



Testing and comparison of different control methods on a gimbal system

Muharrem Mandacı^{1,2*} , Şölen Kumbay Yıldız¹ 

¹Department of Electric and Electronic Engineering, Faculty of Electric and Electronic Engineering, Hacettepe University, 06800, Ankara, Türkiye

²Department of Control System Design, MGEO, ASELSAN A.Ş., 06680, Akyurt, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Investigation of gimbal control performance of different controllers under model parameter variation and disturbance effects
- Adaptive solution to gimbal control under parameter variation with self-tuning PI controller
- Gimbal control application with relay sliding mode control based on input output model

Keywords:

- Gimbal Control
- RMSC-IO
- Integral Action LQR
- Self-Tuning PI Control
- PI Control

Article Info:

Research Article
Received: 13.10.2023
Accepted: 23.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1375758

Correspondence:

Author: Muharrem Mandacı
e-mail:
mmandaci@aselsan.com.tr
phone: +90 538 819 1881

Graphical/Tabular Abstract

Gimbal systems serve as critical mechanisms for carrying payloads and accurately aligning them with specific lines of sight. Designing controllers for these gimbal systems necessitates robustness against external disturbances and variations in system parameters. Various control methods have been explored in existing literature to address this challenge. In the scope of this study, we investigate the performance of four distinct control strategies-Proportional-Integral (PI) control, Self-Tuning PI control, Integral Action Linear-Quadratic regulator (IA-LQR), and Relay Sliding Mode Control based on the Input-Output Model (RSMC-IO)—as speed controllers for a gimbal system. We assess their efficacy through both simulation-based experiments and real-world applications, offering a comprehensive analysis of their outcomes. Beyond speed control, we extend our investigation to include cascade position control, employing a PD control structure in the outer loop. Our study focuses on evaluating the performance of these diverse control structures when subjected to disturbances and variations in model parameters. To the best of our knowledge, this research marks the first attempt to apply the RSMC-IO approach to gimbal systems, enhancing our understanding of control strategies in this context and offering valuable insights into their practical implications (Table A).

	PI	Self Tuning PI	IA-LQR	RSMC-IO
Overshoot (25°C)	%0	%0	%32	%0
Settling Time (25°C)	90 ms	110 ms	90 ms	100 ms
Overshoot (-40°C)	%0	%0	%0	%0
Settling Time (-40°C)	200 ms	110 ms	110 ms	110 ms

Table A. Comparison of Control Methods under Two Different Temperatures

Purpose: The aim of this study is to achieve desired control performance for a gimbal system under model parameter change and disturbances.

Theory and Methods: In this study, PI control, Self-Tuning PI control, Integral Action LQR (IA-LQR) and Relay Sliding Mode Control Based on the Input-Output Model (RSMC-IO) structures are used as speed controllers of a gimbal system

Results: The PI controller has high performance on the known system model. Its performance decreases when the model parameters change. When the results obtained from both simulation and application of the self-tuning PI controller are analyzed, it is seen that when the system parameters change, the RLS method estimates the changed model parameters and updates the PI controller parameters according to the new system parameters. The controller performance decreases until the RLS method converges sufficiently to the new parameters. IA-LQR maintains its performance against model parameter changes both in simulation and in practice. It is observed that the IA-LQR structure has a system response without overshoot in simulation, but in practice it overshoots by 30%. It is seen that the RSMC-IO structure has a similar response to the specified underlying transfer function response both in simulation and in real system implementation. One of the biggest advantages of this control structure is that it can be used without the need to know the system model, based only on relative degree information, and it can react instantaneously to changes in model parameter changes.

Conclusion: The RSMC-IO can react instantaneously to parameter changes and maintains its performance. However, in order to increase the performance of the self-tuning PI controller, the parameters should converge sufficiently. Therefore, it can be said that the RSMC-IO structure is more advantageous against model parameter changes.



Farklı denetim yöntemlerinin bir gimbal sistemi üzerinde sınanması ve karşılaştırılması

Muharrem Mandacı^{1,2*}, Şölen Kumbay Yıldız¹

¹Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

²ASELSAN A.Ş., MGEO, Kontrol Sistemleri Tasarım Müdürlüğü, 06680, Akyurt, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Model parametre değişimi ve bozucu etkiler altında farklı denetleyicilerin gimbal denetim başarımı incelenmesi
- Özyarlamalı OTüm denetleyici yapısı ile parametre değişimi altında gimbal denetimine uyarlamalı çözüm
- Giriş çıkış modeline dayalı röle kayan kipli denetim ile gimbal denetim uygulaması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.10.2023

Kabul: 23.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1375758

Anahtar Kelimeler:

gimbal denetim,
OTüm denetim,
özyarlamalı OTüm denetim,
tümlev etkili doğrusal
karesel denetim,
giriş çıkış modeline dayalı
röle kayan kipli denetim

ÖZ

Gimbal sistemleri, faydalı yükleri taşımak ve bunları belirli bakış hatlarına doğru şekilde hizalamak için kritik mekanizmalar olarak hizmet eder. Bu sistemler için denetleyici tasarımı, dış etkenlere ve sistem parametrelerindeki değişikliklere karşı gürbüzlük gerektirir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için mevcut literatürde çeşitli kontrol yöntemleri araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında gimbal sisteminin için hız denetimi için dört farklı kontrol stratejisinin başarımı irdelenmektedir: Oransal-Tümlevsel (OTüm) denetim, Özyarlamalı OTüm Denetim, Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim (TE-DKD) ve Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle Kayan Kipli Denetim (GÇ-RKKD). Bu yaklaşımların etkinliği hem benzetimler hem de gerçek uygulamaları aracılığıyla değerlendirilmiş ve sonuçları kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Hız denetimine ek olarak, dış döngüde bir Oransal Türevsel (OTür) denetim yapısı kullanılarak ardışık konum denetimi de gerçekleştirilmiştir. Çalışma, model parametrelerindeki değişimler ve bozulmalar etkisinde bu denetim yapılarının başarımını değerlendirmeye odaklanmaktadır. RSMC-IO yönteminin bir gimbal sistemine uygulandığı bir çalışma bilgimiz dahilinde bulunmamaktadır. Bu bağlamda bu çalışma denetim stratejileri anlayışımızı geliştirmekte ve bunların pratik sonuçlarına ilişkin önemli katkılar sunmaktadır.

Testing and comparison of different control methods on a gimbal system

H I G H L I G H T S

- Exploring gimbal control performance across diverse controllers amidst parameter variations and disturbances
- Adaptive control strategies for mitigating parameter variations in gimbal systems: The self-tuning PI controller
- Innovative gimbal control utilizing relay sliding mode control based on the input-output model (RSMC-IO)

Article Info

Research Article

Received: 13.10.2023

Accepted: 23.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1375758

Keywords:

Gimbal Control,
PI control,
self tuning PI control,
integral action LQR,
RSMC-IO

ABSTRACT

Gimbal systems serve as critical mechanisms for carrying payloads and accurately aligning them with specific lines of sight. Designing controllers for these gimbal systems necessitates robustness against external disturbances and variations in system parameters. Various control methods have been explored in existing literature to address this challenge. In the scope of this study, we investigate the performance of four distinct control strategies—Proportional-Integral (PI) control, Self-Tuning PI control, Integral Action Linear-Quadratic regulator (IA-LQR), and Relay Sliding Mode Control based on the Input-Output Model (RSMC-IO)—as speed controllers for a gimbal system. We assess their efficacy through both simulation-based experiments and real-world applications, offering a comprehensive analysis of their outcomes. Beyond speed control, we extend our investigation to include cascade position control, employing a Proportional-Derivative (PD) control structure in the outer loop. Our study focuses on evaluating the performance of these diverse control structures when subjected to disturbances and variations in model parameters. To the best of our knowledge, this research marks the first attempt to apply the RSMC-IO approach to gimbal systems, enhancing our understanding of control strategies in this context and offering valuable insights into their practical implications.

1. Giriş (Introduction)

Ataletsel stabilize platformlar (Inertially Stabilized Platform - ISP), görüntüleme sensörleri, anten veya silah gibi yükleri istenen noktaya yönlendirmek ve stabilize etmek için kullanılan platformlardır. Üzerlerindeki yükleri hedef bakış hattına yönlendirerek gözetleme, hedef takibi, nişan alma, anten açısı ayarlama gibi birçok farklı görevi gerçekleştirmektedirler [1]. Bu platformlar mekanik yapı, faydalı yük ve gimbal içermektedir. Gimbal, sahip olduğu motor, açölçer ve ivmeölçer gibi alt bileşenleri kullanarak yönlendirme ve stabilizasyon işlevlerini yerine getirmektedir [2]. Tüm fiziksel sistemler gibi gimbal sistemlerinde de model hataları ve model belirsizlikleri vardır. Ayrıca çalışma şartları (çevre sıcaklığı, dış bozucular vb.) sistemin model parametrelerini değiştirebilmektedir. Klasik denetim yöntemleri bu belirsizlikler ve parametre değişimleri karşısında başarımları düşmektedir. Bu tip problemlere karşı uyarlamalı denetim ve gürbüz denetim yaklaşımları yaygın olarak tercih edilmektedir.

Özayarlama denetim, parametrelerin ayarlanabildiği bir denetleyici ve bu parametreleri kestirmek için kullanılan bir algoritmadan oluşan bir uyarlamalı denetim yöntemidir [3]. Ek olarak, belirlenen başarımlı ölçütlerini sağlamak için sistem çıkışının bir dayanak model tepkisini takip etmesi istendiğinde ortaya çıkan yapı Özayarlama Model Dayanaklı Denetim (MDD) olarak adlandırılır [4]. Sistem parametrelerindeki değişimlerden dolayı denetim başarımlarındaki düşüşü en aza indirmek için gürbüz denetim yöntemleri de kullanılmaktadır. Kayan Kipli Denetim (KKD) ve Doğrusal Karesel Denetim (DKD) gürbüz denetim yapılarına örnek olarak verilebilir. KKD yapısında sistem durumları belirlenen bir yüzey üzerinde tutulmaya çalışılır [5]. KKD durum uzayı modeli üzerinden geliştirilmiş bir yaklaşım olmakla beraber, röle denetimli sistemler söz konusu olduğunda bu denetim yöntemi giriş-çıkış modeli üzerinden de tanımlanabilmektedir [6]. Doğrusal Karesel Denetim bir optimal denetim yöntemidir. Sistem durumlarını ve denetim sinyalini içeren bir maliyet işlevini en küçük yapan K durum geri besleme kazanç matrisinin bulunması hedeflenmektedir [7].

Gimbal sistemleri üzerinde literatürde birçok farklı denetim yapısı uygulanmaktadır. Klasik Oransal-Tümlüvsel-Türevsel (OTT) denetleyicinin kullanıldığı çalışmaların [8] yanı sıra, bulanık mantık denetimin [9] kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bozuculara ve parametre değişimlerine karşı yüksek başarımlı gösteren gürbüz ve özayarlama denetim yöntemleri de gimbal sistemleri üzerinde kullanılmaktadır. Bir gimbal sistemi üzerinde DKD ile OTT denetleyicinin karşılaştırıldığı bir çalışmada DKD denetim yönteminin daha başarılı olduğu gösterilmektedir [10]. Kayan Kipli Denetim (KKD) yapısının gimbal sistemlerinde çok iyi bozucu bastırma başarımları sergilediğini gösteren bir çalışma bulunmaktadır [11]. Mekanik kütle kaçıklığı (offset) ve parametre belirsizliklerinin yüksek olduğu bir gimbal sisteminde, Özayarlama denetimin yapılarının başarımlarının yüksek olduğunu gösteren bir çalışma [12] mevcuttur. Bir başka çalışmada ise en küçük kareler (EKK) yöntemi

kullanılarak kestirilen sistem modelinin tersi kullanılarak denetim yapısının bozucu bastırma başarımlarının arttığı görülmektedir [13].

Bu çalışmada, dört farklı yaklaşım kullanılarak bir gimbal sisteminin hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Hem benzetimler hem de gerçek sistem uygulamaları aracılığıyla, OTüm, Özayarlama OTüm, DKD ve GÇ-RKKD yaklaşımlarının sistem parametreleri ve çalışma koşullarında meydana gelen değişimler karşısında başarımları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Son olarak, Özayarlama OTüm ve GÇ-RKKD yöntemlerinin hız denetleyicisi olarak belirlendiği iki adet ardışık konum denetimi uygulaması gerçekleştirilerek başarımları irdelenmiştir. OTüm Denetim, parametre değişimleri karşısında istenen denetim başarımlarını koruyamazken, Özayarlama OTüm yaklaşımı içinde bulunan parametre kestirimi mekanizması sayesinde denetleyici parametrelerini güncelleyerek istenen başarımları sağlayabilmiştir. Özellikle ani parametre değişimlerinde gürbüz denetim yaklaşımlarının istenen başarımları özayarlama yaklaşıma göre daha hızlı tesis edebildiği gözlenmiştir. Bu çalışmada incelenen gürbüz denetim yöntemlerinden GÇ-RKKD hem yüksek denetim başarımları hem de sistem modelinin bilinmesine gerek duymaması ve yapısı gereği uygulanmasının kolaylığı ile öne çıkmıştır. Çok sayıda tekniğin gerçek bir sistem üzerinde ve farklı çalışma koşullarında karşılaştırılmalı olarak sınıandığı çalışmalara literatürde sık rastlanılmaktadır. Bunun yanı sıra, GÇ-RKKD yaklaşımının kullanıldığı benzer bir çalışma literatürde bilginiz dahilinde bulunmamaktadır.

