



**TEK BAĞLANTILI DÖNER ESNEK EKLEM İÇİN
LQG-LTR KONTROLÖR TASARIMI**

Furkan YAZICI

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk GÜNER**

2025

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEK BAĞLANTILI DÖNER ESNEK EKLEM İÇİN
LQG-LTR KONTROLÖR TASARIMI

Furkan YAZICI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk GÜNER

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**TEK BAĞLANTILI DÖNER ESNEK EKLEM İÇİN
LQG-LTR KONTROLÖR TASARIMI**

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk GÜNER danışmanlığında, Furkan YAZICI tarafından hazırlanan bu çalışma 30 / 07 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ufuk GÜNER *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ali ÜNLÜTÜRK *İmza* :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

30 / 07 / 2025

İmzası

Furkan YAZICI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEK BAĞLANTILI DÖNER ESNEK EKLEM İÇİN LQG-LTR KONTROLÖR TASARIMI

Furkan YAZICI

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk GÜNER

Bu tez çalışmasında, tek bağlantılı esnek bir manipülatör için yetersiz ölçüm durumunun varlığında kullanılabilecek doğrusal bir kuadratik kontrol yapısı için bir metodoloji sunulmuştur. Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR) yapısı, integral aksiyon ile genişletilmiştir. Genişletilen sistem üzerinde integral (LQG-I) destekli Doğrusal Kuadratik Gauss (LQG) kontrol sisteminin tasarımı yapılmıştır. Ölçülmeyen durumları tahmin etmek için Kalman tabanlı Doğrusal Kuadratik Tahminci (LQE) kullanılmıştır. LQG'nin kararlılığını artırmak için Döngü Transfer Kurtarma yöntemi (LTR) uygulanmış ve LQG kontrolörü LQR'ye yaklaştırılmıştır. LQR yapısı integral etkisiyle genişletilmiş ve bu yapı üzerine LQE ve LTR destekli bir LQG-I kontrolörün performansı dinamik bir model olan deneysel tek eklemlili döner esnek mafsallı vasıtasıyla analiz edilmiştir. Model üzerinde frekans alanında yapılan analiz ile LQG girişi tanımlı LTR analizi uygulanmıştır. Belirlenen parametrelerle sistemin farklı girişlerdeki cevabı analiz edilmiştir. Tüm durumların ölçülebildiği LQR kontrolör ile sadece bir durumun ölçülebildiği ve diğer durumların tahmin edildiği LQG kontrolör karşılaştırılmıştır.

2025, 50 sayfa

Anahtar Kelimeler: Esnek Eklem, LQR, LQG, İntegral Destekli LQR, Döngü Transfer Kurtarma, LQG/LTR

ABSTRACT

MS. Thesis

LQG/LTR CONTROLLER DESIGN TO SINGLE-LINK ROTARY FLEXIBLE JOINT

Furkan YAZICI

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ufuk GÜNER

In this thesis, a methodology for a linear control structure that can be used in the presence of inadequate measurement conditions for a single-linked flexible manipulator is presented. The Linear Quadratic Regulator (LQR) structure is extended with integral action. A Linear Quadratic Gaussian (LQG) control system with integral (LQG-I) support is designed on the extended system. A Kalman-based Linear Quadratic Estimator (LQE) is used to estimate unmeasured states. The Loop Transfer Recovery method (LTR) is applied to increase the stability of the LQG, approximating the LQG controller to the LQR. The LQR structure was extended with an integral effect, and the performance of an LQG-I controller supported by LQE and LTR was analyzed using a dynamic model, an experimental single-joint rotating flexible joint. The model was analyzed in the frequency domain, and LTR analysis was performed with the LQG input defined. The system's response at different inputs was analyzed using the specified parameters. The LQR controller, which can measure all states, was compared with the LQG controller, which can measure only one state and estimate the other states.

2025, 50 page

Keywords: Flexible Joint, LQR, LQG, Integral Aided LQG, Loop Transfer Recovery, LQG/LTR

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmasının belirlenmesinde ve hazırlanmasında, bilgi ve tecrübesiyle bana yardımcı olan ve tez çalışmam 'da katkı sunan saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ufuk GÜNER 'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans tez sürecimde maddi ve manevi olarak her zaman bana destek olan aileme teşekkür ederim.

Furkan YAZICI
Temmuz 2025

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin İçeriği	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Lineer Kuadratik Regülatör Tasarım Tekniği	15
3.2. Lineer Kuadratik Gauss Tasarım Tekniği	17
3.3. Döngü Transfer Kurtarma	21
3.3.1. Sistem Çıkışından Kurtarma	22
3.3.2. Sistem Girişinde Kurtarma	22
3.4. Tek Eklemlı Döner Esnek Mafsal	23
3.4.1. Durum Uzay Gösterimi	24
3.4.2. Kontrolcü Tasarımı	26
3.4.3. Lineer Kuadratik Gauss Kontrolcü Tasarımı	26
3.4.4. İntegral Aksiyonlu Doğrusal Kuadratik Regülatör	27
3.4.5. Doğrusal Kuadratik Tahmin Edici	29
3.4.6. Döngü Transfer Kurtarma	30
3.5. Tek Eklemlı Döner Esnek Mafsal Deneysel Prototipi	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	37
4.1. Simülasyon Çalışmaları	37
4.2. Simülasyon Sonuçları	37
4.3. Deneysel Çalışmaları	42

5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR	48



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
K_I	İntegral hatası geri besleme kazancı
K_{LQR}	Durum-geribildirim kazanç matrisi
K_g	Kalman kazanç matrisi
L_o	Gözleyici transfer fonksiyonu
$\mathcal{N}_c$	Gözlemlenebilirlik matrisi
$\mathcal{N}_o$	Kontrol edilebilirlik matrisi
P_{LQR}	LQR Pozitif kesin simetrik matrisi
P_{LQG}	LQG Pozitif simetrik matrisi
P_f	Tahmin hatası kovaryans matrisi
Q_{LQR}	Durum ağırlık matrisi
Q_a	Genişletilmiş sistem durum ağırlık matrisi
Q_n	Sistem gürültü kovaryansı
R_{LQR}	Konum ağırlık matrisi
R_a	Genişletilmiş sistem konum ağırlık matrisi
R_n	Ölçüm gürültü kovaryansı
$\hat{x}$	Sistemin durum tahmin vektörü
w_s	Sistem gürültüsü
v_s	Ölçüm gürültüsü
σ	Ölçüm ağırlık matrisi
θ_s	Şaft açısal konumu
θ_b	Motor açısal konumu

Kısaltmalar

BLDC	Fırçasız DC Elektrik Motoru
DE	Diferansiyel Evrim
DSP	Dijital Sinyal İşlemcisi
GA	Genetik Algoritma
GWO	Gri Kurt Optimizasyonu
IE	Giriş Tahmini
IRIDF	Ters Rastgele Giriş Tanımlayıcı Fonksiyon
LMI	Doğrusal Matris Eşitsizliği
LQ	Lineer Kuadratik
LQE	Lineer Kuadratik Tahminci
LQG	Lineer Kuadratik Gauss
LQI	Lineer Kuadratik İntegral
LQR	Lineer Kuadratik Regülatör
LTR	Döngü Transfer Kurtarma
MATLAB	Matris laboratuvarı
OBF	Çıktı Tabanlı Giriş Şekillendirme Filtresi
ODE	Adi Diferansiyel Denklem
PDE	Kısmi Diferansiyel Denklem
PID	Oransal İntegral Türev
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SFC	Durum Geri Besleme Kontrolü
TFL	Hedef Geri Besleme Döngüsü
VSC	Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. LQR Blok diyagramı	17
Şekil 3.2. Ayırım metodu.....	18
Şekil 3.3. Kalman Filtresi	19
Şekil 3.4. LQG Kontrol şeması.....	20
Şekil 3.5. LQG/LTR Kontrol Yapısı	21
Şekil 3.6. Tek eklemlı döner esnek mafsals mekanik modeli	23
Şekil 3.7. İntegral aksiyonlu LQG kontrol blok diyagramı	26
Şekil 3.8. LQG/LTR Yapısı.....	31
Şekil 3.9. Prototip tek eklemlı döner esnek mafsals.....	32
Şekil 3.10. BLDC Motor.....	33
Şekil 3.11. Yaylar	33
Şekil 3.12. Şaft.....	34
Şekil 3.13. Üç faz optik enkoder.....	35
Şekil 3.14. Kontrol ünitesi	36
Şekil 3.15. Kontrol ünitesi yapısı.....	36
Şekil 4.1. TFL ve açık döngü sistem frekans tepkisi	38
Şekil 4.2. Duyarlılık(S), tamamlayıcı duyarlılık(T) ve TFL.....	38
Şekil 4.3. Açık döngü sistem kazancı için Bode tepkisi	39
Şekil 4.4. Açık döngü sistem kazancının Nyquist çizimi	39
Şekil 4.5. Gürültüsüz kapalı devre sistem tepkisi	40
Şekil 4.6. Gürültüsüz tahmin durumlar.....	41
Şekil 4.7. Gürültülü kapalı devre sistem tepkisi	41
Şekil 4.8. Gürültü altında tahmin durumlar	42
Şekil 4.9. Tek eklemlı döner esnek mafsals PID tepkisi	43
Şekil 4.10. Tek eklemlı döner esnek mafsals LQR-I tepkisi.....	43
Şekil 4.11. Tek eklemlı döner esnek mafsals LQG-I tepkisi.....	44
Şekil 4.12. Tek eklemlı döner esnek mafsals LQG durum kestirim tepkisi.....	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sistem Parametreleri.....	24
Çizelge 4.2. Kontrolcü Karşılaştırma Tablosu.....	46



1. GİRİŞ

Son yüzyılda teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte robotlar ve iş makineleri, günlük yaşamda ve özellikle çalışma alanlarında giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle seri üretim yapılan sektörlerde bu sistemlerin kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Düşük hata payına sahip olmaları, yüksek performans sunmaları ve üretim hızını artırmaları nedeniyle tercih edilmektedirler.

Manipülörler için kontrolcü tasarımı, robotlar ve iş makinelerinin mekanik tasarımı, sistemlerin dinamik ve kinematik analizleri bu doğrultuda büyük önem taşır. Başarıyla entegre edilen kontrol sistemleri, makinelerin daha verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca bu sistemler, iş süreçlerinde verimliliği artırarak maliyetleri düşürmekte ve insan gücüne olan bağımlılığı azaltmaktadır.

Esnek manipülörler, esnek bağlantılar aracılığıyla hareketi ileten sistemlerdir. Farklı mafsallarıyla birbirine bağlı uzuvlardan oluşurlar. Bu uzuvların konumları ve hızları çeşitli algılayıcılar tarafından ölçülür ve kontrol edilir. Uç işlevçiler aracılığıyla belirli görevleri yerine getiren ve farklı hareketleri gerçekleştiren robot kollar olarak tanımlanmaktadır (Eser, 2022).

Esnek robotik sistemler, robotik cerrahi, hassas üretim ve uzay görevleri gibi alanlarda kullanılmaktadır (Li et al.2024). Yapısal esnekliğe sahip olan manipülörler, gelişen robotik uygulamalarına bir alternatif sunmaktadır. En önemli avantajı boşluk ve sürtünme etkileri olmadan hareket iletimine olanak vermesidir. Dezavantajı ise modellenmesi ve kontrolünün zor olmasıdır. Esnek manipülörler genellikle istenmeyen titreşimlere ve modelleme zorluklarına sahiptir. Bu nedenle, esnek manipülörlerdeki istenmeyen etkileri ortadan kaldırmak için etkili bir denetleyici gereklidir.

Doğrusal kuadratik regülatör, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan model tabanlı bir optimum kontrol yöntemidir. Sistemin geri besleme kazancını türetmek için kuadratik bir performans maliyet fonksiyonunu en aza indirerek kararlılık sağlar. Bu yaklaşım, kapalı devre sistemin performans özelliklerini etkili bir şekilde biçimlendirmeye olanak tanımaktadır.

Bir LQR'nin optimum bir şekilde çalışması, her zaman pratikte mümkün olmayabilir, çünkü sistemin tüm durumlarına erişim gereklidir. Bu gibi durumlarda, sistemin durumu gözlem yoluyla tahmin edilebilir. Bu Doğrusal Kuadratik Gauss (LQG) kontrolünün temelini oluşturur. LQG, durum tahmini ve kontrolü birleştirerek tatmin edici bir yaklaşım sağlamasına rağmen, sistemdeki belirsizlikler ve gürültü nedeniyle denetleyicinin sağlamlığını tehlikeye atabilecek zorlukları beraberinde getirir (Doina, 2012).

Döngü Transfer Kurtarma (LTR), LQG'nin sağlamlığını artırmak için kullanılan bir yöntemdir. LQG kontrolörün LQR'ye yaklaşmasını sağlamak için sistematik bir yaklaşım sunar (Preumont, 1999).

1.1. Tezin Amacı

Esnek eklemlerin kontrolünde, performansı artıran ancak aynı zamanda dinamik titreşimleri bastırabilen yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Burada, hassas yörünge takibi sağlanması, eklem esnekliğinden kaynaklanan dinamik sapmaları minimize edilmesi, optimum sistem performansını sağlanması hedeflenir.

Tek serbestlik derecesine sahip bir robot kol modeli, robotik sistemlerin geliştirilmesinde önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu model, bağımsız olarak kullanılabileceği gibi, daha büyük ve karmaşık bir robot sisteminin de bir bileşeni de olabilir. Çünkü tek serbestlik dereceli esnek eklemler üzerinde elde edilen başarılı sonuçlar, gelecekte daha karmaşık robotik sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar için sağlam bir temel oluşturarak, bu sistemlerin başarı oranını artırmada kritik bir rol oynayabilir.

Esnek eklemlilerli yapılar, doğaları gereği model belirsizliklerini yapısında barındırır, bu da kesin ve deterministik bir şekilde modellenmelerini güçleştirir. Ayrıca, modele ait tüm durumların ölçülmesi yapısal olarak zor ve maliyetli olabilir. Bu durum LQR'nin doğrudan kullanımını engeller. LQG, daha az durumun ölçülebildiği bu tür sistemleri kontrol etmek için alternatif bir çözüm sunar. Ancak, LQG kararlılık açısından zayıf olabilir. Bu sorunu çözmek için LQG'nin kararlılığı LTR yöntemi ile artırılabilir. Bu

çalışmada, minimum sensöre sahip tek bağlantılı esnek döner eklem için LQG kontrolörü tasarımı için bir metot önerilmektedir. Esnek ekleme bağlı yalnızca bir sensör varlığında, sistemin kontrolü için bir metot geliştirilmiştir.

Bu bağlamda, tek serbestlik dereceli esnek döner eklem için bir elektro-mekanik prototip geliştirmiş ve matematiksel model oluşturulmuştur. Daha sonra, tüm durumların ölçülebildiği varsayılarak LQR kontrolörü tasarlanmıştır. LQR'ye referans girişi uygulamak için integral eylem eklenmiştir. Bu kontrolör yapısı LQG için referans olarak kullanılmıştır. Daha sonra, sistemin yalnızca bir durumunun ölçülebildiği durum için LQG tasarımı yapılmıştır. LQG'nin kararlılığını artırmak için ise LTR yöntemi uygulanmıştır.

1.2. Tezin İçeriği

Bu bölümde, çalışmanın genel yapısı ve izlenen yöntem doğrultusunda tez içeriği bölümler halinde özetlenmiştir. İlk bölümde, çalışma hakkında genel olarak bir bilgilendirme yapılmıştır. Bazı temel zorluklardan ve sisteminin tasarımının ve kontrolünün neden gerçekleştirildiği ve literatürde yapılmış çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. İkinci bölümünde, araştırmacılar tarafından tasarlanan ve kontrol yöntemlerinin sisteme etkileri üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmaları incelenmiştir. Üçüncü bölümde, “Materyal ve Yöntem” ana başlığı altında yer almaktadır. Bu bölümde, gerçekleştirilen sisteme ait tasarımın matematiksel çizimleri ve kullanılan donanımlar ele alınmıştır. Ayrıca, sistemin üzerinde uygulanan kontrol türleri hakkında teorik bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise, sistemin üzerinde uygulanan kontrol sistemlerinin performans etkilerine ait simülasyon sonuçlarına ait çıktılar verilmiştir. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar ışığında kullanılan kontrol sistemin performansları ayrıntılı olarak kıyaslanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tek serbestlik dereceli esnek manipülatör hakkında literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara ait özetler aşağıda ayrıntılı şekilde verilmiştir;

Baroudi et al. (2009) bildirilerinde, tek bağlantılı esnek bir robot manipülatör için iki kontrol tekniğini karşılaştırmışlardır. LQR denetleyicisi esnek sistemin uç salınımlarını etkili bir şekilde bastırdığı bu sayede yüksek hızlı robotik uygulamalarda sistem kararlılığı ve enerji ticareti için kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Manipülatörün dinamik modeli, dönen taban ve esnek kolun rijit cisimler olduğu varsayılarak Lagrange yaklaşımı kullanılarak geliştirilmiştir. Kutup konumlandırmaya dayalı bir durum geri besleme denetleyicisi ve Riccati denklem çözüm odaklı LQR kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Kontrol yöntemlerinin performansı MATLAB /Simulink benzetim ortamında test edilmiştir. Benzetim sonuçları, Quanser esnek giriş modülü üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Çalışmada her iki yöntemin deneysel performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçta her iki kontrol stratejisinin esnek manipülatörlerin kontrolünde etkili olduğu göstermişlerdir.

