

Doğrusal Olmayan Bir Sistemin Gürbüz Denetimi Robust Control of a Nonlinear System

Abdurrahman Bayrak¹, Handan Gürsoy², Mehmet Önder Efe³

^{1,2,3}Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Hacettepe Üniversitesi, Beytepe

{[abayrak](mailto:abayrak@cs.hacettepe.edu.tr),[hgursoy](mailto:hgursoy@cs.hacettepe.edu.tr),[onderefe](mailto:onderefe@cs.hacettepe.edu.tr)}@cs.hacettepe.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, doğrusal olmayan ve kesinsizlikler içeren bir sistem için PID, bulanık mantık ve kayan kipli denetim tabanlı bir denetim sistemi tasarlanmıştır. Tasarımın ilk aşaması nominal sistem için gerçekleştirilen bir PID denetleyicinin elde edilmesidir. Bu denetleyicinin kesinsizlik içeren sistem üzerindeki başarımının düşük olması bu bildiri tartışılan önerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Doğrusal olmayan sistemin birim basamak cevabını düzeltmek için bulanık mantık tabanlı bir düzeltme mekanizması tasarlanmıştır. Bu düzeltme mekanizması kayan kipli denetim kuralları göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. Böylelikle elde edilen sistem performansının çok daha iyi olabileceği gösterilmiştir. Kesinsizlik içeren sistem cevabı nominal sistem cevabına hızla yakınsamış ve makul denetleyici çıktıları elde edilmiştir.

Abstract

In this study, PID, fuzzy logic and sliding mode control based feedback control of a nonlinear and uncertain system is presented. The first phase of the design approach is to obtain a nominal PID controller for the nominal plant model. The degraded performance of the designed PID on the uncertain nonlinear system lead to the emergence of the technique discussed here. To compensate deficiencies in the unit step response of the nonlinear system, a fuzzy compensation scheme is proposed. The mechanism is obtained utilizing the sliding mode controller design rules. It is shown that the performance with the proposed scheme could be better than the sole PID driving the nonlinear system. With the proposed technique, the response of the uncertain system converges to that of nominal system with admissible controller outputs.

1. Giriş

Doğrusal olmayan sistemler konusunda yapılan araştırmalar uzun yıllardır güncelliğini korumakta, her bir sistem dinamiği için farklı ve o sisteme özel yaklaşımların geliştirilmesi genellikle kaçınılmaz olmaktadır. Bunun temel sebebi ise, denetimde yüksek başarımın beklenmesi ve doğrusallaştırma yoluyla elde

edilen nominal sistemler için geliştirilmiş denetleyicilerin yetersiz kalmasıdır. Bunlar içinde en yaygın olanı PID tipindeki denetleyici olup bu yaklaşım için de çokça uyarlama ve ayarlama algoritmaları önerilmiştir. Bu çalışmada da esas olarak PID tabanlı nominal denetim sistemi ele alınacaktır [1].

PID denetleyici, kullanılan en yaygın denetim algoritmasıdır ve günümüzde çoğu endüstriyel denetim uygulamaları PID tabanlıdır. Çünkü PID denetleyiciler kolay anlaşılabilme, uygulamada düşük maliyet, basit yapı ve güçlü performans gibi üreticilerin ve tasarım mühendislerinin ilgisini çeken önemli birçok özelliğe sahiptir. Fakat doğrusal PID denetleyicilerin kullanımı doğrusal olmayan dinamikler ve kesinsizlikler içeren sistemler için oldukça zordur. Bu yüzden literatürde doğrusal olmayan PID denetleyicilerin birçok tasarım yöntemleri mevcuttur. En yaygın yaklaşım doğrusal olmayan fonksiyon kullanımıdır. Shinskey, doğrusal olmayan bir fonksiyon kullanarak karesel hataya dayalı bir PID denetleyici betimlemiştir [2]. Jiang, [3], ise PID denetleyiciler için doğrusal olmayan bir fonksiyon tanımlamıştır, ancak bu PID denetleyiciler büyük kesinsizlikler için etkili olamamaktadır. Doğrusal olmayan PID denetleyicilerin elde edilmesinde alternatif yöntemler sinir ağları veya bulanık mantık kullanmak olmuştur [4-6]. Böylelikle hata, hatanın türevi ve integrali doğrusal olmayan bir sistem üzerinde birleştirilerek doğrusal olmayan bir denetleyici elde edilebilmektedir.

