



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KALMAN FİLTRE DURUM KESTİRİMİ VE
LQR KONTROL ALGORİTMALARININ
BENZETİM ORTAMINDA GELİŞTİRİLMESİ
VE SERVO SİSTEM UYGULAMASI**

Nedime Merve CERAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Haziran-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nedime Merve CERAN tarafından hazırlanan “ KALMAN FİLTRE DURUM KESTİRİMİ VE LQR KONTROL ALGORİTMALARININ BENZETİM ORTAMINDA GELİŞTİRİLMESİ VE SERVO SİSTEM UYGULAMASI ” adlı tez çalışması 11/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

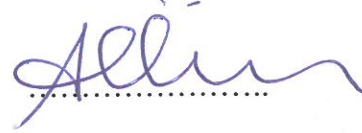
Danışman

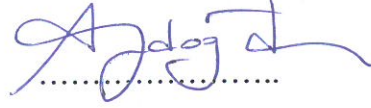
Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

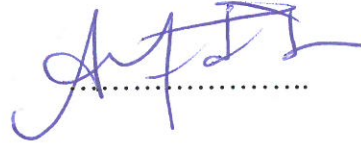
Üye

Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU

İmza







Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

NEDİME MERVE CERAN

Tarih: 11.07.2019

ÖZET

KALMAN FİLTRE DURUM KESTİRİMİ VE LQR KONTROL ALGORİTMALARININ BENZETİM ORTAMINDA GELİŞTİRİLMESİ VE SERVO SİSTEM UYGULAMASI

Nedime Merve CERAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

2019, 67 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU

Doğru akım motoru servo sistemlerde önemli bir tahrik unsurudur. Hız veya konum denetimi gerektiren sistemlerde kolay denetlenebildiği ve yüksek performans gösterdiği için sıkça kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, bir servo sistemin modellenmesi, durum değişkenlerinin Kalman Filtreleri ile gürültülü ve gürültüsüz ortamlarda elde edilmesi ve Doğrusal Kuadratik Regülatör (Lineer Quadratic Regulator, LQR) ile optimal kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle servo sistemin matematiksel modeli elde edilerek simülasyon modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, durum geri besleme ile sistemin LQR kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle sistem kontrolü için gerekli tasarım, kapalı çevrim kutuplarının maniplasyonuna gerek kalmadan optimal bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bunun yanında fiziksel sistemlerde durum değişkenlerinin tamamının ölçümünün mümkün olmadığı göz önüne alındığında, sistemin durum değişkenlerinin en doğru şekilde elde edilmesi kontrol performansı için önemli bir etken olmaktadır. Bundan dolayı, çalışmada durum değişkenleri Luenberger gözleyici (observer) ve Kalman durum gözleyici ile elde edilmiştir. Servo sisteme tasarımı sırasında işlem ve ölçüm gürültüsü uygulanarak denetleyicinin gürültülü ve gürültüsüz ortamlardaki performansı klasik yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Böylece gürültülü ortamlardan daha az etkilenen, durumları öncesinde tahmin ederek gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle üreten yüksek seviyede kararlılığa sahip bir algoritma geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DC Servo Sistem, Durum Kestirimi, Kalman Filtresi, Luenberger Gözleyici, LQR Kontrol, Optimal Kontrol

ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPMENT OF KALMAN FILTER STATE ESTIMATION AND LQR CONTROL ALGORITHMS IN SIMULATION ENVIRONMENT AND SERVO SYSTEM APPLICATION

Nedime Merve CERAN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Ömer AYDOĞDU

2019, 67 Pages

Jury

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU

DC motor is an important drive element in servo systems. They are frequently used in systems requiring speed or position control because they are easy to control and perform well. In this study, a servosystem is modeled, state variables are obtained by using Kalman Filters in noisy and noiseless environments and optimal control with Linear Quadratic Regulator (LQR) is performed. In the study, mathematical model of the servo system was obtained and simulation model was created. The LQR control of the system was then performed with state feedback. With this method, the design required for system control can be calculated optimally without the need for manipulation of the closed-loop poles. In addition, considering that it is not possible to measure all of the state variables in physical systems, the most accurate way to obtain the state variables of the system is an important factor for the control performance. Therefore, in the study, the state variables were obtained by Luenberger observer and Kalman state observer. By applying process and measurement noise to the servo system, the performance of the controller in noisy and noiseless environments was compared with the classical methods. In this way, an algorithm with high stability has been developed which produces predictions of the actual unknown values with uncertainty by predicting the conditions and working with low error in noisy environments.

Keywords: *DC Servo System, Kalman Filter, Luenberger Observer, LQR Control, Optimal Control, State Estimation*

ÖNSÖZ

Otomatik kontrol sistemleri günümüzde modern toplumların günlük yaşantısına girmiş ve hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Kontrol sistemleri; kısaca enerji, malzeme veya diğer kaynakların akışını düzenleyen aygıtlar olarak tanımlanır. Bu düzenin oluşturulması, karmaşıklığı, görünüşü, kullanım amaçları ve işlevlerine göre değişir. Kontrol sistemleri denetlenen niceliklerin değişimini sabit tutar veya bu değerlerin önceden belirlenmiş biçimde değişimini sağlar. Kontrol sistemleri herhangi bir endüstri toplumunun tamamlayıcı bir parçası olup artan dünya nüfusunun ihtiyaç malzemelerini üretmek için geçerlidirler.

Doğru akım (DC) motorlar elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makinalarıdır. Bu motorlar, maliyet verimliliği, hızlı olmaları, yüksek performans sergilemeleri, kolay kullanım, uzun ömür, kolayca harekete geçebilme ve farklı kontrol teknikleri uygulanabilme özellikleri dolayısıyla günümüzde halen yaygın olarak servo sistemlerde kullanılmaktadırlar. DC motorlar, uzay ve bilgisayar teknolojileri, savunma sanayi, robotik uygulamalar ve daha birçok alanda karşımıza çıkmaktadır.

DC motorların pozisyon ve hız kontrolünde yaygın olarak kullanılan Oransal İntegral Türevsel (PID) kontrol gibi klasik yöntemlerin yanında, son yıllarda akıllı denetim teknikleri (sinirsel ağlar, öğrenmeli kontrol vb.), Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR), Bulanık Mantık gibi birçok yöntem kullanılmaktadır.

Simülasyon ortamında geliştirilen sistemlerin pratik hayata uygulanması, teknolojinin gelişmesi ve sanayileşme açısından oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışma, konu ile ilgili teorik çalışma yapan kişilere referans olacak ve katkı sağlayacaktır.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince hiçbir yardımını esirgemeyen ve çalışmalarımı büyük bir titizlikle yönlendiren danışmanım Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU'ya, teşekkür ederim. Yoğun çalışmalarım esnasında bana sabırla destek veren değerli eşim ve aileme ayrıca teşekkür ederim.

Nedime Merve CERAN
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1.Çalışmanın Amacı.....	2
1.2.Çalışmanın Önemi.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
3. MATERYAL VE METHOD	14
3.1.Gözlemleyiciler	14
3.1.1.Luenberger Gözlemleyicisi	15
3.2.Kalman Filtresi.....	17
3.2.1.Kalman Filtresinin Matematiksel İfadeleri	20
3.2.1.1 Zaman Güncelleme/ Tahmin.....	24
3.2.1.2 Ölçüm Güncelleme/ Düzeltme	25
3.3.Lineer Karesel Regülatör	26
3.4.LQR Kontrolün Genel Tanımı	30
3.5.Servo Sistemin Modellenmesi	34

4. KALMAN FİLTRESİ İLE DURUM KESTİRİMİ.....	37
4.1.Servo Sistem Durumlarının Kalman Filtresi ile Kestirimi.....	38
4.2.Servo Sistem Durumlarının Luenberger Gözleyici ile Tahmini	42
5. SERVO SİSTEMİN LQR KONTROLÜ	45
5.1.LQR Algoritması.....	45
5.1.1.LQR Optimal Kontrolde R ve Q Matrislerinin Seçimi	46
5.2.LQR Kontrol	47
5.2.1.LQR ile Regülasyon.....	47
5.2.2.LQR ile Referans Takibi	50
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	51
6.1.Servo Sistem Bulguları	51
6.2.Servo Sistemin LQR Denetleyicisi ile Kontrolü.....	54
6.3.Servo Sistemin LQR Kontrol ve Kalman Filtresi ile Kontrolü.....	56
6.4. Servo Sistemin Luenberger Gözleyici ve LQR ile Kontrolü ...	61
7. SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

\hat{P}_k^-	Hata kovaryansının bir önceki durumu
\hat{x}	Gözleyici durum vektörü
\dot{x}	x durum vektörü türevi
\hat{x}_k	Tahmin edilen durum vektörü
\hat{x}_k^-	k. durumundan önceki durum tahmini
\hat{x}_{k-1}	(k-1). durumundaki tahmin
\hat{y}	Gözleyici çıkışı
A, B, H, C	Durum uzay ifadesi vektör ve matrisleri
A^T, H^T	Matrislerin transpozesi
B_s	Sürtünme katsayısı
G(s)	Transfer fonksiyonu
i(t)	Armatür akımı
J_s	Atalet momenti
J	Performans indeksi
k	Ayrık zaman işlem adımı
K_k	Kalman kazancı
K_{lqr}	LQR kazancı
K_t	Motor tork sabiti
K_v	EMK sabiti
L	Gözleyici kazancı
L_m	Motor sargı indüktansı
P	Pozitif tanımlı Hermitian matris
P_0	Hata kovaryansı başlangıç koşulu
P_k	Hata kovaryansı
P_0	Gözlemlenebilirlik matrisi

Q	İşlem süreç gürültü kovaryans matrisi
R_m	Motor sargı direnci
R	Ölçüm gürültü kovaryans matrisi
S_v	Ölçüm gürültüsü ortak kovaryansı
S_w	Durum gürültüsü ortak kovaryansı
T	Tekil olmayan matris
T_m	Motor torku
u_k	Kontrol sinyali
v_e	Ters EMK gerilimi
v_k	Ölçüm gürültüsü
w	Açısal hız
w_k	İşlem gürültüsü
w_{k-1}	İşlem gürültüsünün bir önceki değeri
x	Sistem Durumu
x_k	Ayrık zaman sistem durumu
x_{k-1}	(k-1) anındaki sistem durumu
y	Sistem Çıkışı
Z_k	k anındaki herhangi bir ölçüm değeri
θ	Pozisyon

Kısaltmalar

DC	Doğru Akım
İHA	İnsansız Hava Aracı
KF	Kalman Filtresi
LO	Luenberger Gözlemleyicisi
LQG	Lineer Kuadratik Gaussian
LQR	Lineer Kuadratik Regülatör
MHz	Mega Hertz
MIMO	Çok Giriş Çok Çıkışlı Sistem
PI	Oransal İntegral Denetim Organı
PID	Oransal İntegral Türevsel Denetim Organı
SISO	Tek Giriş Tek Çıkışlı Sistem
YBM	Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık

1. GİRİŞ

Servo motorlar, kapalı çevrim pozisyon veya hız kontrol sistemlerinde kullanılan bir uç kontrol elemanıdır. Genellikle bilgisayar, sayısal kontrol makineleri, endüstriyel donanım, silah endüstrisi, alternatörlerin hız kontrolü ve ilk marş makinesi olarak tam otomatik regülatör mekanizmalarını kontrol etmek ve ayrıca bir sistemi hızlı ve doğru bir şekilde başlatmak için tasarlanmıştır (Chandresh Pratap Singh 2013).

Endüstriyel uygulamalarda çok sık olarak kullanılan elektrik motorları yapı olarak birbirlerine göre farklılıklar gösterirler. Bu motorların ortak özellikleri; elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmeleridir. Konum ve hız kontrolü için her elektrik motoru uygun olmayabilir. Bu durumda kontrol edilmek istenilen büyüklüğe uygun bir motor seçimi yapılmalıdır (Aydoğdu 2006).

Konum kontrolü yapılması gereken uygulamalarda genellikle adım motorları ya da servo motorlar kullanılır. Servo motorlar büyük güç, yüksek moment ve hızlı tepki gerektiren sistemlerde kullanılır. Bunun yanında daha çok küçük güçlü sistemlerde ve düşük moment gerektiren kontrollerde adım motorları tercih edilir.

Otomatik kontrol sistemleri günümüzde modern toplumların günlük yaşantısına girmiş ve neredeyse her alanda kullanılmaktadırlar. Çamaşır makineleri, bulaşık makineleri, termostatlı fırınlar veya akıllı fırınlar, ütüler, endüstriyel ve birçok araştırma alanında kullanılan robotlar, mikroişlemciler, bilgisayarlar, uzay taşıtları v.b. denetim sistemleri üretimi ve üretim kalitesini sürekli olarak arttırmakta olup yaşam biçimimize etki etmektedirler (Hatem Elaydi 2015). Denetim sistemleri endüstri toplumlarının tamamlayıcı bir parçası olmuştur. Artan dünya nüfusunun ihtiyaçlarını karşılamada ve gelişen teknolojiye ayak uydurmada katkısı göz ardı edilemez.

Kontrol sistemleri elektrik, elektronik, kimya, uçak, inşaat, makine gibi mühendislik alanlarının yanı sıra artık tüm mühendislikleri ilgilendiren evrensel bir bilimler arası konudur. Örneğin inşaat sektöründe gelişen teknolojiyle akıllı binalar ön plana çıkmaktadır ve bununla birlikte bina otomasyonu büyük önem kazanmıştır. İnsansız hava araçlarının (İHA) yaygınlaşması ile kontrol sistemleri havacılık ve uzay alanında ilerlemelere sebep olmuştur.

Kontrol sistemlerinde optimizasyon, sistemlerin en iyi şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı son zamanlarda optimizasyon yöntemlerinin kullanılması bir çok alan için kaçınılmaz hale gelmiştir. Araştırmacılar tarafından hala yeni optimizasyon yöntemleri geliştirilmekte ve bunlar pek çok farklı alanda kullanılmaktadırlar. Kontrol uygulamaları bunların en önemlisidir. Bu alanda kullanılan optimizasyon yöntemleri, kontrolörün optimum noktalarda çalışmasını sağlamaktadır. Bu yöntemlerden biride doğrusal karesel regülatör (LQR) algoritmasıdır. LQR kontrolörü sistem için uygun bir durum geri beslemeli denetleyici bulmak için otomatik bir yol sağlar.

Servo sistemin optimal kontrol yöntemlerini kullanarak kontrol edilebilmesi için sistemin bütün durumlarının bilinmesi gerekmektedir. Bunun içinde sistemin giriş ve çıkışları gözlemlenerek sistemin bilinmeyen durumlarını tahmin etmek ve tahmin edilen durumlarla sistem kontrolünü sağlamak mümkündür. Bunun için gözleyicilerden faydalanılır. Gözleyicilerin kullanım zorluğu arasında lineer sistemlerde, sistem başlangıcında tahmin edilen durumlarda bir miktar hata olması ve sistemi etkileyecek gürültü ve ani değişimler sonucu tahminlerin olumsuz yönde etkilenmesi olabilir.

Kalman filtresi 1960 yılındaki ilk sunumundan bu yana, geliştirilen binlerce askeri ve sivil yön bulma sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olmuştur (Miseon Han 2013). Bu görünüşte basit, dijital, algoritmik filtre, sistemin genel performansını elde etmek için navigasyon dataları üzerinde uygun bir kaynaşma sağlaması ile ünlü olmuştur. Sistem durumlarının ölçülen andaki değerlerini tahmin etmek için, filtre bir önceki bilgilere bakarak her bir yeni ölçümü uygun bir şekilde ağırlıklandırıp, istatistiksel bir yöntemle yeni tahminleri gerçekleştirir. Filtre aynı zamanda, gerçek zamanlı kalite değerlendirmeleri için ya da çevrimdışı sistem tasarım çalışmaları için yapılan tahminlerin güncel belirsizliklerini tespit içinde kullanılabilir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, optimal kontrol yöntemlerinden olan LQR ile Kalman filtresi ve durumların tahmini gerçekleştirilip bu tahminlerle yapılan sistem kontrolüne dair bilgisayar yazılımı ortamında algoritmalar geliştirilmiştir.

Optimal kontrol teorisinin temelini oluşturan en önemli etken minimum performans indeksi ile sistemin devamlılığının ve kontrolünün sağlanmasıdır. Bu amaçla sistemin davranış yapısını belirleyen kontrolör tasarımı gerekmektedir. Bunun için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin başında LQR yöntemi gelmektedir. Bu yöntem sayesinde sistemin kontrolü için gerekli optimal kontrolör tasarımı kapalı çevrim yapıya ait kutupların maniplasyonuna gerek kalmadan optimal bir şekilde hesaplanabilmektedir. LQR yöntemi ile sistemin karakteristiğini optimize edecek şekilde bir kazanç değeri (K_{lqr}) belirlenir. LQR sisteminin uygulanma esası, belirlenen maliyet fonksiyonunun (J) minimizasyonu şeklindedir.

LQR kontrol metodu sistem performansını ve kararlılığını artıran bir yöntemdir. Aynı zamanda LQR yöntemi ile hesaplanan denetleyici kazanç katsayıları kullanılarak en uygun kontrol girişi üretilmektedir ve böylece istenen referans değeri elde edilmektedir.

Kalman filtresi ortalama karesel hatayı en aza indirerek durumları tahmin eden, bozucu etkileri minimize eden matematiksel bir metottür. Kalman filtresi gerçek ve hesaplanmış değerlerin tahminlerini üretmek için ilk olarak bir değer tahmin eder, daha sonra önceki değer ile mevcut değer arasındaki hatayı hesaplar. Son aşamada ölçülen değer ve tahmin edilen değerler için ortalama bir ağırlık değeri bulur. Ağırlık değeri en büyük olan, daha az belirsizlik içermektedir. Kalman filtresi kullanılarak elde edilen sonuçlar, bize sistem çıkış işareti ile referans giriş işareti arasındaki hatanın çok az olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, LQR kontrol, Kalman filtresi ve Luenberger gözleyicisi ile beraber kullanılmıştır. Kalman filtresinin geleneksel filtrelerden farkı olan durum kestirimi özelliği sayesinde sistem durumları önceden tahmin edilebilmiştir. Böylece gürültülü ortamlarda daha az hatayla çalışıp bu durumdan daha az etkilenen, durumları daha öncesinde tahmin ederek gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle beraber üreten yüksek seviyede dayanıklı kararlılığa sahip bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca sistemin kontrol uygulamalarının; sinyal işleme yöntemlerinin blok diyagramlarla temsil edilmesini sağlayan ve kolayca görselleştirmeye izin vererek karmaşık kontrol algoritmalarının tasarımını kolaylaştıran bilgisayar yazılımı ortamında tasarlanarak, benzetim çalışmalarının yapılması da sağlanmıştır.

1.2. Çalışmanın Önemi

Optimal kontrol sistemleri son zamanlarda mühendisler için büyük öneme sahiptir. Kontrol sistemi, seçilmiş olan performans indisinin değerini en uygun değere getirebilen sistemlerdir.

Optimizasyon, sistemlerin en verimli noktalarda çalışmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı, son yıllarda optimizasyon yöntemlerinin kullanılması birçok disiplin için kaçınılmaz hale gelmiştir. Bilim insanları ve araştırmacılar, bir yandan yeni optimizasyon yöntemleri geliştirirken, diğer bir yandan da bu yöntemleri birçok alana uygulamışlardır. Bu uygulama alanlarının en önemlileri arasında, kontrol uygulamaları gösterilebilir. Söz konusu bu uygulama alanında optimizasyon yöntemleri kullanılarak, kontrolörün optimum noktalarda çalışması sağlanmaktadır.

Bu yöntemlerden birisi olan LQR algoritması uygun bir durum geri beslemeli denetleyici bulmak için otomatik bir yol sağlar. Düzenli bir sentez sürecine sahip olan doğrusal kuadratik regülatör kontrol aynı zamanda da yüksek seviyede dayanıklı kararlılığa sahiptir. Bu optimal kontrol yöntemi, sistem değişkenlerinin hata değerlerinin geri beslenmesi yoluyla uygulanmaktadır. LQR yöntemi; hesaplanmış kontrolör kazanç katsayıları, kontrol edilen sistem çıkışı en uygun kontrol girişi ile geçici rejimden sürekli rejime geçiş yaparak istenen giriş referans değerini yakalar.

Durum geri besleme kontrolünde kullanılan durum değişkenlerinin tahmin edilmesi de, sistem performansı ve sistemin verimli çalışması açısından çok önemlidir. Kalman filtresi doğrusal sistemlere uygulanan bir kestirimcidir. Kalman filtresi ortalama karesel hatayı en aza indirerek durumları tahmin eden, gürültü gibi bozucu etkileri en aza indiren matematiksel bir metottur. Bu filtre yapısı özellikle uzay ve askeri teknoloji gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır. Her bir zaman diliminde gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle beraber üretir. Kalman filtresi kullanılarak elde edilen sonuçlar, bize sistem çıkış işareti ile referans giriş işareti arasındaki hatanın çok az olduğunu göstermektedir.

Yapılan araştırmalar LQR kontrolör ve Kalman filtre durum kestirimcisinin beraber kullanılmasıyla birlikte oluşturulan algoritmaların daha dayanıklı bir kararlılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bu tez çalışması toplam sekiz bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; tezin konusu genel olarak tanıtılmış, tezin önemi ve amacı hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde; konu ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmaların özetleri verilmiştir.

Üçüncü bölümde; tezde kullanılacak materyal ve metotlar sunulmuştur. Uygulanacak metotlar ve servo sistem detaylı incelenmiştir. Servo sistemin pozisyon kontrolünde kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Genel olarak gözlemleyiciler anlatılmıştır. Bir gözlemleyici türü olan Luenberger gözleyici ve kalman durum kestirimcisi detaylı olarak incelenmiş ve tasarımı için yapılması gereken aşamalar verilmiştir. Bir optimal kontrol yöntemi olan lineer kuadratik regülatörün (LQR) yapısı, çalışması ve tasarımı hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde; servo sistemin matematiksel modelinden faydalanılarak, kalman filtresi ile durum kestirimi sonucu durumlar elde edilmiştir. Bu durumların gürültülü ortamda ve gürültüsüz ortamda elde edilen sonuçları grafikler üzerinde gösterilmiştir. Yine servo sistemin matematiksel modeli kullanılarak Luenberger gözleyici tasarımı gerçekleştirilmiş ve gözleyicinin sistem durumunu tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Ayrıca sistemin Luenberger gözleyicisi ile durum tahminleri elde edilmeye çalışılmış ve sonuç olarak gözleyicinin sistemi bir noktadan sonra yakaladığı görülmüştür.

Beşinci bölümde; lineer kuadratik regülatör yöntemi kullanılarak servo sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak optimal kontrol ağırlık matrisleri belirlenmiştir. Seçimi yapılan parametreler doğrultusunda sistem üzerine LQR ile regülasyon ve referans takibi gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar grafiklerle gösterilmiştir.

Altıncı bölümde; benzetim ortamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Servo sistemin LQR denetleyicisi ve kalman durum kestirimi ile ayrı

ayrı ve birlikte yapılan kontrolü sonucu elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca sistemin Luenberger gözleyicisi kullanılarak LQR ile kontrolü ve sistem tanımlama yöntemi ile elde edilen tasarım ile karşılaştırılmasına ait sonuçlarda gösterilmiştir.

Yedinci bölümde; yapılan tez çalışmasında elde edilen sonuçlar tartışılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tezin son bölümünde; tezde faydalanılan kaynaklara yer verilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde, servo sistemlerin kontrolü ile ilgili çeşitli metotlar verilmiştir. Ayrıca, doğrusal kuadratik regülatör ve kalman filtresi üzerine değişik çalışmalar mevcuttur. Tezde faydalanılan bazı önemli çalışmaların literatür özetleri aşağıda verilmiştir.

Mahit G., ve ark. (2013) yapılan çalışmada, tüm parçaları tasarlanan elektronik kontrollü bir pülverizatörün karışım tankının seviye kontrolü ve ilaç karışım oranı Lineer kuadratik regülatör ve bulanık mantık kontrol teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem yapısındaki tüm parçalar ayrı ayrı tasarlanan çekilir bir tip pülverizatörün kontrolü, tamamen elektriktir ve kullanıcı sadece dokunmatik operatör panelinden ilaç karışım miktarını ve dekar başına atılması gereken bilgileri girmektedir. Karışım tankına alınan temiz su ve kimyasal ilaç sıvı oranları reçeteye bağlı kalarak karışım modeli türetilmiştir. Girişler ve çıkışlar için kullanılan kontrol valfinin ayarı kontrolör tarafından istenilen su seviyesine göre yapılmaktadır. Karışım ve seviye kontrolü için yapılan LQR tasarımının amacı istenilen çalışma performansını sağlayacak olan pratik bileşenler ile bir sistemi gerçekleştirmektir. Elde edilen model üzerinde LQR kontrol metodu uygulanarak alınan sonuçlar bulanık kontrol sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Matlab/Simulink yazılım programı yardımı ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre LQR kontrolünde aşım olmadığı gözlenmiş ve bulanık kontrol yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır (Mahit Güneş 2013).

