



Rehabilitasyon Robotlarının Kontrolü için Bulanık Mantık ve PID Denetleyicinin Karşılaştırılması

Abdulhamit Sevgi^{1*}, Mustafa Güneş²

^{1*} OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-3567-848X), abdulhamit.sevgi@ostimteknik.edu.tr

² OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-0266-6370), mustafa.gunes@ostimteknik.edu.tr

(1st International Conference on Frontiers in Academic Research ICFAR, February 18-21, 2023)

(DOI: 10.31590/ejosat.1251862)

ATIF/REFERENCE: Sevgi, A., Güneş, M. (2023). Rehabilitasyon Robotlarının Kontrolü için Bulanık Mantık ve PID Denetleyicinin Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (48), 1-5.

Öz

Doğrusal olmayan bir sistemin yanıtı genellikle bir doğrusal denetleyici kullanılarak istenen bir modele göre şekillendirilemez. PID denetleyiciler gibi geleneksel model tabanlı doğrusal denetleyicilerle doğrusal olmayan durumların gerçekleştirilmesi zordur ve denetleyicinin düzgün çalışması için sıfırlama önleyici sarma, geciktirilmiş integral eylem vb. gibi birçok ek önlem dahil edilmelidir. Bu nedenle doğrusal olmayan sistemler için genellikle Bulanık Mantık Kontrol gibi kontrol yöntemleri kullanılır. Bulanık Mantık, gömülü kontrol için hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemlerin geliştirilmesinde uygulanabilen alternatif bir tasarım metodolojisidir. Tasarımcılar, bulanık mantık kullanarak daha düşük geliştirme maliyetleri, üstün özellikler ve daha iyi son ürün performansı sağlayabilirler. Bu sebeple bu çalışmada rehabilitasyon robotlarının kontrolü için MATLAB/Simulink ortamında bir Bulanık Kontrol denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra kontrol etkisi analiz edilip PID denetleyicinin etkisiyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda bulanık mantık denetleyici, PID kontrolünden özellikle yanıt süresi, kararlı durumdaki hata ve aşım gibi çeşitli parametrelerde daha üstün performans sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: PID, Bulanık Mantık, Doğrusal Kontrol, Doğrusal Olmayan Kontrol, Rehabilitasyon Robotu.

Comparison of Fuzzy Logic and PID Controller for Control of Rehabilitation Robots

Abstract

The response of a nonlinear system cannot usually be shaped into a desired model using a linear controller. Non-linear situations are difficult to realize with traditional model-based linear controllers such as PID controllers, and anti-reset winding, delayed integral action, etc., are required for the controller to work properly. Many additional measures should be included, such as for this reason, control methods such as Fuzzy Logic Control are often used for nonlinear systems. Fuzzy Logic is an alternative design methodology that can be applied to the development of both linear and nonlinear systems for embedded control. By using fuzzy logic, designers can achieve lower development costs, superior features, and better end-product performance. For this reason, in this study, a Fuzzy Control controller was designed in MATLAB/Simulink environment for the control of rehabilitation robots. Then the control effect was analyzed and compared with the effect of the PID controller. As a result of the comparison, the fuzzy logic controller outperformed the PID control in various parameters such as response time, steady state error and overshoot.

Keywords: PID, Fuzzy Logic, Linear Control, Non-Linear Control, Rehabilitation Robot.

1. Giriş

Geleneksel olarak, rehabilitasyon süreci büyük ölçüde terapistin deneyimine ve manuel manipülasyonuna dayanır. Rehabilitasyon süreci zaman alıcıdır ve felçli hastaların artmasıyla birlikte tedavi için yeterli terapist bulunmamaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) raporuna göre, 2030 yılına kadar 23,3 milyondan fazla insanın kronik hastalıklardan muzdarip olma şansı olacağı tahmin edilmektedir (Satoh vd., 2009). Bu nedenle, rehabilitasyon robotik sistemi bu karmaşık problem için en iyi çözümlerden biri olacaktır. Rehabilitasyon robotiklerinin uygulamaları sınırlı kalmayıp insan gücü artırma ve insan hareket yardımı şeklinde uygulanabilir.