2. Yöntem (Methodology)

2.1. Model Uyumlama ile OTüm Denetleyici (Model Matching with PI Controller)

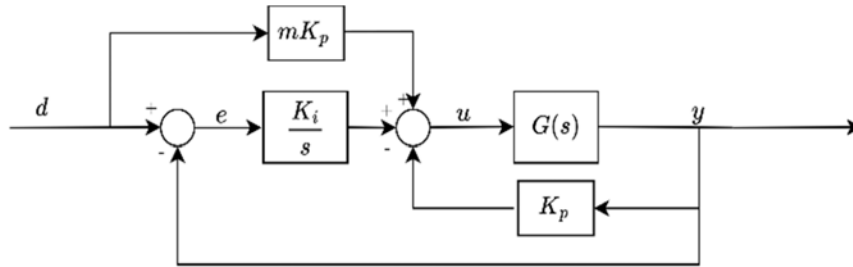
Bir sistemin OTüm denetleyici [14] ile denetlendiği yapının öbek çizeneği Şekil 1'de verilmektedir. Burada $G(s)$ denetlenen sistemin aktarım işlevini, d dayanak girişini, u denetim sinyalini, y sistem çıkışını, e hata sinyalini, m , K_p ve K_i ise OTüm denetleyici parametrelerini ifade etmektedir. Denetim yasası Eş. 1'deki gibidir. $G(s)$, Eş. 2'de gösterildiği gibi birinci derece bir aktarım işlevi olarak kabul edildiğinde, sistemin kapalı döngü aktarım işlevi, sistem ve denetleyici parametreleri cinsinden Eş. 3'teki gibi ifade edilir.

$$u = K_p(md - y) + K_i \frac{1}{s}(d - y) \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{b}{s+a} \quad (2)$$

$$T(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{K_p b m s + K_i b}{s^2 + (K_p b + a)s + K_i b} \quad (3)$$

Başarımlı ölçütleri Eş. 4'teki karakteristik denklem ($\Delta_d(s)$) ile verildiğinde $T(s)$ aktarım işlevinin paydası ile $\Delta_d(s)$ eşitlenerek denetleyici parametreleri K_p , K_i Eş. 5'teki gibi hesaplanabilmektedir.



Şekil 1. OTüm denetleyici (PI Controller)

K_p ve K_i parametreleri seçildiğinde Eş. 6 ile gösterilen noktada bir kapalı döngü sıfırı oluşmaktadır. m parametresi yardımıyla bu sıfırın yeri ayarlanabilir ve model uyumlama yapılabilir.

$$\Delta_d(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4)$$

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n - a}{b} \quad K_i = \frac{\omega_n^2}{b} \quad (5)$$

$$s = -\frac{K_i}{mK_p} \quad (6)$$

2.2. Özyayarlamalı OTüm Denetim (Self-Tuning PI Control)

Sistem parametrelerinin yinelemeli olarak kestirildiği ve bu parametrelere göre denetleyici parametrelerinin güncellendiği yaklaşımlar özyayarlamalı denetim olarak adlandırılmaktadır [15]. Özyinelemeli en küçük kareler (EKK) yaklaşımı, özellikle kesikli zamanda parametre kestirimi için sıklıkla faydalanılan yöntemlerden biridir. Buna karşılık, bu bölümde Sürekli Zaman Özyinelemeli EKK (SZÖEKK) yöntemi [16] ve beraberinde Özyayarlamalı OTüm denetim yapısı anlatılmaktadır. Sistem modeli Eş. 7 ile gösterildiği gibidir. $Y(s)$ sistem çıkışı, $U(s)$ ise sistem girişini ifade etmektedir. $E(s)$ ise sisteme etki eden gürültü, bozucu, modelleme hatası gibi belirsizleri ifade eden bir hata terimidir. Sistem çokterimlileri $A(s)$ ve $B(s)$ Eş. 8 ve 9 ile gösterilmektedir. Eş. 7'de verilen sistem modeli giriş ve çıkış süzgeçlenmesiyle Eş. 10 ile gösterildiği gibi ifade edilebilir. Burada $C(s)$ tasarımcı tarafından seçilen süzgeç çokterimlisidir ve derecesi $A(s)$ çokterimlisi ile aynı olmalıdır. Süzgeç çokterimlisinin seçimi kestirimin başarımı etkilemektedir. $C(s)$, istenilen frekans aralığında sistem ile model uyumunu sağlayacak biçimde seçilir.

$$A(s)Y(s) = B(s)U(s) + E(s) \quad (7)$$

$$A(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 \quad (8)$$

$$B(s) = b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0 \quad (9)$$

$$Y(s) = B(s)\frac{U(s)}{C(s)} + [C(s) - A(s)]\frac{Y(s)}{C(s)} + \frac{E(s)}{C(s)} \quad (10)$$

Eş. 10 doğrusal parametre yapısında yeniden düzenlendiğinde Eş. 11 elde edilmektedir. Parametre vektörü θ ve veri vektörü $\varphi(t)$ sırasıyla Eş. 12 ve 13'te verilmiştir.

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + e_f(t), \quad E_f(s) = \frac{E(s)}{C(s)} \quad (11)$$

$$\theta = [b_m \quad b_{m-1} \quad \dots \quad b_0 \quad c_{n-1} - a_{n-1} \quad \dots \quad c_0 - a_0]^T \quad (12)$$

$$\varphi_u^T(t) = \left[\frac{d^m}{dt^m} u_f(t) \quad \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} u_f(t) \quad \dots \quad u_f(t) \right]$$

$$\varphi_y^T(t) = \left[\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y_f(t) \quad \frac{d^{n-2}}{dt^{n-2}} y_f(t) \quad \dots \quad y_f(t) \right] \quad (13)$$

$$\varphi^T(t) = [\varphi_u^T(t) \quad \varphi_y^T(t)], \quad U_f(s) = \frac{U(s)}{C(s)}, \quad Y_f(s) = \frac{Y(s)}{C(s)}$$

Parametre vektörünü kestirmek için kullanılan yinelemeli denklemler Eş. 15 ve 16 ile verilmektedir [17]. Eşitliklerde yer alan $S(t)$ bilgi matrisiyken, β sayılı unutmaya çarpanıdır. Bilgi matrisinin ilk değeri, α sıfıra yakın küçük bir sayı ve I uygun boyutlu birim matris olmak üzere Eş. 14'te gösterildiği gibi seçilmektedir.

$$S_0 = \alpha I \quad (14)$$

$$S(t') = e^{-\beta T} S(t) + \int_t^{t'} e^{-\beta(t'-\tau)} \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau, \quad t' = t + T \quad (15)$$

$$\hat{\theta}(t') = \hat{\theta}(t) + S^{-1}(t') \int_t^{t'} e^{-\beta(t'-\tau)} \varphi(\tau) [y(\tau) - \varphi^T(\tau) \hat{\theta}(\tau)] d\tau \quad (16)$$

Özyayarlamalı OTüm denetimin gerçekleştirildiği yapının öbek çizeneği Şekil 2 ile verilmektedir. Bu şekilde u denetim sinyalini, y sistem çıkışını, d dayanak girişini ve e hata sinyalini ifade etmektedir. Bu yapıda özyinelemeli EKK yöntemi model parametrelerini kestirmektedir ve denetleyici parametreleri her örnekleme zamanında Eş. 5 kullanılarak güncellenmektedir [18].

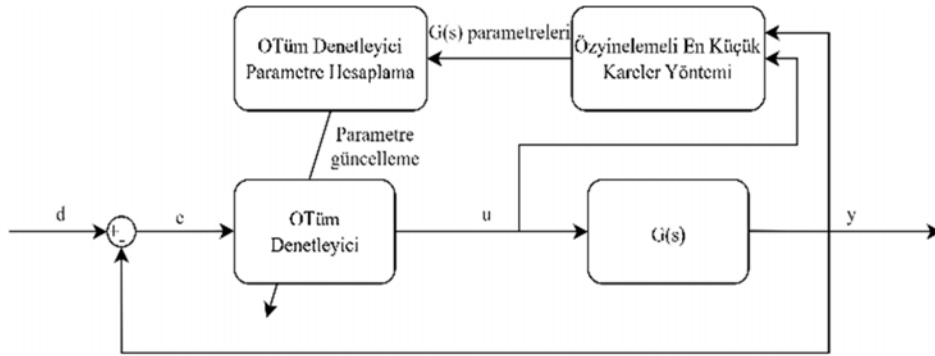
2.3. Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim (Linear Quadratic Control with Integral Action)

Doğrusal Karesel Denetim, optimal denetim yöntemlerinden biridir. Seçilen bir maliyet işlevini en küçük yapan durum geri besleme kazanç matrisinin bulunması amaçlanmaktadır. Tek giriş çıkışlı açık döngü bir sistemin durum uzayı gösterimi A durum uzayı matrisi, B giriş matrisi, C çıkış matrisi ve D ileri besleme matrisi olmak üzere Eş. 17 ile gösterilmektedir. Bu eşitliklerde x dinamik sistem durum değişkenlerini, y sistem çıkışını ve u sistem girişini ifade etmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du \quad (17)$$

Eş. 18 ile verilen denetim yasası kullanıldığında, kapalı döngü durum uzayı modeli Eş. 19 ile gösterildiği gibi elde edilir. Durum geri besleme kazanç matrisi K 'nın seçimi ile sistem kapalı döngü cevabı bir başarımlı ölçütünü sağlayacak şekilde belirlenebilmektedir. K matrisinin eniyi seçimi için kullanılacak maliyet işlevi Eş. 20 ile verilmektedir. Bu eşitlikte yer alan bakışimli pozitif yarı tanımlı Q matrisi ve bakışimli pozitif tanımlı R matrisi başarımlı ağırlık matrisleridir.

$$u = -Kx \quad (18)$$



Şekil 2. SZÖEKK Yöntemi ile Özyayarlamalı OTüm Denetleyici (Self-Tuning PI Controller with CRLS)

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (19)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (20)$$

Maliyet işlevini en küçük yapan K kazanç matrisi Eş. 21 ile gösterilmektedir. P matrisi Eş. 22 ile verilen cebirsel matris Riccati denklemi çözülerek bulunmaktadıdır.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (21)$$

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (22)$$

DKD kullanıldığında sistem cevabında oluşabilecek kalıcı durum hatasını gidermek amacıyla TE-DKD yapısı kullanılmaktadır [19]. TE-DKD ile elde edilen denetim sisteminin genel yapısı Şekil 3 ile verilmektedir.

Şekil 3'te görüldüğü üzere, DKD kullanıldığında oluşabilecek kalıcı durum hatasını gidermek için sistem durum uzayı modeline tümler terimi eklenmektedir. Eklenen tümler terimi sonrası elde edilen genişletilmiş sistem modeli $(\tilde{x}, \tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D})$ Eş. 23 ve 24 ile, \tilde{Q} ve \tilde{R} matrisleri ise Eş. 25 ile verilmektedir. Q_I , hatanın tümlerine verilen ağırlık çarpanını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -C & \vdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \vdots \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} d \quad (23)$$

$$y = [C:0] \begin{bmatrix} x \\ \vdots \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (24)$$

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} Q & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & Q_I \end{bmatrix}, \tilde{R} = R \quad (25)$$

Genişletilmiş durum uzayı modeli matrisleri ve ağırlık matrisleri, Eş. 18 ve 19'da yerine konularak \tilde{K} matrisi (Eş. 26) ve denetim sinyali (Eş. 27) hesaplanmaktadır.

$$\tilde{K} = [K_x \ K_i] \quad (26)$$

$$u(t) = -K_x x(t) - K_i \int_0^t (d - y(t)) dt \quad (27)$$

2.4. Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim (Relay Sliding Mode Control Based on the Input-Output Model)

Bu bölümde giriş çıkış modeli ile tanımlanan röle ile kayan kipli denetim yöntemi anlatılmaktadır. GÇ-RKKD basit ancak etkili ve gürbüz bir denetim yöntemidir. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılabilir. Düşük hesaplama gücü gerektirdiğinden uygulaması oldukça kolaydır. GÇ-RKKD yöntemi, sistem durumlarını ve modelini bilmeye gerek duymadan, yalnızca giriş çıkış modelinin görelî derecesi dikkate alınarak gürbüz denetim gerçekleştirilebilmesini sağlar. Geleneksel KKD yaklaşımlarına benzer şekilde GÇ-RKKD yöntemi de ölçüm gürültüsüne karşı hassastır. Bunun yanı sıra en küçük evrelî olmayan sistemlerin denetiminde kullanılmayacağı önceki çalışmalarda gösterilmiştir [20]. GÇ-RKKD genel yapısı Şekil 4 ile gösterilmektedir [20]. $G(s)$ denetlenen sistemin aktarım işlevini, $M(s)$ dayanak model aktarım işlevini, d dayanak girişini, e_r röle girişini, u denetim sinyalini, y çıkış sinyalini ve son olarak ϕ model aktarım işlevinin tersi ile filtrelenmiş çıkış sinyalini göstermektedir.

