

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN DİNAMİK ANALİZİ VE
KONTROLÜ

AHMET BURAK TATAR

Yüksek Lisans Tezi
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Oğuz YAKUT

MAYIS - 2015

ÖNSÖZ

DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN DİNAMİK ANALİZİ VE KONTROLÜ

AHMET BURAK TATAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ahmet Burak TATAR

KLAZİC - 2015

Bu tez, 06.05 / 2015 tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Oğuz YAKUT

Üye: Doç. Dr. Ayşegül UÇAR

Üye: Yrd. Doç. Dr. Erkan BAHÇE



Bu tezin kabulü fen bilimleri enstitüsü yönetim kurulunun/...../ 2015 tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖNSÖZ

Lisans ve özellikle yüksek lisans eğitimimin her döneminde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bana karşı duymuş olduğu güven ile birlikte gösterdiği sabır ve ilgi sayesinde başarılı olmamdaki büyük katkısını göz ardı edemeyeceğim değerli danışmanım Doç. Dr. Oğuz Yakut'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans eğitimim süresince yaptığım çalışmalarda beni yalnız bırakmayan değerli hocalarıma ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ahmet Burak TATAR

ELAZIĞ - 2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. ROBOT TARİHÇESİ VE ÇEŞİTLERİ.....	4
2.1. Robot Nedir?.....	4
2.2. Robotların Tarihsel Gelişimi.....	5
2.3. Robotların Genel Olarak Sınıflandırılması.....	6
2.4. Robotların Çeşitleri ve Kullanım Alanları.....	6
2.4.1. Endüstriyel Robotlar.....	7
2.4.2. Tıp ve Sağlık Alanında Kullanılan Robotlar.....	7
2.4.3. Operasyonel Robotlar.....	8
2.4.4. İnsansı Robotlar.....	8
2.4.5. Mobil Robotlar.....	9
3. ROBOT TASARIMI.....	11
3.1. Tasarım.....	11
3.2. Motor Seçimi.....	12
3.3. Mikroişlemci Seçimi.....	15
3.4. Sensörler.....	16
4. ROBOT KİNEMATİĞİ.....	20
4.1. İleri Yön (Düz) Kinematığı.....	20
4.1.1. Denavit – Hartenberg Yöntemi.....	21
4.1.2. Eksen Yerleştirme.....	22
4.1.3. Homojen Dönüşüm Matrislerinin Bulunması.....	24
4.1.4. Temel Dönüşüm Matrislerinin Bulunması.....	25
4.2. Ters Kinematik.....	26
5. ROBOT DİNAMİĞİ.....	28
5.1. Lagrange – Euler Yöntemi.....	28
5.1.1. Tork Denkleminde Toplam Ataletin Elde Edilmesi.....	29
5.1.2. Jakobien Matrisinin Oluşturulması.....	30
5.1.3. Tork Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	33
6. ROBOT KONTROLÜ.....	40
6.1. Kontrol Sistemleri.....	40
6.2. PID Kontrolör Tasarımı.....	42
7. YÖRÜNGE PLANLAMA.....	46
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	57
EKLER.....	58

ÖZET

Bu çalışmada, toplam 14 serbestlik derecesine sahip 4-bacaklı bir robot tasarlanmıştır. Tasarımda, hareketli kafaya yerleştirilmiş algılayıcılar yardımıyla robota önemli işlevsellikler kazandırılmıştır. Günümüzde dört bacaklı robot çalışmaları at, köpek ve kedi gibi hayvanların hareket ve davranış özellikleri taklit edilerek gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, tasarlanan robotun baş kısmına yerleştirilen alkol gaz sensörü ile bir köpeğin koku alma özelliği ön plana çıkarılarak, narkotikte faydalı olabilecek robot köpek uygulamalarının altyapısı oluşturulmaya çalışılmıştır.

Dört bacaklı robotun yürümesini sağlayan her bir bacağın eklemleri özenle tasarlanmıştır. Her bir bacak, Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılarak eklem koordinatları ile uç nokta koordinatı arasındaki matematiksel ilişkiler, düz ve ters kinematik dönüşümlerle analiz edilmiştir. Belirlenen eklem parametreleri göz önünde bulundurularak dinamik analizler matematiksel olarak elde edilen diferansiyel denklemler ile gerçekleştirilmiştir. İstenen hareketi gerçekleştirmek için noktadan noktaya yörünge analizi yapılarak, elde edilen referans eklem açıları, geliştirilen PID kontrolör sayesinde yakalanmaya çalışılmıştır. Elde edilen dinamik denklemlere uygulanan PID kontrolörün referans noktaları yakalayabilme başarısını gösterebilmek için MATLAB paket programında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sistem cevapları, grafiksel olarak elde edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 4-bacaklı robot, alkol gaz sensörü, dinamik analiz, PID kontrolör.

SUMMARY

DYNAMIC ANALYSIS AND CONTROL OF A FOUR LEGGED ROBOT

In this thesis study, a four legged robot has been designed, which has 14 degrees of freedom. In the design, with the help of sensors that is placed on the moving head, the important functionalities have been redounded to the robot. Nowadays, four legged robot studies have been performed, by being imitated the motion and behavior properties of animals such as horse, dog and cat. In this thesis study, with the alcohol gas sensor, which was placed on the head of the designed robot, by being brought a dog's sense of smell into the forefront, infrastructure of robot dog applications that would be useful at narcotic has been studied to be constituted.

Each leg was analyzed, by being used Denavit-Hartenberg method, with mathematical connections between joint coordinates and endpoint coordinate and, forward and inverse kinematic transformations. By being considered, the specified joint parameters, the dynamic analysis has been realized with differential equations which are attained mathematically. In order to perform the requested motion, by being made from point to point trajectory analysis, the obtained reference joint angles have been tried to catch by means of the developed PID controller. In order to show the achievement of the catching ability the reference points of PID controller that is applied to the obtained dynamic equations, the simulations have been performed in MATLAB packaged software. System answers were presented in figures and the results were examined.

Keywords: 4-legged robot, alcohol gas sensor, dynamic analysis, PID controller.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. El – Cezeri’nin tasarladığı robot.....	5
Şekil 2.2. Endüstriyel robotlar.....	7
Şekil 2.3. Da Vinci ameliyat robotu.....	8
Şekil 2.4. Bomba imha robotu.....	8
Şekil 2.5. İnsansı robot Asimo.....	9
Şekil 2.6. Dört bacaklı robot Big-Dog.....	10
Şekil 3.1. Dört bacaklı robotun Solidworks programında tasarımı.....	11
Şekil 3.2. Robotun bir bacağına oluşturan 3-eksenli yapı.....	12
Şekil 3.3. Robot eklemlerinde kullanılan bağlantı braketleri.....	12
Şekil 3.4. MG995 RC Servo motor.....	13
Şekil 3.5. RC servo motor için tanımlanan PWM sinyal karakterleri	13
Şekil 3.6. Servo motorun orijinal iç yapısı.....	14
Şekil 3.7. Modifiye edilmiş bir MG995 RC servo motorun bağlantı şeması.....	14
Şekil 3.8. Arduino Mega ADK.....	15
Şekil 3.9. Ultrasonik sensörün çalışma mantığı.....	16
Şekil 3.10. HC-SR04 Ultrasoniksensör.....	16
Şekil 3.11. MQ-3 Alkol gaz sensörü.....	17
Şekil 3.12. MQ-3 Gaz sensörünün bağlantısı.....	18
Şekil 3.13. Dört bacaklı robota ait görüntüler	15
Şekil 3.14. Robot üzerinde kullanılan Lipo Pil.....	19
Şekil 4.1. Denavit – Hartenberg metodu ile eksen yerleştirme.....	22
Şekil 4.2. Dört bacaklı robotun eksenlerinin yerleşimi.....	22
Şekil 4.3. Sağ arka bacağın eksenel yerleşimi.....	23
Şekil 6.1. Açık çevrim kontrol sistemi.....	40
Şekil 6.2. Kapalı çevrim kontrol sistemi.....	40
Şekil 6.3. PID Kontrolörlerinin etkilerinin karşılaştırılması.....	42
Şekil 6.4. Zaman alanı cevap parametreleri.....	43
Şekil 6.5. Tasarlanan kontrol sisteminin blok şeması.....	44

Şekil 7.1.	Belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans konumlar için sistem cevapları	47
Şekil 7.2.	Belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans konumlar için hata cevapları.....	47
Şekil 7.3.	Belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans konumları için elde edilen simülasyon	48
Şekil 7.4.	Belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ referans konumlar için sistem cevapları.....	48
Şekil 7.5.	Belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ referans konumlar için hata cevapları.....	49
Şekil 7.6.	Belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ referans konumlar için elde edilen simülasyon.....	49
Şekil 7.7.	Robotun $x=42$, $y=46$ hedefine ulaşması	51
Şekil 7.8.	Robotun $x=42$, $y=46$ hedefine ulaşırken hatanın değişimi.....	51
Şekil 7.9.	Robotun $x=32$, $y=8$ hedefine ulaşması.....	52
Şekil 7.10.	Robotun $x=32$, $y=8$ hedefine ulaşırken hatanın değişimi.....	52
Şekil 7.11.	Robotun $x=14$, $y=2$ hedefine ulaşması.....	53
Şekil 7.12.	Robotun $x=14$, $y=2$ hedefine ulaşırken hatanın değişimi.....	53

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Dört bacaklı robotun tek bacağının D-H tablosu.....	23
Tablo 4.2. Robot bacağı parametreleri.....	24
Tablo 6.1. PID Denetleyicilerinin karakteristikleri.....	43

KISALTMALAR

- D-H** : Denavit - Hartenberg
PID : Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel)
PTP : Point to Point (Noktadan Noktaya)
PWM : Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RC : Radio Control (Radyo Kontrol – Hobi)

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, 4-bacaklı bir robotun mekanik tasarımı, kinematik analizleri, dinamik analizi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Robot, her bir bacağı 3 serbestlik dereceli olan 4 adet bacak ve 2 serbestlik dereceli bir kafa ile toplamda 14 serbestlik dereceli tümü döner hareketli eklemlere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Dört bacaklı robotun eklem birleşim noktaları, eksenlerin kesişmesini sağlayacak ve hareket kabiliyetini engellemeyecek biçimde tasarlanmıştır. Ayrıca hafifliğin sağlanabilmesi ve gereksiz yapısal elemanlardan kaçınmak için mümkün olduğunca motor gövdelerinden faydalanarak uzuvlar oluşturulmuş ve hafif alaşımlı bağlantı braketleri ile eklem bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Bunun neticesinde, robotun enerjisini daha verimli kullanması ve hareketlerini daha atik gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Bu bakımdan özgün bir tasarım olduğu söylenebilir. Mekanik tasarımlar, Solidworks çizim programında 3D ortamında gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde 4-bacaklı robotlar insanoğlunun yaşamını işlevsel olarak kolaylaştıracak ve ihtiyaçları karşılayacak birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarını genişletmek mümkündür. Güvenlik güçlerinin narkotik uygulamalarında kullanılan köpekler suçla mücadelede vazgeçilmezlerdir. Çok özel koku alma becerileri sayesinde imkânsız başarılabildikleri herkes tarafından bilinir. Ancak, neticede onların bir canlı olduğu ve zarar görebilecekleri bir takım çevresel faktörlerle karşı karşıya kalabilecekleri unutulmamalıdır. Bu durumda, benzer işlevselliğe sahip 4-ayaklı bir robotun bu gibi durumlarda kullanılıp kullanılamayacağı sorusu akla gelmektedir. Bunun için robotun sahip olması gereken en önemli özelliğinin, yani koku duyarlılığının kazandırılması gerekmektedir. Ancak, günümüzde henüz insan burnunun bile hissedebileceği kokuları algılayabilen bir algılayıcı geliştirilememiştir. Buna rağmen, teknolojik gelişmelerle bu problemin ilerleyen zamanlarda çözülebileceğine inanmaktayız. Geçen bu süreç koku algılayan robot çalışmalarının altyapısının hazırlanabilmesine engel değildir. Bu yüzden, bu çalışmada burun görevini görebilecek bir alkol gaz sensörüne karar verilerek robotun baş bölgesinin alt kısmına uygun biçimde yerleştirilmiştir. Böylelikle tasarlanan robota farklı bir işlevsellik kazandırılmıştır. Robotun, alkol gaz sensörü ile ortamdaki alkol gazının yoğunluğunu ölçerek belli bir amaca göre alanda istenilen tepkileri verebilmesi sağlanmıştır.

Aslında, robota kazandırılan bu özellik; tasarlanan robotun, narkotik köpeklerin yaptığı görevleri yapabileceğini ortaya koymak ve bu konuyla ilgili yapılabilecek çalışmalara fikir vermek açısından önemlidir.

Robotun alkol gazı mevcut olan bölgelere yönelmesi; narkotik köpeklerin, uyuşturucu madde içeren bölgeleri tespit etmesiyle aynı görev olarak düşünülebilir. Ancak, günümüz sensör teknolojisinde eroin, esrar vb. gibi uyuşturucu maddeleri algılayabilecek sensörlerin bulunmayışı, robotun uyuşturucu maddeleri tespit etmesini mümkün kılmamaktadır. Böyle olmasına rağmen; algoritma, tasarım ve işlev açısından, gaz sensörü kullanılarak, robotun böyle bir amaç için kullanılmasının zemini hazırlanmış olmaktadır.

Dört ayaklı robotları kapsayan konularda yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışması, 6 bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, robotun tanımı yapılmış ve tarihçesi verilmiş, günümüzde kullanılan robot çeşitleri belirtilmiş, kullanım amaçları ve kullanıldıkları yerler kısaca özetlenmiştir.

İkinci bölümde, robotun mekanik tasarımı hakkında bilgiler verilmiş, kullanılan malzemelerden bahsedilmiş ve montajı tamamlanmış robotun son biçimi gösterilmiştir.

Üçüncü bölümde, robot eklemlerinin istenilen hareketi yapabilmesi için gerekli olan eklem açılarının hesaplanmasına yönelik, düz ve ters kinematik analizleri yapılmıştır. Bunun için Denavit-Hartenberg parametreleri kullanılarak eksen takımları yerleştirilmiş ve dönüşüm tablosu oluşturulmuştur.

Dördüncü bölümde, eklemlerin dinamik davranışının matematiksel modelleri elde edilmiştir. Elde edilen bu ifadeler yardımıyla sisteme etkiyen dış zorlamalar karşısında her bir ekleme uygulanması gereken tork değerleri hesaplanabilecektir.

Beşinci bölümde, tasarlanan PID kontrolörün, dinamik denklemler kullanılarak sisteme uygulanması ve simülasyon cevaplarının elde edilmesi, MATLAB paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölümde de, noktadan noktaya yörünge analizi yapılarak robot eklemlerinin, belirtilen referans noktaları yakalayabilme başarısını ortaya koyan simülasyonların grafiksel cevaplarına yer verilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile 14 serbestlik dereceli, dört bacaklı bir robotun yürümesini sağlayan her bir bacağın eklemleri özenle tasarlanmış eklem parametreleri belirlenerek kinematik ve dinamik denklemler elde edilmiştir. Amaçlanan herhangi bir hareketi sağlayan yörünge analizi ile elde edilecek referans eklem açılarının istenilen

noktalara ulaşılabilmesi, uygulanan PID kontrolör sayesinde başarıyla gerçekleştirilebilmiştir.

2. ROBOT TARİHÇESİ VE ÇEŞİTLERİ

2.1. Robot Nedir?

Robot, çevresinden bilgi alabilen ve bu bilgiyi anlamlı bir amaç için kullanabilen makineye denir. Bir robot sistemi fiziksel olarak vardır. Bilgisayar programlarından farklı olarak ona elimizle dokunabiliriz. Robot, çevresini sürekli algılar ve çevresine tepkide bulunur. Bu algılamalar ışık, renk, konum, şekil gibi farklı parametrelere bağlı olabilir. Her robotun tanımı gereği 3 temel özelliği vardır [1]:

1. İşlem yapma yetisi; Bir işlemi yerine getirebilmelidir; yoksa robot olmaz sadece bir madde olur.
2. İşlemin sonucunu belirleme yetisi; İşlemi yaptıktan sonra mutlak olarak işlemin sonucunu belirlemelidir ki işlem tam olarak yapılmış olsun.
3. Karar verme yetisi; İşlemin sonucuna göre ya da dış etkenlere göre mutlaka bir yargı kurabilmelidir.

Başka bir tanım ile robotlar, verilen bir dizi görevleri önceden programlanmış hareketler aracılığıyla malzemeleri, materyalleri, el aletlerini veya özel donanımları hareket ettirmek amacıyla tasarlanmış, canlılara benzer işlevleri olan ve davranış biçimleri sergileyen, çok işlevli manipülatörlerdir. İnsanların robotlar hakkındaki düşünceleri, tecrübeleri de oldukça önemlidir.