Doğrusal olmayan PID denetim tekniklerinin yanı sıra doğrusal olmayan denetim yöntemlerinin çoğunda karar verme mekanizması olarak kullanılan bulanık mantık denetimi, denetim mühendisliği ve yapay zeka arasında bir geçişi tanımlar [7]. Bulanık mantık denetim 1974'te Mamdani'nin ilk çalışmasından beri denetim uygulamalarında etkili çözümler sunmuştur [8]. Ayrıca, *Japanese Society of Instrument of Control Engineering* tarafından yürütülen Japon Kontrol Teknoloji Endüstrisi araştırmalarına göre bulanık mantık denetimin gelecekte hızla ilerlemeye devam edeceği tahmin edilmektedir, [8]. Esas olarak bölgeler üzerinde tanımlanmış yerel kararların tümleştirilmesini sağlayan bulanık mantık sistemleri, denetim uygulamalarında da giriş değişkenlerinin farklı bölgelerde bulunması halinde

uygulanması gereken çıkış değerlerini aradeğerleme olanağı sağla, [9, 10].

Yukarıda anlatılan denetim tekniklerinin yanı sıra doğrusal olmayan denetim tekniklerinden biri olan kayan kipli denetim, doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde etkili ve basit bir yöntemdir, [1, 11, 12]. Kayan kipli denetim diğer denetim yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Kayan kipli denetimin en önemli avantajı, sistemin dış bozucu etkilere ve parametre çeşitliliğine karşı daha duyarsız olmasını sağlayan gürbüzlük özelliğine sahip olmasıdır, [13]. Yaklaşımın en önemli dezavantajı ise uygulamalardaki çatırdama problemi [14-16]. Çatırdama ayırık zamanlı uygulamalar veya modellenmemiş dinamiklerden dolayı denetimin yüksek frekanslı salınımıdır, [16]. Çatırdama problemini ortadan kaldırmak için birçok teknik geliştirilmiştir. Bu problemi çözmek için geliştirilen tekniklerden biri, süreksiz işaret fonksiyonu yerine onun sürekli bir yaklaşımının kullanılmasıdır, [17]. Çatırdama problemini çözmek için diğer bir teknik ise integratör ile sistem dinamiklerini genişletmek ve bir gözleyici kullanmaktır, [15, 17].

1950'lerin sonunda Sovyet Rusya'da önerilen ve ilk çalışmaları 1960'ların başında Emelyanov tarafından yürütülen kayan kipli denetim metodu, 1970'lerin ortasında İngilizce kitaplar ve makaleleriyle Utkin tarafından tüm dünyaya duyurulmuştur. 1987'de ise Kaynak vd. ayırık zamanlı kayan kipli denetim ile yeni bir kararlılık koşulu önermiştir [18,19] Kayan kipli denetim, denetim uygulamalarının çok büyük bir kısmına çözüm önerebilmektedir. Bu uygulamalar robotik [20-22], ağ sistemleri [23], elektromekanik sistemler [21], hareket ve araç denetimi [23], su altı araçları [24], kimyasal süreç uygulamaları [25], nükleer güç reaktörü uygulamaları [18,26] bu alanlara örnekler.

Bildirinin ikinci bölümünde tasarım yaklaşımı, üçüncü bölümünde önerilen düzeltme mekanizması dördüncü bölümde ise benzetim sonuçları ele alınmış olup son kısımda sonuçlar tartışılmaktadır.

2. Sistem Modeli, Nominal Cevap ve Tasarımın Dayanağı

Bildiride ele alınan sistemin nominal kısmı (1) ile verilmektedir.

$$\dot{y} = 13,618u - 4\dot{y} - 16y \quad (1)$$

Sistemin kesinsizlikler içeren modeli ise (2) denklemindeki gibidir.

