

Gürültülü ve Gürültüsüz Ortamlarda Servo Sistemin Kalman Durum Kestirimi ve LQR Kontrolü

Nedime Merve Aydın^{1*}, Ömer Aydođdu²⁺

^{1,2}Department of Electrical and Electronics Engineering, Konya Technical University, Konya, Turkey

*Corresponding author: Nedime Merve Aydın, mrvecrn07@gmail.com

+Speaker: Nedime Merve Aydın, mrvecrn07@gmail.com

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

Özet – 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 DC servo sistemin modellenmesi, durum değişkenlerinin Kalman Filtreleri ile gürültülü ve gürültüsüz ortamlarda elde edilmesi ve Doğrusal Kuadratik Regülatör (Liner Quadratic Regulator, LQR) ile optimal kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle servo sistemin matematiksel modeli elde edilerek Matlab Simulink modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, durum geri besleme ile sistemin LQR kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle sistem kontrolü için gerekli tasarım, kapalı çevrim kutuplarının manipülasyonuna 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 Kalman durum kestirimi ile elde edilmiştir. Motor sistemine işlem ve ölçüm gürültüsü uygulanarak denetleyicinin gürültülü ve gürültüsüz ortamlardaki performansı klasik yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Böylece gürültülü ortamlarda az hatayla çalışıp az etkilenen, durumları öncesinde tahmin ederek gerçek bilinmeyen değerlerin tahminlerini belirsizlikleriyle üreten yüksek seviyede kararlılığa sahip bir algoritma geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, denetleyici performansının tatmin edici olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – DC servo sistem, LQR, Kalman Filtresi, Matlab/Simulink, Optimal Kontrol

Kalman State Estimation and LQR Control of Servo System in Noisy and Noiseless Environment

Abstract – 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 DC servo system 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 Matlab Simulink 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 Kalman state estimation. 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. According to the simulation results, the controller performance is satisfactory.

Anahtar Kelimeler – DC Servosystem, LQR, Kalman Filter, Matlab/Simulink, Optimal Control

I. GİRİŞ

Otomatik kontrol sistemleri günümüzde 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 sağlanması, 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 artan dünya nüfusunun ihtiyaç malzemelerini üreten endüstri toplumunun bir parçasıdır.

Doğru akım (DC) motorları, maliyet verimliliği, hızlı olmaları, yüksek performans sergilemeleri, kolay kullanım, uzun ömür ve farklı kontrol teknikleri uygulanabilme özellikleri dolayısıyla halen popülerliğini korumaktadır. DC motorlar, uzay ve bilgisayar teknolojileri, savunma sanayi, robotik uygulamalar, servo sistemler ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar [1]-[2].

DC servo sistemin pozisyon ve hız kontrolü ile ilgili literatürde pek çok otomatik kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bunlar Oransal İntegral Türevsel (PID) kontrol gibi klasik yöntemlerin yanında, izdüşümsel denetim yöntemi, geri beslemeye dayalı girdi-çıkı doğrusallaştırma yöntemi, akıllı denetim teknikleri (sinirsel ağlar, öğrenimli kontrol vb.), Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR), Bulanık Mantık Kontrol gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Referans [3]'te 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. Referans [4]'te küçük bir insansız hava aracı (UAV) 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 UAV'nin hareket kontrolünde etkili olduğu ve bu tür uygulamalar için kullanılabileceği bulunmuştur. Referans [5]'de 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. Referans [6]'de tüm parçaları tasarlanan elektronik kontrollü bir pülverizatörün karışım tankının seviye kontrolü ve ilaç karışım oranı LQR ve bulanık mantık kontrol teknikleri kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Karışım tankına alınan temiz su ve kimyasal ilaç sıvı oranları reçeteye bağlı olarak karışım modeli türetilmiştir. LQR kontrolünde aşım olmadığı gözlenmiş ve sistemin oturma zamanının bulanık mantık kontrolüne göre daha az olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında çalışmada optimal kontrol yöntemlerinden olan LQR kontrolünün, FLC yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, servo sistem kontrolü için sistem durum uzay modeli esas alınarak modellenmiştir. Daha sonra durum geri besleme yöntemi kullanılarak LQR yöntemiyle sistemin gürültülü ve gürültüsüz ortamlardaki optimal kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin durum değişkenlerinin en doğru şekilde elde edilmesi için Kalman durum kestirimi

