**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜZEY TEMİZLEME ROBOTUNUN TASARIMI VE KONTROLÜ**

**Nevzat GÜVEN**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Danışman

Prof. Dr. Semih SEZER

Mayıs 2024

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜZEY TEMİZLEME ROBOTUNUN TASARIMI VE KONTROLÜ**

Nevzat GÜVEN tarafından hazırlanan tez çalışması xx.xx.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

|  |  |
| --- | --- |
| Prof. Dr. Kim CASEY | Prof. Dr. Kim CASEY |
| Yıldız Teknik Üniversitesi | Yıldız Teknik Üniversitesi |
| Danışman | Eş-Danışman |

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Kim CASEY, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Eustolia SMALLWOOD, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Angelena BAUMANN, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mitchell GREGORY, Üye

TUBİTAK

Prof. Dr. Yulanda CLEMENTS, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Semih SEZER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yüzey Temizleme Robotunun Tasarımı ve Kontrolü başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nevzat GÜVEN

İmza

*Aileme*

TEŞEKKÜR

Yıldız Technical University is one of the seven government universities situated in İstanbul besides being the 3rd oldest university of Turkey with its history dating back to 1911.It is regarded as one of the best universities in the country as well. Our university has 10 Faculties, 2 Institutes, the Vocational School of Higher Education, the Vocational School for National Palaces and Historical Buildings, the Vocational School for Foreign Languages and more than 25,000 students.

The Istanbul State Engineering and Architectural Academy and affiliated schools of engineering and the related faculties and departments of the Kocaeli State Engineering and Architecture Academy and the Kocaeli Vocational School were merged to form Yıldız University with decree law no.41 dated 20 June 1982 and Law no. 2809 dated 30 March 1982 which accepted the decree law with changes.

The new university incorporated the departments of Science-Literature and Engineering, the Vocational School in Kocaeli, a Science Institute, a Social Sciences Institute and the Foreign Languages, Atatürk Principles and the History of Revolution, Turkish Language, Physical Education and Fine Arts departments affiliated with the Rectorate.

Yıldız Technical University is one of the seven government universities situated in Istanbul besides being the 3rd oldest university of Turkey with its history dating back to 1911.It is regarded as one of the best universities in the country as well.

Nevzat GÜVEN

İÇİNDEKİLER

[SİMGE LİSTESİ viii](#_Toc166006048)

[KISALTMA LİSTESİ ix](#_Toc166006049)

[ŞEKİL LİSTESİ x](#_Toc166006050)

[TABLO LİSTESİ xi](#_Toc166006051)

[ÖZET xii](#_Toc166006052)

[ABSTRACT 14](#_Toc166006053)

[1 GİRİŞ 16](#_Toc166006054)

[1.1 Robot Sistemleri 16](#_Toc166006055)

[1.2 Robot Bileşenleri 17](#_Toc166006056)

[1.3 Yüzey Temizleme Robotları 19](#_Toc166006057)

[1.4 Çalışmanın Motivasyonu 22](#_Toc166006058)

[2 KİNEMATİK ANALİZ 23](#_Toc166006059)

[2.1 İleri Kinematik 23](#_Toc166006060)

[2.2 Katı Cisim Konfigürasyonları 23](#_Toc166006061)

[2.3 Transformasyon 24](#_Toc166006062)

[2.4 D-H Parametrizasyonu 25](#_Toc166006063)

[2.5 Çalışma Uzayı 28](#_Toc166006064)

[2.6 Ters Kinematik 29](#_Toc166006065)

[3 DİNAMİK ANALİZ 31](#_Toc166006066)

[3.1 Diferansiyel Kinematik 31](#_Toc166006067)

[3.2 Lagrange-Euler Formülasyonu 32](#_Toc166006068)

[3.3 Uç İşlevci Temas Modeli 35](#_Toc166006069)

[4 KONTROLCÜ TASARIMI 36](#_Toc166006070)

[4.1 Ters Dinamik Kontrol 36](#_Toc166006071)

[4.2 Non-lineer kompanzasyon & ayrıklaştırma 36](#_Toc166006072)

[4.3 Kontrolcü Stabilizasyonu (PD Kontrolcü) 37](#_Toc166006073)

[4.4 Genetik Algoritma 37](#_Toc166006074)

[5 MODELLEME 39](#_Toc166006075)

[6 BULGULAR VE TARTIŞMA 40](#_Toc166006076)

[Robot Kolu Tasarımı 40](#_Toc166006077)

[7 SONUÇ 41](#_Toc166006078)

[Sonuç 41](#_Toc166006079)

[KAYNAKÇA 42](#_Toc166006080)

SİMGE LİSTESİ

A Durum Matrisi

B Girdi Matrisi

C Çıktı Matrisi

Eklem Açısı

Homojen Dönüşüm Matrisi

Ortak Normalin Mesafesi

Ortak Normalin Ötelenme Mesafesi

Ortak Normale Göre Açı

KISALTMA LİSTESİ

MPC Model Predictive Control

LQ Linear Quadratic

DH Denavit–Hartenberg parameters

PD Proportional Derivative

ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 1** DH-Yöntemi..........................................................................................................9

**Şekil 1.2** Homojen TransformasyonMatrisleri..................................................................9

**Şekil 1.3** İleri Kinematik Yöntemi..................................................................................10

**Şekil 1.4** İleri Kinematik - Yönelim ve Pozisyon İlişkisi................................................10

**Şekil 1.5** Örnek Ters Kinematik Çözümü.......................................................................11

**Şekil 2.1** 2 Uzuvlu Robot Kolu.......................................................................................13

**Şekil 2.2** MPC Akış Şeması............................................................................................15

**Şekil 2.3** LQ Kontrolcü Yapısı........................................................................................16

**Şekil 2.4** LQ Durum Uzay ve Maliyet İfadeleri..............................................................16

**Şekil 2.5** MPC - LQ Rota Takip Karşılaştırması ...........................................................17

**Şekil 2.6** Robot Kolu Modeli.........................................................................................18

**Şekil 2.7** Robot Kolu Durum-Uzay Denklemleri...........................................................18

**Şekil 2.8** H\_sonsuz Kontrolcü Şeması............................................................................19

**Şekil 2.9** Kontrolcülü ve Kontrolcüsüz Durum için Simülasyon ve Deneysel Sonuçlarını Karşılaştırılmalı Grafikleri...........................................................................20

TABLO LİSTESİ

[Tablo 2.1 MPC - LQ karşılaştırması **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**](#_Toc123934238)