Şinasi A., ve ark. (2014) yapılan çalışmada, bir doğru akım motoru (DC) rotor hız kontrolünün rotor hız algılayıcı düzeneği kullanmadan gerçekleştirilmesini ele almıştır. Ölçülen motor durum değişkenlerini kullanarak ölçülemeyen motor durum değişkenini kestirmek ve bu değişkenlere ilave olan ortam gürültüsünü ortadan kaldırmak amacıyla Kalman Filtreleri (KF) kullanılmıştır. Motor durum değişkenleri, değişken genlikli bozucu yük altında ve değişken referans hızlarında kestirilerek, doğrusal karesel regülatör (LQR) için giriş değerleri olarak kullanılmıştır. LQR ve KF bileşimi ile oluşturulan doğrusal karesel Gaussian (LQG) kontrol yöntemin kestirim, filtreleme ve kontrolör başarımı Matlab ortamında gözlenmiştir. Sistemin durum değişkenleri olan motor rotor hızı ve armatür akımı Kalman filtresi kullanılarak kestirilmiş, hız kontrolü için doğrusal karesel regülatör (LQR) ile oluşan doğrusal

karesel Gaussian (LQG) kontrol yöntemi kullanılmıştır. LQG kontrol algoritmaları yüksüz, sabit sürekli ve rassal yük altında simülasyon ortamında çalıştırılarak kontrol başarımları incelenmiştir. Yüksüz çalışma ortamında LQG istenen giriş hızına 4 ms’de ulaşırken kalıcı durum hatası sıfır olup aşırı olarak cevap vermiştir. DC motoruna 0.75’inci saniyede uygulanan 0.85 Nm’lik bozucu yük altında yüksüz durumdaki gibi hızlı cevap verirken sıfır kalıcı durum hatası vermiştir. Rassal hız ve bozucu yük altında çalışırken daha hızlı kalıcı duruma geçerken aynı şekilde aşırı sıfır kalıcı durum hatası verdiği izlenmiştir. Kontrol yönteminin başarısı iki adet performans denemesine hassas ve dayanıklı cevaplar ile kanıtlanmıştır. Aynı zamanda kontrol sistemi sayesinde motor miline bağlanması gereken bir donanım olan takometre ve eşdeğerlerinin kullanım zorunluluğunu ortadan kaldırmıştır (Şinasi Arslan 2014).

Demet C. T. (2015) yapılan çalışmada, son yıllarda pek çok araştırmaya konu olmuş çok rotorlu insansız hava araçlarından quadcopterler veya quadrotorlar için bir adaptif kontrol sistemi tasarlanmıştır. Qball-X4 isimli quadrotorun konum ve açı denetlemesi, dinamiği belli olan sistemlerde kullanılan LQR kontrol, adaptif kontrol ve klasik kontrol yöntemlerinden PID kontrol ile ele alınmış ve karşılaştırılmaları yapılmıştır. Matlab/Simulink benzetim ortamında test edilen bu denetleyicilerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, adaptif kontrol sistemi ile üç ekseninde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Adaptif denetleyiciyi performans açısından LQR denetleyici izlemektedir (Tosun 2015).

Chingiz H., ve ark. (2013) yapılan çalışmada, normal olarak radyo kontrollü bir uçak olarak kullanılan küçük bir İHA seçilmiştir. Bir kanat seviyesinde uçuş durumu için lineerleştirilmiş denklemler ve durum uzayı matrisleri elde edilmiştir. Daha sonra, yükseklik seviyesini kontrol etmek için LQR yöntemini kullanan optimal bir kontrol cihazı tasarlanmıştır. Gürültülerin ölçümler üzerindeki etkisi hesaba katılmış ve doğru ölçümlerin elde edilmesinde ve istenilen kontrol seviyesine ulaşılmasında Kalman filtresinin etkinliği, sistem için tasarlanmış denetleyici kullanılarak gösterilmiştir. Küçük İHA, kontrol girişleri elevatör sapması ve itme hızı aracılığıyla LQR kontrol cihazını kullanarak arzu edilen yüksekliğe komuta edilmiştir. LQR etkinlik matrisleri, etkili bir yükseklik denetleyicisi oluşturmak için gerekli kazançları bulmak için seçilmiştir. Öncelikle kontrolör, bozucuların olmadığı bir ortamda denenmiştir. Ardından bir Kalman filtresi tasarlanmış ve bozulma altındaki sistem tasarlanan

kontrolör ve filtreye test edilmiştir. Sonuçlar, Kalman filtresinin ve LQR kontrol cihazının etkililiğini ortaya koymaktadır (Chingiz Hajiyev 2013).

Carlos O. Moreira, ve ark. (2011) yapılan çalışmada, Matlab'da, 2 MHz' de çalışan, Buck kalibrasyonlu sayısal Kalman durum tahmincisi' ne sahip düşük örnekleme frekanslı Dijital LQR uygulanmaktadır. Çalışmada son zamanlardaki devre gereksinimleri, klasik kontrol yöntemlerini ve analog devrelerde pratik olmayan yeni algoritmaları karşılayabilecek dijital kontrolörler gibi çözümlere yol açtığı için bu konu üzerinde durulmuştur. Doğrusal-kuadratik regülatörlerin (LQR), DC-DC çevirici' yi kontrol etmek için kullanılacak ilginç özellikler sunduğu ortaya koyulmuştur. LQR kontrolün, bir Kalman durum tahmincisi ile uygulandığında, yalnızca bir çıkış sensörü ile algılayan ve akım sensörü kullanmayan bir kontrol yöntemi uygulayabildiğine yer verilmiştir. Yüksek frekanslı kutuplu Orantılı-İntegral-Türev (PID) gibi klasik kontrol yöntemleri, ortalama harici gerilim telafi döngüsü ile akım modu, Kalman durum tahmincisi ve Dijital LQR ile Analog LQR, karşılaştırma amacıyla Matlab'da uygulanmıştır (Carlos O. Moreira 2011).

João Marcos K., ve ark. (2013) yapılan çalışmada, Kalman filtresi ve doğrusal kuadratik regülatör (LQR) temelli yeni bir kontrol şeması, güç kalitesi kontrol cihazlarının performansını arttırmak için önerilmiştir. Yük değişimleri, frekans sapması, gerilim bozulması, hat empedansı, dengesizlik ve ölçüm gürültülü gibi değerler dikkate alınmıştır. Aynı zamanda çalışmada LQR kontrolörünün daha iyi performansa sahip olmasını sağlayan yeni bir sistem modeli de geliştirilmiştir. Bu yeni denetleyici yapısı, önerilen kontrol sisteminde kullanılan ortak bağlama noktasındaki durum uzay değişkenlerini tahmin eden Kalman Filtresine (KF) dayanan bir algoritma sayesinde mümkün olmaktadır. Bu algoritma, kontrolör için referansların üretilmesinden de sorumludur. Önerilen kontrol sistemi bir dijital sinyal denetleyicisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin performansını doğrulamak için kapsamlı testler ve deney sonuçları sunulmuştur. Sunulan algoritmada, PCC voltajlarıyla ilgili durum uzayı değişkenleri çok doğru bir şekilde tahmin edilir ve hızlı yakınsama göstermiştir. Sonuçlar, gelişmiş kontrol yapısının, yüksek hat empedansı ve frekans sapması altında bile iyi bir izleme davranışı gösterdiğini, dengesizlikler de dahil olmak üzere büyük bir yük sınıfı için iyi bir performans sağladığını göstermiştir (Kanieski, Cardoso et al. 2013).

S. Mishra, ve ark. (2013) yapılan çalışmada, en iyi "Q" ve "R" matrislerini ortaya çıkarmak için biyocoğrafya temelli optimizasyon (BBO) tekniği uygulanmıştır, böylece bir mikrogriddeki bozulmayı takip eden frekans gezintisi minimuma indirilmiştir. Pratik bir sistemdeki tüm durumlar ölçülebilir olamayacaklarından bunları tahmin etmek için Kalman tahmincisi kullanılmıştır. Diğer ölçülen durumlarla birlikte bu tahmini durumlar, istenen kontrol sinyalini üretmek için LQR tarafından kullanılmıştır. Bir ana kontrolör ve uygun bir iletişim protokolüyle entegre edilmiş tabanlı şemayı kullanarak microgrid daha akıllı hale getirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yaklaşımın, mikrogrid frekans tepkisini geliştirdiğini ve aynı zamanda akıllı mikro şebekenin frekans kontrolünde yeni bir alternatif yöntem olduğunu göstermektedir (Mishra, Malleshm et al. 2013).

Miseon H., ve ark. (2013) yapılan çalışmada, tekerlekli bisiklet robotunun dengesini sağlamak için Kalman filtresiyle birlikte LQR yöntemini kullanılarak dengeli bir kontrolör tasarlanmıştır. Fiziksel modele uygulamak için Matlab'da simülasyonlar yaparak tekerlekli bisiklet iki tekerlinin hassas denge kontrolü mümkün olmuştur. Kalman filtresi uygulanarak gyro ve ivme sensörlerinin durumları tahmin edilmiştir. Tamamlayıcı filtre ile karşılaştırıldığında, Kalman filtresinin üstünlüğü ortaya konulmuştur. Doğrusal olmayan elemanlar LQR denetleyicisi kullanılarak doğrusallaştırılmıştır. Parametreler, LQR kontrol cihazında uygulanmıştır. Sonuç olarak, yapılan tekerlekli bisiklet iki tekerlisinin dengeli olması ve kullanıcının herhangi bir sorun olmaksızın dengeli olarak sürebildiği görülmüştür (Miseon Han 2013).

Hasan Hüseyin B., ve ark. (2014) yapılan çalışmada, ters sarkacın denge probleminde yönelik çalışılan bu çalışmada sarkacın matematik modeli doğrusallaştırılmış ve doğrusal karesel düzenleyici yöntemi ile kontrolü yapılmıştır. LQR kontrol tasarımı yapılırken, sarkacın dikey olarak dengede tutulması bununla birlikte arabanın başlangıç noktasına getirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, denge kontrolünü iyileştirmeye yönelik olarak yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık (YBM) kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan kontrolör tasarımları performans açısından deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

LQR kontrol uygulama verileri Matlab/Simulink ANFIS Editor ortamında yapay sinir ağı tabanlı eğitilerek elde edilen YBM ve LQR kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır. Kontrol sistemleri Quanser doğrusal ters sarkaç deney cihazında

uygulanmıştır. LQR kontrolcüde, sistemin bütün durum değişkenleri aynı ağırlıkta değerlendirilirken, YBM kontrolcüde ise sarkaç açısının minimize edilmesi ve arabanın referans konumu gerçekleştirmesi öncelikli kontrolcü performans kriteri olarak alınmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için tercih edilen YBM kontrolcü ile doğrusal olmayan sistem davranışlarındaki olumsuz etkiler azaltılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, YBM kontrolcü LQR kontrolcüye kıyasla belirtilen kontrolcü performans kriterini sağlamakta daha başarılı olduğu görülmüştür (Hasan Hüseyin Bilgiç 2014).

Yusuf M., ve ark. (2014) yapılan çalışmada, bir doğru akım (DC) motorunun kontrolü ve gürültü ortamlarda kalman filtresinin etkisi ve kalman filtre destekli kontrolörlerin performansları karşılaştırılmıştır. İlk önce DC motor durum uzay sistemine göre matematiksel olarak modellenmiştir. Daha sonra motorun hız kontrolünü sağlamak için doğrusal kuadratik regülatör (linear quadratic regülatör-LQR) ve oransal integral (proportional integral-PI) yöntemleri kullanılmıştır. Dc motor sistemine hem işlem gürültüsü hem de ölçüm gürültüsü uygulanmıştır ve kontrol sistemlerinin gürültü ortamındaki performansını arttırmak için kalman filtresinin tasarımı yapılmıştır. Filtreli LQR ve PI denetimli sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve sistemin ortalama karesel hata ve yatışma süresi kriterlerine bakıldığında PI, taşma miktarı ve tepe genliği kriterlerine bakıldığında LQR denetiminin daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

Muaddasar A. ve ark. (2018), güç sisteminde genetik algoritma kullanarak yük frekans kontrolü için optimal lineer kuadratik kontrolör tasarımı adlı çalışmasında; güç sisteminde yük frekans kontrolü (LFC) için optimal lineer kuadratik gauss (LQG) kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID kontrolör çok yavaş olduğu için sistem lineer kuadratik regülatör kullanılarak kontrol edilmiş ve Q ve R ağırlık matrisleri genetik algoritma yöntemiyle belirlenmiştir ve frekans sapmalarında azalma ve yerleşme süresi, bu yöntemlerle başarılı bir şekilde sağlanmıştır (Muddasar Ali 2018).

Muneeb Masood R. (2014), Kuadro rotor İHA'ları için genişletilmiş Kalman Filtresi ve LQR kontrol cihazı tasarımı adlı çalışmasında; küçük bir insansız hava aracı için lineer kuadratik regülatör (LQR) yöntemi ile optimal bir kontrolör tasarlanmıştır. Alınan ölçümler üzerindeki bozulmaların etkisini daha iyi değerlendirmek için, sistemde aynı zamanda Kalman filtresi de kullanılmıştır. Sonuç olarak, Kalman

filtresine sahip bir LQR kontrol cihazının İHA'nın hareket kontrolünde etkili olduğu ve bu tür uygulamalar için kullanılabileceği gösterilmiştir (Raja 2017).

Al-Maliki A.Y. ve ark. (2018), DC motorun sensörsüz hız kontrolü için PID tipi FLC kontrol cihazı tasarımı ve ayarlanması adlı çalışmada; DC motorun farklı yüklerle performansını incelemek için üç kontrolör PI, PID ve Bulanık Mantık Denetleyici (FLC) tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sonuçlar, FLC'nin PI ve PID kontrol cihazına kıyasla daha iyi yanıt verdiğini göstermektedir (Abdullah Y. Al-Maliki 2018).

Tuğçe Y. ve ark. (2017) bu çalışmada, akademik çalışmalar kapsamında üniversite – laboratuvar ortamına kazandırılan arabalı üçlü ters sarkaç sisteminin gerçekleştirilen tasarımından bahsedilmiş, üretilen sistemin parametreleri açıklanmıştır. Sistemin matematiksel modeli çıkartılmıştır. Gelecek çalışmalarda yapılması hedeflenen gerçek zamanlı uygulamalara zemin oluşturması amacıyla arabalı üç çubuklu ters sarkaç sisteminin kontrolü Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Optimal kontrol yöntemlerinden olan LQR ve LQG kontrol yapısı incelenmiş ve özellikleri üzerinde durulmuştur. Her iki kontrol yapısı da sisteme uygulanmıştır. Araba referans konumda iken sarkaçların yukarıda dengede durması her iki kontrol yönteminde de sağlanmıştır.

Ömer Ö. ve İrfan Y. (2018) bu çalışmada, sürekli-akım modunda çalıştırılan alçaltıcı tip DA-DA dönüştürücüler için ayrık-zamanda üç farklı kontrolör tasarlanmış ve benzetim çalışmaları ile performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın yürütülebilmesi için ilk önce alçaltıcı tip DA-DA dönüştürücünün matematiksel modeli elde edilmiştir. Dönüştürücünün sürekli-akım modunda çalışabilmesi için kritik indüktans değeri belirlenmiştir. Daha sonra ayrık-zamanda üç ayrı kontrolör; kayan kipli kontrolör, doğrusal karesel regülatör ve oransal-integral-türev kontrolörleri tasarlanmış ve bu kontrolörlerin performansları yerleşme zamanı, aşım ve bozuculara karşı dayanıklılık kriterleri açısından benzetim çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Andres R. ve ark. (2017) bu çalışmalarında, yol kenarı açısını dikkate alan ve hem yanal denge hem de devrilme kontrolü için özel olarak aktif süspansiyon kullanan ana yenilik olarak bir Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) yanal stabilite ve rollover kontrol cihazı geliştirilmiştir. Yol bankası ile ilgili temel sorun, araçtaki sensörler aracılığıyla ölçülememesidir. Bu makalede önerilen çözüm, Kalman filtresi kullanarak bu değişkenin tahminini gerçekleştirmektedir. Bu şekilde, yol rahatsızlık bileşeni ile

aracın dönüş açısı arasında ayırım yapmak mümkündür. Kontrol cihazının etkinliği, deneysel olarak onaylanmış bir araç modeli kullanılarak TruckSim'de yapılan simülasyonlar aracılığıyla test edildi. Taşıt davranışında elde edilen gelişmeleri ölçmek için yanal yük transferi, yuvarlanma açısı, yalpalama hızı ve yan kayma açısı analiz edilmiştir. Bu amaçla, bu değişkenler hem pasif süspansiyon kullanan bir araçtan hem de bulanık bir mantık denetleyicisi kullanan bir araçtan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

D. Angelina V. ve N. Devarajan (2013) bu çalışmada, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) prosesi için kontrolör tasarımı, proses dinamikleri ve proses değişkenleri arasındaki etkileşimlerdeki değişiklikler nedeniyle zordur. Bu makale, Doğrusal Kuadratik Düzenleyici (LQR) ve kalman durum tahmin tekniklerini kullanarak çok değişkenli bir işlem için bir Lineer Kuadratik Gaussian (LQG) Kontrol Cihazı tasarlama yaklaşımını sunmaktadır. Önerilen sistemin performansı, simülasyon kullanarak referans izleme ve bozulma reddetme davranışı için test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yönteminin etkinliğini onaylamıştır.

3. MATERYAL VE METHOD

3.1. Gözlemleyiciler

Durum geri beslemeli sistemlerde çoğu durumda geri bildirim için tüm durumları ölçmek mümkün değildir ve durum geri besleme kontrolünü uygulamak için ölçülemeyen durum değişkenlerini tahmin etmek gerekir. Ölçülemeyen durum değişkenlerinin tahminine genellikle gözlem denir. Durumları tahmin eden veya gözlemleyen bir cihaza (veya bir bilgisayar programına) durum gözlemcisi veya basitçe gözlemci denir. Eğer durum gözlemcisi sistemin tüm durum değişkenlerini gözlemlerse, bazı durum değişkenlerinin doğrudan ölçüm için uygun olup olmadığına bakılmaksızın, tam dereceli bir durum gözlemcisi olarak adlandırılır. Durum vektörünün boyutundan daha az tahmin eden bir gözlemciye, indirgenmiş bir durum gözlemcisi veya kısaca indirgenmiş gözleyici denir. Temel olarak, bir tahmin edicinin uygulanmasının iki şekli vardır: açık çevrim ve kapalı çevrim. Bu ikisi arasındaki fark, tahmin edicinin cevabını ayarlamak için kullanılan tahmin hatasını içeren bir düzeltme terimidir. Kapalı çevrim tahmincisi gözlemci olarak adlandırılır. Açık döngü tahmincilerinde, özellikle düşük hızlarda, parametre sapmalarının hem sabit durumda hem de geçici durumda sürücünün performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bununla birlikte, parametre uyumsuzluğuna karşı sağlamlığı arttırmak ve ayrıca kapalı döngü gözlemcileri kullanarak sinyal gürültüsü vermek mümkündür. Bir gözlemci, gözlemlenecek sistem için kullanılan temsil türüne göre sınıflandırılabilir. Eğer sistem deterministik ise, gözlemci deterministik bir gözlemcidir; aksi takdirde stokastik bir gözlemcidir. En sık kullanılan gözlemciler Luenberger ve Kalman tipleridir. Luenberger Gözlemcisi (LO) deterministik tiptedir ve Kalman Filtresi (KF) stokastik tiptedir.

Bir sistemin gözlemlenebilirliği, sistem durum değişkenlerinin çıkışta gözlemlenebilmesi ile mümkündür. Denklem (3.1)'de durum uzay modeli verilen bir sistem göz önüne alındığında sistem gözlemlenebilirliği durumları da içeren çıkış denklemiyle bağlantılı olduğu görülür. Bir sisteme gözlemleyici tasarlayabilmek için, sistemin gözlemlenebilir olması gerekmektedir. Sistemin gözlemlenebilir olması için;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

denklem (3.2) ile verilen P_o matrisinin rankının n olması gerekir. Başka bir deyişle bu matrisin determinantının sıfırdan farklı olması gerekir.

3.1.1. Luenberger Gözlemleyicisi

Deterministik bir lineer sistemin bilinmeyen durumlarını gözlemleyebilmek için tasarlanan durum gözlemleyicisi ilk olarak, 1971'de David Luenberger tarafından önerildi. Tasarlanan gözlemleyicinin parametreleri doğrusal zamanla değişmeyen sistemler içindir ve kontrol teorisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Durum uzay modeli Denklem (3.3)'te tanımlanan bir sistem için Luenberger gözlemleyicisi Denklem (3.4) gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L[y(k) - C\hat{x}(k)] \quad (3.4)$$

Gözlemleyiciye ait Denklem (3.4)'te y ve u parametreleri gözlemleyicinin girişini, \hat{x} parametresi ise çıkışı ifade etmektedir. Denklem en sağındaki terim olan $L(y(t) - C\hat{x}(t))$ ifadesi, ölçülen y durumları ile gözlemlenen \hat{y} durumları arasındaki farkı gösteren düzeltme terimidir. Bu düzeltme teriminin eklenmesi ile sistem kararsız olsa bile gözlemcinin kararlılığını ve yaklaşmasını sağlar.

Denklemden kullanılan L parametresi gözlemleyici kazanç matrisidir. Durum tahmin hatasının gösterimi aşağıdaki gibidir;

$$e = x(k) - \hat{x}(k) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'teki durum tahmin hatası Denklem (3.4)'te tekrar yazılacak olursa;

$$\dot{\hat{x}}(k+1) = A x(k) + B u(k) - A \hat{x}(k) - B u(k) - L [y(k) - C \hat{x}(k)] \quad (3.6)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (3.6) düzenlenirse;

$$\dot{\hat{x}}(k+1) = (A - LC) \hat{x}(k) \quad (3.7)$$

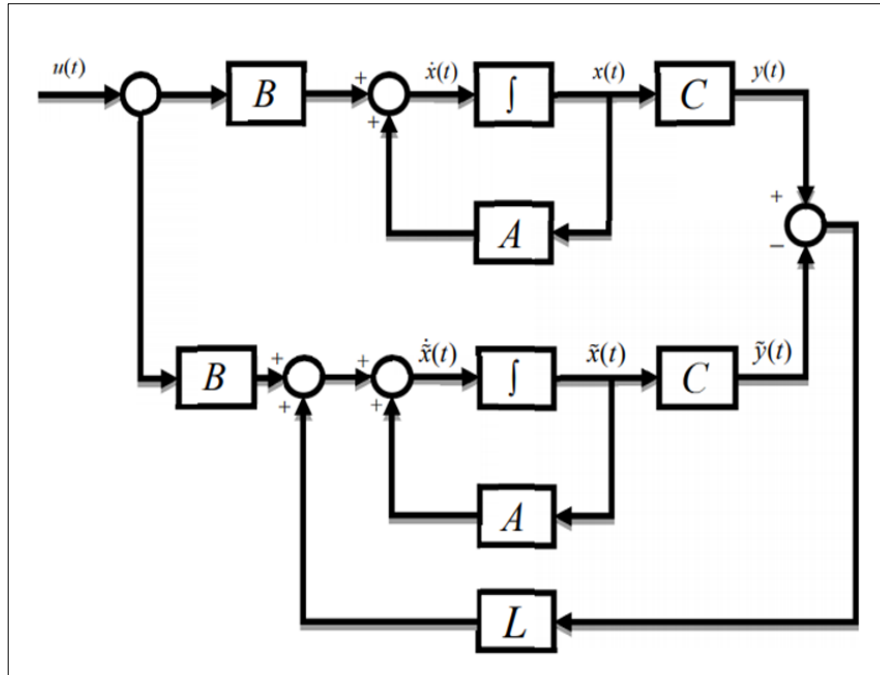
şeklinde elde edilir ve durum hata tahmini başlangıç koşuluna göre;

$$\hat{x}(k) = (A - LC)^k (x(0) - \hat{x}(0)) \quad (3.8)$$

denklemini elde edilir.

Denklem (3.8)'den, durum hata tahmininin dinamiği, $A - LC$ matrisinin öz değerleri tarafından belirlendiği görülebilir. $A - LC$ matrisinin öz değerleri s - düzleminin sol yanında bulunuyor ise, hata vektörü herhangi bir başlangıç değeri $x(0)$ ' dan, sıfıra yakınsayacaktır. Eğer (A, C) çifti gözlemlenebilir ise o zaman $A - LC$ matrisinin öz değerleri keyfi olarak yerleştirilebilir.

Gözlemleyici kazancı L 'nin büyük seçilmesi durumunda, durum hata vektörünü etkileyen dış bozucuların sisteme etkisi artacaktır. Tasarlanan gözlemleyicinin başarılı olması A matrisinin doğru bir şekilde bilinmesi ve lineer zamanla değişmeyen olmasına bağlıdır. Şekil 3.1'de Luenberger gözleyici blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.1. Luenberger Gözleyici Blok Diyagramı

3.2. Kalman Filtresi

Modern sistemlerin çoğu, ölçüm verisine dayanan gizli (bilinmeyen) değişkenlerin tahminini sağlayan sayısız sensörle donatılmıştır. Örneğin, GPS alıcısı, konum ve hızın bilinmeyen değişkenler olduğu ve uydu sinyallerinin varış zamanının farklı zamanlarının ölçüm olduğu konum ve hız tahminini sağlar.

İzleme ve kontrol sisteminin en büyük zorluklarından biri, belirsizlik durumunda gizli değişkenlerin doğru ve kesin tahminini sağlamaktır. GPS alıcısında, ölçüm belirsizliği, termal gürültü, atmosferik etkiler, uydunun konumlarındaki küçük değişiklikler, alıcı saat hassaslığı ve daha birçok gibi birçok dış faktöre bağlıdır.

Kalman filtresi, en önemli ve yaygın tahmin algoritmalarından biridir. Kalman Filtresi yanlış ve belirsiz ölçümlere dayanan gizli değişkenlerin tahminlerini üretir. Ayrıca, Kalman Filtresi, geçmiş tahminlere dayanarak gelecekteki sistem durumunun bir tahminini sunar (Gaeid 2013).

Kalman Filtresi 1950'li yıllarda matematiksel sistem teori bulucusu olan Rudolf Emil Kalman tarafından ortaya konulmuş ancak 1960'lı yıllara kadar duyulan şüpheler dolayısı ile kullanımı yaygınlaşmamıştır. Ancak 1960 yılında ilk kez araç navigasyon sisteminde ve Apollo programında kullanıldıktan sonra hızla yaygınlaşmış ve özellikle elektrik, elektronik, makine, havacılık, uzay ve kontrol mühendisliği alanlarında çok önemli bir gelişme sağlamıştır (Deshpande and Deshpande 2012). Filtre, Rudolf E. Kalman'dan (19 Mayıs 1930 - 2 Temmuz 2016) sonra adlandırılmıştır.

