

“Haptic” Dokunma Hisli ve Kuvvet Geri Beslemeli Arayüz Sistem Tasarımı

Proje No: 104M425

Prof. Dr. Tuna BALKAN
Y. Doç. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN
Y. Doç. Dr. A. Buğra KOKU
Ar. Gör. Özgür BAŞER
Y. Müh. Süleyman BİDECİ

Ağustos 2008
ANKARA

ÖNSÖZ

Bu çalışmada sanal gerçeklik uygulamalarında kullanılmak üzere 7 serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz üretimi ve örnek bir arayüz geliştirilmesi amaçlanmıştır. Cihazın tasarımı, “haptic” cihazlar için gerekli olan maksimum çalışma hacmi, maksimum kuvvet ve tork, maksimum rijitlik, minimum boşluk, minimum istenmeyen ağırlık gibi tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu 7 serbestlik dereceli cihaz için örnek bir arayüz tasarlanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak uygulama sırasında harcanan gücü minimize etmek için cihazın kontrolü ile ilgili bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Verilen ek süreler ile birlikte 1-07-2005 ve 01-07-2008 tarihleri arasında yürütülen bu çalışma TÜBİTAK-MAG Mühendislik Araştırma Grubu tarafından 104M425 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Projede Prof. Dr. Tuna BALKAN yürütücü, Y. Doç. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN, Y. Doç. Dr. A. Buğra KOKU araştırmacı, Ar. Gör. Özgür BAŞER (doktora öğrencisi) ve Y. Müh. Süleyman BİDECİ yardımcı personel olarak yer almıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	8
ABSTRACT	9
1. “Haptic” Cihazların Kullanım Alanları ve Literatürdeki “Haptic” Cihazlar	10
1.1. “Haptic” Cihazların Kullanım Alanları	10
1.1.1. Bilgisayar Destekli Endüstriyel Tasarım	10
1.1.2. Robotların Uzaktan Kontrolü	11
1.1.3. El İşçiliği Gerektiren Profesyonel Eğitim	11
1.1.4. Cerrahi Ameliyat Uygulamaları	12
1.1.5. Ortopedik Operasyonlar için İmplant ve Doku Tasarımı	12
1.2. Literatürde Varolan “Haptic” Cihazlar	13
1.2.1. Mekanik Kol “Haptic” Cihazlar	13
1.2.2. Tel Tahrikli “Haptic” Cihazlar	14
1.2.3. Manyetik “Haptic” Cihazlar	15
1.3. “Haptic” Cihazların Tasarım Kriterleri Açısından Karşılaştırılması	15
2. “Haptic” cihaz tasarım hususları, gerekçeleri ve konfigürasyon seçimi	17
2.1. Çalışma Hacmi	17
2.2. Uç Noktadaki Kuvvet ve Moment	17
2.3. Dinamik Performans	18
3. Kinematik Analizler ve Çalışma Hacmi	21
3.1. Düz Kinematik Analizi	22
3.2. Geri Kinematik Analizi	23
3.3. Tasarlanan Cihazın Çalışma Hacmi	28
4. Motor Seçimleri ve Analizler	30
5. Tasarlanan 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın Farkları ve Üstünlükleri	34
6. Tasarlanan 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın CAD Modeli ve Analizleri	36
7. Cihazın Kontrolü için Geliştirilen “Haptic” Kutu ile Kontrol ve Arayüz Çalışmaları	47
8. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın İmalatı, Montajı ve Cihazın Son Hali	58
9. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın Kontrol Çalışmaları ve Arayüz Tasarımı	64
10. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazda Harcanan Gücü Minimize Etmek için Örnek bir Optimizasyon Çalışması	69
11. Sonuç	76
Referanslar	77

ŞEKİLLER

Şekil 1. Bilgisayar destekli bir tasarım uygulaması	11
Şekil 2. Uzaktan robot kontrolü (Master-Slave application)	11
Şekil 3. “Haptic” cihaz ile tıbbi öğrenim	12
Şekil 4. “Haptic” cihaz ile cerrahi ameliyat uygulamaları	12
Şekil 5. “Haptic” cihaz ile sanal ortamda bir protez tasarımı	13
Şekil 6. Phantom 1.5/6DOF “Haptic” cihaz	13
Şekil 7. Freedom 6S “Haptic” cihaz	14
Şekil 8. Delta “Haptic” cihaz	14
Şekil 9. Tel tahrikli “Haptic” cihaz	14
Şekil 10. Manyetik “Haptic” cihaz	15
Şekil 11. Tasarlanması 7 serbestlik dereceli “Haptic” cihazın kinematik modeli	21
Şekil 12. İlk tekil konum gösterimi	27
Şekil 13. İkinci tekil konum gösterimi	27
Şekil 14. Üçüncü tekil konum gösterimi	27
Şekil 15. Dördüncü tekil konum gösterimi	28
Şekil 16. Tasarlanan 7 serbestlik dereceli “Haptic” cihazın kinematik konfigürasyonu ve çalışma hacmi	28
Şekil 17. 6 Serbestlik dereceli “Haptic” cihazın kinematik konfigürasyonu ve çalışma hacmi	29
Şekil 18. 7 Serbestlik dereceli manipülatörün uç nokta pozisyonu değişmeden serbest hareketi	34
Şekil 19. 7 serbestlik dereceli manipülatörün aynı uç noktada farklı bir konfigürasyon ile yüksek kuvvet kabiliyeti	35
Şekil 20. “Haptic” cihaz toplu CAD modeli	37
Şekil 21. “Haptic” cihaz dağılık CAD modeli	37
Şekil 22. Telli kuvvet iletim sistemi	38
Şekil 23. Paralelogram üst çubuk	39
Şekil 24. Paralelogram üst çubuk analiz sonucu	41
Şekil 25. Paralelogram üst çubuk yan yükleme analizi (CATIA sonucu)	42
Şekil 26. Paralelogram üst çubuk yan yükleme analizi (COSMOS sonucu)	43
Şekil 27. Paralelogramın yük altında yer değiştirme analizi	44

Şekil 28. Ağırlık dengesine etki eden parçalar	45
Şekil 29. “Haptic” cihaz başlangıç konumu denge analizi	45
Şekil 30. Ağırlık merkezi dengesi analizi için denenen konumlar	46
Şekil 31. Tipik bir “Haptic” cihazın çalışma prensibi blok diyagramı	47
Şekil 32. Açık çevrim empedans kontrol	48
Şekil 33. Kapalı çevrim empedans kontrol	48
Şekil 34. Kapalı çevrim admitans kontrol	49
Şekil35. “Haptic” kutu	49
Şekil36. “Haptic” algoritmaları denemek için geliştirilen sistem	50
Şekil 37. “Haptic” kutu sitem şeması	52
Şekil 38. Açık çevrim empedans kontrol diyagramı	54
Şekil 39. Kütle/Yay/Damper mekanik sistem modeli	54
Şekil 40. Benzetlen sanal ortam modeli (kütle/yay/damper/silindirik tutamaç)	55
Şekil 41. Kuvvet geri-beslemeli empedans kontrol modeli	57
Şekil 42. Admitans kontrol modeli	57
Şekil 43. Prototip “Haptic” cihaz	58
Şekil 44. “Haptic” cihaz metal parçalar grup 1	59
Şekil 45. “Haptic” cihaz metal parçalar grup 2	59
Şekil 46. Üretilen 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaz	60
Şekil 47. 7 serbestlik dereceli “Haptic” cihazın tel tahrikli iletim mekanizması	61
Şekil 48. Üretilen “Haptic” cihaz için CMM’de rijitlik ölçümü	63
Şekil 49. Açık çevrim empedans kontrol diyagramı	64
Şekil 50. Kuvvet geri-beslemeli empedans kontrol modeli	65
Şekil 51. Admitans kontrol modeli	65
Şekil 52. 7 Serbestlik dereceli “Haptic” sistem şeması	66
Şekil 53. Kütle/Yay/Damper mekanik sistem modeli	67
Şekil 54. Benzetlen sanal ortam modeli (kütle/yay/damper/”haptic” kalem)	68
Şekil 55. 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın konumlama kısmı (bilek kısmına kadar olan kısım) için optimizasyon tabanlı Simulink modeli	69
Şekil 56. Cihazın konumlama kısmı için Simmechanics modeli ve sisteme verilen rota ($x=0.25$, $y=0.15+0.1\sin(t/2)$, $z=-0.05\sin(t)$ metre olarak)	71
Şekil 57. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1 ve $F_x=F_y=F_z=10N$) cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi (A)	

- ve buna karşılık fazlalık ekle açısının değişimi (B) 72
- Şekil 58. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1 ve $F_x=F_y=F_z=10N$) cihazın konumlama kısmının her bir motor için torklarının zamanla değişimi 72
- Şekil 59. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1 ve $F_x=F_y=F_z=10N$) cihazın konumlama kısmı için gerekli toplam güç 73
- Şekil 60. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada [Durum1-(A) $F_x=-10N$, $F_y=0$, $F_z=0$; (B) $F_x=0$, $F_y=-10N$, $F_z=0$ ve (C) $F_x=0$, $F_x=0$, $F_z=-10N$] cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi 73
- Şekil 61. Değişken kuvvet etkisi altında ve tek bir noktada (Durum2- $x=0.25m$, $y=0.25m$, $z=0.25m$) cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi (A) $F_x=10\sin(0.5t)$ N, $F_y=10\sin(0.5t+ \pi/2)$ N, $F_z=0N$; (B) $F_x=0N$, $F_y=10\sin(0.5t)N$, $F_z =10\sin(0.5t+\pi/2)N$; (C) $F_x=10\sin(0.5t+ \pi/2)N$, $F_y =0N$, $F_z=10\sin(0.5t)N$ 74
- Şekil 62. Sabit düşey kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1- $F_x=0$, $F_x=0$, $F_z=-10N$) cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi (Simülasyon ve deneysel sonuçlar) 75

TABLÖLAR

Tablo 1. “Haptic” Cihazların Tasarım Kriterleri Açısından Karşılaştırılması	17
Tablo 2. “Haptic” Cihaz Tasarım Kriterleri	20
Tablo 3. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın Kinematik Parametreleri	23

ÖZET

“Haptic” cihaz, kullanıcı ile bilgisayar arasında üç boyutlu veri transferi sağlayan bir cihazdır. Bu cihaz kullanıcıya sanal ortamdaki bir nesneyi görmenin yanında, bu sanal nesneye dokunma olanağı da sağlar. Aynı zamanda bu cihaz ile gerçek bir nesneden veriler alınarak bu verilerin sanal ortamda kullanımı da gerçekleştirilebilir.

Günümüzde sanal gerçeklik teknolojisinin gelişimine paralel olarak “haptic” cihazlarının kullanımı, sanayi, eğitim ve tıp alanlarında gittikçe artmaktadır. Bu teknolojinin değişik uygulama alanları, farklı bilim dallarına ait disiplinlerarası çalışmaları gerektirdiğinden, kendi içinde özgün çalışma konularını da yaratmaktadır (“haptic” arayüz tasarımı, serbest modelleme, sanal ortamda ameliyat eğitimi, vb.). Medikal uygulamalarda önemli bir potansiyele sahip bu teknoloji ile daha önceleri el işçiliği ile yapılmak zorunda kalınan karmaşık modifikasyonlar gerçekleştirilebilmektedir (beyin cerrahisinde hata kabul etmeyen, ustalık ve ameliyat öncesi uzun uğraşlar gerektiren operasyonlar). Bu örnek “haptic” cihazlar ile dijital ortamda gerçekleştirilebilecek olan uygulamalardan sadece bir tanesidir.

Bu proje kapsamında, bahsedilen uygulama alanlarına yönelik 7 serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz tasarlanıp üretilmiş ve cihazın kullanılabilirliğini göstermek için bir arayüz tasarlanmıştır. Günümüze kadar tasarlanmış olan bütün “haptic” cihazlar maksimum 6 serbestlik derecesine sahiptirler. Tasarlanan 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaz, bugüne kadar üretilmiş aynı uzuv uzunlukları ve eklem değişkenlerine sahip diğer “haptic” cihazlar ile karşılaştırıldığında yaklaşık %20 daha büyük bir çalışma hacmine ve daha esnek bir çalışma kabiliyetine sahiptir.

Bu çalışma, Dünya’daki “haptic” cihazların geliştirilmesi ve Türkiye’deki “haptic” cihazların ve uygulama alanlarının yaygınlaşması açısından son derece önemlidir.

Anahtar Sözcükler: “Haptic” cihaz, Sanal gerçeklik, Kuvvet geribesleme, “Haptic” modelleme

ABSTRACT

Haptic devices are used to provide multi-modal data transfer between haptic users and computers in virtual reality applications. They enable humans to take force and tactile feedback from any virtual or remote objects. Haptic devices also facilitate the use of data collected from a real object in the virtual environment.

Usage of the haptic devices increase more and more in industrial, educational and medical applications in parallel with development of virtual reality technology. As virtual reality technology requires interdisciplinary study with related to its application areas, it creates a lot of different specific working areas (Haptic interface design, freeform model, surgical operations in virtual environment etc.). Especially, some complex modifications which require hand-working can be performed with the system having great potential in medical applications (Brain surgery without error and operations which require great skill etc.). This is only one of the implementations of haptic devices in digital environment.

Aim of this project is to design and manufacture a novel haptic device which serves the mentioned application areas and to improve an interface to implement the device. Most of the haptic devices in literature have maximum 6 DOF. The 7 DOF haptic device designed has about 20% extra working space and more flexible working capability compared to the other haptic devices with the similar link lengths and joint limitations.

This project is important in terms of the development of haptic devices in the world as well as spreading of haptic devices and its applications in Turkey.

Keywords: Haptic device, Virtual reality, Force feedback, Haptic modeling

1. “Haptic” Cihazların Kullanım Alanları ve Literatürdeki “Haptic” Cihazlar

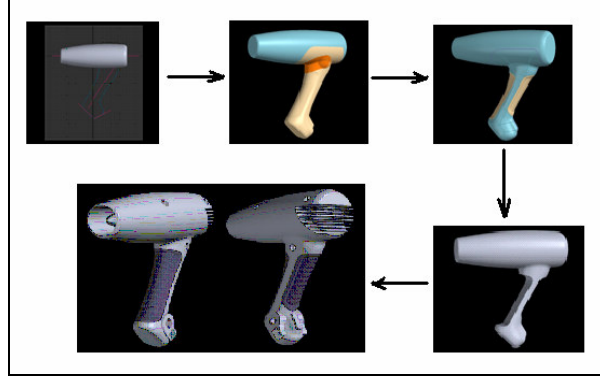
Bu bölümde öncelikli olarak tasarlanan “haptic” cihazın çok farklı uygulamalarda kullanılabilmesi için literatürde bilinen kullanım alanları açıklanmaktadır. Böylece tasarım aşamasında “haptic” cihazın değişik uygulamalara uygun olup olmadığının belirlenmesi hedeflenmiştir. İkinci olarak günümüze kadar üretilen “haptic” cihaz çeşitleri verilmiş ve bunların karşılaştırılması yapılmıştır.

1.1. “Haptic” Cihazların Kullanım Alanları

Kullanıcı ile bilgisayar arayüzleri arasındaki etkileşimi geliştiren “haptic” cihazların kullanım alanları son zamanlarda gittikçe artmaktadır. Sanal ortamdaki nesnelere dokunma hissinin keşfi “haptic” cihazların yeni kullanım alanlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. “haptic” cihazların kullanım alanlarının artması, “haptic” cihazlara olan ihtiyacı arttırmış ve “haptic” cihazların herkes tarafından kullanılabilir hale getirilmesini gereksinim haline getirmiştir. Bu amaçla bütün “haptic” uygulamalara yönelik, sanal gerçeklik modelleme dilleri (FreeForm, Concept, Mimics, vb.) geliştirilmiştir. Son zamanlarda gerçekleştirilmiş bu yenilikler, “haptic” cihazların kullanım alanlarını gittikçe arttırmaktadır.

1.1.1. Bilgisayar Destekli Endüstriyel Tasarım

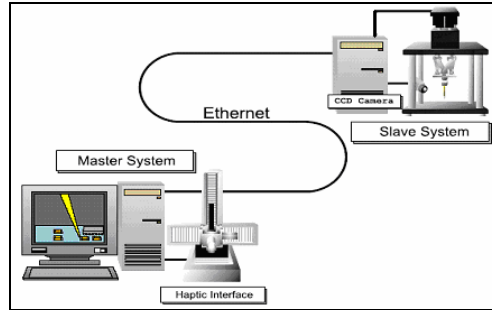
Günümüzde “haptic” cihazları kullanarak bilgisayar destekli üç boyutlu modelleme gibi kompleks uygulamalara yönelik önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bu teknoloji ile herhangi bir CAD programında tasarlanmış bir model üzerinde çok ince ayrıntılı üç boyutlu değişiklikler yapılabilmektedir. Daha sonra geliştirilen model hızlı prototipleme ve CAM sistemine gönderilerek üretimi sağlanabilmektedir. Şekil 1’de “haptic” cihaz kullanılarak geliştirilmiş bir saç kurutma makinasının tasarım aşamaları gösterilmiştir [1].



Şekil 1. Bilgisayar destekli bir tasarım uygulaması

1.1.2. Robotların Uzaktan Kontrolü

Bazı uygulamalarda robotların “haptic” cihazlar kullanarak uzaktan kontrolü yapılmaktadır. Bu tip bir uygulama uzaktan ameliyat uygulamalarında, endüstriyel robotların ve havacılık mühendisliğinde hava araçlarının uzaktan kontrolünde kullanılmaktadır. Uzaktan robot kontrolü literatürde efendi-köle uygulamaları (master-slave applications) olarak isimlendirilmektedir [2].



Şekil 2. Uzaktan robot kontrolü (Master-Slave application)

1.1.3. El İşçiliği Gerektiren Profesyonel Eğitim

“Haptic” cihazlar ressamalara ve heykeltıraşlara 3 boyutlu el yapımı tasarımlarını sanal ortamda gerçekleştirme olanağı sağlar. “haptic” teknolojisi ameliyat prosedürü ile ilgili testlerde (kesme, dikme, vb.) (Şekil 3), uzaysal ve fonksiyonel anatomi gibi konuları içeren

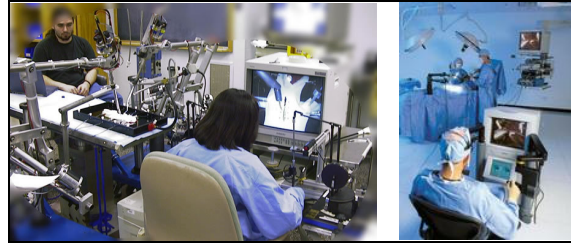
tıbbi öğrenimde de büyük bir potansiyele sahiptir. “haptic” cihazlar ile kadavra gerektiren ve canlılar üzerinde yapılan tıbbi uygulamalar sanal ortamda gerçekleştirilebilmektedir. Bu uygulama, bahsedilen mesleklere zaman kazanma ve daha ekonomik eğitim gibi olanaklar sağlamaktadır [3].



Şekil 3. “Haptic” cihaz ile tıbbi öğrenim

1.1.4. Cerrahi Ameliyat Uygulamaları

Dünya çapında çok sayıda cerrahi operasyon, özel olarak tasarlanmış robotik aparatlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. “Haptic” cihazların da içinde bulunduğu bu özel ameliyat araçları, çalışılan hasta bölgeyi daha kesin saptamak ve bu bölgede daha hassas hareket sağlamak açısından cerrahlara daha iyi bir kontrol olanağı sağlar [3].



Şekil 4. “Haptic” cihaz ile cerrahi ameliyat uygulamaları

1.1.5. Ortopedik Operasyonlar İçin İmplant ve Doku Tasarımı

“Haptic” cihaz teknolojisi sayesinde, herhangi bir hastaya ait CT ve MR verileri kullanılarak kemik yada yumuşak doku protezleri ve implant modeller üretilebilir. Şekil 5’te 3 boyutlu bir

yazıcı kullanarak sayısal modelden fiziksel protezin oluşturması ile ilgili bir örnek verilmiştir [4].



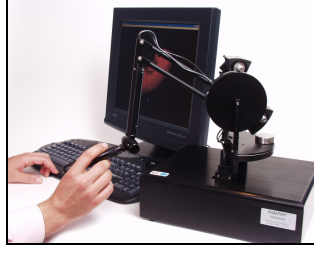
şekil 5. “Haptic” cihaz ile sanal ortamda bir protez tasarımı

1.2. Literatürde Varolan “Haptic” Cihazlar

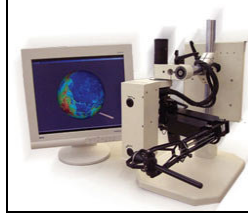
Dünyada günümüze kadar geliştirilmiş çok çeşitli “haptic” cihazlar bulunmaktadır. Bu “haptic” cihazlar, konfigürasyon açısından 3 başlık altında toplanmıştır. Bunlar, mekanik kol “haptic” cihazlar, tel tahrikli “haptic” cihazlar ve manyetik “haptic” cihazlardır.

1.2.1. Mekanik Kol “Haptic” Cihazlar

Mekanik kol “haptic” cihazlar; kullanıcının elinde tuttuğu kaleme 3 boyutlu hareket, kuvvet ve momenti kullanıcıya motorlar tarafından tahrik edilen tellerle ileten cihazlardır. Bu cihazlar yapı itibari ile robot kollara benzemektedir. Dünyada ilk mekanik kol “haptic” cihaz ABD’nde MIT üniversitesinde tasarlanmış ve Sensable Technology Inc. tarafından üretilmiştir. Günümüze kadar tasarlanmış en iyi mekanik kol “haptic” cihaz maksimum 6 serbestlik derecesine sahiptir. Değişik firmalar tarafından geliştirilen “haptic” cihazlar şekil 6, 7 ve 8’de görölmektedir [1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].



Şekil 6. Phantom 1.5/6DOF “haptic” cihaz (Sensable Technology Inc.)



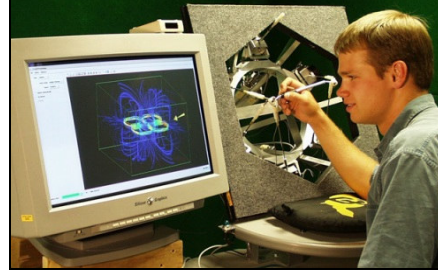
Şekil 7. Freedom 6S “haptic” cihaz (MPB Technology Inc.)



Şekil 8. Delta “haptic” cihaz

1.2.2. Tel Tahrikli “Haptic” Cihazlar

Tel tahrikli “haptic” cihazlar; kullanıcının elinde tuttuğu kaleme 3 boyutlu hareket, kuvvet, momenti motorlar tarafından tahrik edilen tellerle ileten cihazlardır. Bu tip cihazlarda, sayısı en az istenen serbestlik derecesi sayısı kadar farklı motorlarla tahrik edilen teller bulunmaktadır. Diğer tür “haptic” cihazlarda olduğu gibi tel tahrikli “haptic” cihazlar üzerine çalışmalar halen devam etmektedir ve literatürde üretilmiş çeşitli tel tahrikli cihazlar bulunmaktadır. Şekil 9’da ABD Colorado Üniversitesi’nde tasarlanmış bir tel tahrikli “haptic” cihaz gösterilmektedir [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].



Şekil 9. Tel tahrikli “haptic” cihaz

1.2.3. Manyetik “Haptic” Cihazlar

Manyetik “haptic” cihazlar; yapısal bakımdan diğerlerinden farklıdır. Bu tip “haptic” cihazlarda, kaleme verilen hareket ve kuvvet, motorlarla değil kalemin etrafına yerleştirilmiş manyetik bobinlerle sağlanmaktadır. Bu prensip ile çalışan ABD Carnegie Mellon Üniversitesi’nde tasarlanmış olan bir “haptic” cihaz Şekil 10’da gösterilmektedir [26, 27, 28].



Şekil 10. Manyetik “haptic” cihaz

1.3. “Haptic” Cihazların Tasarım Kriterleri Açısından Karşılaştırılması

“haptic” cihaz tasarımında göz önünde bulundurulması gereken yedi temel husus vardır. Bu hususlar; tasarlanan “haptic” cihaza ait çalışma hacmi, uç noktada üretilen kuvvet ve moment, katılık (rijitlik) ve çözünürlük değerleri yüksek olmalı, bununla birlikte sürtünme kuvveti, hissedilir boşluk, uç noktadaki istenmeyen ağırlık değerleri ise düşük olmalıdır. Bahsedilen “haptic” cihaz çeşitleri, tasarımları itibari ile farklı sonuçlar vermektedir. Bu cihazların tasarım hususlarını sağlayıp sağlamadıklarını gözlemek amacıyla Tablo 1. hazırlanmıştır. Bu

tablodan her bir “haptic” cihazın hangi tasarım kriterini sağlayıp sağlamadığı kolaylıkla anlaşılabilir [29, 30].

“Haptic” cihaz çeşitleri karşılaştırıldığında mekanik kol “haptic” cihazlar en çok avantaja sahip olan cihazlardır. Bu yüzden, tasarlanan “haptic” cihazda mekanik kol “haptic” cihazlardan ilham alınmıştır.

Tablo 1. “Haptic” Cihazların Tasarım Kriterleri Açısından Karşılaştırılması

Tasarım Kriterleri	Mekanik Kol “Haptic” Cihazlar	Tel Tahrikli “Haptic” Cihazlar	Manyetik “Haptic” Cihazlar
Çalışma Hacmi	✓	✗	✗
Maksimum Kuvvet	✓	✗	✓
Maksimum Moment	✓	✗	✓
Sürtünme Kuvveti	✓	✓	✓
Katılık	✓	✓	✓
Hissedilir Boşluk	✓	✓	✓
Çözünürlük	✓	✗	✓
İstenmeyen Ağırlık	✓	✓	✓

(✓ : Sağlanan Kriter - ✗ : Sağlanmayan Kriter)

2. “Haptic” cihaz tasarım hususları, gerekçeleri ve konfigürasyon seçimi

“Haptic” cihaz kullanıcıya mekanik sinyaller gönderen ve kullanıcıdan gelen mekanik sinyalleri algılayan elektromekanik kısımlardan oluşur. Bu yüzden, “haptic” cihaz tasarımında mekanik parçaların tasarımı ve uygun konfigürasyonun seçimi çok önemlidir. Bu bölümde, “haptic” cihazlar için tasarım konuları ve kısıtlamaları anlatılmaktadır.

2.1. Çalışma Hacmi

“Haptic” cihazlar kendi çalışma hacmi içindeki sanal ortamı kullanıcıya hissettirmeyi amaçlamaktadır. Bu da uygulamaya göre geniş ve kullanışlı bir çalışma hacmini gerektirebilir. “haptic” cihaz tasarımında cihazın performansını istenen değerlerde tutarak mümkün olan en büyük çalışma hacmini elde etmek önemlidir. Phantom 1.5/6 DOF “haptic” cihaz 260 mm (genişlik) x 460 mm (yükseklik) x 120 mm (derinlik) boyutlarında kullanılabilir çalışma hacmine sahiptir [1]. Bu çalışma hacmi birçok “haptic” uygulama için yeterli görülebilir. Ancak uygulama alanı arttırılmak istendiğinde daha geniş çalışma hacmine ihtiyaç duyulacaktır. Bu yüzden, tasarlanacak olan “haptic” cihaz için 50 cm yarıçaplı yarım küre boyutlarında bir çalışma hacmi hedeflenmektedir. Ayrıca “haptic” uygulamalardaki çalışma alanı içinde, bir noktaya farklı yönlerden yaklaşmak gerekebilir. Bu nedenle de, “haptic” cihazın kalemi, kendi üç dönme eksenini etrafında 360 dereceye yakın olacak şekilde dönebilmelidir.

2.2. Uç Noktadaki Kuvvet ve Moment

“Haptic” cihazlarda uç noktadaki kuvvet ve moment, seçilen motorların gücüne, güç iletim yöntemi ve çevrim oranına, cihazın hareketli kısımlarının atalet momentine ve sürtünmelere bağlıdır. Belirlenen çalışma hacmi içindeki istenilen kuvvet ve moment değerlerine ulaşmak için yukarıda verilen bu tasarım parametrenin seçimi önemlidir. İlk karar verilmesi gereken parametre moment iletim oranı ve iletim yöntemidir. Cihazın, kullanıcı tarafından kolaylıkla hareket ettirilebilmesi için, momentin motorlardan uzuvlara iletim yöntemine de bağlı olarak iletim oranının düşük değerlerde (10’ dan daha düşük) tutulması gerekmektedir. Eğer bu iletim için dişli kutusu tercih edilirse, dişli kutusundaki boşluklar cihazın uç noktasında fazlasıyla hissedilecek ve bu da sanal ortamın benzetilmesinde hatalara neden olacaktır. İkinci

parametre olarak, cihazın atalet momentini minimum değerlerde tutmak için hareketli parçalar oldukça hafif olmalı ve bu parçaların ağırlık merkezi cihazın dönme merkezine yakın tutulmalıdır. Üçüncü parametre olarak, cihazın sürtünmelerini en aza indirmek için, yüksek hassasiyette üretim yapılmalı ve yüksek hassasiyetli yataklar kullanılmalıdır. Son parametre ise motor momenti ve motor büyüklüğüdür. Literatürde, “haptic” uygulamalarda, uç noktadaki gerekli olan kuvvet ve momente karar vermek için, 6 eksenli kuvvet ve moment algılayıcılarını kullanarak bazı deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalara göre, insan kolunun ulaşabildiği en büyük kuvvet 44,5 N ve moment 1,35 N.m'dir [30]. Tasarlanacak olan “haptic” cihazda en büyük anlık kuvvet 10 N olarak ve en büyük anlık moment 500 N.mm olarak hedeflenmiştir.

2.3. Dinamik Performans

Bir “haptic” cihaz kullanıcısı benzetilmeye çalışılan ortamı rahatlıkla ve gerçekçi bir şekilde hissedebilmelidir. Böyle bir “haptic” cihazın tasarımında belirlenmesi gereken iki parametre vardır. Bunlar; cihazın katılığı ve kullanıcı tarafından hareket ettirilmek için uygulanabilecek en küçük kuvvettir. Cihazın katılığı uzuvların geometrisine, malzeme seçimine, yataklardaki ve güç iletim sistemlerindeki boşluklara bağlıdır. Phantom 1.5/6DOF “haptic” cihaz 1 N/mm’lik katılığa sahiptir. Bu bilgiler doğrultusunda tasarlanacak “haptic” cihazda aşağıda verilen yöntemlerin uygulanması gerektiği belirlenmiştir [29, 30].

- Motorlardan uzuvlara hareketin iletilmesi sırasında, uç noktadaki istenmeyen yer değiştirmeye sebep olan boşluklar tel tahrikli iletim sistemleri kullanılarak önlenmelidir.
- Uzuvlardan kaynaklanan yer değiştirmeyi önlemek için, uzuv malzemesi olarak sert fakat hafif malzemeler, yüklerin fazla olduğu yerlerde de kompozit malzemeler kullanılmalıdır.
- Yataklardan kaynaklanan yer değiştirmeleri önlemek için ise yüksek hassasiyetli rulmanlar kullanılmalı ve yataklar hassas işlenmelidir.

Cihazın kullanıcı tarafından sürülebilmesi için gerekli olan en küçük kuvvet, cihazın ivmesine ve cihazın hızına bağlı olarak iki şekilde incelenebilir [32]. İvme kaynaklı en küçük kuvvet, cihazın atalet momentini en aza indirgeyerek ve güç iletim oranını küçük seçerek sağlanabilir.

Hız kaynaklı en küçük kuvvet ise cihazdaki sürtünmeler en aza indirgenerek sağlanabilir. Tasarlanan “haptic” cihazda 1N/mm katılık değeri hedeflenmiştir. Bunun yanında cihazın sanal ortamdaki nesnelere rahatlıkla algılayıp en kısa sürede cevap verebilmesi için cihazın çözünürlüğü yüksek tutulmalıdır. Tablo 2’de tasarlanacak cihaz için gerekli olan tasarım kriterleri değerleri ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2. “Haptic” Cihaz Tasarım Kriterleri

Tasarım Kriterleri	Hedeflenen Değerler
Çalışma hacmi	Yüksek tutulmalı (50 cm yarıçaplı yarım küre)
En büyük anlık kuvvet	Yüksek tutulmalı (10 N)
En büyük anlık moment	Yüksek tutulmalı (yalpalama ve başvurma = 500 N.mm ve dönme =130 N.mm)
En büyük sürekli kuvvet	Yüksek tutulmalı (1,5 N)
En büyük sürekli moment	Yüksek tutulmalı (yalpalama ve başvurma = 180 N.mm, dönme = 50 N.mm)
Katılık	Yüksek tutulmalı (1 N/mm)
Boşluk	Düşük tutulmalı (0 veya çok düşük)
Çözünürlük	Açısal:0,005 derece, Konumsal: 0,1mm
Atalet momenti	Düşük tutulmalı
İstenmeyen hissedilen ağırlık	Düşük tutulmalı (0,15 kg)

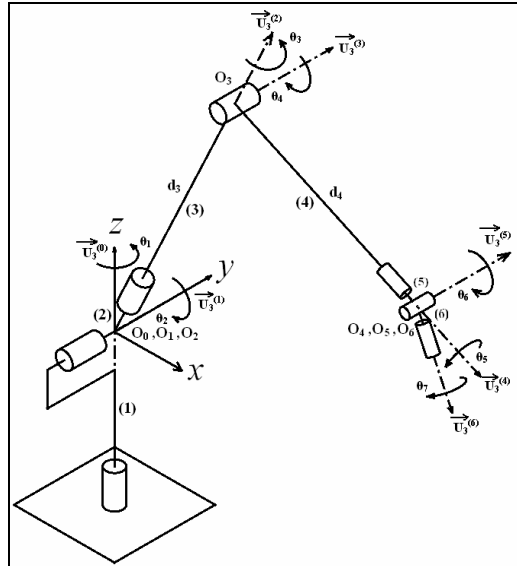
Mekanik kol “haptic” cihaz tasarımında seri ve paralel olmak üzere iki temel konfigürasyon bulunmaktadır. Seri mekanizmalarda uzuvlar, birbirine uç uca yataklarla bağlanmakta ve motorlardan uzuvlara hareket, başka uzuvlara ihtiyaç duyulmadan doğrudan doğruya sağlanmaktadır. Paralel mekanizmalarda ise; uzuvlar birbirine uç uca bağlanmak zorunda değildir ve hareket bağlı diğer uzuvlar tarafından sağlanmaktadır. Genel olarak paralel manipülatörler seri manipülatörlere göre daha katıdırlar. Paralel manipülatörlerin ters kinematik çözümleri, seri manipülatörlere göre daha kolaydır, fakat düz kinematiği daha zordur. Seri manipülatörler, çoğu uygulamalar için daha büyük bir çalışma hacmine sahiptirler. Tasarlanması planlanan “haptic” cihazda bu iki tip mekanizmanın avantajları birleştirilerek karma bir mekanizma kullanılmıştır.

Önceki çalışmalar incelendiğinde, yüksek serbestlik dereceli cihazlar tasarlanarak büyük çalışma hacimlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Bu zamana kadar tasarlanmış olan “haptic” cihazların geneli en fazla 6 serbestlik derecesine sahiptirler ve uzuv uzunlukları artırılarak daha büyük çalışma hacmine ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu yöntemin, cihazın rijitliği ve ataleti gibi diğer tasarım kriterlerini olumsuz yönde etkilediği düşünülerek, uzuv uzunlukları sabit tutulup, 7 serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz tasarlanmıştır. Böylece aynı uzuv uzunlukları ile %20 daha büyük bir çalışma hacmine sahip bir cihaz elde edilmiştir.

3. Kinematik Analizler ve Çalışma Hacmi

İleri kinematik eşitlikler, bir cihazın uç noktasının uzaydaki konumunu eklem değişkenleri cinsinden bir dizi eşitlik halinde tanımlamaya yarar. Geri kinematik eşitlikler ise, cihazın uç noktasının uzaydaki konumu bilindiği takdirde, bu bilgiler kullanılarak eklem değişkenlerinin konumunu elde etmeyi sağlar. Ayrıca, kinematik eşitlikler, uç noktanın konumunu takip etmeyi sağlayıp cihazın çalışma hacminin analiz edilmesine de yardımcı olur. Bu bölümde kinematik modeli oluşturulan 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın düz ve geri kinematik çözümleri elde edilmiş olup cihazın kinematik açıdan çözümsüz olduğu noktaları saptanmıştır.

Tasarlanması planlanan cihazda ilk üç dönme eksenini ile son üç dönme eksenini bir noktada kesişmekte ve kesişim noktası etrafındaki uzuvlar birbirine seri olarak bağlanmaktadır. 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın kinematik çözümlerinin elde edilebilmesi için öncelikle cihazın kinematik modeli oluşturulmuştur. Şekil 11’ de gösterilen kinematik model Denavit-Hartenberg metodu kullanılarak elde edilmiştir. Kinematik eşitliklerin elde edilebilmesi için, eklem değişkenleri, dirsek uzunlukları, etkin uzuv uzunlukları, dönme açıları (θ_i , d_i , a_i , α_i) gibi bütün parametrelerin elde edilmesi gerekir. Tablo 3’te 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın kinematik parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 11. Tasarlanan 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın Kinematik Modeli

Tablo 3. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın Kinematik Parametreleri

k^{th} Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-\pi/2$	0	θ_1
2	0	$+\pi/2$	0	θ_2
3	0	$-\pi/2$	d_3	θ_3
4	0	$+\pi/2$	d_4	θ_4
5	0	$-\pi/2$	0	θ_5
6	0	$+\pi/2$	0	θ_6
7	0	0	0	θ_7

3.1. Düz Kinematik Analizi

Bir manipülâtörün düz kinematik analizinde, cihazın uç noktasının koordinatları ve açısâl pozisyonu kinematik eşitliklerle ifade edilebilir. “haptic” cihazlarda, kullanıcının elinde tuttuğu kalemin uç noktası bilek noktası ile çakıştığı için, cihazın uç noktasının konumu bilek noktasının konumu olarak düşünülebilir. Bu nedenle, tasarlanan 7 serbestlik dereceli cihazın düz kinematik analizi için, cihazın bilek noktasının koordinatları ve kullanıcının elinde tuttuğu kalemin açısâl konumunu ifade eden dönme matrisi, eklem değişkenleri cinsinden ifade edilmelidir. Bu kinematik eşitlikler, çözümler için son derece kolaylık sağlayan, Kartezyen koordinatlar etrafındaki üstel dönme matrisleri ve birim vektörler kullanılarak elde edilmiştir [33, 34, 35, 36]. Kartezyen koordinatlarda, üç eksen etrafında üstel dönme matrisleri ve birim vektör matrisleri sırası ile aşığıdaki gibi yazılabilir;

$$e^{u_1\theta_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_k) & -\sin(\theta_k) \\ 0 & \sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}, \bar{U}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$e^{\bar{u}_2\theta_k} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & 0 & \sin(\theta_k) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_k) & 0 & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}, \bar{U}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$e^{\tilde{u}_3 \theta_k} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & -\sin(\theta_k) & 0 \\ \sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{U}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

7 serbestlik dereceli ‘‘haptic’’ cihazın uç noktasının açısıl pozisyonunu gösteren dönüşüm matrisi ve bilek noktasının konumu üstel dönme matrisleri ve birim vektör matrisleri kullanılarak taban düzlemine göre sırası ile aşağıda verildiği gibi elde edilir;

$$\hat{C}^{(0,7)} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} e^{\tilde{u}_3 \theta_7} \quad (1)$$

$$\bar{r} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} (d_3 \bar{u}_3 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} \bar{u}_3) \quad (2)$$

Bütün üstel dönme matrisleri ve birim vektör matrisleri denklem 2’de yerlerine yazılarak ve gerekli hesaplamalar yapılarak, bilek noktasının, taban düzlemine göre Kartezyen koordinatlardaki konumu, eklem değişkenleri cinsinden aşağıdaki eşitliklerle verilebilir.

$$x = c\theta_1 s\theta_2 d_3 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4) d_4 \quad (3)$$

$$y = s\theta_1 s\theta_2 d_3 + (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 + s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4) d_4 \quad (4)$$

$$z = c\theta_2 d_3 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4) d_4 \quad (5)$$

Elde edilen denklem (1) ve sırası ile denklem (3, 4 ve 5)’te eklem değişkenleri ve uzuv parametreleri kullanılarak 7 serbestlik dereceli ‘‘haptic’’ cihazın uç noktasının açısıl konumu ve bilek noktasının temel düzleme göre koordinatları bulunabilir.

