

Bir Gimbal Sisteminin Özayarlama 2 Serbestlik Dereceli OTüm Denetimi

Self-Tuning 2 Degree-of-Freedom PI Control of a Gimbal System

Muharrem Mandacı^{1,2,a}, Şölen Kumbay Yıldız^{1,b}

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi, Ankara

²Kontrol Sistemleri Tasarım Müdürlüğü
ASELSAN A.Ş., Ankara

^ammandaci@asehsan.com.tr

^bsolen@ee.hacettepe.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, 2 Serbestlik Derecesine Sahip (2 SD) Oransal-Tümlevsel (OTüm) denetleyici ve Özayarlama 2 SD OTüm denetleyici tasarımı açıklanmaktadır. Her iki denetleyicinin performansı model parametre değişiklikleri altında bir benzetim ortamında test edilerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca, denetleyiciler gerçek bir gimbal sisteminde hem oda sıcaklığında hem de soğuk çalışma ortamında uygulanarak sonuçları irdelenmiştir. Özayarlama 2 SD OTüm denetleyicide, parametre değişimleri altında 2 DoF OTüm denetleyicisinde gözlenen performans düşüşünü önlemek için sistem parametrelerini kestirmek üzere Kesikli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler (KZÖEKK) yöntemi kullanılmıştır.

Abstract

This study presents an explanation of the design of two types of controllers: the 2 Degree-of-Freedom (2 DoF) PI controller and the Self-Tuning 2 DoF PI controller. A comparison of the performance of both controllers is conducted under model parameter changes using a simulation environment. Furthermore, the controllers are tested on a real gimbal system in both room temperature and a cold environment, and the results are compared. The Self-Tuning 2 DoF PI controller utilizes the Discrete-Time Recursive Least Squares (DTRLS) method to estimate the parameters of the system to prevent the performance degradation observed in the 2 DoF PI controller under parameter variations.

1. Giriş

Gimbal sistemleri, elektro-optik stabilize sistemler için hedef takip ve hedefe yönelim gibi önemli görevi yerine getiren yapılarıdır. Takıldıkları platform ve buldukları çevre koşulları kaynaklı bozulmalara maruz kalmaktadırlar. Gimbal mekaniği genellikle iki eksenli oluşmaktadır. Gimbal, eksenleri üzerinde

bakış hattını bozacak açısal hareketleri algılayarak bunlara ters yönde motorları döndürerek bakış hattını sabit tutmayı hedefler. Bu bakış hattı stabilizasyonu olarak adlandırılmaktadır.

Gimbal denetimi hem konum takibini yapabilmek hem de bakış hattı stabilizasyonunu koruyabilmek amacıyla genellikle iç içe iki denetim döngüsünden oluşmaktadır. İçte yer alan hız denetim döngüsü yüksek frekanslı bozucuları bastırırken, dışta yer alan ve bant genişliği iç döngüye görece daha düşük olan konum döngüsü ise bakış hattının yönlendirilmesini sağlamaktadır. Gimbal sistemleri için temel denetim problemi içte yer alan hız denetim döngüsüdür [1]. Denetleyici başarımlarını düşüren temel etkilerin başında model parametre değişimi gelmektedir. Özellikle askeri sistemlerde zorlu çevre koşullarında çalışma şartı aranmaktadır. Geniş sıcaklık aralığında çalışması beklenen sistemlerin, sıcaklık etkisi nedeniyle model parametrelerinde zamanla değişimler meydana gelebilmektedir. Bu nedenle iç döngüde genellikle model parametre değişimlerine karşı gürbüz denetleyiciler tercih edilmektedir.

Gimbal bakış hattı stabilizasyonu alanında bir çok farklı denetim yöntemi için çalışmalar yapılmaktadır. OTT (Oransal - Tümlevsel - Türevsel) denetleyicilerin [2, 3] kullanılarak yapılan çalışmaların yanı sıra, LQR tabanlı denetleyiciler [4], Kayan Kipli Denetim Yapıları [5, 6] kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Çalışma ortamından kaynaklı model parametrelerinde meydana gelen değişimler sonucunda denetim başarımları düşülebilmektedir. Bu gibi problemlerin çözümü için uyarlamalı denetim yapıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Uyarlamalı denetim kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada model parametre belirsizliklerinin etkisi azaltılırken [7], bir başka çalışmada EKK yöntemi yardımıyla kestirilen model parametreleri kullanılarak denetim yapısının bozucu bastırma performansının artırılabilceği [8] gösterilmektedir.

