



**ENDÜSTRİYEL ROBOTİK MANİPÜLATÖRLERİN
KONTROL YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Muhammed Halid KAPLAN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Kağan Koray AYTEN**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ENDÜSTRİYEL ROBOTİK MANİPÜLATÖRLERİN KONTROL
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Muhammed Halid KAPLAN

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kağan Koray AYTEN

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

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.

07 / 02 / 2022

Muhammed Halid KAPLAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİYEL ROBOTİK MANİPÜLATÖRLERİN KONTROL YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Muhammed Halid KAPLAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kağan Koray AYTEN

Bu tez çalışmasında genel olarak robotik manipülatörlerin çeşitleri, kullanım alanları ve kontrolü üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Öncelikle, endüstride kullanılan farklı türdeki manipülatörlerin mekanik yapıları araştırılmış olup kinematik modelleri üzerinde durulmuştur. Daha sonra, geçmişten günümüze manipülatörün kontrolü için kullanılan yöntemler ve bunların birleşimiyle elde edilen hibrit denetim yöntemlerinin birçoğu incelenmiş olup özellikle titreşim bastırma ve yörünge izleme konularında manipülatörlerin performansları irdelenmiştir. Bazı geleneksel metotlar belirli özelliklerinden dolayı günümüzde diğer metotlarla birlikte kullanıldığı hibrit yöntemler manipülatör kontrolünde özellikle hatasız olmasına veya hatanın indirgenmesine ve yörünge izleme performansının artmasına yönelik oluşturulmaktadır. Bu geleneksel yöntemlerden olan kayan kipli kontrol, kesirli dereceden kontrol ve gürbüz kontrol yöntemlerinin başka denetleyicilerle birleştirilerek kullanıldığı yapılardan üçü detaylıca incelenmiş olup literatürde elde edilen deneysel sonuçları ve performansları karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte kapsamlı bir literatür taramasıyla beraber manipülatörlerin kontrolü için uygulanan yöntemlerin performans göstergeleri incelenmiş olup başarılı oldukları noktalar vurgulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca detaylı incelenen üç yöntemin karşılaştırmaları ile manipülatör kontrolünde istenen amaca yönelik başarımlar değerlendirilmiştir.

2022, 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Manipulater, Kontrol Yöntemleri, Gürbüz Kontrol, Kayan Kipli Kontrol, Kesirli Dereceden Kontrol, Yörünge İzleme

ABSTRACT

MS. Thesis

COMPARISON OF CONTROL METHODS FOR INDUSTRIAL ROBOTIC MANIPULATORS

Muhammed Halid KAPLAN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kağan Koray AYTEN

In this thesis, it is included that researches types, usage areas and control of robotic manipulators are examined and which control methods are used and also what its aim for control of manipulators. The methods which is used until now and also their hybrid types are examined and the performances of manipulators are shown, especially in vibration suppression and trajectory tracking. Some traditional methods are used with other methods because of their specific features and using at least two methods together like that is called hybrid method. Hybrid methods are especially used for increase trajectory tracking performance and reduce errors to zero. Hybrid methods of three traditional methods, which are sliding mode control, fractional order control and robust control methods, are examined in detail and their performances are compared with simulations results. In conclusion, review with comprehensive research bibliography shows the success of the methods which applied for manipulators control. In addition, comparing three methods which examined in detail, shows the pros and cons of the desired purposes in manipulator control.

2022, 95 pages

Keywords: Manipulator, Control Methods, Sliding Mode Control, Fractional Order Control, Robust Control, Trajectory Tracking

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren ve tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda desteğini esirgemeyen, tecrübelerinden yararlanırken hoşgörü ve sabrını eksik etmeyen öğrencisi olmaktan onur duyduğum değerli danışmanım Doç. Dr. Kağan Koray AYTEN'e;

Bilgi birikimi ile tezime destek olan kıymetli dostlarıma ve meslektaşlarıma;

Bugünlere gelmemde en önemli rolü üstlenen kıymetli aileme;

Teşekkürlerimi, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Muhammed Halid KAPLAN
Şubat 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Robotik Manipülatör Türleri.....	4
1.2. Robotik Manipülatörlerin Kontrolü.....	6
2. LİTERATÜR ÖZETİ	8
3. MATERYAL ve YÖNTEM	41
3.1. Bozulma Gözlemcisi Tabanlı İntegral Kayan Kipli Kontrol.....	41
3.2. Sonlu Zamanlı Kesirli Dereceden Uyarlanabilir Geri Adımlı Hata Toleraanslı Kontrol.....	47
3.3. EID Tabanlı Gürbüz Kontrol.....	54
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	68
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ACTC	Uyarlanabilir Hesaplanmış Tork Kontrolü
AF	Hızlanma Geri Besleme
ANN	Yapay Sinir Ağları
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
DAF	Dinamik AF
DFSB	Doğrudan Geri Besleme
DO	Bozulma Gözlemcisi
DOF	Serbestlik Derecesi
DSF	Doğrudan Gerilim Geri Besleme
EID	Eşdeğer Giriş Bozulması
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FJM	Esnek Eklemlerli Manipülatör
FL	Geribesleme Doğrusallaştırma
FLC	Bulanık Mantık Kontrolü
FLM	Esnek Bağlantılı Manipülatör
GAS	Global Asimptotik Kararlılığı
GFTS	Global Sonlu Zaman Kararlılığı
GPI	Genelleştirilmiş Orantılı İntegral
GWO	Grey Wolf Optimizasyonu
ILC	Yinemeli Öğrenme Kontrolü
IRC	İntegral Rezonans Kontrolü
LMPC	Doğrusal Model Öngörücü Kontrol
LQR	Doğrusal İkinci Dereceden Regülatör
MIMO	Çok Girişli - Çok Çıkışlı
MPC	Model Öngörücü Kontrol
MPPF	Modifiye edilmiş PPF
NPF	Negatif konum geri bildirim
PD	Orantısız Türevsel
PDI	Kısmi Diferansiyel Denklem

PD	Orantısal İntegral
PID	Orantısal İntegral Türevsel
PPF	Pozitif konum geri bildirim
PTP	Noktadan Noktaya
PZT	Piezoelektrik
RC	Tekrarlı Kontrol
RLM	Katı Bağlantılı Manipülatör
SMC	Kayan Kipli Kontrol
SPC	Tekil Pertürbasyon Yaklaşımı
WLS	En Küçük Kareler
ZV	Sıfır-Titreşim
ZVD	Sıfır-Titreşim-Türev
ZVDD	Sıfır-Titreşim-Türevi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Esnek eklem manipülatörünün elektriksel blok şeması.....	41
Şekil 3.2. a) USLFJM'nin fiziksel yapısı b) USLFJM'nin esnek bağlantı uzay modeli	55
Şekil 3.3. EID tabanlı kontrol sisteminin yapı şeması	67
Şekil 4.1. SMC esnek eklem manipülatörünün istenen yörünge takibi	68
Şekil 4.2. Integral SMC esnek eklem manipülatörünün istenen yörünge takibi.....	69
Şekil 4.3. DO tabanlı SMC esnek eklem manipülatörünün istenen yörünge takibi	69
Şekil 4.4. Gerçek ve tahmini bozulmanın profili.....	70
Şekil 4.5. Kontrol stratejilerinin performans karşılaştırması.....	70
Şekil 4.6. Normal çalışmada izleme konumları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.....	72
Şekil 4.7. Normal çalışmada izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.....	73
Şekil 4.8. Aktüatör hatası 1'in etkisi altında izleme konumları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3	74
Şekil 4.9. Aktüatör hatası 1'in etkisi altında izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3	74
Şekil 4.10. Aktüatör hatası 2'in etkisi altında izleme konumları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3	75
Şekil 4.11. Aktüatör hatası 2'in etkisi altında izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3	75
Şekil 4.12. μ_1 hatasının etkisi altında kontrol girişleri: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3	76
Şekil 4.13. μ_2 hatasının etkisi altında izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3	76
Şekil 4.14. μ_2 hatası ve gürültü etkisinde FOAB-FTC performansı: (a) izleme hataları ve (b) Kontrol girişleri.....	77
Şekil 4.15. USLFJM'nin konum kontrolü. (a) Açılar (b) Açısız Hata (c) Kontrol Torku	78
Şekil 4.16. USLFJM'nin yörünge izleme kontrolü. (a) Açılar (b) Açısız Hızlar (c) Açısız Hata (d) Açısız Hız Hatası (e) Kontrol Torku.....	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sistem parametreleri ve değerleri	42
Çizelge 3.2. USLFJM'nin model parametreleri ve değişkenleri	55



1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin ve endüstrinin gelişmesiyle robotik alanındaki gelişmeler her geçen gün artmaktadır. Robot teknolojisi, insanlığın ve uygarlığın gelişiminde büyük etkilere sahiptir. Özellikle son yıllarda robotik alanındaki gelişmeler/ürünler her yerde görülmektedir ve teknolojinin gelişmesinde önemli bir gösterge olmaktadır. Robotlar insanların yaşadığı, bulunduğu her yerde insanların işini kolaylaştırmak, yardımcı olmak ve insanların tehlikeli durumlarda bulunmalarını engellemek için kullanılmaya başlanmıştır. İnsanlara yardımcı olmak için özellikle tekrarlayan ve ağır görevleri yerine getiren, bir tür varlık veya cihaz tasarlama ve inşa etme fikri eski zamanlara kadar uzanmaktadır (Gasparetto and Scalera 2019a).

Sanayi devriminden itibaren, endüstriyel ortamlarda bazı otomasyon biçimleri yer almıştır; ancak “endüstriyel robotik” kavramı 1950’lerde ortaya atılmıştır. Endüstriyel robotlar kronolojik olarak; birinci nesil (1950-1967), ikinci nesil (1968-1977), üçüncü nesil (1978-1999) ve dördüncü nesil (2000 yılından itibaren) olarak ayrılmaktadırlar. İlk nesil robotlar genelde basit yükleme/boşaltma veya basit taşıma işleri için kullanılmışlardır. Basit mekanik tasarıma sahip olan ilkel robotlar ihtiyaç duyduğu enerjiyi buhar gücüyle sağlamış olup, sonra buhar gücünün yerini elektrik enerjisi almaya başlamıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yazılım teknolojilerini kullanan, daha karmaşık otonom robotlar tasarlanmaya başlanmıştır (Gasparetto and Scalera 2019b).

Robot teknolojisi, geleneksel mühendislik sınırlarını aşan yeni bir modern teknoloji alanı olarak günümüzde her alanda kullanılmaya başlamıştır. Uygulama, imalat ve bilgi mühendisliği gibi alanlar robotik disiplininin karmaşıklığıyla başa çıkmak için ortaya atılan yeni disiplinlerdendir. Birkaç yıl içinde robotik mühendisliğinin ayrı bir mühendislik disiplini olarak tek başına yer alacağı tahmin edilmektedir (Ajwad et al. 2015).

Robotic Industries Association tarafından tanımlandığı kadarıyla robot, “çeşitli görevlerin yerine getirilmesi için programlanmış hareketler yoluyla malzeme, parça, alet veya özel cihazları hareket ettirmek için tasarlanmış yeniden programlanabilir, çok işlevli bir manipülatördür”. Robotik manipülatörler, robotun mekanik bir yapısıdır, ancak

1. GİRİŞ

bilimsel literatürde genellikle 'robot' ve 'manipülator' kelimeleri birbirinin yerine kullanılmaktadır (Craig 1986). Normalde seri şemada bağlanan döner veya öteleme eklemlili bağlantılardan oluşan bir manipülatörün üç bölümü vardır: Kol, bilek ve el. Kolun işlevi, bir nesneyi bilek yönlendirirken 3B Kartezyen uzayda belirli bir yere yerleştirmektir. Uç işlevci veya araç olarak da adlandırılan el, nesne manipülasyonu için kullanılır (Ajwad et al. 2015).

Robotik manipülatörler, endüstriyel olarak; alıp yerleştirme, kaynak yapma, boyama, malzeme taşıma gibi yaygın uygulamalara sahiptir. Manipülatörler; yüksek doğruluk, seri hareket etme, ince işleri hatasız yapabilme becerilerine sahip olmalıdırlar (Lochan and Roy 2015).

Günümüzde robotlar rehabilitasyonda, hareket yardımında, haptik/VR'da, hedef tespitinde ve izlemede, nükleer santrallerde ve çok sayıda diğer endüstriyel uygulamalarda aktif olarak kullanılmaktadır (Ajwad et al. 2015).

Endüstriyel teknolojilerin gelişimine yol açan araştırmalar sayesinde robotlar artık endüstriyel otomasyonda giderek önem kazanmaktadır. Çeşitli endüstrilerde robotların artan kullanımının nedeni, bunların esnek programlanabilirlik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Robotlar, insan gücünü azaltma ve maliyet etkinliğine ek olarak kesinlik, tekrarlanabilirlik, seri üretim ve kalite gibi katı gereksinimleri olan görevleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır (Bamdad 2013). Robotların endüstrideki tipik örnek uygulamalarının içinde kaynak, paketleme, düzenleme, kesme, boya püskürtme, taşıma ve zımparalama yer almaktadır (Baizid et al. 2015). Bu görevler, manipülatör tabanlı robotların endüstride kullanılmasını gerektirmektedir. Görevin başarılması, belirli bir sistematik modeli takip eden manipülatörün eklemlerinin tekli/çoklu yön(ler)deki hareketlerinin sonucundan kaynaklanmaktadır. Noktadan noktaya robotların aksine, esnek yörünge takibi yapan robotlar en gelişmiş olanlardır ve bunların denetimi için gelişmiş bilgisayar kontrolcülere gerektirmektedir. Kontrol değişkeni/değişkenleri; temel olarak konum, hız, kuvvet/tork veya hepsinin bir hibrit kombinasyonu şeklindedir (Ajwad et al. 2015).

1. GİRİŞ

Robotik manipülatörlerin bir çeşidi olan esnek bağlantılı manipülatörler (FLM), yüksek performans, düşük maliyetli küçük boyutlu aktüatörlerin kullanılması ve daha az enerji tüketimi gibi çeşitli üstünlüklerinden dolayı günümüzde oldukça talep görmektedir (Alandoli and Lee 2020). Ancak robotik manipülatörlerin esnek yapısı, modellemede ve kontrolde ilave zorluklara neden olmaktadır. FLM'lerin yukarıda belirtilen üstünlüklerinden dolayı, literatürde FLM'lerin modellenmesi ve kontrolüne odaklanan çalışmaların sayısında hızlı bir artış yaşanmıştır. Bu artışın sebebi, FLM'lerin tıbbi robotik alanında, uzay görevlerinde, nükleer tesislerde, savaş faaliyetlerinde ve tarım sektöründe yoğun olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ek olarak, FLM'ler, işçilere yakın operasyonlar gerçekleştirirken katı bağlantı manipülatörlerinden (RLM'ler) daha güvenli olarak kabul edilmektedir (San-Millan et al. 2015). Ayrıca, imalat sanayilerinin rekabet gücünü korumak, malzeme maliyetlerini düşürmek ve işletmelerin talebe daha yakın üretim yapmalarını sağlamak için esnek sistemler kullanılmaktadır (Neuschwandtner et al. 2013). Bununla birlikte FLM'lerin en büyük dezavantajı, mekanik yapılarından dolayı titreşim bastırma ve FLM'leri kontrol etme gibi büyük zorlukları hala bulunmaktadır (Alandoli and Lee 2020).

Ayrıca, geleneksel kontrol algoritmaları, tasarımları karmaşık uygulamalarda titreşimleri azaltmak ve FLM'leri verimli bir şekilde kontrol etmek için hala yeterli olmamaktadır (Akyuz et al. 2011a). FLM'lerin bağlantılarının esnekliği nedeniyle, dinamik modelleri RLM'lere oranla çok daha karmaşık olmaktadır. Bu karmaşık dinamik modelin bir sonucu olarak, kontrolörlerin tasarımında ve uygulanmasında çeşitli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca esneklik, sistem performanslarını olumsuz etkileyen istenmeyen titreşimlere yol açmaktadır (Fareh et al. 2015). RLM'ler için geliştirilmiş mevcut kontrol algoritmaları, FLM'ler sonsuz serbestlik derecesine (DOF) sahip olduğundan, FLM'leri kontrol etme yeteneğine sahip olamamaktadırlar. Bu nedenle, FLM'lerin denetiminin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi için özel kontrol tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. FLM'lerin karmaşık dinamikleri ve dinamik denklemlerinin doğrusal olmayan özelliğinden dolayı FLM'lerin kontrol edilmesini karmaşıktır. Bu nedenle, FLM'leri veya RLM'leri denetlemek için birçok kontrol tekniği bulunmaktadır. Ayrıca, gürbüz bir kontrol tekniği geliştirmek için sürekli bir iyileştirmenin olması ve gerçek zamanlı çalışmalar için uygulanabilir olması gerekmektedir (Alandoli and Lee 2020).

Robot teknolojileri için farklı tiplerde robot manipülatörleri araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Seri manipülatörler, gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip (redundant) manipülatörler, mobil manipülatörler, paralel manipülatörler ve kablo tahrikli manipülatörlerden oluşmaktadır. Geleneksel bir manipülatör genellikle sabit bir tabandan bir uç işlevciye uzanan motorla çalıştırılan eklemlerle birbirine bağlanan bir dizi bağlantı olarak tasarlanırken, mobil manipülatör ise genellikle bir mobil platformdan ve platforma sabitlenmiş bir manipülatörden oluşan robotik bir cihaz olarak tasarlanmaktadır (Xiao and Zhang 2014). Seri manipülatörlerden farklı olarak paralel manipülatör, tek bir platformu veya uç işlevcisini desteklemek için genellikle birkaç seri zincir kullanan mekanik bir sistemden oluşmaktadır. Kablo tahrikli manipülatörler, hareketli platformun rijit bağlantılar yerine kablolar tarafından tahrik edildiği özel paralel manipülatörlerdir (Yeo et al. 2013). Manipülatörlerin insan gücünden tasarruf etmek için kullanılması, çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak yer almasına olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak, robot manipülatörlerinin kontrolü için birçok yaklaşım önerilmiş, araştırılmış ve kullanılmıştır (Jin et al. 2018).

1.1. Robotik Manipülatör Türleri

Manipülatörler, genel olarak seri manipülatörler, paralel manipülatörler, kablo tahrikli manipülatörler ve mobil manipülatörler olmak üzere dört kategoriye ayrılabilirler. Bunun dışında gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip manipülatörler de bulunmaktadır.

Seri manipülatörler, endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan manipülatör türüdür. Açık çevrim kinematik zincire sahip olan bu tip manipülatörler, tabandan başlamak üzere belirli adet kolun mafsallar yardımıyla birleştirilmesiyle tasarlanmışlardır.

Paralel manipülatörler ise, kapalı çevrim kinematik zincire sahip olup sabit tabanları doğrusal veya dönem hareketiyle tahrik veren bacakların birbirinden bağımsız olarak hareketli platforma mafsal yardımıyla bağlanmasıyla tasarlanmaktadır. En ünlü örneklerden biri olan Stewart platformu, altı lineer aktüatör ve iki platformdan oluşmaktadır (Mohammed and Li 2016). Seri manipülatörlerle karşılaştırıldığında,

1. GİRİŞ

paralel manipülatörler daha iyi hassasiyete sahip olup kinematik yapısı değiştirilerek yeni serbestlik derecelerine sahip farklı tipte yapılar oluşturulabilmektedir. Ek olarak, paralel manipülatörler, bir seri manipülatördeki her bir eklem tarafından büyütülebilecek hatayı önleyebilmekte, böylece konumlandırma görevlerinde kendilerine daha iyi bir doğruluk sağlayabilmektedir. Ancak paralel manipülatörlerin yapısal doğası gereği, çalışma alanları seri manipülatörlere göre çok daha sınırlı olmaktadır. Ayrıca, bu manipülatörlerin daha büyük sorunu tekilliktir. Mekanik sistem kendi tekil bölgesine ya da tekil noktasına yaklaştığında, rijitlik ve hassasiyet ciddi şekilde düşer ve bu da manipülatörlerin daha kötü performans göstermesine neden olur (Zhang and Gao 2012).

Manipülatörlerin diğer bir çeşidi olan kablo tahrikli robot manipülatörlerde aktüatör olarak seri ve paralel manipülatörlerin aksine esnek yapıya sahip kablolar yardımıyla tasarlanmaktadır. Bu kablolar, birbirinden bağımsız olacak şekilde tahrik edilecek olan uç işlevciye çeşitli noktalardan bağlanarak paralel manipülatörlerde olduğu gibi farklı serbestlik derecesine sahip yapılara dönüştürülebilmektedir. Pratik olarak, kırılğan olan yükleri taşımak, engelli insanlara yardım etmek için bir dış iskelet inşa etmek, canlı yayın yapmak gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadırlar (Jin et al. 2018).

Mobil manipülatörler, hareketli bir taban üzerine entegre edilmiş robotik kollardan oluşmaktadır ve manipülatörler çok daha geniş çalışma alanlarına sahip olabilmekte ve böylece konumlandırmada daha iyi performans gösterebilmektedir. Mobil manipülatörler genellikle bir m-tekerlekli holonomik/nonholonomik mobil platform ve platform üzerine monte edilmiş bir n-DOF modüler manipülatör tarafından oluşturulmaktadır (Liu and Li 2005). Mobil manipülatörlerin pratik uygulamalarına örnekler olarak, patlayıcı görevleri, tehlikeli bölge araştırmaları ve uzay görevleri gösterilmektedir (Jin et al. 2018).

Manipülatörlerin bir diğer türü olan gereğinden çok serbestlik derecesine sahip manipülatörler, çarpışmadan kaçınma, tork veya eklemlerdeki hız gibi belirli kriterleri optimize etme gibi performansta bazı iyileştirmeler sağlayan manipülatörlerdir. Diğer manipülatörden farklı olarak, ekstra DOF bir robot manipülatör daha geniş bir aralıkta hareket edebilmekte, daha iyi el becerisine sahip olabilmekte ve ayrıca organize görevleri daha iyi yerine getirebilmektedir (Hou et al. 2010).

1.2. Robotik Manipulatörlerin Kontrolü

Manipulatörlerin arzu edilen hareketleri yerine getirebilmesi için denetim mekanizmaları üzerine literatürde çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Manipulatörler için genel olarak yüksek hızda çalışması, minimum izleme hatası, bozulmalara ve gürültülere karşı duyarsız ve işlevselliğinin çok olması istenmektedir. Ayrıca, birçok kullanım alanına sahip olmalarından dolayı, farklı kontrol yaklaşımları tasarlanmakta ve test etme ihtiyacı, bir zorunluluk ve önemli bir araştırma alanı haline gelmektedir (Kabir et al. 2019).

Manipulatörlerin kontrolü için önerilen yaklaşımlar, model tabanlı ve model tabanlı olmayan yaklaşımlar olarak iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır. Model tabanlı yaklaşımlar genellikle ileri beslemeli denetleyicilerden oluşmaktadır. Titreşimi bastırmak için sistemin fiziksel özellikleri ve titreşim etkisi tasarım aşamasında dikkatlice düşünülmelidir. Bu sistemler için genellikle geri besleme sensörlerine gerek yoktur. Bu tip kontrol sistemlerinin en önemli dezavantajı, denetleyici girişinin genellikle sistemdeki değişiklikleri dikkate almamasıdır (Dwivedy and Eberhard 2006).

Model tabanlı olmayan yaklaşımlar, model tabanlı yaklaşımlardan daha basittir ve bu nedenle uygulanmaları daha kolaydır. Bu yaklaşımlar genellikle geri beslemeli kontrole dayanmakta, sistem durumlarının tahminleri sensörlerden alınmakta ve kontrol girdisi titreşimi en aza indirecek şekilde düzenlemek için beslenmektedir. Bu tür denetleyicilerin en önemli dezavantajı, geri beslemedeki gecikmedir (Kiang et al. 2015).

Model tabanlı olmayan yaklaşımlar kendi içinde aktif tabanlı, pasif tabanlı, karma ve akıllı veya uyarlanabilir olarak 4'e ayrılmaktadır. Aktif tabanlı yaklaşımlara örnek olarak; Pozitif konum geri bildirim (PPF) veya negatif konum geri bildirim (NPF) kontrolü (Kim et al. 2010), Uç nokta ivme geri besleme kontrolü (Dyke 1996), Doğrusal hız geri besleme kontrolü (Mahmood et al. 2008), Tekrarlayan Kontrol (Kiang et al. 2015), PID (Orantısal-İntegral-Türev) Kontrolü (Borase et al. 2021), Doğrudan Gerinim Geri Besleme Kontrolü (Kiang et al. 2015), Kesirli Dereceli Kontrol (Monje et al. 2007), Tekil Pertürbasyonlar (Kiang et al. 2015), Genelleştirilmiş Orantılı İntegral (GPI)

1. GİRİŞ

Kontrolü (Becedas et al. 2007) ve İntegral Rezonans Kontrolü (IRC) (Kiang et al. 2015) sayılabilir.

Pasif tabanlı yöntem için kontrolörler basit olmakla beraber kol dinamiklerindeki değişikliklere karşı dayanıklıdır, ancak sonuçta ortaya çıkan kol hareketleri daha yavaş olmaktadır (Feliu et al. 2005).

Model tabanlı olmayan yaklaşımlardan olan karma yaklaşımlara örnek olarak; İki Döngü, İç ve Dış Döngü Kontrolü (Kiang et al. 2015) ve İki Zamanlı Ölçek Kontrolü (Bascetta and Rocco 2006) verilebilir.

Model tabanlı olmayan yaklaşımlardan akıllı veya uyarlanabilir yaklaşımlar olarak ifade edilenler ise Kayan Kipli Kontrol (Kiang et al. 2015), Gürbüz Kontrol (Cui et al. 2006), Uyarlanabilir Kontrol (Pradhan and Subudhi 2012), Yapay Sinir Ağları (ANN) tabanlı kontrol (Su and Khorasani 2001) ve Bulanık Mantık Kontrolü (Kiang et al. 2015) olarak sıralanabilir.

Model tabanlı yaklaşımlara örnek olarak ise Giriş Şekillendirme veya Komut Ön Şekillendirme (Cole and Wongratanaphisan 2011), İleri Besleme Kontrolü (Park 2004), Optimal Kontrol (Kiang et al. 2015), Doğrusal ikinci dereceden Gauss (Dong et al. 2006) ve Tahmini Kontrol (Vidyasagar 1986) verilebilir.

Bu tez çalışmasında; literatürde benzer esnek manipülatörlerin pozisyon kontrolü için yapılan model tabanlı ve model tabanlı olmayan kayan kipli kontrol, kesirli dereceden kontrol ve gürbüz kontrol yöntemlerinin başka denetleyicilerle birleştirilerek kullanıldığı hibrit yapılardan üçü detaylıca incelenmiş olup literatürde elde edilen deneysel sonuçları ve performansları karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında paralel manipülatörleri kontrol eden yöntemleri olarak izleme hatasına dayalı olarak tasarlanan, orantısal-türev (PD) ve doğrusal olmayan PD kontrolörü gibi kinematik kontrol yöntemleri gösterilebilir. Diğeri ise tam dinamik modeli dikkate alan, böylece doğrusal olmayan dinamikleri telafi edebilen, daha iyi bir performans sağlayabilen ve PD kontrolörüne, paralel manipülatörlerin model parametrelerine bağlı olan, dinamik kompazasyonlar eklenerek tasarlanan artırılmış PD ve hesaplanmış tork kontrolörü gibi dinamik kontrol yöntemleri olabilir (Shang and Cong 2013). Kinematik kontrol yöntemleri iyi bir performans verememekte ve yüksek hızlarda sistemin kararlılık garantisi bulunmamaktadır. Dinamik kontrol yöntemlerinde ise istenilen performans genel olarak doğru bir modele bağlı bulunmaktadır. Bu sebeple doğrusal olmayan sürtünmeler, bilinmeyen dinamikler ve yükteki değişimlerden dolayı doğru modeller elde etmek zorlaşmaktadır. Model belirsizliğini sınırlamak için gürbüz (robust) kontrolörler uygulanmıştır. Gürbüz kontrolör model belirsizliklerini sınırlayarak yörünge takibinin doğruluğunu iyileştirebilmekte ama iki yöntemde kullanılan PD kontrolör genel olarak yörünge bozulmalarına cevap vermekte zorlanmakta ve yüksek hızlı hareketlerden dolayı oluşan ani hızlanma ve yavaşlamadan kaynaklanan bozulmaları engelleyememektedir. PD kontrolörünün bu bozulmaları reddetme yeteneğini geliştirme amacıyla hızlanma geri besleme (AF) kontrolörü kullanılmıştır. AF kontrolörünün performansı, katı cismin dinamiğine ve konumuna, hız ve ivmenin mükemmel ölçümüne bağlıdır ama özellikle ivmenin doğru ölçümü oldukça zordur. Shang ve Cong (2013), ani hızlanma ve yavaşlamadan kaynaklanan yörünge bozukluklarına karşı AF ile dinamik kompazasyonu birleştirerek dinamik AF (DAF) kontrolörünü, her biri bir aktif ve pasif eklemden ve bağımsız 2 serbestlik açısından oluşan üç adet seri manipülatörün zincirleme birleşimiyle oluşan düzlemsel paralel manipülatör için önermişlerdir. Dinamik tanımlama için uyarıcı yörünge optimal kriterlere göre tasarlanmakta ve Sonlu Fourier serileri yardımıyla formüle edilmektedir. Ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ise üç uyarıcı yörüngeden oluşan optimal uyarıcı yörünge ile model parametre tahminleri için kullanılmaktadır. Deneysel sonuçları sağlam kontrolör ile karşılaştırdıklarında, DAF kontrolörünün lineer yörüngede hızlanma ve yavaşlama esnasında izleme hatalarının çok daha küçük

2. LİTERATÜR ÖZETİ

olduğunu, dairesel yörüngede de keskin başlangıç sebebiyle oluşan maksimum hatayı daha fazla azalttığı gözlenmektedir (Shang and Cong 2013).

Yörünge izleme konusunda ve yörünge izleme hatasını indirmek için uç konum kontrol yöntemleri de kullanılmaktadır. Esnek robotik manipülatörlerde uç konumun yanıt hızı ve doğruluğu ile artık titreşimi bastırma arasında denge oluşturan kutup yerleştirme, doğrusal ikinci dereceden gauss ve ters dinamik tabanlı kontrol gibi bazı kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Modele dayalı yaklaşımın dezavantajları, kontrol algoritmasının karmaşıklığının sistem düzeniyle artması ve kapalı döngü sistemin kararlılığının, robot yükündeki değişikliklere, model parametre belirsizliklerine ve yüksek mertebeden modellenmemiş dinamiklere duyarlı olabilmesidir. Saf model tabanlı yaklaşımların sorunlarını çözmek için önerilen kontrol türleri kontrolcü parametrelerini sistemdeki değişikliklere uyarlayan adaptif kontrol ve sistem parametrelerindeki bazı varyasyonlara karşı duyarsızlaştıran gürbüz denetleyiciler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Özellikle ikinci gruptaki sistemler karmaşık olarak tasarlanmaktadır. Alternatif sistem olarak, doğrudan geri beslemeye (DSFB) dayalı kontrol veya pasifliğe dayalı kontrol kullanılmaktadır (Feliu et al. 2014). Bu teknikler model parametre belirsizliklerine karşı sağlamdırlar. DSFB, tahrik motorunun konum kontrolü ve kolun hassas olarak konumlandırılmasını sağlamak için kullanılmıştır. Sistemin kararlılığı motorun kontrolüne ve bağlantının parametrelerine bağlıdır. DSFB yaklaşımına PD denetleyici eklenmiş ve doğrusal olmayan fonksiyona dayanan kontrol yasası önerilmiştir. Yüksüz esnek manipülatör varsayımı altında kapalı döngü sistemin asimptotik kararlılığı gösterilmiştir. Diğer sağlam denetleyiciler, esnek manipülatörün pasiflik özelliklerine dayanmaktadır. Motor torkunun girdi olarak ve tabandaki hızın çıktı olarak alındığı PI denetleyici, sistemi stabilize etmekte olup titreşim bastırma konusunda etkisi az olmaktadır ve referans yörünge takibinin çok yavaş olması gerekmektedir. Ryu et al. (2004) sistemi yörünge üretici ile tesis arasındaki enerji alışverişini karakterize eden iki portlu ağ olarak görmüşler ve bu ağ her zaman pasif tutmak ve sistemi kararlı hale getirmek amacıyla zaman domeni pasiflik yaklaşımını önermişlerdir. Bu yaklaşım sürekli durum hatasını ortadan kaldırmadığı gibi girdi sıfır olduğunda denetleyici, sistemde sönümleme yapamadığı için genel pasiflik yaklaşımlarına göre verimi düşük sönümleme yapmasına neden olur (Ryu et al. 2004). Feliu et al. (2014) PD içeren pasiflik tabanlı kontrolörü tek bağlantılı esnek manipülatör için kullanmışlardır. Eklem ve bağlantı

2. LİTERATÜR ÖZETİ

dinamiklerini ayırmak için doğrusal geri besleme kullanmışlardır. PID veya PD denetleyiciden elde edilen iç döngü ve pasif tabanlı denetimden oluşan dış döngünün iç içe geçmesi ile bir sistem oluşturmuşlardır. PD kontrol, yüksek kazançlı doğrusal geri besleme kullanarak Coulomb sürtünmesinin etkisini en aza indirmektedir. PID kontrol integral eyleminden dolayı sürekli durum hatasını ortadan kaldırmaktadır. Önerilen kontrol yöntemi kısıtlamayı, kararsızlığı, zaman yanıtı sınırlamasını ve kararlı durum hatalarını sıfıra ya da en aza indirmiştir. PID ve PD denetleyiciler karşılaştırıldığında, PID'nin tahmini referans takibinin PD'dekine benzer bir yerleşme süresine sahip olduğu, kararlı durum hatasının PID'de daha az olduğunu ve kuplaj torkunu ve artık titreşimin PID'de daha etkin bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir (Feliu et al. 2014).