Robotlar, aynı zamanda otonom olarak (bağımsız) bulunduğu ortamı kendi programı sınırlarında algılayıp yorumlayabilen ve tepki üreten makinelerdir. İnsanda beynin gördüğü işlevi, robotta, kontrol kartı gerçekleştirir. Algılama, robotta kullanılan algılayıcılar aracılığıyla olur. Algılayıcılardan gelen bilgi, kontrol kartı aracılığıyla, yazılmış olan programa göre yorumlanır ve tepkiler sayısal veriler halinde robotun hareket mekanizmalarına gönderilir.

Robot, bir kaide üzerinde en az bir kol, tutma organları (genellikle pensler, vantuzlar veya elektromıknatıslar), pnömatik, hidrolik veya elektriksel sensörler ile konumu ve basınç algılayıcılarıyla, bilgi işlem organlarıyla donatılmış kontrollü mekanik manipülatörlerdir.

Yukarıdaki tanımlarda da görüldüğü gibi robot; canlılara benzer işlevleri olan ve davranış biçimleri sergileyen makinelerdir [2].

2.2. Robotların Tarihsel Gelişimi

Robotların şimdiye kadar birçok farklı tanımı yapılmıştır. Webster sözlüğünde robot, genellikle insanların gerçekleştirdikleri işlevleri yerine getiren otomatik araçlar olarak tanımlanmaktadır. Ancak, bu tanıma göre mesela bir çamaşır makinesi de robot sayılabilmektedir.

Robotun, Amerikan Robot Enstitüsü tarafından yapılan tanımı ise, malzemelerin, parçaların ve araçların hareket ettirilebilmesi için tasarlanmış olan çok fonksiyonlu ve programlanabilir manipülatör veya farklı görevleri yerine getirebilmek için değişken programlı hareketleri gerçekleştirebilen özel araç şeklindedir.

Robot kelimesi, Çek ve Slovak dillerinde köle veya işçi anlamına gelir. 1921’de “Robot” sözcüğü ilk defa Çekoslovak oyun yazarı Capek tarafından kullanılmıştır.

Robot kelimesi ilk olarak 1920 yılında kullanılmış olsa da, robotlara ait ilk kavramlar ve robot benzeri ilk makinelere ait bilgiler M.Ö.3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Eski Mısır, eski Yunan ve Anadolu medeniyetlerinde otomatik su saatleri benzeri makinelerin geliştirildiği bilinmektedir. M.Ö.100 yıllarında yaşamış olan İskenderiyeli mühendisin otomatik açılan kapılar, fışkiyeler vb. gibi düzenekleri su ve buhar gücü ile çalıştırıldığı eski kitaplarda yazılmaktadır.

İlk sibernetikçi (Bir insanın veya otomatik bir makinenin, modern tekniğin kaynakları çerçevesinde herhangi bir işi yönetmesini veya belli bir amaca ulaşmasını sağlayan bilim.) kabul edilen Ebul-iz İsmail bin ar-Razzaz el-Cezeri (MS 12.yy), sadece suyun kaldırma gücünü kullanarak tamamen yeni bir teknik ve sistem kurmuş, çok yönlü otomatik hareketler elde edebilmiştir [3].



Şekil 2.1. El – Cezeri’nin tasarladığı robot

2.3. Robotların Genel Olarak Sınıflandırılması

Yetenek düzeyi olarak robotlar çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu başlık altında endüstriyel robotlar; sıra kontrollü, öğrenebilen, kontrollü yörünge, adaptif ve zeki robotlar olarak sınıflandırılırlar.

Sıra kontrollü robotlar; başlangıç komutlarına bağlı olarak belirli bir işlem dizisini sırasıyla gerçekleştirirler. Çeşitli zamanlarda farklı sıralarla işlem yapmak üzere ayarlanabilirler. Fakat ayarlamadan sonra yeni bir ayarlamaya kadar aynı işlem sırasını takip etmeleri söz konusudur.

Öğrenebilen robotlara bir seri hareketi icra etmesi öğretilir. Manyetik disk, manyetik bant, ram türü bir kayıt aracı pozisyon sensörlerinden gelen koordinat bilgilerinin kaydedilmesi için kullanılır. Her noktada üç eksene ait koordinat bilgileri kaydedilir. Tüm yol aynı şekilde işlendikten sonra robotun aynı yolu tekrarlaması istenir. Öğretme işlemi bir insan tarafından gerçekleştirilir ve yol boyunca izlenecek yörünge ve hareketler öğretici tarafından tespit edilir.

Kontrollü yörünge robotları, öğrenebilen robotlar ile adaptif robotlar arasında kalır. Bir dereceye kadar nümerik kontrollü takım tezgâhlarına benzediklerinden nümerik kontrollü olarak da adlandırılırlar. Bu çalışmada analizi gerçekleştirilen robot, kontrollü yörünge robotu olarak ifade edilebilmektedir.

Adaptif robotlar, çevrelerine reaksiyon verecek şekilde bilgisayar kontrollü yörünge özelliğine sahip olmakla birlikte bir operasyonun gerçekleştirilmesi esnasında yörünge ve hareketleri değiştirebilme yeteneğine de sahiptirler. Örneğin, bir kaynak robotu bir görme sensöründen alınan bilgiler vasıtasıyla tanımlanan yörünge yanlış olsa bile doğru kaynak dikişini gerçekleştirebilir.

Zeki robotlar, çevrelerini sezme hareketlerini değiştirme yeteneğine sahiptirler. Bu nedenle çevreye ait bir model ve bilgi tabanına sahip olmaları gereklidir. Yapay zekâ araştırmalarına göre robotlarda zekilik, çeşitli amaçlı sensörler topluluğuna, büyük bir hafıza kapasitesine ve çevreyi modelleme yeteneğine sahip olmak anlamına gelmektedir.

2.4. Robotların Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Robotların kullanım alanları oldukça geniştir. Temizlik sanayisinden, tehlikeli işler ve bakımına; tıp alanından, tarım sektörüne; boya sanayisinden, otomobil sanayine ve akla

gelen tüm alanlarda kullanımı oldukça yaygındır. Robotların temel amacı insanların hayatını kolaylaştırmak, onlara hizmet etmektir.

2.4.1. Endüstriyel Robotlar

Endüstriyel robotlar, insan benzeri özellikleri olan, programlanabilir makinelerdir. Bir robotun en işlevsel uzvu koludur. Parça tutma, montajlama, yerleştirme vb. işlemlerde robot kolları kullanılmaktadır. Bu robotlar; kesme, delme, boyama, şekil verme, yüzey işleme gibi işlemleri yapabilmektedir. Endüstriyel robotlar, farklı tasarımlar ve farklı boyutlarda yapılabilmektedir. Endüstriyel robotlar ilk üç ekleminin yapısına göre; kartezyen, küresel, silindirik, SCARA, mafsallı robotlar olarak farklı bölümlere ayrılmaktadır.



Şekil 2.2. Endüstriyel Robotlar

2.4.2. Tıp ve Sağlık Alanında Kullanılan Robotlar

İnsan kolunu taklit edebilen robotların, bir adım daha ileriye gidip insanlar tarafından kullanılabilecek protezler haline gelebilmeleri için çalışmalar yapılmaktadır. İnsan beyninden gelen sinyallerin ölçülmesi ve yorumlanması ile bu sinyallere karşılık gelen fiziksel hareketlerin robot kolu tarafından yerine getirilmesi sağlanabilmektedir [4].

Günümüzde son derece hassas robot manipülatörleri kullanılarak bazı ameliyatlarda gerçekleştirilmektedir. Bu robotlar sayesinde kıtalar arası iletişim ile cerrahların ameliyatlara katılması da sağlanabilmektedir [5].



Şekil 2.3. Da Vinci ameliyat robotu

2.4.3. Operasyonel Robotlar

Operasyonel robotlar, insan hayatının tehlikeye girebileceği yerlerde, insanların yapması gereken işleri yapmak üzere üretilirler. Robotlar, radyasyonlu, tehlikeli, kimyevi ya da biyolojik maddelerin olduğu, insanları zorlayacak sıcak, soğuk ortamlarda veya patlayıcılar üzerinde rahatlıkla çalışabilirler [4].

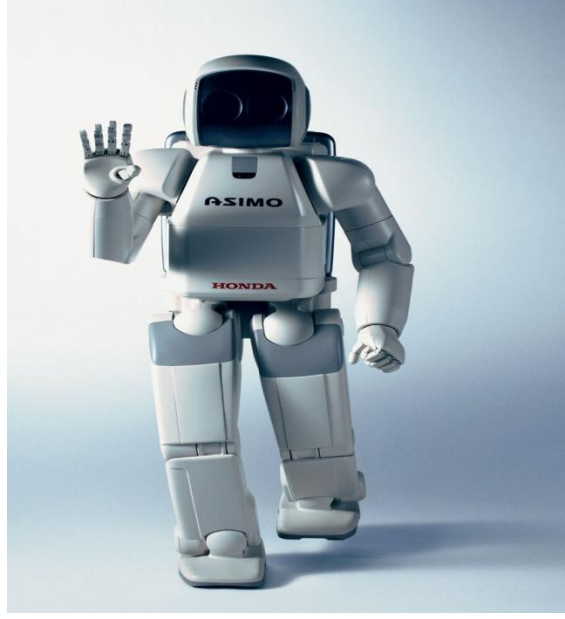


Şekil 2.4. Bomba imha robotu

2.4.4. İnsansı Robotlar

İnsansı robotlar, insan gibi hareket edebilen, insanlar gibi düşünebilen ve yapay zekâ algoritmaları kullanarak, kendi veri tabanını sürekli güncelleyerek kendisini geliştirebilen (öğrenen) robotlardır. Günlük yaşantımız içerisinde; özellikle iş hayatında, insana ihtiyaç duyulan tüm durumlarda, insansı robotlar vazgeçilmez bir alternatiftir. Çünkü bu robotlar, insanlar tarafından istenildiği gibi programlanabilmekte ve her türlü koşulda

kullanılabilmektedir. Önceki tanımlarda da ifade edildiği gibi, insanoğluna hizmet eden bu robotların kullanılmaya başlanması hayatı oldukça kolaylaştırmıştır.



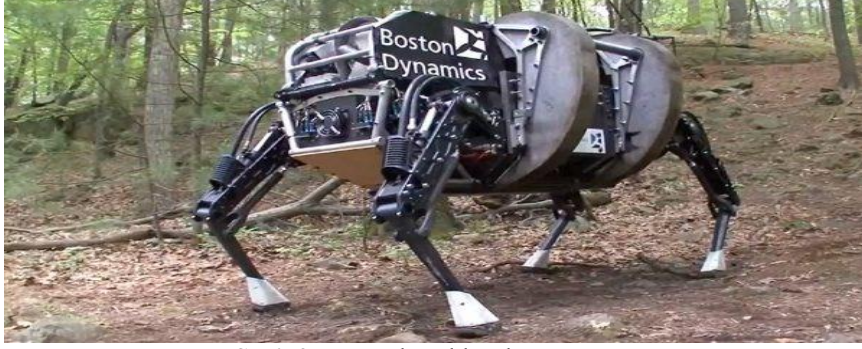
Şekil 2.5. İnsansı robot Asimo

2.4.5. Mobil Robotlar

Mobil robotlar, fiziksel olarak sabit bir noktaya bağlı kalmayan, belirlenen bir çevrede (havada, karada ya da suda) hareket ederek istenilen fonksiyonları yerine getirebilen robotlardır. Mobil robotların tasarım amacı, insanlar için tehlikeli ve zor olan görevleri yerine getirmektir. Mobil robotlar, otonom ya da bilgisayar kontrollü olabilmektedir. Ancak her iki kontrolde de, algılayıcılar (sensörler) kullanılarak, çevresel faktörler algılanabilmelidir. İnsansı robotlar, askeri ve güvenlik amacıyla kullanılan robotlar, uzay araştırmalarında kullanılan robotlar mobil robotlara örnek verilebilir. Ayrıca, daha önce belirtilen operasyonel robotlar da kısmen mobil robotlar sınıfına dâhil olmaktadır.

Mobil robotlar, hareket sistemlerine göre paletli, tekerlekli ya da bacaklı olabilmektedir. Bu çalışmada analizi yapılan robot, dört bacaklı robotlar (animal robots) grubuna girmektedir. Bacaklı robotlar, bazı hayvanların vücut yapılarından esinlenerek o hayvanların hareketlerini yapabilmek amacıyla tasarlanmaktadır. Ayrıca bacaklı robotlar, askeri alanlarda ve volkanik arazilerde keşif amaçlı olarak kullanılabilmektedir. Bu robotların tasarım amacı, canlı varlıkların yaptıkları eylemlerin en benzer şekilde robotlara yaptırılmasını sağlayarak, yeryüzünde insanların hayatlarını daha kolay hale getirmek ve

günümüz teknolojisinin imkânlarının bu gibi projeleri uygulayamaya yeterli olduğunu kanıtlayabilmektir. Şekil 2.6.'te dört bacaklı robotlara bir örnek verilmiştir.



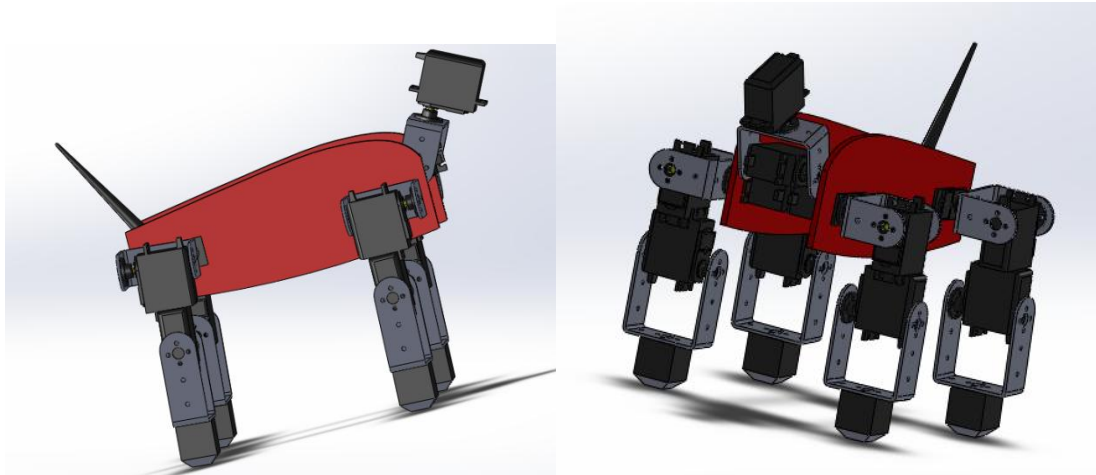
Şekil 2.6. Dört bacaklı robot Big-Dog

3. ROBOT TASARIMI

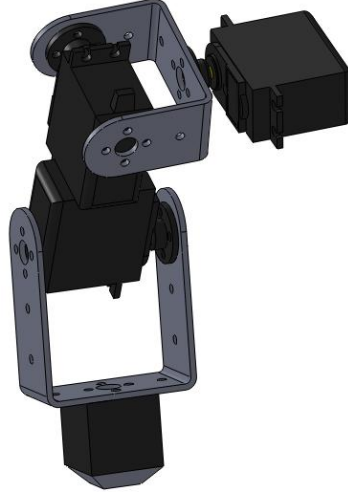
Çalışma konusu olan dört bacaklı robotun gerçekleştirilmesinde; mekanik tasarım, imalat, montaj, motor seçimi, mikroişlemci ve algılayıcı seçimlerinin her biri farklı aşamalarda ele alınmıştır.

3.1. Mekanik Tasarım

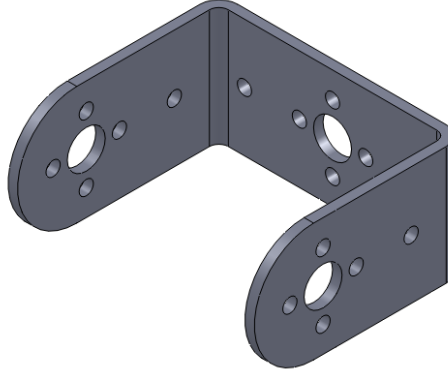
Robotun mekanik tasarımı Solidworks adlı çizim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir mekanik eleman özenle belirlenerek bilgisayar ortamında boyutlandırılmış daha sonra uygun biçimde montajı gerçekleştirilmiştir. Montajı tamamlanan robot, mevcut eklemlerinde harekete engel olabilecek mekanik aksaklıkların önceden fark edilebilmesi için hareket tanımlamaları yapılarak, 3D ortamında animasyonlarla izlenmiştir. Mekanik tasarımı tamamlanan 4 bacaklı robotun simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir. Burada baş hareketlerini sağa ve sola gerçekleştiren bir motor, başın aşağı ve yukarı hareketini sağlayan ikinci bir motor ile iki eksenli kafa hareketleri elde edilebilmiştir. Robotun her bir bacağı 3 serbestlik derecesine sahip döner eklemlerle oluşturulmuş ve bacağı tahrik eden motorlar bacadaki uzuvları oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.2’de robotun bir bacağı oluşturan 3 eksenli yapının Solidworks’ta tasarlanmış görüntüsü yer almaktadır. Her bir eklemdaki dönme hareketini gerçekleştirebilmek ve uzuvların birbirine olan bağlantısını sağlayabilmek için Şekil 3.3’te gösterilmiş olan bağlantı braketleri kullanılmıştır. Bağlantı braketleri alüminyum alaşımlarından imal edilmiş, oldukça hafif, rijit ve yüksek mukavemete sahip olduğundan tasarımda kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.1. Dört bacaklı robotun Solidworks programında tasarımı



Şekil 3.2. Robotun bir bacağına oluşturan 3-eksenli yapı



Şekil 3.3. Robot eklemlerinde kullanılan bağlantı braketi

3.2. Motor Seçimi

Motor seçimi yapılırken, motorun karakteristik özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi dört bacaklı robot mekanizmasında 14 adet servo motor kullanılmıştır.