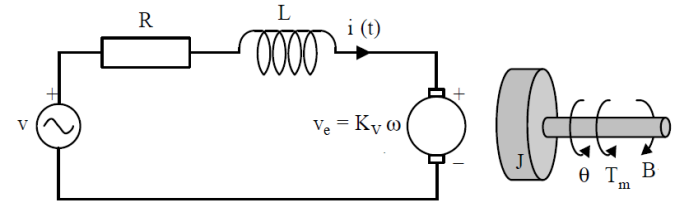
kullanılmıştır. Bu çalışma, Matlab/ Simulink ortamında simülasyon olarak yürütülmüştür ve sistem cevabı karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

II. MATERYAL VE METODLAR

Bu çalışmada ilk olarak servo sistemin durum uzay modeli elde edilmiştir. Daha sonra sistem kontrolü bir optimal kontrol yöntemi olan LQR kontrol ile gerçekleştirilmiş ve durum değişkenlerinin Kalman filtresi yardımıyla gürültülü ve gürültüsüz ortamlardaki durumları ele alınarak sistem kontrolü sağlanmıştır.

A. DC Servo Sistem Modeli

Doğru akım motorlarında armatür devresi, bir endüktans (L) ile seri olarak bağlanmış bir direnç (R) ve dönüş sırasında armatürde indüklenen ters yönlü gerilimi (ters EMK) temsil eden bir voltaj kaynağından oluşur. Bir DC servo sistemin hızı uygulanan voltajla orantılıdır. Torqu motor akımıyla orantılıdır. Hız kontrolü, değişken gerilim ayarlayıcı bir güç elektroniği devresi ile sağlanabilir [2]. DC servo sistemin şematik modeli Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. DC 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;

$$T_m = K_t i(t) \quad (1)$$

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

$$v_e(t) = K_v w(t) \quad (2)$$

Şekil 1'e göre Kirchoff ve Newton kanunlarını kullanarak aşağıdaki denklemleri elde edebiliriz;

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = v(t) - K_v w(t) \quad (3)$$

$$J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) = K_t i(t) \quad (4)$$

$$w(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

Burada verilen J ve B değerleri motor ve yük değerlerini içeren eşdeğer atalet momenti ve sürtünme değerleridir. Ayrıca, θ pozisyon, K_v EMK sabiti, K_t tork sabiti, R direnç değeri ve L indüktans değeridir.

Denklem (3),(4) ve (5) ele alındığında, türev içeren terimler çekilerek, servo sistemin durum uzay modeli aşağıdaki gibi elde edilir. Burada sistem çıkışı servo pozisyonu olarak alınmıştır.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}(t) \\ \dot{w}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -K_v/R & 0 \\ K_t/J & -B/J & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ w(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v(t) \quad (6)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ w(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu çalışma için alınan servo sistem verileri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Quanser Deney Seti DC Servo Sistem Verileri

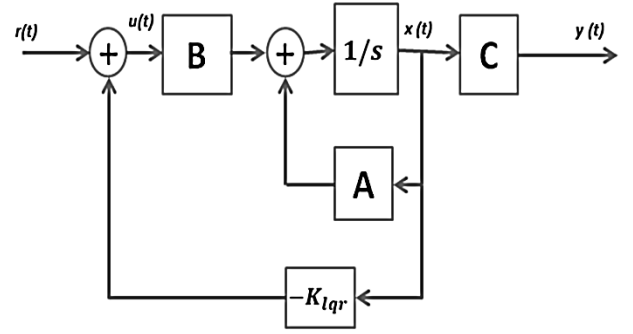
SEMBOL	AÇIKLAMA	DEĞER
J	Eylemsizlik Momenti	4.83x10 ⁻⁷ kg.m ²
B	Sürtünme Etkisi	4.41x10 ⁻⁶ N.m/(rad/sec)
K _t	Tork Sabiti	0.00767 N.m/A
K _v	EMK Sabiti	0.00767 Volt/(rad/sec)
R	Armatür Direnci	2.6 ohm
L	Armatür Endüktansı	0.18 mH

B. LQR Tasarımı

Durum darbe cevaplarının minimize edilmesini amaçlayan doğrusal kuadratik regülatör (LQR), doğrusal optimal durum geri beslemeli kontrol olarak adlandırılabilir. Çok düzenli bir sentez sürecine sahip olan LQR kontrol aynı zamanda da yüksek seviyede dayanıklı kararlılığa sahiptir [3]-[4].