Genel olarak istenmeyen titreşim problemleri esnek manipülatörlerin esnek yapılarından dolayı hareket esnasında oluşmaktadır ve oluşan titreşimlerin bastırılması için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yörünge planlama yaklaşımı, oluşan bu titreşimlerin kontrolü için kullanılan yöntemlerden biridir ve bu yöntem de bilim insanları tarafından ilgiyle araştırılmaktadır. Springer et al. 2013 yılında optimal yörünge planlaması üzerine araştırmalarda bulunmuşlar ve esnek bağlantının elastik titreşimini indirmek için minimum zaman yörüngesi kullanmışlardır (Springer et al. 2013). Bu çalışmada, doğrusal çıktı takibini sağlayabilmek için yörünge planlama yöntemi kullanılmıştır. Ancak, yörünge planlama yöntemi, ileri besleme kontrol stratejilerinden biridir. Bu yüzden çeşitli bozulmalar ve parametre varyasyonları ile daha çok uğraşmaktadır ve kalıcı titreşimler üzerinde etkisi bulunmamaktadır. İleri beslemeli kontrol sistemlerinin bu probleminden dolayı geri besleme kontrol tekniklerini kullanarak kalıcı titreşimler ve bağlantı titreşimlerini bastırmak için eklem motoru ve özellikle piezoelektrik (PZT) malzemelerden oluşan akıllı malzemeler kullanılmıştır. Eklem motoru için PD denetleyicisi ve PZT aktüatörler için doğrusal hız besleme kontrolörü kullanılarak rijit hareket kontrolü ve oluşan titreşimler bastırılmıştır. 2015 yılında Lou et al. döner eklemli ve yan yana yerleştirilmiş iki adet PZT aktüatörlü manipülatörün, eklem motor kontrolünde titreşimsiz hareketi sağlamak için yörünge planlama yaklaşımı ve daha önce kullanılan doğrusal hız geri besleme kontrolörünün birleşiminden oluşan bir sistem kullanmışlardır (Lou et al. 2015). Doğrusal hız geri besleme denetleyicisini, PZT aktüatörlerinin eklem hareketinden sonra modelleme hatalarından ve harici bozukluklardan dolayı ortaya çıkabilecek titreşimleri bastırmak için kullanmışlardır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çalışmalarında ilk eklem açısından son eklem açısına, yani noktadan noktaya (PTP) hareket eden manipülatörün problemine odaklanmışlardır. PTP hareketinin sonunda bağlantının kalan titreşimlerini en aza indiren eklem yörüngesini bulmak için yörünge planlama yaklaşımını kullanmışlardır (Lou et al. 2015). Düzgün hareketi gerçekleştirmek ve eklem yörüngesini planlamak ve karşılaştırma yapmak için doğru ve kesin olan ayrıca tasarımı ve kontrolü kolay olan beşli polinom fonksiyonunu kullanmışlardır. Düzgün bir hareket elde etmek için başlangıç açısı, açısal hız ve açısal ivme sıfır olarak ayarlanır. Bu arada, son açısal hız ve açısal ivme de sıfır olarak ayarlanır. Sadece beşli polinom yörüngesi boyunca manipülatörü döndürdükleri, optimal yörünge yaklaşımının uygulandığı ve optimal yörünge yaklaşımıyla doğrusal hız geri besleme kontrolörünün uygulandığı üç ayrı senaryo kullanmışlardır. İlk senaryoda eklem açısı ve açısal hızın deneysel sonuçları referans eğrileri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Ancak hem eklem hareketinde hem de sonrasında istenmeyen titreşimlerin tepe değeri eklem motoru 1s durduğunda bile hala devam ettiği görüşmüş ve bağlantı titreşiminin yerleşme süresi 9.5s olarak gözlemlenmiştir. İkinci senaryoda açısal yer değiştirme ve hızın arzu edilen değerlerle örtüştüğü, optimal yörüngeye karşılık gelen titreşimlerin ilk senaryoya göre oldukça az olduğu, bağlantı titreşimlerinin yerleşme süresinin 4.3s'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Üçüncü ve son senaryoda ise açısal yer değiştirme ve hızın istenilen değerlerle örtüştüğü, titreşimlerin ikinci senaryodaki yörünge planlamanın yanı sıra PZT aktüatörlerin doğrusal hız geri besleme kontrolünün titreşimi bastırmasından dolayı önemli ölçüde azaltıldığı ve bağlantı titreşimlerinin yerleşme süresinin ilk senaryoya göre yüzde 75 civarı azaldığı ve 2.3s'ye düştüğü gözlemlenmiştir (Lou et al. 2015).

İstenmeyen titreşimler esnek manipülatörlerde en çok uç işlevcide oluşmakta ve bu yüzden esnek manipülatörlerin modellenmesi ve kontrolü oldukça önemlidir. Bununla beraber, özellikle uç işlevci konum kontrolü, titreşim bastırma etkinliğinin artırılması için gereklidir. Esnek sistemler için geliştirilen kontrol yöntemleri, hassasiyet ve performans olarak sınırlamalara sahip olduğundan farklı kontrol yapıları kullanılmaktadır. H2 tekniğine dayalı optimal ve gürbüz kontrol yöntemi ile frekans alanında da ikinci dereceden performans indeksi sunulmuştur. Geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi sistemin doğrusal modlarını stabilize etmek için, Doğrusal İkinci Dereceden Regülatör (LQR) ise hız terimi için kullanmıştır. Aktüatör doygunluğundaki rijit kısım için doğrusal H_{∞} ile hibrit kontrol yöntemi kullanılmıştır (Razmjoooy et al. 2016). Huang ve Chen 2004

2. LİTERATÜR ÖZETİ

yılında, uyarlanabilir kayan kipli kontrol yöntemini uyumsuz belirsizliklere sahip esnek manipülatör için kullanmışlardır (Huang and Chen 2004). Aktüatör kısıtlamalarından dolayı performans düşüşü olduğu gözlemlenmiştir (Huang and Chen 2004). Ozgoli ve Taghirad 2005 yılında önceki çalışmayı geliştirmek adına H_∞ kontrolüne ek olarak H_2 denetleyicinin de eklendiği bir yöntem ile kontrolcü sinyalinin genliğini en aza indirmek için kullanmışlardır (Ozgoli and Taghirad 2005). Titreşim kontrolü için LQR ile kapalı döngü şekilli girdi yöntemi ile birlikte 5 çubuklu esnek ekleme sahip manipülatör üzerinde uygulanmıştır. Razmjoo et al. 2016 yılındaki bu çalışmalarında, Gray Wolf Optimizer (GWO) algoritmasını kullanarak optimize edilen LQR kontrol yöntemi ile tek bağlantılı esnek eklemlili manipülatörün optimal kontrolünü sağlamak üzerine çalışmışlardır (Razmjoo et al. 2016). Mirjalili et al. 2014 yılında tanıttığı GWO, gri kurtların hayatlarından ve liderlik hiyerarşisinden esinlenerek üretilmiştir (Mirjalili et al. 2014). En iyi çözüm yolunu bulmak için üretilmiş bir algoritmadır. Önerilen yöntem, yörünge yerleşme süresini nihai değerin yüzde ikisi olarak ölçülmüştür. Ayrıca önerilen yöntemin klasik LQR'a göre daha optimal hareket ettiği gözlemlenmiştir (Razmjoo et al. 2016).

Sapmaları en aza indirmek, uç işlevci konum doğruluğunu sağlamak ve oluşan titreşimleri en aza indirmek için vinçler ve bazı robotik manipülatörlerde genelde sistemin sertliği artırılarak tasarımlar yapılmaktadır. Ama düşük ağırlıklı yapılar daha yüksek çalışma hızlarına ve daha büyük iş hacmine sahiptirler. Bu nedenle, bu yapılar esnek, düşük ağırlıklı ve geniş açıklıklı olduklarından titreşim sorunları bulunmaktadır (Garcia-Perez et al. 2016). Son yıllarda, titreşim sorununu indirmek için esnek manipülatörlerin dinamikleri ve kontrolü üzerine çalışılmaktadır. Bu çalışmaların çoğu Euler-Bernoulli desteğini kullanarak tek esnek robot kollarını kontrol etmesine rağmen endüstriyel robot manipülatörlerin ve vinçlerin çoğu daha karmaşık yapıdadırlar. Bu sebeple çoğu araştırma, esnek yapıların modellenmesi ve kontrolünü, akıllı malzemeler gibi son teknolojik çözümler kullanarak dinamik performansı iyileştirmek istemişlerdir. Bu akıllı malzemeler, sensör ve aktüatörlerin bozulmaları durumunda anlık dinamik tepkileri geliştirmek için sertlik ve sönümlenme gibi fiziksel özelliklerini değiştirmelerine olanak sağlamaktadır. Hurlebaus ve Gaul çalışmalarında, PZT veya elektrostriktif malzemeler, manyeto veya elektroeolojik akışkanlar ve şekil hafızalı alaşımlar gibi akıllı malzemeleri sistem hareketinden oluşan bozulmaları düzeltmek ve titreşimleri en aza

2. LİTERATÜR ÖZETİ

indirmek ve kontrol kuvvetleri uygulamak için kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir (Hurlebaus and Gaul 2006). Preumont et al. iki PZT destek tarafından kontrol edilen uzay kafes kulesinin titreşim kontrolü için bütünleşik kuvvet geri besleme kontrol yöntemini kullanmışlardır (Preumont et al. 2008). Çerçeve (frame) yapısının oturma süresini azaltmak ve kalite verimliliğini arttırmak için PZT aktüatörlerinin sönüm ekleme ve titreşim genliklerini indirgeme özellikleri kullanılmaktadır. Geleneksel kontrol yöntemleri genelde mekanik sistemlerin esnekliğinden kaynaklanan titreşimleri harekete geçirdiğinden ve bu titreşimleri bastırmak için çok az işlem yapmaları esnek manipülatörleri uç işlevci konum takibi ve yörünge planlaması için büyük bir problemdir. Esnek manipülatörlerde stabilizasyon oluşturmak için Doğrudan Gerilim Geri Besleme (DSF) yöntemi de kullanılmıştır. Garcia-Perez et al. çalışmalarında, esnek manipülatörler veya kolların titreşim kontrolü için sistemin dinamiklerine sönümleme katsayısı eklenmesine izin veren DSF sahip PD denetleyici ve genel yapının uç pozisyonunun düzenlenmesini ve yörünge takibini iyileştirmek PPF yöntemini kullanılmışlardır (Garcia-Perez et al. 2016). Ayrıca, PZT yığın aktüatör kullanarak istenmeyen titreşimleri indirmek istemişlerdir. Konum planlaması sırasındaki titreşim büyüklüğü ve dinamik performans için deneyler yapmışlardır. Konum planlamasında ölçülen titreşimin DSF kullanıldığında yarı yarıya azaldığı gözlemlenmiştir. Esnek yapının dinamik performansında modifiye edilmiş PPF (MPPF) ile DSF birleşimi olarak iki ayrı gözlem yapılmıştır. MPPF ile DSF'nin beraber uygulandığında performansın daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar ışığında, DSF kullanımının beklenenden daha az etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Garcia-Perez et al. 2016).

Garcia-Perez et al. (2016) tarafından da kullanılan PD kontrolörü ve ayrıca PID kontrolörünün kavramsal basitliklerinden ve açık ayar prosedürlerinden dolayı hem hibrit olarak hem de ikincil kontrolör olarak manipülatör kontrolü için çokça tercih edilen kontrol yöntemlerindedirler. PID algoritmaları ile rijit robotların hareket kontrolü sağlanmıştır. Chaillet et al. 2006 yılında, dış etkenlere rağmen PID kontrollü manipülatörün sağlamlığı üzerinde çalışmışlardır (Chaillet et al. 2006). Geleneksel PID kontrolü genişletilerek vekil (proxy) tabanlı kayan kipli kontrol, manipülatörün konum kontrolü için kullanılmış ve 2013 yılında Kikuuwe, PID konum kontrolü uygulanan robotik manipülatörün stabilitesinin yeni bir kanıtını formüle etmiştir (Kikuuwe 2013). Manipülatörün yarı Global Asimptotik Kararlılığını (GAS) sağlamak için hem eklem

2. LİTERATÜR ÖZETİ

konumu hem de hız ölçüm gereksinimlerinin zayıflığını gidermek için konum hatası ve filtrelenmiş konum etrafında çift integral terimi ekleyerek PI^2D regülatörü kullanılmıştır. İlk kez, doğrusal olmayan mekanik sistemlerin kontrolünün GAS'ı sağladığını göstermek için konum hatası teriminin doğrusal integralini değiştiren bağımsız PID kontrolörü kullanılmıştır. Ayrıca, GAS'ın sağlandığını göstermek için doğrusal bir PD kontrolüne konum hatalarının integral etkisini ekleyerek basit bir PID denetleyici kullanılmış ve belirsiz kinematiğe sahip manipülatörün asimptotik ayar kontrolü için Jacobian PID kontrolü kullanılmıştır. Su et al. paralel manipülatörlerin senkronize global asimptotik hareket kontrolü için doymuş (saturated) senkronizasyon eylemini PID kontrolüne eklemiştir (Su et al. 2007). Ayrıca kolay pratik uygulama sağlamak için, basit bir çıktı geri beslemeli PID kontrolü kullanarak tek konum ölçümleriyle manipülatörün küresel asimptotik düzenlenmesini gerçekleştirmişlerdir (Su et al. 2008). Doğrusal PID kontrolörüne doğrusal olmayan orantısal ve türev terimi ekleyerek dönen ve prizmatik eklemlere sahip robotların doymuş (saturated) fonksiyon içermeyen de GAS'ı sağladığı gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar asimptotik kararlık üzerinedir ama sonlu zamanlı kararlılığı hızlı geçişli ve yüksek hassasiyetli performanslara olanak sağladığından 2013 yılında Amato et al. çalışmalarında bahsedilmiştir (Amato et al. 2013). Bu avantajlardan dolayı, PD ve yerçekimi telafi sistemiyle yerel sonlu zaman düzenlemesi sağlanmış ve Su et al. (2008) bu sisteme bir filtre ekleyerek Global Sonlu Zaman Kararlılığını (GFTS) göstermişlerdir. Bu iki çalışmada da yer çekimi bilgisinin tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden model belirsizliğinin üstesinden gelmek için, sonlu kayan kipli kontrol tekniği tabanlı gürbüz sonlu zaman düzenleme kontrol yöntemi önerilmiştir. Ayrıca alternatif olarak, Lyapunov'un kararlılık teorisi ve geometrik homojenik tekniğiyle doğrusal olmayan PID kontrolü geliştirilmiş ancak sadece yarı GFTS'yi gösterebilmiştir. Bu sebeple Su ve Zheng çalışmalarında, manipülatörün GFTS'ni sağlamak için doğrusal olmayan PID kontrolü önermişlerdir (Su and Zheng 2017). Önerilen denetleyiciye göre yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan orantısal ve türev terimi eklemiştir. Kontrol kazançlarının üzerindeki açık koşulları sağlayan GFTS'yi üretmek için Lyapunov'un kararlılık teorisini ve geometrik homojenlik tekniğini kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemin başarılı olduğunu göstermek için iki farklı karşılaştırma yapmışlardır. Birincisi, daha önce kullanılan gürbüz sonlu zamanlı terminal kayan kipli kontrol yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Her iki kontrol yöntemi de son konuma, hassas bir şekilde varmış olmakla beraber önerilen yöntemin daha hızlı geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. İki yöntemin de yüksek gürbüzlüğe sahip parametre

2. LİTERATÜR ÖZETİ

belirsizliğine sahip olduğu ve çok çeşitli parametrelerde önerilen yöntemin daha hızlı geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. İkincisi, iki yönteminde benzer yapıya sahip ve model bilgisini kullanmamasından yola çıkarak yaygın olarak kullanılan geleneksel PID denetleyicisi ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucu, önerilen kontrol yönteminin, geleneksel PID kontrol yöntemine göre daha hızlı geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu hızlı geçiş hareketi, çok büyük tork değerlerine çıkılmadan elde edilmiştir (Su and Zheng 2017).

Manipülâtör kontrolünde gürbüzlük ve kararlılığın gerekliliği kadar mekanik titreşimleri ve istenmeyen titreşimleri indirgemenin özellikle gürbüzlük ve konum kontrolü için önemi daha öncede bahsedildiği üzere oldukça fazladır. Pasif tekniklerin yeterli veya pratik olmadığı uygulamalarda mekanik titreşimleri sönmölemek veya indirgemek için akıllı yapılar veya entegre sensörlerin dahil edilmesi son zamanlarda kullanılan yöntemlerden biridir. Akıllı yapıların en yaygın sınıfı, küçük hacimleri, düşük ağırlıkları ve yapısal entegrasyon kolaylıklarından ötürü PZT aktüatörler ve sensörlerdir. Esnek yapıların kontrolü ile ilgili zorluklardan biri olan değişken rezonans frekansları, yüksek frekanslı dinamikler ve yüksek rezonanslı dinamikler ile sistemlerin istikrarsız olması riskini ifade etmektedir. Bu yapıları kontrol etmek için H₂ gürbüz kontrol tekniği, H_∞ kontrol tekniği ve doğrusal ikinci dereceden gauss kontrol tekniği kullanılmıştır (Feliu-Talegon et al. 2016). Bu tekniklerin doğrudan uygulanması, yüksek dereceli ve zayıf stabiliteye sahip sistemler oluşturmaktadır. Yayılma etkilerine karşı gürbüz yörünge takibinin kararlılığını oluşturmak için Lyapunov tabanlı kontrol kullanılmış yan yana yerleştirilmiş rezonans mekanik sistemlerin özelliklerinden yararlanan gürbüz kontrol sistemleri de kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri olan eş konumlu sistemin en kullanışlı özelliği ise frekans domeninde (Inovasyon Ortaklık Bölgesi özelliği) kutupların ve sıfırların birbirine geçmesidir yani sürekli olarak 0 ve 180 dereceler arasında uzanan faz yanıtıyla sonuçlanmasıdır (Feliu-Talegon et al. 2016). İlk olarak, PPF bu özelliği kullanan tekniklerden biridir. Mahmoodi ve Ahmadian aktif sönmö mü iyileştirmek için MPPF kullanmışlar ve ayrıca bir diğer teknik olan hız geri beslemenin tamamen sönmömsüz yapılarda bile titreşimleri kaldırabildiğini göstermişlerdir (Mahmoodi and Ahmadian 2009). Bir diğer yaklaşımda ise sistemin kontrolsüz modlarının varlığında kapalı döngü kararlılığını garantileyen rezonans kontrol yaklaşımıdır. Yan yana yerleştirilmiş rezonans sistemlerinde başarılı olmakla beraber kontrolörün yüksek geçişli yapısı sebebiyle bazı

2. LİTERATÜR ÖZETİ

uygulamalarda sistemin kararlı çalışmasını engelleyebilmektedir. Bu yaklaşıma yönelik bir gelişme entegre rezonans kontrolü daha yüksek frekanslarda yuvarlanma özelliğini korurken, sönümlemeyi önemli ölçüde arttırmaktadır. Kesirli dereceden kontrolörlerin esnek yapıların ve robotların kontrolü için gürbüzlüğü arttırdığı gözlemlenmiştir. Kesirli dereceden PD denetleyici, esnek uzay aracının durum kontrolü için kullanılmış ve düzlemsel iki serbestlik dereceli esnek robot kontrolü için orantılı terime kesirli dereceden türev terimi eklenmiştir. Ayrıca tek bağlantılı esnek robotun yük değişikliklerine karşı dayanıklı kontrolü için kesirli dereceden PD denetleyici kullanılmış ve kesirli dereceden oransal-integral (PI) denetleyiciyi esnek bir bağlantıyı kontrol etmek için “fraktor” olarak adlandırılan analog cihaz kullanmışlardır. Kesirli dereceden denetleyiciler gürbüzlüğü iyileştirebilmesine rağmen yayılma etkilerine karşı gürbüzlüğü garanti edememektedir. Monje et al. nominal faz marjı ve kazanç geçiş frekansı spesifikasyonları ile sistemin kazanç değişikliklerine gürbüzlük sağlayan kesirli dereceli PI kontrolörü önermişlerdir (Monje et al. 2004). Tavazoei ve Tavakoli-Kakhki istenen fazın eşzamanlı başarılmasını ve kesirli dereceden kontrolörle marj kazanımını sağlamışlardır (Tavazoei and Tavakoli-Kakhki 2014). Feliu-Talegon et al. daha yüksek gürbüzlük sağlamak için kesirli dereceden kontrolörle beraber yan yana yerleştirilmiş akıllı yapılar içinde IRC'den oluşan bir şema önermişlerdir (Feliu-Talegon et al. 2016). Üç senaryolu deneylerinde bir ucu sabitlenmiş diğer ucu esnek olan bir kol kullanmışlardır. Birinci senaryoda yüksüz durumdaki kolun yer değiştirmesi izlenmiştir. IRC ve önerilen denetleyici, kolun titreşimini PPF ve MPPF'ye nazaran daha etkin bir şekilde bastırdığı gözlemlenmiş ve önerilen denetleyicinin titreşimi IRC'den de daha hızlı bastırmıştır. İkinci senaryoda 0.15 kg'lık yük kullanılmış titreşim bastırmaların birinci senaryoya göre daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir ve önerilen denetleyici yine uygulanan diğer denetleyicilere göre daha etkin bir şekilde titreşimi bastırmıştır. Üçüncü senaryoda 0.3 kg'lık bir yük kullanılmış ve ikinci senaryodan daha yavaş sönümlenmeler gözlemlenmiştir. Bu sebeple yük arttıkça sönümlenmenin yavaşladığı görülmüştür (Feliu-Talegon et al. 2016).

Manipülatörlerdeki titreşimlerin geç sönümlenmesi veya yeterince indirgenmemesinden dolayı özellikle hafif ve esnek manipülatörler her ne kadar enerji açısından verimli olsalar da bu titreşimler sebebiyle daha düşük hızlarda çalışmaktadırlar. Daha hızlı çalışmalarını için çeşitli kontrol yöntemleri uygulanarak titreşimler mümkün

2. LİTERATÜR ÖZETİ

mertebe hızlı ve tam sönümlenmesi istenmektedir. Esnek yapıların baskın mod doğrusal ve doğrusal olmayan titreşim kontrolüne ek olarak, Sethi et al. baskın mod yaklaşımının yetersiz olduğu durumlarda çok modlu eş zamanlı kontrolün uygulanmasından bahsetmişlerdir (Sethi et al. 2011). Açık döngü kontrol sistemleri, atalet tarafından uyarılmış titreşimleri bastırma konusunda idealdirler ve en yaygın, pratik olanlarından biri girdi şekillendirmedir. Girdi şekillendirmenin modelleme belirsizliğine duyarlılığı nedeniyle gürbüz girdi şekillendirme yöntemleri kullanılmıştır. Singhose'nin araştırmalarına göre Sıfır-Titreşim (ZV), Sıfır-Titreşim-Türev (ZVD), Sıfır-Titreşim-Türevinin Türevi (ZVDD), Belirtilen Duyarsızlık ve Ekstra Duyarsız giriş şekillendiriciler gibi tek modlu ve çok modlu esnek yapılar için farklı girdi şekillendirme teknikleri kullanılmıştır (Singhose 2009). Esnek manipülatörler çok modlu titreşimli sistem olduğundan dolayı kontrolü için çok modlu giriş şekillendirme yöntemi kullanımı gerekmektedir. Çok modlu giriş şekillendiriciler, kıvrımlı şekillendiriciler ve eş zamanlı şekillendiriciler olarak ikiye ayrılmaktadır. Frekansların çok yüksek olmadığı durumlarda kıvrımlı şekillendiriciler çok modlu sistemin her bir titreşim modunu hedefleyerek çalışmaktadır. Eş zamanlı şekillendiriciler, kıvrımlı şekillendiricilere göre daha hızlı tepki verirler ama gürbüzlük olarak daha düşük seviyededirler. Girdi şekillendirme, bağımsız bir kontrol stratejisi olduğundan diğer kontrol stratejileri ile kullanılabilir. Giriş şekillendirici komutundaki aşırı gürültünün üstesinden gelmek için önceden şekillendirilmiş komut teknikleri kullanılmakta ve devamlı yumuşak komutlar, bozucu etkileri azaltabilmektedir. Darbe ve sarsıntıları azaltmak için dalga formu komutları girdi şekillendiricilerde kullanılmıştır. Çok modlu girdi şekillendiricinin darbe sayısını azaltmak ve tasarım frekansının tek katlarındaki frekansların titreşimlerini ortadan kaldırmak için tek modlu şekillendirici kullanılmıştır. Model tabanlı geri besleme ile çok modlu sistemin frekanslarını ortak frekansın var olduğu noktaya kadar değiştiren frekans modülasyonu girdi şekillendirmeyi kullanan Masoud et al. manipülatörün tabanına hızlandırma komutlarını şekillendirmek için kullanılan çok modlu frekans modülasyonu girdi şekillendirici kullanmışlardır (Masoud et al. 2016). Manipülatör frekanslarını modüle etmek için model tabanlı geri bildirim, tüm yüksek mod frekansları, geri besleme modelinin temel frekansının tek-tam sayı katları haline gelmesi için kullanmışlardır. Sistemin tüm modlarında aynı anda titreşimleri bastırmak için tek modlu girdi şekillendirici uygulamışlardır. Simülasyonları, esnek bir koldan oluşan Euler-Bernoulli desteği üzerinden yapmışlardır. ZV ve ZVD giriş şekillendiricileri önerilen sisteme uygulamışlardır. ZV girdi şekillendirici, ikinci darbeye verilen yanıtın birinci darbeye

2. LİTERATÜR ÖZETİ

uyarılan titreşimi hafifleten iki darbe dizisi ile genel giriş komutuna dayanmaktadır ve gürbüz olmayan şekillendiricilerdir. Darbeler, sistemin titreşim periyodunun yarısı kadar ayrılmaktadır. ZVD girdi şekillendiriciyse sistemin titreşim periyodunun yarısı ile ayrılmış üç darbe dizisi içermektedir ve gürbüz şekillendiricidir. Ayrık modelin tüm modlarında titreşimlerin hem ZV hem de ZVD ile bastırıldığı gözlemlenmiştir. Hızlanma komutlarındaki frekans içeriği ve dalgalanmalar, düşük frekanslı geri besleme komutunun sonucunda önemli ölçüde azalmıştır. Frekans azalması durumunda çok daha yumuşak hızlanma komutları görülür ve modüle edilmiş sistemin en düşük frekansta çift kök sergilediğini gözlemlenmiştir. Bu durumda ZV başarısız olurken ZVD, çift köklere karşı azaltılmış duyarlılığı nedeniyle daha iyi performans göstermiştir (Masoud et al. 2016).

Bu sebeple önerilen girdi şekillendirmede, Li et al. robotik manipülatör sistemlerinin giriş ve çıkışında doygunluk, ölü bölge ve güvenlik spesifikasyonlar gibi kısıtlamalar bulunduğunu ifade etmişlerdir (Li et al. 2015). Robotların insanlarla ve çevreyle fiziksel etkileşiminin artması nedeniyle robotik manipülatörlerde bilinmeyen dinamikler ve bilinmeyen bozukluklar ortaya çıkmaktadır. Bilinmeyen bozulmalara sahip sistemlerde bozulma gözlemcisi (DO) ile kayan kipli kontrol yöntemi ve ayrıca girdi doygunluğuna sahip robotik dış iskelet kontrolü için bozulma gözlemci tabanlı uyarlamalı bulanık kontrol yöntemi kullanılmıştır. İki bilinmeyen parçadan oluşan birleşik bozulma tahmini için de doğrusal olmayan bozulma gözlemcisi kullanılmıştır. Kullanılan bu sistemler, bilinmeyen bozulmalar için bozulma gözlemcisinin etkinliğini göstermişlerdir. Sistem belirsizliklerinin kontrolünde, bilinmeyen sistem parametrelerinin çevrimiçi tahminlerini sağlayabildiği için uyarlamalı kontrol yöntemleri dikkat çekmektedir. Zhou ve Krstic, bilinmeyen parametreler, bozulmalar ve zaman gecikmesindeki sistem kontrolü için uyarlamalı tahmin edici geri besleme kontrol yöntemini kullanmışlardır (Zhou and Krstic 2016). Chen et al. 2015 yılındaki çalışmalarında, daha önce ayrık zamanlı ve kısıtlamalara tabi olan paralel ilişkilere izin veren doğrusal sistemler için kullanılan sistem bilgisi gerekli olmayan ANN tabanlı yöntemlerin yararlı olacağını göstermişlerdir (Chen et al. 2015). Radyal tabanlı fonksiyon içeren ANN'ler ile uyarlamalı geri adımlı kontrol yöntemi ve Çok Girişli - Çok Çıkışlı (MIMO) doğrusal olmayan, belirsiz ve giriş kısıtlamaları bulunan sistemlerin yörünge kontrolü için de uyarlamalı ANN kontrol yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, çıktı mekanizmasındaki bilinmeyen doğrusal olmayan bir sistem için uyarlamalı kontrol yöntemi de kullanılmıştır. Bechlioulis ve Rovithakis, tek

girişli ve tek çıkışlı katı geri besleme sistemlerin tahmini performansını sağlamak için ANN tabanlı gürbüz uyarlamalı kontrol yöntemini kullanmışlardır (Bechlioulis and Rovithakis 2009). Bu yöntemin, performans fonksiyonun pozitif ve bir sabite yakınsaması bulunuyorsa hatanın sınırları değişse bile kullanılabileceğini göstermişlerdir. Bu anlatılarla birlikte, Bariyer Lyapunov fonksiyonları sabit kısıtlama durumlarında başarılı bir yöntemdir. Bariyer Lyapunov tekniği çıktı kısıtlama problemini önlemek için ve fonksiyonun bilinmeyen parametrelerinin belirlenen üst küme içinde bulunması için kullanılmıştır. Tee et al. zamanla değişen çıktı kısıtlama ihlalindeki doğrusal olmayan sistemler için asimetrik zamanla değişen Bariyer Lyapunov kullanmışlardır (Tee et al. 2011). He et al. çalışmalarında, manipülatör sistem belirsiz dinamiklerini önlemek için uyarlamalı ANN, bilinmeyen bozulma etkisini önlemek için DO ve zamanla değişen çıktı kısıtlamalarını önlemek için de asimetrik zamanla değişen BLF kullanmışlardır (He et al. 2017). Önerilen kontrol yöntemi, model tabanlı kontrol yöntemi ve PD kontrol yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Model tabanlı kontrol yönteminde, manipülatör parametreleri kesin olarak bilindiğinde, DO tahmin hataları giderek küçülmüş ve sıfıra yakınsadığı görülmüştür. PD kontrol yönteminde DO tahmin hataları önceki yöntemle aynı olarak azalmış ve sıfıra yakınsamıştır. Sistemin çalışması sırasında istenen yörüngeyi takip ettiği ama bazı kısıtlamaların ihlal edildiği gözlemlenmiştir. Önerilen kontrol yönteminde öncekilerle aynı olarak DO tahmin hataları azalmış ve sıfıra yakınsadığı belirtilmiştir. Sistemde yer alan bilinmeyen hataların etkisini telafi ettiği ve iyi bir referans izleme performansı sergilediği gözlemlenmiştir (He et al. 2017).