Durand et al. (2014) konferans Çalışmalarında, doğrusal sistemler için olay tetiklemeli kontrol yaklaşımına dayalı bir durum geri besleme LQR kontrolörü önermişlerdir. Olay tetiklemeli LQR kontrol stratejisi, hesaplama ve iletişim kaynaklarını gerektiğinde kullanarak sistemin performansını artırırken, aynı zamanda aktüatör sınırlarını göz önünde bulundurur. Ayrıca, hata takibini iyileştirmek amacıyla integral eylem eklenmiş bu yaklaşım, olay tetiklemeli bir kontrol sisteminde aşırı salınımları önlemek için üstel unutma faktörüyle desteklenmiştir. Önerilen yöntem, bir jiroskop sistemine uygulanarak test edilmiş ve kontrol güncellemelerinin sayısını önemli ölçüde azaltırken, referans takibini ve sistemin kararlılığını başarılı bir şekilde sağladığı gözlemlenmiştir. Bu makalenin sonuç bölümünde, özellikle kaynak kısıtlı gömülü sistemlerde ve esnek manipülatör gibi karmaşık dinamik sistemlerin kontrolünde olay tetiklemeli LQR kontrol stratejisinin etkinliğini vurgulamışlardır.

Dallali et al. (2015) çalışmalarında, ayrık zamanda Doğrusal Matris Eşitsizliği (LMI) kullanılarak tasarlanan LQR kontrolünün uygulanmasını araştırarak robotun

izleme performansını artırmışlardır. Bu yöntem, esnek eklemli robotlar için geri besleme kazancı oluşturmaya yönelik sistematik bir yaklaşım sunar ve ideal kapalı sistem dinamiklerine ulaşma yolunda önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Esnek manipülatörlerde bağlantı takibi için statik tam durum doğrusal geri besleme kontrolünün kullanımı için deneysel çalışma yapılmıştır. Robotun eklemlerindeki pasif elastikiyetin neden olduğu ve özellikle yüksek yer çekimi kuvvetleri veya merdiven çıkma gibi dış durumlarda bağlantı takibini zorlaştıran sorunları ele alınmıştır. Bulgularında, LQR kontrolörünün geri besleme kazançlarının mühendislik için sistematik bir yol sunduğunu ve bunun sonucunda kapalı devre dinamiklerinin ve izleme kabiliyetlerinin iyileştirildiğini ortaya koymuşlardır. Genel anlamda, doğrusal durum geri besleme kontrolünün, esnek eklemlere sahip insansı robotların kararlılık etkisini artırdığını ve ek telafi stratejileriyle iyileştirmeye çalışıldığını göstermişlerdir.

Razmjooey et al. (2016) makalelerinde, esnek mafsallı robot manipülatörlerinin kontrolü için optimize edilmiş bir LQR kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Sistem dinamiklerinin modellenmesinde Euler-Lagrange enerji yaklaşımı kullanılmıştır. Tasarlanan LQR kontrolörünün temel amacı, sistemin performansını ve kararlılığını artırmaktır. Kontrolörün ağırlık matrisleri, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) algoritması kullanılarak en uygun hale getirilmiştir. Denetlenen sistemin yerleşme süresini azaltmak ve aşım oranını minimuma indirmek amacıyla özel bir performans endeksi belirlenmiştir. Önerilen kontrol yaklaşımının performansı, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tabanlı kontrol yöntemi ile karşılaştırılmıştır. MATLAB tabanlı modelleme sonuçları, GWO tabanlı LQR kontrolörünün üstün kararlılık ve geliştirilmiş dinamik tepki sağladığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, esnek mafsallı robot manipülatörlerin kontrolünde GWO destekli LQR stratejisinin etkin ve kararlı bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Rojas et al. (2016) makalelerinde, iki serbestlik dereceli bir robot kolunun kontrolü hibrit LQR yöntemiyle ele almışlardır. Çalışmanın temel amacı, dışsal bozulmalara karşı sistemin sağlamlığını koruyarak hassas hareket kontrolünü sağlamaktır. Optimal kontrol teorisi kullanılarak geliştirilen model, MATLAB yazılımının Simulink ortamında simüle edilmiştir. Kontrol yasalarının türetilmesinde Pontryagin'in Maksimum Prensipleri ve Hamilton-Jacobi-Bellman denklemleri gibi

yöntemler kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda, önerilen LQR yönteminin dengeyi sağladığını ve salınımı azalttığını göstermektedir. Hibrit LQR kontrolünün, karmaşık dinamik yapıya sahip robotik manipülatörler için oldukça etkili olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, önerilen yöntemin bazı geçişli sistemlerde de başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bu çalışma, hibrit kontrol yöntemlerinin robotik sistemlerde yüksek doğruluk ve stabilite potansiyelini artırmıştır.

Tahir et al. (2017) makale çalışmalarında, tek bağlantılı esnek manipülatörlerin titreşimlerini azaltmaya yönelik optimal kontrol yaklaşımlarını ele almışlardır. Tek bağlantılı esnek manipülatörlerin artık seçimlerinin azaltılması ve pozisyon kontrolünün sağlanması için genişletilmiş, Çıktı Tabanlı Giriş Şekillendirme Filtresi (OBF) yöntemi önerilmiştir. Yöntem, LQR ve PID kontrolcülerıyla ayrı ayrı birleştirilerek uygulanmış ve farklı yük değişimlerine karşı olarak test edilmiştir. Simülasyon çalışmalarının, LQR-OBF yönetiminin hem hata azaltma hem de pozisyon yönetimi açısından PID-OBF'ye göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, çıktı şeklinde giriş şekillendirme yönteminin esnek manipülatörlerin hassas kontrolünde etkili bir çözüm sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, esnek manipülatörlerin kontrolüne yönelik ileri araştırmalar için önemli bir temel oluşturmuşlardır.

Ikizoglu and Gurisik (2018) bildirilerinde, tek eklemlili esnek eklemlili robotlar için çeşitli optimum kontrol stratejilerinin kullanımına odaklanmışlardır. Çalışmanın asıl amacı, manipülatörün açısal hareketini minimum yerleşme süresi ve minimum titreşim ile gerçekleştirmektir. Bu doğrultuda, LQR tabanlı üç farklı optimal kontrol yöntemi fiziksel bir sistem üzerinde test edilmiştir. Mekanik belirsizlikler, dişli boşluğu ve sürtünme etkileri gibi istenmeyen sistem davranışlarını analiz etmekte ve bunları gidermeye yönelik çözümler önermektedir. Sonuç olarak seçilen kontrol yöntemlerinin etkinliğini göstererek, esnek mafsallı robot manipülatörlerinin kontrolü üzerine yapılacak ileri çalışmalar için güçlü bir temel sunulmuştur.

Dharavath and Ohri (2020) kaynak bildirisinde, tek bağlantılı esnek mafsallı bir manipülatörün pozisyon takibi ve titreşim kontrolünü sağlamak amacıyla iki farklı kontrol tekniğini karşılaştırmışlardır. Sistem dinamiği Euler-Lagrange yöntemiyle modellenmiş ve kontrol tasarımı Durum Geri Besleme Kontrolü (SFC) ile Riccati

denklemleri kullanılarak elde edilen LQR yöntemi uygulanmıştır. MATLAB simülasyonları ve Quanser deney seti ile yapılan doğrulamalar sonucunda, LQR kontrolörünün pozisyon hatasını ve titreşimi önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, LQR yöntemi, SFC'ye kıyasla daha düşük aşım ve daha hızlı oturma süresi sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, esnek eklemli robot manipülatörlerinin hassas kontrolü için LQR'nin üstün performans sunduğunu göstermiştir.

Saldaña Enderica et al. (2024) makale çalışmalarında, döner esnek bağlantı sistemlerinde salınımları azaltmak için Genetik Algoritmalar (GA) kullanarak Q ve R matrislerinin performansını incelemişlerdir. Çalışmada, esnek bağlantıların dinamiklerini kontrol etmek amacıyla optimal kontrol tasarımı önerilmektedir. Bu tasarımda, esnek sistemlerin genellikle ortaya çıkan titreşimler ve osilasyonların engellenmesi hedeflenmiştir. Genetik algoritmalar, Q ve R matrislerini optimize etmek için kullanılmış, böylece sistemdeki kontrol performansı iyileştirilmiştir. Yapılan deneylerde, esnek döner bağlantı sistemindeki salınımlar başarılı bir şekilde azaltılarak başarılmıştır. Ayrıca, genetik algoritmanın, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha etkili bir çözüm sunduğu ve sistem kararlılığını artırdığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, genetik algoritmaların esnek sistemlerde osilasyon kontrolü sağlamak için potansiyel bir yaklaşım olarak etkili olduğunu göstermişlerdir.

Chacko et al. (2024) makalelerinde, LQR kontrolörlerinde Q ve R matrislerini ayarlamak için üç farklı yöntemi karşılaştırmışlardır. Deneysel sistem olarak karmaşık dinamiğe sahip ters sarkaç araba sistemi seçilmiştir. LQR tabanlı titreşim kontrolü için, yapay arı kolonisi algoritması ile LQR matrislerini ayarlanmıştır. Newton-Raphson yöntemi, kapalı çevrim kutuplarını doğrudan belirleyerek etkili hale getirirken, sınır ağları fonksiyonları, doğrusal olmayan sistemlerin çözümü için polinomlaştırma tekniğiyle modelleme yapmaktadır. Bal arısı algoritması ise biyolojik ilham alarak optimizasyon çözümü üretmektedir. Benzetim çıktılarına göre, tüm yöntemler sistemi kararlı hale getirebilmektedir. Ancak, aşım ve yükselme süresi gibi geçici yanıt ölçütlerinde Newton-Raphson yöntemi daha üstün performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca bu yöntem, tasarımcıya sistem özelliklerini doğrudan kontrol etme imkânı sunmaktadır. Sonuç olarak, analitik yaklaşımlı LQR optimizasyonu ile daha kesin ve etkili bir çözüm sunulmuştur.

Chien-Yu Ji et al. (2008) çalışmalarında, esnek eklemli robot sistemi için giriş tahmin algoritmasına dayalı LQG ile sağlam bir denetleyici önermişlerdir. Çalışmada, LQG'nin sağlamlığı giriş tahmin algoritması ile artırılmıştır. Denetleyici tasarımı, Giriş Tahmini (IE) algoritması ile LQG kontrolörü birleştirilmiştir. Bu birleşik strateji, öngörülemeyen sistem değişiklikleri ve dış müdahaleler karşısında üstün kontrol performansı sağlamayı amaçlamaktadır. IE algoritması, çevrimiçi ters tahmin yöntemi olarak tanımlanır ve Kalman Filtresi ile en küçük kareler yöntemini içermektedir. Algoritma, ilave tork sensörü gerektirmeden sistem girişini tahmin edebilmektedir. LQG kontrolörü ise dış müdahalelere karşı düşük hassasiyetle bilinir. Kontrol performansının etkinliği, esnek mafsallı robot sistemlerinin eklem kontrolü üzerinde test edilmiştir. Simülasyonlarla, IE algoritmasının dış müdahale torkunu etkili bir şekilde tahmin edildiği gösterilmiştir. Ayrıca, LQG kontrolörünün, dış bozucuları başarıyla yönettiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu birleşik yöntem robot sisteminin eklem kontrolünde yüksek performans gösterdiği vurgulanmıştır.

Doina (2012) bildirisinde, LQG ve LQR yöntemlerini kullanarak esnek eklem manipülatörleri için optimal denetleyiciler tasarlamıştır. Çalışmada, esnek eklem manipülatörünün dinamiklerini içeren matematiksel bir model geliştirilmiş ve bu model LQG/LQR kontrol stratejilerinin uygulanabilmesi için temel oluşturulmuştur. Geri besleme doğrusallaştırma teorisi kullanılarak, manipülatörün doğrusal olmayan dinamikleri doğrusal bir forma dönüştürerek, LQG/LQR tekniklerinin uygulanabilirliğini artırmıştır. Simülasyon çalışmalarında, bir bağlantılı esnek eklem manipülatörü kullanılarak kontrol stratejilerinin etkinliği test edilmiş ve bu yöntemlerin manipülatör dinamiklerini yönetmede başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, enerji benzeri kriterlere göre optimal denetleyiciler tasarlayarak sistemin stabilitesini ve dayanıklılığını artırmayı hedeflenmiş ve tek bir komutla iki çıkışı kontrol etme yöntemini önererek kontrol verimliliğini yükseltmiştir.

Huerta et al. (2012) makale çalışmalarında, şebekeye bağlı Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüler (VSC) için bir akım kontrol şeması sunarak, LQG servo kontrol tekniğini kullanmışlardır. Kalman Filtresi ve Lineer Kuadratik (LQ) kontrol tasarım parametrelerinin seçimine odaklanılarak, sıfır kararlı durum hatası, kanal ayrıştırma ve gürültü bağışıklığı sağlanmasını amaçlamışlardır. LQR denetleyicisinin Riccati denklemi

çözümü ile optimize edilmesi ve Kalman Filtresinin ölçümlerden faydalananarak durumu doğru şekilde tahmin etmesi, sistemin kararlılığı artırılmıştır. Ayrıca, sistem için geliştirilen Kalman Filtresi yaklaşımı sayesinde hesaplama karmaşıklığı önemli ölçüde azaltılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlarla, önerilen kontrol yapısının gürültülü ortamlarda LQR'ye göre daha başarılı olduğu ve reaktif akım değişimlerini etkin bir şekilde yöneltildiği gösterilmiştir. LQG denetleyicisinin Dijital Sinyal İşlemcisi (DSP) üzerinde uygulanabilirliği gösterilmiş ve tasarım matrislerinin seçim ölçüleri belirlenmiştir. Bu yöntemle, özellikle şebeke gerilimi gibi bozuculara karşı dayanıklı ve optimize edilmiş bir kontrol performansı sunulmuştur.

Kosari et al. (2013) bildirilerinde, LQG stratejilerini kullanarak bir kontrol sisteminin tasarım ve uygulamasını ele almışlardır. LQG denetleyicileri, belirsizlikler ve gürültü içeren sistemlerin kontrolünü sağlamak amacıyla tasarlanmış olup, model ve ölçüm gürültülerinin başlangıç değerleri belirlenerek sistemin performansı optimize etmişlerdir. Çalışmada, süreç ve sensör gürültüsünün etkileri incelenmiş ve sistemin dayanıklılığını artırmak için sensör gürültüsüne ideal değerin %40'ı kadar bir ekleme yapıldığı belirtilmiştir. LQG ve ideal LQR yanıtlarının karşılaştırılması sonucunda, aralarındaki farkın küçük olduğu ve LQG kontrolcüsünün belirlenen koşullar altında başarılı bir performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca, açık döngü transfer matrisinin frekans alanında LQR'ye yakınsamasının sistemin kararlılığı açısından kritik olduğu vurgulanmış ve bu kontrol yöntemlerinin özellikle güneş radyasyonu gibi dış etkenlerden etkilenen uzay sistemlerinde kullanıldığı ifade edilmiştir.

Tek bağlantılı esnek manipülatörlerin modellenmesi ve kontrol üzerine yapılan çalışmalar, özellikle enerji verimliliği ve hızlı operasyon birimlerinin ön planda olduğu uygulamalar için büyük önem verilmiştir.

Altınar'ın (2016) doktora tez çalışmasında, esnek manipülatörlerin dinamik modelleri ve kontrolünü ele almıştır. Çalışma, sistemin hem Kısmi Diferansiyel Denklemleri (PDE) modelini hem de diferansiyel denklemi temelli olan, Adi Diferansiyel Denklem (ODE) içermektedir. Özellikle PDE tabanlı model daha iyi sonuçlar vererek esnek sistemlerin dinamiklerini daha iyi yansıtmıştır. LQG ve H_∞ kontrol yöntemleri, sistem denetimi ve dinamik yanıtların modellenmesi amacıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç

olarak, PDE modelinin daha başarılı görüldüğü ve H_∞ kontrolünün modellenmemiş dinamiklerin etkisini azaltmadaki düşük performansı ortaya çıkmıştır.

Danh (2022) makalesinde, gürültü altında LQG kullanarak esnek robot kollarının kontrolünü incelemektedir. Robot kolunun dinamiklerini anlamak için Euler-Lagrange yöntemiyle bir matematiksel model geliştirilmiş ve LQG regülatörünün gürültüye rağmen hareket kontrolünü başarılı bir şekilde sağladığını göstermiştir. Bağımsız eklemlerden oluşan robot tasarımının hassas kontrol sağladığı vurgularken, yapılan kararlılık testlerinde sistemin başlangıçta kararsız olabileceği ancak zamanla stabil hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapay sinir ağlarının entegrasyonu ile kontrol performansının iyileştirilmesi hedeflenmiş ve MATLAB simülasyonlarında başarılı sonuçlar elde etmiştir. Çalışma, daha önce bu model için sunulmamış yöntemler önererek robotik ve kontrol sistemleri alanına özgün bir katkı sağlamıştır.

Colombo and Da Silva (2022) makalelerinde, esnek bağlantılara sahip paralel bir manipülatör için LQG tabanlı bir kontrol yaklaşımı sunmuşlardır. LQG ve PID'yi içeren hibrit bir kontrol metodu uygulayarak, çalışmada denetlenen sistemin kontrol girişi ters kinematik model üzerinden elde etmişlerdir. Paralel manipülatörlerin yüksek doğruluk ve enerji verimliliği sunmasına rağmen, doğrudan konum ölçümünün zorluğu ve yüksek hızlarda oluşan titreşimler kontrol açısından önemli zorluklar doğurmaktadır. Çalışmada, görsel tabanlı bir poz tahmin yöntemi ve indirgenmiş bir esnek model kullanılarak kontrol stratejileri geliştirilmiştir. PID tabanlı bir kontrol döngüsü ile birlikte, titreşimleri en aza indirmek için LQR/LQG kontrol yöntemi uygulanmış ve önerilen yaklaşımın, geleneksel PID kontrolüne kıyasla daha iyi takip performansı sağladığını göstermişlerdir. Sonuç olarak, esnek paralel manipülatörlerin kontrolünde model tabanlı yöntemlerin etkinliğini vurgulamışlardır. LQG denetleyicisinin kararlılığını sağlamak amacıyla kontrol kazançlarının belirlenmesinde yinelemeli optimizasyon tabanlı bir prosedür kullanmışlardır. İleri beslemeli geliştirilmiş ölçüm teknikleriyle, gelecekteki çalışmalar için potansiyel bir iyileştirme yöntemini önermişlerdir.