Servo motor, bir mekanizmada son kontrol elemanı olarak görev yapan motordur. Genellikle güç sağlayan motorlar belirli bir hızda dönmeye göre tasarlanırken servo motorlar çok geniş bir hız komutunu yerine getirecek şekilde tasarlanır [6].

Robotun her bir eklemi için Şekil 3.4’de görüldüğü gibi MG995 RC servo tipi motorlar kullanılmıştır. Servo motora giden kontrol bilgisi rotorun konumunu belli bir doğrulukla sağlamaktadır. Fiziksel olarak RC servo motorlar sınırlı dönme yeteneğine sahiptirler. Bu çalışmada kullanılan motorlar en fazla 140 derece açığa ulaşabilmektedir. Kullanılan servo

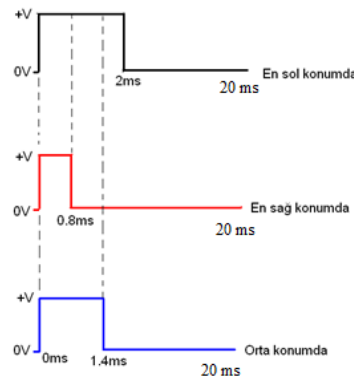
motorlar 3 bağlantı ucuna sahiptir. Bunlardan ikisi besleme ve şaseyi oluştururken diğeri kontrol sinyali içindir.



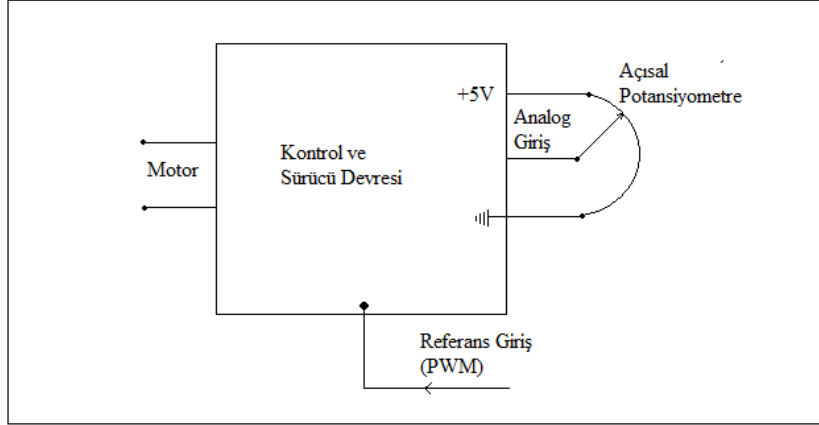
Şekil 3.4. MG995 RC servo motor

Bilindiği gibi RC Servo motorlar; oyuncak uçak, oyuncak araba, oyuncak tekne gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Konum kontrollü olarak çalışan bu servo motorların temel olarak içlerinde bir DC motor, pozisyon algılayıcısı, elektronik kontrol devresi ve redüktör bulunmaktadır. Düşük torka sahip olan DC motorla birleştirilen redüktör sayesinde çıkıştan yaklaşık 13 kg/cm değerinde tork alınabilmektedir. Redüktörden dolayı devir sayısı düşerek 140 derecelik bir açı 0.35s’de süpürülebilmektedir.

Besleme pinlerinden uygulanan gerilim ise 4.8V ~ 6V arasında olmalıdır ve nominal değeri 5V tur. Motor konumu kontrol pininden uygulanan PWM sinyallerine göre değer alır. Şekil 3.5.’te görüldüğü gibi uygulanan kontrol sinyallerinin ON süresi 2 ms ise motor en sol konumda (-70°), 1.4 ms ise orta konumda (0) , 0.8 ms ise en sağ konumda (70°) olmaktadır.

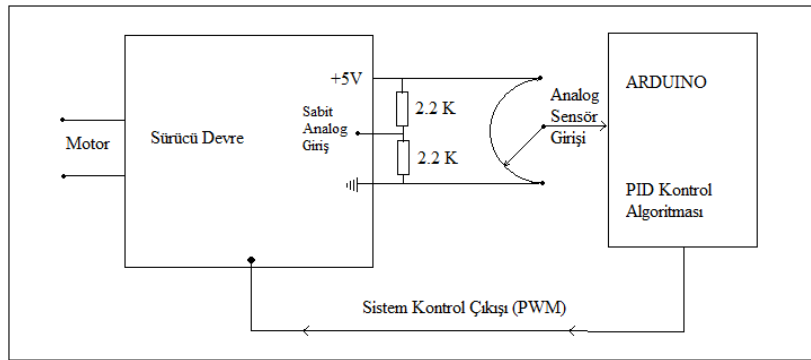


Şekil 3.5. RC servo motor için tanımlanan PWM sinyal karakterleri



Şekil 3.6. Servo motorun orijinal iç yapısı

Şekil 3.6’da servo motorun iç yapısında yer alan elektronik kontrol ünitesinin giriş çıkış bağlantıları verilmiştir. Görüldüğü gibi, PWM referans girişinden gönderilen darbe sinyalleri motorun gitmesi istenen referans konum açısını sağlayacak şekilde oluşturulur. Bu sinyaller bir mikroişlemci tarafından üretilerek, servo motora iletilir ve servo motor sürücü devresinde yer alan kapalı çevrim kontrol sistemi ile denetim gerçekleşir. Ancak, motorun istenilen referans konum açısına ulaşp ulaşmadığı bilgisi mikroişlemciye bildirilemez. Dolayısıyla bu servo motorun doğrudan kullanılması esnasında olası bir hata gözlemlenmeden uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Şayet, bu geri besleme bilgisinin aynı zamanda mikroişlemciye aktarılması istenirse servo motorun iç yapısında birkaç küçük modifikasyon ile bu mümkün hale getirilebilir. Bunun için Şekil 3.7’de gösterilen bağlantıların gerçekleştirilmesi önerilebilir.



Şekil 3.7. Modifiye edilmiş bir MG995 RC servo motorun bağlantı şeması

Motorun açısal konum bilgisi servo motorun iç yapısında yer alan analog potansiyometre sensöründen alınarak, mikroişlemciye aktararak okunabilir. Bu bilgi, mikroişlemci içerisine gömülebilen bir kapalı kontrol algoritmasında geri besleme olarak kullanılabilir. Dolayısıyla, daha önceki yapıda referans olarak girilen PWM sinyali bu yeni

yapıda kontrol çıkış sinyali olarak görev yapacaktır. Bu yapı sayesinde mikroişlemci içerisine gömülen algoritmanın amacı doğrultusunda istenen referans konuma ulaşıp ulaşılmadığı potansiyometreden alınan bilgi ile anlaşılabilir.

3.3. Mikroişlemci Seçimi

Robot sistemlerinin uygulaması yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden biri kullanılacak mikroişlemcinin seçimidir. Çünkü, robot mekanizmasındaki motorların hareketini, sensörlerin davranışlarını vb. gibi elektronik aksamın tepkilerinin tümünü hatasız bir şekilde kontrol edebilmek kullanılan mikroişlemciye bağlıdır.

Daha önce de belirtildiği gibi robot üzerinde 14 adet motor ve bununla birlikte çeşitli sensörler yer almaktadır. Tüm bu elektronik sistemin kontrolünü sağlayabilmek için, öncelikle mikroişlemcinin çalışma hızı ve giriş/çıkış (input/output) pinlerinin sayısına dikkat edilmelidir.

Buna uygun olarak 4 bacaklı robot mekanizmasında Şekil 3.8’de görülen ARDUINO MEGA ADK mikroişlemci kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Arduino Mega ADK

Arduino Mega ADK mikroişlemci kartının seçilmesinde;

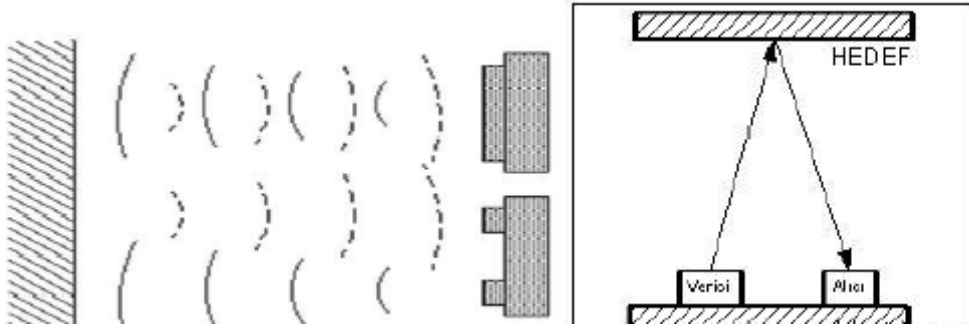
- 14’ü PWM çıkış özelliğine sahip 54 adet dijital giriş (I/O) çıkışın bulunması,
- 16 adet analog I/O bulunması,
- 16 MHZ kristal osilatör sayesinde yüksek işlemci hızı,
- Kolay programlanabilmesi,
- Kullanım kolaylığı

gibi seçici özelliklerinin bulunması etkili olmuştur.

3.4. Sensörler

Tasarlanan robotta, çevresel etkilere tepki vermek ve farklı fonksiyonları gerçekleştirmek amacıyla iki farklı sensör kullanılmıştır. Bunların ilki, ses dalgasının iletimi mantığı ile çalışan ultrasonik sensördür.

Ultrasonik sensörler, genellikle robotlarda engellerden kaçmak, navigasyon (yön bulma) ve bulunan yerin haritasını çıkarmak amacıyla kullanılmaktadır. Ultrasonik mesafe sensörü, piezoelektrik transdüserden gelen 40 kHz ultrasonik sesin kısa darbelerini (pals) yayarak çalışmaktadır. Ses enerjisinin küçük bir kısmı sensörün önündeki cisimlerden yansırarak detektöre yani farklı piezoelektrik transdüsera gelir. Şekil 3.9’da gösterilen alıcı yükselteci yansıyan işareti sinyal algılama (dedüksiyon) sistemine veya mikro denetleyiciye gönderir. Sinyalin havadaki hızına bağlı olarak mikro denetleyici, cisimlerin ne kadar uzakta olduklarını zamanlama işlemleriyle belirler [7].



Şekil 3.9. Ultrasonik sensörün çalışma mantığı



Şekil 3.10. HC-SR04 Ultrasoniksensör

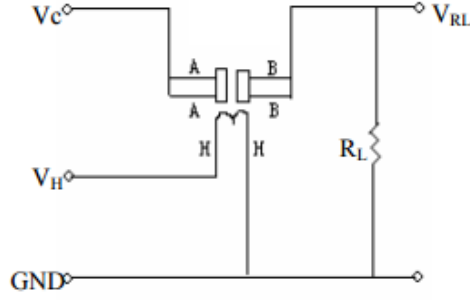
Şekil 3.10’da mevcut robot için kullanılan ultrasonik sensör verilmiştir. Sensör üzerinde 4 adet pin bulunmaktadır. Bunlar; Vcc, Gnd, Trig ve Echo pinleridir. Sensörü kullanmak için trig pininden yaklaşık 10µs’lik darbe gönderilmektedir. Sensör, kendi içerisinde 40 kHz frekans değerinde bir sinyal üretilip 8 darbe verici transdüserine gönderir. Bu ses dalgası havada, deniz seviyesinde ve 15°C sıcaklıkta 340 m/s’lik bir hızla yol alır. Bir cisme çarpar ve geri sensöre yansır. Cismin sensörden uzaklığı ile doğru orantılı Echo pini, bir süre lojik 1 seviyesinde kalır ve tekrar lojik 0 olur. Echo pininin lojik 1’de kaldığı süre kullanılarak, genel hız formülü ile (3.1) mesafe ölçümü yapılabilir.

$$x = v \times t \quad x = \text{yol}, \quad v = \text{hız}, \quad t = \text{zaman} \dots \quad (3.1)$$



Şekil 3.11. MQ-3 Alkol gaz sensörü

Şekil 3.11’de ise, dört bacaklı robotta kullanılan MQ-3 alkol gaz sensörü verilmiştir. Bu gaz sensörü ile robotun, dış ortamda herhangi bir alkol gazı kokusu aldığında, duruma göre çeşitli tepkiler vermesi amaçlanmıştır. Gazın yoğunluğuna göre, analog okuyucudan alınan değerlerin artmasıyla robotun alkol yoğunluğu olan bölgeye doğru yönelmesi veya o bölgeden kaçması veya daha farklı bir fonksiyon gerçekleştirmesi planlanmıştır. Şekil 3.12’de MQ-3 alkol gaz sensörünün devre bağlantısı verilmiştir.

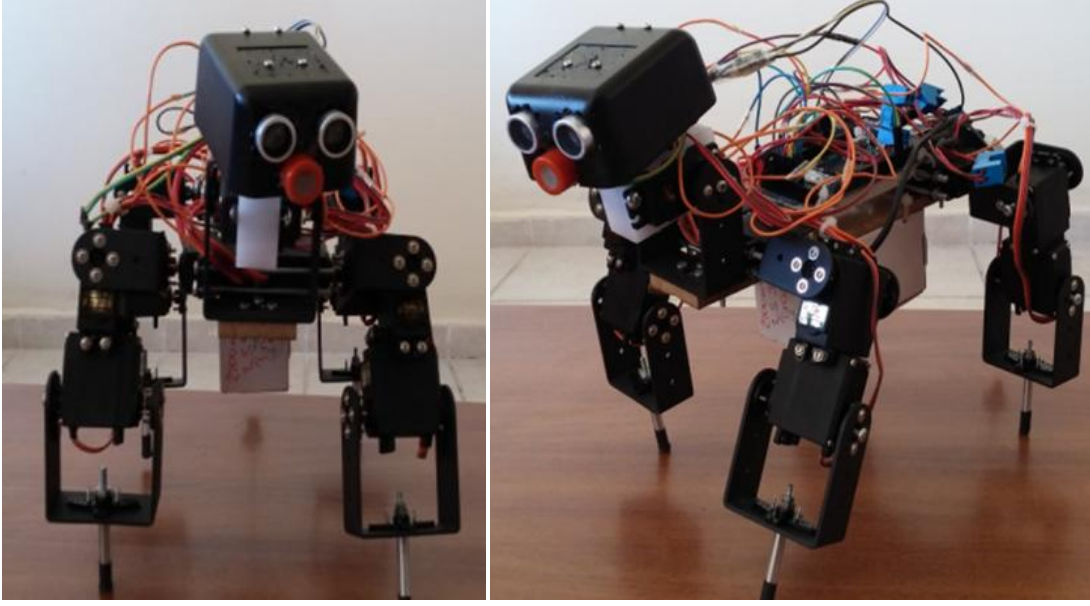


Şekil 3.12. MQ-3 Alkol gaz sensörünün bağlantısı

MQ-3 alkol sensörü, uygun yoğunluklarda (konsantrasyonlarda) alkol gazının varlığını algılar. Bu sensör, çıkış olarak gazın yoğunluğuna göre analog voltaj verir. Bağlantısı şu şekilde yapılmaktadır;

5 V gerilim H pinlerine verilerek sensörün ısınması sağlanır ve doğru ölçümlerle çalışması sağlanır. A veya B pinlerine 5 V gerilim uygulamak sensörün diğer pinleri üzerinden analog voltaj vermesine neden olmaktadır. Sensörün hassasiyeti, toprak ile sensörün çıkış pini arasına bağlanacak direnç değeri ile ayarlanabilir.

Şekil 3.13.'te bu tez çalışması kapsamında tasarlanan dört bacaklı robotun gerçek uygulama anlarında çekilmiş resimleri yer almaktadır. Mikroişlemci kartı robotun sırt kısmında yer almakta, tüm giriş ve çıkış sinyallerinin sağlandığı kablolar açıkça görülebilmesi için kapatılmamıştır. Baş kısmına ultrasonik sensör ve alkol gaz sensörü yerleştirilmiştir. Robotun alt karın bölgesine ise enerji kaynağı görevini üstlenen Lipo pil monte edilmiştir. Şekil 3.14'te gösterilen pil 2200 mAh kapasiteli, 2-hücreli (2s), 7.4V çıkış gerilimine sahip, 87x34x19 mm boyutlarında ve 120 gr ağırlığındadır.