Bugün Kalman filtresi, hedef izleme (Radar), konum ve navigasyon sistemleri, kontrol sistemleri, bilgisayar grafikleri ve çok daha fazlasında kullanılmaktadır.

Kalman filtresi filtreleme özelliğinin yanı sıra sistemin durum kestirimini yani tahminini yapabilen bir matematiksel formülasyondur. Aynı zamanda yapılan hataları sürekli minimize ederek gerçek değere ulaşmayı amaçlar. Sistemin bir önceki bilgileri ile giriş ve çıkış bilgilerini kullanarak bir sonraki zaman aralığının tahminini gerçekleştirebilen bir filtredir. Formülasyon olarak oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir, bu nedenle birçok uygulamada kullanılırken zorlanılır (Nivedita 2015).

Kalman filtresinin temel mantığında, tahmin etmek, karşılaştırmak, güncellemek ve yeni bilgilerle daha iyi bir tahmin vardır. Sürekli elde edilen tahmin üzerine daha iyi olması için çalışan bir filtredir.

Uygulamalarda kullanılan birçok sistem dinamiktir. Bundan dolayı bu sistemler modellenirken sistemi etkileyen birçok faktör ölçülemez. Bu ölçülemeyen faktörlerden dolayı yetersiz bilgilere sahip bir sistem hakkında çıkarım yapabilmek için kalman filtresi oldukça uygun bir yöntemdir. Aslında kalman filtresi bilmediğimiz bilgiler dâhilinde bile bize sistem hakkında tahminler sunabilen ve bu tahminleri sürekli istenen değerlere yakınsamaya çalışan bir filtredir. Kalman Filtresi, geleneksel tahmin edicilerde olduğu gibi filtreleme özelliğine rağmen, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin etmek için çok güçlü ve yeteneklidir.

Gürültülü sistemlerde de durum tahminlerini elde etmek için kalman filtresi kullanımı çok uygun olmaktadır. Filtre, sisteme verilen gürültülü veriler üzerinde de gerçek zamanlı çalışarak hataları, en az-kareler eğri uydurma yöntemi ile filtre eder ve sistemin matematiksel modellenmesi kullanılarak elde edilen bir sonraki durumları matematiksel tahminine göre optimize eder.

Filtre, elde edilen tahminleri gözlem ile karşılaştırılır. Tahminler ve gözlem arasındaki fark, Kalman kazancı adı verilen kazanç ile ölçeklendirilir. Daha sonra sıradaki tahminleri iyileştirmek için modele giriş olarak geri besleme yoluyla uygulanır. Kalman kazancı sistem performansını daha iyi bir hale getirmek için ayarlanabilir şekilde tasarlanır. Kazancın büyük olması durumu filtrenin gözlemleri daha yakından takip etmesine olanak sağlar. Düşük olması durumunda ise sistemin tahminleri daha yakından takip edilir.

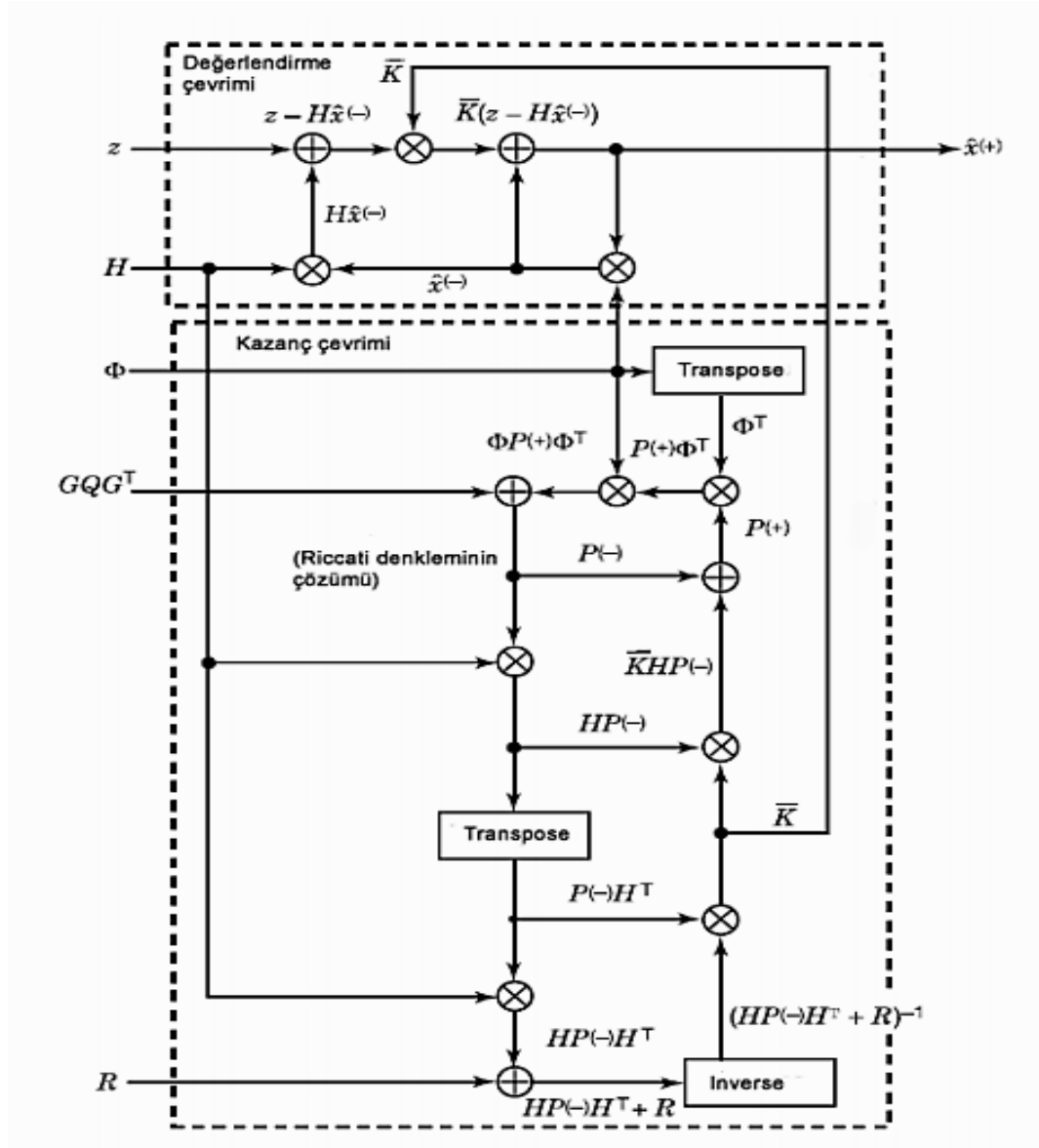
Ölçümün yapıldığı bütün zaman anlarında, Kalman filtresi, gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle beraber üretir. Sıradaki ölçümün sonucu gözlemlendiğinde, bu tahminler, belirsizliği düşük tahminlere daha fazla ağırlık vererek, ağırlıklı ortalama ile güncellenir (Kanieski, Cardoso et al. 2013).

Kalman filtresi sensör füzyonu ve veri füzyonu içinde kullanılır. Tipik olarak, gerçek zamanlı sistemler bir sistemin durumunu elde etmek için tek bir ölçüm yapmak yerine birçok ardışık ölçüm üretir. Bu ölçümler daha sonra o zaman anında sistemin durumunu tahmin etmek için matematiksel olarak birleştirilir.

Kalman filtresi birçok alanda sistemin durumunu tahmin edebilen bir yöntemdir. Matematiksel olarak doğrusal sistemlerin durumlarını tahmin eder. Uygulamalarda

kullanılabilecek yararlı bir filtredir. Teorik olarak oldukça güçlü bir filtredir. Çünkü mevcut filtreler içinde kestirim hatasını minimize eden tek filtredir.

Kalman filtresinin genel akış diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. R.E. Kalman, ayrık veri doğrusal filtreleme problemine özinelemeli bir çözümü tanımlayan ünlü makalesini yayınladı. O zamandan beri, dijital hesaplamalardaki büyük gelişmeler nedeniyle, Kalman filtresi, özellikle özerk veya yardımcı navigasyon alanında kapsamlı araştırma ve uygulamalara konu olmuştur.



Şekil 3.2. Kalman Filtresi Genel Akış Diyagramı

Teorik olarak KF, doğrusal kuadratik Gauss problemi olarak adlandırılan şeyin bir tahmincisidir; bu, lineer sistemin anlık durumunu, durumla ilgili lineer olarak doğrusal olan ancak Gauss gürültüsü ile bozulan bir ölçümden tahmin etme problemidir. Elde edilen tahmin edici, tahmin hatasının herhangi bir kuadratik fonksiyonuna göre statik olarak optimaldir. Matematiksel bakış açısına göre, KF minimum kareler yönteminin verimli bir özyinelemeli hesaplama çözümü sağlayan bir denklemler kümesidir. Filtre birkaç yönden çok güçlüdür. Geçmişin, şimdiki ve gelecekteki durumların tahminini sağlar. Bu, modellenen sistemin kesin özellikleri bilinmese bile sağlanır. Modern kontrol teorisi başka bir disiplinin temelini bir parçasıdır. KF, sistemin durumunu belirsiz dinamiklerle tahmin etmek için gürültülü sensör çıkışlarını birleştirmek için oldukça etkili ve çok yönlü bir prosedürdür. Fiziksel bir sisteme uygulandığında, gözlemci veya filtre iki gürültü kaynağının etkisi altında olacaktır. Bunlar;

1. İşlem gürültüsü - örneğin, sistemin bir parçası olan bir dirençteki termik gürültü.

2. Ölçüm gürültüsü - örneğin, niceleme gürültüsü.

Aşağıda Kalman filtresine dair temel özellikler sıralanmıştır:

- a) Kalman filtresi filtre özelliğinin yanında daha çok bir tahmin edicidir.
- b) 20. yüzyılda yapılan en önemli buluşlardan biri olduğu söylenebilir.
- c) Bazı matematik alt yapılarla filtreye tamamen olmasa da hakim olmak mümkündür.
- d) Yazılım ortamındaki uygulamalarda kullanılmak için çok uygundur.
- e) Rekürsif bir metottur.
- f) Denklemleri çok karmaşık ve matrisleri çok gizemli olsa da bazı durumlarda ihmal edebilir ya da göz ardı edilebilir.

3.2.1. Kalman Filtresinin Matematiksel İfadeleri

Kalman filtresinin en basit şekli aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada, K_k Kalman kazancı dışındaki bütün değerler bilinmektedir.

$$\hat{X}_k = K_k Z_k + (1 - K_k) \hat{X}_{k-1} \quad (3.9)$$

Burada alt indis olan k harfi durumları gösterir. Bu indis ayırık zaman aralıkları olarak varsayılabılır. Şöyle ki, $k=1$ olduğunda 1 s (saniye), $k=5$ olduğunda ise 5 s olarak kabul edilebilir.

Burada amaç x sinyalinin tahmini \hat{X}_k olan değerini bulmaktır. Her bir k için bu değer bulunmaya çalışılır. Z_k burada ölçülen değerdir. Bu değer doğruluğu kesin olarak bilinemez. Diğer türlü bütün bunların yapılmasına gerek kalmazdı. Burada en önemli parametre K_k Kalman kazancıdır ve \hat{X}_{k-1} değeri ise sinyalin önceki durumdaki tahminidir. Bu denklemdaki bilinmeyen eleman Kalman kazancıdır (K_k). Çünkü zaten ölçülen değer (Z_k) ve öndeki tahmin edilen sinyal (\hat{X}_{k-1}) bilinmektedir. Her bir durum için buradaki Kalman kazancı hesaplanmalıdır.

Kalman filtresinin iki denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} x_k &= A x_{k-1} + B u_k + w_{k-1} \\ Z_k &= H x_k + v_k \end{aligned} \quad (3.10)$$

Sinyalin her bir x_k değeri birinci denklem kullanılarak bulunur. Herhangi bir x_k değer, önceki değerinin (x_{k-1}) üzerine kontrol sinyali (u_k) ve önceki işlem gürültüsü (w_{k-1}) eklenerek oluşturulan lineer bir kombinasyonla bulunur.

İkinci denklemle ise, herhangi bir ölçüm değeri (z_k), sinyalin değeri (x_k) ile ölçümün gürültüsünün (v_k) lineer kombinasyonundan oluşur.

Denklem 3.10'te kullanılan her iki gürültüde Gaussian olarak ele alınır. İşlem gürültüsü (w_k) ve ölçüm gürültüsü (v_k) istatistiksel olarak birbirinden bağımsızdır.

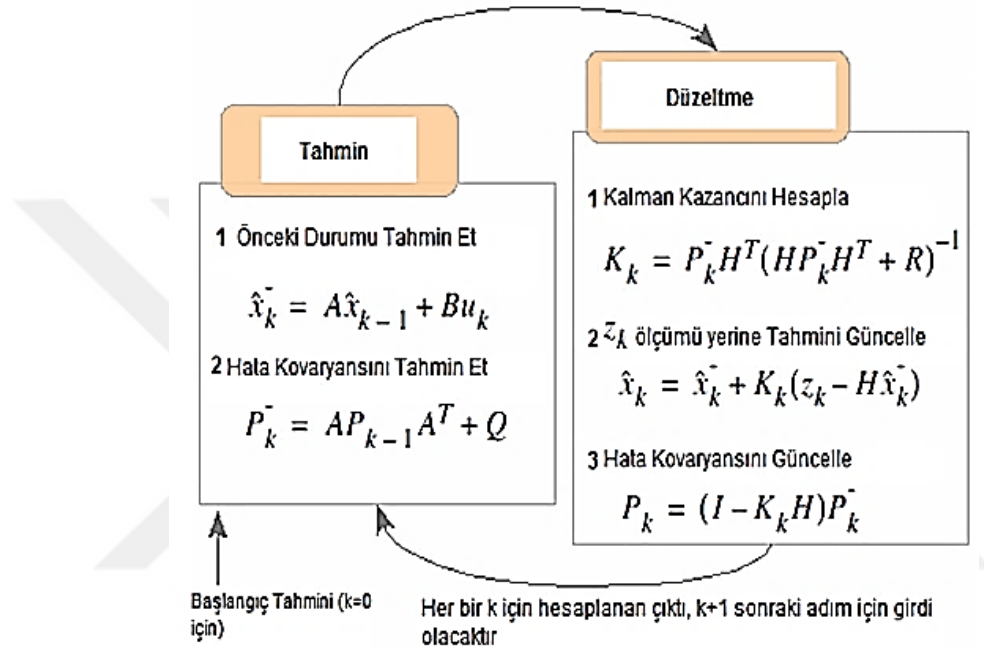
A, B ve H ise matrislerin genel gösterimidir.

Model, kalman filtresine uydurulduysa bundan sonraki adım gerekli parametreleri ve başlangıç değerlerini belirlemektir.

Kalman filtresi iki temel aşamadan oluşan bir yapıya sahiptir. Bunlardan birincisi tahmin-zaman güncelleme ikincisi ise ölçüm güncelleme ya da düzeltmedir. Tahmini yapılacak durumlar zaman güncelleme ve ölçüm güncelleme arasında sürekli bir döngü içerisinde çalışırlar ve elde edilen tahminin gerçek değere yaklaşmasını

sağlarlar. Her iki denklemde k. durumda işleme konulur. Gerekli olan tüm bilgiler elde edildikten sonra işleme başlanılır.

Şekil 3.3'te \hat{x}_{k-} önceki tahmindir. Yani düzeltme güncellemesi yapılmadan önceki asıl tahmindir. P_{k-} önceki hata kovaryansıdır. Bu iki değer bir sonraki ölçümleri güncelleme - düzeltme aşamasında "önceki" değerler olarak kullanılır. Yani bir sonraki aşamaya girdi olarak girerler.



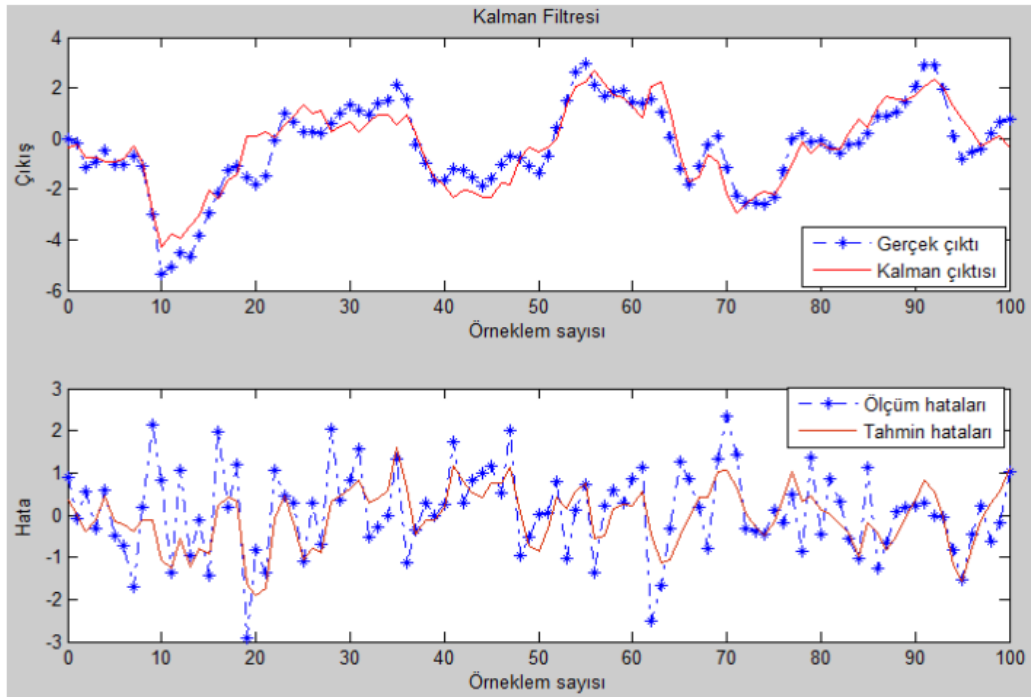
Şekil 3.3. Kalman Filtresi Tahmin ve Düzeltme Denklemleri

Yürütülen kalman filtre algoritması, şu anki k zamanı için \hat{x}_{k-} ve P_{k-} matrislerinin ilk değerleri ile çalışmaya başlar. Durum ölçümlerinin yapıldığı her zaman anında filtre yeni oluşturduğu bilgiyi sistemde kullanmak amacıyla \hat{x}_{k-} ve P_{k-} değerlerini günceller. Bir sonraki döngüde $k+1$ anında yeni bir ölçüm yapıldığında, \hat{x}_{k-} ve P_{k-} için bir sonraki an olan $k+1$ anında yeni değerlerinin bulunabilmesi için filtre sistem modelini kullanarak tahmin etme aşamasına geçer. Daha sonra ölçülen değer yeni değerler üzerine etki edebilmesi için düzeltme basamağı çalıştırılır. En son aşamada ise \hat{x}_{k-} ve P_{k-} 'nin yeni değerleri bulunur. Daha sonra zaman $k+1$ anı ayarlanarak her yeni ölçüm için tahmin etme ve düzeltme basamakları tekrarlanır.

Tahmin etme ve düzeltme basamaklarındaki denklemlerde karşımıza çıkan R ve Q parametreleri, gürültü kovaryans matrisleridir. R ölçüm gürültüsü olarak adlandırılırken Q matrisi işlem gürültüsü olarak adlandırılır. Bu gürültüler gerçekte dinamik ve non-lineardir. Ancak işlem kolaylığı ve kalman filtresine uygulayabilmek için bu gürültü değerleri Gaussian dağılıma uydurularak doğrusallaştırılmıştır.

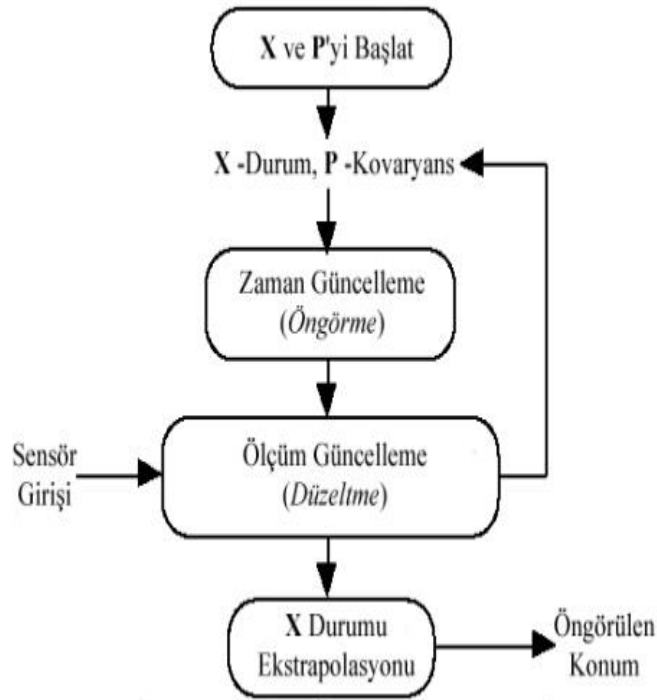
R ölçüm gürültüsünün küçük olması ölçülen tahminlerin doğruluğunu artıran bir faktördür. Filtre tasarımı sırasında R ve Q matrisleri birbirini 1'e tamamlayacak şekilde ya da eşit olarak seçilir.

Kalman filtresi gürültülü ortamlarda daha iyi performans sergilemektedir. Filtrenin asıl amacı da gürültülü sistemlerde kestirim işlemini yapmaktır. Şekil 3.4'te herhangi bir sinyale gürültü eklenerek kalman filtresi ile sistem durumları tahmin edilmiştir ve bu bilgisayar yazılım ortamında gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere sisteme gürültü eklenmesine rağmen kalman filtresi tahminlerinin gerçek çıktıya ne kadar yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Kalman Filtresi Uygulanan Yazılım Çıktısı

Şekil 3.5 kalman filtresinin genel akış diyagramını göstermektedir. Filtre herhangi bir t anı için X ve P matrislerini başlatarak çalışmaya başlar. Durumların ölçümünün yapıldığı her zaman anında filtre yeni bilgiyi işleme almak için X ve P 'yi güncelleştirir. Bir sonraki an olan t_1 anında yeni bir ölçüm yapıldığında, X ve P 'nin t_1 çalıştırır. Daha sonra ölçülen değerlerin yeni değerlerle birleştirilebilmesi için düzeltme basamağı çalıştırılır. Son olarak ise X ve P 'nin yeni değerleri bulunur. Daha sonra zaman t_1 ayarlanarak her yeni ölçüm için öngörme-düzeltilme basamakları tekrarlanır.



Şekil 3.5. Kalman Filtresinin Genel Akış Diyagramı

3.2.1.1. Zaman Güncelleme/ Tahmin

Denklem (3.11) ile düzeltme aşamasında kullanılacak durumların önceki tahmin değerleri bulunmaktadır. Filtrenin tasarımı sırasında kullanılan bu birinci aşamada durum matrisleri A ve B "1" olarak alınır ve kontrol sinyalinin olmadığı varsayılır. Fakat sistemde durum matrisleri ve kontrol sinyali varsa bunlarda işleme dâhil edilmelidir. İfadeden de anlaşıldığı üzere herhangi bir durum tahmin değeri, bir önceki durumun tahmin değeri ile kontrol sinyalinin lineer bir kombinasyonudur.

Başlangıç koşulları bilinmiyorsa $k=1$ için X_{k-1} yani $X_0 = 0$ olarak alınabilir. Başlangıç durum tahmininin 0 alınması sistemin çalışmasını engellemeyecektir. Ancak başlangıç koşullarında sistemin durumu biliniyorsa bu değerleri kullanmak, tahminlerin gerçek değerlere daha hızlı yakınsamasını sağlayacaktır.

$$X_k^- = AX_{k-1} + BU_k \quad (3.11)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'de tahminin edilen durumların hata kovaryansı düzeltme basamağında kullanılmak için bulunmaktadır. Eğer hata kovaryansının başlangıç koşulu ($k = 1$ için $P_{k-1}=P_0$) bilinmiyorsa sıfırdan farklı bir değer alınabilir. Genellikle 1 olarak alınmaktadır.

3.2.1.2. Ölçüm Güncelleme/Düzeltilme

Ölçüm güncelleme basamağında tasarıma ait belirlenmesi gereken en önemli bilinmeyen kalman kazancıdır. Kalman kazancı filtre performansını daha iyi bir hale getirmek için değiştirilebilir.

Kalman kazancı, yapılan ölçümü göz önüne alarak tahmin edilecek durumların ne kadar değişmesi gerektiğine karar. Aslında kalman kazancı bir çarpan olarak durum tahminine eklenir. Filtre tasarımı sırasında kalman kazancı üzerinde en fazla etkiye sahip değişken hata kovaryansıdır (P_k). Hata kovaryansı büyük bir değere sahipse sistem durumlarının tahminleri çok fazla değişiklik gösterir. Bu sebepten dolayı elde edilen yeni ölçümlerle tahmin güncellemesi yapılmalıdır. Hata kovaryansı kalman kazancı ile doğru orantılıdır. Yani hata kovaryansı arttığı zaman kalman kazancıda artar.

Eğer hata kovaryansı küçük ise, durum tahminlerinin çok fazla değişmediği gözlenir. Bu yüzden tahmin değerini sürekli olarak değiştirmek gereksizdir. Hata kovaryansının azalması durumunda ise kalman kazancıda azalır.

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3.13)$$

Kalman kazancı üzerinde etkisi olan bir diğer eleman ise ölçüm gürültüsüdür (R). Ölçüm gürültüsü artması ölçüm değerlerinin doğru olmadığını kanıtlar. Ölçüm

gürültüsü ve kalman kazancı ise ters orantılıdır. Yani ölçüm gürültüsü arttıkça kalman kazancı azalır.

$$X_k = X_k^- + K_k (Z_k - HX_k^-) \quad (3.14)$$

Denklem (3.14) durum tahminlerinin elde edildiği denklemdir. Burada durumları tahmin etmek adına denklem (3.13)'te elde edilen kalman kazancı (K_k) ve k alt indis anındaki ölçüm değerleri kullanılır. Bulunan durum tahminleri zaman güncelleme basamağında girdi olarak kullanılır.

$$P_k = (1 - K_k H) P_k^- \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'te hata kovaryansının bir önceki tahmin değeri kullanılarak zaman güncelleme basamağında kullanılacak olan güncel hata kovaryansı bulunur.

