

İki Yönlü Denetimde İletişim Kanalındaki Gecikmenin Kayan Kipli Gözlemci Kullanarak Telafisi

Berk Çallı¹, Tuğba Leblebici², Mustafa Ünel³, Asif Şabanoviç⁴, Seta Bogosyan⁵, Metin Gökaşan⁶

^{1,2,3,4}Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Programı
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

{berkc,tleblebici}@su.sabanciuniv.edu

{munel,asif}@sabanciuniv.edu

⁵Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
University of Alaska Fairbanks, Alaska, A.B.D.

s.bogosyan@uaf.edu

⁶Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

gokasan@elk.itu.edu.tr

Özetçe

Uzaktan iki yönlü denetim uygulamalarında iletişim kanalındaki gecikmeler sistemin kararlılığını bozucu etkenlerdir. Bu bildiriye, kayan kipli gözlemci tabanlı yeni bir gecikme telafi yöntemi sunulmaktadır. Bu gözlemcinin parametre belirsizliklerine karşı gürbüz bir hale getirilebilmesi için bozan etken gözlemcisi kullanılmaktadır. Benzetimler ve deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin gecikmeden kaynaklanan kararsızlığı engellemede ve yöneten sistem (master) ile yönetilen sistem (slave) arasındaki saydamlığı sağlamada başarılı olduğunu göstermektedir.

Abstract

In bilateral control applications, time delays in the communication channel have destabilizing effects. In this paper, a new sliding mode observer based compensation technique is presented. Disturbance observer is utilized to make this sliding observer more robust to parameter changes. Simulation and experimental results show that the proposed method is successful as far as avoiding instability due to time delays and providing transparency between master and slave sides.

1. Giriş

Günümüzde birçok uygulamada uzaktan iki yönlü denetime çeşitli nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulmaktadır. Uzaktan iki yönlü denetimin robotik alanındaki uygulamaları sayesinde insan sağlığına zararlı ortamlarda çalışılabilmekte, su altı araştırmalarında önemli bulgular elde edilmekte,

uzay istasyonu bakım çalışmaları robotlar aracılığı ile gerçekleştirilebilmektedir.

Uzaktan iki yönlü denetim uygulamalarındaki başlıca problemlerden biri iletişim kanalındaki gecikmedir. Bu gecikme yöneten sistem (master side) ile yönetilen sistem (slave side) arasındaki girdi ve ölçüm sinyallerinin gecikmesi olarak özetlenebilir. Bu gecikme iki yönlü kontrol sistemlerinin kararlılığını bozucu yönde bir etkidir. Aynı zamanda saydamlığı (transparency), yani sistemi yöneten kişinin gerçekleştirilen operasyonu gerçekten yapıyormuş gibi hissetmesini büyük ölçüde engeller. Uygulamanın türüne bağlı olarak bu gecikme sabit veya değişken olabilir.

Uzaktan iki yönlü denetim uygulamalarında gecikme telafisi konusunda literatürde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bu yöntemler başlıca, saçılma değişkenleri (scattering variables) kullanan, dalga değişkenleri (wave variables) kullanan, gözlemci tabanlı, kayan kip ve optimal denetim tabanlı yöntemler olarak özetlenebilir.

Saçılma değişkenleri teorisi [1]-[5], edilgenlik (passivity) teorisi tabanlı bir yaklaşım olup, iletişim hatları teorisinden yararlanır. Sistemler arasındaki veri iletişimi, iletişim kanalları kayıpsız olacak şekilde tasarlanır ve bu şekilde edilgenlik sağlanmış olur. Bu yöntem öncelikle sabit gecikme telafisi için tasarlanmış, ardından değişken gecikme telafisi için geliştirilmiştir. Saçılma değişkenleri teorisi ile edilgenlik teorisine göre kararlılık sağlanabilmesine karşın, sistemin saydamlığı ile ilgili herhangi bir analiz yapılmamaktadır.

Dalga değişkenleri teorisi [6]-[9], saçılma değişkenleri teorisinden türemiştir. Bir açıdan bakıldığında, saçılma teorisinin farklı bir şekilde formülasyonudur; saçılma değişkenleri elektrik teorisinden tanımlanırken, dalga tabanlı yöntem daha fiziksel bir yaklaşım üzerinden geliştirilmektedir. Bu yöntem

ile iletişim kanalına sönümleme eklenir; bu şekilde edilgenlik anlamında kararlılık sağlanmış olur. Bu yöntemde kararlılık ile saydamlık birbirine ters orantılı performans parametreleridir. Yani sistemin sönümleme miktarı, uygun şekilde ayarlanmalıdır. Literatürde sönümleme miktarının adaptif olarak ayarlandığı yöntemler de mevcuttur.

Literatürdeki gözlemci tabanlı yöntemlerin bir kısmı iletişim kanallarındaki gecikmeyi tahmin etmeye dayalıdır. Bu tip yöntemler genellikle gecikme sabit olduğunda iyi sonuç vermektedir. Diğer bir takım yöntemler ise gecikmeyi bir iletişim bozukluğu olarak algılayıp bu bozukluğu telafi etmek amacı ile gözlemci tasarlanmaktadır [10]-[12]. Bu yöntemler kararlılık açısından olumlu sonuçlar verse de, saydamlık konusundaki analizleri mevcut değildir.

