Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi
1(1), 180-185, 2022 Araştırma Makalesi

# ROBOT MANÜPİLATÖRLER İÇİN AYRIK ZAMAN TABANINDA GERİBESLEMELİ LİNEERLEŞTİRME İLE DENETLEYİCİ YAKLAŞIMI

# DISCRETE TIME-BASED FEEDBACK LINEARIZATION CONTROLLER APPROACH FOR ROBOT MANIPULATOR

*Berkem Vural*[1], *Ali İhsan Taş*[2], *Ali Burak Özden*[1], *Mert Aydın*[2], *Mehmet İşcan*[2], *Cüneyt Yılmaz*[2]

[1]Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
berkem.vural@yildiz.edu.tr
burak.ozden@std.yildiz.edu.tr
[2]Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
ihsan.tas@yildiz.edu.tr
aydnmrt67@gmail.com
miscan@yildiz.edu.tr
cuneyt@yildiz.edu.tr

## Özetçe

Bu bildiride, iki eklemli robotik kol tasarımı için ayrık zamanda bir pozisyon denetleyicisi tasarlanmış olup sürekli zamanda tasarlanmış bir PID denetleyicisi ile performans kıyasları verilmiştir. Robot manipülatörlerle yapılan işlerde hassas konumlandırma en temel performans kriterlerinden biridir. İlerleyen teknolojiyle birlikte gelişen bilgisayar ve mikroişlemci sistemlerinin getirdiği operasyonel kısıtlar, dijital denetleyicilerin kullanımını kaçınılmaz kılmıştır. Bu sebeple, robot manipülatörlerin ayrık zamanda pozisyon kontrolü değerli bir çalışma alanıdır. Sunulan ayrık denetleyici Lyapunov Kararlılık Teoremine dayalı enerji tabanlı oransal bir denetleyici olarak tasarlanmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda ise her iki çeşit kontrolcü sınamasında kullanılan örnekleme zamanında, sürekli zamanda tasarlanan PID denetleyicisi kararsızlığa giderken bu bildiride sunulan ayrık denetleyici, her iki eksen için de kararlı bölgede kalmıştır. Her iki eksen için de yüksek hassasiyette konum kontrolü başarı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sunulan denetleyiciyle, ayrık denetleyicilerin dijital platformlardaki hızlı modifikasyon kabiliyetleri uyarınca, operasyonel farklılıklardan doğabilecek muhtemel tasarım belirsizlikleri rahatlıkla ikame edilebilmektedir.

## Abstract

In this paper, a discrete-time position controller was designed for two-joint robotic arm design and performance comparisons with a continuous-time PID controller are given. Precise positioning is one of the most essential performance criteria in robot manipulator usage. Operational constraints brought about by computer and microprocessor systems developing with advancing technology have made the use of digital controllers inevitable. For this reason, discrete-time position control of robot manipulators is a valuable field of study for research. The proposed discrete controller is designed as an energy-based proportional controller based on Lyapunov Stability Theorem. As a result of the simulations, while the continuous PID controller was not in the stable region at the sampling time used in both types of controller testing, the discrete controller presented in this paper remained in the stable region for both axes. High precision position control for both axes has been successfully achieved. In addition, with the proposed controller, possible design uncertainties that may arise from operational differences can be easily compensated in accordance with the rapid and flexible modification capabilities of discrete controllers on digital platforms.

## 1. Giriş

Robot manipülatörler temelde; uygulayıcının temasına gerek kalmaksızın cisimlerin konumlarını manipüle etmeye yarayan cihazlardır [1]. Günümüzde ağır sanayide kaynak yapımından stoklamaya, paketlemeden medikal uygulamalarına dek oldukça geniş bir kullanım alanına sahip robot manipülatörler; gereken iş gücünü azaltırken yapılması beklenen hedefteki kesinlik derecesini de artırmaktadır [2]. Çeşitleri arasında seri ve paralel manipülatörler, kartezyen, silindirik, kutupsal, eklemli, seçici uyumlu mafsallı robot kolları bulunur [3]. Genel olarak robot manipülatörlerin kullanımında; konumlandırma ve keskinlik derecesi yüksek, hassas çalışma aralıklarına sahip olma oldukça önemlidir. Ayrıca kullanım çeşitliliğinden doğabilecek olan tasarım parametrelerindeki belirsizlikler, yine farklı kontrolcü tasarımları vasıtasıyla giderilmektedir [4][5]. Bu doğrultuda robot manipülatörlerdeki denetleyici tasarımı ve uygulamaları günümüzde önemini git gide artırmaktadır.

