

# Bulanık Mantıklı Sınır Tabakası Kalınlığı Ayarlaması ile Kayan Kipli Robot Kontrolü

Kemalettin Erbatur<sup>1</sup>, Berk Çallı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mekatronik Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul  
erbatu@sabanciuniv.edu

<sup>2</sup>Mekatronik Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul  
berkc@su.sabanciuniv.edu

## Özetçe

Kontrol sinyalindeki çatırtı kayan kipli kontrol uygulamalarında önemli bir sorundur. Sınır tabakası yaklaşımı, çatırtıyı önlemek için, literatürdeki birçok düzenlemeden biridir. Bu yöntemde, süresiz kayan kipli kontrol yerine, yüksek kazanımlı geri besleme kontrol yasası kullanılmıştır. Sınır tabaka kalınlığı önemli bir tasarım parametresidir. Bu bildiri, sistemin çatırtı olmadan en iyi performansı göstermesi için, sınır tabaka kalınlığını çevrimiçi bir bulanık mantık kullanarak ayarlama yöntemini önermektedir. Bu metod kontrol sinyalindeki çatırtının ölçümünü gerektirmektedir. Bildiri, iki serbestlik dereceli, doğrudan tahrikli bir robot kolu üzerinde yapılan deneyleri de içermektedir.

## 1. Giriş

Birbirine bağlı, doğrusal olmayan sistem dinamikleri ve değişen sistem parametrelerinin zorluk yarattığı robot manipulator kontrolü konusunda, Kayan Kipli Kontrol (KKK) [1-4] gürbüz bir kontrol stratejisi olarak önerilmektedir. KKK'nın birincil özelliği kontrol sinyalinin süresiz olmasıdır. Belirli koşullar sağlandığında, bir durum uzayının önceden tanımlanmış altuzayında, sistem durumunun sürekli olarak anahtarlamaya yüzeyinden geçtiği bir kayma hareketi elde edilir. Birçok çalışmada Kayan Kipli Kontrol'ün kesikli zamanda uygulamasına ve kararlılık analizine değinilir [5-9]. [9], örnekleme periyodu yeteri kadar kısa tutulduğunda, sürekli zamanda geçerli olan kararlılık ispatlarının, kesikli zamanda da geçerli olacağı belirtilmektedir.

Kayan kipi sağlanması için gerekli olan yüksek hızlı (ideal olarak sonuz frekanslı) anahtarlamaya, kayan yüzeyinin çevresinde salınımın neden olur. Kayan kipli hareket kontrolü uygulamalarında, çatırtı adı verilen kontrolör çıkışındaki yüksek frekanslı salınımın problem teşkil eder. Bu problemin neden olduğu sorunlar ve problemi yaratan etkenler [2]'de açıklanmıştır. Pratik uygulamalarda çatırtı, modellenmemiş yüksek frekanslı plant dinamiklerini tetikleyebileceği ve bunun da daha önceden öngörülemeyecek kararsızlıklara yol açabileceği için oldukça istenmeyen bir olgudur.

Bu problemin üstesinden gelmek için, orijinal Kayan Kipli Kontrol kuramının üstünde birçok değişik modifikasyonlar önerilmiştir [10], [11]. Bu modifikasyonlar arasında en popülerleri, sistemin hareketi kayma yüzeyinin yakın komşusu  $\beta$ 'ya ulaştığında

yüksek kazanımlı geribesleme kullanmak anlamına gelen sınır tabaka yaklaşımıdır [4]. Bu yaklaşım yüksek kazanımlı sistemler ve kayan kipli sistemlerin denkliği fikrine dayanır [12]. Bu metotta sınır tabaka kalınlığının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Çok dar bir sınır tabaka, çatırtı problemini çözemeyeceği gibi, çok kalın bir sınır tabaka da referans izleme performansı ve gürbüzlük açısından düşüş demektir.

Akıllı kontrol alanının gelişmesi ile bulanık mantık, yapay sinir ağları ve evrimsel hesaplama dayalı yeni kontrol yaklaşımları da sık olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu kontrol metodları, kontrol mühendislerinin problemi kendi anlayışları ile çözümlemesinde, belirsizlik, kesinsizlik veya hassassızlık problemlerinin üstesinden gelmelerinde, geniş bir özgürlük alanı sağlamaktadır. Bulanık kontrol sistemleri, belirsizlik ve kesinsizlik problemlerine çözüm olan bir araç olarak, insan deneyiminin sistem kontrolünde kullanılabilmesine aracılık edebilirler. Bu sistemler robot yörünge kontrolü alanın kullanıldıklarında, kontrol yapısına iki katkıdan birini sağlarlar. Bunlardan biri kontrol sinyalinin bulanık kurallar ile hesaplanmasıdır. Diğeri ise diğer kontrol mekanizmalarının, belirsizlikler karşısında veya değişik çalışma noktalarında, daha iyi performans göstermesi için değişkenlerinin ayarlanması veya adapte etmesidir. Bulanık mantık ve kayan kipli kontrolörlerin birleştirilmesi bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır ve yakın zamanda bu konuda yapılmış bir araştırma [13]'te verilmiştir.