Kayan kip tabanlı yöntemler [13]-[15] ise, zaman gecikmesini sistem üzerindeki bir belirsizlik olarak yorumlar. Sistem kayan kipli denetimciler kullanılarak, gecikmeye karşı gürbüz hale getirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemde belirsizlik üzerine konulan sınır ve bu sınıra bağlı parametre seçimi önem taşımaktadır. Sistemdeki gecikmeyi telafi ederken, hem performans hem de kararlılık kriterlerini değerlendirip, optimal bir çözüm bulma yöntemleri de literatürde mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları [16]-[18]'de verilmiştir.

İki yönlü denetim farklı yapılarda tasarlanabilir. Bu yapılar yönetilen sisteme gönderilen sinyaller açısından farklılık göstermektedir. [1]-[8]'de kullanılan yapıda yöneten sistemden yönetilen sisteme hız referansı bilgisi gönderilmektedir. Gönderilen hız referansı bilgisi yönetilen taraftaki bir hız denetimcisi tarafından denetim girdisine çevirilip yönetilen sisteme beslenmektedir. Aynı zamanda çevreyle etkileşim sonucu oluşan kuvvet bilgisi yönetilen taraftan yöneten tarafa iletilmektedir. İkinci yapıda ise yönetilen sistemin denetim sinyali yöneten tarafta hesaplanarak yönetilen tarafa iletilmektedir. Yönetilen sistemin pozisyon bilgisi ise yöneten tarafa gönderilmektedir. [10]-[12]'de, gecikme telafisi üzerinde bu yapı kullanılarak çalışılmıştır.

Bu bildiride, uzaktan iki yönlü denetim uygulamaları için kayan kipli gözlemci tabanlı yeni bir gecikme telafi yöntemi sunulmaktadır. Bu yöntem ile yöneten sistem tarafında, uzaktan yönetilen sistemin gerçek pozisyonu kestirilmektedir. Bu kestirimde ölçülen (gecikmeye uğramış) pozisyon bilgisi ve denetim sinyali kullanılmaktadır. Bu yöntemin tasarımında yukarıda bahsedilen ikinci yapı kullanılmıştır.

Önerilen bu yöntem literatürdeki yöntemlerden çeşitli açılardan farklılık gösterir. Sistem durumlarının gecikmeye uğramamış hali başarılı bir şekilde tahmin edildiğinde sistem zaten gecikme yokmuş gibi çalıştığından, saydamlık sağlanabilmektedir. Gözlemci sadece model parametrelerinden ve ölçülen değerlerden yararlanmaktadır; gecikmenin miktarının tahmin edilmesi gerekmemektedir. Yapılan deneyler de göstermektedir ki, önerilen kayan kipli gözlemci yöntemi hem uygulama açısından kolaylık taşımakta, hem de benzetim ve deney sonuçlarından görüldüğü üzere oldukça iyi bir performans göstermektedir.

Bildirinin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde doğrusal bir sistem için Kayan Kipli Gözlemci tasarımı açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde Bozan Etken Gözlemcisi tasarımına değinilmekte ve bu gözlemcinin ikinci bölümdeki sistem ile birlikte kullanımı

anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde kayan kipli gözlemci ve Bozan Etken Gözlemcisinin DC motora uygulanması anlatılmaktadır. Beşinci ve altıncı bölümde sırasıyla benzetim ve deney sonuçları sunulmaktadır. Son bölümde ise bazı önemli noktalara değinilerek bildiri sonlandırılmıştır.

2. Doğrusal Bir Sistem İçin Kayan Kipli Gözlemci

Bu bölümde ikinci dereceden skaler ve doğrusal bir sistem üzerinde gecikme telafisini sağlamak amacı ile Kayan Kipli Gözlemci tasarımı anlatılmaktadır. Bu sistemler genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\ddot{x} + a_1\dot{x} + a_2x = bu \quad (1)$$

Burada a_1 , a_2 ve b diferansiyel denklemin katsayıları, u ise sistemin girdisidir. Bu sistemde x ve \dot{x} değişkenlerinin ölçülebildiği ve a_1 ile a_2 'nin kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır. Öncelikle sadece ölçüm kanalında gecikme olduğu durumu düşünelim. Bu gecikme

$$x_m(t) = x(t - \tau(t)) \quad (2)$$

şeklinde düşünülebilir. Burada altsimge m ölçülen sinyali ifade etmektedir.

Gözlemci kayan kipli olacak şekilde tasarlanacaktır. Bu gözlemciyi süren girdi u_o , şu şekildedir:

$$u_o = u_{eq} + K \text{sign}(\sigma) \quad (3)$$

Burada K kazanç parametresi, $\text{sign}(\cdot)$ ise işaret fonksiyonudur. $K \text{sign}(\sigma)$ girdinin süreksiz kısmını, u_{eq} ise eşdeğer (equivalent) kısmını oluşturur.