3.3. Lineer Karesel Regülatör (LQR)

Optimal kontrol problemleri kontrol mühendislerinin dikkat merkezinde büyük öneme sahiptir. Optimal kontrol sistemi, tasarımı sırasında seçilmiş olan performans indisinin değerini optimize edebilen sistemlerdir (Hatem Elaydi 2015).

Optimal kontrol, havacılık, proses kontrolü, robotik, biyomühendislik, ekonomi, finans ve yönetim bilimi gibi birçok farklı alanda uygulama bulmuş ve kontrol teorisi içinde aktif bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir. Dijital bilgisayarın 1950'lerde gelmesinden önce, sadece oldukça basit optimal kontrol sorunları çözülebiliyordu. Dijital bilgisayarın gelişi, optimal kontrol teorisi ve yöntemlerinin birçok karmaşık soruna uygulanmasını sağlamıştır.

Optimal kontrol sistemleri tasarımında ideal davranıştan olan sapmaları belli ölçüde minimize eder. Bu minimize etme işlemi seçilmiş olan performans indeksi ile sağlanır. Performans indeksi fonksiyonunun değerine göre, tasarlanmak istenen sistemin var olan sisteme ne kadar yakın olduğu belirlenir.

Optimal kontrol sistemlerinde asıl amaç performans indeksini minimize ya da maksimize etmektir. Minimize ya da maksimize etme olayı performans indisinin yapısına göre değişir. Performans indeksini minimize etmek için uygun kontrol vektörü $u(k)$ seçilmelidir. Optimal kontrol sistemlerinin yapısını belirlediği için performans

indeksi seçimi çok önemlidir. Performans indisinin seçimine bağlı olarak, kontrol sistemi doğrusal, doğrusal olmayan, sabit veya zamanla değişen olacaktır. Performans indisinin seçimine bağlı olarak, oluşturulacak olan sistemin yapısı sistemin isteklerini en uygun şekilde karşılar. Bunun yanında, tasarlanmış olan sistemin istekleri sistemin performans özelliklerinin sağlanması ile aynı zamanda fiziksel olarak gerçekleştirilebilir olmasını da istemektedir.

Kontrol sisteminin optimizasyon probleminin matematiksel olarak ifade edilebilmesi için birkaç faktörün bilinmesi gerekmektedir. Bunlar;

- Sistem denklemleri
- Gözlemlenebilir kontrol vektörleri sınıfı
- Problem sınırları
- Performans indisi
- Sistem parametreleri

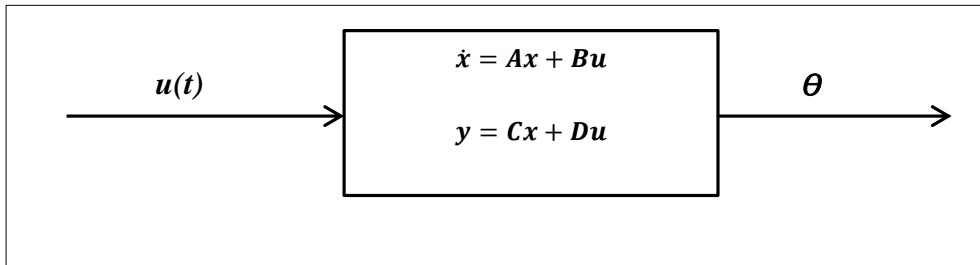
Optimal kontrol probleminin çözülebilmesi $u(k)$ optimal kontrol vektörünün seçilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu $u(k)$ vektörü ;

- Performans indisi yapısına,
- Sınırların yapısına,
- Başlangıç duruma ve başlangıç çıkışa,
- Talep olunan duruma ve talep olunan çıkışa,

bağlıdır.

Optimal kontrol teorisinde, sistem dinamiğinin bir dizi lineer diferansiyel denklem ile tanımlandığı ve maliyetin ikinci dereceden bir fonksiyonla tanımlandığı durum, LQ problemi olarak adlandırılır. Teoride elde edilen ana sonuçlardan biri, çözümün denklemleri aşağıda verilen bir geri besleme kontrolörü olan LQR tarafından sağlanmasıdır. LQR kontrolü, karesel performans indekslerine sahip en uygun kontrol yöntemidir. LQR basittir ve doğrusal durum geri beslemesi veya çıktı geri bildirimini ile kapalı döngü optimal kontrolünü sağlayabilir.

İleri Beslemeli Kontrol Sistemi; kontrol edilen değişkenini etkileyen bozucu etki değişkenini, ölçüp değerlendirdikten sonra önceden tahmin edip gerekli ayar değişkenini düzeltme işlemidir. Diğer bir ifade ile kontrol edilen değişken daha bozulmadan ön tedbir alma işlemidir.



Şekil 3.6. Açık Çevrim Sistem

Geri Beslemeli Kontrol Sistemi; geri bildirim sistemleri işlem sinyalleri ve bu şekilde davranan sinyal işlemcileridir. Bir geri besleme sisteminin işlem bölümü, çok basitten karmaşık devrelere kadar değişen elektriksel veya elektronik donanımlardan oluşabilir. Basit analog geri besleme kontrol devreleri; transistörler, dirençler, kapasitörler vb. gibi ayrı ve bileşenler kullanılarak ya da daha karmaşık dijital geri bildirim sistemleri oluşturmak için mikroişlemci tabanlı ve entegre devreler kullanılarak oluşturulabilir.

Açık çevrim sistemler açık uçludur. Bundan dolayı kazanç, stabilize, sıcaklık, besleme gerilimi gibi devre veya yük parametrelerindeki değişimlerden dolayı sistemde oluşacak varyasyonları gidermeye çalışmaz. Fakat bu açık çevrim sistemlerdeki varyasyonların etkileri ortadan kaldırılabilir veya geri besleme ile önemli ölçüde azaltılabilir.

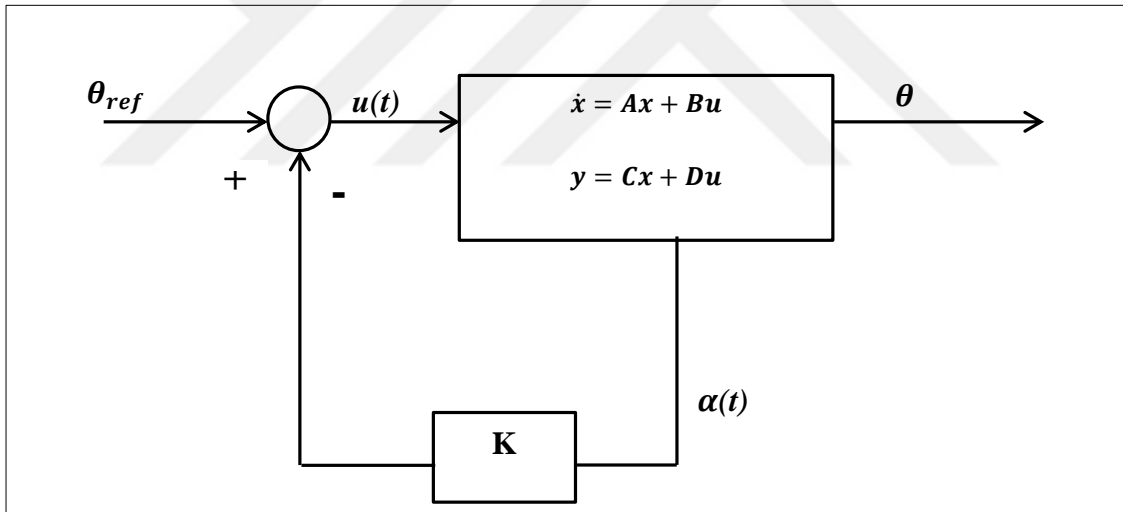
Kapalı çevrim sistemler ise açık döngü sistemi konseptini ileriye doğru kullanan bir veya daha fazla geri besleme döngüsüne sahip kontrol sistemidir. Kapalı devre sistemler istenen çıkış koşulunu gerçek koşulla karşılaştırarak otomatik olarak elde etmek ve korumak için tasarlanmıştır. Bunu çıkış ile referans girişi arasındaki fark olan bir hata sinyalin üreterek yapar. Kapalı çevrim sistemlerde geri besleme, bir sistemden çıkış sinyalinin bir cevap oluşturacak şekilde etkili giriş sinyalini değiştirmesini sağlayan bir alt devreden oluşur.

Geri besleme sistemi çıkış sinyalinin örneklendiği ve ardından sistemi çalıştıran bir hata sinyali oluşturmak için girişe geri beslendiği sistemdir. Geri besleme sistemleri

çok yararlıdır ve amplifikatör devrelerinde, osilatörlerde, proses kontrol sistemleri ve diğer elektronik sistemlerde yaygın olarak kullanılır.

Geri beslemeli kontrol sisteminin blok diyagramı aşağıdaki gibidir. Algılama ve kontrol etme geri besleme kontrol sisteminin temelindeki ana kavramlardır. Geri besleme kontrolün sistemlere uygulanmasında birkaç önemli nokta vardır:

- Sistem kazancı ve tepkisi gibi devre karakteristikleri tam olarak kontrol edilebilir.
- Devre karakteristikleri, besleme gerilimleri veya sıcaklık değişimleri gibi çalışma koşullarına bağlı kalmadan yapılabilir.
- Kullanılan bileşenler doğrusal olmadığı için sinyal bozulmaları önemli ölçüde azaltılabilir.
- Bir devre veya sistemin kazanç, frekans tepkisi ve bant genişliği en az sınırlar dâhilinde kolayca kontrol edilebilir.



Şekil 3.7. Servo Sistem Durum Geri Besleme Kontrolü

Pozitif geri beslemede, ayar noktası ve çıkış değerleri, geri besleme girişi ile faz içi olduğu için kontrol cihazı tarafından bir araya getirilir. Pozitif geri bildirim etkisi, sistem kazancını artırmaktır. Yani pozitif geri bildirim ile elde edilen toplam kazanç, geri bildirim yapılmadan elde edilen kazançtan daha büyüktür. Pozitif geri besleme sistemlerinin örnek olarak operasyonel bir amplifikatöre dayanan bir amplifikatör veya op-amplar verilebilir.

Negatif geri besleme kontrol sistemlerinde, geri besleme asıl girişle faz dışı olduğu için ayar noktası ve çıkış değerleri birbirinden çıkarılır. Negatif geri bildirim etkisi kazancı azaltmaktır. Negatif geri besleme, sistem kararlılığını artıran bir kontrol sistemidir. Negatif geri besleme sistemlerine örnek olarak amplifikatörler verilebilir.

3.4. LQR Kontrolün Genel Tanımı

LQR algoritması, özünde, uygun bir durum geri bildirim denetleyicisi bulmanın otomatik bir yoludur. Bu nedenle, kontrol mühendislerinin, LQR algoritmasının kullanımı üzerinde bir kontrol cihazı bulmak için tam durum geri bildirim gibi alternatif yöntemleri tercih ettiklerini bulmak nadir değildir. Bunlarla mühendis, ayarlanan parametreler ve kontrolör davranışındaki sonuçta meydana gelen değişiklikler arasında daha net bir bağlantıya sahiptir. Doğru ağırlıklandırma faktörlerini bulmadaki zorluk, LQR bazlı kontrolör sentezinin uygulanmasını sınırlar. LQR, pratik geri besleme kazanımları sağlayan iyi bilinen bir tasarım tekniğidir. Doğrusal kuadratik regülatörün türetilmesi için, sistemin durum uzay şeklinde yazılacağı varsayılırsa:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.16)$$

Ve n durumlarının x kontrol cihazı için uygun olduğunu gösterir. Geri besleme kazancı, optimal kontrol vektörünün K_{lqr} matrisidir;

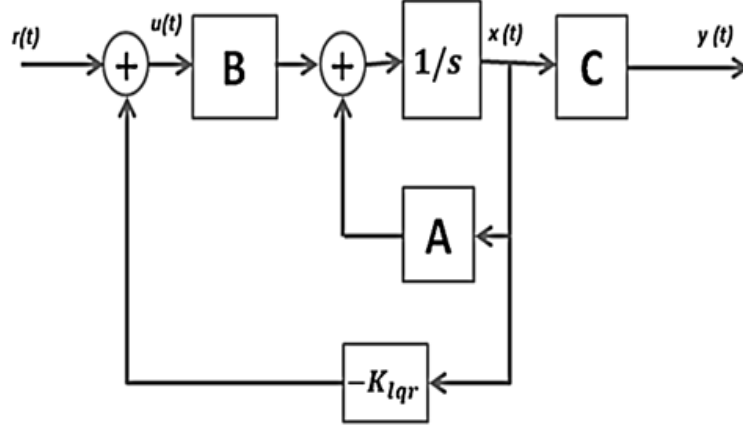
$$u(t) = -K_{lqr}x(t) \quad (3.17)$$

Performans indeksini en aza indirmek için;

$$J = \int_0^{\infty} (x \cdot Qx + u \cdot Ru) dt \quad (3.18)$$

Burada Q , pozitif- tam tanımlı veya pozitif-yarı tanımlı Hermitian veya gerçek simetrik matristir ve R , pozitif-tam tanımlı bir Hermitian veya gerçek simetrik matristir. Denklem (3.18)'in sağ tarafındaki ikinci terim kontrol sinyallerinin enerjisini harcar. Matris Q ve R , hatanın nispi önemini ve bu enerjinin harcanmasını belirler. Bu problemde, kontrol vektörü $u(t)$ 'nin sınırsız olduğu varsayalım. Daha sonra görüleceği gibi Denklem (3.17)'de verilen lineer kontrol yasası en uygun kontrol yasasıdır. Bu nedenle, K_{lqr} matrisinin bilinmeyen elemanları performans indeksini en aza indirecek

şekilde $u(t) = -K_{lqr}x(t)$ belirlenirse, o zaman herhangi bir $x(0)$ ilk durumu için en uygundur. En uygun konfigürasyonu gösteren blok şeması Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. LQR Kontrol Blok Diyagramı

Optimizasyon problemi çözülecek olursa, Denklem (3.17), Denklem (3.16)’da yerine yazılacak olursa;

$$\dot{x} = Ax - BK_{lqr}x' = (A - BK_{lqr})x \quad (3.19)$$

Takip eden türevlerde, $A - BK_{lqr}$ matrisinin kararlı olduğunu veya $A - BK_{lqr}$ özdeğerlerinin negatif gerçekte parçalara sahip olduğunu varsayalım. Denklem (3.17), Denklem (3.18)’de yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} J &= \int_0^{\infty} (x \cdot Qx + x \cdot K_{lqr} \cdot RK_{lqr}x) dt \\ &= \int_0^{\infty} (x(\cdot Q + K_{lqr} \cdot RK_{lqr})x) dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

Gerekli düzenleme yapılırsa;

$$x(\cdot Q + K_{lqr} \cdot RK_{lqr})x = - \frac{d}{dt(x \cdot Px)} \quad (3.21)$$

Burada P pozitif tanımlı Hermitian matris veya simetrik matristir. O halde;

$$x(\cdot Q + K_{lqr} \cdot RK_{lqr})x = -x \cdot Px - x \cdot Px = -x[(A - BK_{lqr}) \cdot P + P(A - BK_{lqr})]x \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'nin her iki tarafını karşılaştırarak ve bu denklemin herhangi bir x için geçerli olması gerektiğine dikkat ederek,

$$(A - BK_{lqr}) \cdot P + P(A - BK_{lqr}) = -(Q + K_{lqr} \cdot RK_{lqr}) \quad (3.23)$$

Eğer $A - BK_{lqr}$, kararlı bir matris ise, Denklem (3.23)'ü karşılayan pozitif tanımlı bir matrisin olduğu kanıtlanabilir. Dolayısıyla bir sonraki adım Denklem (3.23)'ten P 'nin elemanlarını belirlemek ve pozitif olup olmadığını görmektir.

Performans indeksi J olarak değerlendirilebilir;

$$J = \int_0^{\infty} (x(\cdot Q + K_{lqr} \cdot RK_{lqr})x) = -x \cdot Px \quad (3.24)$$

Burada $x(\infty) \rightarrow 0$ 'a gittiği varsayılırsa, J performans indeksi aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$J = x(0)Px(0) \quad (3.25)$$

Böylece performans indeksi, J , başlangıç koşulu $x(0)$ ve P cinsinden elde edilebilir. Doğrusal kuadratik optimal kontrol probleminin çözümünü elde etmek için, şu şekilde devam edilir; R , pozitif-tam bir Hermitian matris olduğu varsayıldığı için gerçek matris yazılabilir;

$$R = T \cdot T \quad (3.26)$$

T , tekil olmayan bir matris ise, Denklem (3.20)'de yazılırsa;

$$(A - BK_{lqr}) \cdot P + (A - BK_{lqr}) + Q + K_{lqr} \cdot T \cdot TK = 0 \quad (3.27)$$

Denklem tekrar düzenlenirse;

$$A \cdot P + PA + [TK_{lqr} - (T \cdot)^{-1} B \cdot P] \cdot [TK_{lqr} - (T \cdot)^{-1} B \cdot P] - PBR^{-1}B \cdot P + Q = 0 \quad (3.28)$$

J , performans indeksinin, K_{lqr} , geri besleme kazancına göre en aza indirilmesi,

$$x[TK_{lqr} - (T \cdot)^{-1} B \cdot P] \cdot [TK_{lqr} - (T \cdot)^{-1} B \cdot P]x \quad (3.29)$$

K_{lqr} , ile ilgili;

$$TK_{lqr} = (T \cdot)^{-1} B \cdot P \quad (3.30)$$

Bundan dolayı;

$$K_{lqr} = T^{-1} (T \cdot)^{-1} B \cdot P = R^{-1} B \cdot P \quad (3.31)$$

Denklem (3.31) optimal K_{lqr} , matrisini verir. Böylece, performans indeksi, J , Denklem (3.18) tarafından verildiğinde, K_{lqr} , burada yerine yazıldığında ikinci dereceden optimal kontrol problemine en uygun kontrol yasası doğrusaldır ve;

$$u(t) = -K_{lqr} x(t) = R^{-1} B \cdot P x(t) \quad (3.32)$$

Denklem (3.28)'deki P matrisi, Denklem (3.16)'da veya aşağıdaki indirgenmiş denklemi yerine getirmelidir;

$$A \cdot P + PA - PBR^{-1}B \cdot P + Q = 0 \quad (3.33)$$

Denklem (3.33) azaltılmış matrisli Riccati denklemi olarak adlandırılır ve P matrisi bu denklem yardımıyla elde edilir.

Tasarım adımları aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

- P matrisi için indirgenmiş matris Riccati denklemi, Denklem (3.33), çözülür.
- Pozitif-tam bir matris olan P varsa (bazı sistemler pozitif tam P matrisine sahip olmayabilir), sistem stabil veya matris $A-BK_{lqr}$ stabildir.
- Bu P matrisi Denklem (3.32)'de yerine koyulduğunda, elde edilen K_{lqr} , matrisi optimal geri besleme kazancı matrisidir.

Eğer $A-BK_{lqr}$ matrisi kararlıysa, mevcut yöntem daima doğru sonucu verecektir. Performans indeksi durum vektöründen ziyade çıkış vektörü cinsinden verilmiştir yani,

$$J = \int_0^{\infty} (y \cdot Qy + u \cdot Ru) dt \quad (3.34)$$

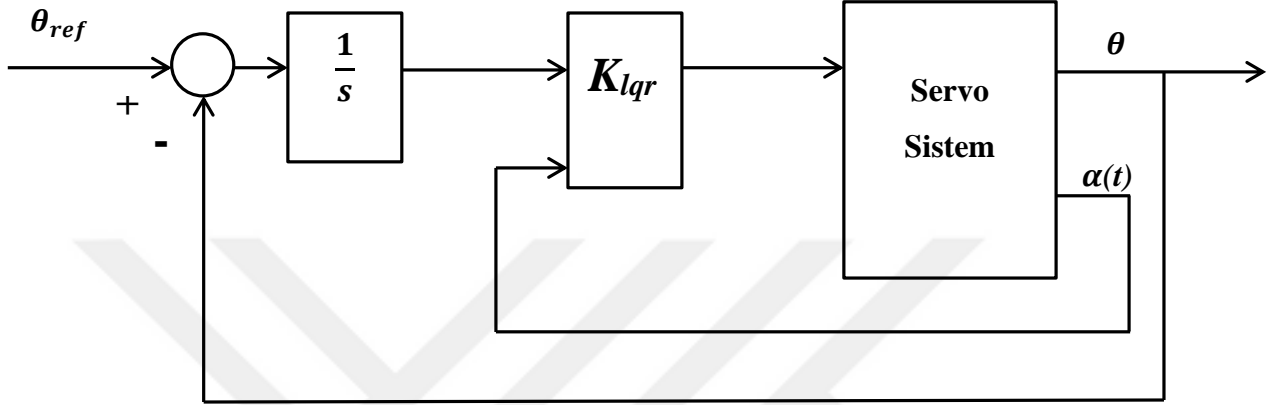
Daha sonra, çıkış denklemi kullanılarak endeks değiştirilebilir,

$$y = Cx \quad (3.35)$$

Böylece;

$$J = \int_0^{\infty} (x \cdot C \cdot Q C x + u \cdot R u) dt \quad (3.36)$$

Burada sunulan tasarım adımları, optimal geri besleme kazancı K_{lqr} matrisini elde etmek için uygulanabilir.

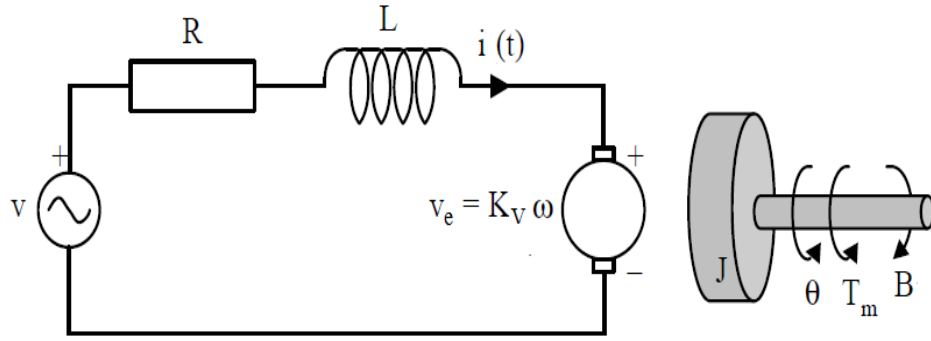


Şekil 3.9. Servo Sistemin LQR Kontrol Blok Diyagramı

3.5. Servo Sistemin Modellenmesi

Kusursuz bir matematiksel model tanımladığı gerçek bir sistemi verdiği kusursuz çıkış yanıtlarıyla tam olarak ifade edebilir. Fakat birçok fiziksel model karmaşık yapılarından dolayı kusursuz model türetilmesini imkânsız hale getirmiştir. Bundan dolayı pratikte güvenli olarak denetleyici tasarımlarında basitleştirilmiş sistem modelleri (düşük dereceli) kullanılmaktadır.

Bir yüke bağlanmış servo sistemin şematik diyagramı Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Genel olarak gösterilen bu elektromekanik sistem iki kısma ayrılabilir: elektriksel kısım ve mekanik kısım. Doğal mıknatıslı servo sistem iki girişli (döneç gerilimi (veya akımı), ve harici tork) ve bir çıkışlı (hız) bir sistem olarak düşünülebilir (Omer Aydogdu 2017).



Şekil 3.10. Servo Sistem Modeli

DC servo sistemde oluşacak denklemlerden ilki üretilen motor torku (T_m) ile armatür akımı (i) ve motor tork sabiti (K_t) ilişkisidir. Bu ilişki aşağıdaki gibi formülize edilir;

$$T_m = K_t i(t) \quad (3.37)$$

Armatür döndükçe armatüre bağlı şaftın açısal hızıyla (w) doğru orantılı olarak bir ters emk gerilimi oluşur. Oluşan ters emk gerilimi aşağıdaki gibidir;

$$v_e(t) = K_v w(t) \quad (3.38)$$

Şekil 3.8'e göre Kirchoff ve Newton kanunlarını kullanarak aşağıdaki denklemleri elde edebiliriz;

$$L_m \frac{di(t)}{dt} + R_m i(t) = v(t) - K_v w(t) \quad (3.39)$$

$$J_s \frac{dw(t)}{dt} + B_s w(t) = K_t i(t) \quad (3.40)$$

$$w(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.41)$$

Burada verilen J_s ve B_s değerleri motor ve yük değerlerini içeren eşdeğer atalet momenti ve sürtünme değerleridir. Ayrıca, θ pozisyon, K_v EMK sabiti, K_t tork sabiti, R_m direnç değeri ve L_m indüktans değeridir.

Denklem (3.39),(3.40) ve (3.41) ele alındığında, türev içeren terimler çekilerek, servo sistemin durum uzay modeli aşağıdaki gibi elde edilir. Burada sistem çıkışı servo pozisyonu olarak alınmıştır.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}(t) \\ \dot{w}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_m / L_m & -K_v / R_m & 0 \\ K_t / J_s & -B_s / J_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ w(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 / L_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v(t) \quad (3.42)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ w(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Sistemin transfer fonksiyonu Denklem (3.44) olarak ifade edilebilir.

$$G(s) = \frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{s \cdot (J_s s + B_s) \cdot (L_m s + R_m) + K^2} \quad (3.44)$$

4. KALMAN FİLTRESİ İLE DURUM KESTİRİMİ

Kalman filtresi pek çok farklı alandaki sistemlerin değerlerini kestirebilen bir yöntemdir. Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse, Kalman filtresi doğrusal bir sistemin durumlarını kestirir. Kalman filtresi sadece pratikte değil, aynı zamanda teorik olarak da güçlüdür. Zira mevcut bütün filtreler içinde kestirim hatasını minimize eden tek filtredir. Kalman filtresi genelde gömülü sistemlere uygulanır, çünkü bir sistemi kontrol edebilmek için sistemin durumları ile ilgili kesin bilgiye ihtiyaç duyulur.

