Tork Belirsizliği Altında Bir Robot Manipülatör İçin Yinelemeli Öğrenme Kontrolcüsü Tasarımı ve Performans Analizi
Design and Performance Analysis of an Iterative Learning Controller for a Robotic Manipulator Under Torque Uncertainty

Ammar URGAN[1], *Yavuz EREN*[1]

[1]Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
{ammar, yeren}@yildiz.edu.tr

Özetçe

Bu çalışma, tork belirsizliği altındaki bir robot manipülatörünün (Phantom Omni), istenen referans yörüngeyi yüksek hassasiyetle takip etmesini sağlayan kontrolör yapısının tasarımını ve performans analizini içermektedir. Tork belirsizliğine rağmen kontrol performansını arttırabilmek için tasarlanan yinelemeli öğrenmeli kontrolcüsünde zaman ayarlı kazanç anahtarlamalı bir strateji kullanılmıştır. Tasarlanan kontrol mekanizması, geçici hal durumunda kontrol sinyalindeki ani sıçramaları düşük bir öğrenme kazancıyla önlerken, kalıcı hal durumunda yüksek kazanca geçerek kalıntı hatayı agresif bir şekilde küçültmektedir. Çalışmada önerilen kontrolcü yapısı, literatürde sıklıkla tercih edilen ve gürbüz bir yapıya sahip olan kayan kipli kontrol yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği ve performansı hem benzetim hem de deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir.

Abstract

This study involves the design and performance analysis of a controller architecture that enables a robotic manipulator (Phantom Omni) operating under torque uncertainty to track a desired reference trajectory with high accuracy. A time-controlled gain-switching strategy was employed in the iterative learning controller, which was designed to improve control performance despite torque uncertainty. The designed control mechanism prevents sudden jumps in the control signal during the transient state using a low learning gain, while switching to a high gain during the steady state to aggressively reduce the residual error. The proposed controller architecture was compared with the sliding-mode control method, which is frequently preferred in the literature and possesses a robust structure. The applicability and performance of the proposed method have been supported by both simulation and experimental results.

1. Giriş

Robotik manipülatörler, üç boyutlu uzayda karmaşık ve hassas hareket görevlerini gerçekleştirme yetenekleri sayesinde endüstriyel otomasyonda kritik bir rol oynamaktadır [1]. Ancak pratikte; bilinmeyen yerçekimi ve sürtünme torkları, yük değişimleri, dış titreşimler ve eyleyici hataları gibi faktörler sistemde tork belirsizliklerine yol açarak yörünge takip hassasiyetini düşürmekte ve sistem kararlılığını doğrudan tehdit etmektedir [2]. Doğrusal olmayan bozucu torklar şeklinde ortaya çıkan bu belirsizlikler, robotun dinamik davranışını karmaşıklaştırmakta ve sistemde aşırı kontrol eforuna veya kontrol sinyalinde çatırdamaya neden olmaktadır [3, 4]. Bu birleşik belirsizlikler altında, hesaplanmış tork kontrolü (CTC) ve model referanslı uyarlamalı kontrol (MRAC) gibi geleneksel kontrolcüler hassasiyetlerini koruyamamakta, belirgin yörünge takip hataları veya parametrik ıraksamalar sergilemektedir [5, 4]. Bu tür zorlukların üstesinden gelmek için belirsizlikleri dikkate alan uyarlamalı ve gürbüz kontrol stratejileri kullanılmaktadır; özellikle Kayan Kipli Kontrol (SMC), sınırlandırılmış belirsizlikleri kompanze etmek ve çatırdamayı azaltmak amacıyla literatürde baskın bir strateji olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir [3, 6].

