılaştırmalara temel olarak alınmıştır. Özgün önerdiğimiz ilk yaklaşımda ise, ardışık görüntü karelerinin kullanımı için basit fakat verimli bir yöntem olarak sonuçlar aldığımız *görüntü karesi interpolasyon* tekniğini uygulanmıştır. Buna ilave olarak projemizin daha ileriki evrelerinde, platformun ataletsel güdüm algılayıcılarından alınan hareket verileri kullanılarak ve kamera görüntü alım sürecinin bu verilerden elde edilen bir metrik işaret ile tetiklenmesi yoluyla görüntü bulanıklığının azaltılması hedeflenmiştir. Bu konuda önce bir benzetim çalışması yapılarak olası kazanımlar incelenmiş, daha sonra gerçek robot üzerinde gyro verileri üzerinden tetikleme yapılabilmesi için yöntemler geliştirilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde bu yaklaşımlar detaylandırılacaktır.

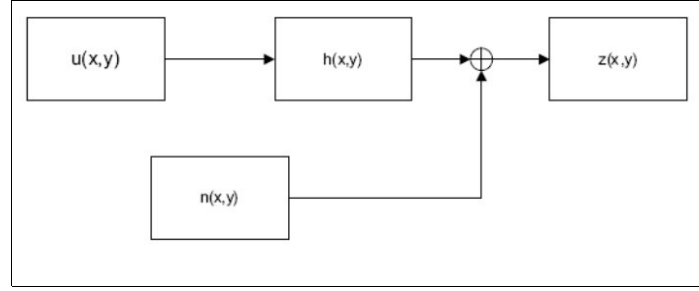
3.1 Hareket Bulanıklığı ve Etkilerinin Karakterizasyonu

Projemiz kapsamında ele aldığımız önemli bir unsur, hareket bulanıklığı etkisinin önceki projemizde tasarladığımız SensoRHex platformu ve üzerine entegre ettiğimiz algılayıcıları kullanılarak deneysel olarak karakterizasyonu idi. Çalışmalarımız kapsamında ilk olarak bu alanda sonuçlar aldık. Proje planımıza uygun olarak ilk aşamada Hareket Bulanıklığı'nın modellenmesi, ölçülmesi ve onarılması ile ilgili bilimsel literatürü tarayarak yapılan çalışmalar konusunda teklifimizde gözümüzden kaçan ya da aradan geçen zaman içinde ortaya konulan çalışmaları inceledik. Bunu takiben öncelikle Hareket Bulanıklığı bozulmasının matematiksel modelleri, ardından bozulmanın belirleyici parametrelerinin değişik veriler üzerinden tahminlenmesi üzerine literatürdeki yöntemler incelenmiştir. Bozulmanın matematiksel modelleri genelde yönelimsel doğrusal süzgeçlere dayanmaktadır. Parametre kestirimi için ise tekil kamera kareleri, çoğul kamera kareleri veya özellikle ataletsel prensiplere dayanan harici algılayıcılar kullanılabilir.

Projemiz kapsamında buna ek olarak Bilgisayarlı görme yordamlarında sıklıkla kullanılan görsel öznitelik vektörlerinin bu bozulmalardan nasıl etkilendiklerinin incelenmesi hedeflendiğinden bu öznitelik vektörleri arasında bulunan Harris Köşe Bulucu, Canny kenar bulucu ve Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (SIFT) yordamlarının incelenmesi gerçekleştirilmiş, ilk aşamada Harris Köşe bulucu ile karakterizasyon deneyleri, daha sonra ise diğer iki görsel öznitelik vektörü olan Canny kenar bulucu ve Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (SIFT)'in bu etki altındaki davranışlarının incelenmesi tamamlanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir.

3.1.1 Hareket Bulanıklığı Modelleri

Hareket Bulanıklığı modellerine bir örnek olarak doğrusal bulanıklık verilebilir. Temelde yönelimsel doğrusal bir süzgeçleme işlemi ile modellenen bu bozulum, örneğin süzgecin sıfır noktaları dolayısı ile tek bir görüntü karesi temelinde ele alındığında geri dönüşümü olmayan veri kaybı içermektedir. Bu süzgeç yapısı Şekil 53'de blok şema olarak verilmiştir.



Şekil 53: Doğrusal Hareket bulanıklığı işlemi blok şeması

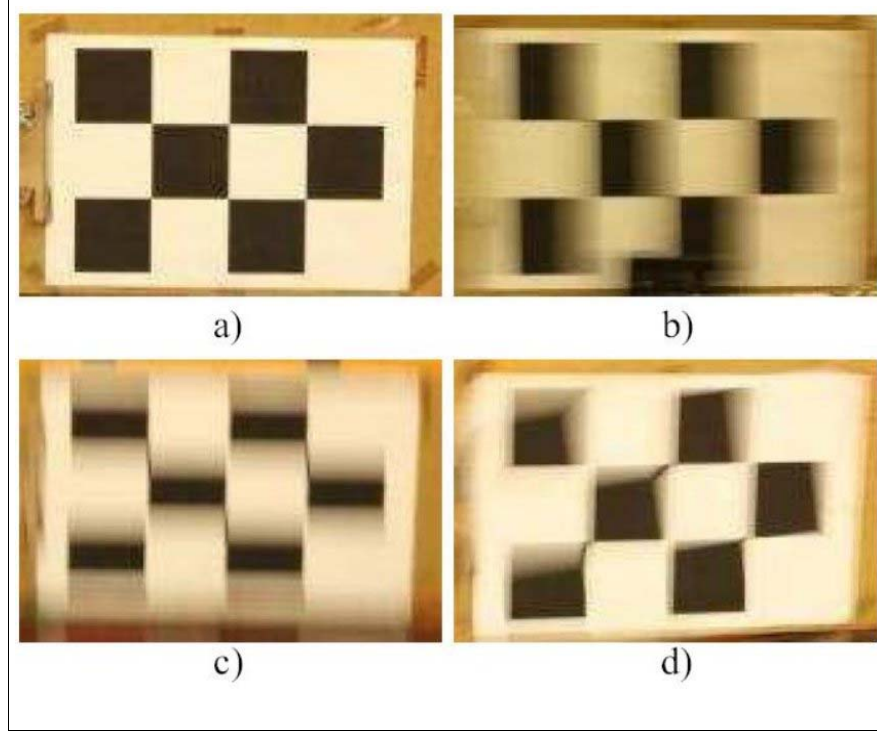
Burada iki boyutlu bir işaret olan ideal görüntü verisi $u(x,y)$, bozucu bir süzgeç olan $h(x,y)$ 'den geçmekte ve üzerine algılayıcı gürültüsü $n(x,y)$ bindikten sonra ölçülen işaret olan $z(x,y)$ 'yi oluşturmaktadır. İlgili süzgeçleme işlemi

$$z = u * h[x, y] = \int u(x - s, y - t)h(s, t) dsdt$$

evrişim tümlevi ile ifade edilmekte, buradaki bozucu süzgeç ise

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{L} & \text{if } -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \text{ and } y = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ifadesi ile tanımlanabilmektedir. Bunun yanında dönüsel ve eksensel hareket bulanıklığı modelleri de bulunmaktadır ve ekli teknik raporumuzda incelenmiştir. Bu bulanıklık etkilerinin deney kurulumumuzda toplanmış bir örneği Şekil 54'de verilmiştir.



Şekil 54: SensoRHex platformu üzerinde kontrollü bir hedeften toplanmış hareket bulanıklığı örnekleri. (a) Tripod üzerinde sabit görüntü, (b) yatay bozulmuş, (c) dikey bozulmuş ve (d) döneysel bozulmuş.

Hareket sırasında ortaya çıkan Hareket Bulanıklığı'nın ölçülmesi önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Tek bir video karesi kullanılarak karede varolan bozuluma sebep olan süzgecin çıkartılması en zor problemdir. Resim üzerinde ve doğal sahnelerde resim gradyanının dağılımları kullanılarak bazı tahminlemeler mümkündür. Basit bir örnek, noktasal özneliklerden oluşan bir sahnenin görüntü karesinde uzun çizgilerin uzunluk ve yönelimlerinin ölçülmesi olabilir. Bu çizgiler hareket bulanıklığının sonucu olacaktır. Bozucu etkinin kestirilmesi ve parametrelerinin çıkartılmasında belki de en güvenilir yol, harici bir algılayıcı, örneğin bir dönü ölçer seti kullanılmasıdır. Görüntüye dayanan tüm yöntemler farklı niteliklerdeki hareket bulanıklığı bileşenlerinin üst üste binerek ayrıştırılamaz hale gelmesi problemine açıktır. Tüm bileşenlerin ayrı ayrı kestirilebileceği harici algılayıcılar bu probleme maruz kalmamaktadır. Bozucu süzgecin parametrelerinin elde edilmesi tümüyle mümkün olduğu varsayılsa bile, süzgeçleme süreci belli noktalarda (örn. süzgeç sıfırları) kayıplı bir süreç olduğundan geri dönüşüm mümkün olmayabilir. Bu sıkıntı harici algılayıcılar için de geçerlidir. Son alternatif, birden fazla resim karesi kullanılarak bozucu modelin çıkartılması ve geri dönüşümün sağlanmasıdır. Bu alanda çok ilginç çalışmalar bulunmaktadır. Literatürde birden fazla ardışık video karesi kullanılarak kayıpsız geri dönüşümün mümkün olduğu gösterilmiştir.

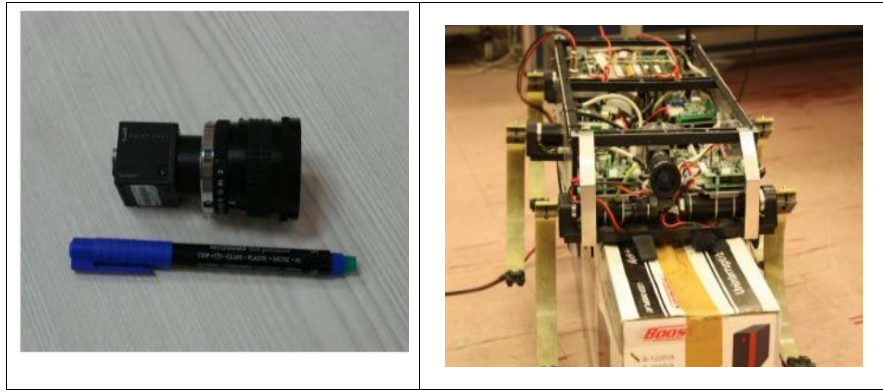
3.1.2 Deneysel Veri Seti

Çalışmamızın bir parçası olarak bacaklı robot platformumuzun hareketi sırasında kapsamlı veri alımı gerçekleştirilmiştir. Robotumuzun değişken yürüme hızları, yazılımımızda "hız katsayısı" ile belirlenmiştir. Bu katsayılar, belli fiziksel hızlara karşılık gelmektedir ve bu karşılıklar, aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Hız Katsayısı	Fiziksel Hız	Video İsmi	Açıklama
0.0	0 m/sn	VSeq1	Robot dama desenli tahtadan 0.5m uzakta hareketsiz
0.1	0.14 m/sn	VSeq2	Robot dama desenli tahtaya 4.5m uzaktan verilen hızla yürüme
0.4	0.16 m/sn	VSeq3	
0.8	0.25 m/sn	VSeq4	
1.0	0.40 m/sn	VSeq5	

Tablo 3: Deneysel robotumuz ile yapılan video kayıt deneyleri

Bu hızlar ile kaydedilen video verileri üzerinden görsel öznitelikler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 55'da çalışmalarımız sırasında kullandığımız PointGrey Flea2 kamera ve objektifi ile bu yapının robot platformu üzerindeki yerleşimi gösterilmiştir. İleriki çalışmalarımızda hareketli taşıyıcı bir "kafa" üzerine yerleştirmeyi planladığımız kamera, mevcut durumda platform iskeletine basit lastik şok emicilerden oluşan bir mekanik alt geçirgen süzgeç üzerinden bağlanmış durumdadır.

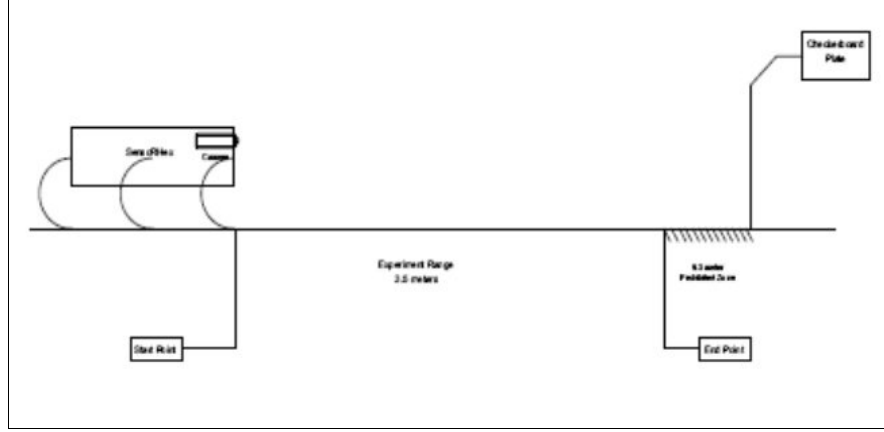


Şekil 55: SensoRHex platformu üzerinde görsel veri toplamada kullanılan PointGrey Flea2 kamerası ve robot platformu üzerindeki yerleşimi

Çalışmalarımız sırasında deneysel robotumuz belirli bir düzenekte tanımlı optik bir hedefe bakarak değişik hızlarda yürütülmekte ve kamera verileri toplanmaktadır. Bu düzenek Şekil 56'da verilmiştir. Düzenekten toplanan video verilerine örnek bir dizi ise Şekil 57'de bilgimize sunulmuştur.

3.1.3 Performans Kriterleri

Deneysel çalışmamızda Harris Köşe Bulucu ve Canny Kenar Bulucu için "gerçek" öznitelikler, video verisinin yoğun emek ile el ile işaretlenmesi sonucunda elde edilmiş ve bu öznitelikler için görüntüde belirlenen dama desenli alan için bazı performans kriterleri tanımlanmıştır. Öncelikle yordamın gerçek yerine yakın bölgede doğru olarak bulunduğu öznitelikler için resim içerisindeki pozisyonun doğruluğunu belirten "ortalama hata oranı" değerlendirilmiştir. Ancak bundan daha da önemli gözükken metrikler olarak "öznitelik kaçırma sayısı" ve özniteliğin bulanıklık dolayısı ile çift görülmesine karşılık gelen "şaşıklık sayısı" ölçütleri de kullanılmıştır. SIFT özniteliği için el ile belirlenebilen bir "gerçek" veriden söz edilemediği için robotun hareketsiz olduğu Vseq1 video verisi üzerindeki yordam performansı baz alınarak ve SIFT özniteliklerinin birbirleri ile eşleşmeleri dikkate alınarak bir karşılaştırma yapılmıştır.



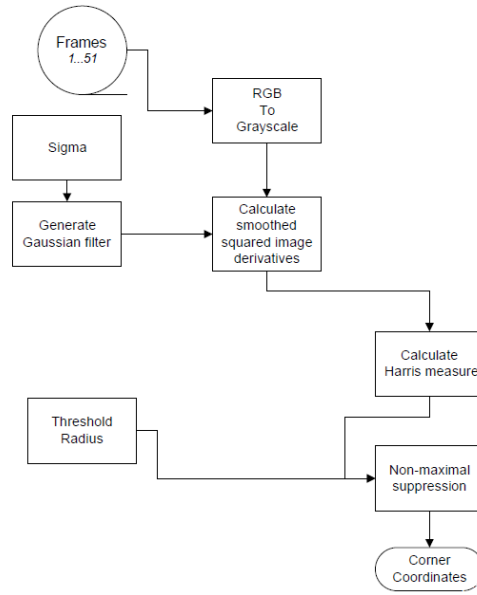
Şekil 56: SensoRHex platformu ile kamera verisi toplanmasında kullanılan düzenek. Robot değişik hızlarda belli bir düz mesafe katetmekte ve karşısına yerleştirilen özel bir görsel hedef üzerinden veri toplamaktadır.



Şekil 57: SensoRHex platformu ile yürüyüş deneyleri sırasında toplanan ve hareket bulanıklığı içeren video dizilerine bir örnek.

3.1.4 Ele Alınan Görsel Öznitelikler

Çalışmalarımız dahilinde il olarak Harris Köşe Bulucu yordamı uygulanmış ve elde ettiğimiz gerçek veriler ile bu öznitelik bulma yordamının performansı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme de iki performans kriteri gözlenmiş ve kaydedilmiştir: Sahneye yerleştirilmiş (dama tahtası sayesinde) belirgin köşelerin video karesi içinde yerlerinin bulunma hassasiyeti (piksel cinsinden) ve var olup da kaçırılmış/bulunamamış köşelerin sayısı. İlk metriğin hesaplanmasında tüm video karelerinde el ile işaretlenmiş ve mutlak doğru kabul edilmiş köşe bilgilerinden yararlanılmıştır. Daha sonra ise, diğer iki görsel öznitelik vektörü olan Canny kenar bulucu ve Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (SIFT)'in hareket bulanıklılığı altındaki davranışlarının incelenmesi tamamlanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 58: Harris Köşe bulucu genel yordamsal adımları.

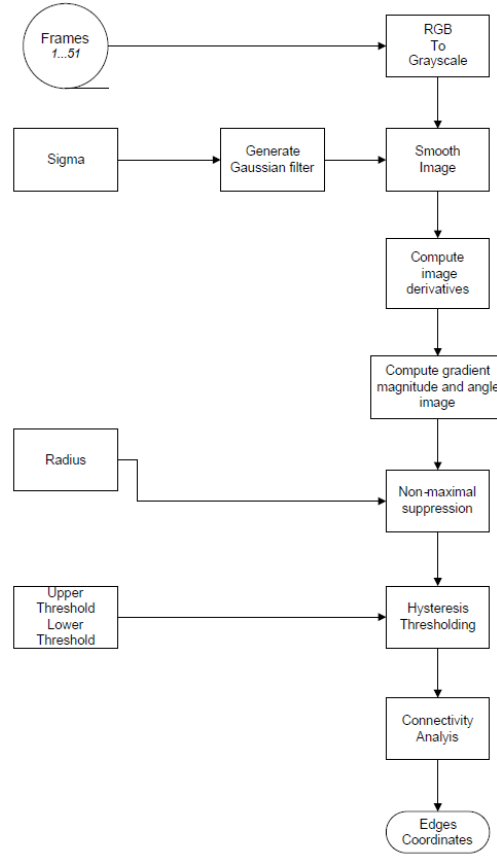
Ele alınan öznelik vektörlerinin elde edilmesi ile ilgili genel adımlarını gösteren iki örnek blok şema, Şekil 58 ve Şekil 59'de yer almaktadır. Çalışmamızda Kovese tarafından genel bir görüntü işleme kütüphanesi kapsamında gerçekleştirilen Harris Köşe Bulucu uygulamasından yararlanılmıştır. (<http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>).

Çalışmamızda Vedaldi tarafından Matlab ortamında gerçekleştirilen SIFT uygulaması (<http://www.vlfeat.org/~vedaldi/code/sift.html>) kullanılmaktadır.

3.1.5 Harris Köşe Bulucu Sonuçları

Harris Köşe Bulucu ile yapılan deneylerde birkaç değişik performans davranışı gözlenmiştir. En yüksek öznelik bulum performanslarında özneliklerin resimdeki yerlerinin bulunmasında hata oranları ölçülmüştür. Hızın artması ile performansın düşüşü ile birlikte öznelik noktalarının bulunmasında “kaçırma” ve “çift görme” davranışlarının ortaya çıktığı gözlenmektedir. Bulunan noktalar üzerinden yapılan hata analizinde ise bir özneliğin bulunabilmesi halinde yer bulma hatasının çok da artmadığı gözlenmiştir. Değişik hızlarda köşe bulma hassasiyet sonuçları ve köşelerin kaybedilme oranlarını gösterir sonuçlar **Tablo 4**'de verilmektedir. En yüksek hızlı harekette toplam 51 video karesinden 30'unun içersindeki tüm öznelik vektörlerinin kaybedilmiş olduğu, dolayısı ile önemli bir bozulunun söz konusu olduğu gözükmemektedir.

Kaybedilmeyen öznelikler üzerindeki yer bulma hatalarına bakıldığında en düşük hız olan Vseq2 ile en yüksek hız olan Vseq5 arasında çok önemli bir fark gözükmemektedir. Ancak ciddi oranda özneliğin görüntülerde hiç bulunamadığı anlaşılmaktadır.

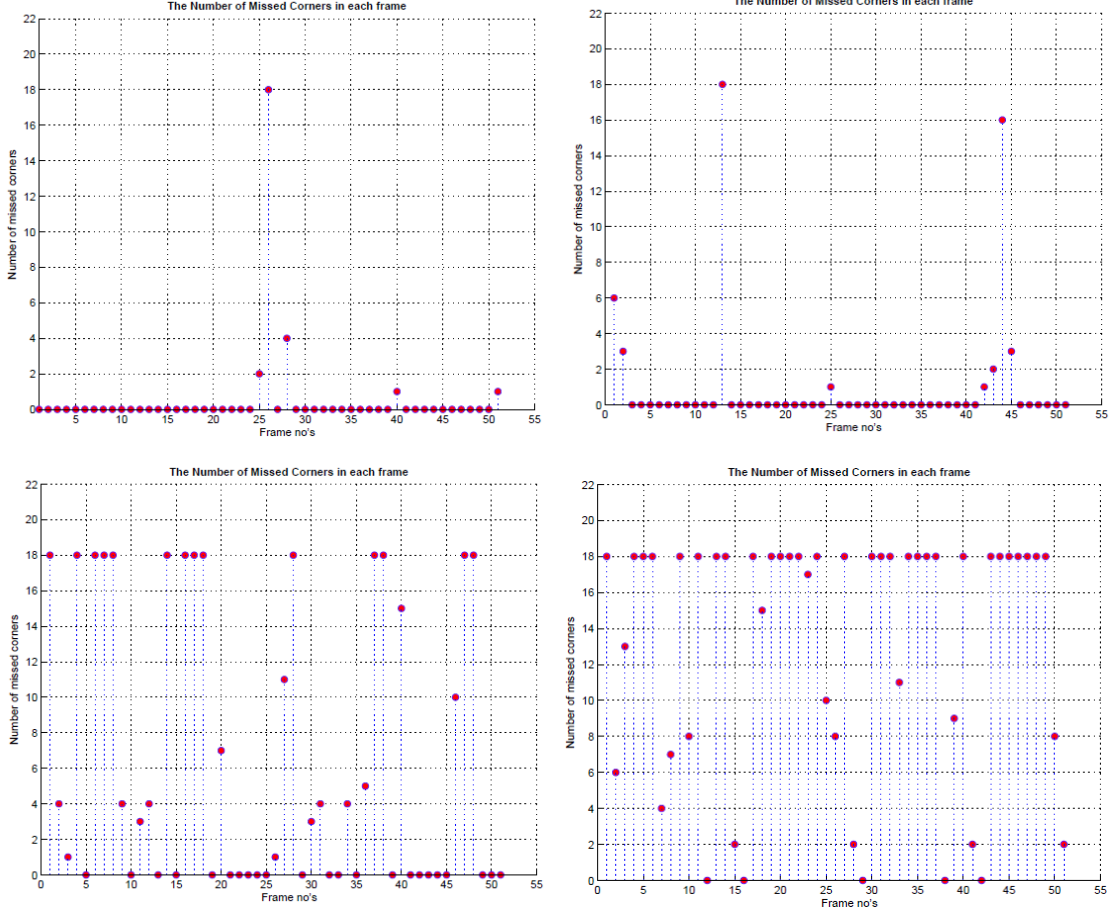


Şekil 59: Canny kenar bulucu genel yordamsal adımları

	E_{ave}	\tilde{V}	Number of "all missed" Frames
Vseq 2	1.7897	0.1	1
Vseq 3	1.9835	0.4	$1/51 \cdot 100$
Vseq 4	2.1216	0.8	$14/51 \cdot 100$
Vseq 5	2.9331	1.0	$30/51 \cdot 100$

Tablo 4: Video verilerinde Harris köşe bulucu sonuçları. Ortalama hata sonuçları (pixel) birimi ile ifade edilmektedir.

Öznitelik kaçırma oranlarına her video karesi bazında bakıldığında düşük hızlarda izole video karelerinde kayıplar olduğu, karelerin genelinde ise iyi bir performans olduğu gözükmektedir. Hızlar arttıkça hem kayıp oranları artmakta, hem de kayıplar tüm karelere yayılmaktadır. Bu durum aşağıda gözlenebilir.

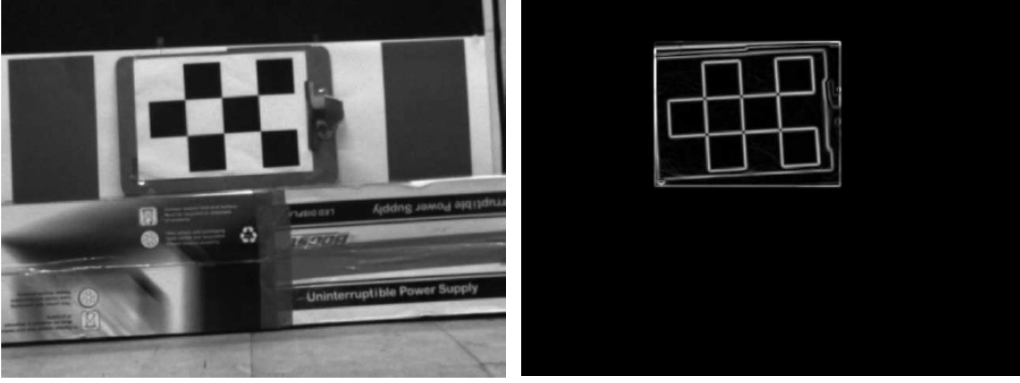


Şekil 60: Dört değişik yürüme hızı ile elde edilen video verileri üzerinde video karesine bağlı Harris Köşe bulma kayıpları. Damalı alan içerisinde toplam 18 köşe bulunmaktadır.

Öğrencimizin ilgili tez çalışmasında Şekil 60'deki sonuçlara ilave olarak "şaşıklık" yani bir köşe noktanın hareket bozulumu altında iki ya da dörde bölünmesi oranları da ele alınmaktadır.

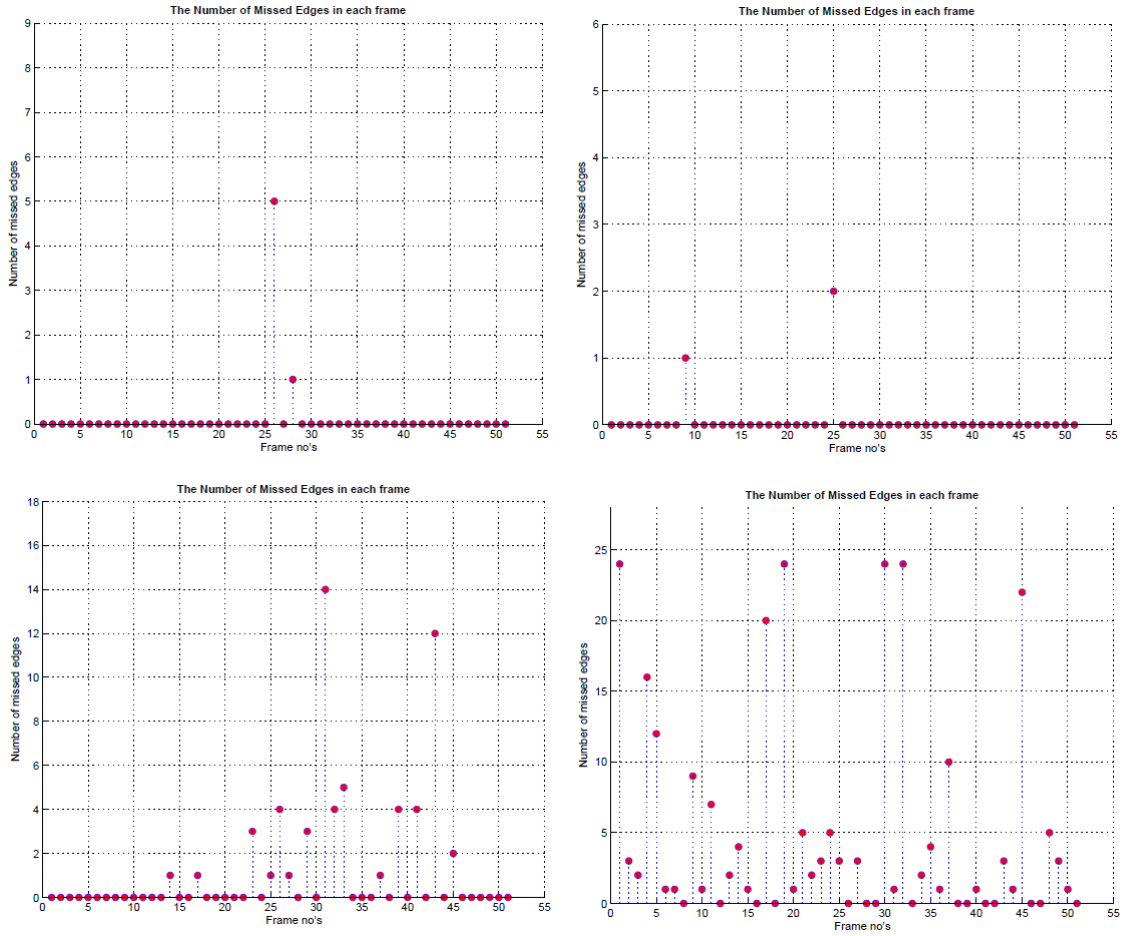
3.1.6 Canny Kenar Bulucu Sonuçları

Projemizde ele aldığımız ikinci görsel öznitelik olan ve türev temelli bir yaklaşım ile resimdeki kenarların bulunmasını sağlayan Canny kenar bulma yordamı, örnek bir video karesi üzerinden gösterilmiştir. Yordam bu örnekte sadece dama deseni içeren ve gerçek kenar durumu el ile işaretlenmiş örnek kısma uygulanmıştır.



Şekil 61: Örnek video karesinin ilgili bölgesinde Canny kenar bulucu sonuçları.

Canny kenar bulucu ile yapılan deneylerde de el ile işaretlenen gerçek kenarlar ile kenar bulma yordamının değişik robot hızları altındaki performansını kıyaslama yolu izlenmiştir. Damalı desene sahip kontrollü alanda 24 adet kenar parçası bulunmaktadır ve bu kenarlar hareketsiz robotun kamera görüntülerinde problemsiz olarak tespit edilebilmektedir. Performans diğer özniteliklerde olduğu gibi robot yürüyüş hızındaki artış ile birlikte kayba uğramaktadır. Bu kayıpla ilgili performans sonuçları aşağıda Şekil 62’de verilmektedir.

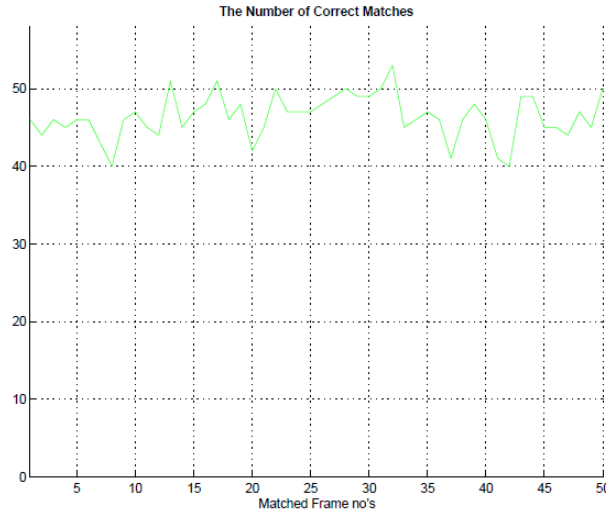


Şekil 62: Dört değişik yürüme hızı ile elde edilen video verileri üzerinde video karesine bağlı Canny kenar bulma yordamı sonuçları.

Burada göze çarpan davranışlardan birisi, kenar bulma yordamının orta hızlarda köşe bulma yordamına göre biraz daha iyi çalıştığıdır. Hız parametresinin 0.4 değeri için (Vseq3 veri seti), verinin neredeyse tümünde kenarlar eksiksiz çıkartılmıştır. Ancak bunun üzeri hızlarda yordamın yavaş yavaş başarısız olduğu gözükmemektedir. Yine de en yüksek hızda dahi kenarların önemli bir kısmının bulunabildiği anlaşılmaktadır. Burada kısaca bahsettiğimiz bu sonuçların yanında Y.Lisans öğrencimizin tezinde kenar kalınlıklarının değişiminin analizi, kenarların çift görülmesi gibi etkilerin yoğunluğu da incelenmiştir.

3.1.7 SIFT Özniteliği Başarım Sonuçları

SIFT özniteliği ile yapılan deneylerde el ile işaretlenmiş bir “gerçek” öznitelik setinden bahsedilemez. Bu sebeple durahan haldeki robot kamerasından alınan video ile elde edilen performans ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Burada verilen “doğru eşleştirme adedi”, her karede bulunan SIFT noktalarının öznitelik vektör değerleri kullanılarak ve yakınlık ölçütünden yararlanılarak ardışık kareler arasında eşleştirilmesi sonucu elde edilen eşleştirme sonuçlarını vermektedir. Hareketsiz video verisinde her iki ardışık video karesi arasında yaklaşık 40-50 noktanın eşleştiği görülmektedir. Bu, SIFT yordamının sadece kamera gürültüsü ve eldeki kamera ve ışıklandırma altında verebildiği en iyi sonucu göstermektedir.

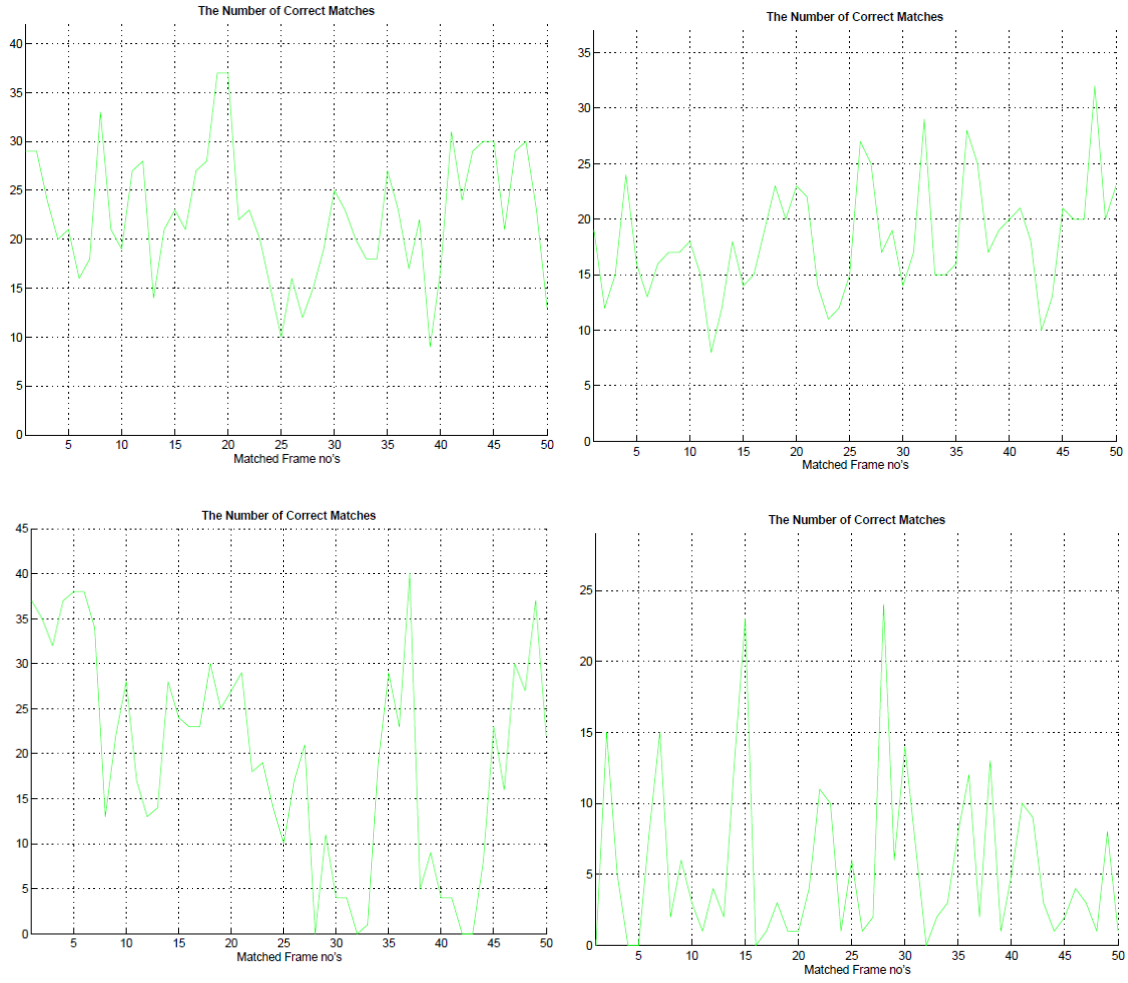


Şekil 63: Durağan robot video verilerinde SIFT yordamının ardışık kareler arası eşleştirme performansı.

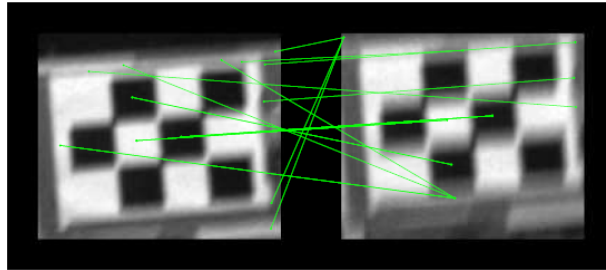
Hareketin başlaması ile SIFT yordamının hemen etkilenmeye başladığı ve performansın hızla düştüğü, hıza bağlı eşleştirme deney sonuçlarında açıkça görülmektedir.

Burada performansın düştüğü video karelerine özellikle bakmak ilginç bilgiler vermektedir. Örneğin 0.1 hız katsayısında 25'inci karede özellikle bir performans düşüşü görünmektedir. Bu kareye ve SIFT eşleştirmelerine bakıldığında ardışık video karelerinden ikincisinin önemli ölçüde hareket bulanıklığına maruz kaldığını gözliyoruz.

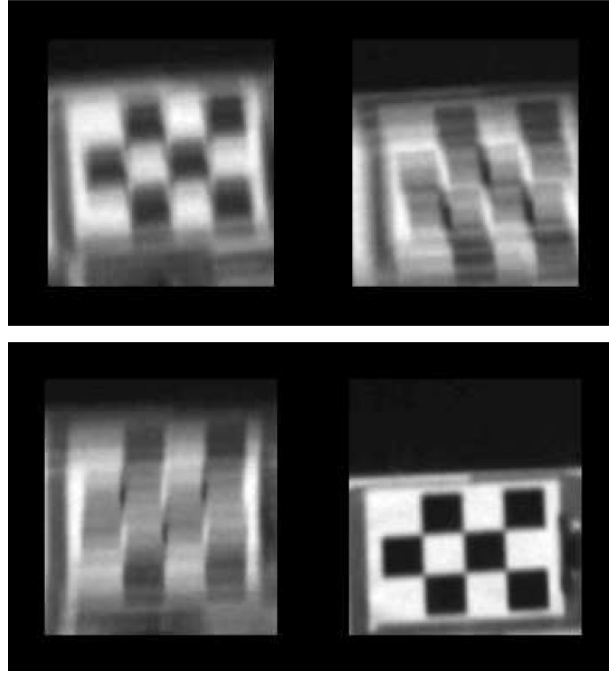
Hız katsayılarından 0.8 değerinde SIFT eşleştirmelerinin tümünün kaybedildiği zamanlar göze çarpmakta. Bu şekilde iki örneği aşağıdaki Şekil'de dikkatinize sunuyoruz. Bunlardan ilkinde iki ardışık kareden ikincisinin de hareket bulanıklığı ile tahrip olduğunu, ikincisinde ise karelerden birisinin tahrip olmuş olduğunu görüyoruz.



Şekil 64: Dört değişik yürüme hızı ile elde edilen video verileri üzerinde SIFT noktalarının kareler arası örtüşmesinin video kare indeksine bağlı değişimi

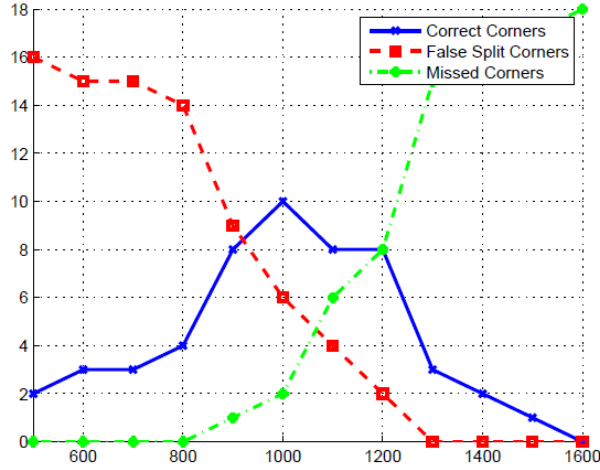


Şekil 65: 0.1 hız katsayısında 25'inci kare ile ardışığı kare arasındaki SIFT öznelik eşleştirmeleri. İkinci karedeki yoğun hareket bozulumu gözükmekte.



Şekil 66: 0.8 hız katsayısında tüm SIFT öznelik eşleştirmelerinin kaybedildiği örnekler.

Çalışmamızda son olarak Harris köşe bulucu yordamının eşik değerinin 0.4 hız katsayısında en yoğun bozuluma uğramış bir kare için değiştirilerek performansa etkisini örnek olarak vermek isteriz. Aşağıda Şekil 67’de bu eşik değerinin belli bir en iyi değeri olduğu ve böyle bir değer elde edilebileceği gözükmemekte.



Şekil 67: 0.4 hız katsayısı için en yoğun bozuluma uğramış video karesi üzerinde en iyi Harris köşe bulucu eşik değerinin aranması

Çalışmamızın bu aşamaya kadar olan karakterizasyon kısmında çıkarımlarımız şu şekilde özetlenebilir:

- Yaygın olarak kullanılan görsel özneliklerin hemen hemen tümü, hareket bulanıklığı altında ciddi performans düşüşleri göstermektedir,

- Performans düşüşleri genel anlamda hareket bulanıklığı artışı ile üssel bir ilişki ortaya koymaktadır. Bu sebeple hareket bozulumu tümüyle engellenemese bile azaltılması, görsel özniteliklerde önemli iyileşmeler sağlayacaktır,
- Robotumuzun düşük hızlarında bozulmalar daha çok tekil video karelerine veya az sayıda ardışık video karesine sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple bu tekil karelerin ister resim düzeyinde, ister öznitelik düzeyinde onarılması, önemli avantaj sağlayacak bir ara yol olarak görülebilir,

3.2 Ters-Filtreleme ve Görüntü İnterpolasyonu ile Giderim

Görüntü bulanıklığının giderilmesinde ilk olarak ele aldığımız çalışma, literatürdeki yaygın yaklaşım olarak karşımıza çıkan, tek kare üzerinden ters filtreleme ile giderim. Bu bölümde bu yolla elde edilen sonuçları sunup, önerdiğimiz görüntü karesi interpolasyon yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak sunmaktayız.

3.2.1 Ters Filtreleme Yaklaşımları İle Giderim

Hareket bulanıklığı'nın giderilmeye çalışılmasında yaygın yaklaşım, ters filtreleme yaklaşımlarının kullanılmasıdır. Ördüğümüz yöntemler ile bir karşılaştırma zemini hazırlamak için yaygın kabul gören bazı yaklaşımları değerlendirmeye aldık. Bu yaklaşımları saymak gerekirse: Lucy-Richardson yaklaşımı, Wiener Süzgeci, Kör Filtreleme (Rastlansal Başlangıç Noktası ve Doğru Başlangıç Noktaları kullanımı ile). İdeal durumda hareket bulanıklığı, f ile ifade edilen ideal görüntü karesi harekete bağlı olarak ortaya çıkan h fitesi ile filtrelenmesi ve sonucun eklenen görüntü ile bozulması ile ifade edilir:

$$g = h \otimes f + n \quad \Leftrightarrow \quad G = H \cdot F + N$$

Ters filtreleme yaklaşımları, orjinal görüntü karesine yaklaşık bir sonuç elde etmek için bu bozucu fitrenin tersini kullanma fikrine dayanır:

$$\tilde{f} = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{H \cdot F + N}{H} \right) = \mathcal{F}^{-1} \left(F + \frac{N}{H} \right)$$

Gürültü varlığında orjinal resim karesi ile ters filtreleme sonucunu birbirine yaklaştıran bir eniyileme problemi çözülmek istenirse Wiener Filtresi yaklaşımı kullanılır (Shesterov, 2004). Bu durumda onarılan resim

$$\tilde{f} = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{H^2}{H^2 + k} \cdot \frac{G}{H} \right) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{H^2}{H^2 + k} \cdot \frac{H \cdot F + N}{H} \right)$$

İfadesi ile verilir. Burada k , resmin her pixeline eklenen positif reel bir sayıdır ve filtrenin tasarım parametresidir. Bu değer arttıkça gürültü bastırımı artar ancak elde edilen h in etkisinin onarımı kötüler. Dikkat edilirse $k=0$ değeri gürültü olmadığı durumdaki optimum ters filtrelemeye karşılık gelir.