Eş. 28 ile r röle genliği olmak üzere röle çıkış sinyali gösterilmektedir. Kayan kipi oluşması için gerek koşul Eş. 29 ile verilmektedir. Bu koşul sağlandığı zaman $e_r(t) = 0$ olur ve sistem kayma evresine geçer. Kayan kipi oluşabilmesi için Eş. 31 ile verilen görelî derece koşulunun sağlanması gerekmektedir [21]. Bir aktarım işlevinin kutup ve sıfır sayıları arasındaki fark görelî derece (ρ) olarak adlandırılmaktadır. Kayma evresindeki sistemin kapalı döngü çıkışı Eş. 30 ile gösterilmektedir ve bu eşitlikte kayan kipte çalışan sistemin çıkışının sadece model ($M(s)$) ile belirlendiği görülmektedir. Sistem çıkışında kalıcı durum hatasının oluşmaması için $M(0) = 1$ olmalıdır.

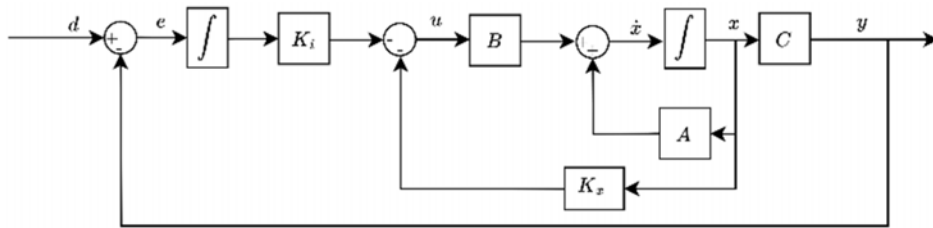
$$u = \begin{cases} r, & e_r \geq 0 \\ -r, & e_r < 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$e_r(t) \dot{e}_r(t) < 0 \quad (29)$$

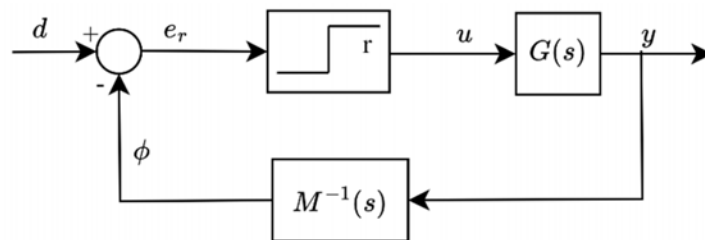
$$y = Md \quad (30)$$

$$\rho(M^{-1}G) = 1 \quad (31)$$

Hata sıfır etrafındayken röle çıkışında meydana gelen sık değişimlerden dolayı denetim sinyali de sık değişmektedir ve



Şekil 3. Tümler Etkili Doğrusal Karesel Denetim Yapısı (Linear Quadratic Controller with Integral Action)



Şekil 4. Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim Yapısı (Relay Sliding Mode Control Based on the Input Output Model)

çatırdamaya neden olmaktadır. Ayrıca Eş. 31'de verilen görelî derece şartı her zaman sağlanamayabilir. Röle elemanından önce ve sonra derecesi uygun seçilmiş süzgeçler yerleştirilerek hem görelî derece koşulunun sağlanması hem de röle çıkışının yumuşatılması sağlanabilmektedir [21]. $E(s)$ ve $F(s)$ süzgeçlerinin eklendiği bu genişletilmiş yapı Şekil 5 ile verilmektedir. Bu yapıda kayan kipin gerçekleşebilmesi için gerekli görelî derece koşulu Eş. 32 ile verilmektedir. $F(s)$ süzgeci eklendiğinde röle çıkışı doğrudan sisteme uygulanmadığından, röle genliği sistemin kullanabildiği en büyük denetim sinyalinden yüksek seçilebilir. Kapalı döngü sistem tepkisinin sabit bir dayanak girişini takip etmesi istendiğinde, röle genliğinin büyüklüğü Eş. 33 ile verilen şartı sağlayacak şekilde seçilmelidir, aksi takdirde $e_r(t)$ sifıra ulaşamaz ve kayan kip elde edilemez.

$$\rho(EM^{-1}GF) = 1 \quad (32)$$

$$|r| > \frac{|d|}{|G(0)|} \quad (33)$$

3. Benzetim Çalışmaları (Simulation Studies)

3.1. Hız Denetimi Benzetim Sonuçları (Speed Control Simulation Results)

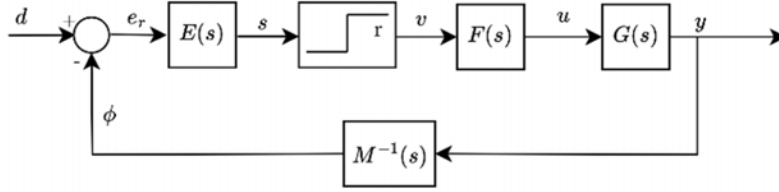
Bu bölümde Bölüm 2'de anlatılan denetleyiciler, Eş. 34 ile gösterilen birinci derece kararlı sistem modeli üzerine benzetim ortamında

uygulanmaktadır. Benzetim çalışması için durulma süresi 150 milisaniye ve en büyük aşma %0 olacak şekilde başarımlı ölçütleri belirlenmiştir. Bu başarımlı ölçütlerini sağlayan ikinci derece karakteristik denklem parametreleri $\omega_n = 40$ ve $\zeta = 1$ olarak hesaplanmaktadır. Benzetimin örnekleme zamanı 0.5 milisaniyedir. Yöntemlerin ani parametre değişiklikleri karşısında başarımlı karşılaştırabilmek amacıyla benzetimin $t = 1$ s anında a parametresi 2,85'ten 4,85'e yükselirken, b parametresi 33'ten 13.2 değerine düşmektedir. Uygulamada kullanılan ivmeölçerin dokümanında yer alan çıkış gürültüsü miktarı 0.06 %/sn olarak verilmektedir. Yapılan benzetime bu çıkış gürültüsü de eklenmektedir, böylece benzetim sonuçlarının gerçek sistem sonuçlarına daha yakın bir çıktı vermesi amaçlanmaktadır. Bu bölümde yer alan şekillerde birinci grafik dayanak girişini (d), istenen sistem çıkışını (y_i) ve sistem çıkışını (y) göstermektedir. İkinci grafik denetim sinyalini (u) ve üçüncü grafik hatayı (e_y) göstermektedir.

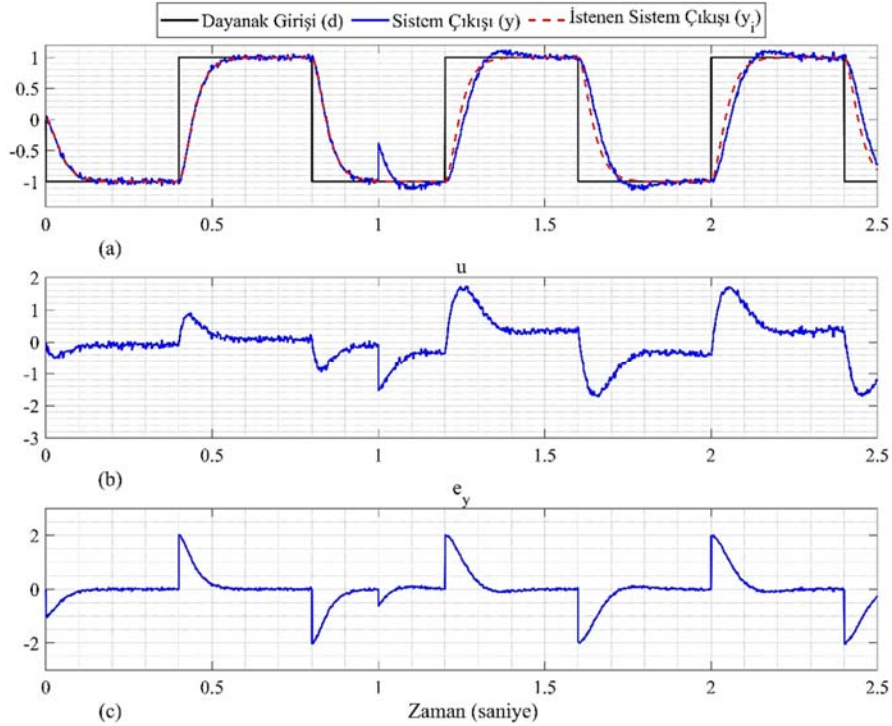
$$G_1(s) = \frac{b}{s+a} = \frac{33}{s+2,85} \quad (34)$$

3.1.1. OTüm denetleyici ile benzetim sonuçları (PI controller simulation results)

Eş. 5 ile OTüm denetleyici parametreleri $K_p = 2,34$, $K_i = 48,48$ olarak hesaplanmaktadır. Aşmasız bir tepki istendiğinden denetleyiciye ait m parametresi 0 (sıfır) seçilmiştir. Benzetime ait sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6a'da görüldüğü gibi, OTüm



Şekil 5. Genişletilmiş GÇ-RKKD Yapısı (Extended RSMC-IO Structure)



Şekil 6. $G_1(s)$ için OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları (PI Simulation Results for $G_1(s)$)

denetleyicisinin $G_1(s)$ modeli için ürettiği cevap aşmasızdır ve durulma süresi yaklaşık 150 milisaniyedir. Sistem parametrelerindeki ani değişimden sonra aşma miktarının %5'e yükseldiği ve durulma süresinin 170 milisaniyeye çıktığı görülmektedir. Şekil 6b incelendiğinde parametre değişiminden sonra denetleyici daha büyük denetim sinyali üretmesine rağmen cevabın yavaş kaldığı ve aşmalı olduğu anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle, istenen denetim başarımı sağlanamamaktadır.

3.1.2. Özayarlama OTüm denetleyici ile benzetim sonuçları (Self-tuning PI controller simulation results)

Şekil 7 ile benzetim sonuçları gösterilmektedir. Bir önceki şekildeki grafiklere ilaveten Şekil 7d ve Şekil 7e kestirilen sistem modeli parametrelerini (\hat{a} ve \hat{b}) göstermektedir. Denetleyici parametreleri, başarımlı ölçütlerine göre belirlenen ζ , ω_n değerleri ve kestirilen model parametreleri \hat{a} ve \hat{b} kullanılarak, Eş. 5 ile hesaplanmaktadır. Tablo 1 ile kestirici için kullanılan parametreler verilmektedir. İki farklı unutma çarpanı (β_1 ve β_2) ile benzetim yapılarak unutma çarpanının etkisi de incelenmektedir. Şekil 7a ve Şekil 7b incelendiğinde hem parametre değişimi öncesinde hem de sonrasında cevabın aşmasız ve durulma süresinin 150 milisaniye olduğu görülmektedir ve başarımlı ölçütleri sağlanmaktadır. Parametre değişiminden sonra parametre

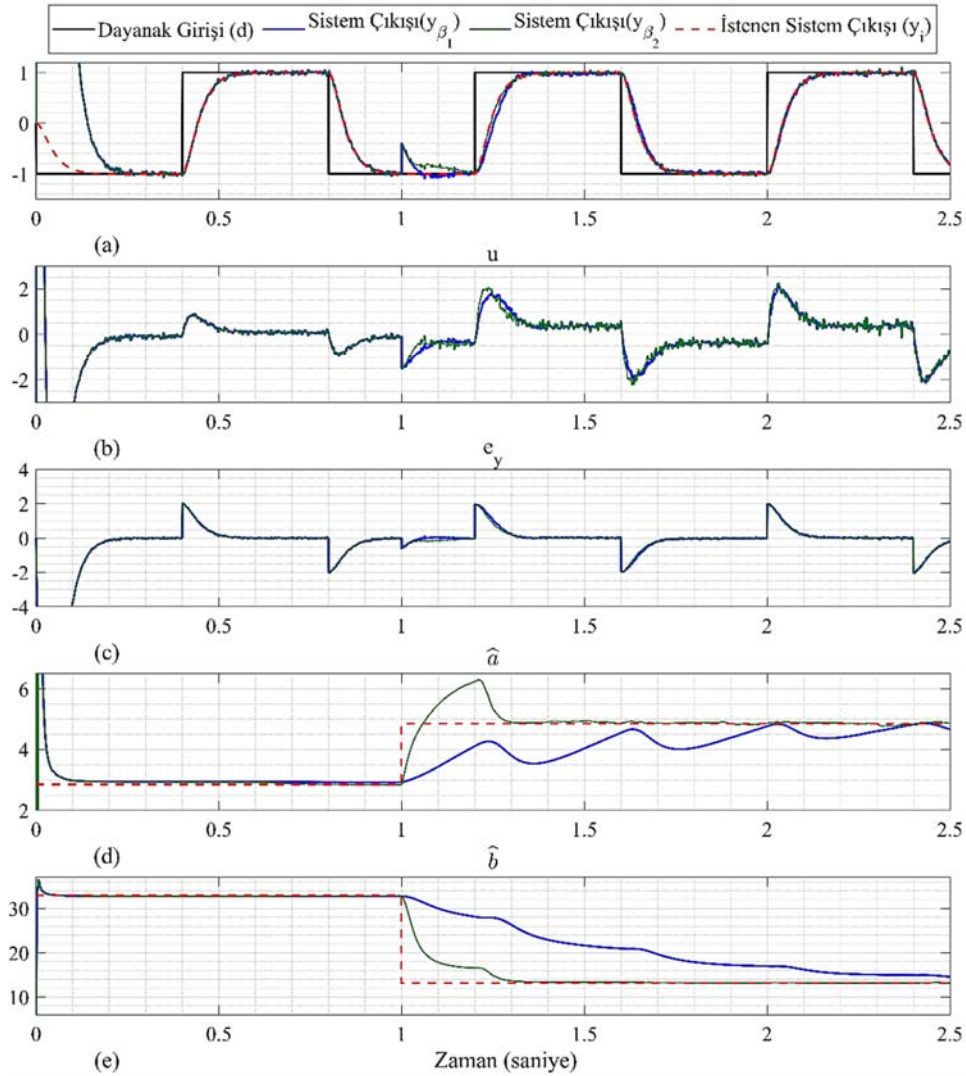
yakınsaması gerçekleşene kadar denetleyici yavaş cevap vermektedir. Parametre yakınsaması gerçekleştikten sonra sistem cevabı parametre değişimi öncesindeki sistem cevabına benzemektedir. Şekil 7d ve Şekil 7e incelendiğinde unutma faktörünün etkisi görülebilir. $\beta_1 = 0$ için eski değerler unutulmamaktadır. Zaman ilerledikçe parametre kestirimi eski değerlerin etkisinde kalmaktadır. Bu nedenle $t = 1$ s zamanından sonra β_2 değerini kullanan kestirim gerçek değerlere daha hızlı yakınsamaktadır. SZÖEKK yönteminde unutma çarpanı seçiminin doğrudan parametre yakınsama hızını etkilediği görülmektedir.