Şekil 3.13. Dört bacaklı robota ait görüntüler



Şekil 3.14. Robot üzerinde kullanılan Lipo Pil

4. ROBOT KİNEMATİĞİ

Robot uzuvlarının eklemleri ve hareketleri arasındaki ilişki, robot kinematığı ile ifade edilmektedir. Robotik sistemlerde kinematik ifadeler büyük önem arz etmektedir. Robot kinematığı ile robotun hız, kuvvet, tork ve ivme analizleri yapılmaktadır [8]. Bilindiğı üzere bir robot, öteleme ve dönme hareketi yapan eklemlerden ve bu eklemleri birbirine bağlayan bağlardan (mafsal) oluşmaktadır. Robot eklemlerinin her birinin konumu, bir önceki ekleme veya bir sonraki ekleme göre ifade edilmektedir. Art arda oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir adı verilir [9]. Maxwell [11], 4x4 homojen dönüşüm matrislerini tanımlamıştır. Denavit-Hartenberg [12] ise, bu dönüşüm matrislerini kullanarak herhangi bir koordinat sisteminin oryantasyon ve konum bilgilerini başka bir koordinat sisteminin durumuna göre belirtmiştir [13].

4.1. İleri Yön (Düz) Kinematığı

Düz kinematik analiz yapılırken, robotun, pozisyon ve oryantasyonunu nasıl belirlediğı ve bu belirlemenin eklem (joint) koordinatları cinsinden nasıl yapılacağı gösterilir. Bilindiğı gibi herhangi bir manipülatör, birbirine eklemler ile bağlanmış bir seri uzuv (eleman) oluşmuş olarak düşünülebilir. Manipülatörün her bir elemanına bir koordinat sistemi bağlanır ve bu koordinat sistemleri arasındaki bağıl pozisyon ve oryantasyonu homojen transformasyonları kullanarak belirlenir. Bir link (koordinat düzlemi) ile bir sonraki link arasındaki ilişkiyi gösteren homojen transformasyon matrisi, “A” ile gösterilirken, temel dönüşüm matrisi ise “T” ile gösterilir. Ele alınan robotun eksen sayısı kadar homojen dönüşüm matrisi bulunur.

Robotlara düz kinematik analizi yapılmasının temel nedeni, robotun her bir ekseninin belirlenen açılarda hareketi ile robotun uç noktasının ulaştığı konumun koordinatlarını elde etmektir. Bu konum koordinatları elde edilirken Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılır. Robotun uç noktasının pozisyonunu belirleyen ana homojen dönüşüm matrisi (4.1)’deki gibi elde edilir.

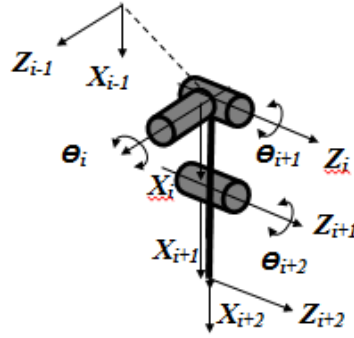
$${}^N_0T = A_1 A_2 \dots A_N \quad N: \text{Eklem sayısı} \quad (4.1)$$

4.1.1. Denavit-Hartenberg Yöntemi

Robotikte kullanılan Denavit-Hartenberg yöntemi ile amaçlanan, robotun mafsallarına yerleştirilen sıralı eksenlerin birbirleri ile olan transformasyonu ile homojen dönüşüm matrisini elde etmek ve her eksenin sahip olduğu bu matrisler ile kinematik analizi yapmaktır. Bu yöntemin uygulamasındaki aşamaları sırasıyla aşağıda ifade edilmiştir.

- Öncelikle eklem eksenlerinin dönme ve kayma yönleri belirlenir. Bu işlem gerçekleştirilirken eklem eksenleri, döner mafsallar için dönme yönü z eksen, prizmatik mafsallar için kayma yönü z eksen olarak kabul edilir. Robotun uç noktasına da son eksene paralel bir eksen takımı yerleştirilir. Bunun amacı da, son eksenin transformasyon matrisini de diğer eksenler gibi doğru bir şekilde belirlemektir.
- Merkez koordinat düzleminde eklem hareket yönüne dik olacak şekilde z eksen yerleştirilir. Bu z eksenine, 90° açıyla x eksen yerleştirilir.
- z ve x eksenine göre sağ el kuralına göre y eksen belirlenir. Ancak, ana dönüşüm matrisini oluştururken y ekseninin bir etkisi olmadığı için belirlenmesine gerek yoktur.
- x eksen, z ekseninden z-1 eksenine geçerken hareketin aynı x eksen üzerinde olması gerektiği gibi yerleştirilir. Kısaca şöyle ifade edilebilir; eğer, bir önceki eksen takımından bir sonraki eksen takımına geçerken, eksen takımlarının konumları farklı koordinatlarda bulunuyor ise, eksenler arasındaki öteleme bir önceki eksenin x ya da z eksen doğrultusunda olmalıdır ve bir sonraki eksen takımındaki x eksen bu kurala göre yerleştirilir.
- Bir seri robotun eklemine koordinat sistemleri yerleştirilirken 1. eksenin dönme yönü z eksen olarak belirlendikten sonra, genellikle bu eksene x eksenince döndürüldüğünde komşu iki z eksen çıkışacak şekilde bir x eksen yerleştirilir. Şekil 4.1.'te, örnek bir kinematik çiftin eksen yerleştirmesi verilmiştir.

4.1.2. Eksen Yerleştirme



Şekil 4.1. Denavit-Hartenberg metodu ile eksen yerleştirme

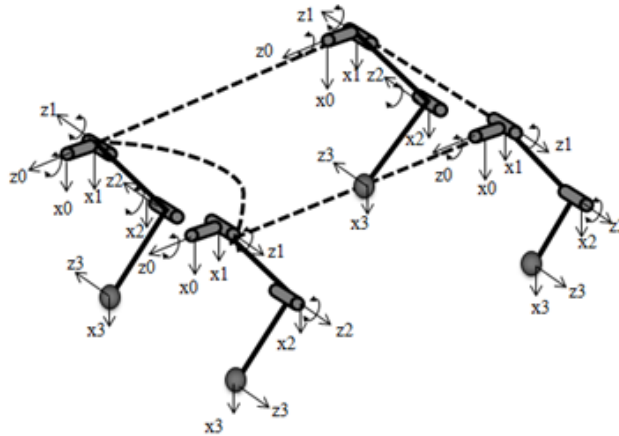
Eksen takımı yerleştirildikten sonra, robotun uç noktasının koordinatlarını belirleyen dönüşüm matrislerini bulmaya yarayan D-H tablosu oluşturulur. D-H tablosu 4 geometrik büyüklüğe bağlıdır. Bu parametreler, herhangi bir döner veya prizmatik eklemi tam olarak belirler.

θ_i : Eklemin dönme açısını ifade eder.

d_i : Bir önceki z eksenini (Z_{i-1}) ile bir sonraki x eksenini (X_i) arasında, önceki z eksenini doğrultusundaki öteleme hareketinin değişimini ifade eder.

a_i : Bir önceki x eksenini (X_{i-1}) ile bir sonraki x eksenini (X_i) arasında, önceki x eksenini doğrultusundaki öteleme hareketinin değişimini ifade eder.

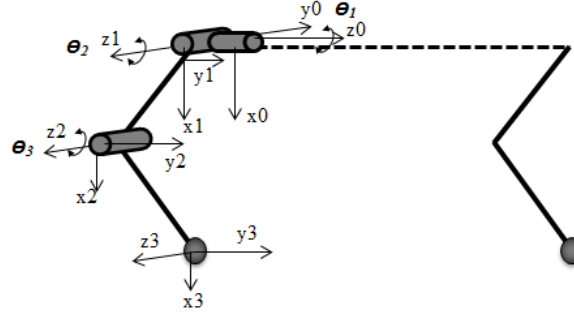
α_i : Bir önceki z ekseninden bir sonraki z eksenine geçerken yaptığı dönme açısını ifade eder.



Şekil 4.2. Dört bacaklı robotun eksenlerinin yerleşimi

Şekil 4.2’de, yapılan bu tez çalışması kapsamında, analizi gerçekleştirilen dört bacaklı robotun eksenlerinin yerleşimi gösterilmiştir.

4 bacağın da eksenel yapısı aynı olduğundan dolayı, tek bacak üzerinden analiz yapılarak robotun kinematiği ve dinamiği hesaplanabilir. Dolayısıyla, tek bacak üzerinden analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3’te sağ arka bacağın eksenel yapısı verilmiştir.



Şekil 4.3. Sağ arka bacağın eksenel yerleşimi

Şekil 4.3’te görüldüğü üzere başlangıç eksenini 0. (sıfırıncı) eksen olarak kabul edilmiştir. z0 eksenini sayfa düzlemine göre sağa doğru iken, x0 eksenini aşağı doğru ve y0 eksenini de sayfa düzleminden içeriye doğrudur. Aynı şekilde z1, z2 ve z3 eksenleri sayfa düzleminden dışarıya doğru iken, x1, x2, x3 eksenleri aşağı yönde ve y1, y2, y3 eksenleri de sayfa düzlemine göre sağa doğrudur.

Belirtilen Denavit-Hartenberg yöntemine göre bu robotun tek bacağının D-H tablosu Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Dört bacaklı robotun tek bacağının D-H tablosu

<u>Eksen</u>	<u>θ_i</u>	<u>d_i</u>	<u>a_i</u>	<u>α_i</u>
<u>1</u>	θ_1	0	0	$\pi/2$
<u>2</u>	θ_2	0	a_1	0
<u>3</u>	θ_3	0	a_2	0

Dört ayaklı robotun bir ayağının kinematik ve dinamik analizini yaparken kullanılması gereken uzunluk (a_1 , a_2), kütle vb. parametre değerleri, ölçülerek Tablo 4.2.’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Robot bacağı parametreleri

<u>Uzuv</u>	<u>Boyutlar [m]</u>	<u>Kütle [kg]</u>
<u>a₁</u>	0.06	0,14
<u>a₂</u>	0.085	0,025

4.1.3. Homojen Dönüşüm Matrislerinin Bulunması

Robot bacağının her bir ekleminin sahip olduğu parametreler doğrultusunda oluşturacağı dönüşüm matrisi, (4.2)'de verilmiştir.

$$A_i = Rot\ z, \theta_i * Trans\ 0,0,d_i * Trans\ a,0,0 * Rot(x,\alpha_i) \quad (4.2)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Matris çarpımı sondan yapılır. Sondaki matrisle bir önceki matris çarpılarak sonuç matris elde edilir.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Burada $Rot\ z, \theta_i$; eklemin z eksenine etrafındaki dönme açısını ifade eden matris, $Trans\ 0,0,d_i$; eklemin z eksenine doğrultusundaki ötelemesini ifade eden matris, $Trans\ a,0,0$; eklemin x eksenine doğrultusundaki ötelemesini ifade eden matris, $Rot(x,\alpha_i)$; eklemler arasındaki z eksenlerinin birbirine olan açı izdüşümlerini ifade eden

matristir. Görüldüğü üzere, bu matrisler çarpılarak, bir eklem homojen dönüşüm matrisi elde edilir.

Verilen matris formlarına göre 1, 2 ve 3 no'lu eksenin dönüşüm matrisleri (4.7), (4.8) ve (4.9)'da verilmiştir.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_1 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_2 * \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_2 * \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.1.4. Temel Dönüşüm Matrisinin Bulunması

3 serbestlik dereceli robot bacağına her bir eklem matrisini kullanarak, (4.1) denklemi kullanılırsa temel homojen dönüşüm matrisi olan T matrisi elde edilir. Bu matrisin elde edilmesiyle de, robotun bacağına uç noktasının x, y ve z eksenlerindeki konumlarını veren koordinatları bulunur. Bu koordinatlar; (4.11), (4.12) ve (4.13)'de verilmiştir. Ayrıca, aşağıda trigonometrik olarak ifade edilecek denklem ve matrislerde bazı kısaltmalar kullanılmıştır. Bazı kısaltmaların ifadeleri şu şekildedir;

- $C_{1,2,3} = \cos \theta_{1,2,3}$
- $S_{1,2,3} = \sin \theta_{1,2,3}$
- $S = \sin (\theta_2 + \theta_3)$
- $C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$
- $C_{1,2,3}^2 = \cos^2 \theta_{1,2,3}$
- $S_{1,2,3}^2 = \sin^2 \theta_{1,2,3}$
- $S_{23}^2 = \sin^2(\theta_2 + \theta_3)$

- $C_{23}^2 = \cos^2(\theta_2 + \theta_3)$

$${}^3_0T = \begin{bmatrix} C_{23}C_1 & -S_{23}C_1 & S_1 & C_1(a_2C_{23} + a_1C_2) \\ C_{23}S_1 & -S_{23}S_1 & -C_1 & S_1(a_2C_{23} + a_1C_2) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & a_2S_{23} + a_1S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$P_x = C_1(a_2C_{23} + a_1C_2) \quad (4.11)$$

$$P_y = S_1(a_2C_{23} + a_1C_2) \quad (4.12)$$

$$P_z = a_2S_{23} + a_1S_2 \quad (4.13)$$

Böylelikle, robot uç noktasının pozisyonu belirlenmiş olur ve çalışmada ele alınan dört bacaklı robotun bir bacağının ileri yön kinematik analizi P_x , P_y ve P_z koordinatları elde edilerek gerçekleştirilmiş olur.

4.2. Ters Kinematik

Robotik biliminde, robotun uç işlevcisinin temel dönüşüm matrisi ile elde edilen pozisyon ve yönelim parametreleri kullanılarak, robot hareketinin kontrolü için gerekli olan her bir eklemin dönme açısı olan θ_i açılarını elde etmek için ters kinematik analiz gerçekleştirilmektedir. Diğer bir söylemle, ileri yön kinematiğinde temel homojen dönüşüm matrisi ve uç işlevcinin koordinatlarının belirlenmesinin amacı, ters kinematik uygulanarak eklemlerin dönme açılarını hesaplamaktır.

Ters kinematik aşağıdaki nedenlerden dolayı çözülmesi oldukça zor olan problemler içerir [10].

- Analitik olarak karmaşık, doğrusal olmayan denklemler içerir.
- Eklemlerin yapısına bağlıdır. Eğer robot prizmatik eklemlerden oluşuyorsa ters kinematik problemin çözümü kolaylaşabilirken, robottaki döner eklem sayısı arttıkça problemin çözümü de o derece zorlaşmaktadır.
- Her zaman matematiksel çözüm fiziksel çözümü temsil etmez.

Ters kinematikte bu açıların belirlenmesi için merkez koordinat düzleminin (0 no'lu koordinat düzlemi), robotun uç noktasının koordinat düzlemine (3 no'lu koordinat düzlemi) olan iz düşümünü ifade eden bir dönüşüm matrisinden yararlanılmaktadır.

$${}^3_0T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

(4.14)' te belirtilen iz dönüşüm matrisinin parametreleri aşağıda tanımlanmıştır.

Robotikte, bir robot mekanizmasının ters kinematik analizi yapılırken, genellikle (4.15)'te verilen formül kullanılmaktadır.

$$A_2^{-1} A_1^{-1} {}^3_0T = A_3 \quad (4.15)$$

Formülde görüldüğü üzere, 1 ve 2 no'lu dönüşüm matrislerinin tersleri alınarak, temel dönüşüm matrisi ile çarpılmış ve 3 no'lu matrise eşit olduğu belirtilmiştir. Bu formülün kullanılmasının amacı ise, her üç eklemin açı değerlerini robot parametrelerine göre trigonometrik bir denklem halinde elde etmektir.

$$A_1^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2^{-1} = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -a_1 \\ -S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Daha sonra, gerekli ara işlemler de yapılarak her bir eklemin açı değerini ifade eden denklemler bulunur.

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{n_y}{n_x} \right) \quad (4.17)$$

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{a_z}{a_x \cos \theta_1 + a_y \sin \theta_1} \right) \quad (4.18)$$

$$\theta_3 = \arctan \left(\frac{o_z \sin \theta_2 + o_x \cos \theta_1 \cos \theta_2 + o_y \sin \theta_1 \cos \theta_2}{-o_z \cos \theta_2 + o_x \cos \theta_1 \sin \theta_2 + o_y \sin \theta_1 \sin \theta_2} \right) \quad (4.19)$$

Düz ve ters kinematik analiz algoritması EK.1'de verilmiştir.

5. ROBOT DİNAMIĞI

Robotikte bir robot mekanizmasının dinamiği, o mekanizmanın hareketinden dolayı oluşan eşitliklerin ve sonuçların matematiksel formda ifade edilmesidir. Robot mekanizmasının dinamik analizi, eklemlere tahrik elemanları (motor vb.) tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile mekanizmanın zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi olarak ifade edilebilir [14]. Kısaca, bu çalışmada kullanılan dört bacaklı robotun bacak mekanizmasının hareket performansı, uygun bir dinamik modelin elde edilmesine bağlıdır.