Bu çalışma kapsamında bir gimbal sisteminin model parametre değişimi altında hız döngüsünün başarımları irdelenmektedir. Denetleyici olarak 2 SD OTüm ve Özayarlama 2 SD OTüm denetim yapıları kullanılmaktadır. Özayarlama 2 SD denetleyici, sistem modeli parametrelerinin yineli olarak kestirildiği ve bu kestirilen model parametrelerine göre denetim yön-

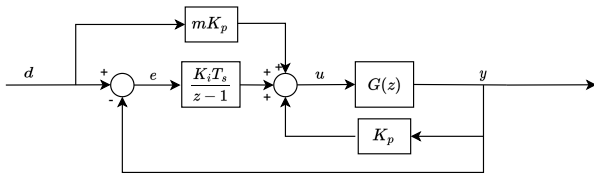
teminin parametrelerinin güncellendiği yapıdır.

2. Denetleyiciler

Bu bölümde hem benzetimde hem de gerçek sistem üzerinde uygulanan denetleyiciler anlatılmaktadır.

2.1. 2 SD OTüm

2 SD OTüm denetleyici [9] öbek çizeneği Şekil 1 ile gösterilmektedir. Şekil 1'de d dayanak girişini, e hata sinyalini, u denetim sinyalini ifade ederken, y sistem çıkışı ifade etmektedir. K_p , K_i ve m parametreleri, 2 SD OTüm denetleyicisinin parametreleridir ve T_s örnekleme zamanını göstermektedir. Son olarak $G(z)$ ayrık zaman sistem modelidir.



Şekil 1: 2 SD OTüm Denetleyici

2 SD OTüm denetleyicisinde, klasik OTüm denetleyiciden farklı olarak dayanak girişi sinyali bir katsayı (m) ile çarpılmaktadır. Bu sayede OTüm denetleyicinin kapalı döngü aktarım işlevine ek olarak getirdiği sıfırın konumu ayarlanabilmektedir.

$G(z)$ Eşitlik 1 ile verilen aktarım işlevi olarak seçildiğinde öbek çizeneğinin kapalı döngü aktarım işlevi $T(z)$, Eşitlik 2 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$G(z) = \frac{b}{z+a} \quad (1)$$

$$T(z) = \frac{K_p m b z - K_p m b + K_i T_s b}{z^2 + z(a-1 + K_p b) - a - K_p b + K_i T_s b} \quad (2)$$

Denetleyici parametreleri seçilerek kapalı döngü aktarım işlevi, belirlenen bir hedef aktarım işlevine ($T_d(z)$) eşitlenebilmektedir. $T_d(z)$ (Eşitlik 4), istenen sistem cevabı parametreleri doğal frekans ω_n ve sönüm oranı ζ kullanılarak elde edilen $T_d(s)$ (Eşitlik 3) aktarım işlevinin ayrık zaman formudur. Belirlenen aktarım işlevi ile model uyumlama Eşitlik 5 ile gösterildiği yapılmaktadır [10].

$$T_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

$$T_d(z) = \frac{z+c}{z^2+tz+p} \quad (4)$$

$$\frac{K_p m b z - K_p m b + K_i T_s b}{z^2 + z(a-1 + K_p b) - a - K_p b + K_i T_s b} = \frac{z+c}{z^2+tz+p} \quad (5)$$

Denetleyici parametreleri $T_d(z)$ ve $G(z)$ parametreleri cinsinden Eşitlik 6 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$K_p = \frac{t-a+1}{b} \quad K_i = \frac{p+a+K_p b}{T_s b} \quad m = \frac{K_i T_s}{K_p(c+1)} \quad (6)$$

2.2. Özyarlamalı 2 SD OTüm

Bir kestirim yöntemi yardımı ile model parametrelerini sürekli olarak kestiren ve bu kestirilen yeni model parametrelerine göre denetleyicinin kendisini güncellediği denetim yapılarına özyarlamalı denetim yapıları denilmektedir. En yaygın kullanılan parametre kestirim yöntemlerinden biri özyinelemeli en küçük kareler yöntemidir (Recursive Least Squares, RLS).