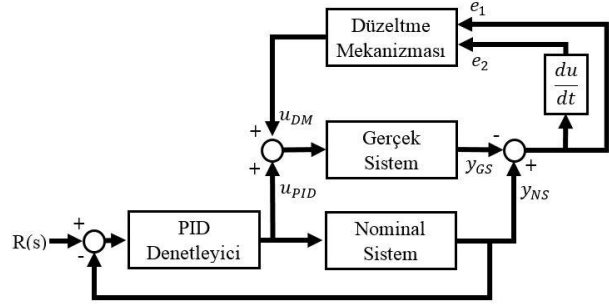
$$\dot{y} = (13,618 + \Delta g)u - 4\dot{y} - 16y + \Delta f \quad (2)$$

Bu ifadeye kesinsizlik terimleri ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\Delta f = \frac{10 \sin(10x_1 x_2)}{(1 + x_1^2 + x_2^2) \cos(x_1 - x_2)} \quad (3)$$

$$\Delta g = \frac{10 \cos(10(x_1 - x_2)) \sin(x_1^2 + x_2^2)}{(1 + x_2^2)} \quad (4)$$

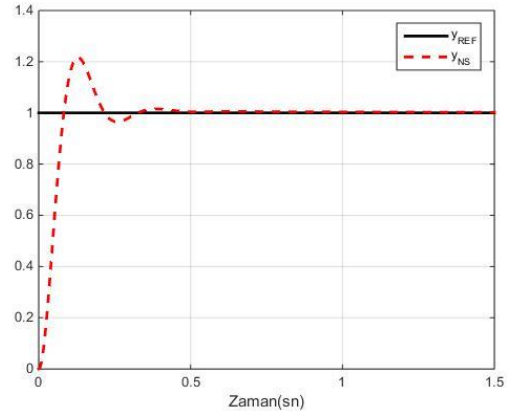
Önerilen denetim sisteminin blok diyagramı ise Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen PID denetleyici (5) ifadesinde verilmektedir.



Şekil 1: Denetim sisteminin blok diyagramı.

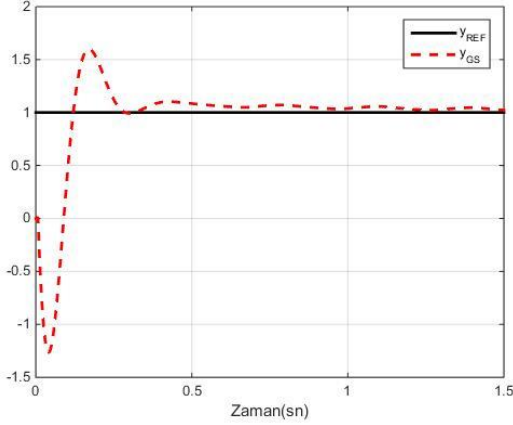
$$C(s) = 54,74 + \frac{51,62}{s} + 1,565s \quad (5)$$

Yukarıdaki parametre seçimi ile nominal denetim sisteminin basamak cevabının yükselme zamanı 0.039 sn yerleşme zamanı 0.29 sn olarak hedeflenmiş ve katsayılar belirlenmiştir. Bu şartlar altında elde edilen cevap Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: Nominal sistemin birim basamak cevabı.

Elde edilen PID denetleyici bir kez de kesinsizlik içeren sistemin denetiminde kullanıldığında Şekil 3'teki sonuç elde edilmektedir.



Şekil 3: Düzeltme mekanizması olmayan gerçek sistemin birim basamak cevabı.

Şekle göre, sistem performansı Şekil 2'de gösterilen cevabın oldukça uzağındadır. Yakınsama sürecinin büyük hatalar sergilemesi bu denetim sisteminin bir düzeltme mekanizmasına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

3. Önerilen Düzeltme Mekanizması

Bu bölümde, ihtiyaç duyulan düzeltme mekanizmasının tasarımı ele alınmıştır. Tasarlanan düzeltme mekanizması bulanık denetim tabanlıdır ve kayan kipli denetim kuralları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

Kayan kipli denetim, doğrusal olan ve doğrusal olmayan geri beslemeli denetim sistemlerinde iyi sonuçlar veren bir denetim yöntemidir. Bu yüzden, kayan kipli denetim birçok araştırmacı tarafından sıklıkla geri beslemeli denetim sistemlerine uygulanmaktadır. Kayan kipli denetimin temel amacı, hatayı anahtarlama veya kayma yüzeyine itmek ve hatayı bu yüzey üzerinde tutmaktır. Bunun sonucunda sistem kayma kipindedir ve modelleme hatalarından ve kesinsizliklerden etkilenmez.