Herhangi bir robot mekanizmasının dinamik modeli oluşturulurken, genel olarak Lagrange – Euler yöntemi kullanılmaktadır.

5.1. Lagrange – Euler Yöntemi

Lagrange – Euler yönteminde hareket denklemleri, kinematik zincir içerisindeki cisimlerin toplam enerjisindeki değişim prensibine dayanmaktadır. Dolayısıyla, sistemin hareket esnasında kinetik ve potansiyel enerjisi hesaplanarak dinamik analiz yapılır.

Bu çalışmada da dinamik model oluşturulurken Lagrange – Euler yöntemi kullanılmıştır. Dinamik modeli oluşturmak için, her eklemin sahip olduğu hız, ivme ve tork değerlerini ifade eden tork denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu denklemler elde edilirken, çözülmesi gereken ara denklemlerin her aşaması aşağıda ifade edilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} L(q, \dot{q}) - \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}) = \tau_i \quad 1 \leq i \leq n = 3 \quad (5.1)$$

(5.1)'de, robot bacağının her bir ekleminin tork değerlerini ifade eden tork denklemlerinin elde edilmesini sağlayan Lagrange denklemi verilmiştir. Denklemdaki q_i , her eklemin sahip olduğu konumunu gösteren açı değerlerini ifade eden semboldür. $\dot{q}_i$, konumun türevi olan açısal hızı ifade etmektedir ($\dot{q}_i = \omega_i$). τ_i ise, eklemlerin her birinin hareket için üretmesi gerek tork değerlerini ifade eden semboldür. i , sistemin serbestlik derecesini ifade eder. Robotun bacağı 3 serbestlik dereceli olduğu için, aşağıda ifade edilen denklemlerin tümünde $n = 3$ olarak alınmıştır ve her denklemde i sırasıyla 1, 2 ve 3 değerlerini almaktadır.

Denklemin çözümü için gerekli parametrelerin sayısı oldukça fazladır. Bundan dolayı, denklemin çözümü 2 ayrı işlem grubu halinde ifade edilmiştir. Ayrıca denklemler, çalışmada belirtilen dört bacaklı robotun sağ arka bacağının parametrelerine göre çözümlenmiştir. Dinamik analiz yapılırken, denklemlerin çözümlenmesi için, robotik biliminin önde gelen isimlerinden olan Robert J. Schilling'in kaynağından [15] faydalanılmıştır.

5.1.1. Tork Denkleminde Toplam Ataletin Elde Edilmesi

Öncelikle, (5.1)' in ilk kısmı olan $\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}_i)$ bölümünün çözümlenmesi (5.2)'de aşağıdaki şekilde yapılmıştır. Dinamik model oluşturulurken kullanılan parametreler, matris formundadır.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}_i) = \sum_{j=1}^n D_{ij}(q) \dot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n [\partial D_{ij}(q) / \partial q_k] q_k \dot{q}_j \quad (5.2)$$

Burada $D(q)$; sistemin toplam ataletini ifade etmektedir. Sistemin toplam ataletinin hesaplanması için kullanılması gereken formüller de (5.3) ve (5.4)'te verilmiştir. Bu denkleme göre her bir eklemin toplam ataleti hesaplanıp toplandığında, sistemin toplam ataleti bulunur.

$$D_i(q) = (A^i)^T m_i A^i + B^i{}^T D_i B^i \quad (5.3)$$

$$D(q) = D_1(q) + D_2(q) + D_3(q) \quad (5.4)$$

Denklem içerisindeki A^i ve B^i parametrelerinin bulunması, bacak mekanizmasının Jakobien matrisinin oluşturulmasına bağlıdır. m_i , bacağın uzuvlarının kütlelerini ifade etmektedir. Ayrıca, bacak mekanizmasının 3 serbestlik derecesine sahip olduğu, ilk iki eksen takımı (1 ve 2 no'lu) çakışık olarak kabul edildiği için ve robot bacağının 2 uzvu olduğu için denklemde $i = 2$ olduğu durumda, formüldeki $m_2 \rightarrow m_1$ kütlesi olarak alınmalı ve $m_3 \rightarrow m_2$ kütlesi olarak alınmalıdır.

5.1.2. Jakobien Matrisinin Oluşturulması

Jakobien matrisi, robotikte (6 x n)'lik ilk 3 satırı (A^i) uzvun hareketi esnasındaki açısal hızı, son 3 satırı (B^i) da aynı hareketi yaparken sahip olduğu çizgisel hızı ifade etmektedir.

$$J^i = \begin{bmatrix} A^i \\ B^i \end{bmatrix}_{(6 \times n)} \quad i = 1,2,3 \quad n = 3 \quad (5.5)$$

Jakobien matris elde edilirken, robotun her uzvunun bağlı olduğu ekleme göre hareketi için gerekli olan ve c^i olarak ifade edilen; elemanın (uzuv) ağırlık merkezinin, başlangıç eksen takımı olarak bilinen (0. eksen takımı) eksene göre koordinatlarını veren parametrenin kullanılması gerekir.

$$c^i = H.A_i.\Delta c_i \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = sbt. \quad (5.6)$$

Yukarıda ifade edilen denklemde H , (1 x 4)'lük matristen (3 x 1)'lik matrise geçiş için kullanılan sabit bir ara matristir. Δc_i ise, elemanın ağırlık merkezinin, bacağın uç noktasındaki eksen takımına (3. no'lu) göre koordinatlarını ifade etmektedir. Bununla birlikte; denklem, 2. ekleme uygulandığı zaman ($i = 2$ iken) Δc_1 , 3. ekleme uygulandığı zaman ($i = 3$ iken) ise Δc_2 olarak kullanıldığını belirtmek gerekir. Yani; formüller, (5.6)'daki gibi uygulanmalıdır.

$$c^1 = H.A_1.\Delta c_1 c^2 = H.A_2.\Delta c_1 c^3 = H.A_3.\Delta c_2 \quad (5.7)$$

$$\Delta c_1 = \begin{bmatrix} -a_1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \Delta c_2 = \begin{bmatrix} -a_2/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Gerekli matrissel işlemler yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar (5.9) – (5.11)'de verilmiştir.

$$c^1 = \begin{bmatrix} (-a_1/2)C_1 \\ (-a_1/2)S_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$c^2 = \begin{bmatrix} (a_1/2)C_1C_2 \\ (a_1/2)S_1C_2 \\ (a_1/2)S_2 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$c^3 = \begin{bmatrix} a_1C_1C_2 + (a_2/2)C_1C_{23} \\ a_1S_1C_2 + (a_2/2)S_1C_{23} \\ a_1S_2 + (a_2/2)S_{23} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Jakobien matrisi oluşturulurken c^i matrisinin kullanımı (5.12) – (5.14)'teki gibidir.

$$J^1 = \begin{bmatrix} \partial\theta_1 / \partial c^1 & 0 & 0 \\ \partial\theta_1 / \partial c^1 & 0 & 0 \\ \partial\theta_1 / \partial c^1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ b_0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.12)$$

$$J^2 = \begin{bmatrix} \partial\theta_1 / \partial c^2 & \partial\theta_2 / \partial c^2 & 0 \\ \partial\theta_1 / \partial c^2 & \partial\theta_2 / \partial c^2 & 0 \\ \partial\theta_1 / \partial c^2 & \partial\theta_2 / \partial c^2 & 0 \\ & 0 & 0 \\ b_0 & b_1 & 0 \\ & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

$$J^3 = \begin{bmatrix} \partial\theta_1 / \partial c^3 & \partial\theta_2 / \partial c^3 & \partial\theta_3 / \partial c^3 \\ \partial\theta_1 / \partial c^3 & \partial\theta_2 / \partial c^3 & \partial\theta_3 / \partial c^3 \\ \partial\theta_1 / \partial c^3 & \partial\theta_2 / \partial c^3 & \partial\theta_3 / \partial c^3 \\ b_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix}. \quad (5.14)$$

Yukarıdaki belirtilen b_0 , b_1 ve b_2 parametreleri robot bacağının elemanının öteleme hareketini ifade etmektedir. b_0 her zaman sabittir. b_1 ve b_2 , (5.16) ve (5.17)'deki gibi hesaplanır.

$$b_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad b_1 = R^1 b_0 b_2 = R^1 R^2 b_0 \quad (5.15)$$

Burada R^1 , A_1 matrisinin 3x3'lük kısmını ifade ederken; R^2 , $(A_1 * A_2)$ matrisinin 3x3'lük kısmını ifade etmektedir.

$$R^1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad R^2 = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 \\ S_2 & C_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra elde edilen b_1 ve b_2 matrisleri (5.17)'de verilmiştir.

$$b_1 = b_2 = \begin{bmatrix} S_1 \\ -C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Sonuç olarak her bir eklem için elde edilen Jakobien matrisleri (5.18) – (5.20)'de görülmektedir.

$$J^1 = \begin{bmatrix} (a_1 / 2) S_1 & 0 & 0 \\ -(a_1 / 2) C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.18)$$

$$J^2 = \begin{bmatrix} -(a_1 / 2) S_1 C_2 & -(a_1 / 2) C_1 S_2 & 0 \\ (a_1 / 2) C_1 C_2 & -(a_1 / 2) S_1 S_2 & 0 \\ 0 & (a_1 / 2) C_2 & 0 \\ 0 & S_1 & 0 \\ 0 & -C_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

$$J^3 = \begin{bmatrix} -a_1 S_1 C_2 - (a_2 / 2) S_1 C_{23} & -a_1 C_1 S_2 - (a_2 / 2) C_1 S_2 C_3 - (a_2 / 2) C_1 C_2 S_3 & -(a_2 / 2) C_1 C_2 S_3 - (a_2 / 2) C_1 S_2 C_3 \\ a_1 C_1 C_2 + (a_2 / 2) C_1 C_{23} & -a_1 S_1 S_2 - (a_2 / 2) S_1 S_2 C_3 - (a_2 / 2) S_1 C_2 S_3 & -(a_2 / 2) S_1 C_2 S_3 - (a_2 / 2) S_1 S_2 C_3 \\ 0 & -(a_2 / 2) S_2 S_3 + (a_2 / 2) C_2 C_3 + a_1 C_2 & -(a_2 / 2) S_2 S_3 + (a_2 / 2) C_2 C_3 \\ 0 & S_1 & S_1 \\ 0 & -C_1 & -C_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

Böylece, (5.5)'te belirtilen formül doğrultusunda A^i ve B^i matrisleri belirlenmiş olur. (5.4)'te belirtilen denklemde bilinmeyen D_i sembollü bir parametre daha görülmektedir. D_i , her eklemin merkez eksen takımına göre dönüştürülmüş kütleli atalet momentini göstermektedir. D_i parametresinin genel ifadesi (5.21)'de mevcuttur.

5.1.3. Tork Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$D_i = R^i D_i R^{i^T} \quad (5.21)$$

Burada, farklı bir parametrenin daha olduğu görülmektedir. Bu D_i parametresinin her eklem için oluşturulan matrisi, (5.22) – (5.24)'de verilmiştir.

$$\bar{D}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & ((m_i(a_i)^2)/12) & 0 \\ 0 & 0 & ((m_i(a_i)^2)/12) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

D_i matrisi daha önce de belirtildiği gibi uzvun kütleli atalet momentini ifade etmektedir. Dolayısıyla, bu atalet momenti uzvun şekline de bağlıdır. Tablo 4.2.'de görüldüğü gibi robot bacağının düz bir çubuk şeklinde düşünüldüğü, sadece uzunluk ölçüsü dikkate alınmıştır. Bilindiği gibi düz bir çubuğun atalet momenti, genel olarak $(ma^2)/12$ formülüyle bulunmaktadır. Bu tez çalışmasındaki dört bacaklı robot bacağı mekanizmasında yerçekimi yönü x eksenine yönündedir. Bundan dolayı, y ve z eksenleri doğrultusunda kütleli atalet momentleri oluşacaktır. D_i matrisi de bu prensibe bağlı olacak şekilde oluşturulmuştur.

$$\bar{D}_1 = \bar{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & ((m_1(a_1)^2)/12) & 0 \\ 0 & 0 & ((m_1(a_1)^2)/12) \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$\bar{D}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & ((m_2(a_2)^2)/12) & 0 \\ 0 & 0 & ((m_2(a_2)^2)/12) \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

(5.21) çözümlendiğinde, her eklemin merkez eksene göre dönüştürülmüş kütleli atalet momentleri bulunur.

$$D_1 = ((m_1(a_1)^2)/12) \begin{bmatrix} S_1^2 & -C_1 S_1 & 0 \\ -C_1 S_1 & C_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$D_2 = ((m_1(a_1)^2)/12) \begin{bmatrix} C_1^2 S_2^2 + S_1^2 & S_1 C_1 S_2^2 - S_1 C_1 & -C_1 C_2 S_2 \\ S_1 C_1 S_2^2 - S_1 C_1 & S_1^2 S_2^2 + C_1^2 & -S_1 S_2 C_2 \\ -C_1 C_2 S_2 & -S_1 S_2 C_2 & C_2^2 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$D_3 = ((m_2(a_2)^2)/12) \begin{bmatrix} S_{23}^2 C_1^2 + S_1^2 & S_{23}^2 S_1 C_1 - C_1 S_1 & -S_{23} C_{23} C_1 \\ S_{23}^2 S_1 C_1 - C_1 S_1 & S_{23}^2 S_1^2 + C_1^2 & -S_{23} C_{23} S_1 \\ -C_{23} S_{23} C_1 & -S_{23} C_{23} S_1 & S_{23}^2 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

(5.3)'e göre, 1 numaralı eksen takımının toplam ataletini ifade eden matris, gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra elde edilmiş ve aşağıda verilmiştir.

$$D_1(q) = ((m_1(a_1)^2)/3) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

$$D_2(q) = ((m_1(a_1)^2)/3) \begin{bmatrix} C_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$$D_3(q) = \begin{bmatrix} ((m_2(a_2)^2)/3)C_{23}^2 + m_2(a_1)^2 C_2^2 + m_2 a_1 a_2 C_{23} C_2 & 0 & 0 \\ 0 & ((m_2(a_2)^2)/3) + m_2(a_1)^2 + m_2 a_1 a_2 C_3 & m_2(a_2)^2 + m_2 a_1(a_2/2)C_3 \\ 0 & (m_2(a_2)^2)/3 + m_2(a_1)^2 + m_2 a_1(a_2/2)*C_3 & (m_2(a_2)^2)/3 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

(5.4)'teki ifadeye göre, robot bacağıının her üç ekleminin toplam ataleti (5.31)'de açıkça ifade edilmiştir.

$$D(q) = \begin{bmatrix} ((m_1(a_1)^2)/3)(C_2^2+1) + ((m_2(a_2)^2)/3)C_{23}^2 + m_2(a_1)^2 C_2^2 + m_2 a_1 a_2 C_{23} C_2 & 0 & 0 \\ 0 & ((m_1(a_1)^2)/3) + ((m_2(a_2)^2)/3) + m_2(a_1)^2 + m_2 a_1 a_2 C_3 & m_2(a_2)^2 + m_2 a_1 (a_2/2) C_3 \\ 0 & (m_2(a_2)^2)/3 + m_2(a_1)^2 + m_2 a_1 (a_2/2) C_3 & (m_2(a_2)^2)/3 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Böylelikle, sistemin toplam ataleti hesaplanarak, dinamik tork denklemlerini elde etmek için bir sonraki aşama olan (5.2)'nin çözümüne, doğru sonuçlarla geçilmiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi tork denklemlerinin çözümünde kullanılan (5.1)'in çözümü, 2 aşamada yapılmaktadır. Birinci bölümde (aşamada), denklemin $\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}, t)$ ifadesinin sonucu; ikinci bölümde de, $\frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}, t)$ ifadesinin sonucu elde edilmiştir.

(5.2)'de görüldüğü üzere, elde edilen toplam atalet matrisinin çeşitli parametrelere göre her eklem için açı değerine göre kısmi türevleri ve bu sonucun da zaman göre türevlerinin alınması gerekmektedir. (5.2)'deki denklemin, çözümünün anlaşılmasına fayda sağlaması açısından rastgele parametrelere göre bir örneği aşağıda verilmiştir.

Örneğin, aşağıdaki formüle göre $i = 2, j = 2$ ve $k = 3$ değerleri için bir çözüm yapıldığında;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}, t) &= \sum_{j=1}^n D_{ij}(q) \dot{q}_j + \sum_{k=1}^n \left[\partial D_{ij}(q) / \partial q_k \right] q_k \dot{q}_j \\ &= D_{22}(q) \dot{q}_2 + [\partial D_{22}(q) / \partial q_3] q_3 \dot{q}_2 \end{aligned} \quad (5.32)$$

(5.32)'de verilen denklemde; $D_{22}(q) \dot{q}_2$ ifadesiyle, (5.31)'de elde edilen toplam atalet matrisinin 2. satır ve 2. sütunundaki denklemin, θ_2 açısının 2. türeviyle, yani 2 no'lu eklem hareket sırasındaki açısal ivmesi ile çarpılması gerektiği belirtilmiştir. Daha sonra, $[\partial D_{22}(q) / \partial q_3] q_3 \dot{q}_2$ ifadesiyle de, toplam atalet matrisinin 2. satır ve 2. sütunundaki denklemin, θ_3 açısına göre kısmi türevinin alınarak, θ_2 ve θ_3 açılarının 1. türevleriyle, yani 2 no'lu ve 3 no'lu eklemlerin hareket esnasında yaptıkları açısal hızlar ile çarpılması gerektiği ve elde edilen bu iki sonucun toplanması gerektiği belirtilmiştir. Diğer parametrelere göre olan sonuçlar da örnekteki çözüme paralel bir şekilde yapıldığında doğru sonuçlar elde edilecektir.