Rehabilitasyon robotik sistemi esas olarak aktif ve pasif tipe ayrılır. Pasif tip rehabilitasyon robotik sistemi, hastanın tanımlanan egzersizi yapmasına tam olarak yardımcı olur. Rehabilitasyon egzersizlerini etkili bir şekilde gerçekleştirmek için kesin, kararlı ve güvenilir kontrol teknikleri gereklidir. Geleneksel PID denetleyici, sağlamlık, basitlik ve geniş uygulanabilirlik gibi birçok iyi özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Robotla gerçekleştirilen rehabilitasyon sürecinde hasta da dinamik sistemin bir parçasıdır ve hastanın/deneğin dinamik modeli robot dinamik modeli kadar değişmez ve net değildir. Bu nedenle, rehabilitasyon robotunun uygun şekilde kontrol edilmesi kolay bir iş değildir, çünkü harici bozukluğun kendisi, başka bir çözülmemiş kontrolör olan insan müdahalesine maruz kalır. Bu nedenle bulanık mantık kontrolcü kontrolü (FLC) tercih edilmesi daha uygun görülmektedir (Ali vd., 2018). Klasik mantığın benzer durumlarda problemlere yol açması ve insan mantığına benzer çalışmaması nedeniyle ilk kez 1965 yılında matematiksel düşünce Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır (Wang, 1993). Bulanık mantık, çalışma prensibi insanın karar ve düşünce mekanizmasına benzer olması sebebiyle belirsiz durumlarda tutarlı ve doğru karar verebilmektedir. Bir sistemin karmaşıklığı arttıkça kesin bir model yapmak daha zor ve bazen imkânsız hale gelir. Bulanık Mantık aynı zamanda bir problem çözme kontrol sistemi metodolojisi olarak kabul edilir. Donanım, yazılım veya her ikisinin bir kombinasyonu olarak uygulanabilir.

Zadeh 1973'te bulanık mantığı önerdikten sonra dilsel bir değişken kavramını tanıttı. Bulanık mantık, geleneksel mantık sisteminden farklı olarak, hatalı veya kesin olmayan modelleri modelleyebilmektedir. Bulanık mantık yaklaşımı, geleneksel tekniklere göre büyük avantajlar sağlayan daha basit, daha hızlı ve daha güvenilir bir çözüm sunmuştur (Ozkaya, 2016). Bulanık Mantık, çok sayıda kontrol uygulamasına başarıyla uygulanmıştır. En sık kullanılan denetleyici, sistemin matematiksel bir modelini gerektiren PID denetleyicisidir. Bulanık mantık denetleyici, PID denetleyiciye bir alternatif sunar. Bulanık mantık denetleyicilerdeki kontrol eylemi, basit "eğer-o zaman" kuralları ile ifade edilebilir. Bulanık denetleyiciler, klasik denetleyicilere göre çok daha geniş çalışma koşullarını kapsayabildikleri ve farklı nitelikteki gürültü ve parazitlerle çalışabildikleri için klasik denetleyicilere göre daha yeterli olduğu çeşitli çalışmalarla ispat edilmiştir (Obaid vd., 2010).

Kontrol sistemlerinde ilk uygulama, küçük model bir buhar motoru için FLC'nin uygulanabilirliğini gösteren Mamdani tarafından 1974'te başarılmıştır (Mamdani, 1974). FLC'nin matematiksel temeli, bulanık sistemlerin evrensel yaklaşımcı olduğunu gösteren Wang tarafından sağlanmıştır (Wang, 1994). Bulanık mantığın başarıyla uygulandığı en karmaşık ilk

sistemlerden biri de 1977 yılındaki çimento fırınlarıdır (Kadirkamanathan, 1999). 1985 yılında Sugeno ve Murakami'nin yaptıkları bulanık mantık kontrolör çalışması otonom araç kontrolünde dönüm noktası olmuştur. Bulanık mantık ile otonom park kontrolü yapan çalışmalarıyla, bir makinenin basit bir insan işlemi ve deneyiminin modeli ile kontrol edilebileceğini ispatlamışlardır (Sugeno & Murakami, 1984). Otonom kontrol, bir sürücü deneyimine dayanarak, doğru kontrol kurallarını bulmaya ve uygun ayarların yapılmasına kadar indirgenmiştir. Bunun sonucunda yapılan çalışmalarda, otonom araçlarda klasik kontrol ve bulanık kontrol tekniklerini karşılaştırmıştır ve bulanık denetleyicilerin başarılı olduğu gözlenmiştir (Chaib vd., 2004).