İyi bir yörünge izleme performansı sağlamak manipülatörün hassas kontrolü için önemli bir noktadır ve yörünge izleme performansının başarılı bir sonuç vermesinde manipülatörün uç nokta kontrolünün önemi fazladır. Genelde model ters çevirme veya Geribesleme Doğrusallaştırma (FL) gibi ileri beslemeli kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Geri beslemeli doğrusallaştırılabilir sistemin uyarlamalı kontrol yöntemi, bozulmaların ve model belirsizliklerin etkisini indirgemek için kullanılmıştır. Uyarlamalı kontrole ilk katkı olarak PD geri besleme kısmi ve tahmini bilinmeyen parametrelerle tam dinamik ileri beslemeli sistem kullanılmış ve sistemin gelecekteki dinamik davranışının tahminine dayalı Model Öngörücü Kontrol (MPC) yöntemi doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrol amaçlarını izlemeye yardımcı olmaktadır. MPC sınırlamaları gerçek zamanlı gerçekleştirilmeyen optimizasyon yoluyla

2. LİTERATÜR ÖZETİ

pahalı girdi hesaplamasıyla oluşmakta ve bu da hızlı dinamik sistemlerde pratik uygulamaları kısıtlamaktadır. Doğrusal olmayan MPC yöntemi integral eylemin olduğu katı bağlantı manipülatör kontrolü için ve doğrusal MPC (LMPC) yöntemi de esnek manipülatör kontrolü için kullanılmıştır. Aktif titreşim kontrolünü sağlamak için MPC yöntemini ilk olarak Hassan et al. tarafından (2007) kullanılmış ve hareket denklemleri doğrusallaştırarak LMPC yöntemini uygulamışlardır. Takacs et al. 2014 yılında, modelin genişletilmiş Kalman filtresiyle güncellendiği ve bu güncellenmiş lineer dinamiklere dayalı optimal kontrol probleminin çözülmesiyle uyarlamalı LMPC tasarlamışlardır (Takacs et al. 2014). Pradhan ve Subudhi 2014 yılında, iki esnek bağlantıya sahip manipülatörün gerçek zamanlı model tanımlamasının otoregresif hareketli ortalamaya bağlı olduğunu ifade etmişler ve tanımlı dinamikler LMPC uygulamışlardır (Pradhan and Subudhi 2014). Uyarlamalı MPC tasarımı, esas olarak LMPC gerçekleştirmeye ve parametre güncellenmesine odaklandığı görülmektedir. Doğrusal olmayan terimleri kaldırmak için FL kullanılmaktadır. Belirsizliklerin varlığında FL kesinliğini kaybetmekte ve uyarlanması gerekmektedir. Kokusuz (izsiz) Kalman filtresi, doğrusal modelin parametrelerini tahmin ederek ve güncelleyerek tam doğrusallaştırılmış sistemin doğrusal olmayan giriş-çıkış davranışını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Literatürdeki önceki çalışmalara bakarak, Schnelle ve Eberhard 2017 yılındaki çalışmalarında, FL, LMPC ve Kalman Filtresi ile uç efektör yörünge takibi için yeni uyarlamalı doğrusal olmayan MPC üzerine çalışmışlardır (Schnelle and Eberhard 2017). Belirsizliklerin kontrol yapısı üzerindeki etkisini ölçmek ve sağlamlık değerlendirmesi için ayrıntılı bulanık aritmetik analiz kullanmışlardır. Katı manipülatör üzerinde önerilen yöntem ile FL tabanlı MPC yöntemini yörünge izleme konusunda karşılaştırmışlardır. İzleme hatasının Kalman Filtresi etkisi sayesinde önerilen yöntemde daha çok azaltıldığı gözlemlenmiştir. Yörünge izleme performansı olarak özellikle izleme hatası daha çok indirildiğinden önerilen yöntem daha iyi performans sergilemiştir. Esnek manipülatör üzerinde yaptıkları çalışmada doğal olarak uç efektör kontrolüne odaklanmışlar ve titreşim bastırma, yörünge izleme ve izleme hatası durumlarından önerilen yöntemin performans olarak daha iyi olduğu gözlemlenmiştir (Schnelle and Eberhard 2017).

Schnelle ve Eberhard (2017)'in çalıştığı konu olan esnek manipülatörün referans takip hatası yıllardır araştırılan ve araştırılmaya devam edilen bir konudur. Literatürde yapılan ilk çalışmalar, sınırlı durum bilgisi, örnekleme oranları ve hesaplama gücüyle

doğrusal olmayan yüksek serbestlik dereceli karmaşık yörüngeleri izleyebilen bir kontrol sistemi üzerine yapılmıştır. Bu belirtilen çalışmalarda manipülatörün tamamen rijit olduğu varsayılmıştır. Manipülatörün esnekliği göz ardı edildiği için rijit modele dayalı kontrol yöntemleri çokta iyi sonuçlar vermemiştir. İlk olarak, rotorun kinetik enerjisinin kendi dönme hareketinden oluştuğunu varsayan bir basitleştirilmiş esnek eklem modeli önerilmiş ve sadece motor pozisyon ve hızını kullanan PD kontrol denetleyicinin bu esnek eklemler için global kararlılık elde edilebileceği gösterilmiştir. Moberg ve Hanssen, endüstriyel robotta referans örnekleme oranlarının ve ölçüm gerekliliklerinin sınırlandırılması nedeniyle, özellikle geri besleme doğrusallaştırılmasının esnek kol bağlantısındaki sarsıntıya kadar geri besleme gerektirdiğinden dolayı sistemin tam doğrusallaştırılmasının gerçekten zor olduğu göstermişlerdir (Moberg and Hanssen 2008). Doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinin küresel kararlılık gerçekleştirdiği ama geri besleme doğrusallaştırılmasında ise esnek kolun bittiği ekleme kadar geri bildirim gerektiği gösterilmiştir. Brogliato et al. çalışmalarında, kontrol yöntemlerine, PD kontrol, pasifliğe dayalı kontrol ve Tekil Pertürbasyon Yaklaşımı (SPC) eklemişler ve kontrol yönteminin katı modele dayanmasına rağmen pasifliğe dayalı kontrol yönteminin en iyi performansı gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Brogliato et al. 1998). Esnek ekleme dayalı kontrol yöntemlerinin performansının düşük olmasının sebebi, sistemin ivmesinin ve üzerinde oluşan sarsıntının yüksek dereceden türevlerin yanlış tahmini sebebiyle çatırdama olgusunun oluşması olarak bildirmişlerdir. Brogliato ve Rey, daha esnek manipülatörler için ek çalışma yapmış ve kontrolcü üzerinde çatırdamanın hala olduğunu gözlemlemişler ve yüksek dereceden türevlerin ölçüm gürültüsü veya model belirsizlikleri nedeniyle ölçümlerinin hatalar içermesinin kaçınılmaz olduğunu ifade etmişlerdir (Brogliato and Rey 1998). Yüksek dereceden türev tahmini zor olduğundan dolayı, De Luca, geri besleme kontrolünü, motor konumunu ve hızını kullanan ileri besleme kontrol yöntemi kullanmış ama geri besleme kontrolünün sadece konum ve hızı kullanması sebebiyle esnek bağlantıdaki performansın tatmin edici olmadığını gözlemlemiştir (De Luca 2000). Tekil Pertürbasyon Yaklaşımı (SPC) yönteminin, indirgenmiş model bazında doğrusal olmayan kontrolör tasarımı için uygun olduğu gözlemlenmiştir. SPC yöntemi, motor ve bağlantı arasında ki sapma için, hızlı kontrol yöntemi ve istenen bağlantı konumunu ve hızını izlemek için de yavaş kontrol yönteminden oluşan bileşik kontrol stratejisinden oluşmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kontrol döngüleri ikinci dereceden indirgenmiş modele dayalı tasarlandığından asimptotik kararlılık elde etmek birinci türevlere bağlıdır. Lessard et al. SPC'nin karmaşık yörünge takibi için kararlılık konusunda başarısız olduğunu göstermişlerdir (Lessard et al. 2014). Geleneksel SPC için kazançlar hızlı ve yavaş sistemler arasındaki bağlantının ihmal edilmesiyle bulunmaktadır ve bu nedenle istikrarsızlık göstermeden istenen performans sağlanmamaktadır. Kim ve Croft (2017) çalışmalarında, esnek eklemler için doğrusal olmayan ileri beslemeli kontrol ile doğrusal SPC'den oluşan bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Önerilen kontrol yöntemi, birinci yöntem hesaplanmış tork kontrol yöntemi, ikinci yöntem ileri beslemeli kontrol yöntemi ve üçüncü yöntem merkezi olmayan tam durumlu kontrol yöntemi olmak üzere 3 yöntem ile karşılaştırılmıştır. Sisteme basit ortalama filtresi uygulandığında, filtre boyutu daha küçük olduğunda birinci yöntemin oldukça fazla titreşimler ürettiği gözlemlenmiştir. İzleme performansı ve tork arasındaki geçişler ikinci yöntem ve önerilen yöntemde benzer olduğundan ileri beslemenin geçici durumlar sırasında baskın ve önemli olduğunu göstermiştir. Birinci ve ikinci yöntemin geri besleme kazanımları aynı olmasına rağmen ikinci yöntemde oluşan artık titreşimin daha az olduğundan izleme performansı birinci yöntemle göre çok daha iyidir. Artık titreşimler sadece üçüncü ve önerilen yöntemde aktif sönümlenme ile azaltılabilmemiş ve önerilen yöntemde daha fazla sönümlenme olduğundan daha iyi bir performans sergileyebilmiştir (Kim and Croft 2017).

Üsteki çalışmalara ek olarak, gereksiz titreşimleri bastırma veya minimum seviyeye çekme, minimum zaman ve minimum enerji optimizasyonu için manipülatörlerde yörünge planlama çalışmaları son zamanlarda daha çok çalışılmakta ve önem kazanmaktadır. Yörünge planlaması çalışmaları genellikle manipülatörün çalışma alanında gerçekleştirilmektedir ve bu sayede çalışma alanında manipülatörün uç noktasının yörüngesi çalışma alanında doğal olarak tanımlanabilmektedir. Fakat bu tanımlama kinematik tekilliğe ve manipülatörün serbestlik derecesinde fazlalığa yol açabilmektedir. Gasparetto et al. yörünge planlamasını yaparken, bu sebeplerden dolayı daha çok eklemleri dikkate alarak planlama yapmışlardır. Çünkü eklemi dikkate alarak oluşturulan kontrol yöntemleri konum doğruluğunun azalmasına neden olmasına rağmen eklem hareketinin doğru bir şekilde çalışmasını garanti etmektedir (Gasparetto et al. 2015). Eklem uzayında yörüngeler polinom, spline, Bezier ve NURBS vb. gibi çeşitli enterpolasyon (ara değeri bulma) işlevleriyle oluşturulmaktadır. Genel enterpolasyon

işlevleri için farklı dereceli polinom fonksiyonlarının birleşimine dayanan bazı yaklaşımlar, “343” yaklaşımı, “445” yaklaşımı ve “5455” bulunmaktadır. Hızlanma veya sarsıntı sürekliliği için yörünge temel öğeleri olarak spline işlevleri kullanılmıştır. Xu et al. yörünge planlaması için Bezier eğrisini uygulamışlardır (Xu et al. 2014). Bezier eğrisinin, iç düğüm değişimi tüm yörüngeyi etkileyen ve yörüngeyi yeniden hesaplanmasına yol açan ana dezavantajı bulunmaktadır. B-spline işlevlerinin tatmin edici yörünge düzgünlüğü sebebiyle kullanılmış ve optimal yörünge enterplasyonu için tek tip kübik B-spline işlevi eklem sarsıntılarını sınırlamak için kullanılmıştır. Beşli B-spline referans yörüngesi sarsıntı kararlılığını daha da iyi gerçekleştirmek için kullanılmış ve sıralı ikinci dereceden programlama ile yörüngeyi optimize edilmiştir. Xiao et al. kübik polinom uydurma yöntemiyle Kartezyen ve eklem uzayınının kısıtlamalarını parametre uzayına dönüştürmüş ve çevrimiçi uygulamalarda zaman açısından uygun bir yörünge ortaya çıkarmışlardır (Xiao et al. 2012). Abu-Dhaka et al., genetik algoritma metodolojisi geliştirerek karmaşık ortamlarda zaman açısından optimum ve çarpışmayan yörünge oluşturmuşlardır (Abu-Dhaka et al. 2015). Çalışma süresi optimizasyonun öneminin yanında sarsıntı minimizasyonu da manipülâtör performansı için oldukça önemlidir. Gasparetto ve Zanotto (2008) yaptığı çalışmalarda, sarsıntı minimizasyonu için optimize edilmiş amaç fonksiyonu olarak sarsıntının karesinin integralini kullanmışlardır ve yörünge geçiş noktalarının enterpolasyonu için spline uygulamışlardır. Endüstride üretim sürecinde kullanılan manipülâtör hareketlerinin sarsıntısı optimal bir şekilde yürütülmedir. Aynı çalışmada, optimal yörünge planlaması için toplam çalışma süresiyle ve sarsıntının karesinin integrali ile orantılı iki terimden oluşan maliyet fonksiyonu kullanmışlardır (Gasparetto and Zanotto 2008). Ayrıca, Zanotto et al. önceki çalışmalarının üzerine iki minimum zaman sarsıntısı yörünge planlama yöntemini Kartezyen uzayda doğrulamışlardır ama maliyet fonksiyonunun iki terimi yapay ayarlama gerektirdiği için bu yöntem çok başarılı olmamıştır (Zanotto et al. 2011). Günümüzde problemleri çözmek ve tüm hedefleri tek bir maliyet fonksiyonuna dönüştürmek için çok amaçlı evrimsel algoritmalar kullanılmaktadır. Xu et al. ortak yörünge optimizasyonuna kısıtlı çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) uygulayarak seyahat süresini, enerjiyi ve uç efektör mesafesini en aza indirmişlerdir (Xu et al. 2015). Ayrıca, seyahat süresini ve manipülâtörünün titreşimini indirgemek için çok amaçlı genetik algoritmada kullanılmıştır. Saravanan et al. çalışmalarında, baskın olmayan sıralama genetik algoritması iki ve çok amaçlı diferansiyel evrim algoritmalarını yörünge optimizasyon için kullanmışlardır (Saravanan et al. 2009). NSGA-II

algoritmasının daha yavaş yakınsadığını ama baskın olmayan çözümler sağlamak için daha iyi performans gösterdiğini göstermişlerdir. Shi et al. optimal zaman, enerji ve hassaslık gibi manipülatörlerin yörünge planlaması için beşli düzgün olmayan rasyonel B-spline sistemini eğriler oluşturmak için kullanmışlardır (Shi et al. 2016). Beşinci dereceden B-spline'a göre yörüngeyi daha esnek ve değiştirilmesi kolay hale getirmekte, ama matematiksel formları n ağırlık içererek hesaplanacağından daha karmaşık matematiksel modelleme gerektirmektedir. Bu yüzden Huang et al. yaptıkları çalışmada, yörünge optimizasyonu, doğrusal olmayan kısıtlamalar ve sarsıntı kısıtlamaları gibi problemler için önceden seçilen parametre gerektirmeyen NSGA-II yöntemi ile eklem uzayındaki yörüngeyi oluşturmak için 5. dereceden B-spline enterpolasyonunu, 6 eklemli ve 6 serbestlik açısına sahip PUMA560 manipulatoründe kullanmışlardır (Huang et al. 2018). Belirtilen yöntem, Gasparetto ve Zanotto'nun çalışması ile karşılaştırıldığında eklemlerin ortalama sarsıntıları, 1, 2, 3 ve 6. eklemlerde sırasıyla %6, %22, %6, %12 daha yüksektir ve eklem ortalama hızları 1, 3 ve 5. eklemlerde sırasıyla %4, %4, %2 oranında daha düşüktür (Gasparetto ve Zanotto'nun 2007). Dan'ın 1993 yılındaki çalışmasıyla karşılaştırıldığında ise önerilen yöntemin eklem ortalama sarsıntıları %1, %6, %6, %1 oranında daha yüksektir ve eklem ortalama hızları %3, %8, %2 oranında daha düşüktür. Önerilen yöntem diğer iki yönteme nazaran biraz daha kötü performans sergilemiştir ama önerilen yöntemde önceden belirlenmiş başlangıç değerine veya amaç fonksiyonundaki ağırlıkların değerlerinin dikkatli ve uygun ayarlanmasına ihtiyaç duyulmadığı için diğer çalışmalara göre daha kolay uygulanabilir ve kullanışlı olduğu gözlemlenmiştir (Huang et al. 2018).

Huang et al. (2018) tarafından da kullanılan PUMA560 manipülatöründe de olduğu gibi hafif ve daha küçük aktüatör barındırabilen robot manipülatörler günümüzde endüstriyel robotikte özellikle taşıma, kaynaklama ve işlemede daha çok kullanılmaya başlamıştır. Robotun hafifliğinden dolayı kontrol problemi daha karmaşık olmakla beraber özellikle eklem elastikliğinin etkisi daha belirgin olarak görülmektedir. Eklem elastikliği kontrol tasarımında dikkate alındığında koordinat sayısı iki katına çıkmakta ve bu dinamik modeli daha karmaşık hale getirmektedir. Kontrol tasarımı için eklem elastikliğinin dikkate alınmasının önemi ile ilgili ilk çalışma 1984 yılında yapılmış ve o yıldan beri esnek eklemli manipülatörler için kontrol problemleri daha kapsamlı incelenmeye başlamıştır (Kim 2017). Teorik olarak ideal olan tam durum geri besleme

ile isteğe bağlı kapalı döngü performansı elde edilmektedir. Brogliato et al. ayrıştırma kontrolü, geri adım atma kontrolü ve pasifliğe dayalı kontrolü karşılaştırmakta ve tam durum kontrol yöntemlerinin ortak nokta olarak sarsıntıya kadar geri beslemeye veya bağlantı konumunun üçüncü türevine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Brogliato et al. 1995). Bu sebeple model belirsizliği ve ölçüm gürültüsü nedeniyle yüksek dereceli durumun tahmininin gerçekte zor olduğunu göstermektedir. Düşük dereceli durumlara dayalı kontrol yöntemlerinden biri, esnek eklem dinamik modelinin motor tarafından yalnızca konum ve hız geri bildirim, kısmi durum geri bildirim ile global kararlılığa ulaşabileceğini gösterilmiştir. Motor kontrolörü, sensör gereksinimi ve daha yumuşak girdi nedeniyle tipik endüstriyel robotta kolayca uygulanabilmektir. Bu nedenle, Kim, çalışmasında SPC olarak belirtilen tekil pertübasyon tekniğine bağlı olarak geliştirilen kontrol yöntemlerini sadece konum ve hız ile tam durum kontrolüne izin verdiği için kullanmıştır. Önerdiği yöntemde pertübasyon parametresi yeterince küçük olduğu varsayıldığı için esnek eklem dinamik modeli farklı zaman ölçeklerinde ayrılmış iki indirgenmiş modele bölünmektedir. Sapma dinamiği ve sınır tabakası hızlı sistemi, katı dinamiklerde yarı kararlı durumu veya yavaş sistemi temsil etmektedir. 1985'te yavaş kontrolün doğruluğunu arttırmak için düzeltici kontrol önerilmiş ve 1993'te, hızlı sistemin bant genişliğini arttırmak için PD kontrolünü önerilmiştir (Kim 2017). Taghirad ve Khosravi ise integral eylemli düzeltici kontrol yöntemi önermişlerdir (Taghirad and Khosravi 2002). Kim iki zamanlı ölçek için yaptığı çalışmada, yavaş sistemlerdeki iki sorunun üzerinde durmuştur (Kim 2017). Bunlardan biri, yavaş kontrol için genelde kullanılan katı modelin modelleme hatası olduğunda, bu yavaş modelin tam yavaş modeli temsil edecek kadar doğruluğunun olup olmadığı ve bir diğeri ise eklem katılığını arttırmadan yavaş modelleme hatasını azaltmanın mümkün olup olmadığıdır. Çalışmasında esnek eklem manipülatörü için deneyler yapmış ve geleneksel bir model tabanlı PD kontrolör ile karşılaştırmıştır. Eylemsizlik, kütle merkez ve indirgeme oranı bilgisayar destekli tasarım verilerinden elde edilmekte, eklem sertliği değerlerini bulmak içinde doğrusal model temel alınarak çok değişkenli frekans yanıt fonksiyonu kullanılmaktadır. Sürtünmenin ileri besleme kontrolü ile iptal edileceği varsayılmaktadır. Geleneksel kontrol yapısında büyük modelleme hatası olduğundan dolayı performansta düşük kalmakta ve düzeltici kontrol performansı iyileştirme konusunda başarılı olamamaktadır. Ama önerilen kontrol yönteminde performansın başarılı bir şekilde iyileştirildiği gözlemlenmektedir. Önerilen kontrolün yavaş sistemin 10 Hz'lik kapalı çevrim bant genişliğine kadar sistemi stabilize ettiği ama 10 Hz'den büyük genişliklerde

2. LİTERATÜR ÖZETİ

kontrolcüde çatırdamanın oluştuğu gözlemlenmektedir. Yörünge izleme konusunda geleneksel kontrol yaklaşımı önemli kalıntı titreşimlerinden dolayı yörünge izleme açısından kötü performans göstermişken önerilen kontrol yaklaşımı kalıntı titreşimleri iyileştirip daha iyi performans göstermektedir (Kim 2017).

Kim (2017) çalışmasında da bahsettiği üzere kalıntı titreşimler manipülatörün performansını fazlasıyla etkilediği için titreşimin kontrolü her zaman önemlidir. Bu titreşimin oluşumunun nedenlerinden biri de atalet parametreleri sebebiyle oluşan çatırdamalardır. Dinamik doğrusal yaklaşımlara dayanmadan robot dinamiğindeki atalet parametrelerinin açık doğrusal ayrışmasını kullanarak küresel yakınsama gerçekleştiren iki önemli çalışma diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu çalışmalar, Craig et al. önerdikleri uyarlanabilir ters dinamik kontrol (Uyarlanabilir Hesaplanmış Tork Kontrolü (ACTC)) yöntemi (Craig et al. 1987) ve Slotine ve Li'nin önerdikleri pasifliğe dayalı uyarlanabilir kontrol yöntemidir (PBAC) (Slotine and Li 1987). ACTC'de, tahmin edilen kütle matrisinin tersi parametre uyarlama yasasında kullanıldığı için pozitif tanımlı tahmini kütle matrisine ihtiyaç duyulmaktadır ama PBAC'de kütle matrisinin tek tip pozitif kesinliğine ihtiyaç duyulmamaktadır. Atalet parametrelerinin fiziksel tutarlığını sağlayan koşullarına karşılık gelen robot kütle matrisinin pozitif tanımlanması garanti etmektedir. Bu özellik ile Ioannou ve Sun'un fiziksel olarak tutarlı atalet parametrelerinin izdüşüm tabanlı algoritmalar kümesinin dışbükey karakterizasyonu uygulamasıyla birlikte uyarlanabilir robot kontrolünde kullanılmıştır (Ioannou and Sun 2012). Bu yöntem ile uygulanabilir setin sınırındaki parametre güncelleme yasasını değiştirilerek, uygulanabilir setin, önceden belirlenen sınırlar içerisinde bulunduğu düzgün olmayan uyarlamalı kontrol üretilmektedir. ACTC ve PBAC yöntemleri, tabanlı doğrudan uyarlanabilir kontrol yöntemlerinin, ilk uyarlama kazanç matrisi seçmesi gerekmektedir çünkü sabit adaptasyon kazanımlarının sayısı, probleme bağlı olan adaptasyon parametrelerinin karesi ile değişmekte ve deneme yanılma gerektirdiğinden uzun süren bir işlem olmaktadır. Lee et al. çalışmalarında, parametre izdüşümüne veya sıfırlama prosedürüne dayanmadan, tahmini parametrelerin fiziksel tutarlığını garanti eden parametre adaptasyon kanunu kullanarak anlatılan problemlerin üstesinden gelmeye çalışmışlardır (Lee et al. 2018). Amari'nin kullandığı, koordinatla değişmeyen ve atalet parametreleri uzayının altında bulunan Riemannian metriğini parametre sayısına bakmadan uyarlama hızını arttırmak için kullanmışlardır (Amari 1998). Sabit parametre

2. LİTERATÜR ÖZETİ

tahmini ile tamamen pasifliğe dayalı “adaptasyonun olmadığı”, farklı sabit adaptasyon kazanç matrisine sahip pasifliğe dayalı “öklid” ve “sürekli geri çekilme” ile önerilen yöntem olan “doğal” olarak isimlendirilmiş dört farklı adaptasyon yasasını karşılaştırmışlardır. İlk olarak, standart sapmanın 0,05 ile 0,4 arasında 0,05 arttığı model belirsizliği seviyelerine göre kontrol yöntemlerinin sağlamlığı ve yörünge izleme performansları karşılaştırılmıştır. “doğal” ve “sürekli geri çekme” yöntemleri tüm gürültü seviyelerinde diğerlerine göre daha iyi performans göstermiştir. İkinci olarak, standart sapmanın 0,4 ile 1,2 arasında 0,2 arttığı model belirsizliğiyle kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır. İlk yapılan deneyde “doğal” ve “sürekli geri çekme” yöntemlerinin sağlamlık ve yörünge izleme konusunda daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Yarıçapı 0,05m olan düzgün “küre”, 0,0323m, 0,3227m ve 0,0323m uzunluklarına sahip “elipsoid1” ve 0,1375m, 0,2165m ve 0,1082m uzunluklarına sahip “elipsoid2” olan üç adet bilinmeyen yük kullanılarak başka bir deney yapmışlardır. Önerilen yöntemin, geçici davranış ve izleme hatası yakınsama konusunda diğer yöntemlere göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Esnek eklemlerli manipülatörlerde yörünge izleme kontrolünde genelde torqu sisteme girdi olarak kabul edip aktüatör dinamiklerini göz ardı eden kontrol yöntemleri kullanılmıştır. İlk olarak 1987 yılında esnek manipülatörün dinamik modelini sunulmuş ve bu modelin dinamik modeli üzerinden doğrusal veya doğrusal olmayan kontrol yöntemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Alam et al. 2019). Ailon et al. bilinmeyen yük ve parametrik model varyasyonu ile manipülatörde yinelemeli regülasyon üzerinde çalışmışlardır (Ailon et al. 2000). Akyuz et al. durum geri besleme ve PID kontrol yöntemlerini beraber kullanarak yörünge izleme kontrolünü sağlamaya çalışmışlardır (Akyuz et al. 2011b). Barjuei et al. parametre belirsizliği olan esnek manipülatör için Kayan Kipli Kontrol (SMC) yöntemi üzerinde çalışmışlardır (Barjuei et al. 2014). SMC hesaplama basitliği ve mükemmel yapısı nedeniyle kontrol yöntemleri arasından ilgi duyulan bir yöntem olmaya başlamıştır. Geleneksel SMC yöntemlerinde kayan yüzey sadece eşleşme belirsizliklerinin hafifletilmesine odaklandığından pratik sistemlerde belirli belirsizliklerle eşleştirme koşulu karşılanamayabilmektedir. Bu nedenle, Hu et al. integral SMC yöntemi üzerinde çalışmışlar ve geleneksel SMC yöntemlerine göre pratikliğini ve sağlamlığını doğrulamışlardır (Hu et al. 2008). Ajwad et al. integral SMC'nin uyumsuz belirsizliklerin telafisi için etkili bir yöntem olduğunu göstermişlerdir

2. LİTERATÜR ÖZETİ

(Ajwad et al. 2015). Integral SMC yönteminde, sistemin kontrol performansından ödün vererek uyumsuzluk bozulmalarını ortadan kaldırdığı, kayma yüzeyindeki integral eylemin yüksek aşma ve nominal kontrol performansını düşüren olumsuzlukları getirmesiyle anlaşılmaktadır. Alam et al. çalışmalarında, aktüatör dinamiklerine ek olarak uyumsuzluk bozulmalarıyla manipülatörün istenen yörünge takibini de sağlamak için DO tabanlı integral SMC üzerine çalışmışlardır (Alam et al. 2019). SMC yöntemlerinde, sistem, kayan veya anahtarlama yüzeyi olarak adlandırılan tanımlanmış yüzey üzerine uygulanmaktadır. Sistem yörüngeleri kayan yüzeye ulaştığında, kontrol yöntemi konfigürasyonu sistemi kayan yüzeyde tutmak için sürekli değiştirilmekte ve yüksek frekanslı bu anahtarlama sebebiyle çattırtı problemi ortaya çıkmaktadır. DO, eşleşmeyen belirsizliğin anlık değerini tahmin ederek kontrol kanunundaki parametrelili güncellemektedir bu nedenle DO tabanlı integral SMC yönteminde, DO sayesinde nominal kontrol performans sürdürülebilmektedir. Alam et al. yaptıkları simülasyon sonuçlarında SMC, integral SMC ve DO tabanlı integral SMC kontrol yöntemlerini karşılaştırmışlardır (Alam et al. 2019). Her üç yöntemde herhangi bir bozulma olmadığı koşullarda aynı mükemmel performansı sergilemişlerdir. Ama sisteme bozucu bir etki bulunduğunda, SMC’de sistem yörüngesi sapmış ve kaybolmayan ve sürekli devam eden sabit kararlı durum hatasına neden olmuştur. Bozucu etki integral SMC yönteminin olduğu sistemi etkilediğinde mükemmel sağlamlık özelliği göstermiş ve bozucu etkiyi ortadan kaldırmıştır ama nominal kontrol performansı kötü etkilenmiştir. Bozucu etki DO tabanlı integral SMC yönteminde bulunduğunda, bozulma gözlemcisinin etkisiyle bozulma ortadan hızlı bir şekilde kaldırılmış ve nominal kontrol performans çok etkilenmemiştir. Gerçek ve tahmini bozulma arasındaki tahmin hatasına bakıldığında önerilen kontrol yönteminde tahmin hatası sifira yaklaşmıştır. Ayrıca, sabit durum hatası, yerleşme süresi ve aşma gibi özellikler incelendiğinde önerilen yöntemin diğerlerine kıyasla daha etkin ve hızlı performans sergilediği gösterilmiştir (Alam et al. 2019).