Denklem (1)'deki sistemi taklit etmeye yönelik olan gözlemci sistemi aşağıdaki gibi tasarlanabilir:

$$\ddot{\hat{x}} + a_1\dot{\hat{x}} + a_2\hat{x} = bu + u_o \quad (4)$$

$$\dot{\hat{x}}_e = \dot{\hat{x}}_m - u_{oeq} \quad (5)$$

Bu denklemde $(\hat{\cdot})$ gözlemci ara terimlerini, e altsimgesi ise tahmin edilen değişkenleri ifade etmektedir. Gözlemcinin girdisi, gözlemci ara değişkenlerinin ölçülen değerlere yakınsamasını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Çıkarımın ileriki aşamalarında da görüleceği gibi, bu yakınsama, tahmini değerlerin de gerçek değerlere yakınsamasını sağlayacaktır. Ölçülen değerler ile gözlemci ara değişkenleri arasındaki hata aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$e = x_m - \hat{x} \quad (6)$$

Bu hatayı kullanarak kayma yüzeyi

$$\sigma = \dot{e} + C e \quad (7)$$

olarak tasarlanabilir. Bu denklemde C kayma yüzeyinin eğimini ifade eder. Kayma yüzeyinin türevi alındığında

$$\dot{\sigma} = \ddot{e} + C \dot{e} \quad (8)$$

elde edilir. Denklem (6)'nın iki kere türevi alınıp (8)'e yerleştirildiğinde

$$\dot{\sigma} = \ddot{x}_m - \ddot{\hat{x}} + C \dot{e} \quad (9)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemde \ddot{x} yerine, denklem (4)'ten elde edilen ifade yazıldığında şu denkleme ulaşılır:

$$\dot{\sigma} = \ddot{x}_m + a_1\dot{x}_e + a_2x_e - bu - u_o + C\dot{e} \quad (10)$$

Bu denklem kullanılarak gözlemciyi süren girdinin eşdeğer kısmı, $\dot{\sigma}$ sifira eşitlenerek bulunur:

$$u_{o_{eq}} = \ddot{x}_m + a_1\dot{x}_e + a_2x_e - bu + C\dot{e} \quad (11)$$

Denklem (11)'de tasarlanmış eşdeğer denetim girdisi denklem (5)'te kullanıldığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\ddot{x}_e = -a_1\dot{x}_e - a_2x_e + bu - C\dot{e} \quad (12)$$

Bu denklemde, bu teriminin (1)'deki karşılığı yerine konulduğunda

$$(\ddot{x}_e - \ddot{x}) + a_1(\dot{x}_e - \dot{x}) + a_2(x_e - x) = -C\dot{e} \quad (13)$$

ifadesine ulaşılır. e hatası kayma kipli denetim sayesinde sifıra çekileceğinden, $-C\dot{e}$ terimi de sıfır olacaktır. Eğer (1)'deki açık döngü sistem modeli kararlı ise (kararsız olması durumunda durum geribesleme yöntemi ile kararlı hale getirilebilir), tahmini x_e değişkeni x 'e yakınsar. Dolayısıyla bu x_e değeri kontrol döngüsünde kullanılabilir. Bu çıkarımda girdi kanalındaki gecikmeye karşı herhangi bir telafi yöntemi uygulanmamaktadır. Ancak, Bölüm 5 ve 6'da sunulan benzetim ve deneylerde görüldüğü gibi sunulan yöntem, girdi kanalındaki kararsızlığı da önlemektedir.

Bu bölümde anlatılan kayan kipli gözlemci çıkarımı, model parametrelerinin tam olarak bilindiği durum için geçerlidir. Uygulamalarda çoğunlukla sistem parametrelerinin yaklaşık (nominal) değerleri bilinmektedir. Bu yaklaşık değerler ile gerçek değerler arasındaki fark, tahmini edilen x_e üzerinde hataya sebep olur. Bu durumu engellemek için bir sonraki bölümde değinilen Bozan Etken Gözlemcisi (Disturbance Observer) tasarlanmalıdır.

3. Bozan Etken Gözlemcisi

Bozan Etken Gözlemcisi hareket denetim sistemlerinde sık kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile sistem üzerine düşen bozucu etkenler kestirilir ve telafi edilir. Bu gözlemcinin tasarımında sistem parametrelerinin yaklaşık değerleri kullanılır ve gözlemci, yaklaşık ve gerçek parametreler arasındaki hataları bozan etken olarak algılar. Dolayısıyla, Bozan Etken Gözlemcisi ile hem dıştan gelen bozan etkenler telafi edilir, hem de sistem parametreleri yaklaşık değerlere çekilmiş olur. Bu bildiriye Bozan Etken Gözlemcisi, kayan kipli gözlemcide kullanılan yaklaşık parametre değerleri ile gerçek parametre değerleri arasındaki fark nedeniyle x_e üzerinde oluşan hatayı engellemek amacı ile kullanılmaktadır.