Bu bildiri sınır tabaka kalınlığını çevrimiçi bulanık mantıkla ayarlayan bir algoritma önermektedir. Bu metod bir çatırtı değişkeninin tanımlanmasına dayanır [14-16]. Bulanık sistem, çatırtı değişkenini ve kayan değişkenini uygulanabilir bir sınır tabaka kalınlığı belirlemek için kullanır. Bu ayarlama yöntemi [16] da öne sürülen yöntem ile benzerdir, ancak, değişik üyelik fonksiyonları kullanmakta ve bu metodu deneyler ile doğrulamaktadır.

Bir sonraki bölüm, diğer bölümlerdeki tartışmalara ışık tutması için, ikinci dereceden tek giriş tek çıkış sistemlerde sınır tabakalı klasik kayan kipli kontrolörün tasarımını ana hatları ile anlatmaktadır. Üçüncü bölüm çevrimiçi ayarlama metodunun üzerinde durmaktadır. İki serbestlik dereceli doğrudan tahrikli robot kolu üzerindeki deneyler dördüncü bölümdedir. Beşinci bölümde ise sonuçlar sunulmaktadır.

## 2. Sınır Katmanı Kullanan Klasik KKK

Bu bölümde klasik kayan kipli kontrolör özetlenmiştir. Sadelik açısından, ikinci dereceden tek giriş tek çıkışlı sistemler üzerinde

odaklanılmıştır. Bu kontrolör durum uzayı denklemleri aşağıdaki gibi olan sistemler için tasarlanmıştır.

$$\ddot{x} = f(X) + b(X)u \quad (1)$$

Bu denklemde X, durum uzay değişkenlerinin dizilmesinden oluşan vektördür ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$X = [x \quad \dot{x}]^T \quad (2)$$

u kontrol girdisidir ve girdi kazanım vektörü b sadece pozitif değerlerden oluşur. İzleme hatası aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$e = x_d - x \quad (3)$$

Burada  $x_d$  arzu edilen x değeridir. İkinci derecen sistemlerin kayan kipli kontrolünde, genel olarak, arzu edilen dinamik cevap aşağıdaki gibi verilir.

$$s(e) = \dot{e} + \lambda e = 0 \quad (4)$$

Burada  $\lambda$  kararlılık için kullanılan pozitif bir sayıdır. Eğer s sıfıra çekilebilirse, arzu edilen dinamiklere ulaşılır ve (4)'te dikte edilen, faz düzleminde eğimi  $-\lambda$  doğruya karşılık gelen (Şekil 1) dinamikler ile izleme hatası sıfıra yakınsar. Literatürde, genelde, s cisinden olan Lyapunov fonksiyonu (V) seçen yaklaşımlar kullanılır ve bu fonksiyon aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (5)$$

Kontrol kuralı, faz düzlemindeki durum yörüngeleri için çekici bir kayan doğrusu yaratmak için tasarlanır.

Bu  $\dot{V}$  'in kesin eksi olmasının ile sağlanır ki bu da orijin dışında hep negatif değerler alması anlamına gelir. Kesin eksi bir  $\dot{V}$  için yapılan seçin aşağıdaki denklemde verilmiştir.

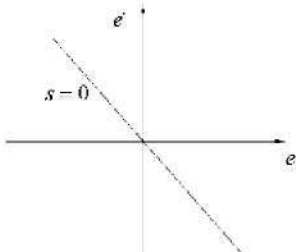
$$\dot{V} = s\dot{s} = -K'|s| \quad (6)$$

Burada  $K'$  pozitif bir sabittir. (1-4) kullanılarak,  $\phi$  aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$\phi(t) = \dot{x}_d + \lambda x_d \quad (7)$$

ve bu denki olan denklemin aşağıda verilmiştir.

$$s(\dot{\phi}(t) - f(X) - b(X)u - \lambda \dot{x}) = -K'|s| \quad (8)$$



$$u = \frac{1}{b}(\dot{\phi} - f - \lambda \dot{x}) + \frac{K'}{b} \text{sign}(s) \quad (9)$$

Burada,  $\text{sign}(s)$  işaret fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} -1 & \text{if } s < 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ 1 & \text{if } s > 0 \end{cases} \quad (10)$$