ÖZET

**Yüzey Temizleme Robotunun Tasarımı Ve Kontrolü**

Nevzat GÜVEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Semih SEZER

Bu çalışma bir robot kolunun düzlemsel bir yüzey üzerindeki kirleri görsel olarak algılayıp yüzeyi temizlenmesi işlemi incelenmiştir. Sistemin bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Yüzeye paralel silme işleminin yapılabilmesi için 5 eksenli bir robot kolu tercih edilmiş ve göreve uygun ölçülerde kolun tasarımı yapılmıştır. Modellemenin doğruluğunu artırmak için kütle, atalet gibi değerler modelleme programında alt bileşenlere malzeme ataması yapılarak bulunmuş modellemeye dahil edilmiştir. Tasarlanan robot kolunun eksen ilişkileri URDF formatı yardımıyla oluşturulmuştur. Hazırlanan URDF formatındaki robot Matlab/Simscape ortamına aktarılmıştır. İleri kinematik, ters kinematik ve dinamik hesaplamalar Matlab/Simulink ortamında hazır fonksiyonları bulunan Robotics System Toolbox yardımıyla yapılmıştır. Kontrolcü olarak hesaplanmış tork kontrolcüsü (Computed Torque Controller) kullanılmıştır. Kontrolcünün kazançlarının optimizasyonu için genetik algoritma kullanılarak belirlenen rotayı takip hatası minimize edilmeye çalışılmıştır. Yüzey temizleme işlemine geçebilmek için robottan belirsiz bir mesafe uzakta konumlandırılan düzlem üzerinde rastgele kir nesneleri oluşturulmuştur. Bu kir nesnelerinin tanınması için görüntü işleme yapılmış görüntü işleme sonucunda kir çeperlerine ait koordinatlar robot kolunun takip etmesi gereken yörüngeyi oluşturmuştur. Robot kolu öncelikle yüzeyin kendinden uzaklığını tespit edip erişip erişemeyeceğini kontrol etmektedir. Erişebiliyorsa silme işlemini yapmaktadır. Robotun uç işlevcisinin yüzeyle olan etkileşimi yay-damper modeli aracılığıyla modele eklenmiştir. Böylelikle robotun yüzey silme işlemini yapabilmesi için gerekli tork ihtiyacı bulunmuştur. Sonuç kısmında robot uç işlevcisinin belirlenen koordinatları uygun şekilde takip edebildiğine yönelik referans ile karşılaştırmalı grafikler verilmiştir. Oluşturulan robotik sistem temizlik işleminin enerji ve zaman tasarrufu oluşturacak şekilde kullanılabilirliğini göstermesi açısından önemlidir. Çalışmadaki robot bir takım kurallara uygun tipteki kir nesnelerinin takibini yapabilmektedir. Yeterli görsel veri tabanı oluşturulursa görüntü işleme işlemi yapay zeka ile yapılıp kullanım kapsamı genişletilebilir.

**Anahtar Kelimeler**— Robot kolu; Görsel algılama; Temizlik işlemi; Simülasyon; 5 eksenli robot kol; Matlab/Simscape; Robotik; Hesaplanmış tork kontrolcüsü; Genetik algoritmalar; Görüntü işleme

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ   
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

**Design and Control of Surface Cleaning Robot Arm**

Nevzat GÜVEN

Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Semih SEZER

This study aims to simulate the visual detection of dirt on a planar surface by a robotic arm and the subsequent cleaning process in a computer environment. A 5-axis robotic arm was chosen to perform parallel wiping on the surface, and the arm was designed to fit the task requirements. To enhance the accuracy of the modeling, values such as mass and inertia were included in the model by assigning materials to subcomponents in the modeling program. The axis relationships of the designed robotic arm were created using the URDF format. The prepared URDF-format robot was transferred to the Matlab/Simscape environment. Forward kinematics, inverse kinematics, and dynamic calculations were performed using the Robotics System Toolbox functions available in the Matlab/Simulink environment. A computed torque controller was used as the controller. Genetic algorithms were used to optimize the gains of the controller to minimize the tracking error of the calculated trajectory. To proceed with the surface cleaning process, random dirt objects were generated on a plane positioned at an uncertain distance from the robot. Image processing was performed for the recognition of these dirt objects, and the coordinates of the dirt edges formed the trajectory that the robot arm should follow. The robot arm first determines if it can reach the surface by detecting its distance from it. If reachable, it performs the wiping process. The interaction between the end effector of the robot and the surface was added to the model through a spring-damper model to determine the torque requirement necessary for the robot to perform the surface wiping process. In the results section, comparative graphs are provided to show that the robotic end effector can accurately track the specified coordinates. The created robotic system is important in demonstrating the usability of the cleaning process in terms of energy and time savings. The robot in the study can track dirt objects of a certain type according to specific rules. If a sufficient visual database is created, image processing can be done with artificial intelligence, expanding the scope of use.

**Keywords-** Robot arm; Visual detection; Cleaning process; Simulation; 5-axis robotic arm; Matlab/Simscape; Robotics; Computed torque controller; Genetic algorithms; Image processing

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY   
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

1. GİRİŞ
   1. Robot Sistemleri

Robotlar belirli görevleri önceden programlanarak veya otonom olarak yerine getirebilen elektromekanik araçlardır. İlerleyen teknolojiyle beraber robot kolları kullanımı oldukça yaygınlaşmış olup gelecekte insan gücünün yerini büyük oranda alacağı tahmin edilmektedir. Mckinsey tarafından yapılan çalışma raporunda 2030’a kadar insan gücüne dayanan fiziksel işlerin %18 oranında azalacağı, temel düşünsel becerilere (ezber, dikkat, dil vb.) yönelik işlerin ise %28 azalacağı öngörülmektedir. [ [The future of work in Europe | McKinsey](https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/the-future-of-work-in-europe)].

Robotlar önceden-programlanmış, otonom, tele-opere ve destekleyici robotlar olarak dört gruba ayrılabilir. Önceden programlanmış robotlar yapay zeka desteği olmadan belirli bir görevi (otomobil üretimi kaynak prosesi gibi) yerine getirecek şekilde programlanmış robotlardır. Hassas şekilde çalışmaya uygunlardır. Otomotiv endüstrisinde sık kullanılır. Otonom robotlar kontrol girdisi olmadan çalışan robotlardır. Çevreyle etkileşimini kontrol edip çevreye adapte olabilmektedir. Yapay zeka desteğiyle objeleri tespit etme, rota belirleme gibi özelliklere sahiptirler. Teleopere robotlar insanlar tarafından uzaktan yönlendirilen robot sistemleridir. Bu sistemler uzay, sağlık sektörü gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Son olarak destekleyici robotlar insan vücuduna destek olacak şekilde kullanılan robot tipidir. Kontrol girdileri insan hareketleri veya düşüncesi ile yapılabilen türleri vardır. Bu robotlar insanların doğal yeteneklerini geliştirecek şekilde çalışırlar.[ [Introduction to Robotics (ilstu.edu)](https://mind.ilstu.edu/curriculum/medical_robotics/index.html)]

|  |  |
| --- | --- |
| automobile industrial robots  Ön-Programlı Robot | Roomba Robot  Otonom Robot |
| The Engineering Feat: ISS Robotics  Tele-opere Robot | What are some examples of current augmenting robots? - Quora  Destekleyici Robot |

* 1. Robot Bileşenleri

Robotlar çok farklı türde olabildiğinden, kullanılan bileşen çeşitleri çok değişken olabilmektedir. Fakat genel anlamda robotlar sensörlerden ve işlevcilerden oluşmaktadır.

**Sensörler :**

Sensörler robotun çevresinden bilgi toplamasını sağlarlar. Bu bilgi robotun davranışını yönlendirebilir.