Doğrusal olmayan otonom bir sistem durum uzayında aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + bu(t) + d_o(t) \quad (14)$$

Burada, $f(x(t))$ sistemin karakteristiklerini içeren doğrusal olmayan bir fonksiyon, $u(t)$ sistemin girdisi ve $d_o(t)$ ise sistem üzerine dıştan etkiyen bozucu etkidir. $f(x(t))$ ve b aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f(x(t)) = f_n(x(t)) + \tilde{f}(x(t)) \quad (15)$$

$$b = b_n + \tilde{b} \quad (16)$$

Burada $f_n(x(t))$, $f(x(t))$ 'nin nominal parametrelerle hesaplanmış doğrusal bir ifadesidir. b_n parametresi b 'nin yaklaşık değeridir. $(\tilde{\cdot})$ gerçek değerler ile yaklaşık değerler arasındaki hatayı ifade eder. Bu değerler sistem modelinde yerine yerleştirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\dot{x}(t) = f_n(x(t)) + b_n u(t) + \underbrace{\tilde{f}(x(t)) + \tilde{b}u(t) + d_o(t)}_{d(t)} \quad (17)$$

Bu denklemde de görüldüğü gibi, yaklaşık değerler ile gerçek değerler arasında kalan hatalar sistem üzerindeki bozan etkenler olarak düşünülebilir. Bu durumda $d(t)$, sistem üzerindeki toplam bozan etkidir. Bu bozan etken aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$d(t) = \dot{x}(t) - f_n(x(t)) - b_n u(t) \quad (18)$$

Bu denklem sıfır başlangıç koşulları ile Laplace uzayında aşağıdaki gibi yazılır:

$$D(s) = sX(s) - F_n(s) - b_n U(s) \quad (19)$$

Bu denklemde $sX(s)$ terimi, X 'in gelecek değerlerini gerektirir. Bu denklemi pratikte gerçekleştirebilmek (realize edilemek) için, denklemin her iki tarafı alçak geçiren bir süzgecin transfer fonksiyonu ($\frac{g}{s+g}$) ile çarpılabilir:

$$\underbrace{\frac{g}{s+g} D(s)}_{\triangleq \hat{D}(s)} = \frac{g}{s+g} (sX(s) - F_n(s) - b_n U(s)) \quad (20)$$

Burada $\hat{D}(s)$, $D(s)$ 'nin bir kestirimi olup, alçak geçiren süzgecin kesim frekansına bağlı olarak, alçak frekanslarda $D(s)$ 'ye yakınsar. Denklem yeniden düzenlendiğinde

$$\hat{D}(s) = \frac{sg}{s+g} X(s) - \frac{g}{s+g} F_n(s) - \frac{g}{s+g} b_n U(s) \quad (21)$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklemdeki ($\frac{s}{s+g}$) ifadesi yerine eşiti olan $1 - \frac{g}{s+g}$ yazılırsa

$$\hat{D}(s) = (1 - \frac{g}{s+g})gX(s) - \frac{g}{s+g} F_n(s) - \frac{g}{s+g} b_n U(s) \quad (22)$$

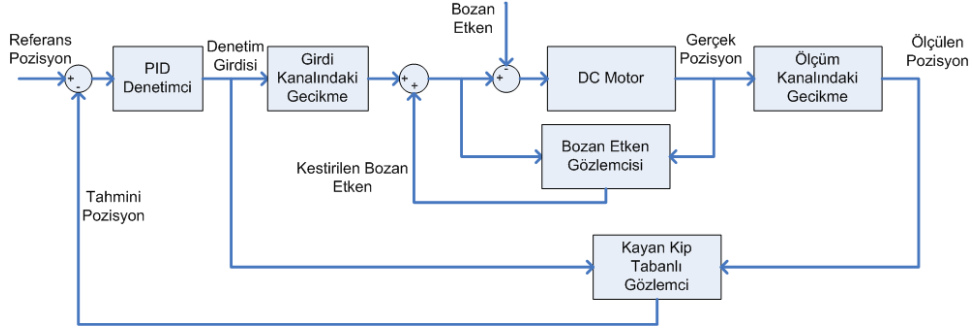
elde edilir. Bu ifade düzenlendiğinde aşağıdaki sonuca ulaşılır:

$$\hat{D}(s) = gX(s) - \frac{g}{s+g} (gX(s) + F_n(s) + b_n U(s)) \quad (23)$$

Kestirilen bozan etken sisteme beslendiğinde (Şekil 1), sistem parametreleri nominal parametrelere çekilmiş olur.

4. Kayan Kipli Gözlemcinin DC Motor'a Uygulanması

Bu bölümde, Bölüm 2 ve 3'teki yöntemlerin birleşiminden oluşan gözlemci sisteminin DC motor'a uygulanması sunulacaktır. Öncelikle DC motor için bozan etken gözlemcisi tasarlanmıştır. Böylece, hem dıştan gelen bozan etkenlere karşı gürbüzlük sağlanmış, hem de sistem parametreleri yaklaşık değerlere çekilmiştir. Ardından, yaklaşık parametreler kullanılarak kayan kipli gözlemci tasarımı anlatılmıştır. Bu iki



