

Koordinat dönüşümüne dayalı zamanla değişen doğrusal kayma yüzeyi

Sezai TOKAT*, İbrahim EKSİN, Müjde GÜZELKAYA

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

Özet

Bu çalışmanın amacı, kayma yüzeyi tasarımı için yeni bir yöntem geliştirmektir. Yeni yaklaşımlar; birisi kayma yüzeyinin kendisi, diğeri ise doğal olarak kayma yüzeyine dik olan bir koordinat ekseninde geliştirilmiştir. Daha sonra, kontrol kuralı Lyapunov kararlılık koşulu uygulanarak düzenlenmiştir. Önerilen yeni kayma yüzeyi bulanık mantık kontrol, yakın komşuluk ve fonksiyon atama yaklaşımları kullanılarak zamanla değişen bir parametre yardımı ile ayarlanmıştır. Elde edilen yöntemlerin analizi parametre belirsizlikleri ile sınır değerli dış bozuculara sahip ikinci derece sistem modeli üzerinde koşturulan benzetimlerle yapılmıştır. Çeşitli başarımlar ölçütleri kullanılarak önerilen yöntemin ulaşma zamanının azaltılmasının, bozuculara karşı dayanıklılık, yumuşak faz düzlemi yörünge hareketi gibi olumlu iyileştirmeler sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayma kipli kontrol, kayma yüzeyi tasarımı.

Coordinate transformation based time-varying linear sliding surface

Abstract

The aim of this study is to propose new approaches for on-line tuning of the linear sliding surface in the sliding mode controllers. The new approaches are developed for a class of second order systems on a new coordinate axes that one of which is the classical sliding surface and the other one is naturally chosen to be orthogonal to it. The control law is then modified accordingly by applying the Lyapunov stability condition. The adjustment of the linear sliding surface defined in the new coordinate axes is achieved by tuning a new parameter using three different methods. First, an adaptive sliding surface with a rotation scheme is constructed by interpreting the classical delta neighborhood approach. Next, the rotation process is achieved by using a fuzzy tuning mechanism that uses the new coordinates as its input variables and generates an incremental change in the new parameter value as an output. Thirdly, a time-varying function is used for defining the new parameter. Numerical simulations are performed on a second order system model with parameter uncertainties and bounded external disturbance. The new approaches are compared with the sliding mode controller having a constant sliding surface and two sliding mode controllers having a continuously time-varying sliding surface. Results have shown improved performances of the proposed approaches in terms of a decrease in the reaching and settling times, robustness to disturbances and smooth phase plane trajectory.

Keywords: Sliding mode control, sliding surface design.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Sezai TOKAT. stokat@pamukkale.edu.tr; Tel: (212) 285 35 00.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Koordinat dönüşümüne dayalı zamanla değişken kayma yüzeyi tasarım yöntemleri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.06.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.07.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 29.02.2004 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Kayma kipli kontrol, değişken yapıli sistemler kuramının bir alt sınıfı olarak ortaya çıkmıştır (Edwards ve Spurgeon, 1998). Yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geribesleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda süreksiz bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir kontrol yöntemidir (Utkin, 1983). Literatürde çokça yer bulmasının ve değişik alanlara uygulanmasının nedeni, kullanım kolaylığı ve dış bozucular ve parametre belirsizlikleri ile başa çıkmadaki becerisidir.

Kayma kipli kontrolör tasarım süreci iki adımlı bir yordam olarak düşünülebilir. Bu adımlar sırasıyla; istenen kararlı dinamiklere karşı düşen bir kayma yüzeyinin belirlenmesi ve belirlenen kayma yüzeyine ulaşmayı sağlayan bir kontrol kuralının elde edilmesidir (Hung vd., 1993). Kayma kipli kontrole sahip bir sisteme ilişkin faz yörüngesi iki ayrı bölümde ele alınabilir (Hung vd., 1993). Kayma yüzeyi dışında bulunan herhangi bir başlangıç koşulundan başlayan sistem yörüngeleri kayma yüzeyine ulaşma eğilimindedir. Kayma yüzeyine ulaşmak için geçen süre ulaşma zamanı ve faz yörüngesinin bu bölgesi ise ulaşma kipi olarak adlandırılır. Ulaşma kipinde sistem, parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarlıdır (Edwards ve Spurgeon, 1998). Kayma yüzeyine ulaşıldığı zaman sistem yörüngelerinin parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarsız olduğu kayma kipi başlar. Bu yüzden ulaşma kipini kısaltarak ya da tamamen ortadan kaldırarak sistem duyarlılığını azaltmak ya da yok etmek için literatürde önerilmiş birçok değişik yöntem bulunmaktadır.

Süreksiz kontrol kuralına sahip sistemlerin tasarım problemi, genellikle kayma yüzeyi parametrelerinin seçilmesine indirgenir. Çünkü, ilgili sistemin başarımını tamamen bu parametreler belirler. Bu yüzden kayma kipli kontrolör başarımının iyileştirilmesini konu alan çalışmaların birçoğu kayma yüzeyi tasarımı ile ilgilidir. Kayma yüzeyi tasarımı için bir yöntem doğrusal olmayan kayma yüzeyi kullanılmasıdır

(Tokat vd., 2003a). Fakat genel olarak, kontrol kuralının belirlenme zorluğu, doğrusal olmayan ilişki elde etme güçlükleri bulunur. En sık kullanılan yöntem, geleneksel kayma kipli kontrolöre ait sabit ve doğrusal kayma yüzeyi için başarımı iyileştirecek şekilde zamanla değişen bir düzen geliştirilmesidir. Doğrusal kayma yüzeyi, döndürme veya öteleme işlemleri kullanılarak izleme davranışını iyileştirecek şekilde durum uzayında hareket ettirilebilir. Choi vd. (1993), yaptıkları dikkat çekici çalışmada ikinci dereceden sistemler için öteleme ve döndürme düzenlerini tanımlamışlar ve zamanla değişen doğrusal kayma yüzeyi için kayma kipi varlığını diferansiyel geometriden yararlanarak ispatlamışlardır. Choi ve diğerleri (1993) tarafından elde edilen sonuçlardan yola çıkarak öteleme ve kayma düzenine sahip kayma kipli kontrolör tasarımı için bulanık mantıklı bir ayarlama yaklaşımı önerilmiştir (Ha vd., 1999). Hareketli doğrusal kayma yüzeyi düşüncesindeki önemli bir olumsuzluk, bekleme sürelerinden dolayı bozuculara karşı oluşan duyarlılıktır. Bekleme süresi, hesaplanan bir doğrusal kayma yüzeyinden bir başka doğrusal yüzeye geçiş aşamasında geçen zaman dilimidir. Bartoszewicz (1995), bu süreksizlik etkisi üzerinde durmuş ve hareketli kayma yüzeyinin sürekli bir eşdeğerini elde etmiştir. Yine Bartoszewicz (1996), kararlı bölgelerde zamana bağlı bir öteleme fonksiyonu kullanarak kayma yüzeyleri tasarlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, çeşitli başarım ölçütleri ile değerlendirilen kayma kipli kontrolör başarımını iyileştirmek üzere zamanla değişen doğrusal kayma yüzeyleri tasarlamaktır.