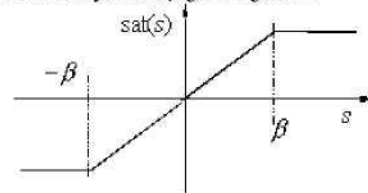
Pratikte f ve b matrisleri kesin olarak bilinemez, dolayısıyla yerlerine bu matrislerin tahmini değerleri kullanılır. Böylece kontrol kuralı aşağıdaki hale gelir.

$$u = \frac{1}{\hat{b}}(\dot{\phi} - \hat{f} - \lambda \dot{x}) + K \text{sign}(s) \quad (11)$$

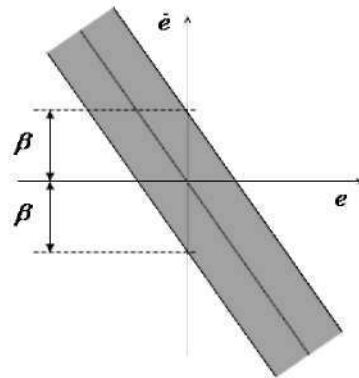
Burada  $K = K' / \hat{b}$  'dir. Eğer f ve b üzerindeki belirsizliklerin sınırı biliniyor ise, K kazanımı yeteri kadar büyük seçilerek bu belirsizliklere karşı gürbüzlük sağlanabilir. Teoride işaret fonksiyonu sistem durumlarını kayan doğrusunun üstünde tutmak için sonsuz frekansta anahtarlama gerektirir. Fakat, kontrol dijital bilgisayar ile uygulandığında kaçınılmaz olan aktüatör sınırlamaları ve gecikmeler gibi bazı etkenler yüzünden sonsuz frekansta anahtarlama uygulanabilir bir yöntem değildir. Bunun sonucu olarak durum yörüngelerinin kayan doğrusunun üzerinden sık atlamaları gözlemlenir. Bu sık atlamalar kayan kipli kontrol terminolojisinde çatırtı olarak isimlendirilir. Bu durum, hareket kontrolü alanında da kontrol girdisinde ve hız sinyalinde yüksek frekanslı ve yüksek şiddetli salınımlar olarak ifade edilir. Çatırtı probleminin üstesinden gelebilmek için orijinal kontrol kuralı üzerinde birçok düzenlemeler önerilmiştir. Bu çözümler arasında en basit ve popüler olanı, işaret fonksiyonunun doyum fonksiyonu ile değiştirilmesi olan sınırlı tabaka yaklaşımıdır (Şkl. 2).

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} -1 & \text{if } s \leq -\beta \\ s / \beta & \text{if } -\beta < s < \beta \\ 1 & \text{if } \beta < s \end{cases} \quad (12)$$

Bu durumda kontrol yasası aşağıdaki gibidir.



Şekil 2: Doyum fonksiyonu



Şekil 3: Sınırlı tabakası

$$u = \frac{1}{b}(\dot{\phi} - \hat{f} - \lambda \dot{x}) + K_{sat}(s). \quad (13)$$

Şekil 3'te de gösterildiği gibi  $\beta$  parametresi sınır tabakanın kalınlığıdır.

### 3. Çevrimiçi Ayarlama Metodu

Dijital bilgisayarların kullanıldığı pratik uygulamalarda, örnekleme zamanından kaynaklanan zaman gecikmeleri yüzünden, sonsuz frekansta anahtarlama mümkün değildir. Dolayısıyla, kayan doğrusunun izlenmesi yerine, kayan doğrusu etrafında zigzag hareketi gözlenir. Kesikli zamanda kayan kipli kontrolörleri inceleyen bir çok bildiri literatürde mevcuttur ve sürekli zamandaki kararlılık analiz araçlarının kesikli zamandaki eşitleri mevcuttur [5-9]. Genel olarak kesikli zamanda kararlılığı sağlayan koşullar, örneklenmiş kayan değişkenini içeren eşitsizlikler şeklindedir ve bu koşulları sağlayan kontrol yasaları, önceki bölümde değinilenden farklı olarak, kesikli zaman denklemleridir. Ayrıca, sürekli zamanda tasarlanmış kontrol yasalarının kararlılığının, örnekleme periyodu yeterince kısa seçilirse kesikli zamanda da geçerli olacağına [9]'da değinilmiştir. Bu bildiride önceki bölümde, sürekli zamanda tasarlanan kontrolör kullanılmıştır. Fakat, uygulamanın dijital bilgisayarlarda yapılacağı kabul edilmiş ve bunun etkileri incelenmiştir.