Robot manipülatörlerin kontrolünde kullanılan teknikler geniş bir yelpazede sıralanabilir. Kayan kipli kontrol [6], oransal-integral-türevsel denetleyici kontrol döngüsü yöntemi [7], bulanık kontrol [8], yapay sinir ağları yoluyla kontrol [9], adaptif kontrol yaklaşımları [10][11] vb., gibi yöntemler izlenerek robotik kolların kontrolü sağlanmaktadır [12]. Ayrıca

tipik sürekli zamanda denetleyici tasarımları içeren sistemler, uygulama kolaylığına karşın sistem üzerindeki muhtemel değişikliklerde yüksek efor ve düzeltme maliyeti gerektirmektedir. Denetleyici performansı, sistem elektronik elementlerinin analog okuma hızları, operasyon çözünürlüğü ve yazılım/kodlama tarafında önemli parametrelerden olan işlemcinin örnekleme periyodu ile doğrudan ilişkilidir [13][14][15]. Gerçek hayattaki uygulamalarda, sürekli zamanda denetleyici tasarımları örnekleme zamanı ve çözünürlük hususunda doğası gereği çalışma kriterlerini karşılayamamaktadır [16].

Literatürdeki popüler denetleyici yaklaşımlarından biri olan, robot manipülatörler için kayan kipli denetleyici tasarımlarından Zhai ve Yi'nin [17] yaptıkları çalışmada; dışardan gelen gürültüler ve muhtemel atalet belirsizlikleri mevcutken, robot manipülatörlerin yörünge takibi için farklı kullanım parametrelerine uygun, kayan kipli denetleyici tasarlamışlardır. Açıkça; hızlı oturan ve hassas bir yörünge takibi için gürbüz kararlılığa sahip olacak şekilde bir ikinci dereceden hızlı tekil olmayan kayan kipli denetleyici tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Sürekli zamandaki kontrolcüde kullanılan Lyapunov kararlılığın birinci türevindeki yüksek frekanslı anahtarlama terimleri sayesinde gürültüler bertaraf edilmiştir. Bilindiği üzere lineer kayan kipli denetleyiciler, hızlı yakınsama için yüksek kazanç oranlarına ihtiyaç duyar ve bu eyleyicilerin hızlıca doyuma uğrayabileceği durumlara yol açar [18]. Robot manipülatör tasarımlarında bir diğer yaygın olarak kullanılan sürekli zamanda denetleyici yaklaşımı, bulanık mantık tabanlı denetleyicilerdir. Robot kol eklemlerinde genellikle pozisyon/konum ölçümleri için sistemler mevcutken genellikle hız ölçümlerine de gereksinim duyulur. Genel olarak, pozisyon algılayıcılarıyla (enkoder) hassas konum ölçümü yapılabilirken, hız ölçümü için kullanılan takometrelerden yeterli hassasiyette hız ölçümü yapılamamaktadır [19]. Kim [20] yaptığı çalışmada adaptif bulanık mantıkla, manipülatörün belirsiz ve doğrusal olmayan dinamik parametrelerini yaklaşık olarak tahmin etmemizi sağlayan tasarımı gerçeklemiştir. Çıkış geri beslemeli robot sistemine gözlemci-denetleyici yapısına bir adet bulanık sistem ekleyerek ve sadece konum ölçümlerini kullanarak iyi bir konum izleme performansı ve yük belirsizliğiyle harici gürültülere karşı gürbüzlüğü sağlamıştır. Ancak modelin gerçek hayatta dijital bilgisayarlarla uygulanmasında ayrıklaştırma işlemine tabii tutulması, mikroişlemcilerin doğası gereği kaçınılmazdır. Ortaya atılan çalışmadaki operasyon gereksinimlerinin düşüklüğü uygulamadaki bu ihtiyaçla birbirini ikame etmektedir.

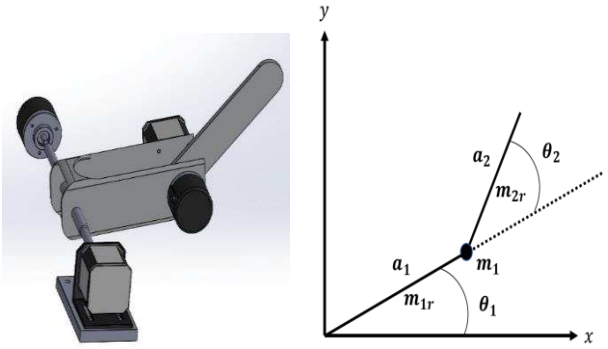
Özellikle 21. yüzyıldaki teknolojik gelişmelerle dijital bilgisayar sistemlerinin kullanım sıklığı her geçen gün daha da artmaktadır. Dijital kontrol sistemlerinin kullanımıyla daha ucuz maliyetli ürünler, farklı sistem parametreleri için daha uyarlanabilir ve değişimlere açık, gürültülere karşı daha güçlü sistemlerin tasarımı ve uygulanması mümkün olmaktadır [21].