Tablo 1. SZÖEKK Parametreleri (CRLS Parameters)

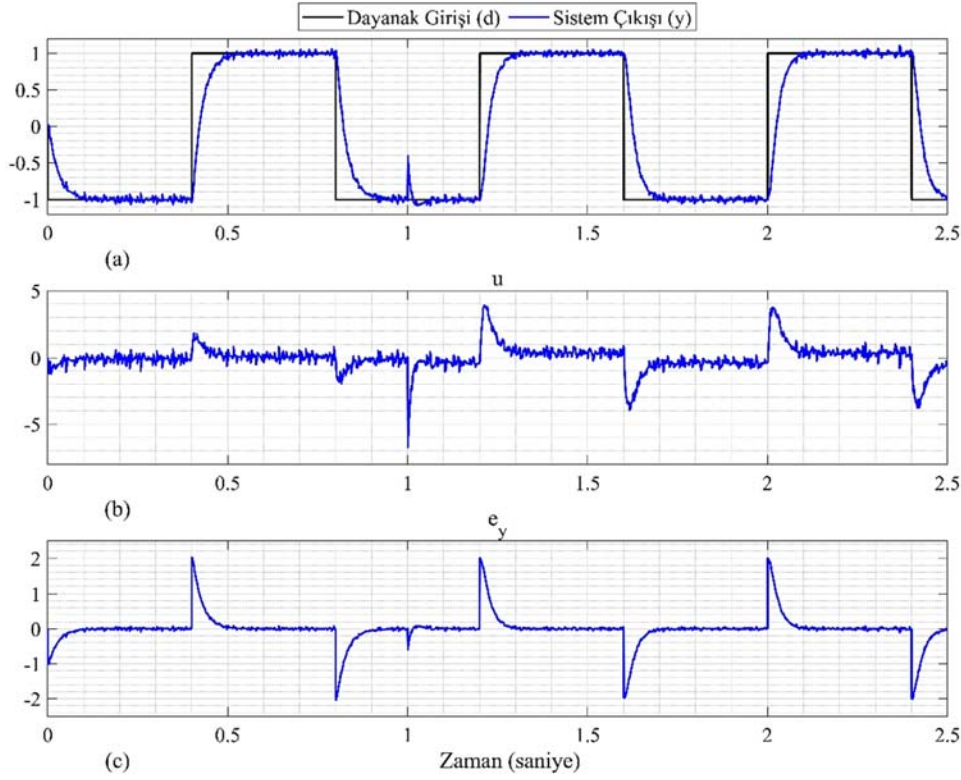
α	β_1	β_2	$\hat{\theta}_0$	C(s)
0.10^{-7}	0	7	$[0.01 \ 0.01]^T$	$s + 10$

3.1.3. TE-DKD ile benzetim sonuçları (LQR-IA simulation results)

Şekil 8 ile benzetim sonucu elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. \tilde{Q} ve \tilde{R} matrisleri Eş. 35 ile verilmektedir. Eş. 36, hesaplanan durum geri besleme kazanç matrisidir. Şekil 8a incelendiğinde model parametre değişimi meydana geldiğinde TE-DKD yönteminin cevabının parametre değişiminden önceki cevaba benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 7. $G_1(s)$ için Özayarlama OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları (Self-Tuning PI Simulation Results for $G_1(s)$)



Şekil 8. $G_1(s)$ için TE-DKD ile Benzetim Sonuçları (IA-LQR Simulation Results for $G_1(s)$)

Parametre değişimi öncesi ve sonrasında sistem cevabı aşmasız ve durulma süresi 140 milisaniyedir. Şekil 8b'de görüldüğü üzere denetim sinyali büyüklüğü artmaktadır.

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1500 \end{bmatrix}, \bar{R} = 0,01 \quad (35)$$

$$\bar{K} = [11,02 \quad -387,3] \quad (36)$$

3.1.4. GÇ-RKKD ile benzetim sonuçları (RSMC-IO simulation results)

Benzetim sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 9 ile gösterilmektedir. Şekilde yer alan dördüncü grafik hata sinyalini gösterirken, beşinci grafik röle girişini göstermektedir. Dayanak aktarım işlevi $M(s)$ Eş. 37 ile verilirken, röle sonrasına eklenen $F(s)$ süzgeci Eş. 38 ile verilmektedir. Rölenin genliği 30 birimdir. Şekil 9a incelendiğinde parametre değişimi öncesi ve sonrasında durulma süresi ve aşma başarımlarını sağladığı gözlenmektedir. Şekil 9b ve Şekil 9c incelendiğinde parametre değişimi sonrası denetim sinyalinin büyüklüğünün arttığı görülmektedir.

$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 80s + 1600} \quad (37)$$

$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s+25)^2} \quad (38)$$

3.2. Konum Denetimi Benzetim Sonuçları (Position Control Simulation Results)

Bu bölümde sistem modeli Eş. 34 ile verilen sistemin konum denetimi, benzetim ortamında ardışık konum denetimi ile gerçekleştirilmiştir. İç döngüdeki hız denetleyici olarak bir önceki bölümde yer alan Özayarlamalı OTüm denetim ve GÇ-RKKD denetim yapıları seçilmiştir. Dış döngüde konum denetleyicisi olarak

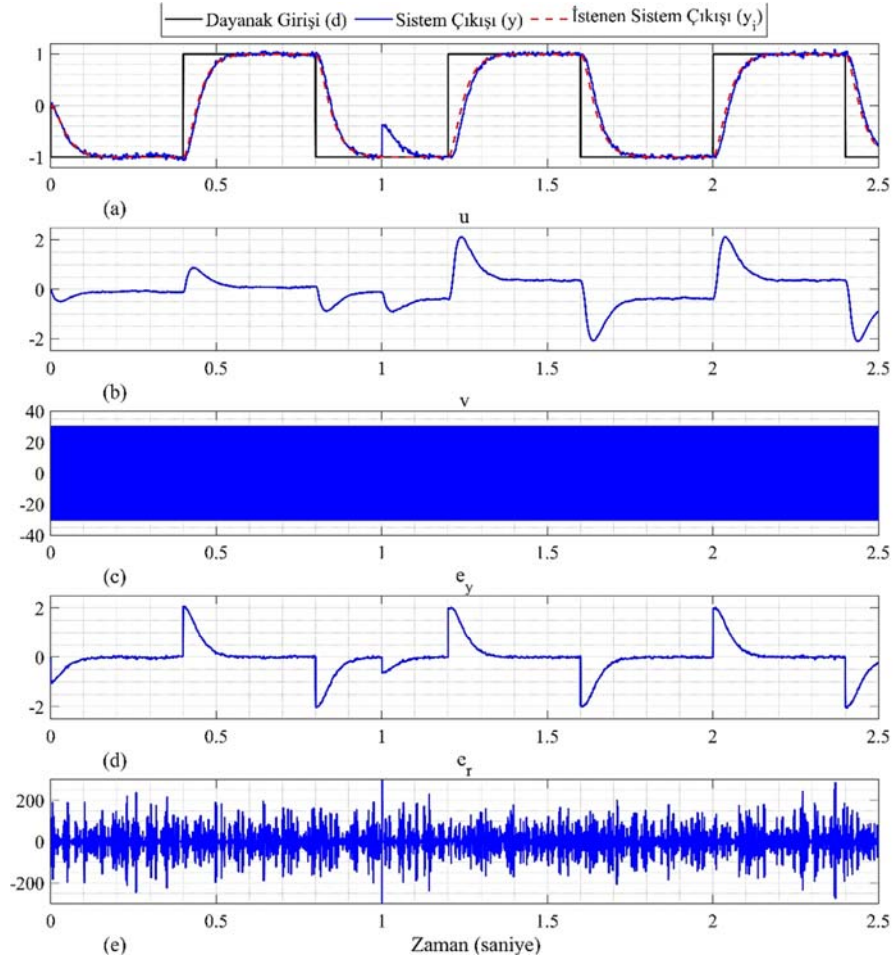
OTür (Oransal-Türevsel) denetleyici ($C(s) = K_p + K_d s$) kullanılmaktadır. OTür denetleyici parametreleri kutup atama yaklaşımı kullanılarak $K_p = 7,45$ ve $K_d = 0,035$ olarak hesaplanmıştır. Önceki benzetimlere benzer şekilde sistem parametrelerindeki değişikliklerin etkisi burada da irdelenmiştir. Bu bağlamda, $t = 1,25$ s anında Eş. 34'te verilen aktarım işlevinin a parametresi 2,85'ten 5,7'ye yükselirken, b parametresi 33'ten 16,5 değerine düşmektedir. Şekil 10 ile bu bölümde kullanılan ardışık konum denetim yapısı gösterilmektedir. Bu bölümde verilen Şekil 11 ve Şekil 13'te yer alan birinci grafikte dayanak girişi (d) ve sistem çıkışı (y_d) yer almaktadır. İkinci grafikte denetim sinyali (u) ve üçüncü grafikte dayanak girişi ve sistem çıkışı arasındaki hata (e_d) gösterilmektedir.

3.2.1. İç döngü: Özayarlamalı OTüm denetim (Inner loop: Self-Tuning PI controller)

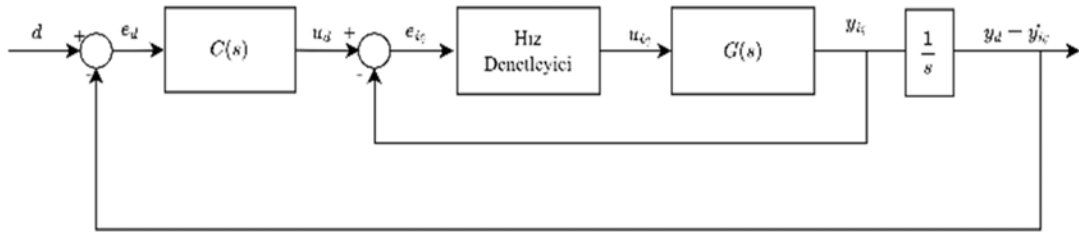
Tablo 2'de SZÖKK yönteminin parametreleri yer almaktadır. Şekil 11 ile konum döngüsü sonuçları verilmektedir. Şekil 12 ile Özayarlamalı OTüm hız denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde dördüncü ve beşinci grafikte SZÖEKK yönteminin kestirdiği model parametrelerinin (\hat{a} ve \hat{b}) zamana bağlı grafiği yer almaktadır. Şekil 11 incelendiğinde birinci dayanak sinyali değişiminde konuma aşmalı oturduğu, daha sonraki dayanak sinyali değişiminde parametre yakınsamasının gerçekleşmesi ile birlikte bu aşma ortadan kalkmaktadır. Şekil 11'de parametre değişiminin konum denetimi üzerinde etkisinin az olduğu görülmektedir. Şekil 12'de yer alan grafikte SZÖEKK yöntemi parametre değişimi sonrası $t = 1,7$ s anında yeni model parametrelerine yakınsamaktadır.