2.2.1. Kesikli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler (KZÖEKK) Metodu ile Parametre Kestirimi

Bir sistem modeli, $y(t)$ sistem çıkışı, $u(t)$ sistem girişi ve q ileri kaydırma işlevi olmak üzere Eşitlik 9 ile gösterildiği gibi tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte yer alan A ve B çokterimliliği Eşitlik 7 ve 8 ile verilmektedir.

$$A(q) = q^n + a_1 q^{n-1} + \dots + a_n \quad (7)$$

$$B(q) = b_1 q^{m-1} + b_2 q^{m-2} + \dots + b_m \quad (8)$$

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) \quad (9)$$

Bu model kesikli zamanda Eşitlik 10 ile gösterilen fark denklemleri cinsinden yeniden ifade edilebilmektedir.

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t+m-n-1) + \dots + b_m u(t-n) \quad (10)$$

Bu fark denklemini doğrusal parametre formunda yazıldığında Eşitlik 11 elde edilmektedir.

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta \quad (11)$$

θ ve φ vektörleri Eşitlik 12 ve 13 ile verilmektedir. $\varphi(t)$ sistem giriş ve çıkış sinyallerini içeren veri vektörünü, θ parametre vektörünü ifade etmektedir.

$$\theta^T = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_m] \quad (12)$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n) \ u(t+m-n-1) \dots u(t-n)] \quad (13)$$

θ parametrelerinin kestirilmesi için KZÖEKK yöntemi [11] kullanılmaktadır. Kestirilen parametreler ile gerçek parametreler arasındaki kestirim hatalarının (Eşitlik 14) kareleri toplamı maliyet işlevi (Eşitlik 15) olarak tanımlanmaktadır. $\hat{y}(t)$ kestirilen çıkışı ve $\hat{\theta}$ kestirilen parametre vektörünü göstermektedir.

$$\epsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta} \quad (14)$$

$$J = \sum_{k=1}^t (y(k) - \hat{y}(k))^2 \quad (15)$$

Maliyet işlevini en küçük yapan $\hat{\theta}$ vektörünü özyinelemeli olarak hesaplamak için, Eşitlik 16, 17, 18 ve 19 ile verilen KZÖEKK yöntemi kullanılmaktadır.

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + K(t+1)\epsilon(t+1) \quad (16)$$

$$\epsilon(t+1) = y(t+1) - \varphi^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (17)$$

$$K(t+1) = \frac{P(t)\varphi(t+1)}{\lambda + \varphi^T(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \quad (18)$$

$$P(t+1) = \frac{1}{\lambda} \left[P(t) - K(t+1)\varphi^T(t+1)P(t) \right] \quad (19)$$

P(t) eşdeğişim (covariance) matrisini ve λ unutma çarpımını ifade etmektedir. P(t) matrisinin başlangıç değerinin seçimi Eşitlik 20 ile gösterilmektedir.

$$P(0) = \alpha I \quad (20)$$

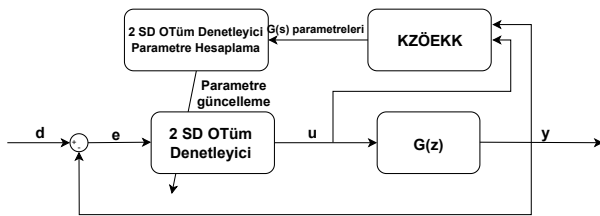
α 1000-100000 arası bir sayıdır. Eğer sistem modeli hakkında bir bilgi yoksa parametre vektörü θ^* 'nin ilk değeri Eşitlik 21 ile gösterildiği gibi seçilmektedir.

$$\theta(0) = 0 \quad (21)$$

Eğer model parametreleri hakkında bir bilgi mevcut ise, bu parametre değerleri $\theta(0)$ değeri olarak atanır.

2.2.2. Denetleyici Parametre Güncelleme

Şekil 2 ile özyinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılarak denetleyici parametrelerinin kestirildiği, parametreleri güncellenen denetleyici ile denetimin yapıldığı yapının öbek çizeneği gösterilmiştir. Her örnekleme zamanında kestirilen \hat{a} ve \hat{b} parametreleri kullanılarak güncel denetleyici parametreleri Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır. Bu şekilde yer alan u denetim sinyali, y sistem çıkışıdır. Ayrıca d dayanak girişini ve e hata sinyalini ifade etmektedir.



