

# Bulanık Parametre Ayarlamalı Görüntü Destekli Kuvvet Kontrolü

Berk Çallı<sup>1</sup>, Kemalettin Erbatır<sup>2</sup>, Mustafa Ünel<sup>3</sup>

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Mekatronik Programı

Sabancı Üniversitesi, İstanbul

<sup>1</sup>berkc@su.sabanciuniv.edu, <sup>2</sup>erbatır@sabanciuniv.edu, <sup>3</sup>munel@sabanciuniv.edu

## Özetçe

Görüntü ve kuvvet sensörleri, robot kontrolünde kullanılacak zengin içerikli veriler sunmaktadır. Bu verilerin birleştirilerek kullanılması robotların bir çok karmaşık görevde başarımlarını arttırabilir. Bu bildiri öncelikle özel bir robot konum ve kuvvet kontrol problemini tanımlamaktadır. Bu problem sabit büyüklükteki bir referans kuvvetinin, dönmeye serbest bırakılmış bir iş parçası üzerine dik yönde uygulanmasını içerir. Bu problemin çözümünde, ilk olarak görüntü tabanlı hibrit konum/kuvvet kontrol yöntemi denenmiştir. Bu yöntemde sabit kazanç parametrelerinin kullanmasından kaynaklanan güçlükler dikkat çekilmiş ve parametrelerinin ayarlanmasında bulanık mantık kullanılan hibrit yapıda bir kontrol sistemi önerilmiştir. Sabit parametrelili ve bulanık mantık parametre ayarlamalı kontrol yöntemleri doğrudan tahrikli SCARA tipindeki bir robot üzerinde denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 1. Giriş

Robotlar üstünde gelişmiş sensörler kullanmak, onların bir çok karmaşık görevi başarabilmelerini sağlar. Kuvvet ve görüntü sensörleri, robotik uygulamalarında büyük öneme sahiptir ve bu iki sensörün birleştirilmesi manipulasyon uygulamalarında büyük ilerlemeleri sağlayacak niteliktedir.

Bu iki sensörü birleştirmek için çeşitli yöntemler sunulmuştur. [1] bu yöntemleri, devretmeli, hibrit ve paylaşımlı kontrol olarak üç kategoriye ayırmıştır. Devretmeli kontrol yönteminde, belirlenen bir yönde kuvvet kontrolü ve görüntü tabanlı kontrol arasında anahtarlama yapılır. Bu şekilde robot uç işlevcisinin iş parçasının yakınına görüntü tabanlı kontrol ile gelmesi sağlanır ve ardından görüntü tabanlı kontrol kapatılarak, kuvvet kontrolü çalıştırılır. Hibrit kontrol metodunda görüntü tabanlı kontrol ve kuvvet kontrolü görev koordinat takımı kullanılarak birbirine dik yönlerde ayrı ayrı uygulanır. Paylaşımlı kontrol ise kuvvet kontrolü ve görüntü tabanlı kontrolün aynı yönlerde uygulanmasıdır. Bu kontrollör tipleri tek başlarına kullanılacakları gibi, bir kombinasyonları da oluşturulabilir. [2-6], bu üç kontrol yönteminin birleştirilerek kullanıldığı çalışmaları içerir. Bu çalışmalarda kuvvet kontrolü ve görüntü tabanlı kontrol birbirlerine ileri beslemeli şekilde yardım etmektedir. Bir başka çalışmada ise bir empedans kontrolörüne görüntü sistemi ile konum referansı üretilerek birleştirme çalışması yapılmıştır [7].

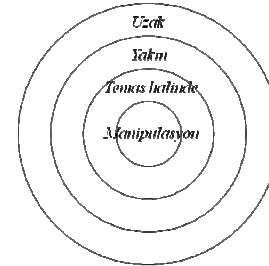
Bu bildiride, bir manipulasyon görevi problem olarak tanımlanmıştır. Bu problemde, dikey bir eksen çevresinde dönmeye serbest bırakılmış yatay ve düz bir iş parçasının

kenarındaki belirli bir noktaya, kenara dik yönde belirli büyüklükte bir kuvvet uygulanması hedeflenmiştir. Bu görevin gerçekleştirilebilmesi kuvvet uygulama noktasının ve iş parçasının yöneliminin devamlı olarak tesbit edilmesini gerektirir. Bu görevin başarılabilmesi için öncelikle görüntü tabanlı hibrit konum/kuvvet kontrolü kullanılmıştır. Bu kontrollörün kullanılmasından doğan problemler açıklanmış ve bu problemleri çözmek için kontrollörü n kazanç parametreleri bulanık mantık kullanarak çevrimiçi olarak ayarlanmıştır. Aynı zamanda, hiyerarşik evre şablonu metodundan [8] da yararlanılmıştır. Bu metotta görev “uzak”, “yakın”, “temas halinde” ve “manipulasyon” gibi evrelere ayrılmaktadır (Şekil 1). Her evrede sensörlerin kullanım yöntemleri değişmektedir.