Choi and Krishnamurthy (1991) çalışmalarında, esnek bağlantılı iki kollu düzlemsel bir manipülatörün kuvvet kontrolünü ele almışlardır. Çalışmada, sistemin hareket denklemleri genişletilmiş Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiş ve yalnızca

yapısal esneklik etkileri modele dâhil edilmiştir. LQG/LTR kontrol yöntemi kullanılarak, modelleme hatalarına ve sensör gürültüsüne dayanıklı, Kartezyen uzayında çalışan bir geri besleme kontrol sistemi tasarlamışlardır. Önerilen kontrolcü, manipülatörün çevreyle temas kuvvetini hassas bir şekilde düzenlerken, aynı zamanda uç noktanın belirlenen yörüngeyi takip etmesini sağlamıştır. Yapılan benzetimlerle, yöntemin kuvvet ve konum kontrolünü aynı anda başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği ve esnek manipülatörlerin hassas kontrolü için etkili bir yaklaşım sunduğunu göstermişlerdir.

Kim (1994) makalesinde, doğrudan tahrikli robotik kol gibi doğrusal olmayan sistemlerde karşılaşılan Coulomb sürtünmesi ve boşluk gibi zorlu etkileri göz önünde bulundurarak geliştirilen QLQG/LTR kontrol yöntemini tanıtmıştır. Geleneksel QLQG denetleyicilerin karmaşık denklem yapısı ve sınırlı kararlılık dayanıklılığına karşı, bu yeni yöntem istatistiksel lineerleştirme, hedef filtre tasarımı ve çevrim transfer geri kazanımı tekniklerini birleştirerek tasarımı basitleştirip sistemin dayanıklılığını artırmayı amaçlamıştır. Kontrol sistem tasarımı, hedef filtre döngüsünün belirlenmesi, uygun kazançların Riccati denklemleriyle elde edilmesi ve Lyapunov denklemlerinin çözümü ile gerçekleştirmiştir. Doğrusal sistemler için LQG/LTR ile güçlü kontrolcüler tasarlanırken, doğrusal olmayan sistemler için Ters Rastgele Giriş Tanımlayıcı Fonksiyon (IRIDF) yaklaşımıyla uyarlanmış ve kontrol yapıları elde etmiştir. Bu yapı, doğrusal olmayan kazançların iteratif olarak iyileştirilmesi sağlanmıştır. Sunulan QLQG/LTR yöntemi, farklı çalışma koşullarında sabit durum hatalarını ortadan kaldırmakta, Coulomb sürtünmesinin etkilerini telafi etmekte ve sistemin kararlılığını artırmıştır. Sonuçta, yöntemin hem performans hem de kararlılık açısından güçlü ve etkili bir kontrol çözümü sunduğunu göstermiştir.

Lu et al. (1998) yaptıkları makale çalışması, sismik yükler altında çalışan yapılar için LQG/LTR temelli bir aktif kontrol yöntemini önermişlerdir. Amaç, düşük mertebeli, kullanışlı ve sismik etkilere dayanıklı bir yapı kontrolörü geliştirilmiştir. İlk aşamada, yapının baskın modları korelasyonla hız geri besleme yoluyla bastırılmış ve sistem sadeleştirilmeye uygun hale getirilmiştir. Ardından, dengeli gerçekleştirime sistemine dayalı, model indirgeme ile sistemin düşük mertebeli modeli elde edilmiştir. Tasarım, düşük frekanslı bozulmaların reddedilmesi ve yüksek frekanslı gürültülerin bastırılması gibi kriterleri içermektedir. LQG/LTR denetleyicisi, Kalman Filtre şekillendirmesinin

uygulanması ve Riccati denkleminin çözümü yoluyla türetilmiştir. Yöntem, iki ayrı altı katlı bina modelini içeren sayısal benzetim yoluyla değerlendirmeye tabi tutulur: biri izolatörlerle donatılmış, diğeri sabit temellere sahiptir. Simülasyonlar, özellikle izolatörlü yapıda deformasyonu %84 ve üst yapı tepkisini %50'nin üzerinde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, kontrol sistemi, zaman gecikmeleri ve yapısal belirsizliklere karşı kararlılığı korunmuştur. Bu yönüyle, önerilen yöntem pratik yapısal uygulamalar için sağlam ve etkili bir kontrol olarak verilmiştir.

Xu Gang and Cao Guangzhong (2000) çalışmalarında, LQG ve LTR yöntemlerini karşılaştırarak, LQG/LTR'nin standart LQG yönteminin özel bir durumu olduğunu öne sürmüşlerdir. LQG/LTR, belirlenen bir Hedef Geri Besleme Döngüsünün (TFL) özelliklerini geri kazandırmak için model tabanlı bir kompensatör tasarımı gerektirirken, LQG yöntemi uygun ağırlık matrisleri ve gürültü kovaryansları seçilerek aynı sonuca doğrudan ulaşılabilir. Çalışmada, LQG'nin iki aşamalı LQG/LTR yöntemine kıyasla daha doğrudan ve anlaşılır bir çözüm sunduğu gösterilmiştir. Kalman Filtresi ve LQR tasarımlarının kullanımı ile sistemin kararlılığı ve performans kriterleri optimize edilmektedir. Sonuç olarak, LQG metodolojisinin uygun modelleme ile karmaşık sistemler için etkin bir kontrol çözümü sağladığı ortaya konulmuştur.

Zhang et al. (2010) bildirilerinde, LQG/LTR kontrol yöntemi, doğrusal çok değişkenli sistemlerin kontrolü için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım olduğunu ve özellikle uçuş kontrol sistemlerinde sağlamlık ve performans açısından önemli avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, LQG/LTR tasarımının deneme-yanılma yöntemiyle belirlenen ağırlık matrisleri nedeniyle zaman alıcı ve verimsiz olabileceğini belirtmiş ve Diferansiyel Evrim (DE) algoritmasını kullanarak bu sürecin optimize edileceğini önerilmiştir. DE tabanlı optimizasyon yöntemi, hedef geri besleme döngüsünün belirlenen performans kriterlerine uyumlu hale getirilmesini sağlayarak, sistemin hassasiyet ve sağlamlık gereksinimlerini karşılamada etkili bir yöntem olarak sunulmuştur. Esnek manipulatörler gibi dinamik model belirsizliği ve kontrol zorlukları içeren sistemlerde de LQG/LTR metodolojisinin avantajlarından yararlanmak mümkündür. Bu bağlamda, özellikle esnek manipulatörlerde modelleme hataları ve dış bozucu etkilere karşı dayanıklılığı artırmak için LQG/LTR kontrolünün uygulanabilirliği önemli bir araştırma konusu olarak değerlendirilmiştir.

Wang (2011) bildirisinde, doğrudan tahrikli döner konumlandırma sistemlerinde, özellikle belirsiz atalet yükleriyle ilgili karşılaşılan zorlukları ve çözümlerini ele almıştır. Doğrudan tahrik mekanizması kullanılan bu sistemlerde, motor yükü doğrudan sürerek mekanik boşlukları ortadan kaldırmakta ve tasarımı basitleştirmektedir. Ancak değişen koşullara bağlı olarak yük belirsizliği, sistemin performansını olumsuz etkileyebilir ve kararsızlığa neden olmuştur. Çalışmada, bu sorunu çözmek için, belirsizliklere karşı etkili bir kontrol yöntemi olarak LQG kontrol yasası önerilmiş ve Kalman Filtresi ile uyum sağlanarak sistemin durum geri beslemesi optimize edilmiştir. Ayrıca, LTR ayar yöntemi ile sistemin sağlamlığı ve dinamik performansı artırılmış ve simülasyon ile deney sonuçları, önerilen kontrol stratejisinin başarılı olduğunu göstermiştir.

Das and Halder (2014) kaynak bildiri çalışmalarında, füze duruş kontrolü için hibrit bir LQG-LTR-LQI kontrol şemasını önermişlerdir. Çalışma, LQG kontrolü LTR ve LQI kontrol yöntemleri birleştirilerek, sistemin sağlamlık ve kararlılık özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen yöntemde, optimum ağırlık matrisleri seçimi yapılarak kontrol performansı en üst düzeye çıkarılmış ve sistemin bozucu etkilere karşı direnci artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen kontrol şemasının füze sistemlerinde yüksek hassasiyetli ve kararlı bir duruş kontrolü sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, benzer şekilde esnek manipülatör sistemlerinde titreşimleri azaltmak ve sistemin dayanıklılığını artırmak için hibrit optimal kontrol yaklaşımlarının uygulanabilirliği ortaya koyulmuştur.

Kurkcı and Kasnakoglu (2015) bu bildirilerinde, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun pozisyon kontrolü için LQG/LTR yöntemini uygulamışlardır. Makalede, sistem tanımlama teknikleri kullanılarak BLDC motorunun nominal modeli elde edilmiş ve bu model üzerinden bir LQG/LTR kontrolcüsü tasarlanmıştır. Önerilen kontrolcü, model belirsizliklerine ve bozucu etkilere karşı dayanıklılığı artırmayı hedefleyerek deneysel bir platformda test edilmiştir. Gerçek zamanlı deneyler sonucunda, tasarlanan sistemin iyi bir komut takibi, bozucu etkilere karşı güçlü bir direnç ve frekans bölgesinde yüksek bir sağlamlık sergilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, LQG/LTR yönteminin karmaşık dinamik sistemlerin kontrolünde etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Vajpayee et al. (2021) bu makale çalışmalarında, basınçlı su tipi bir nükleer santralin kontrolünü iyileştirmek için LQI, LQG ve LTR yöntemlerini birleştiren yeni bir hibrit kontrol stratejisi önermişlerdir. Çalışmada kullanılan çok girişli çok çıkışlı sistem modeli 38 durum değişkeni ile karakterize edilmiş ve doğrusal hale getirilerek kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen LQGI/LTR yöntemi, süreç ve ölçüm gürültüsü varlığında sistemin kararlılığını ve dayanıklılığını artırarak referans takibini sıfır kalıcı hata ile sağlamıştır. Simülasyonlar, farklı kontrol stratejileriyle karşılaştırıldığında, LQGI/LTR tekniğinin daha iyi kararlılık ve takip performansı sunduğu gösterilmiştir. Bu yöntem, nükleer santral gibi doğrusal olmayan ve belirsizlik içeren sistemlerde güvenli ve etkin kontrol sağlamak için önemli bir alternatif olarak öne çıkarılmıştır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde doğrusal kuadratik regülatör, doğrusal kuadratik gauss ve döngü kurtarma tekniklerinin matematiksel alt yapısı verilmiştir. İlk olarak tek bağlantılı döner esnek eklem matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak, durum uzay modellenmesi yapılarak sistemin parametreleri belirlenmiştir. Üçüncü olarak yüksek lisans tezi kapsamında ele alınan kontrolcü yöntemleri üzerinde bilgiler verilerek ve sistem için tasarlanan optimal kontrol metodunun analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak tasarlanan prototip sistem hakkında bilgi verilerek önerilen kontrolcünün pratik uygulamaları sunulmuştur.

3.1. Lineer Kuadratik Regülatör Tasarım Tekniği

Bu bölümde LQR kontrol tasarım yönteminin teorik altyapısı verilmiştir.

LQR, durum darbe cevaplarının minimize edilmesini amaçlayan, doğrusal optimal durum geri beslemeli kontrol sistemidir. Çok düzenli bir sentez sürecine sahip olan LQR kontrol aynı zamanda da yüksek seviyede dayanıklı ve kararlılık düzeyine sahiptir. LQR kontrol için kullanılan doğrusal durum uzay modeli Denklem 3.1’de gösterilmektedir.

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

Burada $x(t)$ sistem durumlarını, $u(t)$ sistem girişini, $y(t)$ sistem çıkışını temsil etmektedir. LQR, Denklem 3.1’de verilen sistemin asimptotik olarak kararlılığını kontrol eden Denklem 3.2’deki performans fonksiyonunu minimize etmek için uygun olarak kontrol yasası ortaya çıkarmaktadır.

$$J_{LQR} = \int_{t_0}^t (x^T Q_{LQR} x + u^T R_{LQR} u) dt\tag{3.2}$$

Performans fonksiyonu kuadratik bir fonksiyonudur. Yaygın olarak kullanılmaktadır. En düşük hata ve minimum enerji kriterlerine dayanır. Bu denklem’ de kullanılan Q_{LQR} durum ağırlık matrisini R_{LQR} ise kontrol ağırlık matrisini temsil eder. Performans fonksiyonu çözüldüğünde Denklem 3.3’ deki kontrol kuralına ulaşılır.

$$u = -K_{LQR}x \quad (3.3)$$

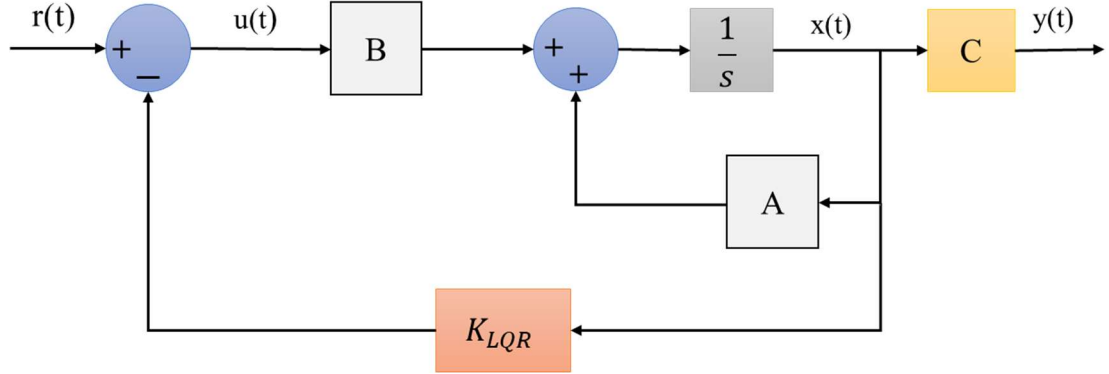
Burada u sistemin kontrol girişini olarak temsil edilir ve K_{LQR} ise durum-geri bildirim kazanç matrisini temsil eder. K_{LQR} ’ hesaplanmasında Denklem 3.4 kullanılır.

$$K_{LQR} = R^{-1}B^T P_{LQR} \quad (3.4)$$

Riccati denklemi, özellikle kontrol teorisi ve optimizasyon alanlarında önemli bir rol oynayan doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemdir. Genellikle optimal kontrol problemlerinde, sistemlerin en iyi şekilde yönetilmesi için gereken geri besleme kazançlarının hesaplanmasında kullanılır. Dolayısıyla, P_{LQR} Denklem 3.5 tanımlı Riccati denkleminin çözümünden elde edilir.

$$A^T P_{LQR} + P_{LQR} A - P_{LQR} B R^{-1} B^T P_{LQR} + Q = 0 \quad (3.5)$$

Şekil 3.1’de LQR kontrolcüsünün blok diyagramını göstermektedir. Şemada klasik olarak kullanılan geri besleme durum kazancı matrisi K_{LQR} ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1. LQR Blok diyagramı

3.2. Lineer Kuadratik Gauss Tasarım Tekniği

LQG tekniği olasılık tabanlı bozucular ve ölçüm gürültüsü içeren sistemler için optimal kontrolcü olarak kullanılmaktadır. LQG yapısı LQR kontrolcüye bir kestiricinin eklenmesi ile oluşmaktadır. Bu yapı sistem durumlarını gözlemlenebilir hale getirmektedir. LQG tasarımı gürültü etkisini de içeren durum uzay formu ile ele alınır.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) + \Lambda w_a \\ y(t) &= Cx(t) + v_a\end{aligned}\tag{3.6}$$

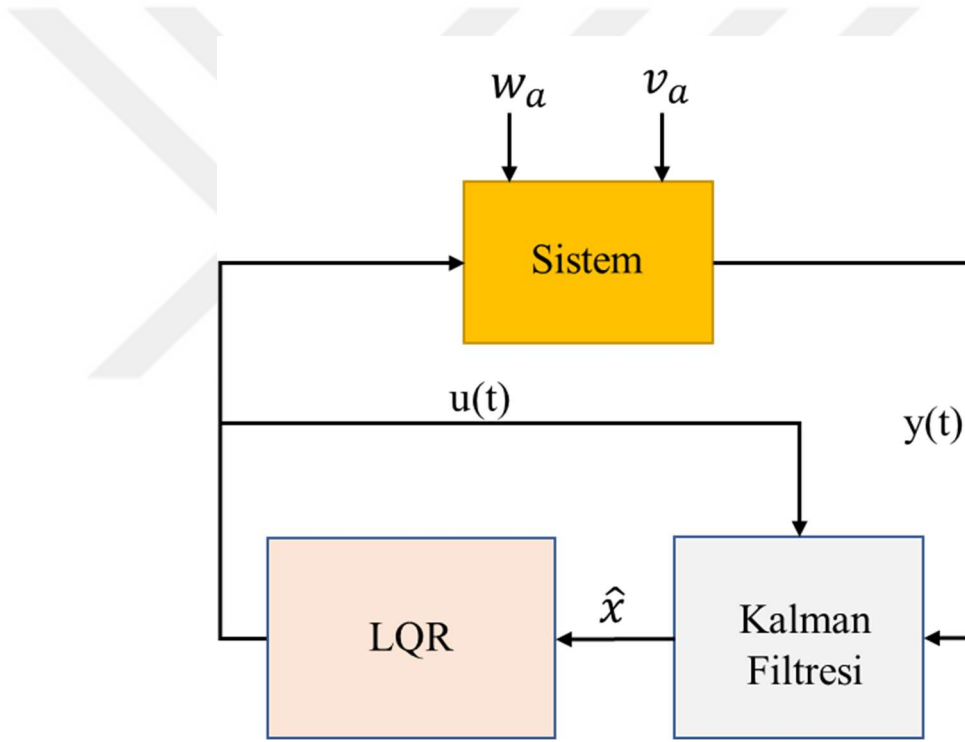
Denklem 3.6 'da w_a ve v_a sabit güç spektral yoğunlukları W , V olan ilişkisiz, sıfır ortalamalı, beyaz gürültüyü temsil etmektedir. Denklem 3.7 'de tanımlanan beklenen değerler ile güç spektral yoğunluklara bağlanır.