Şekil 1: Bütünleşik Sistemin Blok Diagramı

sistemin birlikte kullanılması ile bütünleşik bir sistem elde edilmiştir. DC motor modeli

$$J\dot{\omega}(t) = -B\omega(t) + K_t u(t) + d_o(t) \quad (24)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde ω motorun açısal hızı, J motorun eylemsizliği, K_t tork sabiti, B sürtünme sabiti, $u(t)$ sistemin girdisi, $d_o(t)$ ise sisteme dıştan etkileyen bozan etkidir. Yaklaşık (nominal) değerler n altsimgesi ile gösterildiğinde, sistem parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$J = J_n + \tilde{J} \quad (25)$$

$$B = B_n + \tilde{B} \quad (26)$$

$$K_t = K_{t_n} + \tilde{K}_t \quad (27)$$

Bu ifadeler denklem (24)'de yerine yazıldığında

$$J_n \dot{\omega}(t) = -B_n \omega(t) + K_{t_n} u(t) - \underbrace{\tilde{J}\dot{\omega}(t) - \tilde{B}\omega(t) + \tilde{K}_t u(t)}_{d(t)} + d_o(t) \quad (28)$$

elde edilir. $d(t)$ 'yi kestirmek için Bölüm 3'tekine benzer bir yol izlendiğinde aşağıdaki ifadeye ulaşılır:

$$\hat{D}(s) = J_n g \Omega(s) - \frac{g}{s+g} (J_n g \Omega(s) - B_n \Omega(s) + K_{t_n} U(s)) \quad (29)$$

Bulunan $\hat{D}(s)$ sisteme beslendiğinde, sistem parametreleri nominal parametrelere çekilmiş olur.

Bu aşamadan sonra, kayan kipli gözlemci tasarlanmalıdır. DC motor için gözlemci sistemi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\dot{\hat{\omega}}(t) = \frac{K_{t_n}}{J_n} u(t) - \frac{B_n}{J_n} \omega_e(t) + u_o(t) \quad (30)$$

$$\dot{\omega}_e(t) = \dot{\omega}_m(t) - u_{o_{eq}}(t) \quad (31)$$

Hata, ölçülen pozisyon $p_m(t)$ ile gözlemci ara değişkeni olan pozisyon $\hat{p}(t)$ arasındaki fark olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$e(t) = p_m(t) - \hat{p}(t) \quad (32)$$

Kayma yüzeyi (7)'deki gibi tanımlanmıştır. Kayma yüzeyinin türevi alınıp, hatanın ikinci türevi bu denklemde yerine konulduğunda

$$\dot{\sigma} = \dot{\omega}_m(t) - \frac{K_{t_n}}{J_n} u(t) + \frac{B_n}{J_n} \omega_e(t) - u_o(t) + C\dot{e}(t) \quad (33)$$

ifadesi elde edilir. $\dot{\sigma}$ sıfıra eşitlendiğinde, eşdeğer girdi aşağıdaki gibi bulunur:

$$u_{o_{eq}}(t) = \dot{\omega}_m(t) - \frac{K_{t_n}}{J_n} u(t) + \frac{B_n}{J_n} \omega_e(t) + C\dot{e}(t) \quad (34)$$

Denetim sinyali, süreksiz haliyle ile beraber denklem (3)'teki gibidir. Bölüm 2'dekine benzer bir analiz yapıldığında tahmini açısal hızın gerçek açısal hıza yakınsadığı görülmektedir:

$$(\dot{\omega}_e(t) - \dot{\omega}(t)) + \frac{B_n}{J_n} (\omega_e(t) - \omega(t)) = -C\dot{e}(t) \quad (35)$$

Bu sistemde pozisyon yakınsaması sağlanamamaktadır. Pozisyon, hızın integrali alınarak elde edilmektedir. Tasarlanan sistemlerin birlikte kullanımı Şekil 1'deki diagramda görülebilir. Bir sonraki bölümde, bu bölümde tasarlanan yöntem ile elde edilen benzetim sonuçları sunulmaktadır.

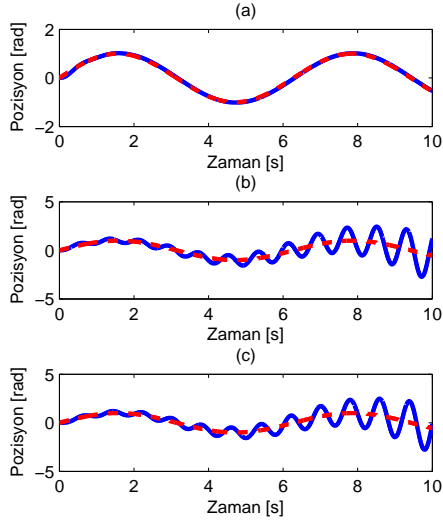
5. Benzetimler

Sunulan sistemin performansını değerlendirmek amacı ile Matlab Simulink ortamında benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerde DC motor modeli kullanılmıştır. Yöntemin performansı ölçüm ve girdi kanallarındaki çeşitli gecikme türleri ile gözlemlenmiştir. Sunulan sonuçlarda kesikli çizgi referans sinyalini, düz çizgi ise motorun pozisyonunu göstermektedir.

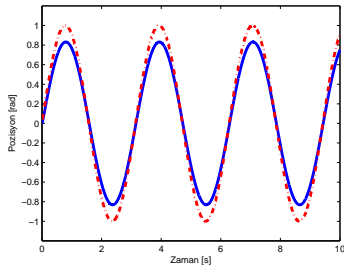
Öncelikle iletişim kanalındaki gecikmenin sistem üzerindeki etkisini görmek amacı ile benzetimler yapılmıştır. İletişim kanalında gecikme olmadığı durum, sadece ölçüm kanalında 0.1 saniyelik bir gecikmenin olduğu durum ve sadece girdi kanalında 0.1 saniyelik bir gecikmenin olduğu durum Şekil 2'de verilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, iletişim kanalındaki küçük gecikmeler bile kararsızlığa yol açmaktadır.