Bulanık mantık sistemlerinin hibrit konum/kuvvet kontrolü alanındaki kullanımı [9-12]’de bulunabilir. Bu bildiride sunulan yöntem, konum ve kuvvet hatalarının birlikte kullanılarak bulanık mantık kuralı oluşturulması açısından farklılık içermektedir. Bildiride sunulan yöntemin bir diğer özgülüğü ise bulanık mantık kullanan hibrit konum/kuvvet kontrol yapısındaki konum kontrolü bileşeninin görüntü tabanlı uygulanması ve bulanık mantık sisteminin görüntü tabanlı kontrollör göz önüne alınarak tasarlanmasıdır.

Bu bildiride sunulan yöntemin performansını kanıtlamak için 6 eksenli ölçüm yapabilen bir kuvvet sensörü ve çalışma alanını üstten görebilen bir kamera ile donatılmış, iki eksenli SCARA tipi doğrudan tahrikli bir robot üstünde deneyler yapılmıştır.

Bir sonraki bölümde yukarıda bahsedilen manipulasyon problemi ayrıntılı olarak tanımlanmaktadır. Üçüncü bölüm, görüntü tabanlı kontrol ve kuvvet kontrolünün hibrit yapıda birleştirilmesini içermektedir. Bölüm 4’te ise, bu kontrollöre bulanık mantıkla parametre ayarlama sistemi eklenmiş ve bu sistemin detayları anlatılmıştır. Beşinci bölümde robot üzerinde gerçekleştirilen deneyler irdelenmiştir. Son bölümde sonuçlar sunulmaktadır.



Şekil 1: Birleştirmede kullanılan hiyerarşik evre şablonu yöntemi

## 2. Manipulasyon Senaryosu

Şekil 2'de problem tanımında kullanılan manipulasyon senaryosu aşama aşama gösterilmiştir. Şekilde görülen koordinat takımı, iş parçasının üzerine yerleştirilmiş görev koordinat takımıdır. Koordinat takımının merkezi, üzerine kuvvet uygulanacak hedef noktaya sabitlenmiştir.  $x$  eksenini iş parçasının kenarına teğet,  $y$  eksenini ise bu kenara dik seçilmiştir. Bu problem tanımında iş parçasının kuvvet uygulanan kenarının düz olduğu varsayılmıştır. İş parçası  $P$  noktasından geçen dikey bir eksen çevresinde dönebilmektedir. Bununla birlikte, parça etkiyen kuvvete karşı bir dengeleyici kuvvet oluşabilmesi için doğrusal yaylar aracılığı ile sabit zemine bağlanmıştır. Senaryo aşağıda belirtilen evreleri içermektedir.

Şekil 2 a) da görüldüğü gibi, ilk aşamada robot, iş parçasından uzaktaki bir konumdan ( $I$  noktası) harekete başlamaktadır. Bu evrede amaç robotun  $y$  eksenine doğrultusunda çekilmesidir. İkinci evre Şekil 2 b)'de görülmektedir. Bu evrede robot  $y$  ekseninde  $O$  noktasına ilerlemelidir. Bu iki evre ile birlikte, robot, kuvvet uygulama noktası  $O$ 'ya dik şekilde yaklaşmaktadır ve dik kuvvet uygulamaya başlaması kolaylaştırılmaktadır. Robot uç işlevcisi iş parçasına değdikten sonra referans kuvvet iş parçası üzerine uygulanmalıdır (Şekil 2 c). İş parçası hareket ederse,  $O$  noktası ile temas yeniden sağlanmalı ve referans kuvveti uygulanmaya devam edilmelidir (Şekil 2 d).  $O$  noktası hariç, obje üzerindeki herhangi başka bir noktaya kuvvet uygulanmamalıdır.