Tablo 2. Ardışık Konum Denetimi için SZÖEKK Parametreleri (CRLS Parameters for Cascade Position Control)

α	β	$\hat{\theta}_0$	$C(s)$
10^{-7}	7	$[0.01 \ 0.01]^T$	$s + 10$



Şekil 9. $G_1(s)$ için GÇ-RKKD ile Benzetim Sonuçları (RSMC-IO Simulation Results for $G_1(s)$)



Şekil 10. Ardışık Konum Denetim Öbek Çizeneği (Cascade Position Control Block Diagram)

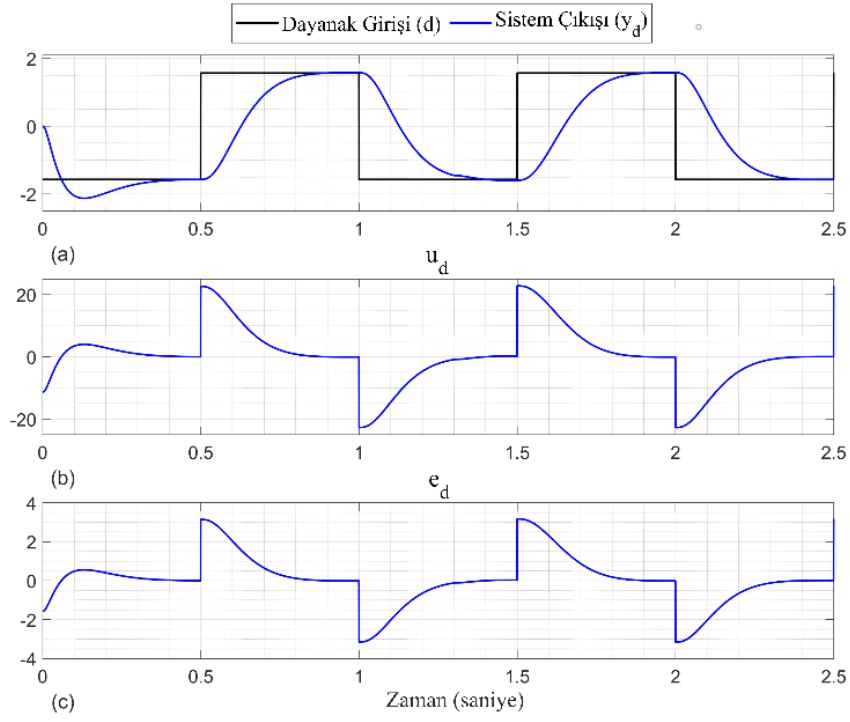
3.2.2. İç döngü: GÇ-RKKD (Inner loop: RSMC-IO)

İç döngüde GÇ-RKKD yapısının kullanıldığı ardışık konum denetiminin konum döngüsü ve hız döngüsü sonuçları sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14 ile gösterilmektedir. Şekilde yer alan üçüncü grafikte röle girişi, dördüncü grafikte ise sistem çıkışı hata grafiği yer almaktadır. Son olarak beşinci grafikte röle girişi yer almaktadır. Dayanak aktarım işlevi $M(s)$ Eş. 37 ile verilirken, röle sonrasına eklenen $F(s)$ süzgeci Eş. 38 ile verilmektedir. $M(s)$ seçilirken, Bölüm 3.1'de belirlenen istenen kapalı döngü sistem başarımlı ölçütleri olan $\omega_n=40$ ve $\zeta=1$ parametreleri dikkate alınmış ve model aktarım işlevinin kazancının 1 olması sağlanmıştır. Şekil 13 incelendiğinde, Özyarlamalı OTüm denetleyiciden farklı olarak ilk dayanak sinyali değişiminde de konum denetiminin aşmasız cevap verdiği görülmektedir. Parametre değişiminin etkisi grafiklerde

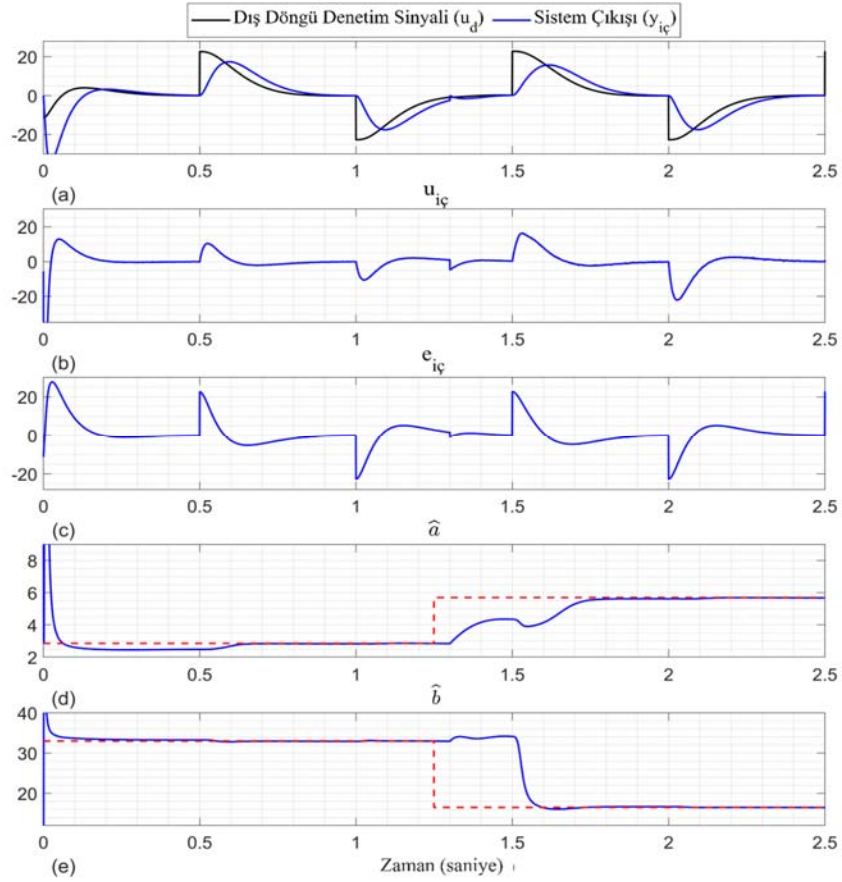
gösterilmektedir. Şekil 13a incelendiğinde hız denetim başarımının parametre değişimi öncesi ve sonrasında benzer olduğu, Şekil 13b ile görüleceği üzere parametre değişimi sonrası denetim sinyali büyüklüğünün arttığı anlaşılmaktadır.

4. Uygulama Sonuçları (Application Results)

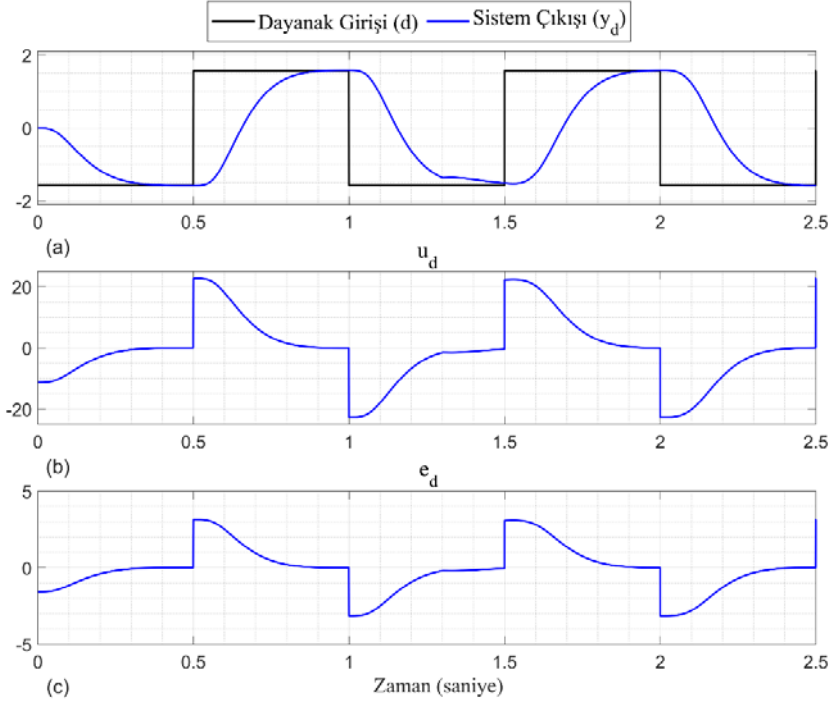
Askeri operasyonlarda kullanılan gimbal sistemlerinin en zorlu hava şartlarında dahi çalışması beklenmektedir. Özellikle bir gimbal sistemi çevre sıcaklığının sıfırın altında olduğu bir ortamda çalışırken, sistemin sürtünmesi ciddi miktarda artmaktadır. Bu nedenle sistem modeli değişmektedir. Bu bölümde hem farklı denetim yapılarının denetim başarımı hem de ardışık konum denetimi sonuçları incelenmektedir. Ardışık konum denetiminin iç döngüsünde Özyarlamalı OTüm denetim ve GÇ-RKKD yapısı kullanılmaktadır.



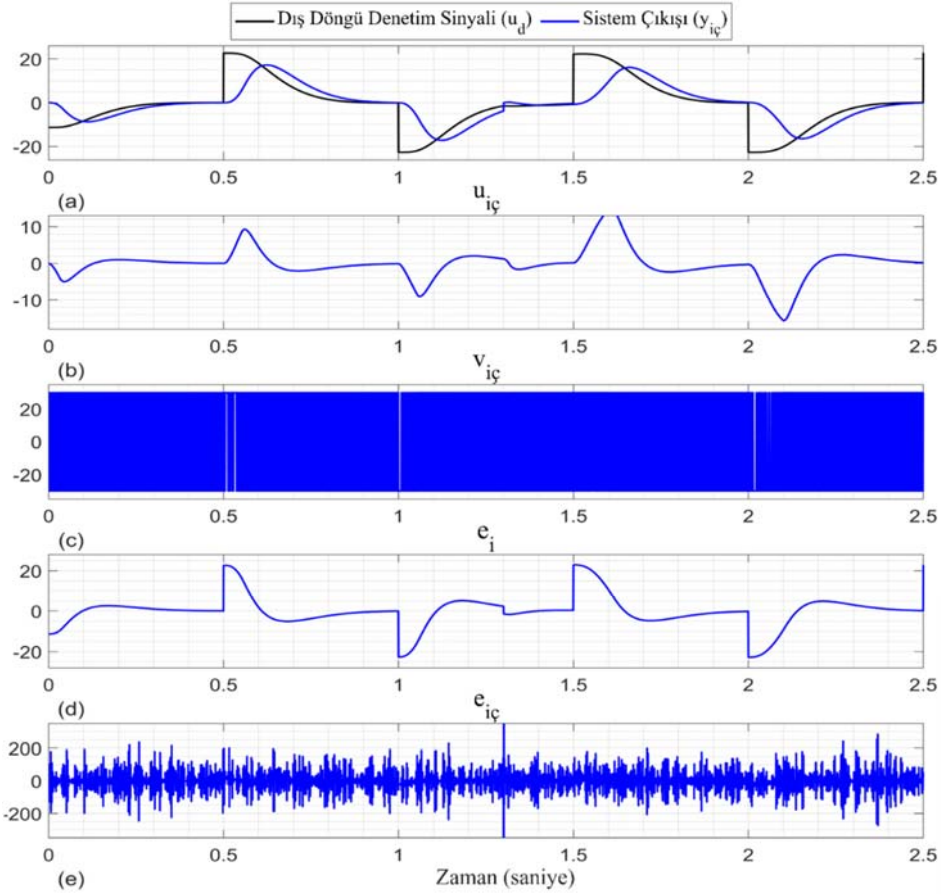
Şekil 11. $G_1(s)$ için Konum Denetimi – İç Döngü: Özayarlama OTüm (Position Control for $G_1(s)$ – Inner Loop: Self Tuning PI)



Şekil 12. $G_1(s)$ için Özayarlama OTüm Hız Denetimi (Self Tuning PI Speed Control for $G_1(s)$)



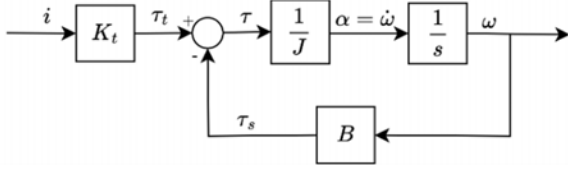
Şekil 13. $G_1(s)$ için Konum Denetimi - GÇ-RKKD (Position Control for $G_1(s)$ – GÇ-RKKD)



Şekil 14. $G_1(s)$ için GÇ-RKKD Hız Denetim (GÇ-RKKD Speed Control for $G_1(s)$)

4.1. Uygulamada Kullanılan Sistemin Matematiksel Modeli (Mathematical Model of the System Used in the Application)

Kullanılan gimbal sistemi bir eksen, eksenin hareketini sağlayan bir motor, eksenin konumunu ölçen bir açıölçer algılayıcı, eksenin açısal dönüş hızlarını algılayan bir dönüölçer algılayıcı ve faydalı yükten oluşmaktadır. Motora uygulanan akım (i) sonucu motorun ürettiği tork (τ) değeri $\tau = K_t i$ eşitliği ile hesaplanmaktadır ve K_t motor tork katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Motor akımı denetlenerek motorun ürettiği tork değiştirilebilir. Motor akım döngüsü kapalı döngü bant genişliği, hız döngüsü bant genişliğinin yaklaşık 10 katı olacak şekilde, 1 kHz olarak tasarlanmaktadır ve bu nedenle akım kapalı döngü aktarım işlevi $T_{akım}(s) \approx 1$ olarak kabul edilmektedir. Tork, kütleyi ataletyle ilişkili olarak ($\tau = J\alpha$) döndürmektedir. Gimbal ekseninde yer alan bir diğer etki olan T_s dinamik sürtünme değeri, B sürtünme katsayısı ve ω açısal hız olmak üzere $T_s = B\omega$ eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır [22]. Bu bilgiler kullanılarak elde edilen gimbalin basitleştirilmiş matematiksel modeli Şekil 15 ile gösterilmektedir ve kapalı döngü aktarım işlevi Eş. 39 ile verilmektedir.