Yukarıdaki çalışmalarda da görüldüğü üzere özellikle yörünge izleme doğruluğu, yerleşme süresi ve titreşim bastırma ya da azaltma gibi durumlar tam olarak istenilen düzeyde olmadığı için sürekli geliştirme içinde olan alanlardandır. Yapılan çalışmaların çoğunda harici etkiler göz ardı edilmektedir. Manipülatörlerin çevre ile etkileşim halinde olduğu uygulamalar için konum/kuvvet kontrolü de denilen uç efektör konumu ve kuvveti kontrol edilmektedir. Doğru model hızı, konum ölçümü ve uç efektör ile çevre arasındaki

2. LİTERATÜR ÖZETİ

tepki kuvveti de dahil olmak üzere konum/kuvvet yöntemlerinin tam tanımının olduğu varsayılmıştır (Tuan and Hieu 2019). Sensör kullanımının, gürültü etkileri, toplam ağırlık ve maliyet artımı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Hız/kuvvet ölçümüne ihtiyaç duymayan açık çevrim kuvvet kontrol yöntemi kullanılmış ama sonrasında Martinez-Rosas et al. doğrusal gözlemciyi, hız sensörlerini açık çevrim kuvvet kontrol yöntemi ile değiştirmek için kullanmışlardır (Martinez-Rosas et al. 2006). Bu gözlemci gibi gözlemciler doğrusal olmayan sistemlerde kullanılmadığı için Kalman gözlemcisi, kayan gözlemci gibi gözlemciler önerilmiştir. Sistemin dinamik parametresini değiştirmeye ihtiyaç duymayan GPI gözlemcisini önerilmiş ve Gutierrez-Giles ve Arteaga-Perez, dinamik model ve faydalı yük parametrelerinin kesinliği için PID ve konum/kuvvet kontrolü içinde GPI gözlemcisi kullanmışlardır ama bu yöntem ölçüm gürültüsünden etkilenmiştir (Gutierrez-Giles and Arteaga-Perez 2013). Uyarlamalı kontrol yöntemleri genellikle bozulmalar ve bilinmeyen parametre problemlerini aşmak için kullanılmıştır. Bu nedenle, uyarlamalı kontrol yöntemi, uyarlamalı koordineli SMC yöntemi ve uyarlamalı koordineli kontrol yöntemi kullanılmıştır (Tuan and Hieu 2019). Uyarlamalı kontrol yönteminde durum tahmini için genişletilmiş Kalman filtresi, rijit yüzey ile etkileşimde bulunan manipülatör için uyarlamalı kontrol yöntemi ve konum tabanlı uyarlamalı kuvvet tahmincisiyle robotun bilinmeyen parametreleri için kuvvet tabanlı uyarlamalı ortam uygunluk tahmincisi sensörsüz uyarlamalı kuvvet/konum kontrol yöntemi üzerinde kullanılmıştır (Tuan and Hieu 2019). Arteaga-Perez ve Gutierrez-Giles, bilinmeyen pertürbasyonlara ve belirli sayıdaki zaman türevine sahip kuvvet kontrol yöntemini tasarlamak için GPI gözlemcisini kullanmışlardır (Arteaga-Perez and Gutierrez-Giles 2014). Tuan ve Hieu çalışmalarında (Tuan and Hieu 2019), kuvvet ve hız sensörleri kullanmadan kısıtlı hareket kontrol problemi için yeni GPI kuvvet/hız gözlemcisi ile Slotine ve Li tarafından önerilmiş olan uyarlama kontrol yönteminin birleşiminden oluşan bir yöntem kullanmışlardır (Slotine and Li 1987). GPI gözlemcisi, ölçüm gürültüsünün gözlemci kazancından etkilendiği ve dolayısıyla tahmin hatası yakınmasını etkilendiği için NGPI gözlemcisi kullanmışlardır. Uyguladıkları yöntemin etkinliğini göstermek için üç senaryolu simülasyon gerçekleştirmişlerdir. İlk senaryoda kontrol yöntemi sadece konum ölçümleri ile çalışmakta ve gerçek konumun iyi bir yakınsamasının yanı sıra uç efektör konum hatalarının ve tahmin edilen hız ile gerçek hız arasındaki hatalarında indirgeniğini gözlemlenmiştir. İkinci senaryo da sisteme ölçüm gürültüleri eklenmiştir. Gözlemci gürültüden etkilendiği halde performans olarak hataları telafi etmiştir ama ilk senaryoya göre tahmini kuvvet ve gerçek kuvvet ile tahmini hız ve

gerçek hız arasındaki hatalar daha yüksek çıkmıştır ama bu hatalarında kaybolma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Üçüncü senaryoda manipülatörün parametrelerini değiştirerek simülasyon yapılmış ve önerilen yöntemin kontrolcüsü parametre değişikliklerine uyum sağlamıştır. Oluşan hatalar ilk iki senaryoya göre parametre değişikliklerinin etkisi nedeniyle daha fazla çıkmıştır ama hatalar kaybolma eğiliminde olmuşlardır. Önerilen yöntem parametre değişikliğine ve harici etkilere rağmen başarılı bir performans sergilemiş ve yörünge izleme konusunda tahmini değerlerin gerçek değerlere yakınsandığı gözlemlenmiştir (Tuan and Hieu 2019).

Esnek Eklemlerli Manipülatörlerde (FJM) yörünge izleme ve konum kontrolünde titreşim bastırma yörünge yakınsaması için dikkate alınmak zorundadır. Bu nedenle, tam durum ölçümlerine bağlı PD kontrolü kullanılmış ve sadece konum ölçümlerini kullanarak bu çalışma genişletilmiştir (Yan et al. 2019). Luca ve Book, yörünge izleme kontrolü için statik geri beslemeli doğrusallaştırmayı kullanmışlardır (Luca and Book 2008). Sağlam gözlemci tasarımı ve gözlemci tabanlı kontrol için doğrusal matris eşitsizlik yaklaşımı ve gözlemci dinamik yüzeyi tekniği ile çıkış geri besleme kontrol yöntemini kullanılmıştır (Yan et al. 2019). Liu et al. nöro-uyumlu gözlemci tabanlı kontrol yöntemi kullanmışlardır (Liu et al. 2018). FJM'ler parametre bozulmaları ve harici rahatsızlıklardan kaynaklanan belirsizliklerden etkilendiğinden bu yöntemlerin kullanımı kötü performans vermektedir. Talole et al. genişletilmiş durum-gözlemci tabanlı kontrol yöntemini yörünge izleme kontrolü sağlamak için kullanmıştır (Talole et al. 2009). Keppler et al. pasifliğe dayalı kontrol yöntemini uyumlu olarak çalışan robotların hareket kontrolü için kullanmışlardır (Keppler et al. 2016). Ayrıca, parametre bozulmalarına veya harici rahatsızlıkları sönmüleyerek hareket kontrolü sağlamak için He et al. sinirsel öğrenmeye dayalı kontrol yöntemini kullanmışlardır (He et al. 2018). Bu yöntemler, eklem esnekliğini etkilemekte ve ekstra gürültü oluşturabilecek fazladan sensörlere ihtiyaç duymaktadır. Yan et al. çalışmalarında, belirsiz tek bağlantılı FJM'nin (USLFJM) hareket kontrolü ve yörünge izleme kontrolü için sağlam kontrol yöntemi kullanmışlardır (Yan et al. 2019). USLFJM'nin belirsiz dinamik modeline ve istenen hedefe dayalı, doğrusal olmayan sanal bozulmaya sahip doğrusal hata sistemini kullanmışlardır. Önerilen Eşdeğer Giriş Bozulması (EID) tabanlı sağlam kontrol yöntemini, yörünge izleme kontrolü, konum kontrolü ve hata sistemini stabilize etmek için kullanmışlardır. Önerilen kontrol yöntemi sadece konum ölçümlerini kullanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ayrıca, linear sistemin, global asimptotik kararlılığı stabilize etmek için durum geri besleme kontrolörü ve hata sisteminin doğrusal olmayan sına bozulmasından dolayı oluşan etkiyi telafi için tam sıralı gözlemci ve EID tahmincisi kullanmışlardır. Konum kontrolü için yapılan simülasyonda, parametre bozulmaları ve harici rahatsızlıklar etkisinde bağlantı açısının 6 saniye içinde istenen konuma ulaştığı ve ardından USLFJM'nin titreşimi iyi bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir. Liu et al. yörünge izleme için yapılan simülasyonu, kullandıkları yöntem ile karşılaştırmışlardır. Kontrol yönteminin bozulan parametreleri ve harici rahatsızlıkları dikkate almadığı gözlemlenirken önerilen kontrolün 5 saniye içinde yörüngeyi izlediğini ve yörünge hatalarının sifıra yakınsadığı gözlemlenmiştir (Liu et al. 2018).

Yörünge izleme doğruluğu ve hataların indirgenmesi üzerindeki bu çalışmalar, son zamanlarda manipülatörlerden istenen yüksek doğruluk talebinden ötürüdür. Özellikle yüksek hassasiyetli görevlerde yeterli yörünge izleme doğruluğu sağlanamaması sistemin kısa süreler için kullanılmasına neden olmaktadır. Bu da mevcut makinelerin sürekli olarak değiştirilmesiyle sonuçlanmaktadır. Literatürde dinamik sistemin yanlışlığının sistem bozukluğunu ve gürültüyü temsil ettiği varsayılmakta ve bu nedenle dinamik sistemin performans özelliklerini iyileştirmek için optimal kontrol, adaptif kontrol, Yinemeli Öğrenme Kontrolü (ILC) ve Tekrarlı Kontrol (RC) gibi çeşitli gelişmiş kontrol yaklaşımları önerilmektedir (Panomruttanarug 2020). Bu kontrolcüler arasında ILC ve RC, her yineleme veya periyot sırasında doğruluğu nasıl geliştireceklerini öğrenme yeteneklerinden ötürü ilgi çekmektedir. ILC ve RC yaklaşımları öğrenilen hataya göre sonraki yinelemeyi ayarlama konusunda benzerlik taşımakta ama izleme problemini farklı şekilde ele almaktadırlar. ILC'de her sonlu zaman aralığında başlangıç koşulunu aynı değere sıfırlayan bir sistem kullanırken, RC aynı başlangıç değerine dönmediği için geçişler periyotlar arasına yayılabilmektedir. Ayrıca periyot sonuna yakın kontrol hareketleri bir sonraki başlangıçta hatayı güçlü şekilde etkilediği için ILC ve RC yaklaşımlarının gerçek kararlılık sınırlarını farklılaştırmaktadır. Panomruttanarug'un Longman ile yaptıkları çalışmayı (Panomruttanarug and Longman 2004) genişleterek 2020 yılında tekrardan manipülatörlerin konum kontrolü için frekans tepkisinden tasarlanan model tabanlı RC sistemini kullanmıştır (Panomruttanarug 2020). Önerilen yöntem, RC tasarlamak için dinamik sistem modeli türetmeden önce, kararlı kontrolör tasarımı için deneylerden doğrudan alınan sistem frekans yanıtı

2. LİTERATÜR ÖZETİ

kullanılmaktadır. Genel olarak RC yaklaşımları kararlılık için Lyapunov kararlılık teori araçlarını kullanırken önerilen yöntemde frekans alanında kararlılık analizi kullanılmaktadır. Taban ve uç efektör etrafında dönen iki döner eklem (Eklem T) ve Kartezyen düzlemde Z ve Y eksenini boyunca iki prizmatik eklem (Eklem Z) olmak üzere 4 eklem oluşan manipülatör kullanılmaktadır. Deneysel çalışma için ilk olarak manipülatörlerin her bağlantıda hareket kontrolü için genel olarak geri besleme kontrol sistemi kullanılmakta ve her eklemdeki hareket kontrolü için iki set PID kontrol sistemi kullanılmaktadır. 3 periyot boyunca uygulanan bu yaklaşım küçük hatalar dışında referans yörüngeyi izlediği gözlemlenmektedir. Ama küçük hatalar eklemi sıkmadan yörüngeye ulaşmayı engellediğinde daha uzun periyotlarda arıza oluşturabilmektedir. 100 periyot olarak uygulandığında ise klasik kontrolörün tekrarlanan hatalar olduğu gözlemlenmiştir. İkincil olarak, ilkinde oluşan tekrarlanan hataları engellemek için tekrarlamalı kontrolde sisteme eklenmiştir. Her bir periyotta önceki periyotta ortaya çıkan hatayı öğrenerek engellemeye çalıştığı gözlemlenmektedir (Panomruttanatuğ 2020). Üçüncü olarak kararlılığı incelemek için sistemden frekans yanıtları alınmakta ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile frekans yanıtı hesaplanmaktadır. Bu sayede sistemin öğrenme hızının değişimi gösterilmekte, yüksek frekanslarda kararlılık sınırına yaklaşıldığı bu sebeple öğrenmenin zorlaştığı ve sistemin frekans yanıtındaki küçük değişikliklerin varlığı sistemi kolayca kararsız hale getirebileceği gözlemlenmektedir. 100 periyot tekrarlanan sistemde yüksek kazançların daha hızlı öğrenmeye olanak sağlandığı görülmektedir. Ama 70. tekrardan sonra hata yavaş yavaş büyüyerek beklenmedik dalgalanmalar oluşturarak eklemde kararsızlığa neden olmaktadır. Son olarakta sisteme ters frekans yanıtı 100 tekrar olarak uygulanmaktadır. 100 tekrara kadar hata oranının sifıra yakın olarak çok düşük olduğu gözlenmektedir. PID kontrolörü, basit RC tasarımı ile karşılaştırıldığında eklem T’de oluşan hatanın yüzde 96.12 ve eklem Z’de oluşan hatanın yüzde 75.12 oranında iyileştiğini, ters frekans yanıtı tasarımı RC tasarımı ile karşılaştırıldığında eklem T’de oluşan hatanın yüzde 99.22 ve eklem Z’de oluşan hatanın yüzde 95.03 oranında iyileştiği gözlemlenmektedir. Ters frekans yanıtı tasarımı RC tasarımının da basit RC tasarımına göre yüzde 80’e varan oranlarda iyileştirildiği gözlenmektedir (Panomruttanatuğ 2020).

Hatanın indirgenmesi ve konum kontrolünün doğruluğunun artması özellikle al ve yerleştir uygulaması yapılan manipülatörlerde önemli bir noktadır ve araştırmacıların

uzun süredir üzerinde durduğu araştırma konusudur. Bu işlemler için robot manipülatörün işlem uzayında hareket kontrol problemi manipülatörün uç-efektör konumunun istenilen konum yörüngesiyle asimptotik olarak eşlenmesini sağlayacak uygun eklem torklarının hesaplanmasına bağlıdır. Endüstriyel manipülatörlerde, dış konum döngülerine ek olarak iç bağlantı hız döngüleri kullanılarak elektromekanik eksen kontrolü sağlanmaktadır. Kelly ve Moreno, manipülatörlerin operasyonel uzayda hareket kontrolünün, dış döngünün kinematik kontrol yaklaşımına karşılık geldiğini ve iç döngünün küresel olarak kararlı olması koşuluyla oldukça genel bir yapıya sahip ortak hız kontrolörüne karşılık geldiği iki döngülü kontrol sistemi kullanmışlardır (Kelly and Moreno 2005). 2005 yılındaki bu çalışma (Kelly and Moreno 2005), 2013 yılında Soto ve Campa'nın çalışması ile ters kinematikli ortak bir kontrol şemasına göre çift döngülü hiyerarşik kontrol sisteminin operasyonel alan kontrolü için avantajlı olduğundan bahsetmektedirler (Soto and Campa 2013). Bu çalışmalar, sadece sistemin kararlılığına yönelik olmakta ama kararlılığın minimum gereklilik olduğunu, yörünge takibi, görevi yürütme süresi veya hareket esnasında harcanan enerji en aza indirmenin önemli olduğunu ifade edilmektedir. Optimal hareket kontrol yöntemleri, sayısal optimizasyon teknikleri, dış bükey optimizasyon teknikleri ve optimal kontrol teorisine dayalı optimizasyon teknikleri olarak üçe ayrılmaktadır. Sayısal optimizasyon teknikleri, Newton-Raphson yinelemesi, tahmin edici-düzeltilici entegrasyon, gradyan tabanlı, Euler ve yamuk yöntemleri gibi sayısal formülasyonlara dayanmaktadırlar. Dış bükey optimizasyon tabanlı hareket kontrol teknikleri anlık optimal çözüm bulmak için yerel optimizasyon kullanmaktadırlar. Optimal kontrol teorisine dayalı optimizasyon teknikleri de dinamik programlamaya dayalı hareket kontrol problemlerini çözmektedirler. Dinamik programlama teorisi, kayıp fonksiyonuna göre kontrol çözümünün optimalliği için gerekli ve yeterli olan Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) denkleminde yol açmaktadır. Literatürde sayısal optimizasyona dayalı çalışmalar, doğrusal olmayan optimizasyon çerçevesi, ANN tabanlı dışbükey optimizasyonu, ANN tabanlı uyarlamalı eleştiri yöntemi gibi çalışmalar robot eklem hız kontrolörlerini, girdilerin iç eklem hız döngüsünün gerçekleşmesi için kinematik kontrol döngüsü optimizasyonunu kullanmaktadırlar (Prakash et al. 2020). Hareket kontrol sistemi için iç dinamik tork döngüsünün artık çözünürlüğünü sağlamak için yerel optimizasyon şemaları, ANN tabanlı eklem tork optimizasyon şemaları ve yakın-optimal kontrolör ANN tabanlı uyarlamalı eleştiri formülasyonu altında manipülatörün dinamik tork kontrolünü içermektedir. Prakash et al. kapalı döngü kararlılığına ek olarak optimal maliyete küresel yakınsamayı Lyapunov hassasiyetiyle garanti etmek için çift döngülü

2. LİTERATÜR ÖZETİ

bir kontrol sistemi üzerinde çalışmaktadırlar (Prakash et al. 2020). Dış kinematik kontrolü için manipülatörden gelen geri bildirimine göre istenen hedefe ulaşılan yörünge üretimi ve kapalı formdaki analitik HJB denklemini kullanarak yörünge oluşturma probleminde minimum sarsıntı oluşması için kapalı döngü optimal kontrol yaklaşımını önermektedirler. Ayrıca önerilen kontrol yaklaşımı referans sinyalindeki veya manipülatör durumlarındaki değişikliklerden dolayı yörüngeyi güncelleyebilmektedir. AC optimal kontrol formülasyonu altında ANN tabanlı izleme kontrol şeması iç dinamik optimal kontrol döngüsü için kullanılmaktadır. Yaklaşık optimal kontrol yasası, sistem hata dinamiğiyle bağlantılı olarak HJB denkleminin çözülmesiyle elde edilmektedir. Önerilen kontrolörün etkinliğini göstermek için yedi eklemlili manipülatörü üzerinde çalışmışlar ve literatürdeki bazı yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Bu yöntemlerden ikisi yakın sonuçları bulunan, 2000 yılında kullanılmış olan Orocos'un Kinematik ve Dinamik Kütüphanesinde bulunan ters kinematik çözücü ile hızla keşfeden rastgele ağaç bağlantısı(RRT-Connect) ve 2015 yılında kullanılmış olan TRAC-İK ters kinematik çözücü ile RRT-Connect yöntemidir (Prakash et al. 2020). Diğer ikisi ise, yine yakın sonuçları bulunan 2015 yılında kullanılmış olan tekil değer filtresi ve 2018 yılında kullanılmış olan tekrarlayan sinir ağlarıdır (Prakash et al. 2020). İç döngüde manipülatörde yerleşik bulunan PID tabanlı dinamik kontrolör kullanılmıştır. Ortalama normalleştirilmiş yörünge maliyeti ve mutlak zaman çatırdama niceleyicisinin integrali açısından karşılaştırma yapıldığında, son poz düzenleme kontrolünde önerilen kontrolörün diğer kontrolörlere nazaran sırasıyla yüzde 40 ve yüzde 75 oranlarında daha etkin olduğu görülmektedir. Zaman endeksli yörünge izleme kontrolü açısından bakıldığında sırasıyla yüzde 75 ve yüzde 50 oranlarında daha etkin bir sonuç verdiği görülmektedir (Prakash et al. 2020).

İzleme performansı açısından Prakash et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi performans iyileştirmeleri çalışmaları odak noktalarındandır. İzleme performansına kötü etkileyen etkenlerin absorbe edilmesi çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Bu etkenler önceki çalışmalarda özellikle üzerinde durulan uç efektör konum kontrolünde titreşim bastırmadır. Bunun yanı sıra çevreden gelen harici rahatsızlıklar ve belirsizliklerde izleme performansını ve geçici tepkinin iyileştirilmesini kötü etkilemektedir. Ayrıca ortak aktüatörlerden birinde oluşan hata veya arızada performansı kötü etkilemektedir. Bu sebeple her türlü hatayı tolere etmek ve

manipülâtörün istenen görevi yapabilmesi için hata toleranslı/dayanıklı kontrolöre (FTC) ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif hata toleranslı kontrolör (AFTC) ve pasif hata toleranslı kontrolör (PFTC) olarak ikiye ayrılmaktadır (Anjum and Guo 2021). AFTC’de, arıza teşhisi gözlemcisi arızayı tahmin ederek kontrol girişi gelen tahmini geri beslemeye göre değişir bu sebeple hatayı gidermek gecikmekte ve bu da sistemin kararsızlığına yol açabilmektedir. PFTC’de ise hem normal hem de hatalı işlemlerde çalışan sağlam kontrolör kullanıldığından AFTC’ye göre daha hızlı hata çözümlemesi olur. Hataya dayanıklı kontrolörlere PID, PD, hesaplanmış tork kontrol (CTC), akıllı ve öğrenen kontrol, optimal kontrol ve sağlam kontrol örnek olarak gösterilmektedir. Geri adımlı kontrol yöntemi uyarlama yasasını dahil edebildiğinden dolayı belirsizler ve hatalar karşısında iyi izleme performansı gösterebilmektedir. Geleneksel geri adımlı kontrol yöntemi, sistem durumlarının sonlu zaman yakınsamasını garanti edememektedir. 1986 yılında tanıtılan sonlu-zaman kararlılığı yaklaşımı sistemin sonlu-zaman yakınsamasının yanı sıra yüksek hassasiyetli performansı sağlamaktadır (Anjum and Guo 2021). Wang ve Wen çalışmasında, uyarlanabilir geri adımlı kontrol yöntemini aktüatör arızalarını gidermek ve geçici performans garantisi için kullanmışlardır (Wang and Wen 2010). Kontrol enerjisi harcanırken ekstra masraf olmadan gelişmiş hata sonrası geçici performans sağlamak için Chakravarty ve Mahanta, geri adımlı yaklaşımı ikinci dereceden kayan kipli ile birleştirmişlerdir (Chakravarty and Mahanta 2016). Kesirli hesap teorisi sıradan entegrasyon ve farklılaşmayı kesirli düzene uydurmak için kurallar ve düzenlemeler getirmektedir. Kesirli hesap teorisinin, hafızada sınırlama olmadan daha önceki tepkileri yakalaması ve kesirli dereceden sistemin ve kesirli dereceden kontrolörlerin nadir özelliklerini çıkarma gibi avantajları bulunmaktadır. 2016 yılında önerilmiş olan kesirli dereceden PID kontrolü, yine 2016 yılında önerilmiş olan kesirli sıralı uyarlamalı kontrol ve 2010 yılında önerilmiş olan kesirli bulanık kontrol gibi sistemler kesirli hesap teorisi tabanlı kontrol sistemlerindedir (Anjum and Guo 2021). Kesirli kontrol yöntemlerinin, tamsayı yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiği ve bozulmaların ve diğer model belirsizliklere karşı daha sağlamlık gösterdiği gözlemlenmiştir. 2019 yılında, belirsiz dinamikleri olan demirsiz lineer senkron motor kontrolü için akıllı kesirli dereceden sıralı geri adımlama kontrolörü, yine 2019 yılında, orantısız kesirli dereceden ferro-rezonans sistemi için kesirli dereceden uyarlamalı geri adımlı kontrolör ve 2016 yılında, manipülâtörlerdeki belirsizlikler ve dış bozulmalara karşı kesirli dereceden uyarlanabilir geri adımlı kontrol kullanılmıştır (Anjum and Guo 2021). Anjum ve Guo çalışmalarında, manipülâtörlerde bulunan belirsizlikler, harici yük

2. LİTERATÜR ÖZETİ

bozulmaları ve aktüatör hatalarıyla başa çıkmak için sonlu zamanlı kesirli dereceden uyarlanabilir geri adımlı hata toleranslı kontrol yöntemini önermişlerdir (Anjum and Guo 2021). PUMA560 robotik manipülatörün ilk üç eklemi üzerinde deneyler ve simülasyonlar yapmış ve PID ve CTC kontrol yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Aktüatörlerde hata olmadığı varsayıldığı birinci senaryoda önerilen kontrol yönteminin diğerlerine göre konum takibi, izleme hatası ve yüksek yakınsama hızı açısından daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. İkinci senaryoda, birinci aktüatör ani bir ön gerilim hatasının uygulandığı ve ikinci ve üçüncü aktüatörlerden birine ani hata ve diğerine yüzde 60 kısmi kaybın olduğu hatanın uygulandığı iki farklı hatanın olduğu testler yapılmıştır. Her iki hatalı durumda da önerilen kontrol yönteminin PID ve CTC'ye göre konum izleme, izleme hatası ve yüksek yakınsama hızı açısından daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir (Anjum and Guo 2021).

Anjum ve Guo (2021)'nin çalışmasında karşılaşılan ve performansın iyileştirildiği aktüatörlerde oluşan hatalar gibi gerçek ortam robot uygulamalarındaki harici bozulmalara ve dinamik belirsizliklere karşı uyarlamalı kontrol, geri adımlı kontrol, sinir ağı kontrolü (NN), bulanık mantık kontrol (FLC) ve benzeri akıllı kontrol yöntemleri de uygulanmaktadır. Bu akıllı kontrol yöntemlerinden NN kontrol yöntemi, He et al. tarafından, dinamik belirsizliği olan robotta tam durum geri besleme kontrolünde kullanılmış ve doğru hız ölçümü için de çıkış geri besleme kontrolünde yüksek kazançlı gözlemci kullanmışlardır (He et al. 2015). 2017 yılında, hibrit kontrol yöntemlerinde, NN kontrol yöntemini dinamik belirsizliklerin üstesinden gelmesi için 2018 yılında da, çevre ile etkileşimi olan manipülatörlerde giriş doygunluğunu ayarlamak için NN kontrol yöntemini kullanılmıştır (Yu et al. 2020). NN yönteminin yanı sıra, FLC yönteminin kendi kendine öğrenme sistemlerinden biri olduğu ve belirsiz doğrusal olmayanların ve harici bozulmaların çözümünde kullanılabileceğini gösterilmiştir (Yu et al. 2020). Tong et al. doğrusal olmayan belirsizlikler için geri adımlı ve stokastik küçük kazancı olan FLC yöntemini kullanmışlardır (Tong et al. 2012). Li et al. dış iskelet kontrol için uyarlamalı FLC yöntemini ve doğrusal olmayan bozulmalar için bozulma gözlemcisini (DO) kullanmışlardır (Li et al. 2015). DO'nun son zamanlarda kullanılmasının nedeni ek sensör bilgisine ihtiyaç duymadan belirsiz harici bozulmalarda etkili olmasıdır. 2000 yılında yapılan çalışmada, sürtünme kompanzasyonunda doğrusal olmayan sistem teknikleri kullanmışlar ve DO yönteminin faydalı olduğunu kanıtlamışlardır (Yu et al. 2020). Girdi,

çıkı ve tam durum kısıtlamaları ile uyarlamalı kontrolün son zamanlarda önemi artmakta ve Zhang et al. (2018), yörünge izleme performansını iyileştirmek için düşündükleri çıkı kısıtlaması için bariyer Lyapunov fonksiyonları (BLF) kullanmışlar ve DO ile bilinmeyen harici bozulmaları telafi etmişlerdir. Kısıtlı kontrol yöntemlerinde uygun BLF formu seçilmesi önemli bir noktadır ve en çok kullanılanlardan biri olan zamanla değişen asimetric BLF (TABLF), Liu et al. tarafından, kısıtlama aşımalarının olmaması için geri adımlı yöntemin her kullanılmıştır (Liu et al. 2016). Yu et al. doğru yörünge takibi ve tam durum kısıtlamaları için FLC yöntemiyle teget BLF'nı (tBLF) birleştirmiş ve DO'yu da doğrusal olmayan bozukluklar için kullanmışlardır (Yu et al. 2020). Önerilen kontrol yöntemini orantılı türev (PD) kontrol yöntemi ve model tabanlı (MB) kontrol yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Önerilen yöntemin kısıtlamaları çok az aştığı, hızlı yükselme sergilediği ve küçük kararlı durum hatası ile kararlılığı garanti ettiği gözlemlenmiştir. Yörünge izleme konusunda MB yöntemiyle benzer olarak iyi performanslar sergilemişlerdir. Kısıtlamaların aşılması önerilen yöntemde PD yönteminden daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca PD yöntemi yörünge izleme ve hız takibi konusunda önerilen yöntemde göre daha kötü performans sergilemiştir (Yu et al. 2020).

Manipülatorlerde bu çalışmadaki gibi yüksek hızlı uygulamalarda model tabanlı olmayan PD kontrol gibi yöntemler görüldüğü gibi daha kötü performanslar sergilemektedirler. PID kontrol yöntemi de PD kontrol yöntemi gibi model tabanlı olmayan geleneksel kontrol yöntemlerindedir. PID kontrol yönteminde, eklemler bağımsız ikinci dereceden doğrusal sistem ve birleştirilmiş eklemler dış etki olarak kabul edilen bu kontrol algoritması basit ve tasarımı kolaydır. Düşük hız ve kararlı çalışma koşulları gibi durumlarda kontrol sisteminin doğruluğunu karşılamaktadır (Zaiwu et al. 2021). Manipülatorler karmaşık ve doğrusal olmayan sistemler olduğundan geleneksel PID kontrolü de tıpkı PD kontrolünde de görüldüğü gibi yüksek hızlı ve hassasiyetli kontrol konusunda başarılı değillerdir. Manipülatorde kontrol teknolojisinin gelişmesiyle beraber bulanık kontrol, optimal kontrol, dinamik yüzey kontrolü, kayan mod kontrolü, kesirli dereceden kontrol, sağlam sinirsel kontrol, ileri besleme tork kontrolü gibi kontrol sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Aralarında ileri beslemeli tork kontrolü en sezgisel doğrusal olmayan ve manipülator ters dinamiklerine dayanan etkili bir kontrol yöntemidir bu yüzden ters dinamik kontrol olarak da adlandırılır. Modelsiz kontrol yöntemlerine göre genellikle yüksek izleme doğruluğu, düşük geri besleme kazanç katsayısı, uyumluluk

kontrolüne yüksek uyum ve düşük enerji tüketimi konularında daha iyi performans göstermektedir. Ters dinamik kontrol sistemi için ileri besleme torkunun tahmini için ters dinamik model oluşturulması gerekmektedir (Zaiwu et al. 2021). Araştırmalarda genel olarak rijit eklemli manipülatör kullanılsa da önemli esnek özelliklere sahip esnek eklemli manipülatörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Eklem esnekliğinin etkisi manipülatörlerde mekanik rezonansa yol açabilir ve servo kontrol sisteminin kararlılığını ve izleme doğruluğunu etkileyebilmektedir. Rijit eklemli manipülatörlere kıyasla esnek eklemli manipülatörler karmaşıklık, yüksek doğrusal olmama ve büyük miktarda hesaplama gibi sorunları bulunmaktadır. Esnek eklemli manipülatörün ters dinamik modellemesi, verilen yörünge altında yüksek dereceli eklem açısı ve eklem sürüş torkuna ihtiyaç duymaktadır. 2004 yılında, esnek eklemlerde ters dinamik modellemede yüksek dereceli dinamik denklemlerini oluşturmak için Langrange teorisi tabanlı bir yöntem önerilmiş ama yöntemin seçilen koordinatlar ve yüksek dereceli türetme konusunda karmaşık hesaplama bağlı kendine has dezavantajları olduğu görülmüştür (Zaiwu et al. 2021). Bianco, yüksek dereceli kinematik ve dinamik türetme konusunda daha verimli olduğunu düşündükleri için ve aktüatör torklarının türevlerini hesaplamak için Newton-Euler yöntemine bağlı öz yenilemeli bir yöntem önermişlerdir (Bianco 2009). Buondonno ve De Luca, esnek manipülatör için önerdikleri yöntemde kullandıkları Denavit-Hartenber (D-H) tekniğinin yüksek dereceli kinematik ve dinamik türetme açısından oldukça karmaşık olduğu gözlemlenmiştir (Buondonno and De Luca 2015). Modern geometrik matematiğin analiz aracı olan Lie grubu ve Lie cebirinin robot kinematiği ve dinamiğinde uygulanması giderek artmaktadır. Tüm olası katı cisim hareketlerinin dönüşüm uzayı Lie grubunun elamanıdır ve Lie cebiri, Lie grubunun birim elemanın teğet uzayına denmekte ayrıca 1995 yılında, Lie grubu rijit eklemli manipülatör dinamiğinin formüle edilmesi için kullanılmıştır (Zaiwu et al. 2021). Önceki çalışmadan yola çıkan Yang et al. yılındaki çalışmalarında esnek eklemlerin ters dinamik analizi için Lie grubu tabanlı öz yenilemeli Newton-Euler yöntemi kullanmışlar ama çalışmalarını manipülatör ters dinamik kontrolü için uygulamamışlardır (Yang et al. 2018). Cai et al. esnek manipülatörlerde, dönüş hatasını indirgeyen, doğrusal olmayan ölü bölgeyi azaltan ve kontrol performansının iyileştirilmesi sınırlı olan saf geri besleme kontrolü olan çift hızlı kapalı döngüye dayalı kontrol yöntemi önermişlerdir (Cai et al. 2016). Geri besleme kontrolleri tork tahmini için doğru dinamik modele ihtiyaç duyduğundan yöntemin performansı düşük kalmıştır. Manipülatör dinamik modeli genellikle uzman alan bilgisinden türetildiği için bu modellemeye analitik modelleme de denmektedir. Kim ve Croft, esnek manipülatörde

tork ileri besleme kontrolünü analitik dinamik modele dayandırmışlar ama doğru analitik dinamik modeli kurulması zordur (Kim and Croft 2017). 2007 yılında, doğru dinamik model için nominal dinamik modeli değiştirmek için kullanılan tanımlama yöntemlerinden yola çıkarak manipülatörün uyarma yörünge parametrelerini nominal dinamik modele uydurmak için farklı optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır (Zaiwu et al. 2021). Schaal et al. simülasyon ve deney yoluyla manipülatörün dinamik modelinin tahmini için yerel ağırlık haritalama regresyonu yöntemini kullanmış ve tahmin edilen dinamik modeli ileri beslemeli kontrol sisteminde kullanmıştır (Schaal et al. 2002). Manipülatörler parametre belirsizliklerine ve parametre dışı belirsizliklere de sahip oldukları için analitik modellemenin ve parametre tanımlamanın dinamik model için doğruluğu sınırlıdır. Bu yüzden, Zeinali ve Notash, kayan kipli kontrolde modellenmemiş dinamikleri, dış bozucuları ve zamanla değişen parametreler nedeniyle belirsizlik tahmincisini kullanmıştır (Zeinali and Notash 2010). Makine öğrenimi kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir ama tamamen veriye dayalı yöntemler yorumlanamaz ve çalışma koşulları değiştiğinde hatalardan zarar görebilmektedir. Bu nedenle Guo et al. 2019 yılında, besleme tahrik sisteminin dinamik modeli için veriye dayalı modellemenin yanında hibrit analitik yöntemini kullanmışlardır (Guo et al. 2019). Yüksek dereceli kinematik ve dinamik türetme hesaplanmasının karmaşık olması ve doğru dinamik modelin kurulmasının esnek manipülatörün ters dinamik kontrolü için temel iki problem olduğu görülmektedir. Bu nedenle Zaiwu et al. (2021), bu problemlere karşı hibrit dinamik modele dayalı ters dinamik kontrol yöntemi önermişlerdir. Manipülatörün analitik ters dinamik modeli, Lie grubu ve Lie cebirine dayalı tabanlı oluşturulmuştur. Radyal tabanlı fonksiyon (RBF) sinir ağı modeli analitik ters model ile birleştirilmiş ters dinamik kontrol yöntemi önerilmiştir. Geleneksel ters dinamik modelin tamamen doğru olduğu yani ters dinamik kontrol doğru modelle (IDC-AM), tahmini dinamik parametrelerin yüzde 90 oranında doğru olduğu yani ters dinamik kontrol hatalı modelle (IDC-IM) ve hatalı model RBF sinir ağı modeli yani ters dinamik kontrol hibrit modelle (IDC-HM) olarak üç farklı simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Ters dinamik modelin tahmini parametreleri hatalı olduğunda düz yörünge izleme hassasiyetinin azaldığı ama hatalı modele hibrit model uygulandığında düz yörünge izleme hassasiyetinin arttığı görülmüştür. Daire yörünge izleme hassasiyetine bakıldığında hibrit modeli yine başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum mutlak hata (MAE) ve ortalama karekök hata (RSME) olarak bakıldığında düz yörünge izlemede ters dinamik modelin MAE'si 1.15 mm ve RSME'si 0.81 mm iken hibrit modelde MAE 0.54 mm ve RSME 0.34 mm olarak

2. LİTERATÜR ÖZETİ

çıkıştır. Daire yörünge izlemede ters dinamik modelin MAE'si 0.79 ve RSME'si 0.51 iken hibrit modelde MAE 0.57 ve RSME 0.2 olarak çıkıştır. Önerilen yöntemin dinamik modelin yanlışlığı sebebiyle oluşan performans düşüklüğünün üstesinden geldiği gözlemlenmektedir (Zaiwu et al. 2021).