Kayma kipli kontrolör

İkinci dereceden tek girişli açık çevrim dinamik sisteme ait genel durum uzayı ifadesi:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2(t) \\ \dot{x}_2 &= \sum_{i=1}^n (a_i + \Delta_i(t))f_i(\mathbf{x}, t) + b(\mathbf{x}, t)u(t) + d(\mathbf{x}, t) \quad (1) \\ x_1(t_0) &= x_{10}, x_2(t_0) = x_{20} \end{aligned}$$

şekindedir (Edwards ve Spurgeon, 1998). Burada $\mathbf{x}(t) = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ durum vektörü, a_i ($i=1 \dots n$) sabit sistem parametreleri, $u(t)$ kontrol

işareti, $f_i(\mathbf{x},t)$ ve $b(\mathbf{x},t)$ sistem özelliklerine bağlı fonksiyonlardır. $\Delta_i(t)$ ve $d(\mathbf{x},t)$ ise:

$$\Delta_i^- \leq \Delta_i(t) \leq \Delta_i^+ \quad (2.a)$$

$$\gamma^- \leq d(t) \leq \gamma^+ \quad (2.b)$$

olan sınır değerli parametre belirsizliği ve dış bozuculardır. Burada Δ_i^-, Δ_i^+ ve γ^-, γ^+ bilinen sabit değerli skaler büyüklüklerdir. Kontrol problemi, $\mathbf{x}(t)$ durumlarının istenen bir $\mathbf{x}_d(t)=(x_{d1}(t), x_{d2}(t))$ yörüngesini izlemesidir. Tek girişli sistemler için $s(\mathbf{x},t)=0$ şeklinde tek bir kayma yüzeyi tanımlıdır ve ikinci derece için:

$$s(\mathbf{x},t) = e_2(t) + ce_1(t) \quad (3)$$

şeklinde alınabilir. Burada c kesin pozitif gerçek bir sayıdır ve izleme hatası:

$$\mathbf{e}(t) \hat{=} (e_1(t), e_2(t)) = (x_1(t) - x_{d1}(t), x_2(t) - x_{d2}(t)) \quad (4)$$

olarak tanımlıdır.(3)'ün diferansiyeli alınırsa:

$$\dot{s}(\mathbf{e}) = c\dot{e}_1(t) + \sum_{i=1}^n (a_i + \Delta_i)f_i - \dot{x}_{d2} + u(t) \quad (5)$$

elde edilir. Belirsiz parametrelere ait kısım ayrı yazılır ve $\dot{s}(\mathbf{x}) = 0$ yapan kontrol kuralını elde etmek için $u(t)$ çekilirse, eşdeğer kontrol kuralı:

$$u_{eq}(t) = -c\dot{e}_1 + \dot{x}_{d2} - \sum_{i=1}^n a_i f_i - \sum_{i=1}^n \Delta_i f_i \quad (6)$$

olarak bulunur. Fakat (6) denkleminde son terim sistem belirsizliklerinden dolayı gelen bir terimdir ve fiziksel olarak elde edilemez. Bunun için $\dot{x}_{d1} = x_{d2}$ varsayılırsa, (6) yerine:

$$\hat{u}_{eq}(t) = -ce_2 + \dot{x}_{d2} - \sum_{i=1}^n a_i f_i(\mathbf{x},t) \quad (7)$$

yazılabilir. (7) kontrol kuralı anma eşdeğer kontrol kuralı olarak adlandırılır. Kontrol kuralı $u=u_{eq}+u_N$ için eşdeğer kontrol kuralı yerine (7) yerleştirilir ve (5)'te yerine koyulursa:

$$\dot{s}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \Delta_i(t)f_i(\mathbf{x},t) + u_N(t) \quad (8)$$

değeri elde edilir. Burada artık tasarım problemi $u_N(t)$ 'nin elde edilmesi sorunudur. (2a) ve (2b) koşulları altında her zaman için:

$$\rho(\mathbf{x},t) > \left| \sum_{i=1}^n \Delta_i(t)f_i(\mathbf{x}) \right| + \mu \quad \forall \mathbf{x},t \quad (9)$$

eşitsizliğini sağlayan bir $\rho(\mathbf{x},t)$ değeri elde etmek mümkündür (Edwards ve Spurgeon, 1998). Burada μ küçük değerli pozitif skaler bir tasarım ölçütüdür ve değeri (2b)'de verilen dış bozuculara ait sınır değerleri altında:

$$\mu > \max\{|\gamma^-|, |\gamma^+|\} \quad (10)$$

eşitsizliğini sağlayacak şekilde seçilir. Kontrol kuralının süreksiz bileşeni $u_N(t)$ 'yi tasarlamak için kullanılabilir bir ifade:

$$u_N(t) = -\rho(\mathbf{x},t)\text{sign}(s) \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir. Görüldüğü gibi, $\rho(\mathbf{x},t)$ süreksiz kontrol kuralına ait kazanç değerinin parametre belirsizliklerine bağlı alt sınırını verir ve kesin pozitif gerçek bir sayıdır. (11) kullanılarak ulaşma koşulu sınanırsa:

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s \left(\sum_{i=1}^n \Delta a_i(t)f_i(\mathbf{x}) + u_N(t) \right) \\ &\leq |s| \cdot \left(\left| \sum_{i=1}^n \Delta a_i(t)f_i(\mathbf{x}) \right| - \rho \right) \end{aligned} \quad (12)$$

olduğu görülür. (9) değeri (12)'de kullanılırsa:

$$s\dot{s} \leq -\mu|s| \quad (13)$$

elde edilir ve ulaşma koşulunun sağlandığı görülür. Bu durumda, ideal kayma kipinin sonlu zamanda elde edileceği garanti edilmiş olur. (11)'de verilen kontrol yapısı ölçeklenmiş röle yapısı olarak adlandırılır.

Önerilen doğrusal kayma yüzeyi

Yeni kayma yüzeyinin tasarımı

Geleneksel kayma yüzeyine dik bir eksen:

$$p(\mathbf{e}) = c'e_1 + e_2 \quad (14)$$

olarak tanımlanmıştır. (14) ekseninin geleneksel kayma yüzeyine dik olması için:

$$cc' = -1 \quad (15)$$

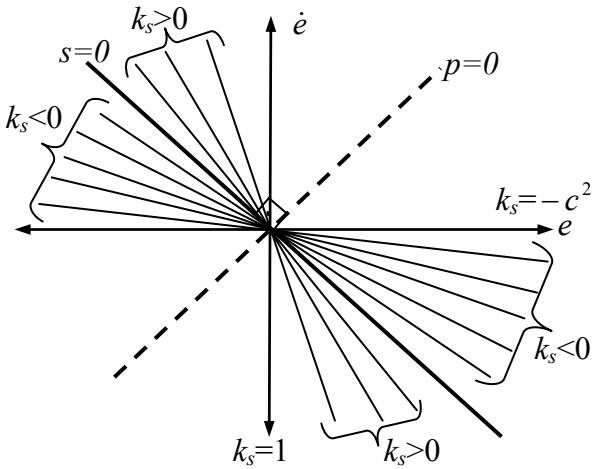
koşulu sağlanmalıdır. Bu çalışmada, özgün $(e_1 - e_2)$ faz düzleminde koordinatlardan ilki geleneksel kayma yüzeyine ait s değeri, diğer koordinat ise normal olarak, geleneksel s kayma yüzeyine dik olan (14) denklemi seçilerek elde edilen yeni bir $(s-p)$ koordinat eksenini kullanarak, yeni bir kayma yüzeyi:

$$\hat{s}(\mathbf{e}) = s(\mathbf{e}) - k_s \cdot p(\mathbf{e}) \quad (e\dot{e} > 0 \text{ ise } k_s = 0) \quad (16)$$

şeklinde tanımlanmıştır (Tokat vd., 2002a). Burada k_s 'in büyüklük ve işareti Şekil 1'den de görüldüğü gibi yeni kayma yüzeyinin geleneksel kayma yüzeyine göre bağlı konumunu belirler. Negatif k_s değerleri için yeni kayma yüzeyi \hat{s} , geleneksel kayma yüzeyine göre ters-saat yönünde ve pozitif k_s değerleri için ise saat yönünde döndürülmüş olarak elde edilir. (16) denklemini sıfıra götüren çözüm kümesi, sistem parametreleri için $\dot{x}_{d1} = x_{d2}$ alınarak $\dot{e}_1 = e_2$ olduğu varsayılırsa:

$$e(t) = e(0) \cdot \exp\left(-\frac{c + k_s/c}{1 - k_s} t\right) \quad (17)$$

elde edilir. (17)'de $e(t)$ hata değerinin asimtotik olarak sıfıra yaklaşması için k_s değerinin:



Şekil 1. Önerilen doğrusal kayma yüzeyinin farklı k_s değerleri için gösterilimi

$$-c^2 < k_s < 1 \quad (18)$$

aralığında olması gerekir.