Dijital uygulamada, işaret fonksiyonlu klasik kayan kipli kontrol uygulansa bile, izleme performansı garanti değildir. Zigzag hareketi küçük sınır katman kalınlığı değerlerinde bile gözlenmektedir. Yüksek  $\beta$  değerleri için çadırı ortadan kalkmaktadır, fakat  $\beta$ 'yı arttırmak, izleme performansında gerilemeye yol açmaktadır. Bu durum kritik bir  $\beta$  değeri olduğunu ve bu değer altında çadırının oluşacağını, üstünde de izleme performansının düşeceğini göstermektedir. Ayrıca, [15], sinusoidal bir referans yörüngesi için elde edilebilen minimum izleme hatasının bu  $\beta$  değeri ile sağlanabileceğini açıklar (Şekil. 4). Bu durum, kayan doğrusu eğimi, kazanım parametresi K ve eşdeğer kontrolün hesaplanması aynı tutulduğu farz edilirse, sınır tabaka yöntemi ile elde edilebilecek performansı sınırlayan bir faktördür.

Sınır tabakanın kalınlığını sınırlandıracak bu kritik değer deneylerle, deneme yanılma ile, bulunabilir. Fakat, bu değer deneyde kullanılan referans yörüngesine oldukça bağlı bir değer olabilir. Ayrıca gerçek uygulamalarda, parametreyi ayarlama sırasında, mekanik sistem hiç istenmeyen yüksek şiddette çadırıya maruz kalabilir. Ayrıca, sistem dinamiğindeki küçük değişimlerin bile, sistemi denge durumundan çadırı seviyesine çekebileceği söylenebilir.

Dolayısıyla, olabilecek en iyi performansı elde edebilmek için, sınır tabaka kalınlığının, kontrol sinyalindeki çadırıya göre değiştirilmesi gerekir.

Çadırıyı ölçmek için (14)'üncü denklemde, çadırı değişkeni,  $\Gamma$ , tanımlanmıştır.

$$\Gamma = |\dot{u}| \quad (14)$$

Kontrol sinyalinin türevinin mutlak değeri,  $|\dot{u}|$ , Dijital uygulamada Euler yaklaşımı ile elde edilir. Şekil 5, bu değişkenin, çok fazla kontrol işlemi olduğunda ya da kontrol sinyali çok değiştiğinde, gösterdiği tipik davranışı belirtir.

Birçok çeşitli çadırı değişkeni tanımlanabilir. Benzer çadırı değişkenleri, kayan kipli kontrolörlerinin parametrelerinin çevrimiçi ayarlanmasında [14] ve [15] de kullanılmıştır. Bu çadırı ölçüsünü kullanarak sınır tabaka kalınlığı  $\beta$ 'yı kontrol aktivitesi ile

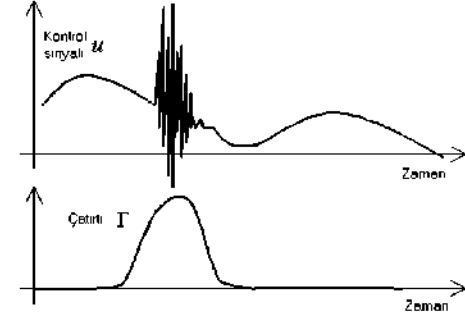
ilişkilendiren birçok parametre ayarlama metodu geliştirilebilir. Ana mantık aşağıdaki gibi özetlenebilir.

(i) Çadırı oluştuğunda, sınır tabaka kalınlığı, kontrol girdisini daha yumuşatmak için, arttırılmalıdır.

(ii) Kontrol aktivitesi az olduğunda sınır tabaka kalınlığı azaltılmalıdır. Bunun nedeni, en iyi izleme performansını elde etmek için bir miktar kontrol aktivitesi gerekmektedir ve aynı zamanda bizim amacımız sistemi çadırı limitinde tutmaktır. Düşük kontrol aktivitesi, çadırı değişkeni  $\Gamma$ 'nin değerinin küçük olmasından anlaşılabilir.



Şekil 4: Tipik sınır tabaka kalınlığı - bata ilişkisi



Şekil 5: Çadırı değişkeni

(i) ve (ii)'de bahsedilen kurallar, [15]'te anlatıldığı gibi, kendi başlarına sınır tabaka kalınlığını ayarlamak için kullanılabilir. Fakat bu yöntemler, sadece sistemdeki çadırı bilgisine dayanır. Sınır tabaka kalınlığını ayarlama başka bir değerli bilgi de kayan değişkenidir. Aşağıda belirtilen kurallar, bu bildiride, sınır tabaka kalınlığı ayarlamasında, kayan değişkenine dayanan kurallardır.

(iii) Kayan değişkeninin mutlak değeri düşük olduğunda, faz yörüngesi kayan doğrusuna yakın demektir, dolayısıyla düşük bir doyum fonksiyonu çadırıyı beraberinde getirir.