Bu durumun üstesinden gelmek amacı ile, Bölüm 4'te tasarlanan kayan kipli gözlemci yöntemi kullanılmıştır. Gözlemcide nominal parametreler kullanılmış ve bu parametreler, gerçek parametrelerle aralarında %15'lik bir fark olacak şekilde seçilmiştir. Sadece ölçüm kanalına 1 saniyelik sabit bir gecikme uygulanmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 3'teki gibidir. Bu sonuçtan da görüldüğü gibi, gecikmenin neden olduğu kararsızlık engellenmiştir ancak, referans belirgin bir hata ile izlenebilmektedir. Bu hata gözlemcide kullanılan yaklaşık parametrelerin sistem parametrelerinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumu önlemek amacı ile Bölüm 4'te tasarlanan bozan etken gözlemcisi sisteme eklenmiştir. Bu sistemle yapılan benzetim sonucu Şekil 4'te verilmiştir. Görüldüğü gibi Bozan Etken Gözlemcisi kullanılmadığında gözlemlenen hata ortadan kalkmıştır.

Tasarlanan yöntemin ölçüm kanalındaki değişken gecikmeye karşı olan performansını görmek amacı ile ölçüm



Şekil 2: Ölçüm ve girdi kanallarındaki gecikmenin etkisi. (a) Gecikme olmadığı durum, (b) Sadece ölçüm kanalında 0.1 s gecikme olduğu durum, (c) Sadece girdi kanalında 0.1 s gecikme olduğu durum

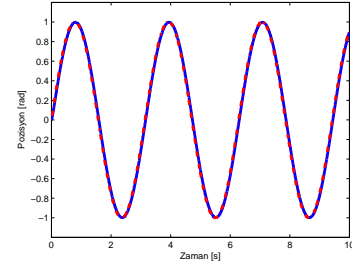


Şekil 3: Sadece ölçüm kanalında sabit gecikme ile benzetim sonucu: Sadece kayan kipli gözlemci kullanıldığında

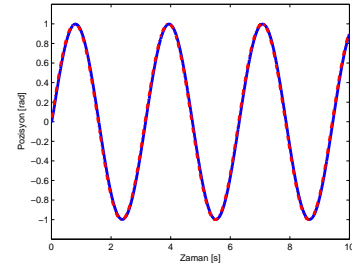
kanalına, 0.8 ile 1.2 saniye arasında rastgele değişen bir gecikme uygulanmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 5'te görüldüğü gibidir. Sunulan yöntemin, ölçüm kanalındaki değişken gecikmeyi telafi etmekte de oldukça başarılı olduğu bu şekilden görülmektedir.

Ölçüm kanalındaki gecikme aynı tutularak girdi kanalına 1 saniyelik sabit gecikme uygulandığında ise Şekil 6'daki sonuç elde edilmiştir. Bu sonuçtan görüldüğü gibi, sunulan yöntem girdi kanalındaki gecikmenin neden olduğu kararsızlığı da önlemektedir. Sistem, referansı ölçüm kanalındaki gecikmenin miktarı kadar geriden takip etmektedir. Bu durum ancak referansın gelecek değerlerinin sisteme beslenmesi ile önlenemez. Çift yönlü denetim uygulamalarında referans genellikle bir operatör tarafından verildiği için, referansın gelecek değerlerini saptamak mümkün olmamaktadır.

Girdi kanalındaki gecikme, 0.8 ile 1.2 saniye arasında rastgele değişen bir gecikme ile değiştirildiğinde elde edilen sonuç Şekil 7'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi hem ölçüm, hem de girdi kanalında değişken gecikmenin olduğu durumda da yöntemimiz başarılı sonuçlar vermektedir.



Şekil 4: Sadece ölçüm kanalında sabit gecikme ile benzetim sonucu: Kayan kipli gözlemci ile birlikte Bozan Etken Gözlemcisi kullanıldığında

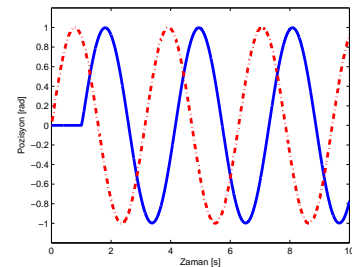


Şekil 5: Sadece ölçüm kanalında değişken gecikme ile benzetim sonucu

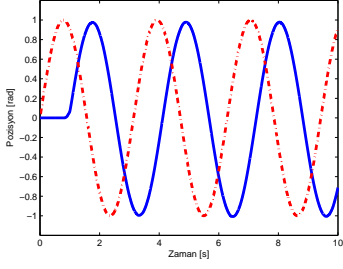
6. Deney Sonuçları

Önerilen yöntemin performansı, Maxon RE serisi bir motor üzerinde deneylerle test edilmiştir. Denetim dSPACE 1102 kartı ile gerçekleştirilmiştir. Kart Simulink arayüzü kullanılarak programlanmıştır. Gecikmeler sisteme yapay olarak simulink ortamında verilmiştir.