Enkoder : Konum, açı, hız, ivme gibi büyüklükler ölçüleri ölçen sensörlerdir. Bu sensörden elde edilen veri uç işlevcisinin konumunun kontrolünde kullanılabilir.

Kamera : Robotun çevresiyle görsel ilişki kurmasını sağlar. Şekil, renk, büyüklük, mesafe gibi bilgilerin robot kontrolünde ve karar verme aşamalarında kullanılmasını sağlar.

LIDAR : Lazer ışınlarıyla robotun etrafındaki nesnelere olan uzaklığının ölçmesinde kullanılır. Bu sensör sayesinde robotun çalıştığı çevrenin 3 boyutlu haritası çıkarılabilir. Süpersonik sensörler de benzer görevi daha az hassas şekilde yerine getirmektedir.

İvmeölçer ve Manyometre : Bu sensörler robotun dünyanın yer çekimi ve manyetik alanına göre hareketini ölçmek için kullanılır.

Kuvvet- Tork Ölçüm Sensörleri : Robotun çevresindeki eklem bölgerindeki veya çevresindeki nesnelerle olan kuvvet-tork ilişkilerini ölçen sensörlerdir.

Termometre(sıcaklık), mikrofon(ses), barometre(basınç ölçümü), buton(temas ölçümü) gibi sensörler de robotlar tarafından kullanılmaktadır.

**İşlevciler :**

Robotların asıl işlevini yerine getiren parçalardır. Örnek olarak Marsta kullanılan robotların örnek toplama mekanizması verilebilir. Çoğu zaman robotun kullanıldığı alana göre özel tasarımlar gerekmektedir. Kazma, çekil, kaynak torcu, ışık, lazer, tornavida, neşter gibi her çeşitten malzeme robot için işlevci olarak kullanılabilmektedir.

Robotlara hareket kabiliyetini motor, eyleyici gibi elemanlar vermektedir. Robot kolları için elektrik motorlarının yeterli olmadığı yerlerde hidrolik-pnömatik eyleyiciler kullanılabilmektedir.

* 1. Yüzey Temizleme Robotları

Binaların camlarını temiz tutmak ısı ve ışık verimliliğini artırması açısından önemlidir. [ [5 Benefits of Window Cleaning | Pella](https://www.pella.com/ideas/windows/benefits-of-cleaning-windows/#:~:text=Why%20clean%20windows%3F,your%20home's%20energy%20efficiency%20levels.)] Yüksek katlı binalarda temizlik işlemi temizlik işçileri tarafından riskli şekilde yapılagelmiştir. Hala daha bu alanda faaliyet gösteren insan gücüne dayalı kaynaklı kullanan firmalar bulunmaktadır. Günümüzde bu alana yönelik geliştirilmiş robotik çözümler de bulunmaktadır bazı örnekler figür xx’te gösterilmiştir.

dış mekan, ufuk çizgisi, metropol, yüksek apartman bloğu içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

[A Portable Robot That Will Shake the Window Cleaning Industry - AEC Business (aec-business.com)](https://aec-business.com/a-portable-robot-that-will-shake-the-window-cleaning-industry/)

|  |  |
| --- | --- |
| High Rise Window Cleaning - What You Should Know - Toronto Window Cleaners[High Rise Window Cleaning - What You Should Know - Toronto Window Cleaners](https://torontowindowcleaner.ca/high-rise-window-cleaning-what-you-should-know/) | Window cleaning London's tallest skyscrapers - BBC London[Window cleaning London's tallest skyscrapers - BBC London (youtube.com)](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=-ybdV13oeK0) |

|  |  |
| --- | --- |
| Skyline Robotics Osmo cleaning windows in a sky scraper  Skyline Robotics closes $9.8M round to bring automated window washing  worldwide - The Robot Report  [Skyline Robotics Ozmo automates skyscraper window cleaning - The Robot Report](https://www.therobotreport.com/skyline-robotics-ozmo-automates-skyscraper-window-cleaning/) | The Kite robot - KITE Robotics - Veilig en accuraat glas en gevel reinigen  op grote hoogte    [The Kite robot - KITE Robotics - Veilig en accuraat glas en gevel reinigen op grote hoogte](https://www.kiterobotics.com/en/the-kite-robot/) |

Yüzey temizleme işlemine ihtiyaç duyulan diğer bir önemli uygulama alanı güneş panellerinin temizliğidir. Biriken toz ve kir nedeniyle güneş panellerinin verimliliği ortalama %30 düşmektedir. Panellerin belirli aralıklarla temizlenme gereksinimi bulunmaktadır. Bu işleme yönelik geliştirilen robotik çözümlerden bazıları figür xx’te gösterilmiştir. [How to clean solar panels without water | MIT News | Massachusetts Institute of Technology](https://news.mit.edu/2022/solar-panels-dust-magnets-0311)

gökyüzü, yer, dış mekan, dağ içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

[Kalyon Karapınar 1.350 MWp GES / Merkezi Kontrol Binası - Arkitera](https://www.arkitera.com/proje/kalyon-karapinar-1-350-mwp-ges-merkezi-kontrol-binasi/)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Solar panel cleaning robot - YTM - Robsys Europe GmbH - dry cleaning / wet  cleaning[Solar panel cleaning robot - YTM - Robsys Europe GmbH - dry cleaning / wet cleaning (directindustry.com)](https://www.directindustry.com/prod/robsys-europe-gmbh/product-4560971-2542427.html) | Solar panel cleaning device from SolarCleano[Solar panel cleaning devices cut grime and save cash (solarpowerworldonline.com)](https://www.solarpowerworldonline.com/2022/05/solar-panel-cleaning-devices-cut-grime-and-save-cash/) | Maintenance: - An autonomous cleaning robot for solar panels  [Maintenance: - An autonomous cleaning robot for solar panels (pveurope.eu)](https://www.pveurope.eu/maintenance/maintenance-autonomous-cleaning-robot-solar-panels) |

İncelenen örneklerdeki çözümlerde temizleme işleminin mobilite kazandırılmış robotlarda yapıldığı görülmektedir. Bu robotlar belirli periyotlarla temizlenmek istenen tüm yüzeyi fırça gibi uç işlevciler kullanarak temizlemektedirler.