$$\begin{aligned}W &= E\{w_a(t)w_a^T(t)\} \\ V &= E\{v_a(t)v_a^T(t)\} \\ E\{w_a(t)v_a^T(t)\} &= 0\end{aligned}\tag{3.7}$$

Optimal çözüm için Denklem 3.8'de verilen maliyet fonksiyonunu en aza indirir.

$$J_{LQG} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \int_0^T (x^T Q_{LQG} x + u^T R_{LQG} u) dt \quad (3.8)$$

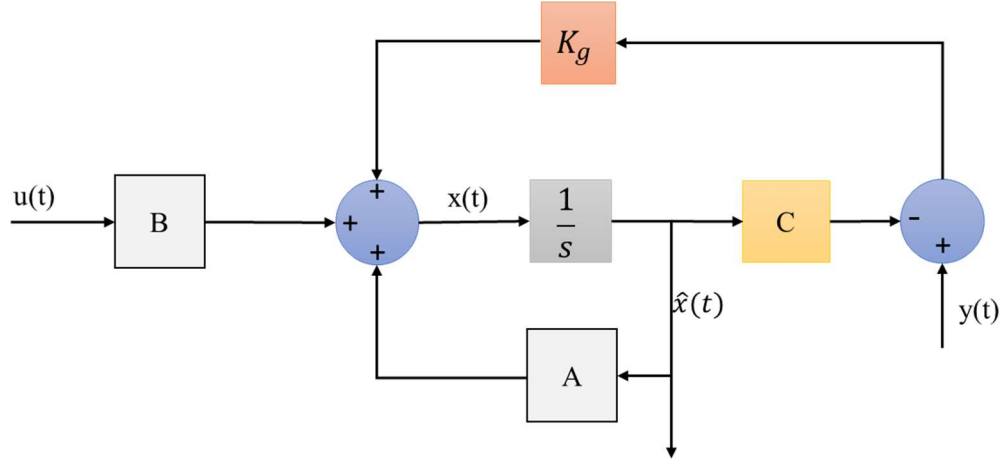
Burada $Q_{LQG} = Q_{LQG}^T \geq 0$ ve $R_{LQG} = R_{LQG}^T > 0$ ağırlık matrislerini temsil etmektedir. Q_{LQG} Sistem gürültü yoğunluğuna ve R_{LQG} ölçüm gürültü yoğunluğuna bağlıdır. Buradaki LQG problemin çözümü için Şekil 3.2’de verilen ayırma ilkesi olarak bilinen yaklaşımdan yararlanılır (Lu et al. 1998). Bu ilkeye göre, en uygun kontrol performansı, iki aşamalı bir yöntem izlenerek elde edilmektedir. İlk aşamada, sistemin gerçek durumu x ’in, beklenen hata kovaryansı $E\{(x - \hat{x})^T(x - \hat{x})\}$ en küçük olacak şekilde optimum tahminci olan $\hat{x}$ elde edilir.



Şekil 3.2. Ayırım metodu

Birinci alt problem olan durum tahmini, Kalman Filtresi teorisi ile gerçekleştirilir. Şekil 3.3’de verilen Kalman Filtresi blok diyagramı, yapısal olarak bir durum gözleyicisini olup, diğer gözleyicilerden temel farkı kazanç matrisinin olasılık temellere dayalı biçimde belirlenmesidir.

Kalman Filtresine, sistemin giriş ve çıkış vektörleri $u(t)$ ve $y(t)$ girdi olarak verilmekte, $\hat{x}$ ise sistemin durum tahmin vektörü olarak çıkış olarak elde edilmektedir. Şekil 3.3 Kalman Filtresinin yapısını göstermektedir.



Şekil 3.3. Kalman Filtresi

Denklem 3.9’da Kalman Filtresi için durum tahmin modeli gösterilmiştir. Durum tahmini $\hat{x}$ ile gösterilmektedir. Kalman kazanç matrisi K_g ile gösterilmektedir.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_g(y - C\hat{x}) \quad (3.9)$$

Denklem 3.10’da Kalman kazanç matrisinin hesaplanması için gerekli eşitlik gösterilmektedir.

$$K_g = P_{LQG}C^TV^{-1} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’daki P_{LQG} pozitif simetrik matristir ve $P_{LQG} = P_{LQG}^T \geq 0$ olarak tanımlıdır. Denklem 3.11’de verilen Riccati eşitliği çözülerek P_{LQG} bulunur.

$$P_{LQG}A^T + AP_{LQG} - P_{LQG}C^TV^{-1}CY + \Lambda W\Lambda^T = 0 \quad (3.11)$$

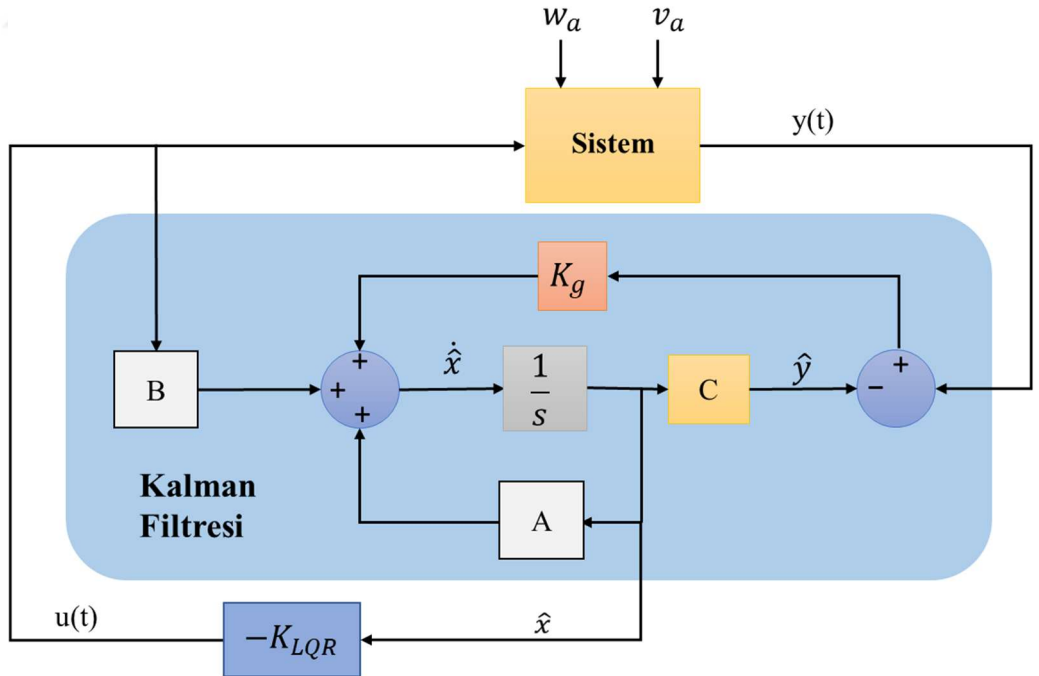
Riccati denkleminin çözümü tahmin hatasını minimum yapmaktadır. Sistem tahmin hatası denklem 3.12 ile tanımlıdır.

$$e(t) = \hat{x}(t) - x(t) \quad (3.12)$$

Kalman Filtresinin yakınsaması denklem 3.13'deki $(A - K_g C)$ 'nin öz değerlerinin negatif tanımlı olmasına bağlıdır.

$$\dot{e}(t) = (A - K_g C)e(t) \quad (3.13)$$

LQR kontrolördeki K_{LQR} ve Kalman Filtresindeki K_g kazanç mantisleri mevcut olan kapalı sistemi kararlı kılabilir. Bu sebeple LQR kontrolör ve Kalman gözleyicisi ayrı ayrı kararlı koşullarını sağlayabilmektedir.



Şekil 3.4. LQG Kontrol şeması

Şekil 3.4'de LQG kontrol yapısını gösterilmektedir. Burada LQR kontrolör ve Kalman gözleyicisi bir arada bulunmaktadır.

3.3. Döngü Transfer Kurtarma

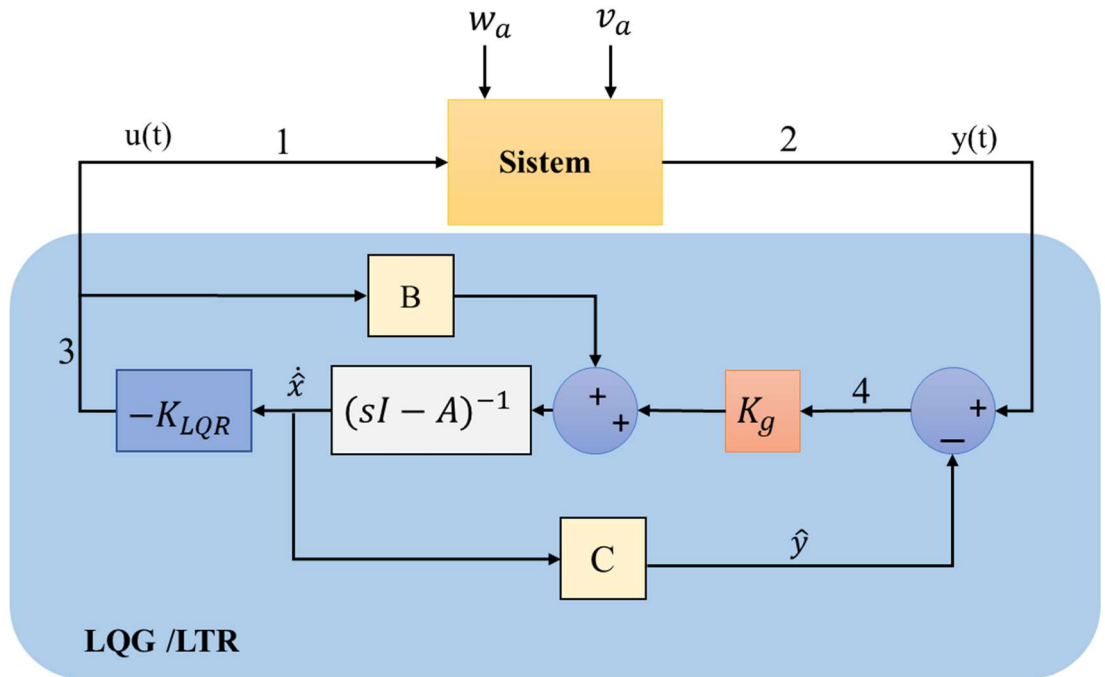
Döngü transfer kurtarma yöntemi, LQG kontrol düzenleyicilerde gözlemlenen sınırlı sağlamlığı iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. LTR tasarımının temel amacı, LQG yaklaşımıyla elde edilen açık çevrim transfer fonksiyonunu, LQR tasarımında elde edilen açık çevrim transfer fonksiyonuna asimptotik olarak yaklaştırmaktır. Bu bağlamda, gözlemleyici, Denklem 3.14'te ifade edilen açık döngü transfer fonksiyonunu kullanarak sistemin iç dinamiklerinin şekillendirilmesinde kritik bir rol oynar.

$$L_{LOG}(s) = K_{LQR}(sI - A + K_g C)^{-1} B \quad (3.14)$$

LTR ile ulaşılmak istenen transfer fonksiyonu Denklem 3.15 ile tanımlanır.

$$L_{LQR} = -K(sI - A)^{-1} B \quad (3.15)$$

Şekil 3.5 LQG/LTR yapısını göstermektedir.



Şekil 3.5. LQG/LTR Kontrol Yapısı

LTR tasarımında iki farklı yaklaşım uygulanabilir (Xu Gang & Cao Guangzhong, 2000) ; sistem çıkışından kurtarma ve sistem girişinden kurtarma.

3.3.1. Sistem Çıkışından Kurtarma

Gözlemci tasarımı sırasında durum gürültüsü artırılır ve Gözlemcinin kapalı çevrim transfer fonksiyonu, sistemin çıkış transfer fonksiyonuna yaklaşır. Özellikle çıkış gürültüsü baskınsa tercih edilir. Şekil 3.5'te verilen LQG/LTR diyagramın sistem çıkışı öncesinden ayrılırsa gözleyici transfer fonksiyonu Denklem 3.16 ile ifade edilebilir.

$$L_o = C(sI - A)^{-1}K_g \quad (3.16)$$

Bu durumda ölçüm gürültüsünün sıfıra yakınsaması durumunda V sıfıra yakınsar ve $P_{LQG}C^TV^{-1}$ sonsuza ıraksar, dolayısıyla L_o birim matrise yakınsar.

3.3.2. Sistem Girişinde Kurtarma

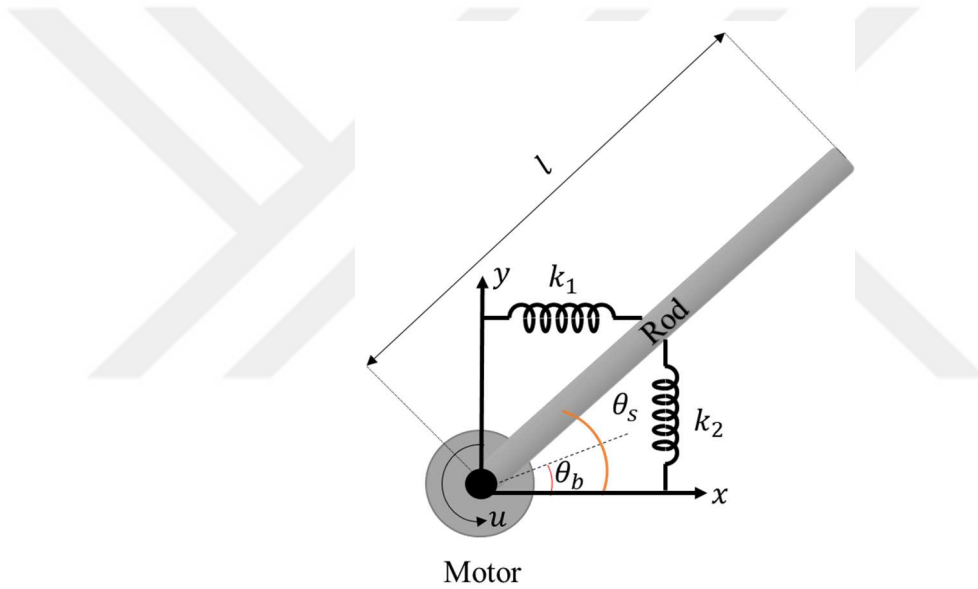
Gözlemci ve kontrolcü birlikte tasarlanır. Sistemin giriş transfer fonksiyonu korunmaya çalışılmaktadır. Sisteme dışsal girişler baskınsa kullanılır. Bu stratejiler sayesinde sistemin döngü kazanç yapısı eski haline getirilebilir ve sistem yeniden sağlam hale gelir. Bu durumda kontrolcü transfer fonksiyonu Denklem 3.17 ile tanımlanır.

$$L_c(s) = K_{LQR}(sI - A + K_gC)^{-1}K_g \quad (3.17)$$

Bu durumda ölçüm gürültüsünün sıfıra yakınsaması durumunda W sonsuza ıraksar ve $L_c(s) \approx K_{LQR}(sI - A)^{-1}C^T$ yakınsar.