Şekil 15. Gimbal Matematiksel Modeli
(Mathematical Model of the Gimbal)

$$\frac{W(s)}{I(s)} = G_s(s) = \frac{K_t}{Js+B} = \frac{b}{s+a} \quad (39)$$

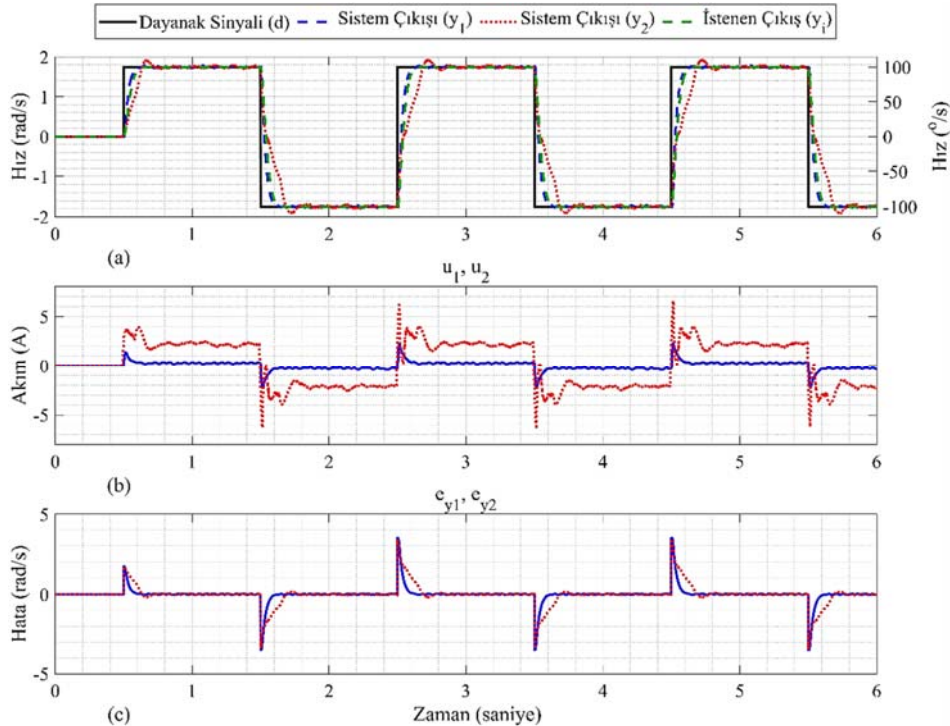
4.2. Hız Denetimi Uygulama Sonuçları (Speed Control Application Results)

Bu kısımda Bölüm 2'de anlatılan denetleyicilerin, bir gimbal ekseninde hız denetiminde uygulanması ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Denetleyiciler sisteme önce oda sıcaklığında, ardından -40°C sıcaklığında olan bir ortamda uygulanmaktadır ve böylece değişen çalışma koşullarına bağlı parametre değişimlerinin etkisi incelenmektedir.

Örnekleme aralığı dönüölçer örnekleme aralığı göz önüne alınarak 0,5 milisaniye olarak belirlenmiştir. Tablo 3, istenen kapalı döngü sistemin aktarım işlevi parametreleri olan doğal frekans ω_n , sönüm oranı ζ 'yi ve yerleşme zamanı t_d 'yi göstermektedir. Ayrıca tabloda kullanılan sistem modelinin parametreleri ve denetleyicilerin üretebileceği en büyük akım değeri yer almaktadır. Üst limitten daha yüksek akım komutu üretilmesini yazılım engellemektedir. Bu bölümde yer alan şekillerde birinci grafik dayanak sinyali (d), istenen sistem cevabını (y_i), oda sıcaklığı sistem cevabını (y_1) ve soğuk ortam sistem cevabını (y_2) içermektedir. İkinci ve üçüncü grafikler ise sırasıyla iki farklı sıcaklıktaki denetim sinyallerini (u_1 ve u_2) ve hataları (e_{y1} ve e_{y2}) göstermektedir.

4.2.1. OTüm denetleyici ile elde edilen sonuçlar (PI Controller Results)

Denetleyici parametreleri Eş. 5 yardımıyla $K_p = 1,84$ ve $K_i = 44,44$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 16'da gösterilmektedir. Şekil 16a incelendiğinde oda sıcaklığındaki sistem tepkisinin aşmasız olduğu, ancak düşük sıcaklıkta %10'luk bir



Şekil 16. İki Farklı Sıcaklıkta OTüm denetleyicisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması
(Comparison of Results with PI controller at Two Different Temperatures)

Tablo 3. Uygulamada Kullanılan Parametreler (Parameters Used in the Application)

ω_n	ζ	b	a	t_d	En Yüksek Aşma	En Büyük Akım
40 rad/s	0,9	36	5,7	0,12 s	<< %1	8 A

aşmanın olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında denetleyicinin durulma zamanı 90 milisaniye olarak ölçülürken, soğuk ortamda bu süre 200 milisaniye olarak ölçülmüştür. Soğuk ortamda denetleyicinin ürettiği akım komutu artan sürtünmeden dolayı daha büyüktür. Özetle, OTüm denetleyici ile oda sıcaklığında tüm başarımlar ölçütleri sağlarken, düşük çalışma sıcaklığında 120 milisaniye olarak belirlenen durulma süresi ölçütü ve aşmasız tepki isteri sağlanamamıştır.

4.2.2. Özayarlama OTüm denetleyici ile elde edilen sonuçlar (Self-Tuning PI Controller Results)

Bu bölümde Özayarlama OTüm denetleyicinin uygulama sonuçları gösterilmektedir. Kestirilen \hat{a} ve \hat{b} parametrelerine göre denetleyici parametreleri K_p ve K_i , Eş.5 kullanılarak her örnekleme zamanında güncellenmektedir. Şekil 17 ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Şekil 17d ve Şekil 17e’de kestirilen sistem modeli parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) yer almaktadır. Tablo 4, SZÖEKK yönteminin parametrelerini göstermektedir.

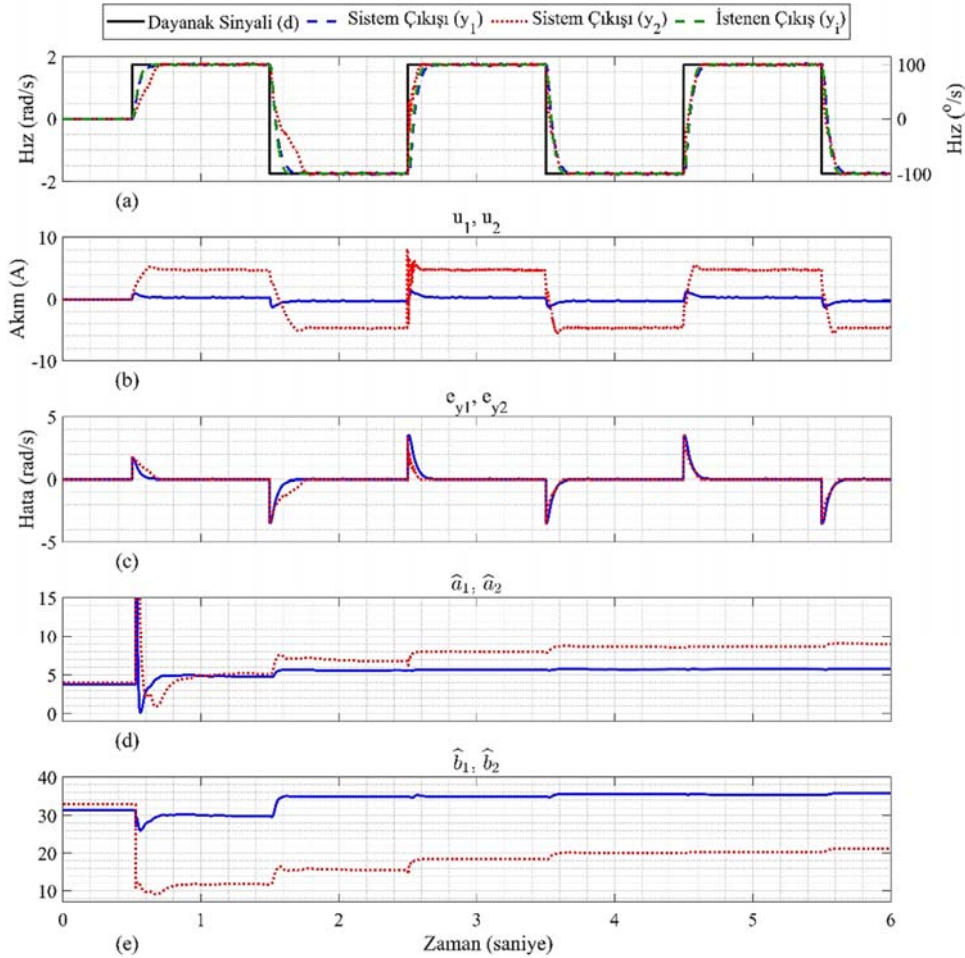
Tablo 4. Hız Denetimi Uygulaması için SZÖEKK Parametreleri (CRLS Parameters for Speed Control Application)

α	β	$\hat{\theta}_0$	$C(s)$
10^{-7}	4	$[0 \ 0]^T$	$s + 10$

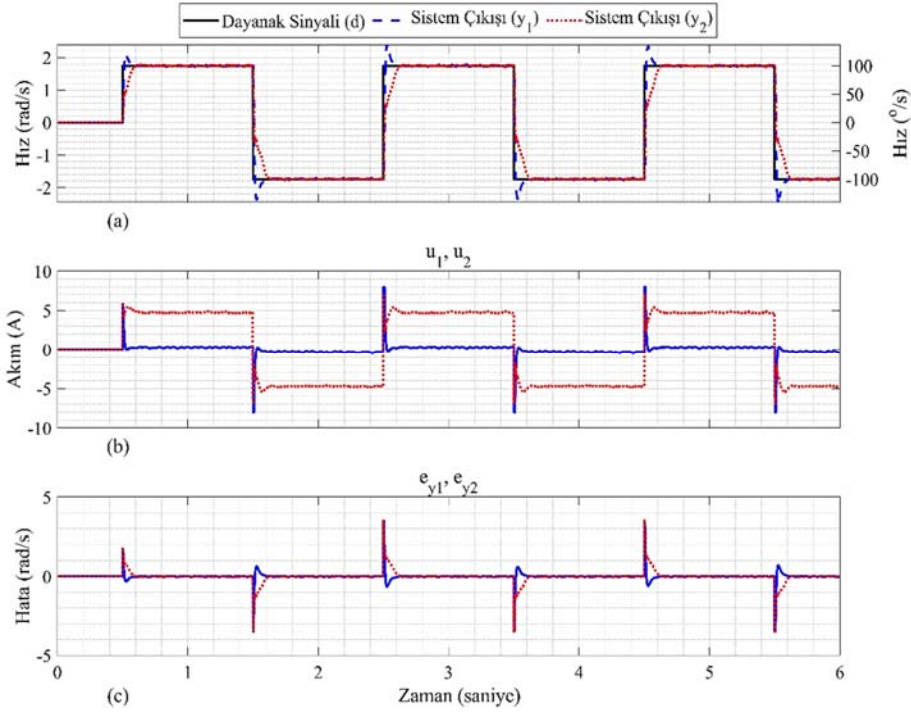
Şekil 17a incelendiğinde, parametre yakınsaması gerçekleştiikten sonra her iki çalışma sıcaklığında da sistem çıkışının istenen çıkışı başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılan teste durulma süresi 110 milisaniye olarak ölçülmektedir. $-40^\circ C$ sıcaklıkta gerçekleştirilen uygulamada parametrelerin yakınsaması daha uzun zaman aldığından, uygulamaların ilk saniyelerinde sistem çıkışının istenen çıkıştan daha yavaş olduğu gözlenmektedir, ancak kestirici yakınsadıkça sistem cevabı hızlanmaktadır. Düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen uygulamada durulma süresi oda sıcaklığındaki sonuçlara benzer şekilde 110 milisaniyedir. Şekil 17d ve Şekil 17e ile parametrelerin model parametrelerine yakınsama süreci görülmektedir. Ortam sıcaklığının parametre kestirimlerinin son değerlerini belirgin şekilde etkilediği, dolayısıyla değişen çalışma sıcaklığının sistem modeli üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenebilir. Şekil 17b’de yer alan akım değerleri incelendiğinde soğuk koşullar altında denetleyicinin ürettiği akım miktarı artmaktadır.

4.2.3. TE-DKD ile elde edilen sonuçlar (LQR-IA Results)

Bu bölümde TE-DKD yapısının gimbal sistemine uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar incelenmektedir. TE-DKD parametrelerini belirleyecek \tilde{Q} ve \tilde{R} matrisleri Eş. 40, elde edilen geri besleme kazanç matrisi \tilde{K} Eş. 41 ile verilmektedir. İki farklı sıcaklık koşulu altında bu denetleyici uygulanarak elde edilen denetleyici sonuçları Şekil 18 ile sunulmuştur. TE-DKD oda sıcaklığında %32



Şekil 17. İki Farklı Sıcaklıkta Özayarlama OTüm denetleyicisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Results with Self-Tuning PI Controller at Two Different Temperatures)



Şekil 18. İki Farklı Sıcaklıkta TE-DKD Yönteminin Sonuçlarının Karşılaştırılması
(Comparison of Results with LQR-IA at Two Different Temperatures)

aşma yapmaktadır ve durulma süresi 90 milisaniyedir. Aynı denetleyici soğuk ortamda %0 aşma ve 110 milisaniye durulma süresi başarımına sahiptir. Her iki sıcaklık koşulu altında da istenilen durulma süresi başarım ölçütünü sağladığı görülmektedir, ancak oda sıcaklığında en büyük aşma isteri sağlanamamıştır.