## 3. Sabit Kazanç Parametrelili Hibrit Yapılı Kontrol Yöntemi

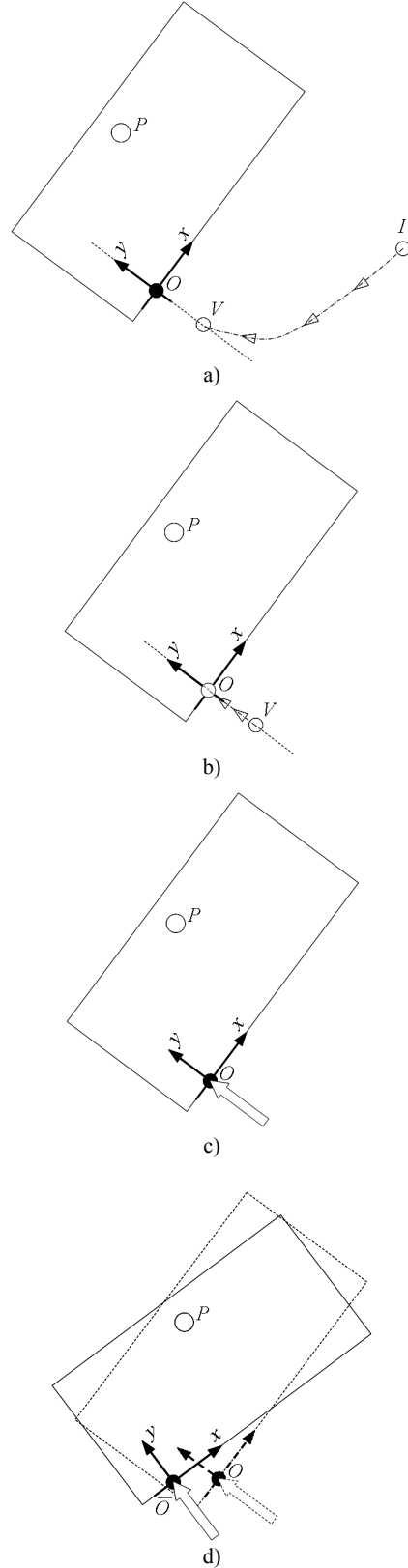
Bu bölümde, bir önceki bölümde belirtilen problemin çözümü için sabit kazanç parametrelili görüntü tabanlı hibrit yapı bir konum/kuvvet kontrolörü tasarlanmaktadır. Bu yöntemde bir görev koordinat takımı kullanılmaktadır ve koordinat takımının merkezi kuvvet uygulama noktasına konulmuştur. Kuvvet kontrolü iş parçasına doğru uygulanırken ( $y$  eksenini yönünde), uç işlevcisini hizalama görevi görüntü tabanlı kontrollöründür ( $x$  eksenini yönünde). Görev koordinat takımının yönelimi görüntü ile çevrimiçi (online) olarak belirlenmektedir. Görev uzayında, kuvvet hatası, referans kuvveti  $F^r$  ve ölçülen kuvvet  $F$ 'in farkı olarak tanımlanmıştır.

$$e_F = (F^r - F) \quad (1)$$

“Seçilen kuvvet hatası” ise,

$$e_{FS} = S(F^r - F) \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemde  $S$  “seçme matrisi”dir. Bu matrisin girdileri kuvvet kontrolünün uygulanacağı yönleri belirler. Eğer  $i$  endeksli yön, kuvvet kontrolü uygulanmak istenen yön ise,  $S$  matrisinin diagonal girdilerinden  $s_{ii}$  teriminin değeri 1 olarak belirlenmektedir; aksi takdirde bu terim 0'dır.



Şekil 2: Manipulasyon Senaryosu

Kuvvet kontrolü kuralı

$$F_F^c = K_{p_F} e_{FS} + K_F \int e_{FS} dt \quad (3)$$

şeklinde seçilmiştir.

(3)'de  $F_F^c$  görev uzayında tanımlanan kartezyen kontrol kuvvetidir.  $K_{p_F}$  diagonal oransal kazanç matrisi ve  $K_F$  diagonal integral kazanç matrisidir:

$$K_{p_F} = \begin{bmatrix} K_{p_F^x} & 0 \\ 0 & K_{p_F^y} \end{bmatrix}, \quad K_F = \begin{bmatrix} K_{F^x} & 0 \\ 0 & K_{F^y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kuvvet kontrolü tarafından oluşturulan  $F_F^c$  kuvveti, robot eklem momentlerine, robot jakobiyanı kullanarak aşağıdaki gibi çevrilir.

$$u_F = J_R^T(q) R_w^T F_F^c \quad (5)$$

(5)'te kullanılan rotasyon matrisi  $R_w^T$  robot zemin eklemine yerleştirilmiş dünya koordinat sistemi ile görev uzayının arasındaki yönelim ilişkisini kurar.  $u_F$  kuvvet kontrolü tarafından oluşturulmuş kuvvetin eklem kontrol momentlerine çevrilmesinden oluşur. Bu denklemde  $()^T$  matris devriğini belirtmektedir.

Bu bildiride uygulanan görüntü tabanlı kontrol yöntemi "dinamik bak ve git" kategorisine girmektedir. Bu tip uygulamalarında, görüntü tabanlı kontrol daha içteki eklem enkoder ölçümlerine dayanan bir konum kontrol döngüsü için konum referansları üretmektedir.