3.2. Geri Kinematik Analizi

Bir manipülâtörün uç noktasının konumunun saptanması robotik uygulamalarını ilgilendiği en önemli konulardan biridir. Normal olarak, çalışma hacmi içerisinde bir konumu belirlemek için, Kartezyen koordinat sisteminde uç noktanın pozisyonu bilinmektedir. Bununla birlikte, hedeflenen konuma ulaşmak için, uç noktanın konumunun eklem değişkenleri cinsinden tanımlanması gerekmektedir. Robotikte, bu analiz geri kinematik analiz olarak isimlendirilir. Eğer uç noktanın yönelme ve dönüşüm matrisleri biliniyorsa, 6 serbestlik dereceli bir manipülâtörün analitik olarak ters kinematik çözümü oldukça kolaydır. Tasarlanması

düşünülen cihaz 7 serbestlik dereceli “redundant” bir manipülatördür. Bir “redundant” manipülatörün geri kinematiğinin sonsuz sayıda çözümü vardır. Genel olarak, “redundant” manipülatörlerin geri kinematiğini çözmek için eklem değişkenlerinin biri biliniyor olarak kabul edilir ve diğer eklem değişkenleri de belirlenen değişken cinsinden hesaplanır. Tekil konum (singularity) olarak isimlendirilen bazı manipülatör konumlarında, uç noktanın konumu analitik olarak çözüm vermeyebilir. Bu yüzden, bütün tekil konumlar tasarıma başlanmadan önce saptanmalı ve tasarım sırasında bu konumlardan mümkün oldukça kaçınılmalıdır.

Kinematik modeli oluşturulan 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın ters kinematik çözümünü elde etmek için, bilek noktasının konumunu veren konum denklemlerinden başlanabilir. Eklem değişkenlerinden biri olan θ_4 diğer eklem değişkenlerine ihtiyaç duyulmadan denklem (3, 4, 5) kullanılarak elde edilebilir ve bu elde edilen çözüm diğer eklem değişkenlerinin çözümünde kullanılabilir.

$$\theta_4 = \sigma \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 - d_3^2 - d_4^2}{2d_3d_4} \right) \quad \sigma = \pm 1 \quad (6)$$

Sistem redundant bir manipülatördür ve bilek noktasına kadar 3 adet konum denkleminin içinde (Denk. 3, 4, 5) 4 bilinmeyen bulunmaktadır. Bu yüzden, eklem değişkenlerinin hesaplanmasında değişkenlerden biri parametre olarak seçilmiş ve bu parametreye göre ayrı ayrı ters kinematik çözümler elde edilmiştir.

θ_1 eklem değişkenine bağlı olarak ters kinematik çözümler:

$$\theta_3 = \sigma \sin^{-1} \left[\frac{-\sin \theta_1 x + \cos \theta_1 y}{\sin \theta_4 d_4} \right] \quad \sigma = \pm 1 \quad (7)$$

$$\theta_2 = a \tan_2 [\eta_2; \xi_2] \quad (8)$$

η_2, ξ_2 yerine;

$$\eta_2 = \frac{-z c \theta_3 s \theta_4 d_4 + (c \theta_1 x + s \theta_1 y)(d_3 + d_4 c \theta_4)}{x^2 c^2 \theta_1 + y^2 s^2 \theta_1 + 2xys \theta_1 c \theta_1 + z^2}$$

$$\xi_2 = \frac{(c \theta_1 x + s \theta_1 y) c \theta_3 s \theta_4 d_4 + z(d_3 + d_4 c \theta_4)}{x^2 c^2 \theta_1 + y^2 s^2 \theta_1 + 2xys \theta_1 c \theta_1 + z^2}$$

θ_2 eklem değişkenine bağlı olarak ters kinematik çözümler;

$$\theta_1 = a \tan_2[2t_1; 1 - t_1^2] \quad (9)$$

$$\theta_3 = a \tan_2[\eta_3; \xi_3] \quad (10)$$

t_1, η_3, ξ_3 yerine;

$$t_1 = \frac{s \theta_2 y + \sigma \sqrt{s^2 \theta_2 (x^2 + y^2) - (d_3 + c \theta_4 d_4 - c \theta_2 z)^2}}{s \theta_2 x + d_3 + c \theta_4 d_4 - c \theta_2 z}$$

$$\eta_3 = \frac{-s \theta_1 x + c \theta_1 y}{s \theta_4 d_4}$$

$$\xi_3 = \frac{c \theta_2 c \theta_1 x + c \theta_2 s \theta_1 y - s \theta_2 z}{s \theta_4 d_4}$$

θ_3 eklem değişkenine bağlı olarak ters kinematik çözümler;

$$\theta_1 = a \tan_2[2t_1; 1 - t_1^2] \quad (11)$$

$$\theta_2 = a \tan_2[\eta_2, \xi_2] \quad (12)$$

t_1, η_2, ξ_2 yerine;

$$t_1 = \frac{x + \sigma \sqrt{x^2 + y^2 - (s\theta_3 s\theta_4 d_4)^2}}{(s\theta_3 s\theta_4 d_4 + y)}$$

$$\eta_2 = \frac{-z c \theta_3 s \theta_4 d_4 + (c \theta_1 x + s \theta_1 y)(d_3 + d_4 c \theta_4)}{x^2 c^2 \theta_1 + y^2 s^2 \theta_1 + 2xys\theta_1 c\theta_1 + z^2}$$

$$\xi_2 = \frac{(c \theta_1 x + s \theta_1 y) c \theta_3 s \theta_4 d_4 + z(d_3 + d_4 c \theta_4)}{x^2 c^2 \theta_1 + y^2 s^2 \theta_1 + 2xys\theta_1 c\theta_1 + z^2}$$

Yukarıda türetilen denklemlere göre ilk 4 eklem değişkeni, bu değişkenlerin üstel dönme matrisleri ve uç noktanın dönüşüm matrisi biliniyor. Cihazın son üç eklem değişkeni bu bilinenler kullanılarak elde edilebilir. Denklem (1)' de, elde edilen bilinenler denklemin sağ tarafına toplanırsa, kullanıcın elinde tuttuğu kalemin açısıl yönelimini ifade eden θ_5 , θ_6 , θ_7 , denklemin sol tarafında 3-2-3 diziliminde olacaktır.

$$e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} e^{\tilde{u}_3 \theta_7} = e^{-\tilde{u}_2 \theta_4} e^{-\tilde{u}_3 \theta_3} e^{-\tilde{u}_2 \theta_2} e^{-\tilde{u}_3 \theta_1} = \hat{C} \quad (13)$$

Denklem (13)' teki \hat{C} , 3x3 bilinen bir matristir ve denklemin sol tarafında 3 bilinmeyen bulunmaktadır. Böylece, son 3 eklem değişkeni aşağıdaki gibi bulunabilir; (C_{ij} bilinen \hat{C} matrisinin ij elemanlarını göstermektedir.)

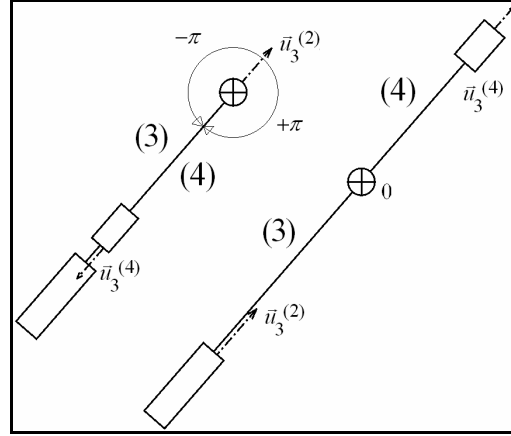
$$\theta_5 = a \tan_2 [c_{23}; c_{13}] \quad (14)$$

$$\theta_6 = a \tan_2 \left[c_{33}; \sigma \sqrt{1 - c_{33}^2} \right] \quad (15)$$

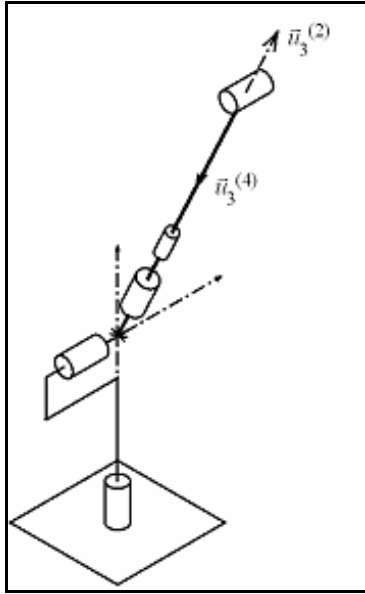
$$\theta_7 = a \tan_2 (c_{32}; -c_{31}) \quad (16)$$

Elde edilen bu denklemler kullanılarak tasarlanan 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın istenen konumuna gitmesi için gerekli olan eklem değişkenleri rahatlıkla hesaplanabilir. Bütün bu denklemler sayısal olarak MATLAB programında doğrulanmıştır. Bununla birlikte geri kinematik çözümler sırasında belirsizlik veren tekil konum noktaları saptanmıştır. Bu tekil konum noktaları şematik gösterimleri ile birlikte aşağıdaki gibi özetlenebilir;

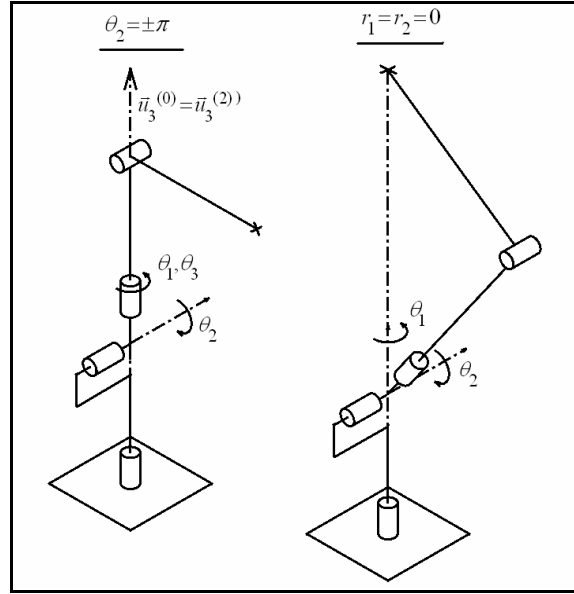
1. tekil konum $\rightarrow \theta_2 = 0, +\pi, -\pi$
2. tekil konum $\rightarrow \theta_4 = 0, +\pi, -\pi$
3. tekil konum $\rightarrow x = y = 0$
4. tekil konum $\rightarrow \theta_6 = 0, +\pi, -\pi$



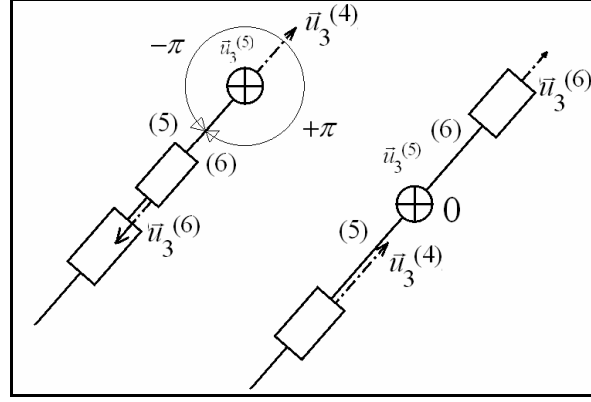
Şekil 12. İlk tekil konum gösterimi



Şekil 13. İkinci tekil konum gösterimi



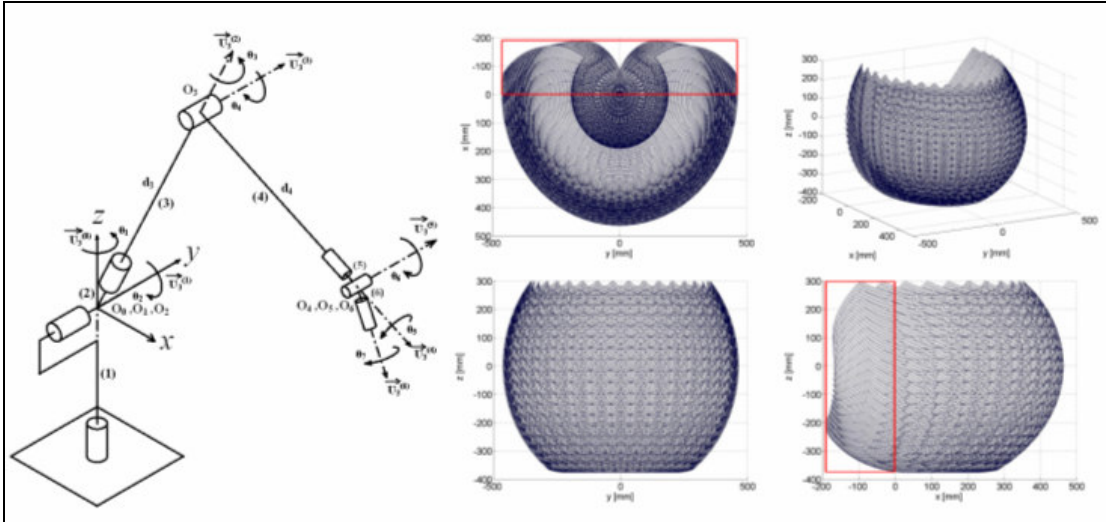
Şekil 14. Üçüncü tekil konum gösterimi



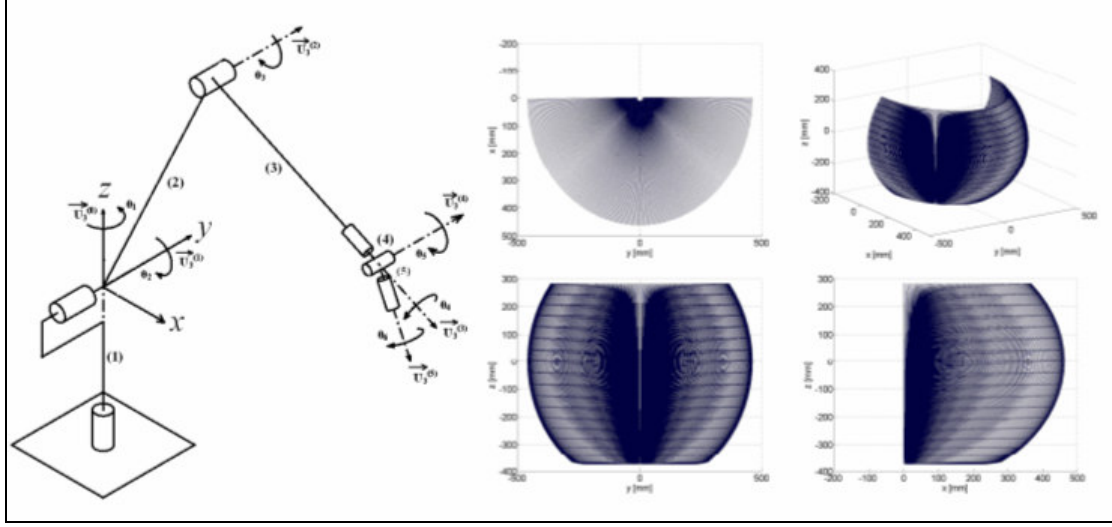
Şekil 15. Dördüncü tekil konum gösterimi

3.3. Tasarlanan Cihazın Çalışma Hacmi

Tasarlanan 7 serbestlik dereceli haptic cihazın konumsal çalışma hacmi, görsel olarak izlenebilmesi için düz kinematik analizinde elde edilen denklem (3), (4), (5) kullanılarak cihazın eklem limitleri dahilinde MATLAB yazılımı ile oluşturulmuştur. Şekil 16 ve 17’de aynı uzuv uzunluklarına sahip 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaz ile benzeri 6 serbestlik dereceli “haptic” cihaz hem kinematik hem de çalışma hacmi açısından karşılaştırılmaktadır [29, 30]. Bu iki şekildeki çalışma hacimleri karşılaştırıldığında, dikdörtgen çerçeveler fazladan kazanılan % 20’ lik çalışma hacmini göstermektedir.



Şekil 16. Tasarlanan 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın kinematik konfigürasyonu ve çalışma hacmi



Şekil 17. 6 Serbestlik dereceli “haptic” cihazın kinematik konfigürasyonu ve çalışma hacmi

4. Motor Seçimleri ve Analizler

“Haptic” cihazlarda kullanıcının elinde tuttuğu kalem kullanıcı tarafından hareketlendirildiği için cihaz çok düşük hızlarda çalışmaktadır. “haptic” cihazlarda motorlar tarafından gerçekleştirilen asıl iş, kullanıcının eline önceden tanımlanmış noktalarda direnç göstermektir. Tasarım süresince cihazın ağırlık merkezi destek noktasına odaklandırılacaktır, bu da motorların daha küçük boyutlarda ve daha az güçte seçilmesine olanak sağlamaktadır. Buna göre motor seçimlerinde istenen maksimum kuvvet ve momente göre ve cihazın motor seçimi açısından kritik olduğu düşünülen pozisyonlarında statik analizler gerçekleştirildi ve motor seçimleri yapıldı.

Daha önce belirlenen maksimum kuvvet ve momentler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 10 N bilek noktasındaki maksimum kuvvet
- 1.5 N bilek noktasındaki devamlı kuvvet
- 500 Nmm uç noktadaki (dönme, başvurma eksenleri etrafında) maksimum moment ve 130 Nmm uç noktadaki (yalpa eksenleri etrafında) maksimum moment
- 180 Nmm uç noktadaki (dönme, başvurma eksenleri etrafında) devamlı moment, 50 Nmm uç noktadaki (yalpa eksenleri etrafında) devamlı moment

Belirlenen bütün maksimum kuvvetler cihazın verebileceği en son değerlerdir ve bu değerler seçilen motorların stall momentleri ile sağlanabilir. Tasarlanacak olan “haptic” cihazda son üç motor (Minimotor) kullanıcının elinde moment üretmek ve başlangıçtaki dört motor ise kullanıcının elinde kuvvet üretmek için kullanılır.

Belirlenen momentler için Minimotor seçimi:

Yukarıda belirlenen moment değerleri kullanıcının elinde tuttuğu kalemin koordinat düzlemine göre verildiği için, bu değerler Minimotor seçimleri için direk kullanılabilir ve seçilecek olan motorlar yer kısıtlamasından dolayı 20 mm lik çap ölçülerini geçmemelidir. Bu yüzden, bu bölgede dişli kutusu kullanılmadan belirlenen moment değerlerine ulaşmak mümkün değildir. Uç noktadaki moment değerlerini sağlayacak şekilde aşağıdaki motor dişli kutusu kombinasyonu seçimi ve sağlamaları yapılmıştır.

Seçilen Minimotor 1, 2 ve 3 (yalpa, başvurma eksenleri etrafında);

Faulhaber 1524 SR Minimotor + Faulhaber 15/8 dişli kutusu (76/1 çevrim oranı)

Örnek olarak seçilen motorlarla uç noktadaki momentlerin sağlanması yapılmıştır.

$$M_{\text{maks (yaw-pitch)}} = M_{\text{Stall}} * i = 6.76 * 76 = 514 \text{ Nmm}$$

$$M_{\text{devm (yaw-pitch)}} = M_{\text{dvm}} * i = 2.5 * 76 = 190 \text{ Nmm}$$

Ulaşılan bu değerler “haptic” cihazdan istenen değerleri sağlamaktadır.

Belirlenen kuvvetler için motor seçimleri:

Belirlenen kuvvetleri sağlayacak motorların seçimi için sanal iş metodu ile statik analizler gerçekleştirildi [36]. Sanal iş yöntemine göre verilen formülasyonda seçilecek motorlar için gerekli olan momentleri veren, Jacobian matrisini (J), yerçekimi kuvvetini (G) ve cihazdan istenen moment ve kuvvetleri (R) içeren formülasyon aşağıdaki gibidir;

$$\bar{Q} = \bar{G} - \hat{J}_r^T \cdot \bar{R} \quad (17)$$

Tasarlanacak cihazda cihazın ağırlık merkezi destekleme merkezine odaklanacağı için yerçekimi kuvvetleri ihmal edilip denklem aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\bar{Q} = -\hat{J}_r^T \cdot \bar{R} \quad (18)$$

7 serbestlik dereceli “haptic” cihazda, Jacobian matrisi aşağıdaki gibi 7 kolon ve 6 satır içermektedir.

$$\hat{J} = \begin{bmatrix} \bar{J}_{r1} & \bar{J}_{r2} & \bar{J}_{r3} & \bar{J}_{r4} & \bar{J}_{r5} & \bar{J}_{r6} & \bar{J}_{r7} \\ \bar{J}_{a1} & \bar{J}_{a2} & \bar{J}_{a3} & \bar{J}_{a4} & \bar{J}_{a5} & \bar{J}_{a6} & \bar{J}_{a7} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Jacobian matrisinin elemanları \bar{J}_{rk} ve \bar{J}_{ak} aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\bar{J}_{rk} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial \theta_k} \quad (20)$$

$$\bar{J}_{ak} = \text{col} \left[\left(\frac{\partial \hat{C}}{\partial q_k} \right) \cdot \hat{C}^T \right] \quad (21)$$

Jacobian matris elemanları denklem (20) ve (22) kullanılarak elde edilebilir;

$$\bar{J}_{r1} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} \tilde{u}_3 e^{\tilde{u}_2 \theta_2} \left[d_3 \bar{u}_3 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} \bar{u}_3 \right] \quad (22)$$

$$\bar{J}_{r2} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} \tilde{u}_2 \left[d_3 \bar{u}_3 + d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} \bar{u}_3 \right] \quad (23)$$

$$\bar{J}_{r3} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \tilde{u}_3 e^{\tilde{u}_2 \theta_4} \bar{u}_3 \quad (24)$$

$$\bar{J}_{r4} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} d_4 e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} \tilde{u}_2 \bar{u}_3 \quad (25)$$

$$\bar{J}_{r5} = \bar{J}_{r6} = \bar{J}_{r7} = 0 \quad (26)$$

$$\bar{J}_{a1} = \bar{u}_3 \quad (27)$$

$$\bar{J}_{a2} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} \bar{u}_2 \quad (28)$$

$$\bar{J}_{a3} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} \bar{u}_3 \quad (29)$$

$$\bar{J}_{a4} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} \bar{u}_2 \quad (30)$$

$$\bar{J}_{a5} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} \bar{u}_3 \quad (31)$$

$$\bar{J}_{a6} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} e^{\tilde{u}_3 \theta_5} \bar{u}_2 \quad (32)$$

$$\bar{J}_{a7} = e^{\tilde{u}_3 \theta_1} e^{\tilde{u}_2 \theta_2} e^{\tilde{u}_3 \theta_3} e^{\tilde{u}_2 \theta_4} e^{\tilde{u}_3 \theta_5} e^{\tilde{u}_2 \theta_6} \bar{u}_3 \quad (33)$$

İlk dört motorun seçimi için yukarıda türetilen denklemler kullanılarak MATLAB’da tekrarlı bir program oluşturuldu. Bu programda manipülatörün pozisyonu ve istenen maksimum kuvvet ve moment değerleri yönleri ile birlikte girildiğinde gerekli olan motor momentleri elde edilebilir. Buna göre, her motorun seçimleri için ayrı ayrı, kritik olduğu düşünülen noktalarda statik analizler yapıldı. Bütün bu kritik pozisyonları karşılayacak maksimum moment değerleri belirlendi. Ancak, elde edilen maksimum değerleri herhangi bir çevrim

oranı kullanmadan motor seçimi yapmak mümkün değildir. Bu yüzden, diğer tasarım hususları da göz önünde bulundurularak her motor için çevrim oranları belirlendi. Buna göre; temelden itibaren birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü motorlar için çevrim oranları sırası ile (10/1), (8/1), (5/1), (8/1) olarak belirlendi. Bütün bu hususlar dikkate alınarak motorlardan istenen maksimum ve devamlı moment değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Motor 1} \Rightarrow Q1_{\text{maks}}=5.080\text{Nm}, Q1_{\text{devm}}=0.867\text{Nmm}, i=10:1$$

$$M1_{\text{stall}} = \frac{Q1_{\text{maks}}}{i} = \frac{5.080}{10} = 0.508\text{Nm}, \quad M1_{\text{devm}} = \frac{Q1_{\text{devm}}}{i} = \frac{0.867}{10} = 0.087\text{Nm}$$

$$\text{Motor 2} \Rightarrow Q2_{\text{maks}}=4.226\text{Nm}, Q2_{\text{devm}}=0.550\text{Nmm}, i=8:1$$

$$M2_{\text{stall}} = \frac{Q2_{\text{maks}}}{i} = \frac{4.226}{8} = 0.528\text{Nm}, \quad M2_{\text{devm}} = \frac{Q2_{\text{devm}}}{i} = \frac{0.550}{8} = 0.069\text{Nm}$$

$$\text{Motor 3} \Rightarrow Q3_{\text{maks}}=2.665\text{Nm}, Q3_{\text{devm}}=0.446\text{Nmm}, i=5:1$$

$$M3_{\text{stall}} = \frac{Q3_{\text{maks}}}{i} = \frac{2.665}{5} = 0.530\text{Nm}, \quad M3_{\text{devm}} = \frac{Q3_{\text{devm}}}{i} = \frac{0.446}{5} = 0.089\text{Nm}$$

$$\text{Motor 4} \Rightarrow Q4_{\text{maks}}=2.364\text{Nm}, Q4_{\text{devm}}=0.510\text{Nmm}, i=8:1$$

$$M4_{\text{stall}} = \frac{Q4_{\text{maks}}}{i} = \frac{2.364}{8} = 0.295\text{Nm}, \quad M4_{\text{devm}} = \frac{Q4_{\text{devm}}}{i} = \frac{0.510}{8} = 0.063\text{Nm}$$

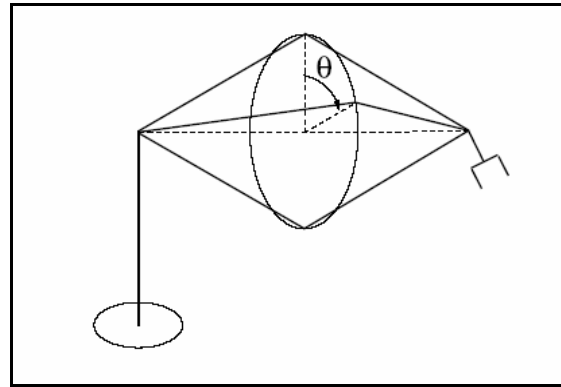
Bütün bu hesaplamalar doğrultusunda ilk dört motor aşağıdaki gibi seçilmiştir.

İlk üç motor : Faulhaber 3257..CR
Dördüncü motor : Faulhaber 2657..CR
Minimotorlar : Faulhaber 1524..SR Minimotor + Faulhaber 15/8 dişli kutusu
(76/1çevrim oranı)

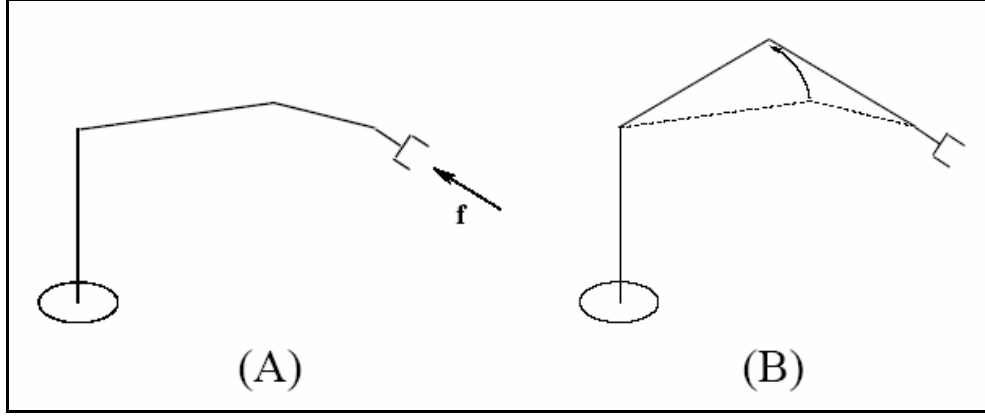
5. Tasarlanan 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın Farkları ve Üstünlükleri

Günümüze kadar tasarlanıp üretilen “haptic” cihazlar ve bu cihazların dezavantajları önceki bölümlerde ayrıntıları ile anlatıldı. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak amacı ile; farklı kinematik yapıda 7 serbestlik derecesine sahip bir “haptic” cihaz tasarlanması planlanmıştır. Tasarlanan bu yeni “haptic” cihazın farkları ve ayrıcalıkları maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 7 serbestlik derecesine sahiptir.
- Kinematik yapısı insan kolunun kinematik yapısına benzemektedir.
- Günümüze kadar tasarlanmış 6 serbestlik dereceli “haptic” cihazlar ile karşılaştırıldığında aynı uzuv uzunlukları ve eklem değişken limitleri ile yaklaşık % 20 daha büyük bir çalışma hacmine sahiptir.
- 7 serbestlik dereceli olma özelliği ile bir noktaya sonsuz sayıda farklı pozisyondan yaklaşabilmektedir. Bu özellik cihaza daha esnek bir çalışma kabiliyeti katmaktadır. Bu durum Şekil 18’ de rahatlıkla gözlenebilir.
- Fazladan kullanılan 7. serbestlik derecesi ile tekil konum noktalarından kolaylıkla kurtulabilecektir.
- Uç noktanın aynı konumunda 6 serbestlik dereceli bir manipülatör ile karıştırıldığında daha yüksek kuvvet değerleri elde edilebilecektir (Şekil 19).
- Fazladan dengeleyici ağırlıklar kullanılmadan cihazın statik dengesi sağlanabilecektir.



Şekil 18. 7 Serbestlik dereceli manipülatörün uç nokta pozisyonu değişmeden serbest hareketi[37]

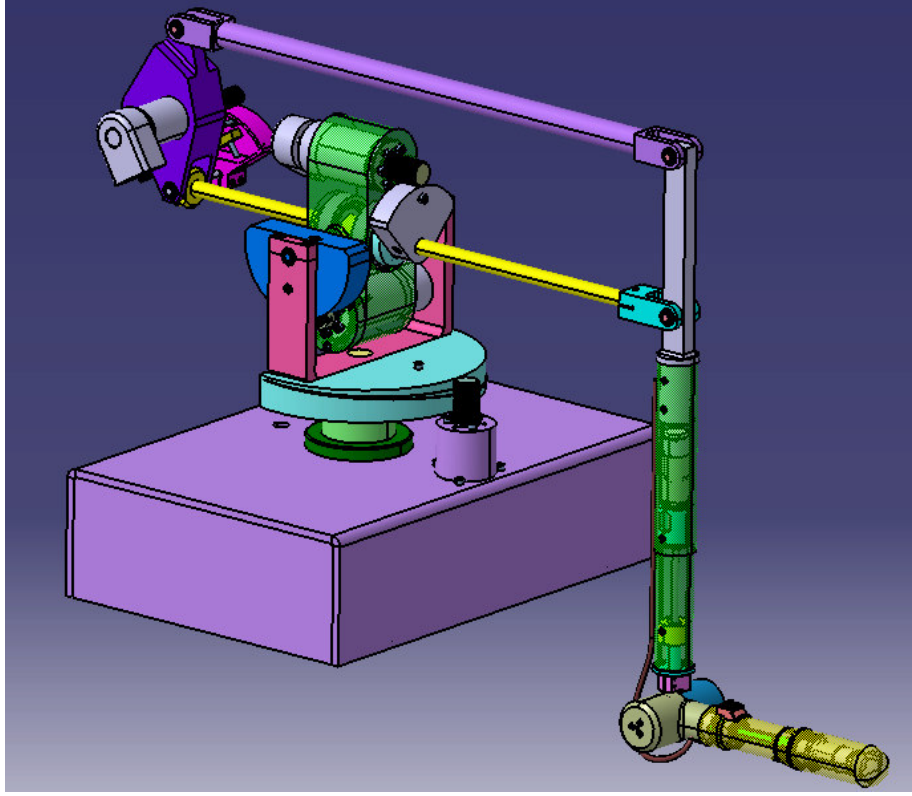


Şekil 19.7 Serbestlik dereceli manipulatörün aynı uç noktada farklı bir konfigürasyon ile yüksek kuvvet kabiliyeti [37]

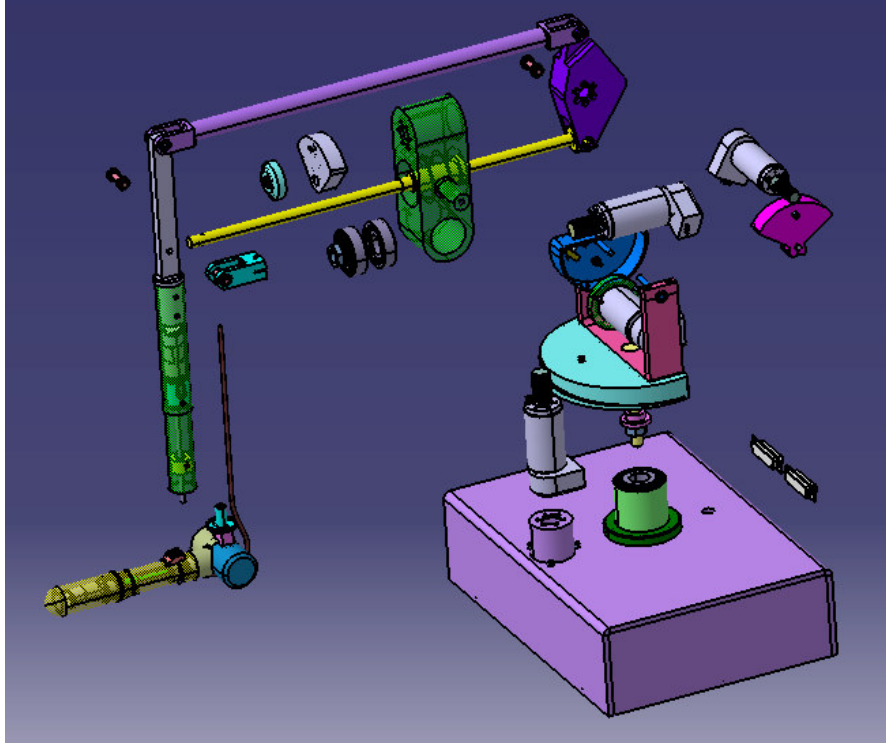
6. Tasarılan 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın CAD Modeli ve Analizleri

Proje kapsamında üretilen “haptic” cihaz (7 serbestlik derecesi olan bir manipülatör); hareketi sağlayan motorlar ve dişli kutuları, kontrolü sağlamak amacıyla sinyal üreten kodlayıcılar (encoderler), kuvvet algılayıcıları, sinyalleri toplayarak bilgisayar ortamına taşımaya ve kontrol sinyallerini motorlara iletmeye yarayan veri toplama kartlarını kullanan bir sistemdir. Bu sistemin veri toplama kartları dışında kalan motorları, kodlayıcıları, kuvvet algılayıcıları, dişli kutuları sistemde hareketli olan kısımları oluşturan elemanlardır. Cihaz kullanılırken bu elemanların, kullanıcıya uygulanması istenen kuvvet üzerinde sürekli olarak dinamik etkileri olacaktır. Bu nedenle, sistemi sürekli rahatsız eden bu uyarıcıların (gürültülerin) kontrol sistemi tarafından mümkün olduğunca iyi bertaraf edilmesi gerekmektedir. Cihaz, gerçek zamanlı (Real Time) çalışan bir kontrol algoritması tarafından kontrol edileceği için, işlem zamanının mümkün olduğu kadar bu tarz işlemler tarafından meşgul edilmesinden kaçınılmasında fayda vardır. Bu nedenle, sistemin üzerinde olumsuz etki yaratan bu dinamik yüklerin bertarafı, sistemin mekanik olarak tasarlanması sırasında düşünülmeli ve kontrol algoritmasına bu konuda düşecek olan işin en aza indirilmesi gerekmektedir.

Bu düşünce ile cihazımızı CATIA ortamında tasarladık. CATIA 3 boyutlu tasarım programları içinde en iyi olanlardan birisidir ve sanayisinde en çok tercih edilen programların başında gelir. Bu güçlü yazılım ile cihazın parça tasarımı, parçalar üzerinde gerilme analizleri, montaj, ağırlık merkezinin dengelenmesi, kinematik ve gerilme analizler gibi önemli işlemler bilgisayar ortamında önceden sınanabilmektedir. Şekil 20 ve 21 de cihazın son halinin toplu ve dağılık CAD modeli görülmektedir.



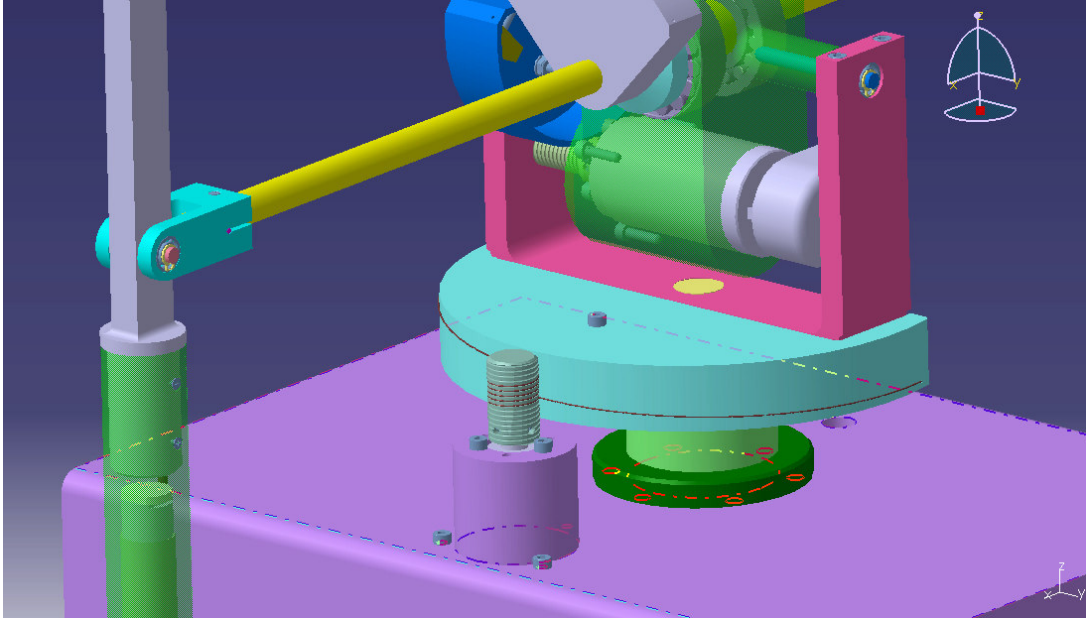
Şekil 20. "Haptic" cihaz toplu CAD modeli



Şekil 21. "Haptic" cihaz dağılmış CAD modeli

Güç İletimi

Cihazda güç iletimi iki farklı sistem ile sağlanmaktadır. Birincisi, yer sıkıntısının çok fazla olmadığı eklemlerde kullanılan kasnak ile vida arasına sarılan tel ile iletimin sağlandığı sistemdir. Bu eklemler, 1., 2., 3. ve 4. eklemlerdir. Bu iletim sistemin kullanılmasının sebebi, motorun dönüş yönünü değiştirmesi sırasında meydana gelebilecek boşlukları (backlash) ortadan kaldırmaktır. Bu boşlukların olumsuz etkileri özellikle dişli kutusu kullanılan iletimlerde çok sık görülmektedir. Şekil 22 de bu bağlantının kullanıldığı 1. eklemden bir örnek verilmiştir.