3.4. Tek Eklemlı Döner Esnek Mafsal

Tek eklemlı döner esnek mafsal yapısı, iki bağımsız döner bileşen içerir. İlk döner ünite, ana aktüatör olan bir motordan ve ikinci döner bileşen, bir çubuğa bağlı bir şafttan oluşur. Şaft, motordan bağımsız olarak hareket edebilmektedir. Motor ve şaft arasındaki etkileşim iki yay tarafından sağlanır. Şekil 3.6, sistemin mekanik yapısını göstermektedir. Sistemdeki yaylar iki yönlü etkiye neden olur. Motorun dönüşü torku yay aracılığıyla çubuğa iletir ve şaftın dönme ataletinden kaynaklanan tork, yay aracılığıyla motora iletilir. Bu durumda, tek eklemlı döner esnek mafsal 'ın doğrusal zamana bağlı olmayan hareket Denklemi 3.18'de ki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tek eklemlı döner esnek mafsal mekanik modeli

$$\begin{aligned} I_s \ddot{\theta}_s + D_s \dot{\theta}_s + k_T(\theta_s - \theta_b) &= 0 \\ I_b \ddot{\theta}_b + D_b \dot{\theta}_b - k_T(\theta_s - \theta_b) &= u \end{aligned} \quad (3.18)$$

Burada θ_s şaft açısal konumunu ve θ_b motor açısal konumunu temsil eder. Analiz parametrelerini belirlerken, 30 cm uzunluğunda, 4 mm çapında bir metal çubuğun 60 mm çapında bir dış motor yüzeyine bağlandır. Şaft rulmanlar ile motor yüzeyine bağlı olduğu kabul edilmiştir. Rulmanlardan kaynaklı sürtünme ve sönümlleme etkilerinin çok küçük olduğu varsayılmıştır. Sistemin parametreleri Çizelge 3. 1'de listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Sistemin Parametreleri

Sembol	Tanım	Değer
J_s	Çubuk ataleti	0.002590 kg·m ²
J_b	Motor ataleti	0.003315 kg·m ²
D_s	Çubuk sönümleme katsayısı	0.0858 N.m/(rad/s)
k_T	Toplam Sertlik	1.5 N/m
D_b	Motor sönümleme katsayısı	0.0365 N.m/(rad/s)

3.4.1. Durum Uzay Gösterimi

Tek eklemlili esnek mafsallın durum uzay gösteriminde, sistemin dinamiklerini birinci dereceden diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Durum vektörü, motorun ve şaftın açısal hızını, konum içeren değişkenleri içermektedir. Sistem dinamikleri, durum vektörünün zamana göre türevi alınarak ifade edilmektedir. Sistemin durum değişkenleri Denklem 3.19 'da gösterilmektedir:

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta_s & x_2 &= \dot{\theta}_s \\ x_3 &= \theta_b & x_4 &= \dot{\theta}_b \end{aligned} \quad (3.19)$$

Sistem durumlarına bağlı durum denklemleri Denklem 3.20 'de tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k_T}{J_s} x_1 - \frac{D_s}{J_s} x_2 + \frac{k_T}{J_s} x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{k_T}{J_b} x_1 - \frac{D_b}{J_b} x_4 - \frac{k_T}{J_b} x_3 + \frac{1}{J_b} u \end{aligned} \quad (3.20)$$

Burada u giriş torkunu temsil etmektedir. Sistemin durum uzay formu Denklem 3.21 ile ifade edilir:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_s x + B_s u \\ y &= C_s x + D_s u\end{aligned}\tag{3.21}$$

Denklem 3.20 dikkate alındığında, A_s ve B_s matrisleri aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_T}{J_r} & -\frac{D_r}{J_r} & \frac{k_T}{J_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_T}{J_b} & 0 & -\frac{k_T}{J_b} & -\frac{D_b}{J_b} \end{bmatrix} \quad B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_b} \end{bmatrix}\tag{3.22}$$

LQR tasarımı için tüm durumların ölçülebilir ve LQG tasarımı için yalnızca şaft konumunun ölçülebilir olduğu kabul edilmiştir. Bu durum için, iki çıkış matrisi Denklem 3.23 ve 3.24’de gösterilmiştir.

$$C_{s_{LQR}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{3.23}$$

$$C_{s_{LQG}} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]\tag{3.24}$$

Sistemin gözlemlenebilirliği ve kontrol edilebilirliği Denklem 3.25 ile incelenmiştir.

$$\mathcal{N}_c = \begin{bmatrix} C_s \\ C_s A_s \\ C_s A_s^2 \\ C_s A_s^3 \end{bmatrix} \quad \mathcal{N}_o = [B_s \quad A_s B_s \quad A_s^2 B_s \quad A_s^3 B_s]\tag{3.25}$$

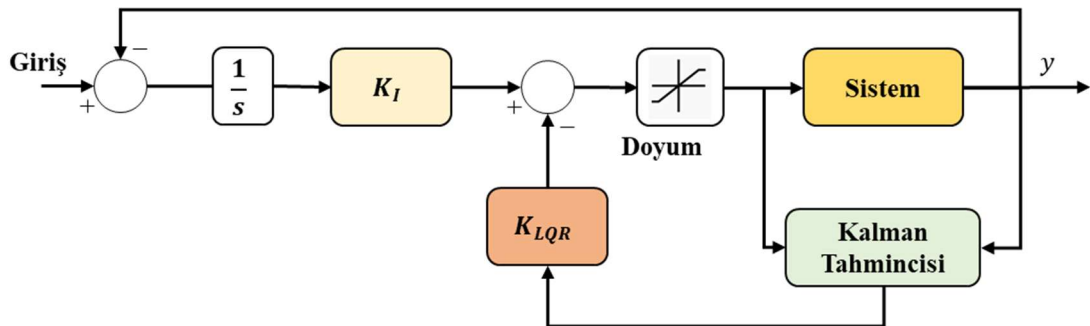
Tablo 1'deki parametreler göz önünde bulundurarak $\mathcal{N}_c$ ve $\mathcal{N}_o$ matrislerinin mertebesi (rankı) dört olarak hesaplanır. Bu nedenle, her ikisi durum için sistem tamamen gözlemlenebilir ve kontrol edilebilirdir.

3.4.2. Kontrolcü Tasarımı

Tek eklemlı döner esnek mafsals sisteminin kontrolü için LQR kontrolöre Kalman Filtresi uygulanarak LQG kontrolcü tasarlanır. Kararlı durum hatasını azaltmak için LQR kontrolüne bir integral aksiyonu eklenir. Böylece, sistemin belirlenen referans değere tam olarak ulaşması sağlanır. LTR yöntemi ise LQG kontrolcüsünün sağlamlılığını artırmak ve istenen frekans cevabını elde etmek için uygulanır. Bu şekilde, esnek manipülatör sistemleri gibi dinamik yapıların, LQG ve LTR gibi yöntemlerin sağladığı optimal kontrol stratejilerinden büyük ölçüde faydalanması sağlanır. Bu yöntemler bir arada kullanıldığında hem sistemin gürültüye duyarlılığını azaltır hem de kontrol performansını önemli ölçüde iyileştir. Sonuç olarak, LQG, LQE ve LTR yöntemleri birlikte değerlendirildiğinde, esnek manipülatör sistemlerinin kararlılığını ve performansını sınırlı ölçüm altında optimize etmek için güçlü bir kontrol stratejisi ortaya çıkarır.

3.4.3. Lineer Kuadratik Gauss Kontrolcü Tasarımı

LQG kontrolcü, optimal kontrol ile durum kestirim yapılarını birleştirir. Bu kontrol yaklaşımı, sistemin doğrusal olduğu ve süreç ile ölçüm gürültüsünün Gaussian dağılımına sahip olduğu varsayımına dayanır. LQG tasarımı iki adımlı bir süreçten oluşur. İlk olarak, LQR tasarlanır. Bunu takiben, Kalman Filtresi olarak da bilinen doğrusal bir tahmin edici oluşturulur. Sonuç olarak, Kalman ve LQR, LQG kontrol çerçevesinde birleştirilir. Şekil 3.7’de integral aksiyonlu LQG kontrolünün genel blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. İntegral aksiyonlu LQG kontrol blok diyagramı

LQG tabanlı denetleyici tasarımı bir model ve kontrol hedefi gerektirir. Bölüm 3.4.1 açıklanan model, LQG denetleyicisinin sistem modeli olarak kullanılır. Önerilen sistem için kontrol hedefleri, sabit durum hatası, geçici tepki ve kararlılık marjları açısından tanımlanır. Tek eklemli döner esnek mafsallı kontrolü için belirlenen hedefler aşağıda listelenmiştir.

- Yerleşme süresi: $< 2,5$ sn.
- Maksimum aşım: $< \%20$,
- Kalıcı durum hatası: $< \%1$,
- Faz marjı: $\approx 60^\circ$.

İntegral eylem LQG, ayırma ilkesini dikkate alarak iki bölüme ayrılabilir (Lu vd. 1998). İlk tasarım bölümü, integral eklenmiş bir modele ve bir durum geri bildirimi kontrol kazancı bulmaya odaklanır. Kontrol kazancı, düzenleme performansının maliyet fonksiyonunu en aza indirmelidir. İkinci tasarım bölümü, bozuculardan en az etkilenen Kalman Filtreli bir durum tahmincisi üretmektir.

3.4.4. İntegral Aksiyonlu Doğrusal Kuadratik Regülatör

İntegral eylemli LQR, K_{LQR} ve K_I kazançlarını belirlemeye dayanır. Bu nedenle, integrale desteklenmiş genişletilmiş bir model gerektirir. K_{LQR} ve K_I kazançlarının genişletilmiş modele ait bir maliyet fonksiyonunu en aza indirmesi beklenir.

Dolayısıyla, genişletilmiş sistem modeli Denklem 3.26 ve 3.27 ile ifade edilebilir:

$$\dot{x} = A_a x + B_a u + B_r r \quad (3.26)$$

$$y = C_a x + D_a u \quad (3.27)$$

Burada r referans girişini temsil eder. İzleme hatasını içeren yeni durum oluşur ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{e}_I = r - y \quad (3.28)$$

Dolayısıyla, genişletilmiş model Denklem 3.29 ile tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} A_a &= \begin{bmatrix} A_s & 0 \\ -C_s & 0 \end{bmatrix} & B_a &= \begin{bmatrix} B_s \\ 0 \end{bmatrix} & B_r &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ C_a &= [C_s, 0] & D_a &= [0] \end{aligned} \quad (3.29)$$

Kazanç parametrelerini bulmak için, aşağıdaki maliyet fonksiyonu en aza indirilir.

$$J_a = \int (x^T(t)Q_a x(t) + R_a u^2(t))dt \quad (3.30)$$

Burada Q_a ve R_a genişletilmiş sistemin kontrol performansını düzenlemek için kullanılan ağırlık matrislerdir ve Q_a 'da integral aksiyonu için ek bir parametre bulunmaktadır.

$$Q_a = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4, \gamma] \quad (3.31)$$

$$R_a = \alpha \quad (3.32)$$

Burada q_i durum ağırlık katsayıları ve γ integral kazanıcını düzenleyen yeni ağırlık katsayısıdır. Giriş ağırlık katsayısı tektir ve α ile gösterilir. Maliyet fonksiyonundaki optimizasyon problemini göz önünde bulundurarak, kontrol girişi Denklem 3.33 ile tanımlanabilir:

$$u(t) = -K_{LI}x(t), \quad K_{LI} = [K_{LQR} \quad K_I] \quad (3.33)$$

Burada $K_{LI} = R_a^{-1}B_a^T\Phi$ ve Φ Denklem 3.34'deki cebirsel Riccati denkleminin çözümüdür.

$$A_a^T \Phi + \Phi A_a - \Phi B_a R_a^{-1} B_a^T \Phi + Q_a = 0 \quad (3.34)$$

3.4.5. Doğrusal Kuadratik Tahmin Edici

LQE, sistemin durum değişkenlerinin doğrudan ölçülemediği ya da gürültü nedeniyle hatalı ölçüldüğü durumlarda tahmin etmek için kullanılır. Ancak, bozucular ve gürültü dikkate alınmalıdır. Çünkü LQR denetleyicisi sistem durumlarına sıkı sıkıya bağlıdır. Bozucu ve gürültü, denetleyicinin kararlılığını hızla bozabilir. Bu çalışmada, Kalman tabanlı tahmin edici dikkate alınmıştır. Kalman Filtresi, durum ve ölçüm gürültüsünü dikkate alan olasılık tabanlı bir tahmin edicidir. Kalman kestiricisi için model gürültü parametreleriyle Denklem 3.35 ile düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_s x + B_s u + w_s \\ y &= C_s x + D_s u + v_s \end{aligned} \quad (3.35)$$

Burada w_s sistem gürültüsünü ve v_s ölçüm gürültüsünü ifade eder. Tahmini durum $\hat{x}$, kullanılarak elde edilebilir. Bu durumda kestirilen durumlar Denklem 3.36 ile tanımlanabilir.

$$\dot{\hat{x}} = A_s \hat{x} + B_s u + L_f (y - C_{SLQG} \hat{x} - D_s u) \quad (3.36)$$

Burada L_f , cebirsel Riccati denklemi ile hesaplanan optimum Kalman kazanç matrisini temsil eder. Gürültü kovaryansı Denklem 3.37 ile tanımlanabilir:

$$R_n = E(v_s v_s^T), \quad Q_n = E(w_s w_s^T) \quad (3.37)$$

L_f 'yi elde etmek için Denklem 3.38 kullanılır.

$$L_f = P_f C_s^T R_n^{-1} \quad (3.38)$$

Burada P_f Denklem 3.39'daki cebirsel Riccati denklemi ile çözümüdür.

$$A_s P_f + P_f A_s^T - P_f C_s^T R_n^{-1} C_s P_f + Q_n = 0 \quad (3.39)$$

Bu durumda kestirim hata dinamikleri Denklem 3.40 ve 3.41 ile tanımlanabilir:

$$e = x - \hat{x} \quad (3.40)$$

$$\dot{e} = (A_s - L_f C_s) e \quad (3.41)$$

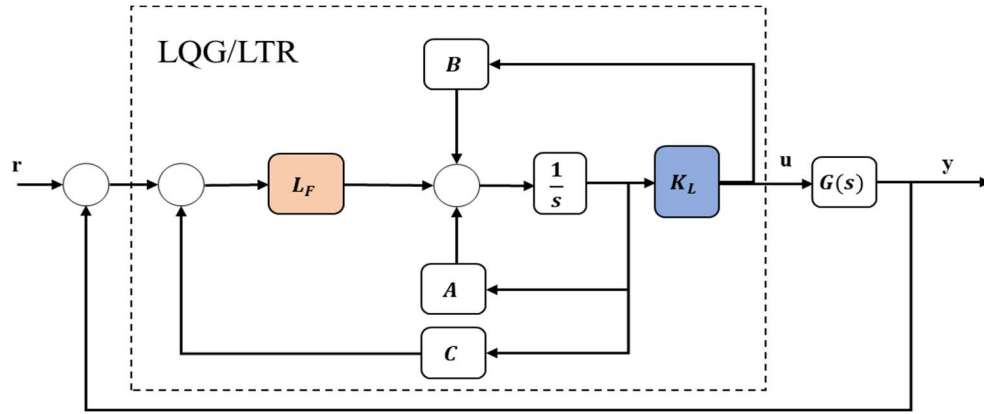
Kalman Filtresinin yakınsaması için $(A_s - L_f C_s)$ 'nin tüm öz değerleri negatif olmalıdır ($e \rightarrow 0$).

3.4.6. Döngü Transfer Kurtarma

LTR, açık çevrim sistemin belirli bir bant genişliğinde istenen kazanç ve faz özelliklerini korumasına yardımcı olur. Hem LQR hem de Kalman ayrı ayrı çok iyi sağlamlık sergileyebilir. Öte yandan, LQG'nin sağlamlık garantisi yoktur. LTR, LOG denetleyicisinin sağlamlığını iyileştirmek için sistematik bir prosedürdür. Kurtarma, sistem çıkışına veya girişine uygulanabilir. Bu çalışmada, kurtarma giriş üzerinden uygulanır. Bu yaklaşımın amacı, Kalman Filtre kazançlarını, ortaya çıkan transfer fonksiyonunun kararlılık marjlarını garanti altına alacak şekilde düzenlemektir. Ayrım ilkesi dikkate alındığında, giriş tabanlı LTR iki aşamalı olarak uygulanabilir.

LQR Tasarımı: Bu aşama, uygun Q_a ve R_a matrislerinin seçilmesini içerir. Bu matrisler, durum geri bildirimiyle dayanıklılık ve performans sağlamalıdır.

Kalman Filtre Tasarımı: Bu aşama, Kalman Filtresi kazanç matrislerinin tasarlanmasını içerir. Tasarım, hedef geri bildirim döngüsünün performans ve sağlamlık gereksinimlerini karşılamalıdır.



Şekil 3.8. LQG/LTR Yapısı

LQG/LTR'nin blok yapısı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Sistem transfer fonksiyonu Denklem 3.42 ile elde edilir:

$$G(s) = C_s(sI - A_s)^{-1}B_s \quad (3.42)$$

Dolayısıyla, çıkışta açık döngü sistemi Denklem 3.43 ile tanımlanabilir:

$$G_{ol}(s) = K_L (sI - A_s + B_s K_L + L_f C_s)^{-1} L_f C_s (sI - A_s)^{-1} B_s \quad (3.43)$$

Ve hedef geri bildirim döngüsü (TFL) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$TFL_{in} = K_L (sl - A)^{-1} B \quad (3.44)$$

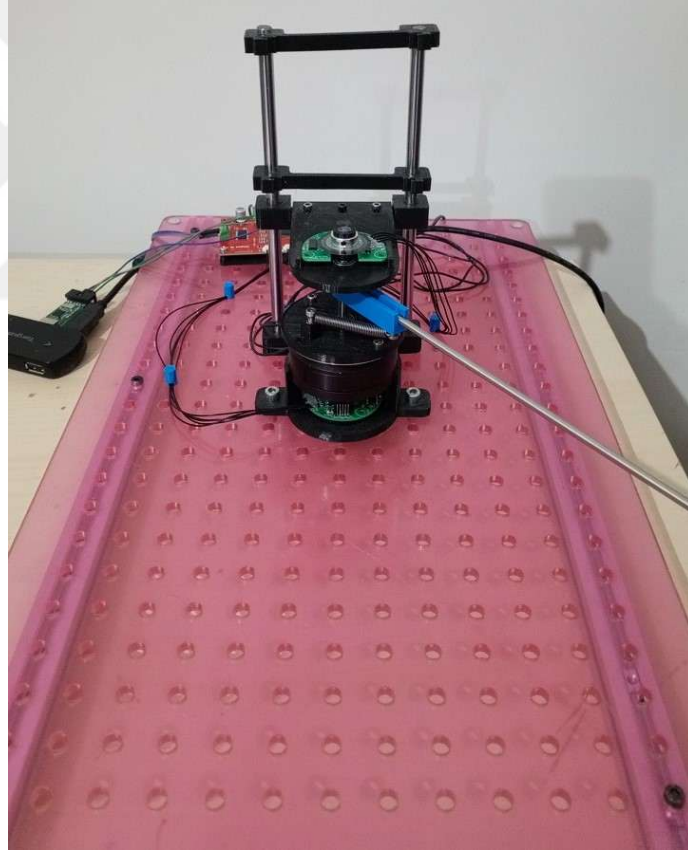
Kalman Filtre tasarımı, açık devre sistemi artan σ ile TFL'ye yakınsaması gerekir. Bu durum Denklem 3.45 ile tanımlanır.

$$M_{in}(s) = \lim_{\sigma \rightarrow \infty} G(s) = K_L(sI - A)^{-1}B \quad (3.45)$$

Burada M_{in} TFL'yi temsil eder ve σ ölçüm ağırlık matrisi $R_n = \sigma^{-1}I$ içinde tanımlıdır.