Şekil 2: Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi ile Özyarlamalı OTüm Denetim Yapısı

3. Benzetim Sonuçları

Kullanılan sistem modeli Eşitlik 22'de gösterilmektedir. Sistem üzerine 2 SD OTüm ve Özyarlamalı 2 SD OTüm denetleyicileri uygulanmaktadır. Benzetim çalışmaları MATLAB 2020B Simulink ortamında gerçekleştirilmektedir.

$$G_b(z) = \frac{b}{z+a} = \frac{0.009081}{z-0.9959} \quad (22)$$

Benzetimin $t=0.7s$ anında a parametresi -0.9959 'dan -0.9897 'ye ve b parametresi 0.009081 'den 0.009958 değerine yükselmektedir.

Tablo 1 ile benzetim için kullanılan başarımlar kriteri değerleri verilmektedir. Tabloda durulma süresi ve aşma başarımlar ölçütü değerleri ile birlikte bu başarımlar ölçütlerini sağlayacak şekilde seçilen istenen kapalı döngü aktarım işlevi parametrelerinin değerleri (ω_n ve ζ) gösterilmektedir.

Tablo 1: $G_b(z)$ için Kullanılan Parametreler

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma
40 rad/s	1	0.15 sn	%0

3.1. 2 SD OTüm Sonuçları

Şekil 3 ile 2 SD OTüm denetleyicinin sonuçları gösterilmektedir. Benzetim modeli $G_b(z)$ ve Tablo 1 ile verilen değerler kullanılarak Eşitlik 6 ile hesaplanan denetleyici parametreleri Tablo 2 ile verilmektedir. 2 SD OTüm denetleyicinin model parametre değişimi öncesi ve sonrasında ürettiği her iki cevap da aşmasızdır. Model parametre değişimi öncesinde istenen çıkış ile sistem çıkışının benzer olduğu görülmektedir ancak parametre değişiminden sonra sistem çıkışı yavaşlamaktadır. 2 SD OTüm denetleyicinin model parametre değişimi gerçekleşikten sonraki geçici tepkisi dayanak modelinden farklıdır. Bu nedenle denetim başarımlarını koruyamadığı görülmektedir.

Tablo 2: $G_b(z)$ için 2 SD OTüm Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m
3.90	86.35	≈ 0

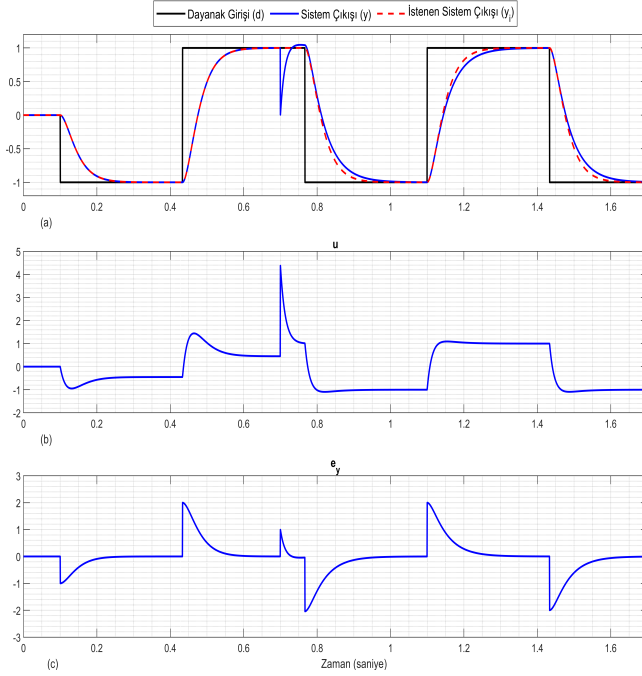
3.2. Özyarlamalı 2 SD OTüm Sonuçları

Şekil 4 ile KZÖEKK parametre kestirim yöntemini kullanan Özyarlamalı 2 SD OTüm denetleyici sonuçları gösterilmektedir. Tablo 1 ile verilen değerler ve KZÖEKK ile kestirilen model parametreleri (\hat{a} , \hat{b}) kullanılarak her örnekleme zamanında denetleyici parametreleri Eşitlik 6 kullanılarak güncellenmektedir. Tablo 3 ile KZÖEKK yönteminin parametreleri verilmektedir. Tabloda yer alan iki farklı unutma çarpanı için benzetim tekrarlanmakta ve sonuçları birlikte verilmektedir.