Sinyalden gürültüyü çıkartan Kalman filtresini kullanabilmek için, ölçüm yaptığımız sistemi doğrudan ifade edilebilmelidir.

Sistemlerin matematiksel modellemesi ile ilgili olarak pratikte karşılaşılan iki temel sorun vardır. Bunlar;

1) Sistem modelinin gerçek sistemi tam olarak temsil etmemesi durumudur. Örnek verilecek olursa;

- Sistemde gerçekte var olan bazı dinamiklerin modelde dikkate alınmamış olması,
- Bazı parametrelerin tam doğru seçilememiş olması,
- Sistem parametrelerini bir süre sonra değişmesi, böylece en başta modellemede kullanılmış olan değerlerinden artık farklılık göstermesidir.

2) Sistem çıkışından alınan ölçümlerin mükemmel olmaması durumudur. Bu duruma örnek verilecek olursa;

- Sensörlerin ölçümlerinde bir miktar hata payı olması,
- Ölçümlere gürültü karışmasıdır.

Bu iki durumda da sistemden ölçülen çıkışları daha iyi bir hale getirmek ve sistemin dinamiklerini yöneten durum değişkenlerini tahmin etmek için Kalman filtresi kullanılabilir.

Bölüm 3.5'te ayrıntılı bir şekilde anlatılan servo sistemin durum uzay modelini kullanarak y ölçümlerine dayanarak x durumlarının kestirimi yapılabilir. Durum kestiriminin olması için aşağıdaki iki gereklilik yerine gelmelidir.

- İlk olarak, durum değişkeninin kestiriminin ortalamasının, gerçek sistemin değerlerinin ortalamasına eşit olmalıdır.

- İkinci olarak ise, hata varyansını en küçük yapan kestiriciye ihtiyaç vardır.

Kalman filtresi bu iki durumu da yerine getirir. Ancak Kalman filtresinin uygulanabilmesi için bazı ön kabuller gerekmektedir. Öncelikle durum (w) ve ölçüm (v) gürültülerinin ortalama değerleri sıfır kabul edilir. Daha sonra ise durum gürültüsü ve ilk durum (x) arasında bir bağıntı olmadığı kabul edilir. Bunun sonunca gürültünün ortak kovaryans matrisleri S_w ve S_v aşağıdaki şekilde ifade edilir.

Durum gürültüsü ortak kovaryansı;

$$S_w = E(w_k w_k^T) \quad (4.1)$$

Ölçüm gürültüsü ortak kovaryansı;

$$S_v = E(v_k v_k^T) \quad (4.2)$$

Bu kabullerden sonra Kalman filtresini oluşturan denklemler aşağıdaki gibidir.

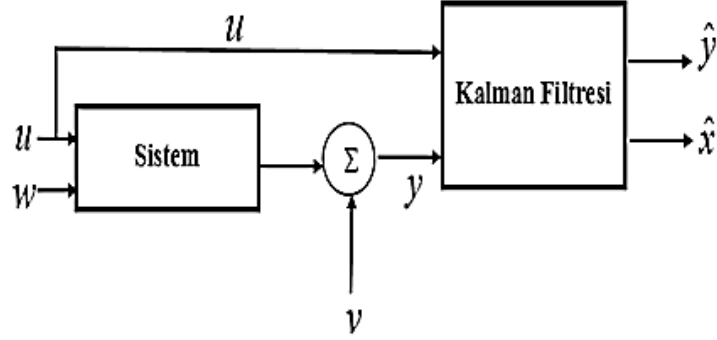
$$\begin{aligned} K_k &= A P_k C^T (C P_k C^T + S_v)^{-1} \\ \hat{x}_{k+1} &= (A \hat{x}_k + B u_k) + K_k (y_{k+1} - C \hat{x}_k) \\ P_{k+1} &= A P_k A^T + S_w - A P_k C^T S_v^{-1} C P_k A^T \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.1. Servo Sistem Durumlarının Kalman Filtresi ile Kestirimi

Bölüm 3.5'te anlatıldığı gibi servo sistemimizi modellediğimizde sistemi tanımlayan doğrusal modelimiz aşağıdaki gibidir;

$$\begin{bmatrix} \dot{i}(t) \\ w(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_m / L_m & -K_v / R_m & 0 \\ K_t / J_s & -B_s / J_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ w(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 / L_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v(t) \quad (4.4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ w(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$



Şekil 4.1. Kalman Durum Kestirimi Blok Diyagramı

Kalman filtre denklemleri her bir adım için bilgisayar yazılım ortamında uygulanınca aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- $Qk=10; Rk=1; \%Filtrenin\ Q\ ve\ R\ parametreleri$
- $Kest1=kalman(ssystem_ss,Q,R); \%Filtrenin\ tasarımı$

```
Kest1 =

a =
      x1_e      x2_e      x3_e
x1_e      -14.44      -0.04261      -1.035
x2_e      1.588e+04      -9.13      -1703
x3_e         0         1      -58.36

b =
      u1      y1
x1_e      5.556      1.035
x2_e         0      1703
x3_e         0      58.36

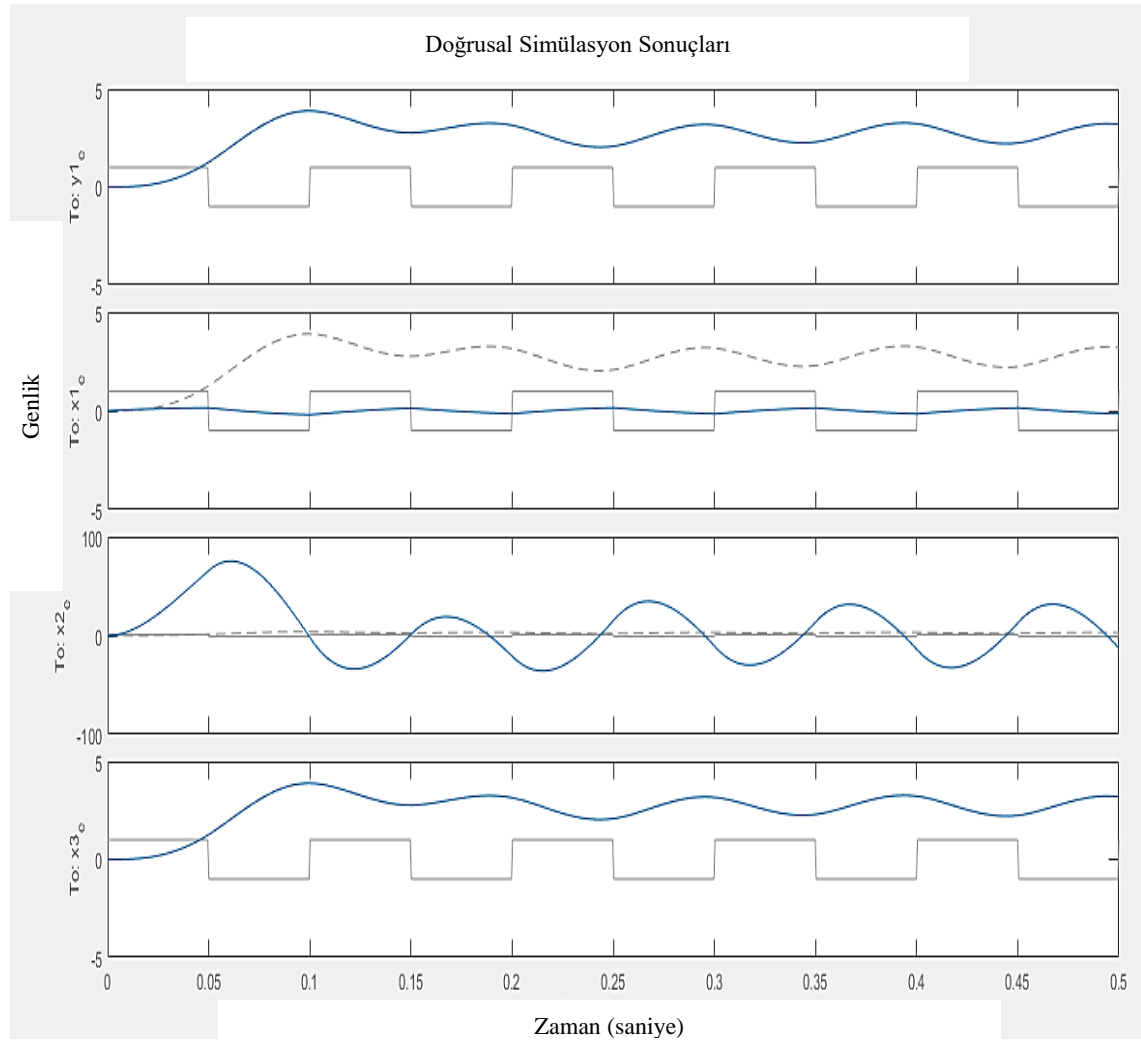
c =
      x1_e      x2_e      x3_e
y1_e         0         0         1
x1_e         1         0         0
x2_e         0         1         0
x3_e         0         0         1

d =
      u1      y1
y1_e         0         0
x1_e         0         0
x2_e         0         0
x3_e         0         0
```

Şekil 4.2. Oluşturulan Kalman Filtresi Durumları

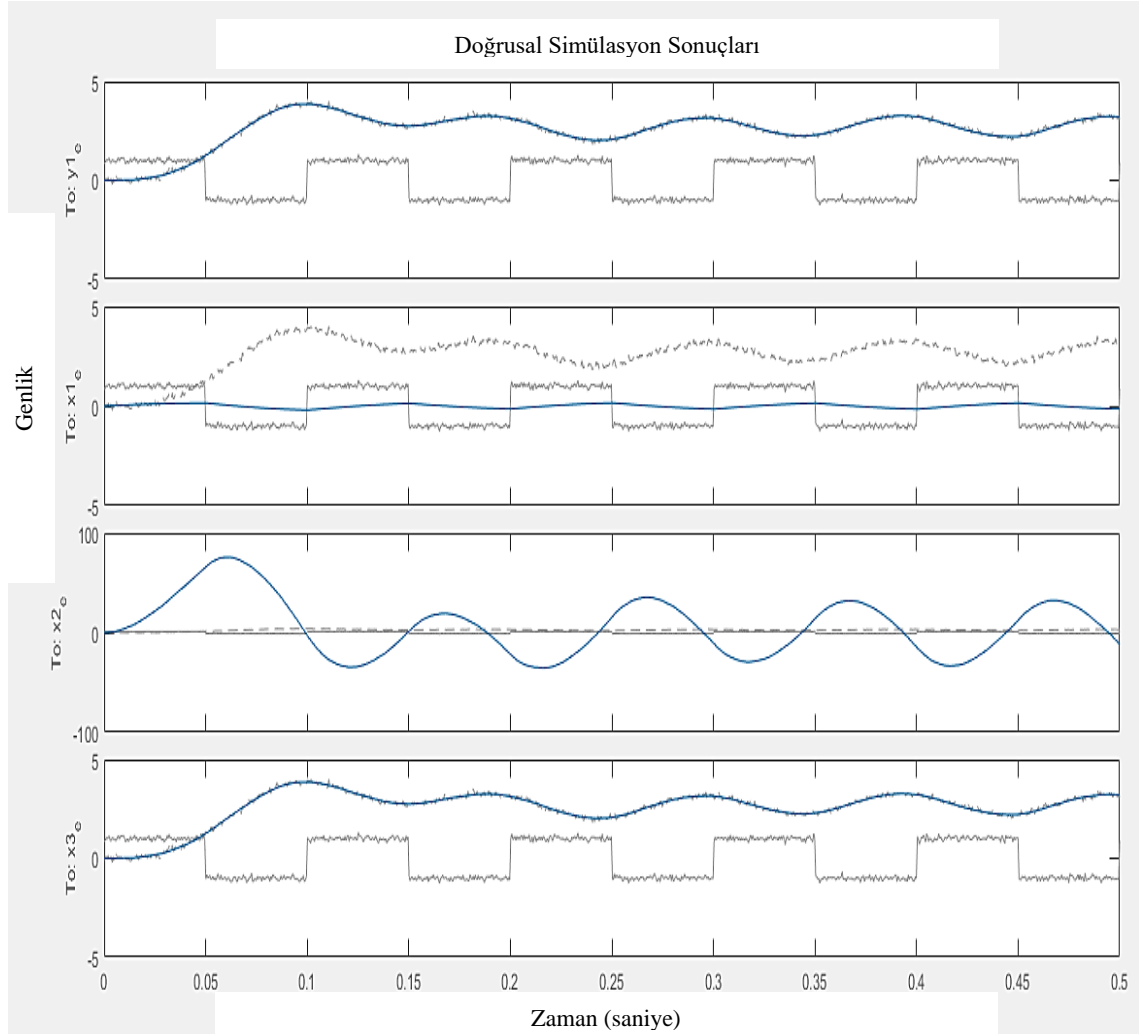
Bilgisayar yazılım ortamında tasarlanan filtre Şekil 4.2’de görüldüğü gibi durum uzay sistemindedir. Filtrenin iki girişi ve üç çıkışı vardır. $u1$, sisteme uygulanan girişi, $y1$ sistemden alınan gürültülü ölçümleri temsil eder. $x1_e$, $x2_e$, $x3_e$ ise sistemin durum tahminlerini göstermektedir.

Tasarlanan filtrenin önce gürültüsüz ortamdaki tepkisini incelenmiştir ve sonuç aşağıdaki gibi olmuştur.



Şekil 4.3. Kalman Filtresi ile Tahmin Edilen Durumlar

Daha sonra tasarlanan filtre asıl amacına uygun bir şekilde kullanılmak üzere giriş ve çıkışlarına bir miktar gürültü verilerek filtre yeniden tasarlanmıştır. Mevcut sistemde hem girişe hemde çıkışa 0.1 genlikli random bir gürültü eklendiğinde;

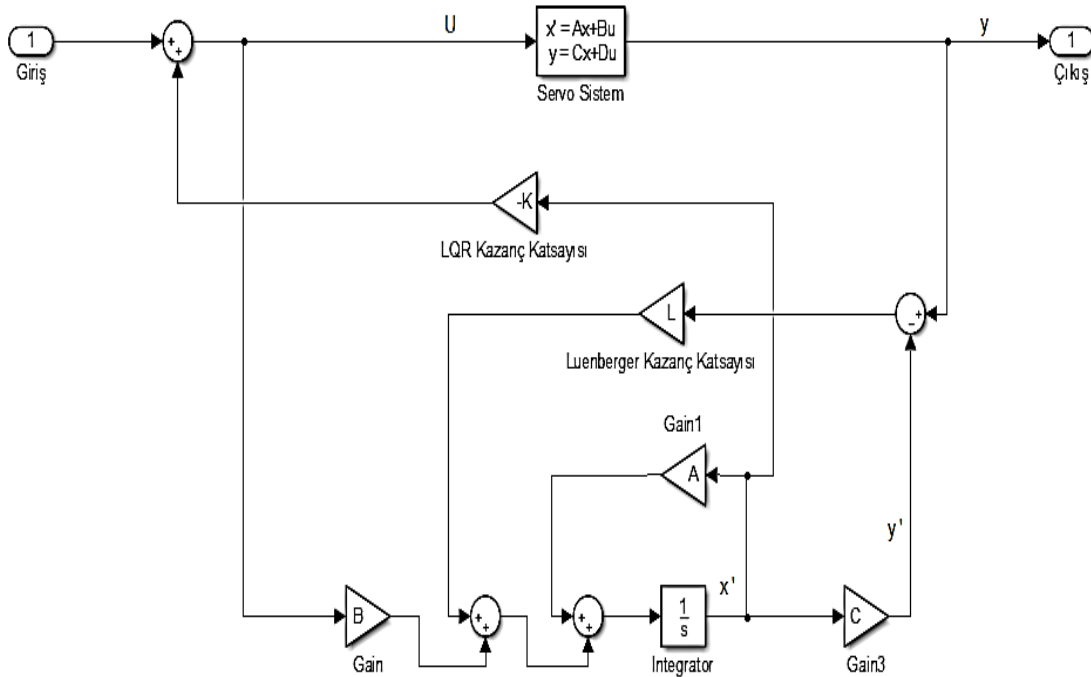


Şekil 4.4. Gürültülü Ortamda Oluşturulan Kalman Filtresi ile Tahmin Edilen Durumlar

Kalman filtresi kullanılarak yapılan durum kestirimi ile sistemin hem gürültülü hem gürültüsüz ortamda gerçeğe en yakın tahminleri verdiği Şekil 4.4 ve Şekil 4.3'te görülmektedir.

4.2. Servo Sistem Durumlarının Luenberger Gözleyici ile Tahmini

Sistem durumlarının bilinmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda sistemin giriş ve çıkışlarını gözlemleyerek durumlar tahmin edilmeye çalışılır. Özel durumlar haricinde doğrusal sistemler için genellikle belli bir sürelik gözlemlerin ardından durum tahminini doğru olarak yapmak mümkündür. Bu yaklaşımın dezavantajı sistem ilk başladığında tahminlerde bir miktar hata olacak olması ve sistemdeki ideal olmayan durumların ve gürültülerin de tahminleri etkileyebilmesidir. En önemli avantajı ise durumları doğrudan ölçmeye gerek kalmamasıdır.



Şekil 4.5. Gözlemleyici Blok Şeması

Gözleyicinin kendi içindeki durumuna \hat{x} diyelim. Amaç \hat{x} 'in zamanla sistem durumu x 'e yakınsamasını sağlamaktır, yani $\hat{x} \leftarrow x$. Gözleyici sisteminin durum denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B u + L (y - \hat{y}) \quad (4.6)$$

$$\hat{y} = C \hat{x} + D u \quad (4.7)$$

Gözleyicinin durum denklemi sisteme çok benzemektedir, sadece ekstradan durum denkleminde $L(y-\hat{y})$ terimi vardır. Bu terim, gözleyicinin çıkışı \hat{y} ile sistem çıkışı y arasındaki fark miktarına göre gözleyici durum dinamiğini hızlandırır veya yavaşlatır. Bu sayede gözleyici durumunun zamanla sistem durumuna yakınsaması sağlanmaya çalışılır. Yakınsama sağlandıktan sonra $\hat{x} = x$ ve dolayısıyla $\hat{y} = y$ olacağından $L(y-\hat{y}) = 0$ olur. Böylece gözleyici dinamiğindeki bu ekstra terimin etkisi ortadan kalkarak gözleyici dinamiği sistem dinamiğine eşit olur ve bundan sonra gözleyici ile sistemin davranışları birbirinin aynısı olarak devam eder, yani gözleyici durumu sistemi izler. Pratikte sistemde meydana gelen değişiklikler, gürültüler vs. sonucunda sistem dinamiği ile gözleyici dinamiği arasında zaman içinde tekrar ayrılıklar meydana gelebilir ama bu durumda yine $L(y-\hat{y})$ terimi devreye girerek bu durumu düzeltir ve gözleyicinin görevini yapmaya devam etmesini sağlar.

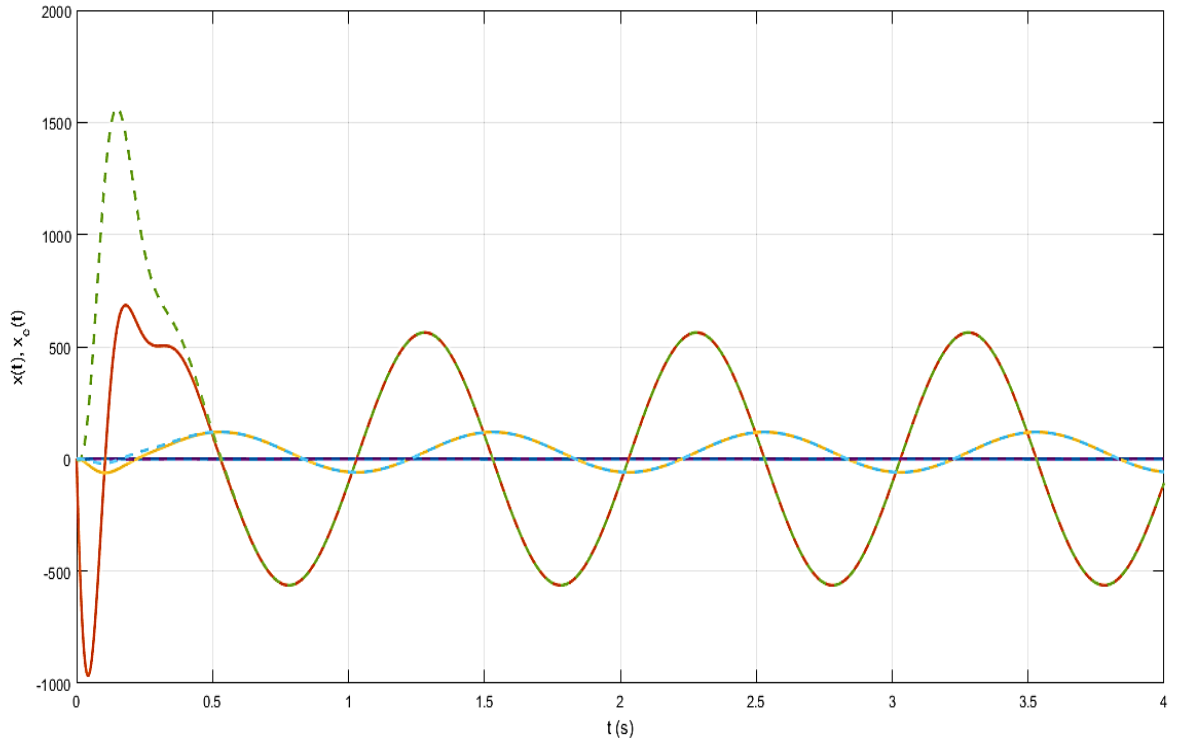
Gözleyici ile ilgili olarak tasarlanması gereken tek parametre gözleyici kazancı olan vektörüdür. Bir takım matematiksel ispatlar sonucunda gösterilebilir ki gözleyicinin kazancı L 'yi, $A'CL'$ matrisinin kutupları sol tarafta yer alacak şekilde seçmek gereklidir. Kutuplar ne kadar hızlı olursa gözleyici o kadar hızlı çalışacaktır.

Gereken tasarımları gerçekleştirdikten sonra oluşturulan gözleyicinin sistem durumunu tahmin etmesini incelediğimizde sonuçlar aşağıdaki gibi olmuştur.

Gözleyici kazancı L ;

$$L = \begin{bmatrix} -0.0052 \\ -589.0889 \\ 27.4251 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

şeklinde bulunmuştur.



Şekil 4.6. Gözleyici Tahmini Sonuçları

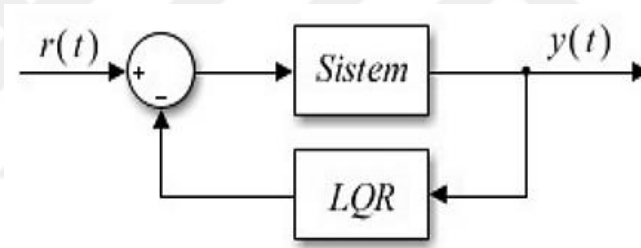
Şekil 4.6’da kesikli çizgiler gözleyici cevabını, düz çizgiler ise sistem cevabını göstermektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi sistem durumunu doğrudan bilmemesine ve sistemle farklı bir noktadan başlamış olmasına rağmen gözleyici durumları zamanla sistem durumlarına yakınsamaktadır. O halde sistemin durumlarını direkt olarak ölçemesek bile, bir gözleyici yardımıyla sistemin giriş ve çıkışına bakarak tahmin edebiliriz.

5. SERVO SİSTEMİN LQR KONTROLÜ

5.1. LQR Algoritması

Optimal kontrol teorisi içinde yaygın bir kullanım alanına sahip olan LQR kontrol sistemi, kolay uygulanabilirliği ve zamanla değişmeyen lineer sistemler için optimal çözümler üretebilmesi açısından birçok alanda tercih edilmektedir (Karaman 2015).

LQR kontrolün optimizasyon probleminde sistemde birbiri ile çelişen iki önemli nokta arasında denge sağlanmaya çalışılır. Bunlardan ilki regülasyon hızının artırılmasıdır. İkincisi ise, kontrolcü girişinin, $u = -K_{lqr}x$, dolayısıyla harcanan enerjinin az olmasıdır. Kontrolcü, MIMO sistemlerde, SISO sistemlerdeki kadar başarılı sonuçlar verebilmektedir.



Şekil 5.1 LQR Kontrol Blok Diyagramı

LQR kontrolör sistemde asıl amaç performans indeksini minimize etmektir. Bu da sistemin durumlarını ve girişlerini, R ve Q olarak adlandırılan ağırlık matrisleri cezalandırılarak performans indeksi minimize edilir.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (5.1)$$

Q pozitif tanımlı veya pozitif yarı tanımlı simetrik bir kontrol matrisidir. Q matrisinin diagonal elemanları her bir durum için katsayı ifade eder. Bu katsayıların büyük olması, sistem kapalı çevrim kutuplarının s domeninde daha sola kaymasını ve bundan dolayı durumların sifira daha hızlı yaklaşmasını sağlamaktadır. R matrisi, tek

giriş tek çıkışlı bir sistem olduğu için pozitif tanımlıdır. Girişin cezalandırılması için kontrol edilmesi gereken matristir.