* 1. Çalışmanın Motivasyonu

Bu tezde yüzey temizliği işleminde kullanılan bir robot kolu sistemi incelenecektir. Bu sistemin modellemesi Matlab/Simscape/Simulink aracılığıyla yapılacak olup, yüzey temas dinamiği ve yörünge ölçekleme algoritmaları da sisteme dahil edilecektir. Yörünge ölçekleme algoritmaları robotun güvenli bir şekilde rotayı takip etmesini sağlamaktadır. Eğer yörünge zamanlama yapılmaz ise robot kolu önüne bir engel geldiğinde engeli aşabilmek için motor torkunu sürekli artıracaktır. Bu durumda robota, önündeki nesneye ve etrafa zarar verme ihtimali oluşmaktadır. Böylelikle robot kolu insanlı ortamlarda etrafa zarar vermeden çalışabilir hale gelecektir. Yörünge planlaması için referans bir görsel üzerine görüntü işleme yapılarak robot koluna referans olacak rota çizilecektir. Çalışma için 5 eksenli bir robot kolu seçilmiştir; bunun nedeni temizleme uç işlevcisinin yüzey ile düzlemsel ilişki kurabilmesini sağlayabilecek minimum eksen sayısının 5 olmasıdır. Tez kapsamında tasarlanan 5 kollu robotik kol sisteminin görselleri aşağıdaki gibidir.

|  |  |
| --- | --- |
| tıbbi cihazlar, iç mekan, duvar, diş fırçası içeren bir resim  Açıklama otomatik olarak oluşturuldu  Üretilmiş Robot Kolu Görselleri | |
| CAD Modeli | ekran görüntüsü, dikdörtgen, tasarım içeren bir resim  Açıklama otomatik olarak oluşturuldu  Simulink Modeli |

1. KİNEMATİK ANALİZ
   1. İleri Kinematik

Eklem değişkenleri bilinen robot kolunun her bir uzvunun konum ve yönelimini bulunması işlemidir. Robot kolu uzuvlarına koordinat eksenleri tanımlanıp, komşu uzuvlardaki konfigürasyonlarının bulunması işlemine ileri kinematik denilmektedir.

* 1. Katı Cisim Konfigürasyonları

Robot kolunu 3 boyutlu ortamda tarif etmek için konfigürasyonlara ihtiyaç vardır. Konfigürasyon robot kolu pozisyonlarının noktaları hakkında tüm bilgileri içerir. Cisimler esnek ve katı cisimler olarak ikiye ayrılır. Katı cisimlerin esnemediği varsayılmaktadır. Katı cisimlerin uzuvları birbirlerine prizmatik veya döner eklemlerle bağlıdırlar.

|  |  |
| --- | --- |
| Introduction | SpringerLink  Eklem ekseni  Döner eklem | Introduction | SpringerLink  Eklem ekseni  Prizmatik Eklem |

Robot manipülatörleri birbirlerine ikiden daha fazla linkle bağlı cisimlerden oluşmaktadır. Her linkin kendine ait ağırlığı, ataleti bulunmaktadır. Her bir uzvu sabit bir koordinat eksenine göre tarif etmek kolaydır. Aşağıdaki örnekte siyah ile gösterilen koordinat ekseni ana referans eksendir. Diğer uzuvlar bu eksene göre konumlandırılır. Her bir uzvun kendine ait koordinat ekseni bulunmaktadır ve koordinat eksenleri hareket edebilmektedir. Uzuvların pozisyon ve oryantasyonları eklem değişkenlerinin değişimiyle değişmektedir.

çizgi film, ekran görüntüsü içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

* 1. Transformasyon

Matris çarpımlarıyla uzuvlara ait koordinat eksenleri arasındaki ilişkiyi elde etmek mümkündür. Bu işlem için homojen dönüşüm matrisi (4x4) kullanılmaktadır. İki koordinat ekseni arasındaki pozisyon ve oryantasyonu birbirlerine göre veren matrise homojen dönüşüm matrisi ismi verilmektedir.

Örnek bir homojen dönüşüm matrisi

İlk (3x3)’lük yani R birbirlerine göre olan oryantasyonu verirken son sütundaki ilk üç eleman ise iki eksen arasındaki görece pozisyonu vermektedir.

Bir noktanın diğer bir eksende taşınmış hali

Oryantasyonun daha kolay anlaşılması için x,y,z eksenleri etrafındaki dönme açıları cinsinden yazılmasına euler dönüşümü denilmektedir.

* 1. D-H Parametrizasyonu

Denavit- Hartenberg yöntemi robot koluna ait dört ana değişkenin kullanılmasıyla homojen dönüşüm matrislerinin çıkartılması işlemidir. Öncelikle robot kolunun uzuvlarına aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi eksenler tanımlanır. Kol hareket eksenleri z ekseni olarak belirlenmiştir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | otomat, ekran görüntüsü içeren bir resim  Açıklama otomatik olarak oluşturuldu |

Robot kolunun konfigürasyonuna göre eksenler arasındaki mesafeler aşağıdaki ifadeler göz önünde bulundurularak isimlendirilir.

|  |
| --- |
| : ekseni etrafında ve arasındaki açı |
| : ekseni doğrultusunda ölçülen ve arasındaki mesafe |
| :ekseni doğrultusunda and arasındaki mesafe |
| : ekseni etrafında and arasındaki açı |

Eksenlerin arasındaki bu ilişkiler dikkate alınarak aşağıdaki gibi bir tablo oluşturulur.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| i |  |  |  |  |
| 1 | 0 | 0 | 0 |  |
| 2 | -90 | 0 | 0 |  |
| 3 | 0 |  | 0 |  |
| 4 | 0 |  | 0 |  |
| 5 | 90 |  | 0 |  |

D-H notasyonuna uygun şekilde yapılmış olan bu tablo kullanılarak transformasyon matrisleri oluşturulur. İleri kinematik, eklem değişkenlerini kullanarak ile uç işlevcisinin konumu ve yönelimini referans eksene göre hesaplar. Her bir ekleme ait koordinat sistemleri arasındaki ilişki dönüşüm matrisleriyle elde edilebilmektedir. Her bir eklemin transformasyon matrisi arka arkaya çarpılarak referans eksene göre konum ve oryantasyon bulunabilir.

Böylelikle uç işlevcisinin referans eksene göre konumu şu şekilde elde edilmiştir. Başlangıç konumu olarak için ileri kinematik şu şekilde elde edilir.

Elde edilen çarpımdaki ***n o*** ve ***a*** ifadeleri uç işlevcinin oryantasyonunu, ***p*** ifadeleri ise referans eksene göre x, y ve z’deki konumları vermektedir.

Elde edilen denklem sistemi ile ileri kinematik hesaplamalar yapılmış olur.

* 1. Çalışma Uzayı

İleri kinematik yöntemle elde edilen uç konum işlevcisi konumunun ulaşabildiği uzay (robot kolunun fiziksel limitleri de dikkate alınarak) kontrol edilmiştir.





* 1. Ters Kinematik

Robot uç işlevcisinin oryantasyonunun ve konumunun bilindiği durumda bu noktayı sağlayacak eklem açılarını bulma işlemine ters kinematik analiz denir. Ters kinematik analizde bir uç işlevcisi konumunu sağlayan birden fazla çözüm olabilir.Ters kinematik hesapları ileri kinematiğe göre daha karmaşık ve zordur. Analitik olarak; trigonometrik ilişkiler kullanılarak yada ileri kinematikte elde edilen matrislerin manipülasyonu ile çözüm elde edilebilmektedir. Yada Levenberg-Marquardt yöntemi gibi iteratif yöntemler kullanılabilmektedir. Bu çalışmada Levenberg-Marquardt yönteminin çözüm yöntemi gösterilmiştir.