Kesinsizlikler içeren bir sistem için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)u + \Delta \quad (6)$$

$f(x_1, x_2)$ ve $g(x_1, x_2)$ sürekli ve türevlenebilir fonksiyonlardır. Kayan kipli denetim yöntemi kuralları göz önüne alındığında şu ifadeler yazılabilir. $r_1: x_1$ için referans işareti, $r_2: x_2$ için referans işaretidir ve referans sinyalleri arasında $\dot{r}_1 = r_2$ ilişkisi sağlanır. Hata değişkenleri

$$e_1 = x_1 - r_1 \quad (7)$$

$$e_2 = x_2 - r_2 \quad (8)$$

olmak üzere anahtarlama fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlansın. Burada $\lambda > 0$ kayma yüzeyinin eğimini belirler.

$$\sigma = \dot{e}_1 + \lambda e_1 \quad \text{veya} \quad \sigma = e_2 + \lambda e_1 \quad (9)$$

$\dot{\sigma} = -M \operatorname{sgn}(\sigma)$ ilişkisini sağlayan ve u ile gösterilen denetim işareti aşağıdaki gibi bulunur:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \ddot{e}_1 + \lambda \dot{e}_1 \\ &= \ddot{x}_1 + \dot{r}_1 + \lambda e_2 \\ &= \dot{x}_2 - \dot{r}_2 + \lambda e_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Bu ifade aşağıdaki eşitliği yazabilmeyi mümkün kılacaktır.

$$-M \operatorname{sgn}(\sigma) = \dot{x}_2 - \dot{r}_2 + \lambda e_2 \quad (11)$$

Bu eşitlik ile denetim sinyali aşağıdaki gibi elde edilecektir.

$$u = \frac{1}{g} (\dot{r}_2 - \lambda e_2 - f - M \operatorname{sgn}(\sigma)) \quad (12)$$

Kayan kipli denetimin temel problemi işaret fonksiyonunun küçük değişimlere karşı hassasiyetinden kaynaklanan çatırdama problemidir. Bu problemi çözmek için erişme kuralındaki işaret fonksiyonu aşağıdaki gibi yumuşak geçişli hale getirilir.

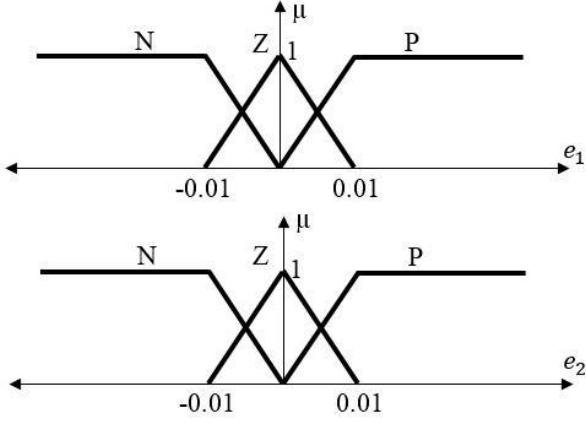
$$\operatorname{sgn}(\sigma) \approx \frac{\sigma}{\varepsilon + |\sigma|}, \quad \varepsilon > 0 \quad (13)$$

Yukarıda verilen ifade ile denetim sinyali aşağıdaki gibi elde edilecektir.

$$u = \frac{1}{g} \left(\dot{r}_2 - \lambda e_2 - f - M \frac{\sigma}{\varepsilon + |\sigma|} \right) \quad (14)$$

Yukarıdaki ifadede temel güçlük M katsayısının nasıl seçileceği konusundadır. Bu değer büyük olduğunda erişme hızlı olmakta ancak kontrol sinyalindeki yüksek frekanslı bileşenler daha etkili ve baskın hale gelmektedir. Yüksek kazanç dolayısıyla denetim sistemi bozuculara karşı daha gürbüz olmaktadır. M katsayısı düşük tutulduğunda ise kontrol sinyali yüksek frekanslı bileşenlerden arınmakta ancak sistem de gürbüzlük