Tablo 3: $G_b(z)$ için KZÖEKK yöntemi parametreleri

θ_0	α	λ_1	λ_2
[0 0]	10000	1	0.996

Model parametre değişimi öncesinde sistem cevabının istenen sistem cevabına benzediği görülmektedir. Model parametre değişimi meydana geldikten sonra ilk dayanak girişi değişiminde sistem cevabının yavaşladığı, ancak zamanla kestirim yönteminin yeni model parametrelerini kestirmesi sonucunda cevabın hızlandığı görülmektedir. Kestirilen model parametreleri, yeni model parametrelerine yeterince yakınsadıktan sonra,



Şekil 3: $G_b(z)$ ile 2 SD OTüm Denetleyici

sistem cevabının model parametre değişimi öncesindeki cevaba benzer olduğu görülmektedir. Özayarlama 2 SD OTüm denetleyicinin model parametre değişimine karşı denetim başarımını koruduğu görülmektedir.

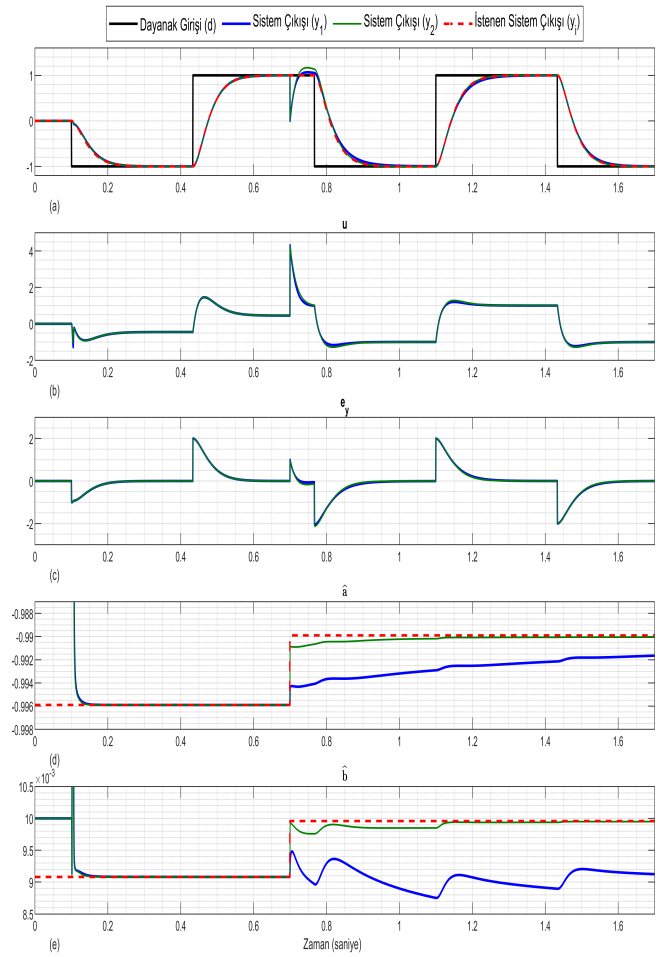
Şekil 4-d ve Şekil 4-e grafikleri incelendiğinde unutmada faktörünün etkisi görülmektedir. $\lambda_1 = 1$ için yapılan benzetimde KZÖEEK eski değerleri unutmadığı için parametre yakınsaması oldukça yavaş olmaktadır. $\lambda_2 = 0.996$ değeri için yapılan benzetimde, KZÖEEK yönteminin veri hafızası 0.12 saniyedir. Bu nedenle eski verileri unutmaktadır. Böylece değişen model parametrelerine daha hızlı yakınsamaktadır. Unutmada çarpanının doğru seçimi KZÖEEK yönteminin parametre yakınsamasını, dolayısıyla model parametre değişimi altında sistem cevabının istenen sistem cevabına yakınsama hızını doğrudan etkilemektedir.

4. Uygulama

Bu bölümde denetleyicilerin bir gimbal sisteminin bir eksenine uygulanması ile elde edilen sonuçlara yer verilmektedir.