Kontrol yöntemi, sistem durum değişkenlerinin geri beslenmesi yoluyla uygulanmaktadır. LQR yönteminde sistem, kontrol giriş işaretini optimal geri besleme kazanç katsayıları ile, en uygun geçici ve sürekli durum cevaplarını elde ederek yakalar [5]-[7]. Bunun için LQR kontrol yöntemi uygulanırken, durum takip hatası ve sistem girdi maliyeti kullanılarak, performans indeksi (J) olarak bilinen bir ilişki tanımlanır ve bundan faydalanılır [6]-[8]. Yani, LQR kontrol yapısı performans indeksini (J) minimum yapacak şekilde tasarlanan bir durum geri beslemeli kontrol yöntemidir. Şekil 2'de LQR kontrol blok diyagramı görülmektedir. Tasarım için durum uzayı ifadesi aşağıdaki gibi verilen bir sistemi ele alalım.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (8)$$



Şekil 2. LQR Kontrol Blok Diyagramı

Sistemde; giriş işareti sıfır kabul edilirse, durum geri besleme denetleyici $u(t) = -K_{lqr}x(t)$ olmak üzere minimize edilecek performans indeksi,

$$J(x, u) = \int_0^{\infty} [x^T(t)C^TQCx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (9)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada; Q pozitif tanımlı veya pozitif yarı tanımlı simetrik bir matristir. R ise tek giriş tek çıkışlı bir sistem olduğundan aşağıdaki gibi pozitif tanımlıdır [9].

$$\begin{aligned} Q &= Q^T = MM^T \geq 0 \\ R &= R^T = NN^T > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Yukarıda belirtilen LQR problemini çözmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

1. (A, B) kontrol edilebilirdir. Bu kabul çözümün varlığını garanti eder. Eğer (A, B) kontrol edilebilir değilse, o zaman x_0 kontrol edilemeyen alt uzayda elemana sahiptir. Hal böyle iken, x_0 'ı orijine yönlentecek $u(t)$ kontrol yasası bulunmayabilir.
2. (A, MC) çifti gözlemlenebilirdir. Bu kabul iç kararlılığı garanti eder. Eğer (A, MC) çifti gözlemlenebilir değilse, o zaman $MCx(t)$ 'nin orijine yakınsamasına rağmen, $x(t)$ 'nin bazı elemanları ıraksayabilir.
3. N tam ranklıdır. Bu kabul sonlu kontrol enerjisini sağlar. Eğer N tam ranklı değilse (eşdeğer olarak, eğer R tekil ise), o zaman $u(t)$ 'nin bazı elemanlarının lineer kombinasyonları sonsuz enerjiye sahip olabilir.

Performans indeksini minimize edebilmek için durum geri besleme kazancı (K_{lqr}) hesabında kullanılan P cebirsel

değeri, aşağıda verilen Riccati denklemi yardımıyla elde edilir [10]-[11].

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (11)$$

LQR probleminin çözümü dört aşamada elde edilebilir.

1. Aşağıda ifade edilmiş pozitif tanımlı, Hermitian tek matrisin var olduğunu kabul edelim. Bu matris denklemi Riccati denkleminin çözümüdür.

$$P = P^T > 0 \quad (12)$$

2. Tüm $u(t)$ girişleri arasında;

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \quad (13)$$

koşulunu sağlayan ve $J(x_0, u)$ ' yi minimize eden statik, lineer, geri besleme kontrol yasasının,

$$u(t) = -R^{-1}B^T P x(t) \quad (14)$$

denklemini ifade edileceğini ispat etmek mümkündür.

3. $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ koşulunu sağlayan tüm $u(t)$ için $J(x_0, u)$ ' nin sınırsız olduğu ispat edilebilir.
4. Son olarak (12) denklemlerini sağlayan $P=P^T$ şartını verecek ispat yapılır.

Tüm bu ispat ve işlemler sonucunda optimal geri besleme kazancı K_{lqr} ;

$$K_{lqr} = R^{-1}B^T P \quad (15)$$

olarak bulunur. LQR tasarımında optimal sonucu elde etmek için Q ve R seçimleri çok önemlidir. Bu matrislerin seçimi için değişik yöntemler mevcuttur. Literatürde; basit seçim, Bryson seçim metodu, çıkış seçimi gibi yöntemler önerilmektedir.