Öncelikle, ölçüm kanalında 1 saniyelik sabit gecikme olduğu durum ele alınmıştır. Gecikme telafisi için kayan kipli gözlemci nominal parametreler ile tasarlanmıştır. Bozan etken gözlemcisi kullanılmadan sadece kayan kipli gözlemci ile elde edilen sonuç Şekil 8'de verilmiştir. Görüldüğü gibi hem oldukça büyük bir pozisyon hatası gözlemlenmekte, hem de pozisyon sürekli kaymaktadır. Gözlenen bu durumlar, kayan kipli gözlemci tasarlanırken kullanılan nominal parametreler ile motorun gerçek parametreleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu durumu önlemek için bozan etken gözlemcisi tasarlandığında elde edilen sonuç Şekil 9'daki

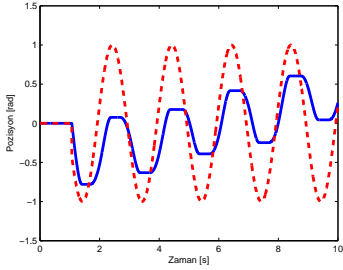


Şekil 6: Ölçüm kanalında değişken gecikme ve girdi kanalında sabit gecikme ile benzetim sonucu

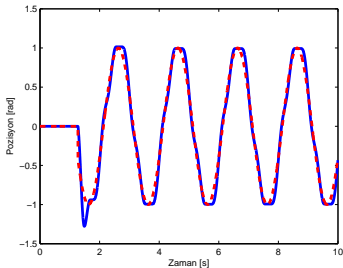


Şekil 7: Ölçüm ve girdi kanallarında değişken gecikme ile benzetim sonucu

gibidir. Görüldüğü gibi Bozan Etken Gözlemcisi sistemin parametrelerini nominal parametrelere çektiğinden bir önceki durumda görülen olumsuzluklar giderilmiştir. Motor başarılı bir şekilde referansı izlemektedir.



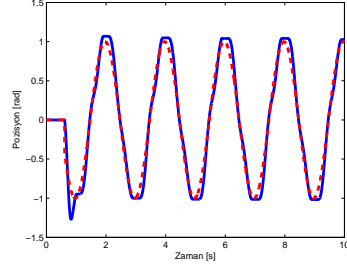
Şekil 8: Sadece ölçüm kanalında sabit gecikme varken, sadece kayan kipli gözlemci kullanarak elde edilen deney sonucu



Şekil 9: Sadece ölçüm kanalında sabit gecikme varken, kayan kipli gözlemci ve bozan etken gözlemcisinin birlikte kullanımı ile elde edilen deney sonucu

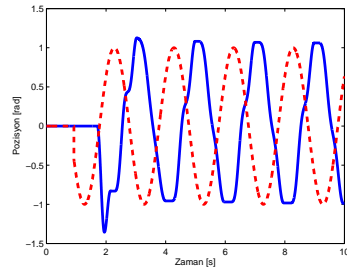
Ölçüm kanalına 0.8 ile 1.2 saniye arasında rastgele olarak değişen bir gecikme uygulandığında elde edilen sonuç Şekil 10'da verilmiştir. Görüldüğü gibi ölçüm kanalındaki değişken gecikme de başarılı bir şekilde telafi edilebilmektedir. Ölçüm kanalındaki değişken gecikme aynı tutulup, girdi kanalına 0.8 saniyelik sabit bir gecikme uygulandığında Şekil 11'deki sonuç elde edilmiştir. Girdi kanalındaki gecikmenin neden olduğu kararsızlık yine önlenmiştir, ancak benzetim sonuçlarına benzer olarak, girdi kanalındaki sabit gecikme referansın gecikerek izlenmesine neden olmuştur. Buna rağmen sinyalin şeklinde önemli bir bozuluk gözlenmemektedir.

Hem ölçüm hem girdi kanalında 0.8 ile 1.2 saniye arasında rastgele değişen gecikme uygulandığında Şekil 12'deki sonuç

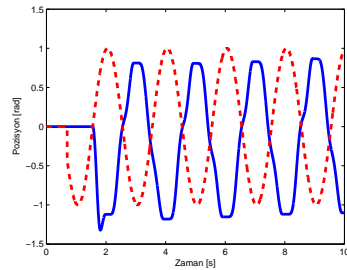


Şekil 10: Sadece ölçüm kanalında değişken gecikme varken elde edilen deney sonucu

elde edilmiştir. Yine sinyal şekli önemli bir bozulmaya uğramasına rağmen sinyalde kaymalar gözlenmiştir. Bu durumu engellemek için önerdiğimiz yöntem üzerinde bir takım düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu düzenlemelere sonuçlar bölümünde değinilmiştir.