Zamanla değişen doğrusal kayma yüzeyi

Denklem (16)'da verilen doğrusal kayma yüzeyinin konumu, k_s değeri zamanda sürekli olarak değiştirilerek:

$$\hat{s}(\mathbf{e}, t) = s(\mathbf{e}) - k_s(t) \cdot p(\mathbf{e}) \quad (19)$$

şeklinde ayarlanabilir (Tokat vd., 2002b). Ölçeklenmiş röle kontrol yapısı önerilen yeni kayma yüzeyine ait (19) ifadesi için de elde edilebilir. Bunun için kayma yüzeyinin türevi alınır, bağımlı değişkenler yazılmaksızın:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{s}} &= \dot{s} - \dot{k}_s p - k_s \dot{p} \\ &= (1 - k_s) \dot{e}_2 + \left(c + \frac{k_s}{c}\right) \dot{e}_1 - \dot{k}_s e_2 + \frac{\dot{k}_s}{c} e_1 \end{aligned} \quad (20)$$

elde edilir. Burada $\dot{x}_{d1} = x_{d2}$ alınarak $\dot{e}_1 = e_2$ olduğu varsayılır ve (20) denklemi (1) sistemi için yeniden düzenlenirse:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{s}} &= (1 - k_s) \left(\sum_{i=1}^n (a_i + \Delta_i) f_i + bu + d - \dot{x}_{d2} \right) \\ &+ \left(c - \dot{k}_s + \frac{k_s}{c} \right) e_2 + \frac{\dot{k}_s}{c} e_1 \end{aligned} \quad (21)$$

olarak yazılabilir. Doğrusal bileşenler seçilirse:

$$\begin{aligned} bu_{eq}(t) &= -\frac{\dot{k}_s}{c(1 - k_s)} e_1 - \frac{\left(c - \dot{k}_s + \frac{k_s}{c}\right)}{1 - k_s} e_2 \\ &- \sum_{i=1}^n a_i f_i + \dot{x}_{d2} \end{aligned} \quad (22)$$

olduğu görülür. Daha sonra, elde edilen (22) ifadesi $u = u_{eq} + u_N$ denkleminde yerine koyulursa:

$$\begin{aligned} bu(t) &= -\frac{\dot{k}_s}{c(1 - k_s)} e_1 - \frac{\left(c - \dot{k}_s + \frac{k_s}{c}\right)}{1 - k_s} e_2 \\ &- \sum_{i=1}^n a_i f_i + \dot{x}_{d2} + bu_N(t) \end{aligned} \quad (23)$$

olarak bulunur.

(23) kontrol kuralı (21)'de yerine koyulursa:

$$\hat{s} = (1 - k_s) \left(\sum_{i=1}^n \Delta_i f_i + b u_N + d \right) \quad (24)$$

ifadesi elde edilir. Eğer:

$$b \cdot \rho(\mathbf{x}, t) \geq \left| \sum_{i=1}^n \Delta_i f_i \right| + \mu + |d| \quad (25)$$

eşitsizliğini sağlayacak herhangi bir skaler $\rho(\mathbf{x}, t)$ fonksiyonu tanımlanırsa $u_N(t)$ için potansiyel bir ifade:

$$u_N(t) = -\rho(\mathbf{x}, t) \text{sign}(\hat{s}) \quad (26)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda (25) koşulu altında (24) yeniden yazılırsa:

$$\begin{aligned} \hat{s} \cdot \dot{\hat{s}} &= (1 - k_s) \left(\hat{s} \left(\sum_{i=1}^n \Delta_i f_i \right) - b \rho |\hat{s}| + \hat{s} \cdot d \right) \\ &\leq (1 - k_s) |\hat{s}| \left(\left| \sum_{i=1}^n \Delta_i f_i \right| - b \rho + |d| \right) \\ &\leq -\mu |\hat{s}| \end{aligned} \quad (27)$$

elde edilir. (18)'de verilen aralıktaki k_s değerleri için $(1 - k_s) > 0$, $\forall t$ olduğu için bu durumda:

$$|\hat{s}| \left(\left| \sum_{i=1}^n \Delta_i f_i \right| - b \rho + |d| \right) \leq -\frac{\mu}{1 - k_s} |\hat{s}| \quad (28)$$

yazılabilir. (28) denkleminde:

$$\mu = \hat{\mu} \cdot (1 - k_s) \quad (29)$$

şeklinde düzenlenirse, $\hat{\mu}$ kesin pozitif olur. Fakat (25)'de verilen Δ_i ve $d(t)$ büyüklükleri fiziksel olarak ölçülemediği için $\rho(\mathbf{x}, t)$ değerinin (25)'teki büyüklükler cinsinden elde edilmesi mümkün değildir. Verilen (28) koşulunu sağlayan uygun bir seçim:

$$b \cdot \rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^n |\bar{\Delta}_i f_i| + \hat{\mu} + \bar{\gamma} \quad (30)$$

olabilir. Burada $\bar{\Delta}_i$ ve $\bar{\gamma}$ ifadeleri:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}_i &= \max \left\{ |\Delta_i^-|, |\Delta_i^+| \right\} \\ \bar{\gamma} &= \max \left\{ |\gamma^-|, |\gamma^+| \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

şeklinindedir. Böylece kararlılık koşulu sağlanmış ve sonlu zamanda ideal kayma olayı garanti edilmiş olur.

Bu durumda, kararlılık koşullarını sağlayan ve yeni kayma yüzeyini kullanan bir kontrol kuralı (23), (26) ve (30) denklemleri kullanılarak:

$$\begin{aligned} u(t) &= \left(-\sum_{i=1}^n a_i f_i + \dot{x}_{d2} - \frac{(c - \dot{k}_s + k_s/c)}{(1 - k_s)} e_2 - \frac{\dot{k}_s}{c(1 - k_s)} e_1 \right) / b \\ &\quad - \left(\hat{\mu} + \sum_{i=1}^n |\bar{\Delta}_i f_i| + \bar{\gamma} \right) \text{sign}(s) / b \triangleq u_{eq} + u_N \end{aligned} \quad (32)$$

biçiminde yazılabilir.

Önerilen kayma yüzeyinin ayarlanması

Bu çalışmada, önerilen kayma yüzeyinin ayarlanması, c kayma yüzeyi parametresinin değiştirilmesi yerine, elde edilen (32) kontrol yapısındaki $k_s(t)$ dönme ölçütünün sürekli zamanda güncellenmesi ile sağlanmıştır. Bu bölümde, $k_s(t)$ 'nin güncellenmesi için önerilen çeşitli yaklaşımlar üzerinde durulmuştur.