Bu bildiride temel olarak amaç; literatürde bulunan robot manipülatör kontrolündeki, ayrık zaman tabanlı yaklaşımla yapılan çalışmalara katkı sağlamaktır. Temelde, bu tip denetleyici tasarımına sahip sistemle; düşük işlemci gücüne ve daha az maliyete ihtiyaç duyan sistem tasarımlarına örnek teşkil edecek bir robot manipülatör modellenmiştir. Gerçekleştirilen iki eklemli robot manipülatörün, öncelikle lineer olmayan sistem modeli elde edilmiş olup bu modelin geri bildirimli doğrusallaştırma yöntemiyle lineer denklemleri elde edilmiştir. Ardından, elde edilen model ayrıklaştırılarak Lyapunov kararlılık teoremi uyarınca ilgili ayrık zamanlı enerji tabanlı oransal denetleyicisi tasarlanmıştır. Burada, hesaplanmış tork kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Böylelikle, farklı platformlara kolaylıkla entegre edilebilen, bu şekilde çalışma varyetelerinde karşılaşılması muhtemel belirsizliklere karşı kolay adapte edilebilen tasarıma ulaşılmıştır. Düşük maliyetli ve hassas pozisyonlamaya sahip, iki eklemli robot kol için sistem modeli ve ilgili simülasyonların çıktıları sunulmuştur.

## 2. Metot

### 2.1. Genel Sistem Tasarımı

Tasarlanan robot manipülatör sistemi esas olarak iki adet robot koldan ve iki adet oynar mafsaldan ibarettir. Teorik olarak çift tersine sarkaç modeli üzerine inşa edilen tasarımda iki serbestlik derecesi belirlenmiştir. Sistemin çalışma aralığı olarak her iki eksen için ±45 derecelik açı limiti kararlaştırılmıştır. Genel sistemin bilgisayar destekli tasarım ortamında modellenen yapısı ve ilgili modelin fiziksel serbest cisim diyagramı Şekil-1'de görüldüğü gibidir.




*Şekil 1:* Robot manipülatör tasarımı

Şekil 1'de gösterilen serbest cisim diyagramında $a_1$ birinci kolun uzunluğunu, $a_2$ ise ikinci kolun uzunluğunu temsil eder. $m_{1r}$ ve $m_{2r}$ sırasıyla birinci ve ikinci kolun kütlesine tekabül eder. $m_1$ ise birinci kol ve ikinci kol arasındaki eyleyicinin kütlesini belirtir; birinci kol tabana bağlı olduğundan birinci mafsaldaki eyleyici kütlesi matematiksel modele etki etmemektedir. $\theta_1$; birinci kolun x eksenine göre yaptığı açıyı, $\theta_2$ ise ikinci kolun birinci kola göre yaptığı açıyı temsil eder.

### 2.2. Matematiksel Model

Sistemin dinamik modeli Lagrange mekaniği kullanılarak elde edilmiştir. Genelleştirilmiş Lagrange eşitliği denklem 1 de gösterildiği gibidir [22].

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}} = \tau \qquad (1)$$

Denklemde ifade edilen L, sistemin toplam kinetik enerjisi K ile potansiyel enerjisi P arasındaki farkı; R, sistemin sönümleme enerjisini, q, $\theta_1$ $ve$ $\theta_2$ den oluşan durum uzayını $\tau$ ise manipülatörler için torku temsil etmektedir. L ifadesi denklem 2 de verildiği gibidir.

$$L = K - P \qquad (2)$$

Denklem 3 ve 4'te ise sırası ile sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjileri verilmiştir.

$$K = \dot{\theta}_1\left(\frac{1}{2}J_{eq1} + \frac{1}{2}m_{2r}a_1^2\right) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2\frac{1}{8}m_{2r}a_2^2 + (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2)\frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2) \quad (3)$$

$$P = \left(m_1 + \frac{1}{2}m_{1r} + m_{2r}\right)ga_1\sin(\theta_1) + m_{2r}ga_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