Şekil 22. Telli kuvvet iletim sistemi

İkinci güç iletim sistemi ise dişli kutusu kullanılan iletim sistemidir. Bu iletim şekli 5., 6., ve 7. eklemlerde -son üç eklem- kullanılmıştır. Kullanılan dişli kutuları 1/76 oranında olup, boşluksuz (zero backlash) olarak üretilmiş özel dişli kutularıdır.

Kablolama

Kablolama, özellikle robotik uygulamalarında çok önemli bir unsurdur. Tüm tasarım, kabloların geçeceği yerlerin tespitine, kabloların hareket sırasında sarılıp açılımlarına, bükülüşlerine göre değiştirilmektedir. Tasarladığımız cihazın ilk dört ekleminde bulunan

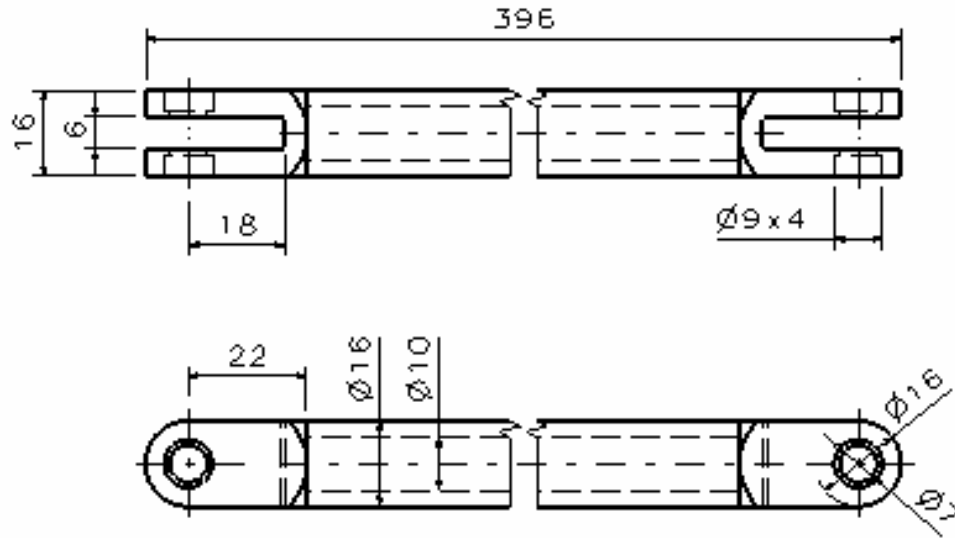
elektronik cihazlar için kablolama çok büyük bir sorun değildir. Bu eksenlerdeki elektronik aksam modellenmiş ve kablolarının yolları ile ilgili olan çalışma, açıktan yollar izleneceği için, kolaylıkla tamamlanmıştır.

Kablolamada zorlanılan asıl kısım bilek kısmı olmuştur. Bu bölgedeki motorlar, kodlayıcılar ve kuvvet algılayıcısından gelen kablolar bileğe uzanan uzuv (kol) içerisinde olacak şekilde ve her eklem geçişinde (7, 6, 5 sırası ile) dönüşe direnmeyen sarımlar kullanılmıştır. Parçalar, bu sarımların açılıp kapanmalarına imkân sağlayan iç boşluklar ile birlikte modellenmiştir.

Sonlu Eleman Analizleri

Tasarımı tamamlananmış olan bazı parçalar için CATIA ortamında Sonlu Eleman Analizleri (FEA) yapılmıştır. Bu bölümde bu çalışmalar ile ilgili veriler sunulmuştur.

Şekil 23'te paralelogram mekanizmasını oluşturan çubuklardan üstte olanı görülmektedir. Bu parça için malzeme ataması yapıldıktan sonra sonlu eleman analizleri uygulanmıştır.



Şekil 23. Paralelogram üst çubuk

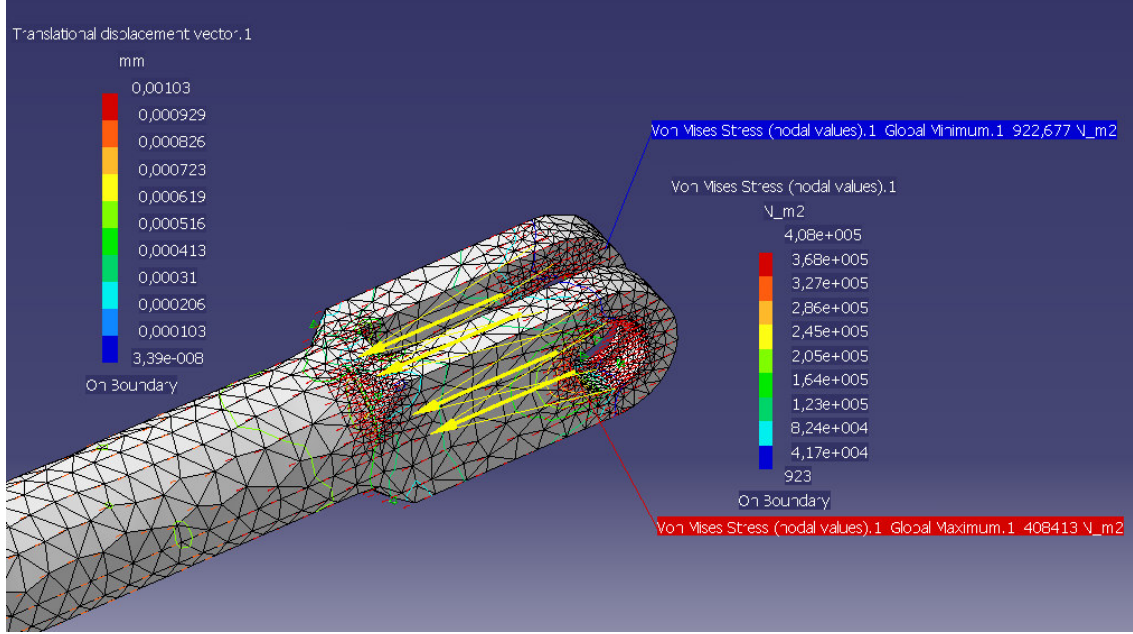
Bu parça için gerilme ve burkulma analizleri yapılması gerekmektedir. Bu analizlere başlamadan önce bilinmesi gereken bazı veriler vardır;

- parçaya uygulanacak olan kuvvetler ve momentler
- sınır şartları
- malzeme

Tasarladığımız cihaz için esas alınan kuvvet değerleri, uç noktada (bilek noktası) 10N kuvvet ve 500 Nmm moment olarak belirlenmiştir. Ayrıca cihaz için hedef konulan katılık değeri 1N/mm dir. Bu değerleri ölçü alarak, analizini yapacağımız parçaya etki eden kuvvetleri bulabiliriz. Sınır şartları parçanın sistem içerisindeki hareketi gözlemlenerek verilebilir. Sınır şartları, analizi basitleştirmek için, esaslarından uzaklaşmadan bazı varsayımlar ile değiştirilebilir. Buna karşılık olarak da güvenlik katsayısı yükseltilebilir. Cihazın hemen hemen bütün parçaları, ataleti düşürmekte hafifliğin sağlanabilmesi için alüminyum tercih edilmiştir. Alüminyum alaşımları oluşturulduğunda, fiziksel özellikleri çok değişmese de mekanik özellikleri oldukça fark etmektedir. Akma dayanımı yaklaşık olarak 200-500 MPa arasında değişmektedir. Bu sayede, analiz sonuçlarına göre kullanılacak alüminyum alaşım malzeme değişimi yapılabilir.

Şekil 24, parçaya ait bir analiz sonucunu göstermektedir. Bu durumda, parçanın iki ucundan pimli bağlandığı ve sadece aksel yük taşıdığı (two force member) düşünülmüştür. Bileğe uzanan parça 1/2,5 oranında yükü bu parça üzerine aktaracaktır. Bilekte 10N kuvvet uygulandığı düşünüldüğünde, bu parçanın yataklarına gelen kuvvet 25N'a çıkmaktadır. Kuvvet aksel (x yönü) olarak etki etmektedir ve yataklar tarafından karşılanmaktadır.

Yükleme iki uçta yatak yükü şeklinde yapılmıştır. Büyük oklar yataklara uygulanan kuvvetleri göstermektedir. Küçük oklar (parçanın silindirik kısmı ile kafa kısmının birleştiği bölgede görülenler) parça üzerindeki küçük kontrol noktalarının yer değiştirmesini gösterirler. Yani, parçada meydana gelen uzama/kısalma görülmektedir. Analiz sonuçlarını gösteren iki adet sütun parçanın yanında renk cetveli olarak gösterilmiştir. Sağdaki, parçada meydana gelen gerilmeleri soldaki de uzamaları göstermektedir.



Şekil 24. Paralelogram üst çubuk analiz sonucu

Parça için 7000 serisi alüminyum malzeme kullanılmıştır ve analizde kullanılan mekanik özellikleri şöyledir;

Young Modülü 72 GPa

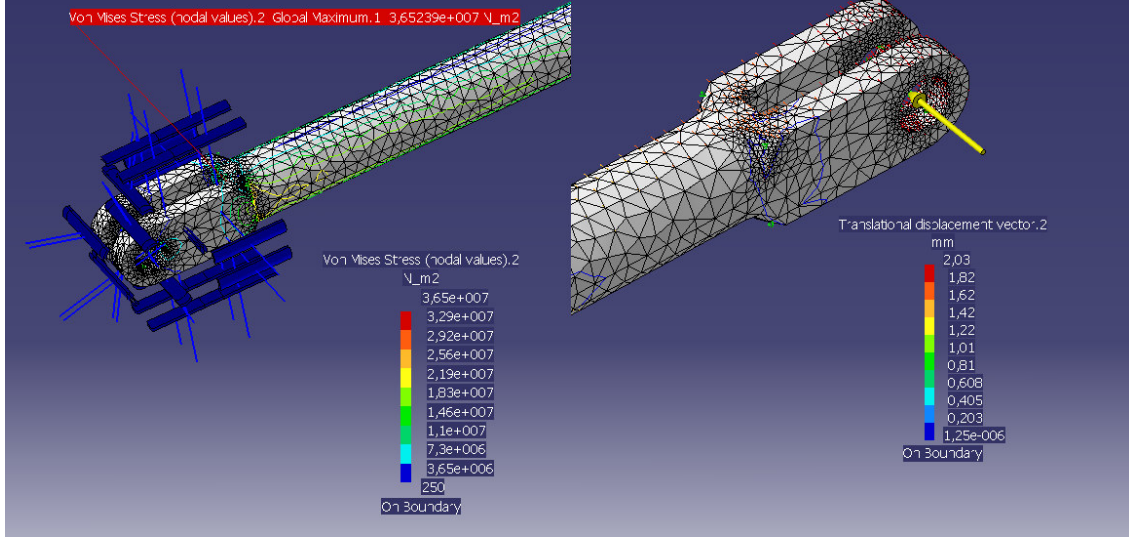
Poisson Oranı 0,33

Yoğunluk 2700 kg/m³

Akma Gerilmesi 482 MPa

Gerilmeler, geometrideki değişimin olduğu yerde en büyük değerini almıştır. Gerilmeler silindirik kısmın başladığı yerde, yüzeyde en büyük değerini almıştır. Bu bölgede gerilmeler, Şekil 24'de görüleceği üzere yaklaşık 5,3MPa değerindedir. Bu değer, atanan malzemenin dayanımı göz önüne alındığında küçük bir değerdir. Fakat cihaz için önemli olan hususlardan birisi de cihazın katılığıdır. Yani, parça yük altında çok fazla esnememelidir. Bu değer de uzama cetvelinden 0,00103mm olarak okunmaktadır. Kolda (bilek noktasına uzanan ve paralelogram mekanizmasını kapatan parça) 1/2,5 oranı olduğundan bilek noktasında bu değer 2,5 katına çıkar ve 0,00258mm ye olur. Böylece katılık $10N / 0,00258mm = 3876N/mm$ hesaplanır ve hedef aldığımız değer (1N/mm) altındadır, sorun teşkil etmemektedir.

Aynı yük altında, burkulma analizi de ayrıca yapılmış ve burkulma olmadığından aynı değerler elde edilmiştir.



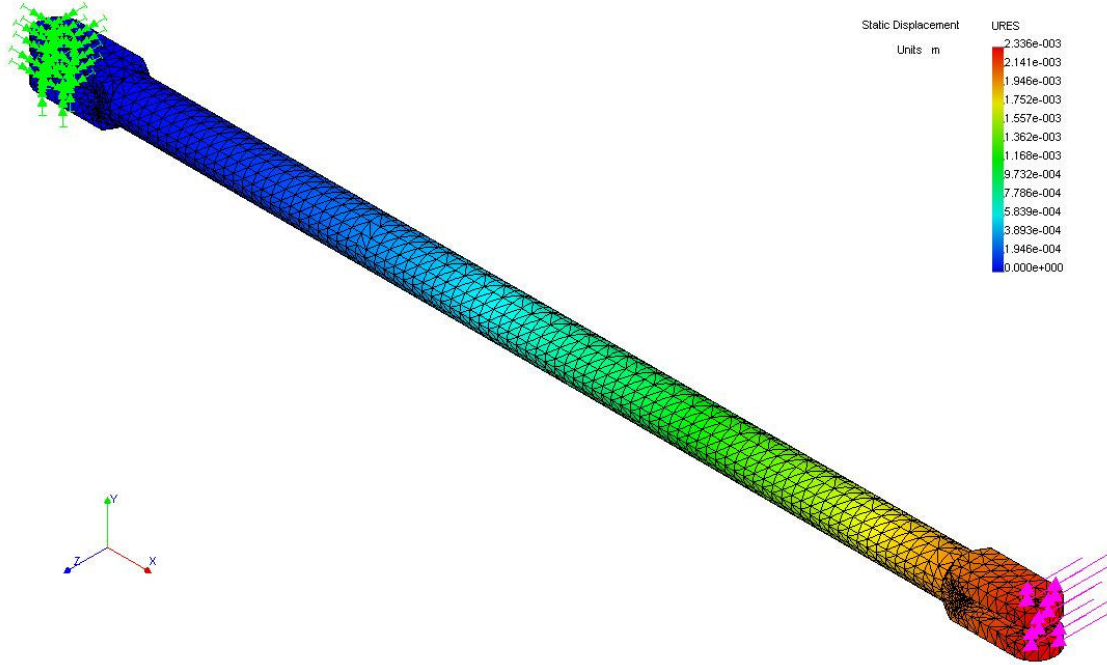
Şekil 25. Paralelogram üst çubuk yan yükleme analizi (CATIA sonucu)

Parçanın bir diğer kritik yüklenme hali de, kullanıcının cihazı y yönünde harekete zorlamasıdır. Bu durumda parçanın arka ucu (x eksenine göre) sabit kabul edilirse 25N'luk kuvvet parçanın ön ucuna y yönünde etki edecektir. Şekil 26'da bu durum modellenmiş ve analiz edilmiştir.

Şekil 25 incelendiğinde bu durumun daha kritik olduğu görülür. Parçada ki en büyük gerilme 36,5 MPa ve en büyük yer değiştirme 2,03mm olarak ölçülmüştür. Gerilme değeri seçilen malzeme için bir sorun teşkil etmemektedir. Sistem bir bütün halinde incelendiğinde etkiyen 25N'luk kuvvetin aslında diğer parçalar tarafından daha aza indirildiği görülür. Ayrıca yapılan diğer bir analizde, titanyum malzeme kullanımının yer değiştirme miktarını yaklaşık olarak %40 oranında azalttığı görülmüştür. Fakat tasarım bu hali ile kabul edilebilir durumdadır, çünkü uzama bilek noktasında 5,075mm hissedilir ve uygulanan kuvvet 10N olduğundan katılık $10N/5,075mm = 1,97 N/mm$ hesaplanır ve amaçlanan katılıktan büyüktür.

CATIA'da yapılan bu analiz sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla Şekil 25 deki yükleme şekli COSMOS paket programı ile de analiz edilmiştir. Sonuçlar CATIA'da elde edilen sonuçlara benzer değerlerdedir. Bu program ile yapılan analiz Şekil 27'de gösterilmiştir ve en büyük yer

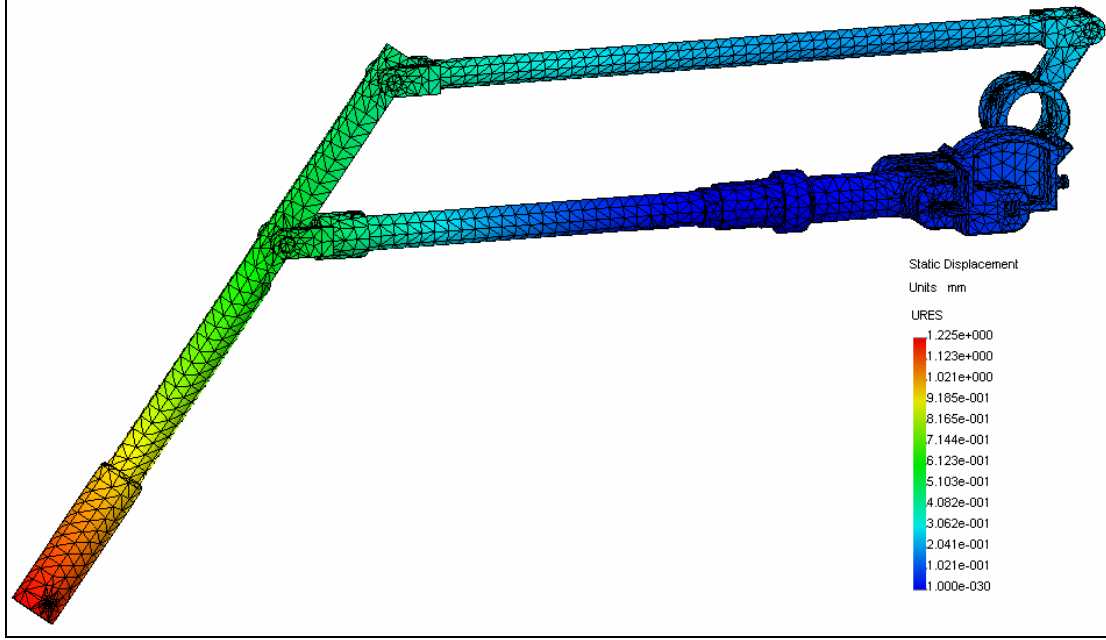
değiştirme 2,34 mm okunmaktadır. Bu değer bilek noktasında $2,34 * 2,5 = 5,85$ mm yer değişimine karşılık gelir. Katılık $10N / 5,85mm = 1,71N/mm$ değeri ile 1N/mm lik amaçlanan katılığın altında kalmaktadır.



Şekil 26. Paralelogram üst çubuk yan yükleme analizi (COSMOS sonucu)

Yukarıda anlatılan analiz en kötü yükleme şekli sürekli olarak uygulandığında görülecektir. Cihazın genel çalışma şartları göz önünde bulundurulduğunda bu yüklerin aslında çok daha düşük oldukları görülür.

Tek bir parça için yapılan analizlere ek olarak cihazın uç noktadaki katılığının hedeflenen değerden daha düşük olması için, cihazda kullanılan paralelogram bir bütün olarak analiz edilmelidir. Bu amaç için de COSMOS paket programı kullanılmış ve uç noktaya yine aynı kuvvet ve momentler (10N ve 500 Nmm) uygulanmıştır. Analiz sonucunda uç noktadaki yer değiştirmenin yaklaşık 1mm olduğu görülmektedir (Şekil 27). Bu değer hedeflenen katılığı (1N/mm) karşılamaktadır.

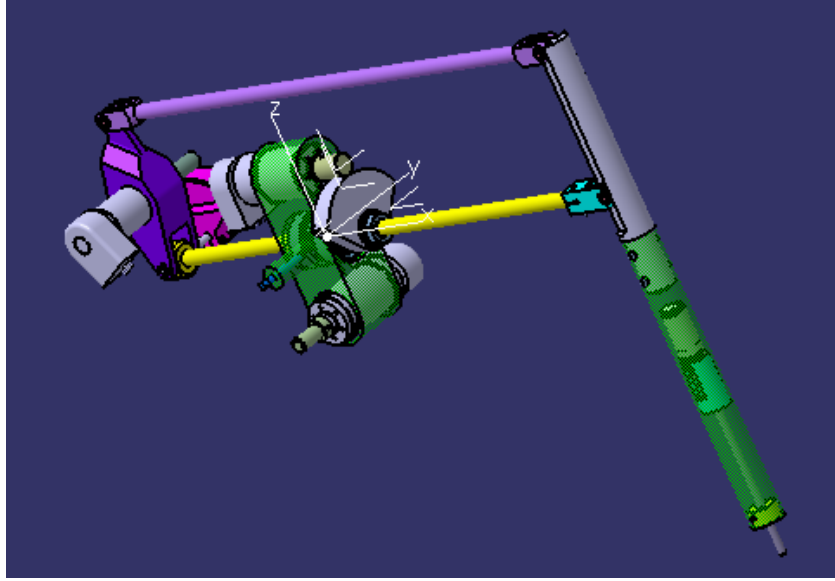


Şekil 27. Paralelogramın yük altında yer değiştirme analizi

Ağırlık Merkezinin Dengelenmesi

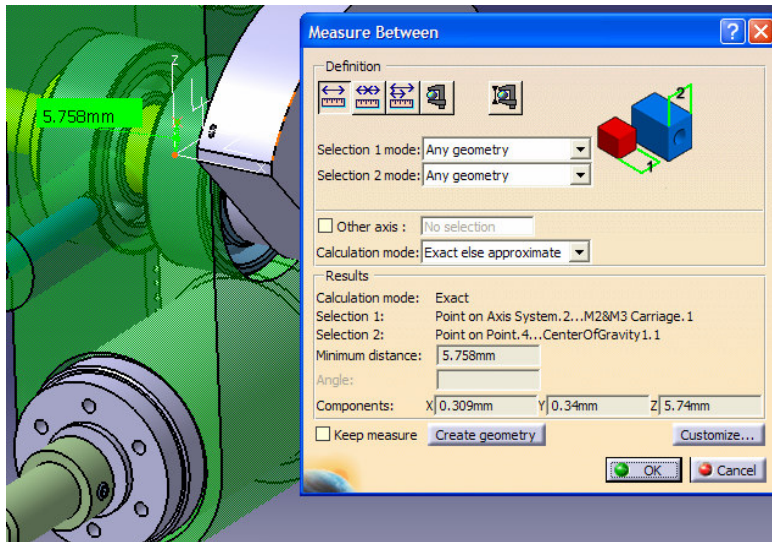
Cihaz bilek kısmına kadar düşünüldüğünde, ideal bir “haptic” cihaz için sistemin dengede kalması beklenir. Yani kullanıcının elinde tuttuğu “haptic” kalem hariç diğer kısımların ağırlık merkezi bir noktaya sabitlemek gerekmektedir. Bu dengeyi sağlamak amacı ile imal edilen parçalar için malzemeler atanmış, satın alınacak parçalar modellenmiş, teknik belgelerindeki ağırlıkları geometrik merkezlerinde alınmıştır. Kodlayıcıların ağırlıkları teknik belgelerinde yer almamaktadır, fakat şu aşamada ağırlıkları ihmal edilebilir. Çünkü boyutları ve malzemeleri incelendiğinde çok hafif elemanlar oldukları görülebilir.

Ağırlık merkezinin sistem hareket halindeyken de dengede olması istenmektedir. Bu nedenle, kolun (bileğe uzanan uzuv) açık halindeki yer değişimini dengelemek ve atalet kuvvetlerini azaltmak amacı ile kolun paralelinde bulunan ve 4.motoru taşıyan parça daha ağır bir malzemedan (çelik) üretilmiştir. Şekil 28’de ağırlık merkezi analizi ile ilgili bir çalışma gösterilmiştir. Ağırlık merkezi dengelenmesinde 1.eklemden sonraki parçalar kullanıcının elinde olduğu için analize dahil edilmemiştir.



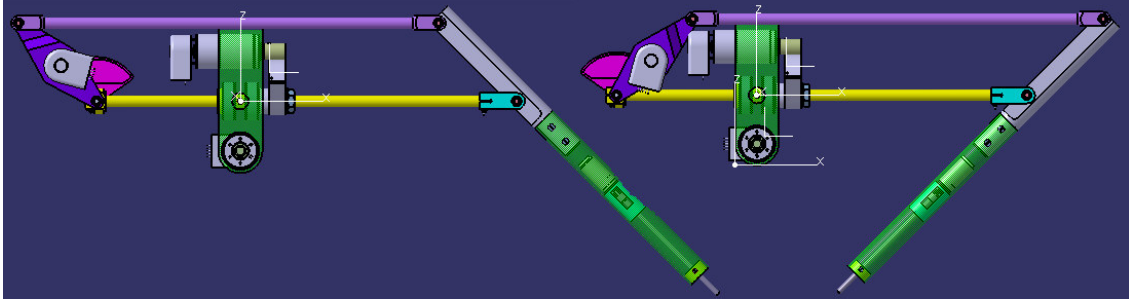
Şekil 28. Ağırlık dengesine etki eden parçalar

Bu parçalar cihazın kullanımı sırasında ağırlık merkezinin sürekli olarak hareket etmesine neden olurlar. Kullanıcı elinde sadece tuttuğu son uzvun dinamik ve statik özelliklerini hissetmelidir. Şekil 29’de ki parçalar için tasarım sırasında statik denge sağlanacak şekilde çalışma yapılmıştır. Dinamik etkilerin kullanıcıya iletilmemesi işi ise kontrolü sağlayan yazılım tarafından karşılanacaktır. Şekil 29’da cihazın varsayılan başlangıç halinde dengede olduğu söylenebilir. Çünkü bu konumda z-ekseni üzerinde olması beklenen ağırlık merkezi, z-ekseninden toplam uzaklığı (sapması) 0,46mm dir.



Şekil 29. “Haptic” cihaz başlangıç konumu denge analizi

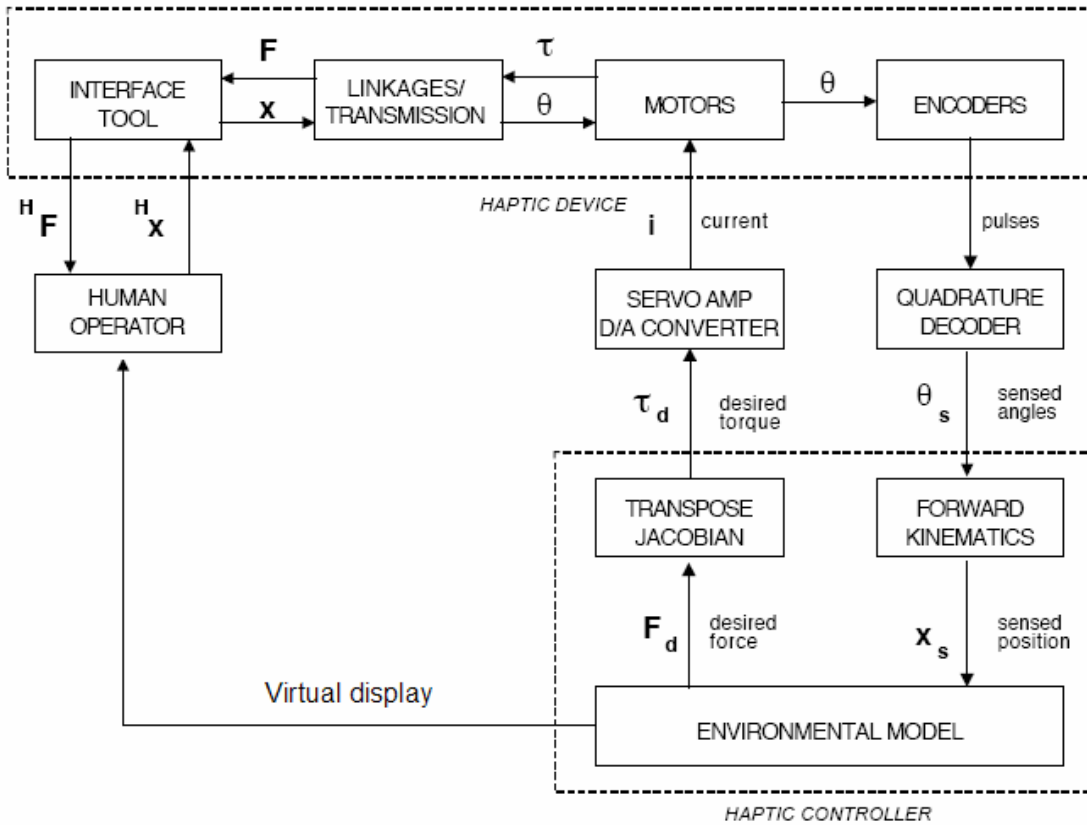
Daha önceden de belirtildiği gibi, sistemin cihazın bütün konumları için dengede kalması istenmektedir. Bilek noktasının Şekil 30'da görülen öndeki ve arkadaki konumları için yapılan analizlerde ilk konumda ağırlık merkezinin x-ekseni boyunca 2mm, ikinci konumda ise -2mm yer değiştirdiği görülmüştür. Her iki konum için kayma miktarının çok yakın olması dengeleme işinin başarılı olarak sağlandığını göstermektedir.



Şekil 30. Ağırlık merkezi dengesi analizi için denenen konumlar

7. Cihazın Kontrolü için Geliştirilen “Haptic” Kutu ile Kontrol ve Arayüz Çalışmaları

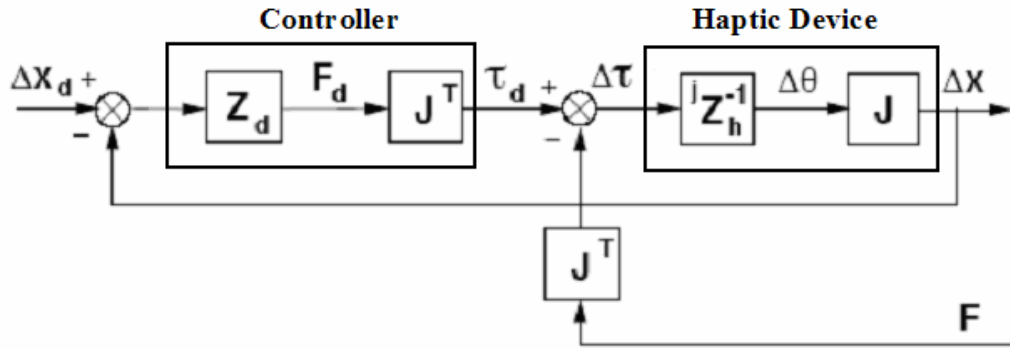
Tipik bir “haptic” cihaz genel olarak motorlar/kodlayıcılar, uzuvlar, aktarma organları ve “haptic” kaleminden oluşmaktadır. Günümüzde hazır olarak temin edilen “haptic” cihazların çoğu “master arm” robotlar gibi kontrol edilmektedir. Şekil 31 tipik bir “haptic” cihazın çalışma prensibini tasvir eden blok diyagramı göstermektedir.



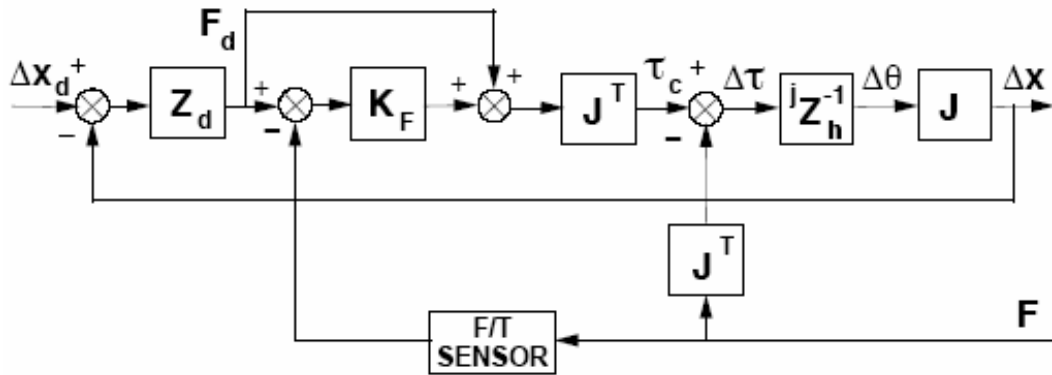
Şekil 31. Tipik bir “haptic” cihazın çalışma prensibi blok diyagramı

Literatürde “haptic” kontrolünde genel olarak iki tip algoritma kullanılmaktadır. Bunlar *empedans kontrol* ve *admitans kontrol* algoritmalarıdır. Bunlardan ilki kullanıcının hareketine (kodlayıcı çıktısı sayesinde konum, hız ve ivme) karşılık sanal ortam özelliklerine göre bir referans kuvvet hesaplar ve bu kuvveti kullanıcıya hissettirmeye çalışır (“haptic” kontrolcü ile). Bu tip bir kontrol, cihazın kullanıcıya sunacağı kuvvetin düzenlenmesinde herhangi bir kuvvet geri beslemesi olmadığı için açık çevrim kuvvet kontrolü (open-loop force control)

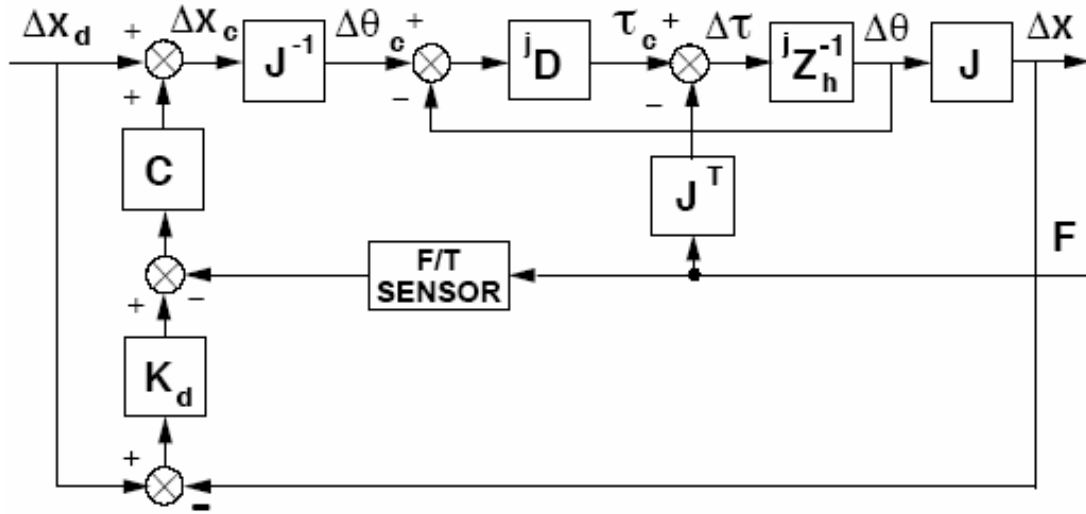
olarak isimlendirilmektedir. Açık çevrim kontrolden başka kuvvet geri beslemesi ile kapalı çevrim bir kontrol kullanıcının sanal ortamı daha hassas hissetmesini olanak sağlamaktadır. İkincisi ise tam tersi olup kullanıcının uyguladığı kuvvete karşılık bir referans hareket hesaplar ve bu hareketi kontrol etmeye çalışır. Bu kontrol tipinde kullanıcın uyguladığı kuvvetin algılanması gerektiğinden bir kuvvet algılayıcısına gereksinim vardır. Bu algoritmalar, benzetimi yapılmak istenen sanal ortama göre seçilmelidir. Yani, hangi kontrol yönteminin kullanılacağına cihaza değil uygulamaya göre karar verilmesi ve uygulama geliştirilirken yazılımsal olarak sisteme dahil edilmesi gerekmektedir. Bu iki kontrol stratejisinin blok diyagramları Şekil 32, 33 ve 34'te ayrıntıları ile gösterilmektedir.



Şekil 32. Açık çevrim empedans kontrol



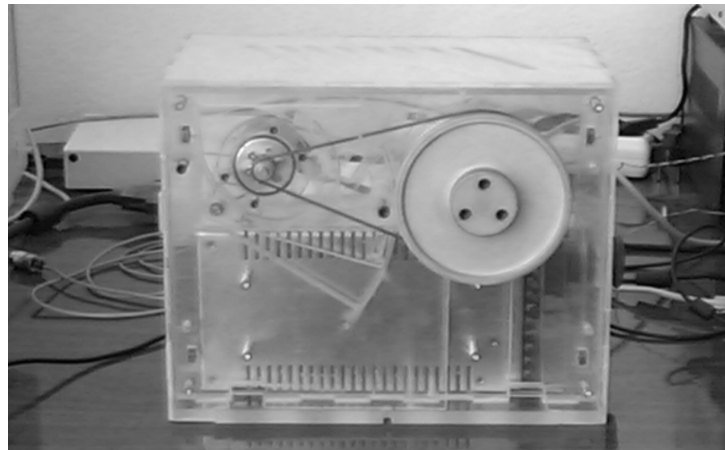
Şekil 33. Kapalı çevrim empedans kontrol



Şekil 34. Kapalı çevrim admitans kontrol

Blok diyagramlarındaki x konumu, F kuvveti, τ torku, θ eklem açısını, Z_d istenen empedans matrisini, J Jacobian matrisini, J^T Jacobian matrisinin devriğini, jZ_h eklem empedans matrisini, K_f kuvvet kazanç matrisini, K_d istenen rijitlik kazanç matrisini, jD eklem servo kontrolcü matrisini, C empedans kontrolcü kazanç matrisini göstermektedir.

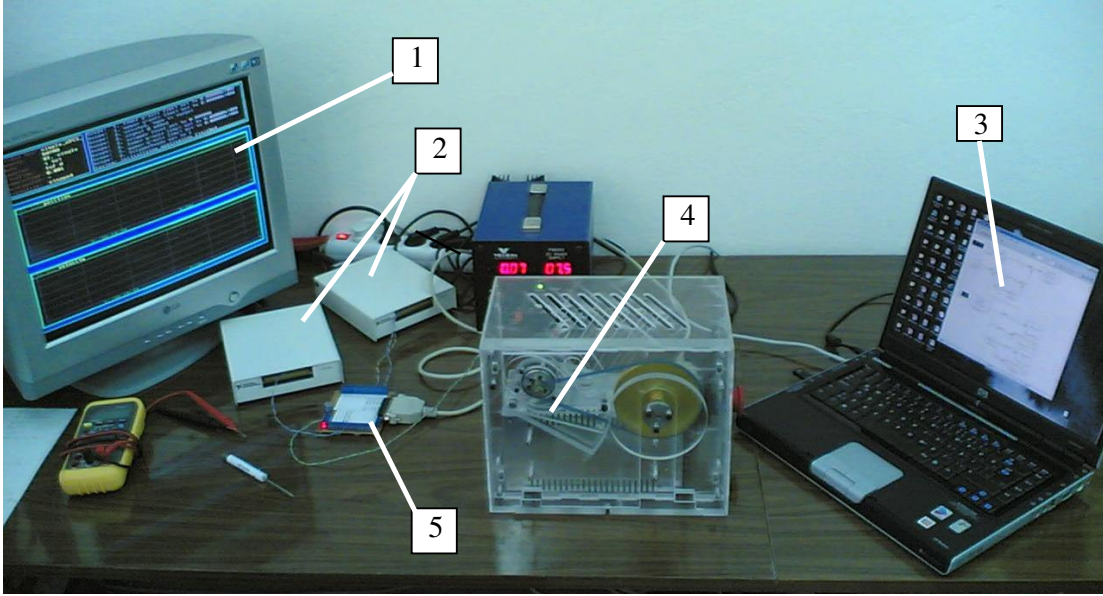
Kontrol çalışmalarında doğrudan 7 serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz üzerinde başlamakansa, tek serbestlik dereceli bir cihazla öncelikle bir “haptic” cihazın kontrolü nasıl yapılır sorusuna yanıt aranmıştır. Bu düşünce ile tek serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz olan “haptic” kutunun tasarlanmasına ve kontrol çalışmalarının bu kutu üzerinde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.