(iv) Kayan değişkeninin mutlak değeri yüksek olduğunda, faz yörüngesi kayan doğrusundan uzak demektir, dolayısıyla arzu edilen, kayan doğrusuna ulaşma zamanını azaltmak için, düşük bir doyum değeri kullanılmaktadır.

Bu dört kural,  $\beta$  ayarlama mekanizması kurmak için çeşitli şekillerde kullanılabilir.  $\Gamma$ ,  $s$  ve  $\beta$  arasındaki analitik bir ilişki yöntemlerinden biri olabilir. Bu bildiride önerilen metod  $\beta$  parametresini bulanık sistemler kullanarak ayarlanmasıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi, bulanık sistemler, bir sistemin sözel tanımlarını (yukarıdaki dört kural gibi), kontrol elde etme problemini veya adaptasyon mekanizmalarını yaratmak için doğal yöntemlerdir.

Tablo I ve şekil 6 ayarlama kullanılan dört bulanık kuralı tarif eder. Tablo I'de "NB" negative büyük, "NK" ise negatif küçük, PB is pozitif büyük anlamına gelir. Durulama işlemi (15)'teki ifade ile gerçekleşir ve son olarak  $\beta$ , kontrol döngüsündeki her  $k$  için (16)'daki gibi tanımlanır.

$$\Delta\beta = \frac{\mu_{Büyük\ s} \mu_{Küçük\ \Gamma} \Delta\beta_{NB} + \mu_{Büyük\ s} \mu_{Büyük\ \Gamma} \Delta\beta_{NK} + \mu_{Küçük\ s} \mu_{Büyük\ \Gamma} \Delta\beta_{BP}}{\mu_{Büyük\ s} \mu_{Küçük\ \Gamma} + \mu_{Büyük\ s} \mu_{Büyük\ \Gamma} + \mu_{Küçük\ s} \mu_{Küçük\ \Gamma} + \mu_{Küçük\ s} \mu_{Büyük\ \Gamma}}$$

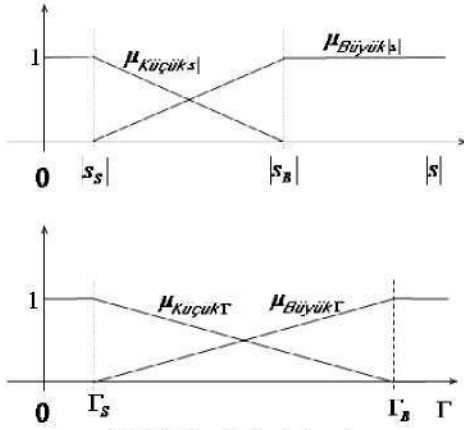
(15)

$$\beta(k) = \beta(k-1) + \Delta\beta(k-1)$$

(16)

Tablo I: Bulanık Mantık Kuralı

		$\Gamma$	
		Küçük $\Gamma$	Büyük $\Gamma$
$ s $	Büyük $ s $	NB $\Delta\beta$	NK $\Delta\beta$
	Küçük $ s $	0	PB $\Delta\beta$



Şekil 6: Üyelik fonksiyonları

Kolayce görülebilir ki, yukarıda belirtilen kural tabanı, (i) - (iv)'te bahsedilen kuralları sağlamaktadır. Bir sonraki bölümde simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir.

#### 4. Deneysel Sonuçlar

Sabancı Üniversitesi Robotik Laboratuvarı'nda yapılmış olan, iki serbestlik dereceli doğrudan tahrikli robot Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu manipulatör, deneysel çalışmalar için test düzeneği olarak kullanılmıştır. Bu manipulatörün kol kütle ve uzunlukları Tablo II'de verilmiştir. Yokogawa Dynaserv marka doğrudan tahrikli motorlar, zemin ve kol eklemlerinde kullanılmıştır ve 1024000 puls/devir çözünürlükte pozisyon sinyali üretmektedirler. Bu deneyde, çatırtısız kayan kipli algoritma, doğrudan tahrikli manipulatörün kontrolünde kullanılmıştır. Zemin motorunun tork kapasitesi 200 Nm, kol motorunun tork kapasitesi ise 40 Nm'dir. Robot kolunu kontrol etmek için dSpace 1102 DSP tabanlı bir sistem kullanılmıştır. Kullanıcı arayüzü Pentium 3 bir PC'de bulunmaktadır. C dilinde yazılmış servo rutinleri bu düzenekte derlenmiş ve DSP'ye yüklenmiştir.

Robotun dinamik denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} + D(q_1, q_2) \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C(q_1, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{c1} \\ F_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$q_1$  zemin eklemi açısıl pozisyonunu,  $q_2$  ise kol eklemi açısıl pozisyonunu temsil etmektedir.