Levenberg-Marquardt yönteminde jakobi matrisinden yararlanılır. Robot kolu değişkenlerinin tüm birinci derece türevlerini içeren matrise jakobi matrisi denilmektedir. Bu yöntemde eklem değişim vektörü ( )hesaplanır ve ilk tahminin üzerine eklenir. Bu işlem hata limitlerinin altına inene kadar devam eder. Levenberg-Marquardt yönteminde vektörünü minimum yapan değil de aşağıdaki ifadeyi minimum yapan en uygun çözüm aranır.

Burada olan sıfırdan farklı sönüm katsayısıdır. Yukarıdaki ifade şu şekilde de yazılabilir.

Açık denklem

Eşlenik olarak şu şekilde yazılabilir

Bu denklemde theta vektörü yalnız bırakılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

Böylelikle çözümün ilk aşaması tamamlanmış olur elde edilen yeni açılar için tekrar jakobi matrisi hesaplanır yukarıdaki işlemler tekrar edilirse belirli bir iterasyondan sonra hata istenilen limitin altında kalacak yani gerekli eklem açıları bulunmuş olacaktır.

Özetle bu bölümde ileri ve ters kinematiğin esasları anlatılmıştır. İleri kinematikte eklem açıları verilip uç işlevci konumu ve oryantasyonu bulunurken, ters kinematik analizde uç işlevci konumu ve oryantasyonu verilip eklem açıları bulunmaktadır. İleri kinematik hesapları için robotun DH parametre tablosu çıkarılıp tablo yardımıyla transformasyon matrisleri oluşturulmuştur. Transformasyon matrislerinin çarpımı ile uç işlevci konumu bulunmuştur. İleri kinematik robotun kontrol algoritmasında doğrudan kullanılmasa da jakobi matrisinin hesaplanması için gereklidir. Ters kinematiğin ise robotun verilen rota takip görevini yerine getirebilmesi için mutlaka hesaplanması gerekmektedir. Ters kinematik için Matlab-Simulink Robotics System Toolbox’un da kullandığı Levenberg-Marquardt yöntemi gösterilmiştir. Bu yöntem iteratif bir yöntemdir. Diğer iteratif yöntemlere göre performansının daha iyi olduğu görülmüştür. (Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares Methods)

İleri Kinematik

Ters Kinematik

1. DİNAMİK ANALİZ

Robot kolunun dinamik analizi eklemlere tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot kolunun zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Elde edilen matematiksel denklemler robot kolunun bilgisayar ortamında simülasyonu, eklem uzayında en uygun tasarım parametreleriyle hareket edebilmesi, kararlı ve kontrollü bir davranış sergilemesi açısından önemlidir. (Robot dinamiği ve kontrolü Dr. Zafer Bingül)

* 1. Diferansiyel Kinematik

Diferansiyel kinematikte amaç eklem hızlarını ve uç işlevci açısal ve lineer hızlarını bulmaktır. Uç işlevci açısal ve lineer hızları şu şekilde ifade edilir.

olmak üzere

n eklem sayısı olmak üzere (3xn) boyutunda matrislerdir. eklem hızlarının uç işlevcinin lineer hızına, ise eklem hızlarının uç işlevcinin açısal hızına yaptığı katkıya verilen isimdir.

Yukarıdaki denklemde ile gösterilen ifade geometrik jacobian ifadesidir. Jacobian ifadesi aşağıdaki şekilde eklemin türüne hesaplanır.

uç işlevcinin konumu, rotasyon matrisinden transformasyon matrisinden elde edilen matrislerdir.

* 1. Lagrange-Euler Formülasyonu

Karmaşık dinamik sistemler, kinetik ve potansiyel enerji farkından yararlanan Lagrange denklemini kullanarak basit bir şekilde modellenebilir.(Schilling 1990). Kinetik enerji ve potansiyel enerji arasındaki farkı temsil eden Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir.

Denklemdeki q ifadesi genelleştirilmiş koordinatı temsil etmektedir. Kinetik enerji (T) robot kolunun pozisyonuna ve hızına bağlı iken potansiyel enerji(U) sadece kolun konumuna bağlı bir fonksiyondur.

Denklemlerdeki ifadeleri daha da açık yazarsak

Kinetik enerji terimi :

Elde edilen B(q) matrisi kütle matrisidir (n x n elemanlı). Simetrik ve pozitif tanımlı bir matristir. jakobiyen matrisinin açısal ve lineer bölümleridir. üst indeksi uzvun atalet ve kütlesini, m üst indeksi ise motorun atalet ve kütlesini temsil etmektedir. Bu çalışmada motor uzva dahi edilmiştir.

Potansiyel enerji terimi :

terimi temel referans koordinat eksenine göre yer çekimi ivmesi vektörüdür. Eğer ze ekseni dikey eksense . uzvun ağırlık merkezinin temel eksene göre konumudur.

Potansiyel ve kinetik enerji terimleri yazıldıktan sonra robot kolunun hareketinden dolayı oluşan denklem

ifadesi , genelleştirilmiş koordinat ekseni ile ilişkilendirilmiş genelleştirilmiş kuvvettir. Motor ve sürtünmeden dolayı oluşan torkları içerir. ifadesi daha açık şekilde şu şekilde gösterilebilir.

ve korunumlu olmayan kuvvetlerin sayısını belirtir. Lagrange türevleri şu ifadeyi verir.

ifadelerinden yukarıda bahsedilmişti. Şimdi ifadesi incelenirse:

Bu denklemde elde edilen coriolis matriksidir.(n x n boyutunda). G(q) ise potansiyel enerji vektörüdür. Yer çekiminden ve uzuvlardaki yaylardan gelen potansiyel enerjiyi içermektedir. Bu çalışmada uzuvlarda yay bulunmadığından sadece yer çekimi etkisini içerir. ifadesi şu şekilde hesaplanır.

Tüm bu elde edilen ifadeler tek bir denklemde gösterilirse :

Burada aktüatör torkları

viskoz sürtünme torklarını verirken (n x n) sürtünme katsayısı matrisidir.

coulomb sürtünme torkudur. (n x n) sürtünme katsayısı matrisidir.

uç işlevcinin etraf ile etkileşiminden kaynaklı oluşan kuvvettir.

Bu çalışmada sürtünmeler ihmal edilmiş uç işlevci kaynaklı oluşan kuvvet terimi hesaplara dahil edilmiştir.

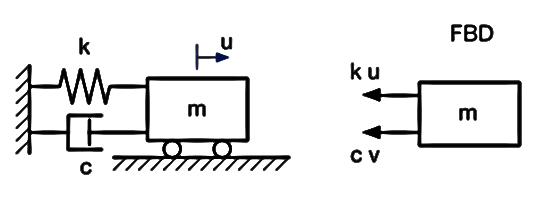
Bu ifadeye ters-dinamik denklem ismi verilmektedir. Bu denklemde ivmenin yalnız bırakılmasıyla elde edilen denkleme ise ileri-dinamik denklem ismi verilmektedir. Bu denklemin çözümünün eldesiyle dinamik analiz kısmı tamamlanmış olur.