Şekil 11: Ölçüm kanalında değişken, girdi kanalında 0.8 saniyelik sabit gecikme varken elde edilen deney sonucu

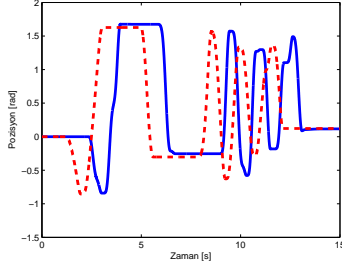


Şekil 12: Ölçüm ve girdi kanallarında değişken gecikme varken elde edilen deney sonucu

Ölçüm ve girdi kanalında değişken gecikme mevcutken operatörden gelen gelişigüzel referanslarla deneyler yapılmıştır. Bu deneyin sonucu Şekil 13'te verildiği gibidir. Görüldüğü gibi önerdiğimiz yöntem operatörden gelen değişik türdeki referanslarla da oldukça başarılı çalışmaktadır. Bu sonuç önerdiğimiz yöntemin uzaktan yönetim uygulamalarındaki yüksek potansiyelini ortaya koymaktadır.

7. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu bildiride uzaktan iki yönlü denetim sistemlerinde gecikme telafisine yönelik kayan kipli gözlemci tabanlı yeni bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yöntemin başarısı yapılan benzetimler ve



Şekil 13: Ölçüm ve girdi kanallarında değişken gecikme varken operatörden gelen referans ile elde edilen deney sonucu

deneyle desteklenmiştir. Bu yöntem iki yönlü denetimin sadece pozisyon takibi kısmı için tasarlanmıştır. Birçok iki yönlü denetim uygulaması kuvvet iletimini de içermektedir. Bu tip uygulamalarda kullanmak için önerdiğimiz yöntem uzaktan kuvvet iletimi yöntemleri ile desteklenmelidir.

Önerilen yöntemin DC motora uygulanmasında, tahmini hızın gerçek hıza yakınsaması sağlanmaktadır; pozisyon yakınsaması ise sağlanamamaktadır. Pozisyon, tahmini hız değerinin integrali alınarak elde edilebilmektedir. Sunulan yöntem geliştirilip pozisyon yakınsaması sağlanırsa, değişken girdi gecikmesi durumunda daha başarılı sonuçlar elde edebileceğimizi düşünmekteyiz ve çalışmalarımızı bu yönde sürdürmekteyiz.

8. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK-NSF işbirliği çerçevesinde TÜBİTAK tarafından 106M533 No'lu "Zamansal Gecikme Telifli İki Yönlü Kontrol Sistemleri" adlı bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

9. Kaynakça

- [1] R. J. Anderson, M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay", Proc. of International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1988.
- [2] R. Lozano, N. Chopra, M. W. Spong, "Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Delay", Proceedings of 8. Mechatronics Forum, 2002.
- [3] N. Chopra, M. W. Spong, "Bilateral Teleoperation Over the Internet: Time Varying Delay Problem", Proceedings of American Control Conference, 2003.
- [4] P. Berestesky, N. Chopra, M. W. Spong, "Theory and Experiments in Bilateral Teleoperation over the Internet", IEEE International Conference of Control Applications, 2004.
- [5] N. Chopra, P. Berestesky, M. W. Spong, "Bilateral Teleoperation Over Unreliable Communication Networks", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008.
- [6] G. Niemeyer, J. E. Slotine, "Stable Adaptive Teleoperation", IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991.
- [7] G. Niemeyer, J. E. Slotine, "Towards Force Reflecting Teleoperation Over Internet", International Conference on Robotics and Automation, 1998.

- [8] G. Niemeyer, J. E. Slotine, "Using Wave Variables for System Analysis and Robot Control", International Conference on Robotics and Automation, 1997.
- [9] S. Munir, W. J. Book, "Wave-Based Teleoperation with Prediction", Proceedings of the American Control Conference, 2001.
- [10] K. Natori, T. Tsuji, K. Ohnishi, A. Hase, K. Jezernik, "Robust Bilateral Control with Internet Communication", Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004.
- [11] K. Natori, K. Ohnishi, "Time Delay Compensation in Bilateral Teleoperation Systems", IEEE 3rd International Conference of Mechatronics, 2006.
- [12] N. Liyama, K. Natori, R. Kubo, K. Ohnishi, H. Furukawa, K. Miura, M. Takahata, "A Bilateral Controller Design Method Using Delay Compensators", International Conference on Industrial Technology, 2006.
- [13] H. C. Cho, J. H. Park, "Stable Bilateral Teleoperation under a Time Delay Using a Robust Impedance Control", International Journal of Mechatronics, 2005.
- [14] L. G. Garcia-Valdovinos, V. Parra-Vega, M. A. Arteaga, "Observer-based Sliding-Mode Impedance Control of Bilateral Teleoperation under Constant Unknown Time Delay", International Journal of Robotics and Autonomous Systems, 2007.
- [15] J. H. Park, H. C. Cho, "Sliding-Mode Controller for Bilateral Teleoperation with Varying Time Delay", International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1999.
- [16] G. M. H. Leung, A. B. Francis, J. Apkarian, "Bilateral Controller for with Time Delay via Teleoperators μ -Synthesis", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995.
- [17] A. Sano, H. Fujimoto, M. Tanaka, "Gain-Scheduled Compensation for Time Delay of Bilateral Teleoperation Systems", International Conference on Robotics and Automation, 1998.
- [18] G. M. H. Leung, B. A. Francis, "Robust Nonlinear Control of Bilateral Teleoperators", Proceedings of the American Control Conference, 1994.