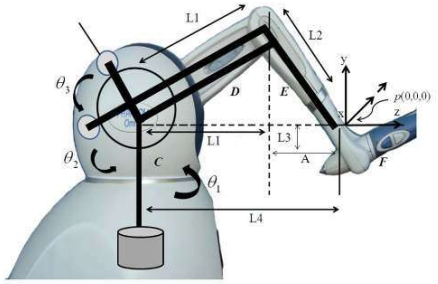
Belirsizliklerle başa çıkmada klasik gürbüz kontrolcülere güçlü bir alternatif olan yinelemeli öğrenmeli kontrol (ILC), zamanla tekrar eden görevlerde sistem performansını iyileştirmek amacıyla öne çıkan oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşım, aynı yörüngenin ardışık olarak izlendiği uygulamalarda öğrenme temelli hata azaltımı sağlayarak yörünge takibi doğruluğunu iterasyonlar ilerledikçe önemli ölçüde artırmaktadır. ILC tabanlı kontrolcüler; mobil robotlar [7] , kara taşıtları [8] ve robotik kol sistemlerinde [9] optimizasyon tabanlı veya sezgisel biçimlerde başarıyla uygulanmaktadır [10, 11]. Son dönem literatüründe, parametre belirsizliklerine karşı sistem performansını artırmak adına bu kontrolörlerin uyarlanabilir stratejilerle entegre edildiği yenilikçi yaklaşımlar da dikkat çekmektedir [12]. Bu motivasyonla sunulan çalışmada, tork belirsizliği altındaki bir robot manipülatör (Phantom Omni) için ardışık iterasyonlarda öğrenme sağlayan zaman ayarlı kazanç anahtarlamalı bir ILC mimarisi tasarlanmış ve elde edilen deneysel performans, literatürde sıklıkla tercih edilen SMC yöntemi ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2. Matematiksel Model ve Ön Bilgiler

Bu bölümde ilk olarak robot manipulatörüne ait dinamik denklem verilmiştir. Sonrasında kontrolcü tasarımında kullanılacak olan yöntemlerle ilgili temel bilgiler verilmiştir.

2.1. Dinamik Model

Haptik cihaza ait eklem yerleşimi ve dönme eksenleri Şekil 1'te gösterilmistir. Phantom Omni^{TM} haptik cihazının dinamik modeli Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak aşağıdaki formda yazılabilir.



Şekil 1: Phantom Omni^{TM} haptik cihazı [13]

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta) = \tau \tag{1}$$

burada $M = M^T \in R^{3x3}$ atalet matrisini, $C \in R^{3x3}$ koriyolis ve merkezcil kuvvetler matrisini, $N \in R^{3x1}$ yerçekimi matrisini, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \in R^{3x1}$ eklem pozisyonlarını ve $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in R^{3x1}$ eklemlere etki eden torkları ifade etmektedir.

Dinamik modelin bilinen bazı özellikleri sağladığı varsayılmaktadır. Bu özellikler sırasıyla: Atalet Matrisi $M(\theta)$'nin Simetrik, pozitif tanımlı olması, Eylemsizlik matrisi ve Koriyolis/Merkezcil Kuvvetler Matrisi arasında $S = \frac{1}{2}\dot{M}(\theta) - C\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ şeklinde tanımlanan ters simetri ilişkisi olması, yerçekimi matrisinin sınırlandırılabilir olması ve $Y\psi = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta)$ şeklinde lineer parametrize edilebilir olmasıdır [14].

Eşitlik (1)'de verilen dinamik modele ait atalet matrisi

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{bmatrix} \tag{2}$$

olarak ifade edilebilir. Elemanları ise

$$\begin{aligned} m_{1,1} &= k_1 + k_2 cos2\theta_2 + k_3 cos2\theta_3 + k_4 cos\theta_2 sin\theta_3 \\ m_{1,2} &= m_{2,1} = k_5 sin(\theta_2) \\ m_{1,3} &= m_{3,1} = 0 \\ m_{2,2} &= k_6 \\ m_{2,3} &= m_{3,2} = -0.5k_4 sin(\theta_2 - \theta_3) \\ m_{3,3} &= k_7 \end{aligned}$$

şeklindedir. Koriyolis ve Merkezcil kuvvetler matrisi

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} \end{bmatrix} \tag{3}$$

gibi yazılabilir. Elemanları ise

$$\begin{aligned} c_{1,1} &= -k_2\dot{\theta}_2 \sin(2\theta_2) - k_3\dot{\theta}_3 \sin(2\theta_3) \\ &\quad - 0.5k_4\dot{\theta}_2 \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_3 \cos(\theta_2)\cos(\theta_3) \\ c_{1,2} &= -k_2\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) - 0.5k_4\dot{\theta}_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) \\ &\quad + k_5\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \\ c_{1,3} &= -k_3\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_3) - 0.5k_4\dot{\theta}_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_3) \\ c_{2,1} &= k_2\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) + 0.5k_4\dot{\theta}_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) \\ c_{2,2} &= c_{3,3} = 0 \\ c_{2,3} &= 0.5k_4\dot{\theta}_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ c_{3,1} &= k_3\dot{\theta}_1 \sin(2\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_3) \\ c_{3,2} &= -0.5k_4\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \end{aligned}$$