Achkoski vd., hastanın sağlık durumunu değerlendirmek ve belirli bir ölçüğe göre sıralamak için fizyolojik parametrelerin (kalp hızı, sistolik kan basıncı ve vücut ısısı gibi) analizi için bulanık mantık temelli bir yaklaşım önermişlerdir (Achkoski vd., 2016). Wei vd., Tip-2 kendini organize eden bulanık mantık denetleyicisi (SOFLC), operasyonel belirsizliklerle mücadele ederken çevrimiçi eğitimi kolaylaştırmak için tip-2 bulanık mantık denetleyicisini kendi kendini organize eden bir mekanizma ile birleştirmişlerdir. Hastalar arası değişkenliği ele almak için tip-2 SOFLC parametrelerini çevrimdışı olarak optimize etmek için yeni bir veriye dayalı vekil model ve genetik programlamaya dayalı strateji geliştirmişlerdir (Wei vd., 2020). Sagdatullin, petrol üretimi ve nakliyesinde teknolojik nesnelere için otomatik kontrol sistemlerinin inşasına yönelik çeşitli yaklaşımların özelliklerini incelemiştir. Ele alınan sistemin tanımlama modelleri araştırılması sonucunda doğrusal olmayan nesnelere kontrol etmek için ayırık terimli nöro-bulanık ve bulanık kontrolörlerin kullanılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır (Sagdatullin, 2021).

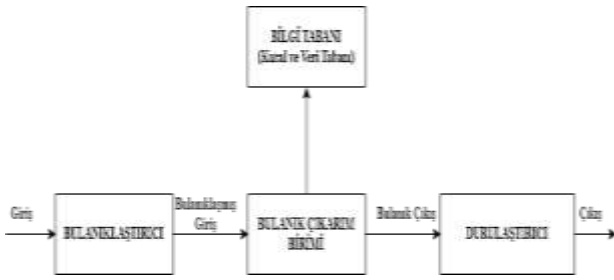
Y. Jianhua vd., buhar enjeksiyon kazanı için tahmine dayalı bulanık kontrol sisteminin bir uygulamasını sunmuştur (Jianhua vd., 2006). Yawei Zhao vd., bulanık ve yapay sinir ağı kavramlarını entegre etti ve bir kazan sisteminde arıza teşhisi için uygulamışlardır (Zhao vd., 2008). R. Liu vd., bulanık uyarlamalı PID (Orantılı-İntegral-Türev) ve kademeli kontrol kavramlarını birleştirdi ve bunu fırın sıcaklık kontrolüne uygulamışlardır (Liu vd., 2020). M. Raghappriya vd., bulanık mantığa dayalı fotovoltaiik sistem takibi üzerine bir çalışma yapmışlardır (Raghappriya vd., 2022). Dr. V. Suma, bulanık mantık ve derin sinir ağının hibrit kombinasyonuna dayanan bir bilgi erişim sistemi sunmuştur (Suma, 2020). Namazov MATLAB paket programında 2-bağlantılı robot manipülatörünün bulanık mantık kontrolü için sistem tasarımı gerçekleştirmiştir (Namazov, 2018).

Bu çalışmada ise rehabilitasyon uygulamalarında kullanılan bir robotik manipülatörün simüle edilerek geleneksel bir PID denetleyicisi ile bir bulanık mantık denetleyicisi arasındaki karşılaştırmaları içerir.

2. Materyal ve Metot

Bulanık denetleyicinin dört ana bileşeni vardır: Birinci bölüm, bilginin bir dizi kural biçiminde tutulduğu "kural tabanı"dır. İkinci kısım, değerlendirmelerin yapıldığı, o an hangi kontrol kurallarının ilgili olduğu ve ardından tesise hangi girdinin verilmesi gerektiğine karar verilen "çıkartım mekanizması"dır. Üçüncü kısım, "bulanıklaştırma"nın girdileri basitçe değiştirerek yorumlanabilmesi ve kural tabanındaki kurallarla karşılaştırılabilmesidir. Bir bulanık denetleyicinin son kısmı, çıkartım mekanizması tarafından kararlaştırılan bulanık çıktıları

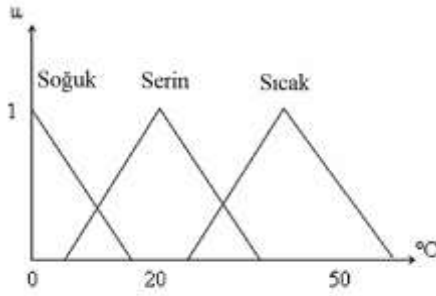
tesise kesin girdilere dönüştüren “durulaştırma”dır. Bulanık denetleyicinin temel blok diyagramı Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Bulanık denetleyici temel blok diyagramı.