özelliğinden uzaklaşmaktadır. Bu kısımda M kazancının seçimi üzerine bulanık mantığa dayanan bir seçim yaklaşımı üzerinde durulacaktır. Bu yaklaşıma esas oluşturan üyelik fonksiyonları (7) ve (8) ifadeleriyle tanımlanan hata değişkenleri üzerinden Şekil 4'teki gibi seçilmiş, kural tablosu ise Tablo 1'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4: e_1 ve e_2 üyelik fonksiyonları.

Tablo 1: Bulanık mantık kural tablosu

$e_2 \setminus e_1$	N	Z	P
P	PZ	PH	PE
Z	PH	PL	PH
N	PE	PH	PZ

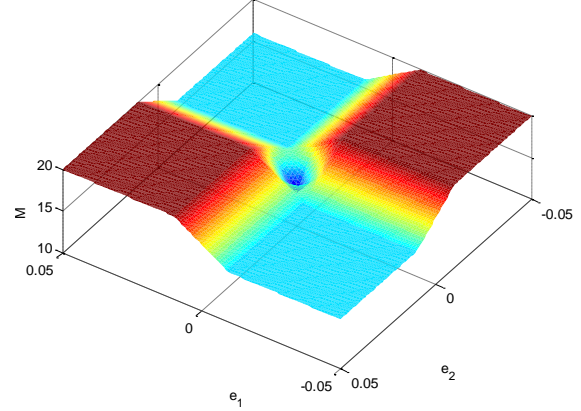
Bu mekanizmayı tasarlamak için Şekil 1'de gösterildiği gibi nominal sistem için elde edilen denetim sinyali ile düzeltme mekanizmasından üretilen denetim sinyalinin toplamı denetim sinyali olarak gerçek sisteme uygulanmıştır. Gerçek sistemin çıkışı ile nominal sistemin çıkışı arasındaki fark e_1 ve bu hatanın türevi e_2 ise düzeltme mekanizması içerisindeki bulanık mantık karar mekanizmasına giriş olarak uygulanmıştır.

Şekil 4 e_1 ve e_2 değişkenlerine ait üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Bulanık mantık karar mekanizmasının çıkışı M değişkenidir. Bu değer hesaplanırken, kayma yüzeyinden ve orijinden uzaklık dikkate alınarak Tablo 1'de gösterilen bulanık mantık kural tabanı oluşturulmuş ve eşitlik (15)'deki çarpıma dayalı çıkarsama yöntemi kullanılmıştır. Durulaştırma aşamasında tekli (İng. *singleton*) üyelik fonksiyonları kullanılmış, böylelikle Tablo 1'deki kümeler y_i değişkeni ile gösterilen bazı değerler atanmıştır. Durulaştırıcı bu seçimlerle ağırlıklı ortalama hesaplayan bir alt sisteme dönüşmüştür.

Seçilen değerler için elde edilen karar yüzeyi Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu yüzeye göre kayan kipli denetim kuralları ışığında hatanın ve türevinin negatif ve pozitif yönde büyümesinin engellenip, değerlerinin (-

0.01,0.01) aralığında bir bölgeye yumuşatarak kaydırma işleminin yapıldığı görülmektedir.

$$M = \frac{\sum_{j=1}^9 y_j \mu_{j1}(e_1) \mu_{j2}(e_2)}{\sum_{j=1}^9 \mu_{j1}(e_1) \mu_{j2}(e_2)} \quad (15)$$