3.5. Tek Eklemlı Döner Esnek Mafsal Deneyisel Prototipi

Tek eklem döner esnek mafsal prototipi, iki bağımsız döner bileşenden oluşmaktadır: bir dış rotorlu fırçasız DC motor ve ona bağlı bir şaft. Şaft, iki rulmanla donatılmış olup, motordan bağımsız hareket edebilmektedir. Motor ile şaft arasındaki etkileşim iki yay aracılığıyla sağlanmaktadır. Sistemde iki optik kodlayıcı bulunmaktadır: biri motor dönüşünü izlemek için motorun altına, diğeri ise şaftın dönüşünü izlemek için şaftın üstüne yerleştirilmiştir. Kontrol birimi, motorun sürülmesi, kodlayıcı verilerini toplanması, kontrol algoritmalarını çalıştırılması ve harici cihazlarla iletişim kurma işlevlerini yerine getirmektedir. Şekil 3.9 tek eklemlı döner esnek mafsal yapısını göstermektedir.



Şekil 3.9. Prototip tek eklemlı döner esnek mafsal

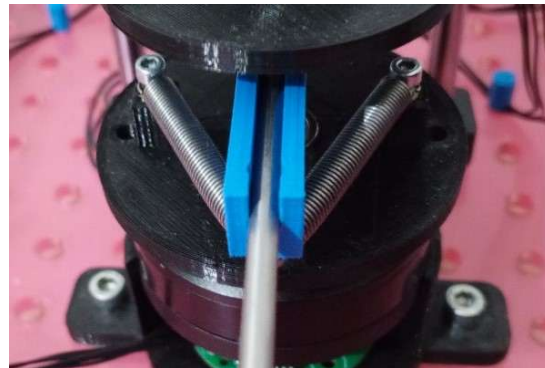
Dış rotorlu BLDC motor, esnek manipülatörün ana tahrik elemanıdır ve yüksek tork üretimiyle sağlar. Fırçasız yapısı, bakım ihtiyacını azaltırken verimliliği artırır ve motorun ömrünü uzatır. Motor, elektronik olarak kontrol edilen bir sistemle çalışarak

hassas hız ve yön kontrolü sağlar. BLDC motorlar, düşük hızda bile yüksek tork üretebilir, bu da manipülatörün esnek hareketlerini kontrollü bir şekilde gerçekleştirmesine olanak tanır. Şekil 3.10 prototip içinde kullanılan motoru göstermektedir.



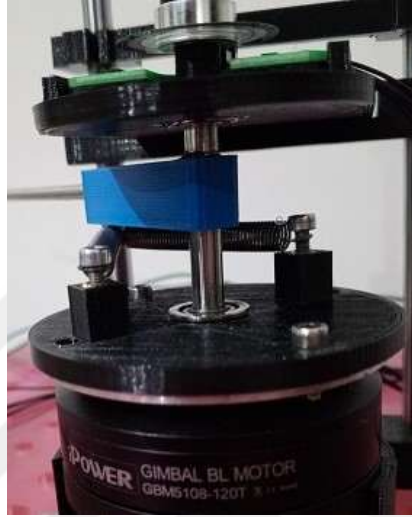
Şekil 3.10. BLDC Motor

Sistemdeki kullanılan yaylar, motor ile mil arasındaki etkileşimi sağlamak için kritik rol oynar. Yaylar, milin esnekliğini artırarak manipülatörün hareketine dinamik bir özellik katar. Ayrıca, yaylar, sistemin yanıt hızını ve doğruluğunu optimize etmek için esneklik sağlar, çünkü motorun dönme hareketini milin elastik özellikleriyle dengelemeye yardımcı olur. Bu etkileşim, prototipin dinamik modellemesinde önemli bir faktördür ve kontrol algoritmalarının başarısını doğrudan etkiler. Şekil 3.11 prototipin içimde kullanılan yayları göstermektedir.



Şekil 3.11. Yaylar

Şaft, motorun torkunu esnek manipülatöre ileten ana bileşendir ve iki rulmanla desteklenir. Bu sayede şaft, motorla bağımsız hareket edebilir ve düzgün bir dönüş sağlar. Şafta bağlı bir çubuk yaylar ile motor rotoruna bağlıdır. Şaftın tasarımı, manipülatörün hassas hareket kontrolünü doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Şekil 3.12 prototipin içimde kullanılan şaft yapısını göstermektedir.

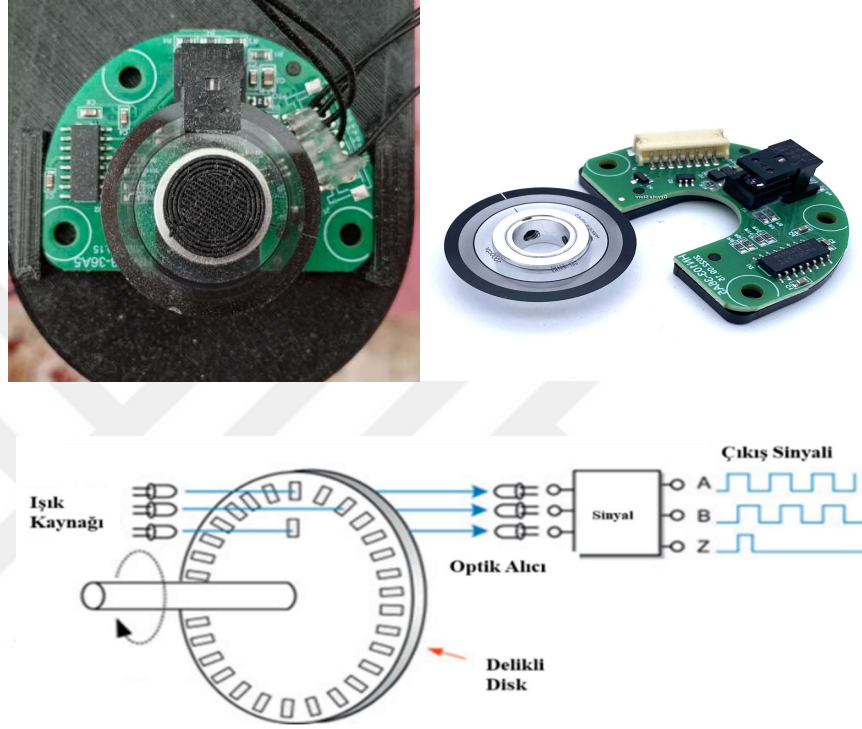


Şekil 3.12. Şaft

Rulmanlar, milin serbestçe dönmesini sağlamak için kullanılır. Sistemin hareket kabiliyetinin sağlayan temel elemanlarıdır. Esnek manipülatörlerde, özellikle milin dönme hareketini kontrol etmek için doğru rulman seçimi büyük önem taşır. İki rulman kullanılarak milin her iki ucu desteklenir, bu sayede milin hareketi daha stabil hale gelir ve sürtünme minimuma indirilir. Ayrıca rulmanlar, motorun ürettiği torku doğrudan milin her iki tarafına eşit olarak iletilmesini sağlar. Yüksek hassasiyetli rulmanlar, sistemin daha az titreşim ve daha yüksek doğrulukla çalışmasını sağlar, bu da esnek manipülatörün performansını artırır.

Optik enkoderler, motorun ve shaftın hareketlerini hassas bir şekilde ölçmek için kullanılan önemli sensörlerdir. Sistemde kullanılan enkoder, motorun dönüş hızını ve açısını ölçerek geri besleme sağlar. Şaftın hareketini izlemek için yerleştirilen ikinci enkoder, şaft hızını ve pozisyonu ölçmeyi sağlar. Tek eklemlili döner esnek mafsallarda 3 faz optik enkoderler kullanılmıştır. Bu enkoderler, dönüş hareketini sayısal sinyallere çeviren hassas konum algılama cihazlarıdır. Standart iki fazlı (A ve B kanallı) enkoderlere ek olarak üçüncü bir faz (genellikle Z veya indeks kanalı) içerirler. A ve B kanalları, 90

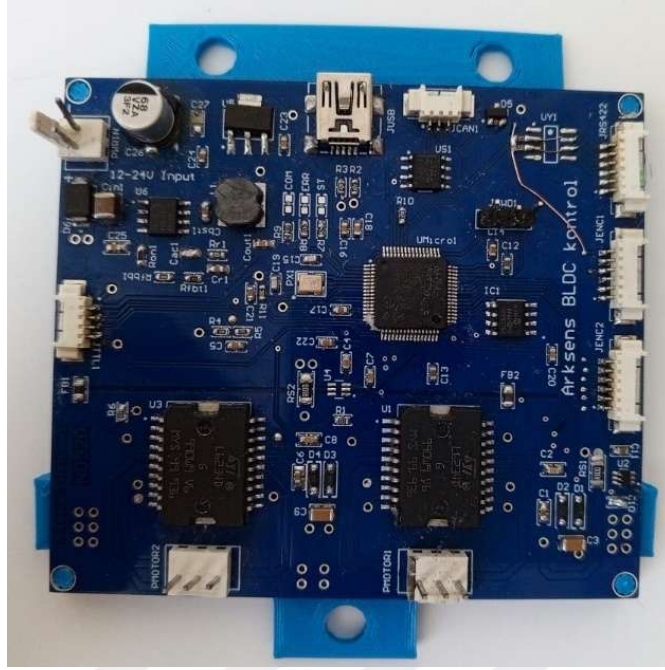
derece faz farkına sahip kare dalga sinyalleri üreterek dönüş yönü ve hız bilgisini sağlar. Z fazı ise her tam turda yalnızca bir darbe üreterek referans veya sıfırlama noktası olarak kullanılır. Bu sayede sistem, mutlak pozisyonu kolayca tanımlayabilir ve başlangıç konumunu hassas şekilde ayarlayabilir. Şekil 3.13 prototipin içinde kullanılan optik enkoder yapısını göstermektedir.



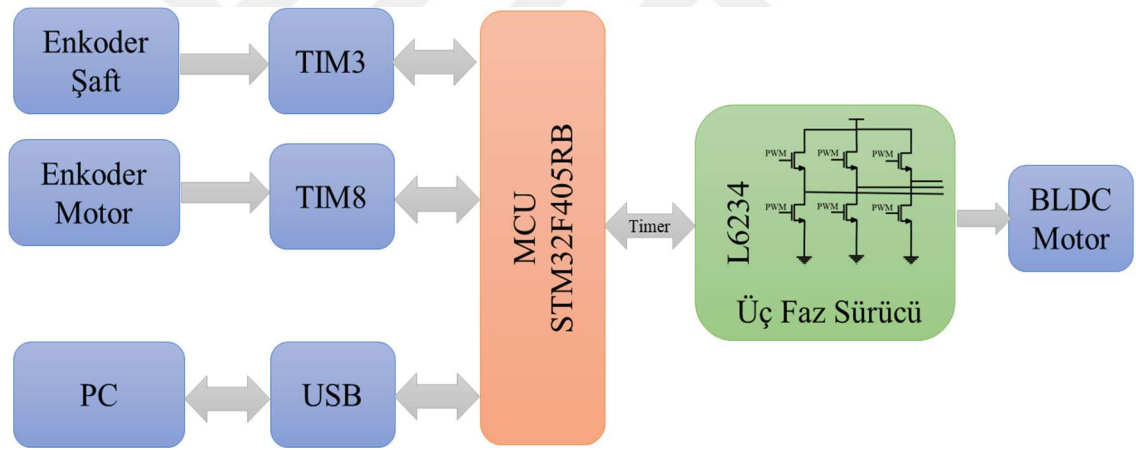
Şekil 3.13. Üç faz optik enkoder

Kontrol ünitesi, motorun sürülmesinden enkoder verilerinin toplanmasına kadar tüm kontrol süreçlerini gerçekleştiren birimdir. Bu ünite, bir mikro denetleyici kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 3.14 'de kontrol ünitesini gösterilmektedir.

Kontrol ünitesi içerisinde STM32F405RB mikro denetleyicisi ve L6234 motor sürücü bulunmaktadır. Mikrodenetleyici motor sürücüsüne komut göndererek enkoder verilerini işlemektedir. Bu ünite ayrıca harici cihazlarla iletişim kurarak sistemin dış dünyaya açılmasını sağlar, veri aktarımını USB protokollerinin kullanılarak yapmaktadır. Şekil 3.15 kontrol biriminin blok yapısını göstermektedir.



Şekil 3.14. Kontrol ünitesi



Şekil 3.15. Kontrol ünitesi yapısı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde öncelikle prototipini yaptığımız tek eklemli döner esnek mafsallın kontrolü için gerçekleştirilen Matlab/Simulink simülasyon sonuçlar paylaşılmıştır. Daha sonrasında sistem parametreleri dikkate alınarak gerçek zamanlı LQG/LTR kontrolünden elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur.

4.1. Simülasyon Çalışmaları

Matlab/Simulink programı kullanılarak tek eklemli döner mafsallın sisteminin modeli üzerinden ilk önce simülasyon ile çalışmaları yapılmıştır.

4.2. Simülasyon Sonuçları

Öncelikle LQR kazançları belirlenmiştir. K_{LQR} kazanç vektörü kullanılarak, TFL Denklem 3.44 üzerinden tanımlanmıştır. LQR-I ağırlık matrisleri aşağıdaki Denklem 4.1 ve 4.2 ile tanımlanmıştır.

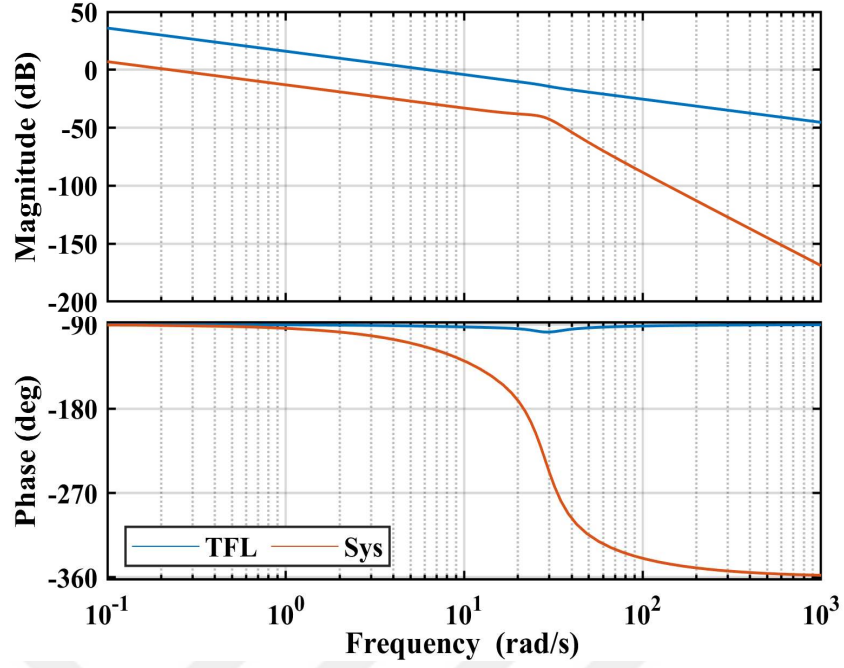
$$Q_a = \text{diag}[1,0,0,0,30] \quad (4.1)$$

$$R_a = 0.01 \quad (4.2)$$

Denklem 3.34 deki Ricatti denkleminin çözümünden Denklem 4.3 teki LQR-I geri besleme kazanç vektörü elde edilmiştir.

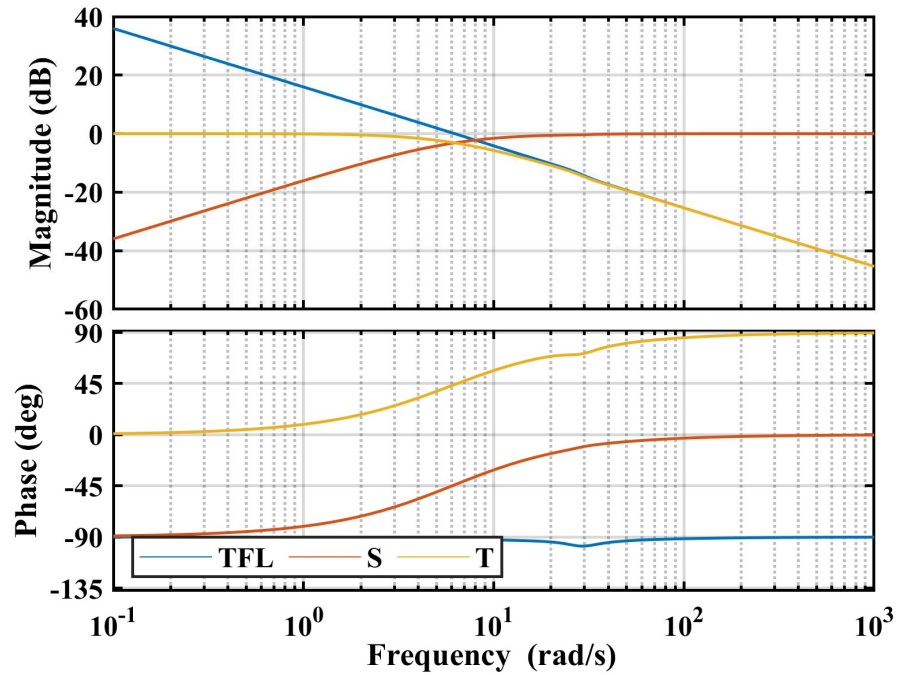
$$K_{LQR-I} = [0.1663, 0.0180, 0.3765, 0.0312, 1] \quad (4.3)$$

Sistem modeli dikkate alındığında, TFL ve açık döngü sisteminin frekans tepkisi Şekil 4.1’de görülmektedir.