4.1. Kullanılan Sistem Modeli

Bu bölümde kullanılan sistem modeli Şekil 5 ile gösterilen bir gimbal ekseninin basitleştirilmiş modelidir. Model girişi akım ($I(s)$) ve model çıkışı açısal hız ($W(s)$) olmak üzere sistem modelinin aktarım işlevi Eşitlik 23 ile gösterilmektedir. Bu modelde yer alan K_t parametresi kullanılan motorun teknik dokümanında yer alan motor tork sabitini, J ve B_v parametreleri ise sistemin mekanik tasarımı sonucunda ortaya çıkan dönüş eksen eylemsizlik momenti değerini ve sürtünme katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 4: $G_b(z)$ ile KZÖEEK 2 SD OTüm Denetleyici

$$G_s(s) = \frac{I(s)}{W(s)} = \frac{K_t}{Js + B_v} \quad (23)$$

Eşitlik 24 ile bir gimbal sisteminin kesikli zaman aktarım işlevi gösterilmektedir. Uygulamada bu model üzerinden denetleyiciler uygulanmaktadır.

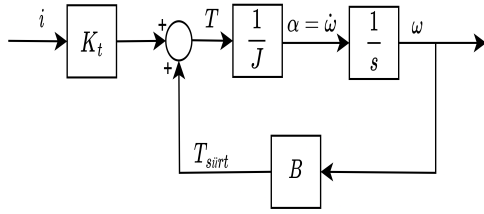
$$G_s(z) = \frac{b}{z + a} \quad (24)$$

Eşitlik 25 ile motor teknik dokümanındaki değerler ve mekanik tasarım sonucu elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan gimbal modeli verilmektedir.

$$G_s(z) = \frac{0.01797}{z - 0.9972} \quad (25)$$

4.2. Uygulama Sonuçları

Gimbal oda sıcaklığındayken denetleyiciler sisteme uygulanmış ve sonuçları kaydedilmiştir. Ardından gimbal, özellikle hava platformlarının maruz kaldığı en düşük sıcaklıklardan biri olarak kabul edilen $-40^\circ C$ 'lik düşük sıcaklık kabineye konarak sistem üzerinde sıcaklık değeri durağan duruma geçene kadar



Şekil 5: Bir Gimbal Ekseninin Basitleştirilmiş Modeli

beklenmiştir ve sonra denetleyiciler sisteme uygulanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Ortamın soğuması sonucu sistemdeki motor, rulman, rulman yağı gibi elemanlardan gelen sürtünme miktarı artacağı için model parametreleri değişmektedir. Bu sayede soğuk ortam kaynaklı parametre değişimine karşı denetleyicilerin başarımı incelenmektedir.

Tabloda 4 ile verilen ω_n ve ζ değerleri istenen cevabın kapalı döngü aktarım işlevinin parametrelerini göstermektedir. Ayrıca denetleyicilerin üretebileceği en büyük akım değeri limiti de tabloda yer almaktadır. Denetim sinyali bu değer üzerinde hesaplanırsa denetleyici içerisinde sınırlandırılmaktadır.

Tablo 4: Uygulama - Başarım Ölçütleri Tablosu

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma	Akım Limiti
40 rad/s	0.9	0.12 sn	$\ll \%1$	8

4.2.1. 2 SD OTüm

Denetleyici parametreleri Tablo 5 ile verilmektedir.

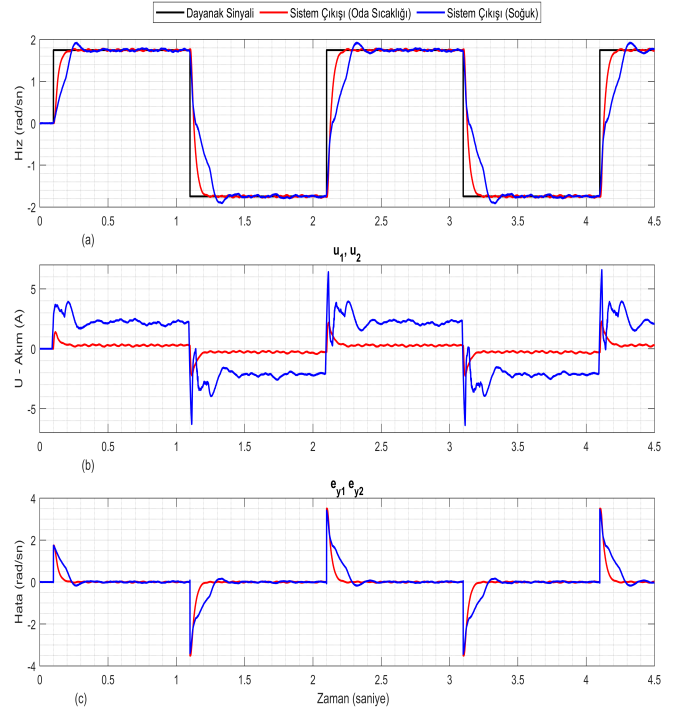
Tablo 5: $G_s(z)$ 2 SD OTüm Tipi Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m	T_s
1.84	66.7	≈ 0	500 μ s