Bulanıklaştırma; Bulanıklaştırma, bulanık çıkarım sürecinin ilk adımındır. Bu, kesin girdilerin bulanık girdilere dönüştürülmesini içerir. Kesin girdiler, sensörler tarafından ölçülen sıcaklık, basınç, rpm vb. gibi verileri işlemek üzere kontrol sistemine iletilen giriş kısmıdır.

Bulanık çıkarım birimi tarafından işlenecek olan her net girdinin kendi üyelik fonksiyonları veya kümeleri grubu vardır. Bu üyelik fonksiyonları grubu, kesin girdinin sahip olabileceği tüm ilgili değerleri içeren bir söylem evreni içinde bulunur. Şekil 2’de hava sıcaklığının kesin değerlerini bulanıklaştırmak için üç bulanık küme tanımlanmıştır. Bu takımlar diğer takımları kısmen kapsar. Bu nedenle, bazı net girdiler farklı bulanık kümelerin üyesi olabilir. Ancak her girdinin farklı üyelik dereceleri vardır. Bu üyelik dereceleri kontrol süreçlerinde değerlendirilir.



Şekil 2. Hava sıcaklığının üyelik fonksiyonları.

Kural tabanı; Kurallar, kuralların hem koşulunda hem de sonucunda birkaç değişken kullanabilir. Bu nedenle kontrolörler hem çok girişli çok çıkışlı (MIMO) problemlere hem de tek girişli tek çıkışlı (SISO) problemlere uygulanabilir. Tipik SISO problemi, bir hata sinyaliyle dayalı olarak bir kontrol sinyalini düzenlemektir. Kontrolör aslında hem hataya hem de hatadaki değişime ve entegre hataya girdi olarak ihtiyaç duyabilir, çünkü prensipte üçü de hata ölçümünden oluşur. Basitleştirmek için kontrol hedefi, bazı proses çıktılarını önceden belirlenmiş bir ayar noktası veya referans etrafında düzenlemektir. Temel olarak bir linguistic denetleyicisi, IF-THEN formatında kurallar içerir.

- Hata Negatif ise ve hatadaki değişiklik Negatif ise, çıktı Negatif Büyük olur
- Hata Negatif ise ve hatadaki değişim Sıfır ise, çıkış Negatif Orta olur
- Hata Negatif ise ve hatadaki değişim Pozitif ise, çıkış Sıfırdır
- Eğer hata Sıfır ve hatadaki değişim Negatif ise çıkış Negatif Orta olur.

Verilen bu kurallar Tablo 1’deki gibi kural tablosu formatında sunulabilir.

Tablo 1. Kurallar Tablosu.

		Hatadaki Değişim		
		N	Z	P
Hata	N	NB	NM	Z
	Z	NM	Z	PM
	P	Z	PM	PB

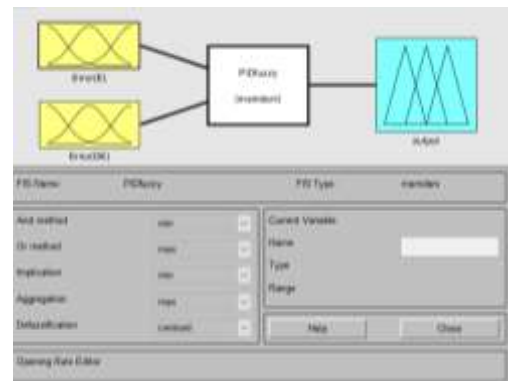
Çıkarım mekanizması; Çıkarım mekanizmasının iki temel görevi vardır: Birincisi, her bir kuralın mevcut durumla ilgili olma derecesini belirlemektir. Bulanıklaştırma aşamasından geçen girdiler, kural tabanındaki her kural için değerlendirilir. Girdilere bağlı olarak, bir veya daha fazla kural karşılanabilir. Diğer görev, mevcut girdileri ve kural tabanındaki bilgileri kullanarak kontrol eylemine karar vermektir. Çıkarım mekanizmasının çıktısı, durulaştırma aşamasının girdisi olur.