şeklindedir. Yerçekimi matrisi ise

$$N = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \tag{4}$$

gibi ifade edilebilir. Elemanları ise

$$\begin{aligned} n_1 &= 0 \\ n_2 &= k_8 \cos(\theta_2) + k_{10}(\theta_2 - 0.5\pi) \\ n_3 &= k_9 \sin(\theta_3) \end{aligned}$$

şeklinde tanımlanabilir. Denklemlerde kullanılan değişkenlerin nominal değerleri aşağıdaki gibi kullanılmıştır [15]:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1.798 \times 10^{-3}, & k_2 &= 0.864 \times 10^{-3}, \\ k_3 &= 0.486 \times 10^{-3}, & k_4 &= 2.766 \times 10^{-3}, \\ k_5 &= 0.308 \times 10^{-3}, & k_6 &= 2.526 \times 10^{-3}, \\ k_7 &= 0.652 \times 10^{-3}, & k_8 &= 164.158 \times 10^{-3}, \\ k_9 &= 94.050 \times 10^{-3}, & k_{10} &= 117.294 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

2.2. Yinelemeli Öğrenmeli Kontrol

Yinelemeli öğrenmeli kontrol, belirli bir görevi sürekli olarak tekrar eden sistemlerde, geçmiş iterasyonlardan elde edilen hata bilgisini kullanarak kontrol performansını adım adım iyileştiren bir yöntemdir. ILC'nin genel güncelleme kuralı Denklem (5)'de verilmiştir:

$$u_k(t) = L_1 u_{k-1}(t) + L_2 f_k(t) \tag{5}$$

Burada $u_k(t)$ mevcut iterasyondaki kontrol işaretini, $L_1 \in (0,1]$ modelleme hatalarına karşı gürbüzlüğü artırmak için kullanılan unutma katsayısını, L_2 öğrenme kazancını ve $f_k(t)$ ise genellikle izleme hatası ve türevlerini içeren güncelleme fonksiyonunu belirtmektedir [16]. Giriş referansının sürekli ve periyodik olduğu bir sistemde, ardışık iterasyonlar yerine sinyallerin

periyodik olarak tekrar ettiği varsayılabilir. Bu durumda, bir önceki iterasyona ait kontrol sinyali $u_{k-1}(t)$, bir önceki periyottan gelen $u_k(t-T_0)$ sinyali ile değiştirilerek zaman ekseninde sürekli bir öğrenme sağlanabilir. Güncellenmiş sürekli zamanlı öğrenme kuralı Denklem (6)'de ifade edilmiştir:

$$u_k(t) = L_1 u_k(t-T_0) + L_2 f_k(t) \tag{6}$$

Burada T_0, periyodik referans sinyalinin periyodunu ifade etmektedir.

2.3. Kayan Kipli Kontrol

Kayan kipli kontrol, doğrusal olmayan sistemlerdeki parametrik belirsizliklere ve dış bozuculara karşı yüksek dayanıklılık sağlayan gürbüz bir kontrol yöntemidir. Tasarım süreci, sistemin hata dinamiğini istenen bir yörüngeye zorlayacak bir kayma yüzeyinin tanımlanması ve sistem durumlarını sonlu bir sürede bu yüzeye yönlendirip orada tutacak anahtarlamalı bir kontrol kuralının tasarlanması şeklinde iki ana aşamadan oluşur. Birinci dereceden genel bir kayma yüzeyi s ve bu yüzeye ulaşmayı garanti eden temel kontrol kuralı şu şekilde ifade edilir:

$$s = \dot{e} + \gamma_1 e \tag{7}$$

$$u_{smc} = f(s,x,e)\text{sgn}(s) \tag{8}$$

Burada e ve $\dot{e}$ sırasıyla izleme hatasını ve türevini, $\gamma_1 > 0$ yüzey eğimini belirleyen pozitif bir sabiti, $f(s,x,e)$ ise sistemdeki belirsizliklerin ve dış bozucuların üst sınırını aşacak büyüklükte seçilen anahtarlama kazancını belirtmektedir.

3. Kontrolcü Tasarımı

Hata dinamikleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$e = q_d - q \tag{9}$$

$$\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q} \tag{10}$$

$$\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q} \tag{11}$$

Daha sonra, filtrelenmiş hata r ve türevi şu şekilde tanımlanır:

$$r = \dot{e} + \alpha_1 e \tag{12}$$

$$\dot{r} = \ddot{e} + \alpha_1 \dot{e} \tag{13}$$

burada α_1 pozitif bir sabittir.