Wiener Filtresinin yanında, iteratif optimizasyon teknikleri ile hareket bulanıklığı filtresinin etkileri geri çevrilmeye çalışılabilir. Bunlardan ilki Richardson-Lucy algoritmasıdır ve bu iki

araştırmacı tarafından eş zamanlı geliştirilmiştir (Richardson, 1972; Lucy, 1974). Algoritma bir başlangıç adımı ve bunu takı eden bir iterasyon denklemi ile

$$\text{(first guess)} \quad \forall y, x: \tilde{f}_0(y, x) := c, \quad c \in \mathbb{R}_+ \setminus \{0\}$$

$$\text{(R-L iteration)} \quad \tilde{f}_{n+1} = \tilde{f}_n \cdot \left(h \otimes \frac{g}{h \otimes \tilde{f}_n} \right), \quad n > 0$$

İfadesi ile tanımlıdır. Wiener yaklaşımı da, bu yaklaşım da bozucu filtreye ait ifadenin bilinmesini gerektirir ve bu sebeple “kör olmayan” yaklaşımlar olarak adlandırılır. Bunun yanında “kör yaklaşımlar”, yani bozucu filtre ifadesine gerek duymayan yaklaşımlar da bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan bir kısmı, örneğin Richardson-Lucy yaklaşımının bazı varsayımlar ile genellenmesi ile elde edilebilir. Ancak bu yaklaşımlar, gerçek dünyaya ait resimlerde genelde çok iyi sonuçlar vermemekte, harici başka ölçümler yolu ile bozucu filtre hakkında bilgi sahibi olunabilmesi, başarıyı arttırmaktadır.

3.2.2 Görüntü Karesi İnterpolasyon Yaklaşımı

Bacaklı robotun hareketi sırasında meydana gelen sarsıntı kaynaklı hareket bulanıklığının algoritmik yöntemler ile giderilmesi konusunda ilk yaklaşımımız, video kare dizisinde bulanıklığın tespit edilmesi, bunu takiben kareler arasında resim içeriğindeki hareketin kestirilmesi ve bu bilgi ışığında çevre karelerdeki bilginin interpolasyon yoluyla kullanılması biçiminde olmuştur. Bulanıklığın miktarının kestirilmesinde türevsel yöntemlerden, hareketin kestirilmesinde ise tamamladığımız iş paketinden kazandığımız optik akış bilgisinden yararlanılmıştır.

Bu çalışmanın ilk aşaması, interpolasyon imkanı olan video karelerini otomatik olarak tespit edebilmektir. Bunun için hareket bulanıklığının bir ölçüsü gereklidir. Çalışmamızda temelde resim üzerinde türev alınması ve bu türev sonrasında resimdeki enerjinin bir şekilde hesaplanmasına dayanmaktadır. Türev işlemi bir üst geçiren filtre işlevi görmekte ve işlem sonrasında net karelerde resimdeki enerji yüksek olmakta ama bulanıklaşmış resimlerde ise üst frekanslardaki enerji azaldığı için filtreleme sonrasında kalan enerji oldukça az olmaktadır. Bu prensip, netliğin bozulduğu durumları tespit etme ve hareket bulanıklığını ölçme imkanı vermektedir. Tabii bu ölçüm focus bozulması ile netlik kaybı ile hareket bulanıklığı arasında ayırım imkanı vermemektedir.

Resimdeki hareket bulanıklığının ölçülmesinde, yukarıda anlatılan prensibe dayanan değişik ölçütler literatürde önerilmiştir. Bunlardan bazıları şu şekilde listelenebilir: resimdeki görüntü elemanlarının parlaklık varyansı,

$$M_1 = \iint (g_i(x, y) - m_i)^2 dx dy,$$

resmin iki eksenindeki birinci türevlerinin mutlak yüzey integrali (L1 norm kullanılarak)

$$M_2 = \iint \left| \frac{\partial g_i(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial g_i(x, y)}{\partial y} \right| dx dy,$$

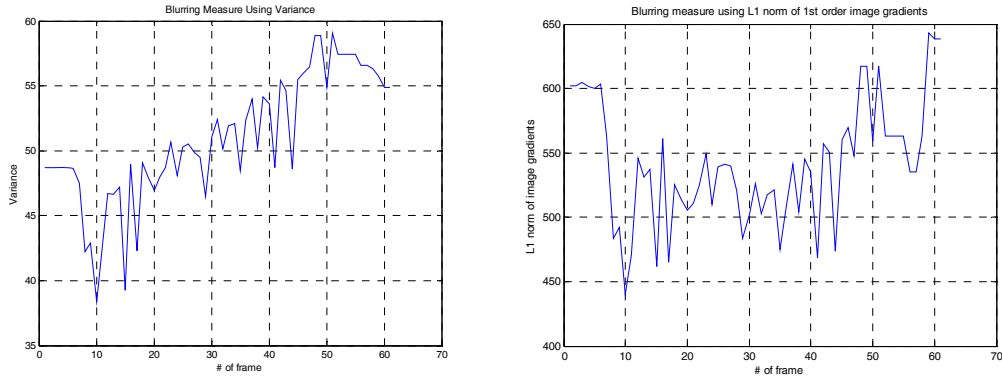
(L2 norm kullanılarak)

$$M_3 = \iint \left(\frac{\partial g_i(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_i(x,y)}{\partial y} \right)^2 dx dy,$$

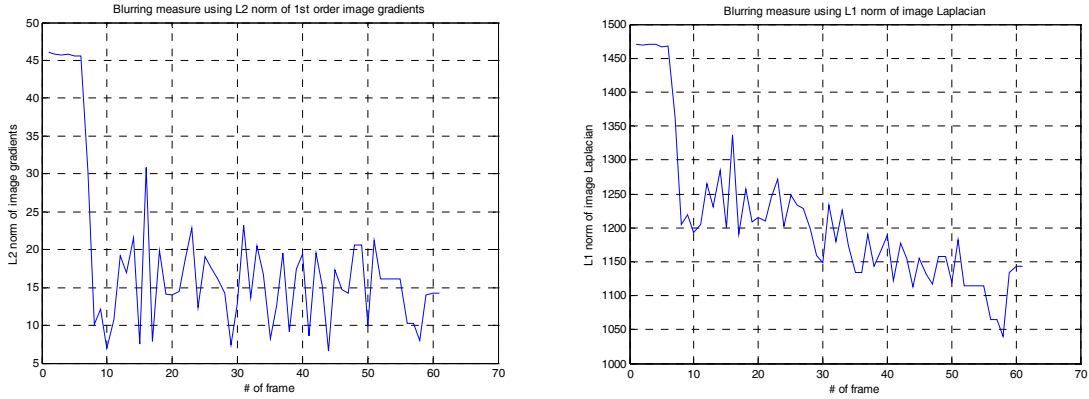
ve resmin iki eksenindeki ikinci türevlerinin (Laplacian) mutlak integrali (L1 norm kullanılarak)

$$M_4 = \iint \left| \frac{\partial^2 g_i(x,y)}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 g_i(x,y)}{\partial y^2} \right| dx dy$$

olarak tanımlanabilir. Bu ölçütlerin robotumuzdan hareket halindeyken alınmış örnek bir video dizininde kare indeksine bağlı olarak değişimi aşağıda **Şekil 68** ve **Şekil 69**'de verilmiştir.



Şekil 68: M1, M2 ölçütlerinin vide kare indeksine bağlı olarak değişimi



Şekil 69: M3, M4 ölçütlerinin vide kare indeksine bağlı olarak değişimi

Bu şekillerde enerjideki artış (tepe noktaları) resimde yüksek frekanslı sinyal enerjisinin fazlalığını, dolayısı ile “keskin” resimleri, çukur noktalar ise tam tersine yüksek frekans içeriğinin kaybını, dolayısı ile hareket bulanıklığına uğramış video görüntü karelerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde tepe ve çukur noktaların tüm dört ölçütte de birbiri ile eşleştiği, ancak değişik ölçütlerin video içinde zamanla değişen diğer etkenlerden (örneğin genel parlaklık) değişik mişarlarda etkilendiği gözlenebilir. Burada bu yavaş değişen bileşenlere karşı en dayanıklı ölçütlerin birinci türeve dayanan bileşenler olduğunu, L2 normu kullanan ölçütün en iyi davranışı gösterdiğini gözlemliyoruz.

Bir diğerk gözlemimiz ise bozunuma ugrayan karelerin uzun süreleri kapsamadığı ve bozunan bir karenin genelde iki kare yakınında daha keskin durumda, bozunuma uğramamış bir başka görüntü karesinin bulunabildiği yönündedir. Bu gözlem, interpolasyon yaklaşımı ile bir iyileştirme elde edilebileceği umudunu vermektedir. Aşağıda verilen ek sonuçlar da bu beklentiyi onaylamaktadır.

Bozunumu uğramış bir kareyi onarmanın bir yolu, bu karenin öncesinde ve sonrasında bulunan sağlam kareler içindeki bilgiyi kullanarak bozulan karedeki bilgiyi yeniden elde etmektir. Burada bazı zorluklar bulunmaktadır. Örneğin kareler içindeki veriler aynı içeriği taşımayabilir. Hareket halindeki bir obje (insan, hayvan, taşıt) karede hareket halinde olabilir ve görüntüde her karede farklı bölgeleri kapatabilir. Bir diğerk zorluk ise hareket bulanıklığına yol açmış olan kameranın kendi hareketidir. Çalışmamızda video içinde hareketli nesnelere olmadığını varsayıyoruz ancak ikinci hareket problemin doğal bir parçası olarak ele alınmak zorundadır. Kameranın kendi hareketi, ardışık karelerde büyük ölçüde aynı kalan görsel verilerin farklı bölgelere hareketine yol açmaktadır. Kareler arasında görsel interpolasyon yapılabilmesi için, bu hareketin resin her bölgesinde kestirilebilmesi ve veri olarak birbirine karşılık gelen piksellerin belirlenmesi gereklidir.

Araştırma gurubumuz bu amaçla daha önceden inceleyerek donanım gerçekleştirmesini tamamladığımız optik akış yöntemini benimsemiştir. Optik akış hesabı, keskin iki resim karesi verildiğinde ve istenmesi halinde resmin her pikseli için bu iki kare arasında hangi yönde ve ne kadar bir hareket söz konusu olduğunu hesaplayabilmektedir. Horn ve Schunk yöntemi kullanılarak hesaplanması halinde optik akış vektör uzayı, yinelemeli olarak

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_x^{k+1} &= \bar{\mathbf{v}}_x^k - \frac{I_x(I_x \bar{\mathbf{v}}_x^k + I_y \bar{\mathbf{v}}_y^k) + I_t}{\lambda^2 + I_x^2 + I_y^2} \\ \mathbf{v}_y^{k+1} &= \bar{\mathbf{v}}_y^k - \frac{I_y(I_x \bar{\mathbf{v}}_x^k + I_y \bar{\mathbf{v}}_y^k) + I_t}{\lambda^2 + I_x^2 + I_y^2}, \end{aligned}$$

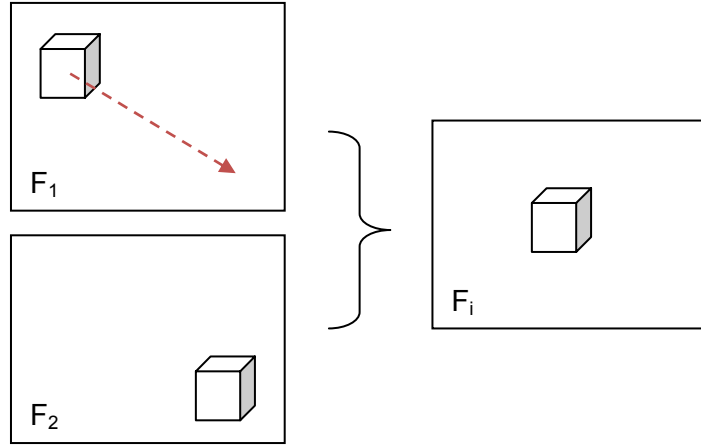
denklem seti ile verilir ve her piksel için hesaplanabilir.

Bu yolla tespit edilen hareket bilgisi kullanılarak, ortada bozunuma uğramış karenin öncesinde ve sonrasındaki keskin karelerin verileri ortadaki kareye ait zaman anına izdüşürülerek ortalama alınabilir. Bu izdüşürme işlemi, önce ve sonra elde olan bozulmamış karelerin sayısına göre doğrusal veya daha üst dereceden interpolasyon yoluyla yapılabilir. Bu prensip, aşağıda Şekil 70'de gösterilmiştir.

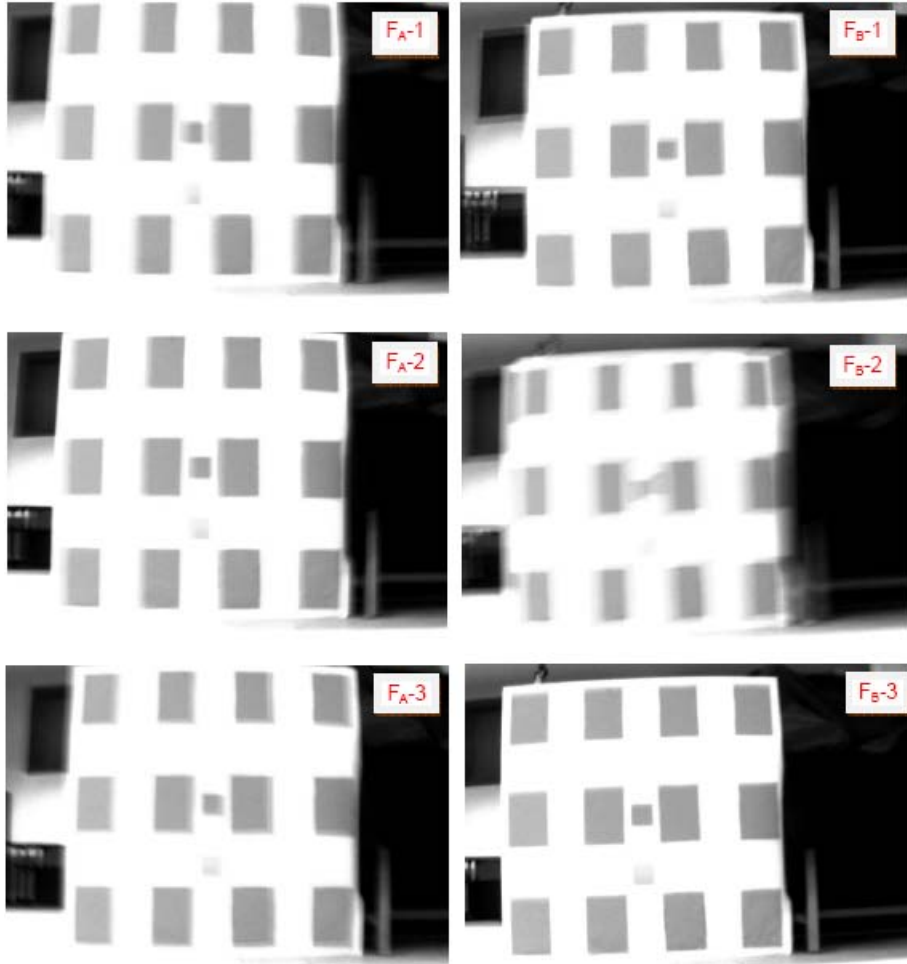
3.2.3 Karşılaştırmalı Deneysel Sonuçlar

Robotumuz üzerinden alınmış deneysel verilere bakıldığında, bir örnek üzerinde ardışık 3 video karesinin nasıl bir davranış gösterdiği görülebilir (Şekil 71). İlk olarak, ters filtreleme sonuçlarına bazı örnekler verdim. Daha sonra, tüm deneylerimiz bir özet tabloda karşılaştırılacaktır.

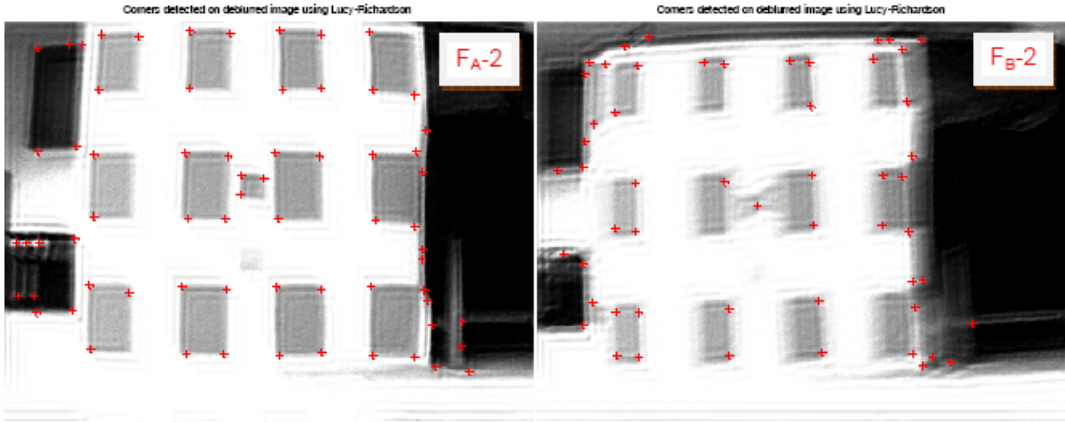
Şekil 72 ve Şekil 73'de verilen örnekler, Kör olmayan iki algoritmanın veri setimiz üzerindeki performansını Şekil 71'de gösterilen veride hedefin görüntü karesi içindeki hareketi ile bozunuma uğrayan karenin nispeten daha iyi durumda iki video karesi ile çevrili olduğu açıkça gözükmektedir. Bu, video içinde sıklıkla rastlanan bir durumdur. Birinci ve üçüncü kare üzerinden hesaplanan optik akış vektör alanı Şekil 74'de verilmiştir.



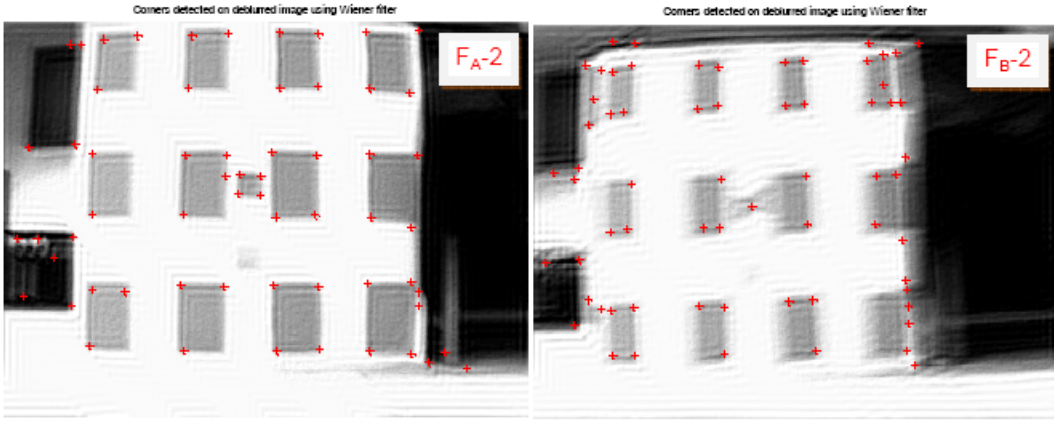
Şekil 70: Video karesi interpolasyon işleminin sembolik gösterimi



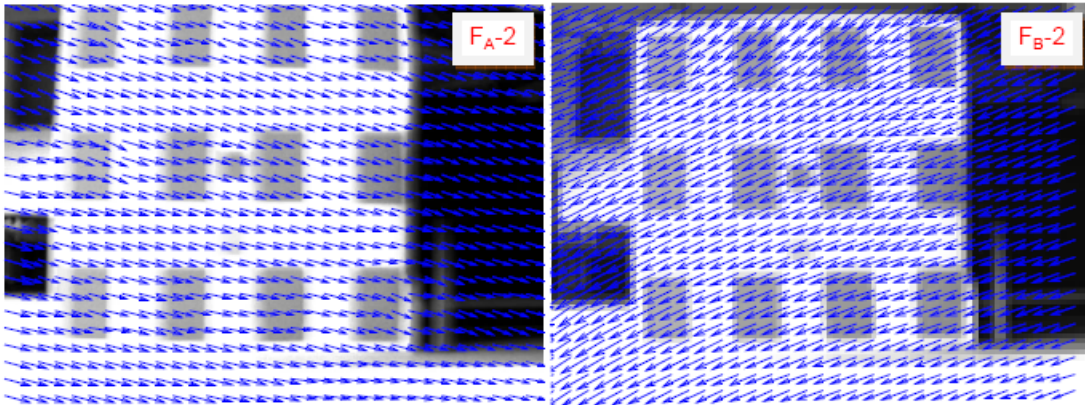
Şekil 71: Deneysel çalışma için SensorHex üzerinde alınmış iki ardışık video diziniden 3-karelik örnek dizinler. Burada A ve B dizinlerinde ortada bulunan 2 no'lu kare, tüm tartışılan yöntemler ve önerilen Kare interpolasyon yöntemi ile kestirilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 72: Örnek: Richardson-Lucy algoritması ile onarım sonucunda Köşe Bulucu sonuçlarının durumu.

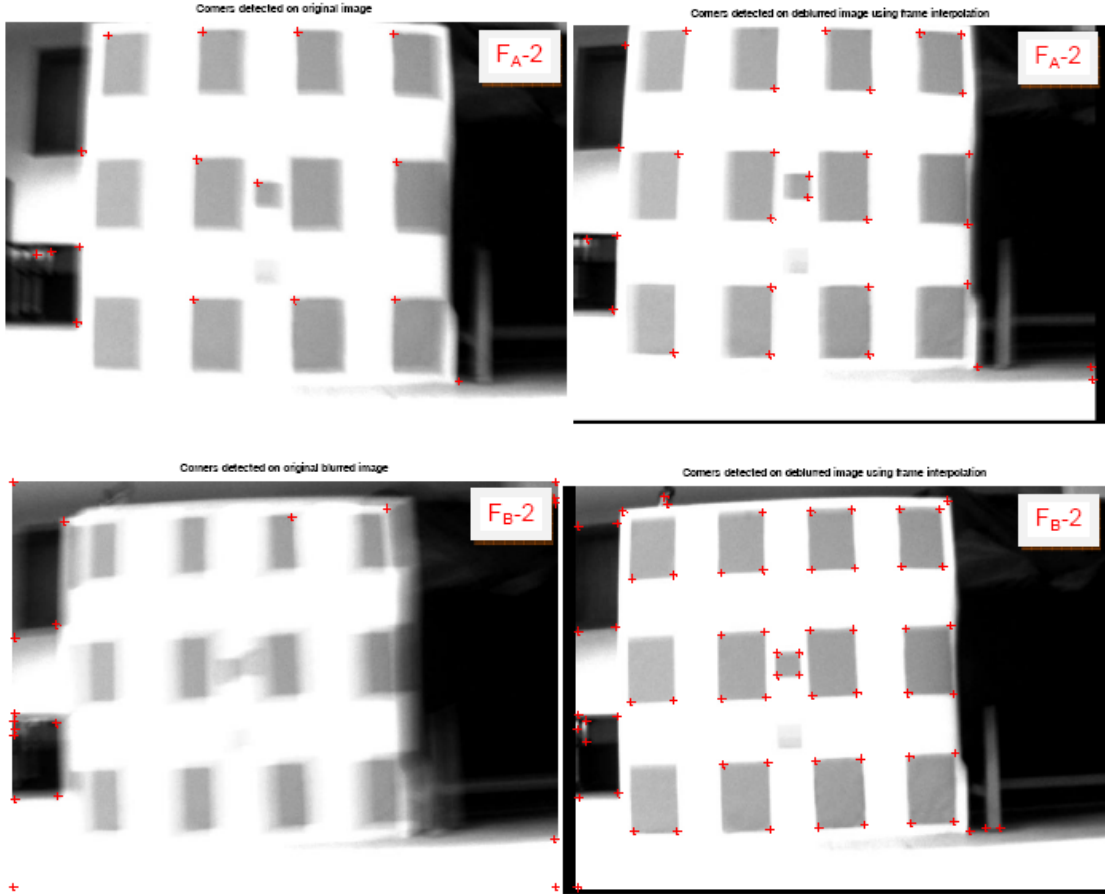


Şekil 73: Örnek: Wiener Filtre algoritması ile onarım sonucunda Köşe Bulucu sonuçlarının durumu.



Şekil 74: Yukarıdaki iki video dizininin ilk ve son karesinden elde edilen optik akış vektör alanının gösterimi. Bu optik akış alanı, Görüntü Karesi İnterpolasyon yöntemi önerimizde kullanılmaktadır.

Şekil 74’de verilen hareket bilgisi doğrultusunda ilk resimdeki piksellerin vektör alanı doğrultusunda ileri doğru, son karedeki piksellerin ise geriye doğru kaydırılması yoluyla keskin iki resim verisi çakıştırılmaktadır. Çakışan veriler değişik yaklaşımlar ile tümleştirilebilir. Ortalama almak, olası bir yaklaşımdır ve makul sonuçlar vermektedir. İleride başka alternatifler üzerinde de durulabilir. Aşağıda, örneklerini verdiğimiz deney seti üzerinde bozunuma uğramış orta kare ve onun anlatılan yöntemle düzeltilmiş hali üzerinde Harris Köşe Bulucu algoritma sonuçları verilmiştir. Görüldüğü üzere iki kare, resimdeki bileşenler açısından örtüşmekle birlikte sağdaki düzeltilmiş karede hareket bulanıklığı önemli ölçüde giderilmiş ve bunun sonucunda Köşe Bulucu performansı artırılmıştır.



Şekil 75:Bozulmuş kareler ve Kare İnterpolasyon tekniği ile düzeltilmiş kareler orta video resim karesi üzerinde Harris Köşe Bulucu ile elde edilen sonuçlar.

Projemizde özel öneme sahip konu, resimlerde hareket bulanıklığının görsel öznelikler üzerine bozucu etkileridir. Yukarıdaki Şekilde, aynı zamanda bozulmuş ve onarılmış video karesi üzerinde Harris Köşe bulucu yordamının sonuçları gösterilmiştir. Büyük dikdörtgenlerde bozulmuş karede köşeler bulunabilmesine rağmen bunların yerleri ve sonucunda ortaya çıkan dikdörtgen boyutları büyük ölçüde yanlıştır. Sağ tarafta ise (sol üst köşe hariç) hem köşelerin başarı ile bulunması, hem de dikdörtgen boyutlarının aslını yansıtması sağlanmıştır.

Ortakdaki küçük dörtgen ise bozulmuş karede tamamen kaybedilmiştir ancak onarılmış görüntü üzerinden başarıyla bulunmuştur. Daha düşük genlikli küçük kareye ait köşeler ise onarılmış kare üzerinden ancak kısmen bulunabilmiştir.

Sonuçlar, bu yöntem ile hareket bulanıklığına uğramış video dizinlerinde önemli miktarda bilginin geri kazanılabileceğini göstermiştir. Tüm bu sonuçların kıyaslamalı durumu, aşağıda gösterilmiştir. Burada gözlenen, Görüntü Karesi yaklaşımının, özellikle hareket bulanıklığının arttığı ama bozulan kareyi çevreleyen karelerde makul veriler bulunduğu ve sıklıkla karşılaşılan durumlarda iyi sonuçlar verdiğiidir.

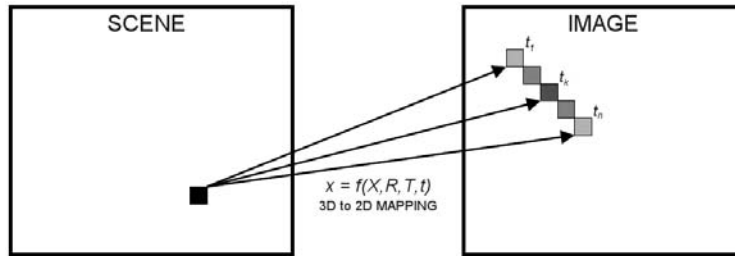
	No of corners	
	Frame F _A -2 (Slightly Blurred)	Frame F _B -2 (Heavily Blurred)
Ideal image	52 (100%)	52 (100%)
Original blurred image	10 (19.0%)	1 (1.9%)
Lucy-Richardson	45 (86.5%)	27 (51.9%)
Wiener Filter	44 (84.6%)	40 (76.9%)
Blind Deconv.(Random init.)	44 (84.6%)	22 (42.0%)
Blind Deconv.(Exact init.)	46 (88.5%)	36 (69.0%)
Frame interpolation	22 (42.3%)	44 (84.6%)

Tablo 5: Deneysel robotumuz ile yapılan video kayıt deneyleri

3.3 Hareket Bulanıklığı Matlab Benzetim Çalışması

Proje çalışmalarımız kapsamında, robot üzerinde hareket halinde bulunan bir kamera'nın maruz kaldığı hareket bulanıklığının benzetim yoluyla elde edilmesine yönelik olarak Matlab ortamında ek çalışmalar yapılmıştır. Bu benzetim çalışmasının amacı, donanım deneylerinden önce hem bir sonraki yaklaşımda anlatılacak yöntem ile donanım destekli kamera görüntü alma anı tetikleme yaklaşımı ile ilgili ön bilgiler kazanabilmek, hem de kamera stabilizasyonu için kontrol algoritmalarının geliştirilmesinde bir B-planı imkanı sahibi olmaktır.

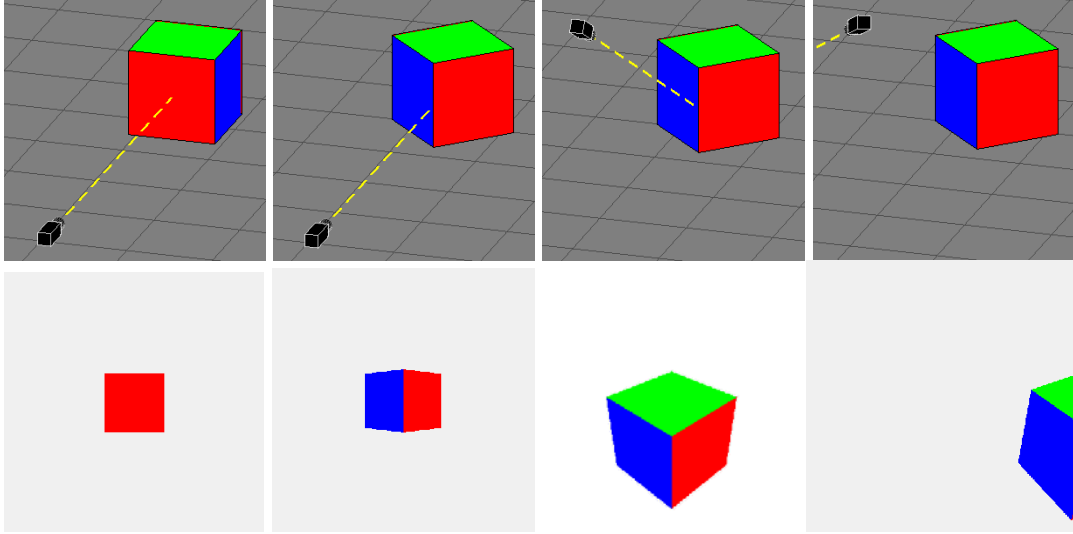
Bu amaçla yapılan benzetim çalışmaları iki parçadan oluşmaktadır. İlk parça olarak kullanılan kameranın kalibrasyon sürecinden geçirilmesi ve ilgili kameranın perspektif dönüşümü denklemlerinin elde edilmesidir. Bundan sonra, belli uzaklıkta görüntülenecek bir sahne varsayılarak (poligonlardan benzetim yolu ile de oluşturulabilir) ve robotun maruz kaldığı özellikle açısız hareket sonucu kamera bakış açısı üzerinden benzetilen nesne resim düzlemine yansıtılmaktadır. Bu işlem Şekil 76'de gösterilmiştir.



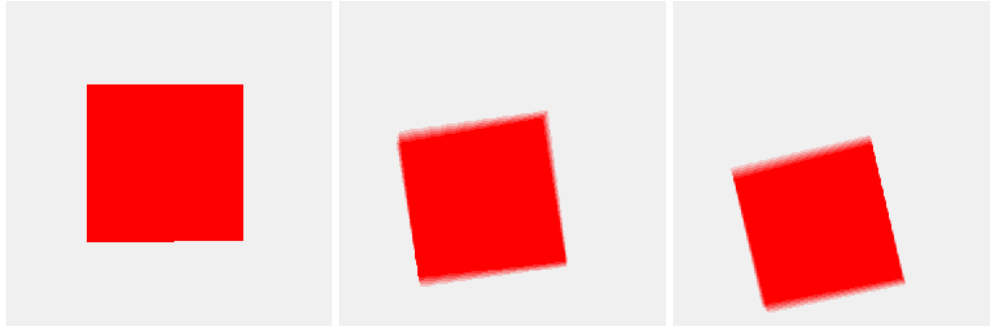
Şekil 76: Hareket bozunumunu da içeren perspektif dönüşümünün kavramsal gösterimi

Hareket bulanıklığını resim düzleminde hesaplayabilmek için oluşturulan sentetik sahnede kamera hareketinin benzetimi yapılmakta ve pozlama zamanı içerisinde nesnenin resim düzlemine izdüşümleri ortalamaya tabii tutulmaktadır. Bu işlemimizde henüz aydınlatma ile

ilgili unsurları dikkate almıyoruz. Senstetik sahnedeki resim düzlemi verilerinin elde edilmesi aşağıda Şekil 83'de, kamera hareketinden kaynaklı benzetilmiş hareket bulanıklığı ise Şekil 84'de gösterilmiştir.



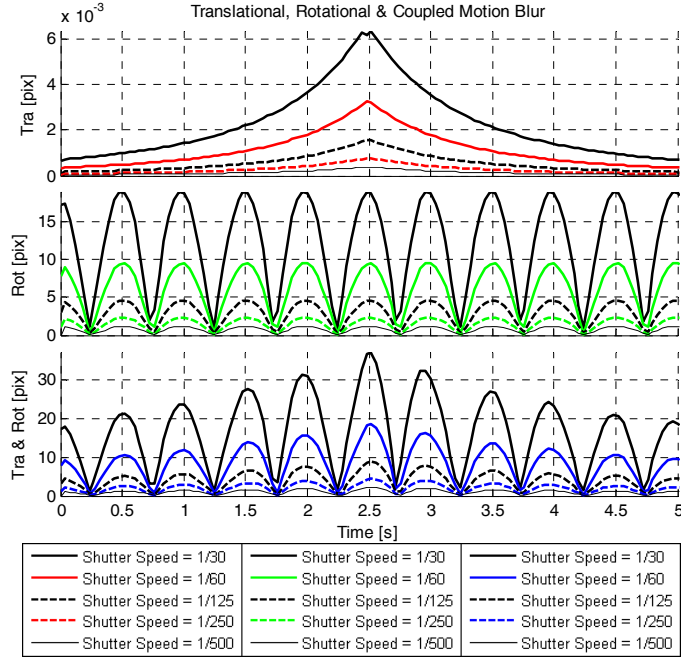
Şekil 77: Benzetim çalışmaları: Sentetik sahnenin resim düzlemi üzerinde görüntü oluşturması



Şekil 78: Benzetim çalışmaları: Kameranın tümleşik kayma ve dönü hareketi sonucu oluşan hareket bulanıklığı. İlk resim hareket olmayan durumu göstermektedir.

Geliştirdiğimiz bu altyapı kullanılarak pek çok benzetim çalışması yapılmış, kontrollu parametrik hareket sinyalleri altında hareket bulanıklığının değişik kamera optik ve kullanım parametrelerine göre nasıl değiştiği irdelenmiştir.

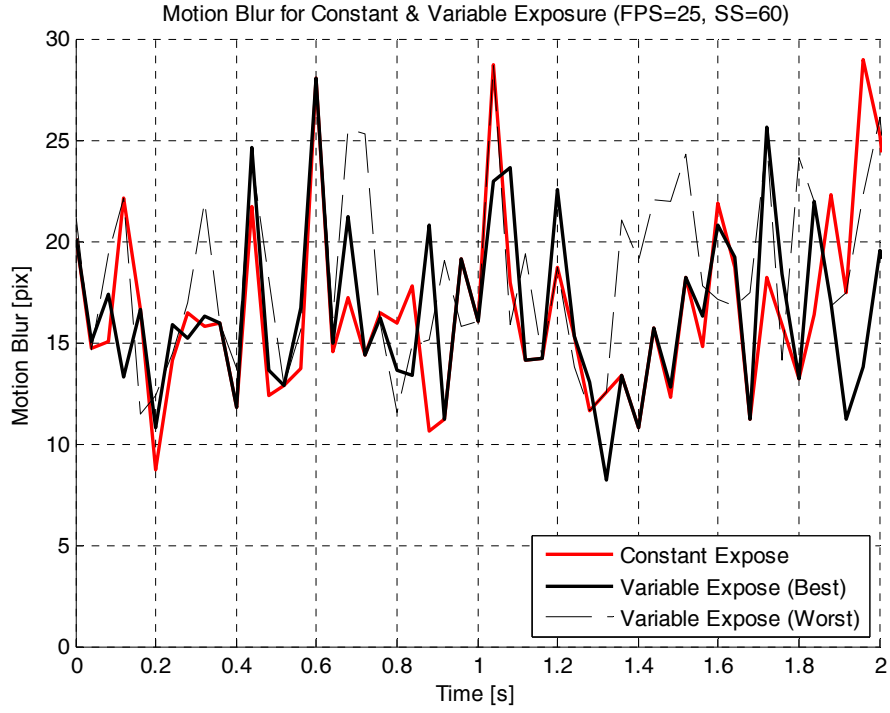
Benzetim sonuçlarına burada bir iki örnek ile değinilebilir. Örneğin kamera resim alma (shutter) hızının hareketin kare içinde gözleendiği süreyi belirleme açısından doğrudan etkisi vardır. Değişik resim alma hızlarının belli bir kamerada kaç piksel hareket bulanıklığına yol açtığı bilgisi, kamera modeli ve benzetim ortamımız yoluyla çıkartılabilmektedir. Bu analiz aşağıda Şekil 79'da verilmiştir. Yine aynı benzetim aracı kullanılarak elimizdeki farklı kamera/objektif kombinasyonlarının eşdeğer optüratör hızı altında yol açtığı bulanıklık miktarları da ortaya konulabilir. Bu sonuçlara bazı örnekler raporumuzda yer almaktadır.



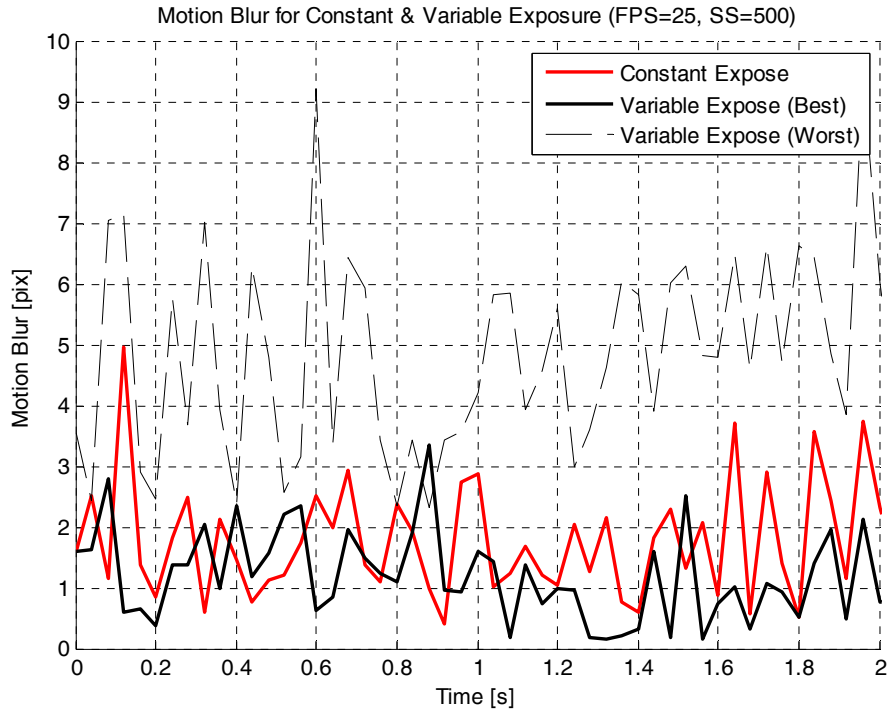
Şekil 79: Kamera resim alma (obtüratör) hızının doğrusal ve dönüsel hareket ile ortaya çıkan hareket bulanıklığına etkisi.

Benzetim modeli çalışmamızın sağladığı analiz imkanı ile elde edilen ilginç sonuçlardan bir başkası ise hareket sırasında resim alma anının donanım tetiklemesi yolu ile kontrolü ile hareket bulanıklığında bir iyileşmenin elde edilip edilemeyeceğinin incelenmesidir. Gerçekte bunun yapılabilmesi için daha sonraki çalışmalarımız kapsamında hem bir donanım tetikleme mekanizması, hem de doğru resim alma anlarının tahminlenmesi için bir hareket kestirim yordamı geliştirilmesi gerekmiştir. Ancak benzetim ortamında homojen zamanlama ile en avantajlı (kamera hareketinin en az olduğu) anların seçildiği durum kıyaslanarak bir iyileşme beklentisinin makul olup olmadığı incelenmiştir. Aşağıda verilen örnek sonuçlarda 25 kare/saniye bir resim alma hızında önce 1/60 sn. daha sonra 1/500 sn. pozlama zamanlarının 1/25 sn'lik aralık içinde kaydırılması ve uygun zamanda tetiklenmesinin verdiği sonuçlar gözükmemektedir. Bu örneklerde değişken bir kazanım elde edilebildiği gözlenmektedir. Görüntü alım zamanının (pozlama) kısalması ile kareler arası görüntü alınabilecek değişken zaman aralığı genişlemekte ve bu sebeple kazanım artmaktadır. Öte yandan pozlama zamanının kısalması, ortaya çıkan hareket bozulmasının genliğini tüm durumlarda azaltmaktadır. Dolayısı ile değişken ışık şartları ve saniyede alınan görüntü karesi sayısındaki değişkenlik altında bu performans artışı değişkenlik gösterebilir.

Benzetim ortamındaki bu ön çalışmaları takiben, projemizin ilerleyen süreçlerinde donanım destekli tetikleme konusunda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, takip eden bölümde ele alınmıştır.



Şekil 80: Değişken resim alma anı tetikleme nin hareket bulanıklığı üzerine etkisini inceleyen benzetim sonuçları. FPS=25kare/saniye, SS(resim alma hızı)=1/60 sn.



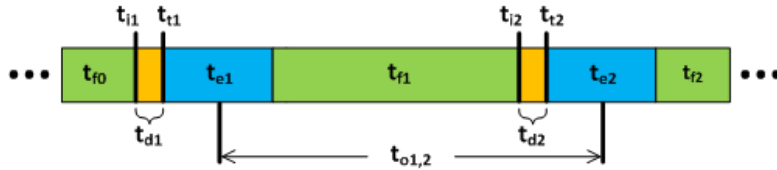
Şekil 81: Değişken resim alma anı tetikleme nin hareket bulanıklığı üzerine etkisini inceleyen benzetim sonuçları. FPS=25kare/saniye, SS(resim alma hızı)=1/500sn.

3.4 Donanım Destekli Kamera Tetikleme İle Giderim

SensoRHex'in yürüyüşü sırasında gövde hareketlerinin yarı-periyodik olduğunu bilmekteyiz. SensoRHex'in yürüyüşü sırasındaki gövde hareketleri tam olarak bilinmeyen fakat yaklaşık olarak tahmin edilebilen salınımlardan oluşmaktadır. Bu durumda robot yürürken bazen hareket bulanıklığı fazla, bazen de az olması beklenir. Kameranın görüntü alma sırasında diyaframının açık kaldığı süre boyunca hangi hareketleri yaptığını bilirsek oluşacak olan görüntünün nasıl bir hareket bulanıklığına sebep olacağını matematiksel olarak bulabiliyoruz (Joshi vd., 2010), (Basu ve Ravi, 1997). Bu da görüntü alınması işlemini sadece hareket bulanıklığının az olacağı zamanlarda yapabilmemiz için olanak sağlar.

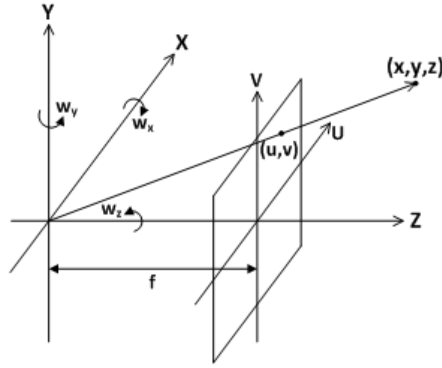
SensoRHex'in döngüsel açı hızları labımızdaki "Fizoptika" marka 3 eksen optik jiroskop sayesinde oldukça gürültüsüz bir şekilde ve 600Hz gibi yüksek bir frekansta alınabilmektedir. Fakat MEMS tabanlı ivme ölçerler karmaşık hareketlere maruz kaldığında fazla miktarda gürültülü ve hatalı ölçümler verebilir. Kameranın çizgisel hareketinden kaynaklanan hareket bulanıklığının hesaplanması aynı zamanda derinlik bilgisinin de bilinmesini gerektirir. Ancak kameranın döngüsel hareketlerinden kaynaklanan hareket bulanıklığı görüntüsü çekilen sahnenin derinliğinden bağımsızdır. Ayrıca görüntüsü çekilen alan kameradan uzak mesafede olduğunda kameranın döngüsel hareketleri görüntü bulanıklı üzerinde daha baskın hale gelmektedir. Dolayısı ile SensoRHex üzerinde hareket bulanıklığı hesabı için hesaplara sadece robotun döngüsel hareketlerinin katılması uygundur.