Denklem 3'te verilen $J_{eq1}$ birinci kolun eşdeğer atalet momentini temsil eder. Denklem 3 ve 4 ü kullanarak elde edilen L denklem 5'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} L &= K - P \\ &= \dot{\theta}_1\left(\frac{1}{2}J_{eq1} + \frac{1}{2}m_{2r}a_1^2\right) \\ &+ (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2\frac{1}{8}m_{2r}a_2^2 \\ &+ \left(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\right)\frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2) \\ &- \left(m_1 + \frac{1}{2}m_{1r} + m_{2r}\right)ga_1\sin(\theta_1) \\ &+ m_{2r}ga_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (5)$$

Sistemin toplam sönümleme enerjisi ise denklem 6'da verildiği gibidir.

$$R = \frac{1}{2}C_{eq1}\dot{\theta}_1^{\,2} + \frac{1}{2}C_{eq2}\dot{\theta}_2^{\,2} \quad (6)$$

Sistemin sönümleme enerjisi, her bir eksen için $C_{eq}$ ile gösterilen toplam sönümleme katsayısı ile orantılı olarak verilmiştir. Bu katsayı simülasyonda tarafımızca verilecektir, ancak sistem gerçek zamanlı operasyonda çalışırken deneysel olarak hesaplanacaktır.

İlgili ifadeler denklem 1'de yerine konulup parametrik olarak adım adım çözüldüğünde elde edilen tork ifadeleri ise denklem 7 ve 8 de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \tau_1 = \ &\ddot{\theta}_1\left(J_{eq1} + m_{2r}a_1^2 + \frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 + m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2)\right) \\ &+ \ddot{\theta}_2\left(\frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 + \frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2)\right) \\ &- \left(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2\right)\left(\frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\sin(\theta_2)\right) \\ &+ \left(m_1 + \frac{1}{2}m_{1r} + m_{2r}\right)ga_1\cos(\theta_1) \\ &+ \frac{1}{2}m_{2r}ga_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ &+ C_{eq1}\dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = \ &\ddot{\theta}_1\left(\frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 + m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2)\right) \\ &+ \ddot{\theta}_2\left(\frac{1}{4}m_{2r}a_2^2\right) \\ &+ \dot{\theta}_1^2\left(\frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\sin(\theta_2)\right) \\ &+ \frac{1}{2}m_{2r}ga_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ &+ C_{eq2}\dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

İşlem kolaylığı açısından elde edilen sistem modeli, denklem 9'da verilen standart manipülatör dinamiği notasyonu ile gösterilmiştir.

$$M\ddot{q} + V(q,\dot{q}) + G(q) = \tau \quad (9)$$

Verilen ifadede M atalet matrisini, V Coriolis matrisini, G yer çekimi matrisini ve q ise durum uzay matrisini ifade etmektedir. Bu matrisler denklem 10, 11, 12 ve 13'te gösterilmiştir.

$$q = \begin{bmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{bmatrix}, \dot{q} = \begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix}, \ddot{q} = \begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M = \begin{bmatrix} J_{eq1} + m_{2r}a_1^2 + \frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 + m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2) & \frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 + \frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2) \\ \frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 + m_{2r}a_1a_2\cos(\theta_2) & \frac{1}{4}m_{2r}a_2^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

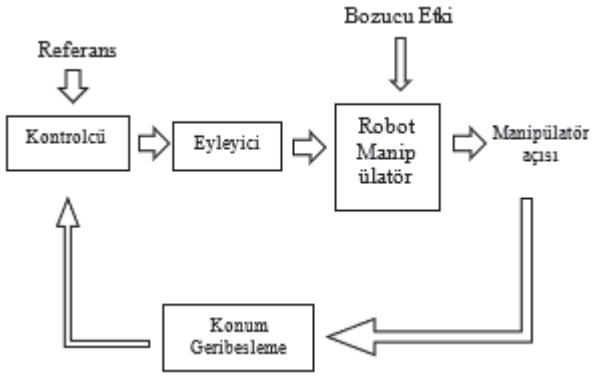
$$V = \begin{bmatrix} -\left(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2\right)\left(\frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\sin(\theta_2)\right) + C_{eq1}\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_1^2\left(\frac{1}{2}m_{2r}a_1a_2\sin(\theta_2)\right) + C_{eq2}\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$G = \begin{bmatrix} \left(m_1 + \frac{1}{2}m_{1r} + m_{2r}\right)ga_1\cos(\theta_1) + \frac{1}{2}m_{2r}ga_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \frac{1}{2}m_{2r}ga_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 2.3. Denetleyici Tasarımı