Dinamik model aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\tau - \tau_{unc} = M(\theta)\ddot{\theta} + C\left(\theta,\dot{\theta}\right)\dot{\theta} + N(\theta) \tag{14}$$

burada τ_{unc} torkun belirsiz kısmını ifade etmektedir. Referans yörünge için dinamik denklem şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\tau_d = M(\theta_d)\ddot{\theta}_d + C\left(\theta_d,\dot{\theta}_d\right)\dot{\theta}_d + N(\theta_d) \tag{15}$$

ve bu ifade Denklem (14)'den çıkarıldığında

$$\tau - \tau_{unc} - \tau_d = -M(\theta)\ddot{e} - C\left(\theta,\dot{\theta}\right)\dot{e} \tag{16}$$

denklem aşağıdaki formda yeniden yazılabilir:

$$\tau - \tau_{unc} - \tau_d = -M\ddot{e} - C\dot{e} \pm M\alpha_1\dot{e} \pm C\alpha_1 e \tag{17}$$

$$M\dot{r} = -Cr + M\alpha_1\dot{e} + C\alpha_1 e + Y_d\psi - \tau + \tau_{unc} \tag{18}$$

Bu aşamada, Lyapunov aday fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$V = \frac{1}{2} r^T M r \tag{19}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi şu şekilde elde edilir:

$$\dot{V} = \frac{r^T \dot{M} r}{2} + r^T M \dot{r} \tag{20}$$

Denklem (18) kullanılarak türev ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{V} = r^T\left(\frac{\dot{M}}{2} - C\right)r + r^T\left(M\alpha_1\dot{e} + C\alpha_1 e + Y_d\psi - \tau + \tau_{unc}\right) \tag{21}$$

Ters simetrik matris özelliğinden dolayı ilk terim sıfıra eşittir.

3.1. Yinelemeli Öğrenmeli Kontrolcü Tasarımı ve Kararlılık Analizi

Kontrolcüye bir öğrenme terimi (u_{iter}) eklendiğinde,

$$\tau = \hat{M}\alpha_1\dot{e} + \hat{C}\alpha_1 e + Y_d\psi + \alpha_2 r + u_{iter} \tag{22}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi şu hali alır:

$$\dot{V} = -r^T\alpha_2 r + r^T(\tau_{unc} - u_{iter}) \tag{23}$$

Burada, genel yapıya bir kazanç anahtarlama mekanizması eklenerek yinelemeli öğrenme terimi u_{iter} tüm zamanlar için geçmiş iterasyon bilgisini kullanacak şekilde aşağıdaki gibi tasarlanmıştır:

$$u_{iter}(t) = u_{iter}(t-T_0) + \alpha_4(t)ee^T Isign(r) \tag{24}$$

Burada $\alpha_4(t)$, başlangıçtaki yüksek hata geçişlerini yumuşatmak ve hata belirli bir seviyeye indikten sonra kalıcı durum hatasını agresifçe küçültmek amacıyla tanımlanmış zaman ayarlı bir öğrenme kazancıdır:

$$\alpha_4(t) = \begin{cases} \alpha_{4,d}, & t < 2T_0 \\ \alpha_{4,y}, & t \geq 2T_0 \end{cases} \tag{25}$$

Denklemde $\alpha_{4,d}$ düşük kazanç katsayısını, $\alpha_{4,y}$ ise büyük kazanç katsayısını ifade etmektedir ($\alpha_{4,y} > \alpha_{4,d} > 0$).

Tasarlanan bu kontrol kuralı Denklem (23)'de yerine konulduğunda Lyapunov fonksiyonunun türevi şu hali alır:

$$\dot{V} = -r^T\alpha_2 r + r^T(\tau_{unc}(t) - u_{iter}(t-T_0)) - r^T\alpha_4(t)ee^T Isign(r) \tag{26}$$

Kararlılık analizi için, $\tilde{\tau}(t) = \tau_{unc}(t) - u_{iter}(t-T_0)$ terimi bir önceki periyottan kompanze edilemeyen modellenmemiş dinamiklerin sınırlandırılmış kalıntı hatası olarak tanımlanır ve $||\tilde{\tau}(t)|| \leq \delta$ olduğu varsayılır. Ayrıca $r^T sign(r) = ||r||_1 \geq ||r||$ norm eşitsizliği kullanılarak Lyapunov türevi üstten sınırlandırılabilir:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{min}(\alpha_2)||r||^2 + ||r||\delta - \alpha_4(t)\lambda_{min}(ee^T I)||r||_1 \tag{27}$$