600Hz frekansta kameranın maruz kaldığı döngüsel salınımları ölçerken, gerçek zamanlı olarak bu ölçümlerden kamerada oluşacak olan "anlık optik akış" hesaplanabilir. Şekil 82'te uyguladığımız akıllı görüntü tetikleme sisteminin zamanlası görülmektedir. 3 eksende toplanan dönüş hızlarına karşılık gelen ortalama optik akış yine 600Hz frekansta hesaplanmaktadır. Örneğin, jiroskop bilgisi t_{i1} anında gelmiş olsun. Son derece hızlı bir şekilde ortalama optik akış hesaplanır ve ortalama optik akış belirli bir değerin altında ise kamera görüntüsü t_{t1} anında tetiklenir. Anlık ortalama optik akışın hesaplanması ve kameranın tetiklenip tetiklenmeyeceği t_{d1} kadar sürede olur. Diyaframın açık kalacağı süre bu çalışmada sabit tutulmuştur ve t_{e1} ($=t_{e2}$) olarak belirlenmiştir.



Şekil 82: Ardışık görüntülerin yakalama zamanlaması.

Gövde açısal hızları anlık olarak bilindiğinde ve kamera sensörü de gövdeye sabitlendiğinden, kameradan alınan görüntü üzerinde oluşacak olan hareket bulanıklığını gövde hareketlerinin fonksiyonu şeklinde yazabiliriz. Şekil 83 bize sabit bir noktanın (x,y,z) kameranın sensörü üzerinde nereye düşeceğini (u,v) göstermektedir.



Şekil 83: Kamera ve Dünya koordinat sistemleri ile kamera dönüş açılarının gösterimi.

Kamera modeli olarak “iğne delikli kamera modeli” kullanılmıştır;

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} \frac{x}{z} \\ \frac{y}{z} \end{bmatrix}.$$

iğne delikli kamera modelinin tersi de şu şekilde gösterilebilir:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \frac{u}{f} \\ z \frac{v}{f} \\ z \end{bmatrix}.$$

Ölçebildiğimiz veri açısal hız bilgisi olduğundan iğne delikli kamera modelinin türevine de ihtiyacımız vardır. Gösterimi şu şekildedir;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} \frac{\dot{x}z - x\dot{z}}{z^2} \\ \frac{\dot{y}z - y\dot{z}}{z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{fx}{z^2} \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{fy}{z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}.$$

Kamera W matrisi ile döndürüldüğünde sahnedeki sabit noktanın kameraya göreli olarak nasıl bir hızda hareket edeceği de şu şekilde bulunur;

$$\dot{P} = W \times P,$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

Kullandığımız “Hareket Bulanıklığı Ölçevi” (MMBM) anlık optik akış vektörlerinin kamera sensörü üzerindeki ortalamasıdır. Resim üzerindeki anlık ortalama optik akış formülü tanımı gereği,

$$\mu := \frac{1}{\Delta u \Delta v} \int_{u_{\min}, v_{\min}}^{u_{\max}, v_{\max}} \sqrt{\dot{u}^2 + \dot{v}^2} du, v$$

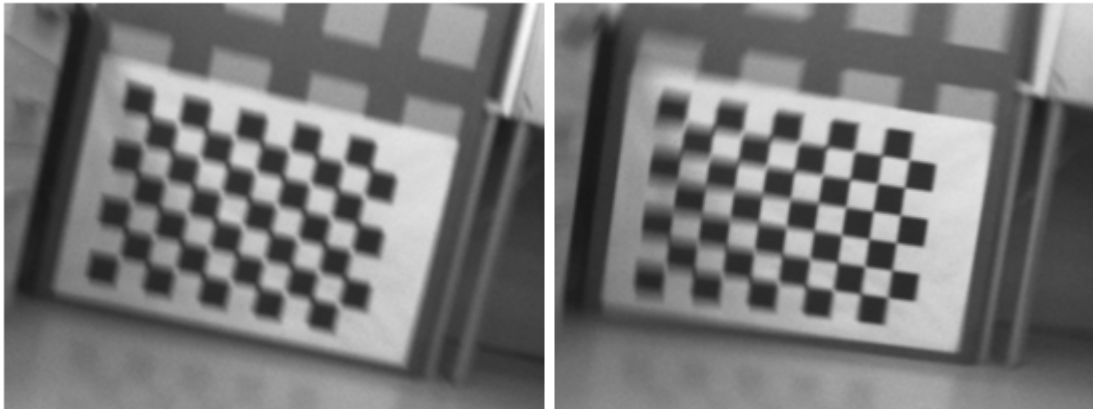
Bu denklemleri kullanılarak son denklemde verilen ve dünya üzerindeki sabit noktanın kamera dönüşü ile görüntü sensörünün üzerinde nasıl bir optik akış oluşturacağı bilgisi aşağıdaki gibi bulunabilir,

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{u}{z} \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{v}{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{u}{z} \\ \frac{v}{z} \\ \frac{f}{z} \end{bmatrix}$$

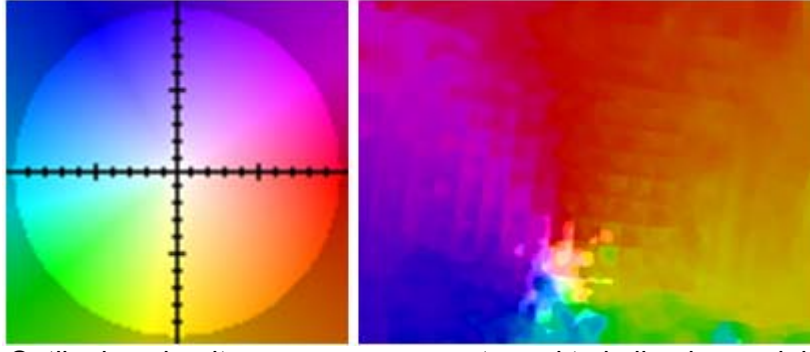
Son olarak yukarıda karekök içinde kalan ifadenin açık hali şu şekilde bulunur:

$$\begin{aligned} \dot{u}^2 + \dot{v}^2 &= \frac{w_y^2}{f^2} \mathbf{u}^4 + \frac{w_x^2}{f^2} \mathbf{v}^4 + \frac{w_x^2 + w_y^2}{f^2} \mathbf{u}^2 \mathbf{v}^2 - 2 \frac{w_x w_y}{f^2} \mathbf{u}^3 \mathbf{v} - 2 \frac{w_x w_y}{f^2} \mathbf{u} \mathbf{v}^3 + (2w_y^2 + w_z^2) \mathbf{u}^2 \\ &+ (2w_x^2 + w_z^2) \mathbf{v}^2 - 4w_x w_y \mathbf{u} \mathbf{v} - 2w_x w_z f \mathbf{u} - 2w_y w_z f \mathbf{v} + (w_x^2 + w_y^2) f^2. \end{aligned}$$

Bulduğumuz ölçevin sonucu ancak nümerik yöntemlerle bulunabilmektedir. Ölçevimizin (MMBM) doğruluğunu gösterebilmek için ölçevimizin verdiği değerleri literatürde kullanılan optik akış algoritmalarından birisini (Sun vd., 2010) kullanarak elde ettiğimiz ortalama optik akış ile karşılaştırdık. Karşılaştırma için kameranın baskın olarak yunuslama açısında hareket ettiği ve üç ekseninde karmaşık hareket ettiği zamanlarda alınan görüntülerden oluşan veri setleri kullanıldı. Şekil 84 kullandığımız veri setlerinden rastgele alınan iki resmi göstermektedir. Şekil 85'da ise Şekil 84'te görülen iki resimden hesaplanan optik akışın sonucu gözükmemektedir. Piksellerin değişim miktarları ve yönleri Şekil 85(a)'da verilen renk haritası ile gözlemlenebilir. Şekil 85(b)'de gösterilen örnek için baskın olarak kameranın dikey eksenindeki (z eksen) dönüşü açık olarak gözükmemektedir.

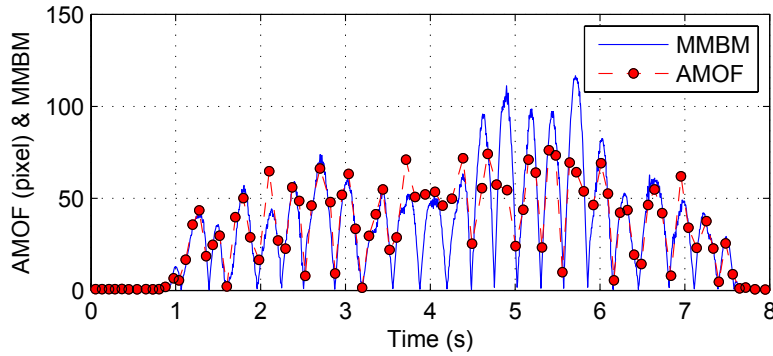


Şekil 84: Kamera ile alınan ardışık iki görüntü.

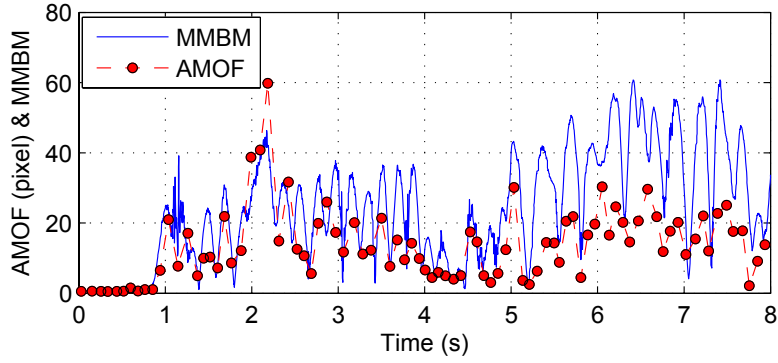


Şekil 85: (a) Optik akış algoritması sonucunu göstermekte kullanılan renk haritası ve (b) Şekil 84'te görülen iki kare arasındaki optik akış hesabı.

Ölçümümüzün ve kullandığımız optik akış algoritmasının sonucunda bulduğumuz anlık optik akış miktarlarının karşılaştırılması sonucunda Şekil 86 ve Şekil 87'de de görüldüğü üzere birbirleri ile tutarlı oldukları görülmüştür. Bazı farkların olması kaçınılmazdır. Çünkü bizim ölçümümüz Şekil 82'te gösterilen t_{i1} anındaki jiroskop datası ile o anda olacak olan anlık ortalama optik akışı vermektedir, fakat kullandığımız optik akış algoritması iki kareye ihtiyaç duyduğundan ancak $t_{0,2}$ zamanındaki ortalama optik akışı verebilir. Ayrıca ölçümümüz 600Hz frekansında hesaplanırken kameradan ancak 12Hz ile kalibre edilmiş kareler alınabilmektedir. Şekil 86 ve Şekil 87'de gösterilen kırmızı noktalar optik akışın resimlerden hesaplanabildiği anlardır ve noktaların arası sadece kestirimdir. Göreceli olarak biraz daha yavaş hareket eden veri seti ile karşılaştırma yapıldığında karşılaştırma sonucunun oldukça tutarlı olduğu Şekil 86'de görülmektedir. Ancak kamera dönüş hızı artırıldığında ve hareket karmaşıklaştığında resimlerdeki hareket bulanıklığından kaynaklanan bilgi kaybı da artmakta ve bu durum optik flow algoritmasının performansını düşürmek sureti ile karşılaştırmamızın sonucunun Şekil 87'de görüldüğü gibi farklılaşabilmesine neden olmaktadır. Ancak Şekil 87'de gözükken farklılıklar ölçümümüzün geçersizliğinden değil kullandığımız optik akış algoritmasının limitlerini geçtiğimizden kaynaklanmaktadır.



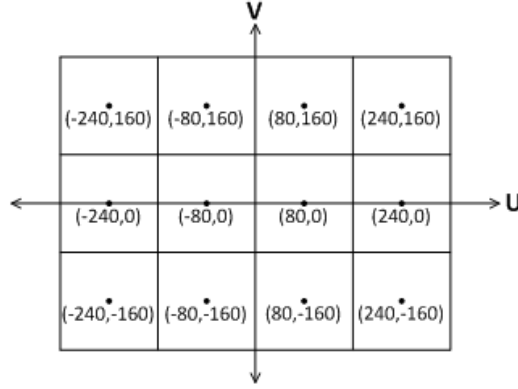
Şekil 86: Kamera yunuslama hareket yaptığında MMBM ve AMOF'un karşılaştırılması.



Şekil 87: Kamera karmaşık hareket yaptığında MMBM ve AMOF'un karşılaştırılması.

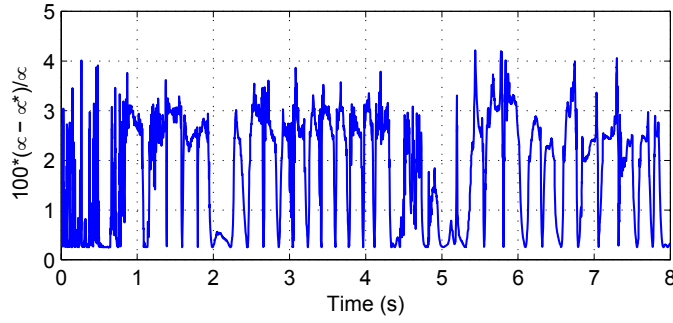
Yukarıda verilen ölçümüz sadece nümerik yöntemlerle hesaplandığından gerçek zamanlı olarak hesaplanabilmesi için bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bunun için iki boyutlu yüzeyde (kamera sensörü) hesaplamamız "Riemann Sum" yöntemi ile yeniden ele alınmıştır. Ölçüye ait ifadeyi kamera sensörü yüzeyinde nümerik olarak çözdürmek yerine, optik akış vektörleri sadece Şekil 88'da gösterilen 12 kare bölümün merkezinde hesaplanmış, ve her kare alanda ölçümüzün sabit olduğu değerinin de her alanın merkezindeki değer olduğu varsayılmıştır. Ölçümüzün son halinin sadece her kare alanın merkezindeki optik akış vektörlerinin büyüklüklerinin ortalaması haline dönüştüğünü görebiliriz;

$$\mu^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{u_i^2 + v_i^2} dA.$$



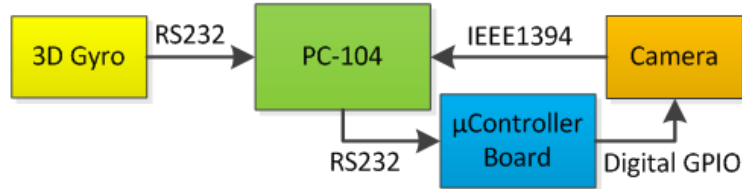
Şekil 88: "Riemann Sum" yaklaşımında kullanılmak üzere kamera sensörünün aralıklara bölünmesi.

Bu denklem derece hızlı bir şekilde 600Hz ile alınan bir datada gerçek zamanlı olarak hesaplanabilmektedir. Denklem **Error! Reference source not found.**'nin nümerik hesaplanması ile de neredeyse aynı sonucu vermektedir. Şekil 89 ölçümüzün nümerik ve yaklaşımsal hesaplanmasının verdiği sonuçların farkının nümerik sonuca göre yüzde değişimini göstermektedir. Yani uyguladığımız Riemann Sum yaklaşımını %5'in altında hata vermektedir ve bu bizim çalışmamızda son derece yeterlidir. Riemann Sum yaklaşımının nümerik hesaplamalarla yakın çıkmış olmasını ölçümüzün değişiminin yumuşak olmasını ve aldığımız alanların fonksiyonu temsil etmek için yeterli olmasına bağlayabiliriz.



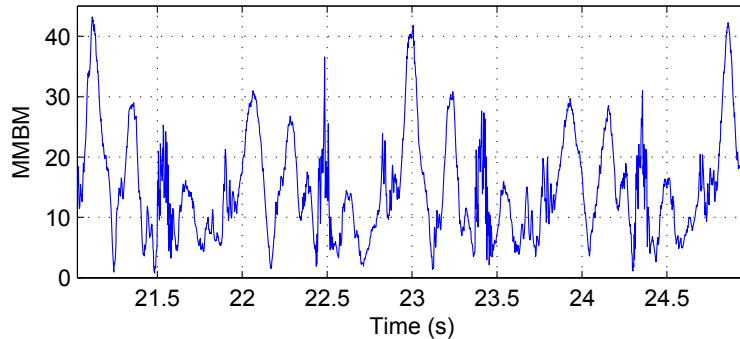
Şekil 89: Ölçevimizin numerik ve yaklaşımsal hesaplanması arasındaki yüzdesel fark.

Gerçek zamanlı hesaplanabilen hareket bulanıklığı ölçevimizi kullanarak SensoRHex üzerindeki kameradan alınacak görüntünün sadece hareket bulanıklığının az olacağı anlarda alınmasını sağladık. Kullandığımız donanımın yapısı Şekil 90'de görülmektedir.



Şekil 90: Kamera görüntüsü tetiklemekte kullanılan donanımın yapısı.

SensoRHex'in yürüyüşü sırasında açılmalı gövde salınımlarının yarı-periyodik olması, robot yürürken alınacak olan görüntülerdeki hareket bulanıklığının da zaman içinde azalıp tekrar artacağı anlamına gelmektedir. Şekil 91'de robotun iki adımdan biraz daha uzun bir süredeki jiroskop verisi üzerinde ölçevimizin hesaplanmış sonucu görülmektedir. Şekilde robotun ayağının yere çarpış anları ölçevin maksimum değerlere ulaştığı yüksek 3 nokta olarak gözükmemektedir. Bacakların yere ilk temas ettiği anlarda robota impulsif kuvvetler uygulandığından hareket bulanıklığının da en fazla olması beklenen anlar olduğu açıktır. Ölçevimiz bu anları net bir şekilde ortaya koymuştur. Görüntünün tetiklenmesini de ölçevin değerinin belli bir eşik değerinin altında olduğu anlarda yaptığımızda alınacak görüntünün göreceli olarak az hareket bulanıklığına sahip olması beklenir.



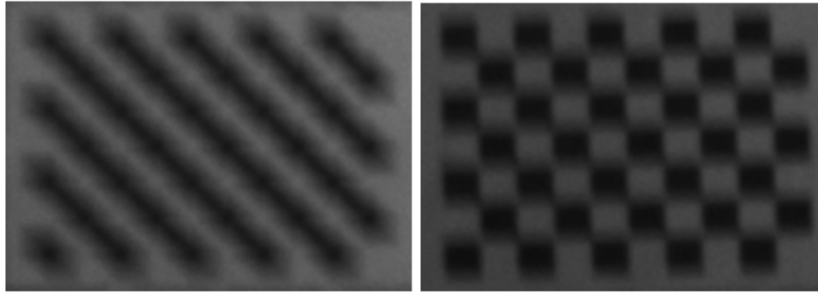
Şekil 91: Robot yürüyüşü sırasında hesaplanan MMBM.

Şekil 90'de gösterilen donanımı kullanan SensoRHex ile Şekil 92'te görülen deney alanı kuruldu. Robot düz yürürken akıllı tetikleme yöntemi ile tetiklenen kameramızdan görüntüler toplandı. Aynı kamera ile robot yürürken sabit frekanslı tetikleme ile alınan görüntülere göre

hareket bulanıklığında ciddi azalmalar gözlemlendi. Şekil 93 her iki veri setindeki en fazla hareket bulanıklığına sahip kareleri karşılaştırmaktadır. Özellikle görüntü bulanıklığının aşırı fazla olduğu karelerin neredeyse kalmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 92: (a) Dışardan ve (b) SensoRHex'in görüş açısından deney alanı.



Şekil 93: (a) Sabit frekanslı, (b) MMBM kullanan akıllı kamera tetiklemesi ile yapılan deneylerin sonucunda alınan en fazla hareket bulanıklığına uğrayan kareler.

Son olarak deney sonuçlarımızı daha sayısal sonuçlara dökülebilmek amacıyla literatürdeki bazı "yardımsız bulanıklık ölçümleri" toplanan resimlerde denendi. JNBM algoritması (Ferzi ve Karam, 2009) ile sabit frekansta toplanan resimler ve akıllı tetikleme ile toplanan resimlere bahsi geçen bulanıklık ölçümleri uygulandı. SensoRHex yürürken 5fps sabit hızla alınan resimlerde JNBM ortalaması 0.3564 çıkarken, akıllı resim alma yöntemimizde JNBM ortalaması 0.4908 çıkmıştır. JNBM sonucunun büyük olması resmin daha keskin olması anlamına da geldiğinden hareket bulanıklığı ölçümümüzü kullanarak yapılan resim alımının daha başarılı olduğu görülmüştür.

Alınan görüntülerde daha az hareket bulanıklığı olduğunda pek çok görüntü işleme algoritmasının performansı artacaktır. Örneğin robot üzerinden alınan görüntüler ile SLAM uygulaması yapmak istediğimizde daha hassas ve daha doğru haritalama ve konum tespiti yapılabilecektir. Kullandığımız yöntem kamerayı harici olarak tetikliyordu. Fakat başka kameralarda tetikleme yazılımsal olarak da yapılabilir. Yada tetikleme kontrolü olmayan sistemlerde resmin çekildiği anlarda jiroskop datasından ölçümümüz hesaplanarak alınan resmin ortalama ne kadar hareket bulanıklığına sahip olacağı kestirilip, resmin kullanılıp kullanılmayacağına karar verilebilir.

Yöntemimiz resimde daha hareket bulanıklığı oluşmadan önlem alabildiği için resimlerdeki önemli bilgiler büyük ölçüde korunmuş olur. Resimleri daha da iyileştirmek için gerektiğinde yazılımsal yöntemler kullanılabilir.

Önerdiğimiz sistem şu anda toplanan jiroskop datasını işlediği için sadece kamera diyaframı açılmadan önceki hareketi bilip, yakın gelecekte robotun bir anda değişen davranış

sergilemeyeceği varsayımında bulunuyor. Ayrıca hareket modeli olan robotlarda ölçevimizin kamera diyafrazının açık olduğu anlardaki ortalama hareket kirliliğini de tahmin etmekte kullanabiliriz. Böylece optimal triggering anlarında görüntü alınması sağlanabilir.

3.5 Sonuç

Bu bilimsel alanda proje kapsamındaki çalışmalarımız tamamlanmış olmakla birlikte bu alandaki çalışmalarımız için açık uçlar bulunmaktadır. Karakterizasyon ve Ters Filtreleme Yöntemleri ile elde edilen sonuçlar tamamlanmıştır. Donanım destekli tetikleme alanındaki çalışmamız henüz tüm çıktılarını vermiş değildir ve uluslararası dergi makalesi olarak bilimsel yayın çıktısı vermesi beklenebilir. Bunun için çalışma sonucunda elde edilen ölçev kullanılarak hareket bulanıklığının azaltılabildiği karşılaştırmalı olarak gösterilecektir. Bunun ötesinde çoğul karelerden ve robotun hareket bilgisi de kullanulara donanım destekli ters filtreleme ile ilgili tüm fikirlerimizi gerçekleştirme imkanı bulamadık. Bu açık uçlardaki çalışmalarımız halen bir Y.Lisans ve bir Doktora öğrencisinin tez çalışmaları kapsamında devam etmektedir.

4 FPGA Destekli Optik Akış

Projemiz kapsamında ele aldığımız konulardan birisi, robot görme alanında önemli yaklaşımlarda birisi olan optik akış yönteminin, literatürde kabul gören bir halinin tümüyle FPGA üzerinde bir sayısal donanım tasarımı ile gerçekleştirilmesi idi. Bu çalışmayı motive eden temel etken, deneysel platformumuz SensoRHex ölçeğindeki “taşınabilir” mobil robotlarda, güç imkanlarının ve dolayısı ile hesaplama (bilgisayar) altyapısının sahip olduğu sınırlamalardır. Bu imkanlar her gün gelişmekle birlikte mobil robotlarda da eş zamanlı başarılmak istenen işlevler de aynı hızda artmaktadır. Bu sebeple düşük güç tüketimi ve yüksek hızda görsel algı yordamlarının gerçekleştirilebilmesi önemini korumaktadır.

Projemizin bu konu kapsamında gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda, FPGA destekli optik akış konusunda başarılı bir sistem ortaya çıkarılmış ve performans analizlerine tabi kurulmuştur. Bu çalışma, uluslararası alanda yenilik içermektedir ve uluslararası dergi makalesi olarak kabul görmüş ve yayınlanmaya değer bulunmuştur. Burada tasarım unsurlarından ve deney sonuçlarımızdan kısaca bahsetmekteyiz. Yayınlanmış olan makalemiz, projemizin çıktılarında birisi olarak ekler arasında yer almaktadır.

4.1 Motivasyon ve Genel Yaklaşım

Projemizde ele alındığı üzere optik akış, bilgisayar ile görme konusunda görüntü kareleri arasında kameranın veya görüntü içerisinde bulunan görsel unsurların hareketinin çıkartılması için çok yaygın kullanılan bir yordamdır. Bu yordamın kullanımındaki önemli sorunlardan birisi, hesaplanması için gereken yüksek işlemsel yüküdür. Bu sebeple, optik akışın video hızlarında ve makul çözünürlüklü görüntüler üzerinde genel amaçlı bilgisayarlar ile hesaplanması mümkün olamamaktadır.

Bilgisayarlı görmenin küçük ve orta ölçekli hareketli robotlarda uygulamalarında, platformun güç ve hesapsal bağımsızlığının sağlanabilmesi için çok güçlü bilgisayarların platform üzerinde kullanılması imkansız hale gelmektedir. Bu durum, optik akış gibi hesapsal yükü yüksek yordamlar için ek bir zorluk ortaya koymaktadır. Dolayısı ile optik akışın hareketli

robotlarda başarıyla uygulanması için düşük güç tüketimli ve yüksek hızlı gerçekleştirme ortamlarına ihtiyaç büyüktür.

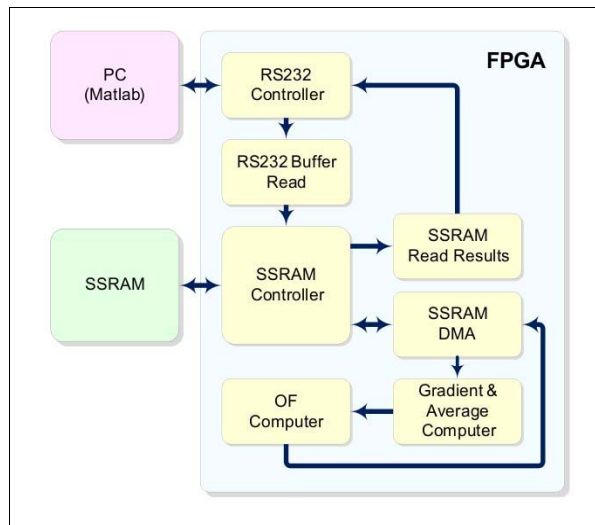
Bu iş kaleminde hızlı ilerleyebilmek ve düşük güç tüketimine odaklanmak amacıyla, projemiz kapsamında daha güçlü bir FPGA alımını önermemize rağmen, lab altyapımızda bulunan ve çok daha düşük güç tüketimine sahip bir FPGA'nin kullanımını benimsedik. Geliştirme kartının kaynakları sebebiyle işleyebildiğimiz resim boyutu makul fakat çok büyük olmayan bir boyutta belirlendi. FPGA seçiminin ve kart üzerindeki hafızanın arttırımı yoluyla resim boyutunun büyütülmesinin son derece mümkün olduğunu belirledik.

4.2 Optik Akış Algoritması ve Donanım Tasarımı

Proje sürecinde literatür taramamız şu durumu ortaya koymuştur: Optik akış, oldukça iyi çalışılmış bir konudur ve 1980'lerde önerilen temel yöntemlere zaman içinde birden fazla iyileştirme önerilmiştir. Ancak yöntemin temel mantığı çok değişmemiştir. En önemli iki yöntem zamansal ve uzaysal türev yöntemlerine dayanmaktadır. Çalışmamızda son yıllara ait özel ve katkısız iyileştirmeler yerine temel yaklaşımlardan birisi olan Horn & Schunck yöntemini baseline olarak donanımda gerçekleştirmeyi hedefledik.

Literatürden anlaşıldığı kadarıyla bu ölçekte robot platformlarındaki güç sınırlamaları dikkate alınarak tasarlanmış bir optik akış sistemi literatürde bulunmamakta, daha yüksek güç tüketimleri ile var olan az sayıda uygulamanın ise tasarımları akademik veya ticari kullanımlar için temin edilememektedir. Bu durum çalışmamızın hem projemizin kısa ve uzun vadeli hedeflerine hizmet edeceğini hem de ya akademik amaçla kullanılabilir açık kaynak bir tasarımı veya savunma sanayimiz de dahil özel sektör firmalarımızın kullanabileceği ticari bir ürüne katkı yapabileceğini ortaya koymuştur.

Proje çalışmalarımız kapsamında literatür taramasına ve Optik akış yordamının incelenmesine ilave olarak FPGA donanım isterleri üzerine çalışılmış ve yordamın gerçekleştirilmesi için tasarım ortamı kurulmuştur. FPGA seçiminde seçeneklerimizi kapatmamak için ilk aşamada Lab'ımızda bulunan düşük maliyetli ve düşük güç tüketimli Altera FPGA geliştirme kartının kullanılması kararı alınmıştır. Projemiz bütçesinde daha ileri özelliklerde bir yonga alınması mümkün olmasına rağmen, tasarımda seçilen FPGA yongasının düşük güç tüketimi, seçilmesinde ana etken olmuştur.



Şekil 94: Planlanan FPGA yapısı üst seviye blok şeması



Şekil 96: FPGA temelli Optik Akış tasarımı fonksiyonel donanım modülleri ve giriş/çıkış bağlantıları

Yukarıda Şekil 96'de, tasarımıımızı oluşturan donanım modülleri kapalı bloklar olarak gösterilmekte ve giriş/çıkış kaplarına yer verilmektedir. Kısaca bahsetmek gerekirse tasarım şu şekilde çalışmaktadır: Tasarımıımız deneysel amaçlı durumdadır ve giriş verilerini bir test bilgisayarından almakta ve sonuçları bir test bilgisayarına geri yollamaktadır. Arabirim RS232 seri bağlantı olarak seçilmiştir. Bu oldukça yavaş bir arabirim olmasına rağmen proje ana amaçlarımız için yeterlidir. Bilgisayar arabirimi çekirdek Optik Akış gerçekleştirilmesinden bağımsızdır ve gelecekte kolaylıkla değiştirilebilir. Bunun yanında FPGA üreticisinin hazır kütüphanelerinde bulunan bir modül olması, çalışmamızı hızlandırmıştır.

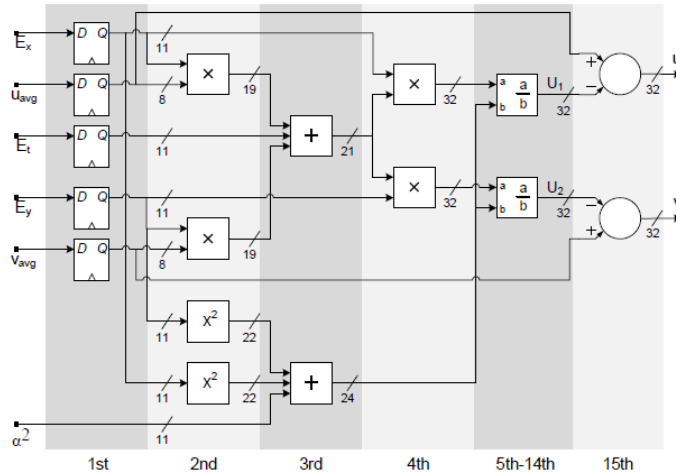
RS232 donanım modülü, bilgisayardan gelecek ve bilgisayara gidecek verileri tekil byte bazında tutmakta ve iletişimi sağlamaktadır. Tarafımızdan tasarlanan RS232_TO_SSRAM ve SSRAM_TO_RS232 modülleri ise sırası ile bu verinin sağlıklı biçimde FPGA kartı üzerinde bulunan SSRAM hafıza modülüne yazılması ve sonuçların bu modülden çekilerek bilgisayara yollanmak üzere RS232 modülüne transfer edilmesini sağlamaktadır. Bu modüller RS232 modülüne gelen verinin sağlıklı akışını ve kaybolmamasını sağlar. Bu transter işlemleri mevcut durumda optik akış hesabının başında ve sonunda yapılmaktadır ancak daha hızlı bir arabirim ile kullanıldıklarında gerçek zamanlı işleyişe uygun yapıya sahiptirler.

SSRAM_DMA modülü merkezi yapılardan biri olup, tüm hesapsal yapının veriyi almak ve sonuçları yollamak amacıyla SSRAM hafızaya asenkron ulaşımını düzenleyen Doğrudan Hafıza Ulaşımı (Direct Memory Access – DMA) modülüdür. Boru Hattı yapısına (pipeline) sahip olan diğer hesapsal modüller bu modülü kullanarak veriye ihtiyaç duyulduğu anda veriyi hafızadan talep etmekte, sonuçlar ortaya çıktığında ise sonuçları uygun hafıza bölgelerine yönlendirmektedir. Okuma ve yazma işlemlerinin biribiri ile çakışmaması bu modül sayesinde gerçekleşmektedir. DMA modülünün hafıza ile etkileşimli kısmı 200 MHz hızında, hesapsal modüller ile etkileşimli kısmı ise 50 MHz hızında tasarlanmıştır. Bu çift saat alanı yapısı, nispeten yavaş modüllerin hafıza okuma/yazma hızını düşürmesine ve tüm sistemi yavaşlatmasına engel olmuştur. Sistemimizi oluşturan modüllerin saat hızları aşağıda verilmiştir.

Module	Clk. Freq.	Module	Clk. Freq.
Optical Flow Computer	50 MHz	SSRAM Controller	200 MHz
Gradient & Average Computer			
RS232 Controller			
SSRAM to RS232			
RS232 to SSRAM			
		SSRAM DMA	

Tablo 6: Tasarımın modüllerinin saat hızları.

Tasarımımızdaki GRAD_LOCALAVG_COMP modülü, optik akış hesap yordamının aşamaları olan gradyan ve bölgesel ortalamaları hesaplamakta, OF_COMPUTER modülü ise son aşama olan optik akış hesabını yapmaktadır. Bu modül eş uzunluklara sahip hesapsal yapıların paralel olarak tasarlanması ile ve bu paralel yapıların aşamalı biçimde yerleştirilmesinden oluşan bir boru hattı mimarisine (pipelined architecture) sahiptir. Bu yapı aşağıda Şekil 97’de gösterilmektedir. Boru hattı yapısı, işlemin tümünün çok uzun zaman aldığı hesapsal problemlerde, modüle veri kabul etme birim zamanını boru hattı aşamalarından en uzun zaman alanının zaman aralığına indirmektedir. Bu sebeple hesap yapısını küçük ardışık parçalara bölmek ve en uzun zaman alan parçayı mümkün olduğunca kısaltmak yolu izlenmektedir. Bunun için OF_COMPUTER yapısı içinde 15 boru hattı aşaması tasarlanmıştır. 5-14’üncü aşamalar, kendi içinde uzun zaman alan bölme işlemini parçalara ayırmaktadır.



Şekil 97: Optik akış hesabını yapan OF_COMPUTER modülünün boru hattı mimarisine sahip yapısı

Tasarımımızda bulunan FİFO (İlk-giren-ilk-çıkart) tampon alanlarının (buffer) yapısı, ekli makale taslağında detaylandırılmaktadır. Şimdi, gerçekleştirdiğimiz FPGA gerçekleştirilmesi ile yapılan testlere değinilecektir.

4.3 Deneysel Performans Değerlendirmesi

Çalışmamızda gerçekleştirilen FPGA donanımını değerlendirmek için literatürde optik akış yöntemlerinin performansını değerlendirmek için önerilmiş olan iki kısa video dizininden yararlanılmıştır. Bunlar “Rubic’s Cube” ve “Hamburg Taxi” dizinleridir. İlk veri seti daha kontrollü bir ortamda bir döner tabla üzerine yerleştirilmiş ve belirgin görsel öğeler içeren bir dizin iken ikinci dizin daha doğal bir ortamda bir kavşak kamerasından çekilmiş video verisini içermektedir. İki dizin de yaklaşık 20 video karesi içermektedir. İlk dizinde 256x256

pixel, ikinci dizinde ise 256x190 pixel bulunmaktadır. En büyük resim boyutu için tasarlanan donanımımız dolayısı ile daha küçük olan dizinin eksik kısmı sıfırlar ile doldurularak test edilmektedir.



Şekil 98: Test amacıyla kullanılan "Rubic's Cube" ve "Hamburg Taxi" video dizinleri.

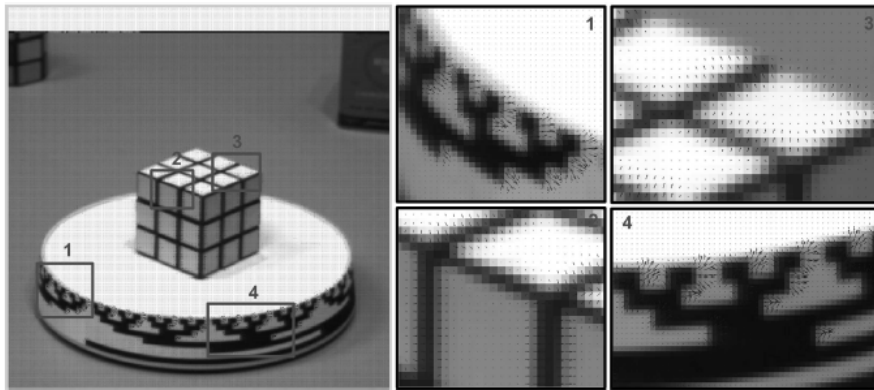
Çalışmamızda amaç yeni bir optik akış yordamı tasarlamak veya yordamın başarımını arttırmak değildir. Bu sebeple çalışmamızdaki performans kriteri olarak PC'de Matlab ortamında kayan nokta hassasiyetine sahip referans gerçekleştirme ile FPGA ile gerçekleştirilen sabit nokta hassasiyetindeki yapı arasındaki örtüşme alınmıştır. Bu örtüşmeyi ölçmek amacıyla iki ölçüt kullanılmıştır. Bunlardan ilki optik akış vektörlerindeki *açısal hatadır* ve

$$AE = \arccos \left(\frac{1 + u \cdot u_r + v \cdot v_r}{\sqrt{1 + u^2 + v^2} \sqrt{1 + u_r^2 + v_r^2}} \right)$$

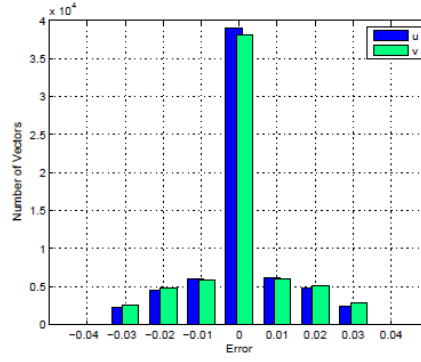
ifadesi ile verilmektedir. İkinci ölçüt olarak vektörlerin uç noktalarını kıyaslayan *uç nokta hatası* kullanılmaktadır ve

$$EE = \sqrt{(u - u_r)^2 + (v - v_r)^2}$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Bu hataların resim içinde ortalaması (AAE, AEE) ve video üzerinden ortalaması (SAAE, SAEE) performans ölçütlerimiz olarak incelenmektedir. Ekli makale çalışmasında bu ölçütler üzerinden birden fazla analiz yer almaktadır.

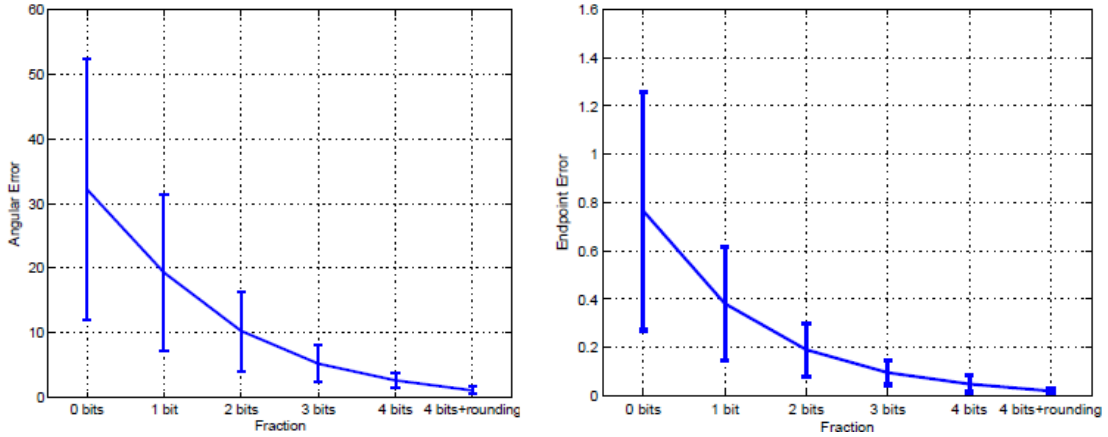


Şekil 99: "Rubic's Cube" video dizini üzerinde FPGA ile hesaplanmış optik akış vektör alanı



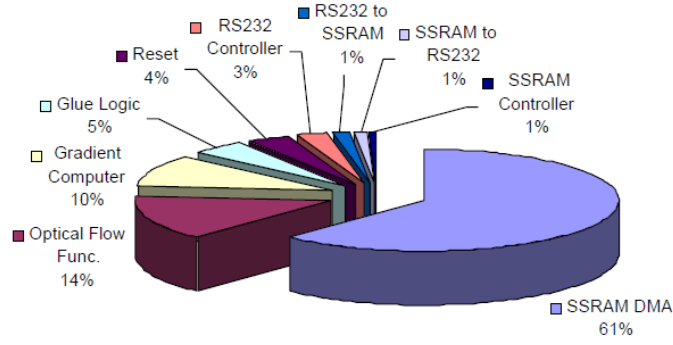
Şekil 100: “Rubic’s Cube” video dizini üzerinde optik akış (u,v) vektör bileşenlerinin hata dağılımı

Yukarıda Şekil 99’da “Rubic’s Cube” video dizini üzerinde elde edilen optik akış vektörleri bir örnek kare üzerinden verilmekte ve Şekil 100’de ise optik akış vektörlerinin hesaplanmasındaki hataların genlik dağılımı gösterilmektedir. Hataların büyük kısmının 0.01 piksel seviyesinin altındadır. FPGA gerçekleştirilmesinde kullanılan sabit nokta sayısal temsilinin nokta yerine göre hassasiyet ve referans PC gerçekleştirilmesine göre oluşan hatalar ise Şekil 101’de gösterilmiştir.



Şekil 101: FPGA gerçekleştirilmesinde kullanılan sabit nokta sayısal temsilinin nokta yerine göre hassasiyet ve referans PC gerçekleştirilmesine göre oluşan hatalar

Bunun yanında FPGA tasarımımızın yer kullanımı, hesap hızı ve FPGA yer kullanımı analizleri yapılmıştır. Matlab ortamında referans PC’de (Core2 Duo 1.66 GHz, 1Gb Hafıza) 2 kare/saniye hızında hesaplanabilen video test dizinleri FPGA tasarımımız tarafından 257 kare/saniye hızında hesaplanabilmektedir. Bunun yanında güç tüketimi PC işlemcisi için 35W seviyesinde iken FPGA sadece 0.84W güç tüketmektedir. FPGA güç tüketiminin modeüllere göre dağılımı aşağıda verilmiştir.



Şekil 102: FPGA güç tüketiminin modüllere göre dağılımı

4.4 Sonuç

Sonuç olarak referans PC gerçeklemesine çok yakın hassasiyette fakat radikal biçimde düşük enerji tüketimli ve yüksek hızlı bir FPGA gerçeklemesi elde edilerek projemizin bu kapsamdaki çalışmaları tamamlanmıştır. Çalışmalarımız bir dergi makalesi olarak çıktı vermiş, bu makale olumlu yorumlar ile kabul edilerek Elsevier Microprocessors and Microsystems dergisinde yayınlanmıştır. Bu makale proje raporumuzun ekleri arasında yer almaktadır.

5 İşitsel Algı Yoluyla Yüzey Tanıma

Konumlandırma ve navigasyon uygulamaları, robotlarda otonom davranışın önemli unsurlarıdır ve projemiz kapsamında ele alınan konulardan bir diğeri olan robot hareket modellerini kullanmak durumundadır. Robot hareket modelleme konusunun önemli yönlerinden birisi, bu hareket modellerinin yüzeye bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. Proje kapsamında yaptığımız deneyler bu durumu doğrulamıştır. Robot platformunun hareketi sırasında ilgili yüzey modelinin kullanılabilmesi için gerçek zamanlı olarak robotun üzerinde hareket halinde olduğu yüzeyin tanınması gerekmektedir. Bu tanıma problemine farklı ölçüm modaliteleri ile, örneğin yine kamera yardımı ile çözüm üretmek mümkün olabilir (ve bu gelecekte yapabileceğimiz çalışmalar arasında değerlendirilmektedir.) Ancak kamera'nın bu ölçekteki bir robotta yüzeye yakınlığı, yüzey ile ilgili verileri çok gürültülü kılmakta ve hareket altında şiddetli hareket bulanıklığı bozulumu ile elde edebilmemize sebep olmaktadır. Bu da yüzey tanıma için kamera kullanımını zorlaştırmaktadır.