* 1. Uç İşlevci Temas Modeli

Robot kolunun uç işlevcisi ile cam arasındaki temastan dolayı oluşan kuvvetin hesaplanıp, kuvvetten dolayı eklem üzerinde oluşan torkların hesaplanması gerekmektedir. Kuvvetlerin hesaplanması için uç işlevci ile cam düzlemi arasında yay-damper modeli kullanılmıştır.

Bu denklemdeki k yay rijitlik katsayısı, d sönüm katsayısıdır. x uç işlevcinin normal eksendeki cam ile olan mesafesi, v ise uç işlevcinin cam ile arasındaki hız değeridir. Temas kuvvetinin eklemlerde oluşturduğu torkların hesabı için Jacobiyen matrisinden yaralanılır.

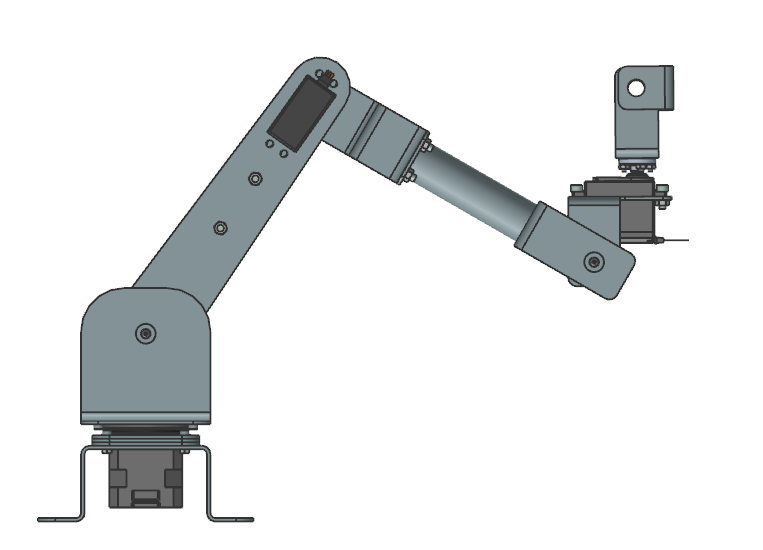
Elde edilen matrisi nx1 boyutundadır. Dinamik modellemede hesaplanan eklem torklarına temastan gelen torklar eklenir.



***b***

***k***

**Düzlem**



* 1. Yörünge Planlama

Yörünge planlama robot kolunun uç işlevcisinin bir başlangıç ve hedef nokta arasındaki giderken, hızının, ivmesinin planlanmasıdır. Yörünge planlama için şu şekilde bir hiyerarşi tanımlanabilir.

* Görev planlama: Yüksek seviye hedefleri içerir. “Git ve şu objeyi al ve şuraya koy” gibi.
* Yol planlama: Başlangıç ve bitiş noktaları arasında gerçeklenebilir bir yol planlama işlemidir. Birden çok noktanın birleştirilmesi gibi düşünülebilir.
* Yörünge planlama: Yol planlamadan farklı olarak yol boyunca pozisyon, oryantasyon, hız ve ivmenin planlanması işlemidir.

Yörünge planlaması için iki farklı yaklaşım bulunmaktadır.

Bunlar

* Görev uzayında yörünge planlaması : uç işlevcinin rota boyunca ilerleyeceği yol üzerindeki noktaların konumunun belirlenmesi ve gerekli interpolasyonların yapılması için kartezyen koordinat sisteminin kullanılması işlemidir.
* Eklem uzayında yörünge planlaması : uç işlevci için konum girdilerinin verilmesi ve gerekli interpolasyonların yapılması işlemi doğrudan eklem açıları kullanılarak yapılır.

taslak, ekran görüntüsü içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Görev Uzayı** | **Eklem Uzayı** |
| **Avantajları** | * Hareket tahmin edilebilirdir. * Engeller ve çarpışmalar daha kolay atlatılabilir. | * Daha hızlı çözümlenirler. * Eyleyici hareketi daha yumuşaktır. |
| **Dezavantajları** | * Yavaştır. * Eyleyici hareketi yumuşak olmak zorunda değildir. | * Ara noktalardan geçilip geçilmediği garanti edilemez. |

Yörünge tipleri için temel iki yöntem vardır. Bunlar:

Trapezoidal Hız : Sabit ivme ve sıfır ivme parçalarından oluşan kesikli yörünge ivmeleri belirlenir. Sabit ve sıfır ivme belirlemeleri hızın trapezoidal bir profile sahip olmasına , yörünge pozisyon eğrisinin ise s biçiminde olmasına neden olur. Pozisyon, hız ve ivme limitleri koymak ve valide etmek görece olarak kolaydır.

metin, diyagram, çizgi, öykü gelişim çizgisi; kumpas; grafiğini çıkarma içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

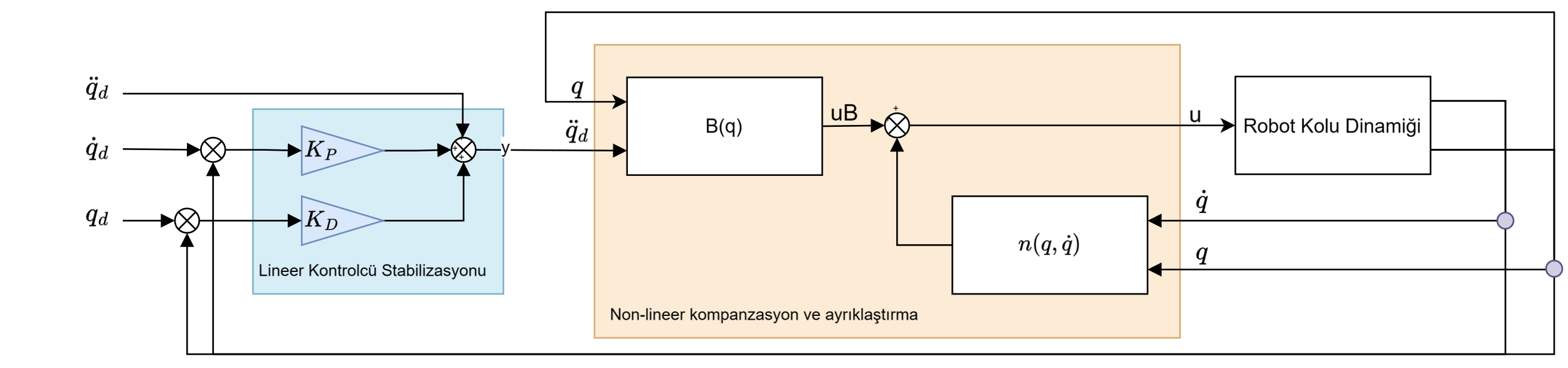
Polinom : Farklı derecede polinomlar interpolasyon yapılması işlemidir. Çoğunlukla üçüncü derece ve beşinci derecede polinomlar kullanılmaktadır. Polinom yörüngeler yörünge noktalarının sürekli bir şekilde sıfır yada sıfırdan farklı hız ve ivmelerle takip edilebilmesini sağlarlar. Fakat ivme ve hız değerlerinin limitleri belirlemek ve valide etmek zordur. Robot kolu uç işlevcisi yörünge noktasından geçerken hız ve ivmeleri aşım yapabilir.

metin, diyagram, öykü gelişim çizgisi; kumpas; grafiğini çıkarma, çizgi içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

1. KONTROLCÜ TASARIMI
   1. Ters Dinamik Kontrol

Robot kolu kontrolünde sık kullanılan bir yöntem olduğu için ters dinamik kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Kontrolcü yapısı aşağıdaki gibidir. Kontrolcü lineer kontrolcü stabilizasyonu ve non-lineer kompanzasyon & ayrıklaştırma bölümü olarak iki ayrı kısımda incelebilir.