Öğrenme kazancını içeren son terim her zaman negatif veya sıfır olduğundan ($-\alpha_4(t)\cdots \leq 0$), sistemin kararlılığını en kötü durum senaryosuna göre değerlendirmek mümkündür:

$$\dot{V} \leq -||r||\left(\lambda_{min}(\alpha_2)||r|| - \delta\right) \tag{28}$$

Elde edilen Denklem (28), $||r|| > \frac{\delta}{\lambda_{min}(\alpha_2)}$ olduğu sürece $\dot{V} < 0$ şartının kesin olarak sağlandığını matematiksel olarak gösterir. Bu durum, kayma yüzeyinin (r) ve dolayısıyla sistemin izleme hatasının (e) orijin etrafında küçük bir bölgeye yakınsayacağını kanıtlar; yani sistem Düzgün Nihai Sınırlandırılmış kararlılığa sahiptir.

Pratikte, ILC kuralındaki $\alpha_4(t)$ terimi $\dot{V}$'nin negatifliğini daha da artırarak hatanın bu nihai sınıra çok daha hızlı yakınsamasını sağlar. $t < 2T_0$ iken seçilen küçük $\alpha_{4,d}$ kazancı, hatanın henüz yüksek olduğu ilk periyotlarda kontrol girdisinde aşırı sıçramaların oluşmasını engeller. $t \geq 2T_0$ anından sonra hata yeterince küçüldüğünde devreye giren yüksek $\alpha_{4,y}$ kazancı ise, kalan kalıntı hatayı çok daha hızlı bastırarak nihai hata sınırının daraltılmasını ve daha hassas bir yörünge takibi elde edilmesini garanti eder.

3.2. Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı ve Kararlılık Analizi

$\tau_{unc} = \beta_1 \tau$ olduğundan, kontrol girdisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\tau = \alpha_3 |\hat{M}\alpha_1 \dot{e} + \hat{C}\alpha_1 e + Y_d \psi| sign(r) + \alpha_2 r \qquad (29)$$

Bu durum, Lyapunov fonksiyonunun türevini şu hale getirir:

$$\dot{V} = r^T (M\alpha_1 \dot{e} + C\alpha_1 e + Y_d \psi - (1-\beta_1)\alpha_3 |\hat{M}\alpha_1 \dot{e} + \hat{C}\alpha_1 e + Y_d \psi| sign(r) + \alpha_2 r) \qquad (30)$$

$\beta_1 < 1$ ve $\alpha_3 > 1/(1-\beta_1)$ koşulları altında Lyapunov fonksiyonunun türevi

$$\dot{V} = r^T (-(...)) sign(r) - r^T \alpha_2 r \qquad (31)$$

halini alır ve bu ifade negatif tanımlıdır.

4. Sonuçlar

Bu bölümde öncelikle benzetim çalışmaları ve deneysel sisteme ait yapılandırma detayları sunulmuş; ardından elde edilen benzetim ve deney sonuçları tartışılmıştır.

4.1. Deney Düzeneği ve Benzetim Modeli

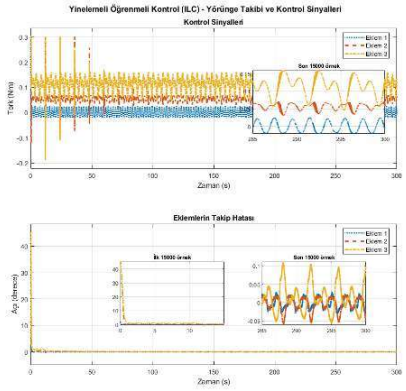
Çalışmada deneysel platform olarak Phantom Omni robotik sistemi kullanılmıştır. Kontrol algoritmaları MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiş olup, robot ile bilgisayar arasındaki haberleşme frekansı 1600 Hz olarak belirlenmiştir. Deneysel sistemde tork belirsizlik miktarı doğrudan ölçülememiş sadece bulunduğu varsayılmıştır. Benzetim çalışmalarında ise kontrolcülerin belirsizlikleri bastırma yeteneğini daha açık bir şekilde gösterebilmek amacıyla, uygulanan tork değeri %45 oranında düşürülmüştür. Benzetim modelinde ve deneysel sistemde kullanılan referans eklem yörüngeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned}\theta_1 =& 0.3sin(\pi t) + 0.15sin(0.5\pi t) + 0.05sin(0.25\pi t + 0.3);\\ \theta_2 =& 0.7 + 0.2sin(\pi t + 0.125) + 0.1sin(0.5\pi t + 0.30)\\ &+ 0.05sin(4/12\pi t + 0.53);\\ \theta_3 =& 0.7 + 0.25sin(\pi t + 0.25) + 0.2sin(0.5\pi t)\\ &+ 0.05sin(2/12\pi t + 0.43);\end{aligned}$$