Yakın komşuluk yaklaşımı- Denklem (19) ile verilen doğrusal kayma yüzeyinin döndürülmesi için alternatif bir yöntem Choi vd. (1994) tarafından elde edilen ve ikinci derece sistemler için doğrusal bir kayma yüzeyi tasarım yöntemi olan yakın komşuluk yaklaşımıdır. Bu yaklaşım ile elde edilen dönme düzenindeki temel mantık kayma yüzeyinin başlangıçta keyfi ilk koşullardan geçecek şekilde seçilmesi ve daha sonra kayma yüzeyinin önceden belirlenen bir değere kadar döndürülmesidir.

Choi vd. (1994) tarafından c kayma yüzeyi eğim değerini değiştirmek için kullanılan bu yöntem bu çalışmada $k_s(t)$ parametresini ayarlamak için önerilen yeni kayma yüzeyi için yorumlanarak kullanılmıştır. Bu durumda, önerilen yeni kayma yüzeyi için dönme yordamı yakın

komşuluk yaklaşımı kullanılarak adım adım aşağıdaki şekilde yazılabilir:

1. $k_s(t)$ parametresini ayarlamak için gerekli uygun bir δ_r sabiti belirle. Daha sonra δ_f yüzeyin civar komşuluğu olmak üzere $\delta_{fr} = \delta_f + \delta_r$ değerini hesapla.

2. İlk koşullardan $k_s(t_0)$ değerini hesapla ve $k_s(t_0)$ değerini kullanarak dönme yönünü belirle. Şekil 1'den de görüldüğü gibi, eğer $k_s(t_0) < 0$ ise, başlangıç kayma yüzeyi son ulaşılabilecek kayma yüzeyine göre ters-saat yönünde dönmüş durumdadır. Bu durumda son kayma yüzeyine ulaşmak için saat yönünde dönme işlemi uygulanır. Eğer $k_s(t_0) > 0$ ise, başlangıç kayma yüzeyi son kayma yüzeyine göre saat yönünde dönmüştür. Bu durumda ise ters-saat yönünde dönme işlemi gerçekleştirilir.

3. Yeni $k_s(t)$ değeri

$$\left| s(\mathbf{e}) \Big|_{t=t_0} - k_s(t_1) p(\mathbf{e}) \Big|_{t=t_0} \right| = \delta_{fr} \quad (33)$$

denkleminin çözümünden elde edilir. Denklem (33)'ün çözümünden $k_s(t_1)$ için elde edilen iki değerden büyük olanı saat yönünde dönme durumunda diğeri ise ters-saat yönünde dönme durumunda yeni k_s değeri olarak alınır.

4. Yordamın sona erdirilmesi için ise $k_s(t)$ 'nin işaretine bakılır. Eğer saat yönünde dönme sırasında $k_s \geq 0$ olursa veya ters-saat yönünde dönme sırasında $k_s \leq 0$ olursa dönme yordamı sona erdirilir ve $k_s=0$ olarak sabitlenir.

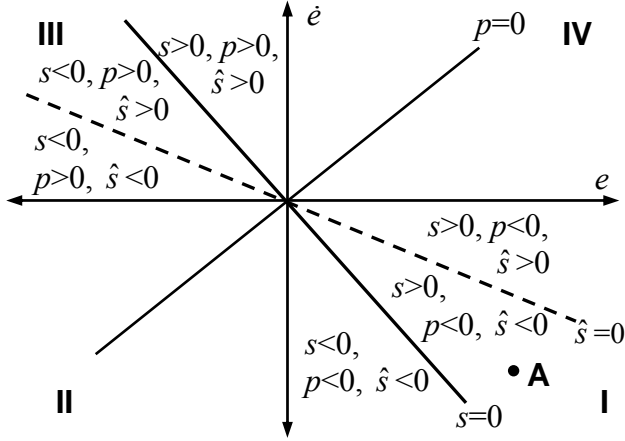
Dönme yordamı hata faz düzleminin kararlı bölgelerinde anlamlıdır. Choi vd. (1993) tarafından kararsız bölgelerde kullanılmak üzere önerilen öteleme yordamı yeni kayma yüzeyi için de kullanılabilir. Bu çalışmada sadece dönme düzenleri üzerinde durulmuştur.

Bulanık mantık ile akıllı kontrol yaklaşımı- Kararlılık ve uygun başarımlı ölçütlerini sağlamak amacı ile bulanık mantık ve kayma kipli kontrol konularının bütünleştirilmesi

kontrol araştırmalarının aktif bir alanını oluşturmaktadır (Kaynak vd., 2001). Bu çalışmalar iki ayrı grupta sınıflandırılabilir (Song ve Smith, 2000). Bunlardan ilki geleneksel kayma kipli kontrol stratejilerini kullanır ve bir şekilde kontrol düzeneğini basitleştirme veya geliştirme amacı ile bulanık modellerden yararlanır (Zhang ve Man, 2000). Bu tip kontrol yapıları kayma kipli bulanık kontrolör (Song ve Smith, 2000) ya da dolaylı yaklaşım (Ha, 2001) olarak adlandırılır. İkinci gruba giren yordamlar ise geleneksel bir kayma kipli kontrolöre ait giriş/çıkış ilişkisinin yaklaşık bir değerinin elde edilmesi ile ilgilenir ve genellikle tek girişli bir bulanık mantık kontrolör ile gerçekleşir (Li vd., 1997). Bu tip kontrolörler ise bulanık kayma kipli kontrolör (Yu vd., 1998) veya doğrudan yaklaşım (Ha, 2001) olarak adlandırılır. Bulanık mantık kontrolün yumuşak kontrol davranışı kontrolör tasarım adımlarının sadeleşmesine, sistemdeki çaptırmanın önlenmesine ve daha iyi sönüm elde edilmesine yardımcı olurken, kayma kipli kontrolör modelleme belirsizlikleri ve dış bozucular ile başa çıkılmasını sağlar (Liang ve Zhong-ren, 1996; O'Dell, 1997).

Bu çalışmada, bulanık mantık tekniğinden kayma kipli kontrolör başarımının iyileştirilmesi amacı ile yararlanılarak kayma kipli bulanık kontrolör tasarımı yapılmıştır. Kontrol parametresi olan k_s 'i ele aldığımızda, bu değer sistem durumlarının o anki konumuna göre ayarlanması başarımlı olumlu yönde etkileyecektir. Bunun için girişleri sisteme ait değişkenler olan, çıkışları ise k_s 'in değişimini veren bir bulanık mantık kontrolör tasarlanabilir. Çünkü, k_s 'in bir sonraki adımda hangi yöne ne kadar değişeceğine karar vermek, k_s 'in o anki değerini doğrudan belirlemekten daha kolaydır. Şekil 2 incelenirse s , \hat{s} ve p 'nin işaretlerinin farklı olduğu bölgeler görülür. Örneğin, A noktasında, $s > 0$, $p < 0$ ve $\hat{s} < 0$ 'dır. Bu bilgiler ile, sistem durumlarının geleneksel ve önerilen kayma yüzeylerine göre hangi konumda olduğu bilinir. Bu sayede, k_s 'in ne yönde değiştirilmesi gerektiği; yani kayma yüzeyinin ne yöne doğru döndürülmesi gerektiği belirlenebilir (Tokat vd., 2003b).