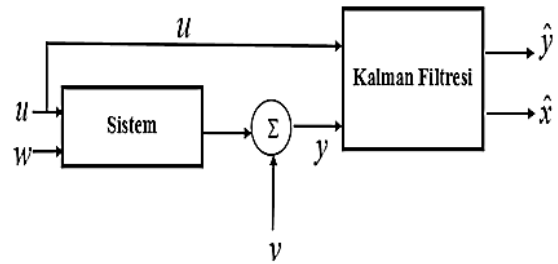
C. Kalman Filtresi

Kalman filtresi, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edebilen filtredir. Kalman filtresi filtreleme özelliğine ilaveten geleneksel tahmin edicilerde olduğu gibi, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin etmede kullanılan çok güçlü bir yöntemdir. Eş zamanlı olarak kullanılabilen bu filtre sayesinde sisteme tanımlanan gürültü ve hata modelleri ile çok başarılı sonuçlar elde edilebilir. Kalman filtresinde sistem tahmini, gözlem ile karşılaştırılır. Elde edilen fark, Kalman kazancı olarak bilinen bir çarpanla ölçeklendirilir. Daha sonra sıradaki tahmini belirlemek için modele bir girdi olarak geri besleme uygulanır. Kalman kazancı, performansı iyileştirmek için ayarlanabilir özelliكتedir [12]. Temel blok diyagramı Şekil 3'de verilen sistemde, $\hat{x}(t)$ tahmin edilen durumları, $\hat{y}(t)$ kalman çıkışını, $w(t)$ sistem gürültüsünü, ve $v(t)$ ise ölçüm gürültülerini ifade etmektedir.

Kalman filtresinin en basit şekli denklem (16) ile ifade edilebilir. Burada, K_k Kalman kazancı dışındaki bütün değerler bilinmektedir.

$$\hat{x}_k = K_k z_k + (I - K_k) \hat{x}_{k-1} \quad (16)$$

Denklemde; \hat{x}_k şu anda hesaplanan kalman durumlarını, z_k ölçüm sonucu elde edilen değeri, \hat{x}_{k-1} bir önceki hesaplanan kalman durumlarını ifade etmektedir [12]-[13].



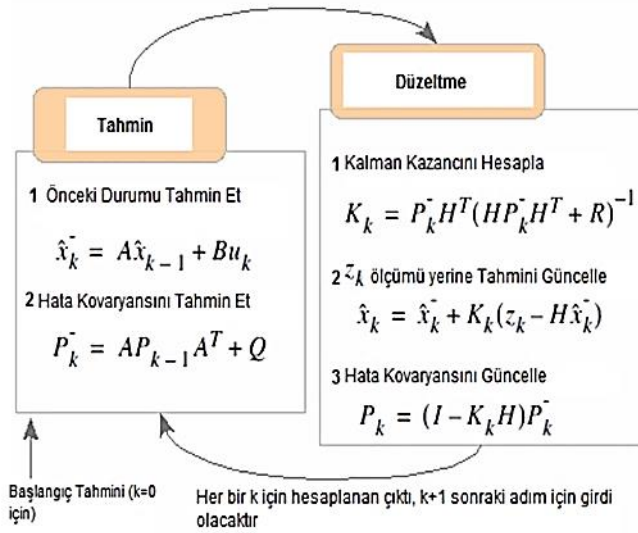
Şekil 3. Kalman filtresi

Kalman filtrelerinde sistem modellendikten sonra Kalman kazancı K_k her döngüde yeniden hesaplanmalıdır. Bunun için aşağıdaki gibi bir sistem modeli yazılır.

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \\ z_k &= Hx_k + v_k \end{aligned} \quad (17)$$

Bu ifadede x_k şu anki durum değerleri, x_{k-1} bir önceki durum değerinin üzerine u_k kontrol sinyali ve w_{k-1} bir önceki işlem gürültüsü eklenerek bulunur. Ölçüm değeri z_k ise x_k şu anki değeri ile v_k ölçüm gürültüsünün toplamından bulunur. Buradaki A, B, H matris değerleri, nümerik olarak elde edilen değerlerdir. Ölçüm gürültüsü ve işlem gürültüsü (w_{k-1} ve v_k) gauss gürültüsü olarak alınabilirler. Kalman filtresi uygulamaları Şekil 4'te görüldüğü gibi genel olarak iki aşamada yürütülür. Bunlar tahmin ve düzeltme aşamalarıdır.