* 1. Non-lineer kompanzasyon & ayrıklaştırma

Bu bölümün amacı her bir eklemin kontrolü için girdi ve çıktı sinyallerinin ayrıklaştırılması ve sistemin doğrusallaştırılmasıdır.

|  |  |
| --- | --- |
|  | diyagram, yazı tipi, çizgi, beyaz içeren bir resim  Açıklama otomatik olarak oluşturuldu |

Bu kontrolcü robot kolunun ters dinamiğini hesaplamayı temel alan bir kontrolcü olduğundan ters dinamik kontrol ismini almaktadır. Hesaplamalı tork kontrolcü ismi de kullanılmaktadır. Bu sistemde girdisi diğer eklemlerden bağımsız şekilde sadece girdisini etkileyebilmektedir.

* 1. Kontrolcü Stabilizasyonu (PD Kontrolcü)

Non-lineer kompanzasyon ve ayrıklaştırma sonrası ortaya çıkan kontrol problemi kontrolcü kanunu olan y değerini stabilize eden uygun PD-kontrolcüyü bulmaktır.

olduğu bilindiğine göre yukarıdaki denklem ikinci derecen şu şekilde yazılabilir:

matrisleri köşegen pozitif tanımlı matrislerdir. Sistem ayrık yapıda olması referans sinyal ( ) sadece ilgili eklemi ( ) etkilediği anlamına gelmektedir. Bu sebeple matrislerinin köşegen matrislerdir. olarak verilen bir rotanın çıktısıyla takibinin yapılabilmesi için şu şekilde seçilir.

Denklem 5.x ‘deki değeri yerined denklem 5.xx’deki yazılırsa ve hata terimi kullanılarak düzenlenirse elde edilen denklem şu şekilde olur.

Gerçek açı , istenilen açı ’dır. Bu tip bir hata ancak ve/ya da sıfırdan farklı ise oluşur. Hata, seçilen katsayılarına bağlı bir hızla 0’a yakınsar.

Bu kontrolcünün uygulanması için yerçekimi, Corolis ve merkezcil terimler, sönüm, atalet matrisi gibi terimlerin hesaplanmasıyla mümkündür.

* 1. Genetik Algoritma

Kontrolcünün kazançlarının optimize edilmesi için genetik algoritma optimizasyonu kullanılmıştır. Genetik algoritmalar doğadaki işleyişi taklit eden bir optimizasyon yöntemidir. Genetik algoritmada aday çözümler (fenotipler) popülasyonu daha iyi çözümler verecek şekilde gelişirler. Her aday çözüm kendine has özelliklere sahiptir (kromozom, genotip gibi) ve bu özellikleri her yeni jenerasyonda mutasyona uğrayıp gelişir. Bu çalışmada genetik algoritma optimizasyonu için matlab araç kutusu kullanılmıştır. Genetik algoritmaya ait temel kavramlar [[Genetik Algoritmalar (ab.org.tr)](https://ab.org.tr/ab16/sunum/202.pdf)]

Gen : Kendi başına anlamı olan ve genetik bilgi taşıyan en küçük genetik birim.

Kromozom : Probleme ait bilgileri içeren kromozomlar bir yada birden çok genin bir araya gelmesiyle oluşurlar.

Popülasyon : Kromozomlar veya bireyler topluluğudur. Popülasyon çözülmek istenen probleme alternatif çözümler kümesinin adıdır.

Seçilim : Yeni topluluk oluşturulması için eldeki popülasyondan iyi bireylerin seçilmesi gerekmektedir.

Rulet Seçim : Tüm kromozomların uygunluk değerleri toplanır, her kromozomun uygunluğuna oranlanır. En yüksek oranı olanlar seçilir.

Sıralı Seçim : Krozomolar uygunluk değerlerine göre sıralanır. Belirli bir sıranın altında kalanlar elenir.

Turnuva Seçim : Popülasyon içerisinden rastgele kromozomlar alınır. Bu seçilenlerin arasından en iyi olanlar seçilir.

Çaprazlama : Eldeki yüksek uygunluk kromozomların gen dizilimleri, yine uygunluğu yüksek başka kromozomlarla çaprazlanır.

Mutasyon : Kromozomların genlerinde yapılan yerel değişikliklere verilen isimdir. Böylelikle optimizasyon sırasında çözüm esnasında yön değişiklikleri yaparak yerel minimum bölgelerinden uzaklaşılması amaçlanır.

Genetik algoritmanın uygulanma şematiği aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | Genetik Algoritma (Örnek Uygulama ve Kodları) | |
| Genetik Algoritmalar | Akademik Sunum | | | | | |
| İlk Popülasyon | Uygunluk fonksiyonu | Seçilim | Çaprazlama | | Mutasyon |

1. MODELLEME
   1. Genel Bakış

Sistem üç ana bloğa bölünmüştür. Bu bloklardan ilkinde zaman ölçeklemesi ile yörünge planlamasını yapılıp robot koluna hareket için gerekli açıları, hızları ve ivmeleri beslenmektedir. Beslenen açı, hız ve ivme ile fiziksel modelden gelen açı, hız değerleri kontrolcü bloğuna beslenip kontrolcüden yörünge takibi için gerekli tork çıktısı verilmektedir. Fiziksel model kısmında simscape modeli kurulmuştur. Burada beslenen tork ile robot kolu dinamik olarak hareket etmekte açı ve hız değerleri ise kontrolcüye geri beslenmektedir.

metin, diyagram, çizgi, yazı tipi içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

* 1. Yörünge Planlama

Tüm rotanın takibi için gerekli süre baştan belirlenmiştir ve her bir noktaya zaman ataması yapılmıştır. Yörünge takibi 16 saniyede yapılacaktır ve her bir yörünge segmentinde hareketin için eşit zaman aralığında yapılması istenmiştir. Sistemdeki dijital saat 0.02 saniyelik aralıkla simülasyon saatini çıktı olarak vermektedir. Mod bloğu geçen toplam sürenin 16 saniyeyi geçip geçmediğini kontrol etmektedir. Eğer simülasyon süresi 16 saniyeyi geçerse yörünge takibine baştan başlanmaktadır. Get Trajectory Index fonksiyonu yörünge segmentinin indisi bulur ve bu indisin değişip değişmediğini çıktı olarak verir. Extract Trajectory Segment fonksiyonu Get Tracjectory Index fonksiyonunda indis değiştiyse aktive olan bir fonksiyondur. Yörüngedeki segmentin indisi bilindiğinden bu bölümdeki yörünge noktaları ve oryantasyonlarını indis yardımıyla bulunur. O zaman aralığında incelenen segmentin başlangıç noktası ve bitiş noktası için yörünge noktaları ve oryantasyonlar kullanılarak homojen transformasyon matrisleri oluşturulur ve segment zaman aralığı ile çıktı olarak verilir. Segmentteki başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki hareketin sürekli olarak takibi için interpolasyon yapılmaktadır. İnterpolasyon için Transform Trajectory bloğu kullanılmaktadır. Bu bloğun girdileri ilk ve son noktalar için homojen transformasyon matrisleri, simülasyon zamanı, segment için belirli olan zaman aralığı ve zaman ölçek değeridir. Time scaling bloğunda yörünge segmentindeki her iki nokta aralığı için başlangıçta ve sonunda sıfır hız, segment ortasında maksimum hız olacak şekilde trapezoidal yörünge planlanmaktadır.