Model uyumlama yöntemi kullanıldığı için, oda sıcaklığında sistem cevabı, istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabı ile çok benzer olmaktadır. Şekil 6-a incelendiğinde denetleyicinin oda sıcaklığında %0 aşma yapmadığı ve soğuk ortamda %10 aşma yaptığı görülmektedir. Oda sıcaklığında denetleyicinin durulma zamanı 120 milisaniye olarak ölçülmektedir. Şekil 6-b incelendiğinde soğuk ortamda denetim sinyalinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir, buna rağmen soğuk ortamda durulma 170 milisaniye olarak ölçülmektedir. Denetleyici oda sıcaklığında her iki başarımlı ölçütünü de sağlarken, soğuk koşul altında 120 milisaniyelik durulma süresi ölçütünü ve aşma ölçütünü sağlayamamıştır.

4.2.2. Özayarlamalı 2 SD OTüm

Şekil 7 ile iki farklı sıcaklık koşulu altında uygulanan KZÖEKK 2 SD OTüm denetleyicinin sonuçları ve parametre değişimleri birlikte verilmektedir. Önceki grafiklere ek olarak şekilde yer alan dördüncü (d) ve beşinci (e) grafiklerde kestirilen sistem



Şekil 6: İki Farklı Sıcaklıkta 2 SD OTüm Denetleyicinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

modeli parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) yer almaktadır. Tablo 6 ile uygulamada KZÖEKK yöntemi için kullanılan parametreler verilmektedir.

Tablo 6: $G_s(z)$ için KZÖEKK yöntemi parametreleri

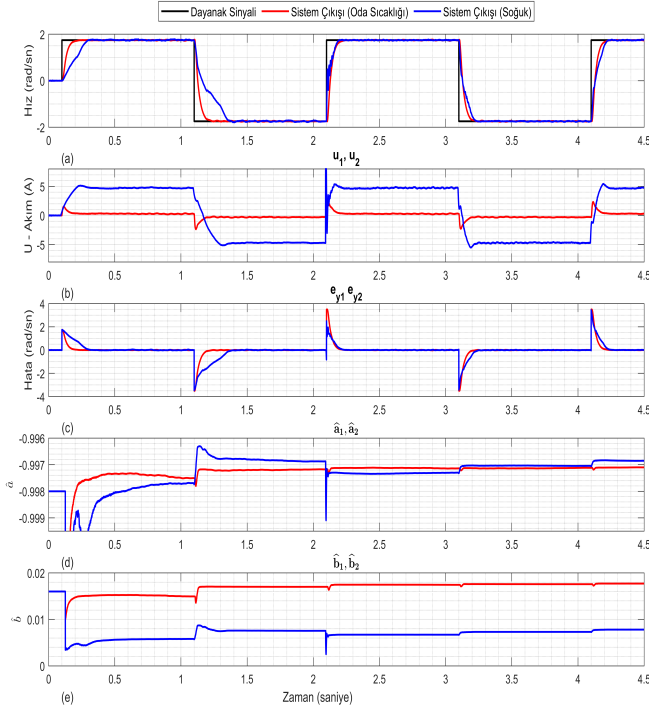
θ_0	α	λ
[-0.998 0.015]	100000	0.998

Şekil 7-a incelendiğinde, Model uyumlama yapılmasından dolayı, her iki koşulda da sistem cevabının istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabı ile çok benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle Özayarlamalı 2 SD OTüm denetleyici her iki koşulda da beklediği üzere aşmasız bir cevaba sahiptir. Oda sıcaklığında yapılan teste durulma süresi 120 milisaniye olarak elde edilmiştir. $-40^\circ C$ sıcaklığında yapılan teste ilk bir kaç saniyede denetleyicinin istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabından daha yavaş bir cevap verdiği, ancak parametre kestirimi soğukta değişen model parametrelerine yakınsadıkça sistem cevabının hızlandığı görülmektedir.

Şekil 7-c ve 7-d ile verilen grafikler incelendiğinde model parametrelerinin iki sıcaklık koşulunda da yaklaşık 2 saniyede yakınsadığı görülmektedir.