Çalışmalarımız sırasında güncellediğimiz literatür taramamız bize şunu göstermiştir: Hareketli robotik alanında işitsel algının çevresel unsurları tanımak için kullanımı konusu literatürde son derece az ele alınmış fakat başarı potansiyeli oldukça yüksek bir konudur. Bu konuda saygın IROS (*Intelligent Robots and Systems*) konferans dizisinde son yıllarda bir özel oturum olmasına rağmen çalışmalar ağırlıklı olarak mesafe ve kaynak yön algılama (sonar, beam-forming) ve uzun zamandır popüler olan konuşma tanıma alanlarına sınırlı kalmıştır. İşitsel algı'nın robotun çevresi ile olan etkileşimi'nin yarattığı doğal sesleri değerlendirmesi konusu ise son derece yeni olduğu ve sadece bir-iki bilimsel makale'de ve sadece iç mekan kontrollü etkileşimler için ele alındığı görülmektedir. Bacaklı robotlar ile yapılmış bir çalışma ise yoktur. Bu sebeple bahsettiğimiz yüzey tanıma problemine projemizde önerdiğimiz akustik yaklaşım önemli bir özgünlük içermiş ve uluslararası düzeyde hem kongre hem de dergi makalesi olarak yayın şansı yakalamıştır.

Projemizde, bu alanadaki çalışmalarımız aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada deneme kayıtları yapılmış ve bu kayıtlar zaman eksenine karşı gözle ve Fourier temelli dönüşüm teknikleri ile frekansta ve zaman-frekansta (spektrogram) incelenmiştir. Daha sonra bacaklı robot platformumuzun bacaklarının yüzey ile etkileşiminden kaynaklanan akustik sinyaller kaydedilerek bir veri tabanı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunu yapabilmek için iki alternatif kayıt sistemi değerlendirilmiştir. İlk sistem robotumuzun üzerinde bulunan PC-104 bilgisayarlar üzerinden bir kayıt mekanizmasıdır. İkinci yöntem ise sıkıştırma olmaksızın daha yüksek (24 bit) çözünürlükte ve 44100 örnek/saniye hızında akustik kayıt yapabilen Olympus LS-10 Doğrusal PCM kayıt cihazının kullanımınıdır. Şekil 103 (a)'da gösterilen bu cihaz standart bir bilgisayar donanımından daha yüksek çözünürlükle kayıt yapabilmeye ve ses sinyallerini incelemememiz ve modellerimizi oluşturmamız için bize daha yüksek bir hassasiyet vermiştir. Ancak bu analizler sonucunda edindiğimiz bilgi, son durumda robotumuzun üzerindeki ses analizinin PC-104 bilgisayar ses donanımı ile performans kaybı olmadan yapılabileceğini göstermiştir. Bu süreçte iki yolla da alınan ses kayıtları ve bunların performansa etkilerini de inceleme fırsatı bulduk ve Olympus'un yaptığı kayıtların önemli bir performans farkı yaratmadığını gözlemledik. Kayıtlarımız sırasında bilgisayar ve Olympus donanımı arasında mikrofon eşitliğini sağlamak için platformumuz için uygun boyutlara sahip yüksek performanslı bir mikrofon olan Sony ECM-DS70P mikrofonu kısa bir uzatma kablosu yoluyla kullanılmıştır (Şekil 103 (b)). Yine de bu kayıt donanımı, bize deney verilerimizi toplamakta önemli kolaylık sağlamış ve erken sonuçlara ulaşmamızı sağlamıştır.



Şekil 103: (a) Olympus LS-10 Doğrusal PCM kayıt cihazı. Bu cihaz 44100 örnek/saniye hızında 24 bit çözünürlük ile kayıt yapabilmektedir. (b) Sony ECM-DS70P mikrofonu.

Platformumuz ve üzerindeki mikrofon yerleşimi de Şekil 105'de gösterilmektedir. Mikrofon, bacakların ortasında ve platformun altında yer almaktadır.



Şekil 104: (a) 106E089 no'lu Tübitak 1001 projesi kapsamında geliştirilen SensorHex bacaklı robot platformumuzun çimen yüzeyi üzerindeki görüntüsü (b) Platform üzerinde mikrofon yerleşimi.

Çalışmalarımız kapsamında iç ve dış mekana ait yedi (7) değişik yüzey üzerinde farklı yürüyüş hızlarında veri toplanmıştır. Bu yüzeyler halı, marley, mermer karo, parke, beton karo-1 (sonbahar yaprakları), beton karo-2 ve çimen olarak seçilmiştir. Değişik hızlarda topladığımız veriler düzenlenmiş ve deneylerimizde kullanılmak üzere bir ses veri tabanı

oluşturulmuştur. Oluşturduğumuz veri tabanını oluşturan yüzeylerin fotoğrafları, Şekil 105'de gösterilmiştir.

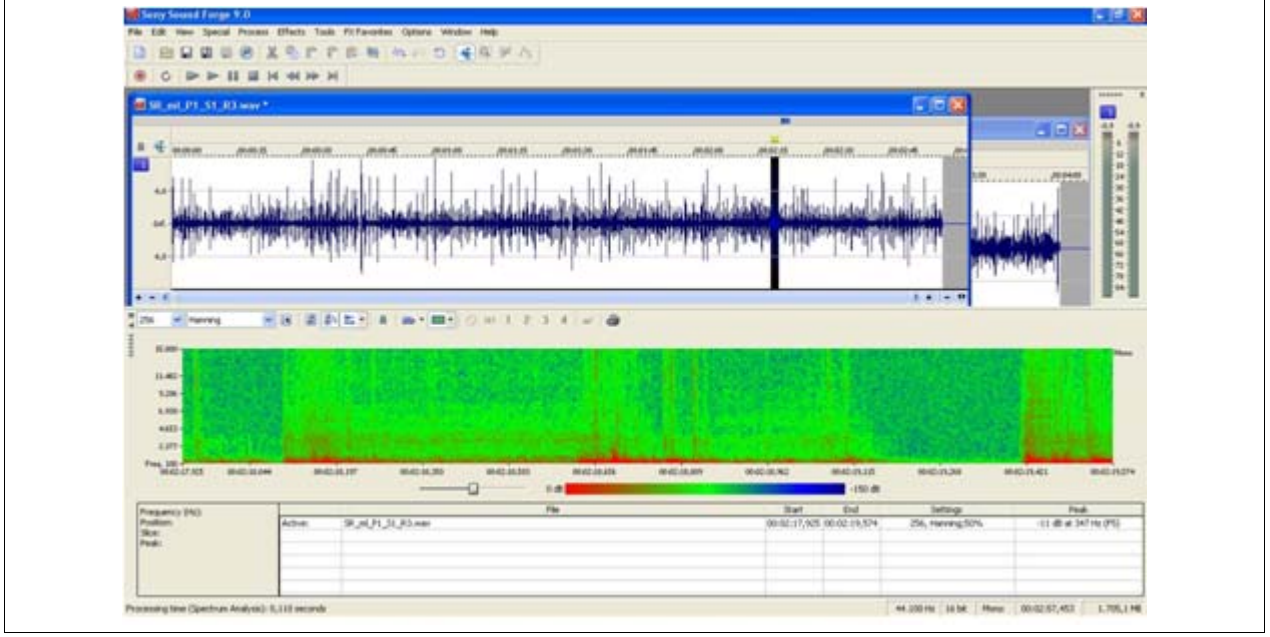


Şekil 105: Akustik deney veri tabanımızı oluşturan 7 değişik yüzey: halı, marley, mermer karo, parke, küçük beton bloklar (sonbahar yaprakları), beton karo ve çimen.

Her yüzey-hız kombinasyonuna ait veri tabanımızda iki dakikalık ses verisi bulunmaktadır. Verilerin toplanması sırasında kullandığımız mikrofon, platformun altına ve bacakların ortasına yerleştirilmiş, kayıtlar stereo olarak yapılmış ancak stereo veriler özel bir biçimde değerlendirilmemiştir.

5.1 İlk incelemeler

İlk aşamada, açık kaynak bir ses analiz programı kullanılarak akustik veriler incelenmiştir. Bu inceleme sırasında hem işaret-zaman davranışına, hem de işaret-frekans-zaman davranışı incelenmiştir. Zaman-Frekans incelemesi için spektrogram analizinden yararlanılmıştır. Bu incelemeye ait bir ekran görüntüsü, Şekil 106'da verilmiştir.



Şekil 106: Bir ses analiz programı ile SensoRHex platformundan halı üzerinde yürüyüş sırasında toplanan ses örneği ve kısa bir parçanın Spektrogram zaman-frekans analizi ile manuel incelenmesi

İlk aşamada bu çalışmalar sayesinde, daha eski, konuşma ve insan ses işareti üzerindeki çalışmalarımızın da verdiği bilgiler ışığında aşağıdaki gözlemleri yapma imkanı bulunmuştur:

- Beklenen biçimde kaydedilen ses işaretlerinde yüzey ile etkileşim tekrarlayan biçimde ve zamanda kısıtlı aralıklarda oluşmaktadır,
- İşaretin tümünde, platform motorlarının ve diğer çevresel faktörlerin oluşturduğu fon gürültüsü bulunmakta ve ilgilendiğimiz işaret ile üst üste binmektedir,
- Zemin ile etkileşimin olduğu zaman aralıklarına ait bazı özellikler işaret içinde gözlenebilmektedir,
- Yüksek frekansların daha yüksek gürültü içerdiği görülmektedir,
- Spektrogram verilerinde yer ile etkileşim anları incelendiğinde yüzeylerin insan tarafından görsel olarak ayırdedilmesinin zor olduğu gözlenmektedir (bu doğrusal ölçekleme veya doğru frekans bantlarına odaklanılmadığı için olabilir).
- Kayıtlar kulak ile dinlendiğinde yüzey ile ilgili bilginin insan tarafından bazen çıkartılabildiği, ama diğer bazı yüzeyleri ayırdetmenin ise çok zor olduğu gözlenmiştir. İnsan'ın başarısının sınırlı olduğu pek çok tanıma probleminde yüksek algoritmik başarı sağlanabildiği bilinmektedir.
- Motor gürültüsü (fon) ve etkileşim anlarına ait kayıt parçaları insan tarafından dinlendiğinde kolaylıkla ayırdedilebilmektedir.

Bu gözlemler, ilk aşamada yer etkileşimine ait zaman aralıklarının zamanda ayrılabilirliği fikrini uyandırmış ancak daha sonra yaptığımız çalışmalarda bu ayrımın erken bir evrede ve zaman işareti kullanılarak yapılmasının çok zor olduğu ve başarımı düşürdüğü gözlenmiştir.

Yine çalışmamızın ilerleyen evrelerinde, insan kulağı ile ayır edilemeyen yüzey işaretlerinin dahi uygun yaklaşımlar ile kolaylıkla ayırdedilebildiğini gözlemledik.

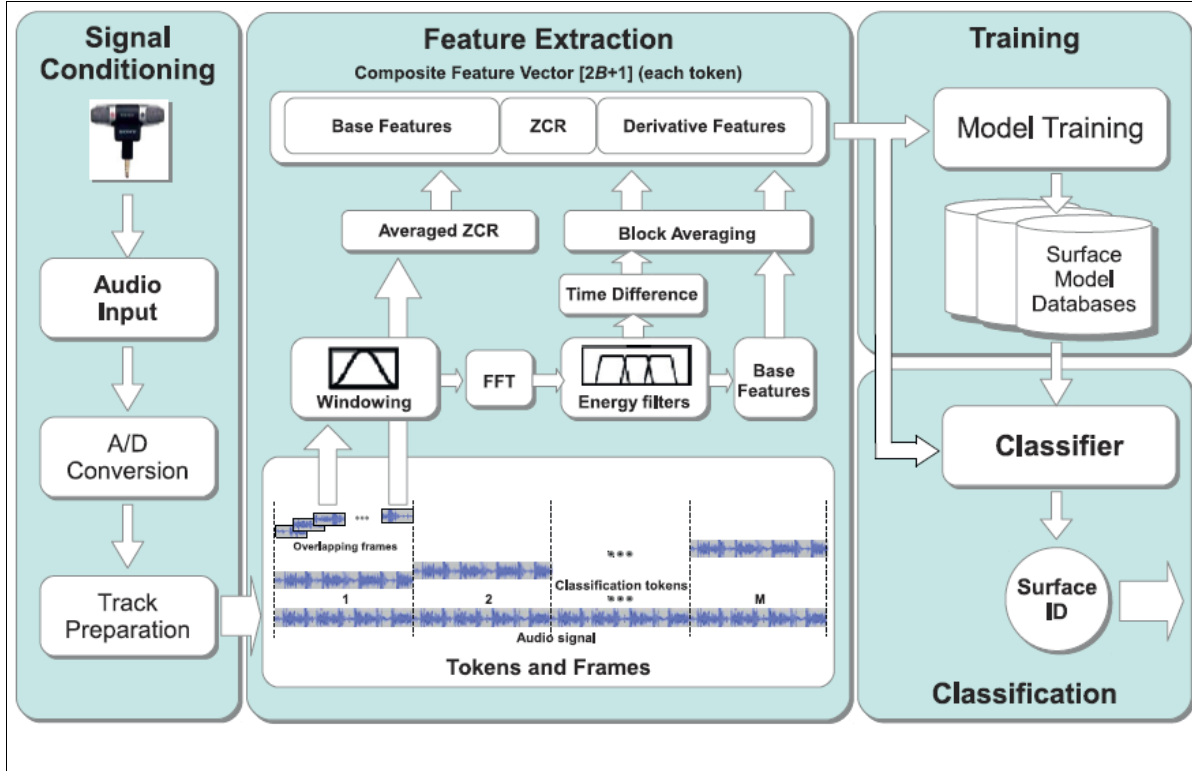
İlk aşamda, spectrogram görseli üzerinde bir “görüntü işleme” yaklaşımı ile sonuç alabileceğimiz inancı, verileri gözle inceledikçe ve göz ile ayırmanın zorluğu anlaşıldıkça (insan görsel verilerin işlenmesinde ve tanınmasında halen en güçlü sistem olarak karşımıza çıkmakta) gündemden çıkarak yerini istatistiksel örüntü tanıma yaklaşımlarının kullanımı fikrine bırakmıştır.

5.2 Akustik Öznitelikler ve Genel Yaklaşım

Bu fikirler, gözlemler ve yapılan analizler sonucunda, genel yaklaşım olarak, ses işaretinden uygun akustik öznitelik vektörlerinin çıkarılmasına ve bu vektör dizisinin yüksek başarımlı bir istatistiksel örüntü tanıma algoritmasına sokulmasına karar verilmiştir. Bunun yanında geçmiş tecrübelerimize dayanarak problemin doğasına uygun akustik öznitelik vektörlerine karar verilmiştir. Bu doğrultudaki fikirler şu şekilde özetlenebilir: Konuşma tanıma, insan sesi sıkıştırma gibi bazı farklı akustik uygulamalarda ses kaynağı'nın bir modeli çıkartılabilmekte, ve bu yolla akustik öznitelik vektörü olarak bu modellerin parametreleri kestirilerek kullanılabilir. Örneğin insan sesi için gırtlak ve ses telleri ses üretim modeli yardımı ile bir üreteç süzgeç modeli (Linear Prediction Filter – LPC Süzgeç Katsayıları) kullanılmaktadır. Aynı şekilde sesin insan kulağı tarafından algısı ele alınarak ve ses ve konuşma tanıma konusunda insan başarısı dikkate alınarak Algısal Süzgeçleme yöntemleri kullanılabilir. Ses frekans bantları üzerinde logaritmik bir süzgeçleme yapan Mel Süzgeci buna bir örnektir.

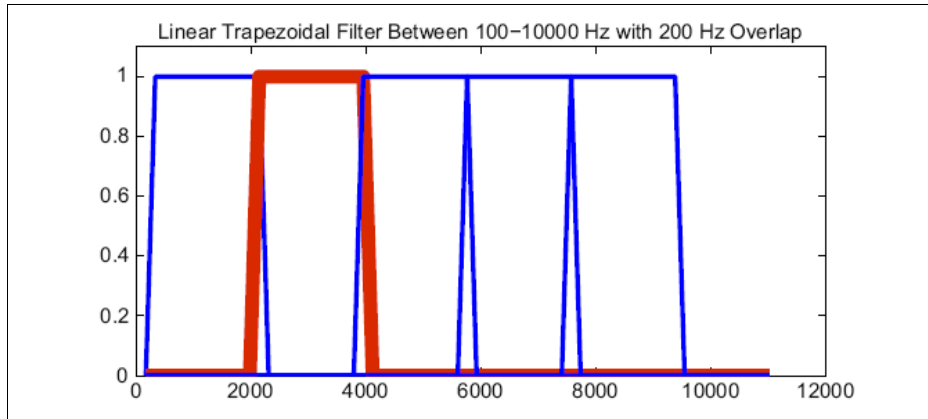
Ancak uygulamamızda sesin kaynağı, robotun bacakları ile çok değişik yapılara sahip olan yüzey arasındaki karmaşık bir etkileşimden doğmaktadır. Bu ses üretim sürecinin genel bir modelini çıkartmak verimli görünmemektedir. Dolayısı ile genel frekans analiz yöntemleri, özellikle Kesikli Fourier Dönüşümü ve bunu etkin gerçekleştiren FFT algoritmasından yararlanmanın uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Bunun yanında işaret durağan olmayan bir özellik göstermekte (non-stationary) ve zaman içinde değişmektedir. Bu değişim içinde belli bölgeler bacakların yer ile teması sonucu oluşan akustik öğeleri içerirken, başka bölgeler bacakların havada olduğu ve dolayısı ile ağırlıklı olarak platform motorlarının ses etkilerinin hakim olduğu bölgeleri içermektedir. Bir diğer nokta ise ses kaydının sürekli olarak yapılacağı varsayımdır. Bu sebepler ise ses işaretinin zamanda küçük parçalara ayrılarak Fourier analizine tabii tutulması uygun bulunmuştur. Bu, durağan olmayan işaretler ile çalışmada oldukça standart bir yaklaşımdır. Bu parçacıklar (değişken olmakla birlikte, örneğin 128, 256 veya 512 zaman örneği), Kesikli Fourier analizinin frekans çözünürlüğünü arttırmak amacıyla eş uzunlukta belli bir pencere fonksiyonu ile çarpılıp FFT algoritmasına sokulmaktadır. Bunun sonucunda aynı sayıda veya daha çok örneğe sahip bir frekans spektrum kestirimi elde edilebilir. Ancak bu verinin doğrudan doğruya akustik öznitelik vektörü olarak kullanılması, yüksek boyutlu olması dolayısı ile uygun değildir. Literatürdeki yaklaşımlardan biri, kısmen örtüsen frekans band süzgeçleri kullanarak ve bu bantlardaki enerjileri hesaplayarak çok daha düşük boyuta sahip fakat spektrum'daki ana bilgileri taşıyan öznitelik vektörleri üretmektedir. Çalışmamızda bu yöntem benimsenmiştir. Bu bantların kapsadığı alan, band genişlikleri, kapsadıkları alan gibi parametreler, deneysel parametrelerdir ve performansa etki edeceklerdir. Örneğin tipik olarak 10 band kullanılarak ilgilenilen frekans aralığı kapsanabilir.



Şekil 107: Akustik yüzey tanıma yordamsal yaklaşımı ve alt bileşenleri

Yöntemimizdeki üst seviye yaklaşımı gösteren blok şema, Şekil 107’de verilmiştir. Şeklin alt kısmında öznelik vektörlerinin çıkartılması işlemi detaylandırılmaktadır. Kullandığımız frekans band süzgeçlerine bir örnek ise aşağıda Şekil 108’de verilmiştir.



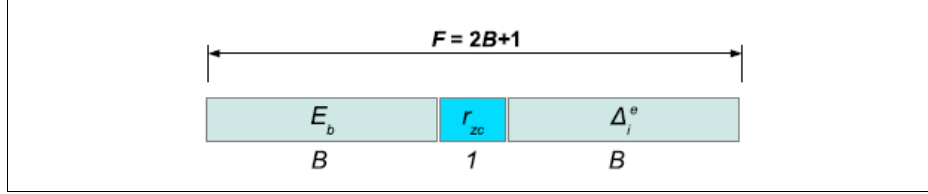
Şekil 108: Band geçiren spektrum süzgeçleri örneği. Örnekte süzgeç sayısı 6, incelenen frekans aralığı ise 0-10KHz’dir.

Burada dikkat edileceği üzere, frekans band enerjilerini baz öznelik vektörleri olarak ele almaktayız. Bunun yanında, akustik analiz literatüründe göze çarpan unsurlardan biri zaman sinyalinin sıfırı kesme hızı (zero-crossing rate) adını alan özneliktir ve

$$Z(n) = \frac{1}{2N} \sum_{r=-\infty}^{\infty} |\text{sgn}[x(r)] - \text{sgn}[x(r-1)]| w_r(n-r)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu bilginin frekansla önemli bir ilişkisi vardır ve bu bilginin bir şekilde Fourier spectrum'u içerisinde de yer aldığı düşünülebilir. Ancak pekçok çalışma, bu bilginin ayrıca öznelik vektörünün parçası yapılmasının iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Literatürde akustik örüntü tanıma alanında olumlu etkileri gözlenen bir diğer unsur da, baz öznelik vektörlerinin kesikli zaman türevinin (basit örnek farkı) son öznelik vektörüne eklenmesidir. Bu bilginin öznelik vektörlerindeki zaman değişimini modelleyerek bir anlamda üst geçiren bir etki yaptığı bilinmektedir. Çalışmamızda bu üç parçanın birleşiminden oluşan bir öznelik vektörü kullanımını benimsedik. Bu son vektör Şekil 109'de gösterilmektedir.



Şekil 109: Akustik öznelik vektörünün içerik ve boyutsal oluşumu.

Tanıma deneyleri sırasında her tanıma işlemine tabii tutulacak parça (token), pencere uzunluğundan daha uzun bir parça olarak ele alınmıştır. Parça uzunluğu bir tasarım parametresidir. Öznelik vektörü uzunluğu ile belirlenen sınıflama uzayı boyutu düşünüldüğünde, FFT analizine sokulan her ses penceresi bir vektör nokta oluşturmakta, teste sokulan bir parça ise birden fazla noktanın oluşturduğu bir bulut olarak düşünülebilmektedir.

5.3 Örüntü Tanıma - Sınıflama Yaklaşımı

Sınıflama problemi, bilinmeyen bir ses işaretine ait bulutun bilinen seslerden elde edilen modellerden hangisine ait ya da "daha yakın" olduğunun bulunmasıdır. Herhangi bir uygulamada elde edilen veri öznelik uzayına dönüştürüldükten sonra sınıflama problemi çok genel bir hal almakta ve literatürdeki tüm yöntemler uygulanabilirlik kazanmaktadır. Ancak belli bir uygulama'da hangi yöntemin hangi performans ile çalışacağı ise verinin yapısına oldukça bağlıdır. Dolayısı ile en uygun yöntemin deneyler ile belirlenmesi gerekmektedir. Problemimizin yapısına ilk aşamada uygun gözüken, oldukça genel bir yapıya sahip olan Vektör Nicemleyici (Vector Quantizer) veya K-Means Kümeleme olarak da bilinen sınıflama yordamlarıyla çalışılarak başlanmıştır. Bu yaklaşım elde edilen veriden elde edilen öznelik bulutunu daha az sayıda merkez ile ifade ederek modeller oluşturmakta, daha sonra bilinmeyen işaretten gelen öznelik vektörlerinin bu modeller ile olan birikimli uzaklıklarını hesaplamaktadır. Bu yolla kaynağı bilinmeyen verinin hangi model tarafından üretilmiş olabileceğini hesaplamaktadır.

Çalışmamızda Vektör Nicemleyici sınıflayıcı yapısının sınıf modellerini oluşturmak için Denetimli K-Ortalama (Supervised K-Means) yordamı kullanılmıştır. Bu yordam tarafımızdan Matlab ortamında kodlanarak kullanılmıştır.

Ancak projemiz kapsamında daha sonra, farklı örüntü tanıma yaklaşımları ile de deneyler yapılması gerektiğine karar verilmiş ve bir "makina öğrenme" kütüphanesi olan WEKA (Witten ve Frank, 2005) kullanımına karar verilmiştir. Bu kütüphane'nin kullanımı, bize daha geniş bir örüntü tanıma yordam repertuarı ile deney yapma imkanı ve kendi Vektör Nicemleyici kodumuzu kontrol etme imkanı vermiştir.

Tüm bu deneyler sonucunda, çalışmamızın sonuçları arasında temsiz özelliğine sahip bir algoritma setine yer verilmektedir. Bunlar, *Naive Bayes* (NB), *Simple Logistic* (SL) and *Functional Tree* (FT) ve *Vector Quantizer* (VQ) (Vektör Nicemleyici) yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımlardan kısaca bahsetmek gerekirse:

Vector Quantizer (VQ) yaklaşımında, eğitim setinin oluşturduğu vector bulutu, vector boyutunun belirlediği çok boyutlu uzayda as sayıda kod vektör ile ifade edilmekte bu kod alfabeti, örüntüye veya sınıfa (yüzeye) ait model oluşturmaktadır. Çalışmamızda bu kod alfabelerini eğitmek amacıyla k-ortalama (k-means) algoritmasının hakemli (supervised) bir halini kullanılmaktadır (Rabiner ve Schafer, 1978) ve sabit bir kod alfabeti seçmekteyiz. Çalışmamızda bu tür tasarım seçeneklerinin etkilerini deneyler yoluyla belirlemeye çalışılmaktadır.

Naive Bayes (NB) yaklaşımında ise eğitim verilerine aynı çok boyutlu uzayda tanımlı bir dağılım fonksiyonunun Maximum Likelihood (ML) yöntemi ile uydurulması ile modellerin eğitimi sağlanmaktadır. Bilinmeyen sınıfa ait test verisini oluşturan vektörler de aynı şekilde bir dağılım ile ifade edilip bu iki dağılım arasında bir yakınlık fonksiyonu hesaplanmaktadır. Bu istatistiksel yakınlık anlamında test verisine en yakın model, test verisinin ait olduğu sınıfı belirlemektedir. (Duda vd., 2000)

Functional Trees (FT) yapısında ise tek değişkenli karar ağaçcıklarını doğrusal ağırlıklar ile birleştirilerek karma bir karar ağacı oluşturma tümevarım mantığı ile ortaya çıkartılmaktadır. (Gama, 2004) Ara düğümler ağaç oluşturulurken yaratılmakta, yapraklar ise ağaç budanırken ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşımın WEKA kütüphanesinde gerçekleştirilmiş halinde aynı zamanda ağacın eğitilmesinde Logistic Regression yaklaşımı ile LogitBoost algoritmasından da yararlanılmaktadır (Friedman, 1998).

Simple Logistic Classifier (SL) FT yaklaşımına benzemekle birlikte bazı farklılıklar göstermektedir. Bu yaklaşımda tek düğümden oluşan ve “basit öğrenciler” olarak ele alınan regresyon fonksiyonları yine LogitBoost algoritmasının yardımı ile birleştirilmektedir. Ancak bu sefer eğitim durma kriteri yaprak düğümlerine varma yerine farklı bir mantık taşımaktadır. (Duda ve Hart, 2000; Witten ve Frank, 2005)

5.4 Performans Kriterleri

Sınıflama yordamlarında başarıyı “doğru sınıflama oranı” ile ölçülebilir. Bunun yanında sınıflayıcının davranışını ve verilerin karıştırılma durumlarını daha detaylı ortaya koyan “Karıştırma Matrisi” (Confusion Matrix) kullanılabilir. Çalışmamızda bu her iki metriktenden de yararlanılmıştır. Çalışmamız sırasında ele aldığımız ve sınıflama performansını yansıtan kriterler, Karıştırma Matrisi elemanları üzerinden şu şekilde tanımlanabilir. *Yüzde doğru sınıflama oranı*,

$$S_A = \frac{\sum_{i=1}^I a_{ii}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I a_{ij}} \times 100\%$$

yüzde yanlış sınıflama oranı,

$$M_A = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j \neq i}^I a_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I a_{ij}} \times 100\%$$

Bunun yanında Karıştırma Matrisi'nin her satırını ayrıca ele alarak C_i sınıfı için sınıf bazında performans da elde edilebilir. Örneğin yüzde doğru sınıflama oranı

$$S_A^{C_i} = \frac{a_{ii}}{\sum_{j=1}^K a_{ij}} \times 100\%$$

ifadesi ile verilmektedir. Örnek bir Karıştırma Matrisi, aşağıda Şekil 110'de gösterilmiştir.

A sample confusion matrix for acoustic surface classification for $P_v=5$, $M=25$, classifier FT with number of base features $B=10$, r_{zc} and Δ^e (success rate=87 %).						
	S_{Ca}	S_{Li}	S_{Ma}	S_{Hw}	S_{Sc}	S_{Gr}
S_{Ca}	18	1	1	1	2	2
S_{Li}	0	24	0	0	1	0
S_{Ma}	0	0	23	2	0	0
S_{Hw}	0	1	0	24	0	0
S_{Sc}	2	1	0	1	20	1
S_{Gr}	0	2	0	0	2	21

Şekil 110: 6 Sınıf için örnek Karıştırma Matrisi.

Tanıma performansı üzerinden tanımlı bu parametrelere ilave olarak, gerçek zamanlı uygulama hedefi olan her algoritmanın ele alması gereken *hesaplama zamanı* t_c de önemli bir performans parametresi olarak ele alınmış ve alternatifler tanıma ve hesaplama performanslarının birlikte oluşturduğu bir *performans uzayında* değerlendirilmiştir.

5.5 Deneysel Yapı ve Temel Deneysel Parametreler

Çalışmamızda toplanan veri seti, 7 değişik iç ve dış mekan yüzeyinden oluşmaktadır. Bu yüzeyler halı, marley, mermer karo, parke, beton karo-1 (sonbahar yaprakları), beton karo-2 ve çimen olarak seçilmiştir. Değişik hızlarda topladığımız veriler düzenlenmiş ve deneylerimizde kullanılmak üzere bir ses veri tabanı oluşturulmuştur. Oluşturduğumuz veri tabanını oluşturan yüzeylerin fotoğrafları, Şekil 105'de gösterilmiştir.

Deney veri tabanını oluşturan 7 değişik yüzey üzerinde, deneysel robot platformumuz SensorHex ile farklı hızlarda ve robotun temel yürüyüş modu olan değişken tripod adım düzeni ile yürüyüşler gerçekleştirilmiştir. Bu kayıtlar sırasında 100-15000 Hz aralığına hassasiyeti bulunan ve Şekil 104'de gösterilen Sony mikrofon kullanılmıştır.

Deneylerimiz sırasında probleme özgü öznelik çıkarma yaklaşımımızdaki temel parametreler deneysel incelemeye tabii turulmuştur. Ayrıca WEKA kütüphanesinin bize sunduğu örüntü tanıma yordamları arasında da geniş bir tarama yapılmış, kayda değer özellikler gösteren (iyi veya kötü çalışan) bir örnek seti sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çalışmamızda incelediğimiz deneysel parametreler şunlardır.

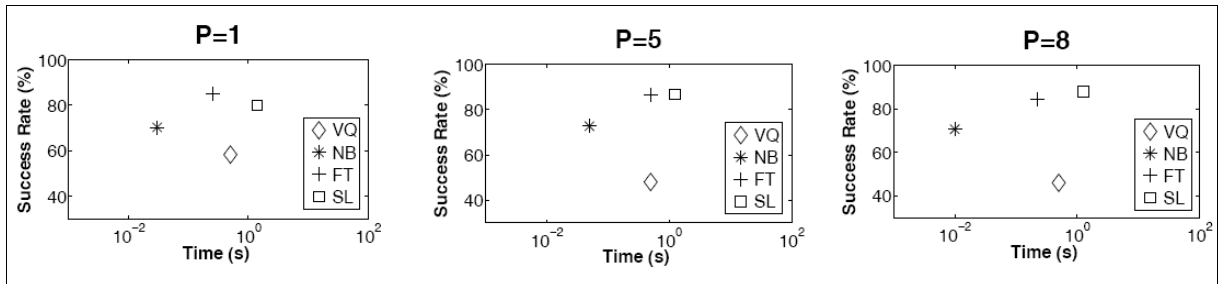
- Tanıma "token" sayısı M (sabit test vary uzunluğu için token sayısı arttıkça, test token uzunluğu kısalmaktadır),
- Temel öznelik sayısı B (bu sayıda artış öznelik vektörünün frekans çözünürlüğünün artmasını sağlamakta ancak vector boyutunu ve dolayısı ile problem boyutunu büyütmektedir),
- Öznelik vektörünün oluşumunun değişik kombinasyonları (örn. sıfır kesme hızı ve temel özneliklerin zaman türevinin vector içinde yer alması)

- Robot yürüyüş hızının değişimi P ,
- Problemdeki sınıf (yüzey) sayısının değişimi N_c .

Aşağıda sunacağımız sonuçlar, ekli dergi makalesinde de detayları ile tartışılmıştır ve burada da makul bir detay seviyesinde verilmeye çalışılacaktır.

5.6 Deney Sonuçları

Denelerimizde performans metriği olarak hem *doğru sınıflama yüzdesi*, hem de *sınıflama işlem yükü* (test bilgisayarında zaman olarak) dikkate alınmıştır. Çok sayıda deney sonucunda performans değerlendirmesinin genel durumu Şekil 111'de verilmiştir.

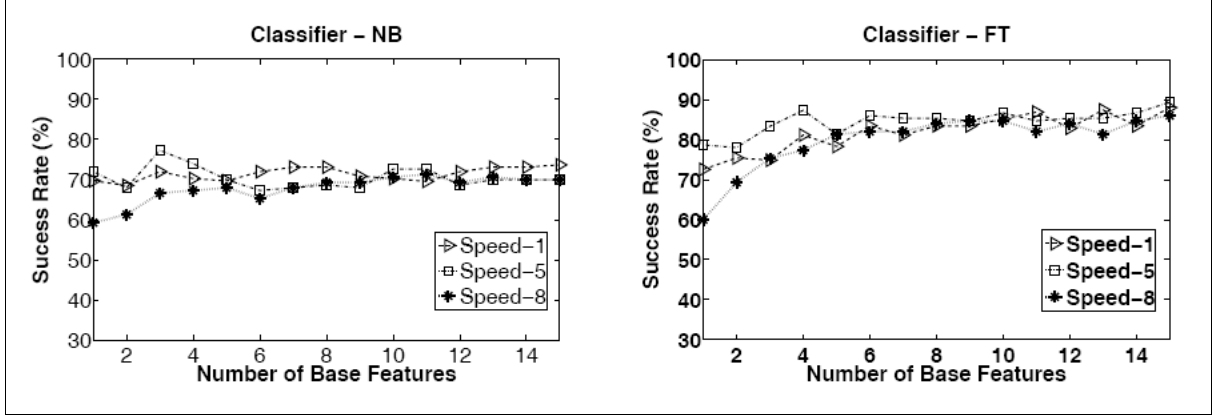


Şekil 111: Sınıflayıcıların performans-işlem yükü düzleminde üç değişik robot hızı için genel değerlendirilmesi

Bu şekilde, Funtional Tree sınıflayıcısının makul bir işlem yükü ile yüksek performans gösterdiği, dolayısı iki performans parametresinin iyi bir dengesini yakaladığı gözükmektedir. Simple Logistic sınıflayıcı ise artan hızlarda daha iyi performans göstermekte ancak ek işlem yükü ile kaşımıza çıkmaktadır. En iyi performansın 7 yüzey sınıfı için tüm hızlarda %85'in üzerinde seyrettiği ve sınıflama işleminin de referans PC'de ortamında 1 saniyelik bir zaman aralığının altında tamamlandığı gözükmektedir.

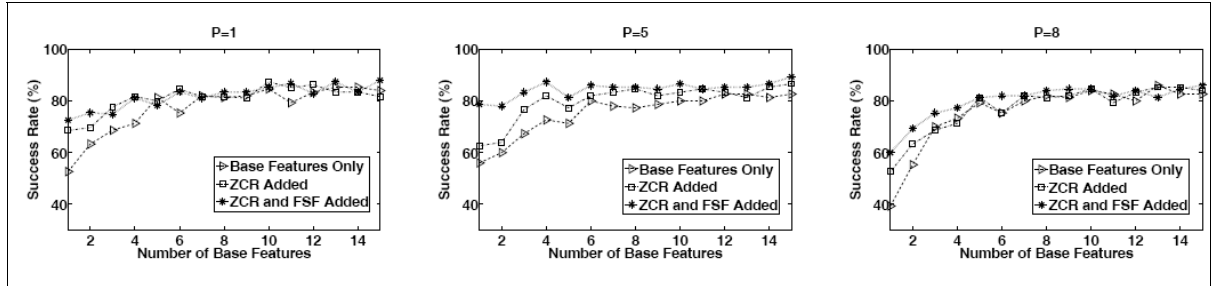
Daha önce küçük sayıda sınıf ile oldukça başarılı sonuçlar elde ettiğimiz referans VQ sınıflayıcısı ise, sonuçlardan gözükteğü üzere artan sınıf sayısı ve artan hız altında performansını kaybederek %50 doğru sınıflama oranlarına kadar inmiştir.

Bu genel sonuçların yanında pekçok deney yapılmış ve özellikle önerdiğimiz öznelik yaklaşımına ait yordam parametrelerinin performansa etkileri değişik sınıflayıcılar için test edilmiştir.



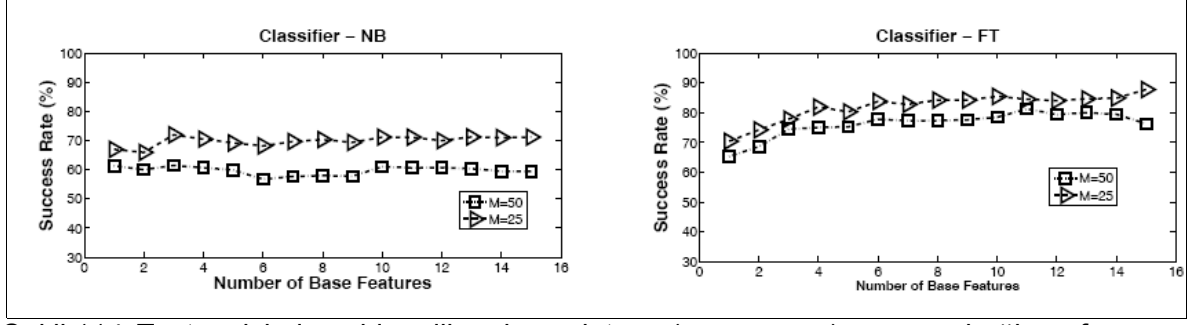
Şekil 112: NB ve FT sınıflayıcılarının frekans analizindeki band sayısına göre ve değişik robot hızlarındaki performansları

Örneğin Şekil 112’de verilen sonuçlar ele aldığımız NB ve FT kısaltmalı iki sınıflayıcının frekans analizi sonunda temel öznelik vektörü olarak alınan ve daha önce detaylandırdığımız Frekans Band Süzgeci sayısına bağlı olarak nasıl bir performans sergilediğini göstermektedir. Frekans eksenini daha fazla sayıda süzgece bölerek daha yüksek çözünürlüklü bir spektrum elde etmenin NB sınıflayıcısına çok büyük bir katkı yapmadığı, ancak FT sınıflayıcısının ise sınıflama performansını 90%’lara kadar çıkartabildiği gözükmektedir. Neden orta seviye hızın en yüksek performansı verdiği ise tam açık değildir Ancak bu hızda yüzey ile çarpışan bacakların yüzey ile ilgili ayırt edici bazı modları tetiklediği yorumu yapılabilir. Bu da, ilk aşamada sahip olduğumuz ve yüzey tanıma probleminin artan hızla zorlaştığı hissini bir ölçüde çürütmektedir.



Şekil 113: FT sınıflayıcısı için temel frekans band enerjilerinden oluşan temel özneliklere, sıfır kesme oranı ve temel özneliklerin zaman farkının eklenmesi sonuçları

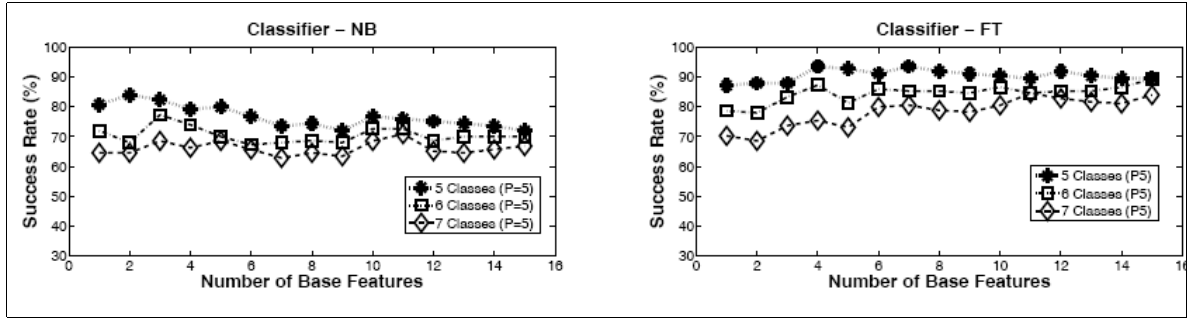
Şekil 113’da ise, temel özneliklere, yine önerdiğimiz sıfır kesme oranı ve temel özneliklerin zaman farkının eklenmesinin sonuçlara nasıl bir etkisi olduğu incelenmektedir. Sonuçlar, temel özneliklerin sayısındaki artış ve beraberinde artan performans ile ek özneliklerin eklenmesinin getirdiği ek kazancın azaldığını göstermektedir. Performans en iyi durumda %90 civarında sature olmaktadır. Yine de en yüksek performans, üç bileşenin öznelik vektöründe birleşmesi ile elde edilmektedir.



Şekil 114: Test verisinden elde edilen deney jetonu (ses parçası) sayısına bağlı performans. Jeton sayısı arttıkça parçalar küçülmekte ve buna bağlı her jetonun sınıflanmasında performans düşüşü görülmektedir.

Şekil 114'de performansın, test için kullanılan ses parçalarının adedine (ve sabit test veri seti dolayısı ile test jetonlarının uzunluğuna) bağlı değişimi gözükmemektedir. Jeton sayısı M=25'den M=50'ye arttığında performansın diğer parametreden bağımsız düştüğü gözükmemektedir. Bu düşüşün temel sebebinin her bir test ses parçasının kısalmış olması olduğunu düşünüyoruz.

Son olarak sınıflama performansının sınıf sayısına bağlı değişimini de ele aldık. Temelde sınıf sayısının artışı ve sınıflar arası benzerlikler yüzünden performansın düşmesi temel beklentimiz idi. Bu beklenti ile uyumlu sonuçlar elde ettik. Aşağıda Şekil 115'de bu sonuçlar sunulmuştur. Performans farklarının, hem NB, hem de FT sınıflayıcıları için temel öznelilik sayıları arttıkça azaldığı de gözlemlerimiz arasındadır.



Şekil 115: Sınıf sayısına bağlı sınıflama performansı değişimi.

5.7 Sonuç

Akustik algı amaçlı yaptığımız çalışmalar proje hedeflerimize tümüyle ulaşmıştır. Robotun doğal ayak seslerinden yüzeyin tanınmasının, oldukça yüksek performanslar ile başarılabilirliğini gösterdik. Geniş bir sınıflayıcı yelpazesi ve problemin yapısı ile uyumlu önerilen öznelilik analiz yöntemi ile akustik yüzey algısının mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Bu alanda ilerlenebilecek yönler olarak, görme sistemi ile erkenden elde edilen yüzey görselleri ile robotun altından gelen seslerin sınıflanması birleştirilerek çok daha yüksek başarılı sistemler elde edilebilir. Bu çalışmalar verimli gelecek çalışma konuları olmakla birlikte mevcut projemizin hedefleri dışındadır.

Akustik algı alanında yaptığımız bu çalışmalar sonucunda saygın bir uluslararası dergide bu çalışma sonuçlarımız olumlu yorumlar alarak yayınlanmıştır. Bu çalışma raporumuzun ekinde bilgi ve değerlendirmenize sunulmuştur.

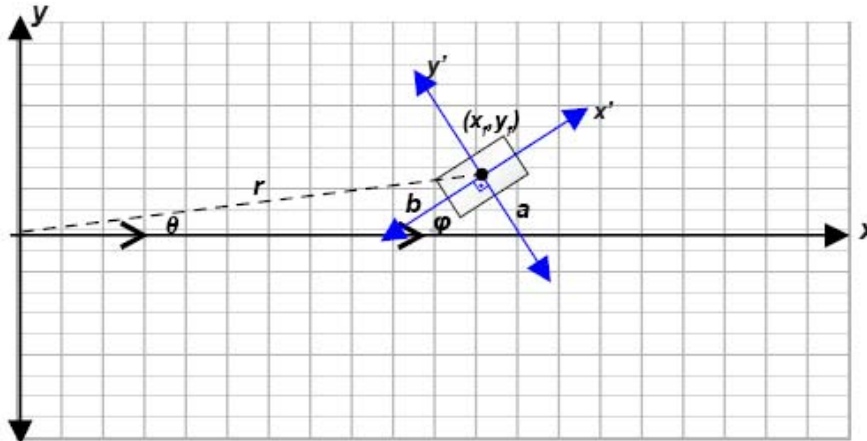
6 İstatistiksel Hareket Modelleri ve Navigasyon Amaçlı Uygulamalar

6.1 Bacaklı Robotlar için İstatistiksel Hareket Modelleri

Belirli bir başarımlar seviyesinde bir hareket modeli, Bayes süzgeci temelli yer bulma, haritalama ve eş zamanlı yer bulma ve haritalama yaklaşımları için bir gerekliliktir. Üretici modeller daha kolaylıkla parçacık süzgeci temelli gerçeklemlerde kullanılabilirken daha zor olan kuramsal modeller Kalman ve Genişletilmiş Kalman süzgeçlerinde gereklidir. Abacaklı robotlar için bu alanda son derece sınırlı akademik çalışma olduğu gözlenmektedir.