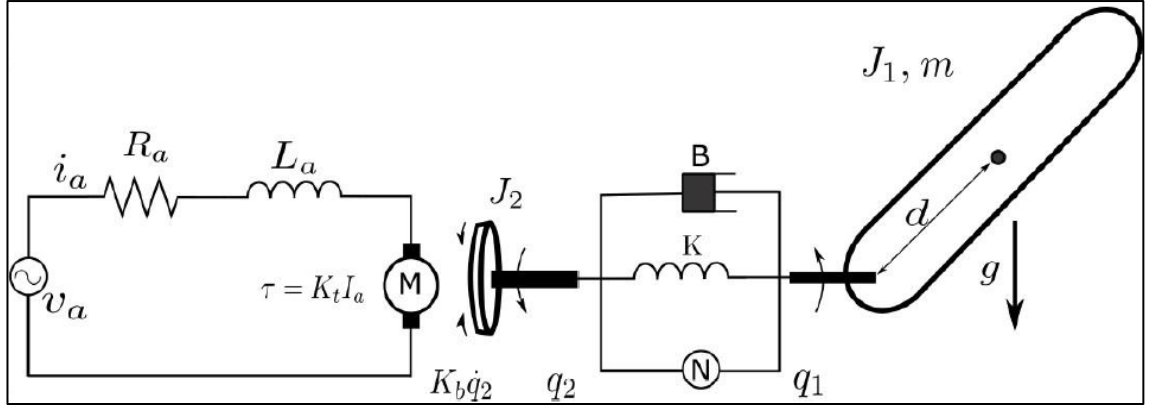


3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, son dönemde araştırmacılar tarafından ilgi çeken ve çalışılan uç kontrol yönteminin esnek manipülatörlere nasıl uygulandığı detaylıca incelenmiştir.

3.1. Bozulma Gözlemcisi Tabanlı İntegral Kayan Kipli Kontrol

Alam et al. (2019), yörünge takibini sağlamak için aktüatör dinamiklerini ve uyumsuzluk bozulmalarını engellemek adına bozulma gözlemcisi (DO) tabanlı integral SMC üzerine çalışmışlardır. Kullandıkları esnek eklem manipülatörü, girdisi, gerilim olan DC motorla çalıştırılan, çıktısı x ekseninde hareket eden uç efektör konumundan oluşan ve manipülatör bağlantısının bağlantı miline bağlı olan elektromekanik bir sistemdir. Eklemde, aktüatörün mili, esnekliğe sahip dişli zinciriyle manipülatör bağlantısına bağlanmakta ve bu eklemdeki esneklikte uç efektörün istenen konumu izleme isteğine karşı istenmeyen titreşimler üretmektedir. Kullanılan manipülatörün elektriksel devre görünümü aşağıdaki Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1. Esnek eklem manipülatörünün elektriksel blok şeması

Elektromekanik sistemin dinamiği Euler-Lagrange denklemi kullanılarak aşağıda ifade edildiği gibi modellenmektedir.

$$J_1 \ddot{q}_1 + mgh \sin(q_1) + k(q_1 - q_2) = 0 \quad (3.1)$$

$$J_2 \ddot{q}_2 - k(q_1 - q_2) + B_d \dot{q}_2 = k_t I_a \quad (3.2)$$

$$u = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + K_b \dot{q}_2 \quad (3.3)$$

Sistem parametrelerinin açıklaması Tablo 3.1'de listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Sistem parametreleri ve değerleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim	Parametre	Sembol	Değer	Birim
Bağlantı Kütlesi	m	1	kg	Bağlantı Uzunluğu	h	0.5	m
Dişli Oranı	N	1	-	Yerçekimi İvmesi	g	10	m/s ²
Armatür Direnci	R_a	1.6	Ω	Bağlantı Atalet Momenti	J_1	1	kg.m ²
Motor Tork Sabiti	k_t	0.2	N.m/A	Motor Mili Atalet Momenti	J_2	0.3	kg.m ²
Geri EHG Sabiti	B	0.001	N.m.s/rad	Armatür Endüktansı	L_a	0.001	H
Eklem Sertliği	K	14	N.m/rad	Kontrol Girişi	u	-	V

İki adet varsayım öne sürmektedirler. Birinci varsayım (3.1), (3.2) ve (3.3)'teki bazı parametreler zaman değişkeni içermektedir. Bu sebeple denklem;

$$J_{2_d}(\cdot) = J_2 + \Delta J_2(t), B_{-d}(\cdot) = B + \Delta B(t) \text{ ve } k_{t_d}(\cdot) = k_t + \Delta k_t(t) \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır. Bu varsayımda açıklanan sistem parametreleri, nominal ve belirsiz parçalar bütünüdür ve pratik uygulamalarda varsayım gayet uygulanabilir. Çevresel etkilerden dolayı nominal parametreler belirsiz davranışlar sergilemekte ve bu yüzden sistemin dinamikleri birleştirilmektedir.

Manipülâtörün doğrusal olmayan dinamik denklemlerin durum uzay formu aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.5)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{mgh}{J_1} \sin(x_1) - \frac{k}{J_1} (x_1 - x_3) \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (3.7)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{k}{J_2} (x_1 - x_3) - \frac{B}{J_2} x_4 + \frac{k_t}{J_2} x_5 + \zeta(x, t) \quad (3.8)$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{R_a}{L_a}x_5 - \frac{k_b}{L_a}x_4 + \frac{1}{L_a}u \quad (3.9)$$

$$y = x_1 \quad (3.10)$$

$$[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, I_a] \quad (3.11)$$

Bu sistemde x değerleri sırasıyla, manipülatör bağlantısının açılmal konumunu ve açılmal hızını, motor milinin açılmal konumunu ve açılmal hızını ve motor armatür akımını temsil eder. y sistem çıkışıdır ve $\zeta(x, t)$ ise parametrik varyasyon, modellenmemiş dinamikler ve harici rahatsızlıkları ifade eder.

İkinci varsayım, Denklem (3.5) – (3.10)'daki uyumsuzluk pertürbasyonu normla sınırlıdır ve $\zeta^* = \lim_{t \rightarrow \infty} |\zeta(x, t)|$ sağlamalıdır, burada ζ^* uyumsuzluk belirsizliğinin üst sınırıdır.

Literatürde raporlanan sayısal analizler, geleneksel SMC sisteminin, uyumsuz belirsizliğe en duyarlı yapıda olduğu ve şiddetli kararlı durum hatasıyla sonuçlandığı, bu sebeple de sistem yörüngelerini istenen sapmaya zorladığını doğrulamaktadır. Integral SMC ise, sistemin nominal kontrol performansından ödün vererek uyumsuz belirsizliği sağlam bir şekilde gidermektedir. DO tabanlı SMC, sistemin hem nominal performansını sürdürmesini hem de bozulmaları önlemek için kullanılan doğrusal olmayan kontrol yöntemidir. Bu yöntem, kontrol denklemindeki parametreleri, eşleşmeyen belirsizliğin anlık değerini dahili durum gözlemcisi ile tahmin ederek güncellemektedir. (3.5)-(3.11)'da formüle edilen sistem genel olarak;

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u + g_2\zeta(x, t) \quad (3.12)$$

$$y = h(x) \quad (3.13)$$

$x \in \mathcal{R}^n$ durum matrisidir, $\zeta(x, t)$ bilinmeyen bir sınırlı belirsizlik vektörüdür, u ve y sırasıyla giriş ve çıkış değişkenleridir, $f(x)$, $g(x)$, ve $h(x)$ doğrusal olmayan düzgün fonksiyonlardır. Bozulmanın etkisini kaldırmak için DO ile yapılan bozulmanın tahmini versiyonu gereklidir.

$$\dot{p} = -lg_2p - l(g_2lx + f(x) + g_1(x)u) \quad (3.14)$$

$$\hat{\zeta} = p + lx \quad (3.15)$$

Burada p gözlemcinin iç durumu, l gözlemci kazancı ve $\hat{\zeta}$ tahmini bozulmadır. Sistem için kayan manifold aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} s = & 4\ddot{z}c + 6\dot{z}c^2 + 4\dot{z}c^3 + zc^4 - \\ & \frac{mgh}{J_1} \cos(x_1)\dot{x}_2 + \frac{mgh}{J_1} \sin(x_1)x_2^2 + \frac{mghk}{J_1^2} \sin(x_1) + \\ & + \frac{k^2}{J_1^2} (x_1 - x_3) + \frac{k^2}{J_1J_2} (x_1 - x_3) - \frac{Bk}{J_1J_2} x^4 + \frac{kk_t}{J_1J_2} x_5 + \frac{k}{J_1} \hat{\zeta}(x, t) \end{aligned} \quad (3.16)$$

(3.16)' in türevini alıp hata dinamikleri değiştirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\dot{s} = v + \frac{kk_t}{J_1J_2L} u + \left(\frac{4ck}{J_1} - \frac{Bk}{J_1J_2} \right) \zeta(x, t) + \frac{k}{J_1} \dot{\hat{\zeta}}(x, t) \quad (3.17)$$

Burada v denklemini basitleştirmek için kullanıldı ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} v = & c^4x_2 + 4c^3\dot{x}_2 + 6c^2\ddot{x}_2 + \\ & 4c \left[\frac{mgh}{J_1} \sin(x_1)x_2^2 - \frac{mgh}{J_1} \cos(x_1)\dot{x}_2 + \frac{mghk}{J_1^2} \sin(x_1) + \frac{k^2}{J_1^2} (x_1 - x_3) + \right. \\ & \left. \frac{k^2}{J_1J_2} (x_1 - x_3) - \frac{Bk}{J_1J_2} x^4 + \frac{kk_t}{J_1J_2} x_5 \right] - \frac{mgh}{J_1} \cos(x_1)\ddot{x}_2 + \frac{mgh}{J_1} \sin(x_1)x_2\dot{x}_2 + \\ & \frac{2mgh}{J_1} \sin(x_1)x_2\dot{x}_2 + \frac{mgh}{J_1} \cos(x_1)x_2^3 + \frac{mghk}{J_1^2} \cos(x_1)x_2 + \\ & \frac{k^2}{J_1^2} (x_2 - x_4) + \frac{k^2}{J_1J_2} (x_2 - x_4) - \frac{Bk}{J_1J_2} \left[\frac{k}{J_2} (x_1 - x_3) - \frac{B}{J_2} x_4 + \frac{k_t}{J_2} x_5 \right] + \\ & \frac{kk_t}{J_1J_2} \left[-\frac{R}{L} x_5 - \frac{k_b}{L} x_4 \right] - c^4\dot{x}_d - 4c^3\ddot{x}_d + 6c^2\ddot{\ddot{x}}_d - 4c \frac{d}{dt} \ddot{x}_d - \frac{d}{dt} \ddot{\ddot{x}}_d \end{aligned} \quad (3.18)$$

Uyumsuzluk belirsizlik etkisinde sistemin istenen yörüngeyi izlemesi için gerekli olan, k_1 ve k_2 'nin anahtarlama kazancı olduğu denklem aşağıdaki gibidir:

$$u = \frac{LJ_1J_2}{kk_t} \left[-v - k_1 \text{sign}(s) - k_2 s + \left(\frac{4ck}{J_1} - \frac{Bk}{J_1J_2} \right) \hat{\zeta}(x, t) \right] \quad (3.19)$$

(3.19)'daki u değeri (3.17)' da yerine yazılınca aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{s} = -k_1 \text{sign}(s) - k_2 s + \left(\frac{4ck}{J_1} - \frac{Bk}{J_1 J_2} \right) \hat{\zeta}(x, t) + \frac{k}{J_1} \dot{\hat{\zeta}}(x, t) \quad (3.20)$$

$\tilde{\zeta}(x, t)$ tahmini ve orijinal bozulmalar arasındaki farktır, yani $\tilde{\zeta}(x, t) = \hat{\zeta}(x, t) - \zeta(x, t)$.

Üçüncü varsayımda ise bozulmanın türevi sınırlıdır ve $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\zeta}(z, t)$ koşulunu sağlamalıdır.

Varsayım 4'te $\tilde{\zeta}(x, t)$, tahmini bozulma hatası normla sınırlıdır ve $\tilde{\zeta}^*(x, t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sup |\tilde{\zeta}(x, t)|$ ile verilir.

Öngörü 1'de (3.12) ve (3.13)'te sistemi varsayım 3 ve 4'ün karşıladığı varsayıldığında bozucu tahmin hatası $\tilde{\zeta}(x, t)$ asimptotik olarak sifıra yakınsar:

$$\dot{\tilde{\zeta}}(x, t) + lg_2 \tilde{\zeta}(x, t) = 0 \quad (3.21)$$

Gözlemci kazancı l , $lg_2 > 0$ olursa bu koşul geçerli olmaktadır.

Bozulma gözlemcisi tasarımı için, (3.14) ve (3.15)' deki denklemler aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\hat{\zeta} = p + lx \quad (3.22)$$

(3.22)' in zamana göre türevi alınarak (3.12)-(3.15) (3.23)' teki gibi değiştirilmektedir.

$$\dot{\zeta} = -lg_2p - l(g_2(x)lx + f(x) + g_1(x)u) + l(f(x) + g_1(x)u + g_2(x)\zeta(x, t)) \quad (3.23)$$

$\dot{\zeta} = \dot{\tilde{\zeta}}$ olduğundan, (3.23)' nin çözümü aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\tilde{\zeta}(t) = \tilde{\zeta}(0)e^{-lg_2t} \quad (3.24)$$

(3.24)' de, eğer $lg_2 > 0$ seçilirse, gözlemci kazancı 1, bozucu tahmin hatası asimptotik olarak sifıra yakınsadığı iyi bilinmektedir. Aşağıda belirtilen Lyapunov aday fonksiyonu ile kapalı çevrim kontrol sisteminin kararlılığını analiz edilebilmektedir:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (3.25)$$

Bu Lyapunov aday fonksiyonunun zaman göre türevi (3.20) ve (3.21)' deki denklemde yerlerine yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{V} \leq -k_2|s|^2 - |s| \left(k_1 - \left| \left(\frac{Ack}{J_1} - \frac{Bk}{J_1J_2} - \frac{lg_2k}{J_1} \right) \right| |\tilde{\zeta}(x, t)| \right) \quad (3.26)$$

k_1 ve k_2 ayar parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$k_2 > 0, k_1 > \left| \left(\frac{Ack}{J_1} - \frac{Bk}{J_1J_2} - \frac{lg_2k}{J_1} \right) \right| |\tilde{\zeta}^*(t)| \quad (3.27)$$

Kontrol yasası ve dahili gözlemciye kazanımlar istenen koşulları karşıladıkları sürece, tasarlanan kontrol yöntemi, sistemin yörüngesinin asimptotik kararlı olduğunu açıkça doğrulamaktadır.

3.2. Sonlu Zamanlı Kesirli Dereceden Uyarlanabilir Geri Adımlı Hata Toleraanslı Kontrol

Anjum ve Guo (2021) makalelerinde sonlu zamanlı kesirli dereceden uyarlanabilir geri adımlı hata toleranslı kontrol yöntemini kullanmışlardır. Riemann-Liouville (RL) ve Caputo tanımları son zamanlarda yaygın olarak kullanılan kesirli dereceden hesaplamalardandır. $f(t)$ fonksiyonunun RL λ . dereceden integrali aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$${}_{t_0}D_t^{-\lambda}f(t) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\lambda}} d\tau \quad (3.28)$$

Burada, t_0 ve t çalışma limitleri ve $\Gamma(\cdot)$ gama fonksiyonudur. RL'nin λ . dereceli türevi aşağıdaki gibidir:

$${}_{t_0}D_t^\lambda f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\lambda)} \frac{d^n}{dt^n} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\lambda-n+1}} d\tau \quad (3.29)$$

Caputo'nun λ . dereceden türevi aşağıdaki gibidir:

$${}^C D_t^\lambda f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\lambda)} \int_{t_0}^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\lambda-n+1}} d\tau \quad (3.30)$$

Burada C , mühendislik uygulamalarında çokça kullanılan Caputo türevini göstermektedir. Aşağıdaki özellik, Caputo türevi için geçerlidir.

$${}^C D_t^\lambda ({}_{t_0}D_t^{-\lambda}f(t)) = f(t) \quad (3.31)$$

Önerme 1: Otonom olmayan kesirli dereceden sistem aşağıdaki gibidir:

$${}_{t_0}D_t^\alpha v(t) = f(t, v) \quad (3.32)$$

Denge noktası $v = 0$ dır. Yukarıdaki denklemde, $\alpha \in (0,1)$ ve $f(t, v)$ Lipschitz koşulunu sağlamaktadır. Eğer aşağıdaki koşulları sağlayan bir Lyapunov adayı bulunursa:

$$\alpha_1 \|v\|^b \leq V(t, v(t)) \leq \alpha_2 \|v\| \quad (3.33)$$

$$\dot{V}(t, v(t)) \leq -\alpha_3 \|v\| \quad (3.34)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ve b pozitif sabit değerlerdir. Sistemin $v = 0$ denge noktası Miattag-Leffler'e göre kararlı olmaktadır. Miattag-Leffler kararlılığı, asimptotik kararlılık anlamına gelmektedir.

Önerme 2: $f(t)$ ' nin integrallenebilir olduğunu düşündüğünde $t_1 \in (0,1)$ ve G_1 ' in sıfırdan büyük bir sabit olduğunda $|f(t_1)| = G_1$ varsayıldığında, ${}_0D_t^{-\lambda} |f(t)| \geq S, S = G_1 t_1^\lambda / \Gamma(1 + \lambda)$ için geçerlidir.

Manipülâtörün dinamik modeli aşağıdaki gibidir:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - B(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - \ell_d - F(\dot{q})) + \kappa(t - T_f)\Theta(q, \dot{q}, \tau) \quad (3.35)$$

Burada $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ pozitif ve kesin olan atalet matrisini, $q \in \mathbb{R}^n$ konum vektörünü, $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ ve $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla hız vektörünü ve ivme vektörünü göstermektedir. $\tau \in \mathbb{R}^n$, aktüatör girişlerini, $B(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, merkezci ve koryolis kuvvetlerinden oluşan bir matrisi göstermektedir. $G(q) \in \mathbb{R}^n$ yerçekimi vektörünü, $F(\dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ sürtünme matrisini, $\ell_d \in \mathbb{R}^n$ ise yük bozulma matrisini gösterir. $\Theta(q, \dot{q}, \tau) \in \mathbb{R}^n$, arızaların sistem üzerindeki etkilerini, $\kappa(t - T_f) \in \mathbb{R}^n$, arızaların zaman profilini ve T_f , arızaların meydana geldiği zamanı gösterir. Robot dinamiğinde, hatanın zaman profilinin matris formu aşağıdaki gibidir:

$$\kappa(t - T_f) = \text{diag}\{\kappa_1(t - T_f), \kappa_2(t - T_f), \dots, \kappa_n(t - T_f)\} \quad (3.36)$$

κ_i , i . durum denklemindeki hatanın etkilerini belirttiğinde hatanın zaman profili aşağıdaki gibidir:

$$\kappa_i(t - T_f) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < T_f \\ 1 - e^{-\varsigma_i(t - T_f)} & \text{if } t \geq T_f \end{cases} \quad (3.37)$$

Bilinmeyen hataların oluşma hızını gösteren ς_i 'nin küçük değeri, fayın yavaş geliştiğini gösterir; bu hataya başlangıç hatası olarak adlandırılmakta ve ς_i 'nin büyük değerinde, κ_i bir adım fonksiyonu haline gelmekte ve oluşan hataya ani hata denilmektedir. Aktüatörlerde küçük hata miktarı bile düşük izleme performansına veya sistemi kararsızlığına neden olabilmektedir. Aktüatör arıza ile karşılaştığında eklemlere etki eden tork aşağıdaki gibidir:

$$\tau(t) = u_0(t) + \mu(t) \quad (3.38)$$

$u_0(t)$ istenen kontrol torku ve $\mu(t)$ aktüatör hatasıdır. (3.35)' deki $\Theta(q, \dot{q}, \tau)$, aktüatör hatası $\mu(t)$ 'yi aşağıda $\Theta(q, \dot{q}, \tau) = M^{-1}(q)\mu(t)$ olarak kullanıldığında dinamik model aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(u) + c(q, \dot{q}) + \chi \quad (3.39)$$

Burada $c(q, \dot{q}) = M^{-1}(q)(-B(q, \dot{q})\dot{q} - G(q))$ robotik manipülatörün bilinen dinamiklerini ve $\chi = M^{-1}(q)(-\ell_d - F(\dot{q})) + \kappa(t - T_f)\Theta(q, \dot{q}, \tau)$ bilinmeyen belirsizlikleri ve hataları ifade etmektedir. Durum değişkenleri $x_1 = q$ ve $x_2 = \dot{q}$ olarak tanımlanırsa (3.39) durum uzayı formunda aşağıdaki gibi yazabilmektedir:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)(u) + c(x_1, x_2) + \chi \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3.40)$$

Burada y çıkış vektörü ve $u = \tau$ kontrol girişidir.

$\tilde{q} = x_q - q_d$, q_d 'nin istenen yörüngeyi temsil ettiği izleme hatasını temsil etsin. Bu makalenin temel amacı, sonlu zamanda q_d için sıfır izleme hatası elde edecek şekilde bir kontrolör u tasarlamaktır.

Geri adım yaklaşımı, (3.40)'daki denklemde etkin kontrol girdisi bulmak için kullanılmakta ve tasarım prosedürüne göre değişkenler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \bar{q} \\ \sigma_2 &= \dot{\bar{q}} - \Psi_1(\sigma_1)\end{aligned}\quad (3.41)$$

σ_1 ve σ_2 'nin zamana göre türevini alındığında

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_1 &= \sigma_2 + \Psi_1(\sigma_1) \\ \sigma_2 &= M^{-1}(x_1)(u) + c(x_1, x_2) + \chi - \ddot{q}_d - \Psi_1(\sigma_1)\end{aligned}\quad (3.42)$$

(3.42)'deki durum denklemleri iki alt sistem olarak gösterilmekte, ilk alt sistem:

$$\dot{\sigma}_1 = \sigma_2 + \Psi_1(\sigma_1)\quad (3.43)$$

Sistemin kararlılığını kanıtlamak için $V = \|X\|_1$ gibi bir Lyapunov eşitliği kullanıldığında yeni vektörü $X = [\sigma_1]$ olarak tanımlandığında Lyapunov adayı aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$V_1 = \|X\|_1 = |\sigma_1|\quad (3.44)$$

V_1 'in zamana göre türevini alındığında:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \dot{\sigma}_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) \\ &= (\sigma_2 + \Psi_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_1)\end{aligned}\quad (3.45)$$

V_1 'e dayalı olarak aşağıdaki denklemler ortaya çıkmaktadır.

$$\Psi_1(\sigma_1) = -k_1 \sigma_1\quad (3.46)$$

$$\sigma_2 = -k_2 \operatorname{sgn}(\sigma_1) - k_3 \operatorname{sgn}(\sigma_1) {}_0D_t^{-\lambda} |\sigma_1|\quad (3.47)$$

k_1 , k_2 ve k_3 pozitif sabitleri temsil etmekte ve (3.46) ve (3.47) kullanılarak (3.45) denklemini (3.48)'deki gibi olmaktadır.

$$\dot{V}_1 = -k_1|\sigma_1| - k_2 - k_3 {}_0D_t^{-\lambda}|\sigma_1| \quad (3.48)$$

Önerme 2'deki denklem kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilmektedir:

$$\dot{V}_1 \leq -k_1|\sigma_1| - k_2 - k_3 S \quad (3.49)$$

Yeni bir pozitif sabit terim seçildiğinde $k = \min(k_1, v)$, burada $v = k_2 + k_3 S$ olmaktadır.

$$\dot{V}_1 \leq -k|\sigma_1| - k \quad (3.50)$$

Bu denklemde, Önerme 1'in koşulları karşılandığında, ilk alt sistem kararlılığı sonucuna varılmaktadır.

İkinci alt sistem, (3.42)' de verilen sistem bütünüün kararlılık analizini yapmak için, Açıklama 1'e dayalı Lyapunov adayı aşağıdaki gibi önerilmektedir:

$$V_2 = \|X\|_1 = |\sigma_1| + |\sigma_2| \quad (3.51)$$

X vektörü, $X = [\sigma_1 \ \sigma_2]$ olarak tanımlanır ve V_2 ' nin zamana göre türevi aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & (\sigma_2 + \Psi_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_1) + (M^{-1}(x_1)(u) \\ & + c(x_1, x_2) + \chi - \ddot{q}_d - \dot{\Psi}_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_2) \end{aligned} \quad (3.52)$$

Bu denklemde $\Psi_1(\sigma_1) = -k_1\sigma_1$ denildiğinde aşağıdaki ifade elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1|\sigma_1| + \sigma_2 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + (M^{-1}(x_1)(u) \\ & + c(x_1, x_2) + \chi - \ddot{q}_d - \dot{\Psi}_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_2) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Bu denkleme göre, kesirli dereceden geri adımlı kontrolör (3.54)' deki gibi tasarlanmaktadır.

$$u = M(x_1)[u_n + u_a] \quad (3.54)$$

u_n ve u_a aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$u_n = -[c(x_1, x_2) - \ddot{q}_d - \dot{\Psi}_1(\sigma_1)] \quad (3.55)$$

$$u_a = -[\Pi + |\sigma_2| \operatorname{sgn}(\sigma_1) + k_2 \sigma_2 + k_3 \operatorname{sgn}(\sigma_2) + k_4 \operatorname{sgn}(\sigma_2) {}_0D_t^{-\lambda} |\sigma_1|] \quad (3.56)$$

Π , $|\chi| \leq \Pi$ olarak ve k_4 pozitif sabit olarak seçilmektedir. (3.53)-(3.56) ile aşağıdaki denklem oluşmaktadır:

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 |\sigma_1| - k_2 |\sigma_2| - k_3 - k_4 {}_0D_t^{-\lambda} |\sigma_1| \quad (3.57)$$

Burada Önerme 2 kullanıldığında aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 |\sigma_1| - k_2 |\sigma_2| - k_3 - k_4 S \quad (3.58)$$

$v = k_3 + k_4 S$ olduğunda yeni pozitif sabit $k = \min(k_1, k_2 v)$ olur ve (3.58)'de denklem aşağıdaki gibi oluşur:

$$\dot{V}_2 \leq -k |\sigma_1| - k |\sigma_2| - k \leq -k(|\sigma_1| + |\sigma_2|) \quad (3.59)$$

Bu denklem, Önerme 2'deki koşulları sağlamakta ve bu nedenle tasarlanan kontrolör (3.53)-(3.56), (3.42)' de asimptotik kararlılığı sağlamaktadır.