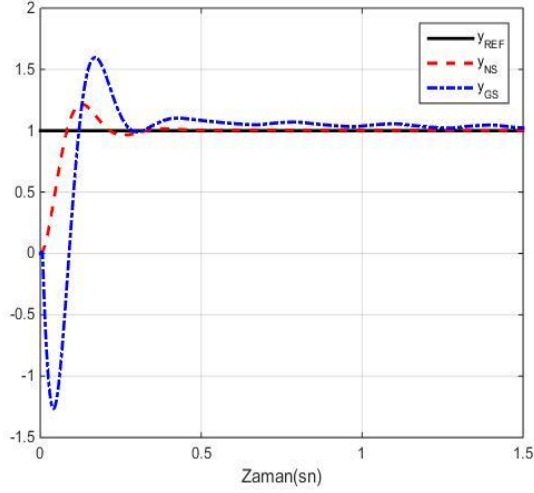


Şekil 5: Bulanık mantık sisteminin öngördüğü M değerlerinin hata ve türevine göre değişim yüzeyi

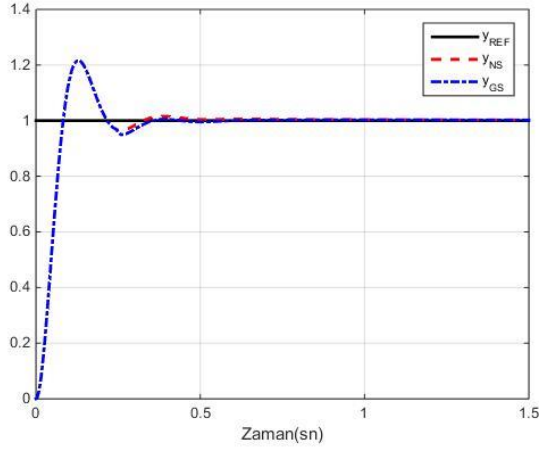
4. Benzetim Sonuçları

Yapılan benzetimlerde erişim kuralında yer alan $\varepsilon = 0.05$ seçilmiştir. PL, PZ, PH ve PE etiketleri için ise sırasıyla $y_{PL}=14$, $y_{PZ}=16$, $y_{PH}=18$, $y_{PE}=20$ olarak seçilmiştir. Şekil 6, 7, 8 ve 9 benzetim sonuçlarını göstermektedir. Sırasıyla Şekil 6'da önerilen mekanizmanın olmadığı durumda elde edilen cevabın tatminkâr olmadığı, salınımların uzun süre devam ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 7'de ise önerilen düzeltme mekanizması etkindir ve kesinsizlikler içeren sistemin cevabı nominal model cevabına çok yakın seyretmektedir. Bu halde üretilen denetim sinyallerinin zamana göre seyri Şekil 8'de gösterilmektedir. Düzeltme mekanizmasının 0.25 saniye civarında nominal denetim sinyalinden oldukça farklılaştığı gözlemlenmektedir.

Benzetimler bir kez de gerçek sistemden elde edilen ölçümlerin gürültülü olduğu durumda tekrarlanmış, bu durumda izleme performansının tatmin edici düzeyde iyi olduğu ancak kayan kipli denetim yaklaşımının tipik sorunlarından olan denetim sinyalindeki yüksek frekanslı bileşenlerin görünmesi sonucu gözlemlenmiştir. Bu durumda elde edilen denetim sinyali Şekil 9'da gösterilmektedir. İşaret fonksiyonunun daha büyük ε değerleri ile yumuşatılması halinde denetim sinyalindeki yüksek frekanslı bileşenler azalmakta ancak buna bedel olarak kayan kipli denetimin avantajlarından uzaklaşmaktadır.

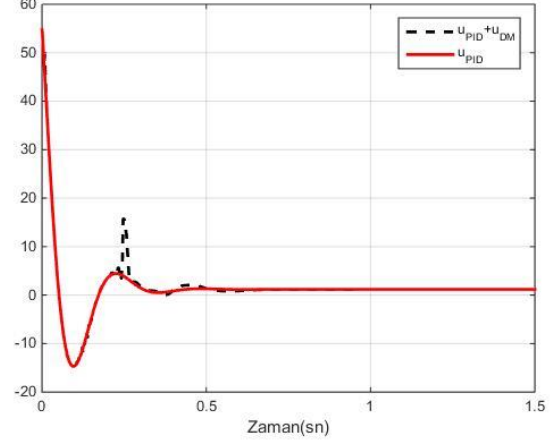


Şekil 6: Düzeltme mekanizması olmayan gerçek sistemin birim basamak cevabı ile nominal sistemin birim basamak cevabının karşılaştırılması.