diyagram, plan, teknik çizim, şematik içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldumetin, diyagram, plan, teknik çizim içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

* 1. Görüntü İşleme Adımları

Robot kolunun takip edeceği rota için görüntü işleme kullanılmıştır. Bir resmin üzerindeki nesneler türlerine göre ayrıklaştırılıp istenilen türdeki nesnenin kenarları ile robot kolu için takip rotasını oluşturulmuştur. Bu çalışmada referans kriter olarak yuvarlaklık oranı seçilmiş olup robot kolunun yuvarlak nesneleri takip etmesi istenmiştir. Soldaki görüntüdeki nesneler görüntü işleme yöntemleriyle belirlenmiş, yuvarlaklıklarına göre puanlanmıştır. Sağdaki resimde görüntü işlemenin sonucunda ortaya çıkan nesneler ve puanları görülmektedir.

|  |  |
| --- | --- |
| grafik, kırpıntı çizim, daire, tasarım içeren bir resim  Açıklama otomatik olarak oluşturuldu | renklilik, ekran görüntüsü, diyagram, tasarım içeren bir resim  Açıklama otomatik olarak oluşturuldu |

* 1. Kontrolcü

metin, diyagram, ekran görüntüsü, plan içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

* 1. Dinamik Model ve Temas Mekaniği

metin, ekran görüntüsü, diyagram, dikdörtgen içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu metin, diyagram, plan, şematik içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

function [hasChanged,segIdx] = getTrajIdx(t,waypointTimes)

% Initialize previous index

persistent prevIdx

if isempty(prevIdx)

prevIdx = 0;

end

% Find the trajectory segment index

segIndices = find(t>=waypointTimes);

% Limit the index value to the number of times minus one

% (This addresses the final time case)

segIdx = min(segIndices(end),numel(waypointTimes)-1);

% Determine whether the index has changed from the previous time step

if prevIdx == segIdx

hasChanged = false;

else

hasChanged = true;

prevIdx = segIdx;

end

end

function [torque,force] = contactForce(xPen,vPen,J,k,d)

%contactForce calculates the reaction force and torque of the contact

% The contact mechanism is modeled as a linear spring-damper system, and the

% reaction force is calculated by the given penetration depth and

% velocity. The torque applied on the robot due to the reaction force is

% also calculated.

% Make sure the penetration depth is nonnegative

if xPen<0

xPen = 0;

end

% Make sure the penetration velocity is nonnegative

if vPen<0

vPen = 0;

end

% Calculate the reaction force based on a linear spring-damper model

force = -k\*(xPen)-sign(xPen)\*d\*vPen;

fext = zeros(6,1);

fext(4) = force;

% Calculate the torque applied on the robot due to the reaction force

torque = J'\*fext;

end

function [T0, Tf, timeInterval] = createTransformTrajSegment(segIdx,waypointTimes,waypoints,orientations)

% Extract the time interval, initial, and final transforms for the segment

timeInterval = waypointTimes(segIdx:segIdx+1);

T0 = trvec2tform(waypoints(:,segIdx)') \* eul2tform(orientations(:,segIdx)');

Tf = trvec2tform(waypoints(:,segIdx+1)') \* eul2tform(orientations(:,segIdx+1)');

end

1. BULGULAR VE TARTIŞMA

Robot Kolu Tasarımı

Robot kolu için DH parametreleri, ileri ve geri kinematik yöntemleri uygulanıp kolayca matematiksel modellenebilmektedir. Kontrolcü seçimi ve kontrolcü performansı karşılaştırma işlemleri yapılmak istendiğinde daha basit modellerin kullanılması avantajlı görünmektedir. İncelenen çalışmalarda simülasyon veriyleriyle deneyler arasında bazı uyumsuzluklar görülmektedir. Bu nedenle modellenen ve kontrol edilen sisteminin aynı zamanda deneysel modelinin hazırlanması faydalı olacaktır. Sistemde non-lineerlik bulunuyorsa lineer kontrol yöntemlerin. Uygulayabilmek için lineerleştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Lineerleştirmeler matematiksel model sistemi gerçek davranışından uzaklaştırsa da belirli koşullar altında istenilen performansı sağlamaktadır. Modern kontrol yöntemleri daha yüksek marjinlere sahip şekilde kontrol çıktıları oluşturabilmektedirler. Bu sebeple klasik yöntemlere göre daha avantajlıdır. Modellenen sistemde farklı kontrol modellerinin uygulanıp karşılaştırılması yararlı olacaktır.

1. SONUÇ

Sonuç

Robot kolları ve robot dinamiği hakkında bilgiler verilmiş, robot kolu kontrolü üzerine modern kontrolcü kullanan 2 adet çalışma incelemiştir. İncelenen çalışmalar vesilesiyle robot kontrolündeki süreç ve yöntemler hakkında bilgiler edinilmiştir. Bu sistem üzerine uygulanmış kontrol algoritmaları hakkında fikir sahipi olunmuştur. Sistemin karakterini belirten (aerodinamik, yapısal, harmonik vb.) ön analizler yapılıp sistem matematiksel modellemesine dahil edilmesiyle, basit modellemere göre daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Sonuç olarak da kontrolcülerin kontrol ettiği sistemlere aerodinamik, yapısal, harmonik vb analizlerden bulunan etkiler eklenip kontrollü durumda elde edilen cevaplara göre performansları kıyaslanabilir.

KAYNAKÇA

[1] Guechi, E.-H.; Bouzoualegh, S.; Zennir, Y.; Blažič, S. MPC Control and LQ Optimal Control of A Two-Link Robot Arm: A Comparative Study. Machines 2018, 6, 37. https://doi.org/10.3390/machines6030037

[2] Toru Watanabe, Ryota Aikawa, Yasuaki Ryokata, Kazuto Seto, ROBUST CONTROL OF A BENDING-TORSION COUPLED FLEXIBLE ARM WITH UNCERTAINTIES, IFAC Proceedings Volumes, Volume 41, Issue 2, 2008, Pages 11853-11858, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902661005, https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02007.

[3] Ersin Doğan, Delta Paralel Robot İleri Ve Ters Kinematik Hesaplamaları yüksek lisans tezi Şubat 2010