Durulaştırma; Çıkarım mekanizmasının çıktısı, durulaştırma aşamasının girdisidir. Bulanık değerlere sahip karar verilen kontrol eylemi, durulaştırma yöntemleri yardımıyla kesin değerlere dönüştürülür. Bulanık değerleri durulaştırmanın birçok yöntemi vardır. Sonucun "kütle merkezi"nin kesin değeri sağladığı "centroid" yöntemi çok popülerdir. Diğer bir yaklaşım ise en çok katkıda bulunanın değerini alan "yükseklik" yöntemidir.

Bu çalışmada robot kolun transfer fonksiyonu, SolidWorks'te Newton Euler yöntemine dayalı olarak 3 boyutlu model üst ekstremite rehabilitasyon robotu tasarımının .xml dosyasını MATLAB Simscape Multibody’ye aktararak elde edilmiştir. Giriş olarak gerilim ve çıkış olarak konum alınarak ortaya çıkarılan transfer fonksiyonu denklem 1’ verilmiştir.

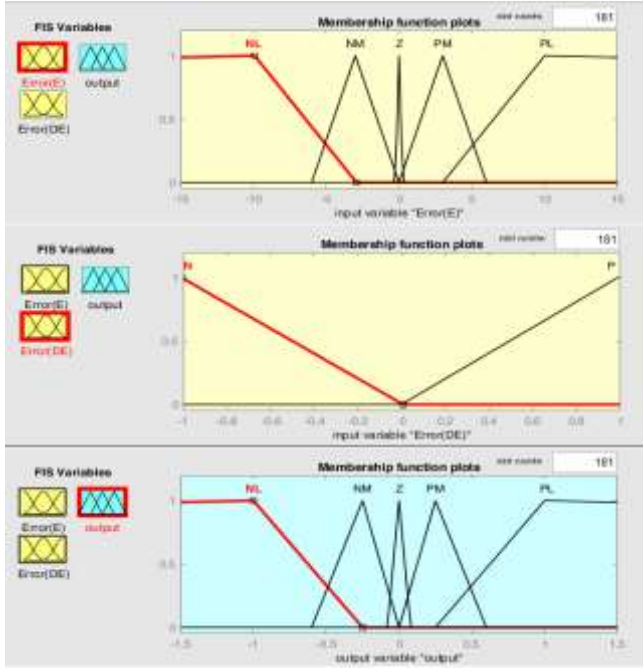
$$\frac{Konum}{Gerilim} = \frac{0.0718}{0.0536*s^2 + 0.003767*s + 0.005651} \quad \text{Denklem (1)}$$

Tasarlanan bulanık denetleyici için iki giriş tanımlanmıştır. Birincisi step adım girişinden hatanın çıkarılmış halidir. İkincisi bu eşitliğin türevidir. Bu Girdilerin her ikisi de kural tabanına uygulanır. Kural tabanında yazılan kurallara göre, denetleyici harekete geçer ve denetleyicinin çıkışı olan ve "aktüatör" hareket eder. Şekil 3’te genel “fis” editörü ekranı verilmektedir.



Şekil 3. Mamdani tipi bulanık denetleyici.

Üyelik İşlevi Düzenleyicisi, FIS Düzenleyicisi ile bazı özellikleri paylaşır. Aslında, beş temel GUI aracının tümü benzer menü seçeneklerine, durum satırlarına, yardım ve kapat düğmelerine sahiptir. Üyelik Fonksiyon Düzenleyicisi, tüm bulanık çıkarım sistemi için tüm giriş ve çıkış değişkenleriyle ilişkili tüm üyelik fonksiyonlarını görüntülemenizi ve düzenlemenizi sağlayan araçtır. Şekil 4'te tasarlanan bulanık denetleyiciye ait üyelik fonksiyonları verilmektedir.



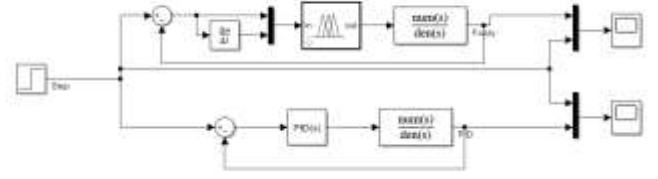
Şekil 4. Tasarlanan denetleyiciye ait giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları.