Şekil35. “Haptic” kutu

Şekil 35’ de gösterilen “haptic” kutu şu elemanlardan oluşmaktadır:

- 150W DC Fırçalı Motor
- Optik Artırmalı Kodlayıcı (500 darbe/devir A ve B kanallı)
- DC Fırçalı Servo Yükseltici
- Güç Kaynağı
- Silindirik tutamaç
- 18/128 dişliler ve poliüretan zincir
- Tek serbestlik dereceli tork algılayıcısı



Şekil36. “Haptic” algoritmaları denemek için geliştirilen sistem

Şekil 36’de “haptic” algoritmaları denemek için kullanılan sistem görülmektedir. Sistemin elemanları sırası ile;

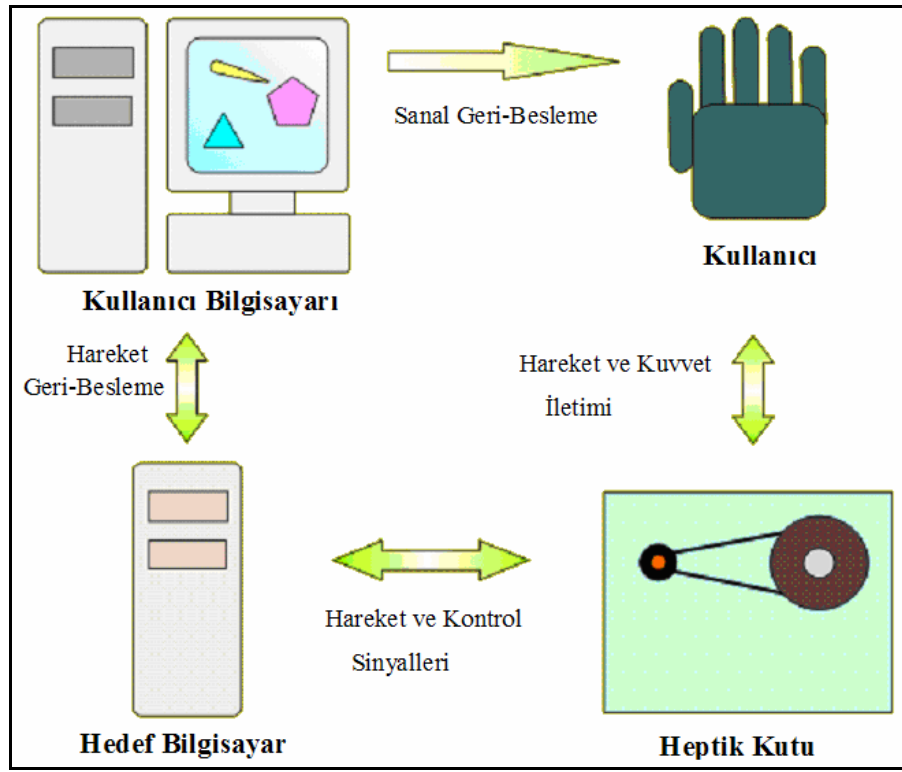
1. Algoritmaları koştan denetleyici (hedef) bilgisayar
2. Veri toplama kartlarının kanallarına bağlantıyı sağlayan dağıtım kutuları (NI SCB68)
3. Kullanıcı bilgisayarı
4. “Haptic” kutu
5. “Haptic” kutunun çevre ile iletişimini sağlayan dağıtım kartıdır.

Sistemin çalışma prensibi Şekil.36'ya göre şöyle açıklanabilir: Sistemde iki adet bilgisayar bulunmaktadır. Bunlardan birisi MATLAB® programı ile yazılım geliştirdiğimiz *kullanıcı (host PC)* bilgisayar, diğeri ise *hedef (target PC)* bilgisayardır. Sistemde iki adet bilgisayar kullanılmasının sebebi, şu anda sistemin yazılımsal olarak geliştiriliyor ve deniyor olmasıdır. Hedef bilgisayar cihazın gerçek zamanlı kontrolü ile uğraşırken kullanıcı hedef bilgisayara kullanıcı bilgisayarı ile ethernet ağ bağlantısı üzerinden müdahale edebilmektedir. Kullanıcı bilgisayarı üzerinde geliştirilen sistem modeli derlendikten sonra yine ağ bağlantısı ile hedef bilgisayara yüklenmektedir. Gerçek zamanlı olarak çalışan bu sistemde hedef bilgisayar sadece cihazın kontrolüne adanmıştır ve bu bilgisayar üzerinde sadece MATLAB® xPCTarget tarafından oluşturulan kernel çalışmaktadır. Böylece hedef bilgisayar diğer işlemler ile uğraşarak zaman kaybetmemektedir. Hedef bilgisayar üzerinde 4 adet veri toplama kartı bulunmaktadır (1xNI PCI-6052E –çok amaçlı, 1xNI PCI6733 –analog çıkış, 2xNI PCI6602 –kodlayıcı okuma). Bu kartların tamamı geliştirilen 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaz kontrolünde aktif olarak çalışacaktır. Bu deney düzeneği için sadece NI PCI-6052E çok amaçlı VTK ve NI PCI-6602 kodlayıcı okuma kartı aktif durumdadır. Kullanıcı 4 numaralı “haptic” Kutunun diskini çevirdiğinde motor şaftına bağlı olan kodlayıcı harekete göre bir kare sinyal üretir. Bu sinyali hedef bilgisayar üzerindeki kodlayıcı okuma kartı *dağıtım kutuları* aracılığı ile alır. Kullanıcı bilgisayarı üzerinde geliştirilip hedef bilgisayara yüklenen modele göre hedef bilgisayar, kodlayıcıdan aldığı bilgiyi de kullanıp bir tork hesaplar. Hesapladığı bu torka karşılık gelen referans voltaj bilgisini kendi üzerinde bulunan NI PCI6052E kartı üzerinden analog olarak “haptic” kutuya iletir. “Haptic” kutu içerisinde bulunan DC motor sürücüsü, aldığı referans sinyale göre motor üzerinden geçen akımı kontrol eder. Motor ucuna bağlanan disk ile etkileşimde olan kullanıcı bu torku kendi hareketine tepki olarak hisseder. Böylece kapalı bir çevrim tamamlanmış olur.

“Haptic” kutu ile donanımsal olarak, gerçek “haptic” cihazın sistem içerisindeki diğer elemanlar ile nasıl etkileşeceği, iletişim kuracağı çözülmüştür. Tek serbestlik dereceli “haptic” kutunun bulunduğu sistem üzerinde kontrol algoritmaları denendikten sonra 7 serbestlik dereceli cihazın kontrolüne geçilmiştir.

“Haptic” kutu ile yapılan çalışmalarda kodlayıcıdan alınan sinyalden konum bilgisi çıkarılmış ve Kalman filtresi kullanarak hız ve ivme tahminleri başarılı bir şekilde yapılmıştır. Hız ve ivme bilgisinin elde edilmesi, sönümleme ve atalet kuvvetlerinin benzetimi (simülasyonu) için gerekli olduğundan, “haptic” uygulamalarda önemli bir yere sahiptir.

Şekil 37 “haptic” kutu sistemin tamamının işleyişini göstermektedir. Sistem hedef bilgisayar, kullanıcı bilgisayarı ve veri toplama kartları ile donanımsal olarak tamamlanmaktadır. Yazılımsal olarak MATLAB® yazılımının kullanılması ile sistem bir bütünlük oluşturur.



Şekil 37. “Haptic” kutu sitem şeması

“Haptic” sistem şu şekilde çalışmaktadır:

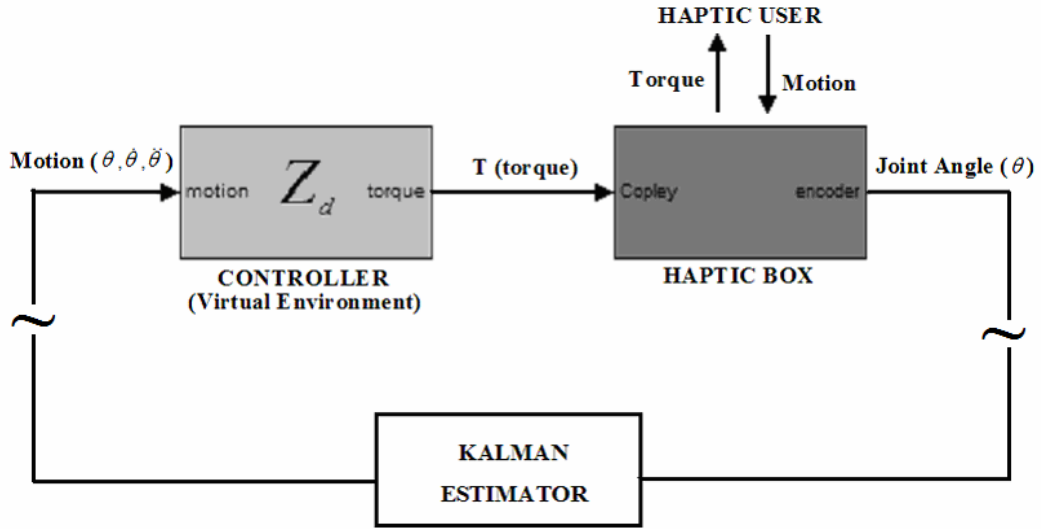
- MATLAB/Simulink® ile geliştirilen modeller derlenerek TCP/IP bağlantısı ile hedef bilgisayara yüklenir. Hedef bilgisayar üzerinde daha önceden MATLAB® kullanılarak oluşturulan “kernel” (çekirdek yazılım) çalışmaktadır.

- Hedef bilgisayar üzerindeki NI PCI 6602 Counter/Timer veri toplama kartı ile kodlayıcı sinyali okunur. Bu sinyal konum bilgisini ihtiva etmektedir ve Kalman algoritması ile işlenerek hız ve ivme kestirimi hassas bir şekilde yapılır (deneylerde elde edilen sonuçlar başarılıdır).
- Hedef bilgisayar üzerinde bulunan NI PCI 6052E veri toplama kartı kullanılarak analog ve sayısal (dijital) veri giriş/çıkış işlemleri gerçekleştirilir. Tork algılayıcısından gelen analog sinyal analog girişle okunur ve motorun servo sürücüsüne referans voltaj kartın analog çıkışı ile sağlanır.

Yapılan uygulamaya göre kontrol sistemi, hareket/tork okuma ve referans voltajı üretme işlemlerini kontrol etmektedir. Bu işlemlerin uygulamalı olarak görülmesi amacı ile bir açık çevrimli empedans kontrol algoritması denenmiştir. MATLAB/Simulink® ile oluşturulan model Şekil 39'da görülmektedir. Algoritma kutudan konum bilgisini okur, hız ve ivme bilgisi kestirimini yapar. Kullanıcıya hissettirilmek istenen nesnelere göre (yay, damper, kütle) tork (τ) hesaplar. τ torkuna karşılık gelen voltaj değeri hesaplanır ve bu değer kutudaki servo yükselticinin referans girişine uygulanır ve böylece sanal ortam hissedilmiş olur.

Bu açık çevrim empedans kontrolünde kontrol kuralı olarak bir oransal kontrolcü kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyde sanal bir kütle-yay-damper sistemi kullanılmıştır ve sistemin kullanıcıya sanal olarak modellenen bu ortamı nasıl hissettirebildiği gözlenmiştir.

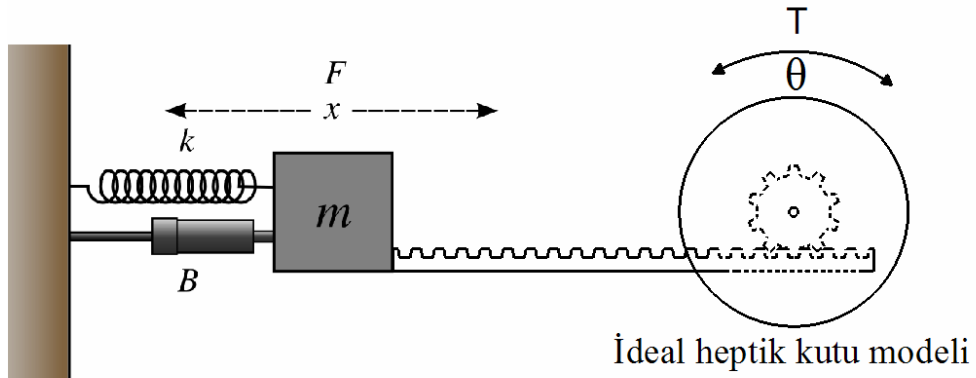
Sanal model, dinamik olarak $\tau = I\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta$ denklemini kullanmaktadır. Ayrıca bir alt sistem modeli olan 'MOTION ESTIMATION' şu işlemleri yapmaktadır; MOTION ESTIMATION alt sistemi NI PCI-6602 veri toplama kartından gelen konum bilgisini alır ve Kalman bloğundaki 'Sabit İvme Hız Kestirimi' algoritmasını kullanarak sırası ile hız ve ivme kestirimlerini yaparak sanal ortam modeli olan 'VIRTUAL ENVIRONMENT' bloğuna gönderir.



Şekil 38. Açık çevrim empedans kontrol diyagramı

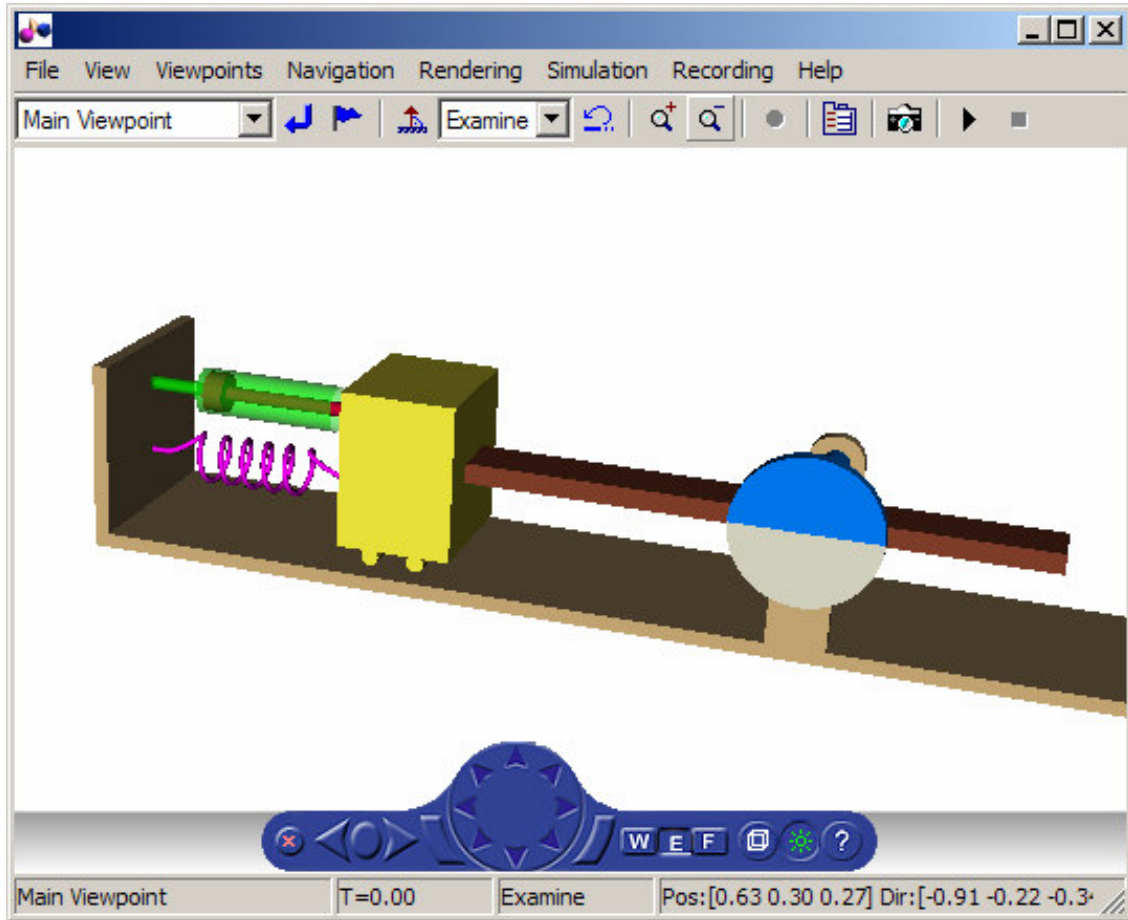
Kontrol çalışmaları MATLAB® xPC Explorer arayüzü ile gerçekleştirilmektedir. Bu arayüz derlenen modellerin hedef bilgisayara yüklenmesini ve modeldeki değişkenleri gerçek zamanlı olarak kontrol etmeyi sağlar. Fakat bu arayüz genel xPCTarget® uygulamalarını kontrol etmek üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle üretilen “haptic” kutuya özgü bir Grafikselle Kullanıcı Arayüzü tasarlanmıştır.

Yukarıda sunulan MATLAB/Simulink® modelin uygulamasında kullanıcıya sanal ortamı hissettirmek için kütle, yay ve damperi içeren sanal bir mekanik sistem seçilmiştir (Şekil 39).



Şekil 39. Kütle/Yay/Damper mekanik sistem modeli

Kullanıcıya uygulama sırasında bu modeli benzetmek ve görüntülemek için bir MATLAB/Simulink® aracı olan “Virtual Reality Toolbox®” kullanılmıştır. Gösterilen kütle/yay/damper modeli “haptic” kutunun tutamacı ile birlikte Şekil 40’da olduğu gibi modellenmiştir. Şekil’den de anlaşılacağı gibi kullanıcı “haptic” kutunun silindirik tutamacını döndürdüğünde aradaki iletim organı aracılığı ile kütleye bir itme kuvveti uygulayacak ve sanal mekanik sistemin cevabını elinde hissedecektir. Mekanik sistemin cevabı kullanıcının silindirik tutamaca uygulayacağı açı, açısal hız ve ivmeye bağlı olarak değişmektedir ve sanal model dinamik olarak $\tau = I\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta$ denklemini kullanmaktadır (denklemdaki I açısal ivme için indirgenmiş ataleti, b açısal hız için indirgenmiş damper katsayısını, k açısal konum için indirgenmiş yay katsayısını göstermektedir). *Bu uygulamada “haptic” kutu ideal bir sistem olarak düşünülmüş olup “haptic” kutunun kendisinden kaynaklanan bütün dinamik ve elektriksel etkiler ihmal edilmiştir.*

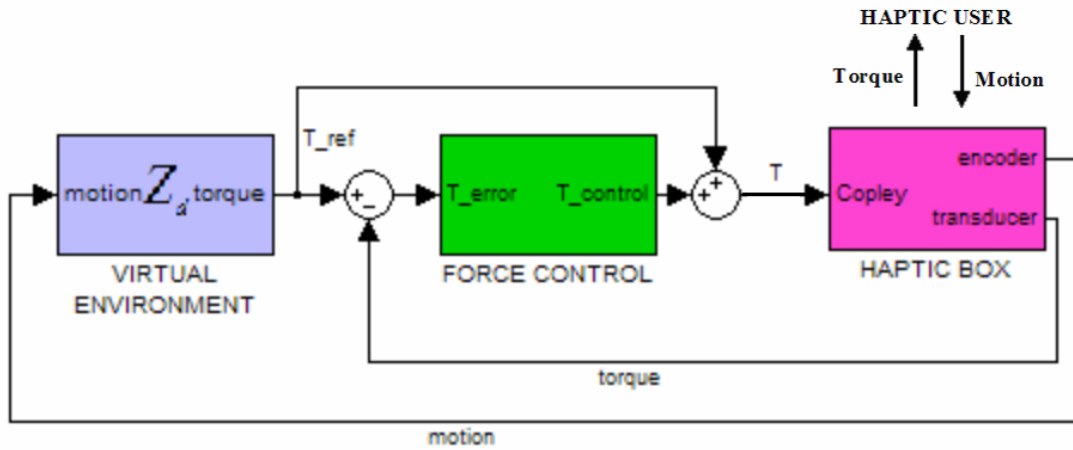


Şekil 40. Benzetilen sanal ortam modeli (Kütle/Yay/Damper/Silindirik Tutamaç)

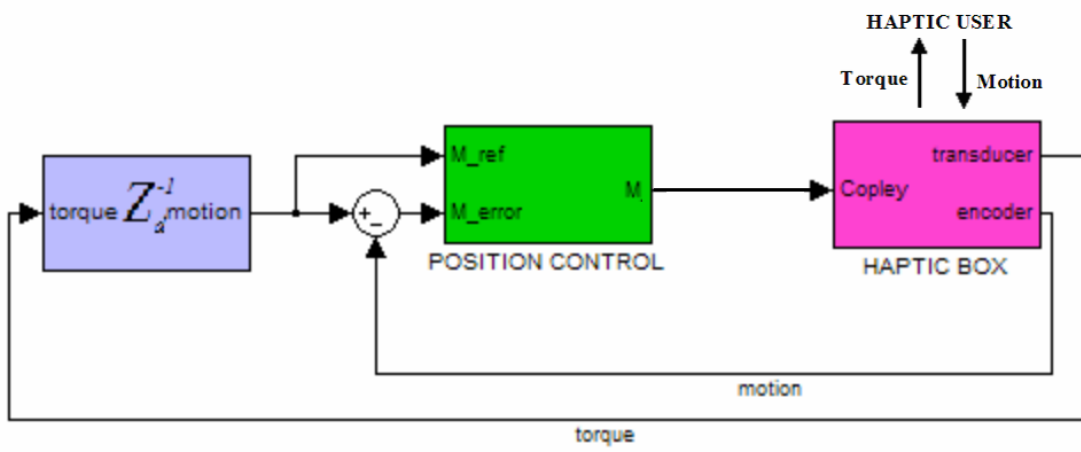
Bu sanal ortamın oluşturulmasının ardından, yukarıda verilen açık çevrim empedans kontrol modeli “haptic” kutuya uygulanmış ve kullanıcının sanal ortamda modellenmiş bir kütle/yay/damper sistemini hem dokunsal olarak hissedebilmesi hem de görsel olarak izleyebilmesi sağlanmıştır. Böylece bir serbestlik dereceli “haptic” kutu için modellenen bu MATLAB/Simulink® modellerinin 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaz için düzenlenip geliştirilebileceği deneysel olarak görülmüştür.

Açık çevrim empedans kontrolü yapılan bu uygulamada tork algılayıcı sadece sistemin çıkış torkunu ölçmek amaçlı kullanılmıştır. “haptic” uygulamalarında açık çevrim empedans kontrolü dışında kapalı çevrim empedans kontrolü ve admitans kontrol algoritmaları da kullanılmaktadır. Bu durumlarda, tork algılayıcısından alınan bilgi kontrolcüye geri beslenmekte veya sürtünmeyi karşılamak için ileri beslenmektedir. Sistemi iyileştirmek için tork algılayıcısının kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Şekil 41 ve 42 MATLAB/Simulink® ortamında “haptic” kutu benzetimi için oluşturulan geri beslemeli empedans ve admitans kontrol algoritmalarını göstermektedir.

Bu uygulama ile üretilen 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın bir eklemdeki kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalman filtresi kullanarak eklemdaki konum bilgisinin okunması ve bu konum bilgisinin filtrelenip, hız ve ivme bilgisinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu sistemde kullanılan motor, üretilen 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazda kullanılan motorlar ile aynı özelliklerdedir. Bu nedenle motorların sürülmesi işlemi de bu tek serbestlik dereceli sistemde olduğu gibi gerçekleştirilecektir. “haptic” kutu için uygulanan bu işlemler 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaza doğrudan uygulanabilecektir. Bu aşamadan sonra yapılması gereken işlem 7 serbestlik dereceli olan cihaz için ileri ve geri dinamik denklemler kullanılarak cihazın uygulamalara hazır hale getirilmesidir.



Şekil 41. Kuvvet geri-beslemeli empedans kontrol modeli



Şekil 42. Admitans kontrol modeli

8. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazın İmalatı, Montajı ve Cihazın Son Hali

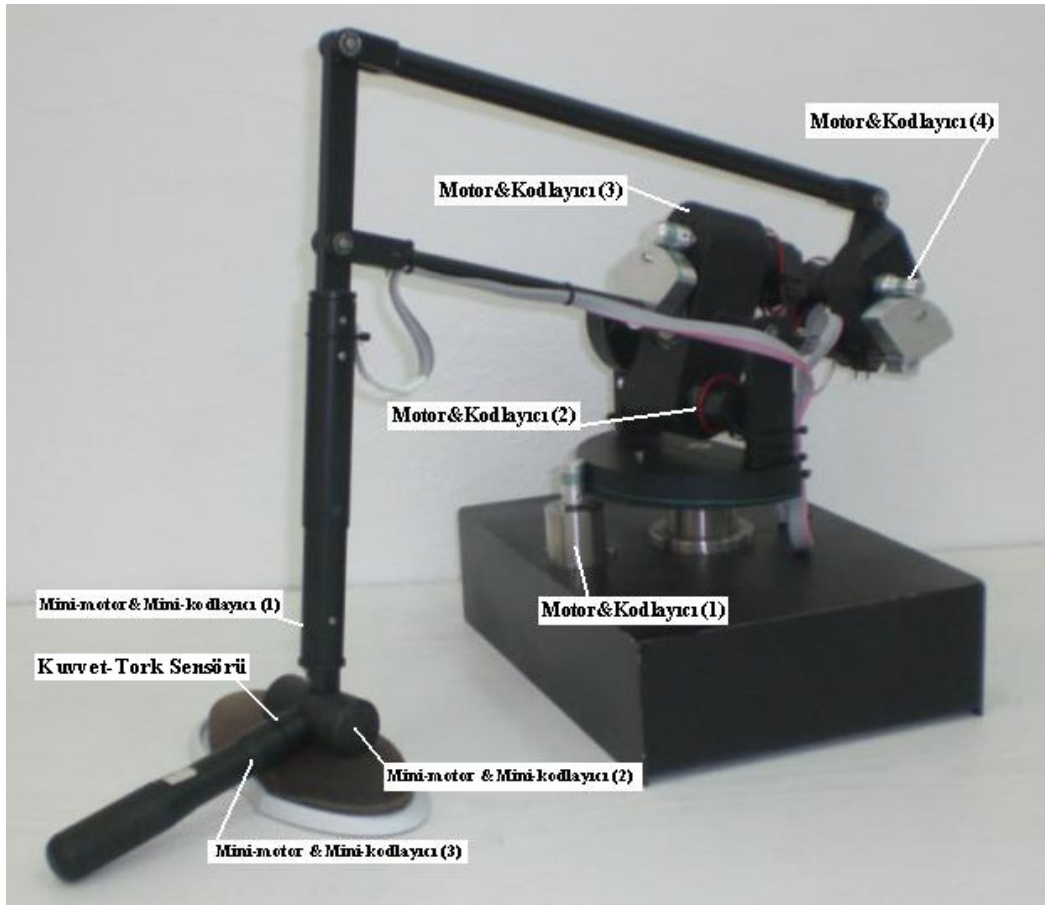
Önceki bölümlerde yapılan ağırlık merkezi balans ayarı ve katılık analizleri doğrultusunda 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın birçok parçasının 7000 serisi alüminyum malzemedен, karşı ağırlık olarak düşünülen parçaların ise çelik malzemedен üretilmesinin uygun olacağına karar verilmiştir. Fakat bu üretim yüksek maliyet gerektirdiğinden üretilecek parçaların hatalı bir tasarıma sahip olmaması gerekmektedir. Bu nedenle, 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın son halini üretmeden önce cihazın bir prototipinin üretilmesine karar verilmiştir. Bu prototip, üniversitemiz bünyesinde bulunan hızlı prototip tezgâhında üretilmiştir. Bu tezgâh parça imalatında hammadde olarak poliamit malzeme kullanmaktadır.



Şekil 43. Prototip “haptic” cihaz

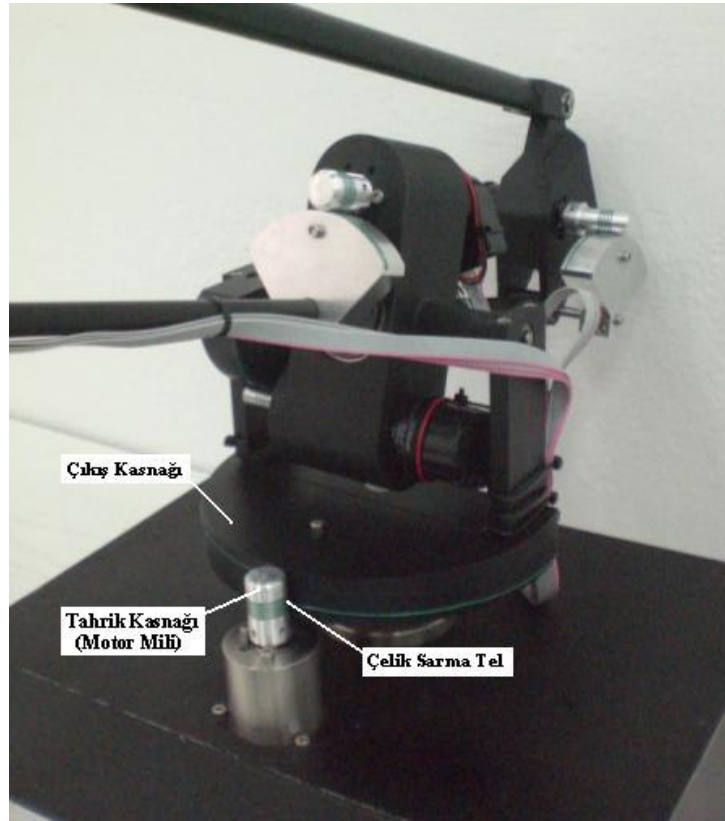
Prototip montaj aşamasında, tasarlanan parçaların çalışmaları test edilmiş ve tasarımın uygun olduğu görülmüştür. Şekil 43’ te üretilen prototip “haptic” cihaz görülmektedir. Fakat özellikle uzun elemanların yük altında eğildikleri ve kalıcı şekil bozuklukları olduğu görülmüştür. Bu durumun, az da olsa diğer parçalar için de geçerli olduğu tespit edilmiş ve bu

Proje kapsamında üretilen 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın nihai hali Şekil 46’ da gösterilmektedir. Cihaz 3 serbestlik dereceli iki seri konfigürasyonun birbirine paralel bir yapı ile (paralelogram) birleşiminden oluşmaktadır. “haptic” uygulamalarda cihazın iki temel görevi vardır. Bunlardan ilki; “haptic” kalemin uzay koordinatlardaki konumunu ve açısal yönelimini en az hata ile saptamak, diğeri ise doğru uzay koordinatlarında kullanıcıya “haptic” kalem aracılığı ile sanal ortamdaki kuvvet ve momenti gerçekçi bir şekilde hissettirmektir. “haptic” cihazın bilek bölgesindeki 3 mini-motor kullanıcıya sanal ortamdaki momentleri hissettirmek, diğeri dört motor ise kullanıcıya sanal ortamdaki kuvvetleri hissettirmek için görev yapmaktadır. “haptic” kalemin kendi üç eksenli etrafında dönmesi (dönme-başvurma-yalpalama eksenleri) mini-motorların arkasına yerleştirilmiş olan üç adet mini-kodlayıcı (mini-encoder) ile “haptic” kalemin uzaydaki yer değiştirmesi ise diğeri dört motorun arkasına yerleştirilmiş kodlayıcılar (encoder) ile saptanmaktadır. Bu motorlar ve kodlayıcılar Şekil 46’ da tabandan itibaren numaralandırılmıştır.



Şekil 46. Üretilen 7 serbestlik dereceli “haptic” cihaz

Üretilen bu cihaza ait tasarım kriterleri Tablo2’ de verilmişti. 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın kontrol çalışmalarına başlamadan önce cihazın tasarım kriterleri açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla her bir tasarım kriteri tek tek ele alınmıştır. Cihazın çalışma hacmi ve uç noktadaki kuvvet ve moment hesaplamaları önceki bölümlerde ayrıntıları ile gösterilmiştir. Uzunlukları, eklem değişkeni limitleri ve motor seçimleri önceki bölümlerde yapılmıştır. Cihazın tasarımındaki diğer bir kriter ise cihazın konumsal ve açısal çözünürlüğüdür. Dolayısı ile cihazın motorları ile uzuvları arasında herhangi bir boşluk (backlash) bırakılmamalıdır. Bu amaçla mini-motorların uçlarındaki çevrim oranları sıfır boşluklu (zero-backlash) mini dişli kutuları ile sağlanmaktadır. Diğer motorlarda ise tel tahrikli hareket iletim sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemde tel büyük kasnağa bir kez, küçük kasnağa (motor miline) üç kez sarılmaktadır ve büyük kasnağın üzerine bir gerdirme mekanizması ile sabitlenmiştir. Böylece motordan uzuvlara, uzuvlardan motora gelen hareket boşluksuz olarak iletilmektedir. Bu da cihazın çözünürlüğünün sadece kodlayıcıların hassasiyetine bağlı kılmaktadır. Şekil 47 tel tahrikli iletim sisteminin cihaz üzerindeki uygulamasını göstermektedir.



Şekil 47. 7 Serbestlik dereceli “haptic” cihazın tel tahrikli iletim mekanizması

Cihazın çözünürlük analizini iki aşamada gerçekleştirmek gerekir. Bunlar açısal ve konumsal çözünürlüktür. Açısal çözünürlük için mini-motor arkasına yerleştirilmiş kodlayıcılar ele alınmalıdır. Konumsal çözünürlük için ise diğer kodlayıcıları en kötü koşulda düşünmek gerekir (Cihazın uzuvlarının en açık olduğu konumunun her bir motora göre analizi).

Açısal çözünürlük:

$$R_A = \frac{\text{Bir tam dönüş açısı}}{(\text{Dönüş başına sinyal sayısı})(\text{Çevrim oranı})} = \frac{360^0}{(1000)(76/1)} \cong 0.005^0$$

Konumsal çözünürlük:

Konumsal çözünürlük için cihazın uzuvlarının en açık hali ve ilk dört kodlayıcı ele alınmıştır (en kötü koşul). En açık halde uç nokta ilk üç kodlayıcıdan maksimum 500 mm ve dördüncü kodlayıcıdan ise 250 mm uzaklıktadır ve kodlayıcının sinyal sayısı kodlayıcı yapısından (4 quadrature) dolayı 4 ile çarpılarak işleme sokulmalıdır (4*1000=4000). Bu durumda, kodlayıcı 1 sinyal okuyacak kadar kodlayıcının bağlı olduğu eklem hareket ettirilir ve diğer linkler değiştirilmeden uç noktanın ne kadar yer değiştirdiğine bakılır. Bu da konumsal çözünürlüğü verir. Söz konusu hesaplamalar ilk dört kodlayıcı için sırası ile aşağıdaki gibidir (Çevrim oranları motor seçimi bölümünde önceden belirlenmişti).

$$R_{K1} = \frac{\text{Bir sinyale karşılık dönme açısı}}{(\text{Bir tam dönüş açısı})(\text{Çevrim oranı})} \cdot 2\pi r = \frac{360/4000}{360.(10/1)} \cdot 2\pi(500mm) \cong 0.08mm$$

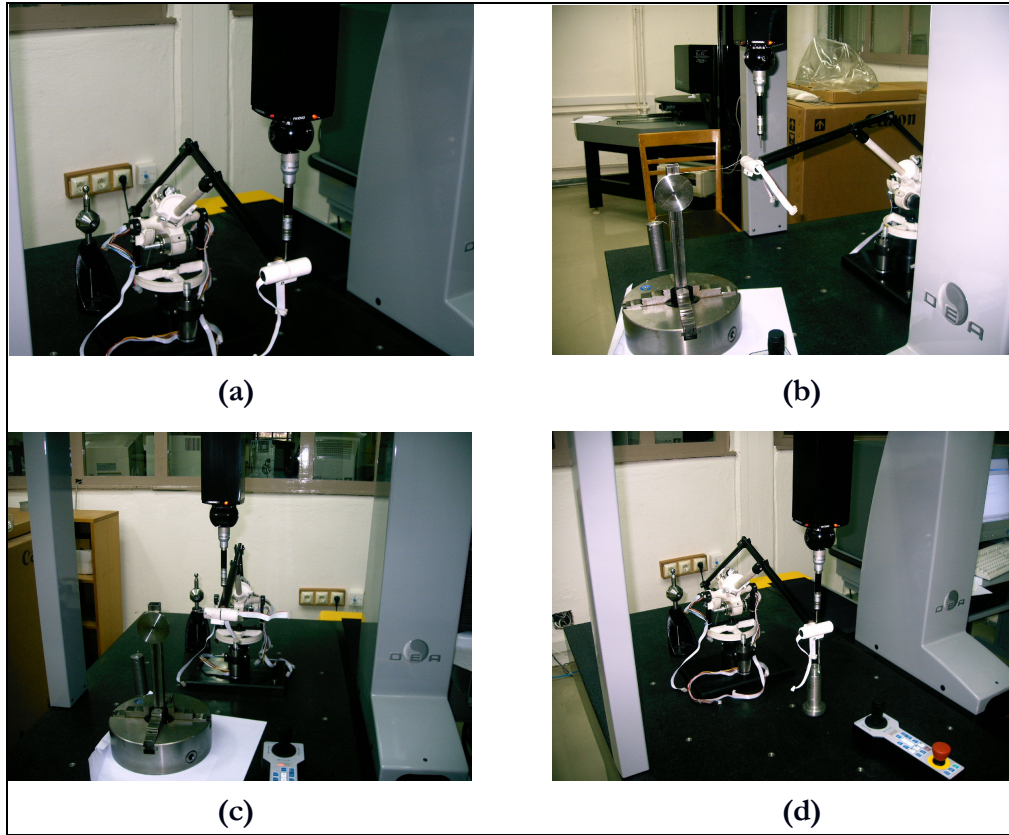
$$R_{K2} = \frac{\text{Bir sinyale karşılık dönme açısı}}{(\text{Bir tam dönüş açısı})(\text{Çevrim oranı})} \cdot 2\pi r = \frac{360/4000}{360.(8/1)} \cdot 2\pi(500mm) \cong 0.1mm$$

$$R_{K3} = \frac{\text{Bir sinyale karşılık dönme açısı}}{(\text{Bir tam dönüş açısı})(\text{Çevrim oranı})} \cdot 2\pi r = \frac{360/4000}{360.(8/1)} \cdot 2\pi(500mm) \cong 0.1mm$$

$$R_{K4} = \frac{\text{Bir sinyale karşılık dönme açısı}}{(\text{Bir tam dönüş açısı})(\text{Çevrim oranı})} \cdot 2\pi r = \frac{360/4000}{360.(5/1)} \cdot 2\pi(250mm) \cong 0.08mm$$

En kötü durum göz önünde bulundurulduğunda açısal çözünürlük $0,005^\circ$ konumsal çözünürlük 0,1 mm olarak belirlenebilir. Ancak bu hesaplamaların teorik hesaplamalar olduğunu göz ardı etmemek gerekir.