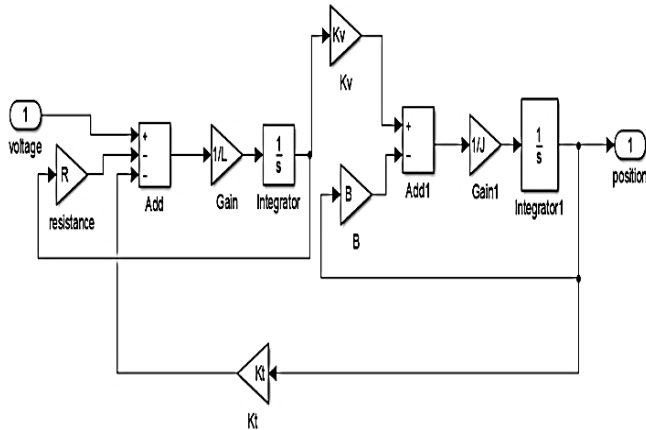
Yürütülen kalman filtre algoritması, şu anki k zamanı için \hat{x}_{k-1} ve P_{k-1} matrislerinin ilk değerleri ile çalışmaya başlar. Konunun ölçümünün yapıldığı her zaman anında filtre yeni bilgiyi sisteme yansıtmak amacıyla \hat{x}_{k-1} ve P_{k-1} değerlerini günceller. Bir sonraki döngüde $k+1$ anında yeni bir ölçüm yapıldığını varsayalım. \hat{x}_{k-1} ve P_{k-1} için $k+1$ anındaki yeni değerlerinin bulunabilmesi için filtre sistem modelini kullanarak tahmin etme basamağını çalıştırır. Daha sonra uzaktan ölçülen değerlerin yeni değerlerle harmanlanabilmesi için ölçüm modelini kullanan düzeltme basamağı çalıştırılır. Son olarak ise \hat{x}_k ve P_k ' nin yeni değerleri bulunur. Daha sonra zaman $k+1$ ayarlanarak her yeni ölçüm için tahmin etme-düzeltilme basamakları tekrarlanır [12]-[14].



Şekil 4. Kalman Filtresi Tahmin ve Düzeltme Aşamaları

III. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada, servo sistemin pozisyon kontrolü Kalman durum kestirimi ve LQR ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan servo sistemin Matlab/ Simulink ortamındaki blok diyagramı Şekil 5'te olduğu gibidir.



Şekil 5. Servo Sistem Blok Diyagramı

Çalışmada kullanılan servo sistem verileri Tablo 1'de verilmiştir. Bu veriler çalışmanın gerçek zamanlı olarak yürütüleceği Quanser deney setinin verileridir. Tablo 1'de verilen değerler kullanılarak servo sistemin durum uzayı matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} -14444.44 & -42.61 & 0 \\ 16670 & -21.73 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 5555.56 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 0 \ 1]$$

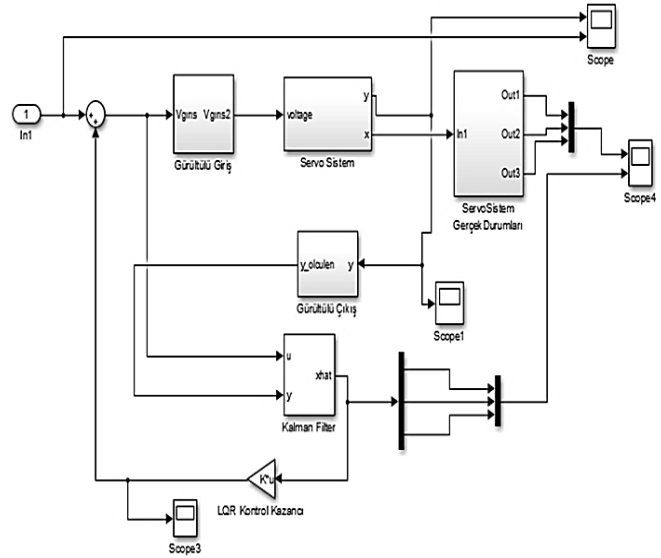
Şekil 6'da, tasarlanan servo sistemin LQR ve Kalman denetimli blok diyagramı görülmektedir. LQR kontrol için Q ve R matrisleri,