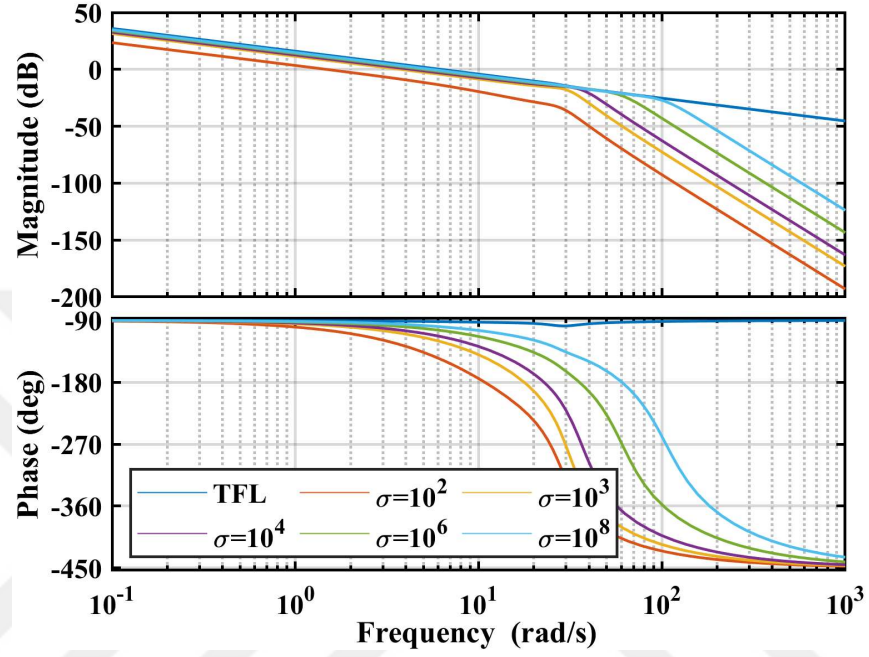
Şekil 4.1. TFL ve açık döngü sistem frekans tepkisi

LQR iyi gürültü reddi ve sağlamlık özelliğine sahiptir. Şekil 4.2, TFL'nin duyarlılığını ve tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonunu gösterir. Tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu iyi referans izleme ve gürültü reddi gösterir. Duyarlılık fonksiyonu iyi bozulma reddi gösterir.

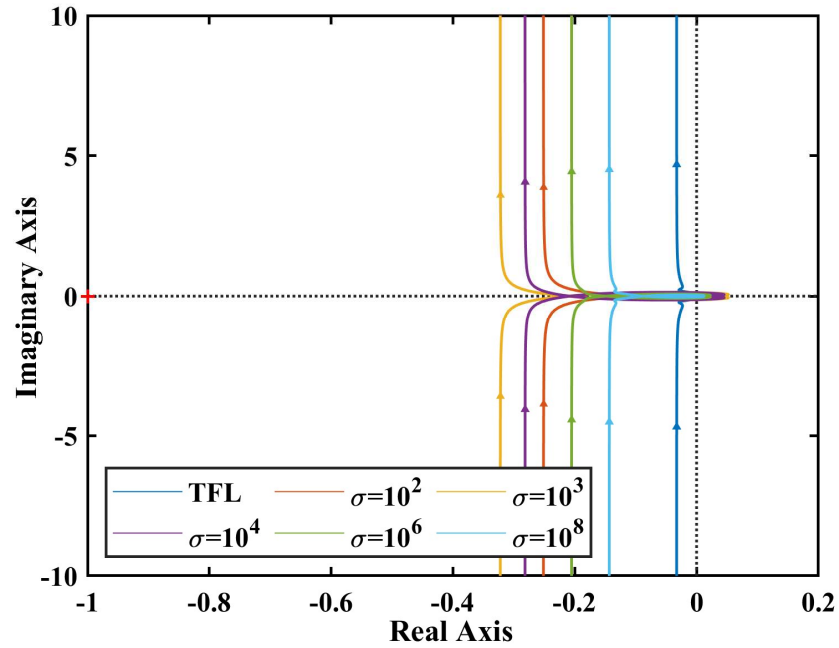


Şekil 4.2. Duyarlılık(S), tamamlayıcı duyarlılık(T) ve TFL

Bode ve Nyquist grafikleri, sistemin farklı σ değerlerindeki tepkisini analiz etmek için kullanılır. Amaç, TFL tepkisine mümkün olduğunca yaklaşımdır. Bu şekilde, sistemin tahmin koşullarıyla LQR performansına ulaşması beklenir. Şekil 4.3, kurtarma kazanımları için Bode tepkisini gösterir.

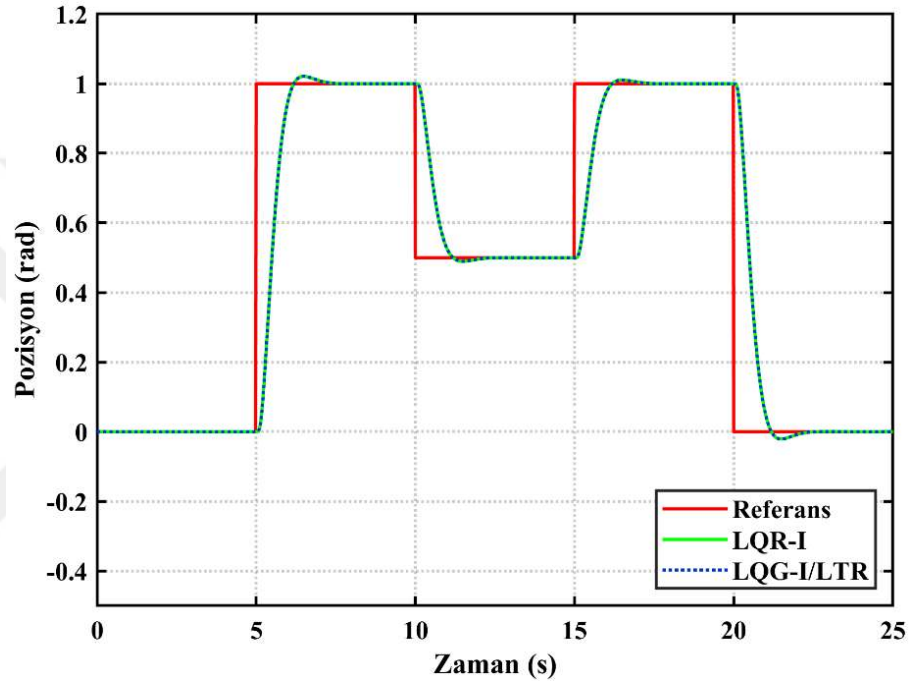


Şekil 4.3. Açık döngü sistem kazancı için Bode tepkisi



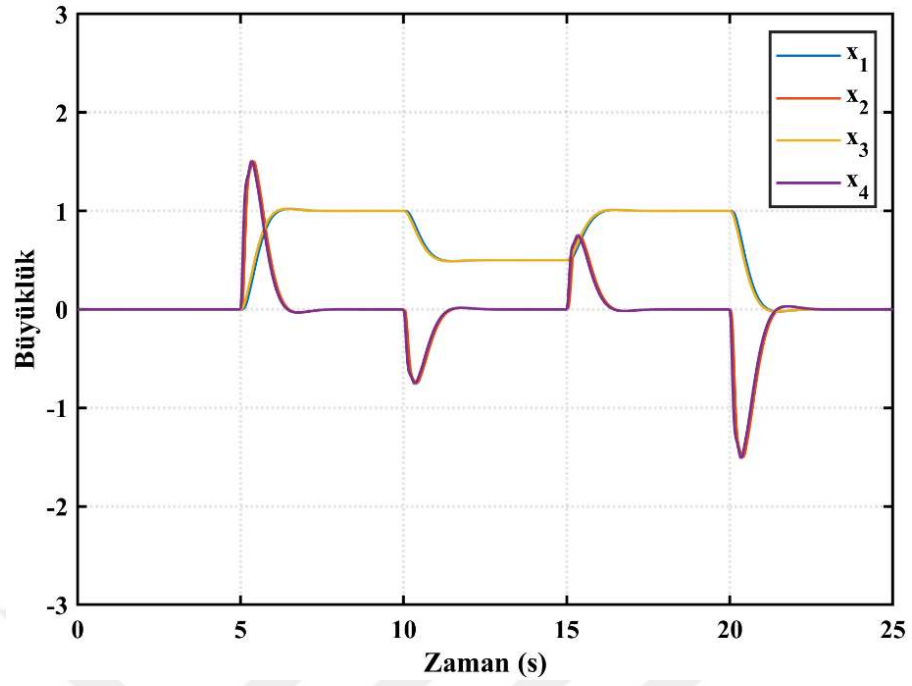
Şekil 4.4. Açık döngü sistem kazancının Nyquist çizimi

σ 'nin artmasıyla, açık döngü sisteminin daha iyi gürültü bastırma ile TFL ile karakterize edildiği görülür. Şekil 4.4, farklı kurtarma kazanımları için Nyquist grafiğini gösterir. Nyquist grafiği ayrıca, açık döngü sisteminin kazancının ve faz marjının TFL ile karakterize edildiğini gösterir. Kapalı devre sisteminin tepkisini analiz etmek için sisteme 5 saniyelik bir periyotla değişken bir giriş uygulanır. Sistemin 5. saniyedeki açıl konumu 1 radyan olarak tanımlanır ve 5 saniye sonra referans girişi 0,5 radyan olarak ayarlanır. Şekil 4.5, sistemin gürültüsüz tepkisini gösterir.



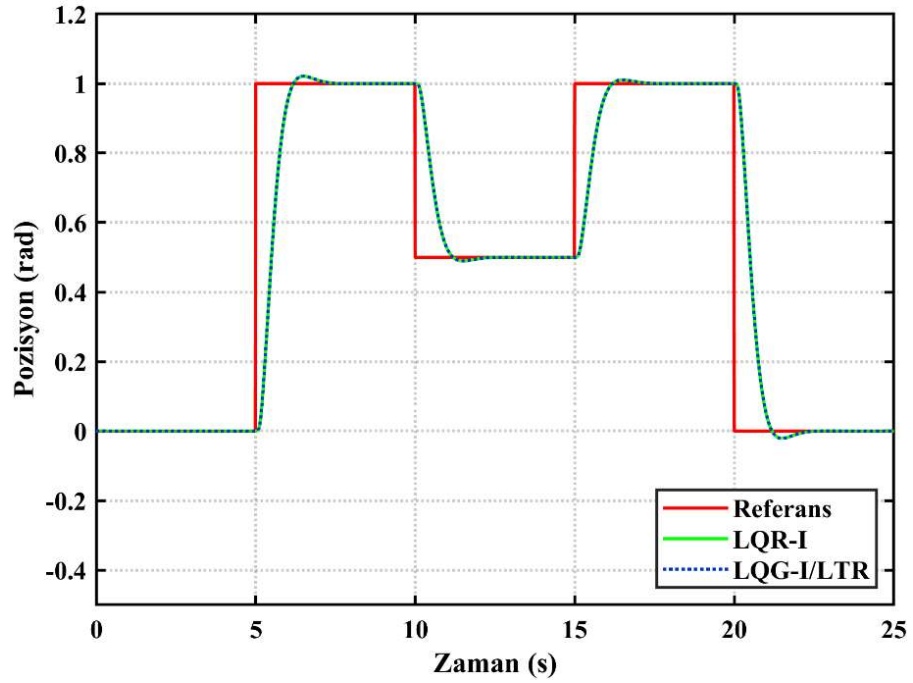
Şekil 4.5. Gürültüsüz kapalı devre sistem tepkisi

Şekil 4.5'de kırmızı çizgi referans girişi, yeşil çizgi tüm istatistiklerin ölçülebilir olduğu LQR-I yanıtını gösterir. Noktalı mavi çizgi yalnızca şaft açıl konumunun ölçülebilir olduğu LQG-I denetleyici yanıtını gösterir. Şekil 4.6, gürültü etkisi olmadan sistem durumlarının tahminini gösterir.

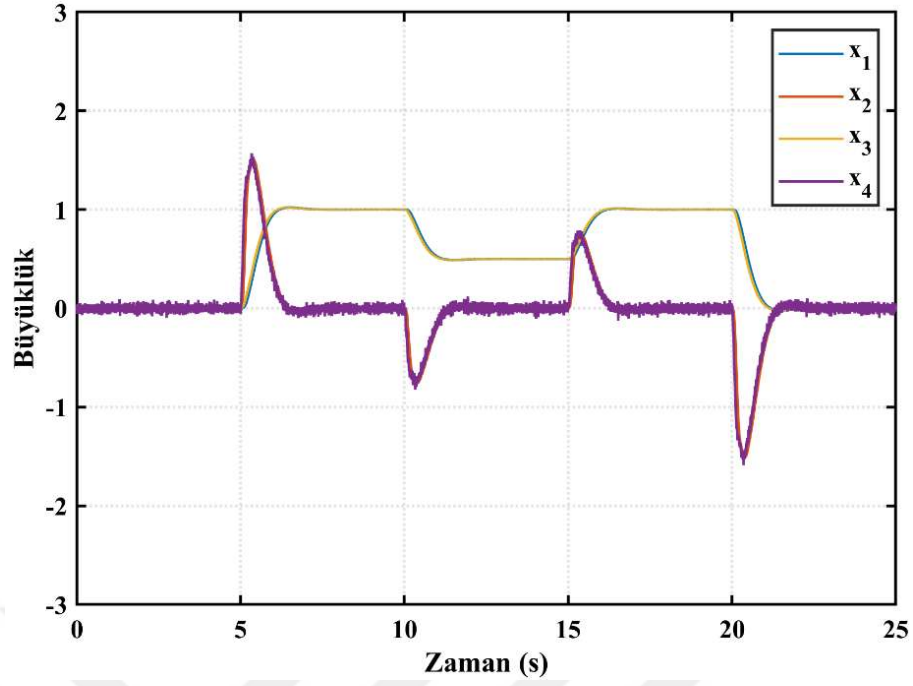


Şekil 4.6. Gürültüsüz tahmin durumlar

Öte yandan, gürültünün etkisini görmek için, tüm sistem durumlarına ve şaft konum ölçümlerine 10^{-8} gürültü gücüne sahip Gauss gürültüsü uygulanır. Şekil 4.7 ve 4.8, kapalı devre sistem tepkisini ve gürültü altındaki tahmini durumları gösterir.



Şekil 4.7. Gürültülü kapalı devre sistem tepkisi



Şekil 4.8. Gürültü altında tahmin durumlar

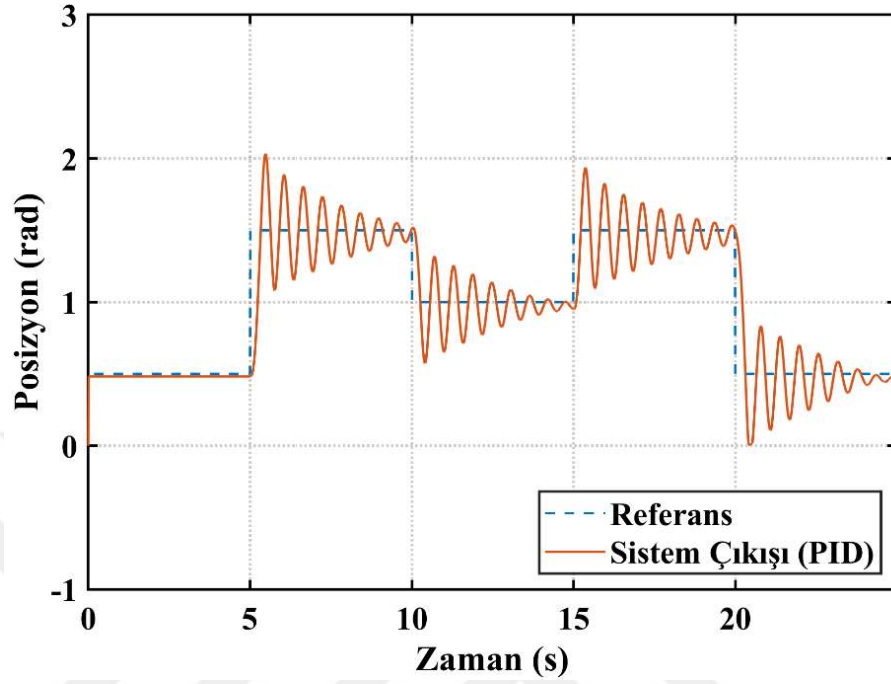
Şekil 4.5 ve 4.7 göz önünde alındığında, maksimum aşım %2,54 civarında ve yerleşme süresinin 2,5 saniyeden küçük olduğu görülmektedir. Nyquist grafikleri dikkate alındığında sistemin faz marjı 69° ulaşabilmektedir.

4.3. Deneysel Çalışmaları

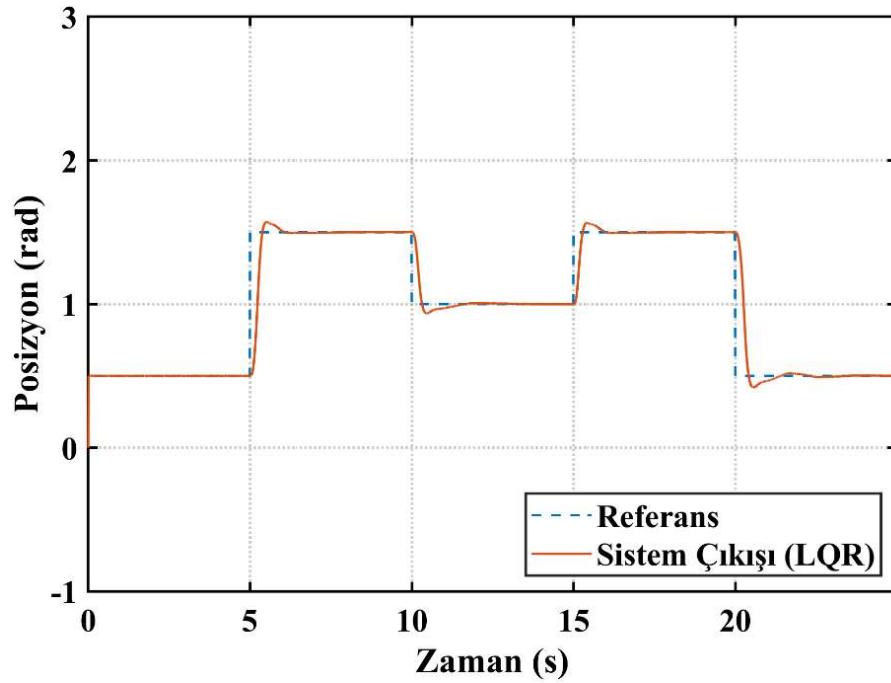
Tek eklemlili döner esnek mafsallı sisteminin tepkisini analiz etmek için simülasyon çalışmasına benzer şekilde sisteme 5 saniyelik bir periyotla değişken bir giriş uygulanır. Ancak fiziksel sistemde ekonderler 0 ve 2π aralığında çalışmaktadır. Konumsal olarak 0 radyan ve 2π ölçüm noktalarında küçük değişimler kontrolcünün hatalı çıkışlar üretmesine neden olabilmektedir. Bu durumdan kaçınmak için referans giriş 0.5 radyandan başlatılır.