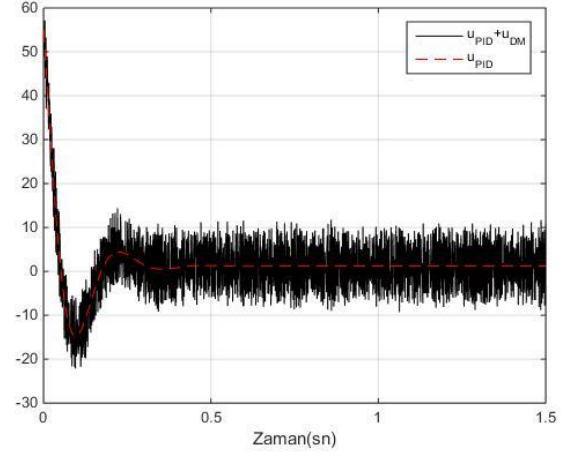


Şekil 7: Düzeltme mekanizması olan gerçek sistemin birim basamak cevabı ile nominal sistemin birim basamak cevabının karşılaştırılması.

Benzetim sonuçlarına göre, önerilen düzeltme mekanizmasının etkin olmadığı durumda kapalı çevrim başarımları düşük iken önerilen mekanizma ise kesinsizliklerin sebep olduğu olumsuz etkileri bertaraf edebilmiştir. Ayrıca önerilen mekanizmanın gürültülü gözlemler altında dahi tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 8: Düzeltme mekanizması olan gerçek sistemin denetim sinyali ile nominal sistemin denetim sinyalinin karşılaştırılması.



Şekil 9: Düzeltme mekanizması olan gürültü etkisindeki gerçek sistemin denetim sinyali (Gürültü varyansı $1e-7$ alınmıştır).

5. Sonuçlar

Bu çalışmada ilk aşama olarak nominal sistem için bir PID denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan bu PID denetleyici kesinsizlikler içeren bir sisteme uygulanmıştır. Bu denetleyicinin kesinsizlik içeren sistem üzerindeki başarımının düşük olması sebebiyle kayan kipli denetim kuralları göz önünde bulundurularak bulanık mantık tabanlı düzeltme mekanizması tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar kesinsizlikler içeren sistem üzerinde düzeltme mekanizması içeren sistemin birim basamak cevabının düzeltme mekanizması içermeyen sistemin birim basamak cevabından daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kesinsizlik içeren sistem cevabı nominal sistem cevabına hızla yakınsamış ve kabul edilebilir denetleyici çıktıları elde edilmiştir.

6. Teşekkür

Yazarlar Hacettepe Üniversitesi Otonom Sistemler Araştırma Laboratuvarına teşekkür eder.