5.1.1. LQR Optimal Kontrolde R ve Q Matrislerinin Seçimi

Lineer kuadratik regülatörde kontrolör kazancı bulunurken işleme alınması gereken Q ve R matrisleri için matris yapıları ve matris elemanlarının seçimi denklem 5.2 ve denklem 5.3' te verilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} \gamma q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \gamma q_n \end{bmatrix}, Q \in \mathfrak{R}^{n \times n} \quad (5.2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \rho r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \rho r_m \end{bmatrix}, R \in \mathfrak{R}^{m \times m} \quad (5.3)$$

Q ve R matrislerinin yukarıdaki gibi seçilmesi, M girişli ve n durumlu sistemlerde sistem durumlarının optimizasyona dahil edilmesini sağlar Burada γ ve ρ parametreleri ağırlık matrislerinin cezalandırma katsayısı olarak düşünülebilir.

Bir diğer seçim yöntemi basit seçimdir. Burada $Q=I$ ve $R=pI$ şeklinde alınabilir. Bu seçimde kullanılan p parametresi daha iyi sonuçlar elde etmek adına değiştirilebilir.

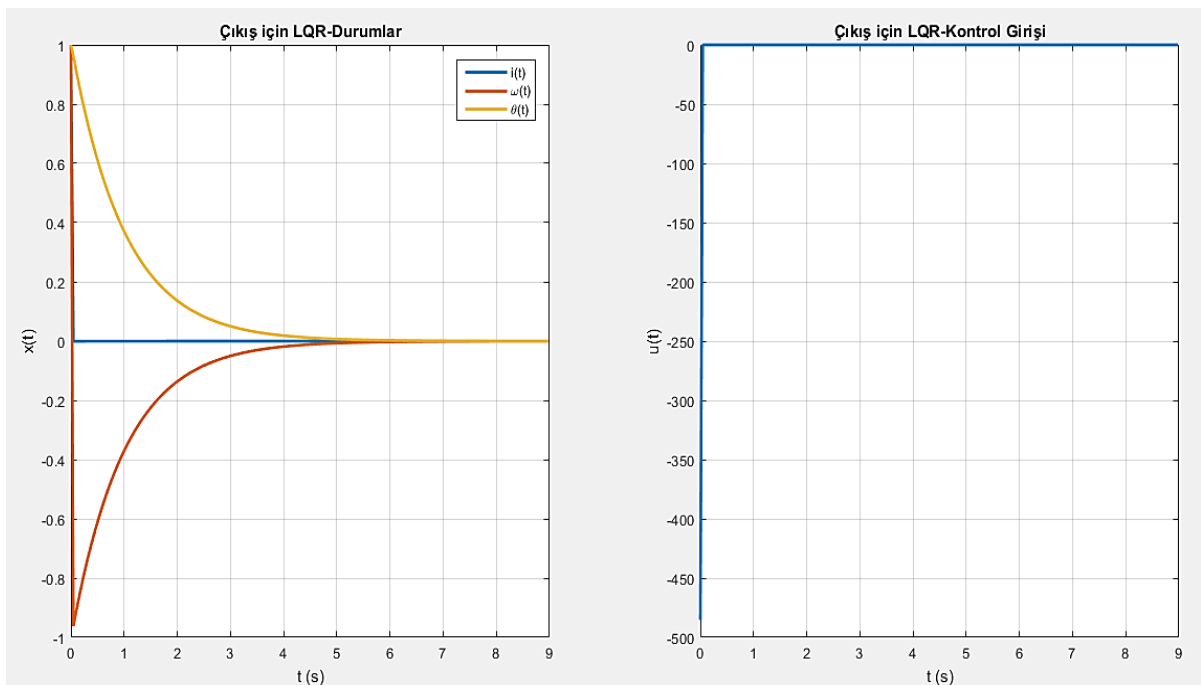
Çıkış seçimi olarak bilinen yöntemde ise istenilen çıkış $y=Cx$ olsun. Eğer (A,C) ikilisi gözlemlenebilir ise $Q=C^T C$ ve $R=pI$ olarak seçilir.

Başka bir şekilde ise deneme yanılma yöntemiyle ağırlık matrisleri Q ve R seçilebilir.

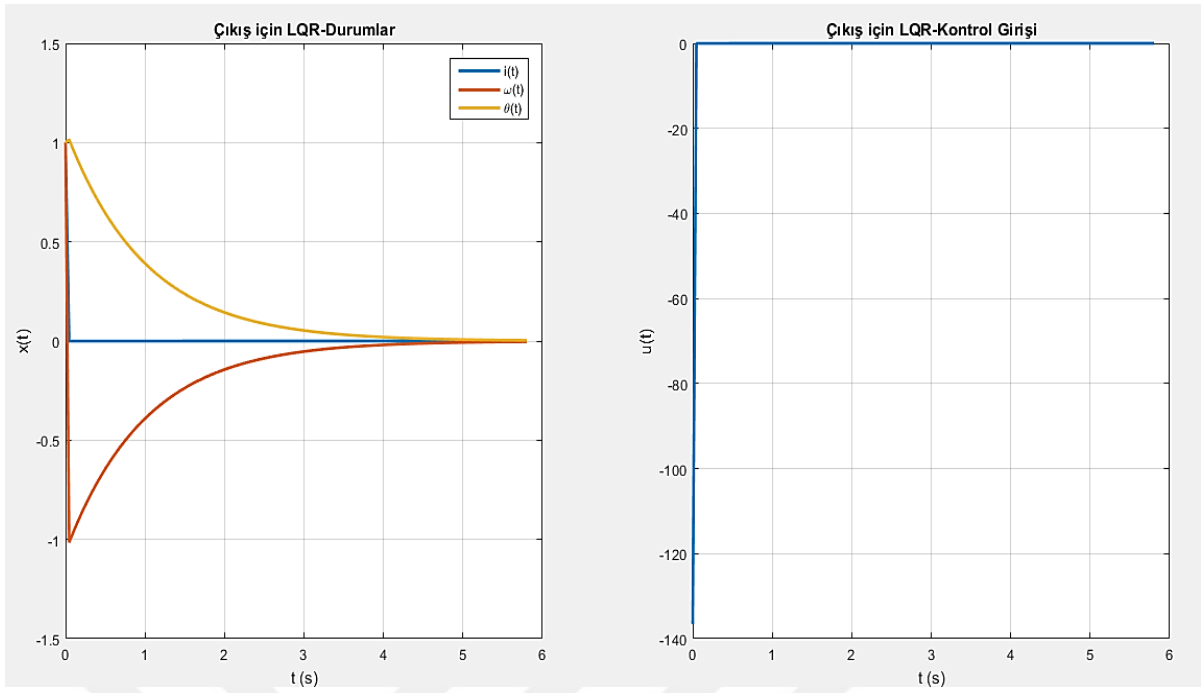
5.2. LQR Kontrol

5.2.1. LQR ile Regülasyon

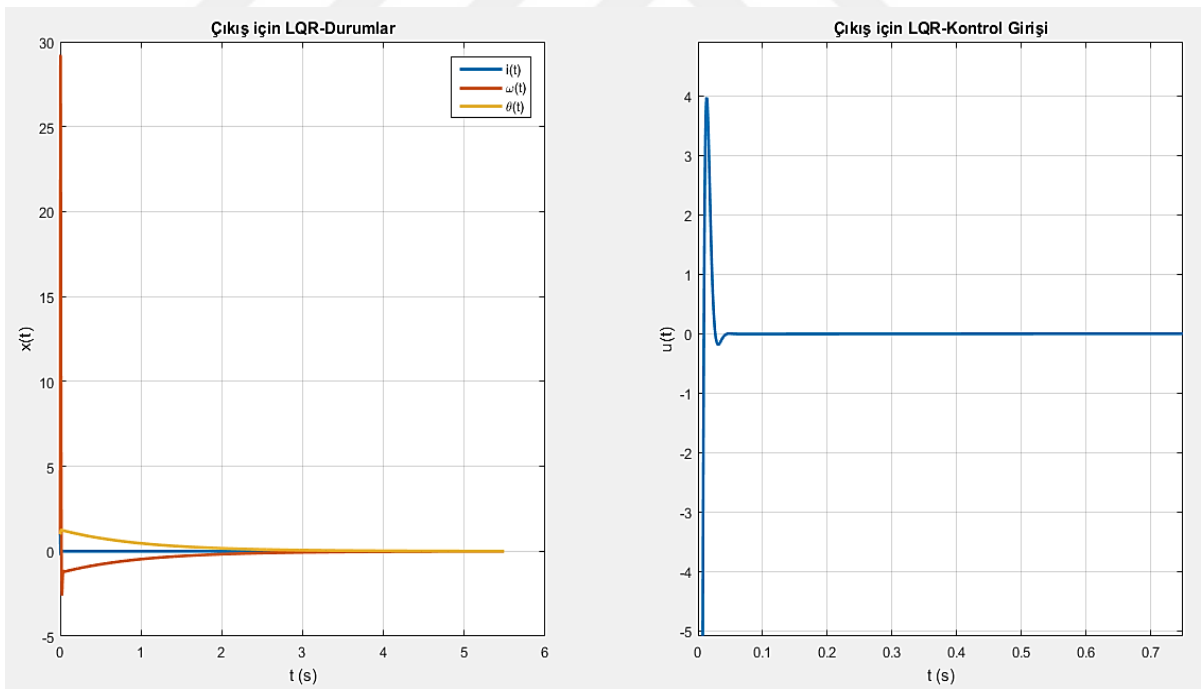
Servo sistemde, elde edilen durum uzay modeli kullanılarak daha iyi bir kontrolör için Q ve R matrislerinin bulunması amaçlanmıştır. Böylece optimum regülasyon hızı ve kontrol girişi seçilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bilgisayar yazılım ortamında ilk olarak giriş R ağırlık matrisi ile cezalandırılmış ve aşağıdaki gibi sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra ise bu duruma en uygun olacak şekilde, durumlar Q matrisiyle cezalandırılmış ve sonuçlar grafiklerle gösterilmiştir.



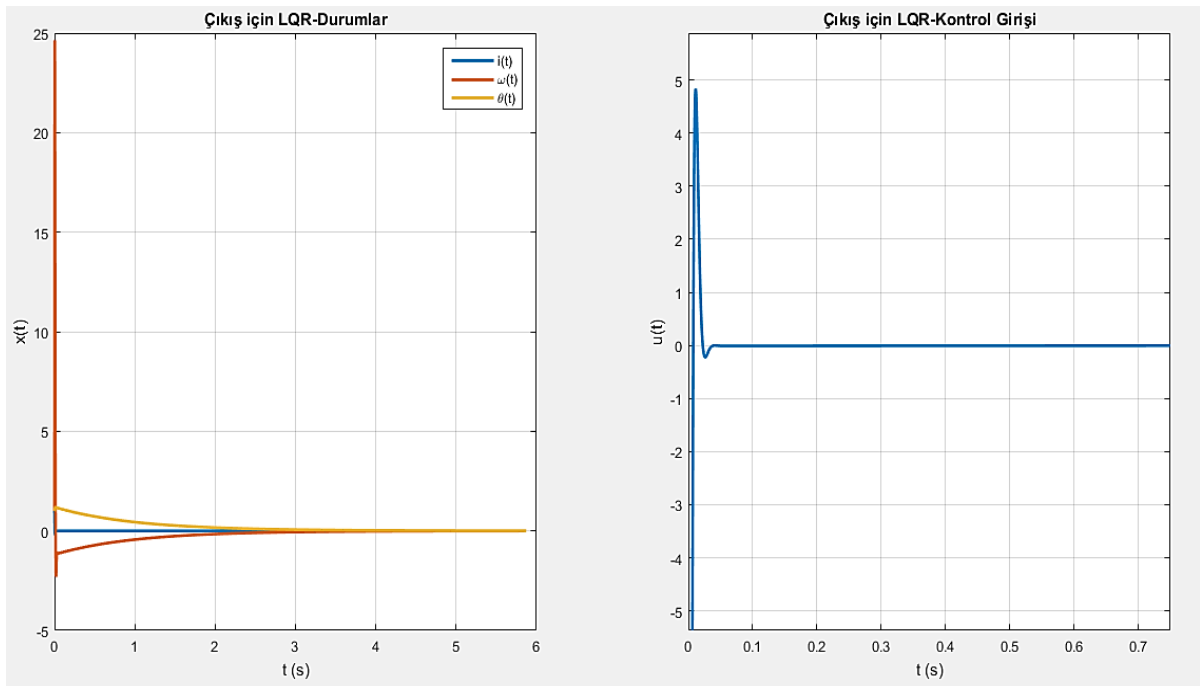
Şekil 5.2. $R = 0.01$ İçin LQR Kontrollü Sistem Durumları ve Sistem Çıkışları



Şekil 5.3. $R = 0.1$ LQR Kontrollü Sistem Durumları ve Sistem Çıkışları



Şekil 5.4. $R = 2$ İçin LQR Kontrollü Sistem Durumları ve Sistem Çıkışları



Şekil 5.5. $R = 2$ ve $Q = 2 \cdot \text{eye}(3)$ İçin LQR Kontrollü Sistem Durumları ve Sistem Çıkışları

$Q = R$ ise regülasyonun hızlı olması ve az kontrol kullanmak eşit önemde,

$Q > R$ ise regülasyonun hızlı olması daha önemli (yani hızlı regülasyon sağlayabilmek için büyük değerli kontrol sinyalleri kullanmaya razı oluyoruz),

$Q < R$ ise az kontrol kullanmak (az enerji harcamak) daha önemli (yani az enerji harçayabilmek uğruna regülasyon işleminin yavaş olmasına ve uzun sürmesine razı oluyoruz) demektir.

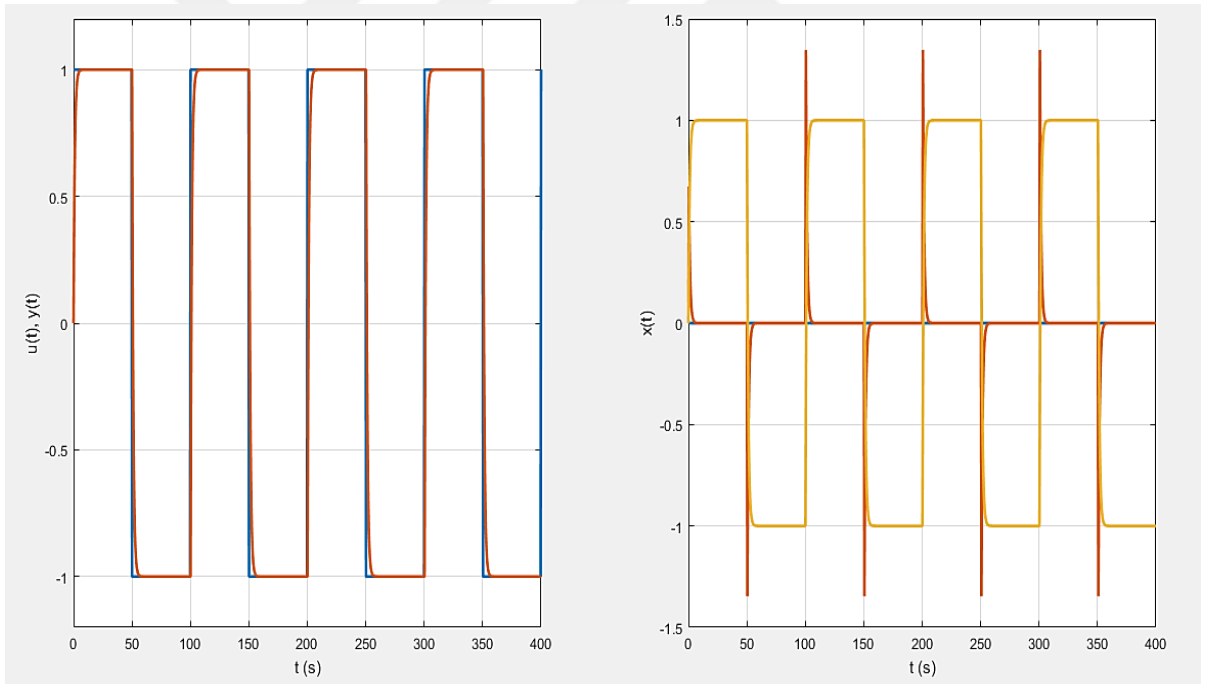
5.2.2. LQR ile Referans Takibi

Servo sistemin kontrolünde; Bölüm 3.4'te anlatıldığı şekilde referans takibinin gerçekleştirilmesi ve durumların geri beslemesi ile sistemi kontrol etmek için LQR kazancı, K_{lqr} , bilgisayar yazılım ortamında;

- $[K,P,E]=lqr(A,B,Q,R,N)$ %LQR kontrol tasarımı

İfadesinden yararlanılarak elde edilmiştir ve sonuçlar aşağıdaki gibi bulunmuştur.

Sisteme ait tahmin edilen durumlar ile sistem girişine verilen kare dalganın kontrolcü tarafından referans takibi gerçekleştirilmiş ve bu değişimler Şekil 5.6'da verilmiştir.



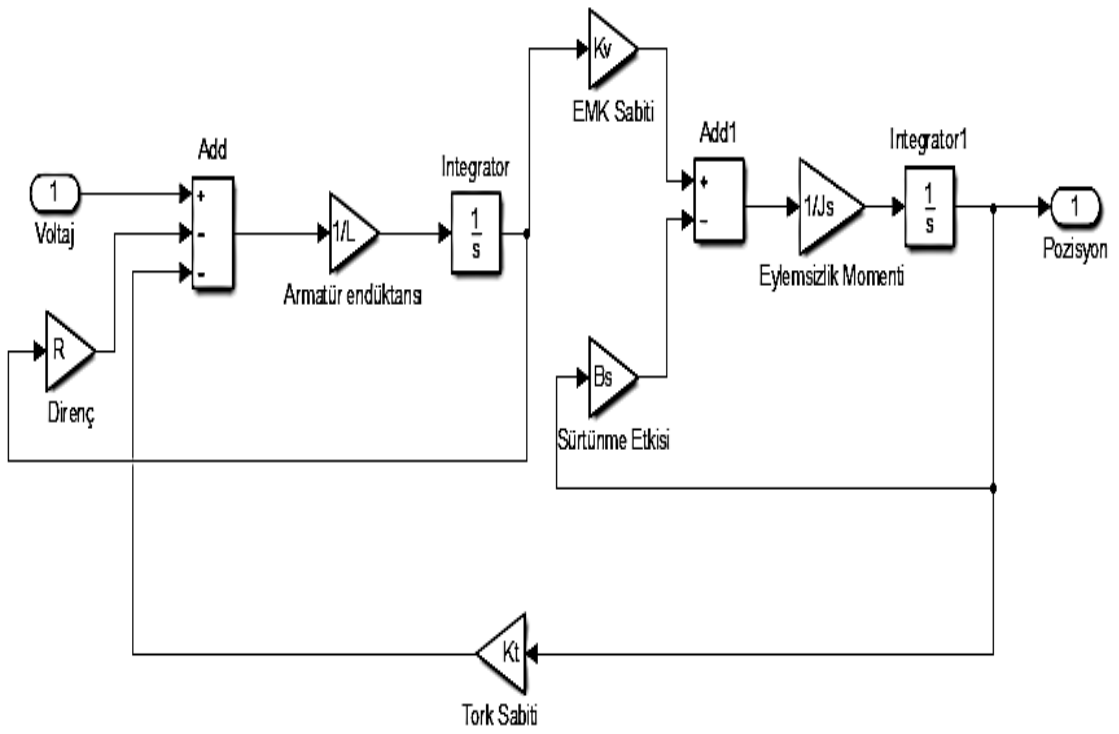
Şekil 5.6. Referans Takibi Sonucu Sistem Durumları, Çıkışı ve Sistem Kontrol Çıkışı

Şekil 5.6'ya göre LQR kontrol ile referans takibinin başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

6.1. Servo Sistem Bulguları

Servo sistemin pozisyon kontrolü Kalman durum kestirimi ve LQR ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan servo sistemin benzetim ortamındaki blok diyagramı Şekil 6.1’de olduğu gibidir.



Şekil 6.1. Servo Sistem Blok Diyagramı

Çalışmada kullanılan servo sistem verileri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. DC Servo Sistem Verileri

SEMBOL	AÇIKLAMA	DEĞER
J_s	Eylemsizlik Momenti	4.83×10^{-7} kg.m ²
B_s	Sürtünme Etkisi	4.41×10^{-6} N.m/(rad/sec)
K_t	Tork Sabiti	0.00767 N.m/A
K_v	EMK Sabiti	0.00767 Volt/(rad/sec)
R_m	Armatür Direnci	2.6 ohm
L_m	Armatür Endüktansı	0.18 mH

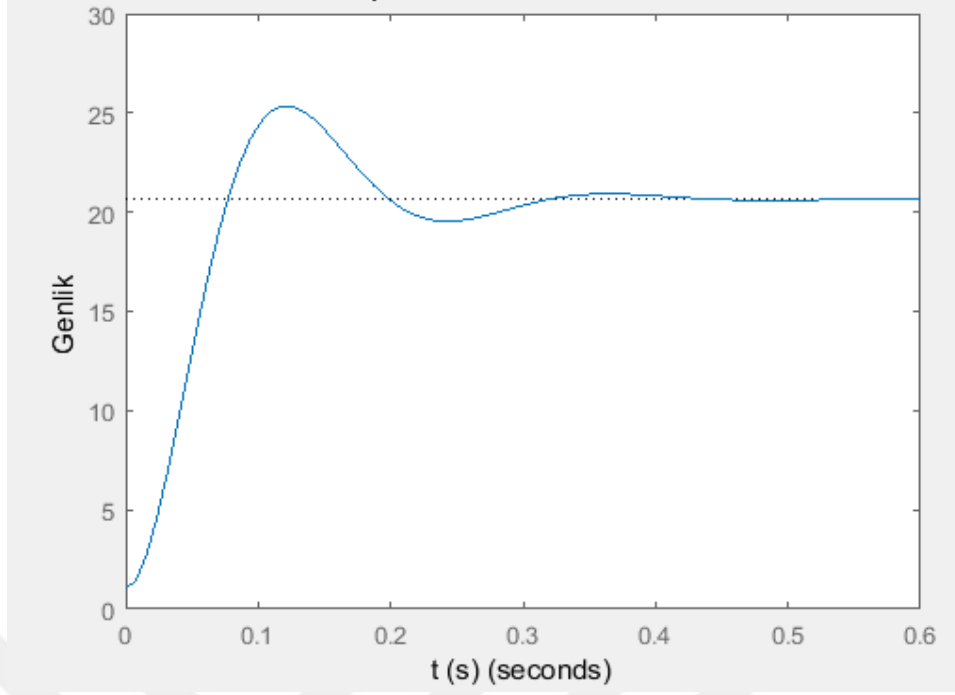
Tablo 6.1' de verilen değerler kullanılarak servo sistemin durum uzayı matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} -14444.44 & -42.61 & 0 \\ 16670 & -21.73 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 5555.56 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$C = [0 \ 0 \ 1] \quad (5.7)$$

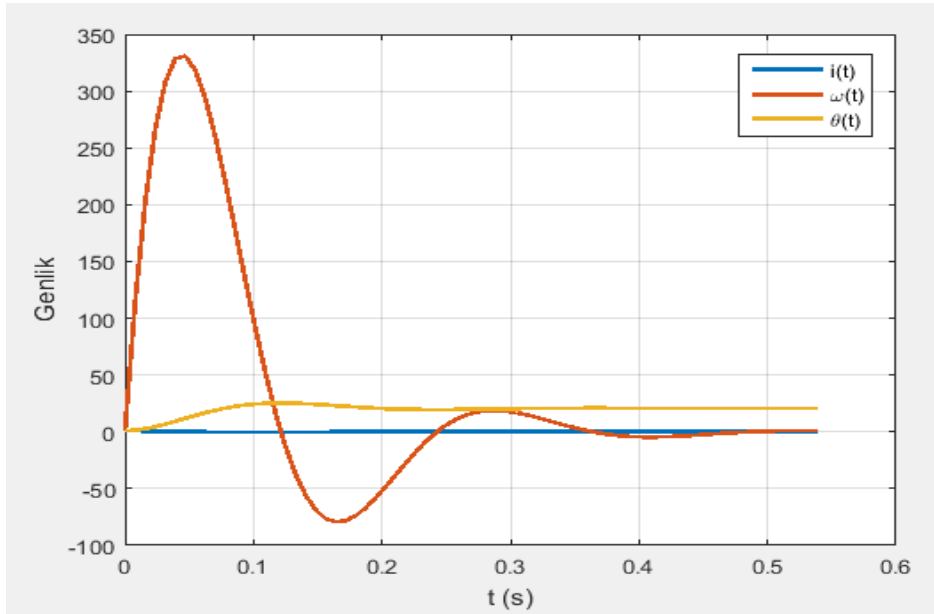
Servo sistemin benzetim ortamında yapılan çalışmaya göre açık çevrim sıfır durum cevabı aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.2. Servo Sistemin Açık çevrim Sıfır Durum Cevabı

Sistemin kararlılığı Şekil 6.2’de de görüldüğü gibi salınımlardan sonra stabil duruma geçmesinden anlayabiliyoruz. Sistem Nyquist kararlılık kriterlerine göre de kararlı bir sistem olduğunu ortaya koymuştur.