5. Sonuçlar

2 SD OTüm denetleyicisinde denetleyici parametrelerinin hesaplanmasında sistem modeli parametreleri kullanılmaktadır. Hem benzetim hem uygulama sonuçları incelendiğinde model



Şekil 7: İki Farklı Sıcaklıkta Özyarlamalı 2 SD OTüm Denetleyicinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

parametreleri yeterince iyi bilindiği durumda istenen sistem çıkışını verdiği görülmektedir. Ancak model parametreleri değiştiğinde, denetleyicinin başarımı düşmektedir. Ancak model parametrelerinde meydana gelen değişimlere karşı denetim başarımını koruyamamaktadır.

Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyici ise model parametrelerindeki değişimini KZÖEEK yöntemi ile kestirerek, denetleyici parametrelerini her örnekleme zamanında güncellemektedir. Bu sayede model parametrelerinde bir değişim meydana geldiğinde 2 SD OTüm denetim yapısından farklı olarak başarımını korumaktadır. Çalışma sonucunda model parametrelerinde değişiklik meydana gelmesi olası sistemlerde Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyicinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyici yöntemi için unutma çarpanının etkisi görülmektedir. $\lambda = 1$ seçilen durum, yani yöntemin eski verileri unutmadığı durum için parametre yakınsamasının oldukça yavaş olduğu, λ değerinin düşürülmesi sonucunda yakınsama hızının arttığı görülmektedir. Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyici kullanılırken sistem uygun bir unutma çarpanının seçilmesi denetim başarımını doğrudan etkilemektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu denetim yöntemlerinin başarımı giriş ve çıkış bozucu etkileri altında incelenebilir. Sinüzoidal, rampa gibi farklı dayanak sinyalleri kullanılarak denetleyicilerin başarımları karşılaştırılabilir. Son olarak farklı denetim yöntemleri de denenerek bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile kıyaslanabilir.

6. Kaynakça

- [1] J. M. Hilkert, "Inertially stabilized platform technology, concepts and principles", *IEEE Control Systems Magazine*, 28(5):25–39, 2008.
- [2] W. Ji, Q. Li, B. Xu, J.-J. Tu, and D.-A. Zhao, "Cascade servo control for los stabilization of opto-electronic tracking platform—design and self-tuning," in *2009 International Conference on Information and Automation*. IEEE, 2009, pp. 1034–1039.
- [3] Mohd Hafiez Ahmad, Khairuddin Osman, Mohd Fais Mohd Zakeri, and S. I. Samsudin, "Mathematical modelling and pid controller design for two dof gimbal system," in *2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA)*, pages 138–143, 2021.
- [4] Ki-jun Seong, Ho-gyun Kang, Bo-yeon Yeo, and Hopyeong Lee, "The stabilization loop design for a two-axis gimbal system using lqg/ltr controller," in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, pages 755–759, 2006.
- [5] B. J. Smith, W. J. Schrenk, W. B. Gass, and Y. B. Shtessel, "Sliding mode control in a two-axis gimbal system," in *1999 IEEE aerospace conference. Proceedings (Cat. No. 99TH8403)*, vol. 5. IEEE, 1999, pp. 457–470.
- [6] C. Espinosa, K. Mayen, M. Lizarraga, S. S. H. Romero, and R. Lozano, "Sliding mode line-of-sight stabilization of a two-axes gimbal system," in *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*. IEEE, 2015, pp. 431–438.
- [7] Andrei Battistel, Tiago Roux Oliveira, and Victor Hugo Pereira Rodrigue, "Adaptive control of an unbalanced two-axis gimbal for application to inertially stabilized platforms," in *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 99–104, 2019.
- [8] Sangdeok Lee and Seul Jung, "Rls model identification-based robust control for gimbal axis of control moment gyroscope," in *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 584–589, 2017.
- [9] Araki, Mituhiko, and Hidefumi Taguchi. "Two-degree-of-freedom PID controllers." *International Journal of Control, Automation, and Systems* 1.4 (2003), 401-411.
- [10] KJ Astrom and T Hagglund. "Pole placement," in *PID Controllers-Theory, Design, and Tuning*, pages 173–179. Instrument Society of America, 1995.
- [11] V. Strejc, "Least squares parameter estimation", *Automatica*, 16(5) ,535–550, 1980. ISSN 0005-1098.