Deneysel sistemde referans giriş ilk 5 saniye 0.5 radyan acısına konumlanır, sonraki 5 saniye için referans giriş 1.5 radyan olarak uygulanır, takip eden periyoda referans giriş 1 radyan çekilir ve 5 saniye sonra tekrar 1.5 radyan giriş uygulanır. Son periyoda sistem 0.5 radyana geri çekilir. Deneysel sistem PID, LQR-I ve LQG-I

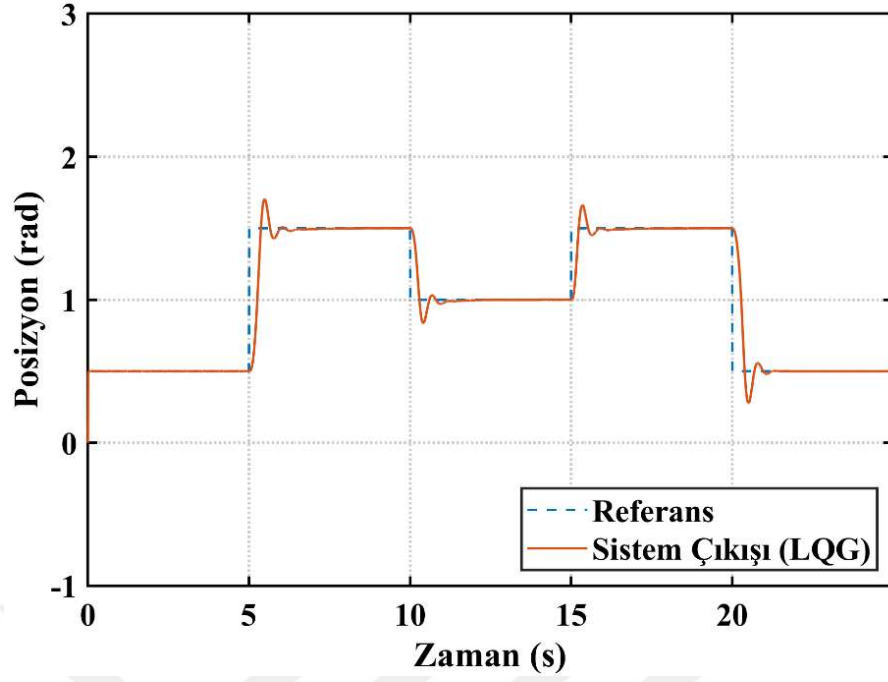
kontrolcileri ile test edilmiştir. Kontrol birimde, tüm kontrolcüler 1 kHz'lik çevrim ile çalıştırılmıştır. Sistem tepkileri 100Hz hızında PC ortamına aktarılmıştır.



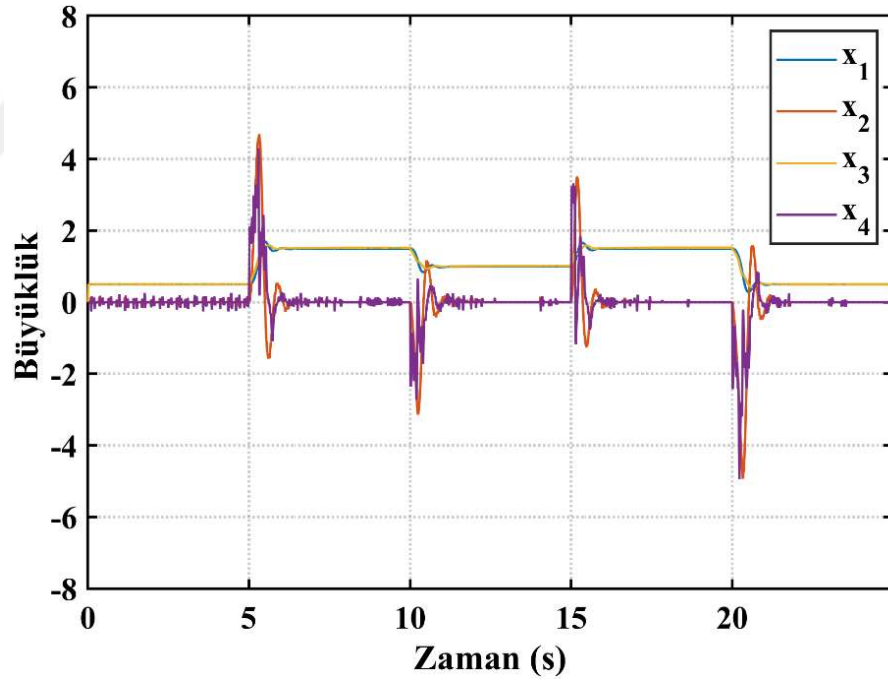
Şekil 4.9. Tek eklemlili döner esnek mafsals PID tepkisi



Şekil 4.10. Tek eklemlili döner esnek mafsals LQR-I tepkisi



Şekil 4.11. Tek eklemlı döner esnek mafsals LQG-I tepkisi



Şekil 4.12. Tek eklemlı döner esnek mafsals LQG durum kestirim tepkisi

Öncelikle geleneksel PID kontrolcü deneysel sisteme uygulanmıştır. PID parametreleri oransal katsayı 6, integral katsayısı 0,01 ve türev katsayısı 0 olarak belirlenmiştir. Bu değerler deneysel çalışmalarda elde edilen en uygun parametrelerdir. Türev parametresi şaft geri beslemesinde sistemin osilasyona girmesine neden

olmaktadır. Şekil 4.9 tek eklemlı döner esnek mafsals PID tepkisini göstermektedir. Deneysel sistem zayıf sönümlenmelidir ve rezonansa oluşturmaya yatkındır. Bu durum geleneksel PID kontrolcü ile sistemin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Şekil 4.9 dikkate alındığında, sistemin aşırı osilasyonlu tepkiler verdiği görülmektedir. Bununla beraber oturma süresinin de çok uzun olduğu görülmektedir.

Bir sonraki deneysel çalışma tüm durumların geri beslendiği LQR-I kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. LQR-I kazançları simülasyonda elde edilen kazançlar ile aynıdır ve Denklem 4.3 ile tanımlıdır.

$$K_{LQR-I} = [0.1663, 0.0180, 0.3765, 0.0312, 1] \quad (4.3)$$

LQR-I kontrol tepkisi Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Referans giriş kesikli mavi çizgi ile, şaft açısals pozisyonu turuncu çizgi ile gösterilmektedir. LQR-I kontrolcü yapısı gereği dayanaklı bir kontrolcüdür ve deneysel sistemin zayıf sönümlenen yapısı ile güçlü bir şekilde başa çıkabilmektedir. LQR-I ile deneysel sistem sınırlı bir aşım ile 2,5 saniyeden kısa bir sürede osilasyon olmadan referans girişe yerleşebilmektedir.

Son deneysel çalışma sadece şaft açısals hızının geri beslendiği, diğer durumların kestirildiği LQG-I kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. LQG kontrol yapısında Denklem 4.3'teki LQR-I kazançları yanında $\sigma = 10^6$ için LTR üzerinden elde edilen Denklem 4.4 ile tanımlı Kalman kazançları kullanılmıştır.

$$L_f = [3.7646, -1.6640, 2.5690, 2.6114] \quad (4.4)$$

LQG kontrolü altında sadece şaft açısals pozisyonun ölçülebildiği durumda, tek eklemlı döner esnek mafsalsın tepkisi Şekil 4.11'de görülmektedir. Ayrıca, kestirilen sistem durumlarının değişimi Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Şekil 4.11 dikkate alındığında, deneysel sistemin LQR-I den daha fazla aşım ve az bir osilasyonla 2,5 saniyeden kısa bir sürede referans girişe yerleşebildiği görülmektedir. Çizelge 4.1 Deneysel sisteme uygulanan kontrolcülerin karşılaştırılması verilmiştir. Bu karşılaştırmada gerçek sistemden alınan veriler MATLAB ortamında aşım, yerleşme

süresi ve kalıcı durum hatası kriterlerine göre analiz edilmiştir. Referans giriş senaryosu içerisinde en büyük aşımın gerçekleştiği bölüm karşılaştırma için referans alınmıştır.

Çizelge 4.1. Kontrolcü Karşılaştırma Tablosu

Kontrolcü	Aşım (%)	Yerleşme Süresi(s)	Kalıcı Durum Hatası (%)
PID	53,57	>5	--
LQR-I	7,34	0,92	0,27
LQG-I	19,67	0,91	0,21

PID kontrolcü 5 saniyelik periyota referans girişe yerleşemediği kabul edilmiştir. Dolayısıyla kalıcı durum hatası hesaplama dışı bırakılmıştır. LQG-I kontrolcü LQR-I kontrolcünden daha fazla bir aşımına sahip olmasına karşın, tasarım kriterlerini karşılamaktadır. Yerleşme süresinde LQG-I, LQR-I yakın bir süreye sahiptir ve tasarım kriterlerini karşılamaktadır. Kalıcı durum hatasında LQG-I tasarım kriterlerine uygun ve LQR-I yakın bir sonuç sunmaktadır. Dolayısıyla, tek eklemlili döner esnek mafsallı için LTR ile desteklenmiş LQG-I kontrolcü ile sınırlı ölçüm koşullarında LQR-I performansına yakın bir performansa ulaşılabilirliği görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışmada, tek eklemlı döner esnek mafsals için şaft titreşimlerinin sönümlenmesi ve sınırlı ölçüm durumunda LQG kontrolör uygulanması amaçlanmıştır. LQG, kontrolcünün referans girişı takibi için integral aksiyon eklenerek LQG-I kontrol yapısına dönüştürülmüştür. LQG-I tasarımında, ayırım metodu kullanılarak LQR-I ve Kalman tasarımları ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrıca LQG sağlamlılığını artırmak için sistematik bir prosedür olan LTR uygulanmıştır. Tüm tasarım aşamaları adım adım açıklanmıştır. Tek eklemlı döner esnek mafsals için bir model oluşturulmuş ve model üzerinde analizler yapılmıştır. Model üzerinde yapılan benzetim çalışmalarında, LQG-I kontrolörün performansı yalnızca bir ölçüm varlığında incelenmiştir. LQR-I performansının LQG-I/LTR ile sağlanabileceğı görülmüştür. Akabinde deneysel tek eklemlı döner esnek mafsals inşa edilmiş ve PID, LQR-I ve LQG-I kontrolör yapıları ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel sistemle elde edilen sonuçlar simülasyon çalışmaları ile tutarlı bir şekilde benzerlik göstermektedir. Esnek yapılı mafsals sistemlerinde sınırlı ölçümün alınabildiğı durumlarda LQG-I/LTR kontrolör ile LQR-I kontrolcüye yakın bir performansın elde edileceğini göstermektedir. PID kontrolcü ile yapılan karşılaştırmalı çalışmalar LQR-I ve LQG-I kontrolör yapılarının etkili sönümle yapabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, özellikle aşım azaltılması ve oturma süresinin kısaltılması için hareket profili üzerinden referans girişı sinyalinin oluşturulması hedeflenmektedir.

Bu çalışma, esnek bağlantılı sistemlerin temel özellikleri hakkında önemli katkılar sunmakta olup, tek eklemlı esnek bağlantı sistemlerinin robotik cerrahi, insansı robotlar ve uzay çalışmaları açısından potansiyeli göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlar gelecekteki araştırmalar için değerli bir kaynak oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altner, B. 2016. Esnek çubuk manipulatorlerinin modellenmesi ve kontrolü, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, 71, İstanbul.
- Baroudi, M., Saad, M. ve Ghie, W. 2009. State-feedback and Linear Quadratic regulator applied to a single-link flexible manipulator. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 19 - 23, 1381-1386, Guilin, China.
- Chacko, S. J., P. C., N. ve Abraham, R. J. 2024. Optimizing LQR controllers: A comparative study. Results in Control and Optimization, 14, 1-14.
- Chien, C.-Y., Chen, T.-C. ve Lee, Y.-L. 2008. Joint control for flexible-joint robot with input-estimation approach and LQG method. Optimal Control Applications and Methods, 29(2), 101-125.
- Choi, B.-O. ve Krishnamurthy, K. 1991. Force control of a two-link planar manipulator with one flexible link. Robotics and Autonomous Systems, 8(4), 281-289.
- Colombo, F. T. ve Da Silva, M. M. 2022. Two hybrid model-based control strategies for a flexible parallel planar manipulator. Control Engineering Practice, 127, 1-9.
- Dallali, H., Lee, J., Tsagarakis, N. G. ve Caldwell, D. G. 2015. Experimental Study on Linear State Feedback Control of Humanoid Robots with Flexible Joints. IFAC-PapersOnLine, 48(19), 130-135.
- Danh, N. C. 2022. Neural Networks Application for the Data of LQG Regulator for the Flexible Joint Robot. EAI Endorsed Transactions on Cloud Systems, 7(22), 1-7.
- Das, S. ve Halder, K. 2014. Missile attitude control via a hybrid LQG-LTR-LQI control scheme with optimum weight selection. Proceedings of the First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES), 1-02 February, 1-6, Adisaptagram, India.
- Dharavath, P. K. ve Ohri, J. 2020. Position and Vibration Control of Single link Flexible Joint Manipulator. Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA), 24-26 June 1-6, Kurukshetra, India.
- Doina, Z. M. 2012. LQG/LQR optimal control for flexible joint manipulator. Proceedings of the 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 25-27 October, 35-40, Iasi, Romania.
- Durand, S., Boisseau, B., Martinez-Molina, J. J., Marchand, N. ve Raharijaona, T. 2014. Event-based LQR with integral action. Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 16-19 September, 1-7, Barcelona, Spain.

- Eser, S. 2022. Tek Uzuflu Esnek Manipulatorün Artık Titreşimlerinin Baskılanmasında Optimizasyon Tabanlı Bir Kontrol Algoritmasının Geliştirilmesi. Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 107, Bursa.
- Huerta, F., Pizarro, D., Cobrecas, S., Rodriguez, F. J., Giron, C. ve Rodriguez, A. 2012. LQG Servo Controller for the Current Control of LCL Grid-Connected Voltage-Source Converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(11), 4272-4284.
- Ikizoglu, S. ve Gurisik, O. 2018. LQR Based Optimal Control for Single-Joint Flexible Link Robot. Proceedings of the 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), 25-27 October, 1-6, Istanbul, Turkey.
- Kim, J. S. 1994. QLQG/LTR Control for Hard Non-Linear Multivariable Systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 208(3), 177-187.
- Kosari, A., Peyrovani, M., Fakoor, M. ve Pishkenari, H. N. 2013. Design of LQG/LTR Controller for Attitude Control of Geostationary Satellite Using Reaction Wheels. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 15-18 October, 1-5 Beijing, China.
- Kurkcü, B. ve Kasnakoglu, C. 2015. LQG/LTR position control of a BLDC motor with experimental validation. Proceedings of the 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 796-800, Bursa, Turkey.
- Li, B., Li, X., Gao, H. ve Wang, F.-Y. 2024. Advances in Flexible Robotic Manipulator Systems—Part I: Overview and Dynamics Modeling Methods. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 29(2), 1100-1110.
- Lu, L.-T., Chiang, W.-L. ve Tang, J.-P. 1998. LQG/LTR Control Methodology in Active Structural Control. Journal of Engineering Mechanics, 124(4), 446-454.
- Preumont, A. 1999. Vibration Control of Active Structures. Meccanica, 34(2), 139-139.
- Razmjoooy, N., Ramezani, M. ve Namadchian, A. 2016. A New LQR Optimal Control for a Single-Link Flexible Joint Robot Manipulator Based on Grey Wolf Optimizer. Majlesi Journal of Electrical Engineering, 10(3), 53-60.
- Rojas, J. H. C., Serrezuela, R. R., López, J. A. Q. ve Perdomo, K. L. R. 2016. LQR Hybrid Approach Control of a Robotic Arm Two Degrees of Freedom. International Journal of Applied Engineering Research, 11(17), 9221-9228.
- Saldaña Enderica, C. A., Llata, J. R. ve Torre-Ferrero, C. 2024. Optimization of Q and R Matrices with Genetic Algorithms to Reduce Oscillations in a Rotary Flexible Link System. Robotics, 13(6), 1-30.

- Tahir, N. M., Hassan, S. M., Mohamed, Z. ve Ibrahim, A. G. 2017. Output Based Input Shaping For Optimal Control Of Single Link Flexible Manipulator. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 10(2), 1-20.
- Vajpayee, V., Becerra, V., Bausch, N., Deng, J., Shimjith, S. R. ve Arul, A. J. 2021. LQGI/LTR based robust control technique for a pressurized water nuclear power plant. Annals of Nuclear Energy, 15.
- Wang, X. 2011. Using LQG-LTR control law to improve the performance of direct drive rotary positioning system subject to uncertain inertia load. Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 17-20 August, 945-948, Beijing, China.
- Xu, G. ve Cao, G. 2000. On the LQG and LQG/LTR methodology. Proceedings of the 2000 International Workshop on Autonomous Decentralized System, 21-23 September, 210-213, Chengdu, China.
- Zhang, M., Sun, P., Cao, R. ve Zhu, J. 2010. LQG/LTR Flight Controller Optimal Design Based on Differential Evolution Algorithm. Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 11-12 May, 613-616, Changsha, China.