Şekil 7: SCARA tipi doğrudan tahrikli robot kolu

Tablo II: Robot kollarının kütle ve uzunlukları

Kol 1(üst kol) ağırlığı	23 kg
Kol 2(dirsek kolu) ağırlığı	4 kg
Kol 1(üst kol) uzunluğu	0.4 m
Kol 2(dirsek kolu) uzunluğu	0.32 m

$J_1$  ve  $J_2$ , sırasıyla, zemin ve kol eklemleri rotor eylemsizlik değerleridir.  $D$  manipulatör eylemsizlik matrisidir.  $C$  matrisi merkezci ve Coriolis etkilerini temsil eder.  $B_1$  ve  $B_2$  iki kolun sabit akışkan sürtünme katsayılarıdır.  $F_{c1}$  ve  $F_{c2}$  Coulomb sürtünme torqlarıdır. Robot, eklem sürme torqları olan  $u_1$  ve  $u_2$  tarafından kontrol edilir. Eklemlerin yatay kinematik düzenleri sayesinde eklemlere yerçekimi etkisi yoktur.

$D$  ve  $C$  matrisleri, robot kolları ve doğrudan işlemlerli motorların çeşitli kütle, uzunluk ve eylemsizlik parametreleri kullanılarak, Euler-Lagrange metodu ile elde edilir [17].  $J_1$  ve  $J_2$  değerleri üretici dökümantasyonundan elde edilebilir. Oysa ki sürtünme parametrelerinin, özellikle Coulomb sürtünmesinin, modellenmesi zordur.

Bu sistemin kayan kipli kontrolü, (13)'ü bütün eklemlere ayrı ayrı uygulayarak elde edilir. Bağımsız kabul edilen robot kollarının tek giriş tek çıkışlı basitleştirilmiş hareket denklemlerin, sabit ve etkin eylemsizlik ve sönümlenme parametreleri ile elde edilmiş hali aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} (J_1 + D_{11\text{-Tablo III}}) \ddot{q}_1 + \hat{B}_1 \dot{q}_1 &= u_1 \\ (J_2 + D_{22\text{-Tablo III}}) \ddot{q}_2 + \hat{B}_2 \dot{q}_2 &= u_2 \end{aligned} \quad (18)$$

olduğunda,

$$J_{e1} = (J_1 + D_{11\text{-Tablo III}}), \quad J_{e2} = (J_2 + D_{22\text{-Tablo III}}). \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $D_{11\text{-Tablo III}}$  and  $D_{22\text{-Tablo III}}$  eylemsizlik matrisi  $D(q_1, q_2)$  'nin kollar dik uzanır haldeki diyagonal

elemanlarıdır.  $\hat{B}_1$  ve  $\hat{B}_2$  deneylerden elde edilen tahmini akışkan sürtünme değerleridir. Linklerin birbirine olan etkileri, merkezci ve Coriolis etkiler ile Coulomb sürtünmeleri ihmal edilmiştir. Robotun dinamiği ile ilgili çok sınırlı bilgi kullanılmıştır.

(18)'deki denklemler, aynı zamanda, (1)'de değinilen şekle getirilebilir.

$$\begin{aligned}\ddot{q}_1 &= -\frac{\hat{B}_1}{J_{eff1}}\dot{q}_1 + \frac{1}{J_{eff1}}u_1 \\ \ddot{q}_2 &= -\frac{\hat{B}_2}{J_{eff2}}\dot{q}_2 + \frac{1}{J_{eff2}}u_2\end{aligned}\quad (19)$$

Böylece (13)'teki kontrol kuralı aşağıdaki gibi uygulanır.

$$\begin{aligned}u_1 &= \frac{1}{\hat{b}_1}(\dot{\phi}_1 - \hat{f}_1 - \lambda_1\dot{x}_1) + K_1\text{sat}(s_1), \\ u_2 &= \frac{1}{\hat{b}_2}(\dot{\phi}_2 - \hat{f}_2 - \lambda_2\dot{x}_2) + K_2\text{sat}(s_2)\end{aligned}\quad (20)$$

Denklemlerde kullanılan değişkenler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}x_1 &= q_1, \quad \hat{f}_1 = -\frac{\hat{B}_1}{J_{eff1}}\dot{q}_1, \quad \hat{b}_1 = \frac{1}{J_{eff1}}, \\ x_2 &= q_2, \quad \hat{f}_2 = -\frac{\hat{B}_2}{J_{eff2}}\dot{q}_2, \quad \hat{b}_2 = \frac{1}{J_{eff2}}.\end{aligned}\quad (20)$$

Bulanık ayarlama için gereken kontrolör parametreleri ve parametre değerleri Tablo III'te verilmiştir. 1 ms'lik kontrol döngüsü kullanılmıştır. İki robot koluna da 0.1 radyanlık basamak referans yörüngesi uygulanmıştır. Sistemin başlangıç durumunda, robot kolları dik uzanır şekilde ve durağandır.