Son olarak cihazın rijitliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla “haptic” cihaz uzuvlar en açık konumda iken eklemleri kilitleyerek uç noktaya sırası x, y, z doğrultularında ağırlık asılmıştır. Bu işlem sonrasında uç noktadaki yer değiştirme CMM ile hassas olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sonucunda cihazın rijitliği yaklaşık olarak 1N/mm olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçüm Şekil 48’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

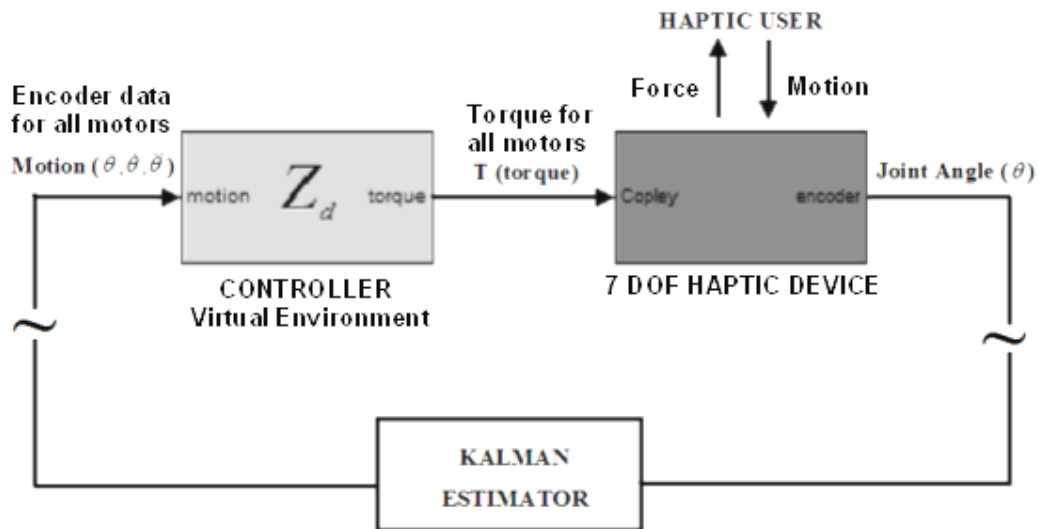


Şekil 48. Üretilen “haptic” cihaz için CMM’de rijitlik ölçümü

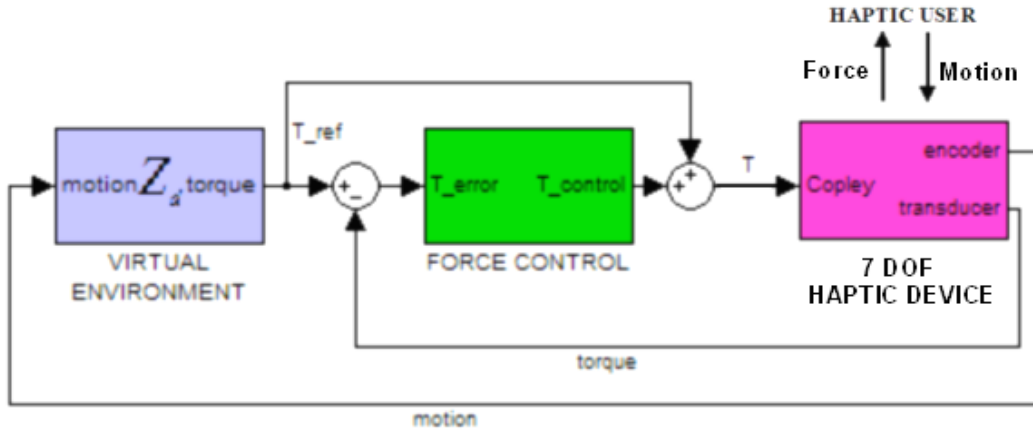
9. 7 Serbestlik Dereceli ‘‘Haptic’’ Cihazın Kontrol alışmaları ve Arayüz Tasarımı

Kontrol çalışmalarına doğrudan 7 serbestlik dereceli ‘‘haptic’’ cihaz üzerinde başlamak yerine tek serbestlik dereceli bir ‘‘haptic’’ kutu ile başlanmıştır. ‘‘haptic’’ kutunun kontrolü ile ilgili bütün bilgiler bölüm 7’ de ayrıntıları ile verilmiştir. ‘‘haptic’’ kontrolünde başlıca iki tip kontrol modeli kullanılmaktadır. Bunlar empedans kontrol ve admitans kontrol modelidir.

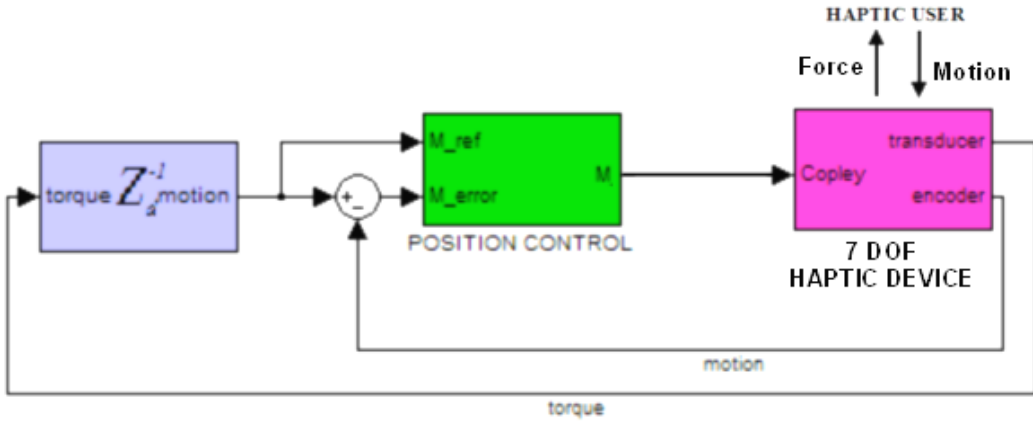
Empedans kontrol modeli kullanıcının hareketine karşılık sanal ortam özelliklerine göre bir referans kuvvet hesaplar ve bu kuvveti kullanıcıya hissettirmeye çalışır. Bu tip bir kontrol cihazın kullanıcıya sunacağı kuvvetin düzenlenmesinde herhangi bir kuvvet geri beslemesi olmadığı için açık çevrim kuvvet kontrolü (open-loop force control) olarak da adlandırılır. Açık evrim kontrolden başka kuvvet geri beslemesi ile kapalı çevrim bir kontrol kullanıcının sanal ortamı daha hassas hissetmesini olanak sağlamaktadır. Admitans kontrol ise tam tersi olup kullanıcının uyguladığı kuvvete karşılık bir referans hareket hesaplar ve bu hareketi kontrol etmeye çalışır. Bu kontrol tipinde kullanıcın uyguladığı kuvvetin algılanması gerektiğinden bir kuvvet algılayıcısına gereksinim vardır. Bu algoritmaların MATLAB® Simulink’ te oluşturulmuş modelleri Şekil 49, 50 ve 51’ de verilmiştir.



Şekil 49. Açık evrim empedans kontrol diyagramı



Şekil 50. Kuvvet geri-beslemeli empedans kontrol modeli

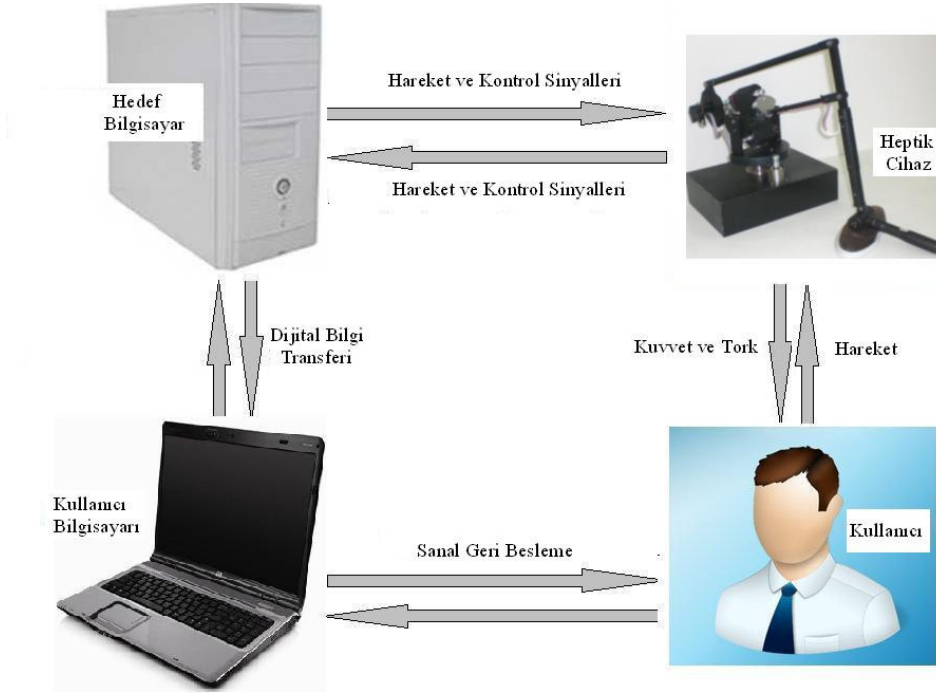


Şekil 551. Admitans kontrol modeli

7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın açık çevrim empedans kontrolünde her bir ekleme yerleştirilen kodlayıcılardan alınan sinyalden eklem açısı bilgileri çıkarılır ve bu bilgilerden ileri kinematik kullanılarak cihazın uç noktasını konumu ve yönelimi elde edilir. Daha sonra Kalman filtresi kullanarak “haptic” kalemin hız, ivme, açısal hız ve açısal ivme tahminleri başarılı bir şekilde yapılır. Bu bilgilerin elde edilmesi, sönümlenme ve atalet kuvvetlerinin benzetimi (simülasyonu) için gerekli olduğundan, “haptic” uygulamalarda önemli bir yere sahiptir.

Şekil 52 “haptic” cihaz sisteminin tamamının işleyişini göstermektedir. Sistem hedef bilgisayar, kullanıcı bilgisayarı ve veri toplama kartları ile donanımsal olarak

tamamlanmaktadır. Yazılımsal olarak MATLAB® yazılımının kullanılması ile sistem bir bütünlük oluşturur.

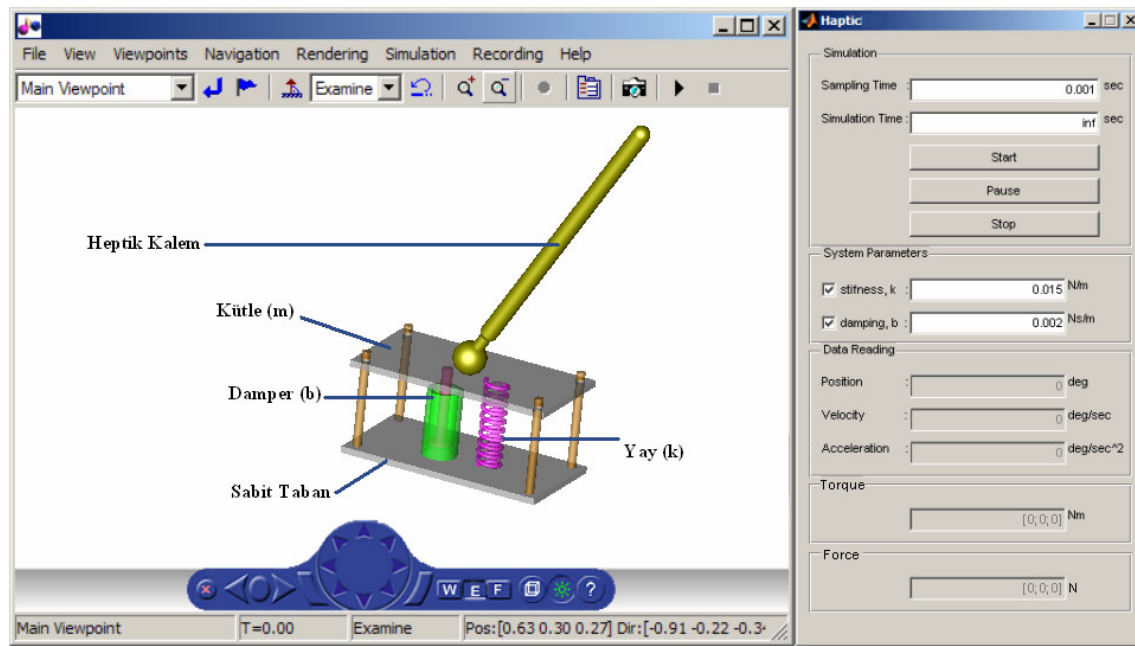


Şekil 52. 7 Serbestlik dereceli "haptic" sistem şeması

"Haptic" sistem şu şekilde çalışmaktadır:

- MATLAB/Simulink® ile geliştirilen modeller derlenerek TCP/IP bağlantısı ile hedef bilgisayara yüklenir. Hedef bilgisayar üzerinde daha önceden MATLAB® kullanılarak oluşturulan "kernel" (çekirdek yazılım) çalışmaktadır.
- Counter/Timer veri toplama kartı ile her bir motorun kodlayıcı sinyalleri okunur. Bu sinyaller kinematik denklemlerle konum bilgisine dönüştürülür, daha sonra Kalman algoritması ile işlenerek hız ve ivme kestirimi hassas bir şekilde yapılır (deneylerde elde edilen sonuçlar başarılıdır).
- Veri toplama kartı kullanılarak analog ve sayısal (dijital) veri giriş/çıkış işlemleri gerçekleştirilir. Benzetilen sanal ortam için kontrolcüde hesaplanan kuvvet ve tork jacobian matrisi ile motorların uygulaması gereken tork bilgilerine dönüştürülür ve bu torkları üretmek için motorun servo sürücüsüne referans voltaj kartın analog çıkışı ile

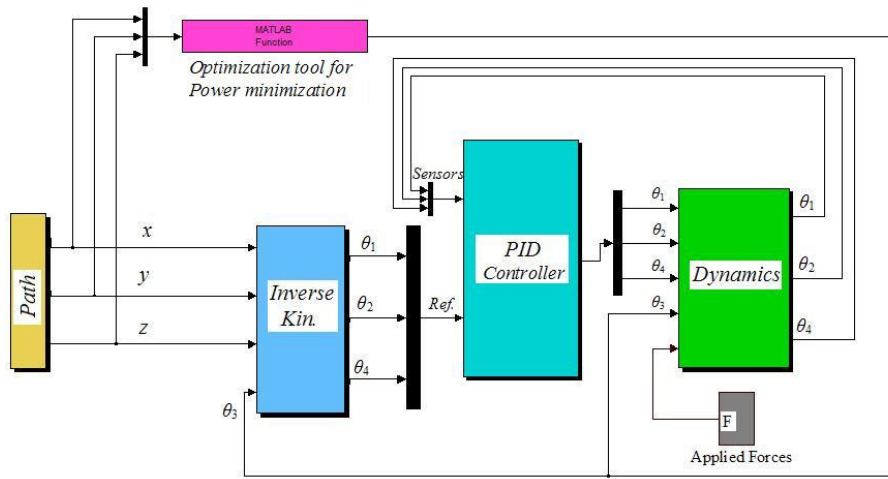
Kullanıcıya uygulama sırasında bu modeli benzetmek ve görüntülemek için bir MATLAB/Simulink® aracı olan “Virtual Reality Toolbox®” kullanılmıştır. Gösterilen kütle/yay/damper modeli “haptic” kalem ile birlikte Şekil 54’te olduğu gibi modellenmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi kullanıcı “haptic” cihazın kalemini sanal hacim içinde üç boyutlu olarak hareket ettirebilmektedir. Kalem sanal ortamdaki kütle ile temas ettiği anda düşey doğrultuda hareket ettirildiğinde sanal mekanik sistemin cevabını elinde hissedecektir. Mekanik sistemin cevabı kullanıcının kütleyle verdiği yer değiştirme, hız ve ivmeye bağlı olarak değişmektedir ve sanal model dinamik olarak $F = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx$ denklemini kullanmaktadır (denklemdaki m ivme düşey ivme için indirgenmiş kütle, b düşey hız için indirgenmiş damper katsayısını, k düşey konum için indirgenmiş yay katsayısını göstermektedir). *Bu uygulamada “haptic” cihaz ideal bir sistem olarak düşünülmüş olup “haptic” cihazın kendisinden kaynaklanan bütün dinamik ve elektriksel etkiler ihmal edilmiştir.* Bu arayüzde kullanıcı sisteme örnekleme zamanını, simülasyon zamanını, yay sabitini ve damper katsayısını girebilmektedir. Bununla birlikte uç noktanın konumunu, hızını, ivmesini ve “haptic” kalemin üzerine yerleştirilen kuvvet-tork sensörünün ölçtüğü değerleri görebilmektedir (Şekil 54 – Sağdaki GUI).



Şekil 54. Benzetilen sanal ortam modeli (Kütle/Yay/Damper/“Haptic” Kalem)

10. 7 Serbestlik Dereceli “Haptic” Cihazda Harcanan Gücü Minimize Etmek için Örnek Bir Optimizasyon Çalışması

Tasarlanan 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın literatürdeki “haptic” cihazlara göre farkları ve üstünlükleri bölüm 5’ te verilmişti. Bahsedilen üstünlüklerden en önemlisi tasarlanan cihazın aynı uzuv uzunlukları ile daha fazla kuvvet uygulayabilmesidir. Bu özellik bir noktada aynı kuvveti uygulayabilmek için daha az güç harcayarak en uygun postürün (posture-kinematik konum) seçilebileceği anlamına da gelmektedir. Yani cihazın “Redundant” olduğunu düşünerek belirli bir noktada belirli bir kuvveti sağlamak için işlem sırasında en uygun postür seçilebilir. Böylece motorlarda daha az tork uygulanabilir, dolayısı ile minimum güç harcanabilir. Bu işlem bir optimizasyon işlemidir. Cihazdaki “redundancy” cihazın bilek kısmına kadar olan konumlama bölümündedir (ilk dört motoru kapsayan kısım). Cihazın ilk dört motorunu göz önünde bulundurarak (bilek kısmına kadar olan kısım) “haptic” kalemin ucunda istenen kuvveti uygulamak için optimum postür seçilebilir. Bu amaçla ilk olarak simülasyon ortamında bir optimizasyon çalışması yapılmıştır, daha sonra bu çalışmalardan biri “haptic” cihazın üzerinde gerçek zamanlı olarak denenmiş ve ölçümler yapılmıştır. Söz konusu simülasyon için MATLAB/Simulink ortamında bir model oluşturulmuştur (Bu çalışmalarda “haptic” cihazın ilk dört serbestlik derecesi standart bir “redundant manipülatör” olarak düşünülmüştür). Bu simülasyon modeli Şekil 55’ te gösterilmiştir.



Şekil 55. 7 Serbestlik dereceli “haptic” cihazın konumlama kısmı (Bilek kısmına kadar olan kısım) için optimizasyon tabanlı Simulink modeli

Şekil 55'teki Simulink modelinde optimizasyon kutusu optimum postürün belirlenmesinde fazlalık (redundant) olarak kabul edilen üçüncü eklem açısının uygun değerini bulmak için görev yapmaktadır. Bu açı değerine bağlı olarak optimum postür bulunabilmektedir. Gerçekleştirilen optimizasyonun matematik yapısından bahsetmek gerekirse aşağıdaki bağıntılar verilebilir.

$$\bar{Q} = \bar{G} - \hat{J}_r^T \cdot \bar{R}$$

Denklemdaki parametrelerden, \hat{J}_r^T bilek koordinatlarını eklem koordinatlarına dönüştüren transformasyon matrisini, \hat{J} Jacobian matrisini, \bar{Q} motor torklarını, \bar{R} bilek noktasında uygulama torkları ve kuvvetlerini, \bar{G} cihazın ağırlığından gelen etkileri göstermektedir. Cihazın ağırlık balansı yapıldığı için \bar{G} optimizasyonda ihmal edilmiştir.

$$\bar{Q} = -\hat{J}_r^T \cdot \bar{R}$$

Bu çalışmadaki optimizasyon mantığında aşağıdaki matematiksel yapı ve MATLAB'ın optimizasyon fonksiyonlarından biri olan "fminbnd" kullanılmıştır

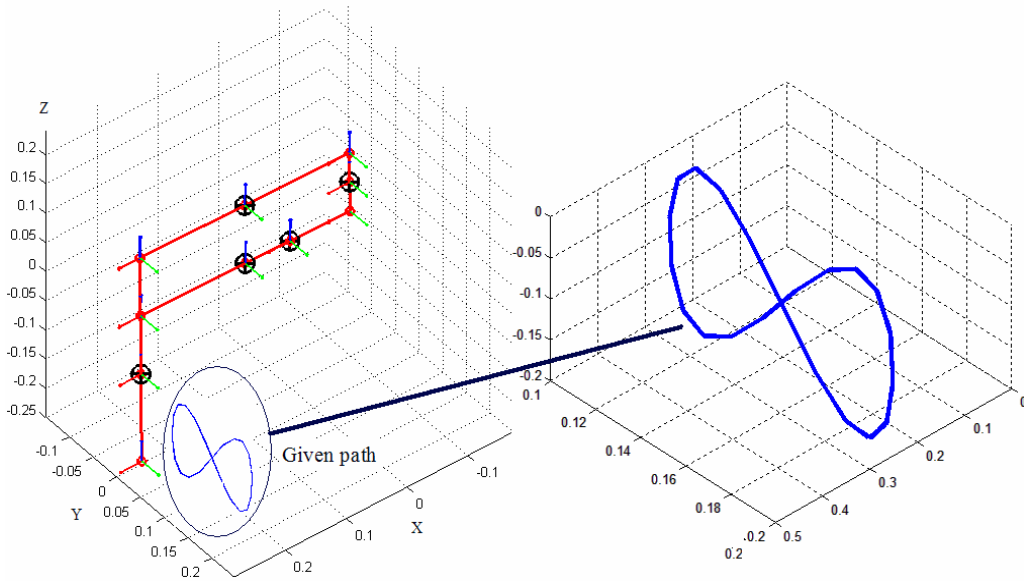
$$\left\{ \begin{array}{l} f(\theta_3) = \sum_{i=1}^4 |Q_i| = \text{Konumlama kısmı için motor torklarının toplamı} \\ f(\theta_3)'ü \text{ minimum yapmak için } (\theta_3)' ü \text{ bul} \\ \text{öyleki} \\ \text{alt limit} < \theta_3 < \text{üst limit} \end{array} \right.$$

Bu simülasyonda iki ayrı durum gerçekleştirilmiştir;

Durum 1. Sabit bir kuvvet altında cihaza bir rota verilir. Cihaz önce θ_3 (tabandan itibaren 3. eklem) sıfır açısına kilitleyerek çalıştırılır ve toplam tork değerleri grafiğe dökülür, daha sonra optimizasyon tabanlı cihaz çalıştırılır ve toplam tork değerleri grafiğe dökülür. Aradaki fark güç kazanımını ortaya koymaktadır.

Durum 2. Sabit bir noktada kuvvetin büyüklüğü değiştirilmeden yönü değiştirilir. Cihaz önce θ_3 sıfır açısına kilitlenerek çalıştırılır ve toplam tork değerleri grafiğe dökülür, daha sonra optimizasyon tabanlı cihaz çalıştırılır ve toplam tork değerleri grafiğe dökülür. Aradaki fark güç kazanımını ortaya koymaktadır.

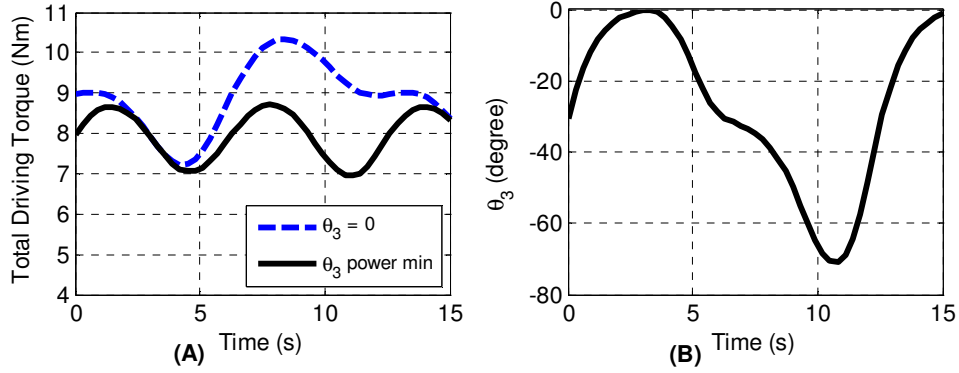
Bütün bu uygulamaları görsel hale getirmek için MATLAB/Simmechanics'te cihazın kinematik ve dinamik modeli oluşturulmuştur. Şekil 56 bu cihazın konumlama kısmının Simmechanics modelini ve simülasyonun ilk aşamasındaki (Durum1) sisteme verilen rotayı göstermektedir.



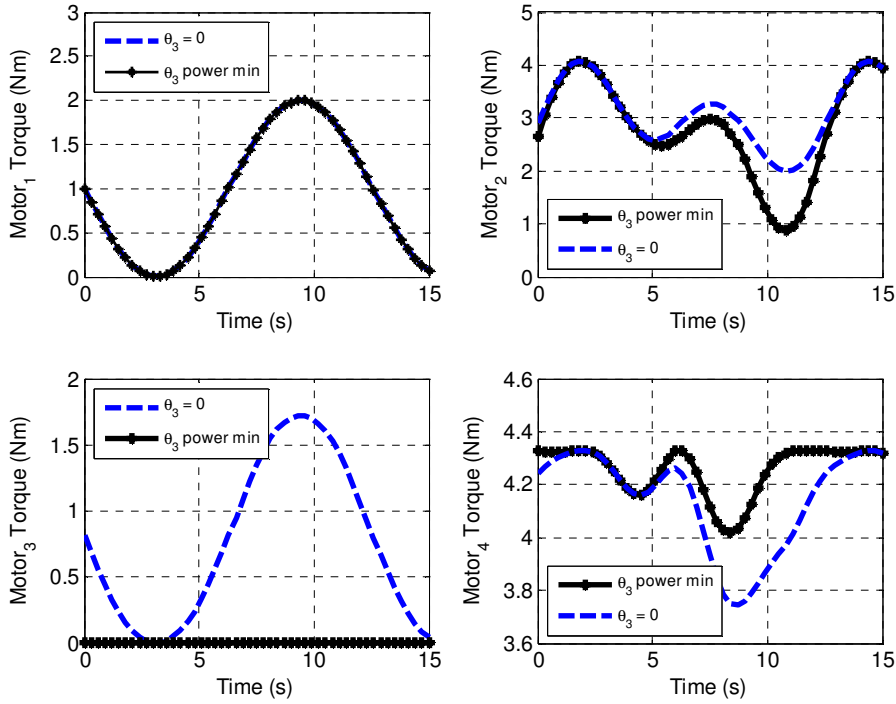
Şekil 56. Cihazın konumlama kısmı için simmechanics modeli ve sisteme verilen rota ($x=0.25$, $y=0.15+0.1\sin(t/2)$, $z=-0.05\sin(t)$ metre olarak).

Deneysel sonuçta elde edilen grafikler sırası ile Şekil 57, 58, 59, 60, 61' de verilmiştir. Bu şekillerden ilk dördü sisteme verilen rota üzerinde ve sabit kuvvet altında gerekli olan her bir motor torkunun, motor torklarının toplamlarının ve harcanan gücün zamana bağlı değişimini göstermektedir (Kuvvetlerin büyüklükleri grafiklerin altında yazılıdır). Son şekil ise sabit bir noktada kuvvetin yönünü değiştirerek elde edilen tork grafiklerini göstermektedir. Her bir grafik tek tek incelendiğinde optimum postür kontrolü ile tek bir postürde gerçekleştirilen operasyonlardan daha az güç harcanarak aynı işin gerçekleştirilebileceği anlaşılmaktadır. Bu uygulama literatürde daha önce denenmemiştir. Bütün bu çalışmalar "Optimal Posture

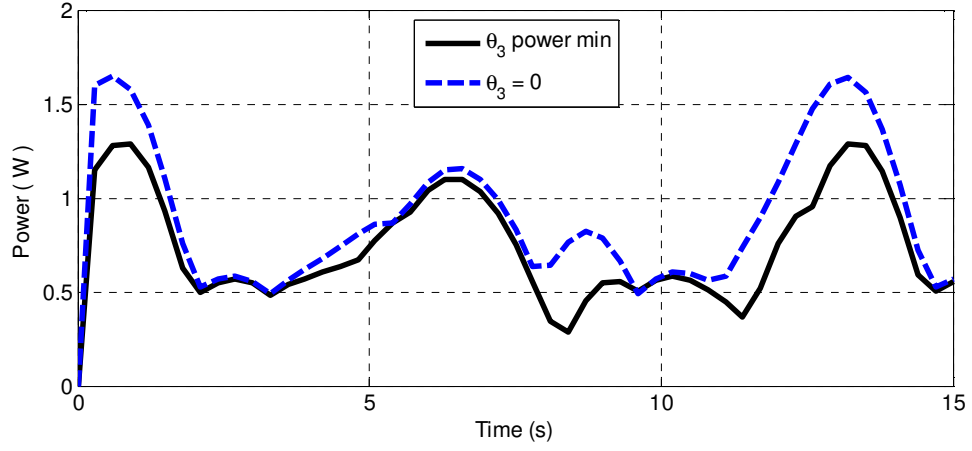
Control for a 7 DOF Haptic Device based on Power Minimization” başlığı altında özellikle “haptic” cihazların ve uygulamalarının geliştirilmesine yönelik özgün çalışmaların yer aldığı bu alanda dünyaca tanınan “Eurohaptics 2008 ” konferansında projemiz kapsamında sunulmuştur.



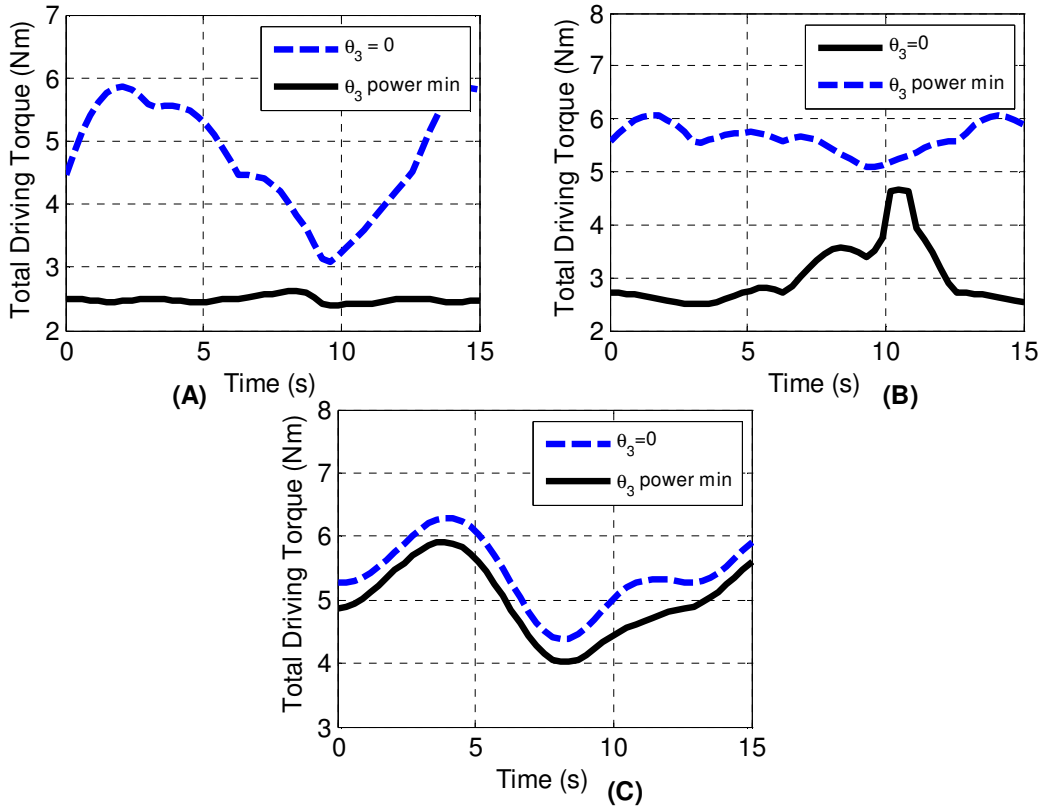
Şekil 57. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1 ve $F_x=F_y=F_z=10N$) cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi (A) ve buna karşılık fazlalık ekle açısının değişimi (B)



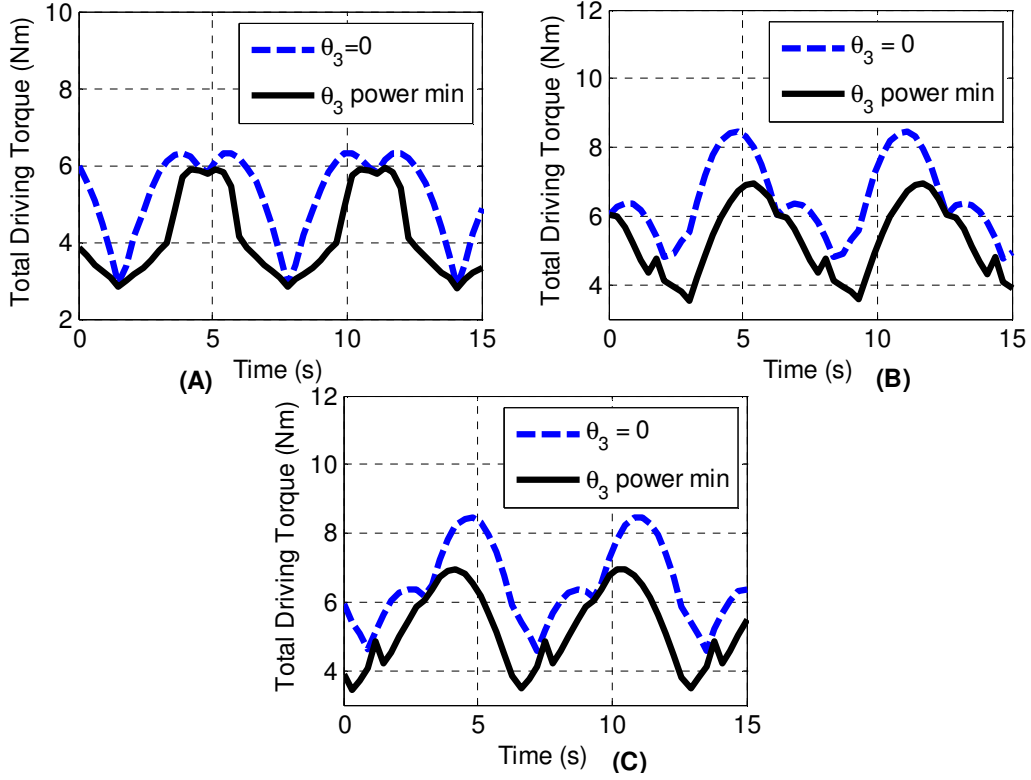
Şekil 58. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1 ve $F_x=F_y=F_z=10N$) cihazın konumlama kısmının her bir motor için torklarının zamanla değişimi



Şekil 59. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1 ve $F_x=F_y=F_z=10N$) cihazın konumlama kısmı için gerekli toplam güç



Şekil 60. Sabit kuvvet etkisi altında ve değişken rotada [Durum1-(A) $F_x=-10N, F_y=0, F_z=0$; (B) $F_x=0, F_y=-10N, F_z=0$ ve (C) $F_x=0, F_x=0, F_z=-10N$] cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi

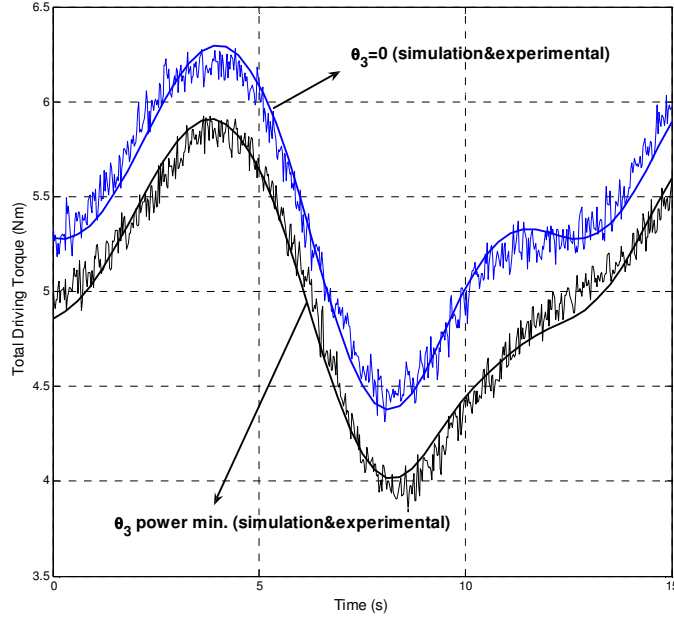


Şekil 61. Değişken kuvvet etkisi altında ve tek bir noktada (Durum2- $x=0.25$ m, $y=0.25$ m, $z=0.25$ m) cihazın konumlama kısmının motor torqları toplamının zamanla değişimi (A) $F_x=10\sin(0.5t)$ N, $F_y=10\sin(0.5t+ \pi/2)$ N, $F_z=0$ N; (B) $F_x=0$ N, $F_y=10\sin(0.5t)$ N, $F_z=10\sin(0.5t+\pi/2)$ N; (C) $F_x=10\sin(0.5t+ \pi/2)$ N, $F_y=0$ N, $F_z=10\sin(0.5t)$ N

Bu simülasyonlardaki koşullarının hepsini gerçek ortamda uygulamak mümkün değildir. Çünkü sisteme verilen rota üzerinde yatay doğrultuda (x ve y doğrultusu) istenildiği gibi kuvveti uygulamak mümkün değildir. Fakat sabit bir kuvveti düşey doğrultuda uygulamak cihazın uç noktasına bir ağırlık asarak mümkün olabilmektedir. Dolayısı ile bilinen bir rota üzerinde düşey doğrultudaki 10 N luk kuvvet altında gerçekleştirilen simülasyonu ürettiğimiz cihaz üzerinde uygulamak mümkün olmuştur. Bu amaçla cihazın ucuna 10 N' nu sağlayacak oranda bir ağırlık montajlanmıştır ve Şekil 60-C yi veren deney gerçek ortamda da gerçekleştirilmiştir. Sisteme yukarıda bahsedildiği gibi bir rota verilmiştir ($x=0.25$, $y=0.15+0.1\sin(t/2)$, $z=-0.05\sin(t)$ metre olarak) ve montajlanan ağırlık etkisi altında "haptic" kalemin bu rotayı takip etmesi sağlanmıştır. Bu sırada her bir motorun çektiği akım değerleri zamana bağlı olarak veri toplama kartları aracılığı ile kaydedilmiştir, aynı zamanda bu akım

değerleri her bir motorun tork katsayısı ile çarpılarak motorların uyguladığı torkların toplamı zamana bağlı olarak grafiğe dökülmüştür. Bu deney hem sabit posturde ($\theta_3=0$) hem de optimizasyon tabanlı değişken posturde gerçekleştirilmiştir ve aynı deneyin simülasyon grafiği üzerine çizdirilmiştir. Şekil 62 söz konusu uygulamanın grafiğini vermektedir. Bu uygulama optimal postur kontrolü yaparak 7 serbestlik dereceli “haptic” cihazın sabit postüre göre daha az güç ile aynı işi yapabileceğini ispatlamaktadır.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Motorların uyguladığı} \\ \text{torkların toplamı} \end{array} \right\} = \sum_{i=1}^4 \left\{ \begin{array}{l} \text{Herbir motorun} \\ \text{çektiği akım} \end{array} \right\} * \left\{ \begin{array}{l} \text{Herbir motorun} \\ \text{tork katsayısı} \end{array} \right\}$$



Şekil 62. Sabit düşey kuvvet etkisi altında ve değişken rotada (Durum1- $F_x=0$, $F_y=0$, $F_z=-10$ N) cihazın konumlama kısmının motor torkları toplamının zamanla değişimi (Simülasyon ve deneysel sonuçlar)

11. Sonuç

Bu projede sanal gerçeklik uygulamalarında kullanılmak üzere 7 serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz üretimi ve örnek bir arayüz geliştirilmesi amaçlanmıştır. Cihazın tasarımı “haptic” cihazlar için gerekli olan maksimum çalışma hacmi, maksimum kuvvet ve tork, maksimum rijitlik, minimum boşluk, minimum istenmeyen ağırlık gibi tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan cihaz literatürdeki benzerleri ile karşılaştırıldığında diğer tasarım kriterlerinden ödün vermeden %20 daha fazla çalışma hacmine sahiptir. Cihazın üretiminde nihai bir ürün ortaya çıkması için üretim son derece hassas bir şekilde ve özenle gerçekleştirilmiştir. Motorlar, kodlayıcılar, elektronik kartlar, kuvvet-tork sensörü, kablolar gibi bütün ekipmanlar cihazın içinde gömülü olarak yerleştirilmiştir. Üretilen bu 7 serbestlik dereceli cihaz için MATLAB/Virtual Reality Toolbox’ı kullanılarak örnek bir arayüz tasarlanmış ve örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen çalışmalara ek olarak, cihazın uygulama sırasında harcayacağı gücü minimize etmek için optimizasyon tabanlı bir kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. Böyle bir optimizasyon çalışması “haptic” cihazlarda daha önce denenmemiştir. Bu da üretilen cihazın emsalleri ile karşılaştırıldığında üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır.