Grafik Kural Düzenleyici arayüzünü kullanarak kural tabanı oluşturmak oldukça kolaydır. FIS Düzenleyicisi ile tanımlanan girdi ve çıktı değişkenlerinin açıklamalarına dayalı olarak, kural düzenleyici, her girdi değişkeni kutusunda bir öğeyi, her çıktı kutusunda bir öğeyi seçerek kural ifadelerini otomatik olarak oluşturmanıza olanak tanır. Tasarlanan bulanık denetleyicinin kural tabanı Şekil 5'te gösterildiği gibidir.

1. If (Error(E) is PL) then (output is PL) (1)
2. If (Error(E) is NL) then (output is NL) (1)
3. If (Error(E) is Z) and (Error(DE) is N) then (output is NM) (1)
4. If (Error(E) is Z) and (Error(DE) is P) then (output is PM) (1)
5. If (Error(E) is Z) then (output is Z) (1)
6. If (Error(E) is NM) then (output is NM) (1)
7. If (Error(E) is PM) then (output is PM) (1)

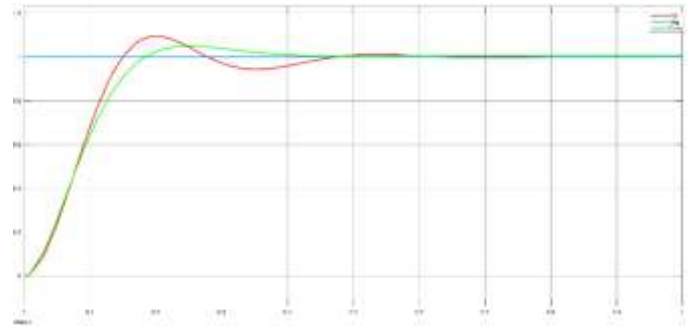
Şekil 5. Tasarlanan bulanık denetleyicinin kural tabanı.

Tasarlanan bulanık mantık ve PID denetleyici MATLAB Simulink ekran görüntüsü Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Tasarlanan bulanık mantık ve PID denetleyicilerin simülasyon ortamında gösterimi.

Tasarlanan kontrolörlerin simülasyon çıktıları Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. Tasarlanan bulanık mantık ve PID denetleyicilerin simülasyon sonuçları.

Simülasyon sonuçlarında istenen seviye için bulanık ve PID denetleyici geçici yanıtının karşılaştırmasını gösterilmektedir (Kırmızı çizgi PID yanıtını, yeşil çizgi bulanık yanıtı ve mavi olan istenen düzeyi gösterir). Grafikten, PID denetleyicinin bulanık denetleyiciye kıyasla büyük bir aşmaya sahip olduğu ve ayrıca istenen seviyede sabitlenmesinin çok zaman aldığı açıktır. Bulanık mantık ise az aşım ve sabit durum hatasına sahiptir ve doğru seviye kontrolü sağlayarak hızlı bir şekilde dengelenir. PID kontrolünün ve bulanık kontrolün avantaj ve dezavantajlarının birbirini dengelediğini bulduk. Hızlı kontrol (kaba ayar) için bulanık denetleyici kullanılabilir ve ardından doğru kontrol (ince ayar) için PID denetleyici kullanabiliriz. Bu yöntem kullanılarak çeşitli kontrolör tasarımları geliştirilmiştir (Kumar, 2015; Bhimte vd., 2018; Bharti vd., 2018; Santos vd., 1996).

3. Sonuç

Çalışmanın Simülasyon sonuçlarına bakıldığında geliştirilen FLC'nin rehabilitasyon robotlarına uygulanabilirliği ispatlanmıştır. Geliştirilen FLC üretilen salınımlar ve aşma açısına bakıldığında yaygın olarak kullanılan klasik PID tasarım yöntemine göre daha iyi performans göstermektedir. Simülasyon sonuçlarında görüldüğü üzere PID denetleyici yükselme süresi daha azdır ancak üretilen salınımlar ve aşım ve oturma süresi daha fazladır. Ancak bulanık mantık denetleyici durumunda, salınımlar, aşım ve oturma süresi düşüktür. Bu nedenle süreçte salınımların tolere edilemediği durumlarda FLC uygulanabilir. FLC, dinamikleri önemli ölçüde değişen tesisler için güçlü performans sergiler. Bu iki sistemden elde edilen kontrol yanıtının karşılaştırılması, bulanık mantık denetleyicinin aşımı ve sabit durum hatasını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bulanık Mantık yöntemi, sistemin nasıl çalıştığını anlamaya çalışmak yerine sistemin ne yapması gerektiğine odaklanmaktadır. Bu sayede sistemi matematiksel olarak modellemeye çalışmak yerine

sorunun çözümüne odaklanılması daha hızlı, daha ucuz çözümlere yol açabilir.