Kontrolcü kazançları benzetim çalışmaları için $\alpha_1 = [9, 15, 7], \alpha_2 = 0.5, \alpha_3 = [75, 18, 16], \alpha_{4,d} = [0.5, 0.5, 0.1], \alpha_{4,y} = [5000, 5000, 1000]$ olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda ise $\alpha_1 = [45, 75, 35], \alpha_2 = 0.05, \alpha_3 = [6, 1.25, 1.25], \alpha_{4,d} = 0.05, \alpha_{4,y} = 5$ olarak belirlenmiştir. Vektörel olarak yazılan kazançlar matrisin köşegendeki elemanlarıdır.

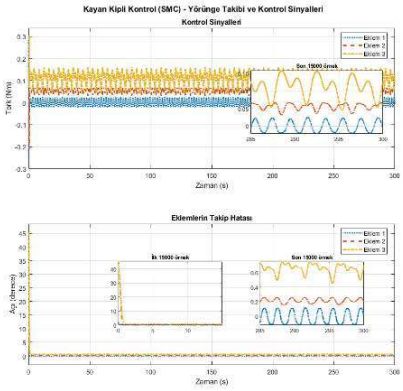
4.2. Benzetim Sonuçları

Yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 2, 3 ve Tablo 1, 2'de sunulmuştur. İlgili figürlerde, üst bölümde kontrol sinyalleri ve bu sinyallerin kalıcı hal durumlarını detaylandıran yakınlaştırılmış grafikler yer almaktadır. Alt bölümde ise eklemlerin yörünge takip hataları verilmiş olup; bu hataların ilk 15000 örneği kapsayan geçici hal ve son 15000 örneği kapsayan kalıcı hal rejimleri detaylı olarak incelenmiştir.Şekil 2'de sunulan yinelemeli öğrenmeli kontrol performansı incelendiğinde, takip hatasının hızlı bir şekilde sıfıra yaklaştığı ve kalıcı hal durumunda eklemler için sırasıyla $[\pm 0.03, \pm 0.05, \pm 0.1]$ derece bandında sınırlandığı görülmektedir. Kontrol sinyalinde gözlemlenen ani sıçramaların yalnızca iterasyon geçiş anlarında meydana geldiği ve yaklaşık 5. iterasyondan (60. saniyeden) sonra tamamen sönümlendiği tespit edilmiştir. Kayan Kipli Kontrol sonuçlarının verildiği Şekil 3 incelendiğinde, kontrol sinyalinde bilindik çatırdama etkisinin oluşmadığı dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, yörünge takip hatasının eklemler için sırasıyla $[\pm 0.1, 0.2 \pm 0.05, 0.6 \pm 0.1]$ derece aralıklarında kaldığı görülmektedir.



Şekil 2: Yinelemeli Öğrenme Kontrolü için Benzetim Sonuçları

Performans karşılaştırmaları için sunulan Tablo 1 tüm test sürecini kapsarken, Tablo 2 yalnızca sonuçların kalıcı hal rejimini, yani son 15000 örneği içermektedir. Karşılaştırmalarda kalıcı hal performansının ayrıca incelenmesinin temel nedeni, yinelemeli öğrenmeli kontrolcünün doğası gereği asıl başarısını iterasyonlar ilerledikçe, yani kalıcı halde göstermesidir. Tablo 2 incelendiğinde, en düşük izleme hatasının ILC ile elde edildiği ve bu esnada harcanan kontrol eforunun diğer yöntemlerle benzer seviyelerde kaldığı açıkça görülmektedir. Tüm süreci kap-



Şekil 3: Kayan Kipli Kontrol için Benzetim Sonuçları

Tablo 1: Benzetim Sonuçlarına Göre Kontrolcülerin Performansı

Kontrolcü	**Kontrol Çıktısının Ortalaması** (N^2m^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,000249	0,003294	0,013964
SMC	0,000254	0,003275	0,013653
	Hatanın Karesinin Ortalaması (deg^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,001938	1,564976	1,713536
SMC	0,008877	1,608297	2,107128

sayan Tablo 1 değerlendirildiğinde ise, ILC ile SMC yöntemlerinin genel performans açısından birbirine oldukça yakın sonuçlar sergilediği tespit edilmiştir.