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

olarak seçilmiştir. Matlab ortamında kontrol algoritmasında LQR kazancı A,B,Q,R matrisleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

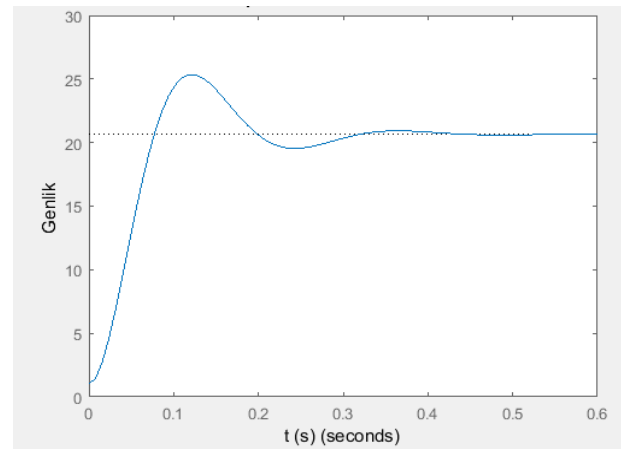
$$K_{lqr} = [71,3261 \ 0,9546 \ 1,0000]$$

Denetleyicinin daha gürbüz bir yapıda olması amacıyla sisteme gürültü eklenerek Kalman filtresiyle durum kestirimleri yapılmıştır. Sistemde Kalman filtresi için $Q=10$ ve $R=1$ olarak alınmıştır.

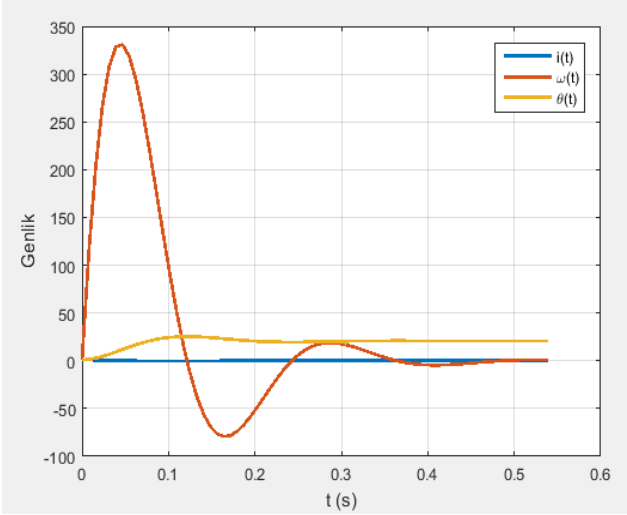


Şekil 6. Servo Sistemin LQR ve Kalman Kontrollü Blok Diyagramı

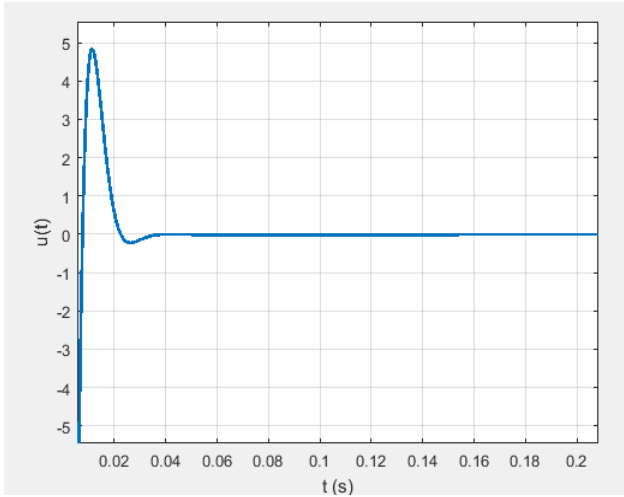
Servo kontrol sisteminin simülasyon çıktıları aşağıdaki gibidir. Şekil 7'de açık çevrim sıfır giriş cevabı görülmektedir. Şekil 8'de sıfır giriş cevabı durum değişkenleri ve Şekil 9'da kapalı çevrim $u(t) = -K_{lqr}x(t)$ kontrol cevabı görülmektedir.