(3.53)-(3.56)'daki kontrolör tasarlanırken, üst sınır değeri Π olan bilinmeyen χ 'nin önceden bilindiği varsayılmakta ama pratikte, hataların ve diğer belirsizliklerin sınır değer tahmini zor olmaktadır. Bu sınırlandırmayı kaldırmak için FOABC-FTC'nin birinci adımını FOBCFTC ile aynı olduğu ve u_a , u_A ile değiştirildiği iki adımlı uyarlama mekanizması tanıtılmaktadır. Yeni kontrol kanunu aşağıdaki gibidir:

$$u = M(x_1)[u_n + u_A] \quad (3.60)$$

Kullanılan u_n (3.55)'de kullanılan ile aynıdır ve u_A aşağıdaki gibi tasarlanmaktadır:

$$u_A = -[\hat{\Pi} + |\sigma_2| \operatorname{sgn}(\sigma_1) + k_2 \sigma_2 + k_3 \operatorname{sgn}(\sigma_2) + k_4 \operatorname{sgn}(\sigma_2) {}_0D_t^{-\lambda} |\sigma_1|] \quad (3.61)$$

Uyarılama hatası $\tilde{\Pi} = \Pi - \hat{\Pi}$ olursa, $X = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \tilde{\Pi}]$ vektörü de göz önünde bulundurulduğunda, aşağıda belirtilen Lyapunov adayı oluşmaktadır:

$$V_3 = \|X\|_1 = |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\tilde{\Pi}| \quad (3.62)$$

Bu denklemin türevi alınırsa aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{V}_3 = (\sigma_2 + \Psi_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_1) + (M^{-1}(x_1)(u) + c(x_1, x_2) + \chi - \dot{q}_d - \Psi_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_2) - \dot{\tilde{\Pi}} \operatorname{sgn}(\tilde{\Pi}) \quad (3.63)$$

Burada $\Psi_1(\sigma_1) = -k_1 \sigma_1$ olarak ayarlandığında aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{V}_3 = -k_1 |\sigma_1| + \sigma_2 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + (M^{-1}(x_1)(u) + c(x_1, x_2) + \chi - \dot{q}_d - \Psi_1(\sigma_1)) \operatorname{sgn}(\sigma_2) - \dot{\tilde{\Pi}} \operatorname{sgn}(\tilde{\Pi}) \quad (3.64)$$

(3.55), (3.60), (3.61) ve (3.64) kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{V}_3 = -k_1 |\sigma_1| - k_2 |\sigma_2| - k_3 - k_4 {}_0D_t^{-\lambda} |\sigma_1| + \tilde{\Pi} \operatorname{sgn}(\sigma_2) - \dot{\tilde{\Pi}} \operatorname{sgn}(\tilde{\Pi}) \quad (3.65)$$

Önerme 2 kullanılarak, (3.65) şu şekilde yazılmaktadır:

$$\dot{V}_3 \leq -k_1 |\sigma_1| - k_2 |\sigma_2| - k_3 - k_4 S + \tilde{\Pi} \operatorname{sgn}(\sigma_2) - \dot{\tilde{\Pi}} \operatorname{sgn}(\tilde{\Pi}) \quad (3.66)$$

$v = k_3 + k_4 S$ alındığında (3.66) denklemini (3.67)' deki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -k_1|\sigma_1| - k_2|\sigma_2| - v \\ & + \tilde{\Pi} \operatorname{sgn}(\sigma_2) - \hat{\Pi} \operatorname{sgn}(\tilde{\Pi}) \end{aligned} \quad (3.67)$$

Buna göre uyarlanabilir yasa aşağıdaki gibi kullanılabilir:

$$\hat{\Pi} = (|\tilde{\Pi}| \operatorname{sgn}(\sigma_2) - k_5 \tilde{\Pi}) \quad (3.68)$$

k_5 pozitif bir terimi ifade etmektedir. (3.67) ve (3.68) kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{V}_3 \leq -k_1|\sigma_1| - k_2|\sigma_2| - v - k_5|\tilde{\Pi}| \quad (3.69)$$

Pozitif sabit olarak $k = \min(k_1, k_2, k_5, v)$ seçildiğinde aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{V}_3 \leq -k|\sigma_1| - k|\sigma_2| - k - k|\tilde{\Pi}| \leq -k\|X\|_1 \quad (3.70)$$

(3.69)'daki denklem Önerme 2'nin koşullarının sağlandığını göstermekte ve tasarlanan (FOAB-FTC) kontrolörü (3.55), (3.60) ve (3.61), (3.42)' de ifade edilen asimptotik kararlılığı sağlamaktadır ayrıca izleme hataları, (3.70)' deki denklem ile aşağıdaki denklem gibi verilen sonlu zaman t_c , sifira yakınsamaktadır:

$$t_c \leq \frac{1}{k} \ln(\|X\|_{t=0} + 1) \quad (3.71)$$

3.3. EID Tabanlı Gürbüz Kontrol

Yan et al. çalışmalarında belirsiz tek bağlantılı esnek bağlantılı manipülatör (USLFJM) için eşdeğer giriş bozulması (EID) tabanlı gürbüz kontrol yöntemini kullanmışlardır (Yan et al. 2019).

USLFJM'nin belirsizlikleri genel olarak parametre bozuklukları ve harici bozukluklar içerdiğinden model parametreleri $\hat{m} = m + \Delta m, \hat{L} = L + \Delta L, \hat{I} = I + \Delta I, \hat{J} = J + \Delta J$ ve $\hat{K} = K + \Delta K$ olarak ifade edilebilmektedir. m, L, I, J, K değerleri model parametrelerinin nominal kısımlarını gösteren belirli olan ve $\Delta m, \Delta L, \Delta I, \Delta J, \Delta K$ değerleri de model parametrelerinin bozulma kısımlarını gösteren belirsiz olan sabitlerdir. Bilinmeyen sabitlerin tüm mutlak değerlerinin üst sınırları olduğunu varsayılmaktadır.

Bu durumda USLFJM'nin kinetik enerjisi,

$$L_k = \frac{1}{2} \hat{I} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \hat{J} \dot{q}^2 \quad (3.72)$$

USLFJM'nin potansiyel enerjisi aşağıdaki biçimdedir.

$$L_p = \frac{1}{2} \hat{K} (q - \theta)^2 + \hat{m} g \hat{L} (1 - \cos q) \quad (3.73)$$

$\beta = [q, \theta]^T$ olursa ve sistemin Langrange fonksiyonu $L_a = L_k - L_p$ olarak seçildiğinde Euler-Lagrange modelleme denklemlerini aşağıdaki gibi kullanmaktadır.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_a}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L_a}{\partial q} = \varepsilon_1 \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_a}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial L_a}{\partial \theta} = \tau + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (3.74)$$

USLFJM'nin dinamik modeli aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\hat{M} \ddot{\beta} + \hat{G} = \lambda \tau + \varepsilon \quad (3.75)$$

Burada $\lambda = [0, 1]^T$ ve $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2]^T$ modellenmemiş dinamiklere sahip sistemin sınırlı dış bozucularıdır, \hat{M} pozitif-belirli atalet matrisi ve \hat{G} yerçekimi kuvveti ve elastik kuvvet matrisidir. \hat{M} ve \hat{G} aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} \hat{J} & 0 \\ 0 & \hat{I} \end{bmatrix}, \hat{G} = \begin{bmatrix} \hat{K}(q - \theta) + \hat{m} g \hat{L} \sin q \\ -\hat{K}(q - \theta) \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$\widehat{M} = M + \Delta M$ ve $\widehat{G} = G + \Delta G$ denklemlerinde M ve G belirli matrislerdir ve ΔM ve ΔG belirsiz matrislerdir. M , G , ΔM ve ΔG matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \Delta M = \begin{bmatrix} \Delta J & 0 \\ 0 & \Delta I \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} K(q - \theta) + mgL \sin q \\ -K(q - \theta) \end{bmatrix} \\ \Delta G &= \begin{bmatrix} \Delta K(q - \theta) + \Delta\mu \sin q \\ -\Delta K(q - \theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.77)$$

$$\Delta\mu = (\Delta mL + m\Delta L + \Delta m\Delta L)g \quad (3.78)$$

olmaktadır.

$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [q, \theta, \dot{q}, \dot{\theta}]^T$ olduğunda (3.75)'teki belirsiz dinamik modelin durum uzayı denklemi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ -\frac{K}{J}(x_1 - x_2) - \frac{mgL}{J} \sin x_1 + \psi_1 \\ \frac{K}{I}(x_1 - x_2) + \frac{\tau}{I} + \psi_2 \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

Buradaki ψ_1 ve ψ_2 denklemleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \frac{\Delta J}{J} \ddot{x}_1 + \frac{\Delta K}{J} (x_1 - x_2) + \frac{\Delta\mu}{J} \sin x_1 - \frac{\varepsilon_1}{J} \\ \psi_2 &= \frac{\Delta I}{I} \ddot{x}_2 - \frac{\Delta K}{I} (x_1 - x_2) + \frac{\varepsilon_2}{I} \end{aligned} \quad (3.80)$$

Bağlantı açısının istenen hedefi q_d ve $e_1 = q - q_d$ olduğunda (3.75)'teki belirsiz dinamik modele dayalı olarak, e_1 hatasının zamana göre türevi aşağıdakileri sağlamaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \ddot{e}_1 \\ e_1^{(3)} \\ e_1^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} - \dot{q}_d \\ -\frac{K}{J}(q - \theta) - \frac{mgL}{J} \sin q - \ddot{q}_d + \eta_1 \\ -\frac{K}{J}(\dot{q} - \dot{\theta}) - \frac{mgL}{J} \dot{q} \cos q - \dot{q}_d^{(3)} + \eta_2 \\ -\frac{K}{J} \ddot{q} + \frac{K}{IJ} \tau - q_d^{(4)} + \xi + \frac{K^2}{IJ} (q - \theta) + \alpha \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

ξ , α ve η_1 aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{mgL}{J} (\dot{q}^2 \sin q - \ddot{q} \cos q), \quad \alpha = \frac{K}{J} \psi_2 + \eta_3 \\ \eta_1 &= \frac{\Delta J}{J} \ddot{q} + \frac{\Delta K}{J} (q - \theta) + \frac{\Delta \mu}{J} \sin q - \frac{\varepsilon_1}{J} \end{aligned} \quad (3.82)$$

η_2 ve η_3 , parametre bozulmalarını ve harici bozulmaları içeren belirsiz terimler olduğundan ve harici bozucular sürekli ve türev alınabilir olmayabileceğinden η_2 ve η_3 burada somut olarak ifade edilememektedir.

$$e = [e_1, e_2, e_3, e_4]^T = [e_1, \dot{e}_1, \ddot{e}_1, e_1^{(3)}]^T \quad (3.83)$$

olduğunda (3.81)' e dayalı olarak denetleyici tasarım sürecini basitleştirmek için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır:

$$\tau = \frac{IJ}{K} (u_e + q_d^{(4)} - \xi) - K(q - \theta) + I\ddot{q}_d \quad (3.84)$$

Daha sonra, (3.81) ve (3.84)'den bir hata sistemi oluşturulmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \\ \dot{e}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ -\frac{K}{J} e_3 + u_e + \alpha \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Burada u_e , hata sisteminin girişidir.

Açıklama 1: Konum kontrolü için, q_d , sabit olan bağlantının istenen açısı olduğundan \dot{q}_d , \ddot{q}_d ve $q_d^{(3)}$ sifira eşittir. Yörünge izleme kontrolünde ise, q_d bağlantı açısının istenen yörüngesidir ayrıca q_d 'nin t zaman değişkenini içeren belirli bir düzgün fonksiyon olduğunu varsayılmakta ve bu da \dot{q}_d , \ddot{q}_d ve $q_d^{(3)}$ 'ün hesaplanabilir olduğunu göstermektedir.

(3.84)'da denklemi verilen gerçek yasayı tasarlama sürecinde USLFJM sistemi için q, θ ve bağlantı açısının zamana göre türevi \dot{q}, \ddot{q} ve $q^{(3)}$ (yani, $q^i, i = 1,2,3$) ölçülmelidir. $q^{(3)}$ 'ün, Bölüm III'te gösterilen u_e tasarımı ile ilgili olduğuna dikkat çekilmektedir.

$$z = [z_1, z_2, z_3, z_4]^T = [q_s, \dot{q}_s, \ddot{q}_s, q_s^{(3)}]^T \quad (3.86)$$

olduğunda, burada $q^{(i)}$ 'nin tahmini için giriş sinyalini herhangi bir dinamik bilgisi olmadan tahmin eden yüksek dereceli zaman türevli izleyici kullanılmaktadır (Ibrir 2004). Yüksek dereceli zaman türevli izleyicinin durum uzay denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_i \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i + 1 \\ -\gamma^4(z_1 - v) - C_4^3 \gamma^3 z_2 - C_4^2 \gamma^2 z_3 - C_4^1 \gamma z_4 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

$v = q$ giriş sinyali, $C_4^k (k = 1,2,3,4)$ binom katsayısı ve $\gamma > 0$ sabittir. Ibrir'e (2004) göre aşağıdaki denklem bilinmektedir:

$$\lim_{\gamma \rightarrow \infty} q_s^{(i)} = q^{(i)} \quad (3.88)$$

$$e_{js} = q_s^{(j)} - q_d^{(j)} \quad (j = 2,3,4) \quad (3.89)$$

(3.85)'deki e_j 'nin tahmini değeri olsun. e_{js} , e_j 'ye yaklaştığından γ sonsuza yaklaşmaktadır. Bu nedenle sistem (3.79) için kontrol girişi aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\tau = \frac{I}{K} \left(u_e + q_d^{(4)} - \xi_s \right) - K(q - \theta) + I\ddot{q}_d \quad (3.90)$$

Burada $\xi_s = (mgL/J)(\dot{q}_s^2 \sin q - \ddot{q}_s \cos q)$ olmaktadır. (3.90)'teki denklem u_e 'den τ 'ya bir dönüştürücü olarak düşünülebilmektedir. (3.85)' de verilen sistem, doğrusal olmayan sanal bozulmaya sahip doğrusal sistem olarak ele alınarak aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\begin{cases} \dot{e} = Ae + Bu_e + d \\ y = Ce \end{cases} \quad (3.91)$$

A, B ve d aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{k}{j} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \alpha + \sigma_4 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

$C \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ kimlik matrisidir, doğrusal olmayan sanal bozulma d , (3.85)'deki hata sisteminin doğrusal olmayan terimini ve zaman türevli izleyicinin neden olduğu bozucuları yani $\sigma_k (k = 1, 2, 3, 4)$ ' yi içermektedir.

(3.91)'de verilen sistem (A,B,C), She et al. tarafından ifade edilen EID varlığıyla, kontrol edilebilir, gözlemlenebilir ve sıfırlarının olmaması gibi özelliklerini sağladığı zaman kontrol girişinde her zaman bir EID, δ bulunmaktadır (She et al. 2008). EID'nin ürettiği etkiyle doğrusal olmayan sanal bozukluk d 'nin ürettiği etki aynı olduğundan sistem aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\begin{cases} \dot{e} = Ae + B(u_e + \delta) \\ y = Ce \end{cases} \quad (3.93)$$

Tam dereceli (sıralı) gözlemci, EID tahmin edici ve durum geri besleme kontrolörüne sahip EID tabanlı kontrol yöntemi kullanılmaktadır.

EID tahmin edici için önce yardımcı olarak aşağıda denklemi verilen tam dereceli gözlemci oluşturulmaktadır.

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}} = A\hat{e} + B\hat{u}_e + K_l(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{e} \end{cases} \quad (3.94)$$

Burada \hat{e} , e 'nin tahmini değeri, $K_l \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ gözlemci kazancı ve \hat{u}_e , gözlemcinin girdisini ifade etmektedir.

Hem EID tahmin ediciye hem de geri besleme kontrolörünü doğru tahminler sağlaması gerektiğinden dolayı bu gözlemcinin yakınsama hızı (3.93)'deki sistemden daha fazla olmalıdır. Tam sıralı gözlemciyi yüksek kazançlı gözlemciye dönüştürmek için etkili bir yaklaşım kullanılmaktadır (She et al. 2008).

(A, B) sistemi kontrol edilebilir ve (C, A) sistemi gözlenebilir olduğu için, (3.94)'deki sistemin gözlenebilirliği, ikili sistemin kontrol edilebilirliğine dönüştürülebilmekte ve böylece (3.93)'deki sistemin optimal tahmin problemi, ikili sistemin optimal kontrol problemine dönüşebilmektedir ve ikili sistem aşağıda gösterildiği gibi kolaylıkla elde edilebilmektedir:

$$\begin{cases} \dot{e}_l = A^T e_l + C^T \hat{u}_{el} \\ y_l = B^T e_l \end{cases} \quad (3.95)$$

ve ikinci dereceden maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$J_1 = \int_0^\infty \{(\rho e_l^T Q_1 e_l + \hat{u}_{el}^T R_1 \hat{u}_{el})\} dt \quad (3.96)$$

Burada $Q_1 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ pozitif tanımlı simetrik bir matris ve $R_1, \rho > 0$ skaler ağırlıklı parametrelerdir.

İkili sistemin (3.96) optimal kontrol yasası aşağıdaki gibidir.

$$\hat{u}_{el} = K_l^T e_l \quad (3.97)$$

(3.96)'daki denklemin küçümsemesi için Ricatti matris diferansiyel denklemini kullanılarak, kontrolör kazancı K_l^T aşağıda gösterildiği gibi olmaktadır:

$$\begin{cases} AS_1 + S_1A^T - S_1C^TR_1^{-1}CS_1 + \rho Q_1 = 0 \\ K_l^T = \frac{1}{2}R_1^{-1}CS_1 \end{cases} \quad (3.98)$$

Bu sonuç aşağıdaki denklemi vermektedir:

$$(A - K_lC)^TS_1 + S_1(A - K_lC) + \rho Q_1 = 0 \quad (3.99)$$

Burada $S_1 = S_1^T > 0$ ve $S_1 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ Ricatti matris diferansiyel denkleminin çözümüdür. ρ 'nın artmasıyla gözlemcinin daha fazla yakınsama hızı elde edeceği anlamına gelmektedir.

Ayrıca durum ve çıktının gözlem hatalarını şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{cases} \Delta e = \hat{e} - e \\ \Delta y = \hat{y} - y \end{cases} \quad (3.100)$$

Önerme: γ bir kararlılık matrisidir (γ 'nin tüm gerçekte kısımları sıfırdan küçüktür), ancak ve ancak herhangi bir $Q > 0$ olduğu durumda Lyapunov denklemi için benzersiz $P > 0$ çözümü bulunmaktadır:

$$P_\gamma + \gamma^T P + Q = 0 \quad (3.101)$$

(3.99)'daki $A - K_lC$, (3.102)'teki γ 'ya benzer. Böylece, Önermeye dayanarak, (3.98)'deki K_l 'nin, $A - K_lC$ 'yi kararlı hale getirdiği bilinmektedir.

(3.93), (3.94) ve (3.100) verilenler birleştirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\Delta \dot{e} = (A - K_lC)\Delta e + \hat{u}_e - u_e - \delta \quad (3.102)$$

Dolayısıyla, eğer δ değerini elde edebilirse, bozuklukları telafi etmek için $u_e = \hat{u}_e - \delta$ tasarlanabilir ve $\Delta \dot{e} = (A - K_l C)\Delta e$ olmaktadır. Açıkça, $A - K_l C$ kararlı olduğunda, $\Delta e \rightarrow 0 (\hat{e} \rightarrow e) t \rightarrow \infty$ olmaktadır. Bu nedenle, bir sonraki bölümde, bir EID tahmin edici tasarlayarak δ değerini elde edilmektedir.

(3.93), (3.94) ve (3.100) birleştirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\dot{e} = A\hat{e} + Bu_e + [B\delta + (\Delta \dot{e} - A\Delta e)] \quad (3.103)$$

δ 'nın aşağıdaki gibi olduğu varsayıldığında:

$$\Delta \dot{e} - A\Delta e = B\Delta \delta \quad (3.104)$$

(3.103)'teki denklem aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\dot{e} = A\hat{e} + B(u_e + \hat{\delta}) \quad (3.105)$$

$\hat{\delta}$ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\hat{\delta} = \delta + \Delta \delta \quad (3.106)$$

Bu EID'nin tahmini değeridir. (3.94), (3.100) ve (3.105) birleştirildiğinde bu değer aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\hat{\delta} = -B^+ K_l C \Delta e + \hat{u}_e - u_e \quad (3.107)$$

$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ ve ek olarak, EID tahmincisi için, bozukluğu dengeleyecek u_e 'de bir terim bulunmalıdır. $F(s)$ filtresi kullanıldıktan sonra $\hat{\delta}, \tilde{\delta}$ olarak güncellenmekte ve aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\tilde{D}(s) = F(s)\hat{D}(s) \quad (3.108)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Burada $\tilde{D}(s)$ ve $D(s)$ sırasıyla $\tilde{\delta}$ ve $\hat{\delta}$ 'nin Laplace dönüşümleridir. $F(s)$ filtresi aşağıdaki gibi tasarlanmaktadır:

$$|F(j\omega)| \approx 1 \forall \omega \in [0, \omega_r] \quad (3.109)$$

Burada ω_r , bozukluğun en yüksek açısal frekansını göstermekte ve $F(s)$ 'nin kesme açısal frekansı, ω_r 'den beş ila on kat daha büyük olmalıdır. Böylece, kontrol kanunu aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$u_e = \hat{u}_e - \tilde{\delta} \quad (3.110)$$

(3.93), (3.94) ve (3.100)'e dayanarak, aşağıdaki denklemler elde edilmektedir:

$$\begin{cases} \Delta \dot{e} = A\Delta e - K_l \Delta y + B(\hat{u}_e - \delta - u_e) \\ \Delta y = C\Delta e \end{cases} \quad (3.111)$$

s-alanında, (3.110)'u (3.111) ile değiştirmek, aşağıdaki sonucu vermektedir:

$$\Delta e(s) = [sI_4 - (A - K_l C)]^{-1} B [\tilde{D}(s) - D(s)] \quad (3.112)$$

(3.107) ve (3.110)'e bakıldığında, $\tilde{\delta}$ ve $\hat{\delta}$ arasında aşağıdaki ilişki bulunmaktadır:

$$\hat{\delta} = -B^+ K_l C \Delta e + \tilde{\delta} \quad (3.113)$$

s-bölgesinde, (3.108), (3.112) ve (3.113)'den aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$[I - F(s)] \tilde{D}(s) = -F(s) B^+ K_l W(s) [D(s) - \tilde{D}(s)] \quad (3.114)$$

Burada $W(s) = [sI_4 - (A - K_l C)]^{-1} B$ olmaktadır. Birinci dereceden filtre yeterince yardımcı olduğundan filtre (3.115)' deki gibi kullanılmaktadır.

$$F(s) = \frac{q}{Ts+1} \quad (3.115)$$

Burada T zaman sabitidir.

(3.93)'daki kapalı döngü sisteminin asimptotik kararlılığını sağlamak için durum geri besleme kontrolörü tasarlanmakta ve doğrusal ikinci dereceden düzenleme optimal kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Geri besleme kontrol yasasını aşağıdaki gibi yapan bir $K_f \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ matrisi bulunmaktadır:

$$\hat{u}_e = K_f \hat{e} \quad (3.116)$$

İkinci dereceden maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ile:

$$J_2 = \int_0^{\infty} (\hat{e}^T Q_2 \hat{e} + \hat{u}^T R_2 \hat{u}) dt \quad (3.117)$$

Aşağıdaki ifadeleri vermektedir.

$$S_2 A + A^T P - P B R_2^{-1} B^T S_2 + Q_2 + \dot{S}_2 = 0 \quad (3.118)$$

$$K_f = -R_2^{-1} B^T S_2 \quad (3.119)$$

Burada $Q_2 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ pozitif tanımlı simetrik bir matris, R_2 bir skaler pozitif parametre ve $S_2 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ Ricatti matris diferansiyel denkleminin çözümüdür. Optimal \hat{u}_e (3.118) ve (3.119)'u karşılamaktadır.

(3.93)'teki sistem için, (A, B) kontrol edilebilir olduğundan (3.118) ve (3.119) birleştirilmekte ve $A + B K_f$ kararlı olduğunda (A, B,C) sisteminin asimptotik olarak kararlı olduğunu elde edilebilmektedir.

Tam sıralı gözlemci ve geri besleme kontrolörünün, hata sisteminin kararlılığını bozmayacak şekilde tasarlanması gerektiğinden kararlılıkla ilgili olarak, $d = 0$ kabul

edersek, δ' 'nin s -bölgesindeki δ' 'ye transfer fonksiyonu (3.112) ve (3.113)'dan elde edilebilmektedir.

$$G(s) = B^+(sI_4 - A)N \quad (3.120)$$

Buradaki N değeri aşağıdaki gibidir:

$$N = [sI_4 - (A - K_1C)]^{-1}B \quad (3.121)$$

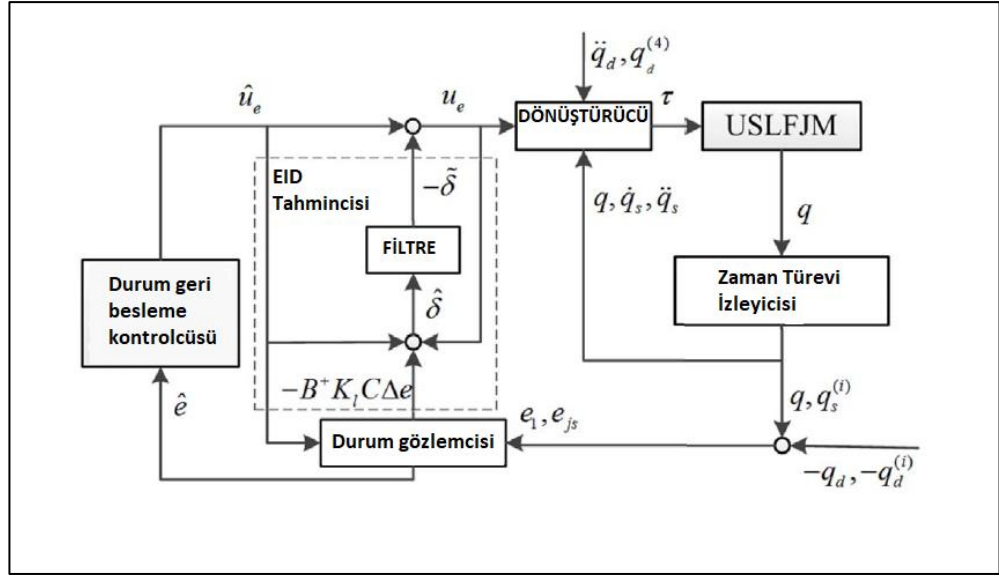
1) Ayırma teoremi ve küçük kazanç teoremine göre (3.93)'deki sistemin kararlılığı aşağıdaki $A - K_1C$ ve $A + BK_f$ kararlıdır.

2) $\|GF\|_\infty = \sup_{\omega \geq 0} \varepsilon_{max}[G(j\omega)F(j\omega)] < 1$, burada $\varepsilon_{max}[\cdot]$ maksimum tekil değer fonksiyonudur.

1. durum önceki tasarımda kanıtlanmaktadır. Mükemmel düzenleme kavramına göre (3.98)'teki K_1^T aşağıdaki gibi tasarlanmaktadır.

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} \{[sI_4 - (A - K_1C)]^{-1}B\}^T = 0 \quad (3.122)$$

Burada $I_4 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ birim matrisidir. (3.122)'nin sol kısmının (3.121)'in parçası olduğunu bulunmaktadır. Böylece, uygulanan $F(s)$ filtresi, K_1 'nin yeterince büyük bir ρ altında tasarlanmasıyla durum 2 garanti edilmektedir. EID tabanlı kontrol sisteminin yapı şeması Şekil 3.3'de gösterilmektedir.

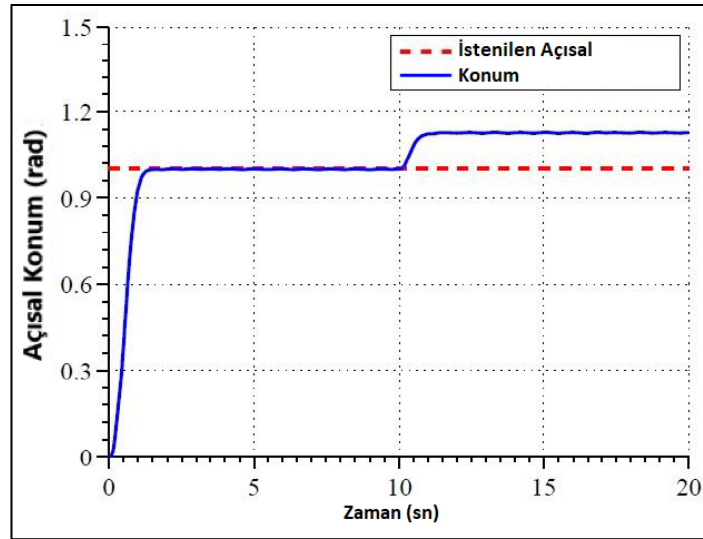


Şekil 3.3. EID tabanlı kontrol sisteminin yapı şeması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

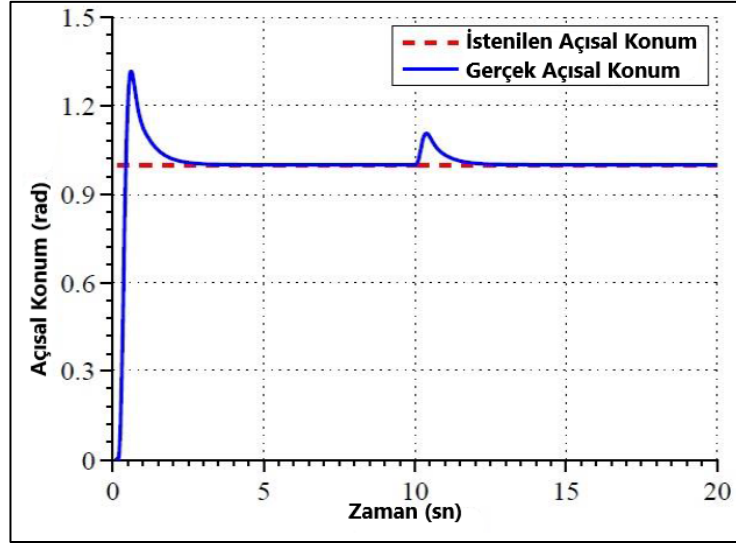
Araştırma aşamasında; bu tez çalışması için detaylı olarak incelenen kayan kipli kontrol, kesirli dereceden kontrol ve gürbüz kontrol yöntemlerinin literatürde yer alan simülasyon sonuçları bu bölümde incelenmektedir. Bu yöntemlerin kendi içlerinde önceki yöntemlerle karşılaştırmaları incelendikten sonra birbirleriyle olan karşılaştırmalarından bahsedilecektir.

Bu kontrol yöntemlerinden doğrusal olmayan DO tabanlı SMC yöntemin ana amacı sürekli var olan uyumsuzluk pertürbasyonunun etkisinde kapalı döngü sisteminin stabilizasyonunu sağlayarak sabit genliğe sahip istenen yörünge takibi etmesidir. Bu yöntem daha önce çalışan geleneksel SMC ve integral SMC yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1’de 10. saniyede sisteme bozulmanın eklendiği geleneksel SMC yönteminin yörünge takip performansını gösterilmektedir. Görüldüğü üzere geleneksel SMC yönteminin ilk oturma süresi oldukça kısadır ama bozulma eklendikten sonra takip konusunda başarılı olamamaktadır.



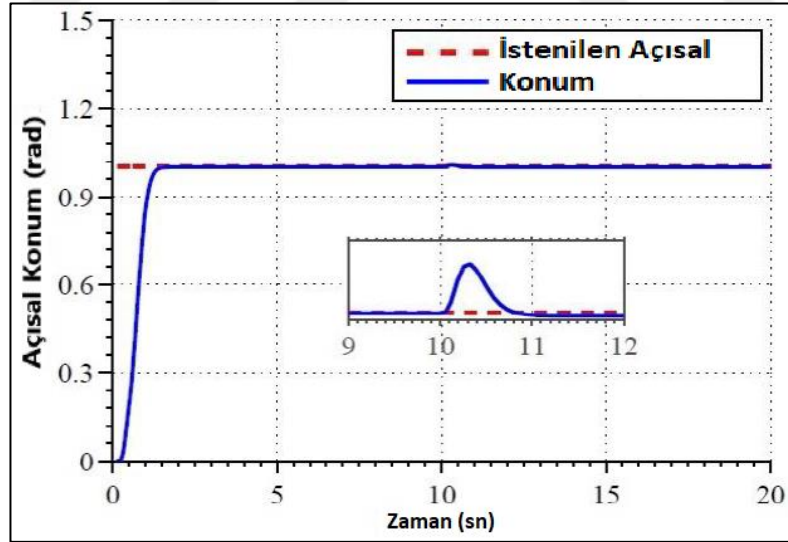
Şekil 4.1. SMC esnek eklem manipülatörünün istenen yörünge takibi

Şekil 4.2’de 10. Saniyede sisteme bozulmanın eklendiği integral SMC yönteminin yörünge takip performansı gösterilmektedir. İlk oturma süresi geleneksel SMC yöntemine göre geç olsa bozulma eklendikten sonra hatayı absorbe edip yörünge izleme performansını başarılı şekilde sürdürmektedir.