Bu düşünceden yola çıkılarak, Şekil 3'te verilen kayma kipli bulanık kontrolör tasarlanmıştır. Uygun bir kural tablosu Tablo 1'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu kurallar kullanıcı bilgisi ile girişlerin yorumlanması sayesinde oluşturulan dilsel ilişkilerden elde edilmiştir. Farklı kullanıcılar farklı yorumlarda bulunabilir. Önemli olan bu temel kuralların fiziksel ve mantıksal bir dayanağı ve tutarlılığı olmasıdır.



Şekil 2. Farklı s , p ve \hat{s} işaretleri ile oluşan kontrol bölgeleri

Tablo 1. Bulanık mantık kontrolöre ait kural tablosu a) $p < 0$, b) $p > 0$

		\hat{s}						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
s	NB	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NM	NB
	NM	PS	ZE	ZE	NS	NM	NM	NB
	NS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	ZE	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS	NM
	PS	PB	PM	PS	PS	ZE	NS	NM
	PM	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS
	PM	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS
	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE	ZE

(a)

		\hat{s}						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
s	NB	ZE	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB
	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB
	NS	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PB
	ZE	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
	PM	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS
	PM	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS
	PB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE

(b)

Kayma yüzeyinin dönme miktarı aynı zamanda döndürme işlemi sırasındaki k_s 'in genliği ile ilişkilidir. Çünkü, hesaplanan aynı miktardaki Δk_s büyüklükleri, küçük k_s değerleri için daha büyük miktarda dönme sağlayacaktır. Bunu önlemek için, Δk_s değerini doğrudan bir önceki k_s değeri ile toplamak yerine:

$$k_s(t) = k_s(t-1) \cdot (1 + \text{sign}(k_s(t-1) \cdot \Delta k_s)) \quad (34)$$

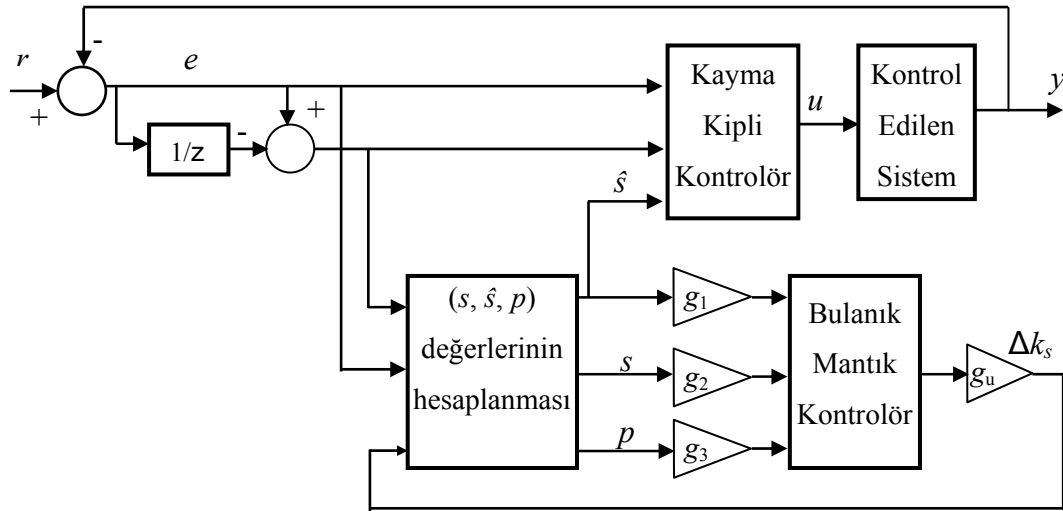
şeklinde elde edilmiştir. (34)'te Δk_s değeri bir önceki k_s değerinin genliği ile çarpıldığı için, k_s 'teki değişim, k_s sifıra yaklaştıkça bağıl olarak küçültülmüş olmaktadır. Bu ise başarıyı olumlu yönde etkiler (Tokat vd., 2003b).

Bu ayarlama mekanizması da önceki yöntemde olduğu gibi kayma yüzeyinin kararsız bölgede döndürülmesinin bir getirisi olmadığından sadece kararlı bölgelerde geçerlidir. Kararsız bölgeler için k_s değeri sıfır olarak alınmakta ve önerilen yeni kayma yüzeyi geleneksel kayma yüzeyi üzerine gelmektedir. Tablo 1'de verilen kural tablosu üç girişlidir. Fakat p değeri sadece negatif ve pozitif olarak değerlendirildiği için, p 'nin işaretine göre ayrılan iki adet iki-boyutlu kural tablosu ile ifade edilmiştir.

Fonksiyon yaklaşımı- Son olarak, $k_s(t)$ parametresi zamana bağlı matematiksel bir ilişki ile tanımlanmıştır. (32)'de verilen kontrol kuralında $k_s(t)$ değişkeninin zamana göre türevi bulunduğu için birinci dereceden türevi alınabilir bir fonksiyon kullanılması gerekir. Ayrıca dönme hareketi sürekli ve hep belirli bir yönde tanımlı olduğu için sürekli artan ya da sürekli azalan monoton bir fonksiyon olmalıdır. Bu amaçlara uygun olarak $k_s(t)$ değeri:

$$k_s(t) = \frac{k_s^+ - k_s^-}{1 + e^{-mt+a}} + k_s^- \quad (35)$$

şeklinde ötelenmiş bir sigmoid fonksiyonu ile tanımlanmıştır (Tokat vd., 2002b). Burada m ve a sırası ile, zaman ölçekleme ve zaman öteleme parametreleridir. Dönme ölçütü olan $k_s(t)$ parametresine ait izin verilen minimum ve maksimum değerler ise sırası ile, k_s^- ve k_s^+ olarak alınmıştır.



Şekil 3. k_s değerindeki değişimi elde etmek için tasarlanan kayma kipli bulanık kontrolör

Sigmoid fonksiyonuna ait parametreler dönme yönüne uygun olarak farklı şekilde seçilir. Eğer saat yönünde bir dönme söz konusu ise büyüklükleri ilk koşullara bağlı olacak şekilde:

$$k_s^- < 0, \quad k_s^+ = 0, \quad m > 0 \quad (36)$$

değer aralığında seçilir. Benzer şekilde, eğer ters-saat yönünde bir dönme söz konusu ise bu durumda:

$$k_s^- = 0, \quad k_s^+ > 0, \quad m < 0 \quad (37)$$

değer aralığında seçilir. Böylece uygun bir dönme düzeni (36) ve (37) koşulları göz önüne alınarak k_s^- , k_s^+ , a ve m parametrelerinin belirlenmesi ile elde edilir. Bu çalışmada verilen tasarım yönteminin temel amacı ulaşma zamanını kısaltmak ve sistem durumlarının kayma yüzeyi üzerinde kalmasını sağlayacak şekilde kayma yüzeyinin döndürülmesi ile yüksek kontrolör başarımı elde etmektir. Sistem durumlarının $t=t_0$ anından itibaren kararlı bölgede olduğu varsayılırsa, kayma yüzeyini sistem durumları üzerine getirmek için (16)'da $\hat{s} = 0$ eşitliğini sağlayacak şekilde:

$$k_s(t_0) = \frac{s(e, t_0)}{p(e)} \quad (38)$$

seçilir. Döndürme işleminin başlangıç anı olan kararlı bölgeye giriş anı $t=t_0$ alınırsa, (35)'te verilen ötelenmiş sigmoid fonksiyonu:

$$k_s(t_0) = \frac{k_s^+ - k_s^-}{1 + e^{-m t_0 + a}} + k_s^- \quad (39)$$

eşitliğini sağlar. Buradan a değeri çekilirse:

$$a = \ln \left(\frac{k_s^+ - k_s(t_0)}{k_s(t_0) - k_s^-} \right) + m t_0 \quad (40)$$

olarak elde edilir. Gerçek değerler elde etmek için saat yönünde dönme durumunda:

$$k_s^- < k_s(t_0) \quad , \quad k_s^+ = 0 \quad (41)$$

ve ters-saat yönünde dönme durumunda:

$$k_s^+ > k_s(0) \quad , \quad k_s^- = 0 \quad (42)$$

olması gerekir. Farklı sistem davranışları elde etmek için farklı m , a , k_s^- , k_s^+ parametreleri kullanılarak önerilen yöntem gerçekleştirilebilir. Özel olarak, (40) için saat yönünde dönme durumunda $k_s^- = 2k_s(0)$ ve ters-saat yönünde dönme durumunda $k_s^+ = 2k_s(0)$ seçildiğinde doğal logaritmalı kısım sıfır olmakta ve hesaplamalar kolaylaşmaktadır.