Şekil 7. Servo Sistemin Açık çevrim Sıfır Durum Cevabı

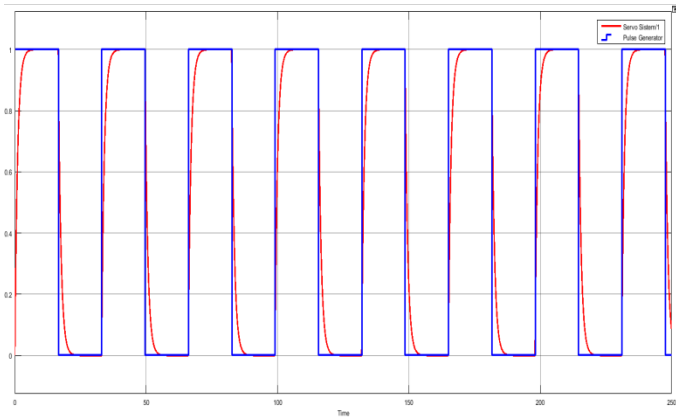


Şekil 8. Servo Sistemin Akım, Hız, Pozisyon Durumlarının Cevabı

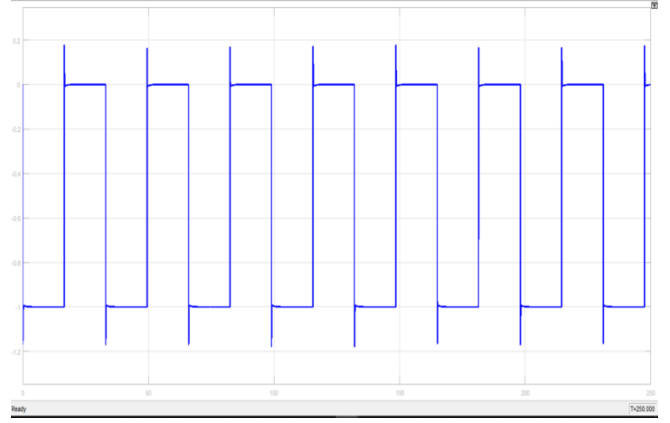


Şekil 9. Servo Kontrol Sisteminde Sıfır Giriş için $u(t)$ kontrol işareti

Servo sistemde referans giriş sinyali olarak 33 saniye periyotlu bir kare dalga uygulanırsa, Kalman durum kestirimli LQR kontrol sisteminin Şekil 10'a görüldüğü gibi bu referans girişi başarıyla takip ettiği görülmektedir. Ayrıca sistemin kapalı çevrim geri besleme kontrol cevabı, $u(t) = -K_{lqr} \cdot x(t)$, Şekil 11'de verilmektedir.

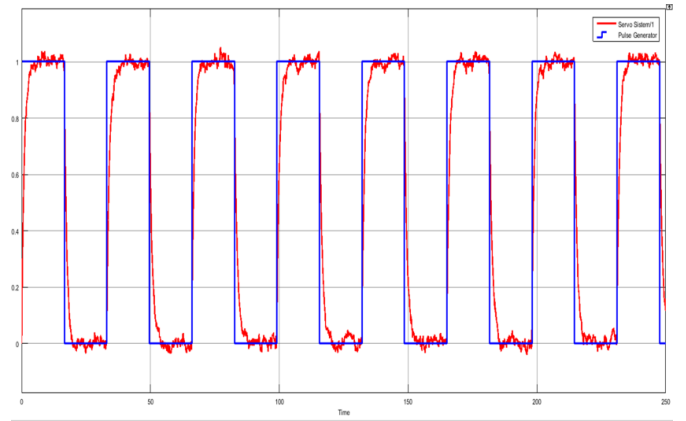


Şekil 10. Servo Sistemin LQR Denetimli Cevabı

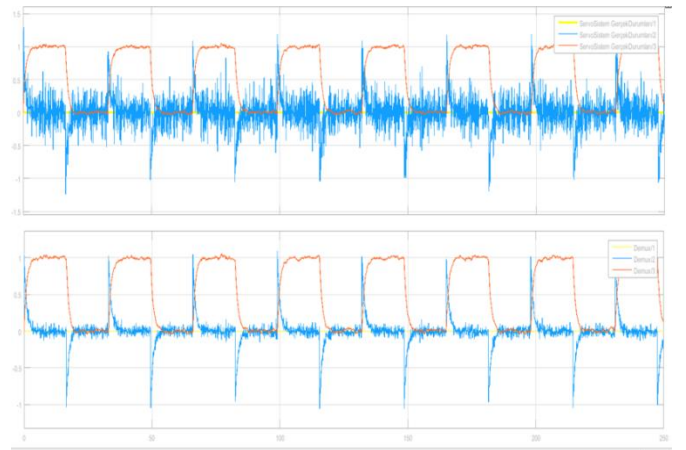


Şekil 11. Servo Sistemin LQR Denetimli Kapalı Çevrim Geri Besleme $u(t) = -K_{lqr} \cdot x(t)$ Cevabı