7. Kaynakça

- [1] J. J. Slotine, ve W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1991
- [2] F. G. Shinsky, *Process Control Systems: Application, Design and Adjustment*, McGraw-Hall Book Company, 1988
- [3] F. J. Jiang, "An Application of Nonlinear PID Control to a Class of Truck ABS Problems," Proc. Of The 40th IEEE Conference On Decision And Control, 2001
- [4] C. L. Chen, ve F. Y. Chang, "Design and Analysis of Neural/Fuzzy Variable Structure PID Control Systems," IEEE Proc. Control and Application, Cilt: 143, No: 2, s: 200-208, 1996
- [5] A. A. S. Ibrahim, "Nonlinear PID Controller Design Using Fuzzy Logic," Proc. of the 11th Mediterranean Electrotechnical Conference, 2002
- [6] N. Wang, ve J. Yu, "Neuron Based Nonlinear PID Control," PRICAL, Cilt 4099 of Lecture Notes in Computer Science, s: 1089-1093, 2006
- [7] L. Reznik, O. Ghanayem, ve A. Bourmistrov, "PID Plus Fuzzy Controller Structures as a Design Base for Industrial Applications," Engineering Applications of Artificial Intelligence, Cilt: 13, No: 4, s: 419-430, 2000
- [8] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant," Proc. Inst. Elect. Eng., Cilt: D-121, s: 1585-1588, 1974
- [9] V. Kumar, B. C. Nakra, ve A. P. Mittal, "A Review of Classical and Fuzzy PID Controllers," International Journal of Intelligent Control and Systems, Cilt: 16, No: 3, s: 170-181, 2011
- [10] H. Takatsu, ve T. Itoh, "Future Needs for Control Theory in Industry - Report of the Control Technology Survey in Japanese Industry," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Cilt: 7, No: 3, s: 298-305, 1999
- [11] Y. Li, ve Q. Xu, "Adaptive Sliding Mode Control with Perturbation Estimation and PID Sliding Surface for Motion Tracking of a Piezo-driven Micromanipulator," IEEE Trans. Automat. Control System Tech 18, 2010
- [12] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," IEEE Trans. Automat. Control AC-22, 1977
- [13] V. I. Utkin, "Sliding Modes in Control and Optimization," Springer-Verlag, Heidelberg, 1992
- [14] I. Eker, "Sliding Mode Control with PID Sliding Surface and Experimental Application to Electromechanical Plant," ISA transactions, Cilt: 45, No: 1, p: 109-118, 2006
- [15] M. Roopaei, ve J. M. Zolghadri, "Chattering-Free Fuzzy Sliding Mode Control in MIMO Uncertain Systems," Nonlinear Analysis, 2009
- [16] V. I. Utkin, "Chattering Problem," 18th IFAC World Congress, 2011
- [17] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice- Hall, Upper Saddle River, 1996
- [18] Z. Huang, R. M. Edwards, ve K. Y. Lee, "Fuzzy-Adapted Recursive Sliding-Mode Controller Design for a Nuclear Power Plant Control," Nuclear Science, IEEE Transactions On, Cilt: 51, No: 8, s: 256 266, Dec 2004
- [19] X, S. Sarpturk, Y. I Stefanopoulos, ve O. Kaynak, "On the stability of discrete-time sliding mode control systems," IEEE Transactions on Automatic Control, 32 (10), 930-932, 1987.
- [20] D. G. Wilson, R. D. Robinett, G. G. Parker, ve G. P. Starr, "Augmented Sliding Mode Control for Flexible Link Manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron. 40, 2002
- [21] A. F. Amer, E. A. Sallam, ve W. M. Elawady, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Using Supervisory Fuzzy Control for 3 DOF Planar Robot Manipulators," Applied Soft Computing, Cilt: 11, No: 8, s: 49434953, 2011
- [22] M. L. Corradn, V. Foss, A. Gantomass, ve G. Ippolt, "Discrete Time Sliding Mode Control of Robotic Manipulators: Development and Experimental Validation," Control Engineering Practice 9, 2012
- [23] P. Dewashri, C. Deepali, ve B. Timande "A Robust PID Controller Design for Network Control System," IJERT, Cilt: 1, No: 7, 2012
- [24] X. Shi, J. Zhou, X. Bian, ve J. Li, "Fuzzy Sliding-Mode Controller for the Motion of Autonomous Underwater Vecihle, Mechatronics and Automation," ICMA, IEEE International Conference, s: 466-470, 2008
- [25] J. Chen, Y. Peng, W. Han, ve M. Guo, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control in Ph Neutralization Process, Procedia Engineering," Cilt 11, No: 8, s: 49434953, 2011
- [26] Z. Dong, "Nonlinear State-Feedback Dissipation Power Level Control for Nuclear Reactors," IEEE Transactions on Nuclear Science, Cilt: 58, No: 8, s: 241-257, 2011
- [27] Z. Wang, L. Huang, ve X. Yang, "Adaptive Fuzzy Control for Stochastic Nonlinear Systems via Sliding Mode Method," Circuits Syst Signal Process, 2013
- [28] Y. Choi, ve M. C. Lee, "PID Sliding Mode Control for Steering of Lateral Moving Strip in Hot Strip Rolling," International Journal of Control, Automation and Systems, Cilt 7, No: 3, s: 399-407, 2009
- [29] F. J. Lin, R. J. Wai, R. H. Kuo, ve D. C. Liu, "A Comparative Study Of Sliding Mode Controllers with Applications," IEEE Trans. Ind. Electron. 40, 2001