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1500 \end{bmatrix}, \bar{R} = 0.01 \quad (40)$$

$$\bar{K} = [10.87 - 387.29] \quad (41)$$

4.2.4. GÇ-RKKD ile elde edilen sonuçlar (RSMC-IO Results)

GÇ-RKKD yöntemi ile elde edilen uygulama sonuçları bu bölümde incelenmektedir. Verilen başarım ölçütlerini sağlayacak şekilde seçilen dayanak aktarım işlevi $M(s)$ Eş. 42 ile gösterilmektedir. Röle genliği 30A olarak seçilmiştir. Görelî derece koşulunu sağlamak üzere röle çıkışına konulan $F(s)$ süzgeci ise Eş. 43 ile gösterilmektedir.

$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 72s + 1600} \quad (42)$$

$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s+25)^2} \quad (43)$$

Şekil 19'da GÇ-RKKD sonuçları sunulmuştur. Şekilde yer alan son grafik röle girişini göstermektedir. Şekil 19a incelendiğinde GÇ-RKKD yapısının parametre değişimine karşı sistem cevabını dayanak aktarım işlevi cevabına yakın tutmayı başarabildiği görülmektedir. Her iki sıcaklık koşulu altında da cevap aşmasızdır. Oda sıcaklığında durulma süresi 100 milisaniye iken soğuk ortamda durulma süresi 110 milisaniyedir.

4.3. Konum Denetimi Uygulama Sonuçları (Position Control Application Results)

Bu bölümde genel yapısı Şekil 10 ile gösterilen ardışık konum denetiminin uygulama sonuçları incelenmektedir. Dış döngüde kullanılan konum denetleyicisi OTür (Oransal-Türevsel) denetim

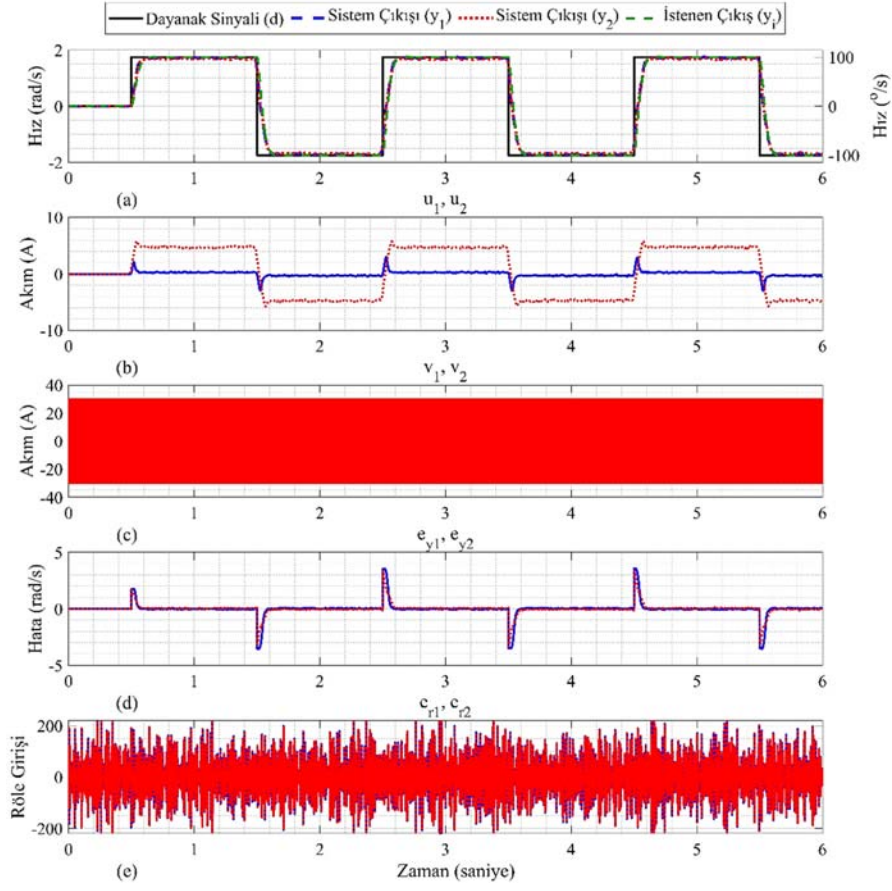
($C(s) = K_p + K_d s$) olarak seçilmiştir ve parametreleri $K_p = 6,33$ ve $K_d = -0,1$ olarak belirlenmiştir. İç döngüde ise Özayarlamalı OTüm Denetleyici ve GÇ-RKKD yapısı kullanılmaktadır. Örneklemeye zamanı 0,5 milisaniyedir. Bu bölümde verilen şekillerde yer alan birinci grafikte dayanak girişi (d) ve sistem çıkışı (y) yer almaktadır. İkinci grafikte denetim sinyali (u), üçüncü grafikte dayanak girişi ve sistem çıkışı arasındaki hata (e_y) gösterilmektedir.

4.3.1. İç döngü: Özayarlamalı OTüm denetim (Inner loop: adaptive PI controller)

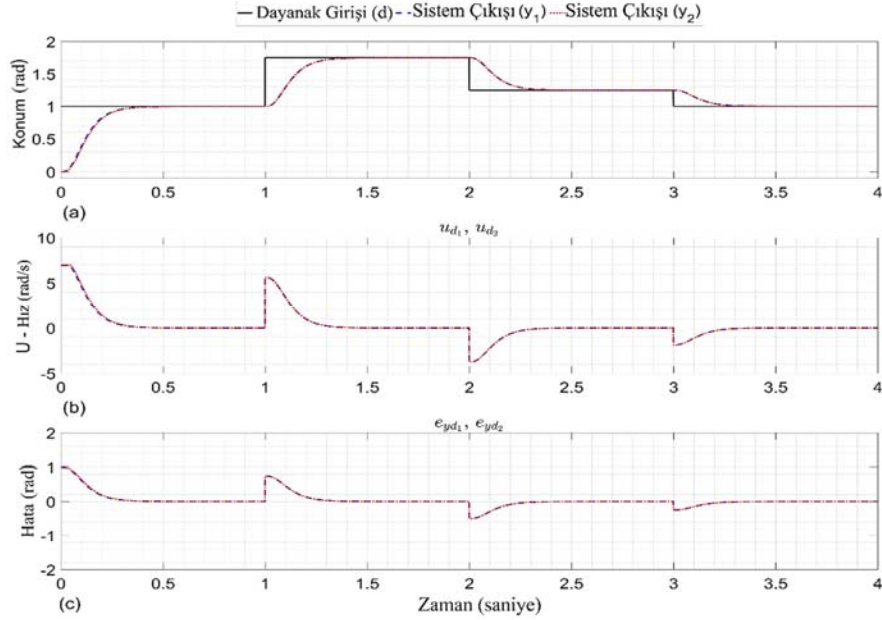
Parametre kestirimi için kullanılan SZÖEKK yönteminin parametreleri olarak Tablo 4 ile verilen değerler kullanılmaktadır. Şekil 20 ile konum döngüsü sonuçları, Şekil 21 ile Özayarlamalı OTüm hız denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde dördüncü ve beşinci grafikte SZÖEKK yönteminin kestirdiği model parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) verilmektedir. Şekil 20 incelendiğinde tüm dayanak sinyaline aşmasız yerleştiği görülmektedir. Şekil 21d ve Şekil 21e incelendiğinde SZÖEKK yönteminin parametre kestirimi, ilk dayanak sinyali değişimi ile birlikte hızlıca yakınsamaktadır. Ortam sıcaklığına bağlı olarak kestirilen sistem parametrelerinin oldukça farklı son değerlere yakınsadığı gözlenmektedir. Şekil 21b'de görüldüğü üzere soğuk ortamda artan sürtünme kaynaklı olarak Özayarlamalı OTüm denetleyicisinin ürettiği denetim sinyali büyümektedir. Model parametrelerinde meydana gelen değişimin konum ve hız denetimi başarımı üzerindeki etkisi az olmaktadır. Şekil 21d ve Şekil 21e incelendiğinde soğuk ortam altında kestiricinin farklı sistem parametrelerine yakınsadığı görülmektedir.

4.3.2. İç döngü: GÇ-RKKD (Inner loop: RSMC-IO)

Bu bölümde iç döngüsünde GÇ-RKKD yönteminin yer aldığı ardışık konum döngüsünün gimbal sistemine sıcak ve soğuk ortamda uygulanması sonucu elde edilen veriler gösterilmektedir. Şekil 22 ile konum döngüsü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 23 ile GÇ-RKKD denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde yer alan üçüncü



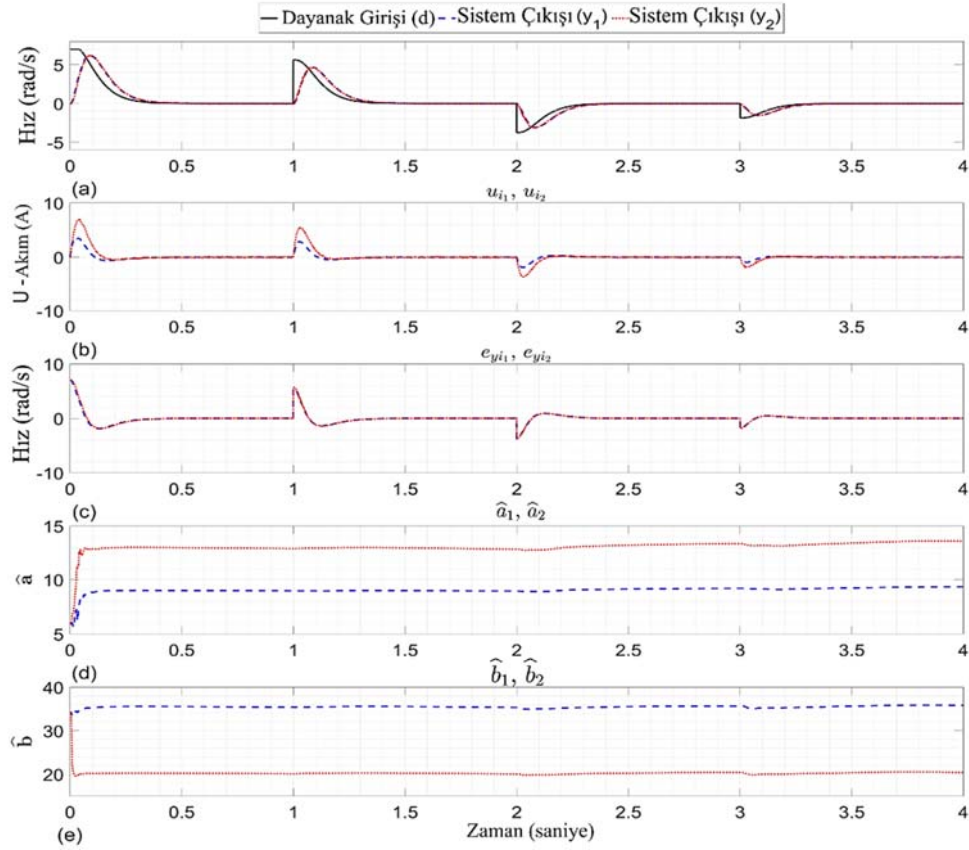
Şekil 19. İki Farklı Sıcaklıkta GÇ-RKKD Yönteminin Sonuçlarının Karşılaştırılması
(Comparison of Results with RSMC-IO at Two Different Temperatures)



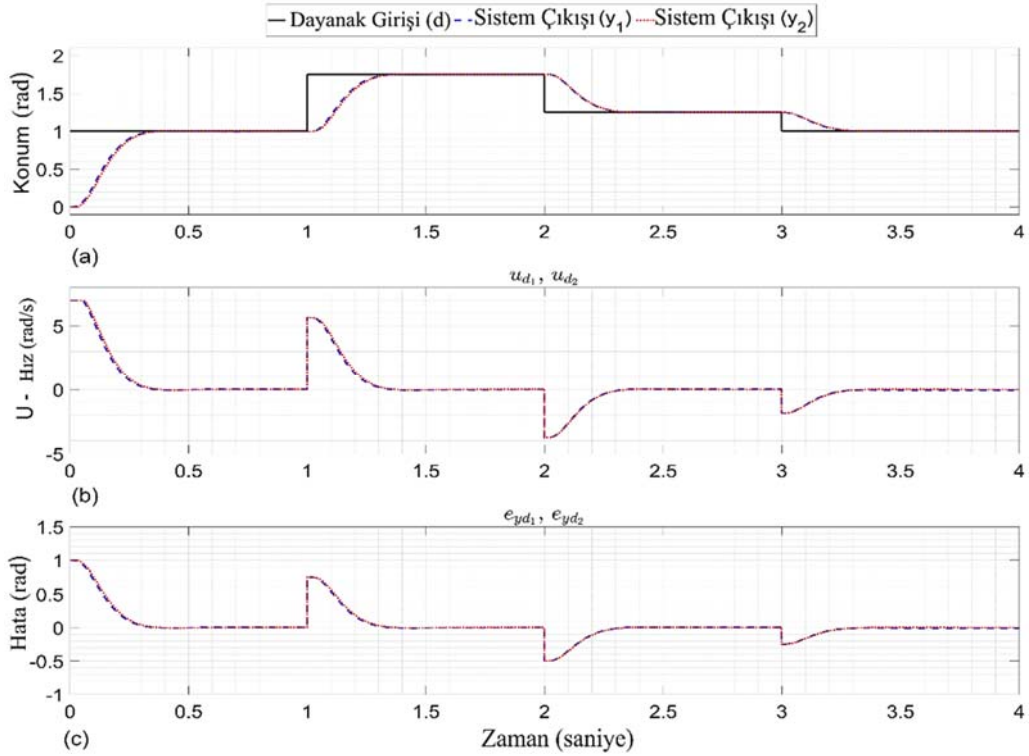
Şekil 20. Konum Denetimi Uygulama Sonuçları – İç Döngü: Özayarlamalı OTüm
(Position Control Application Results – Inner Loop: Self-Tuning PI)

grafikte röle girişi gösterilmektedir. Dördüncü grafik dayanak sinyali ve sistem çıkışı arasındaki hatanın grafiğidir. Son olarak beşinci grafikte röle girişi yer almaktadır.