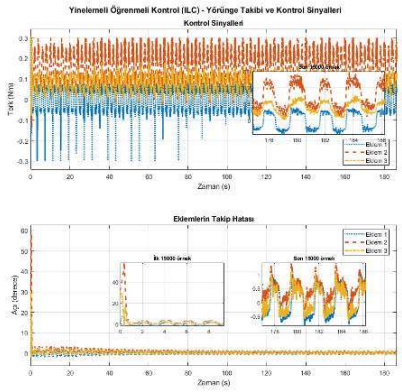
4.3. Deneysel Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 4, 5 ve Tablo 3, 4'te sunulmuştur. Yinelemeli öğrenmeli kontrol performansı incelendiğinde, yörünge takip hatasının ± 1 derecelik bir banda başarılı bir şekilde sınırlandığı görülmektedir. Birinci ekleme ait kontrol sinyalinde yüksek frekanslı ani sıçramalar gözlemlense de, bu durumun fiziksel eklem hareketine veya izleme performansına olumsuz bir etkisinin olmadığı hata grafiklerinden açıkça anlaşılmaktadır. Kayan Kipli Kontrol uygulamasında izleme hatalarının eklemler için sırasıyla $[\pm 1, 1 \pm 1, 1.5 \pm 1.5]$ derece aralıklarında seyrettiği ve kontrol sinyalinde belirgin bir çatırdama etkisinin oluştuğu tespit edilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde, en düşük izleme hatasının ILC ile elde edildiği ve bu esnada harcanan kontrol eforunun diğer yöntemlerle benzer seviyelerde kaldığı açıkça görülmektedir. Tüm süreci kapsayan Tablo 3 değerlendirildiğinde ise, ILC ile SMC yöntemlerinin genel performans açısından birbirine oldukça yakın sonuçlar sergilediği tespit edilmiştir.

Tablo 2: Benzetim Sonuçlarına Göre Kontrolcülerin Kalıcı Hal Performansı

Kontrolcü	**Kontrol Çıktısının Ortalaması** (N^2m^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,000237	0,003209	0,013255
SMC	0,000240	0,003199	0,012929
	Hatanın Karesinin Ortalaması (deg^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,000219	0,000355	0,001698
SMC	0,007701	0,047825	0,429899



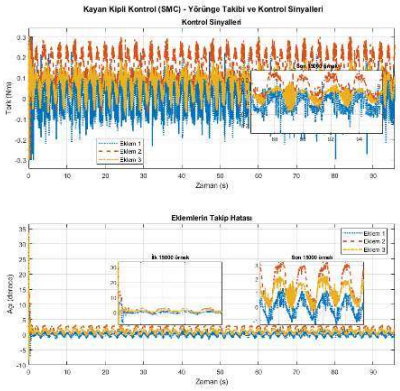
Şekil 4: Yinelemeli Öğrenme Kontrolü için Deneysel Sonuçlar

5. Tartışma

Elde edilen bulgular, Yinelemeli Öğrenmeli Kontrol stratejisinin hem benzetim hem de deneysel ortamlarda yörünge takibi görevini yüksek bir başarımla gerçekleştirdiğini doğrulamaktadır. Tüm deney sürecini kapsayan performans metrikleri incelendiğinde, ILC'nin Kayan Kipli Kontrol yöntemine kıyasla genel izleme hatasında hafif bir üstünlük sağladığı görülmektedir. Ancak analiz yalnızca kalıcı hal rejimini temsil eden son 15.000 örnek üzerinden yapıldığında, ILC'nin izleme hassasiyeti açısından SMC ile arasındaki performans farkını belirgin şekilde açtığı tespit edilmiştir. Üstelik bu üstün takip başarımı, kontrol eforunda dikkate değer bir artışa yol açmadan elde edilmiştir.