Her eklem için elde edilen sonuçlar (5.33) – (5.35)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_i} L = & \theta_1 \theta_2 - \frac{2}{3} m_1 a_1^2 C_2 S_2^2 - 2m_2 a_1^2 C_2 S_2^2 - 2m_2 a_1 a_2 C_2 S_2^2 C_3 + m_2 a_1 a_2 S_2 C_2 S_3 - \\
& \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_2 S_2^2 C_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 + \theta_1 \theta_3 - m_2 a_1 a_2 C_2^2 S_3 - \\
& m_2 a_1 a_2 S_2 C_2 C_3 - \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_3 C_2^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_3 S_2^2 C_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 + \\
& \theta_1 \left[\frac{1}{3} m_1 a_1^2 C_2^2 + \frac{1}{3} m_1 a_2^2 C_{23}^2 + m_2 a_1^2 C_2^2 + m_2 a_1 a_2 C_2 C_{23} \right] \quad (5.33)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_2} L = & \theta_2 \left[\frac{1}{3} m_1 a_1^2 + \frac{1}{3} m_2 a_2^2 + m_2 a_1^2 + m_2 a_1 a_2 C_3 \right] + \theta_3 \left[\frac{1}{4} m_2 a_2^2 + \right. \\
& \left. \frac{1}{2} m_2 a_1 a_2 C_3 + \theta_2 \theta_3 - m_2 a_1 a_2 S_3 + \theta_3^2 - \frac{1}{2} m_2 a_1 a_2 S_3 \right] \quad (5.34)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial q_3} L = & \theta_2 \left[\frac{1}{3} m_2 a_2^2 + m_2 a_1^2 + \left(\frac{1}{2}\right) m_2 a_1 a_2 C_3 \right] + \theta_3 \left[\frac{1}{4} m_2 a_2^2 + \theta_2 \theta_3 - \frac{1}{2} m_2 a_1 a_2 S_3 \right] \quad (5.35)
\end{aligned}$$

Bir sonraki aşamada, (5.1) denkleminin ikinci bölümü incelenmektedir. Çözüm tekniği açısından birinci bölüme benzerlik göstermekle birlikte, birinci bölümde elde edilen bazı denklem parametreleri de bu kısımda kullanılmıştır. Dört bacaklı robotun bir bacağının hareket analizi için çözümlenmesi gereken denklemin ikinci kısmını ifade eden formül (5.36)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n ([\partial D_{kj}(q)/\partial q_i] q_k \dot{q}_j)/2 + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n g_k m_j A_{ki}^j q \quad (5.36)$$

Denklemden görüldüğü gibi $D(q)$, ilk bölümde elde edilen sistemin toplam ataletidir. Yine, $n = 3$ alınarak denkleme çözümlenmektedir. Ayrıca, denklemden belirtilen g_k parametresi, yer çekimini ifade etmektedir. g_k , matris formunda yazılırken yer çekiminin yönü oldukça önemlidir. Çünkü matriste, yerçekiminin yönünün olduğu eksene göre yer çekiminin değeri yazılmaktadır. Bu çalışmada ele alınan robot bacağının yerçekiminin yönü, merkez eksen takımının (0 no'lu eksen takımı) yerleşimine göre olduğundan,

sistemde aşağıya doğru olan eksen, x eksenidir. Dolayısıyla, yer çekiminin değeri x eksenine yazılmalıdır. Yer çekimi matrisi, (5.37)'de verilmiştir.

$$g_k = \begin{bmatrix} 9.81 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Birinci bölümde, (5.32)'de, (5.36) denkleminin çözümünün anlaşılmasını sağlamak açısından, verilen örneğe benzer bir örnek verilmiştir. Birinci bölümde verilen örnekten tek fark olarak A_{ki}^j q parametresi görülmektedir. Bu parametre, Jakobien matris bulunurken elde edilen A^i matrisidir. ($i = 2, j = 2$ ve $k = 1$)

$$([\partial D_{12}(q)/\partial q_2]q'_1 q'_2)/2 + g_1 m_2 A_{12}^2 q \quad (5.38)$$

Örnekte görüldüğü gibi verilen parametrelere göre; sistemin toplam atalet matrisinin 1. satır 2. sütunundaki denklemin, 2 numaralı eklem açısına göre kısmi türevi alınmış, 1 ve 2 numaralı eklemlerin açısal hızlarıyla çarpılmıştır. Yer çekimi matrisinin 1. satırı 9.81, 2 numaralı uzvun kütlesi ile çarpılmış ve bu da 2 numaralı eklem oluşturduğu A^2 matrisinin 1. satırının 2. sütunu ile çarpılmıştır. Son olarak bu iki sonuç toplanmıştır.

Tork denkleminin ikinci bölümünün her ekleme göre çözümü (5.39) – (5.41)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial q_1} L(q, q_1) = 9.81 m_1 \frac{a_1}{2} S_1 - m_1 \frac{a_1}{2} C_2 - m_2 a_1 S_1 C_2 - m_2 \frac{a_2}{2} S_2 C_{23} \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial q_2} L(q, q_2) = & \theta_1^2 - \frac{2}{3} m_1 a_1^2 C_2 S_2^2 - \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_2 S_2^2 C_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 - 2m_2 a_1^2 C_2 S_2^2 - \\ & m_2 a_1 a_2 S_2 C_3 - m_2 a_1 a_2 C_2 S_3 / 2 + 9.81 - m_1 \frac{a_1}{2} C_1 S_2 - m_2 a_1 C_1 S_2 - m_2 \frac{a_2}{2} C_1 S_2 C_3 - \\ & m_2 \frac{a_2}{2} C_1 C_2 S_3 \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial q_3} L(q, \dot{q}) = & (\theta_1^2 - \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_2^2 C_3^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 S_2^2 C_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 - m_2 a_1 a_2 C_2 S_3 - \\ & m_2 a_1 a_2 S_2 C_3 + \theta_2^2 - m_2 a_1 a_2 S_3 + 2\theta_2 \theta_3 [-m_2 a_1 \frac{a_2}{2} S_3]) / 2 + 9.81 - m_2 \frac{a_2}{2} C_1 C_2 S_3 \end{aligned} \quad (5.41)$$

Sonuç olarak; yapılan tüm işlemler, hesaplamalar, çözümlemeler; dinamik analizin yapılması, yani dinamik modelin oluşturulması için elde edilmesi gereken en temel parametre olan tork denklemlerini elde etmek için kullanılmıştır. Verilen formüller ve denklemlerle, sonuca adım adım yaklaşılmıştır. (5.42), (5.42-a) ve (5.42-b)'de her eklem için bulunan tork denklemleri verilmiştir. Bu denklemlerin (5.1)'e göre elde edilmesiyle de, bir sonraki aşama olan; uygun kontrolör tasarlanması gerçekleştirilmiş ve robot bacağına hareket kontrolünün doğru bir şekilde yapılması için gerekli parametreler elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \theta_1 \theta_2 - \frac{2}{3} m_1 a_1^2 C_2 S_2^2 - 2m_2 a_1^2 C_2 S_2^2 - 2m_2 a_1 a_2 C_2 S_2^2 C_3 + m_2 a_1 a_2 S_2 C_2 S_3 - \\ & \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_2 S_2^2 C_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 + \theta_1 \theta_3 - m_2 a_1 a_2 C_2^2 S_3 - \\ & m_2 a_1 a_2 S_2 C_2 C_3 - \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_3 C_2^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_3 S_2^2 C_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 + \\ & \theta_1 \left[\frac{1}{3} m_1 a_1^2 C_2^2 + \frac{1}{3} m_1 a_2^2 C_{23}^2 + m_2 a_1^2 C_2^2 + m_2 a_1 a_2 C_2 C_{23} \right] - 9.81 m_1 \frac{a_1}{2} S_1 - \\ & m_1 \frac{a_1}{2} C_2 - m_2 a_1 S_1 C_2 - m_2 \frac{a_2}{2} S_2 C_{23} \end{aligned} \quad (5.42)$$

Denklemlerde de görüldüğü üzere tork denklemleri oldukça fazla sayıda parametreye bağlıdır. Dolayısıyla, bir robotun dinamik analizini için çözümlenen denklemler hataya açık ifadelerdir. Bu yüzden dinamik model oluşturulurken işaretlere ve parametrelere oldukça fazla dikkat edilmesi gerekmektedir.

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \theta_2 \left[\frac{1}{3} m_1 a_1^2 + \frac{1}{3} m_2 a_2^2 + m_2 a_1^2 + m_2 a_1 a_2 C_3 \right] + \theta_3 \left[\frac{1}{4} m_2 a_2^2 + \frac{1}{2} m_2 a_1 a_2 C_3 \right] + \\ & \theta_2 \theta_3 - m_2 a_1 a_2 S_3 + \theta_3^2 - \frac{1}{2} m_2 a_1 a_2 S_3 - \theta_1^2 - \frac{2}{3} m_1 a_1^2 C_2 S_2^2 - \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_2 S_2^2 C_3^2 + \\ & \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2^2 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 - 2m_2 a_1^2 C_2 S_2^2 - m_2 a_1 a_2 S_2 C_3 - m_2 a_1 a_2 C_2 S_3 / 2 - \\ & 9.81 - m_1 \frac{a_1}{2} C_1 S_2 - m_2 a_1 C_1 S_2 - m_2 \frac{a_2}{2} C_1 S_2 C_3 - m_2 \frac{a_2}{2} C_1 C_2 S_3 \end{aligned} \quad (5.42-a)$$

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & \theta_2 \left[\frac{1}{3} m_2 a_2^2 + m_2 a_1^2 + \left(\frac{1}{2}\right) m_2 a_1 a_2 C_3 \right] + \theta_3 \left[\frac{1}{4} m_2 a_2^2 + \right. \\
& \theta_2 \theta_3 \left[-\frac{1}{2} m_2 a_1 a_2 S_3 - (\theta_1^2 - \frac{2}{3} m_2 a_2^2 C_2^2 C_3 S_3^2 + \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 S_2^2 C_3^2 + \right. \\
& \left. \frac{2}{3} m_2 a_2^2 S_2 C_2 S_3 C_3 - m_2 a_1 a_2 C_2 S_3 - m_2 a_1 a_2 S_2 C_3 - \theta_2^2 - m_2 a_1 a_2 S_3 - \right. \\
& \left. \left. 2\theta_2 \theta_3 \left[-m_2 a_1 \frac{a_2}{2} S_3 \right] \right] / 2 - 9.81 - m_2 \frac{a_2}{2} C_1 C_2 S_3 \right] \quad (5.42-b)
\end{aligned}$$

6. ROBOT KONTROLÜ

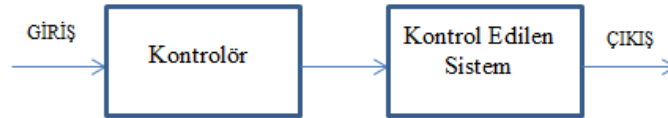
6.1. Kontrol Sistemleri

Kontrol sisteminin tanımlanabilmesi için, öncelikle kontrol ve sistem ifadelerinin tanımlanması gerekmektedir. Kontrol; sistemleri istenilen bir duruma yönlendirme, işleyişine müdahale etme ya da sistemi istenilen bir değerde tutma olarak tanımlanabilir. Sistem; önceden belirlenen bir görevi yapmak üzere, aralarında belirli ilişkiler olan nesnel veya kavramsal birden çok bileşenin oluşturduğu donanımlar bütünüdür. Otomatik kontrol ise; ait olduğu sistemin çıkışını, herhangi bir insan müdahalesine gerek kalmadan istenen değerlerde tutmayı amaçlayan sistemdir.

Kontrol sistemlerinin temel amaçları şu şekilde sıralanabilir;

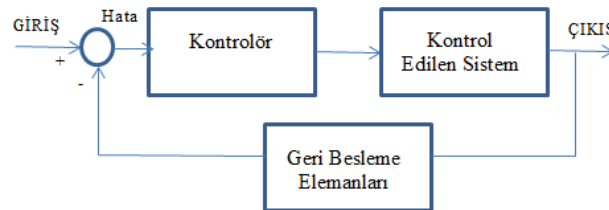
- Denetlenen sistemlerin çıkışını istenen sabit bir değerde kontrol altında tutmak,
- Tasarlanan sistemdeki olayların belirli bir sıra ile oluşmasını sağlamak,
- Kontrol edilemeyen sistemdeki değişkenlerin bozucu etkilerini düzeltmek,
- Sistemdeki hata oranını, belirlenen referans değerler ile karşılaştırıp, hata oranını minimuma indirmek.

Temel olarak kontrol sistemleri; açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Açık çevrim; bir kontrol sisteminin çıkışından bağımsız olduğu sistemlerdir.



Şekil 6.1. Açık çevrim kontrol sistemi

Kapalı çevrim; sistem girişindeki bir kontrol işareti, çıkış işaretine ya da çıkış işaretinden üretilen bir işaret, referans işaret arasındaki farka bağlı sistemlerdir.



Şekil 6.2. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Bir kapalı çevrim denetim sisteminde çıkış parametresi, ölçme elemanı ile ölçülür. Ölçme sonucu elde edilen bu ifade girişe geri beslendikten sonra referans değeri ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonunda bir hata sinyali elde edilir, hata sinyalinin yapısına ve denetlenen çıkış değişkenine uygun bir denetim sinyali üretilir. Kapalı denetim sistemine “geri beslemeli denetim sistemi” de denilebilir [16]. Ayrıca, kapalı çevrim kontrol sistemlerinde hata, çıkışın herhangi bir anda istenilen değere göre farkını ifade etmektedir. Hata sinyali, giriş ile geri besleme sinyali arasındaki farka eşittir.

Geri beslemeli bir denetim sisteminde; ölçme, karar ve uygulama olmak üzere 3 işlem gerçekleşmektedir. Ölçme aşamasında, denetlenen çıkış değişkeni ölçülür. Karar aşamasında, ölçülen değeri ile istenen değeri arasındaki fark hesaplanır. Uygulama aşamasında da; hatayı azaltıcı bir denetleme sinyali uygulanır.

Geri beslemeli kontrol tasarımlarında en yaygın kullanılan kontrol yöntemi, PID kontrol yöntemidir. Bu tez çalışmasında ele alınan, dört bacaklı robotun tek bacağının kontrolü de, PID kontrol yöntemi ile yapılmıştır. Otomatik kontrol sistemlerinde hatayı minimuma indireyecek çeşitli kontrol formları vardır;

- ✓ Oransal Kontrol (Proportional – P),
- ✓ Oransal-İntegral Kontrol (Proportional – Integral – PI),
- ✓ Oransal-Türevsel Kontrol (Proportional – Derivative – PD),
- ✓ Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol (Proportional-Integral-Derivative – PID).

Oransal kontrolde cihaz, çıkış sinyalini prosesin talep ettiği enerji doğrultusunda otomatik olarak ayarlar. Bu sistemde talep edilen enerji ile verilen enerji arasında bir oran mevcuttur. Ayrıca; oransal kontrol sistemlerinde ölçülen değeri öncelikle set noktasının üstüne çıkar ve birkaç kez SET noktası üzerinde salınım yaptıktan sonra, SET değerinin altında bir noktaya yerleşir. SET noktasındaki bu kayma “OFF-SET” olarak adlandırılır.