Kontrol sinyali, eklem pozisyon hatası ve  $\beta$  parametresinin değişim grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Durağan durumda  $3.0 \times 10^{-5}$  rad'lık hata elde edilmiştir. Benzer sonuçlar zemin ekleminde de elde edilmiştir. Fakat bu sonuçlara, yer darlığından dolayı bu bildiride yer verilmemiştir.

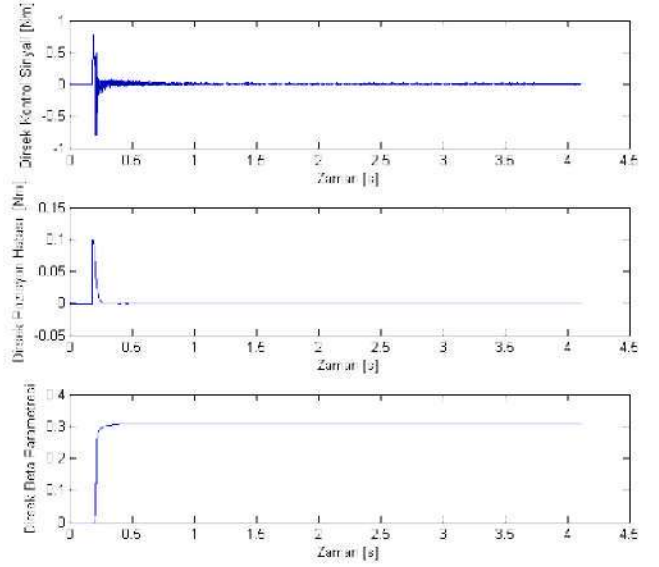
Görülebilir ki, çok yüksek kontrol akivitesi, sınır tabaka kalınlığında ani artımlara yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak da, kontrol sinyalinde yumuşama ve çatırtıda azalma gözlemlenmiştir.

Şekil 6'daki üyelik fonksiyonlarından ve Tablo I'deki kurallardan görülebildiği gibi, kayan değişkeninin mutlak değeri  $|s_s|$ 'den küçük ve çatırtı değişkeni  $\Gamma_s$ 'den küçük olduğunda  $\beta$  parametresinde değişiklik yapılmamaktadır. Dolayısıyla, kayan doğrusuna arzu edilen yakınlığa ve kabul edilebilir bir çatırtı seviyesine ulaşıldığında  $\beta$  parametresi hızlı bir şekilde yakınsar.

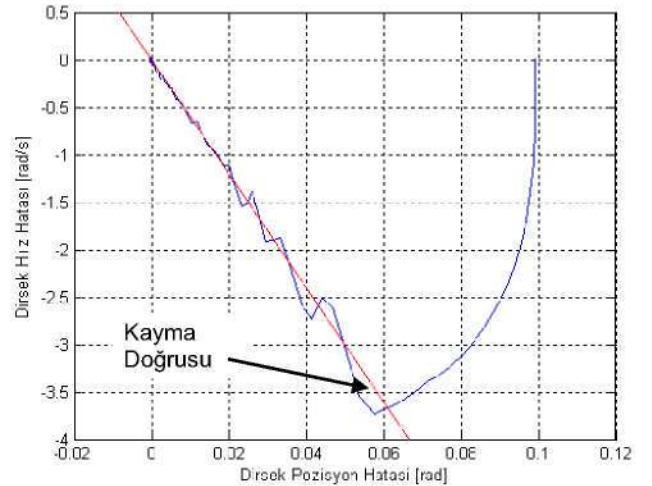
Zemin eklemi için, faz düzlemi yörüngesi ve kayan doğrusu Şekil 9'da gösterilmiştir. KKK sistemlerine sıkça gözlenen, kayan doğrusunu yukarı ıskalama problemi çok geniş bir sınır tabaka ile çözülmemiştir. Kayan doğrusu tam olarak izlenememiştir. Fakat, izleme çok yakındır ve arzu edilen hata dinamikleri iyi bir yakınsama ile elde edilmiştir. Bu da gösterir ki sınır tabaka kalınlığı için kullanılan çevrimiçi ayarlama algoritması başarılıdır.

Tablo III: Kontrolör parametreleri

Parameter	Value	Parameter	Value
$K_1$	30	$ s_B $	4
$K_2$	15	$ s_S $	0.01
$\lambda_1$	50	$\Delta\beta_{BP}$	0.1
$\lambda_2$	80	$\Delta\beta_{NB}$	-0.1
$\Gamma_B$	200000	$\Delta\beta_{NK}$	-0.05
$\Gamma_S$	2000		



Şekil 8: Dirsek eklemi için kontrol ve hata sinyalleri ve sınır tabaka parametreleri. Durağan durum hatası  $3 \times 10^{-5}$  rad'dır.