Kuvvet kontrolünde olduğu gibi, görüntü tabanlı kontrol de görev uzayında kullanılmıştır ve bu uzayda tanımlanan  $e_V^x$  ve  $e_V^y$  hataları Şekil 3'de gösterildiği gibidir. Bu hataların alta konulmasıyla görev uzayında tanımlı olan hata vektörü  $e_V$  şu şekilde oluşur:

$$e_V = \begin{bmatrix} e_V^x \\ e_V^y \end{bmatrix} \quad (6)$$

Seçme matrisi  $S$  yardımıyla seçilmiş konum hataları şu şekilde elde edilir:

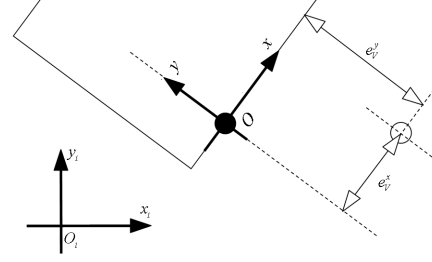
$$e_{VS} = (I - S)e_V \quad (7)$$

Burada  $I$  birim matristir. (7) ile kuvvet kontrolü yapılan yönlerdeki konum hataları yok sayılmaktadır. Görüntü tabanlı kontrol kuralı görüntü uzayında aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$F_V^c = K_V e_{VS} \quad (8)$$

Denklem (8)'de  $F_V^c$ , görev uzayında görüntü tabanlı kontrol tarafından üretilmiş kuvvet vektörüdür.  $K_V$  ise diagonal kazanç matrisidir.

$$K_V = \begin{bmatrix} K_V^x & 0 \\ 0 & K_V^y \end{bmatrix} \quad (9)$$



Şekil 3: Görüntü tabanlı kontrol hataları

Bu bildiride  $F_V^c$  eklem momentlerine robot jakobiyanının devriği kullanılarak çevrilen bir kartezyen kontrol kuvveti olarak kullanılmamaktadır.  $F_V^c$  görev uzayındaki hız ihtiyacı olarak kullanılmış ve bu çıktı ile dünya koordinatlarında konum referansı üretilmiştir. Bu vektör öncelikle görev uzayı ve görüntü uzayı arasındaki yönelim farkını tanımlayan dönme matrisi ile, ardından da görüntü uzayı ve dünya koordinatları arasındaki yönelimi tanımlayan dönme matrisi ile çarpılarak dünya koordinatlarına getirilmiştir ve bu değer dünya koordinatlarında hız referansı olarak alınmıştır:

$$v^r = R_w^i R_V^i F_V^c \quad (10)$$

Bu denklemde  $v^r$  dünya koordinatlarındaki hız referansıdır.

$R_V^i$  görev uzayı ve görüntü uzayı arasındaki,  $R_w^i$  ise görüntü uzayı ve dünya koordinatları arasındaki yönelim ilişkisini içerir. Bu hız referansının integralinin alınması ile konum referansı  $p^r$  elde edilir.

$$p^r = \int v^r dt \quad (11)$$

$p$  mevcut konum olarak tanımlandığında, konum hatası  $e_p$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$e_p = p^r - p \quad (12)$$

Bu hata üzerinden, kartezyen kontrol kuvveti üretmek için denklem (13)'teki PID yasası kullanılmıştır.

$$F_P^c = K_{p_P} e_p + K_{I_P} \int e_p dt + K_{D_P} \dot{e}_p \quad (13)$$

Bu kuvvet robot jakobiyanı kullanılarak, eklem kontrol momentlerine çevrilir.

$$u_P = J_R^T F_P^c \quad (14)$$

(14)'teki  $u_P$  görüntü tabanlı kontrolörün ürettiği eklem momentleridir. Bu değer, kuvvet kontrolörünün ürettiği eklem momentleri ile toplandığında toplam moment elde edilir.

$$u = u_F + u_P \quad (15)$$

İkinci bölümde de anlatıldığı gibi bu bildiride tanımlanan problemdeki amaç dönme serbestliği olan bir iş parçası üstüne, verilen bir referans kuvvetini dik olarak uygulayabilmektir. Bu bildiride bu görev iki evreye bölünmüştür: i) Yaklaşma evresi ve ii) manipulasyon evresi. Yaklaşma evresinde görev

uzayında görsel tabanlı kontrol kullanılarak robot uç işlevcisi iş parçasının üstündeki kuvvet uygulama noktasının yakınına getirilmiştir. Bu evrede, görev koordinat takımının hem  $x$  hem de  $y$  yönünde görsel tabanlı kontrol kullanıldığı için, “seçme matrisi”  $S$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

şeklinde dir.

Yaklaşma evresinde  $x$  yönündeki görsel tabanlı kontrolün kazanç parametresi,  $y$  yönündekinden büyük seçilmiştir. Bu seçim, robot uç işlevcisini kısa sürede  $y$  eksenine üzerine getirir.  $y$  ekseninde ilerleyen robot uç işlevcinin iş parçasına değip değmediği okunan kuvvet değerinin belli bir eşğin üstünde veya altında olmasından anlaşılır. Ölçülen kuvvet değeri eşğin üstünde ise ikinci evreye geçilir.