Referanslar

- [1] http://www.sensable.com/products/phantom_ghost/phantompremium.asp, 10.01.2005.
- [2] <http://ai.stanford.edu/groups/manips/projects/teleoperation/index.html> 10.01.2005.
- [3] A. Fisch, C. Mavroidis, Y. Bar-Cohen, and J. Melli-Huber, "Haptic Devices for Virtual Reality, Telepresence and Human Assistive Robotics." Haptic and Telepresence Robotics, Chapter 4, *ibid*, pp. 73-101.
- [4] <http://web.umn.edu/~vrpl/proj-vbs.htm> 10.01.2005.
- [5] http://www.mpb-technologies.ca/mpbt/haptics/hand_controllers/freedom/freedom.html, 10.01.2005
- [6] http://www.forcedimension.com/fd/avs/home/products/6-dof_delta, 10.01.2005.
- [7] David T. Burns. Design of a six-degree of freedom haptic interface. Master's thesis, Department of Mechanical engineering, Northwestern University, August 1996.
- [8] Thomas H. Massie and J. K. Salisbury. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, November 1994.
- [9] Matt A. Design of a single degree of freedom mechanical breadboard haptic display. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, 1996.
- [10] Grigore C. Burdea. *Force and touch feedback for virtual reality*. A Wiley – Interscience publication, 1996.
- [11] Chris L. Kapuscinski. Motor selection and damper design for a six-degree of freedom haptic display. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, 1997.
- [12] James P. Jamieson and Bryce Wilkins. On establishing the haptic ability of industrial manipulators. Technical report, Department of computer science and software engineering, The University of Melbourne, 2002.
- [13] Aimee P. Phantom-based haptic interaction. Technical report, University of Minnesota.
- [14] Gordon W. Single joint design. Master's thesis, The University of Queensland, 2002.
- [15] Austin H. *Electrical motors and drives*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, second edition edition, 2001.
- [16] Salcudean S.E. and Stocco. L. Isotropy and actuator optimization in haptic interface design. IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2000.
- [17] <http://www.parallemic.org/Reviews/Review003.html> 10.01.2005.

- [18] Albus J.S., Bostelman R., and Dagalakakis N.G., "The NIST ROBOCRANE", *Journal of Robotic Systems*, 10(5): 709-724, 1993.
- [19] Campbell P.D., Swaim P.L., and Thompson C.J., "Charlotte Robot Technology for Space and Terrestrial Applications", 25th International Conference on Environmental Systems, San Diego, SAE Paper 951520., 1995.
- [20] Chen E.Y., Marcus B.A., "EXOS Slip Display Research and Development", ASME International Mech Engr Congress, Chicago, IL, DSC 55(1): 265-270, 1994.
- [21] Ishii M., Sato M., "A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings", *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, MIT Press, Cambridge, MA, 3(1): 81-86, 1994.
- [22] Kontarinis D., Howe R., "Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environments", *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, MIT Press, Cambridge, MA, 4(4): 387-402, 1995.
- [23] Lindemann R., Tesar D., "Construction and Demonstration of a 9-String 6-DOF Force Reflecting Joystick for Telerobotics", NASA International Conference on Space Telerobotics, (4): 55-63, 1989.
- [24] Roberts R.G., Graham T., and Trumpower J.M., "On the Inverse Kinematics and Statics of Cable-Suspended Robots", IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, FL., 1997.
- [25] Stewart D., "A Platform with Six Degrees of Freedom", *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers (London)*, 180(15): 371-386, 1966.
- [26] Berkelman P. J., Hollis R. L., and Salcudean S. E., "Interacting with Virtual Environments using a Magnetic Levitation Haptic Interface", *International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '95*, Pittsburgh, (August 1995).
- [27] Berkelman P.J., Butler Z.J., and Hollis R.L., "Design of a Hemispherical Magnetic Levitation Haptic Interface Device ASME IMECE, Atlanta, November 17-22, DSC-Vol.58 pp. 483-488, 1996
- [28] Hollis R. L., and Salcudean S. E., "Lorenz Levitation Technology: a New Approach to Fine Motion Robotics, Teleoperation, Haptic Interfaces, and Vibration Isolation," *Int'l Symposium for Robotics Research*, Hidden Valley, Pa., October 1-3, 1993.
- [29] Başer Ö, Konukseven E. İ., Koku B. "Haptic Dokunma Hisli Kuvvet Geri Beslemeli Cihaz Tasarımı" *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, Cilt: 7, Sayı:2, sayfa: 68-78, (Kasım 2005).

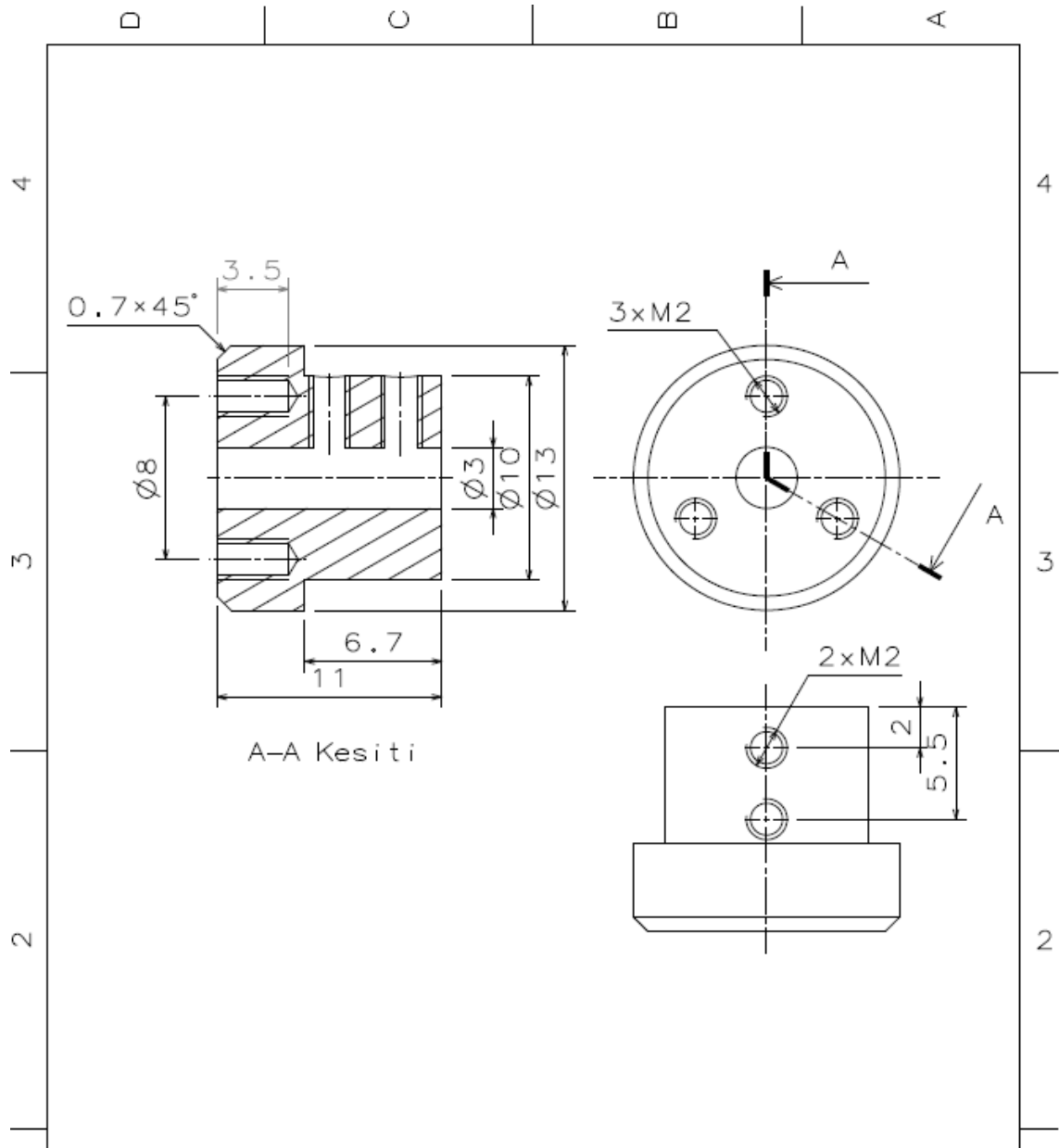
- [30] Başıer Ö., “Haptic Device Design” MS. Thesis, Middle East Technical University, (January 2006).
- [31] Millman, P., Colgate, J.E. “Design of a four degree of freedom force reflecting manipulandum with a specified force/torque workspace.” IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, pp. 1488-1493 (April 1991).
- [32] Townsend, W., “The effect of transmission design on force-controlled manipulator performance.” Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, (April 1988).
- [33] Özgören, M.K., “Application of Exponential Rotation Matrices to the Kinematics Analysis of Manipulators”, in:
Proceedings, Seventh World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Seville, Spain, 1987.
- [34] Özgören, M.K., “Topological analysis of 6-joint serial manipulators and their inverse kinematics solutions”, Mechanism and Machine Theory 37 (2002) 511-547.
- [35] Özgören, M.K., “Position and Velocity Related Singularity Analysis of Manipulators”, in Proceedings, 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milan, Italy, 1995.
- [36] Özgören, M.K., “ME 522 Principle of Robotics Ders Notları”, in ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü.
- [37] John M. Hollerbach “Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom Manipulator” MIT Artificial Intelligence Laboratory 545 Technology Square, Cambridge, MA 02139 USA

EK

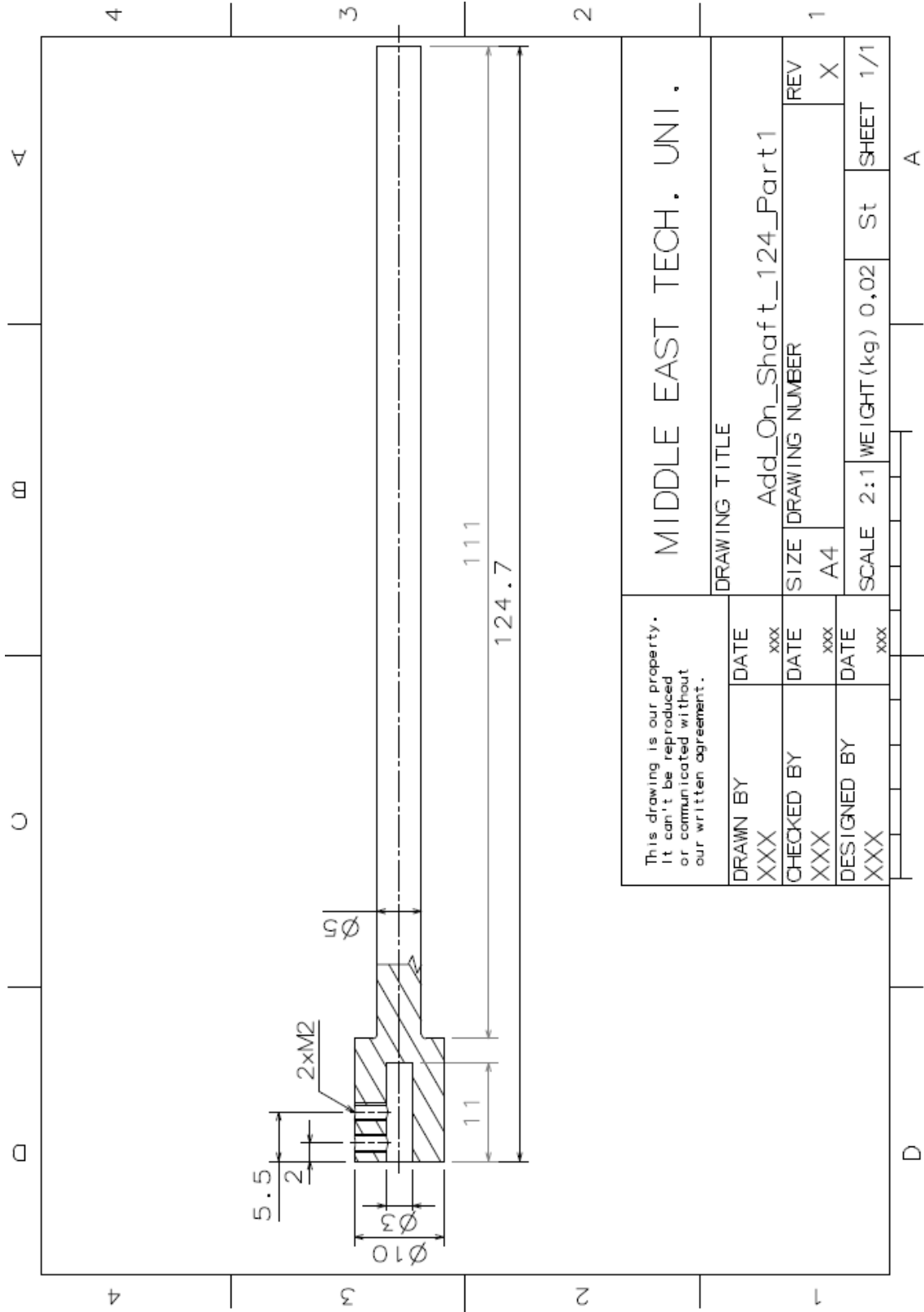
Üretilen 7 Serbestlik Dereceli

“Haptic” Cihazın Teknik

Resimleri



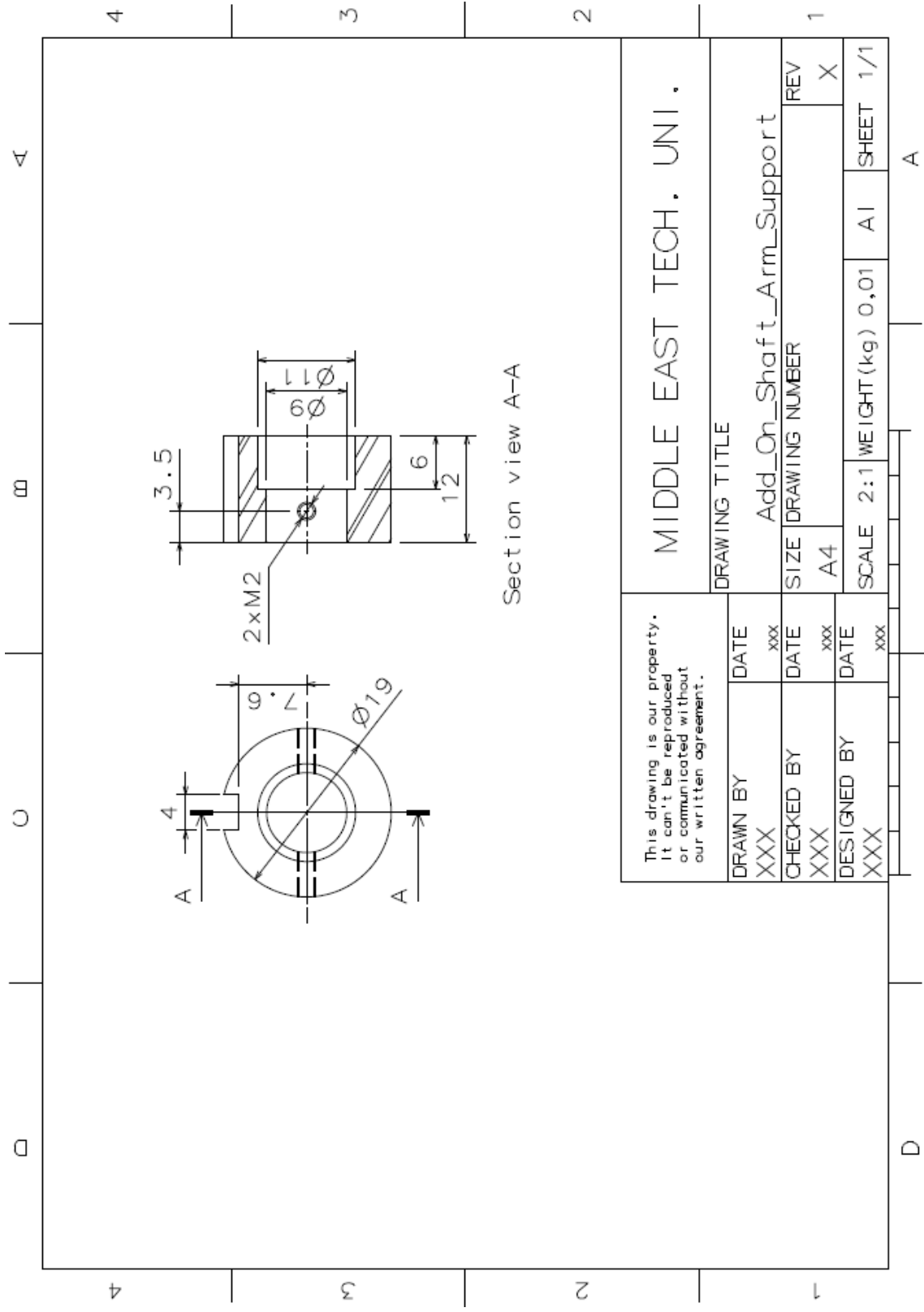
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		MIDDLE EAST TECH. UNI.			
DRAWN BY XXX		DATE xxx		DRAWING TITLE Add_On_Shaft_11_Part1	
CHECKED BY XXX		DATE xxx		SIZE A4	DRAWING NUMBER REV X
DESIGNED BY XXX		DATE xxx		SCALE 4:1	WEIGHT(kg) 0,01 St SHEET 1/1

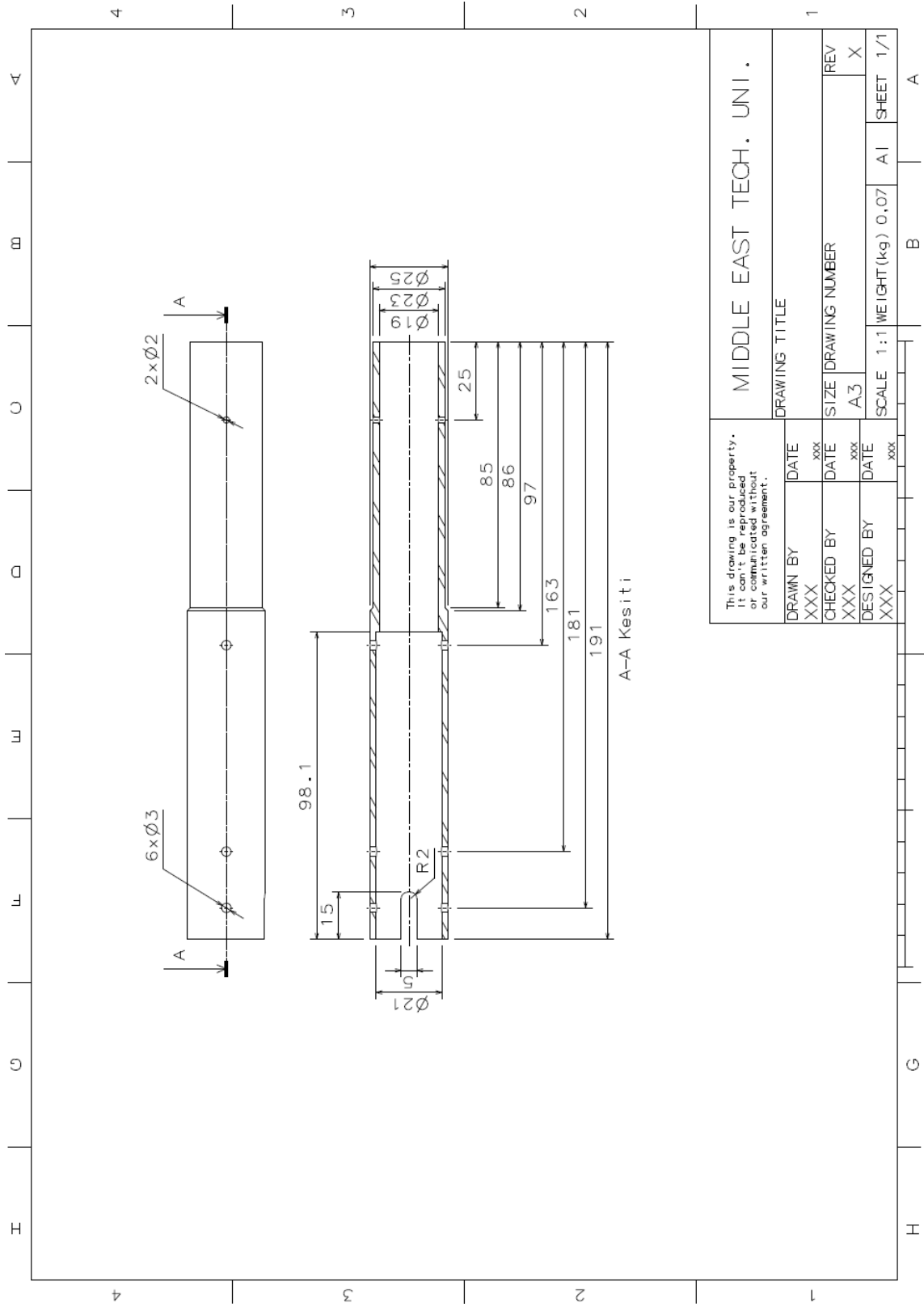


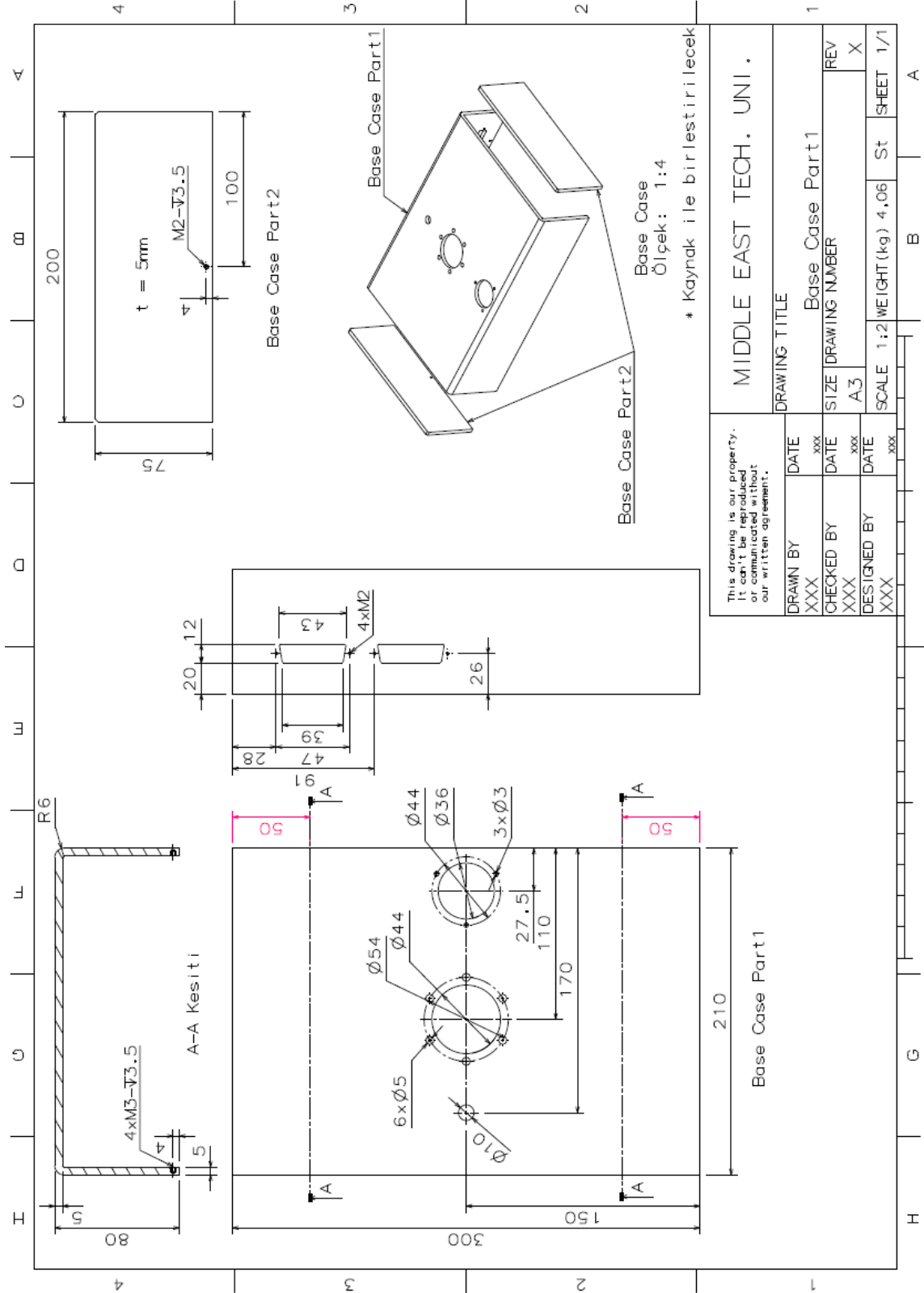
MIDDLE EAST TECH. UNI.

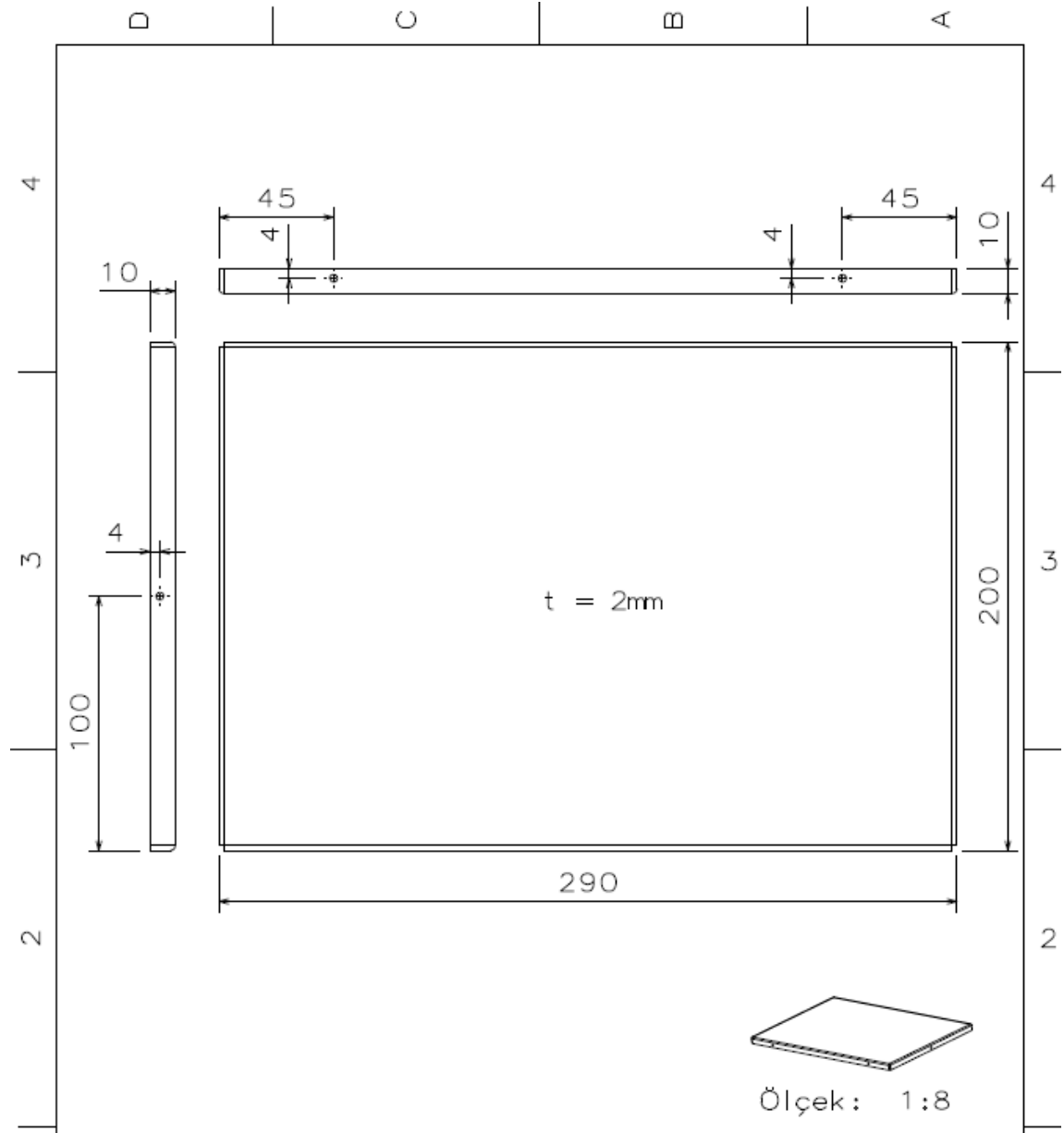
DRAWING TITLE		Add_On_Shaft_124_Part1	
DRAWN BY	DATE	SIZE	REV
XXX	xxx	A4	X
CHECKED BY	DATE	SCALE	SHEET
XXX	xxx	2:1 WEIGHT(kg) 0,02	1/1
DESIGNED BY	DATE	St	
XXX	xxx	A	

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.

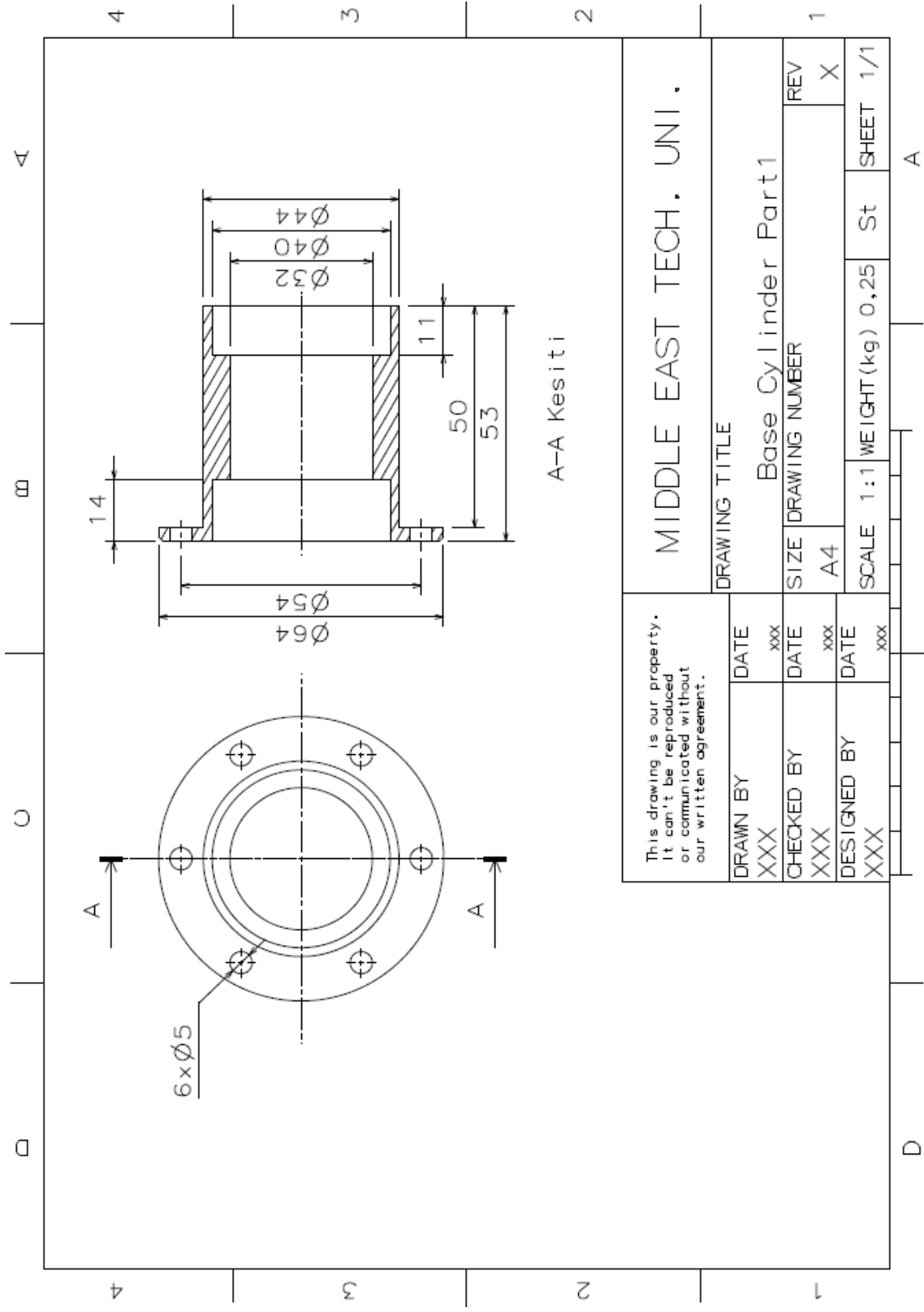


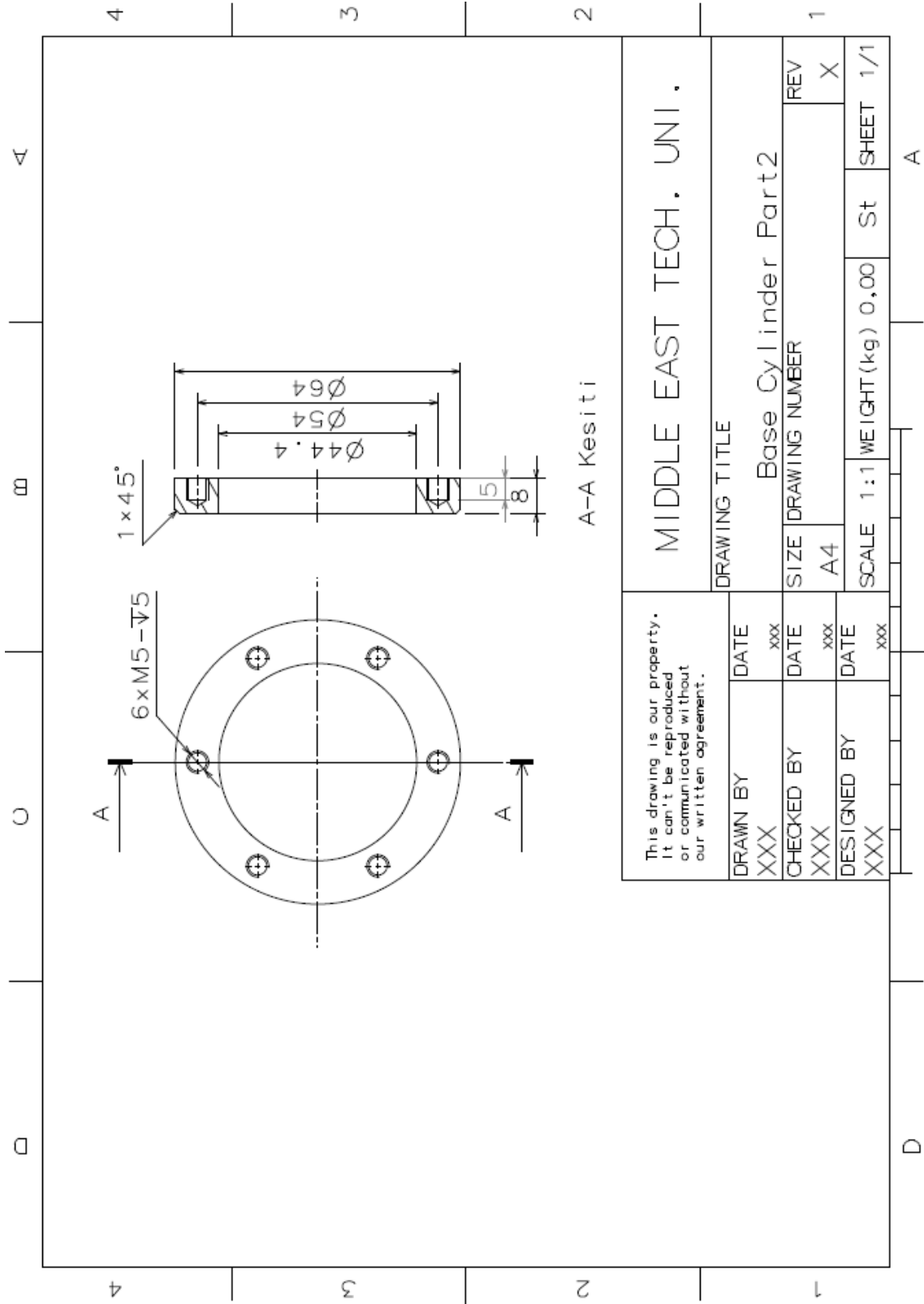


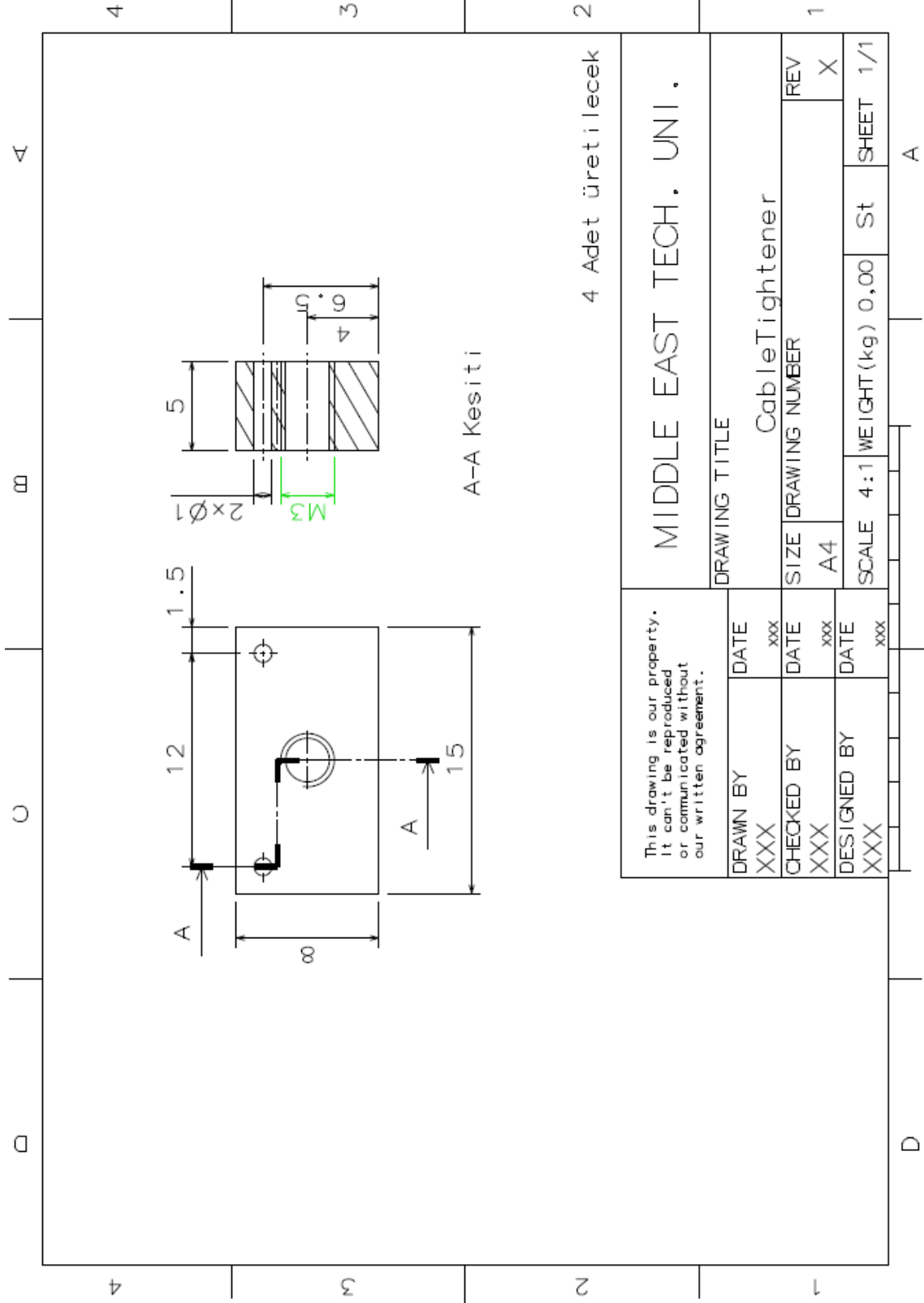




This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		MIDDLE EAST TECH. UNI.			
DRAWN BY XXX		DATE xxx		DRAWING TITLE Base Case Cover	
CHECKED BY XXX		DATE xxx		SIZE A4	DRAWING NUMBER REV X
DESIGNED BY XXX		DATE xxx		SCALE 1:2	WEIGHT(kg) 1,03
				AI	SHEET 1/1







4 Adet üretilecek

MIDDLE EAST TECH. UNI.