Benzetim çalışması

Önerilen doğrusal kayma yüzeyi Bartoszewicz (1996) tarafından önerilen sabit hızlı ve sabit ivmeli kayma yüzeyleri ile karşılaştırılmıştır. Benzetim için kullanılan sistem (1) biçimindedir ve parametreleri:

$$\begin{aligned}
f_1 &= 0.5x_1^3 & f_2 &= 0.3(1-x_2^2) \\
a_1 &= a_2 = 1 \\
b &= 1 \\
\Delta_1 &= \Delta_2 = 0.1\sin(7t) \\
d(t) &= 0.12\sin(10t)
\end{aligned} \tag{43}$$

olarak seçilmiştir. Bartoszewicz (1996) tarafından önerilen sabit ivmeli kayma yüzeyi:

$$s(t) = c_1 e(t) + \dot{e}(t) + \begin{cases} a_1 t^2 + a_2 t + a_3, & t \leq t_b \\ 0, & t > t_b \end{cases} \tag{44}$$

şeklinde. Sabit ivmeli kayma yüzeyine sahip kontrolör (SMC-Sabit İvmeli) için kontrol parametreleri örnek sistem için $a_1=0.204$, $a_2=-1$, $a_3=1.225$, $c_1=1.225$ olarak alınmıştır. Kontrol kuralının değiştiği an ise $t_b=2.449$ olarak alınmıştır. Yine Bartoszewicz (1996) tarafından elde edilen sabit hızlı kayma yüzeyi ise:

$$s(t) = c_1 e(t) + \dot{e}(t) + \begin{cases} a_1 t + a_2, & t \leq t_b \\ 0, & t > t_b \end{cases} \tag{45}$$

şeklinde. Sabit hızlı kayma yüzeyine sahip kontrolör (SMC-Sabit Hızlı) için kontrol parametreleri örnek sistem için $a_1=-1$, $a_2=1.414$, $c_1=1.414$ ve kontrol kuralının değiştiği an ise $t_b=1.414$ alınmıştır.

Bu çalışmada önerilen fonksiyon yaklaşımı (SMC-Fonksiyon) için $c_1=1.225$, $k_s^- = -3.1$, $k_s^+ = 0$, $m=4$ ve $a=0$ olarak seçilmiştir. Bulanık mantık kontrolör yaklaşımı (SMC-Bulanık) için g_1, g_2, g_3 ve g_u giriş ve çıkış ölçekleme faktörleri sırasıyla 2, 82, 100 ve 1/35 olarak ayarlanmıştır. Yakın komşuluk yaklaşımı (SMC-Yakın) için ise $\delta_f = \delta_r = 0.001$ olarak seçilmiştir.

Geleneksel kayma kipli kontrolör (SMC-Geleneksel) için sabit kayma yüzeyi değeri $c_1=1.225$ alınarak benzetimler yapılmıştır.

Benzetimlerde ele alınan tüm kontrolörler için süresiz kontrol kazancı:

$$K = \max\{\gamma^-, \gamma^+\} + \sum_{i=1}^2 |\bar{\Delta}_i f_i| \tag{46}$$

olarak alınmıştır. Kontrol problemi olarak düzeneç sorunu ele alınmış, ilk ve son koşullar sabit değerli olarak:

$$x_1(0) = -1, \quad x_2(0) = 0, \quad x_{d1} = x_{d2} = 0 \tag{47}$$

kabul edilmiştir.

Verilen başlangıç koşulları için $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ sistem durumlarına ait geçici hal yanıtı, bozucu bulunan durum için Şekil 4'te verilmiştir. Kayma yüzeyinin ayarlanması ile elde edilen tüm kontrolörlerin SMC-Geleneksel'den daha iyi yerleşme zamanı sağladığı görülmektedir. En iyi yerleşme zamanı ise SMC-Bulanık yaklaşımı ile elde edilmektedir. Önerilen SMC-Yakın yaklaşımı literatürde geçen SMC-Sabit Hızlı ve SMC-Sabit İvmeli yaklaşımlarından daha kötü bir sistem yanıtı sağlamaktadır. Fakat SMC-Yakın ayırık döndürme hareketine sahip olduğu ve diğer yöntemler sürekli döndürme düzeni kullandığı için bu beklenen bir durumdur.

Şekil 4'te SMC-Yakın ve SMC-Geleneksel yaklaşımı ile elde edilen $x_2(t)$ durumuna ait geçici hal yanıtı incelendiğinde dış bozucuların etkisi kolayca gözlenebilmektedir.

Kontrol işaretleri Şekil 6'da verilmiştir. Önerilen SMC-Fonksiyon yaklaşımı ile birlikte literatürde geçen SMC-Sabit Hızlı ve SMC-Sabit İvmeli yaklaşımlarında başlangıç anından itibaren kayma yüzeyi üzerinde kalındığı görülmektedir. SMC-Bulanık için başlangıçta görülen kontrol işaretindeki bozulma türev alma işleminden kaynaklanmaktadır.

Tablo 2'de mutlak hatanın integrali (IAE), hatanın karesinin integrali (ISE), mutlak hata ile zaman çarpımının integrali (ITAE), hatanın karesi ile zaman çarpımının integrali (ITSE) başarımlar ölçütleri hesaplanmıştır. IAE ve ISE sönüm miktarını içerir. Eğer bir bozucu içeren sistemde IAE ve ISE değerleri azaltılırsa, sürekli hal hatasının ortadan kaldırıldığı, sönümün sağlandığı söylenebilir. Aksi halde, bu değerler zamanla artmaya devam eder. ITAE ve ITSE ölçütlerinde ise hatalar zaman ile çarpıldığı için uzun dönemdeki hatalara daha fazla ağırlık verilir (Ogata, 1970). Başlangıçta