Robot manipülatör kontrolünde hassas pozisyonlandırma için en önemli faktör manipülatörlere uygulanan torktur. Bu yüzden, denetleyici tasarımı için hesaplanmış tork kontrolü yaklaşımı benimsenmiştir. Buna ek olarak, matematiksel olarak sistemin kararlı bir yapıda kaldığını göstermek için Lyapunov Kararlılık teoremi [22] uygulanmış ve ayrık zamanda enerji tabanlı oransal bir denetleyici tasarımı yapılmıştır. Ayrıca sistemin doğrusal olmayan matematiksel modeli geri besleme üzerinden doğrusallaştırılmıştır. Böylelikle düşük işlem gücüyle farklı platformlara entegre edilebilen bir denetleyici tasarım hedefine ulaşılmıştır.

Temelde; sistemdeki iki kol için iki farklı referans açısı verilmektedir, ardından tasarlanan pozisyon kontrolü için gerekli tork değeri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu tork değeriyle sistem modeli beslenip konum çıktısı elde edilmektedir. Elde edilen bu konum çıktısının geri beslemesi tekrar denetleyiciye verilmektedir. Genel sistem şeması şekil 2'de verildiği gibidir.




*Şekil 2:* Kontrol Diyagramı

Kontrolcü tasarımı için öncelikle sistem modeli merkezi fark yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır. Seçilen Lyapunov enerji fonksiyonu ise denklem 14'te gösterildiği gibidir.

$$L[k] = e[k]e^T[k] \tag{14}$$

Denklem 14'te gösterilen L ifadesi, minimize edilmek istenen Lyapunov enerji fonksiyonunu ve e ise sistemdeki hatayı ifade etmektedir. Burada e, kontrol edilmek istenen iki durum olduğu için 2x1'lik bir matrisle ifade edilmektedir. Sistemin k ve k+1 belirli zamandaki enerji farkı ise denklem 15'te ifade edilmiştir.

$$L[k+1] - L[k] = e[k+1]e^T[k+1] - e[k]e^T[k] \tag{15}$$

Denklem 15'teki $e[k+1]$ ifadesi denklem 16'daki gibi yeniden ifade edilirse:

$$e[k+1] = Ae[k] \tag{16}$$

Denklem 16'da verilen A, 2x2'lik oransal denetleyici katsayılarından oluşan bir köşegen matristir. Bu durumda, denklem 15 yeniden düzenlenirse denklem 17 elde edilir:

$$L[k+1] - L[k] = e[k]e^T[k](AA^T - 1) \tag{17}$$

Sistem kararlılığını sağlamak için; hata üzerinden seçilen Lyapunov enerji fonksiyonu en aza indirilmelidir. Bunu sağlamak adına denklem 18'de belirtilen eşitsizlik sağlanmalıdır.

$$L[k+1] - L[k] < 0 \tag{18}$$

Denklem 17 ve 18 göz önünde bulundurulduğunda, $A_{11}$ ve $A_{22}$ değerleri -1 ile 1 arasında olmalıdır.

Son olarak, sistem modeli denklemleri ve Lyapunov kararlılık kuralı kullanılarak elde edilen denetleyici kuralı denklem 19'da verildiği gibidir. M, V, G ve q matrisleri denklem 11, 12 ve 13'te belirtildiği gibidir. Burada kullanılan ifadeler, belirtilen matrislerin merkezi farklar yöntemiyle ayrıklaştırılmış halidir. $q_{ref}$ 2x1'lik referans matrisini; T ise örnekleme zamanını göstermektedir.

$$\tau = \frac{M(q_{ref} - Ae[k] - 2q[k] + q[k-1])}{T^2} + V + G \tag{19}$$

## 3. Deneyler & Sonuçlar

Sistemin simülasyonu için ilk olarak elde edilen matematiksel model MATLAB Simulink ortamında oluşturulmuştur. Ardından kontrolcü yapısı modele eklenmiştir. 20 milisaniye örnekleme zamanıyla simülasyon gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak sistemdeki maksimum tork limiti 1 N.m olarak uygulanmıştır. Simülasyon için bilgisayar destekli tasarım modeli üzerinden elde edilen sistem parametreleri Tablo 1'de gösterildiği gibidir.