ILC'nin kontrol sinyalini ardışık iterasyonlar boyunca kademeli olarak öğrenip hatayı sönümleyen yapısı ile SMC'nin belirsizlikleri yüksek kazançla anlık olarak bastırmaya odaklanan yapısı karşılaştırıldığında, kalıcı haldeki bu performans farkı teorik beklentilerle tam olarak örtüşmektedir. Ayrıca, söz konusu yüksek kalıcı hal başarımının yaklaşık 15. iterasyona denk gelen kısa bir zaman aralığında elde edilmiş olması, algoritmanın pratik öğrenme hızının altını çizmektedir.

Gelecek çalışmalarda, ILC mimarisinin zaman ekseninden bağımsızlaştırılarak doğrudan uzaysal (konum tabanlı) bir formülasyona taşınması planlanmaktadır. Bu sayede, yöntemin



Şekil 5: Kayan Kipli Kontrol için Deneysel Sonuçlar

Tablo 3: Deneysel Sonuçlara Göre Kontrolcülerin Performansı

Kontrolcü	**Kontrol Çıktısının Ortalaması** (N^2m^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,002897	0,027570	0,007352
SMC	0,005016	0,027318	0,007736
	Hatanın Karesinin Ortalaması (deg^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,742494	6,522318	1,651050
SMC	0,560586	4,272745	1,737419

yalnızca periyodik sinyallerle sınırlı kalmayıp, periyodik olmayan referans yörüngeler için de etkin bir şekilde çalıştırılması hedeflenmektedir.

6. Kaynakça

[1] M. Vukobratovic and V. Potkonjak, *Dynamics of Manipulation Robots: Theory and Application*, Springer-Verlag, 1982.

[2] B. Xiao, S. Yin, and O. Kaynak, "Tracking control of robotic manipulators with uncertain kinematics and dynamics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 6439–6449, 2016.

[3] S. Zhang, Z. Chen, and X. Zhang, "Robust adaptive nonlinear admittance control of robotic manipulators with extra-intra uncertainties and disturbances," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 35, 2025.

[4] T. K. Mohammed and C. M. Abdissa, "Robust model reference adaptive controller for 3-dof planar manipulator," *Scientific Reports*, vol. 16, 2026.

[5] M. S. Ahmed, A. Mary, and H. H. Jasim, "Robust computed torque control for uncertain robotic manipulators," *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 2021.

Tablo 4: Deneysel Sonuçlara Göre Kontrolcülerin Kalıcı Hal Performansı

Kontrolcü	**Kontrol Çıktısının Ortalaması** (N^2m^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,002761	0,027635	0,007351
SMC	0,004461	0,025411	0,006951
	Hatanın Karesinin Ortalaması (deg^2)		
	Eklem 1	**Eklem 2**	**Eklem 3**
ILC	0,330602	0,331994	0,211920
SMC	0,364489	3,618670	1,578408

[6] K. Guo, H. Zhang, C. Wei, H. Jiang, and J. Wang, "Novel sliding mode control of the manipulator based on a nonlinear disturbance observer," *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.

[7] K. L. Moore and V. Bahl, "Iterative learning control technique for mobile robot path-tracking control," November 1999.

[8] N. R. Kapania and J. C. Gerdes, "Path tracking of highly dynamic autonomous vehicle trajectories via iterative learning control," July 2015.

[9] Tong Yang, Ning Sun, Yongchun Fang, Xin Xin, and He Chen, "New adaptive control methods for n-link robot manipulators with online gravity compensation: Design and experiments," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 539–548, 2021.

[10] S. Gunnarsson and M. Norrlöf, "On the design of ilc algorithms using optimization," *Automatica*, vol. 37, no. 12, pp. 2011–2016, 2001.

[11] M. Norrlöf, "An adaptive iterative learning control algorithm with experiments on an industrial robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 2, pp. 245–251, 2002.

[12] Lei Chen, Xiangbin Liu, Lang Zou, and Min Zhang, "Robust adaptive control for robotic manipulator with output constraints," in *2024 IEEE 13th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, 2024, pp. 1087–1092.

[13] A. J. Silva, O. A. D. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability," *2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, pp. 193–198, 2009.

[14] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*, CRC Press, 2003.

[15] A. Nygaard, "High-level control system for remote controlled surgical robots," M.S. thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2008.

[16] Jian-Xin Xu, Sanjib K Panda, and Tong Heng Lee, *Real-time iterative learning control: design and applications*, Springer, 2009.