Hareket modeli elde edilirken kesin veya olasılıksal yöntemler kullanılabilir. Kesin yöntemlerde robotun geometrik olarak elde edilen matematiksel hareket modelinin gerçek dünyadaki hareketini birebir yansıttığı varsayılır. Ancak gerçek hayatta birçok sebepten dolayı bu modelden sapmalar oluşmaktadır. Kayma, motorlardaki belirsizlikler, yüzeydeki belirsizlikler bunun sebeplerinden bazılarıdır. Bu hataları da yansıtabilmek için olasılıksal hareket modelleri kullanılmaktadır. Bu modellerde harekete etki edebilecek olan gürültü unsurları da modele eklenir ve sonuç olarak bir hareket emrine karşılık robotun yeni konum ve yönelimi konusunda bir olasılık yoğunluk fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyonu kullanarak robotun yeni zaman anındaki durumu hakkında bilgi edinilir. Olasılıksal hareket modelleri sayesinde elde ettiğimiz durum kestiriminin ne kadar güvenilir olduğu hakkında da bilgi sahibi olabiliriz.

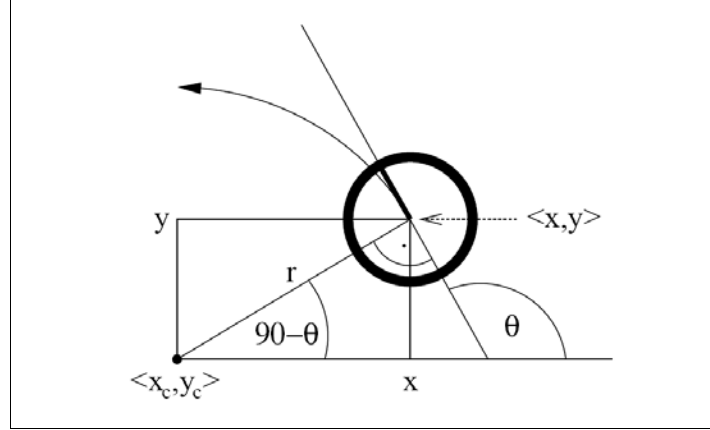
Çalışmamızda robotumuz ile yapılan deneylerde kullanılan koordinat sistemi Şekil 116'de gösterilmiştir.



Şekil 116: SensoRHex hareket deney düzeneği ve koordinat sistemi. Robotun düzlemsel hareketi (x, y, θ) değişkenleri ile modellenmektedir. Projemiz kapsamında yaptığımız çalışmalarda ilk aşamada tek ekseninde (x -ekseni) bir harekete ait bir hareket modeli geliştirilmiştir.

6.1.1 Genel Prensipler

Proje çalışmalarımız kapsamında ilk olarak hareket modellerinde en temel yapı olan hız-zaman temelli “Hız Hareket Modeli” denemelerini robot platformumuz üzerinde yaptık. Hız hareket modeli, robota verilen motor hız emirlerinin zaman ile integralinin alınması ile robotun hareket geometrisinin (kinematiğinin) matematiksel modellenmesi ile oluşturulmaktadır. Takip eden çalışmalarda ise, modelin içine kodlayıcı verilerinin eklenmesi yoluyla, tekerlekli robotlardaki “Odometri Modeli” benzeri bir yapının bacaklı robotlar için geliştirilmesi yolunda bir yaklaşım izlenmiştir.



Şekil 117: Tekerlekli robotlar için geometrik Hız Hareket Modeli (Thrun, 2005)

Hatırlatma bakımından bu yapı Şekil 117’de gösterilmiştir. Burada genel bir dönüş-ilerleme hareketinin merkezi (Thrun, 2005)

$$\begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\lambda \sin \theta \\ \lambda \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x+x'}{2} + \mu(y-y') \\ \frac{y+y'}{2} + \mu(x'-x) \end{pmatrix}$$
$$\mu = \frac{1}{2} \frac{(x-x') \cos \theta + (y-y') \sin \theta}{(y-y') \cos \theta - (x-x') \sin \theta}$$

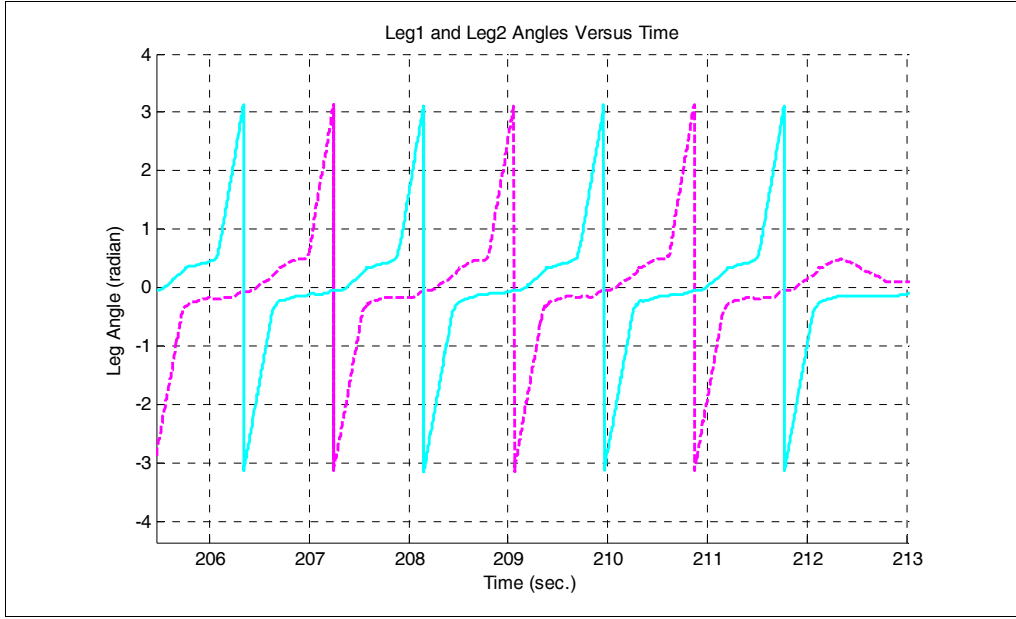
İfadesi ile verilmektedir.

Hız modellerinin hassas olmamasının sebebi, robota verilen emir ile sonuçta gerçekleşen hareket arasında çok sayıda etken olmasıdır. Bunların bir kısmı modellenemez, bir kısmı ise oldukça karmaşık ve rastlansal olabilir. Tekerlekli robotlarda daha iyi bir model, robotun tekerleklerinin hareketinin ölçülmesi ve bu ölçümlerin sanki robota verilen hareket emriymiş gibi modele katılmasıdır. “Odometri hareket modeli” olarak adlandırılan bu model oldukça başarılıdır. Bu ölçümler altında robotun hareketinin tahminlenmesinde geriye kalan belirsizlikler belli bir gürültü modeli ile ele alınabilmektedir.

Elimizde olan gibi dinamik harekete sahip bacaklı robotlarda ortaya çıkan zorluk, çok sayıda bacağın hareketi ile sonuçta meydana gelen robot hareketi arasında modellenemez benzer bir bağlantı ortaya çıkarabilmenin zorluğudur. Tekerlekli robotlarda robot tekerlek geometrisi, tekerlek dönüş miktarları (odometri) ile sonuçta ortaya çıkan hareket arasında matematiksel bir bağlantıyı mümkün kılmaktadır. 6 bacaklı robotta ise elimize gerçek zamanlı 6 ayrı encoder değeri gelmektedir. Benzer bir yaklaşım, bu değerler ile ortaya çıkan hareket arasında bir ilişki kurmaktır. Ancak hareket, o anda yüzeye değmekte olan bacaklar tarafından belirlenmektedir. “Dönüşümlü üç-ayak” (alternating tripod) yürüyüş modunda bir tarafta orta bacak yere değerken, öbür tarafta ise ön ve arka iki ayak yere değmektedir.

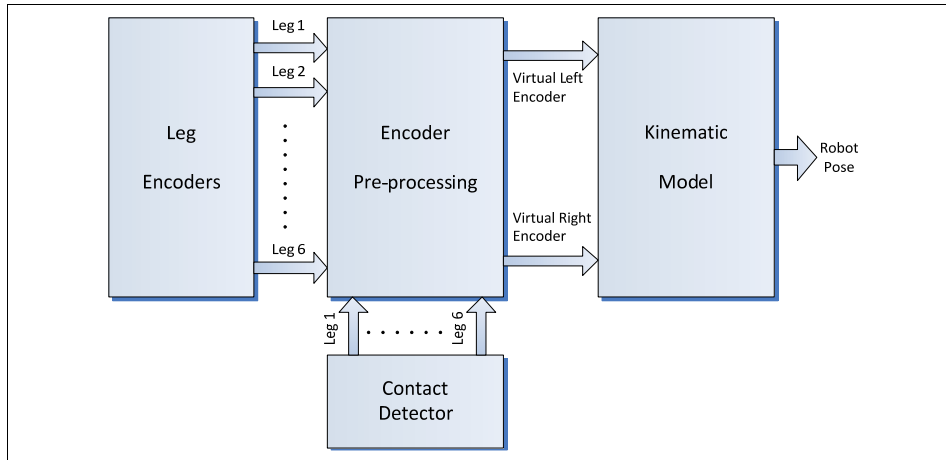
Dolayısı ile bazı encoder değerleri hareket ile bağlantılı iken bazıları ise değildir. Bu ilişki yürüyüş sırasında dinamik olarak değişmektedir.

Hangi bacak encoder'larının kullanılacağı dinamik olarak belirlemek zor bir problemdir. Bacak encoder değerleri ile hareket arasındaki ilişki bacak yere değme durumları tarafından belirlenmekte, bu ilişki de yüzey yapısına ve robot hızına (yürüyüş parametrelerine) bağlılık göstermektedir. Bu encoder değerlerinin açığa çevrilmiş hali sol ve sağ ön bacaklar için Şekil 118'de verilmiştir.



Şekil 118: Sol ve Sağ ön bacaklara ait encoder ölçümlerinin açığa çevrilmiş halleri. Ortadaki daha az eğimli (yavaş) ve doğrusal olmayan bölge, temelde bacağın yer ile temas halinde olduğu zamana karşılık gelmektedir

Kurmaya çalıştığımız model Şekil 119'de kısmen verilmiştir. Aslında sağ tarafta "Robot Pose" olarak adlandırılan çıktıdan önce kinematik modelden sonra arta kalan zor kısımları modelleyen genel bir çok boyutlu fonksiyon tahmin (function approximation) yapısının olmasını ve bunu çıktısının da "robot görel hareket" olarak adlandırılmasını planlıyoruz.



Şekil 119: Uzun vadede planlanan hareket modelinde bacak encoder'ları ile hareket tahmini arasındaki ilişki

Ancak şu aşamada robot kinematiğimizin çıkartılması yolundaki çalışmalar, bacak seviyesinde sonuçlar vermiş durumdadır. Bu sebeple kinematik modelin yerine yaklaşık bir tahminleme modeli kullanılması fikri verimli görülmüş ve çalışmalarımız bu yönde ilerletilmiştir. Çalışmalarımızın ilk dönemlerdeki deneylerinde, sadece hız bazlı bir modelin performansını ele almış ve sonuçların pek parlak olmadığını görmüştük. Bu beklediğimiz bir sonuçtu. Ayrıca gerçekleştirdiğimiz görme bazlı durum ölçümü sistemi de oldukça kaba bir durumda idi. Projemizin ilerleyen dönemlerinde bu zorlukları aşarak encoder temelli bir modelin geliştirilmesini ve daha güvenilir görme temelli bir durum ölçüm sistemini kurgulamayı başardık.

6.1.2 Görsel Veriler (Ölçümler) ile Durum Kestirimi

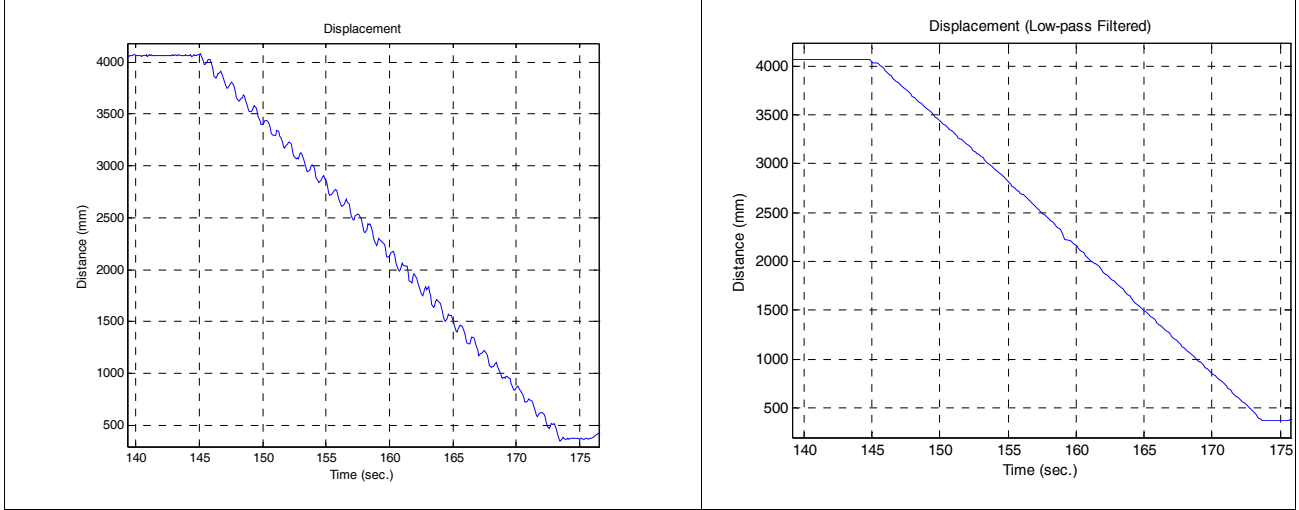
Daha sonraki çalışmalarımız içinde problemi iki açıdan ele aldık. Görme temelli durum ölçümü sistemini ciddi biçimde elden geçirerek kontrollu ortamda çok daha güvenilir durum ölçümleri elde ettik. Bu ölçümleri karşılaştırabilmek için yüksek hızlı (ama 5m kısa mesafeli) bir lazer tarayıcı kullanarak deneylerimiz dışında kullanılabilir bir "gerçek yer" ölçümü elde ettik. Çalışmanın bu aşaması ve elde ettiğimiz hassas durum bilgisi, bize robotumuzun tek eksenli ilerleme hareketinin, bacak hareketleri ile korelasyon içinde yarı-periyodik bir bileşen içerdiğini gösterdi. Bu ölçümler, şu anda bacakların yere değme durumunu ölçmemize rağmen düzgün yapıda bir yüzey üzerinde encoder değerleri ile hareket arasında yaklaşık olarak modellenebilecek bir ilişki kurulabileceğini gösterdi.



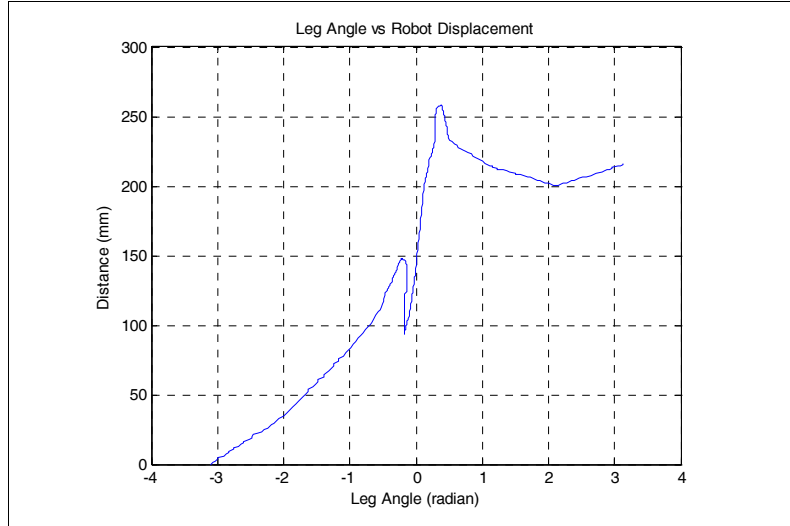
Şekil 120: RoLab bünyesinde kurduğumuz yeni görme temelli durum ölçümü sistemi ve SensoRHex robotunun arkadan görünümü. Üstteki çıkıntı lazer tarayıcıya aittir ve kamera ise robotun önünde bulunmaktadır.

6.1.3 Hareket Modeli – Tek Bacak Kodlayıcı Verileri ile

Çalışmanın ikinci (modelleme) yönünde ise öncelikle hız bazlı bir modeli, daha sonra ise yukarıda anlattığımız prensip altında, tek bir encoder (sağ ön) ile görelî hareket (delta-displacement) arasında yaklaşık bir ilişkiyi bir başvuru tablosu (look-up table) yoluyla oluşturmaya çalıştık. Bu ilişkinin tek bir encoder ve hareket sırasındaki tek bir adım üzerinden görünümü Şekil 122'da verilmiştir. Bu ilişki, ilk aşamada tek bir bacak üzerinden hesaplandığı ve pek çok adım üzerinden ortalama alınmadığı için oldukça gürültülüdür. Yine de tekrarlı olarak gözlediğimiz bazı özellikleri açıkça yansıtmaktadır.



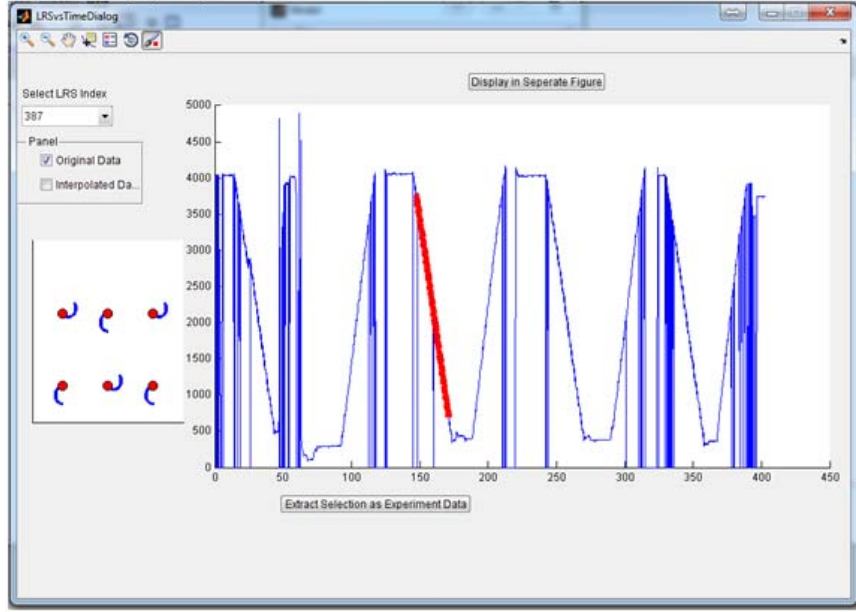
Şekil 121: Robotun bacaklı hareketine ait, lazer tarayıcı ile ölçülen “hedefe mesafe” durumu. (a) Yarı periyodik yapıya sahip gerçek hareket, (b) Alt-geçirgen süzgeç ile elde edilen “sabit hız” bileşeni



Şekil 122: Tek bacağın encoder ölçümleri üzerinden hesaplanan bacak açısı ile robotun o adımdaki görelî hareketi arasındaki ilişki

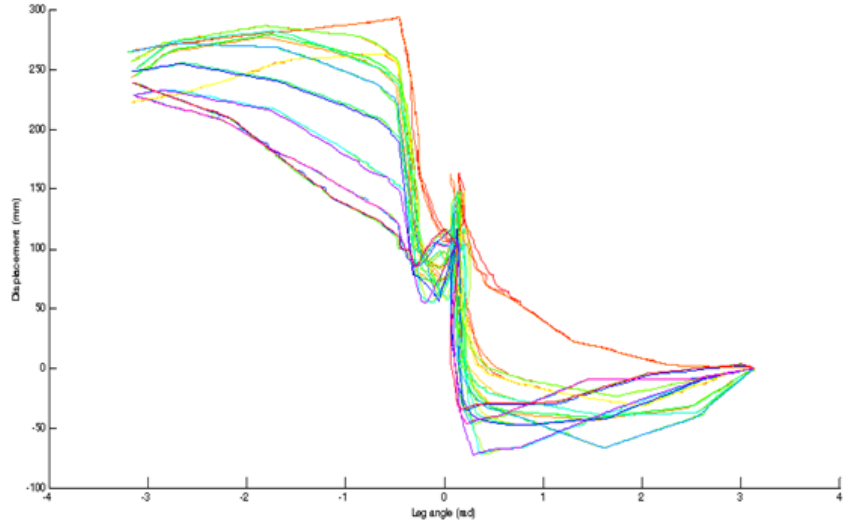
Örneğin tek bir adım sırasında, hareket emri tümüyle ileri doğru olmasına rağmen, PD-motor kontrolü altında, robotun önce ileri, daha sonra kısa süreli geriye doğru yaylandığı açıkça görülmektedir. Bu davranış, ileri hareket üzerinde gözlediğimiz yarı-periyodik hareket ile uyumludur ve az ileride gösterilen sonuçlarda da açıkça görülmektedir. Hareket modelinde bu özelliğin kullanılması sonuçları ciddi biçimde iyileştirmektedir. Aşağıda Bölüm 6.3’de, bu kademeli olarak geliştirdiğimiz hareket modellerinin Bayes Süzgeci yapısı ve özellikle de Parçacık Süzgeci içinde kullanımının kazandırdığı performans ele alınmaktadır.

Projemizin ilerleyen evresinde, platformdan aldığımız verilerin birden fazla git-gel deneyi sırasında elde edilen çok sayıda adım üzerinden yeniden geliştirilerek başarımının artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla bir deney kullanıcı arabirimi geliştirilmiş ve bu altyapı ile deneyler yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 123’de, bu git-gel deneyleri sırasındaki kullanılan deney arabirimi ve ham veriler gösterilmektedir. Bu ham veriler el ile bölütlenerek ilgisiz kısımlar atılmış ve kalan kısımlar hareket değişik hareket modellerinin eğitiminde kullanılmıştır.

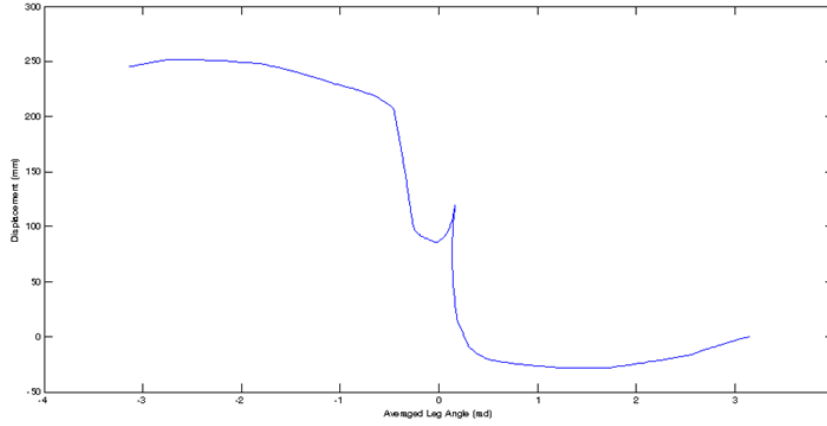


Şekil 123: Matlab ortamında geliştirilen ve deney verilerinin hareket modeli içinde kullanılacak kısımlarını elde etmeyi sağlayan yardımcı yazılım

Git-gel hareketleri sırasında hareket modelinin genellemesi gereken hareket ilişkisindeki değişkenlik, aşağıda Şekil 124'de gösterilmektedir. Modelin bu değişkenliğin bir nevi ortalamasını temsil etmesi ve dolayısı ile herhangi bir anda geçerli olması gerekmektedir. Bu şekilde elde edilen ortalama model ise bir sonraki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 124: Çok sayıda adım verilerinin model uzayında üst üste çizdirilmiş hali. Bu davranışların "ortalama" hali, herhangi bir adımda hareket modeli'nin tahminini yansıtmaktadır.



Şekil 125: Çok sayıda adım verilerinin ortalanarak elde edilen genellenmiş hareket modeli'nin model uzayında görünümü

Projemiz kapsamında giderek iyileşen üç değişik hareket modeli önerilmiş ve bu modellere “sabit hız” temel modeli ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Önerilen hareket modelleri:

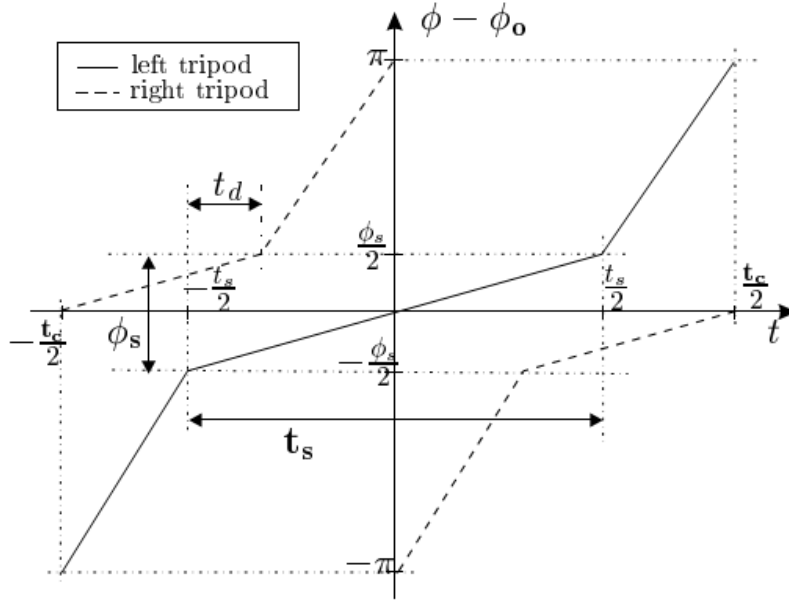
- Tek bacak kodlayıcısı verisi üzerinden model,
- 6 bacak kodlayıcısı (ortalama) üzerinden geliştirilmiş model,
- Bacak yere değme (kontak) bilgisi ile geliştirilmiş model.

6.1.4 Hareket Modeli – 6 Bacak Kodlayıcı Verileri İle Geliştirilmiş

Bu model kapsamında sadece tek bir bacağın kodlayıcı verilerinin kullanımı ile ortaya çıkan modelin hareket gürültüsü sebebi ile yüksek değişkenliğe sahip olduğu gözlenmiş (Şekil 124) ve bu değişkenliği azaltarak daha güvenilir bir model geliştirilmesi için birbiri ile koordineli çalışan 6 bacağın birden kodlayıcı verilerinin bir çeşit ortalamasının model girdisi olarak kullanılması hedeflenmiştir. Ancak robotumuzun “değişken üçayak” (alternating tripod) adım düzeni altında hangi bacakların, hangi anda sol veya sağ sürüşe etki ettiğinin dinamik olarak indexlenmesi gerekmiştir. Bunun yapılması ile bir “hayali sağ” ve “hayali sol” bacak kavramı ortaya atılmış, sol ve sağ taraftan harekete etki eden bacaklar, merkez üreteçten gelen hareket kontrol sinyalinin (Şekil 126) verileri altında dinamik olarak ortalamaya tabii tutulmuştur.

6.1.5 Hareket Modeli – Yere değme/Havalanma Bilgisi ile Geliştirilmiş

Bu modelde, her bacağın yere değme ve havalanması ile ilgili bir algılayıcı verisi olduğu varsayılarak 6 bacağın ortalamalarının alınmasında sadece yere değmekte (ve harekete etki etmekte olan) bacakların modele girdi sağlaması hedeflenmiştir. Henüz robot platformumuz üzerinde böyle bir algılayıcı olmamasına rağmen, doğru yere değme anının bir parametre haline getirilmesi yoluyla bu bilginin varlığının model üzerindeki olumlu etkisi incelenebilmiştir. Yere değme anı, tüm bacaklar için geçerli merkezi kontrol işareti üzerinden tanımlı tek bir parametre olarak ele alınmış ve bir optimizasyon sürecine sokularak sonuçlar incelenmiştir. Bu optimizasyon sonucunda ortaya çıkan ve en iyi sonuçları veren değer ile gerçek yere değme anı arasındaki ilişki, yere değme anlarını yakalayabilecek bir algılayıcı sistemi elde edilmesinden sonra ortaya çıkabilecektir. Bu tür bir ek çalışma, gelecekte bu çalışmanın devamında planladığımız açılımlardan bir tanesidir.



Şekil 126: SensoRHex senkron hareket kontrol işareti. Sol üçayak (solda iki ayak ve sağda bir ayak) ve sağ üçayak için motorlara yollanan referans işaretinin zamana göre değişimi gözlenmektedir.

Tablo 7: Merkezi işaret üretici için kontrol parametreleri

Controller Parameters	
t_c	period of rotation for a single leg
t_s	duration of slow leg swing
ϕ_s	leg sweep angle for slow leg swing
ϕ_0	leg angle offset

Geliştirilen bu 3 model, ileride Bölüm 6.3'de robot durum kestirim sonuçlarına olan etkileri ile ele alınacaktır. Bu modeller ile robot durum kestiriminde kademeli olarak iyileşen sonuçlar elde edilebilmiştir.

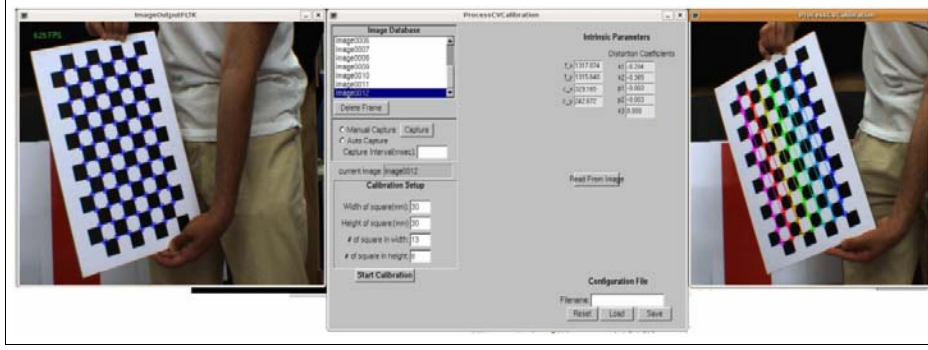
6.2 Navigasyon Amaçlı Merdiven Takibi

Merdivenler, oldukça güçlü yapısal öğeler içeren görsel unsurlardır. İnsanlar da güncel hayatlarında görsel yapı taşlarını, konumlarını ve yönelimlerini belirlemek için rutin biçimde kullanırlar. Örneğin bir insanın yürüme veya koşma sırasında düz bir yüzeyden merdiven tırmanmaya geçişi son derece yumuşak ve akıcıdır. Merdivene yaklaşım sırasında beynimiz görsel veriler üzerinden bu geçiş için vücudumuzun hareketlerini kontrol eder. Merdivenler ile çalışmamızdaki bir motivasyon da, kentsel alanlarda bacaklı robotun yüksek hızlı hareketliliğini sağlamak için bu unsurlardan yararlanılabileceği düşüncesi olmuştur.

Projemiz kapsamında merdiven tanıma ve takibini, önemli bir araştırma yönü olarak ele aldık. Ancak yaptığımız çalışmalarda özellikle dış mekanlarda merdivenlerin tanınmasında yüksek başarımlı bir yöntem geliştirmekte zorlandık. Dolayısı ile bu alandaki çalışmalarımıza, başka öncelikler altında ara vermek durumunda kaldık. Projemiz kapsamında bu konuda yaptığımız çalışmaları özetlemeye çalışacağız.

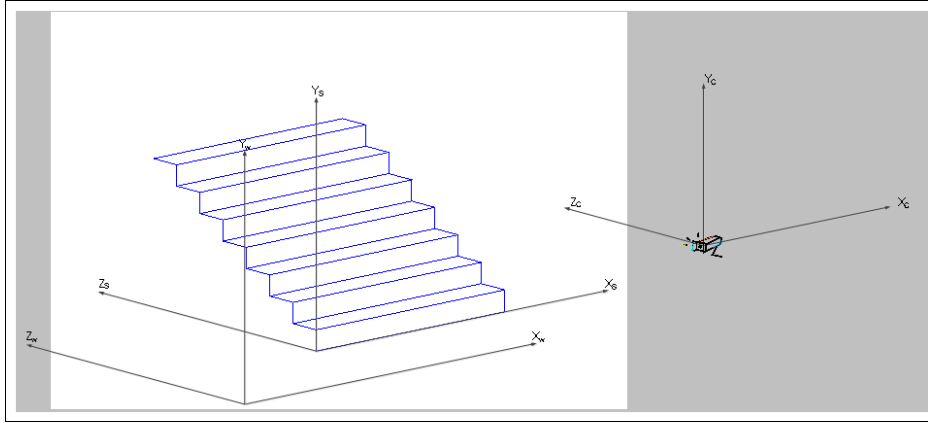
6.2.1 Kamera Kalibrasyonu ve Genel Yaklaşım

Mono kamera ile görsel veriler üzerinden çalışmada, 3-boyutlu dünya, perspektif dönüşüm ile 2-boyutlu resim uzayına iz düşer. Dolayısı ile mono kamera ile merdiven temelli durum kestirimi için ilk aşama, bu iz düşümün modeli olan kamera kalibrasyonu'nun elde edilmesidir. Bu amaçla araştırma gurubumuzca geliştirilen kalibrasyon yazılımı Matlab ortamında çalışmaktadır ve aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 127: Kamera kalibrasyon yazılımı ve kalibrasyon sırasında kullanılan dama desenli plaka

Kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi, herhangi bir 3B modelin (nokta kümesinin), belli bir açıdan bu kamera ile görüntülenmesi sonucu resim düzleminde nasıl bir 2B nokta kümesinin oluşacağını belirler. Bu model, Şekil 128'de 3B olarak gösterilmiştir. Önerdiğimiz yöntemde gerçek merdivenin tek görüntüsünden bu modeldeki kamera konum ve yönelimi çıkartılmaktadır.

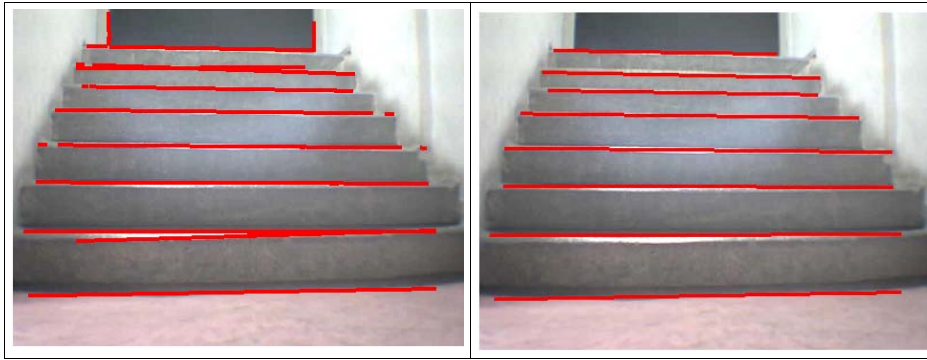


Şekil 128: Koordinat sistemleri, 3B Merdiven modeli ve merdivene göreli kamera konumu. Önerdiğimiz yöntemde gerçek merdivenin tek görüntüsünden bu modeldeki kamera konum ve yönelimi çıkartılmaktadır.

Çalışmamız kapsamında ele aldığımız yaklaşım şu ana fikir üzerine kuruludur: Oldukça belirgin yapıya sahip merdivenin bir 3B modeli varsayılır. Bu model bir 3B nokta kümesi ve bunları bağlayan kenarlardan oluşur. Bu model, elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri (dahili kalibrasyon) kullanılarak kamera'nın kendisine göre göreli yerleştirilmiş her 3B yeri (harici kalibrasyon) için resim düzleminde benzetimsel (simulated) bir görüntüye dönüştürülebilir. Eğer görüntüde bir merdiven görüntüsü bulunuyor ise, elde edilen benzetimsel model iz düşümü ile resimdeki görüntünün gözlenen yapısal parçaları (saklı olmayan yatay ve dikey çizgiler, görünen köşeler) ancak merdiven modeli ve kamera

göreceli konumu doğru parametrelere sahip olduğunda çakışacaktır. Diğer bir deyimle, kamera yeri doğru kestirildiğinde (kamera kalibrasyonunun da doğru yapıldığı varsayımı ile) benzetimsel görüntü ile gözlenen merdiven görüntüsü çakışacaktır.

Bu çakışmanın algılanması için gerçek görüntünün işlenmesi ve merdiven 3B modelinin benzetimsel izdüşümü ile ölçülebilir olarak karşılaştırılabilecek görsel özniteliklerin çıkartılması gerekmektedir. Bu özniteliklerden merdiven için en net olanı, yatay ve dikey çizgilerdir. Çalışmamızda resimde bu çizgilerin otomatik olarak bulunmasında Hough Dönüşümü'nden yararlandık. İlk aşamada model ile çakıştırabilmek için yatay çizgileri kullandık. Bu çizgileri belirlemek için bulunan tüm çizgi öznitelikleri için eğim hesabı yapılarak yatay ile belirlenen değer altında bir açık yapan çizgilerin korunması yolu benimsenmiştir. Bu işlemlerin otomatik olarak yapılması sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 129'de verilmiştir. Oldukça düşük ışıktaki alınan görüntülerde özellikle dikey çizgilerin bulunmasında zorluklar da göze çarpmaktadır.



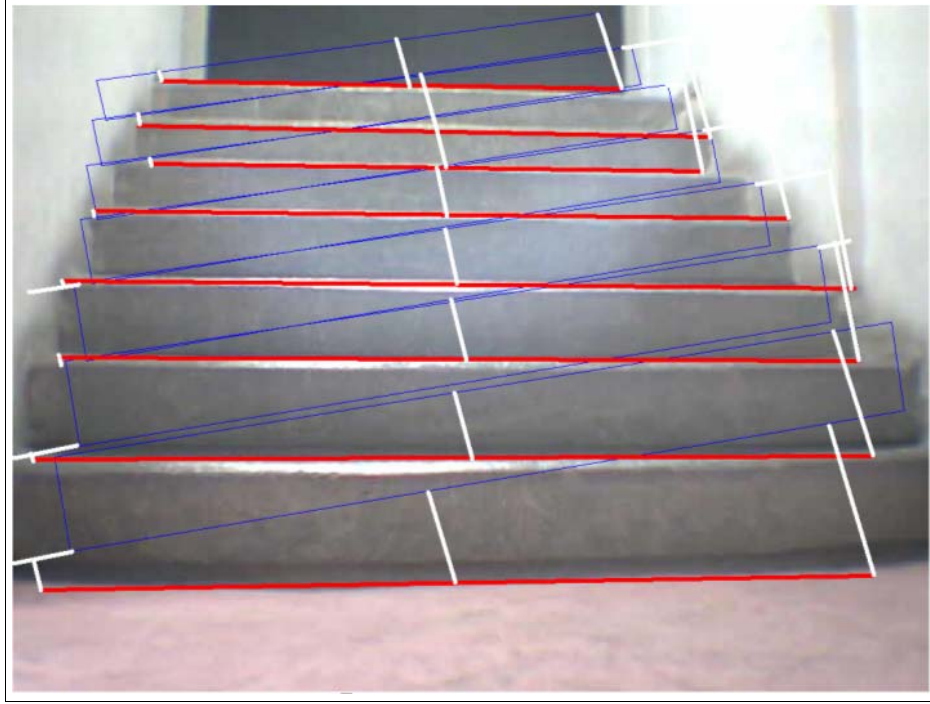
Şekil 129: (a) Merdiven görsel özniteliklerinden yatay ve dikey çizgilerin Hough dönüşümü ile çıkartılması, (b) Yatay çizgilerin ayıklanması ve kesilmiş çizgi parçalarının birleştirilmesi

6.2.2 Model-Görüntü Uzaklık Maliyet Fonksyonu ve Optimizasyon

Kamera'ya göre 3B merdiven modelinde (ki bu modelin bulunması merdivene göre 3B kamera konum/durum modeli'nin bulunması ile eşdeğerdir) bulunan yatay çizgiler ile resimden elde edilen çizgiler arasında bir örtüşmenin ölçülebilmesi için bir çizgi-çizgi uzaklık ölçütü tanımlanması gerekmektedir. Bunun bir yolu, bir taraftaki çizgiler üzerinden kontrollü olarak seçilen noktalar ile diğer taraftaki çizgiler arası bir dik uzaklık tanımlanmasıdır. Merdiven sıralı bir yapı olduğundan bu tekil uzaklıkların sıralı olarak ölçülmesi ve toplanması mümkündür. Bu uzaklık ölçümü Şekil 130'da gösterilmiştir. Resimdeki j'inci çizgiye ait noktalar $({}^m x_1^j, {}^m y_1^j)$ ve $({}^m x_2^j, {}^m y_2^j)$, resimden seçilen k'inci örnek nokta ise (x_k^j, y_k^j) olsun. Bu durumda k'inci örnek nokta ile modeldeki j'inci çizgi arasındaki mesafe

$$\text{Distance}(j, k) = \text{abs} \left(\frac{\det \left(\begin{bmatrix} {}^m x_2^j - {}^m x_1^j & x_k^j - {}^m x_1^j \\ {}^m y_2^j - {}^m y_1^j & y_k^j - {}^m y_1^j \end{bmatrix} \right)}{\text{norm} \left(\begin{bmatrix} x_2^j - {}^m x_1^j \\ y_2^j - {}^m y_1^j \end{bmatrix} \right)} \right)$$

ile hesaplanabilir.



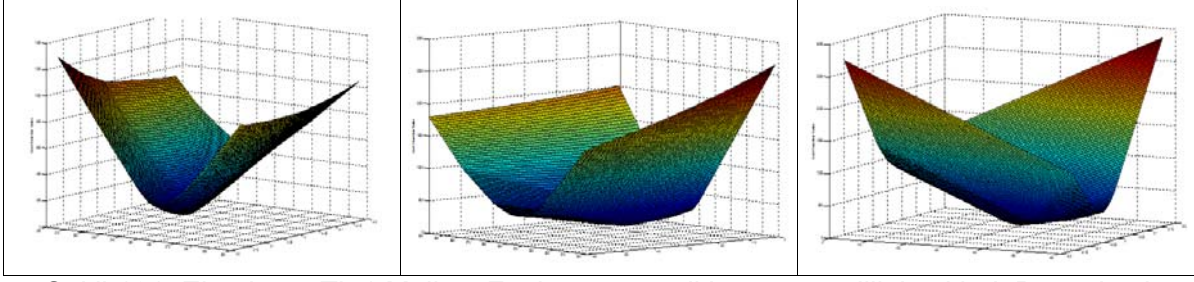
Şekil 130: Kamera resim düzlemine izdüşürülmüş merdiven modeli (mavi) ile resimden elde edilen yatay çizgiler (kırmızı) arasındaki uzaklık ölçümü. Bu ölçüm için resimde bulunan her çizgi için eşit aralıklı üç nokta belirlenmekte ve bu noktalar ile en yakın model çizgisi arasındaki dik uzaklıklar hesaplanmaktadır.

Model ile resim arasındaki örtüşme, bu uzaklık fonksiyonu üzerinden belirlenecek bir Maliyet Fonksiyonu'nun enazlanması yolu ile standard eniyileme yöntemlerinin kullanımı ile sağlanabilir. Çalışmamızda böyle bir yaklaşım benimsenmektedir. Tüm bireysel nokta-çizgi uzaklıkları toplanarak elde edilebilecek bir maliyet,

$$TotalCost = \sum_{i=1}^n Distance(1, i) + \sum_{i=1}^n Distance(2, i) + \dots + \sum_{i=1}^n Distance(l, i)$$

olarak hesaplanabilir. Modelden elde edilen izdüşüm ile resimdeki çizgiler örtüştüğünde bu fonksiyon en düşük değerini alacaktır.

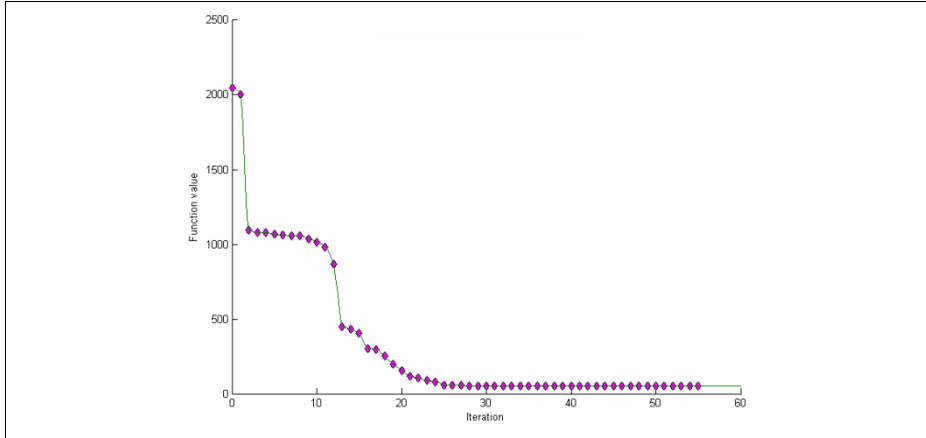
Ancak bu maliyet fonksiyonu'nun parametre uzayında nasıl davrandığı eniyileme yordamlarının davranışını ve performansını belirler. Maliyet fonksiyonu'nun bölgesel tepe ve çukur noktalara sahip olması veya olmaması eniyileme algoritması seçimini ve sonuçta ortaya çıkan yakınsama hızını etkileyecektir. Yukarıda tanımladığımız ilk maliyet fonksiyonu için bazı iki parametrelili kesitler aldık. Aldığımız üç değişik kesit, makul başlangıç sınırları içinde bu fonksiyonun oldukça yumuşak davrandığını ve bölgesel çukurlara maruz kalmadığını göstermekte.