İkinci evrede görüntü tabanlı hibrit konum/kuvvet kontrolü kullanılmaktadır.  $y$  ekseninde kuvvet kontrolü  $x$  ekseninde ise görüntü tabanlı konum kontrolü yapılmaktadır. Bu kullanıma karşılık gelen “seçme matrisi” denklem (17)’deki gibidir.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Bölüm 2’deki problem tanımında, iş parçasının belirli bir noktasına uygulanan kuvvet, obje hareket ettikten sonra yeniden uygulanmalı ve hedef noktası  $O$  haricinde başka bir noktaya kuvvet uygulanmamalıdır. Bu testi yapabilmek için, iş parçası pivot noktası  $P$  etrafında manuel olarak (dışarıdan etki ile) döndürülmektedir. Bu bölümde önerilen kontrolör,  $x$  ekseninde konum hatası olsa bile kuvvet uygulamaya devam etmektedir. Bu, hedef noktası dışındaki noktalara kuvvet uygulanması anlamına gelir. Bu olay  $x$  yönündeki hatanın çabuk kapanmasını sağlamak için görüntü tabanlı kontrol kazancının artırılması ile önlenmeye çalışılabilir. Fakat, yüksek kazanç parametreleri referans aşımına ve salınımlara sebep olabilir. Bu methodun performansıyla ilgili yorumlar ayrıntılı bir şekilde deney sonuçları bölümünde verilmiştir.

Bu bildiriye, yukarıda sayılan dezavantajların üstesinden gelebilmek için görüntü tabanlı kontrolün ve kuvvet kontrolünün kazanç parametrelerinin bulanık mantıkla ayarlanması önerilmiştir. Bir sonraki bölümde bu bulanık mantık yöntemi ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

#### 4. Bulanık Parametre Ayarlamalı Hibrit Kontrol

(3)’te tanımlanan kuvvet kontrol yasasında baskın kazanç parametresi integral katsayısı  $K_F$ ’dir [13]. Dolayısıyla kuvvet kontrolöründe sadece  $K_F$  bulanık mantıkla ayarlanmak üzere seçilmiştir. Görüntü tabanlı kontrolde ise oransal kazanç parametresi  $K_V$  bulanık mantıkla ayarlanmıştır. Bu parametreler ayarlanırken  $x$  yönündeki konum hatası ve  $y$  yönündeki kuvvet hatası değerlerinin yorumlanmasından yararlanılmıştır.

Kazanç ayarlamasında kullanılan ana prensipler aşağıda verilmiştir.

- i. Eğer konum hatası büyük iken kuvvet hatası küçük ise, bu robotun referans kuvvetini yanlış bir noktaya uyguladığı anlamına gelir. Robot, bir an önce  $x$  yönündeki konum hatasını kapatmalıdır ve bu sırada iş parçasına kuvvet uygulamamalıdır. Bunu gerçekleştirmek için kuvvet kazanç parametresi azaltılmalı ve görüntü tabanlı kontrol kazanç parametresi artırılmalıdır.
- ii. Eğer konum hatası küçük ve kuvvet hatası büyük ise, robot uç işlevcinin konumu doğrudur, ancak henüz istenilen kuvvet değerine ulaşamamıştır. İstenilen kuvvete ulaşılmasını çabuklaştırmak için kuvvet kontrolü kazancı artırılmalıdır. Ayrıca,  $x$  yönündeki konum hatası küçüldükçe görüntü tabanlı kontrol kazanç parametresinin azaltılması aşım ve osilasyon riskini azaltır.
- iii. Eğer hem kuvvet hatası hem de konum hatası büyükse, robot uç işlevcisi iş parçasından uzak demektir. Bu durumda kuvvet kontrolü kullanılmamalı ve görüntü tabanlı kontrol ile robot uç işlevcisi hedef noktaya hizalanmalıdır. Bu hizalamayı hızlandırmak için görüntü tabanlı kontrolörün kazanç parametresi artırılmalıdır.
- iv. Eğer hem kuvvet hatası hem de konum hatası küçük ise, görev başarılmak üzeredir ve kazanç parametrelerini değiştirmeye gerek kalmamıştır.

Yukarıdaki bu dört prensip,  $K_F$  ve  $K_V$  kazanç parametrelerinin ayarlanması için, birbirinden bağımsız iki bulanık mantık sisteminin tasarımı kullanılmıştır. Bu prensiplerden oluşturulan bulanık mantık kuralları Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. Bu ayarlamalar, “seçme matrisi”  $S$  ile aktif hale getirilen hatalar ile çarpılan kazanç değerleri üstünde yapılmıştır. Tablolarda, “NB” negatif büyük “NK” negatif küçük, “PK” ise pozitif küçük anlamına gelir. Tablolarda kullanılan “ $\Delta$ ” işareti bulanık mantık ile kazanç parametrelerinin değerlerinin değil, bu parametrelerdeki gerekli değişimlerin hesaplandığını sembolize etmektedir. Şekil 4, Tablo 1 ve Tablo 2’deki girdi değişkenleri için olan üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Durulama kuralları ise aşağıdaki gibidir.