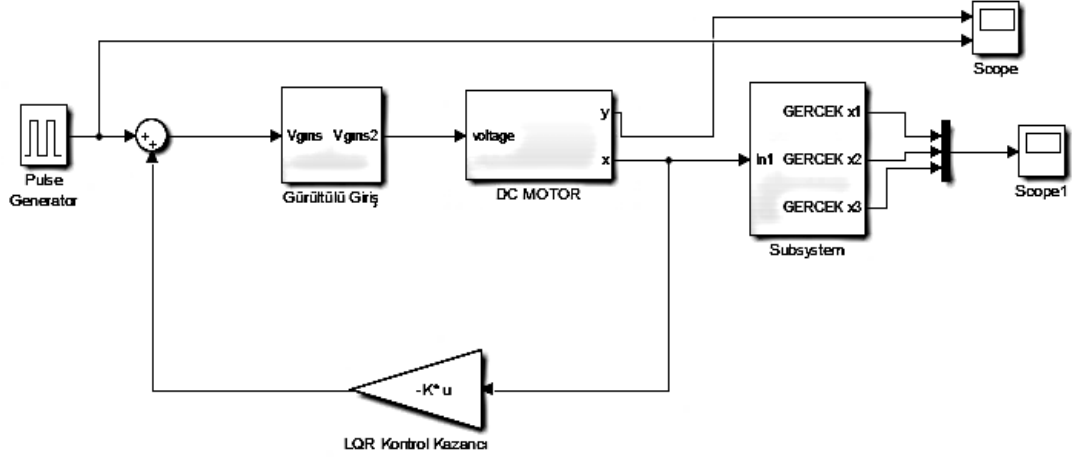
Sistemin akım, hız ve pozisyon durum cevapları ise Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.3. Servo Sistemin Akım, Hız, Pozisyon Durumlarının Cevabı

6.2. Servo Sistemin LQR Denetleyicisi ile Kontrolü

Servo sistemin doğrusal kuadratik regülatör (Linear kuadratik regülatör, LQR) ile kontrolünün blok diyagramı Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Servo Sistem LQR Kontrol Blok Diyagramı

Sistemin LQR kontrolü için Q ve R matrisleri;

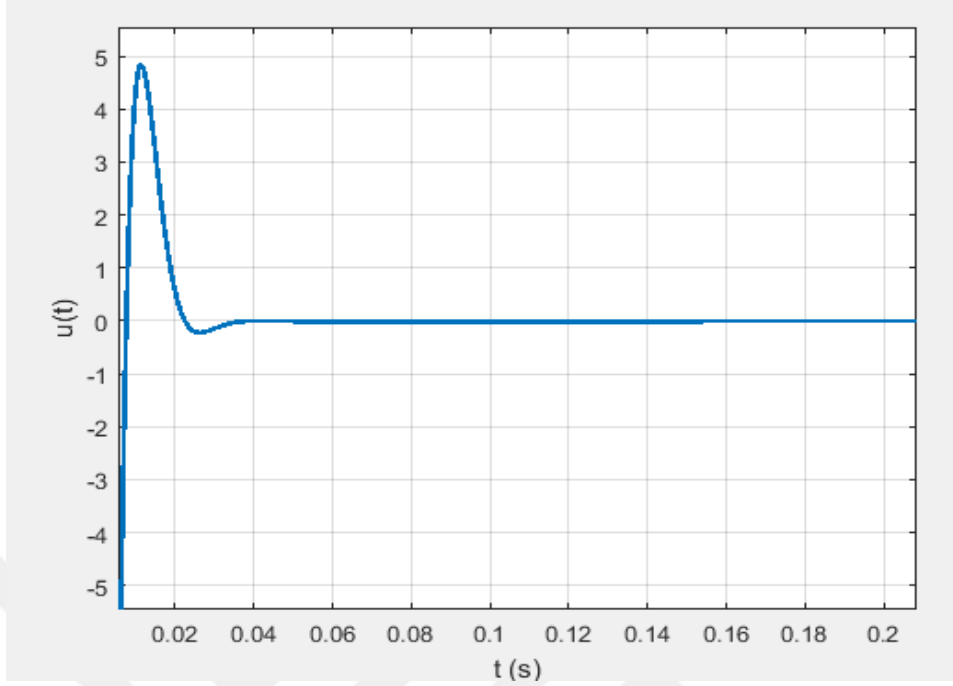
$$Q = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$R = 2 \quad (5.8)$$

Olarak seçilmiştir. Bilgisayar yazılım ortamında kontrol algoritmasında LQR kazancı, K_{lqr} , A, B, Q, R matrisleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

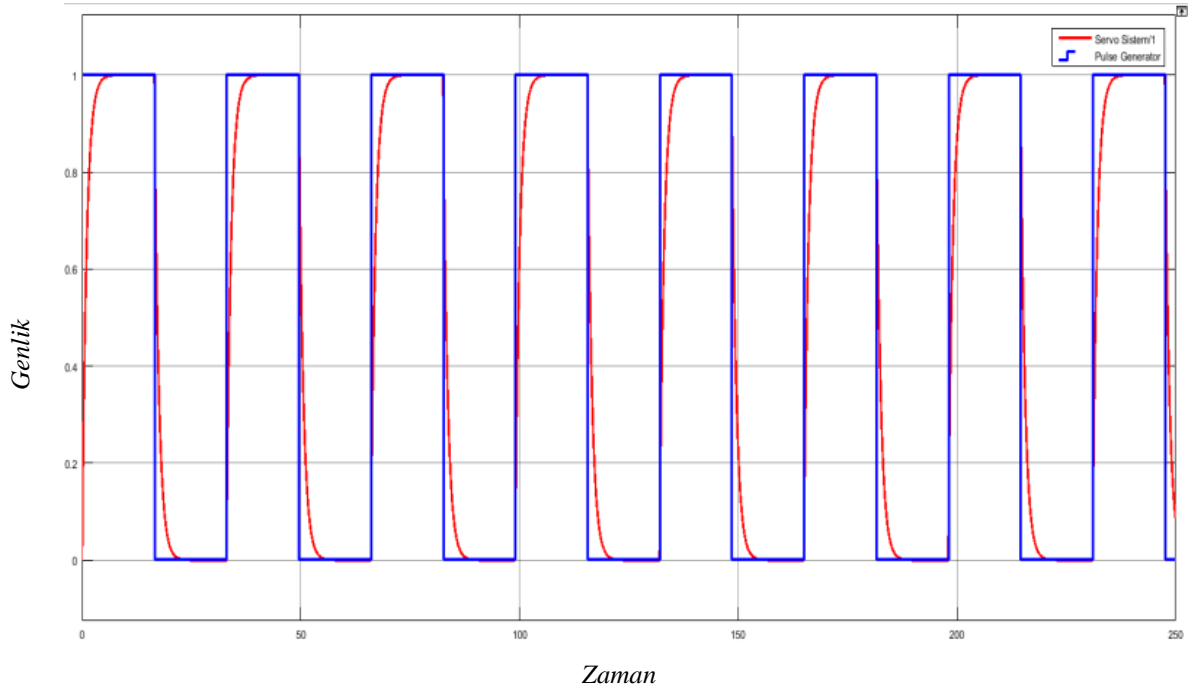
$$K_{lqr} = [71,3261 \quad 0,9546 \quad 1,0000] \quad (5.9)$$

Sistemin kapalı çevrim geri besleme kontrol cevabı $u(t) = -K_{lqr} x(t)$ aşağıdaki gibidir.

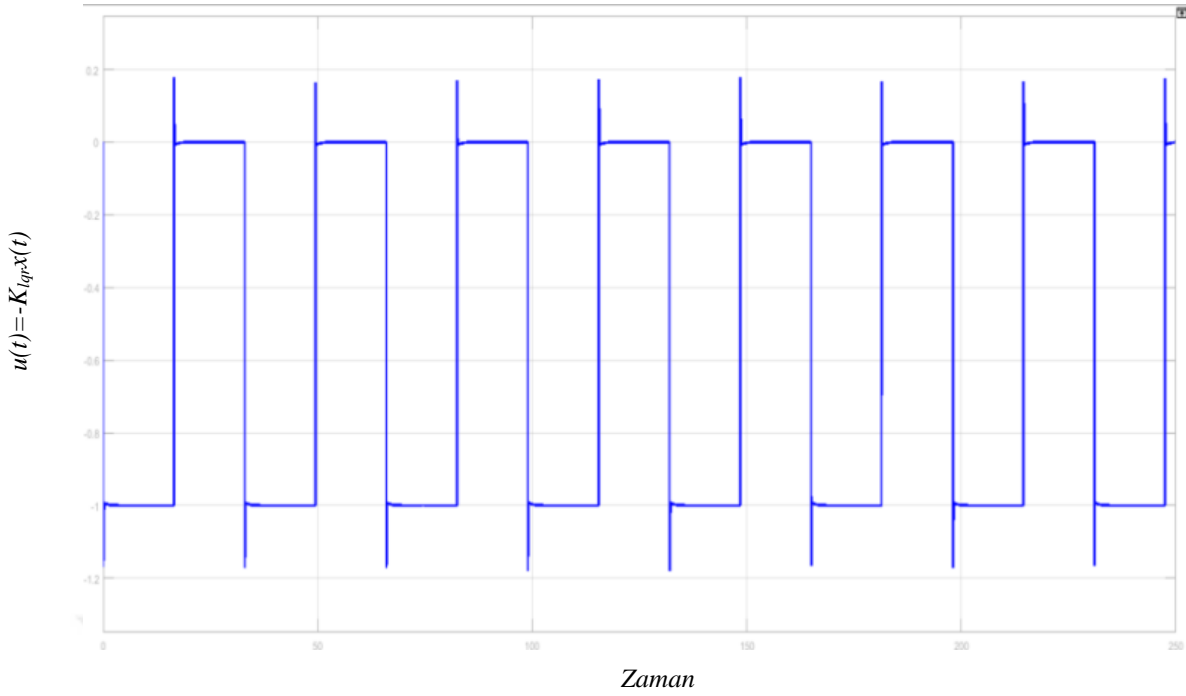


Şekil 6.5. Servo Kontrol Sisteminde Sıfır Giriş için $u(t)$ kontrol işareti

Servo sistemde referans giriş sinyali olarak 33 saniye periyotlu bir kare dalga uygulanırsa, LQR kontrol sisteminin Şekil 6.6’da görüldüğü gibi bu referans girişi başarıyla takip ettiği görülmektedir. Ayrıca sistemin kapalı çevrim geri besleme kontrol cevabı, $u(t) = -K_{lqr} x(t)$, Şekil 6.7’de verilmektedir.



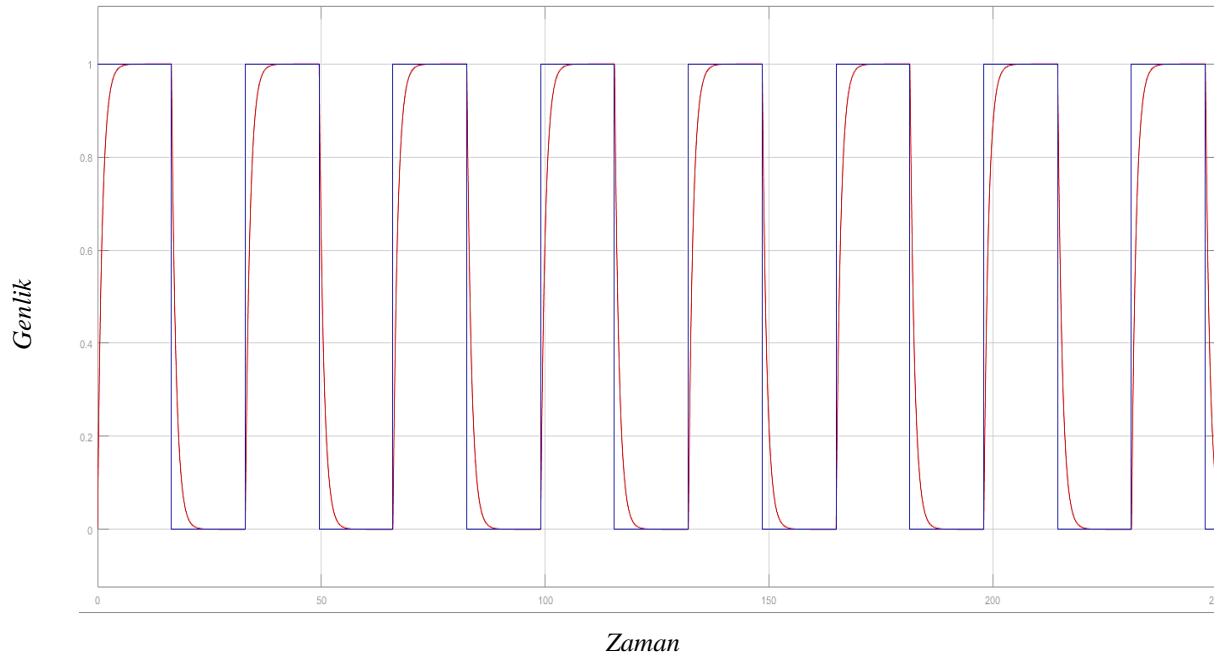
Şekil 6.6. Servo Sistemin LQR Denetimli Cevabı



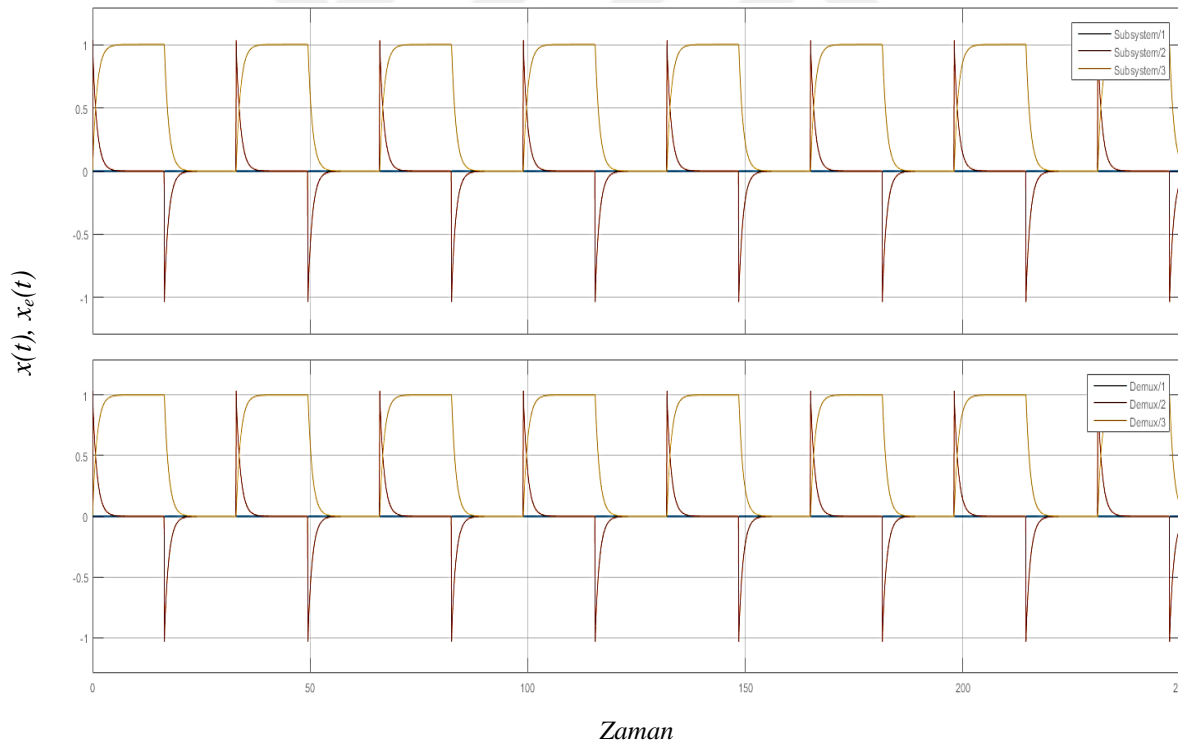
Şekil 6.7. Servo Sistemin LQR Denetimli Kapalı Çevrim Geri Besleme $u(t) = -K_{lqr}x(t)$ Cevabı

6.3. Servo Sistemin Kalman Filtre Durum Kestirimi ve LQR ile Kontrolü

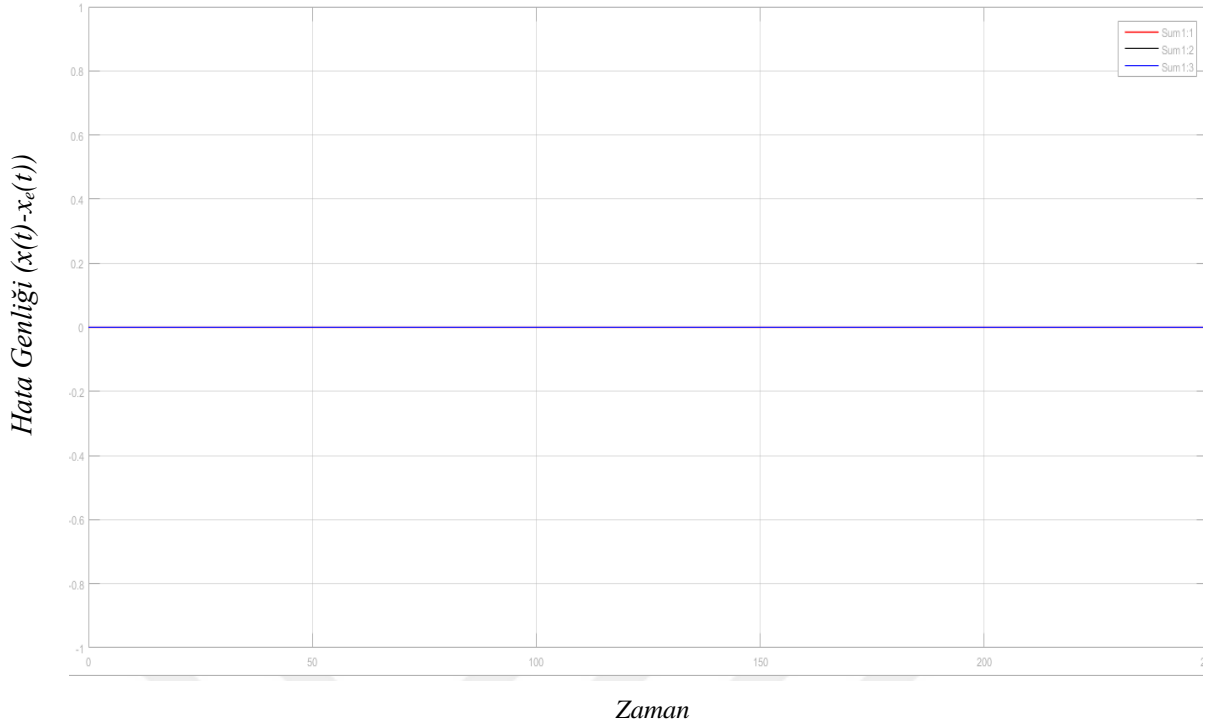
Servo sistemin Kalman durum kestirimli LQR kontrolü öncelikle gürültüsüz ortamda gerçekleştirilip sistem cevapları elde edilmiştir. Gürültüsüz ortamda sistem sıfır hata ile çalışıp, tahmin edilen durumlar gerçek durumlara en yakın şekilde elde edilmiştir. Elde edilen cevaplara göre LQR kontrol ile referans takibi başarıyla sağlanmıştır. Şekil 6.8’de kontrolü sağlanan sistem cevabı, Şekil 6.9’da Kalman durum kestirimi ile tahmin edilen durumlar ve sistemin gerçek durumları, Şekil 6.10’da ise durum hata kovaryans cevabı görülmektedir.



Şekil 6.8. Servo Sistemin Gürültüsüz Ortamda LQR Kontrol Cevabı

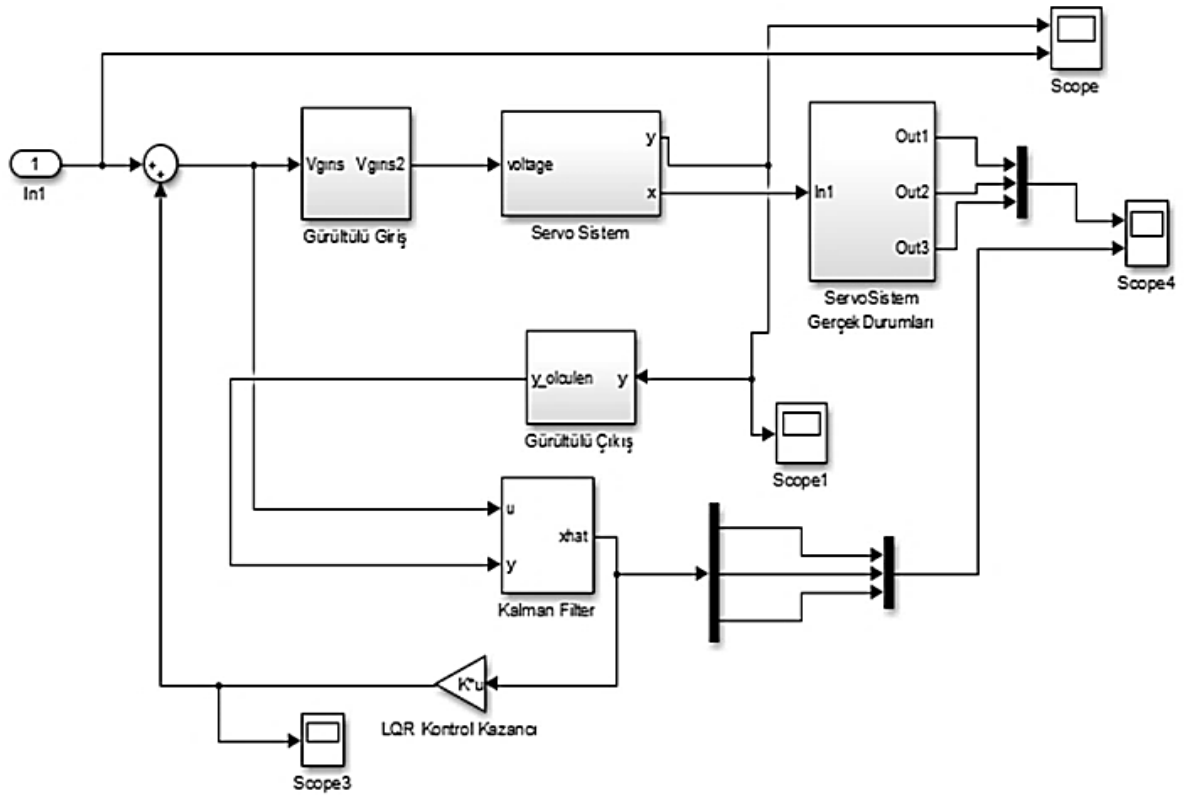


Şekil 6.9. Servo Sistemin Gürültülü Ortamda Gerçek Durumları ve Kalman Durum Kestirimi ile Elde Edilen Durumları

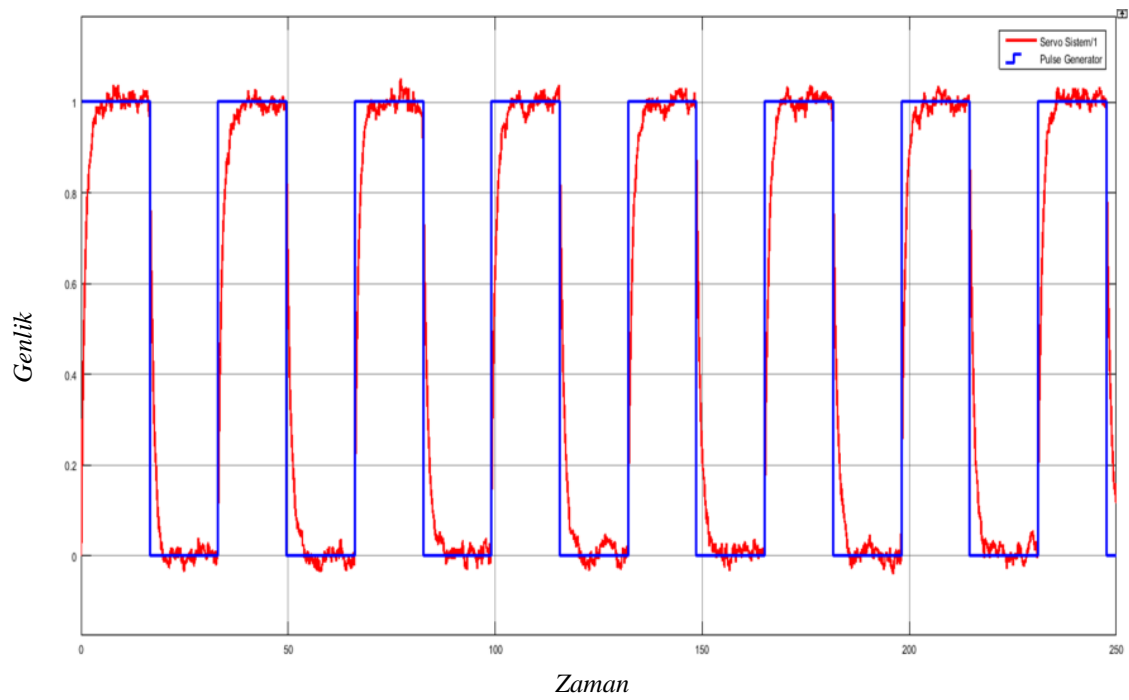


Şekil 6.10. Servo Sistemin Gerçek Durumları ve Tahmin Edilen Durumları Arasındaki Hata Kovaryansı

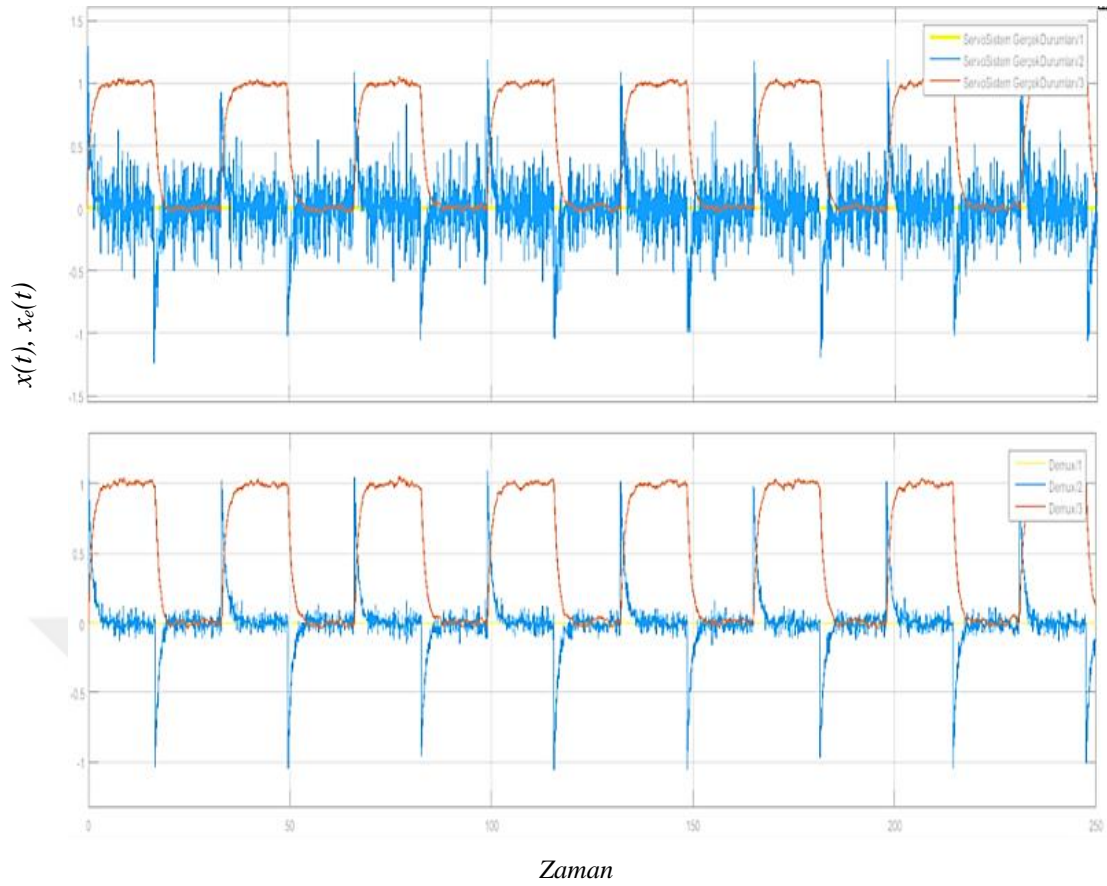
Daha gürbüz bir denetim sağlayabilmek için sistem giriş ve çıkışlarına gürültü eklenerek Servo sistem durumları Kalman filtresi ile tahmin edilmiş ve LQR kontrol ile kontrolü sağlanmıştır. Şekil 6.12’de sistem cevabı görülmektedir. Gürültülü bir ortamda LQR ile kontrolü sağlanan servo sistemin gerçek durumları ve Kalman filtresi ile tahmin edilen durumlar Şekil 6.13’de ki gibidir. Sistemin gerçek durumları ile tahmin edilen durumları arasındaki hatayı görmek için gerçek durumlardan tahmin edilen durumların farkı alınarak Şekil 6.14’teki grafik elde edilmiştir.