Şekil 131: Ele alınan Tip1 Maliyet Fonksiyonunun iki parametre'lik kesitleri. Bu üç kesit, tanımlanan fonksiyonun tek bir çukur noktasına sahip olduğu konusunda olumlu bir izlenim vermektedir.

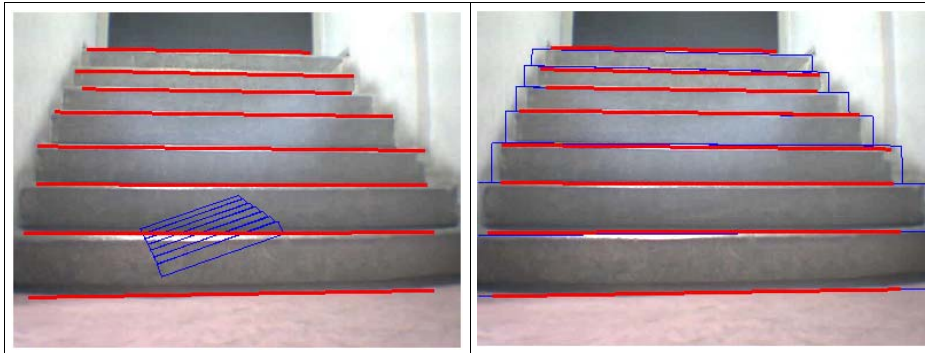
6.2.3 Optimizasyon yoluyla Durum Kestirim Sonuçları

Bu maliyet fonksyonu kullanılarak ve sayısal yaklaşık bir Gradyan hesabı ile (Bu aşamada Maliyet fonksyonu analitik olarak hesaplanmadığından analitik Gradyan hesabı mümkün değildir) bir Gradyan İniş (Gradient Descent) eniyileme yöntemi birleştirildiğinde ümit verici durum kestirimi sonuçları alınmaktadır. Eniyileme iterasyonlarına bağlı maliyet fonksyonu değişimi Şekil 132'de gösterilmektedir.



Şekil 132: Maliyet fonksyonu'nun eniyileme iterasyonlarına bağlı değişimi

Maliyet fonksyonu'nun son değeri sıfır'a varmamakta, yaklaşık $f=51$ değerinde sabitlenmektedir. Bu beklenebilecek bir sonuçtur. Ancak maliyet fonksyonunun değişimi ve ortaya çıkan sonuç, modelin sağlıklı biçimde kestirilebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 133: Eniyileme sonucunda resimdeki merdiven ile karşılaştırılmış merdiven modeli (a) ilk durum, (b) Kesitirim sonrası durum.

Aşağıdaki tablolarda modelin gerçek değerleri ve kestirim sonrası bulunan değerler verilmektedir. Hem tablodan, hem de Şekil 133'den görülebildiği gibi özellikle derinlik kestirimde (${}^w t_{z_c}$) ve kamera (robot) yönelim kestiriminde (${}^w \rho_c$) bir miktar hata oluştuğu gözlenmektedir.

${}^w \rho_c$	${}^w \theta_c$	${}^w \varphi_c$	${}^w t_{x_c}$	${}^w t_{y_c}$	${}^w t_{z_c}$
1.8°	6°	0°	68 cm	31.6 cm	246 cm

Tablo 8: Merdiven modeli gerçek parametreler

${}^w \rho_c$	${}^w \theta_c$	${}^w \varphi_c$	${}^w t_{x_c}$	${}^w t_{y_c}$	${}^w t_{z_c}$
3.5921°	6°	0.2523	68 cm	29.88 cm	187.71 cm

Tablo 9: Merdiven modeli kestirilen parametreler

Derinlikte ve yönelimde oluşan hatanın, yaklaşımımızın mevcut halinde dikey çizgilerin kullanılmamasına ve sadece yatay çizgilerin elde edilen başlangıç/bitiş noktalarına bağlı olarak yapılması sebebiyle olduğunu düşünüyoruz. Elimizde düşük ışıkta alınmış resimlerde dikey çizgilerin bulunmasında yaşanan sorunlara bağlı olarak verdiğimiz bu kararın yeniden değerlendirilmesi gerektiği düşüncesindeyiz. Işık ortamının daha iyi olduğu ortamlar bir yana, elimizdeki resimlerin bir görüntü ön işleme yordamına sokulması sonucu kontrastın arttırımının ve dolayısı ile çizgi bulma aşamasından daha iyi sonuçlar alınabileceğini düşünüyoruz.

Hataların bir diğer sebebinin de “gerçek durum” olarak ölçtüğümüz değerlerin oldukça yaklaşık yöntemler ile elde edilmiş olması muhtemel gözükmemekte. Harici bir robot durum kestirim düzeneğimiz olmadığı için mekanik yöntemler ile yapılan ölçümlerde hata payının yüksek olabileceği değerlendirilebilir. Yine de sonuçlarımız, kentsel ortamlarda merdivenlerin robot durum kestirimi için son derece verimli veri kaynakları olabileceğini göstermektedir.

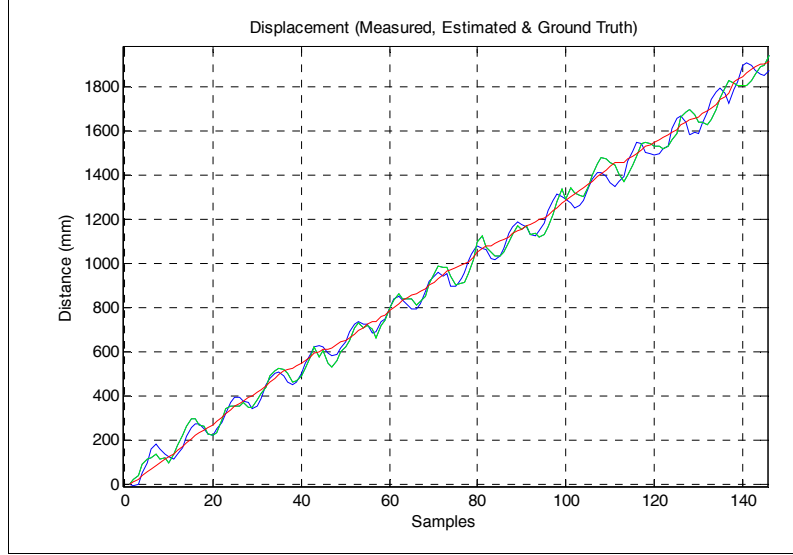
Projemiz kapsamında merdiven tanıma ve takibini, önemli bir araştırma yönü olarak ele aldık. Ancak yaptığımız çalışmalarda özellikle dış mekanlarda merdivenlerin tanınmasında yüksek başarılı bir yöntem geliştirmekte zorlandık. Dolayısı ile bu alandaki çalışmalarımıza, başka öncelikler altında ara vermek durumunda kaldık ve çalışma bu aşamada çıktılar ile sonuçlandı.

6.3 Hareket Modelinin Kestirimde Kullanımı

Hareket modelleri temelde bir Bayes süzgeci içerisinde kullanılabilirler. Bu modellerin, Bayes süzgecinin bir özel durumu olan parçacık süzgeçleri ile kullanımları nispeten daha kolay olmaktadır. Burada model, robotun mevcut durumundan bir zaman adımı sonrasındaki durumunu tahminlemek için kullanılmakta ve bu tahmin teorik bir formüle dayanmak durumuna olmamaktadır. Yani yaklaşık fonksiyonel tahminleme (function approximation) yöntemlerinin kullanımına da açıktır.

Yukarıda anlattığımız hareket modelleme fikirlerinin başarımını tek eksendeki hareket için kontrollü bir ortamda bir parçacık filtresi kullanarak durum kestirimi için test ettik. Filtreye beslediğimiz ölçümlerimiz yeni geliştirdiğimiz görme temelli durum ölçümü sisteminden, mutlak doğru ölçümlerimiz ise lazer tarayıcıdan alındı. Bu ön sonuçların ilk gurubu hız hareket modeli kullanılarak alınmıştır. Burada ölçümlerin mutlak gerçeğe oldukça yakın

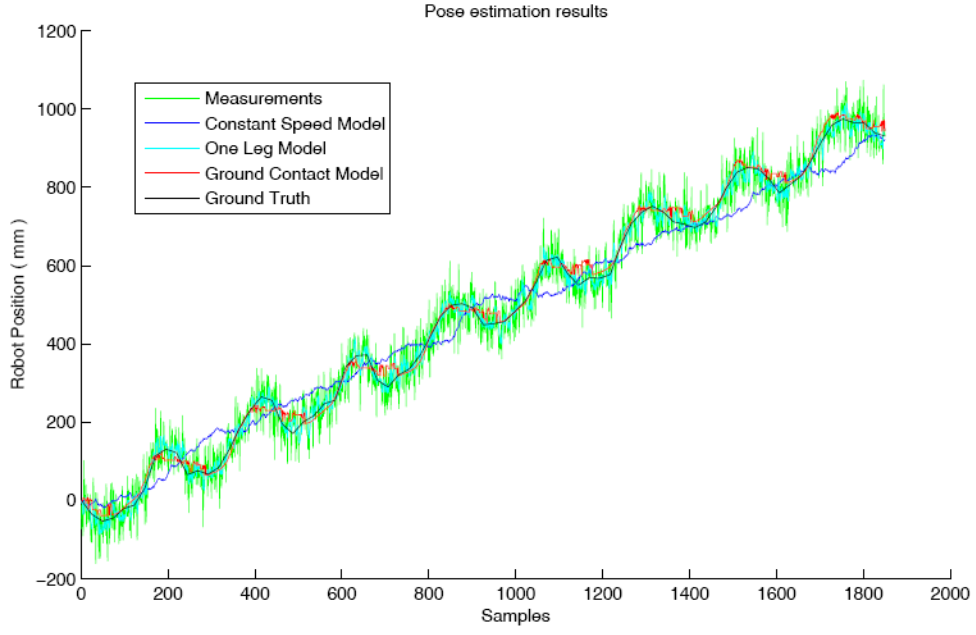
olduğu ve bunun yanında Hız hareket modelinin çok başarılı olamadığı, özellikle hareketteki yarı-periyodik yapıyı hiç modelleyemediği gözükmektedir. Yine de bu deney gurubunda özellikle süzgeçte varsayılan gürültü parametresi ile oynanarak biraz daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini düşünüyoruz.



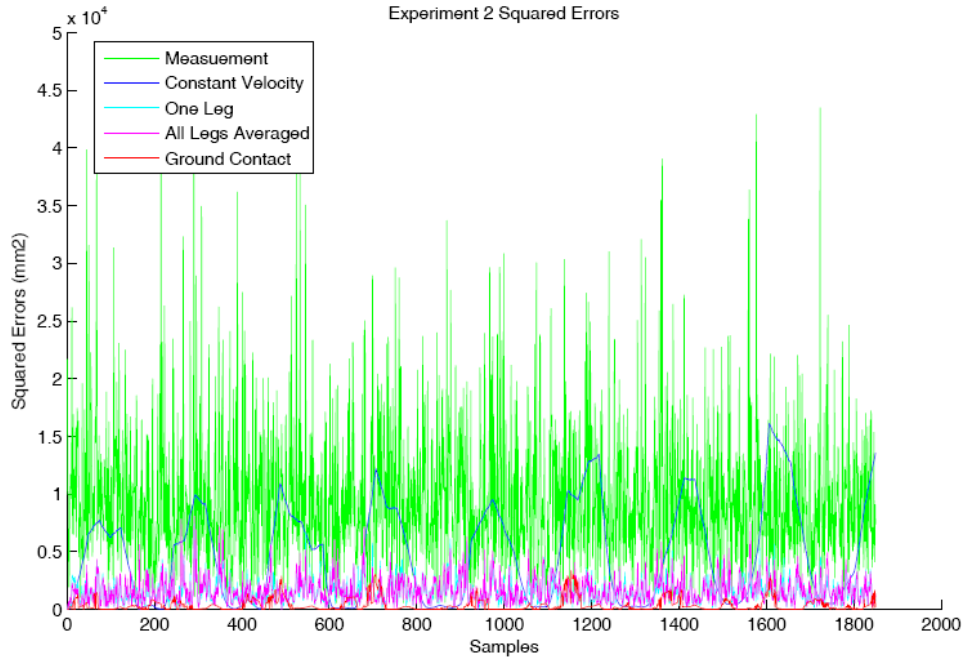
Şekil 134: Sabit hız hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçlar. Burada mavi renk ölçümleri, yeşil renk gerçek hareketi ve kırmızı renk de süzgeç tahminlemesini göstermektedir

Görme temelli ölçüm sistemimizin kontrollü ortamda çok iyi çalışması, ölçümler ile gerçek konum arasında çok az bir fark kalmasına yol açmıştır. Dış mekanlarda ve daha uzak işaret taşları ile konumlandırma probleminde görme sisteminin daha çok gürültü içereceğini tahmin ediyoruz. Bu sebeple ölçümlerimize bir miktar gürültü ekleyerek süzgeçleme problemini daha zorlaştırmak ve bu yolla farklı hareket modelleri arasındaki farkları daha kolaylıkla ortaya koyabilmeyi değerlendirdik.

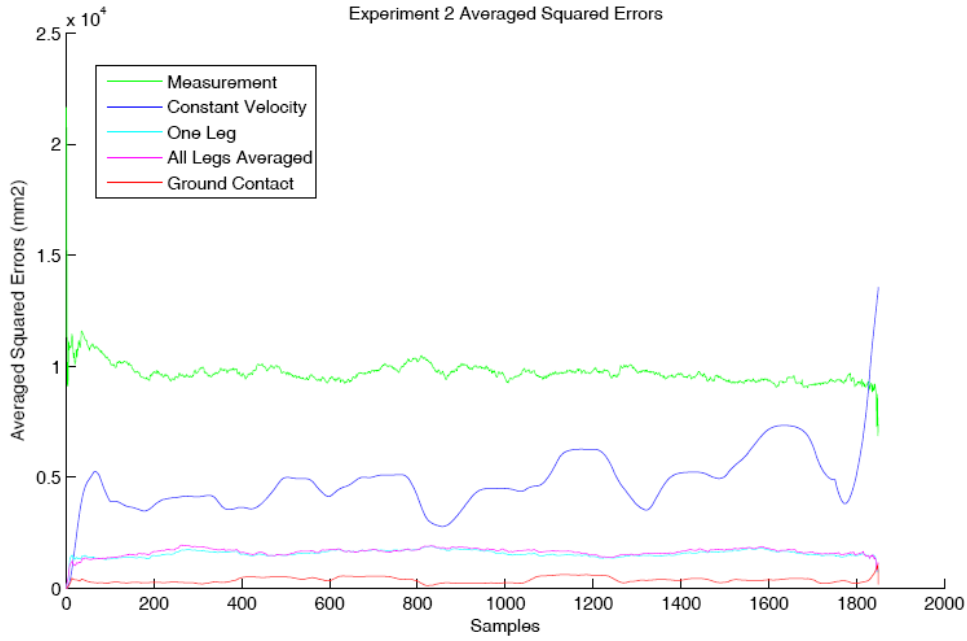
Şimdi, deneylerimiz sırasında yukarıda anlatılan ve önerdiğimiz üç model ile temel çizgi (baseline) olarak aldığımız sabit hız modeli arasındaki performans farklarını irdeleyeceğiz. Şekil 135'de robotun gerçek hareketi, sabit hız modeli ve önerilen üç hareket modelinin kestirim sonuçları gösterilmiştir. Burada gözlemlerin ciddi oranda gürültü içerdikleri gözlenebilir. Ancak modeller arası bir karşılaştırma yapabilmek için mutlak doğru ile ortaya çıkan hata işaretlerine bakmak gerekir.



Şekil 135: Önerilen üç hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçların gerçek hareket ve sabit hız modeli ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması



Şekil 136: Önerilen üç hareket modelinin parçacık süzgeçi içinde verdiği sonuçlar. Gerçek hareket ve model kestirimi arası mutlak farkların gösterimi



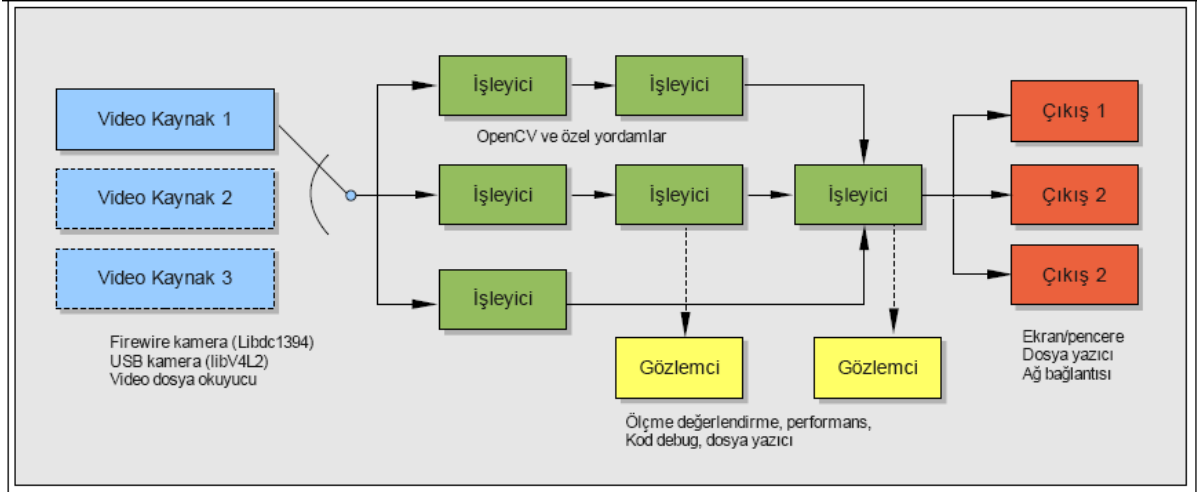
Şekil 137: Önerilen üç hareket modelinin parçacık süzgeci içinde verdiği sonuçlar. Gerçek hareket ve model kestirimi arası mutlak farkların alt geçirgen süzgeç ile gösterimi. Ortalama davranış görüntülebilmektedir.

Yukarıda gösterilen sonuçlar, filtrenin tasarım parametreleri olan varsayılan proses gürültüsü ve gözlem gürültüsü için değişik değerler ile tekrarlanmıştır. Aldığımız sonuçlarö makul parametre aralıklarında yukarıdaki şekillerde gözüken sıralamanın korunduğunu göstermektedir. Giderek iyileşen hareket modellerinin parçacık filtresinin içinde kullanımı ile durum kestirimi hata oranları, önemli ölçüde azaltılabilmektedir. En iyi sonuçların, yerde değme anı parametresinin tanımlanması ve optimize edilmesi sonucunda elde edildiği gözlenmektedir. Bayes süzgeci temelli kestirim yordamı, hareket modelinin de kullanımı ile gözlemlerdeki gürültünün çok altında kestirim hataları ile sonuç vermektedir.

Gelecekteki çalışmalarımızda, hareket modellerinin düzlemsel genel bir harekete genellenmesi yolunda çalışmalar yapılacaktır. Bu çalışmalar, devam etmekte olan bir tez çalışması kapsamında ele alınmaktadır. Bunun yanında, son önerilen ve en yüksek başarıyı sağlayan modelin gerçekte ihtiyacı olan bacak yere değme bilgisinin robot üzerine yerleştirilecek algılayıcılar yolu ile yapılması hedeflenmektedir. Bunun için, ölçebildiğimiz akım değişimlerinden yararlanılabileceği düşünülmektedir. Ancak bu fikir ile başarı sağlanamaması durumunda ise bacak üzerine yereleştirilecek kontak algılayıcıları ile bir çözüm ele alınabilir. Bacakların sürekli dönme özelliğinden dolayı bu algılayıcıların okunması için ya optik, ya da kablosuz iletişimden yararlanılması gerekebilecektir.

7 Robot Görme Kütüphanesi

Projemiz kapsamında bir mühendislik çalışması olarak, hem açık kaynaklarda bulunan ve kullanmamız gereken yazılım parçalarını, hem de projemiz kapsamında geliştirdiğimiz ve kullandığımız parçaları kullanılabilir bir yapıda bir araya getirdiğimiz bir robot görme kütüphanesi tasarladık. Bu kütüphanenin genel yapısı, teklifimizde önerdiğimiz şekilde gerçekleştirildi. Bu yapı



Şekil 138: VisLib robot görme kütüphanesi genel veri akış yapısı

Bu dizin işleme yapısı içinde bir video kaynağı (source), birden fazla seri ve/veya paralel olarak bağlanmış işlemciler (processors) ve gözlemciler (observer) ile bir veya birden fazla çıkışlar (sinks) bulunmaktadır. Bu yapı dinamik yüklenebilen kütüphaneler yardımı ile çalışma sırasında (run-time) konfigüre edilebilir olarak tasarlanmıştır. Dolayısı ile derleme gerektirmeksizin robot üzerinde değişik işlevler ve deneyler için konfigüre edilebilmiş ve bu yapı deneysel çalışmalarımızda kolaylık sağlamıştır.

Bu kütüphane yapısı içerisinde bireysel bloklar, kendi içlerinde mevcut açık kaynak yazılım kütüphane'lerinden yararlanmaktadır. Örneğin kaynak bloklardan bir alternatif Firewire bir kamera'yı temsil edeceği zaman Linux işletim sistemi üzerinde *libraw1394* ve *libdc1394* kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Bunun yanında işlemciler ise kapsamlı görüntü işleme ve görme yardımlarından oluşan ve akademi ve endüstride yaygın kabul gören *OpenCV* kütüphanesi ihtiyacımız olan pek çok alt işlev için kullanılmıştır.

Projemiz kapsamında VisLib kütüphanesinin tasarımı tamamlanmış, yazılımın ihtiyaçlarımızı kapsayan pek çok kısmı kaynak kütüphanelerden de yararlanarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım tasarımının detayları, burada yer verilmesindeki zorluk sebebi ile raporumuzun ekindeki teknik raporda bulunabilir. Burada tasarıma ait kısa bir özet verilecektir.

Görüntü işleme kütüphanesinin geliştirilme amacı görüntü alma, görüntü işleme ve görüntüyü ekranda gösterebilmek amacıyla kullanımı kolay ve güvenilir bir programlama aracına sahip olmaktır.

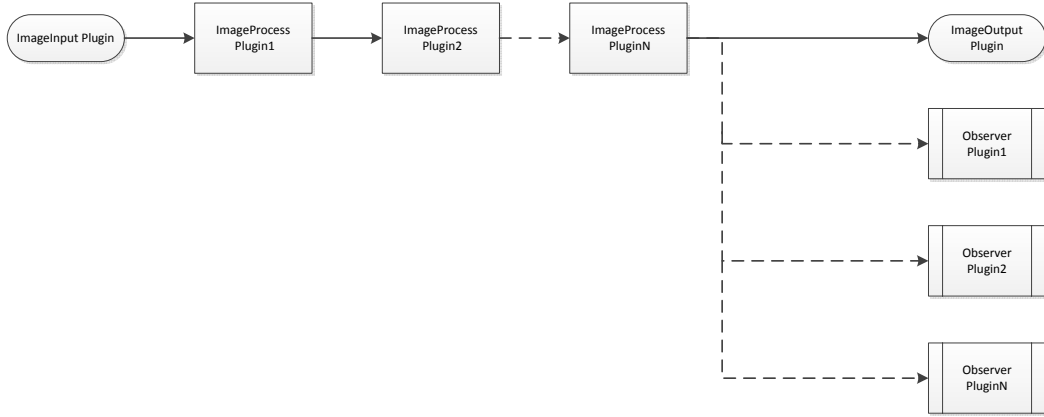
VisLib adını verdiğimiz bu kütüphane boru hattı (pipeline) yapısına sahiptir. Elde edilen bir çerçeve onu işleyecek olan çeşitli eklentilere (plugin) aktarılmakta ardından en son olarak da işlenmiş görüntü kullanılmaktadır. Her bir görüntü işleme işlemi için bir eklenti yazılabilir. Bu eklentilerin yazılmasında başka açık kaynak kütüphanelerden de yararlanılabilir. Örneğin son yıllarda popülerlik kazanan OpenCV kütüphanesi verimli bir altyapı oluşturmaktadır.

Eklentiler yazıldıktan sonra istenilen sırayla boru hattına bağlanabilirler. Örneğin alınan bir resmi ilk olarak siyah beyaza çevirip daha sonra gürültü eklenebileceği gibi bağlanma sırasını değiştirmek suretiyle ilk olarak gürültü eklenip daha sonra siyah beyaza dönüştürülebilir.

Kütüphanedeki eklentiler, aşağıdaki sınıflara ait olabilirler:

- **ImageInput** eklenti sınıfı, video kareleri yakalama ve sisteme besleme amaçlıdır. Her kamera donanımı için bir eklenti yazılabileceği gibi örneğin dosyadan video karelerini okuyan bir eklenti de yazılabilir.
- **Process** eklenti sınıfı, video kareleri üzerinde belli işlemler yaparak yeni kareler veya başka veri dizileri üreten eklentileri kapsamaktadır. Örneğin bir yumuşatma süzgeci örnek gösterilebilir.
- **ImageOutput** eklenti sınıfı, bir video kare dizisini sistemden dışarı almak için yazılan eklentileri kapsar. Örneğin video'nun gösterimi bu sınıfta olabileceği gibi bilgisayar ağı üzerinden başka bir bilgisayara yollanması da bu sınıfta yer alır.
- **Observer** eklenti sınıfı, video dizini girdisi alan ama resim yerine bu resimler üzerinden daha kapsamlı başka veri dizileri üreten "analiz" amaçlı fonksiyonları kapsar. Örneğin video kareleri üzerinden histogram hesaplanması bir örnek olarak verilebilir.

Bu sınıfların kütüphaneyi nasıl oluşturdukları ve kütüphanin genel çalışma yapısı Şekil 139'de verilmiştir.



Şekil 139 Kütüphane'nin eklenti mimarisi

Proje çalışmalarımız kapsamında kütüphanin genel yapısını oluşturan ve arabirimleri tanımlayan sınıflar yazılmış ve işler hale getirilmiştir. Kütüphanin tüm ana sınıflarının da yazımı tamamlanmıştır. Bunlara şu örnekler verilebilir:

Buffer Sınıfı: Video karelerini saklayan sınıftır. Video karelerinin saklanması, silinmesi, boyutlarının ve piksel derinliğinin belirlenmesi gibi fonksiyonlara sahiptir.

ColorTools sınıfı: Renk uzayları ile ilgili mesafe ve ortalama hesaplarını kapsayan sınıftır.

Conversion Sınıfı: Renk uzayları arasında dönüşüm işlemlerini kapsayan sınıftır. RGB, HUV ve HSV renk uzayları ile ilgili kodlar yazılmıştır.

DataElement Sınıfı: Hiyerarşik bir veri ağacı kurmayı sağlayan temel elemandır. Bu elemanların kullanımı ile ağaç yapıları oluşturulabilmektedir.

ImageInput Sınıfı: Yukarıda değinilen boru hattı yapısının giriş elemanlarının ait olduğu sınıftır. Bu sınıfa ait bir objenin örneğinin *update()* fonksiyonu her çağırıldığında bir resim karesi, ilgili donanım tarafından yakalanmalıdır. Çalışmalarımız kapsamında şimdilik Linux bilgisayarlarda "Video for Linux" V4L kütüphanesi desteği yazılmıştır. Linux'da bu

kütüphanenin desteklediği tüm kameralardan görüntü yakalanabilmektedir. Ayrıca MJPG desteği ile dosyadan resim karesi dizileri okunabilmektedir.

ImageOutput Sınıfı: Bu sınıfa ait nesnelere birer eklenti statüsündedir ve görüntü karelerinin kütüphane tarafından işlendikten sonra başka bir yere transferini sağlamaktadır. Projemiz kapsamında GTK kütüphanesini kullanarak resim görüntüleme ve JPEG kütüphanesini kullanarak dosyaya yazma kısımları yazılmış durumdadır.

Observer Sınıfı: Bu sınıfa ait nesnelere, resimler üzerinden hesaplanan karmaşık data yapıları için kullanılabilir. Örneğin bir resim karesinden SIFT özelliklerinin hesaplanması için bir Observer eklentisi yazılmıştır.

Pipeline Sınıfı: Bu sınıfa ait nesnelere, kütüphanenin ana iskeletini kurgulamak için kullanılmaktadır. Bir boru hattı yaratıldığında bu objenin içerisine değişik sınıflara ait eklentiler eklenebilmekte ve bunlar arasındaki bağlantılar tanımlanabilmektedir. Bu yolla bir görüntü işleme zinciri oluşturulabilmektedir.

Process Sınıfı: Video karelerinin işlendiği bir zincirde bu eklenti çeşidi de çok önemlidir. Bu sınıftaki nesnelere bir resmi belli bir işleme tabii tutarak başka bir resme çevirirler. Süzgeçleme işlemleri, renk dönüşümleri, belli unsurları vurgulama veya bastırma gibi işlemlerin tümü bu sınıfa aittir.

Bu nesnelere kullanılması ile kullanıcı bir eklenti yazabilir. Bu eklentiler, boru hattına istenen sıra ile eklenir. Kütüphane'nin görevi, ortaya çıkan çalıştırılabilir programda tanımlanan yapı içerisinde verileri sırası ile bu eklentilerden geçirerek çıktıları oluşturmaktır.

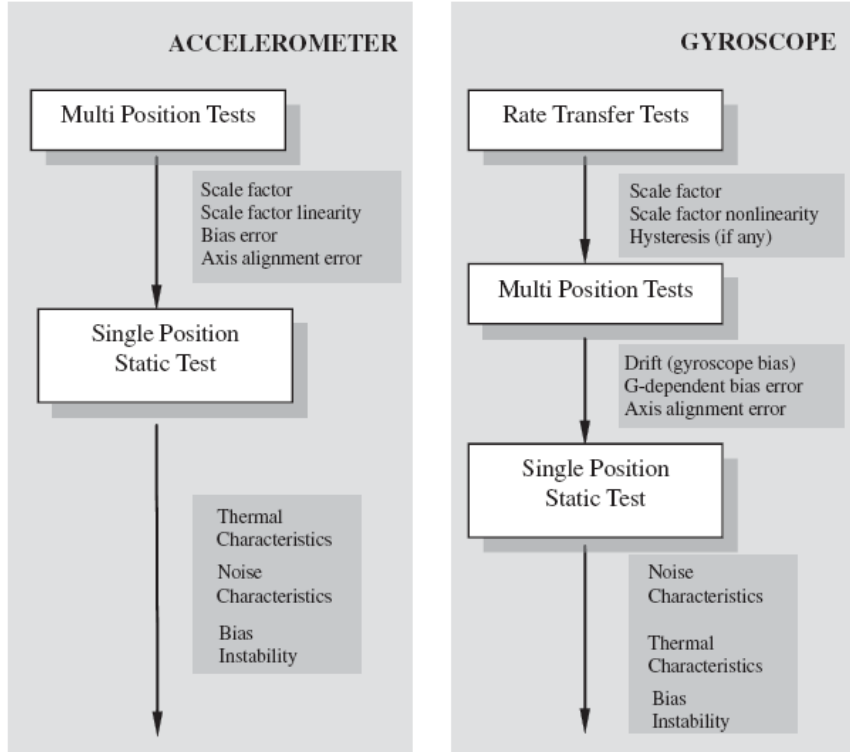
Sonuç olarak VisLib, sürekli gelişecek bir yazılım yapısıdır. Proje kapsamında gerçekleştirdiğimiz çalışmalar, bu kütüphane için önemli bir başlangıç noktası ve ilerleme temsil etmiştir. Robot görme üzerine yapacağımız çalışmaların sonuçlarının ileride de bu kütüphane içerisinde yer almasını planlıyoruz.

8 Projemiz Kapsamında Yapılan Diğer Çalışmalar

8.1 Ataletsel Güdüm Algılayıcı Karakterizasyon ve Kalibrasyonu

Projemiz teklif aşamasındayken bu alanda sürdürdüğümüz çalışmalar, projemiz sırasında son halini alarak çıktı vermiş ve projemiz bünyesinde kullanılmıştır. Bu kapsamda bir Y.Lisans tezi tamamlanmış ve algılayıcılar alanında saygın bir dergide kabul edilerek yayınlanmıştır.

Bu kapsamda yaptığımız çalışma, özellikle projemiz kapsamında deneylerde de kullandığımız MicroStrain MEMS Ataletsel Ölçüm Algılayıcısı ve bu grup algılayıcıların tümü için karakterizasyon ve kalibrasyon presedürünün tanımlanması, uygulanması ve deneyler ile geçerlenmesi olmuştur. Bu amaçla gerçekleştirilen deneylerin akışı Şekil 140'da gösterilmiştir.



Şekil 140: Ataletsel algılayıcı ivmeölçer ve dönüölçer kalibrasyon prosedürleri

İvmeölçer ve dönüölçer'ler için hataların ifadesi

$$\begin{bmatrix} \delta\alpha_x \\ \delta\alpha_y \\ \delta\alpha_z \end{bmatrix} = \mathbf{B}_A + \mathbf{S}_A \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_A \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{Ax} \\ W_{Ay} \\ W_{Az} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_A = \begin{bmatrix} B_{Ax} \\ B_{Ay} \\ B_{Az} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_A = \begin{bmatrix} \delta S_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & \delta S_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & \delta S_{az} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} 1 & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & 1 & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_y \\ \delta\omega_z \end{bmatrix} = \mathbf{B}_G + \mathbf{B}_g \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + \mathbf{S}_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{Gx} \\ W_{Gy} \\ W_{Gz} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_G = \begin{bmatrix} B_{Gx} \\ B_{Gy} \\ B_{Gz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_g = \begin{bmatrix} B_{ga_{xx}} & B_{ga_{xy}} & B_{ga_{xz}} \\ B_{ga_{yx}} & B_{ga_{yy}} & B_{ga_{yz}} \\ B_{ga_{zx}} & B_{ga_{zy}} & B_{ga_{zz}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_G = \begin{bmatrix} \delta S_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & \delta S_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & \delta S_{gz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_G = \begin{bmatrix} 1 & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & 1 & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & 1 \end{bmatrix}$$

İfadeleri ile verilebilir. Burada δ değişkenleri hataları, α değişkenleri gerçek ivmeleri, ω değişkenleri ise dönü hızlarını göstermektedir. Yukarıdaki ifadeler eksen çıktıkları üzerindeki sabir hataları ve eksenler arası bağlantıları (coupling) ifade etmektedir.

Örneğin dönüölçer'in dinamik kalibrasyonunda, kontrollü dönü yapabilmeyen "ratetable" adı verilen bir düzenek kullanılmaktadır. Bu düzenek, projemizde kullandığımız ataletsel ölçüm sensörü ile birlikte XX'de gösterilmiştir. Tübitak-SAGE ile işbirliği ile yapılan deneyler ile algılayıcının kalibrasyon yönteminin geliştirilmesi mümkün olmuştur.



Şekil 141: "Rate Transfer Test": Belli bir ekseninde gerçek dönü miktarı ile algılayıcı eksen çıktıkları arasındaki ilişkinin kontrollü dönü uygulanması yolu ile bulunması.

Projemizin başlangıç çalışmalarının bir parçası olan bu çalışmanın detayları ekli dergi makalesi üzerinden incelenebilir.

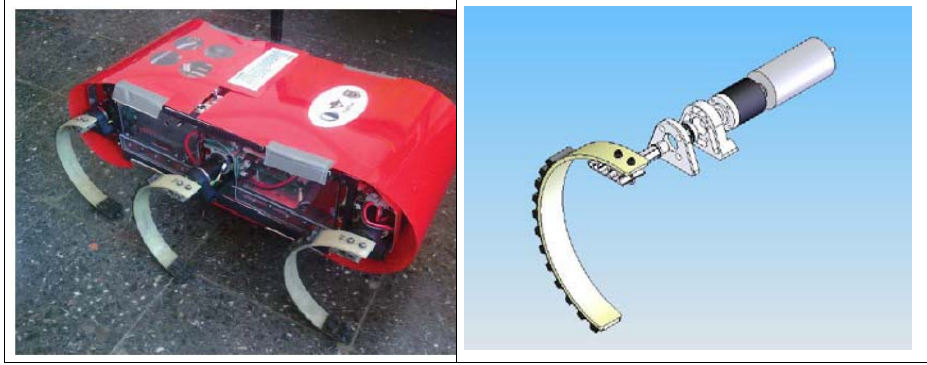
8.2 *SensoRHex* Yarım Daire Bacaklarının *SimMechanics* ile Modellenmesi ve Benzetim Çalışmaları

Önceki projemiz kapsamında başlamış ve devam eden çalışmalarımız kapsamında, deneysel robot platformumuz *SensoRHex*'in dinamik davranışlarının modellenmesi amacıyla esnek yarım-daire şeklindeki bacaklarının modellenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Bu bacaklar ile hareket sırasında meydana gelen ve görüntü alma sürecini de etkileyen bozucu işaretleri anlama ve modelleme yolunda da bu çalışmalar önemli yer tutmaktadır. Bacak şeklinin kararlılığa etkisi de uzun vadeli ilgilerimiz arasındadır.

Çalışmalarımız sırasında Matlab-Simulink-SimMechanics ortamının problemlerimizde benzetim amaçlı kullanılabilmesini anladığımız sırada, zaten önemli ölçüde ilerlemiş olan

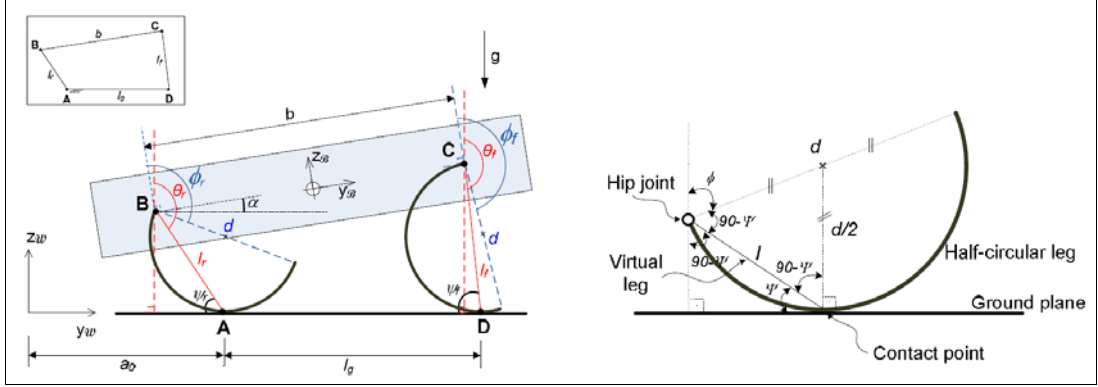
esnek bacaklarımızın Matematiksel modellerinin doğrulanması amacıyla da bir model geliştirilebileceğine karar verdik. Bu amaçla esnek bacaklarımızın, birbirine torsyonel yaylar ile bağlı az sayıda sert parça ile sonlu elemanlar yaklaşımı benzeri bir yaklaşım ile modellenebileceği düşüncesi gelişti. Şimdi bu çalışmanın detaylarından bahsedeceğiz.

Bacaklı robotlar, tahrik mekanizmaları, bacak yapıları yada kontrol algoritmaları bakımından çeşitlilik göstermekle birlikte, hepsinin ortak özelliği doğanın çözümlerini taklit etmeleridir. Fakat organik canlıların, mekanik kopyalarını üretmek çoğu zaman karmaşıklık ile sonuçlanmaktadır. Bu noktada, başarılı uygulamaların oluşturulabilmesi, doğayı başarılı bir şekilde taklit etmek ile değil, doğayı başarılı bir şekilde yorumlamak ile mümkün olmaktadır. RHex, altı-bacaklı robot platformu, doğanın başarılı bir şekilde yorumlanması ile oluşturulmuş, üstün hareket kabiliyetlerine sahip, mekanik açıdan olabildiğince basit robot platformudur. Sahip olduğu altı adet yarım daire şekilli (c-şekilli) esnek bacak ve bu bacakları tek eksende süren 6 adet DC motor, dinamik ve pasif stabilizasyona imkan vermekte, hızlı koşmasını mümkün kılmakta, sıçrama, merdiven çıkma ve takla atma gibi hareketleri yapmasına olanak sağlamaktadır. Robotumuzun bacakları ile şu anki görünümü Şekil 142'de verilmiştir.



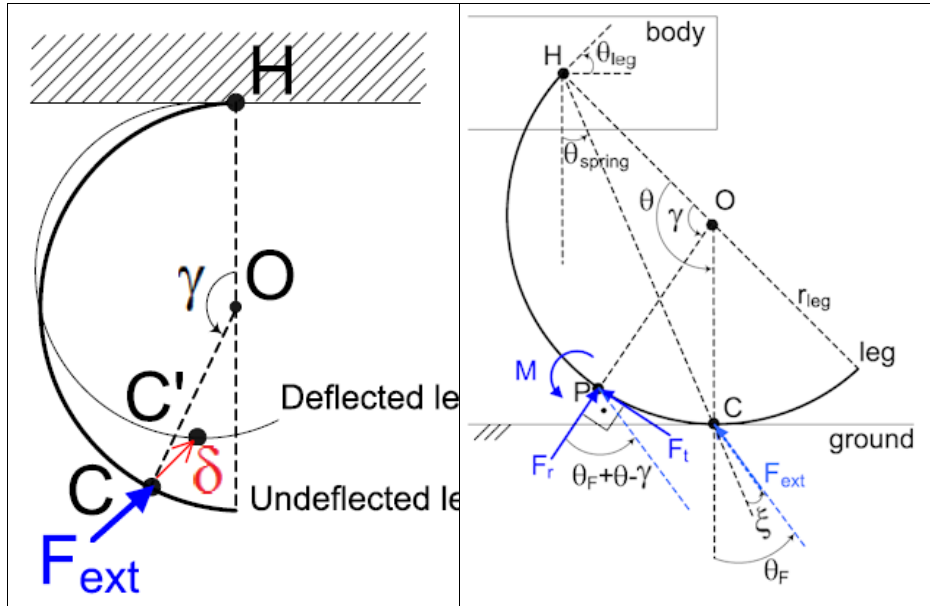
Şekil 142: (a) 106E089 no'lu Tübitak 1001 projesi kapsamında geliştirilen SensorHex bacaklı robot platformumuz (b) Platform bacaklarından birinin ve eyleyici motorun katı model çizimi.

Fakat bu hareket tiplerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, bilgisayar ortamında yapılan benzetimler büyük önem arz etmektedir. Oluşturulan benzetim modellerinin, gerçek sisteme olan yakınlığı, başarıyı etkileyen en önemli unsurlardan birtanesidir. Literatür araştırmaları göstermiştir ki, RHex robot platformu için kullanılan benzetim modellerinin çoğu c-şekilli esnek bacak yerine, ya yuvarlanma hareketini dikkate almayan sabit eşdeğer katsayılı lineer bir yay, ya da esneklik özelliği olmayan, sadece yuvarlanma hareketini modelleyen c-şekilli bacaklar kullanmaktadır. Bu modeller, gerçek sistemi tam olarak temsil etmekte yetersiz kalacak ve elde edilen benzetim sonuçlarının güvenilirliğini azaltacaktır. Aşağıda Şekil 143'de daha önceden geliştirdiğimiz kinematik bacak modeli görülmektedir.



Şekil 143: 106E089 no'lu Tübitak 1001 projesi kapsamında geliştirilen SensoRHex kinematik bacak modeli.