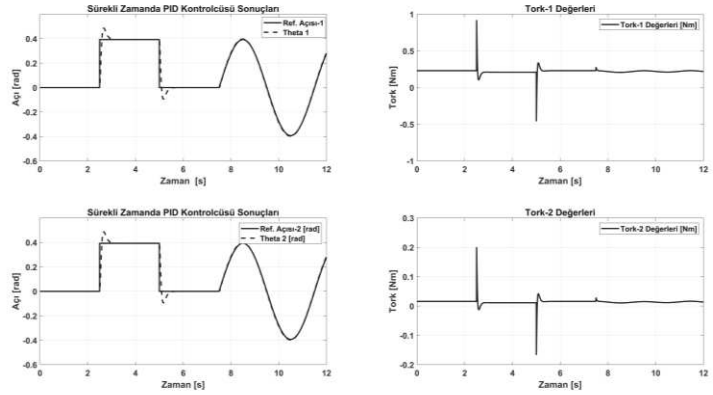
*Tablo 1*: Sistem Parametreleri

| Parametre | Değer |
|---|---|
| $m_1$ | $0.11\ [Kg]$ |
| $m_{1r}$ | $0.0294\ [Kg]$ |
| $a_1$ | $0.15\ [m]$ |
| $m_{2r}$ | $0.0213\ [Kg]$ |
| $a_2$ | $0.14\ [m]$ |
| $J_{eq}$ | $0.00035\ [Kgm^2]$ |
| $C_{eq1}$ | $0.001\ \left[\frac{Nm.sec}{rad}\right]$ |
| $C_{eq2}$ | $0.001\ \left[\frac{Nm.sec}{rad}\right]$ |
| $A_e$ | $\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & 0.72 \end{bmatrix}$ |

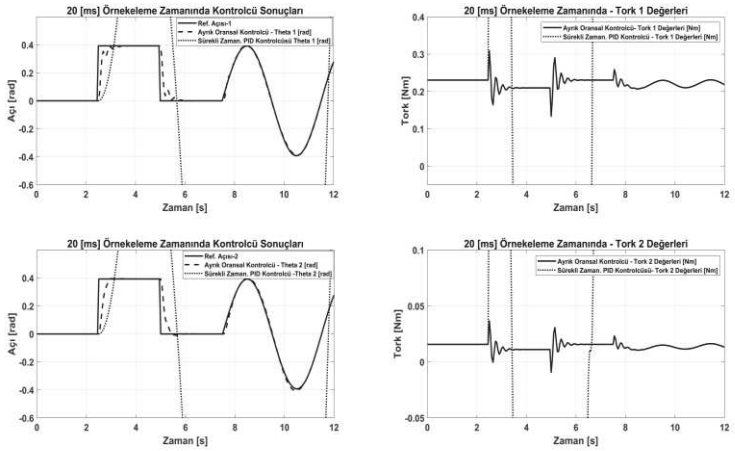
Sistem performansını değerlendirmek ve ayrık zamanlı denetleyici yaklaşımın önemine kıyasla vurgu yapmak için sürekli zamanda bir model tabanlı PID denetleyici tasarlanıp denenmiştir. Her iki eksen için referans sinyali olarak $\pi/8$ radyan büyüklüğünde basamak sinyali ardından 0.25 Hertz ve $\pi/8$ radyan büyüklüğünde sinüs sinyali verilmiştir. İlk olarak sürekli zamanda tasarlanan model tabanlı PID denetleyicinin sonuçları elde edilmiştir. PID denetleyicisinde oransal denetleyici katsayısı 975, integral denetleyici katsayısı 5625 ve türevsel denetleyici katsayısı ise 55 olarak belirlenmiştir. Ardından 20 milisaniyelik zaman periyodunda, sürekli zamandaki ilgili PID denetleyici ve ileri sürülen Lyapunov enerji tabanlı oransal ayrık denetleyici, her iki yapı için de aynı denetleyici parametreleriyle birlikte simüle edilmiştir. Ancak, yapılan tüm simülasyonlarda sistem modeli sürekli zamanda çalıştırılmıştır. Bunun sebebi; tasarlanan dinamik sistemin kendisi pratikte sürekli zamanda çalışırken denetleyicinin mikroişlemci içerisinde ayrık zamanda çalışmasıdır.

Şekil 3'te sürekli zamanda denenen PID denetleyicinin sonuçları, Şekil 4'te ise 20 milisaniyelik örnekleme zamanında çalıştırılan simülasyon çıktıları görülmektedir. Yine sistemin farklı örnekleme zamanında referans sinyalini oldukça iyi bir performansla takip edebildiğini göstermek adına şekil 5'te 2 milisaniyelik örnekleme zamanında yapılmış olan simülasyon çıktıları verilmiştir.