$$\Delta K_{F^y} = \quad (18)$$

$$\frac{\mu_{B_{E^y}} \mu_{K_{E^x}} \Delta K_{F^y PS} + \mu_{B_{E^y}} \mu_{B_{E^x}} \Delta K_{F^y NB} + \mu_{K_{E^y}} \mu_{B_{E^x}} \Delta K_{F^y NS}}{\mu_{B_{E^y}} \mu_{K_{E^x}} + \mu_{B_{E^y}} \mu_{B_{E^x}} + \mu_{K_{E^y}} \mu_{K_{E^x}} + \mu_{K_{E^y}} \mu_{B_{E^x}}}$$

$$\Delta K_{V^x} = \quad (19)$$

$$\frac{\mu_{B_{E^y}} \mu_{K_{E^x}} \Delta K_{V^x NS} + \mu_{B_{E^y}} \mu_{B_{E^x}} \Delta K_{V^x PS} + \mu_{K_{E^y}} \mu_{B_{E^x}} \Delta K_{V^x PS}}{\mu_{B_{E^y}} \mu_{K_{E^x}} + \mu_{B_{E^y}} \mu_{B_{E^x}} + \mu_{K_{E^y}} \mu_{K_{E^x}} + \mu_{K_{E^y}} \mu_{B_{E^x}}}$$

Bu fonksiyonlar, tekli bulanıklaştırma, çarpım karar verme kuralı ve merkez ortalamalı durulayıcı kullanımı ile elde edilmişlerdir. En son olarak  $K_{F^y}$  ve  $K_{V^x}$  değerleri

Tablo 1:  $y$  yönündeki kuvvet kazanç parametresini ayarlamak için kullanılan bulanık mantık kuralları

|           |                 |                     |                     |
|-----------|-----------------|---------------------|---------------------|
|           |                 | $e_{V^x}$           |                     |
|           |                 | Small $e_{V^x}$     | Big $e_{V^x}$       |
| $e_{F^y}$ | Big $e_{F^y}$   | $\Delta K_{F^y PK}$ | $\Delta K_{F^y NB}$ |
|           | Small $e_{F^y}$ | 0                   | $\Delta K_{F^y NK}$ |

Tablo 2:  $x$  yönündeki görüntü tabanlı kontrol kazanç parametresini ayarlamak için kullanılan bulanık mantık kuralları

|           |                 |                     |                     |
|-----------|-----------------|---------------------|---------------------|
|           |                 | $e_{V^x}$           |                     |
|           |                 | Small $e_{V^x}$     | Big $e_{V^x}$       |
| $e_{F^y}$ | Big $e_{F^y}$   | $\Delta K_{V^x NK}$ | $\Delta K_{V^x PK}$ |
|           | Small $e_{F^y}$ | 0                   | $\Delta K_{V^x PK}$ |

$$K_{F^y}(k+1) = K_{F^y}(k) + \Delta K_{F^y}(k) \quad (20)$$

ve

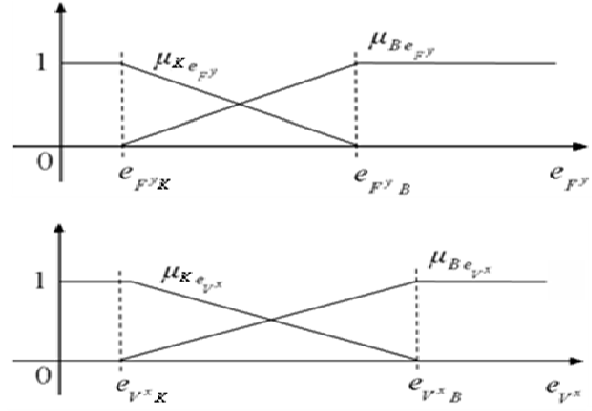
$$K_{V^x}(k+1) = K_{V^x}(k) + \Delta K_{V^x}(k) \quad (21)$$

ile elde edilir. (20) ve (21)'deki  $k$ , dijital kontrolörün hesaplama döngüsünü temsil eder.

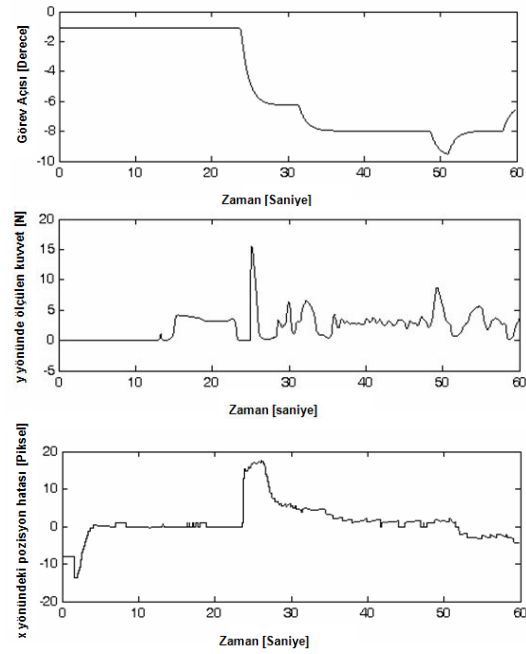
Deney sonuçları bölümünde de tartışıldığı gibi, bu çevrimiçi ayarlama metodu ile iş parçasının yüzeyine teğet doğrultuda kuvvet uygulanması, hedef noktadan  $x$  yönündeki uzaklık arttıkça kuvvet kazanım parametresi azaltılarak engellenmiştir.  $x$  yönündeki konum hatası azaldığında ise bulanık mantık kuralları kuvvet kazanım parametresini artırır.