DRAWING TITLE

CableTightener

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

DRAWN BY	DATE
XXX	xxx
CHECKED BY	DATE
XXX	xxx
DESIGNED BY	DATE
XXX	xxx

SIZE DRAWING NUMBER

A4

REV

X

SCALE 4:1

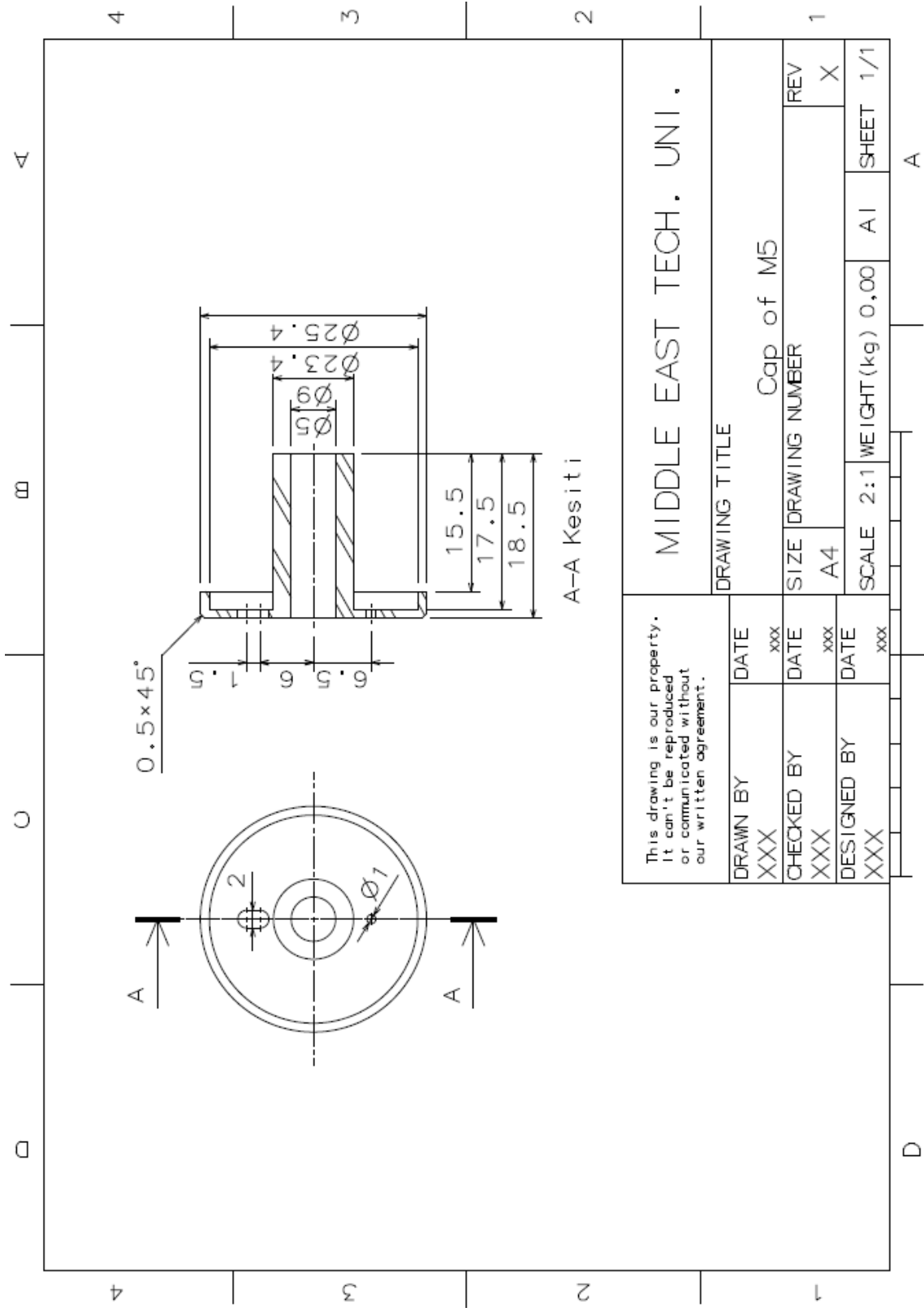
WEIGHT(kg) 0,00

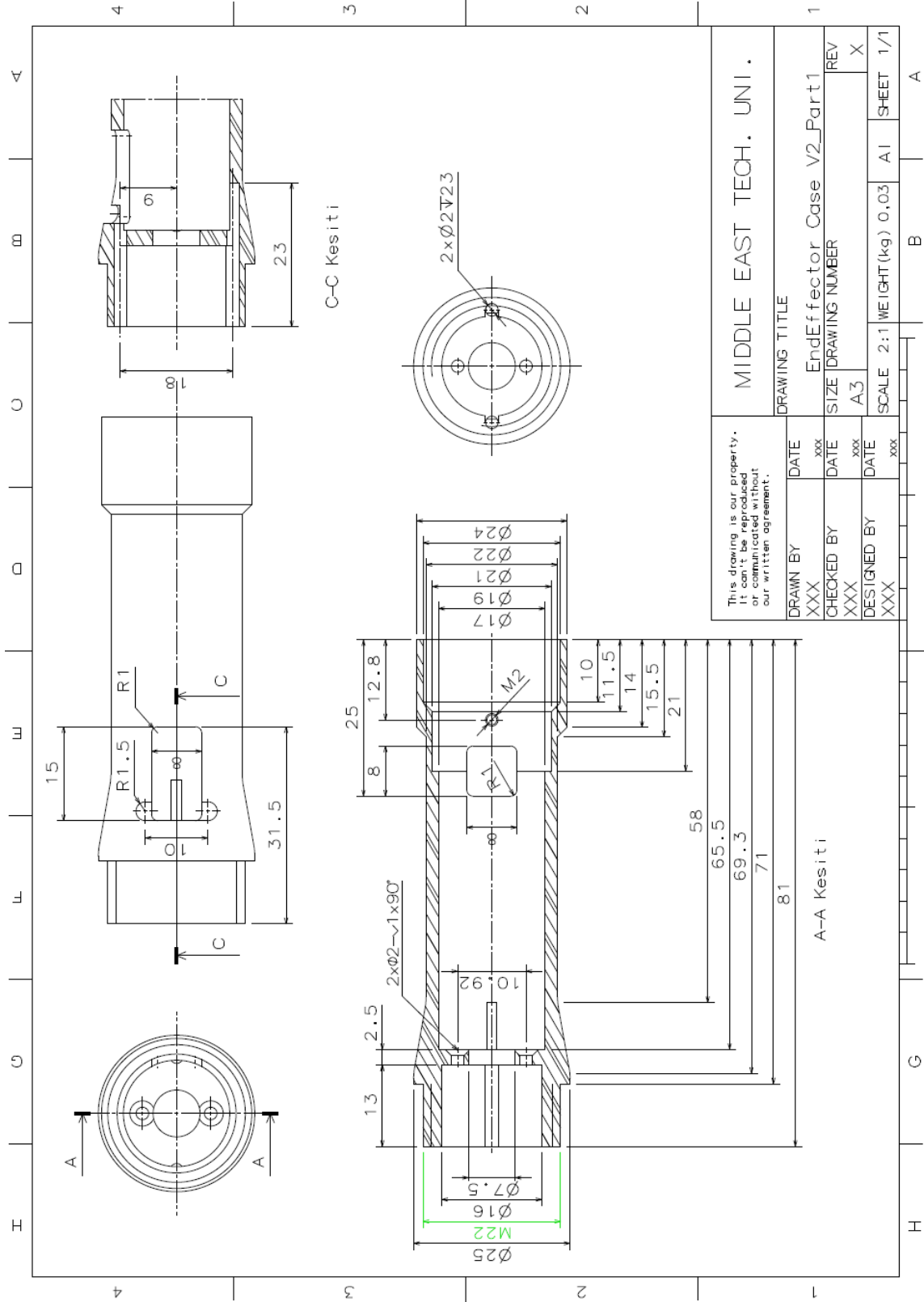
St

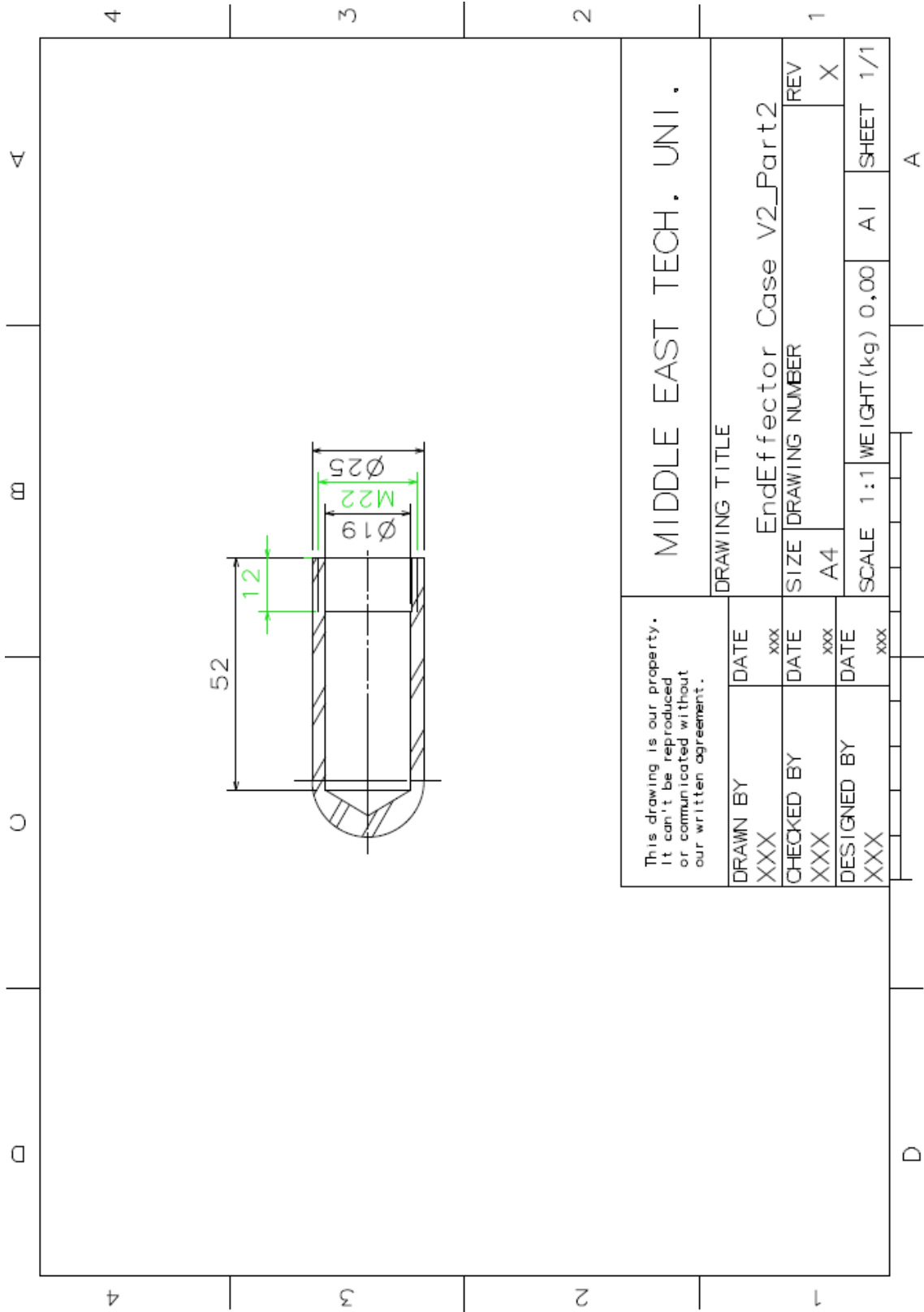
SHEET 1/1

A

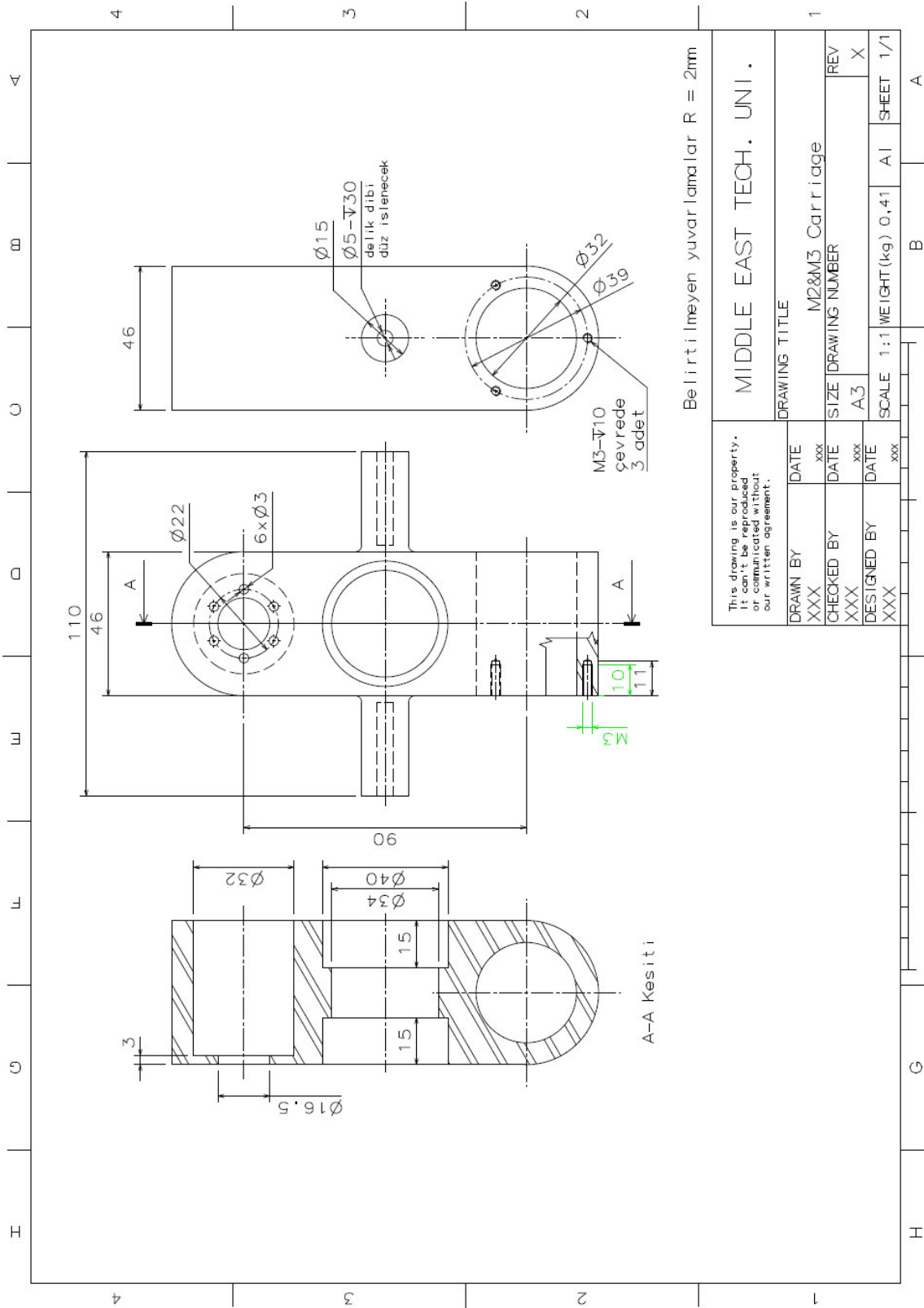
D





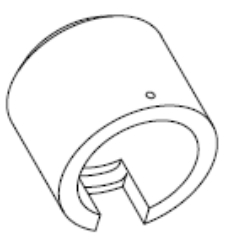
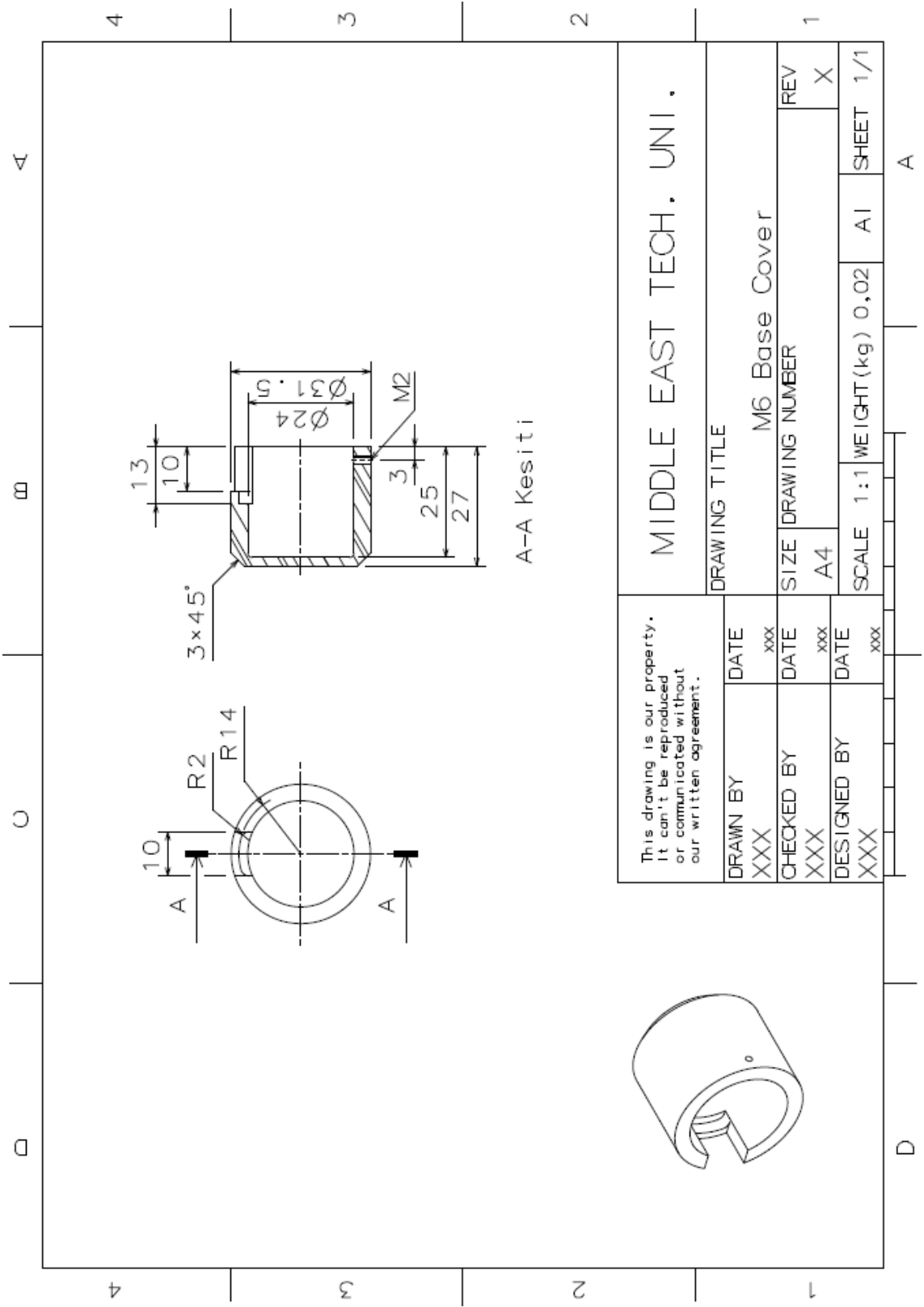


This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DRAWING TITLE	
DRAWN BY	DATE	EndEffector Case V2_Part2	
XXX	xxx	SIZE	REV
CHECKED BY	DATE	A4	X
XXX	xxx	SCALE	1:1 WEIGHT (kg) 0,00
DESIGNED BY	DATE	AI	SHEET 1/1
XXX	xxx	A	

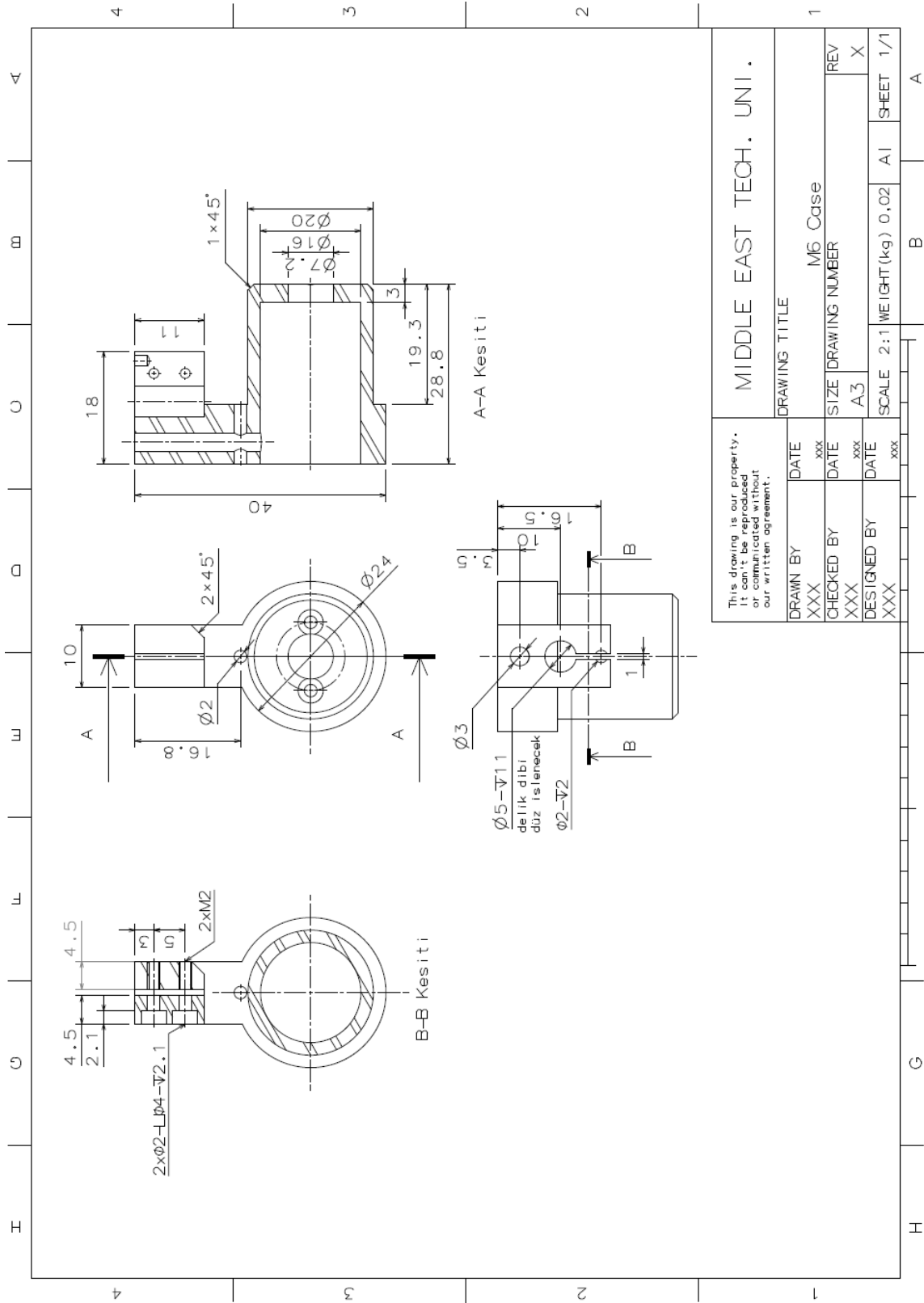


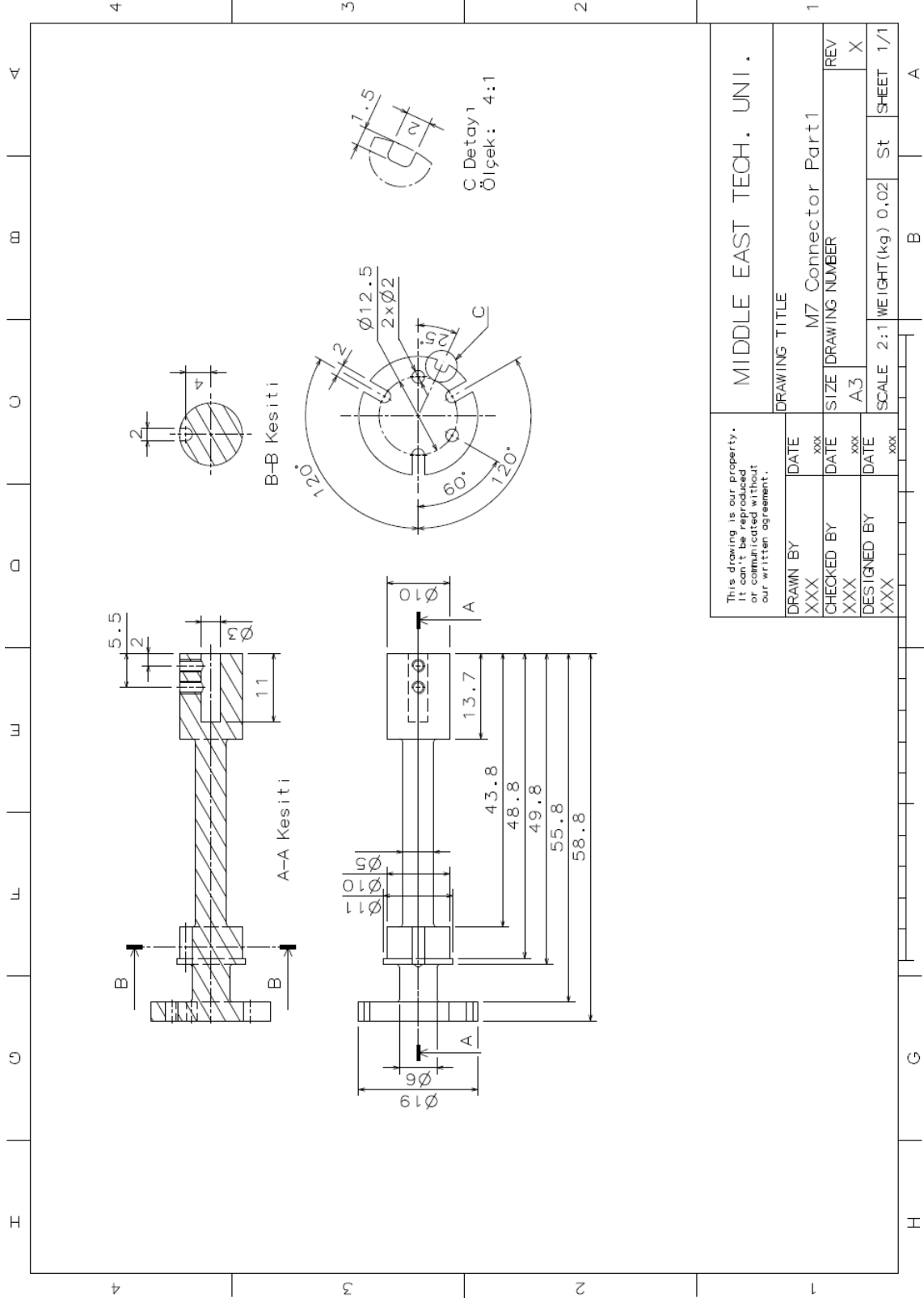
Belirtilmeyen yuvarlamalar R = 2mm

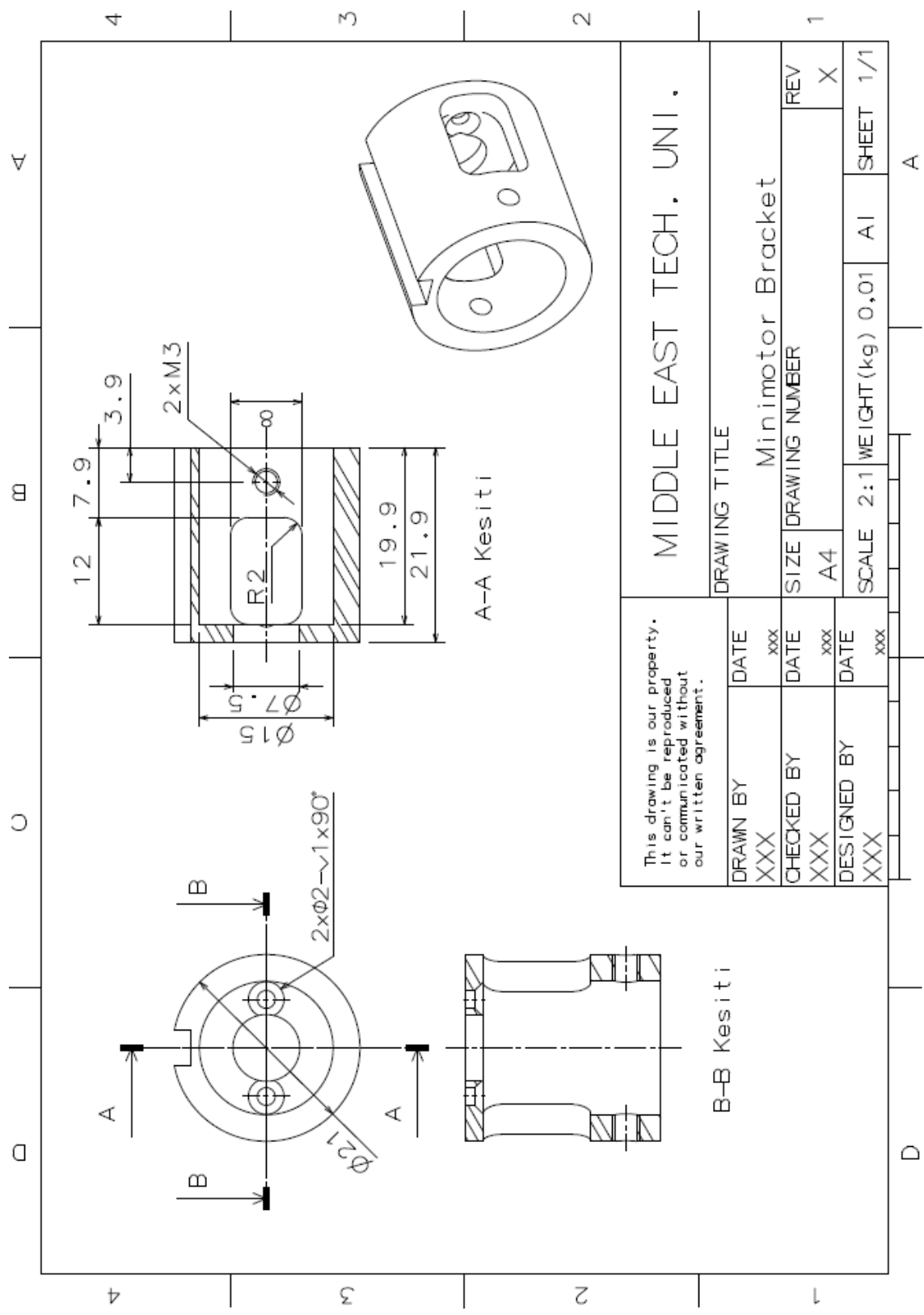
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE	
XXX	xxx	M2&M3 Carriage		REV	
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER	X	
XXX	xxx	A3		A1	
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1	WEIGHT(kg)	0,41
XXX	xxx				1/1
			B		A



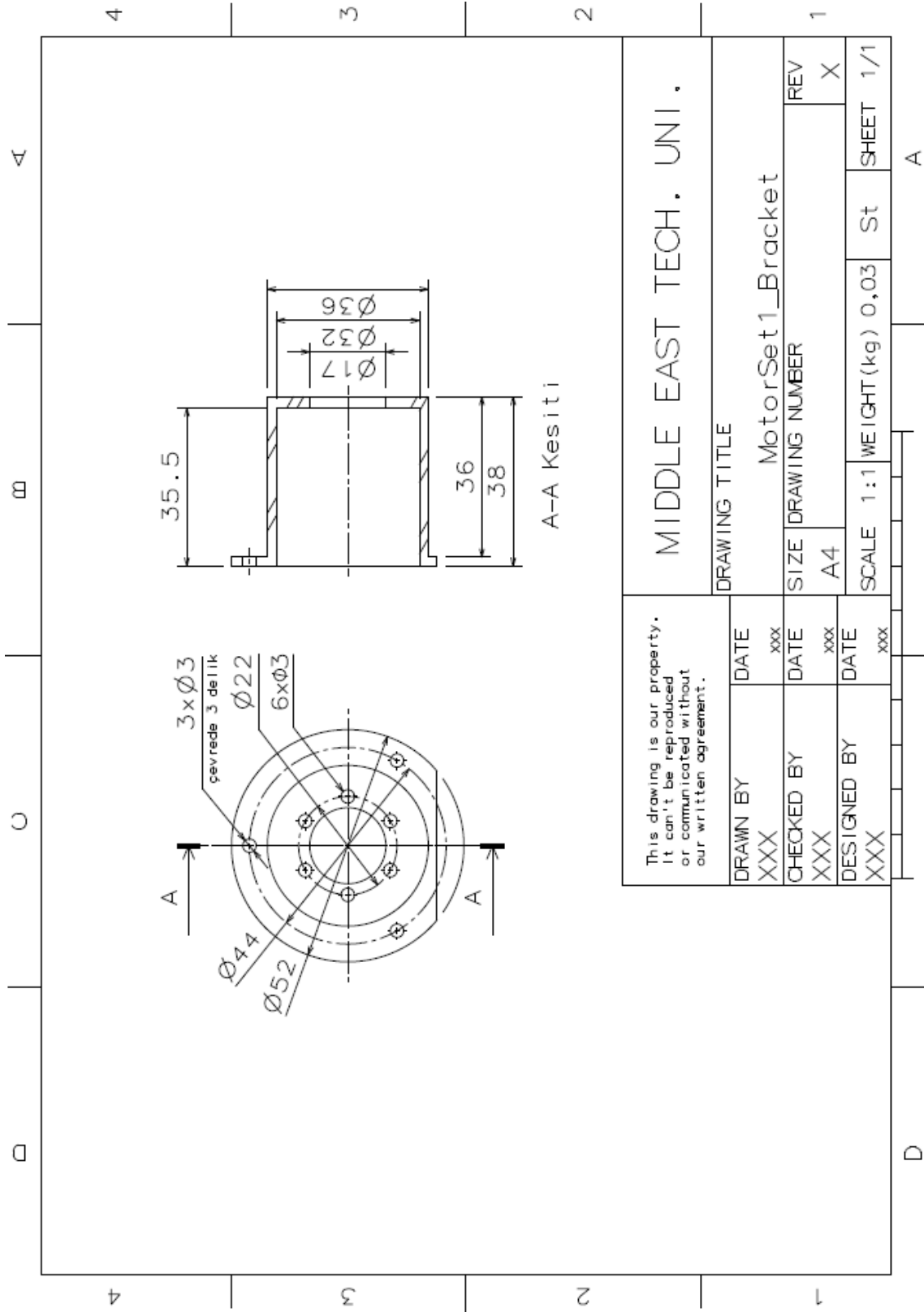
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DATE	xxx
DRAWN BY	xxx	DATE	xxx
CHECKED BY	xxx	DATE	xxx
DESIGNED BY	xxx	DATE	xxx
DRAWING TITLE		M6 Base Cover	
DRAWING NUMBER		SIZE	A4
SCALE		1:1	WEIGHT (kg) 0,02
SHEET		AI	1/1