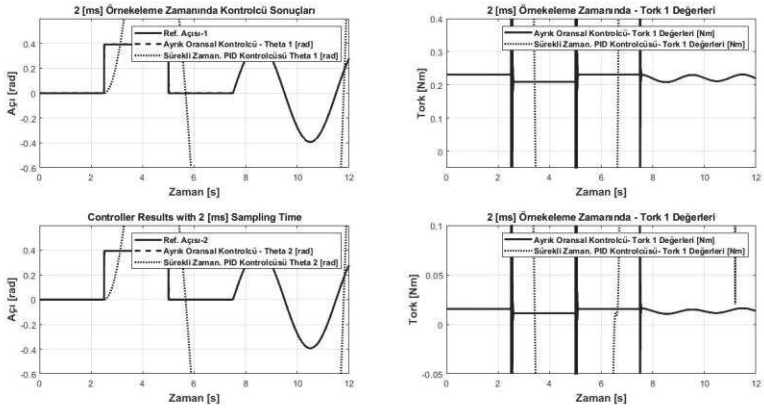
Şekil 3'teki model tabanlı sürekli zamandaki PID denetleyicinin basamak cevap sonuçları sırasıyla birinci ve




*Şekil 3:* Sürekli zamanda PID denetleyici sonuçları




*Şekil 4:* Ayrık zamanda denetleyici sonuçları-1




*Şekil 5:* Ayrık zamanda denetleyici sonuçları-2

ikinci eksen için: maksimum yüzde üst aşım değerleri %25.2 ve %25.8, kalıcı durum hataları yaklaşık olarak $10^{-5}$ radyan ve zaman sabitleriyse 0.34 ve 0.476 saniye olarak gözlemlenmiştir. Şekil 4'te 20 milisaniye örnekleme zamanında yapılan simülasyonda sürekli zamanda yapılan PID denetleyicinin kararsızlığa gittiği görülürken; ayrık zamanda tasarlanan enerji tabanlı oransal denetleyicinin basamak cevap sonuçları ise üst aşım göstermediği görülmüştür. Kalıcı durum hatası yine sırasıyla birinci ve ikinci eksen için yaklaşık olarak $10^{-5}$ radyan ve zaman sabiti ise 0.49 ve 0.38 saniye olarak elde edilmiştir.

## 4. Tartışma

Robot manipülatörler endüstride birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Tasarımlarındaki en önemli amaçlardan biri de konum kontrolündeki hassasiyeti sağlamaktır. Bunu gerçekleştirmek için farklı kontrol metotları mevcuttur. Bununla birlikte sürekli zamanda denetleyici tasarımlarının dijital platformlara entegresinde kısıtlar yaşanmaktadır.

Bundan doğan kısıtları engellemek adına, bu bildirinin odaklandığı ana unsur ayrık zamanda hassas konumlama yapabilen bir denetleyici tasarlamaktır. Bu itibarla, iki eksenli bir robot manipülatör için model temelli enerji tabanlı oransal ayrık denetleyici tasarlanmış olup sürekli zamanda tasarlanmış denetleyici göre avantajları göz önüne serilmiştir. Bunun için de bir adet sürekli zaman PID denetleyici tasarlanıp aynı şartlar altında sunulan denetleyici tasarımıyla kıyası verilmiştir.

Deneysel çalışmalar göstermiştir ki; sürekli zamanda tasarlanan PID denetleyicinin sürekli zamanda yüksek bir performansa sahip olmasına karşın 20 milisaniye örnekleme zamanında sistem ayrıklaştırıldığında sistem denetleyicisi kararsızlığa yakınsamaktadır. Sistem, dijital elementlerin doğası gereği, gerçek operasyon ölçütünde belirli bir örnekleme süresiyle çalışmak zorundadır. Bu yüzden sürekli zamanda tasarlanan ve yüksek performansa dahi sahip denetleyicilerin akademik değerine karşın pratikte uygulanabilirliği çok düşüktür.

Sunulan yöntem matematiksel olarak değerlendirildiğinde sistemin içinden alınan ölçümlerin kesin olarak elde edildiği varsayılmıştır. Algılayıcıların ve eyleyicilerin ideal oldukları ve zaman sabitlerinin örnekleme zamanın altında olduğu kabul edilmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde sunulan yöntemde gerçek hayatta yapılan testlerde uygunluk açısından değerlendirme yapılması ve gerekirse gürültü sönümleyici mekanizmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Sistem parametrelerinin belirsizliğinin bu çalışmada ayrıca tahmin edilmesi ile ilgilenilmemiştir ki, bu da sunulan çalışmanın eksikliklerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tasarlanan ve bu bildiride sunulan enerji tabanlı oransal ayrık denetleyicinin performans çıktılarına bakıldığında ise; birçok mikroişlemci için uygun çalışma kısıtları içerisinde, kabul edilebilecek bir örnekleme süresi olan 20 milisaniyede, yüksek derecede hassasiyete ve düşük zaman sabitine sahip pozisyon kontrolü sağlanmıştır. Böylelikle, ani konum değişimleri karşısında hızlı tepki verebilen bir denetleyici tasarımına ulaşılmıştır. Ayrıca, tasarlanan ayrık denetleyicinin farklı platformlara entegre edilebilir olması bir diğer operasyonel avantajı olarak göze çarpmaktadır.