Bununla birlikte, tüm fiziksel nicelikleri dikkate alarak oluşturulacak matematiksel bir model, karmaşıklığı dolayısıyla kullanılabilir olmayabilir. Daha önceki 106E089 no'lu projemiz ve süregiden çalışmalarımız kapsamında kullanılabilir esnek bacak modelleme çalışmalarımız devam etmiştir. Bu çalışmalar kapsamında Castigliano Teoremi kullanılarak elde edilmiş bir esnek bacak modeli şu anda benzetim çalışmalarımızda kullandığımız bir modeldir ve



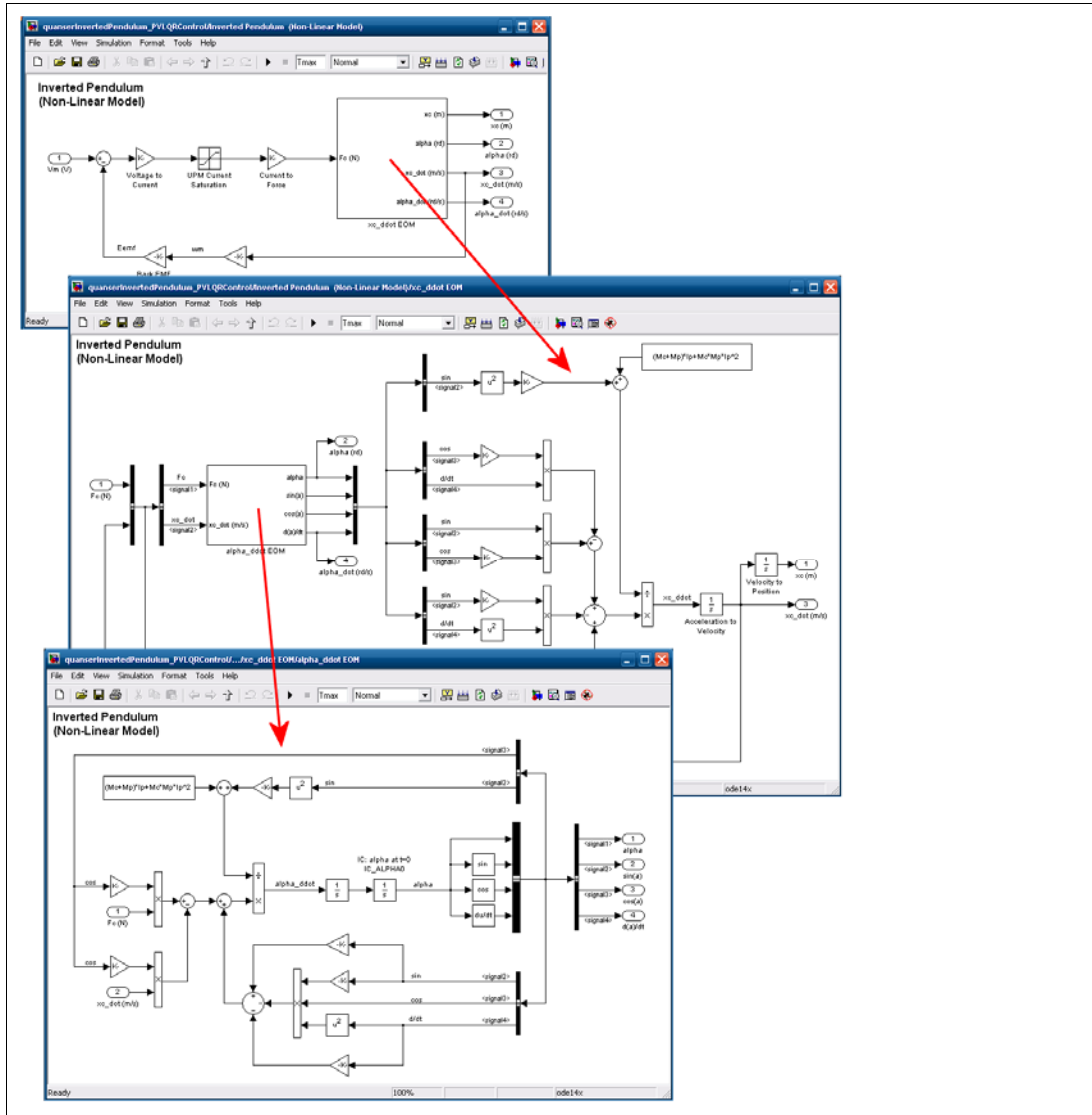
Şekil 144: Castigliano Theoremi'nden yararlanarak geliştirilen ve C noktasında uygulanan bir kuvvete karşı bacakta meydana gelen esnemeyi veren esnek bacak modeli

Matematiksel modelin mutlak ihtiyaç olmadığı durumlarda, bilgisayarlar kullanılarak yaklaşık nümerik modellerin eldesi alternatif bir çözüm sunmaktadır. Dolayısıyla, SensoRHex robot platformu ve üzerinde kullanılan c-şekilli esnek bacakların, bir Matlab eklentisi olan SimMechanics aracı ile modellenmesinin ve benzetiminin yapılmasının, ilgili literatür bakımından faydalı olacağı değerlendirilmiş ve bu alanda bir çalışma yapılmıştır. İlk aşamada, SimMechanics modellerinin ihtiyaçlarımızı karşılayacağına güven oluşturmak için ilgili literatür taranmış ve farklı fakat karmaşık esnek sistemler için yapılmış deneysel geçерleme çalışmaları değerlendirilmiştir. SimMechanics ile yapılacak benzetim çalışmalarının istenen performansı vermesi durumunda kafa mekanizması için

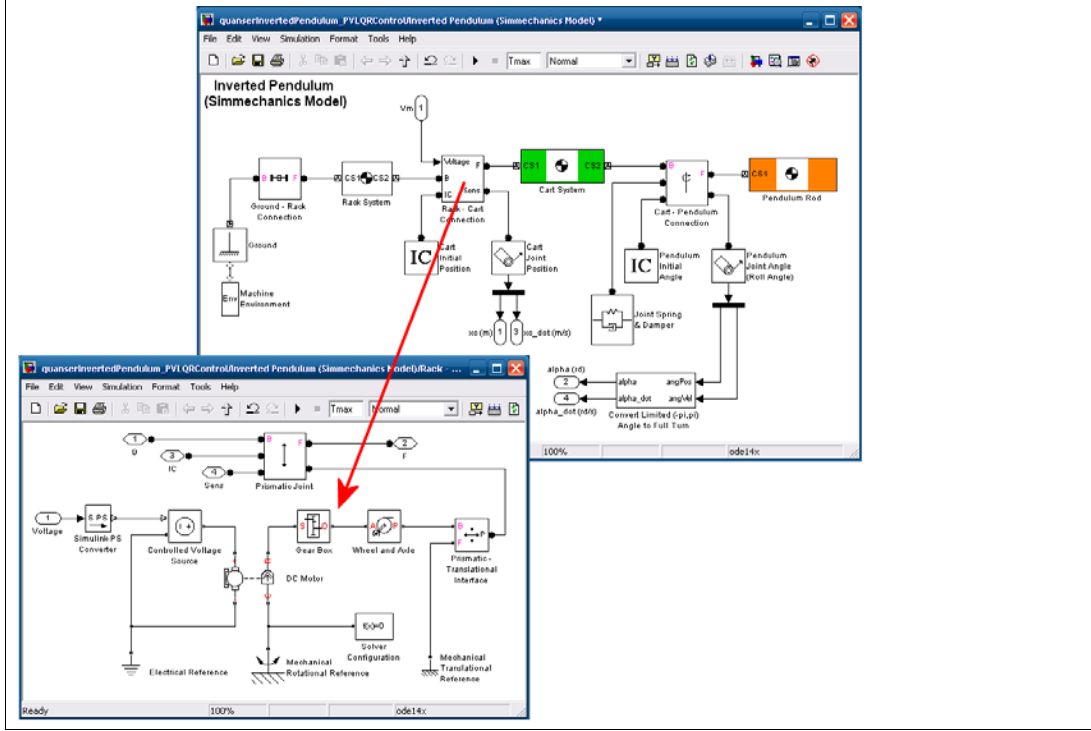
geliştirdiğimiz modellerin test edilmesinde de SimMechanics modellerinden yararlanılabilecektir.

(a) Dinamik Sistemlerin SimMechanics Modelleri

Matlab'in bir modülü olan SimMechanics sistemi, karmaşık dinamik sistemlerin tüm dinamik denklemlerinin elde edilmesine bir alternatif olarak, modeli belli olan bileşenlerin birbirlerine bağlanarak karmaşık bir sistemin toplam modelinin sayısal olarak çözülebilmesine olanak vermektedir. Kontrol laboratuvarımızda bulunan ve Quanser firmasına ait doğrusal olmayan ters sarkaç sistemine ait Simulink ve SimMechanics modelleri aşağıda Şekil 145 ve Şekil 146'de karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Simulink modeli'nin oluşturulması için sistemin tüm dinamik denklemlerinin elde edilmesi ve blok şemasının oluşturulması gereklidir. Buna kıyasla SimMechanics modelinde ise sisteme ait fiziksel elemanlara ait blokların birbirlerine fiziksel ilişkileri tanımlanarak bağlanması söz konusudur ve bu süreç, karmaşık sistemler için daha kolaydır.



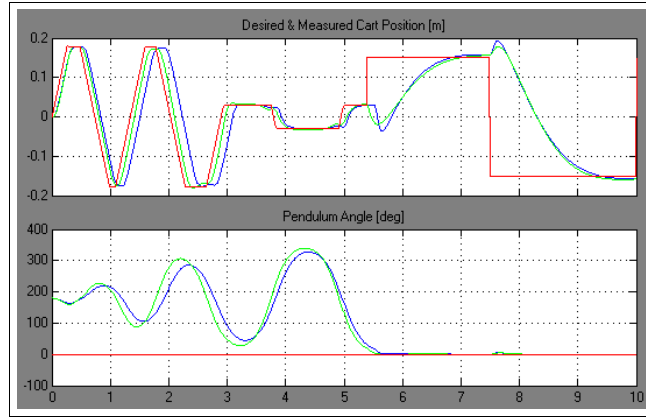
Şekil 145: Quanser doğrusal olmayan ters sarkaç modeli'nin Simulink modeli.



Şekil 146: Quanser doğrusal olmayan ters sarkaç modeli'nin SimMechanics modeli. Bir diğer detay seviyesinde

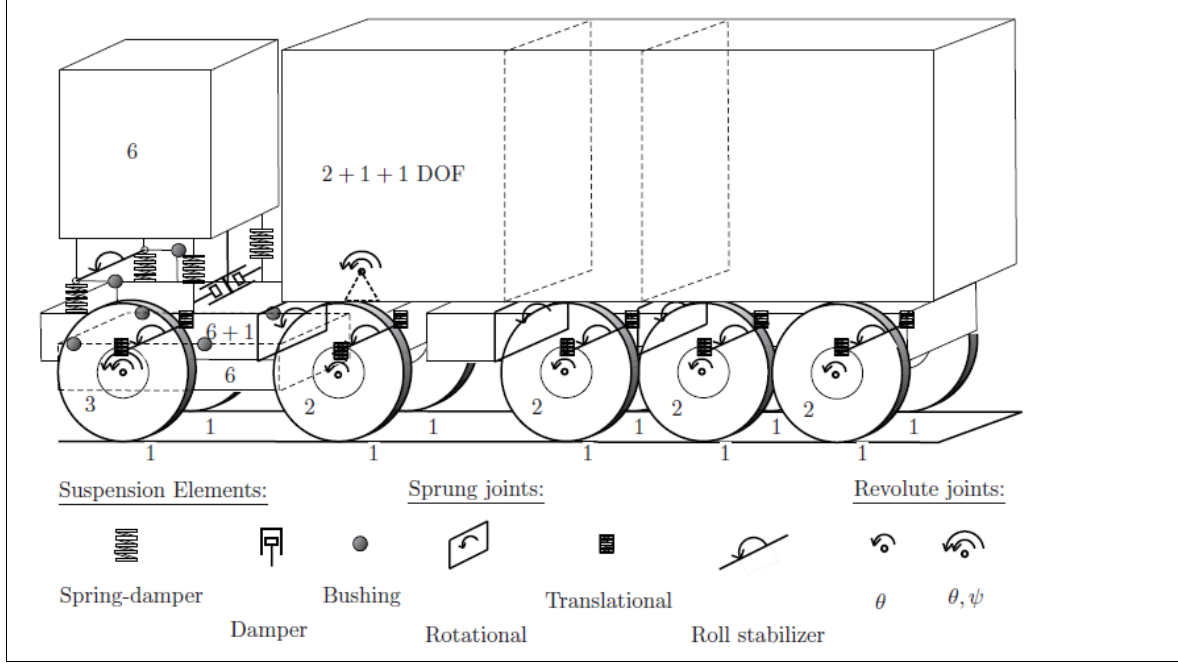
(b) SimMechanics Modellerinin Geçerliliği

Geliştireceğimiz SimMechanics modeline güven oluşturmak öncelikle Quanser firmasına ait ve matematiksel modelleri elimizde olan bir ters sarkaç düzeneği üzerinde karşılaştırmalı deneyler yapılarak yapılmıştır. Bu çalışmada güven verici sonuçlar alınmıştır.

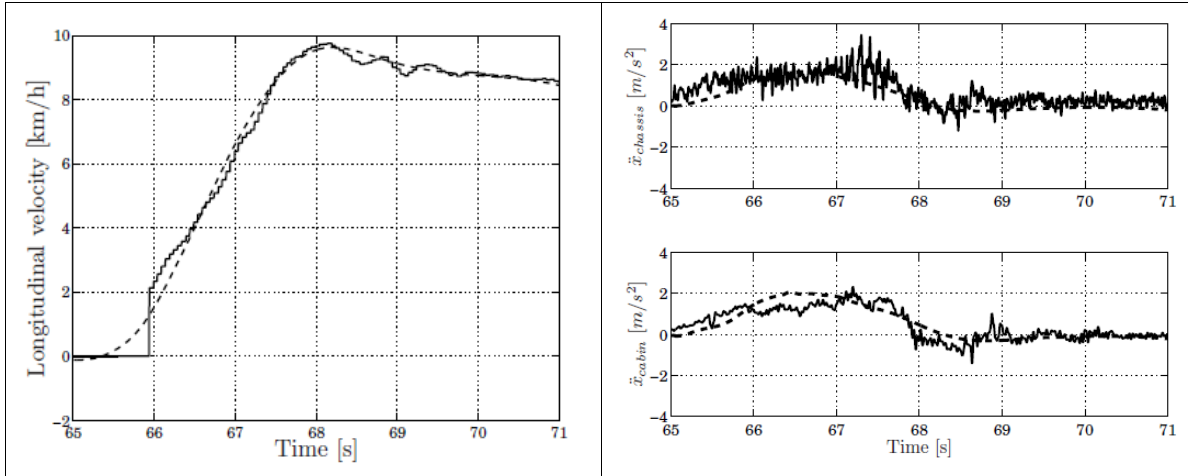


Şekil 147: Quanser doğrusal olmayan ters sarkaç modeli ile Simulink ve SimMechanics ile aynı kontrolcü altında elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmaktadır.

Ayrıca yapılan literatür taramasında özellikle tekerlekli araç dinamiği konusunda geçerleme çalışmalarına rastlanmıştır. (Evers'08) çalışmasına ait bazı sonuçlar aşağıda gözükmemektedir. Bu çalışmada, çok tekerlekli bir araç üzerinden alınan ölçümler ile bu aracın SimMechanics modeli sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 148: (Evers'08) Çalışmasında ele alınan çok tekerlekli araç modeli.



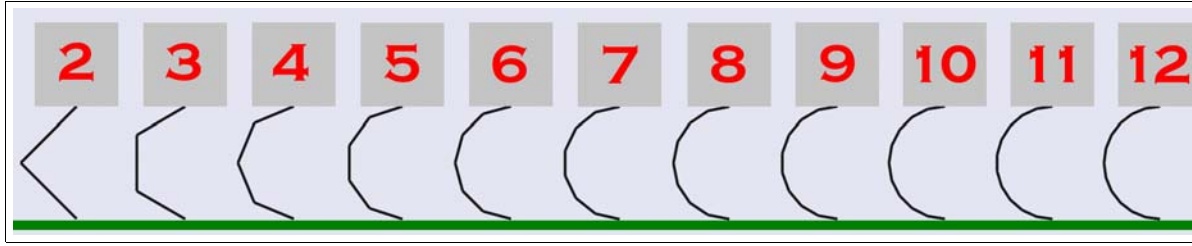
Şekil 149: (Evers'08) Çalışmasında ele alınan çok tekerlekli araç için SimMechanics ile benzetim ve araçtan ölçüm sonuçları karşılaştırması

SimMechanics aracının dinamik sistemlerin modellenmesinde güvenilir sonuçlar verdiği sonucuna vardıldıktan sonra, amaçlarımız doğrultusunda, davranış biçimi bakımından RHex robot platformuna benzer bir yapı gösteren ve daha basit olan *tek bacaklı zıplayan robot*, *çift bacaklı robot* ve son olarak *altı bacaklı robot* model versiyonlarının SimMechanics modelleri oluşturulmuştur.

(c) Bacağın ve Gövdenin Modellenmesi

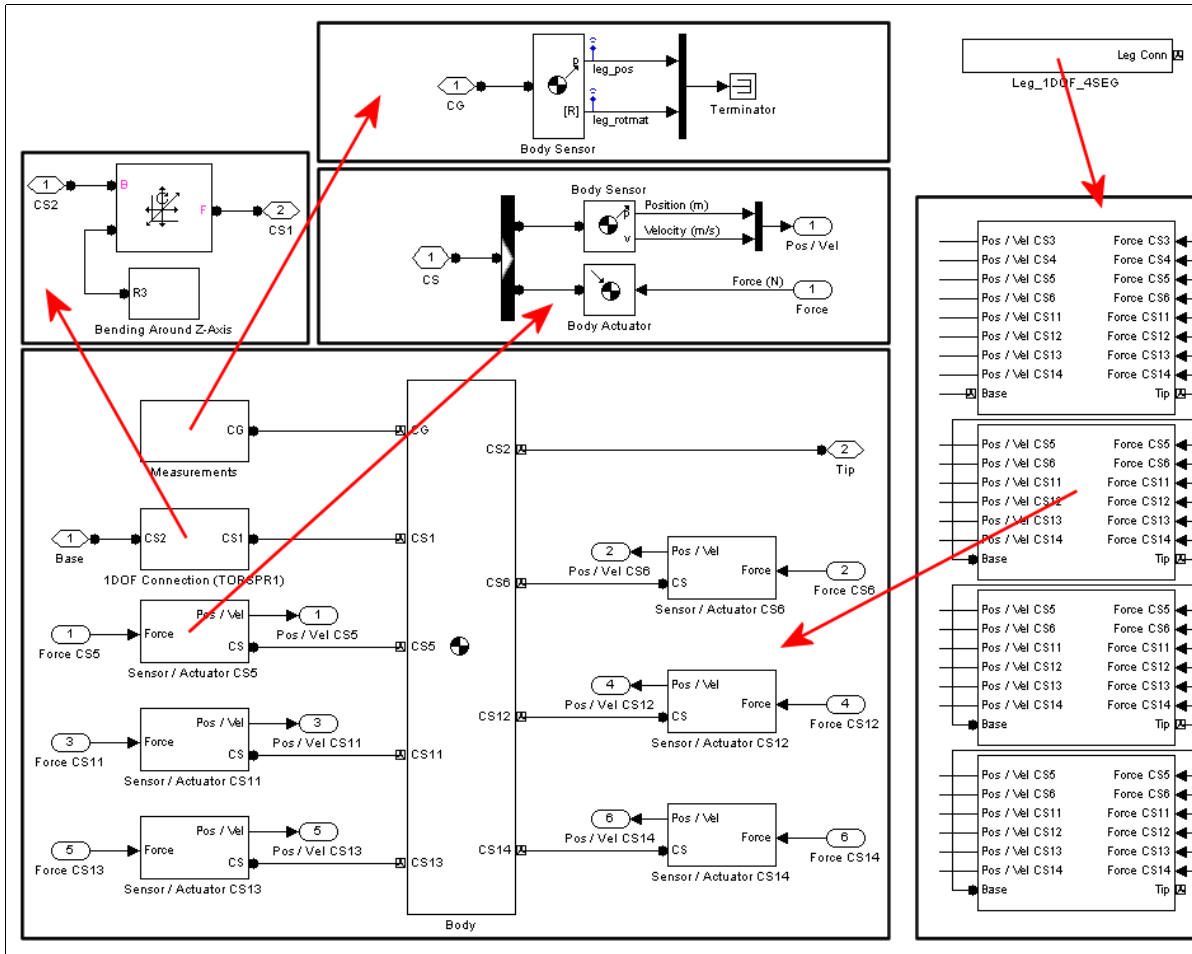
SimMechanics aracının esnek yapıları modellemek için sunduğu bir çözüm olmamasına rağmen, sonlu elemanlar yaklaşımına benzer bir yaklaşım ile bu problemin üstesinden gelinmiştir. C-şekilli esnek bacaklar farklı sayıdaki katı cisim modellerinin uygun eksenlerde serbestlik derecesine sahip mafsallar ile birleştirilmesi ile modellenmiştir. Bu tür bir yaklaşım ile, robot platformu üzerinde kullanılan gerçek bacağın sahip olduğu bükülme,

eğilme ve sıkışma özelliklerinin tümü, benzetim modelinde temsil edilebilmektedir. Bu yaklaşım aşağıda Şekil 150'da gösterilmiştir.

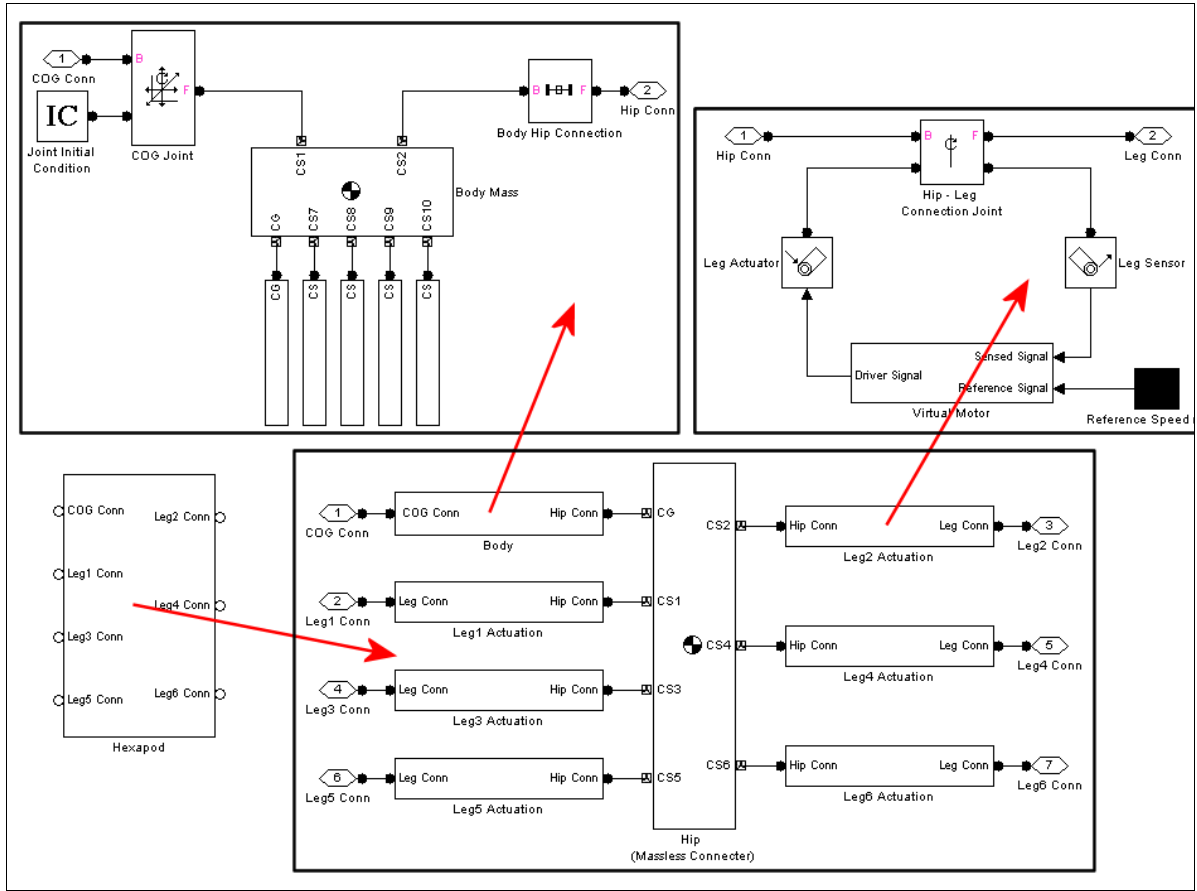


Şekil 150: SensoRHex esnek bacak modellemesinde değişik sayıda eklem içeren yaklaşık sonlu elemanlar yaklaşımı

Bu çalışmada, öncelik, oluşturulan bacak modelinin, gerçek bacağa olan yakınlığını en iyileştirmek olmuştur. Gerçek bacak üretilirken, imalat sonrası çekme ve germe deneyleri ile ortaya çıkan parametreler doğrultusunda, benzetim modelinin sahip olduğu parametreler optimizasyon yaklaşımları kullanılarak örtüştürülmeye çalışılmıştır. Bacakların 0-SD (serbestlik derecesi) (Esnek olmayan), 1-SD ve 2-SD versyonları oluşturulmuştur. Bu modellerden 4 parçalı ve 1-SD'li olan model Şekil 151'da sunulmuştur. Bu model, gövdenin bacak adedine göre gövde modeli ile tork sürümlü bir döner eklem ile birleştirilmektedir. Şekil 152 ise bu bacaklardan 6 adedinin hexapod gövde modeli ile birleşimini göstermektedir.



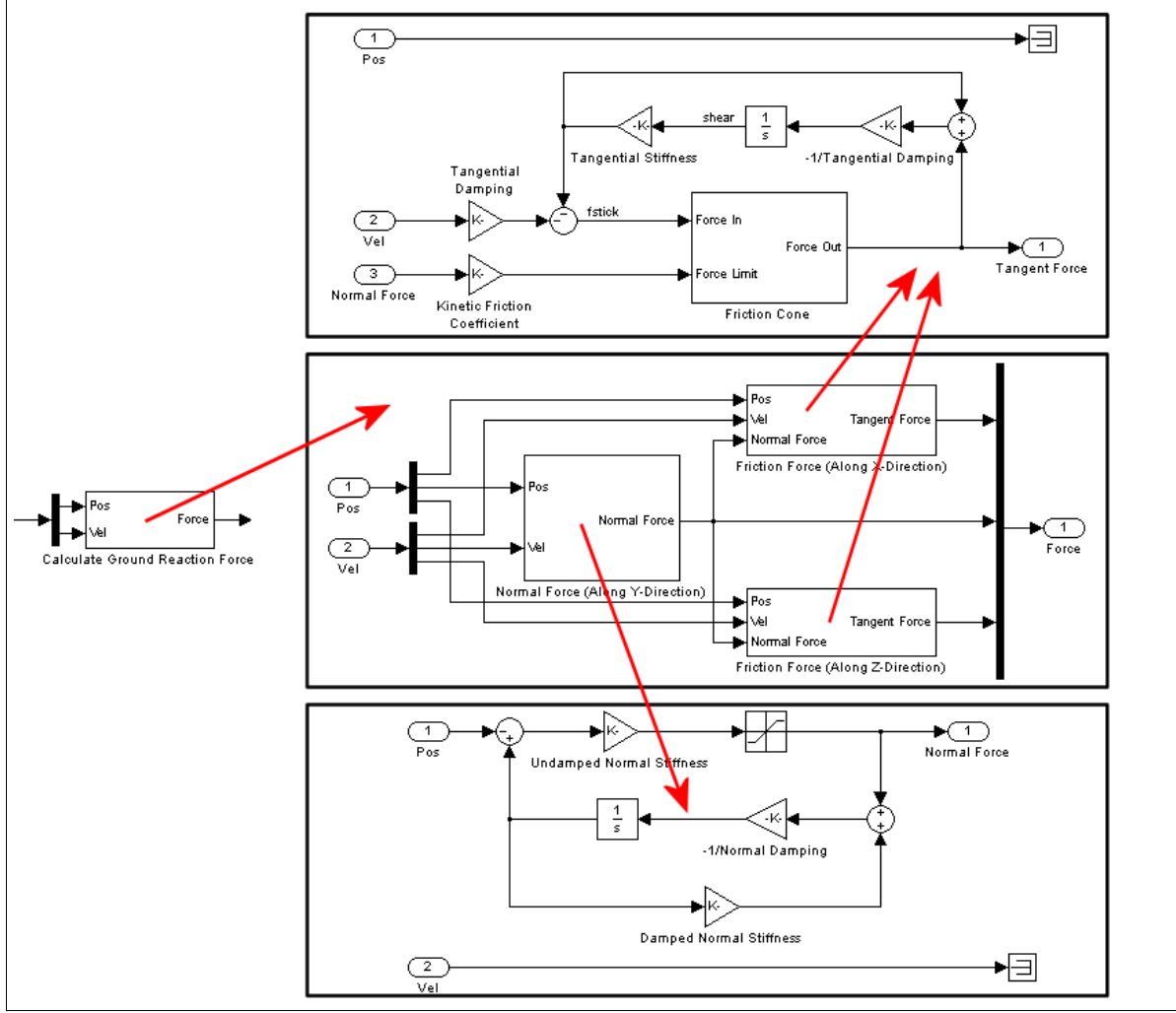
Şekil 151: 4 parçalı, 2-SD'li bacak modeli örneği



Şekil 152: 6 Bacaklı Hexapod modeli'nin iç yapısı

(d) Zemin Modeli

Bacaklı bir robotun izole bir şekilde modellenmesi anlamlı değildir. Bacaklı hareket, belli kinematik ve dinamik özelliklere sahip bacakların, belli bir kontrol algoritması altında zemin ile etkileşiminden ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile planar ve 3B robot modellerinin dinamik davranışını anlama çabası, belli bir zemin modelinin de kullanımını gerektirir. Çalışmamızda bu sebeple bir zemin modeli de oluşturulmuştur. Ancak bu model için gerekli elemanlar SimMechanics'in parçası olmadığından model Simulink ile geliştirilmiştir. Geliştirilen model için (Bibalan'09) çalışmada tanımlanan çift yaylı yay-soğrucu sistem modeli ile aynı çalışmada yer alan bir sürtünme modeli kullanılmış, bu yapı Simulink ile modellenmiştir. Çalışmanın detayları ekli Teknik Raporda bulunabilir. Ortaya çıkan Simulink modeli



Şekil 153: Çalışmamızda kullandığımız zemin Simulink modeli

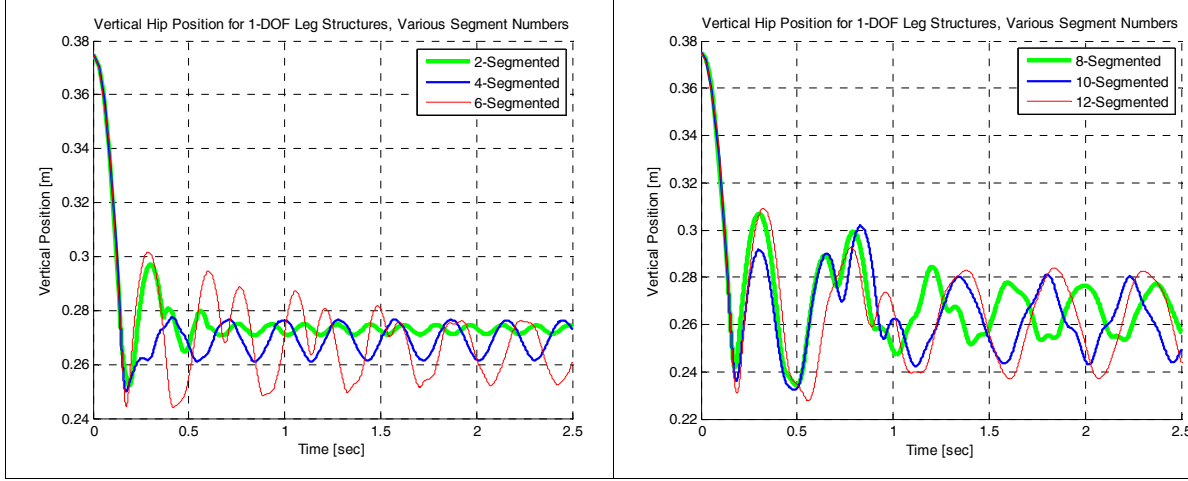
Genel itibariyle, bu problemin çözümünde kullanılan yaklaşım ve elde edilen benzetim modelleri, literatürde eksik olduğu düşünülen bu alana yüksek katkı sağlayacak potansiyele sahiptir. Çalışmamızın bir kısmından hazırlanan bir bildiri, tırmanan ve yürüyen bacaklı robotlar alanına ayrılmış uluslararası saygın CLAWAR 2012 – *Climbing and Walking Robots* kongresine yollanmış ve yayınlanmıştır.

(e) Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada ilk aşama olarak bazı kritik parametrelerin esnek bacağa sahip dinamik sistemin davranışına etkileri incelenmiştir. Bunlar arasında bacak modelinin eklem sayısı (bu sayı arttıkça bacak sahip olduğumuz yarım daire şekilli esnek kompozit bacaklara yaklaşmaktadır), ve bacak segmentleri arasındaki dönüsel esneme katsayısı gibi parametreler sayılabilir. Bu ilk sonuçlarımızdaki deney senaryosu oldukça basittir: Esnek, parçalı bacak modeli, belli bir yükseklikten yere bırakılmakta, yaklaşık iki kere sıçradıktan sonra yerde kendi esnekliği ile salınmaktadır.

Bu davranışa ait bir örnek benzetim sonucu, aşağıda verilmiştir. Burada deneyler, diğer parametreler sabit olmak üzere bacak modelindeki “sonlu eleman”, yani bacak segment sayısının bacak üzerindeki kütlelerin ağırlık merkezinin y-ekseninde hareketine etkisini göstermektedir. Verilen esneklik parametre değeri ile sistem iki kere yerden sıçramakta,

daha sonra ise yere temas halinde salınmaktadır. Salınımın, sıçrama bittikten sonra zaman içinde çok azalmıyor gözükmesi, bacak modelindeki sönümlayıcı parametresinin oldukça küçük alındığını göstermektedir. Bunun yanında sıçrama sırasındaki enerji kaybı ise zemin modeli'nin yer ile temas halinde enerjinin önemli bir kısmını soğurduğunu göstermektedir.



Şekil 154: Düşeyde bırakılan tek bacaklı kütle'nin ağırlık merkezinin düşeyde gösterdiği hareket. Verilen esneklik parametre değeri ile sistem iki kere yerden sıçramakta, daha sonra ise yere temas halinde salınmaktadır.

Yukarıdaki deney verilerinde dikkat çeken bir diğer davranış ise bacağın segment sayısının artışı ve dolayısı ile yarım-daire yapısına yaklaşması sırasında baktaki salınımların frekansının giderek azalmasıdır.

Modelleme aşamasında oldukça ilerlemiş durumda olmamıza rağmen deneysel açıdan oldukça ham durumdayız. Elde ettiğimiz modeller yardımı ile bazı bilimsel sorular sorabilecek durumdayız. Bunlar arasında örneğin, sistem tanıma, yani deneysel model parametrelerimizin gerçek fiziksel sistemimiz ile örtüştürülmesi için model parametrelerinin eniyilenmesi söylenebilir. Bir diğer ilginç soru, bacağın yarım-daire şeklinin, yürüme ve koşma davranışları sırasında robot platformunun gövdesine yansıyan sarsıcı sinyalleri nasıl etkilediği sorusudur. Acaba yarım-daire şekilli bacak, sopa bacağına göre bu sinyallerin bant genişliğini azaltmakta mıdır? Böyle bir durum, mevcut bacak morfolojisinin kafa kontrol problemimize katkısı olduğu sonucunu doğurabilir. Yuvarlanma hareketinin bacaklı robotların ve bacaklı diğer canlıların kararlı hareketine katkısı olduğu iddaa edilmesine rağmen bu konuda somut sonuçlar literatürde yer almamıştır. Dolayısı ile bu katkının değişik motivasyonlar ile ölçülmesi literatüre önemli bir katkı olabilir.

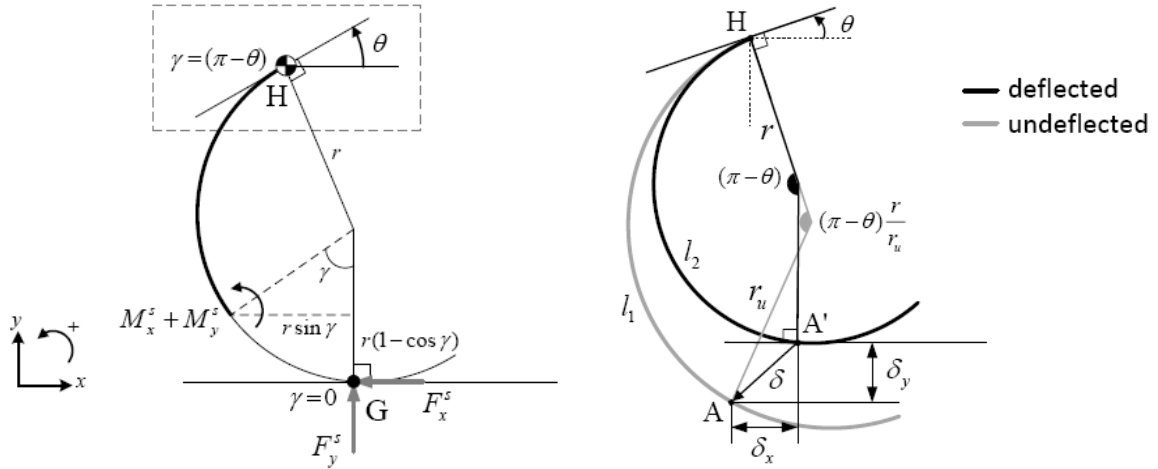
Yine de projemizin öncelikli hedefi, modelin ve modelleme sırasında kazandığımız bilgi birikiminin kafa yapısının modellenmesi ve bu mekanizma için kontrolcü geliştirilmesinde kullanılması olduğundan bacak modellemesi alanında yaptığımız çalışmalara ara verilmiş ve kafa modeli ve kontrolüne öncelik verilmiştir.

8.3 *SensoRHex Yarım Daire Bacaklarının Dinamik Modellemesi ve Tek-Bacak Zıplayan Robot üzerinde Optimal Kontrolü*

Daha önce tamamlamış olduğumuz 106E089 no'lu Tübitak projesi kapsamında başlamış olduğumuz ve Doktora öğrencimizin çalışmaları kapsamında bu proje bünyesinde de devam ettirilen çalışmalardan bir tanesi, deneysel platformumuz SensoRHex üzerinde kullanılan ve

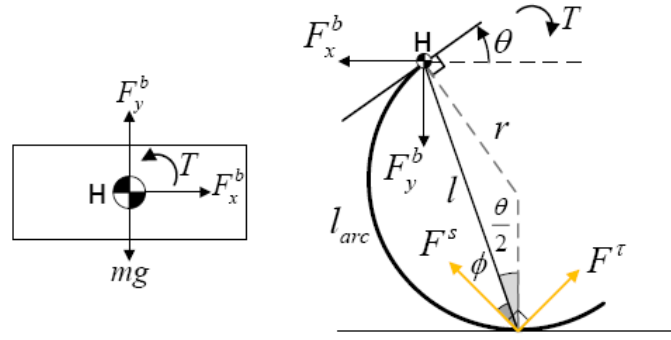
hareket başarımı oldukça yüksek olarak gözlenen yarım dairesel bacakların dinamik modellenmesi ve bu modellerin robot üzerinde dinamik hareket altında geçerliliklerinin analizi olmuştur. Bu çalışmanın bir yönü, bir önceki bölümde anlatıldığı üzere Matlab-SimMechanics ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarıdır. Çalışmanın bir diğer yönü ise bacak yapısının, belli varsayımlar altında kuramsal bir modelinin geliştirilmesi ve kontrol amaçlı kullanılmasıdır.

Çalışmamız kapsamında, kavisli elemanların modellenmesinde kullanılan Castigliano Teoremi kullanılmış ve bacak için belli varsayımlar altında geçerli bir esneme modeli geliştirilmiştir. Bu model için kullanılan değişkenler ve uzaysal ilişkiler, bacak şeması üzerinde verilmiştir.



$$\begin{aligned}\delta_x &= \frac{\partial U}{\partial F_x^s} = \frac{r^3}{4EI} (6\zeta - 8 \sin \zeta + \sin(2\zeta)) F_x^s \\ &+ \frac{r^3}{4EI} (-3 + 4 \cos \zeta - \cos(2\zeta)) F_y^s \\ \delta_y &= \frac{\partial U}{\partial F_y^s} = + \frac{r^3}{4EI} (-3 + 4 \cos \zeta - \cos(2\zeta)) F_x^s \\ &+ \frac{r^3}{4EI} (2\zeta - \sin(2\zeta)) F_y^s.\end{aligned}$$

denklemleri ile ifade edilebilmektedir. Bu esneme denklemlerine sahip bacağı, robot gövdesi ile birlikte ele aldığımızda, tek bacaklı, esnek yarım-dairesel bacağa sahip robotun zıplayarak hareketine ait dinamik denklemler çıkarılabilmektedir. Newton-Euler formulasyonu için serbest gövde modeli Şekil 156'de gösterilmiştir.



Şekil 156: Dinamik sistem modeli için serbest gövde (Free-Body) şeması

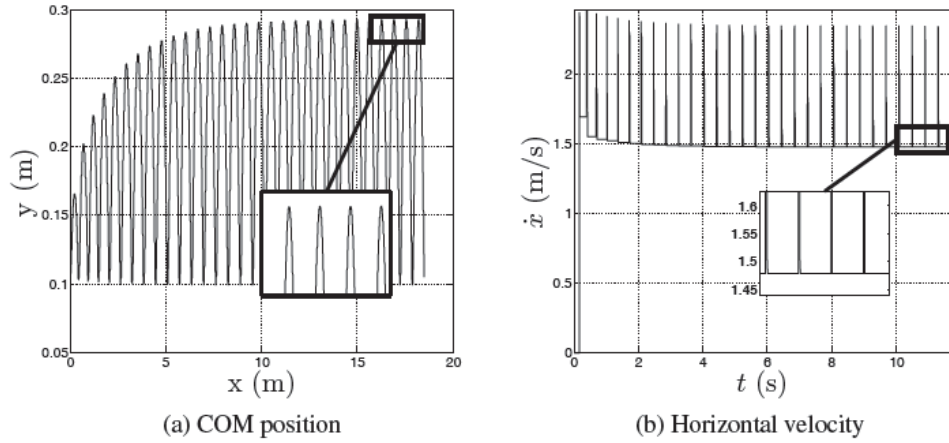
Sistemin yere değdiği durumda yapacağı harekete ait dinamik denklemler

$$\begin{aligned}
 m_b \ddot{x} - F_x^b &= 0 \\
 m_b \ddot{y} - F_y^b + m_b g &= 0 \\
 I_{leg} \ddot{\theta} + T + |\vec{F}^s| l \sin\phi - |\vec{F}^t| l \cos\phi &= 0 \\
 F_x^s + F_x^b - F_x^t &= 0 \\
 -F_y^s + F_y^b - F_y^t &= 0 \\
 \ddot{x}_c &= 0
 \end{aligned}$$

Olarak elde edilmektedir. Bu dinamik denklemler ve sistemin havada serbest atış hareketi yapmasına ait daha basit model, birlikte, sistemin yerde-havada hibrid bir benzetimine izin vermektedir. Bu hibrid sistem benzetimi sayesinde, tek bacaklı zıplayan robot modeli üzerinde kontrolcü deneyleri yapma imkanı vermiştir. Çalışmamız kapsamında platformun koşma hareketinin kontrolü için bir optimal kontrolcü tasarımı ele alınmıştır. Detayları ekli makale'de verilen çalışmaya ait, burada sadece yatay hız kontrolü ile ilgili sonuçlara örnek verilecektir. Yatay hız kontrolü için, önceki yıllarda Raibert tarafından yapılan çalışmalar temel alınmıştır. Ancak çalışmamızda hem bacağın yarı-daire ve esnek yapısı, hem de sisteme enerjinin bacağa uygulanan tork yardımı ile verilmesi anlamında farklı bir yapı vardır. Burada kontrol, üst seviye ve alt seviye olarak iki kademede ele alınmaktadır. İstenen yatay hıza ulaşmak için üst seviyede, bacağın yere değme ilk açısı ve yere temas sürecinde ulaşmaya çalıştığı ikinci açı bir optimal kontrolcü tarafından belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu değerleri referans olarak kabul eden alt-seviye bir PD kontrolcü ise havada bacağı yere değme açısına, yerde ise optimal kontrolcü tarafından seçilen ikinci referans açısına getirmeye çalışılmaktadır. Yere temas halinde iken etkin olan kontrolcunun PD geri besleme kuralı

$$T = -K_p (\theta - \theta_{des}) - K_d \dot{\theta},$$

denklemleri ile verilebilir. Burada T bacağa uygulanan torku vermektedir. Ulaşılmaya çalışacak referans değer θ_{des} 'i belirleyen ise üst seviye optimal kontrolcüdür. Bu kontrol rejimi altında elde edilen sonuçlara bir örnek,



Şekil 157: Dinamik Yatay hız kontrol sonuçlarına bir örnek. 1.5m/sn hızla koşma hareketi sırasında kontrolcü yatay hızı istenen değere getirebilmektedir. Bu sırada sistemin doğal dinamiğinin sonucu olarak zıplama yüksekliğinin de bir limit değere yakınsadığı görülmektedir.

Bu alandaki çalışmalarımız ve bu sonuçların çok bacaklı robotumuz SensoRHex üzerinde uygulanabilmesi için çabalarımız devam etmektedir.

9 Projemiz Hedefleri ve Hedeflere Göre Değerlendirme

Projemizde planlanan iş paketleri ve bu iş paketlerine göre projemizin kendi kendini değerlendirmesi, aşağıdaki tabloda verilmiştir.