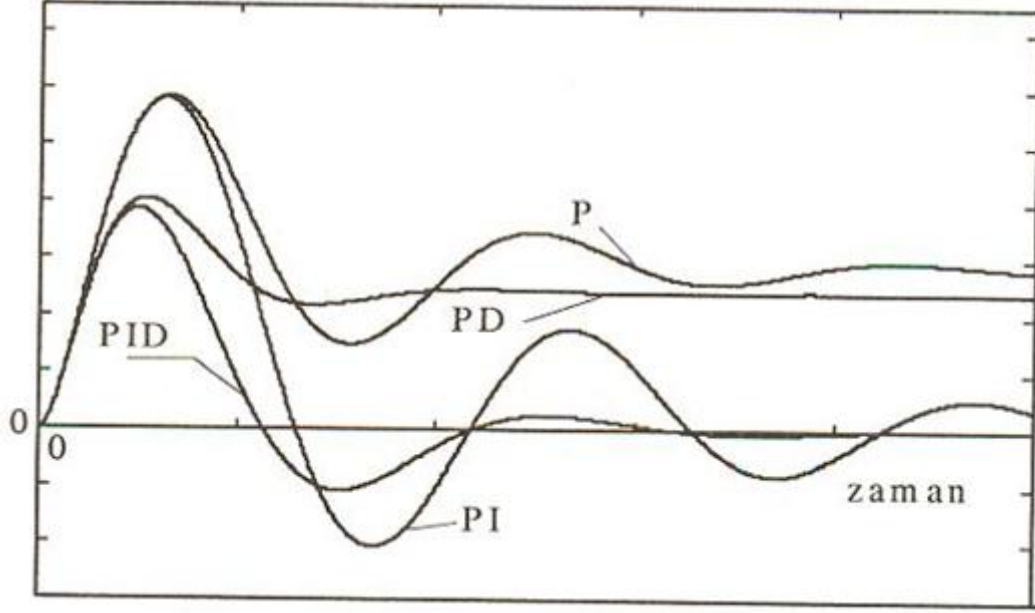
Oransal – İntegral kontrol; oransal kontrolde karşımıza çıkan OFF-SET, P değerine I(integral)’in eklenmesiyle ortadan kaldırılmak için kullanılır.

Oransal – Türevsel kontrolde; türevselliğin eklenmesiyle OFF-SET olarak belirtilen, SET noktasından kayma miktarı azalır. Ancak asıl olarak, aşırı yükselme veya aşırı düşüş azalmaktadır.

Oransal – İntegral – Türevsel kontrol; kontrolü zor ve karmaşık sistemlerde, oransal-türevsel ya da oransal-integral kontrolün yeterli olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. Bu kontrolde; P(oransal) kontrol yapılırken oluşan OFF-SET, PI kontrol ile giderilebilir.

Ancak, meydana gelen aşma miktarları (overshoot), bu kontrole türevsel etkinin de eklenmesi ile minimum seviyeye indirilir veya tamamen kaldırılır [17].

P, PI, PD ve PID kontrol yöntemlerinin sisteme etkileri Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. PID kontrolörlerin etkilerinin karşılaştırılması

6.2. PID Kontrolör Tasarımı

Belirtildiği üzere PID kontrol, diğer kontrol formlarının hepsini ihtiva ettiği için maksimum verim ile sistemi kontrol edebilmek için en kullanışlı yöntemdir. PID kontrolör, sadece sistemde oluşan hatanın varlığını değil, aynı zamanda hatanın ne kadar olduğuna ve hatanın o anki artış veya azalış eğilimine bakarak bir çıkış sinyali verdiği kolaylıkla anlaşılabilmektedir.

PID kontrolör tasarımında, sistemin cevabını bulabilmek için çıkışa etkiyen, integral ve türev etkilerini matematiksel olarak ifade eden formül (6.1)'de verilmiştir.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (6.1)$$

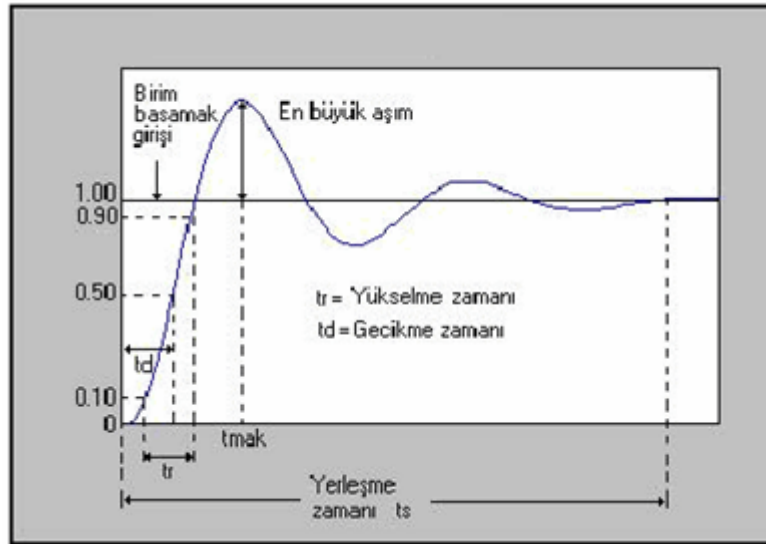
Burada K_p ; oransal kazancı (proportional gain), K_d ; türevsel kazancı (derivative gain), K_i ; integral kazancı (integral gain), $e(t)$ ise hata değerini ifade etmektedir.

Oransal denetleyici (K_p), yükselme zamanını azaltmada etkili olur, kalıcı durum hatasını hiçbir zaman ortadan kaldırmaz. İntegral denetleyici (K_i), kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmada etkili olur ancak, geçici cevabı daha kötü yapabilir. Türevsel denetleyici (K_d), sistem kararlılığının artmasında, aşmanın azalmasında ve geçici cevabın düzelmesinde etkili olur. Her bir denetleyicinin (K_p, K_i, K_d), kapalı döngülü bir sisteme etkisi Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 PID Denetleyicilerin karakteristikleri

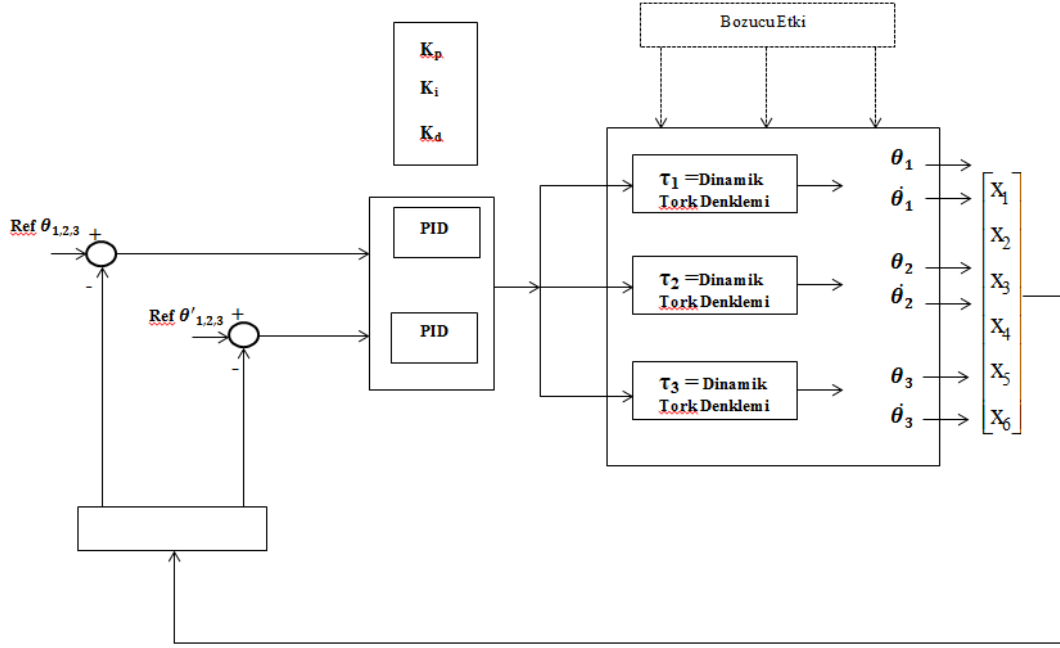
<u>Denetleyici</u>	<u>Yükselme Zamanı</u>	<u>Aşma</u>	<u>Yatışma Zamanı</u>	<u>Kalıcı Durum Hatası</u>
K_p	Kısalır	Artar	Az Değişir	Azalır
K_i	Kısalır	Artar	Artar	Ortadan Kalkar
K_d	Az Değişir	Azalır	Azalır	Az Değişir

Zaman tanım bölgesi özellikleri, zaman alanı cevap parametrelerine bağlı olarak Şekil 6.3’te [18] verilmiştir.



Şekil 6.4. Zaman alanı cevap parametreleri

Yapılan tez çalışması kapsamında, dört bacaklı bir robotun bir bacağının PID kontrol yöntemi ile tasarımı yapılmış ve bu kontrolörün blok şeması Şekil 6.5’te verilmiştir.



Şekil 6.5. Tasarlanan kontrol sisteminin blok şeması

Sistemin çalışma mekanizması şu şekilde açıklanabilir;

Diyagramda da görüleceği üzere, robot bacağına hareket kontrolü için klasik PID kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolör katsayıları deneme yanılma tekniği ile belirlenmiştir. Hesaplanan kontrol sinyalleri dinamik denklemlere uygulanır ve eklemlere ait konum - hız değerleri sistem cevapları olarak elde edilir. Elde edilen sistem cevapları, yörünge planlaması sırasında belirlenen referans değerler ile kıyaslanır ve her eklem için bu iki değer arasındaki fark alınarak hata miktarı tespit edilir. Her döngü için PID kontrolör bu hata miktarını azaltacak şekilde yeni kontrol sinyalleri üretir.

Simülasyonlar, MATLAB paket programında geliştirilen Runge – Kutta sayısal yaklaşım metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Runge – Kutta yöntemi, diferansiyel denklemlerin nümerik çözümlerinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Runge – Kutta yönteminin diğer bir adı da ortak nokta metodudur. Bu yöntemde temel yaklaşım; bir örnekleme periyodu (h) içinde, birden fazla noktada hesaplama yaparak daha doğru bir sonucun elde edilmesi ve böylece diferansiyel denklemlerin nümerik çözümlerinde hatanın adım adım azaltılmasıdır. Bir örnekleme periyodunda, kaç kez hesaplama yapılacağı Runge – Kutta yönteminin derecesi ile belirlenmektedir. Mühendislik çözümlerinde Runge – Kutta yöntemlerinden en sık kullanılanı, (6.2) – (6.6)'da verilmiştir.

$$k_1 = f(x_n, y_n) \quad (6.2)$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}) \quad (6.3)$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}) \quad (6.4)$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + k_3) \quad (6.5)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (6.6)$$

Burada h ; örnekleme periyodunu, $x[n]$; diferansiyel denklemin durum değişkenini, $y[n]$; bir önceki adımda hesaplanan çıkışı ve $y[n+1]$ ise şu anki yeni hesaplanan çıkış değerini göstermektedir [19]. Ayrıca, PID kontrolörün MATLAB algoritması EK.2’de verilmiştir.

7. YÖRÜNGE PLANLAMA

Bir robot manipülatörünün uç işlevcisinin, başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar olan hareketi esnasında yer değiştirme ve dönme yollarını belirleyen noktalar kümesine “yörünge” denir. Robotlarda yörünge planlaması genelde, noktadan noktaya (Point to Point - PTP) hareket türünde yapılmaktadır. Noktadan noktaya hareketi kontrol etmek için 3 yöntem mevcuttur. Bunlar; sıralı eklem hareketi, koordine edilmemiş eklem hareketi ve koordine edilmiş eklem hareketidir. Sıralı eklem hareketi; bir anda diğer bütün eklemlerin sabitlenip sadece bir eklem hareket ettirilmesi şeklindedir. Bu hareket türü, bir endüstriyel robotun kontrolünde hızlı basitleştirmeler sağlayabilmektedir ancak, hareketin süresini uzatmaktadır. Koordine edilmemiş eklem hareketinde, robotun uç işlevcisinin belirtilen noktaya hareketi esnasında yörüngeyi izleyip izlemediği önem arz etmemektedir. Koordine edilmiş eklem hareketi ise, noktadan noktaya hareketin en kullanışlı türüdür. Burada, bütün eklemler sonuç pozisyonuna eş zamanlı şekilde koordine edilmektedir [20]. Bu tez çalışmasında, koordine edilmemiş hareket türü ile noktadan noktaya hareket kontrol edilmiştir.

Robot manipülatörlerinin uç işlevcilerinin çalışma uzayı içinde kendisine verilen görevi yerine getirebilmesi için önceden belirlenen bir noktaya hareket etmesi gerekir. Verimliliğin artması için en önemli etken ise, bu noktaya mümkün olduğu en kısa sürede gitmesidir. Önceden belirlenen sınırlamalar altında uç işlevcinin minimum sürede noktaya hareket etmesi amaçlanır.

Bu çalışmada, dört bacaklı robotun bir bacağının izlemesi gereken bir yörünge için tespit edilmiş bazı eklemlerin açılma konumları referans olarak alınmıştır. Eklemlerin belirlenen bu referans noktaları yakalayabilmesi için PID kontrol uygulanmıştır. Tasarlanan kontrolörde her eklem için belirlenen oransal, türevsel ve integral katsayıları deneme yanılma tekniği ile belirlenmiş ve aşağıda verilen değerlere ulaşılmıştır.

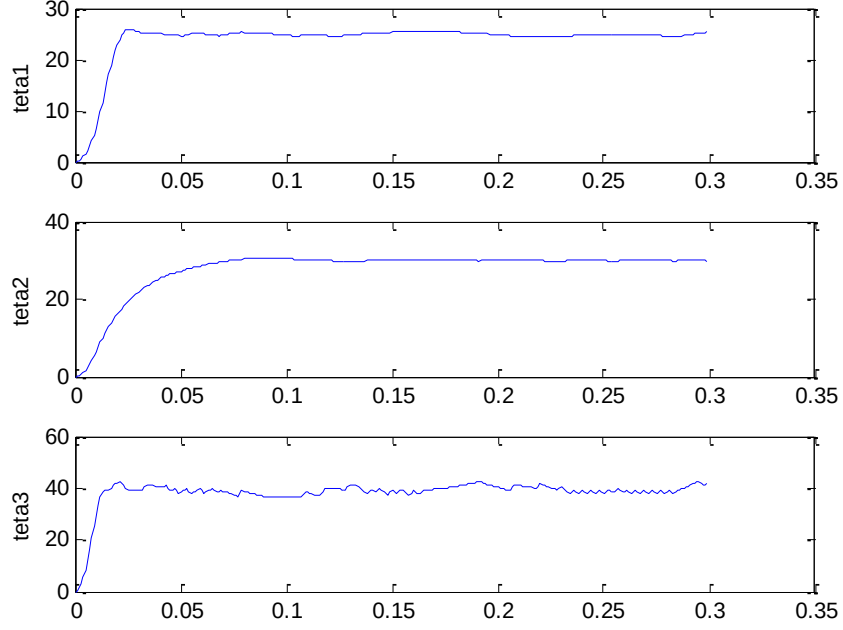
$$K_{p_1} = 800, K_{i_1} = 2 \text{ ve } K_{d_1} = 5 \quad (7.1)$$

$$K_{p_2} = 500, K_{i_2} = 10 \text{ ve } K_{d_2} = 10 \quad (7.2)$$

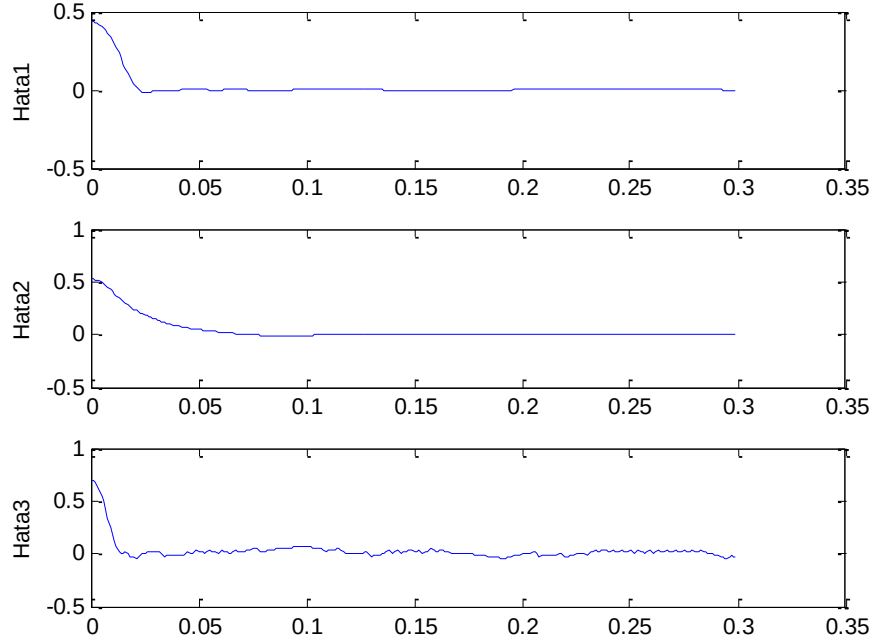
$$K_{p_3} = 700, K_{i_3} = 3 \text{ ve } K_{d_3} = 3 \quad (7.3)$$

Daha önce elde edilen dinamik denklemler kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans

konumları için eklemler kontrol edilmiş ve sistem cevapları Şekil 7.1’de görüldüğü gibi grafiksel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, her bir ekleme ait hata değerlerinin zamanla değişimini veren grafikler Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