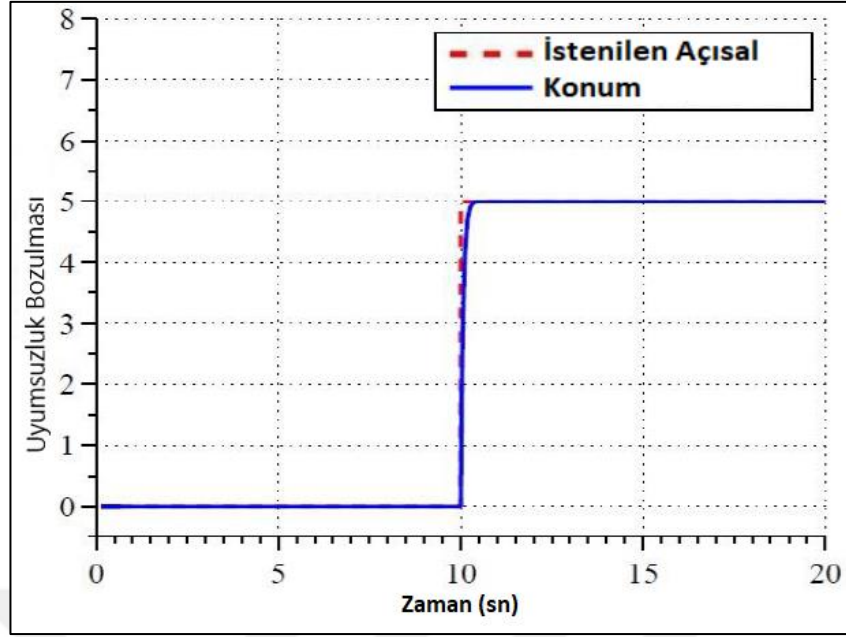
Şekil 4.2. Integral SMC esnek eklem manipülatörünün istenen yörünge takibi

Şekil 4.3'de diğer iki yöntemde olduğu gibi 10. saniyede bozulmanın eklendiği duruma doğrusal olmayan DO tabanlı SMC yöntemi kullanılmaktadır. İlk oturma süresi geleneksel SMC ile benzer olmaktadır. Bozulma eklendikten sonra önerilen yöntemin kısa bir süre içinde bozulma etkilerini kaldırdığı görülmektedir.



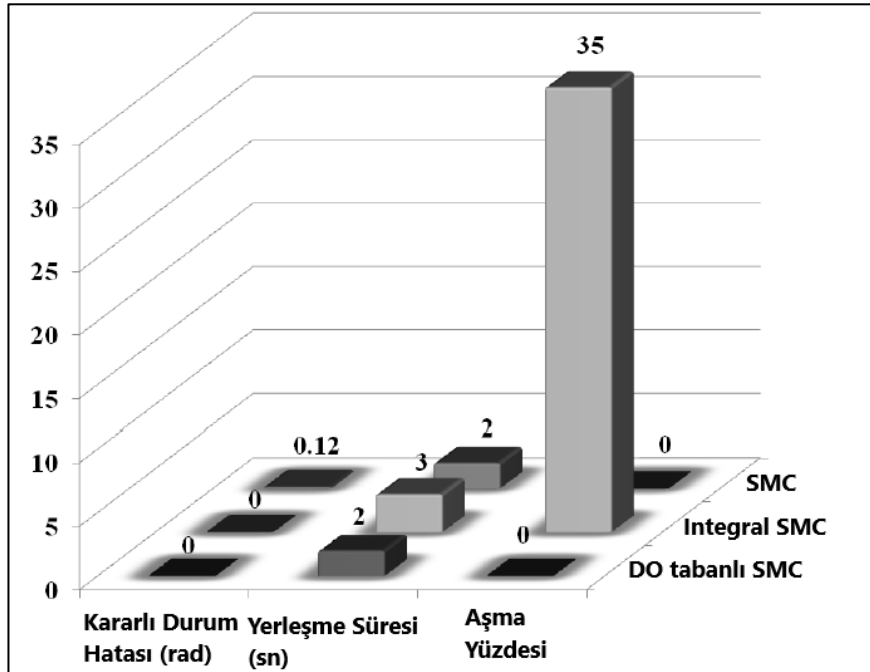
Şekil 4.3. DO tabanlı SMC esnek eklem manipülatörünün istenen yörünge takibi

Şekil 4.4'te gerçek ve tahmini bozulma arasındaki tahmin hatası profili verilmektedir. Önerilen yöntem ile tahmin hatasının çok kısa bir sürede sifira yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Gerçek ve tahmini bozulmanın profili

Şekil 4.5'te karşılaştırılan 3 yöntemin sabit durum hataları, yerleşme zamanları ve aşma yüzdeleri verilmektedir ve önerilen yönteminin bu 3 özelliğe daha iyi performanslar sergilemektedir.



Şekil 4.5. Kontrol stratejilerinin performans karşılaştırması

Hata toleranslı sonlu zamanlı kesirli mertebeden uyarlanabilir geri adımlama yöntemi kendinden önce araştırılan PID ve CTC yöntemleri ile karşılaştırılmaktadır. PUMA560 robotunun ilk üç eklemine kullanılmakta ve sürtünme terimi aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0.5\dot{q}_1 + \sin(3q_1) \\ 1.3\dot{q}_2 - 1.8 \sin(2q_2) \\ -1.8\dot{q}_3 - 2 \sin(q_3) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Yük bozulma terimi de aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\ell_d = \begin{bmatrix} 0.5 \sin(\dot{q}_1) \\ 1.1 \sin(\dot{q}_2) \\ 0.15 \sin(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Sistemin istenen yörüngeleri

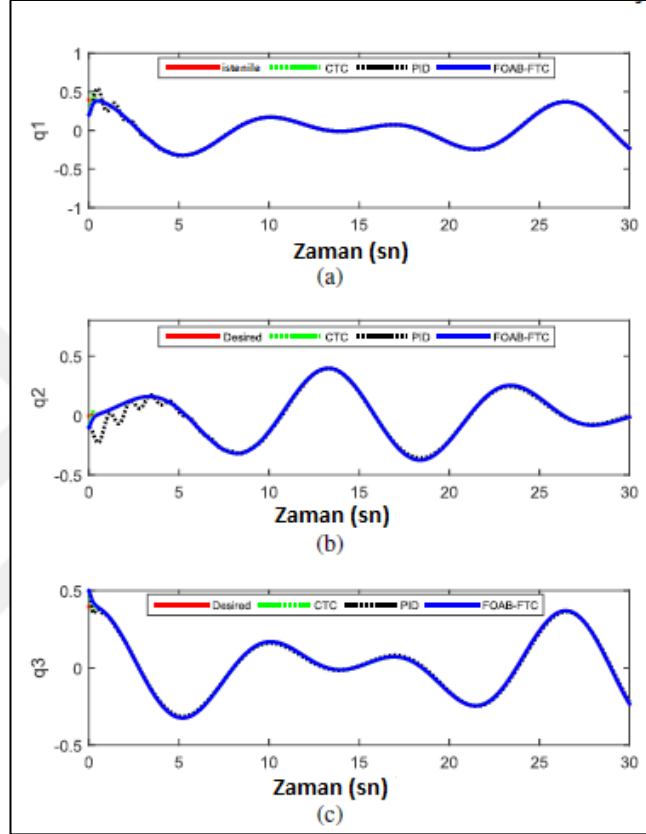
$$\begin{aligned} q_{d_1} &= q_{d_3} = 0.2 \cos(0.7t) + 0.2 \cos(0.5t - 0.2) \\ q_{d_2} &= 0.2 \cos(0.5t - 0.2) - 0.2 \cos(0.7t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

şeklinde seçilmektedir. FOAB-FTC yönteminin parametreleri kesirli derece değeri $\lambda = 0.4$ olarak ve kontrol kanunundaki kazançları $k_1 = k_2 = 8$, $k_3 = k_4 = 5$ ve $k_5 = 30$ olarak seçilmektedir. PID yönteminin kontrol kazançları $k_p = 200$, $k_d = 10$ ve $k_i = 100$ ve CTC yönteminin kontrol kazançları da $k_p = 200$ ve $k_d = 10$ olarak seçilmektedir. Eklem konumları için başlangıç koşulları $q_1(0) = 0.2$, $q_2(0) = -0.1$ ve $q_3(0) = 0.5$ olarak seçilmektedir. (3.62)'de işaret işlevini kullanmanın kontrolör çıkışında çatırdama üretme dezavantajı olduğundan dolayı işaret işlevinin yerine \tanh işlevi kullanılmaktadır.

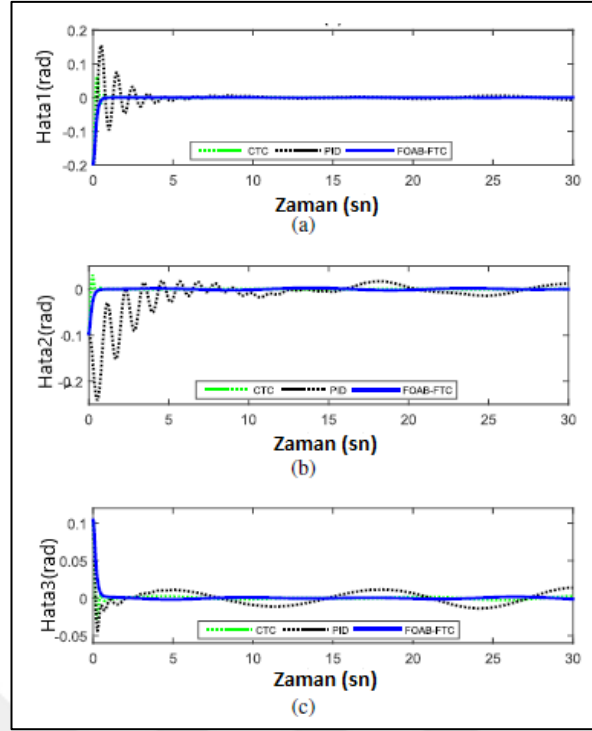
$$\begin{aligned} u_A &= -[\hat{\Pi} + |\sigma_2| \tanh(\sigma_1) + k_2 \sigma_2 \\ &+ k_3 \tanh(\sigma_2) + k_4 \tanh(\sigma_2) {}_0D_t^{-\lambda} |\sigma_1|] \end{aligned} \quad (4.4)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Sistemde belirsizlikler ve bozulmalar bulunurken aktüatörde hatanın bulunmadığı durum üzerine simülasyonlar yapılmaktadır. Şekil 4.6 ve 4.7'deki simülasyonlar incelendiğinde önerilen FOAB-FTC yönteminin diğer yöntemlere kıyasla konum takibi, küçük izleme hatası ve yakınsama hızı açılarından daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

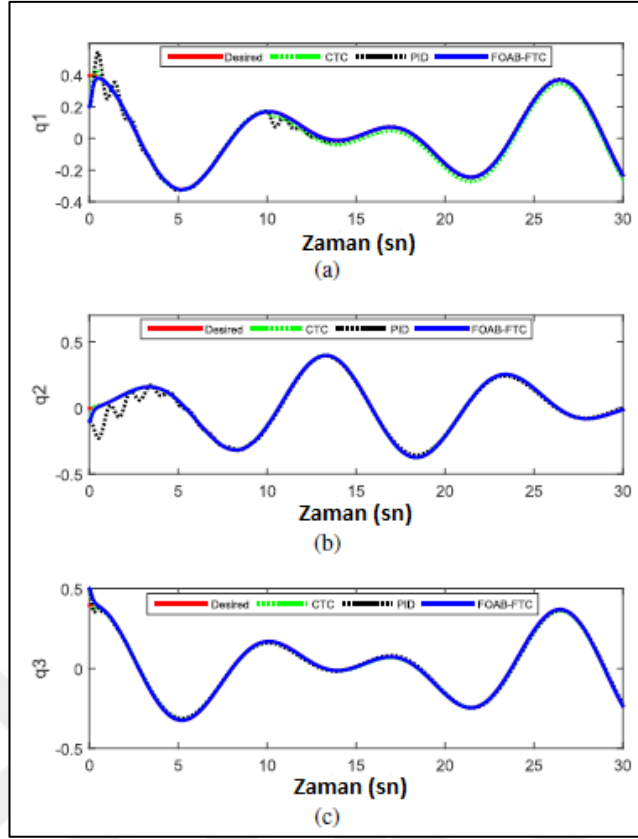


Şekil 4.6. Normal çalışmada izleme konumları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3

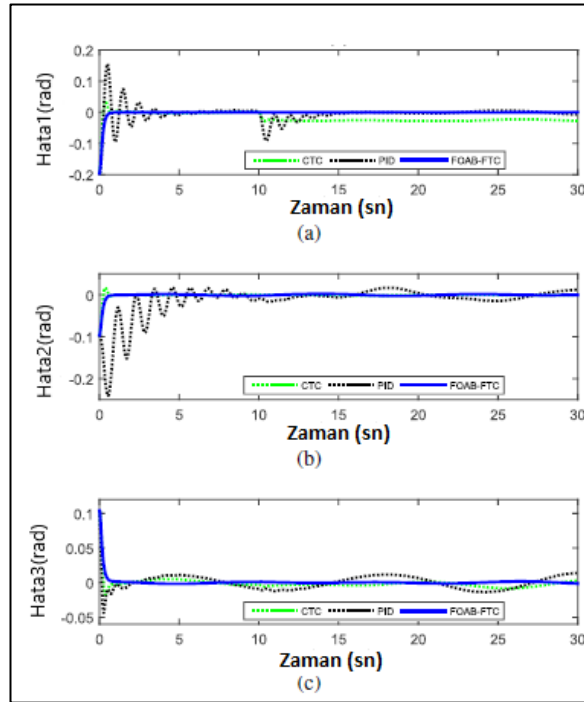


Şekil 4.7. Normal çalışmada izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3

Aktüatörlere $\mu_1 = [12(10 \text{ sn}), 0, 0]^T$ ve $\mu_2 = [0, 15q_1^2 + 10\dot{q}_1^2 + 20 \cos(q_1)(10 \text{ sn}), 0, 60u_3(20 \text{ sn})]^T$ olan iki farklı arıza tanıtılmaktadır. İlk arıza, ilk aktüatöre $t=10 \text{ sn}$ zamanında 12 Nm büyüklüğünde öngerilim arızası verilmesi ve diğer iki aktüatörün sağlıklı olduğu varsayılan ani bir arızadır. İkincisi ise, birince aktüatöre sağlıklı olduğu ama ikinci aktüatöre $t=10 \text{ sn}$ zamanında $\mu_{22} = 15q_1^2 + 10\dot{q}_1^2 + 20 \cos(q_1)$ 'lik bias (yanlılık) hatası ve üçüncü aktüatöre $t = 20 \text{ sn}$ zamanından %60 kısmi kayıp arızasının olduğunun varsayıldığı arızadır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'a bakıldığında μ_1 hatasının etkisinde FOAB-FTC yönteminin diğer iki yönteme göre daha iyi konum izleme yanıtı ve daha küçük konum izleme hatasına sahip olduğu görülmektedir.



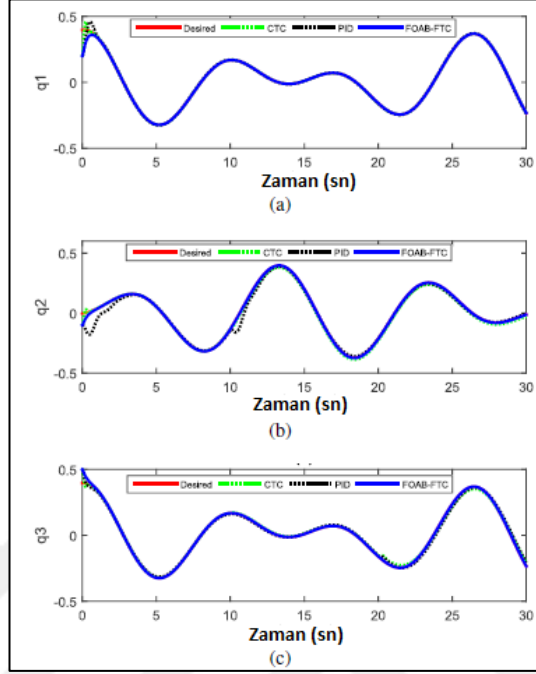
Şekil 4.8. Aktüatör hatası 1'in etkisi altında izleme konumları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.



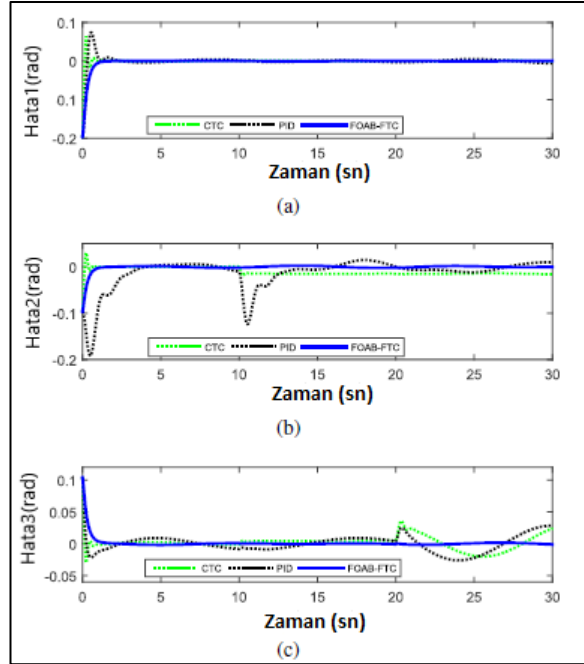
Şekil 4.9. Aktüatör hatası 1'in etkisi altında izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

μ_2 hatasının etkisinde Şekil 4.10 ve 4.11 incelendiğinde önerilen yöntemin yine daha iyi performanslar sergilediği gözlemlenmektedir.



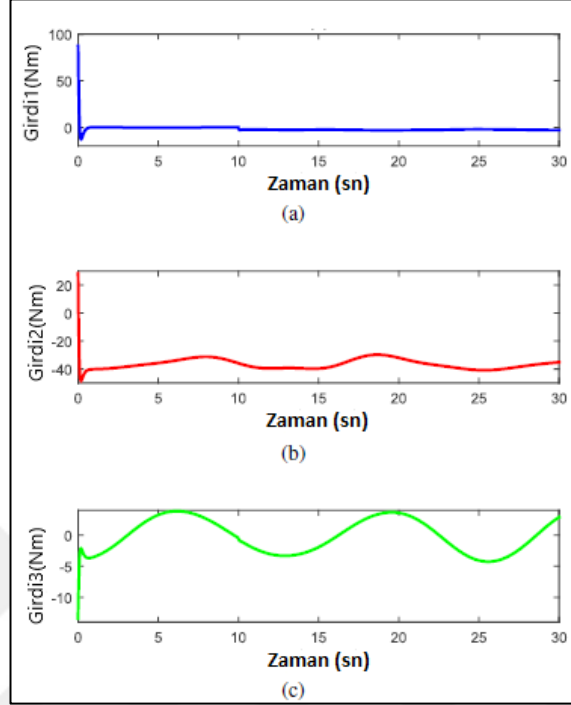
Şekil 4.10. Aktüatör hatası 2'in etkisi altında izleme konumları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.



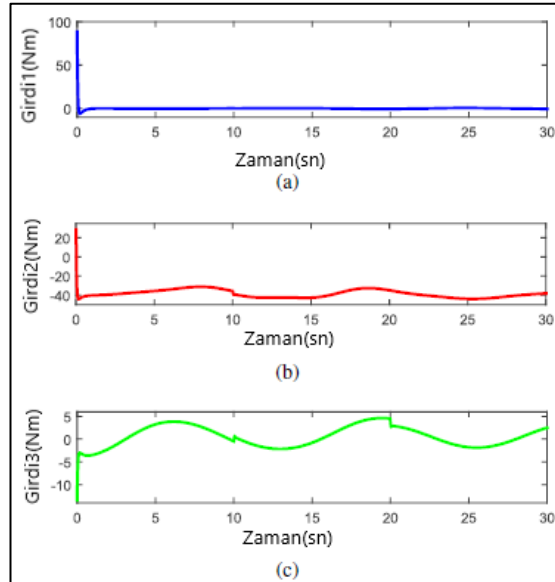
Şekil 4.11. Aktüatör hatası 2'in etkisi altında izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13, sırasıyla μ_1 ve μ_2 hatalarının etkisi altındaki üç eklemün çatırdayan serbest kontrol girişlerini göstermektedir.

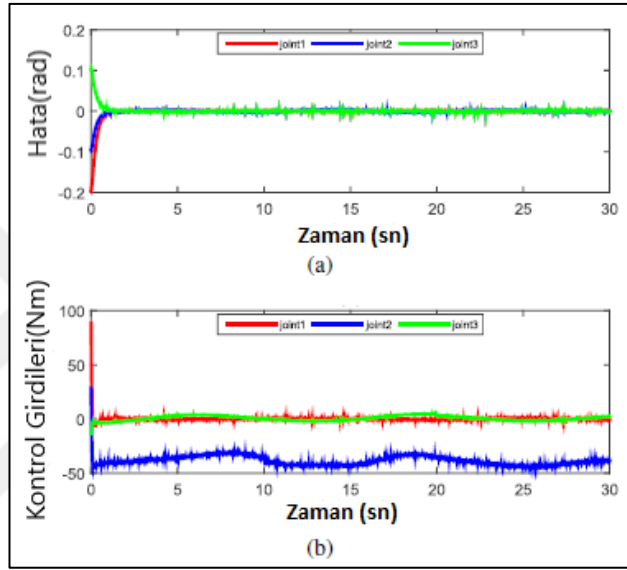


Şekil 4.12. μ_1 hatasının etkisi altında kontrol girişleri: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.



Şekil 4.13. μ_2 hatasının etkisi altında izleme hataları: (a) Eklem 1, (b) Eklem 2 ve (c) Eklem 3.

Şekil 4.14, kontrol parametreleri öncekiyle aynı seçilen, μ_2 hatasının etkisindeki manipülatörün eklem konumuna, 0,001 süresine sahip $4 * 10^{-8}$ gücünde bant sınırlı beyaz gürültü modülü uygulandığında izleme hatası performansını ve kontrol girişlerini göstermektedir. Simülasyon sonuçları, ölçüm gürültüsü varlığında kontrol girişlerinin biraz gürültülü hale dönüştüğünü ama önerilen yöntemin genel olarak izleme doğruluğu ve yakınsama hızı konusunda bozulmalara, hatalara ve ölçüm gürültülerine rağmen iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.14. μ_2 hatası ve gürültü etkisinde FOAB-FTC performansı: (a) izleme hataları ve (b) Kontrol girişleri.

EID tabanlı kontrol yöntemi, USLFJM'nin herhangi bir başlangıç konumundan, istenilen herhangi bir konumda stabilize edecek konum kontrolü için kullanılmaktadır. Manipülatör $q(0) = 0$ başlangıç konumundan istenen konuma, $q_d = (\pi/2)$ döndürülmekte ve titreşimi bastırılmaktadır ($q_d \rightarrow (\pi/2), \dot{q}_d \rightarrow 0$). Nominal parametreler $m = 2kg, L = 1m, K = 10N.m/rad, I = 0.5kg.m^2$ ve $J = 2kg.m^2$ şeklindedir. Yöntemin sağlamlığını göstermek için model nominal parametrelerde %10'lu değişiklik yapılmaktadır. Gerçek model parametreleri ve harici rahatsızlıklar aşağıdaki gibi ayarlanmaktadır:

$$\begin{cases} \hat{m} = 1.1m, \hat{L} = 1.1L, \hat{I} = 1.1I, \hat{K} = 1.1K, \hat{J} = \hat{m}\hat{L}^2 \\ \varepsilon_1 = 0.2 \sin t, \varepsilon_2 = 0.1 \sin 2t \end{cases} \quad (4.5)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Başlangıç durumları da aşağıdaki gibi ayarlanmaktadır:

$$[q(0), \theta(0), \dot{q}(0), \dot{\theta}(0)]^T = [0, 0, 0, 0]^T \quad (4.6)$$

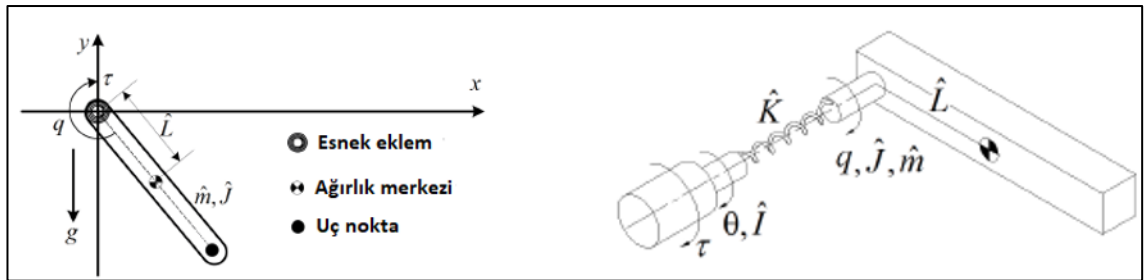
Zaman türevli izleyicinin parametresi $\gamma = 300$ olarak seçilmekte ve kontrolörün tasarım parametreleri aşağıdaki gibi ayarlanmaktadır:

$$\begin{cases} w_r = 5 \text{ rad/s}, T = 0.03 \\ Q_1 = 3000I_4, R_1 = I_4, \rho = 10^6 \\ Q_2 = 150I_4, R_2 = 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

Aşağıdaki denklemler elde edilmektedir:

$$\begin{cases} \text{eig}(A - K_f C) = -9.1324 \pm 0.4278i, -9.1849 \pm 2.8473i \\ \text{eig}(A + BK_f) = -11.7790, -1.0688, -0.7171 \pm 0.6772i \\ \|GF\|_\infty = 0.7708 < 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

Bu da sistemin (3.94)'deki kararlılığı sağladığını göstermektedir. Şekil 4.15'de gösterildiği gibi parametre bozulmalarının ve harici bozulmaların etkisindeyken bağlantı açısı kısa süre içinde istenen konuma ulaşmakta ve ardından titreşim önerilen yöntem ile iyi bir şekilde bastırıldığından önerilen yöntem iyi bir sağlamlığa sahiptir.



Şekil 4.15. USLFJM'nin konum kontrolü. (a) Açılar (b) Açısal Hata (c) Kontrol Torku

Önerilen kontrolün yörünge izleme performansı daha önce Liu et al. (2018) çalışmalarında kullandıkları nöro-uyumlu gözlemci tabanlı kontrol yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Model parametreleri, istenen yörünge ve başlangıç durumları, $m =$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

$2kg, L = 1m, K = 10n.m/rad, I = 0.5kg.m^2$ ve $J = 2kg.m^2$ şeklindedir. İstenen yörünge aşağıdaki gibidir:

$$\ddot{q}_d = 2 \sin 1.5t - 0.5q_d - 1.5\dot{q}_d \quad (4.9)$$

Başlangıç durumları aşağıdaki gibidir:

$$\begin{cases} [q(0), \theta(0), \dot{q}(0), \dot{\theta}(0)]^T = [0.2, 0.2, 0, 0]^T \\ [q_d(0), \dot{q}_d(0)]^T = [0.5, 0.2]^T \end{cases} \quad (4.10)$$

Bozulan parametreler ve harici rahatsızlıklar Liu et al. (2018) kullandıkları yöntemde dikkate alınmamaktadır. Bu simülasyonda (4.5)'deki dış bozululara modellenmemiş dinamikler (hem bağlantının hem de aktüatörün viskoz sönümlenmesi gibi) eklenmesinin sebebi önerilen yöntemin geçerliğini daha fazla göstermektir. Viskoz sönümlenmesi genelde açısal hız ve viskoz sönüm katsayılarının ürünü olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, gerçek model parametreleri ve dış bozulular aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\begin{cases} \hat{m} = 1.1m, \hat{L} = 1.1L, \hat{I} = 1.1I, \hat{K} = 1.1K, \hat{J} = \hat{m}\hat{L}^2 \\ \varepsilon_1 = 0.4\dot{q} + 0.2 \sin t, \varepsilon_2 = 0.6\dot{\theta} + 0.1 \sin 2t \end{cases} \quad (4.11)$$

Ayrıca zaman türevli izleyici ve denetleyicinin tasarım parametreleri aşağıdaki gibi seçilmektedir:

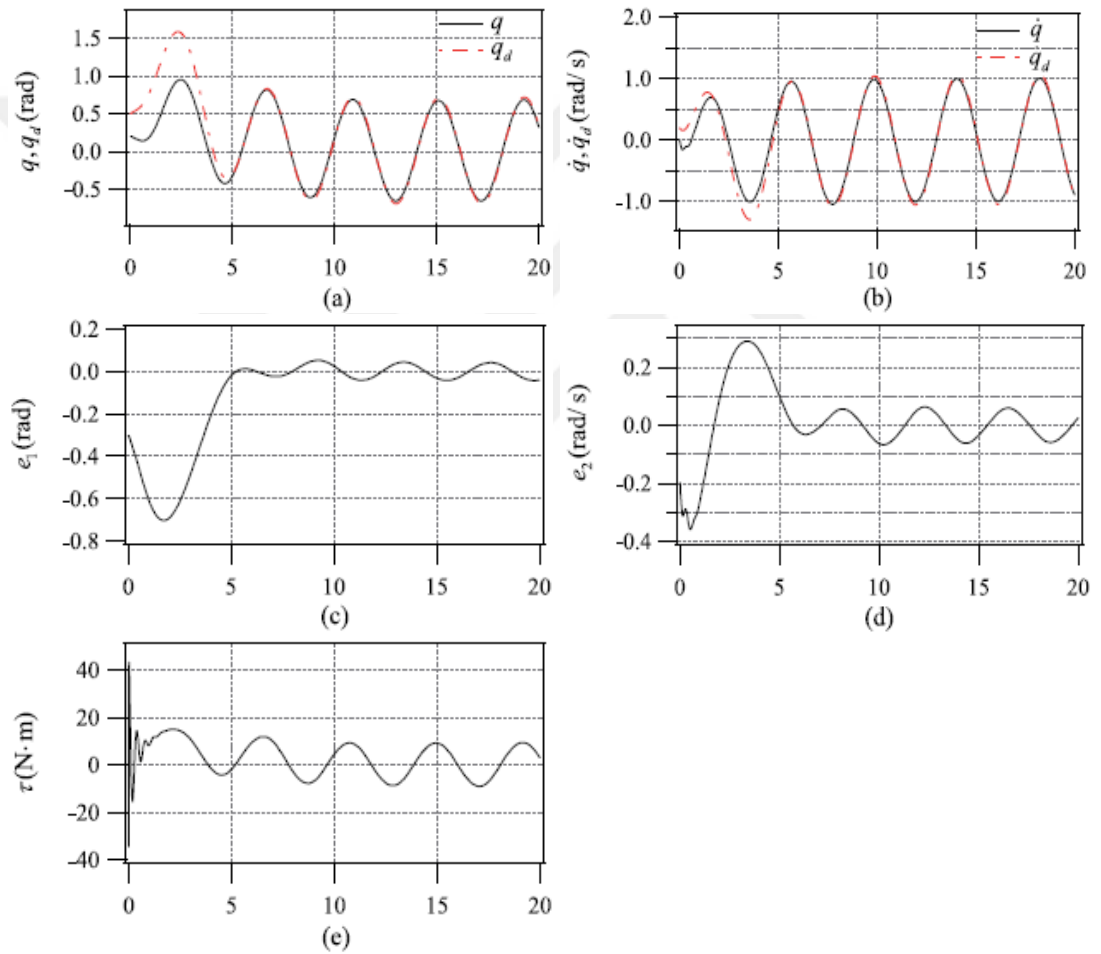
$$\begin{cases} \gamma = 1000, w_r = 5 \text{ rad/s}, T = 0.02 \\ Q_1 = 3000I_4, R_1 = I_4, \rho = 5 \times 10^5 \\ Q_2 = 300I_4, R_2 = 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

Aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\begin{cases} eig(A - K_l C) = -6.4602 \pm 0.4277i, -6.5322 \pm 2.8335i \\ eig(A + BK_f) = -16.9964, -1.0321, -0.7126 \pm 0.6926i \\ \|GF\|_\infty = 0.8729 < 1 \end{cases} \quad (4.13)$$

Bu nedenle sistem (3.94)'deki kararlılık gereksinimleri karşılamaktadır.

Şekil 4.16'daki yörünge izleme sonuçlarına göre, bağlantı açısı q 'nun, yörüngeyi kısa sürede takip edebildiği ve yörünge hatalarının sıfırın küçük bir komşuluğuna yakınsadığını göstermektedir. Liu et al. (2018) yönteminde sadece nominal tek bağlantılı FJM sistemi için yaklaşık izleme etkisi elde etmektedir. Sonuçlar, sağlamlıkta EID tabanlı kontrol yönteminin üstünlüğünü göstermektedir.



Şekil 4.16. USLFJM'nin yörünge izleme kontrolü. (a) Açılar (b) Açısal Hızlar (c) Açısal Hata (d) Açısal Hız Hatası (e) Kontrol Torku.