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 12'de sistem cevabı görülmektedir. Gürültülü bir ortamda LQR ile kontrolü sağlanan servo sistemin gerçek durumları ve Kalman filtresi ile tahmin edilen durumlar Şekil 13'te ki gibidir.



Şekil 12. Servo Sistemin Gürültülü Ortamda LQR Kontrol Cevabı



Şekil 13. Servo Sistemin Gürültülü Ortamda Gerçek Durumları ve Kalman Durum Kestirimi ile Elde Edilen Durumları

IV. 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 Kalman durum kestirimi ile elde edilmiştir. Simülasyonlar sonucunda, durumların değerlerini tahmin etmek için bir Kalman filtresi kullanılarak LQR denetleyicisinin etkinliğini açıkça artırdığını göstermektedir. 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.

REFERANSLAR

- [1] Deshpande P., Deshpande A., Inferential control of DC motor using Kalman Filter. 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems 2012, IEEE. DOI:10.1109/ICPCES.2012.6508056
- [2] Gaeid K., Optimal Gain Kalman Filter Design With DC Motor Speed Controlled Parameters. Journal of Asian Scientific Research, 2013, 3(12):1157-1172.
- [3] Muddasar A., Zahra S.T., Jalal K., Saddiqa A., Hayat M.F., 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, Kambohwell Publisher Enterprises, ISSN: 2409-2770, Vol. 5, Issue 3, PP. 40-49, March 2018.
- [4] Muneeb Masood R., Extended Kalman Filter and LQR Controller Design For Quadrotor UAVs. B.M.E., National University of Sciences and Technology, Pakistan, 2014.
- [5] Al-Maliki A.Y., Iqbal K., PID-Type FLC Controller Design and Tuning For Sensorless Speed Control of DC Motor. Advances in Science, Technology and Engineering System Journal Vol.3, no.6, 515-522, .2018
- [6] Güneş M., Arslan S., Bay A.E., Çok Fonksiyonlu Bir Elektronik Pülverizatörde İlaçlama İşleminin Optimal ve Bulanık Kontrolü. KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2).
- [7] Han M., Kim K., Kim D., Lee J., Implementation of Unicycle Segway Using Unscented Kalman Filter in LQR control, 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) October 31-November 2, 2013, Jeju, Korea.
- [8] Arslan Ş., Mühürücü G., 2014, Speed Control of Direct Current Motor with Linear Quadratic Gaussian Control, Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 27 – 29 Kasım 2014, Bursa.
- [9] Hajiyev C., Vural S.Y., 2013, LQR Controller with Kalman Estimator Applied to UAV Longitudinal Dynamics, Aeronautical & Astronautical Engineering Department, Istanbul Technical University, Received November 26th, 2012, revised December 30th, 2012, accepted January 10th, 2013, Positioning, 2013, 4, Istanbul, Turkey, 36-41.
- [10] Moreira C.O., Silva F.A., Pinto S.F., Santos M.B., Digital LQR Control with Kalman Estimator for DC-DC Buck Converter, EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE, Lisbon, Portugal.
- [11] Tosun D.C., Dört Motorlu Bir İnsansız Hava Aracı İçin Adaptif Kontrol Sistem Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı, 2015.

- [12] Çayıroğlu İ., Kalman Filtresi ve Programlama. Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı, 2012-1.
- [13] Chingiz H., Sıtkı Y.V., LQR Controller with Kalman Estimator Applied to UAV Longitudinal Dynamics. Positioning, 2013, 4, 36-41. (<http://www.scirp.org/journal/pos>)
- [14] Nivedita., Chawla P., Object Tracking in Simulink using Extended Kalman Filter. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 4, Issue 7, July 2015.
- [15] Kaniieski J.M., Cardoso R., Pinheiro H., Gründling H.A., Kalman Filter-Based Control System for Power Quality Conditioning Devices, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO; 11, NOVEMBER, 2013.