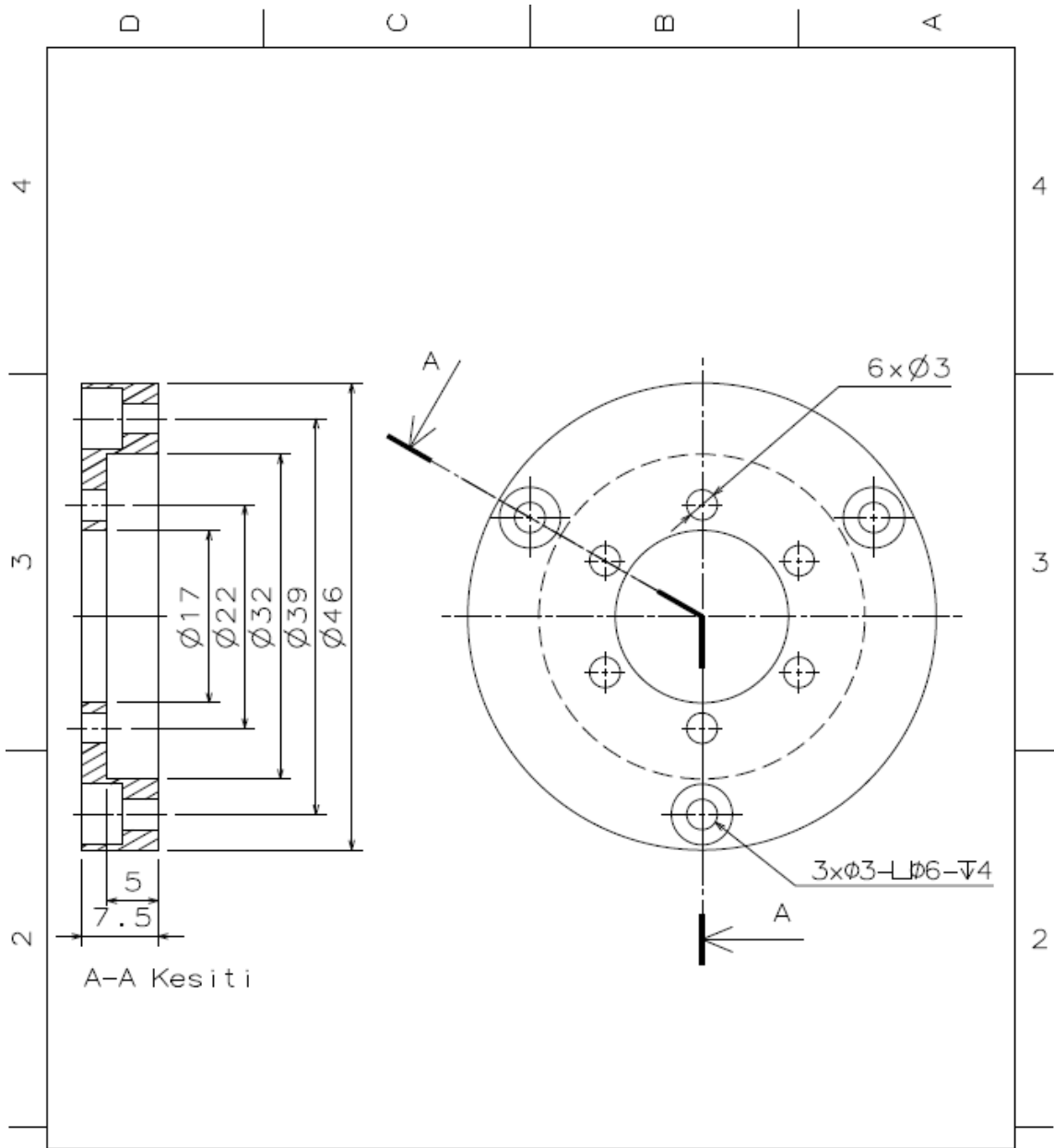




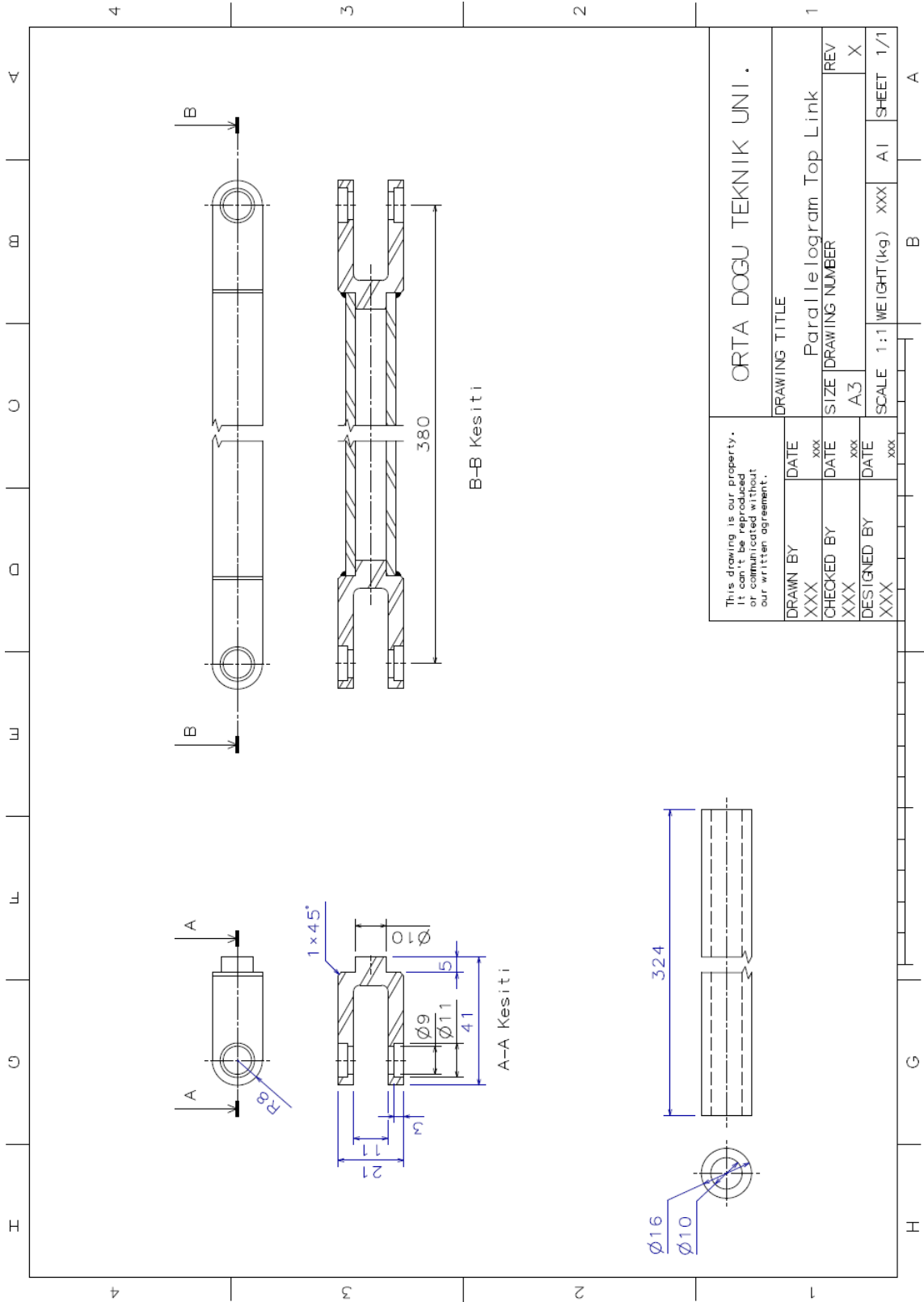


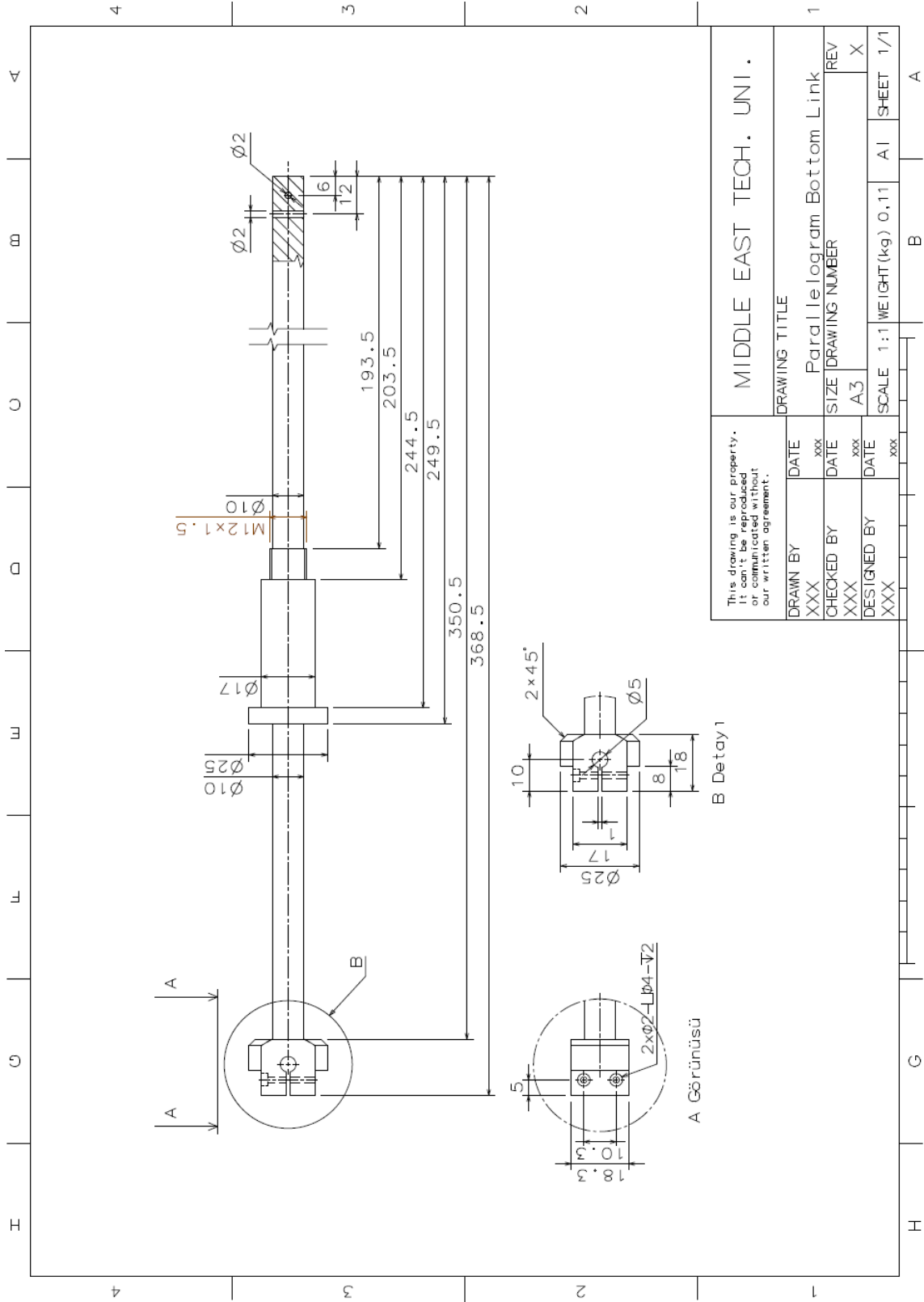
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DRAWING TITLE	
DRAWN BY	DATE	Minimotor Bracket	
XXX	xxx	SIZE	REV
CHECKED BY	DATE	A4	X
XXX	xxx	SCALE	SHEET
DESIGNED BY	DATE	2:1	1/1
XXX	xxx	WEIGHT (kg)	A1
		0,01	A

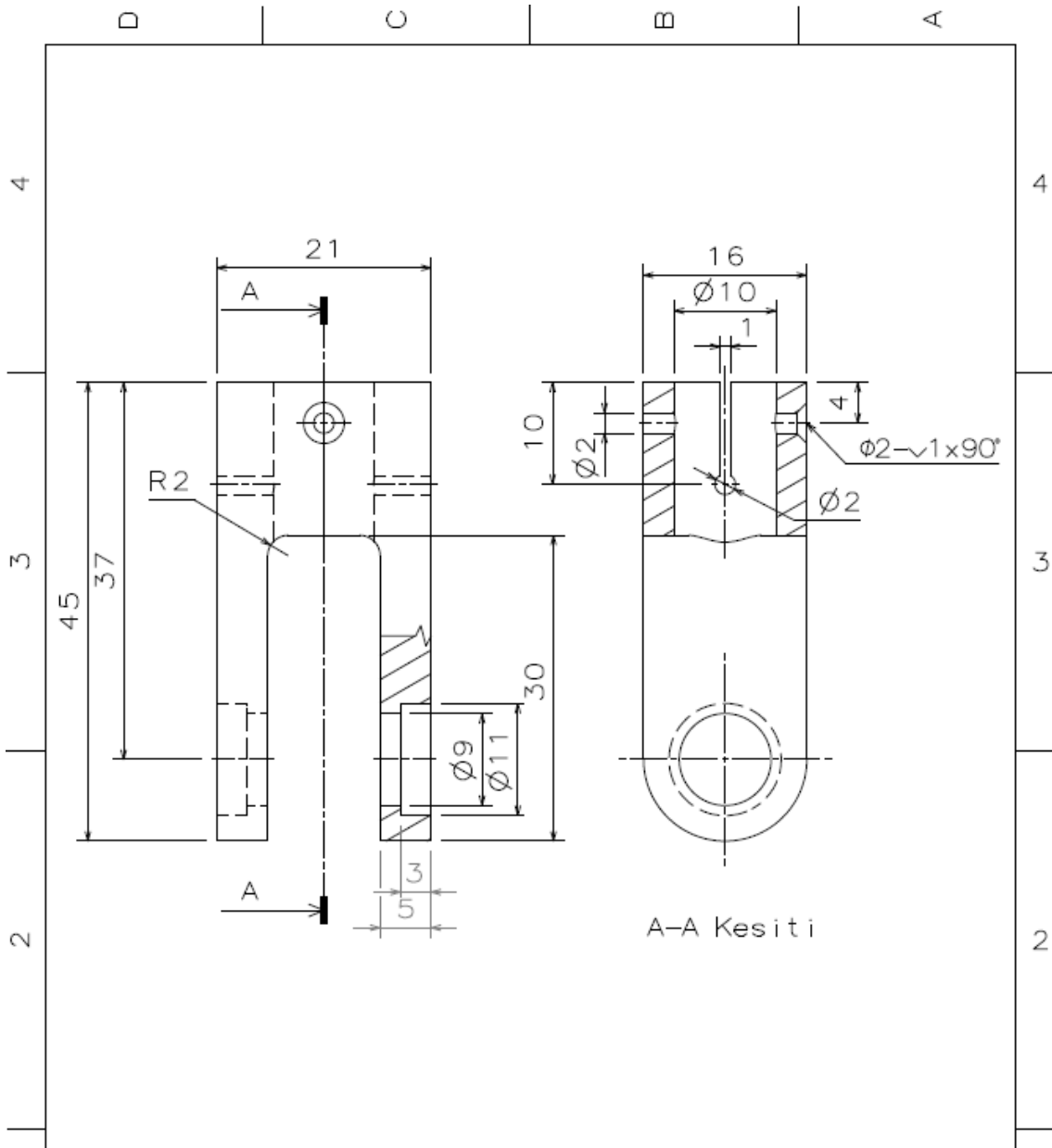




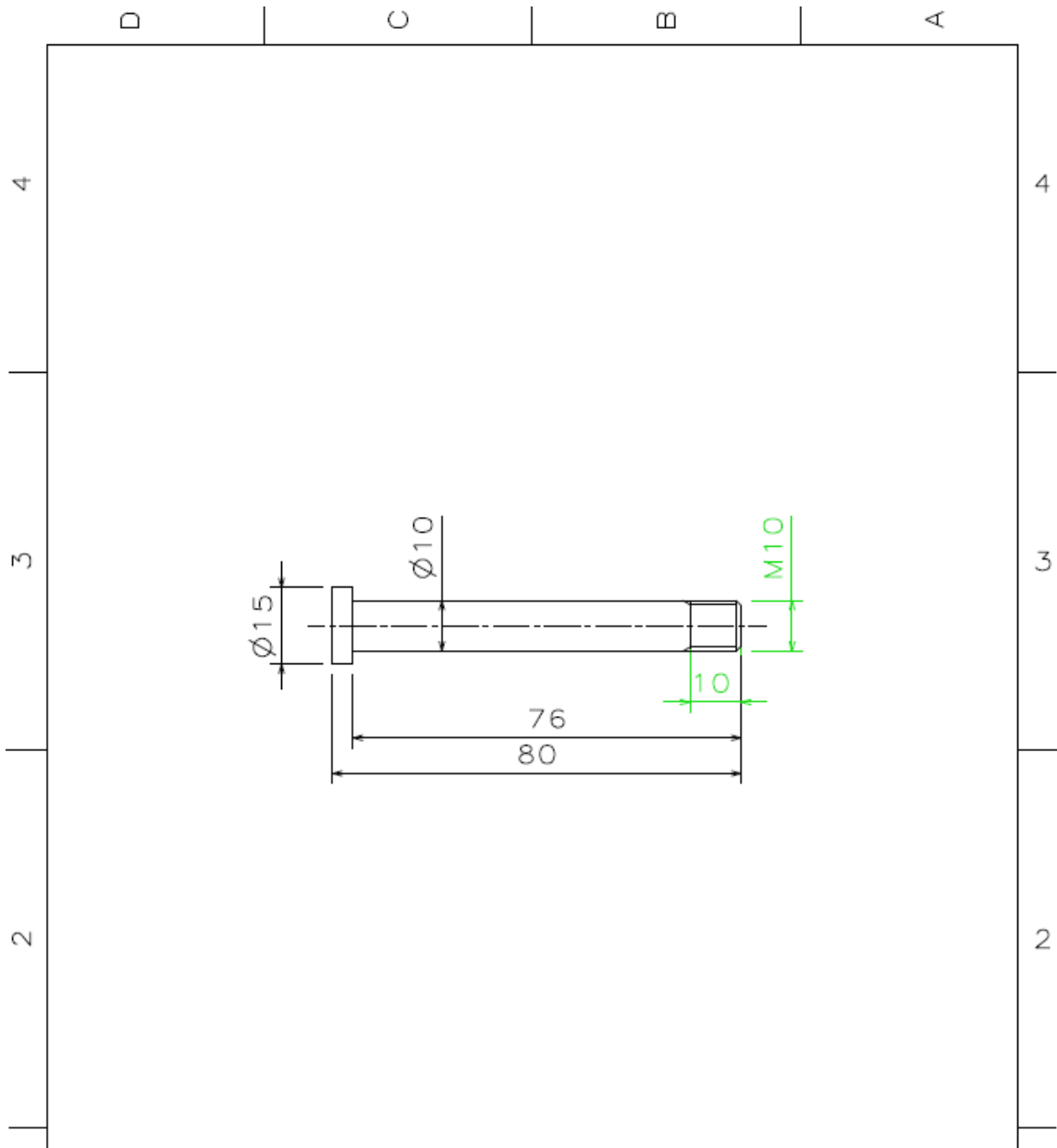
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		MIDDLE EAST TECH. UNI.	
DRAWING TITLE		MotorSet2_Bracket	
DRAWN BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER REV X
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SCALE 2:1	WEIGHT(kg) 0,02
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SHEET 1/1	



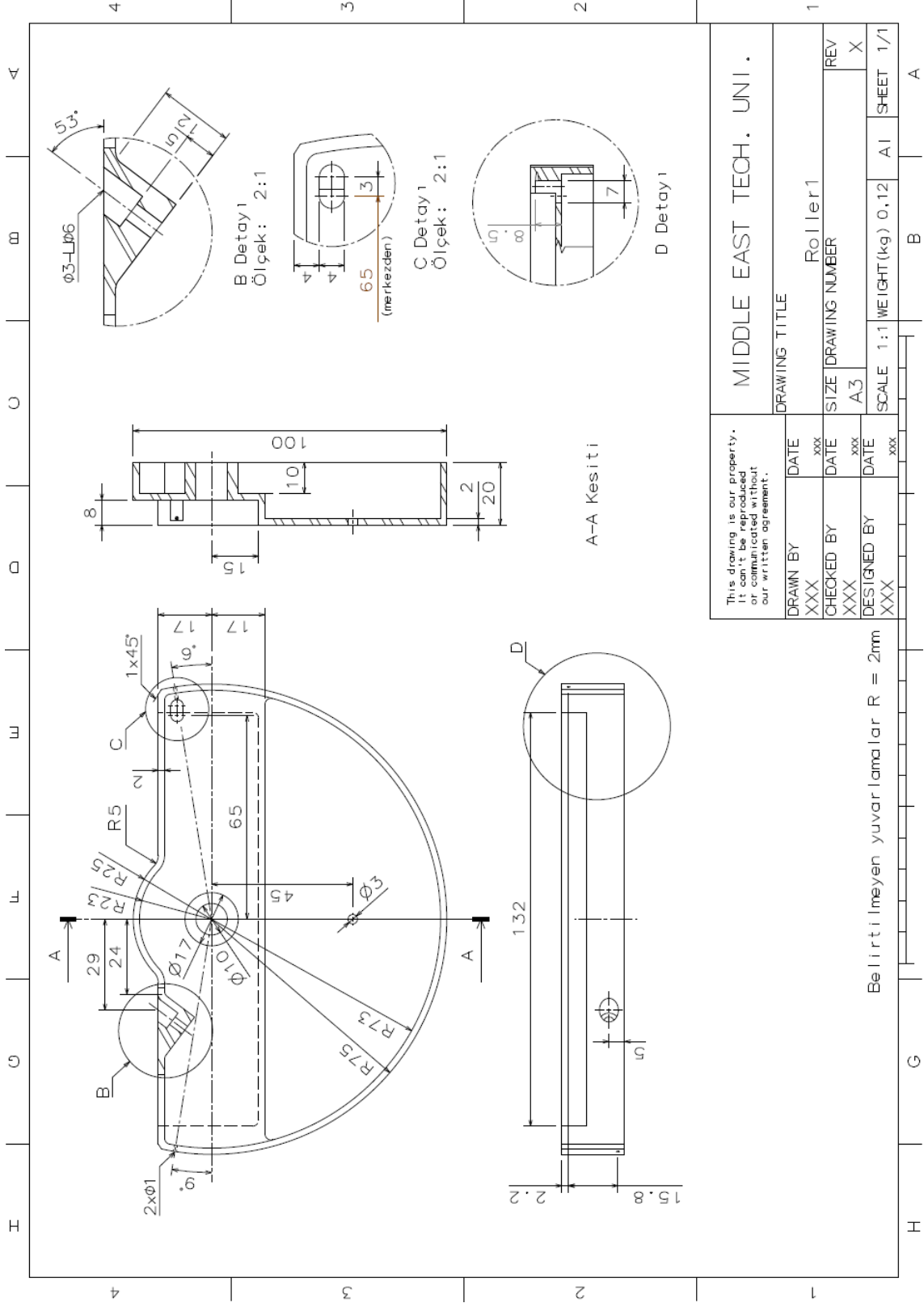




This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		ORTA DOGU TEKNİK UNI .			
DRAWN BY XXX		DATE xxx		DRAWING TITLE Revolute_Joint	
CHECKED BY XXX		DATE xxx		SIZE A4	DRAWING NUMBER REV X
DESIGNED BY XXX		DATE xxx		SCALE 2:1	WEIGHT(kg) 0,06 A1 SHEET 1/1



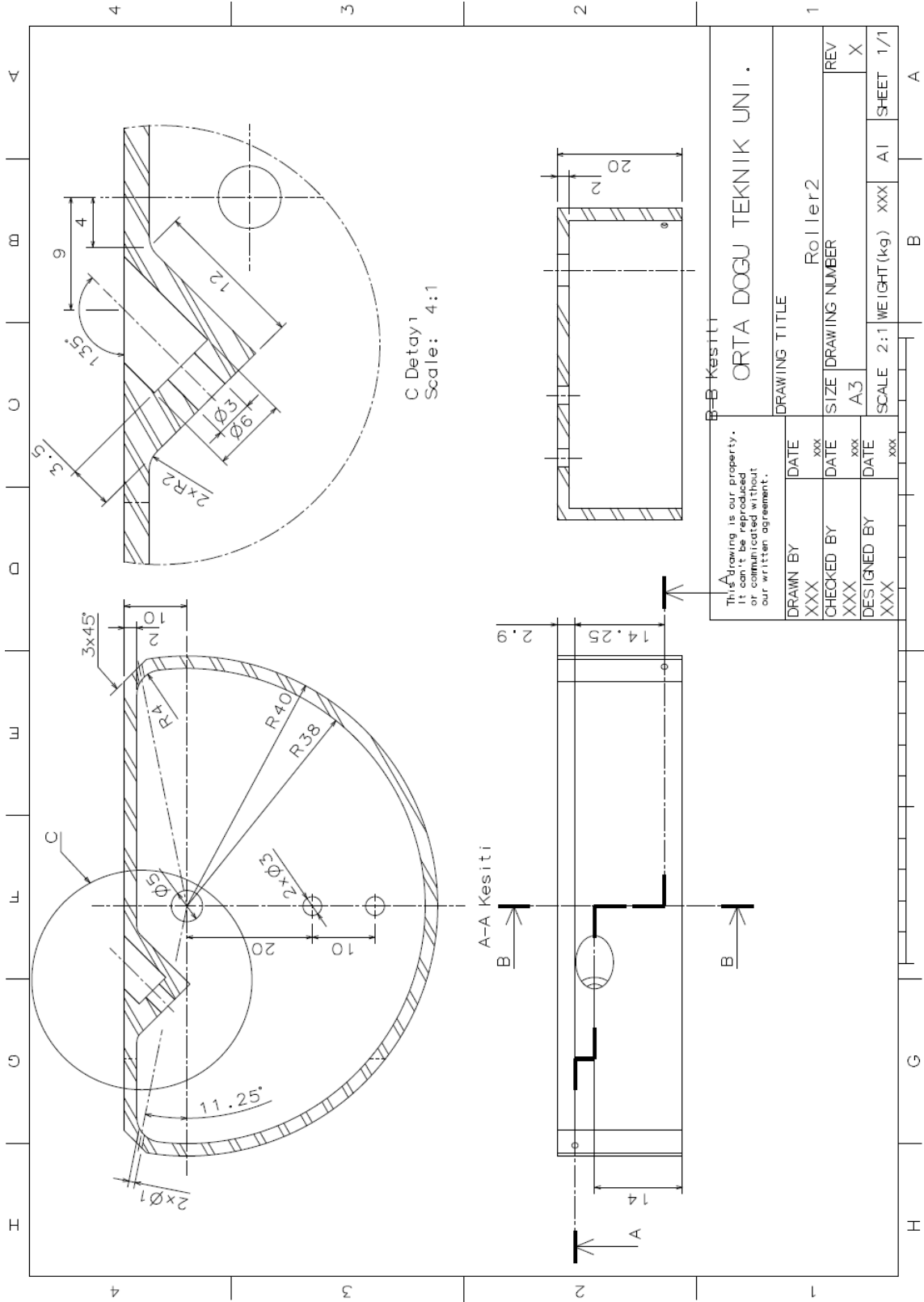
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		MIDDLE EAST TECH. UNI.			
DRAWN BY XXX		DRAWING TITLE Rod01			
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:1	WEIGHT(kg) 0,05	St	SHEET 1/1



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.

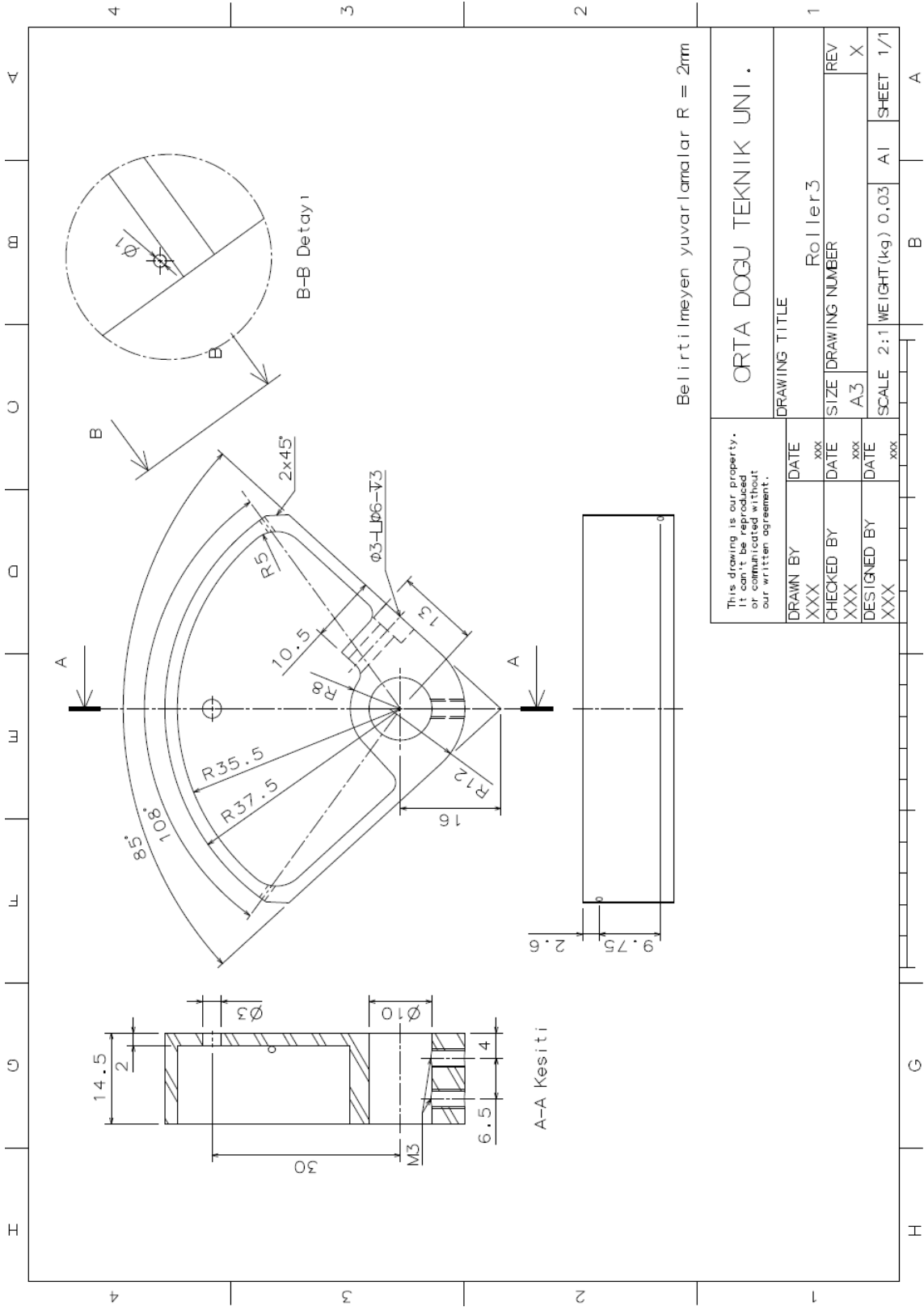
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE	
XXX	xxx	MIDDLE EAST TECH. UNI.	
CHECKED BY	DATE	Roller1	1
XXX	xxx	SIZE	REV
DESIGNED BY	DATE	A3	X
XXX	xxx	SCALE	1:1 WEIGHT(kg) 0,12 AI SHEET 1/1

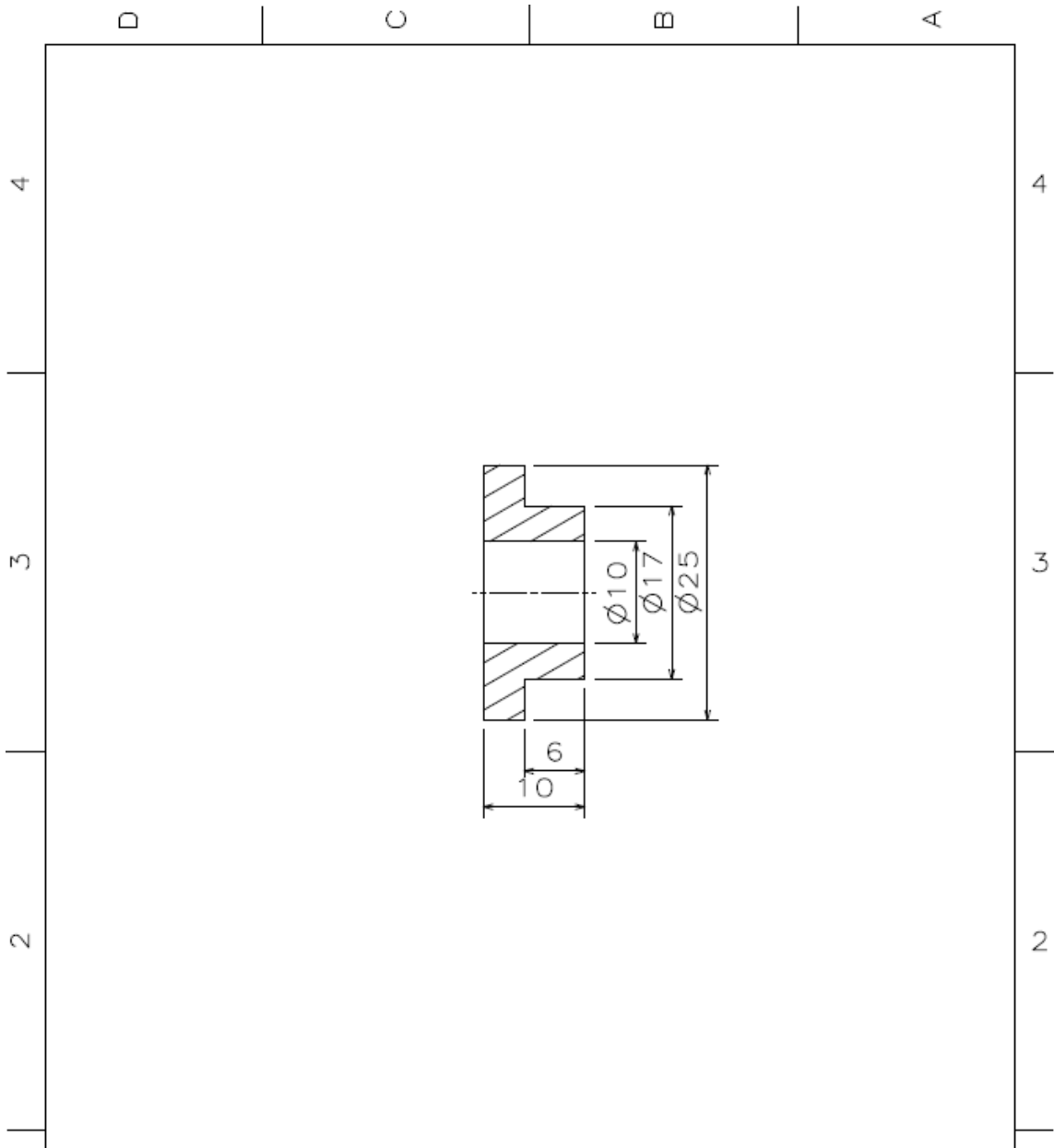
Belirtilmeyen yuvarlaklar R = 2mm



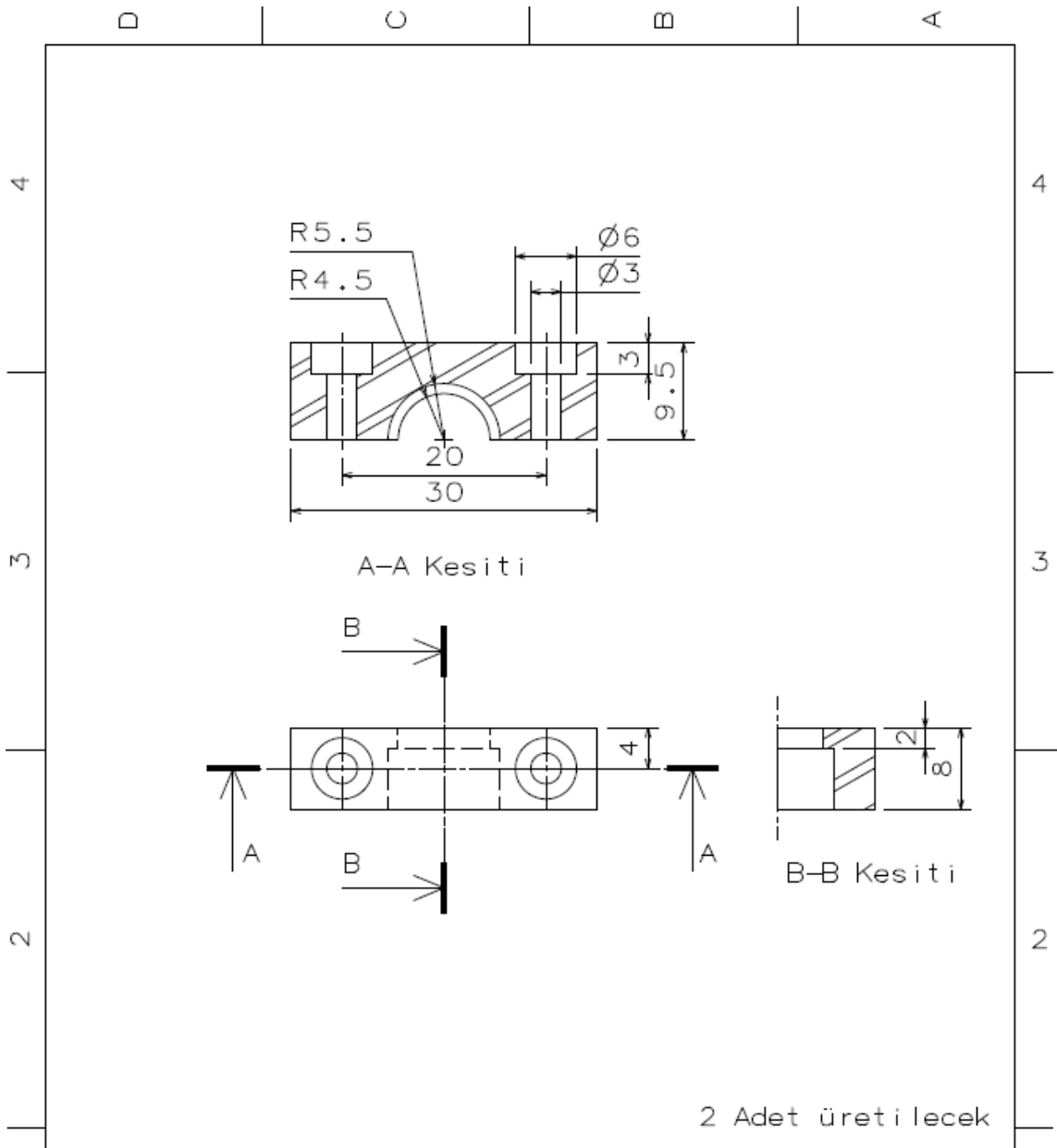
C Detail
Scale: 4:1

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DRAWN BY XXX	DATE xxx	CHECKED BY XXX	DATE xxx	DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 2:1	WEIGHT(kg) XXX	A1	SHEET 1/1
B-B Kesiti ORTA DOGU TEKNİK UNI . DRAWING TITLE											
DRAWING TITLE Roller2											
SIZE DRAWING NUMBER A3											
REV X											





This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		ORTA DOGU TEKNİK UNI .			
DRAWING TITLE		Stopper01			
DRAWN BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER		REV X
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:1	WEIGHT(kg) 0,02	AI	SHEET 1/1
DESIGNED BY XXX	DATE xxx				



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		ORTA DOĞU TEKNİK UNİ .			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY XXX		DATE xxx		U Support Part2	
CHECKED BY XXX		DATE xxx		SIZE A4	DRAWING NUMBER
DESIGNED BY XXX		DATE xxx		SCALE 1:1	WEIGHT(kg) 0,00
		AI	SHEET 1/1		REV X

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 104M425
Proje Başlığı: “Haptic” Dokunma Hisli ve Kuvvet Geri Beslemeli Arayüz Sistem Tasarımı
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof. Dr. Tuna BALKAN, Y. Doç. Dr. E. İlhan KONUSEVEN, Y. Doç. Dr. A. Buğra KOKU, Ar. Gör. Özgür BAŞER, Y. Müh. Süleyman BİDECİ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, ODTÜ BİLTİR Merkezi
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: (Yok)
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: Verilen 6 aylık ek süre ile birlikte 01-07-2005 ve 01-07-2008 arası.
Öz (en çok 70 kelime) <p>Bu projede sanal gerçeklik uygulamalarında kullanılmak üzere 7 serbestlik dereceli bir “haptic” cihaz üretimi ve örnek bir arayüz geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Cihazın tasarımı, “haptic” cihazlar için gerekli olan maksimum çalışma hacmi, maksimum kuvvet ve tork, maksimum rijitlik, minimum boşluk, minimum istenmeyen ağırlık gibi tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu 7 serbestlik dereceli cihazın denenmesi için de bir grafik arayüz tasarlanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak uygulama sırasında harcanan gücü minimize etmek için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler: “Haptic” cihaz, Sanal gerçeklik, Kuvvet geribesleme, “Haptic” modelleme
Projeden Yapılan Yayınlar: Projemiz kapsamında “ <i>Optimal Posture Control for a 7 DOF Haptic Device based on Power Minimization</i> ” başlığı altında bir makale özellikle “haptic” cihazların ve uygulamalarının geliştirilmesine yönelik özgün çalışmaların yer aldığı bu alanda dünyaca tanınan “Eurohaptics 2008” konferansında sunulmuştur. Ayrıca bu makale “Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2008” de yayınlanmıştır.