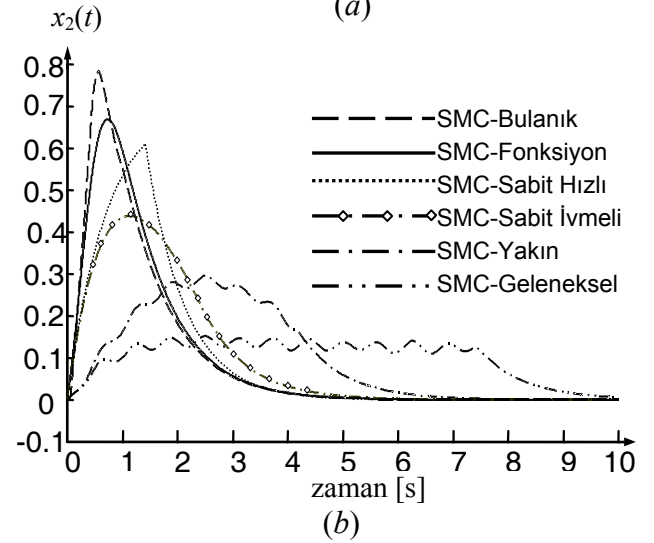
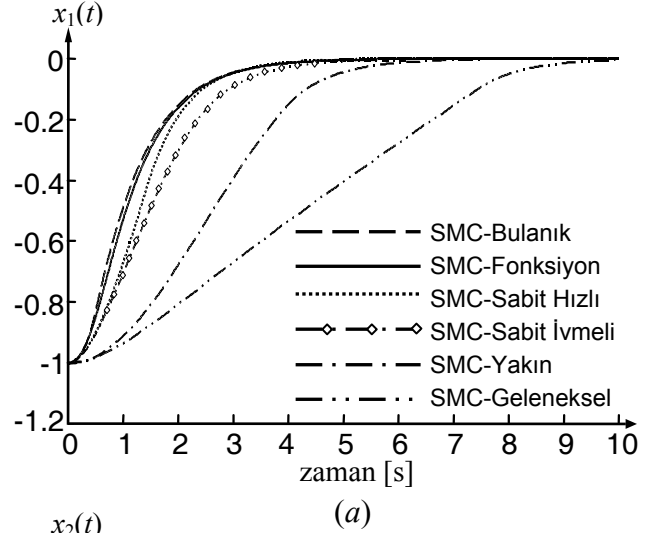
oluşan büyük hatalar IAE ve ISE ölçütlerine katılırken, ITAE ve ITSE kararlı haldeki hatalardan daha çok etkilenir. Ayrıca, zaman tanım bölgesi ölçütlerinden olan yükselme zamanı (t_r), yerleşme zamanı (t_s) ve ulaşma zamanı ($t_{ulaşma}$) değerleri hesaplanmıştır. Başarım ölçütleri karşılaştırılacak olursa, SMC-Sabit Hızlı ve SMC-Fonksiyonun en iyi başarımı gösterdikleri söylenebilir. SMC-Sabit Hızlı yaklaşımında Şekil 6d'de verilen kontrol işaretinde, belirli bir anda kontrol kuralı değiştirildiği için, ani bir öteleme oluşmaktadır. Bu ani değişiklik Şekil 5'te verilen hata durum uzayı gösteriliminde de görülmektedir. Bunun yanında önerilen SMC-Fonksiyon yaklaşımında Şekil 6f'de verilen kontrol işareti ve hata durum uzayı yörüngesi yumuşak bir harekete sahiptir.

Sonuçlar ve tartışma

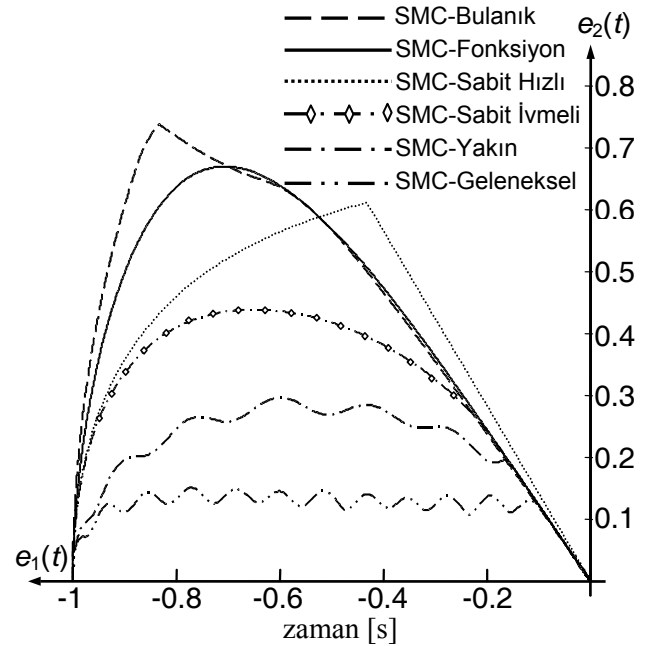
Bu çalışmada koordinat dönüşümüne dayalı yeni bir yöntem kullanılarak doğrusal olmayan bir kayma yüzeyi tasarımı önerilmiştir. Değişik mekanizmalar geliştirilerek yeni eksen takımında tanımlı kayma yüzeyinin dönme miktarını belirleyen parametrenin zamanla ayarlanması ile, zamanla değişen kayma yüzeyleri elde edilmiştir. Zamana bağlı yeni değişkenin ayarlanması için dönme yönüne göre ve ulaşma koşulunu sağlayacak şekilde değişkene ait parametrelerinin nasıl seçilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.

Önerilen yöntemlerin analizi benzetimler ile yapılmıştır. Elde edilen kontrolörlerin geleneksel kayma kipli kontrolör ve literatürden seçilen bazı yöntemlerle karşılaştırmaları yapılarak yeni yöntemlerin ulaşma ve yerleşme zamanını da içeren çeşitli başarım ölçütleri ile bozuculara olan gürbüzlük açısından bir iyileştirme sağladığı görülmüştür.

Bu çalışmada kontrolör parametreleri elle ayarlanmıştır. Genetik algoritmalar gibi çeşitli arama mekanizmalarından yararlanılarak optimum parametre değerleri bulunduğu daha iyi sistem başarımı elde edilebilir. Ayrıca doğrusal kayma yüzeyi tasarlanan aynı koordinat ekseninde doğrusal olmayan kayma yüzeyleri de tasarlanabilmektedir.