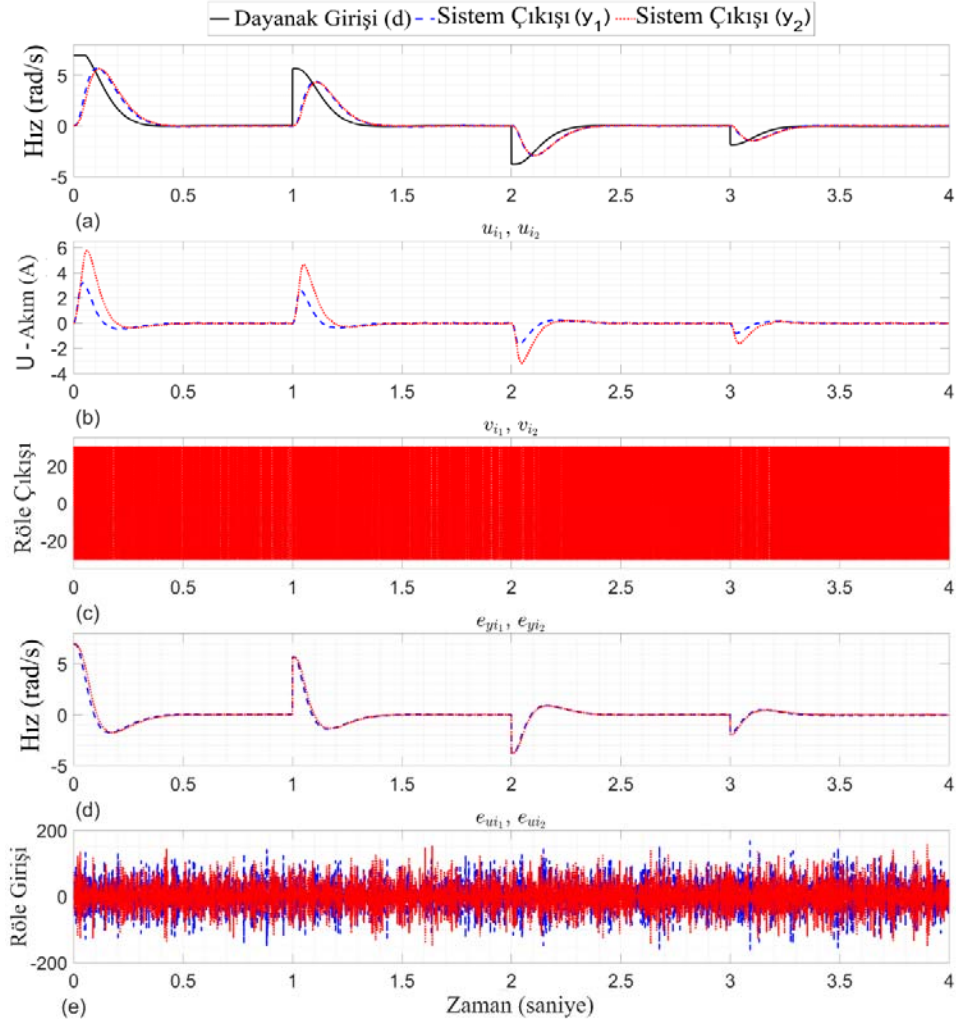
Eş. 44 ile dayanak aktarım işlevi $M(s)$ gösterilmektedir. Görelî derece şartını sağlamak için röle çıkışına Eş. 45 ile gösterilen ikinci derece $F(s)$ süzgeci eklenmektedir.



Şekil 21. İç Döngüde Özayarlamalı OTüm Hız Denetimi (Self-Tuning PI Speed Control in the Inner Loop)



Şekil 22. Konum Denetimi Uygulama Sonuçları – İç Döngü: GÇ-RKKD (Position Control Application Results – Inner Loop: RSMC-IO)



Şekil 23. İç Döngüde GÇ-RKKD Hız Denetimi (RSMC-IO Speed Control in the Inner Loop)

$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 72s + 1600} \quad (44)$$

$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s+25)^2} \quad (45)$$

Şekil 22 incelendiğinde, Özayarlama OTüm denetleyici ile benzer şekilde konum denetiminin aşmasız cevap verdiği görülmektedir. Sıcak ve soğuk ortamda yapılan testlerde elde edilen konum döngüsü sonuçları birbiri ile benzer çıkmaktadır. Sistem çıkışları benzer olduğu için OTür denetleyicinin ürettiği hız komutu grafikleri de benzer olmaktadır. Ancak Şekil 23b incelendiğinde bu hız komutunu yerine getirmek için soğuk ortamda sıcak ortama göre daha yüksek akım komutlarının üretildiği görülmektedir. Şekil 23a'ya bakıldığında hız denetim başarımının soğuk ve sıcak testleri için benzer olduğu anlaşılmaktadır.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmanın temel katkısı, birçok sektörde kullanılan gimbal sistemleri için farklı türde denetleyicilerin hız ve konum denetimi uygulamaları için karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. Birbirinden oldukça farklı denetim stratejileri olan özayarlama ve gürbüz denetim yaklaşımları hem benzetimler hem de gerçek zamanlı uygulamalar aracılığıyla ayrıntılı bir biçimde irdelenmiştir. Bunun

yanı sıra, SZÖEKK kestiricili Özayarlama OTüm denetim yapısının ve GÇ-RKKD yapısının bir gimbal sistemi üzerinde uygulandığı ve sınıadığı bir başka çalışma bilginiz dahilinde bulunmamaktadır.

OTüm denetleyici ile model uyumlama yaklaşımı, sistem modelinin parametrelerinin bilindiği varsayıldığında hem benzetim hem de uygulamada istenen başarımları ölçütlerini karşılamaktadır. Ancak sistem parametrelerinin bilinmediği veya bu parametrelerin gerek çalışma koşulları gerekse bozucular nedeniyle değiştiği durumlarda denetim başarımının önemli ölçüde düştüğü gözlenmektedir. SZÖEKK parametre kestirim yöntemini kullanan Özayarlama OTüm denetleyici hem benzetim ortamında hem de uygulamadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sistem parametrelerinde meydana gelen değişimlerin kestirici aracılığıyla takip edilebildiği, denetleyici parametrelerinin kestirilen sistem parametrelerine göre güncellendiği görülmektedir. Öte yandan, ani parametre değişiklikleri karşısında, kestirici yeni parametre değerlerine yeterince yakınsayana dek denetim başarımı zayıflamaktadır. SZÖEKK algoritması için tasarımcı tarafından belirlenen unutma çarpanının parametre yakınsama hızında kritik öneme sahip olduğu değişik değerlerle yapılan benzetimler aracılığıyla gösterilmiştir. Kestiricinin başarımında seçilen süzgeç çokterimlisi ile bilgi matrisi ve parametre vektörünün ilk değeri de etkilidir. Özetle, özayarlama OTüm yaklaşımı için çok sayıda tasarım parametresinin uygun biçimde seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada iki farklı gürbüz denetim yaklaşımı da incelenmektedir. Bunlar TE-DKD ve GÇ-RKKD yaklaşımlarıdır. Her iki yaklaşım da ani parametre değişimleri ve değişen çalışma koşulları karşısında diğer denetleyicilere göre daha iyi bir denetim başarımı göstermektedir. Ancak TE-DKD yönteminin benzetimde aşmasız bir sistem cevabına sahip olduğu halde, gerçek sistem üzerindeki uygulamada yaklaşık %30 aşmalı bir çıkışa sahip olduğu, dolayısıyla bu yöntemin aşmasız tepki isterini sağlayamadığı gözlenmektedir. GÇ-RKKD yaklaşımında ise sistem çıkışının hem benzetim ortamında hem de gerçek sistem üzerinde yapılan uygulamada belirlenen dayanak aktarım işlevi cevabını başarıyla takip ettiği ve tüm başarım ölçütlerinin sağlandığı görülmektedir. GÇ-RKKD yönteminin en önemli avantajlarından biri, denetlenen sistemin modelinin bilinmesine gerek kalmadan, sadece sistemin aktarım işlevinin görelî derece bilgisine dayanarak kullanılabilmesidir. Her eksen veya gimbale sistemi için farklı denetleyicilerin baştan tasarlanması yerine, GÇ-RKKD yapısının ufak ayarlamalar ile hepsi için kullanılması mümkündür. Bu bağlamda, bu çalışmada karşılaştırmalı olarak irdelenen yöntemler arasında daha yüksek başarım sergilediği değerlendirilen GÇ-RKKD yaklaşımının, bir sonraki çalışmada her iki gimbale ekseninde eş zamanlı olarak uygulanması hedeflenmektedir.

Kaynaklar (Reference)

- Hilkert J. M., Inertially stabilized platform technology, concepts and principles, IEEE Control Systems Magazine, 28 (5), 25-39, 2008.
- Kürkcü B. and Kasnaoğlu C., Estimation of unknown disturbances in gimbal systems, Applied Mechanics and Materials, 789, 951–956, 2015.
- Jia W., Cao Y. and Cao j., Self-tuning Control Method Based on Online Identification for Robot Servo System, 2022 China Automation Congress (CAC), Xiamen, China, 3471-3476, 25-27 November, 2022.
- Hwang S. and Carmichael R., Adaptive Tracking Control for a DC Motor, The First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems, Westlake Village-USA, 231–235, 25-27 May, 1993.
- Utkin V. and Chang H., Sliding mode control on electro-mechanical systems, Mathematical Problems in Engineering (Math. Probl. Eng.), 8, 100–105, 2002.
- Kumbay Yıldız Ş., Relay sliding mode control based on the input-output model, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2609-2626, 2016.
- Hernandez-Lerma O., Laura-Guarachi L.R., Continuous-Time Deterministic Systems, An Introduction to Optimal Control theory, 1st edition, Springer, Switzerland, 127-170, 2023.
- Ahmad M. H., Osman K., Zakeri M. F. M, and Samsudin S. I., Mathematical Modelling and PID Controller Design for Two DOF Gimbal System, 2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA), Langkawi, 138–143, 5-6 March, 2021.
- Solaiappan S. K. and Anitha G., A novel self-tuning fuzzy logic-based pid controllers for two-axis gimbal stabilization in a missile seeker, International Journal of Aerospace Engineering (Int. J. Aerosp. Eng.) 2021, 1–12, 2021.
- Seong K., Kang H., Yeo B., and Lee H., The Stabilization Loop Design for a Two-Axis Gimbal System Using LQG/LTR Controller, 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, 755–759, 18-21 October, 2006.
- Espinosa C., Mayen K., Lizarraga M., Romero S. S. H., and Lozano R., Sliding mode line-of-sight stabilization of a two-axes gimbal system, 2015 workshop on research, education and development of unmanned aerial systems (red-uas), Cancun, Mexico, 431–438, 23-25 November, 2015.
- Battistel A., Oliveira T. R., and Rodrigues V. H. P., Adaptive Control of an Unbalanced Two-Axis Gimbal for Application to Inertially Stabilized Platforms, 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Belo Horizonte, 99–104, 2-6 December, 2019.
- Lee S. and Jung S., RLS model identification-based robust control for gimbal axis of control moment gyroscope, 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, 584–589, 3-7 July, 2017.
- Ogata K., PID Controllers and Modified PID Controllers, Modern Control Engineering, 4th edition, Prentice Hall PTR, New Jersey - USA, 567-647, 2001.
- Aström K. J. and Hagglund T., Process Models, PID Controllers-Theory, Design, and Tuning, 2nd edition, Instrument Society of America, USA, 5-58, 1995.
- Gawthrop P., Least Squares Identification, Continuous-Time Self-Tuning Control Volume I – Design, 1st edition, Short Run Press Ltd, Great Britain, 140-161, 1987.
- Demircioğlu H., Continuous-Time Self-Tuning Algorithms, Ph.D. thesis, University of Glasgow, Faculty of Engineering, Glasgow, 1989.
- Aström K. J., Theory and applications of adaptive control, IFAC Proceedings, 14 (2), 737–748, 1981.
- Hassan A., Sadek H., Bazzi A. and Daher N., LQI Control for Dual-input DC-DC Converter, 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, USA, 556-560, 23-26 June, 2020.
- Kumbay Yıldız, S, Demircioğlu, H, Relay sliding mode control based on the input-output model, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24 (4), 2609-2626, 2016.
- Tsyppin Y.Z., Relay Control Systems. Cambridge University Press. Translated by C. Constanda, 1984.
- Poyrazoğlu, E., Detailed modeling and control of a 2-DOF gimbal system, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2017.