## 5. Deney Sonuçları

Deneylerde Sabancı Üniversitesi Robotik Laboratuvarı'nda tasarlanan ve imal edilen doğrudan tahrikli iki serbestlik dereceli SCARA tipi bir robot kullanılmıştır. Robot, DSP tabanlı dSPACE 1102 kontrol kartı ile kontrol edilmektedir. Kullanıcı arayüzü bir PC üzerinde koşturmaktadır. C dilinde yazılmış kontrol kodu dSPACE'in geliştirme ortamında derlenip DSP'ye yüklenmektedir. Yokogawa Dynaserv doğrudan tahrikli motorlar, omuz ve dirsek eklemlerinde kullanılmıştır ve 1024000 darbe/devir çözünürlükte konum sinyali üretmektedirler. Omuz motorunun moment kapasitesi 200 Nm, dirsek motorunun moment kapasitesi ise 40 Nm'dir. Robotun işlev ucuna bir 6 eksen kuvvet/moment sensörü monte edilmiştir. Uç işlevlisi olarak bu sensörün üstüne eş eksenli olarak takılan bir M8 civata kullanılmıştır. Çalışma ortamını üstten gören bir kamera görüntü sistemini oluşturmaktadır. Bu kameranın çözünürlüğü 320x240 pikseldir. Manipule edilen iş parçası olarak 10 mm kalınlığında dikdörtgen bir polimer levha, dikey bir eksen den pivotlanmıştır. Parça dönmeye serbest bırakılmıştır. Ancak yumuşak doğrusal yaylar iş parçasının iki yanına monte edilmiştir. Bölüm 3 ve bölüm 4'de önerilen metotlar deney düzeneği üzerinde denenmiştir.



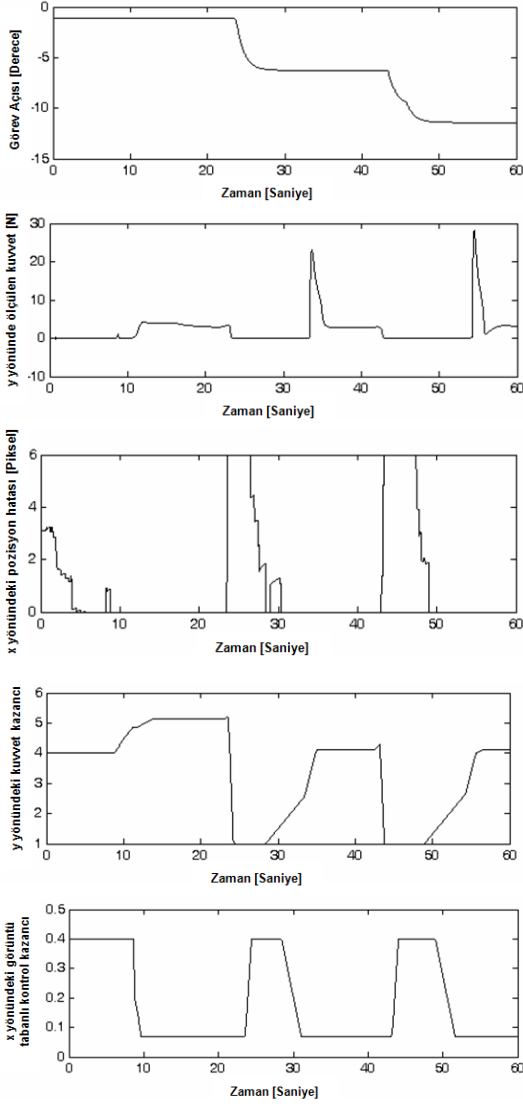
Şekil 4: Ayarlama için kullanılan üyelik fonksiyonları



Şekil 5: Bulanık mantığın kullanılmadığı yöntemde görev açısı,  $y$  yönünde ölçülen kuvvet,  $x$  yönündeki konum hatası edilmiş ve böylelikle kuvvet uygulanmadıkça iş parçasının yöneliminin sabit kalması sağlanmıştır.