## Kaynakça

[1] M. S. Fadali ve A. Visioli, “Digital Control System Design,” *Digital Control Engineering*, pp. 165–234, 2013.

[2] A. Billard ve D. Kragic, “Trends and challenges in robot manipulation”. Science, *364*(6446), p.eaat 8414, 2009.

[3] L. Jin, L. Shuai, Y. Jiguo ve H. Jinbo, "Robot manipulator control using neural networks: A survey." Neurocomputing 285: 23-34, 2018.

[4] Z. Song, J. Yi, D. Zhao ve X. Li, “A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: Fuzzy Approach,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 154, no. 2, pp. 208–226, 2005.

[5] Kai Zheng, Aik-Hong Lee, J. Bentsman, ve C. W. Taft, “Steady-state bumpless transfer under controller uncertainty using the state/output feedback topology,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 3–17, 2006.

[6] L. Zhang, Y. Wang, Y. Hou, ve H. Li, “Fixed-time sliding mode control for uncertain robot manipulators,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149750–149763, 2019.

[7] H. Rahimi Nohooji, “Constrained Neural adaptive PID control for robot manipulators,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 357, no. 7, pp. 3907–3923, 2020.

[8] H. G. Sage, M. F. De Mathelin, ve E. Ostertag, “Robust control of robot manipulators: A survey,” *International Journal of Control*, vol. 72, no. 16, pp. 1498–1522, 1999.

[9] S. D. Swetha Danthala et al., “Robotic Manipulator Control by using Machine Learning Algorithms, a review,” *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 8, no. 5, pp. 305–310, 2018.

[10] J.-J. E. Slotine ve Weiping Li, “On the adaptive control of robot manipulators,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 3, pp. 49–59, 1987.

[11] T. Hsia, “Adaptive control of robot manipulators - A Review,” Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation.

[12] J. Li, H. Ma, C. Yang, and M. Fu, “Discrete-time adaptive control of robot manipulator with payload uncertainties,” *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2015.

[13] Corradini, M.L., Fossi, V., Giantomassi, A., Ippoliti, G., M. L. Corradini, V. Fossi, A. Giantomassi, G. Ippoliti, S. Longhi, ve G. Orlando, “Discrete time sliding mode control of robotic manipulators: Development and experimental validation” – ScienceDirect, pp.816-822. 2012

[14] M. İşcan, A. I. Tas , B. Vural , A. B. Ozden ve C. Yılmaz, "Antenna Tracker Desıgn Wıth A Dıscrete Lyapunov Stabılıty Based Controller For Mını Unmanned Aerıal Vehıcles", International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, c. 6, sayı. 1, ss. 77-85, Tem. 2022.

[15] M. İşcan, A. İ. Taş, B. Vural, A. B. Ozden, ve C. Yılmaz, “Antenna Tracker design with a discrete Lyapunov stability based controller for Mini Unmanned Aerial Vehicles,” *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, vol. 6, no. 1, p. 77, 2022.

[16] P. Podrzaj, “Contionuous vs Discrete Pid Controller,” 2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), 2018.

[17] S. Yi ve J. Zhai, “Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators,” *ISA Transactions*, vol. 90, pp. 41–51, 2019.

[18] Man Zhihong, A. P. Paplinski, ve H. R. Wu, “A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 12, pp. 2464–2469, 1994.

[19] C. Canudas de Wit ve J.-J. E. Slotine, “Sliding observers for robot manipulators,” *Automatica*, vol. 27, no. 5, pp. 859–864, 1991

[20] E. Kim, ”Output feedback tracking control of robot manipulators with model uncertainty via adaptive fuzzy logic”. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, *12*(3), pp.368-378, 2004.

[21] M.M. Fateh. S. Azargoshasb,ve S. Khorashadizadeh, “Model-free discrete control for robot manipulators using a fuzzy estimator.” *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2014.

[22] F.L. Lewis, D.M. Dawson, ve C.T. Abdallah,”*Robot manipulator control: theory and practice*.” CRC Press, 2003.