Manipülatorler için yörünge izleme performansları, oluşan ve bastırılan hata performansları ve genel performansları oldukça önemlidir ve detaylıca incelenen üç yöntemin simülasyonlarında da bunların üzerine yoğunlaştırıldığı görülmektedir. Bu sebeple bu üç yöntem birbirleriyle bu üç kısım üzerinden karşılaştırılmak istenmektedir.

Yörünge izleme performansları karşılaştırıldığında ilk yöntem olan DO tabanlı SMC yönteminin Şekil 4.3'te görüldüğü üzere 1 saniyenin biraz üstünde bir sürede manipülatörün istenen yörüngeyi takip ettiği görülmektedir. İkinci yöntem olan sonlu-zaman kesirli dereceden uyarlanabilir geri adımlı hata toleranslı yönteminde yörünge izleme performansı aktüatöre hata verilmeden veya gürültü olmadan Şekil 4.6'da görüldüğü üzere manipülatörün 0.5 saniye yakın bir sürede istenen yörüngeyi takip ettiği görülmektedir. Şekil 4.8, Şekil 4.10 ve Şekil 4.14 incelendiğinde aktüatörlerde hata olduğunda ve/veya gürültü durumları olduğunda önerilen yöntemde manipülatör sırasıyla 0.7, 1 ve 1.5 saniye civarlarında yörüngeyi takip etmektedir. Üçüncü yöntem olan EID Tabanlı Tam Dereceli Gözlemciye Sahip Durum Geri Beslemeli Kontrol yönteminde Şekil 4.15'te görüldüğü üzere bağlantı açısının 6 saniye civarında istenen konuma ulaştığı ve Şekil 4.16'da görüldüğü üzere 4.5 saniye civarında manipülatör istenen yörüngeyi takip etmektedir. Yörünge takibi konusunda aktüatörlerde hata bulunmaması durumunda ikinci yöntem en iyi performansı sergilerken üçüncü yöntem en kötü performansı sergilemektedir. Hatanın bulunduğu durumlarda birinci yöntem en iyi performansı sergilerken üçüncü yöntem yine en kötü performansı göstermektedir.

Yörünge izleme hataları açısından bakıldığında, birinci yöntem, Şekil 4.4'te görüldüğü üzere yörünge izleme hatasının 0.5 saniye civarında bir sürede sıfıra küçük komşuluklarla yakınsamaktadır. İkinci yöntem, hatanın olmadığı durumda Şekil 4.7'de görüldüğü üzere 1 saniyeye yakın bir sürede birinci duruma göre sıfıra daha küçük komşuluklarla yakınsadığı görülmektedir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.11'de aktüatöre hata verildiğinde yörünge izleme hatasının sırasıyla bir saniyenin biraz altında ve biraz üstünde bir sürede hatasız durumdakine benzer bir komşulukla sıfıra yakınsadığı görülmektedir. Şekil 14'de aktüatöre hata ve sisteme gürültü verildiğinde yörünge izleme hatasının 1.5 saniye civarında gürültülü olarak 0 yakınsadığı görülmektedir. Üçüncü yöntemde yörünge izleme hataları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde sırasıyla 4.5 ve 6 saniye civarında birinci yönteme göre daha büyük komşuluklarla sıfıra yakınsadığı görülmektedir. Üçüncü yöntemin diğer yöntemlere göre yörünge izleme ve yörünge izleme hata performansının kötü olmasının asıl sebebi performanstan çok yöntemin sağlamlığı üzerine durulmasındandır.

Genel olarak incelendiğinde yörünge izleme ve yörünge izleme yerleşme süreleri olarak ikinci yöntem diğer yöntemlere göre daha iyi performanslar sergilemektedir. Sisteme hata verildiğinde bu hatanın bastırılması ve giderilmesi konusunda birinci yöntem diğer yöntemlere göre daha hızlı reaksiyon almaktadır. Fakat ikinci yöntemin hatanın sıfıra indirgenmesi veya yakınsaması konusunda diğer yöntemlere göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Üçüncü yöntemin amacı sağlamliğın ön planda olması olduğundan dolayı başarılı sağlam bir yöntem olduğu görünmektedir. Uygulamalarda istenilen önceliğe göre bu üç yöntemde kullanılabilir. Öncelik olarak hızlı hata çözümü ve yanında iyi bir yörünge takibi isteniyorsa birinci yöntem kullanılabilirken önceliğin yöntemin sağlamliğı olduğu uygulamalarda üçüncü yöntem kullanılabilir. Öncelik olarak hatanın iyi bastırıldığı ve yörünge takibinin iyi olması istenildiği uygulamalarda ise ikinci yöntem rahatlıkla kullanılabilir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Manipülâtörler, belirsiz parametrelere sahip karmaşık doğrusal olmayan dinamik yapıya sahiptirler ve manipülâtörler için kullanılan kontrol yöntemleri, manipülâtörler özelinde kullanım alanlarının genişliğinden ve bu sebeple artan ilgiden dolayı önemli bir araştırma konusudur. Bu araştırma alanında çok sayıda başarılı kontrol yöntemi bulunmakta ve bunları temel mantığını incelenmektedir.

Bu çalışmada uygulama şekli ile birlikte belirli kontrol stratejisinin seçimi, manipülâtörün performansını ve buna bağlı uygulama alanlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu sebeple manipülâtör kontrolü için kullanılan kontrol yöntemleri incelenmekte ve bu kontrol yöntemleri kendi aralarında bazı özelliklerinden dolayı ayrılmaktadır. Genel olarak manipülâtör kontrol tasarımları yüksek hassasiyet, doğruluk, esneklik, tekrarlanabilirlik, sürdürülebilirlik, çalışabilirlik, güvenilirlik, güvenlik ve kararlılık gibi bazı ihtiyaçları karşılamak amacıyla tasarlanmaktadır. Kontrol yöntemlerinin bazı dezavantajları bulunmaktadır ama bu noktada manipülâtör sistemlerinin uygulamalarında ihtiyaç duyulan özellikler için dezavantajlarından bağımsız kontrol yönteminin bu özellikleri sağlamasına odaklanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında incelenen kontrol yöntemleri model tabanlı ve model tabanlı olmayan olarak ikiye ayrılmaktadır. Model tabanlı yöntemler, azaltılmış karmaşıklığa dayalı yöntemler olduğundan bu yöntemler, parametre belirsizliği veya yüksek dereceli titreşim modlarının kesilmesiyle birlikte doğru model bulunamadığından yetersiz performanslara sergilemektedirler. Model tabanlı olmayan yöntemler bu zayıflıkların üstesinden gelebilmekte ama onlarında titreşim, yörünge takibi gibi konularda zayıflıkları bulunmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar gösteriyor ki klasik ya da bireysel kontrol yöntemlerinden çok hibrit kontrol yöntemleri gibi diğer kontrol yöntemlerinin birleşiminden oluşturulan yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışma kontrol yöntemlerin genel olarak iyi performanslar sergilediğini göstermekte ayrıca üç yöntemde detaylı incelemesiyle performans değerlendirmesinde bulunmaktadır. Detaylıca incelenen üç yönteme bakıldığında manipülâtörler için her açıdan üst düzey performans sergileyen bir kontrol yöntemi olmadığı görülmektedir çünkü kontrol yöntemleri genelde manipülâtörlerin yaptıkları işte verimliliğini arttırmak için gerekli olanı sağlamak için

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

tasarlanmaktadır. Bunun yanı sıra akıllı aktüatörler ve bozulma gözlemcileri gibi akıllı sistemler ile kontrol yöntemlerinin dezavantajları indirgenmeye çalışılmaktadır.

Sonuç olarak, incelenen kontrol yöntemleri istenileni verme konusunda iyi performanslar sergilemektedir. Kontrol yöntemlerinin dezavantajları bulunmakta ama hibrit yöntemler, yardımcı sistemlerle beraber bu dezavantajlar, en aza indirgenmeye çalışılmaktadır.



KAYNAKLAR

- Abu-Dhaka, F. J., Valero, F. J., Suñer, J. L. ve Mata, V. 2015. A direct approach to solving trajectory planning problems using genetic algorithms with dynamics considerations in complex environments. *Robotica*, 33(3), 669-683.
- Ailon, A. ve Lozano, R. 2000. Iterative regulation of an electrically driven flexible-joint robot with model uncertainty. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6), 863-870.
- Ajwad, S. A., Iqbal, J., Ullah, M. I. ve Mehmood, A. 2015. A systematic review of current and emergent manipulator control approaches. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 10(2), 198-210.
- Akyuz, I. H., Yolacan, E., Ertunc, H. M. ve Bingul, Z. 2011a. PID and State Feedback Control of a Single-link Flexible Joint Robot Manipulator, *IEEE International Conference on Mechatronics*, 13-15 April, Book of Proceedings, 409-414, Istanbul, Turkiye.
- Akyuz, I. H., Kizir, S. ve Bingül, Z. 2011b. Fuzzy Logic Control of Single-link Flexible Joint Manipulator, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 14-16 March, Book of Proceedings, 306-311, Auburn, AL, USA.
- Alam, W., Ahmad, S., Mehmood, A. ve Iqbal, J. 2019. Robust mode control for flexible joint robotic manipulator via disturbance observer. *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS*, 17(1-B), 85-97.
- Alandoli, E. ve Lee, T. 2020. A critical review of control techniques for flexible and rigid link manipulators. *Robotica*, 38(12), 2239-2265.
- Amari, S. I. 1998. Natural gradient works efficiently in learning. *Neural Computation*, 10(2), 251-276.
- Amato, F., De Tommasi, G. ve Pironti, A. 2013. Necessary and sufficient conditions for finite-time stability of impulsive dynamical linear systems. *Automatica*, 49(8), 2546-2550.
- Anjum, Z. ve Guo, Y. 2021. Finite time fractional-order adaptive backstepping fault tolerant control of robotic manipulator. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(1), 301-310.
- Arteaga-Pérez, M. A. ve Gutiérrez-Giles, A. 2014. A Simple Application of GPI Observers to the Force Control of Robots, *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 3-5 November, Book of Proceedings, 303-308, Metz, France.
- Baizid, K., Yousnadj, A., Meddahi, A., Chellali, R. ve Iqbal, J. 2015. Time scheduling and optimization of industrial robotized tasks based on genetic algorithms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 140-150.

- Bamdad, M. 2013. Analytical dynamic solution of a flexible cable-suspended manipulator. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 350–359.
- Barjuei, E. S., Boscarriol, P., Gasparetto, A., Giovagnoni, M. ve Vidoni, R. 2014. Control Design for 3D Flexible Link Mechanisms Using Linearized Models, *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, 23-26 June, Book of Proceedings, 181-188, Moscow, Russia.
- Bascetta, L. ve Rocco, P. 2006. Two-time scale visual servoing of eye-in-hand flexible manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(4), 818-830.
- Becedas, J., Feliu, V. ve Sira-Ramirez, H. 2007. Control of Flexible Manipulators Affected by Non-Linear Friction Torque Based on the Generalized Proportional Integral Concept, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 4-7 June, Book of Proceedings, 12-17, Vigo, Spain.
- Bechlioulis, C. P. ve Rovithakis, G. A. 2009. Adaptive control with guaranteed transient and steady state tracking error bounds for strict feedback systems. *Automatica*, 45(2), 532-538.
- Bianco, C. G. L. 2009. Evaluation of generalized force derivatives by means of a recursive Newton–Euler approach. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(4), 954-959.
- Borase, R. P., Maghade, D. K., Sondkar, S. Y. ve Pawar, S. N. 2021. A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827.
- Brogliato, B. ve Rey, D. 1998. Further Experimental Results on Nonlinear Control of Flexible Joint Manipulators, *American Control Conference*, 26-26 June, Book of Proceedings, Vol 4, 2209-2211, Philadelphia, PA, USA.
- Brogliato, B., Ortega, R. ve Lozano, R. 1995. Global tracking controllers for flexible-joint manipulators: a comparative study. *Automatica*, 31(7), 941-956.
- Brogliato, B., Rey, D., Pastore, A. ve Barnier, J. 1998. Experimental comparison of nonlinear controllers for flexible joint manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 17(3), 260-281.
- Buondonno, G. ve De Luca, A. 2015. A Recursive Newton-Euler Algorithm for Robots with Elastic Joints and its Application to Control, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 28 September-02 October, Book of Proceedings, 5526-5532, Hamburg, Germany.
- Cai, H., Huang, Y., Tang, T., Wang, Q., Du, J. ve Zhang, T. 2016. Double speed loops control for high-precision position tracking of position-controlled actuators involving a harmonic drive reducer. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(3), 1.
- Chaillet, A., Loria, A. ve Kelly, R. 2006. Robustness of PID-controlled Manipulators with Respect to External Disturbances, *45th IEEE Conference on Decision and Control*, 13-15 December, Book of Proceedings, 2949-2954, San Diego, CA, USA.

- Chakravarty, A. ve Mahanta, C. 2016. Actuator fault-tolerant control (FTC) design with post-fault transient improvement for application to aircraft control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 26(10), 2049-2074.
- Chen, C. P., Wen, G. X., Liu, Y. J. ve Liu, Z. 2015. Observer-based adaptive backstepping consensus tracking control for high-order nonlinear semi-strict-feedback multiagent systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(7), 1591-1601.
- Cole, M. O. ve Wongratanaphisan, T. 2011. A direct method of adaptive FIR input shaping for motion control with zero residual vibration. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1), 316-327.
- Craig, J. J. 1986. *Introduction to Robotics*, Pearson Education, 400, Upper Saddle River, NJ.
- Craig, J. J., Hsu, P. ve Sastry, S. S. 1987. Adaptive control of mechanical manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6(2), 16-28.
- Cui, L., Zhang, J., Gao, L. ve Wang, F. 2006. A Robust Controller of a Flexible Manipulator Using Genetic Algorithm, 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 5-8 December, Book of Proceedings, 1-4, Singapore.
- De Luca, A. 2000. Feedforward/feedback Laws for the Control of Flexible Robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 24-28 April, Symposia Proceedings, Vol 1, 233-240, San Francisco, CA, USA.
- Dong, X. J., Meng, G. ve Peng, J. C. 2006. Vibration control of piezoelectric smart structures based on system identification technique: Numerical simulation and experimental study. *Journal of Sound and Vibration*, 297(3-5), 680-693.
- Dwivedy, S. K. ve Eberhard, P. 2006. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism and Machine Theory*, 41, 749-777.
- Dyke, S. J. 1996. Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: modeling, algorithm development, and experimental verification. Yüksek lisans tezi. University of Notre Dame, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, 255, Indiana, USA.
- Fareh, R., Saad, M. ve Saad, M. 2015. Distributed control strategy for flexible link manipulators. *Robotica*, 33(4), 768-786.
- Feliu, V., Muñoz, I., Roncero, P. L. ve López, J. J. 2005. Repetitive Control for Single Link Flexible Manipulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 18-22 April, Book of Proceedings, 4303-4308, Barcelona, Spain.
- Feliu, V., Pereira, E. ve Diaz, I. M. 2014. Passivity-based control of single-link flexible manipulators using a linear strain feedback. *Mechanism and Machine Theory*, 71, 191-208.

- Feliu-Talegon, D., San-Millan, A. ve Feliu-Battle, V. 2016. Fractional-order integral resonant control of collocated smart structures. *Control Engineering Practice*, 56, 210-223.
- Garcia-Perez, O. A., Silva-Navarro, G. ve Peza-Solis, J. F. 2016. Vibration Control on a Space Flexible Structure with a PZT Stack Actuator Using Strain and MPPF Control, 34th IMAC Conference and Exposition on Structural Dynamics, Structural Health Monitoring, Damage Detection & Mechatronics, 25-28 January, Book of Proceedings, Volume 7, 111-119, Orlando, FL, USA.
- Gasparetto, A. ve Scalera, L. 2019a. From the unimate to the delta robot: The early decades of industrial robotics, In: *Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms*. Zhang B. ve Ceccarelli M. (eds), Springer, 284-295, Berlin.
- Gasparetto, A. ve Scalera, L. 2019b. A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in Historical Studies*, 8, 24-35.
- Gasparetto, A. ve Zanotto, V. 2008. A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), 415-426.
- Gasparetto, A., Boscaroli, P., Lanzutti, A. ve Vidoni, R. 2015. Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview. *Motion and Operation Planning of Robotic Systems*, 3-27.
- Guo, C., Chen, L. ve Ding, J. 2019. A novel dynamics model of ball-screw feed drives based on theoretical derivations and deep learning. *Mechanism and Machine Theory*, 141, 196-212.
- Gutiérrez-Giles, A. ve Arteaga-Pérez, M. A. 2013. Velocity/Force Observer Design for Robot Manipulators, 18th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR), 26-29 August, Book of Proceedings, 730-735, Miedzydroje, Poland.
- Hassan, M., Dubay, R., Li, C. ve Wang, R. 2007. Active vibration control of a flexible one-link manipulator using a multivariable predictive controller. *Mechatronics*, 17(6), 311-323.
- He, W., Ge, S. S., Li, Y., Chew, E. ve Ng, Y. S. 2015. Neural network control of a rehabilitation robot by state and output feedback. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 80(1), 15-31.
- He, W., Huang, H. ve Ge, S. S. 2017. Adaptive neural network control of a robotic manipulator with time-varying output constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47(10), 3136-3147.
- He, W., Yan, Z., Sun, Y., Ou, Y. ve Sun, C. 2018. Neural-learning-based control for a constrained robotic manipulator with flexible joints. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29(12), 5993-6003.

- Hou, Z., Cheng, L. ve Tan, M. 2010. Multicriteria optimization for coordination of redundant robots using a dual neural network. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 40(4), 1075-1087.
- Hu, Q., Xie, L., Wang, Y. ve Du, C. 2008. Robust track-following control of hard disk drives using improved integral sliding mode combined with phase lead peak filter. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 22(4), 413-430.
- Huang, A. C. ve Chen, Y. C. 2004. Adaptive sliding control for single-link flexible-joint robot with mismatched uncertainties. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(5), 770-775.
- Huang, J., Hu, P., Wu, K. ve Zeng, M. 2018. Optimal time-jerk trajectory planning for industrial robots. *Mechanism and Machine Theory*, 121, 530-544.
- Hurlebaus, S. ve Gaul, L. 2006. Smart structure dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2), 255-281.
- Ibrir, S. (2004). Linear time-derivative trackers. *Automatica*, 40(3), 397-405.
- Ioannou, P. A. ve Sun, J. 2012. *Robust adaptive control*. Courier Corporation, 821, New York.
- Jin, L., Li, S., Yu, J. ve He, J. 2018. Robot manipulator control using neural networks: A survey. *Neurocomputing*, 285, 23-34.
- Kabir, U., Hamza, M. F., Haruna, A. ve Shehu, G. S. 2019. Performance analysis of PID, PD and fuzzy controllers for position control of 3-DOF robot manipulator. *Zaria Journal of Electrical Engineering Technology*. 8(1), 18–25.
- Kelly, R. ve Moreno, J. 2005. Manipulator motion control in operational space using joint velocity inner loops. *Automatica*, 41(8), 1423-1432.
- Keppler, M., Lakatos, D., Ott, C. ve Albu-Schäffer, A. 2016. A Passivity-Based Controller for Motion Tracking and Dumping Assignment for Compliantly Actuated Robots, *IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, 12-14 December, Book of Proceedings, 1521-1528, Las Vegas, NV, USA.
- Kiang, C.T., Spowage, A. ve Yoong, C.K. 2015. Review of control and sensor system of flexible manipulator. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 77(1), 187–213.
- Kikuuwe, R. 2013. Alternative proofs of four stability properties of rigid-link manipulators under PID position control. *Robotica*, 31(1), 113-122.
- Kim, S., Wang, S. ve Brennan, M. J. 2010. Comparison of negative and positive position feedback control of a flexible structure. *Smart Materials and Structures*, 20(1), 015011.
- Kim, J. 2017. Two-time scale control of flexible joint robots with an improved slow mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 3317-3325.

- Kim, J. ve Croft, E. A. 2017. Full-state tracking control for flexible joint robots with singular perturbation techniques. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(1), 63-73.
- Lee, T., Kwon, J. ve Park, F. C. 2018. A Natural Adaptive Control Law for Robot Manipulators, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Book of Proceedings, 1-5 October, 1-9, Madrid, Spain.
- Lessard, J., Bigras, P., Liu, Z. ve Hazel, B. 2014. Characterization, modeling and vibration control of a flexible joint for a robotic system. *Journal of Vibration and Control*, 20(6), 943-960.
- Li, Z., Su, C. Y., Wang, L., Chen, Z. ve Chai, T. 2015. Nonlinear disturbance observer-based control design for a robotic exoskeleton incorporating fuzzy approximation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5763-5775.
- Liu, X., Yang, C., Chen, Z., Wang, M. ve Su, C. Y. 2018. Neuro-adaptive observer based control of flexible joint robot. *Neurocomputing*, 275, 73-82.
- Liu, Y. J., Lu, S., Li, D. ve Tong, S. 2016. Adaptive controller design-based ABLF for a class of nonlinear time-varying state constraint systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(7), 1546-1553.
- Liu, Y. ve Li, Y. 2005. Sliding mode adaptive neural-network control for nonholonomic mobile modular manipulators. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 44, 203–224.
- Lochan, K. ve Roy, B. K. 2015. Control of two-link 2-DOF robot manipulator using fuzzy logic techniques: A review, In: *Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Das K., Deep K., Pant M., Bansal J. ve Nagar A. (eds), 499-511, New Delhi.
- Lou, J., Wei, Y., Li, G., Yang, Y. ve Xie, F. 2015. Optimal trajectory planning and linear velocity feedback control of a flexible piezoelectric manipulator for vibration suppression. *Shock and Vibration*, 2015, 952708.
- Luca, A. D. ve Book, W. J. 2008. Robots with flexible elements, In: *Springer Handbook of Robotics*. Siciliano B. ve Khatib O. (eds), Springer-Verlag, 287–319, Berlin.
- Mahmood, I. A., Moheimani, S. R. ve Bhikkaji, B. 2008. Precise tip positioning of a flexible manipulator using resonant control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(2), 180-186.
- Mahmoodi, S. N. ve Ahmadian, M. 2009. Active vibration control with modified positive position feedback. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 131(4), 8.
- Martínez-Rosas, J. C., Arteaga, M. A. ve Castillo-Sánchez, A. M. 2006. Decentralized control of cooperative robots without velocity–force measurements. *Automatica*, 42(2), 329-336.

- Masoud, Z., Nazzal, M. ve Alhazza, K. 2016. Multimode input shaping control of flexible robotic manipulators using frequency-modulation. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 10(3), 179-188.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A. 2014. Gray wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- Moberg, S. ve Hanssen, S. 2008. On feedback linearization for robust tracking control of flexible joint robots. *IFAC Proceedings*, 41(2), 12218-12223.
- Mohammed, A. M. ve Li, S. 2016. Dynamic neural networks for kinematic redundancy resolution of parallel stewart platforms. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(7), 1538-1550.
- Monje, C. A., Calderon, A. J., Vinagre, B. M., Chen, Y. ve Feliu, V. 2004. On fractional $PI \lambda$ controllers: some tuning rules for robustness to plant uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 38(1), 369-381.
- Monje, C. A., Ramos, F., Feliu, V. ve Vinagre, B. M. 2007. Tip position control of a lightweight flexible manipulator using a fractional order controller. *IET Control Theory & Applications*, 1(5), 1451-1460.
- Neuschwandtner, G., Reekmans, M. ve van der Linden, D. 2013. An Open Automation Architecture for Flexible manufacturing, *IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, Book of Proceedings, 10-13 September, 1-5, Cagliari, Italy.
- Ozgoli, S. ve Taghirad, H. D. 2006. A survey on the control of flexible joint robots. *Asian Journal of Control*, 8(4), 332-344.
- Panomruttanarug, B. 2020. Position control of robotic manipulator using repetitive control based on inverse frequency response design. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18(11), 2830-2841.
- Panomruttanarug, B. ve Longman, R. 2004. Repetitive Controller Design Using Optimization in the Frequency Domain, *Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, 16-19 August, Book of Proceedings, 1215-1236, Providence, Rhode Island.
- Park, K. J. 2004. Flexible robot manipulator path design to reduce the endpoint residual vibration under torque constraints. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5), 1051-1068.
- Pradhan, S. K. ve Subudhi, B. 2012. Real-time adaptive control of a flexible manipulator using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(2), 237-249.
- Pradhan, S. K. ve Subudhi, B. 2014. Nonlinear adaptive model predictive controller for a flexible manipulator: An experimental study. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(5), 1754-1768.

- Prakash, R., Behera, L., Mohan, S. ve Jagannathan, S. 2020. Dual-loop optimal control of a robot manipulator and its application in warehouse automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 262-279.
- Preumont, A., De Marneffe, B., Deraemaeker, A. ve Bossens, F. 2008. The dumping of a truss structure with a piezoelectric transducer. *Computers & Structures*, 86(3-5), 227-239.
- Razmjoooy, N., Ramezani, M. ve Namadchian, A. 2016. A new lqr optimal control for a single-link flexible joint robot manipulator based on gray wolf optimizer. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 10(3), 53-60.
- Ryu, J. H., Kwon, D. S. ve Hannaford, B. 2004. Control of a flexible manipulator with noncollocated feedback: time-domain passivity approach. *IEEE Transactions on Robotics*, 20(4), 776-780.
- San-Millan, A., Feliu, V. ve Garcia, A. 2015. A Two-Stage Control Scheme of Single-Link Flexible Manipulators, 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 16-19 June, Book of Proceedings, 1098-1105, Torremolinos, Spain.
- Saravanan, R., Ramabalan, S. ve Balamurugan, C. 2009. Evolutionary multi-criteria trajectory modeling of industrial robots in the presence of obstacles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(2), 329-342.
- Schaal, S., Atkeson, C. G. ve Vijayakumar, S. 2002. Scalable techniques from nonparametric statistics for real time robot learning. *Applied Intelligence*, 17(1), 49-60.
- Schnelle, F. ve Eberhard, P. 2017. Adaptive nonlinear model predictive control design of a flexible-link manipulator with uncertain parameters. *Acta Mechanica Sinica*, 33(3), 529-542.
- Sethi, V., Franchek, M. A. ve Song, G. 2011. Active multimodal vibration suppression of a flexible structure with piezoceramic sensor and actuator by using loop shaping. *Journal of Vibration and Control*, 17(13), 1994-2006.
- Shang, W. ve Cong, S. 2013. Motion control of parallel manipulators using acceleration feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(1), 314-321.
- She, J. H., Fang, M., Ohyama, Y., Hashimoto, H. ve Wu, M. 2008. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(1), 380-389.
- Shi, X., Fang, H. ve Guo, L. 2016. Multi-Objective Optimal Trajectory Planning of Manipulators Based on Quintic NURBS, International Conference on Mechatronics and Automation, 7-10 August, Book of Proceedings, 759-765, Harbin, China.
- Singhose, W. 2009. Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(4), 153-168.

- Slotine, J. J. E. ve Li, W. 1987. On the adaptive control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6(3), 49-59.
- Soto, I. ve Campa, R. 2013. Two-loop control of redundant manipulators: analysis and experiments on a 3-DOF planar arm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(1), 85.
- Springer, K., Gattringer, H. ve Stauer, P. 2013. On time-optimal trajectory planning for a flexible link robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 227(10), 752-763.
- Su, Y. ve Zheng, C. 2017. PID control for global finite-time regulation of robotic manipulators. *International Journal of Systems Science*, 48(3), 547-558.
- Su, Y., Muller, P. C. ve Zheng, C. 2007. A Global Asymptotic Stable Output Feedback PID Regulator for Robot Manipulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 10-14 April, Book of Proceedings, 4484-4489, Rome, Italy.
- Su, Y., Zheng, C. ve Muller, P. C. 2008. Global Continuous Finite-Time Output Feedback Regulation of Robot Manipulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 19-23 May, Book of Proceedings, 3383-3388, Pasadena, CA, USA.
- Su, Z. ve Khorasani, K. 2001. A neural-network-based controller for a single-link flexible manipulator using the inverse dynamics approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(6), 1074-1086.
- Taghirad, H. D. ve Khosravi, M. A. 2002. Stability Analysis and Robust Composite Controller Synthesis for Flexible Joint Robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 30 September-4 October, Book of Proceedings, Vol 3, 2073-2078, Lausanne, Switzerland.
- Takács, G., Polóni, T. ve Rohal'-Ilkiv, B. 2014. Adaptive model predictive vibration control of a cantilever beam with real-time parameter estimation. *Shock and Vibration*, 2014, 741765.
- Talole, S. E., Kolhe, J. P. ve Phadke, S. B. 2009. Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(4), 1411-1419.
- Tavazoei, M. S. ve Tavakoli-Kakhki, M. 2014. Compensation by fractional-order phase-lead/lag compensators. *IET Control Theory & Applications*, 8(5), 319-329.
- Tee, K. P., Ren, B. ve Ge, S. S. 2011. Control of nonlinear systems with time-varying output constraints. *Automatica*, 47(11), 2511-2516.
- Tong, S., Wang, T., Li, Y. ve Chen, B. 2012. A combined backstepping and stochastic small-gain approach to robust adaptive fuzzy output feedback control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(2), 314-327.

- Tuan, D. M. ve Hieu, P. D. 2019. Adaptive position/force control for robot manipulators using force and velocity observer. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 14(6), 2575-2582.
- Vidyasagar, M. 1986. On undershoot and nonminimum phase zeros. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31(5), 440-440.
- Wang, W. ve Wen, C. 2010. Adaptive actuator failure compensation control of uncertain nonlinear systems with guaranteed transient performance. *Automatica*, 46(12), 2082-2091.
- Xiao, L. ve Zhang, Y. 2014. A new performance index for the repetitive motion of mobile manipulators. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44(2), 280-292.
- Xiao, Y., Du, Z. ve Dong, W. 2012. Smooth and near time-optimal trajectory planning of industrial robots for online applications. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(2), 169-177.
- Xu, Z., Li, S., Chen, Q. ve Hou, B. 2015. MOPSO Based Multi-Objective Trajectory Planning for Robot Manipulators, 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering, 24-26 April, Book of Proceedings, 824-828, Shanghai, China.
- Xu, Z., Wei, S., Wang, N. ve Zhang, X. 2014. Trajectory Planning with Bezier Curve in Cartesian Space for Industrial Gluing Robot, International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 17-20 December, Book of Proceedings, 146-154, Guangzhou, China
- Yan, Z., Lai, X., Meng, Q. ve Wu, M. 2019. A novel robust control method for motion control of uncertain single-link flexible-joint manipulator. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(3), 1671-1678.
- Yang, K., Yang, W. ve Wang, C. 2018. Inverse dynamic analysis and position error evaluation of the heavy-duty industrial robot with elastic joints: an efficient approach based on lie group. *Nonlinear Dynamics*, 93(2), 487-504.
- Yeo, S. H., Yang, G. ve Lim, W. B. 2013. Design and analysis of cable-driven manipulators with variable stiffness. *Mechanism and Machine Theory*, 69, 230-244.
- Yu, X., Zhang, S., Fu, Q., Xue, C. ve Sun, W. 2020. Fuzzy logic control of an uncertain manipulator with full-state constraints and disturbance observer. *IEEE Access*, 8, 24284-24295.
- Zaiwu, M., Liping, C. ve Jianwan, D. 2021. Feed-forward control of elastic-joint industrial robot based on hybrid inverse dynamic model. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(9), 1-14.
- Zanotto, V., Gasparetto, A., Lanzutti, A., Boscariol, P. ve Vidoni, R. 2011. Experimental validation of minimum time-jerk algorithms for industrial robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 64(2), 197-219.

- Zeinali, M. ve Notash, L. 2010. Adaptive sliding mode control with uncertainty estimator for robot manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 45(1), 80-90.
- Zhang, D. ve Gao, Z. 2012. Forward kinematics, performance analysis, and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(4), 484-492.
- Zhang, S., Dong, Y., Ouyang, Y., Yin, Z. ve Peng, K. 2018. Adaptive neural control for robotic manipulators with output constraints and uncertainties. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 29(11), 5554-5564.
- Zhou, J. ve Krstic, M. 2016. Adaptive predictor control for stabilizing pressure in a managed pressure drilling system under time-delay. *Journal of Process Control*, 40, 106-118.