Deney sonuçlarında, görev açısı olarak tanımlanan  $\alpha$  açısı, görüntü koordinat takımı ile görev koordinat takımı arasındaki açıdır. İlk yöntemin deney sonuçları Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu şekil görev açısını, görev uzayının  $y$  eksenini boyunca ölçülen kuvvet değerini ve  $x$  eksenini boyunca ölçülen konum hatasını içermektedir.

Şekil 5'de görüldüğü gibi iş parçasının yönelimi başta sabittir ve robot iş parçasına yanaşıp başarılı bir şekilde referans kuvvetini uygulamaktadır. Ardından görev açısı manuel olarak değiştirilmiş ve görev açısındaki bu ani değişim öncelikle sert bir çarpma ile sonuçlanmıştır. Bu durumda  $x$  yönünde konum hatası olmasına rağmen robotun kuvvet uygulamaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu, hedef noktası dışındaki noktalara kuvvet uygulanması anlamına gelmektedir.



Şekil 6: Bulanık mantığın kullanıldığı yöntemde görev açısı, y yönünde ölçülen kuvvet, x yönündeki konum hatası, y yönündeki kuvvet kazancı ve x yönündeki görüntü tabanlı kontrol kazancı

Bu noktalara uygulanan kuvvet sonucu iş parçasının yönelimi daha da değişmiş ve istenilen noktaya kuvvet uygulama görevi gerçekleştirilememiştir.

İkinci yöntemin deney sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Bu deneyde görülen kuvvet aşırımları y yönündeki konum hatası nedeni ile, uç işlevcinin iş parçasına çarparak teması ile oluşmuştur. Bununla birlikte, hedef noktası dışındaki noktalara kuvvet uygulanması bulanık mantıklı ayarlama ile engellenmiştir. x yönünde hata gözlemlendikçe bulanık mantık kuralları kuvvet kazanım parametrelerini düşürmüştür. Bu da önceki yöntemde gözlenen sorunları engellemiştir. x yönündeki hata azaldığında kuvvet kontrolü kazanım parametresi artırılmış, bulanık mantıklı parametre ayarlama yöntemi başarılı olmuştur.

## 6. Sonuçlar

Bu bildiriye kazanım parametrelerinin bulanık mantıkla ayarlandığı görüntü tabanlı hibrit konum/kuvvet kontrolörü bir yöntem olarak sunulmuştur. Yöntem doğrudan işlemeli iki serbestlik dereceli bir robotun üstünde denenmiştir. Bulanık mantıklı çevrimiçi parametre ayarlaması kullanılan yöntemin sabit parametrelili yöntemden daha kararlı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu yöntem bulanık mantığın görüntü tabanlı konum/kuvvet kontrolüne uygulanmasının ilk örneğidir. Sonuçlar bulanık mantığın bu tip birleştirme yöntemleri için uygun olduğunu göstermektedir.

## 7. Kaynakça

- [1] B.J. Nelson, J. Morrow ve P.K. Khosla,, Robotic manipulation using high bandwidth force and vision feedback," *Int. Journal of Math. Comput. Model.*, 1995.
- [2] J. Baeten, ve J.D. Schutter, "Integrated Visual Servoing and Force Control". *Springer tracts in advanced robotics*. Heidelberg, 2004.
- [3] J.D. Schutter ve H.V. Brussel, "Compliant Robot Motion: I. A Formalism for Specifying Compliant Motion Tasks", *International Journal of Robotics Research*, 1988.
- [4] J. Baeten ve J.D. Schutter, "Hybrid Vision/Force Control at Corners in Planar Robotic-Contour Following", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2002.
- [5] J. Baeten ve J.D. Schutter, "Integrated Visual Servoing and Force Control: The Task Frame Approach," *Springer* 2004.
- [6] H. Bruyninckx ve J.D. Schutter, "Specification of force-controlled actions in the "task frame formalism"-a synthesis," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1996.
- [7] G. Morel, E. Malis ve S. Boudet, "Impedance based combination of visual and force control," *Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotic and Automation*, 1998.
- [8] R.C. Luo ve M.G. Kay "Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems", *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Cilt: 19, No.5 1989.
- [9] M. Shibata, T. Murakami ve K. Ohnishi, "A Unified Approach to Position and Force Control by Fuzzy Logic," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 43, No. 1, 1996.
- [10] M.H. Zand, P. Torab ve A. Bahri, "Hybrid Position/Force of a Dexterous Hand Based on Fuzzy Control Strategy," *IEEE ICAR*, 1997.
- [11] F.Y. Hsu ve L.C. Fu, "A New Design of Adaptive Fuzzy Hybrid Force/Position Controller for Robot Manipulators," *IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation*, 1995.
- [12] S.W. Kim, H.S. Noh, D.M. Woo ve M. Park, "Hybrid Position/Force Control Using an Adaptive Fuzzy Control Method," *IEEE IROS*, s: 316, 1995.
- [13] R. Volpe ve P. Khosla, "An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators" *American Control Conference*, s: 758-764, 1992.