Şekil 9: Dirsek eklemi için Faz düzlemi yörüngesi

## 5. Sonuç

Sınır tabaka yaklaşımını kullanan kayan kipli kontrolörler literatürde oldukça ayagın olarak çalışılmıştır. Bu yaklaşım çatırtı problemini çözmektedir fakat orjinal kayan kipli algoritma ile karşılaştırıldığında izleme performansında bir düşüş gözlenmektedir. En iyi performansı veren ve yine de çatırtıyı engelleyebilen bir sınır tabaka kalınlığının belirlenmesi önemli bir tasarım konusudur. Bu bildiri, sınır tabaka kalınlığını ayarlamak için, çevrimiçi bir ayarlama metodu önermiştir. Sınır tabaka kalınlığı, çevrimdışı deneme yanılma yöntemleri olmadan belirlenmiştir. Bu çevrimiçi algoritma, sürekli olarak, kayan değişkenindeki ve çatırtı seviyesindeki değişimlere, sınır tabaka kalınlığını ayarlayarak karşılık vermektedir. Deneylerde de görüldüğü gibi, önerilen metodun performansı ve çatırtıyı ortadan kaldırması, metodu endüstride kullanılmaya aday bir metod olarak sunmaktadır.

## 6. Kaynakça

- [1] Utkin, V. I., "Variable Structure Systems with Sliding Modes," IEEE Transactions on Automatic Control, ACC-22-2, pp.212-222, 1977.
- [2] Young, K. D., V. I. Utkin, and U. Ozguner, "A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 3, pp. 328-342, May 1999.
- [3] Utkin, V. I., Sliding Modes in Control Optimization, New York: Springer-Verlag, 1992.
- [4] Slotine, J. J., and S.S. Shastry, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators," International Journal of Control, v. 38, pp. 465-492, 1983.
- [5] Milosavljevic, C., "General Conditions for the Existence of a Quasi-Sliding Mode on the Switching Hyperplane in Discrete Variable Structure Systems," Automatic Remote Control, 46, No. 3, pp. 307-314, 1985
- [6] Sarpturk, S., Y. I Stefanopoulos and O. Kaynak, "On the Stability of the Discrete-Time Sliding Mode Control Systems," IEEE Transactions on Automatic Control, 32, No. 10., pp. 930-932, 1987
- [7] Sira-Ramirez, H., "Nonlinear Discrete Variable Structure Systems in Quasi-Sliding Mode," International Journal of Control, 54, 445-456, 1991
- [8] Koshkouei, A. J. and A. S. I. Zinober, "Sliding Mode Control of Discrete Time Systems," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 122, pp. 793-802, 2000
- [9] Chen, X. and T. Fukuda, "Computer-Controlled Continuous-Time Variable Structure Systems with Sliding Modes," International Journal of Control, Vol. 67, No. 4. pp. 619-639, 1997
- [10] Slotine, J. J., and W. Li, Applied Nonlinear Control, New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [11] Elmali, H., and N. Olgac, "Robust Output Tracking Control of Nonlinear MIMO Systems via Sliding Mode Technique," Automatica, v.28, pp.145-151, 1992.
- [12] Izosimov, D. B., and V. I. Utkin, "On Equivalence of Systems with Large Coefficients and Systems with Nonlinear Control," Automation and Remote Control, v.11, pp. 189-191, 1981.
- [13] Kaynak, O., K. Erbatur, M. Ertugrul, "The Fusion of Computationally Intelligent Methodologies and Sliding Mode Control - A Survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 48, No. 1, pp. 4-17, Feb. 2001.
- [14] Erbatur, K., O. Kaynak, A. Sabanovic and I. Rudas, "Fuzzy Adaptive Sliding Mode Control of a Direct Drive Robot," Robotics And Autonomous Systems, Vol. 19, No, pp. 215-227: 2, 1996.
- [15] Erbatur, K., A. Kawamura, "Automatic Tuning of the Boundary Layer Thickness for Sliding Mode Motion Controllers via the Use of Chattering Detection," Proc. of Japanese IASC'01, Vol.3, pp. 1557-1562, Matsue, Japan, 2001.
- [16] Erbatur, K., A. Kawamura, "Chattering Elimination via Fuzzy Boundary layer Tuning," Proc. IECON 2002, Annual Conf. IEEE Ind. Elect. Oc, pp. 2131-2135, 2002
- [17] Spong, M. V. and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control," John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1989.