İş Paketi	Açıklama	Tamamlanan %
I	Hareket bulanıklığı (HB) analizi	100
<p>Bu iş paketinde öngördüğümüz çalışmalar, hareket bulanıklığının ve görsel öznelilikler üzerindeki etkisinin analizi ve bu bozucu etkinin algoritmik yöntemler ile giderilmesi için yaklaşımlar geliştirilmesi konusunu kapsamaktadır. Bu kapsamda çalışmalarını tamamlayan Y.Lisans öğrencimiz Ferit Üzer'in çalışmaları kapsamında bozucu etkinin karakterizasyonu tamamlanmıştır. Bu çalışmayı takiben önce Doktora öğrencimiz Gökhan Koray Gültekin'in katkıları ile ters filtreleme yaklaşımlarının bir değerlendirmesi yapılmış, görüntü karesi interpolasyon yöntemi geliştirilerek karşılaştırmalı olarak incelemesi yapılmıştır. Bu alandaki çalışmalarımız, önemli katkı vermeye başlayan Y.Lisans öğrencimiz Mehmet Mutlu'nun çalışmaları ile devam ederek tamamlanmıştır. Bu kapsamda kamera hareketinin ataletsel güdüm algılayıcıları ile ölçülüp takip edilmesi ve kamera görüntü alım sürecinin uygun anlarda tetiklenmesi yoluyla görüntü bulanıklığının azaltılması başarılmıştır. Bu iş paketindeki çıktılarımız henüz yayınlanmamıştır. Ancak bir uluslararası kongre makalesi değerlendirme aşamasındadır.</p>		

II	SensoRHex kafa tasarımı ve kontrolü	95
<p>Bu iş paketindeki hedeflerimiz, deneysel robot platformumuz SensoRHex için kamera ve ataletsel algılayıcıları taşıyabilecek bir kafa tasarımı yapılması ve bu kafa düzeneğinin kontrolüne yönelik çalışmaların yapılmasını kapsamaktadır. Bu alanda bilimsel katkıları hızlandırmak ve bir ara aşama oluşturmak amacıyla kafa platformunun düzlemsel bir sürümünün de geliştirilmesi planlanmıştır.</p> <p>Bu iş paketindeki çalışmalar, iki Doktora öğrencimiz, Babak Rohani ve Orkun Öğücü desteğinde devam ederek tamamlanmıştır. Bu kapsamda hem düzlemsel hem de 3-DOF montaja uygun, doğrusal fırçasız eyleyiciler kullanan bir kafa tasarımı ortaya çıkarılmış ve üretilmiştir. Tasarımda farklı seçenekler değerlendirilmiştir. Düzlemsel düzeneğin tüm analizleri, 3-DOF düzeneğin ise pozisyon ve hız kontrolü için gerekli olan analizleri tamamlanmıştır. Bilimsel çalışmalar, Babak Rohani'nin Doktora tez çalışmaları kapsamında devam etmektedir. Tasarlanan platformun kontrolü ile ilgili çalışmaları ise öğrencimiz Orkun Öğücü ile birlikte yürütülmüştür. Bu kısımda ise gömülü bir sayısal kontrol sisteminin geliştirilmesi ve platform ile entegre edilmesi, fırçasız doğrusal eyleyicilerin matematiksel modellenmesi ve geri besleme için ölçüm sınırlamalarının aşılması için yaklaşımlar geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar öncelikle düzlemsel düzenekte gerçekleştirilmiş, daha sonra kazanılan tecrübe 3-DOF düzenek üzerine uygulanmıştır. Proje kapsamında PID ve LQR kontrolcülerinin testleri tamamlanmıştır. İlave kontrolcülerin değerlendirilmesi çalışmaları, Orkun Öğücü'nün Doktora çalışmaları kapsamında devam etmektedir.</p> <p>İş paketi çalışmaları kapsamında yapılan çalışmalar, uluslararası kongre ve dergi makaleleri olarak çıktı vermiştir. Hazırlık aşamasında olan yayınlar da bulunmaktadır.</p>		
III	İstatistiksel hareket modelleri	90
<p>Bu iş paketi kapsamında, Bayes Filtre kuramı içerisinde gerekli olan ve tekerlekli robotlar için standart olmakla birlikte bacaklı robotlar için literatürde açık bir nokta olan hareket modeli geliştirme çalışmaları hedeflenmiştir. Çalışma, öğrencimiz Emre Ege'nin Doktora çalışmaları kapsamında ele alınmıştır. Robot platformunun tam dinamik modelinin yokluğunda, Parçacık Filtresi ile kullanılmak üzere tahminleme temelli istatistiksel bir hareket modeli geliştirilmiştir. Model, platforma verilen hareket emri ve bacak kodlayıcılarından gelen zamana bağlı dönüş bilgilerini, sonuçta gerçekleşecek artımsal (incremental) harekete bağlamaktadır. Bu hareket modeli, bu aşamada tek eksenli bir hareket için geliştirilmiş ve konumlandırma ve eş zamanlı konumlandırma ve haritalama uygulamasında kazandırdığı performans avantajı incelenmiştir. Modelin düzlemsel robotlar için konum ve yönelim (3-DOF) için genelleştirilmesi çalışması, Emre Ege'nin Doktora çalışmaları kapsamında devam etmektedir. Emre Ege'nin son dönemde kişisel sebepler ile proje ekibinden ayrılması çalışma temposunu yavaşlatmış ve bu iş kaleminde tüm hedeflerimize ulaşmamızı engellemiştir. Ancak yayınlanabilir bilimsel çıktıların ortaya çıktığını ve yayın aşamasına yaklaştığına inanıyoruz.</p>		
IV	Akustik yüzey analizi ve tanıma	100
<p>İş paketi kapsamında bacaklı robotlarda işitsel algının özel biçimlerde kullanılabilmesi savı ortaya atılmış, özellikle bacaklı hareketin doğasından kaynaklanan ses işaretlerinin verimli biçimde işlenebileceği ve hareket otonomluğunu arttırmak için kararlara dönüştürülebileceği savı üzerinde durulmuştur. Çalışmalar, Y.Lisans öğrencimiz Mine Cüneyitoğlu Özkul ile yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda ortaya, robotun üzerinde yürümekte olduğu yüzeyi, bacakların çıkardığı kontak ve sürtünme seslerinden tanıyabilen yüksek başarılı bir yüzey tanıma sistemi ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda kurulan deneysel düzeneği ile gerçek robot platformu üzerinden elde edilen ses işaretleri, frekans analiz yöntemleri ile işlenmiş ve öznitelik vektörlerine dönüştürülmüştür. Bu vektör bulutu üzerinde değişik örüntü tanıma yöntemlerinin performansları analiz edilmiş ve %90'lara varan tanıma performansı elde edilebilmiştir. Bu çalışmalar, öğrencimiz Mine Cüneyitoğlu Özkul'un Y.Lisans tezi ile sonuçlanmıştır. Ayrıca öğrencimiz ile bir uluslararası konferans makalesi ve bir uluslararası dergi</p>		

makalesi yayınlanmış durumdadır.

V	Bacaklı görsel eş zamanlı konumlandırma ve haritalama	90
<p>Projemiz kapsamında özgün öge olarak değerlendirdiğimiz istatistiksel hareket modeli geliştirilmesi konusunun kazanımlarının bir ispatı olarak görsel veriler ile eş zamanlı konumlandırma ve haritalama problemi ele alınmıştır. Bu kazanımı göstermek üzere tek eksenle hareket ele alınmış ve öncelikle konumlandırma, daha sonra hem konum ve hem de haritaya ait parametreler içeren bir kestirim problemi ile EKH probleminin artan performans ile gerçekleştirilebileceği gösterilebilmiştir. Bu alanda yine de konumlandırma probleminin tüm 3 konum değişkeni için de çözülmesi ve bu yolla EKH probleminin de çözümünün genelleştirilmesi gelecekteki çalışmalarımız için hedef teşkil etmektedir.</p>		
VI	FPGA tabanlı Görsel akış	100
<p>İş paketi kapsamında, sınırlı işlemci kapasitesine sahip mobil robotlar üzerinde görsel algıyı mümkün kılacak donanım destekleri geliştirilmesi yönünde bir hedef belirlenmiştir. Bu kapsamda, robot görme yordamları arasında önemli bir yere sahip Optik Akış yordamı ele alınmış ve bu yordamın bir FPGA donanım tasarımı ile yüksek hızda tüm kare için hesaplanması hedeflenmiştir. Proje kapsamında hedeflenen donanım geliştirilmiş ve video verileri üzerinde testleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda öğrencimiz Gökhan Koray Gültekin ile hazırlanan bir uluslararası bir dergi makalesi kabul edilerek yayınlanmıştır.</p>		
VII	Robot görme yazılım kütüphanesi	100
<p>Tasarımı tamamlanan Görme Yazılım Kütüphanesi'nin kodlama çalışmaları tamamlanmış, kütüphane gurubumuz proje çalışmalarında aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. VisLib adını verdiğimiz kütüphaneye entegre edilen yeni ve varolan açık kaynak (ağırlıklı olarak OpenCV) fonksiyonlar, diğer iş paketlerindeki çalışmalar içerisinde rutin olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında bu kütüphane, süregiden geliştirme çalışmalarımızın kullanılabilir kılındığı bir adres niteliğindedir. Sürekli gelişen bir içerik ve yapıya sahip olacağını umuyoruz.</p>		

Genel olarak değerlendirdiğimizde, proje iş paketlerimizin hepsinden tatmin edici çıktılar alabildiğimizi söyleyebiliriz. Son üç iş paketine %95 gibi bir tamamlanma oranı vermemizin sebebi, bu konularda SensoRHex üzerinde yapılabilecek bilimsel çalışmaların ucunun açık olması, verimli ve özgün pek çok çalışmanın gelecekte yapılabilecek olmasını sağlamaktadır. Proje kapsamında ele aldığımız konular kapsamında yapılabilecekleri bitirdiğimizi iddia etmek dürüst ve gerçekçi olmayacaktır. Böyle bir beklenti de proje çıktısı olarak makul değildir. Ancak projemiz kapsamında hedeflediğimiz konularda önemli adımlar attığımızı ve bunları kayda değer bilimsel çıktılara dönüştürdüğümüze inanıyoruz.

Tüm bu çalışmalarımıza rağmen, içinde bulunduğumuz konunun genişliği, pekçok alanda eksiklerimizi görmemizi de sağlamıştır. Bu eksikleri kapatmak, heyecanla yeni konuları öğrenebilmek araştırma motivasyonumuzu oluşturmaktadır.

10 Sonuç

Mobil robotların karmaşık ve doğal arazi şartlarında kullanımı birçok zor problemi bünyesinde barındırmaktadır. Özellikle platformların kendi kendine yeterlikleri istendiği durumlarda, sürekli çalışmalarımızın bir parçası olan robotun hareketliliği ve kontrolü kadar, robotun kendi durumunu ve çevresini sağlıklı biçimde algılayabilmesi olmaktadır. Robotlarda yaygın olarak kullanılan algılayıcılar kadar (örneğin ataletsel algılayıcılar, mesafe algılayıcıları, kamera) daha yeni ve doğada yaygın olmasına rağmen otonom robot sistemlerinde daha nadir karşımıza çıkan algılayıcılar (örneğin işitsel algı) da özellikle dinamik davranışlar gösterebilen bacaklı robot sistemlerinde kullanıldıklarında önemli zorluklar ile karşılaşabilmektedirler. Bacaklı robotların doğada görülen örneklerine yakın bir performansa ulaşabilmeleri için hala çözülmesi gereken birçok karmaşık ve zor problem bulunmaktadır ve robotik araştırmaları bu alanda hala başlangıç aşamasındadır. Projemiz algılayıcıların bacaklı robotlarda kullanımı, özellikle görsel ve işitsel algılayıcıların kullanımı üzerine önemli bazı problemleri ortaya koymuş ve çözüm yolları aramıştır.

Geçtiğimiz üç sene zarfında, projemiz bünyesinde bu konu ile ilgili olarak geniş kapsamlı bir yelpazede yaptığımız araştırmaları tamamladık. Daha önce bir Tübitak projesi kapsamında tasarım ve üretimini gerçekleştirdiğimiz SensoRHex robotumuz bu çalışmalarımızın vazgeçilmes deneysel bir parçasını oluşturmuştur. Çalışmalarımız kapsamında ortaya çıkan en önemli sonuçlardan ilki, 3 eksenli açısal kontrole sahip minyatür bir “robot kafası” tasarımı, üretimi ve kontrolüdür. Paralel eyleyici kapalı kinematik zincir prensibi ile tasarlanan bu kafa yüksek hızda hareket kabiliyeti özelliği göstermesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu tasarımın, bazı farklara sahip 4 sürümü değerlendirilmiş ve ana çalışma çizgimiz olarak bu tasarımlardan bir tanesi, kardan mafsallı simetrik sürüm, seçilmiştir. Çalışmalarımızın bilimsel ayağını hızlandırmak, kuramsal ön sonuçlar alabilmek ve yayınlatabilmek amacıyla, bu 3 eksenli mekanizmanın düzlemsel ve tek eksenli bir sürümü de üretilmiş ve ilk çalışmalarımız bu mekanizma ile yapılmıştır. Kuramsal ve deneysel çalışmalarımız sırasında pek çok zorlukla karşılaşmış ve bunlar proje sürecinde önemli ölçüde aşılmıştır. Kuramsal alanda, mekanizmaların kinematik ve dinamik modellerinin çıkarılması, bunların benzetim modellerinin geliştirilmesi ve tamamen numerik modellerin de karşılaştırma amaçlı oluşturulması sayılabilir. Deneysel alanda ise XPCTarget işletim sistemine sahip gömülü bir kontrol bilgisayarının ve AD/DA dönüştürücü sisteminin ortaya çıkarılması, motor sürücü kartları ile arabirimlerin oluşturulması, daha yüksek hızlı bir kontrolcü döngüsü için motor Hall etkisi algılayıcılarının okunması, ataletsel algılayıcının kalibrasyonu ve okunması, ilk aşama temel kontrolcü optimizasyonu ve değerlendirilmesi sayılabilir. Tüm bu çalışmalar sonucunda projemiz kapsamında, sağlıklı biçimde kontrol edebildiğimiz bir kafa platformunun ortaya çıkmış olması bizi sevindirmektedir. Bu platform ile ilgili çalışmalarımızın ucu açık durumdadır. Devam etmekte olan iki doktora tezi kapsamında ve daha sonrasında ortaya çıkan bu platform ile yayına yönelik pek çok çalışma yapılabilecektir.

Robot kafa tasarımı ve kontrolü, bacaklı robotlarda görsel algının, hareketten kaynaklı bozulmaların onarılması yoluyla iyileştirilmesi amacıyla elektromekanik ve kontrol üzerine kurulu bir yaklaşımı temsil etmektedir. Projemizde görsel algının iyileştirilmesi amacıyla bağımsız bir başka yaklaşım kümesi daha ele alınmıştır ki bu da işaret işleme kuramına dayanan kuramsal-algoritmik yaklaşımların uygulanmasıdır. Bu alanda ise öncelikle, hareket bulanıklığı adı verilen görsel bozulma ve bunun görsel öznitelik vektörlerine olan bozucu etkileri incelenmiş, daha sonra bu bozucu etkinin giderilmesi için ilk aşamada görüntü karesi interpolasyon yöntemi, kör ve kör olmayan ters süzgeçleme yöntemleri ele alınmış ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Daha sonra, kamera görüntü alım sürecinin dinamik olarak tetiklenmesi yoluyla doğru anlarda (robot platformu hareketinin minimum

olduğu anlarda) görüntü alımı yoluyla hareket bulanıklığının azaltılması yolunda çalışmalar yapılmıştır. Projemiz kapsamında Bayes süzgecinin robot algısında kestirim amacıyla kullanılabilmesi için bacaklı robotlar için hareket modelleri geliştirilmesi ele alınmış ve öncelikle tek eksen hareket üzerinde tahminleme tabanlı bir model önerilmiştir. Bu modelin Parçacık Filtresi ile durum kestiriminde elde edilen sonuçlara olan iyileştirmesi değerlendirilmiştir. Modelin çevresel durum kestirimi (haritalama) amaçlı değerlendirmesi devam etmektedir.

Projemizin oldukça önem verdiğimiz bir yönünü oluşturan bir konu, işitsel algı olgusunun bacaklı robotlarda kullanımı olmuştur. Bu amaçla bacaklı robotumuzun yürüyüşü sırasında doğal olarak ortaya çıkan ses işaretleri üzerinden yürünülen zeminin tanınması konusu ele alınmış ve yüksek başarımlı bir yaklaşım ile çözülmüştür. Bu çalışma bir uluslararası dergi makalesine dönüşmüştür. Görsel algının hareketli robotlarda kullanımının gerektirdiği yüksek hızlı, düşük güç tüketimli görüntü işleme yardımcı bileşenleri konusu projemiz kapsamında ele alınan bir diğer konu olmuştur. Bu amaçla robot görme alanında önemli kabul edilen optik akış algoritmasının bir FPGA donanımında gerçekleştirilmesi konusu ele alınmıştır. Bu alanda açık literatürde hiçbir çalışma bulunmaması sebebiyle geliştirilen tasarım kabul görmüş ve bir uluslararası dergi makalesi olarak yayınlanma şansı bulmuştur.

Çalışmalarımız kapsamında geliştirilen algoritmaların bir deposu olarak planladığımız VisLib robot görme kütüphanesi, projemiz kapsamında tasarlanmış ve OpenCV kütüphanesinin de bünyesinde kullanımı ile belli bir olgunluğa getirilmiştir. Ucu açık bir yapıya sahip olan bu kütüphanenin gelişiminin devam edeceği değerlendirilmektedir. Şu aşamada proje çıktılarımızın çoğunu bünyesinde barındırmakta ve deneylerimize katkı vermektedir.

Sonuç olarak, 110E120 no'lu Tübitak projesi kapsamında gurubumuza verilen destek, araştırma çalışmalarımızı ilerletmemizde büyük katkı yapmış, bu katkı, robotik ve işaret işleme alanında saygın Kongre ve Dergilerde bilimsel yayınlar olarak çıktılara dönüşmüştür. Bunun yanında ümidimiz, öğrencilerimizin bu destek ve içinde yer aldıkları çalışmalar ile Akademi'de ve Endüstri'de çalışacak yetkin mühendisler ve akademisyenler olma yolunda aşama kat ettiklerini umuyoruz. Proje kapsamında yaptığımız çalışmalar ile hem öğrencilerimiz hem de bizler yeni bilgi ve tecrübeler kazandık. Proje çalışmalarımızı beğenceğini umarak bu sürece katkılarında dolayı hakem hocamıza da teşekkür etmek istiyoruz.

11 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar

Şu aşamaya kadar yaptığımız çalışmalar ile proje hedeflerimizi büyük ölçüde gerçekleştirdiğimiz düşüncesindeyiz. Ancak yapılan tüm çalışmalara rağmen dinamik bacaklı robotlar ve bu platformlar üzerinde algılayıcılar, algılayıcı veri işleme, kontrol ve planlama alanında literatürde pek çok açık olduğu anlaşılmaktadır. Algılayıcılar desteğinde otonom davranışlarını sağlamak için gerekli adımların sadece bu proje kapsamında bitirilmiş olmasını beklemek tabiidir ki gerçekçi değildir. Projemiz kapsamında bu yönde önemli adımlar atılmıştır ancak başladığımız bazı konular ileride yapılabilecek katkılara açıktır. İleride yapılmasını planladığımız bilimsel çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Geliştirdiğimiz robot kafası için temel kontrol deneyleri yapılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında özellikle sistemdeki yarı-periyodik bozucu işaretlere uygun tasarlanmış özel kontrolcülerin denenmesi ve değerlendirilmesi planlanmaktadır. Bu amaçla özellikle model tabanlı kestirim kullanan kontrolcüler ile denemelerin yapılması verimli gözükmektedir. Bu alanda bir doktora tezi devam

etmektedir. Bu konuda devam etmekte olan bir başka doktora tezi de platform dinamik modelinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi üzerinedir.

- 3 eksenli kafa sisteminin robot üzerinde montaja daha uygun ve daha hafif bir tasarımının ortaya çıkarılması planlanmaktadır. Mevcut platform kısa dönem deneysel çalışmalar için çok uygun olmasına rağmen robotun integral bir parçası haline gelebilmek ve bir ürün görüntüsü kazanmak için oldukça hantaldır.
- Bacaklı robotlarda işitsel algı ile cesaret verici sonuçlar alınmıştır. İşitsel algının görsel algı ile birleştirilerek robot otonomisinin artırılması için kullanılması, yeni projelere imkan verebilecek önü açık ve verimli bir konudur.
- Bacaklı robotlarda durum kestirimi zor ve akademik çalışmalara açık bir konudur. Projemiz kapsamında ilk adımlarını attığımız hareket modellerinin genel düzelemsel hareket için genellenmesi, halen devam etmekte olan bir doktora tezi kapsamında ele aldığımız ve gelecekte yapacağımız bir çalışmadır.
- Görsel algının, dış mekan hareketli robotlarının maruz kaldığı doğal görüntüler ile (örneğin bitki örtüsü altında) ele alınması, yine oldukça verimli ve büyük açılara sahip bir konudur ve gelecekteki çalışmalarımız kapsamında ele alınması planlanmaktadır.

Yukarıdaki bu konuların yanında, çoklu robotların iş birliğine yönelik bazı araştırma konuları üzerine eğilmeyi planlamaktayız. Bu amaçla sahip olduğumuz iki platformun birbiri ile kenetlenmesi ve ortak görev icra etmesi konusu ilgilenmek istediğimiz bir konudur.

Gelecekte ele alınabilecek bir diğer konu ise robotumuzun hareket başarımındaki temel prensiplerin ölçek olarak küçültülerek çok daha düşük maliyetli ve göreve özel sürümlerinin tasarlanması konusudur. Özellikle deprem ve doğal afet durumlarında enkaz altında canlı arama gibi problemlerde robot ölçeğinin küçülmesi yoluyla çok tırmanma gerektirmeyen “yukarıdan aşağı” bir arama yaklaşımının benimsenmesi verimli bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.

12 Projemiz Çıktısı Tamamlanmış Tez Çalışmaları, Ulusal ve Uluslararası Yayınlar

Projemiz çalışmaları birden fazla tez çalışmasına ve makaleye dönüşmüştür. Raporumuzda bu çalışmaların içeriklerine özet olarak yer vermeye çalıştık. Yine de raporumuzun ekinde bu makalelerin kopyalarını ve tezlerin ise Türkçe özet sayfalarını değerlendirmenize sunuyoruz. Aşağıda çalışmaların başlıkları verilmektedir:

12.1 Tez Çalışmaları

Aşağıda projemiz kapsamında yapılmış ve tamamlanmış tez çalışmaları listelenmiştir.

- Antonio De Stasio, “MEMS-IMU Based Attitude Estimation for Quasi-Cyclic Motions of a Dexterous Hexapedal Robotic Platform”, Y.Lisans Tezi, Roma Üniversitesi, Tor Vargata, Nisan 2013 (Eş Danışmanlar Afşar Saranlı ve Francesco Martinelli)

- Mine Cüneyitoğlu Özkul, “Acoustic Surface Perception Through the Ground Interaction of Compliant Legs of a Hexapod Robot”, Y.Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Eylül 2012.
- Emre Akgül, “PID and LQR Control of a Planar Head Stabilization Platform”, Y.Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eylül 2011.

Bu tez çalışmalarına ilave olarak proje konusu ile ilgili sürmekte olan başka tez çalışmaları da bulunmaktadır.

12.2 Makale Çalışmaları

Bu bölümde proje çalışmaları kapsamında yapılmış çalışmalardan ulusal ve uluslararası olarak yayınlanmış ve yayınlanma aşamasında olan makale çalışmaları listelenmiştir.

Yayınlanmış Dergi Makaleleri:

- Cüneyitoğlu-Özkul, M. Saranlı, A. Yazıcıoğlu, Y., “Acoustic surface perception from naturally occurring step sounds of a dexterous hexapod robot”, *Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing*, 40(1), 2013, pp.178-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.03.002>.
- Gültekin, G.K., Saranlı, A., "An FPGA Based High Performance Optical Flow Hardware Design for Computer Vision Applications", *Microprocessors and Microsystems*, 37, 2013. pp. 270-286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micpro.2013.01.001>.
- Aydemir, G.A., Saranlı, A., “Characterization and calibration of MEMS inertial sensors for state and parameter estimation applications”, *Elsevier Measurement*, 45(5), pp. 1210-1225. Ltd. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.015>.

Yayınlanmış Uluslararası Kongre Makaleleri:

- Özkul, M.C., Saranlı, A., Yazıcıoğlu, Y., “Acoustic Surface Perception for Improved Mobility of Legged Robots”, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, IDETC/CIE 2012; Chicago, USA, pp. 75-83, August 2012.
- Akgül, E., Mutlu, M., Saranlı, A., Yazıcıoğlu, Y., “A comparative evaluation of adaptive and non-adaptive Sliding Mode, LQR & PID control for platform stabilization”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, CCA 2012; Dubrovnik, Croatia; October 2012, pp. 1547-1552.
- Ege, E., Gültekin, G.K., Saranlı, A., “A statistical predictive model for legged robot motion: Application to pose estimation”, *Proceedings of the International Conference on Applied and Computational Mathematics*, October 3-6, 2012, Ankara, Turkey, 6 pages.
- Öğücü, M.O., Saranlı, A., “A comparative study on modeling a nonlinear static system by using identification techniques”, *Proceedings of the International Conference on Applied and Computational Mathematics*, October 3-6, 2012, Ankara, Turkey, 6 pages.

- Rohani, B., Akgül, E., Mutlu, M., Saranlı, A. Yazıcıoğlu, Y., “A nonlinear dynamic strategy for mathematical modeling and simulation of stabilized platform in planar motion in one body and three bodies”, *Proceedings of the International Conference on Applied and Computational Mathematics*, October 3-6, 2012, Ankara, Turkey, 6 pages.
- M. M. Ankarali, E. Sayginer, Y. Yazicioglu, A. Saranli, U. Saranli, A dynamic model of running with a half-circular compliant leg, CLAWAR 2012, Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Baltimore, MD, USA, July 23-26, 2012.
- M. O. Ogucu, A. Saranli, Y. Yazicioglu, Modeling half-circular compliant leg by using simmechanics, CLAWAR 2012, Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Baltimore, MD, USA, July 23-26, 2012.
- [Gültekin, G.K.](#), [Öğücü, M.O.](#), [Sayginer, E.](#), [Saranli, A.](#), “A genetic algorithm based solution to constrained component placement of a mobile robot”, *International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications*, INISTA 2012, Trabzon, Turkey, July 2012.

Yayınlanmış Ulusal Kongre Makaleleri:

- Akgül, E., Mutlu, M., Saranlı, A., Yazıcıoğlu, Y., “Adaptif ve Adaptif Olmayan Kayan Kipli, LQR & PID Kontrolcülerin Stabilizasyon Platformu Üzerinde Karşılaştırmalı İncelemesi”, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK 2012), Niğde, Ekim 2012.

Kabul Edilmiş Dergi ve Konferans Makaleleri:

- [Dergi] Rohani, B., Yazicioglu, Y., Mutlu, M., Ogucu, O., Akgul, E., Saranli, A., “Lagrangian Based Mathematical Modeling and Experimental Validation of a Planar Stabilized Platform for Mobile Systems”, **Yayına Kabul Edildi**, Elsevier Journal of Computational and Applied Mathematics, October 2013.

Değerlendirme Aşamasında Makaleler:

- Aydın, Y.O., Saranlı, A., Yazıcıoğlu, Y., Saranlı, U., Leblebicioğlu, K., “Optimal Control of a Half-Circular Compliant Legged Monopod”, **Değerlendirme Aşamasında**, *Control Engineering Practice*, October 2013.
- Mutlu, M., Saranlı, A., Saranlı, U., A Real-Time Inertial Motion Blur Metric: Application to Frame Triggering Based Motion Blur Minimization*, **Değerlendirme Aşamasında**, International Conference on Robotics and Automation – ICRA 2013,
- [Dergi] Serhat, G., Saranlı, A., "A Regionalized SIFT-Visual Attention based Approach for Robust Automatic Landmark Selection and Tracking", **Yollanmak Üzere**, October 2013.

13 Kaynakça

- Agrawal, A., Raskar, R., 2007. "Resolving Objects at Higher Resolution from a Single Motion-blurred Image", *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - CVPR*.
- Agrawal, A., Xu, Y., Raskar, R., 2009. "Invertible motion blur in video", *ACM Transactions on Graphics*, 28.
- Algrain Mc, 1994. "Gyroless Line-Of-Sight Stabilization For Pointing And Tracking Systems", *Optical Engineering*, 33(4), s. 1255-1260.
- Altendorfer, R., Moore, N., Komsuoglu, H., Buehler, M., Brown Jr, H. B., McMordie, D., Saranli, U., Full, R. J., and Koditschek, D. E., 2001. "RHex: A Biologically Inspired Hexapod Runner", *Autonomous Robots*, 11(3), 207-213.
- Bascle, B., Blake, A., Zisserman, A., 1996. "Motion deblurring and super-resolution from an image sequence", *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, s. 573-582.
- Basu, A., Ravi, K., 1997. "Active camera calibration using pan, tilt and roll," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, (27) 3, s. 559-566.
- Ben-Ezra, M., Nayar, S. 2004. "Motion-based motion deblurring", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26, s. 689-698.
- Ben-Ezra, M. & Nayar, S., 2003. "Motion deblurring using hybrid imaging", *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - CVPR*, 1, s. 657-664.
- Bibalan, P., Featherstone, R., 2009. "A Study of Soft Contact Models in Simulink", *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, December 2009, Sydney, Avusturalya.
- Boston Dynamics Inc. Firma Web Sayfası, <http://www.bostondynamics.com>. Son erişim tarihi: 10 Eylül 2013.
- Civera, J., Davison, A. J., Montiel, J. M. M., 2008. "Inverse depth parametrization for monocular SLAM", *IEEE Transactions on Robotics*, 24, s. 932-945.
- Davison, A. J., 2003. "Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera", *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision - ICCV*, 2, s. 1403-1410.
- Dawkins, R., 1996. "Why don't animals have wheels?", *The Sunday Times*.
- Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, D. G., 2000. *Pattern Classification - 2nd Ed.*, Wiley-Interscience.
- Durst, R., Krotkov, E., 1993. "Object Classification from Acoustic Analysis of Impact", *Technical report*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, ABD.

- Durst, R., Krotkov, E., 1995. "Object classification from analysis of impact acoustics", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, Los Alamitos, CA, ABD, s. 90.
- Ekimov, A., Sabatier, J., 2006. "Vibration and sound signatures of human footsteps in buildings", *Journal of the Acoustical Society of America* 120(2), s. 762-768,
- Evers, W., Besselink, I., Nijmeijer, H., Knaap, A., 2008. "Development and Validation of a Modular Simulation Model for Commercial Vehicles", *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 16(1), s. 132-153.
- Fergus, R., Singh, B., Hertzmann, A., Roweis, S., Freeman, W., 2006. "Removing camera shake from a single photograph", *ACM Transactions on Graphics*, 25, s. 787-794.
- Ferzli, R., Karam, L., 2009. "A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of just noticeable blur (jnb)," *IEEE Transactions on Image Processing*, (18) 4, s. 717–728.
- Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R., 1998. "Additive logistic regression: A statistical view of boosting", *Ann. Stat.* 28, s. 2000.
- Gabmann, B., vd., 2005. "Localization of walking robots", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, s. 1471-1476.
- Gaver, W. W., 1988. *Everyday listening and auditory icons*, (Doktora Tezi), Univeristy of California in San Diego, ABD.
- Giordano, B., McAdams, S., 2006. "Material identification of real impact sounds: Effects of size variation in steel, glass, wood, and plexiglass plates", *Journal of the Acoustical Society of America* 119(2), s. 1171-1181.
- Gama, J., 2004. "Functional trees", *Machine Learning*, 55 (2004) s. 219–250.
- Giordano, B. L., McAdams, S., 2008. "Non-visual identification of walking grounds", *Journal of the Acoustic Society of America - Abstracts of ACOUSTICS'08*, s. 3412-3412
- Go, Y., Yin, X., Bowling, A. 2006. "Navigability of multi-legged robots", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11, s. 1-8.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., 2001. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, Boston, MA, ABD.
- Guitton, D., vd., 1986. "Visual, Vestibular And Voluntary Contributions To Human Head Stabilization", *Experimental Brain Research*, 64(1), s. 59-69.
- Hansen, P. C. vd., 2006. "Deblurring Images: Matrices, Spectra and Filtering", *Fundamentals of Algorithms 3*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, ABD.
- Hirasaki, E., Kumakura, H., 2004. "Head movements during locomotion in a gibbon and Japanese macaques", *Neuroreport*, 15(4), s. 643-647.

- Jia, J., 2007. "Single image motion deblurring using transparency", *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – CVPR*.
- Joshi, N., Kang, S. B., Zitnick, C. L., ve Szeliski, R., 2010. "Image deblurring using inertial measurement sensors," *ACM Transactions on Graphics*, (29) 4, s. 301–309.
- Kennedy P.J., Kennedy R.L., 2003. "Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization", *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, 11(1), s. 3-15.
- Klatzky, R. L., Pai, D. K., Krotkov, 2000. E. P., "Perception of Material from Contact Sounds", *Presence: Teleoperation and Virtual Environments* 9(4), s. 399-410.
- Krotkov, E., 1995. "Robotic perception of material", *Proceedings of the international joint conference on Artificial intelligence - IJCAI*, San Francisco, CA, ABD, s. 88-94.
- Krotkov, E., Klatzky, R., Zumel, N., 1996. "Robotic Perception of Material: Experiments with Shape-Invariant Acoustic Measures of Material Type", *Experimental Robotics IV*, Springer-Verlag.
- Kumar G, Tiwari P.Y, Marcopoli V, vd., 2009. "A Study of a Gun-Turret Assembly in an Armored Tank using Model Predictive Control", *Proceedings Of The American Control Conference*, s. 4848-4853.
- Kundur, D. & Hatzinakos, D., 1996. "Blind image deconvolution" *IEEE Signal Processing Magazine*, 13, s. 43-64.
- Labarbera, M., 1983. "Why The Wheels Won't Go", *The American Naturalist*, 121(3), s. 395-408.
- Lee T.H., Koh E.K., Loh M.K., 1996. "Stable adaptive control of multivariable servomechanisms, with application to a passive line-of-sight stabilization system", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 43(1), s. 98-105.
- Lee T.H., Tan K.K., Lee M.W., 1998. "A variable structure-augmented adaptive controller for a gyro-mirror line-of-sight stabilization platform", *Mechatronics*, 8(1), s. 47-64.
- Lemaire, T., vd., 2007. "Vision-based SLAM: Stereo and monocular approaches", *International Journal of Computer Vision*, 74, 343-364.
- Levin, A., Sand, P., Cho, T., Durand, F., Freeman, W., 2008. "Motion-invariant photography", *ACM Transactions on Graphics*, 27.
- Li, X., Logan, R., Pastore, R., 1991. "Perception of acoustic source characteristics: Walking sounds", *Journal of the Acoustical Society of America* 90(6), s. 3036-3049.
- Lin, P., Komsuoglu, H., Koditschek, D. E. 2006. "Sensor data fusion for body state estimation in a hexapod robot with dynamical gaits", *IEEE Transactions on Robotics*, 22, s. 932-943.
- Lin, P., Komsuoglu, H., Koditschek, D. E., 2006. "Legged odometry from body pose in a hexapod robot", *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 21, s. 439-448.

- Lucas, B., Kanade, T., 1981. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision", *Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop*, s.121-130.
- Lucy, L., 1974. "An iterative technique for the rectification of observed distributions". *Journal of Astronomy*, 79, s. 745–754.
- Lutfi, R., Stoelinga, C. (2010), "Sensory constraints on auditory identification of the material and geometric properties of struck bars", *Journal of the Acoustical Society of America* 127(1), s. 350-360.
- Matsushita, Y. vd., 2005. "Full-frame video stabilization" *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-CVPR*, 1, s. 50-57.
- Morimoto C, Chellappa R, 1996. "Fast electronic digital image stabilization for off-road navigation", *Real-Time Imaging*, 2(5), s. 285-296.
- McCall P.L., 2001. "Measurements of gun tube motion and muzzle pointing error of main battle tanks", *Shock And Vibration*, 8(3-4), s. 157-166.
- McLoughlin, I., 2009. "*Applied Speech and Audio Processing: With Matlab Examples*", Cambridge University Press.
- McMordie, D., 2002. *Towards Pronking with a Hexapod Robot*, McGill University, Montreal, Canada.
- Montemerlo, M., vd., 2008. "Junior: The Stanford entry in the urban challenge", *Journal of Field Robotics*, 25, s. 569-597.
- Moore, E. Z., Campbell, D., Grimminger, F., and Buehler, M., 2002. "Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod RHex", *Proceedings of the IEEE International Conference On Robotics and Automation*, s. 2222-2227.
- Murphy, R. R., 2004. "Human-robot interaction in rescue robotics", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 34(2), s. 138-153.
- Neville, N., 2005. *Bipedal Running with One Actuator per Leg*, McGill University, Montreal, Canada.
- Newland, D. E., 1996. *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis - 3rd Ed.*, Prentice Hall, London.
- Ogata, K., 1997. *Modern Control Engineering*, Third Ed., Prentice Hall, ABD.
- Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., 2009. *Discrete-Time Signal Processing - 3rd Ed.*, Prentice Hall.
- Ozgelen, A. T., Sklar, E., Parsons, S. 2007. "Automatic acquisition of robot motion and sensor models", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4434 LNAI, s. 548-555.
- Pozzo T, Berthoz A, Lefort L, 1990. "Head Stabilization During Various Locomotor Tasks In Humans .1. Normal Subjects", *Experimental Brain Research*,82(1), s. 97-106.

- Rabiner, L. L., Schafer, R. W., 1978. *Digital Processing of Speech Signals*, Prentice Hall.
- Richardson, W., 1972. "Bayesian-based iterative method of image restoration.", *Journal of the Optical Society of America*, 62(1), s. 55–59.
- Richmond, J. L., 2000. *Automatic Measurement and Modelling of Contact Sounds*, (Master's thesis), The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Richmond, J. L., Pai, D. K., 2000. "Active measurement of contact sounds", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, s. 2146-2152.
- Saranli, U., Buehler, M., and Koditschek, D. E., 2001. "RHex: A Simple and Highly Mobile Robot", *International Journal of Robotics Research*, 20(7), s. 616-631.
- Schultz, R., Stevenson, R., 1996. "Extraction of high-resolution frames from video sequences", *IEEE Transactions on Image Processing*, 5, s. 996-1011.
- Se, S., Lowe, D., Little, J. 2002. "Mobile robot localization and mapping with uncertainty using scale-invariant visual landmarks", *International Journal of Robotics Research*, 21, s. 735-758.
- Shan, Q., Jia, J., Agarwala, A, 2008. "High-quality motion deblurring from a single image", *ACM Transactions on Graphics*, 27.
- Shesternov, O., 2004. "Motion Deblurring", University of Muenster.
- Shtessel Y, 1995. "Decentralized Sliding Mode Control In 3-Axis Inertial Platforms", *Journal Of Guidance Control And Dynamics*, 18(4), s. 773-781.
- Sinapov, J., Wiemer, M., Stoytchev, A., 2008. "Interactive Learning of the Acoustic Properties of Objects by a Robot", *Proceedings of the RSS Workshop on Robot Manipulation: Intelligence in Human Environments*.
- Sinapov, J., Wiemer, M., Stoytchev, A., 2009. "Interactive Learning of the Acoustic Properties of Household Objects", *Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Robotics and Automation - ICRA*, s. 3937-3943.
- Skaff, S., Kantor, G. A., Maiwand, D., and Rizzi, A. A., 2003. "Inertial navigation and visual line following for a dynamical hexapod robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 1808-1813.
- Solomon, D., Cohen, B., 1992. "Stabilization Of Gaze During Circular Locomotion In Light .1. Compensatory Head And Eye Nystagmus In The Running Monkey", *Journal Of Neurophysiology*, 67(5), s. 1146-1157.
- Sridharan, M., Kuhlmann, G., Stone, P., 2005. "Practical vision-based Monte Carlo localization on a legged robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, s. 3366-3371.
- Sturm, J., Visser, A., 2009. "An appearance-based visual compass for mobile robots", *Robotics and Autonomous Systems*, 57, s. 536-545.

Sun, D., Roth, S., Black, M., 2010. "Secrets of optical flow estimation and their principles," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, s. 2432–2439.

Thrun, S., Burgard, W., Fox, D., 2005. *Probabilistic Robotics*, MIT Press, Boston, ABD

Thrun, S. vd., 2006. "Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge", *Journal of Field Robotics*, 23, s. 661-692

Thrun, S. 2007. "Why we compete in DARPA's Urban Challenge autonomous robot race?", *Communications of the ACM*, 50, s. 29-31.

Torres-Jara, E., Natale, L., Fitzpatrick, P., 2005. "Tapping into Touch", *Proceedings of Fifth International Workshop on Epigenetic Robotics*, Lund University Cognitive Studies, s. 79-86.

Vasquez, D., Fraichard, T., Laugier, C., 2009. "Growing hidden markov models: An incremental tool for learning and predicting human and vehicle motion", *International Journal of Robotics Research*, 28, s. 1486-1506.




















Whitcome, KK., vd., 2008. "Head roll stabilization and muscle mitigation mechanism in human distance running", *American Journal Of Physical Anthropology*, Suppl. 46, s. 222-242.

Wiener, N., 1964. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. The MIT Press., Boston, ABD.

Witten, I.H., Frank, E., 2005. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*, 2nd ed. Morgan Kaufmann, San Francisco, ABD.

Yamuchi, B. M., 2004. "PackBot: a versatile platform for military robotics", *Proceedings of SPIE: Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, s. 228-237.

EKLER:

 ConfPaper_2012_07_CLAWAR_AnkaraliEtAl_RunningCleg.pdf	227 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_07_CLAWAR_OgucuEtAl_ClegSimmechanics.pdf	550 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_07_INISTA_GultekinEtAl_GeneticCompPlacement.pdf	4,018 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_08_ASME_OzkulEtAl_AcousticPerception.pdf	1,293 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_09_ICACM_EgeEtAl_MotionModel.pdf	1,273 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_09_ICACM_Ogucu_CameraModel.pdf	900 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_09_ICACM_RohaniEtAl_PlanarHeadAnalysis.pdf	753 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2012_10_CCA_AkgulMutlu_EtAl_ControllerEval.pdf	473 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_2013_10_MutluEtAl_ICRA14_INREVIEW_MotionBlurOptimizati...	1,588 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 ConfPaper_Ulusal_2012_10_AkgulMutlu_TOK2012_ControllerComparison...	784 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 JPaper_2012_02_AydemirSaranli_MEASUREMENT_IMUCalibration.pdf	1,225 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 JPaper_2013_01_GultekinSaranli_MPMS_FPGAOpticFlow_Published.pdf	3,006 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 JPaper_2013_05_OzkulSaranliYazicioglu_MSSP_AcousticPerception.pdf	3,879 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 JPaper_2013_10_RohaniEtAl_JCAM_ACCEPTED_PlanarDynamics_Accept...	609 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 JPaper_2013_XX_AydinEtAl_CEP_INREVIEW_OptimalCLegRunning.pdf	1,537 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 MStHesis_2011_09_EmreAkgul_PID_LQR_PlanarControlSim.pdf	9,453 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 MStHesis_2012_09_MineCuneyitogluOzkul_AcousticPerception.pdf	3,340 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 MStHesis_2013_04_AntonioDiStasio_CyclicStateEstimation.pdf	18,079 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document
 TechReport_2013_06_EgeSaranli_VisLib_v1.0.pdf	451 KB	Adobe Acrobat 7.0 Document

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. AFŞAR SARANLI
Proje No:	110E120
Proje Başlığı:	Kıvrak Bacaklı Robotlarda Gürbüz Görsel Algının İşitsel Algı Desteğinde Geliştirilmesi Ve Otonom Navigasyon Amaçlı Uygulanması
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	YİĞİT YAZICIOĞLU
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2010 - 01/10/2013
Onaylanan Bütçe:	343214.0
Harcanan Bütçe:	257029.55
Öz:	<p>Proje, yüksek hareket kabiliyetine sahip bacaklı robotlarda görsel algı amaçlı kamera verilerinde hareketten kaynaklı bozulmaların incelenmesi ve farklı yöntemler ile giderilebilmesini, bunun yanında görsel algıya işitsel algı ile yardımda bulunulabilmesini hedeflemektedir. Bu amaçla proje kapsamında görsel verilerdeki hareket sebepli bozulmalar incelenmiş ve modellenmiştir. Bir "robot kafası" geliştirilmesi, özgün kontrol yöntemleri ile kontrol edilmesi ve bu yolla görsel veri alım sürecinin iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında kamera'dan alınan verilerin algoritmik yöntemler ile iyileştirilmesi için donanım destekli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bilimsel yönü ağırlıklı proje kapsamında uluslararası kongre ve dergi makaleleri ortaya çıkmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	robotik görsel algı, hareket bulanıklığı, optik akış, kontrol, işitsel algı, yüzey tanıma
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Proje Yapılan Yayınlar:	<ol style="list-style-type: none">1- An FPGA based high performance optical flow hardware design for computer vision applications (Makale - Diğer Hakemli Makale),2- PID and LQR Control of a Planar Head Stabilization Platform (Tez - Yüksek Lisans Tezi),3- Acoustic Surface Perception Through the Ground Interaction of Compliant Legs of a Hexapod Robot (Tez - Yüksek Lisans Tezi),4- Modeling half-circular compliant leg by using simmechanics (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),5- A nonlinear dynamic strategy for mathematical modeling and simulation of stabilized platform in planar motion in one body and three bodies (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),6- A dynamic model of running with a half-circular compliant leg (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),7- Adaptif ve Adaptif Olmayan Kayan Kipli, LQR & PID Kontrolcülerin Stabilizasyon Platformu Üzerinde Karşılaştırmalı İncelemesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),8- Acoustic Surface Perception for Improved Mobility of Legged Robots (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),9- A comparative study on modeling a nonlinear static system by using identification techniques (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),10- Characterization and calibration of MEMS inertial sensors for state and parameter estimation applications (Makale - İndeksli Makale (B)),11- A statistical predictive model for legged robot motion: Application to pose estimation (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),12- A genetic algorithm based solution to constrained component placement of a mobile robot (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),13- Acoustic surface perception from naturally occurring step sounds of a dexterous hexapod robot (Makale - Diğer Hakemli Makale),14- A comparative evaluation of adaptive and non-adaptive Sliding Mode, LQR & PID control for platform stabilization (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),15- MEMS-IMU Based Attitude Estimation for Quasi-Cyclic Motions of a Dexterous Hexapedal Robotic Platform (Tez - Yüksek Lisans Tezi),
-------------------------	--