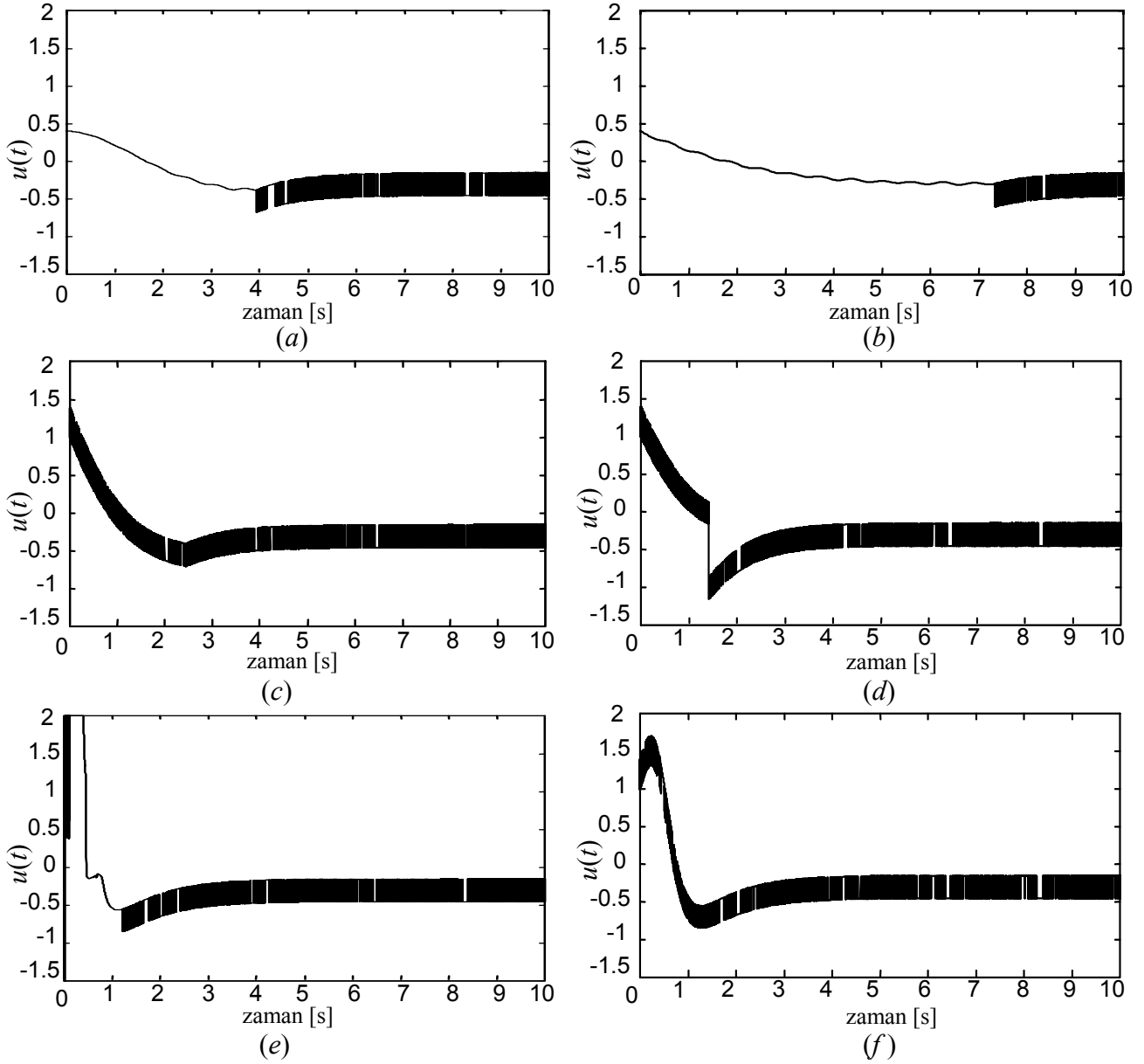


Şekil 4. Sistem durumlarının zamana göre değişimi; a) $x_1(t)$, b) $x_2(t)$



Şekil 5. Hata durum uzayı gösterilimi

Doğrusal kayma yüzeyi



Şekil 6. Kontrol işaretleri a) SMC-Geleneksel, b) SMC-Yakın, c) SMC-Sabit İvmeli, d) SMC-Sabit Hızlı, e) SMC-Bulanık, f) SMC-Fonksiyon

Tablo 2. Doğrusal kayma yüzeyi tasarımı için elde edilen başarımlar ölçütleri

Kontrolör	bozucu	e_{ss}	t_s (%1)	t_r	IAE	ISE	ITSE	ITAE	$t_{ulaşma}$
Geleneksel	yok	0	9.2870	6.1390	4.3171	2.9947	6.1159	11.9598	7.4030
	var	0	9.3340	6.1470	4.3625	3.0402	6.2527	12.1568	7.4220
Yakın	yok	0	6.1700	3.2640	2.6518	1.9268	2.3107	4.3509	3.8630
	var	0	6.2090	3.2520	2.6971	1.9730	2.4003	4.4693	4.0090
Fonksiyon	yok	0	4.2640	1.9740	1.2621	0.8141	0.4469	1.1715	0
	var	0	4.2630	1.9740	1.2620	0.8141	0.4469	1.1707	0
Bulanık	yok	0	4.2490	1.9580	1.1963	0.7501	0.3904	1.0943	1.112
	var	0	4.2680	1.9480	1.2170	0.7727	0.4060	1.1172	1.016
Sabit Hızlı	yok	0	4.0770	1.9500	1.4147	0.9783	0.6115	1.3334	0
	var	0	4.0790	1.9500	1.4147	0.9783	0.6114	1.3333	0
Sabit İvmeli	yok	0	4.8010	2.4070	1.6336	1.0932	0.7990	1.8334	0
	var	0	4.8010	2.4070	1.6335	1.0932	0.7990	1.8332	0

Kaynaklar

- Bartoszewicz, A., (1995). A comment on 'A time varying sliding surface for fast and robust tracking control of second-order uncertain systems', *Automatica*, **31**, 12, 1893-1895.
- Bartoszewicz, A., (1996). Time-varying sliding modes for second order systems, *IEE Proceedings- Control Theory and Applications*, **143**, 5, 455-462.
- Choi, S. B., Cheong, C. C. ve Park, D. W., (1993). Moving switching surfaces for robust control of second order variable structure systems, *International Journal of Control*, **58**, 1, 229-245.
- Choi, S. B., Park, D. W. ve Jayasuriya, S., (1994). A time-varying sliding surface for fast and robust tracking control of second order uncertain systems, *Automatica*, **30**, 5, 899-904.
- Edwards, C. ve Spurgeon, S. K., (1998). Sliding Mode Control: Theory and Applications, 237sh., Taylor & Francis, London, UK.
- Ha, Q. P., (2001), Integration of fuzzy logic and sliding mode in variable structure control, *Proceedings*, 5th World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics, 59-64, Orlando, Florida, USA.
- Ha, Q. P., Rye, D. C. ve Durrant-Whyte, H. F., (1999). Fuzzy moving sliding mode control with application to robotic manipulators, *Automatica*, **35**, 607-616.
- Hung, J. Y., Gao, W. ve Hung, J. C., (1993). Variable structure control: a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **40**, 1, 2-22.
- Kaynak, O., Erbatur, K. ve Ertuğrul, M., (2001). The fusion of computationally intelligent methodologies and sliding mode control- a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **IE-48**, 4-17.
- Li, H. X., Gatland, H. B. ve Green, A. W., (1997). Fuzzy variable structure control, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, **27**, 2, 306-312.
- Liang, C. ve Zhong-ren, L., (1996). A study of fuzzy variable structure sliding mode control, *Proceedings*, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 372-377, Beijing, China.
- O'Dell, B., (1997). Fuzzy sliding mode control, Technical Report, 22pp, ACL-97-001, Advanced Controls Laboratory Oklahoma State University, School of Mechanical and Aerospace Engineering, USA.
- Ogata, K., (1970). Modern Control Engineering, 796pp, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Song, F. ve Smith, S. M., (2000). A comparison of sliding mode fuzzy controller and fuzzy sliding mode controller, *Proceedings*, 19th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, 480-484, Atlanta, Georgia, USA.
- Tokat, S., Eksin, İ. ve Güzelkaya, M., (2002a). Doğrusal zamanla değişen yeni bir kayma yüzeyi ile kayma kipli denetleyici tasarımı, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 181-190, ODTÜ, Ankara.
- Tokat, S., Eksin, İ. ve Güzelkaya, M., (2002b). A new design method for sliding mode controllers using a linear time-varying sliding surface, *Journal of Systems and Control Engineering*, **216**, 455-466.
- Tokat, S., Eksin, İ., Güzelkaya, M. ve Söylemez, T., (2003a). Sliding mode control with a nonlinear time-varying sliding surface, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, **25**(2), 145-162.
- Tokat, S., Eksin, İ. ve Güzelkaya, M., (2003b). New approaches for on-line tuning of linear sliding surface slope in sliding mode controllers, *Tübitak Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **11**, 1, 45-59.
- Utkin, V. I., (1983). Variable structure systems, *Automatica*, **9**, 5-25.
- Yu, X., Man, Z. ve Wu, B., (1998). Design of fuzzy sliding mode control systems, *Fuzzy Sets and Systems*, **95**, 295-306.
- Zhang, X. ve Man, Z., (2000). A new Fuzzy Sliding Mode Control Scheme, *Proceedings*, 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, 1692-1696, Hefei, China.