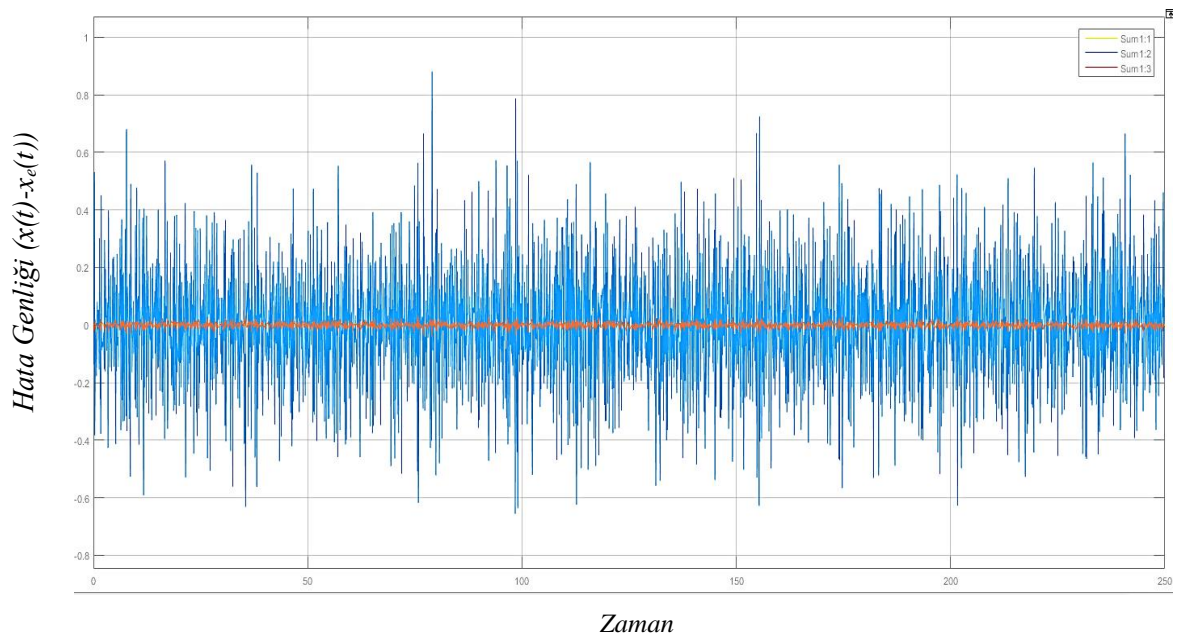
Şekil 6.11. Servo Sistemin LQR ve Kalman Kontrollü Blok Diyagramı



Şekil 6.12. Servo Sistemin Gürültülü Ortamda LQR Kontrol Cevabı



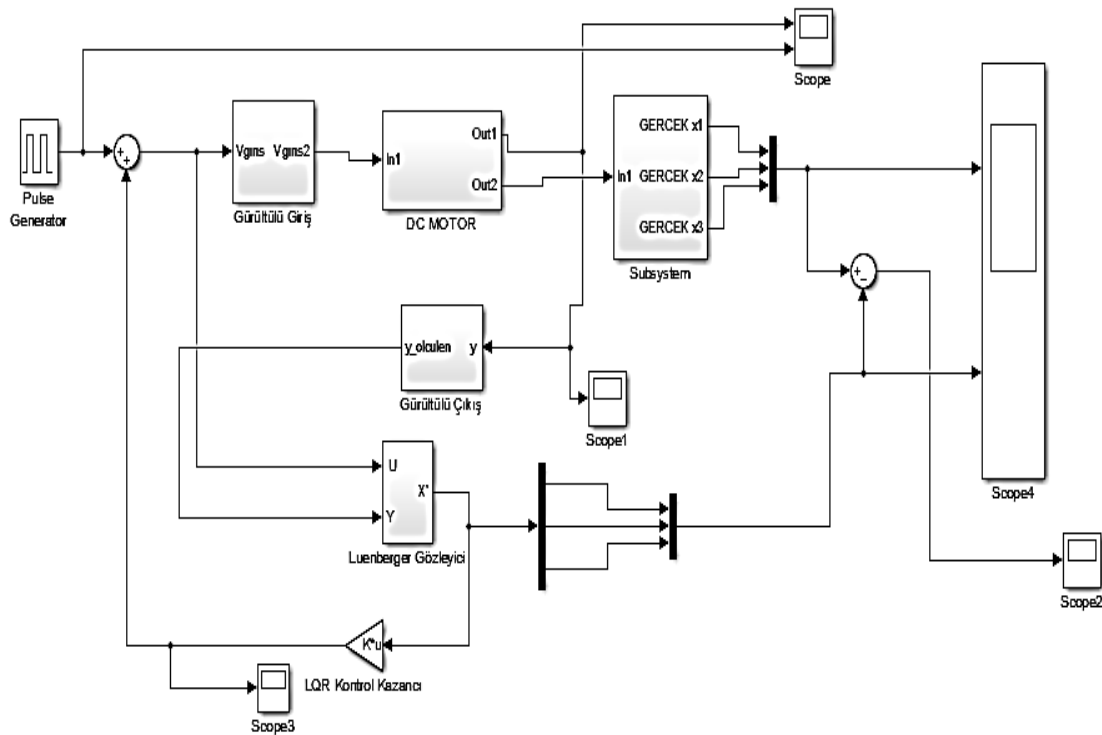
Şekil 6.13. Servo Sistemin Gürültülü Ortamda Gerçek Durumları ve Kalman Durum Kestirimi ile Elde Edilen Durumları



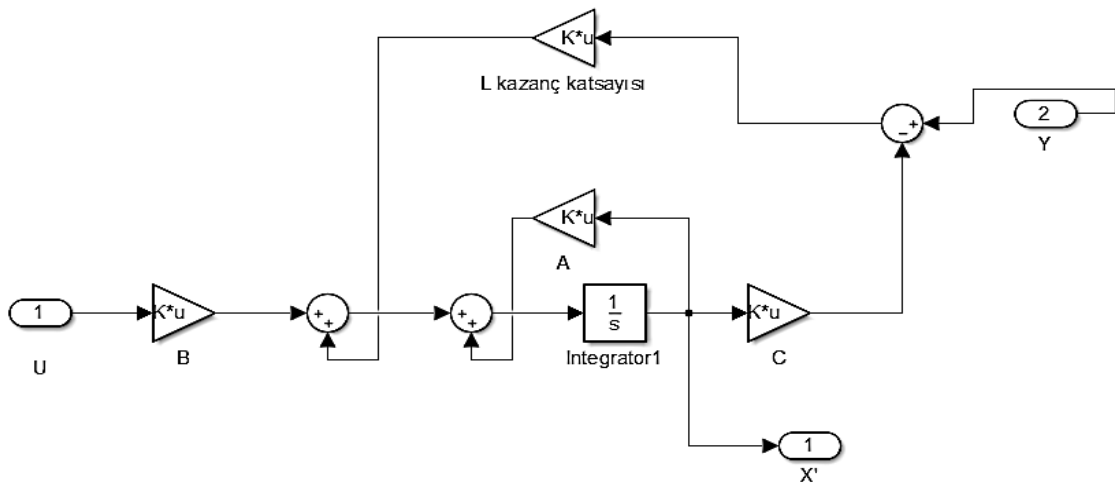
Şekil 6.14. Servo Sistemin Gerçek Durumları ve Tahmin Edilen Durumları Arasındaki Hata Kovaryansı

6.4. Servo Sistemin Luenberger GÖzleyici ve LQR ile Kontrolü

Luenberger gözleyicisi ile tahmin edilen durumlar servo sistemin LQR kontrolünde durum geri besleme kontrol yasasına göre, $u(t) = -K_{lqr}x(t)$, burada kullanılan durumların yerine kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 6.15'te olduğu gibidir. Luenberger gözleyici blok diyagramını ise Şekil 6.16'da verilmiştir.

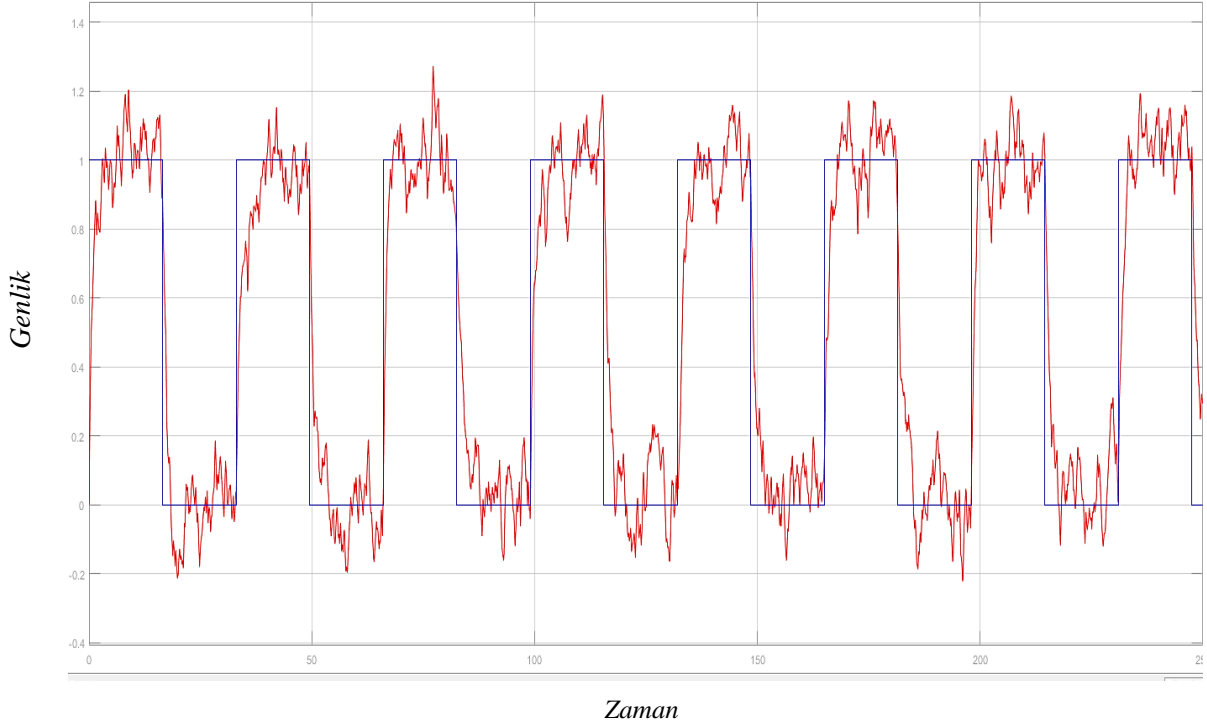


Şekil 6.15. Servo Sistemin Luenberger Gözleyicisi ile LQR Kontrollü Blok Diyagramı

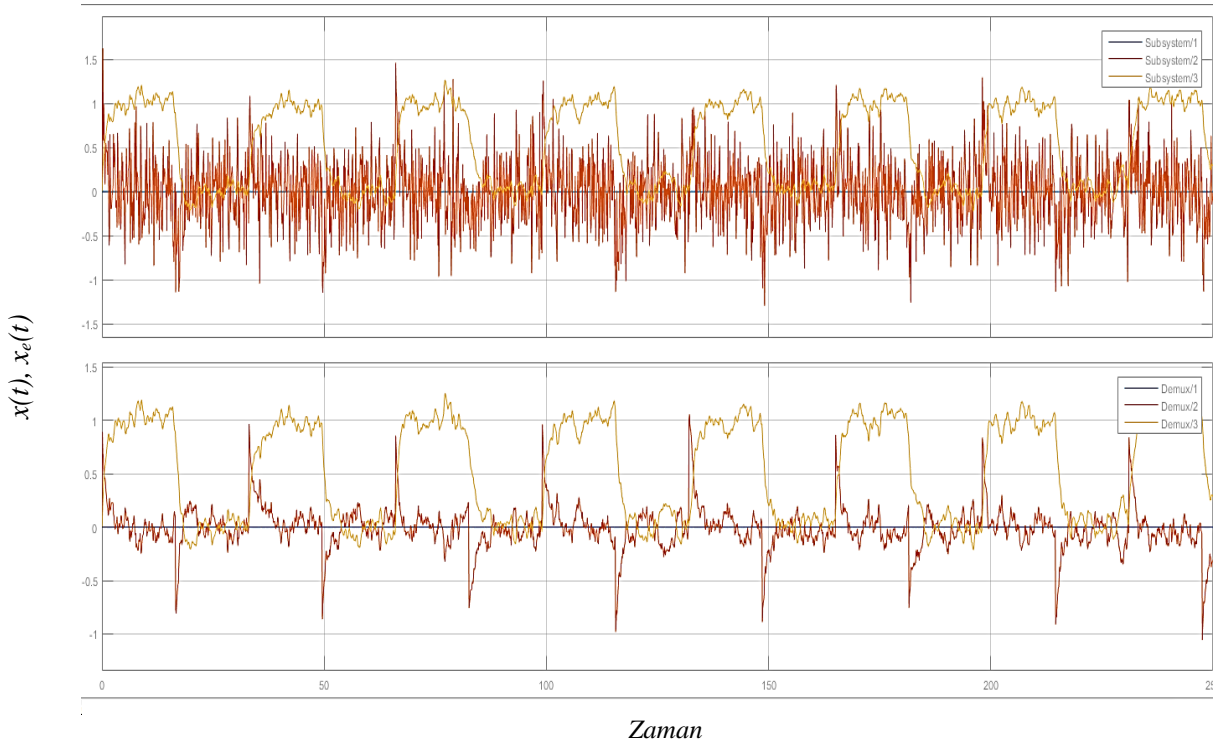


Şekil 6.16. Luenberger Gözleyici Blok Diyagramı

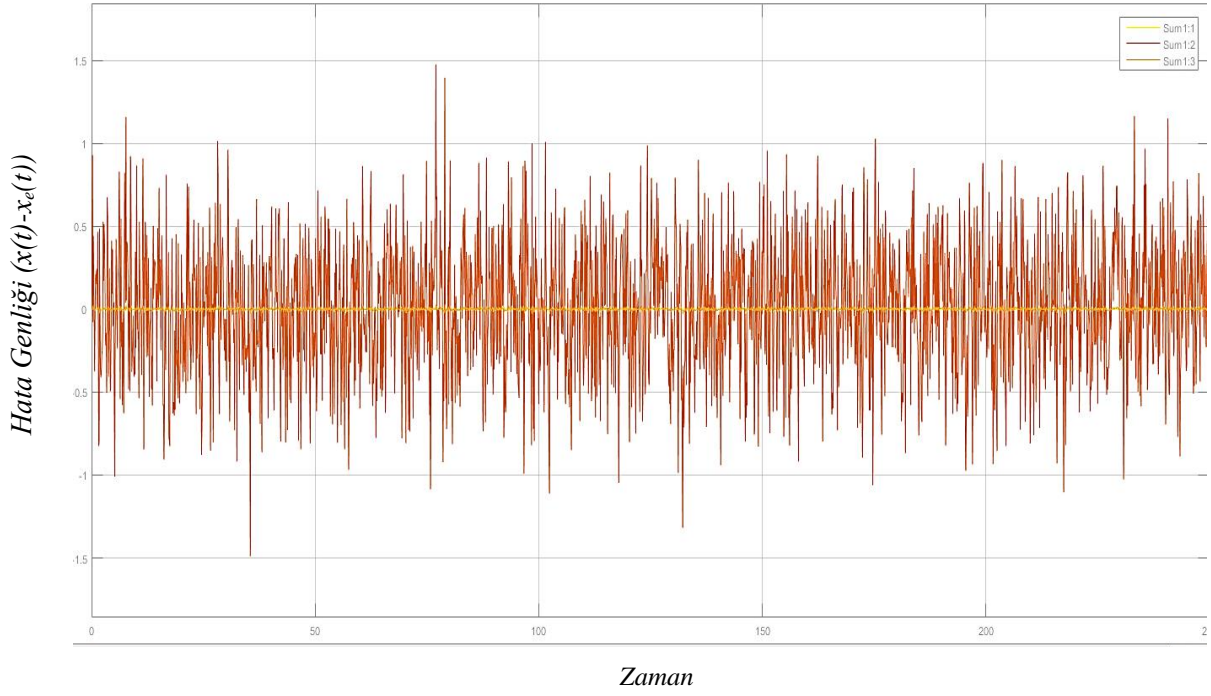
Luenberger gözleyicisi ile kontrolü sağlanan servo sistem cevabı Şekil 6.17’de verilmiştir. Sistemin tahmin edilen ve gerçek durumları ile iki durum arasındaki fark ise sırasıyla Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da görüldüğü gibidir.



Şekil 6.17. Servo Sistem Luenberger Gözleyicisi ve LQR Kontrol Sistem Cevabı



Şekil 6.18. Servo Sistemin Gerçek Durumları ve Luenberger Gözleyicisi ile Tahmin Edilen Durumları



Şekil 6.19. Servo Sistemin Gerçek Durumları ve Luenberger Gözleyici ile Tahmin Edilen Durumları Arasındaki Hata Kovaryansı

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere Luenberger gözleyici ile elde edilen tahminler ve gerçek durumlar karşılaştırıldığında hata kovaryansının Kalman durum kestirimi kullanılarak elde edilen hata kovaryansından daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumda Kalman durum kestiriminin durumları tahmin etmede daha kararlı ve doğru bir yapıya sahip olduğu sonucuna ulaşabiliriz

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada bir servo sistemin pozisyon kontrolü kalman durum kestirimi ve LQR ile sağlanmıştır. Optimal kontrol sağlayan LQR sayesinde dayanıklı bir sistem elde edilmiştir. Sistemin açık çevrim sıfır durum cevabında yerleşme süresinin 0.45sn olduğu ve LQR ile kontrol gerçekleştirildiğinde bu sürenin 0.04sn gibi kısa bir sürede gerçekleştiği görülmüştür. Bununla birlikte fiziksel sistemlerde durum değişkenlerinin tamamının ölçümünün mümkün olmadığı göz önüne alındığında, sistemin durum değişkenlerinin en doğru şekilde elde edilmesi kontrol performansı için önemli bir etken olmaktadır. Bundan dolayı, çalışmada durum değişkenleri hem Kalman durum kestirimi ile hemde Luenberger gözleyici ile elde edilmiştir. Gözleyici ve Kalman durum kestirimi karşılaştırıldığında simülasyonlar sonucunda Kalman filtresi ile tahmin edilen durumların gerçek durumlara daha yakın olduğu görülmüştür. Bundan dolayı Luenberger gözleyicisine kıyasla Kalman durum kestirimcisinin LQR denetleyicisinin etkinliğini artırdığı açıkça gözlenmiştir.

Çalışma hem gürültülü hem gürültüsüz ortamlarda gerçekleştirilip sistem cevapları karşılaştırılmıştır. Gürültülü ortamlarda daha az hatayla çalışıp daha az etkilenen, durumları öncesinde tahmin ederek gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle üreten yüksek seviyede kararlılığa sahip bir algoritma geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, gürültülü ortamlarda da sistemin yeterince iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

Abdullah Y. Al-Maliki, K. I. (2018). "PID-Type FLC Controller Design and Tuning for Sensorless Speed Control of DC Motor." Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal **3**: 515-522.

Aydoğdu, Ö. (2006). FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ GENETİK TABANLI BULANIK DENETLEYİCİ İLE SENSÖRSÜZ KONTROLÜ ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ. **DOKTORA TEZİ**: 187.

Carlos O. Moreira, F. A. S., Sónia Ferreira Pinto, Marcelino B. Santos (2011). Digital LQR control with Kalman Estimator for DC-DC Buck converter. 2011 IEEE International Conference on Computer as a Tool (EUROCON). Lisbon, Portugal.

Chandresh Pratap Singh, S. K., Santu Rana (2013). "State-Space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control using Fuzzy PID." International Journal of Advances in Engineering Science and Technology **2**: 359-369.

Chingiz Hajiyev, S. Y. V. (2013). "LQR Controller with Kalman Estimator Applied to UAV Longitudinal Dynamics." Scientific Research **04**: 36-41.

Deshpande, P. and A. Deshpande (2012). "Inferential Control of DC Motor using Kalman Filter." 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (Icpces 2012).

Gaeid, K. S. (2013). "OPTIMAL GAIN KALMAN FILTER DESIGN WITH DC MOTOR SPEED CONTROLLED PARAMETERS." Journal of Asian Scientific Research **3(12)**.

Hasan Hüseyin Bilgiç, M. A. Ş., Ahmet Yapıcı, Mete Kalyoncu (2014). Doğrusal Ters Sarkacın Denge Kontrolü İçin Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık & LQR Kontrolcü Tasarımı. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı – (TOK 2014).

Hatem Elaydi, M. W. (2015). "Optimal Controller for Single Area Load Frequency Control via LQR and Legendre Wavelet Function." Journal of Automation and Control **3**: 43-47.

Kanieski, J. M., et al. (2013). "Kalman Filter-Based Control System for Power Quality Conditioning Devices." Ieee Transactions on Industrial Electronics **60(11)**: 5214-5227.

Karaman, C. (2015). ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR KONTROLÜ. Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ. YÜKSEK LİSANS TEZİ: 132.

Mahit Güneş, S. A., Ahmet Ertuğrul Bay (2013). "Çok Fonksiyonlu Bir Elektronik Pülverizatörde İlaçlama İşleminin Optimal ve Bulanık Kontrolü." KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi **16**: 42-47.

Miseon Han, K. K., DoYoun Kim ,Jaesung Lee (2013). Implementation of Unicycle Segway Using Unscented Kalman Filter in LQR control 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). **2**.

Mishra, S., et al. (2013). "Biogeography Based Optimal State Feedback Controller for Frequency Regulation of a Smart Microgrid." Ieee Transactions on Smart Grid **4**(1): 628-637.

Muddasar Ali, S. T. Z., Khadija Jalal,Ayesha Saddiqa,Muhammad Faisal Hayat (2018). "Design of Optimal Linear Quadratic Gaussian (LQG) Controller for Load Frequency Control (LFC) using Genetic Algorithm (G.A) in Power System." International Journal of Engineering Works **5**(3): 40-49.

Nivedita, P. C. (2015). "Object Tracking in Simulink using Extended Kalman Filter." International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering **4**(7): 364-366.

Omer Aydogdu, M. L. L. (2017). "Trajectory Control of a Variable Loaded Servo System by using Fuzzy Iterative Learning PID Control." International Journal of Control Systems and Robotics **2**(170-177).

Raja, M. M. (2017). Extended Kalman Filter and LQR controller design for quadrotor UAVs. Department of Electrical Engineering, National University of Sciences and Technology,Wright State University. **Master of Science in Electrical Engineering (MSEE)**.

Şinasi Arslan, G. M. (2014). "Speed Control of Direct Current Motor with Linear Quadratic Gaussian Control." Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu,Bursa.

Tosun, D. C. (2015). Dört Motorlu Bir İnsansız Hava Aracı İçin Adaptif Kontrol Sistem Tasarımı, Anadolu Üniversitesi

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nedime Merve CERAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya, 10.07.1992
Telefon : 05533301642
Faks :
e-mail : mrvecrn07@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Mahmut Esat Anadolu Lisesi, Seydişehir, Konya	2010
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2016
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya	-
Doktora	:	

YABANCI DİLLER

İngilizce, Almanca

YAYINLAR

Aydın N.M., Aydoğdu Ö., Gürültülü ve Gürültüsüz Ortamlarda Servo Sistemin Kalman Durum Kestirimi ve LQR Kontrolü. ISAS 2019, 3. International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, April 19-21, 2019, Ankara, Turkey.