Kaynakça

- Achkoski, J., Temelkovski, B., & Stainov, R. (2016). Fuzzy logic controller development for classification of patient status based on physiological parameters. 2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 1-5.
- Ali, A., Ahmed, S.F., Kadir, K.A., Joyo, M.K., & Yarooq, R.N. (2018). Fuzzy PID controller for upper limb rehabilitation robotic system. 2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), 1-5.
- Bharti, R., Trivedi, R., & Padhy, P.K. (2018). Design of Optimized PID Type Fuzzy Logic Controller for Higher Order System. 2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 760-764.
- Bhimte, R., Bhole, K., & Shah, P. (2018). Fractional Order Fuzzy PID Controller for a Rotary Servo System. 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 538-542.
- Chaib, S., Netto, M.S., & Mammar, S. (2004). H/sub /spl infin//, adaptive, PID and fuzzy control: a comparison of controllers for vehicle lane keeping. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004, 139-144.
- Jianhua, Y., Wenqi, L., & Wei, L. (2006). Fuzzy Predictive Control of Steam Dryness for Steam-injection Boiler. 2007 Chinese Control Conference, 395-398.
- Kadirkamanathan, V. (1999). Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Applications. Mohammad Jamshidi, Nader Vadiiee and Timothy J. Ross (eds.). Artificial Intelligence Review, 13, 337-339.
- Kumar, R., & Kumar, M. (2015). Improvement power system stability using Unified Power Flow Controller based on hybrid Fuzzy Logic-PID tuning In SMIB system. 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), 815-819.
- Liu, R., Hu, E., Zhu, Z., Mao, L., & Ma, Z. (2020). Study on temperature control system of ceramic kiln based on fuzzy PID cascade. 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 1, 1769-1772.
- Mamdani, E.H. (1974). Applications of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. Proceedings of the IEEE.
- Namazov, M. (2018). Fuzzy Logic Control Design for 2-Link Robot Manipulator in MATLAB/Simulink via Robotics Toolbox. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 1-5.
- Obaid, Z.A., Sulaiman, N.B., Marhaban, M.H., & Hamidon, M.N. (2010). Analysis and Performance Evaluation of PD-like Fuzzy Logic Controller Design Based on Matlab and FPGA.
- Ozkaya, U. and Seyfi, L., (2016), A novel fuzzy logic model for intelligent traffic systems, Electronics World, 122(1960), 36-39.
- Raghappriya, M., Devadharshini, K.M., & Karrishma, S. (2022). Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System. Journal of Innovative Image Processing.
- Sagdatullin, A.M. (2021). Application of Fuzzy Logic and Neural Networks Methods for Industry Automation of Technological Processes in Oil and Gas Engineering. 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 715-718.
- Santos, M., Dormido, S., & de la Cruz, J. (1996). Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers. Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems, 3, 1598-1604 vol.3.
- Satoh, H., Kawabata, T., & Sankai, Y. (2009). Bathing care assistance with robot suit HAL. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 498-503.
- Sugeno, M., & Murakami, K. (1984). Fuzzy parking control of model car. The 23rd IEEE Conference on Decision and Control, 902-903.
- Suma, V. (2020). A Novel Information retrieval system for distributed cloud using Hybrid Deep Fuzzy Hashing Algorithm. September 2020.
- Wang, L. (1992). Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. [1992] Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, 2511-2516 vol.3.
- Wang, L. (1994). Adaptive fuzzy systems and control- design and stability analysis.
- Wei, Z., Doctor, F., Liu, Y., Fan, S., & Shieh, J.S. (2020). An Optimized Type-2 Self-Organizing Fuzzy Logic Controller Applied in Anesthesia for Propofol Dosing to Regulate BIS. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 28, 1062-1072.
- Zhao, Y., Chen, L., & Yang, Q. (2008). The research on the fault diagnosis for boiler system based on fuzzy neural network. 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 8552-8556.