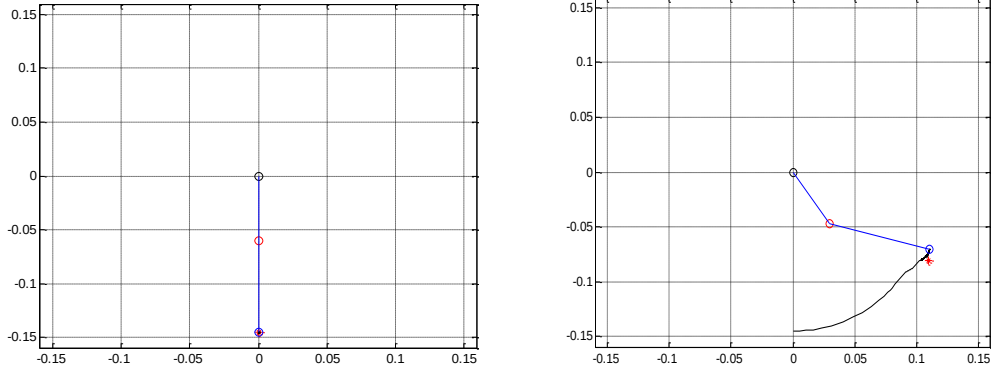


Şekil 7.1. Belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans konumlar için sistem cevapları



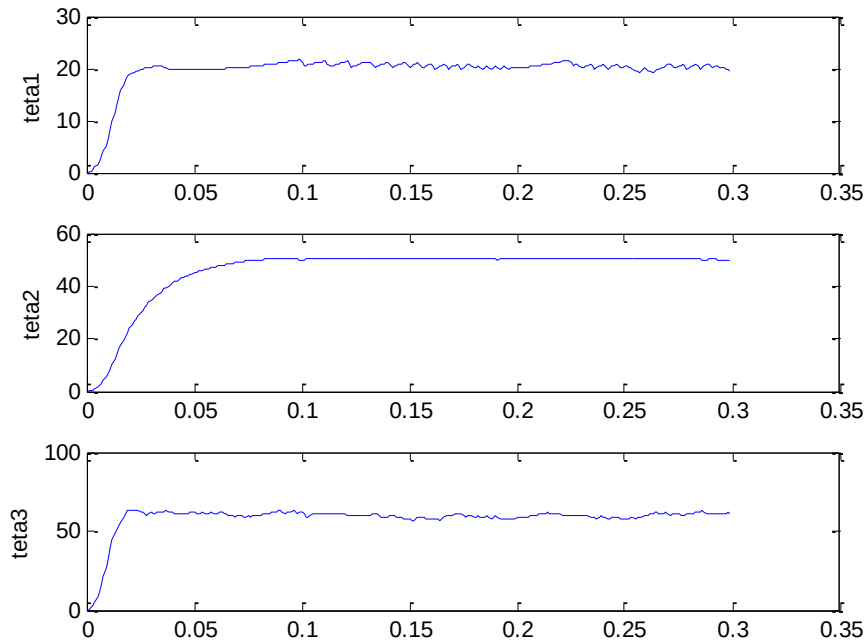
Şekil 7.2. Belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans konumlar için hata cevapları

Elde edilen sonuçlara göre referans değerler oldukça düşük hatayla ve çok kısa bir sürede başarılı olarak yakalamıştır. Ancak, 3 numaralı eklemin açısında bir salınım meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 7.3'te robot bacağına başlangıç konumundan referans konumuna geçtiği simülasyona ait grafik yer almaktadır.

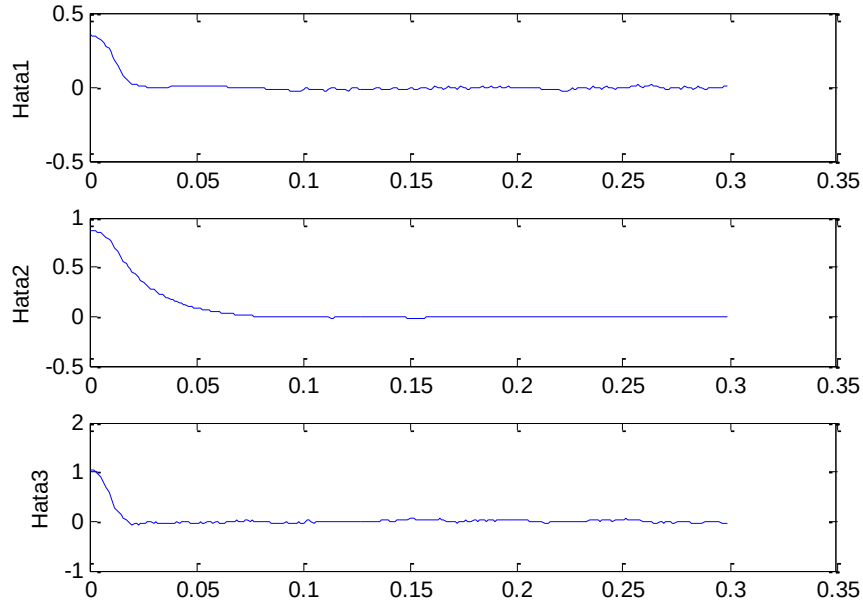


Şekil 7.3. Belirlenen $Q_1 = 25^\circ$, $Q_2 = 30^\circ$ ve $Q_3 = 40^\circ$ referans konumları için elde edilen simülasyon

Başka bir referans konum olarak belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ değerleri için eklemler tekrar kontrol edilmiş ve sistem cevapları Şekil 7.4'te görüldüğü gibi grafiksel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, her bir ekleme ait hata değerlerinin zamanla değişimini veren grafikler Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

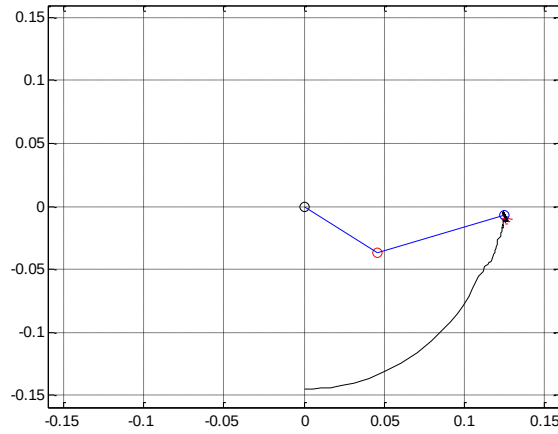


Şekil 7.4. Belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ referans konumlar için sistem cevapları



Şekil 7.5. Belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ referans konumlar için hata cevapları

Elde edilen sonuçlar yine oldukça başarılı bir kontrolün gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Şekil 7.6’da robot bacağına ikinci uygulamaya ait başlangıç konumundan referans konumuna geçtiği simülasyondan elde edilen grafik yer almaktadır.



Şekil 7.6. Belirlenen $Q_1 = 20^\circ$, $Q_2 = 50^\circ$ ve $Q_3 = 60^\circ$ referans konumlar için elde edilen simülasyon

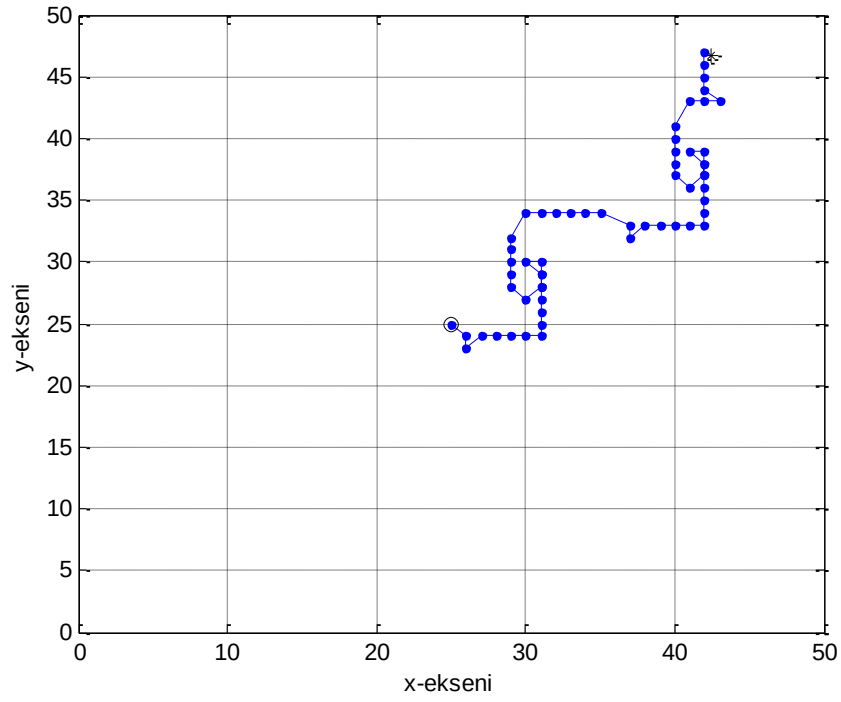
Robotun üzerine yerleştirilen alkol gaz sensörü yardımıyla gaz yoğunluğunun en fazla olduğu noktanın bulunabilmesine yönelik MATLAB paket programında basit bir algoritma geliştirilmiştir. Öncelikle uygulamanın içeriğini detaylı olarak açıklamak gerekirse;

Sınırları belirlenmiş bir alan içerisinde belirlenen bir nokta hedef olarak işaretlenmektedir. Bu alanın tam orta noktası başlangıç olarak seçilerek robotun bu

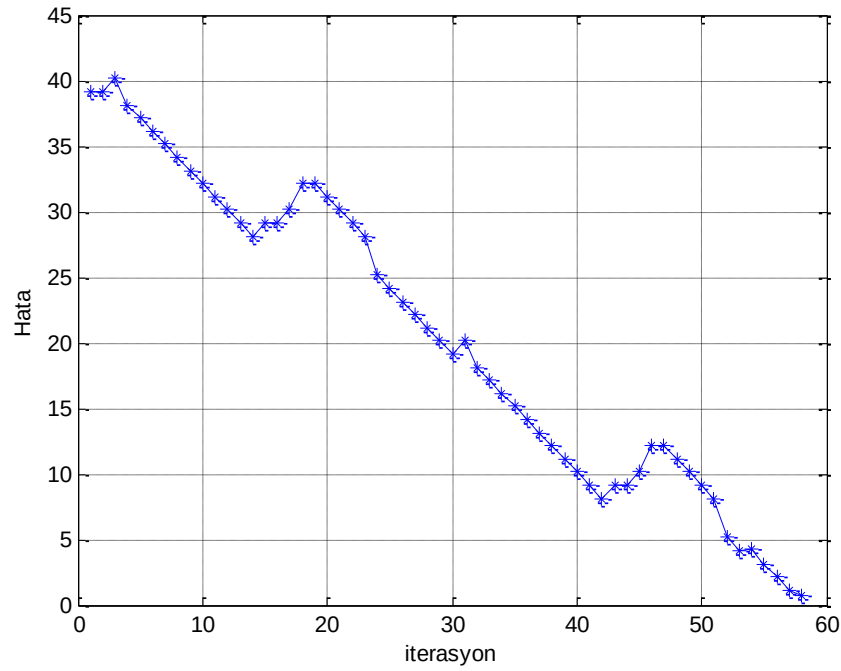
noktadan itibaren hedef noktayı aramaya başlayacağı kabul edilmiştir. Robot her bir iterasyonda çeşitli yönlerde doğru düz veya dairesel hareketlerle adım atarak aramayı gerçekleştirecektir. Arama esnasında robot yaptığı her hareketin sonunda ortamdaki gaz yoğunluğunu gaz sensörü yardımıyla ölçecektir. İki iterasyon arasında ölçülen gaz yoğunluğu farkını göz önünde bulundurarak ilerleyeceği yönü tayin edecektir. Dolayısıyla, bu fark negatif çıkmışsa hedeften uzaklaştığı, pozitif çıkmışsa hedefe yaklaştığı sonucunu çıkararak ilerleme yönünü tahmin edecektir. Robotun hedefe ulaştığı anda sıfır hatayı tespit etmesi çok zor olacağı için bu hatanın belirli toleransı yakalaması ile hedefe ulaştığı kabulü yapılacaktır.

Uygulamanın, MATLAB paket programında simülasyonunun gerçekleştirilebilmesi için söz konusu gaz yoğunluğu robotun hedef konuma olan uzaklığı cinsinden hesaplanacaktır. Simülasyonlar, belirlenen alan içerisinde tespit edilmiş 3 farklı nokta için tekrarlanacaktır. Bu arada, simülasyon için uygulama alanı x-doğrultusunda 50, y-doğrultusunda 50 birim olarak alınmıştır. Robotun başlangıç noktası ise bu alanın tam orta noktası olan $x=25$ ve $y=25$ birim olarak seçilmiştir.

İlk olarak hedef noktanın $x=42$ ve $y=46$ birim öteye yerleştirildiği ve robotun bu hedef noktayı arayarak bulması beklenmiştir. Simülasyon neticesinde robotun izlediği yörüngeyi gösteren grafik Şekil 7.7’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 7.8’de iterasyona bağlı olarak hatanın değişim grafiği gösterilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlara göre robotun hedefi başarılı bir şekilde bulabildiği ve iterasyona bağlı olarak hatanın azalma eğilimi gösterdiği açıkça görülmektedir. Robotun izlediği yörüngeye bakılırsa hedefe doğrudan yönelmediği, dairesel hareketlerle aramayı gerçekleştirdiği anlaşılmaktadır. Bu da robotun gaz yoğunluğundaki değişimi algılayabilmesi ve çıkan neticeye göre yönünü belirlemeye çalıştığını göstermektedir. Benzer sonuçlar, ikinci ve üçüncü uygulama simülasyonlarında da görülebilmektedir.



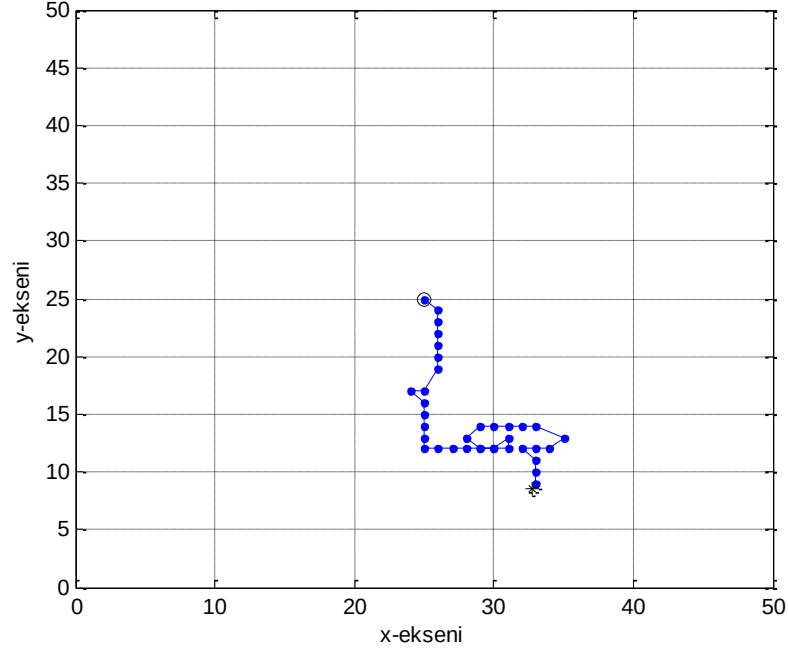
Şekil 7.7. Robotun $x=42$, $y=46$ hedefine ulaşması



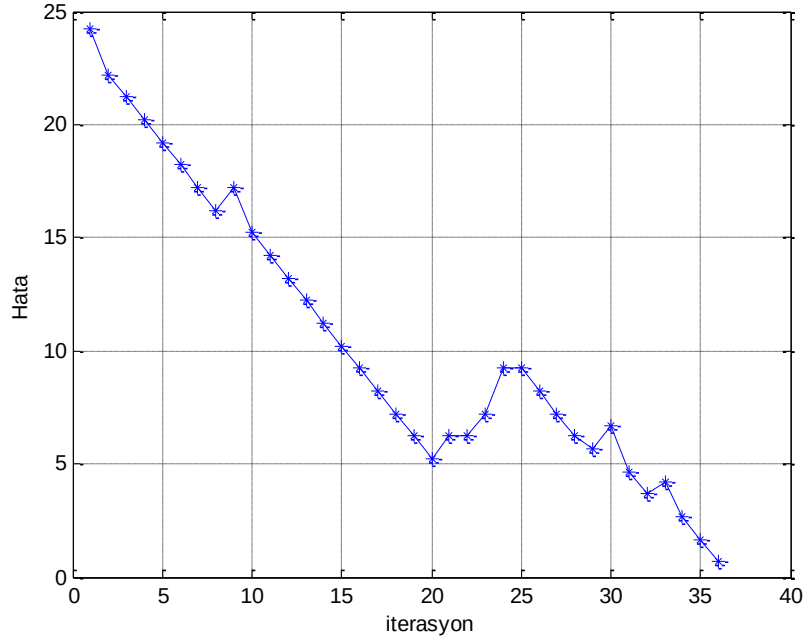
Şekil 7.8. Robotun $x=42$, $y=46$ hedefine ulaşırken hatanın değişimi

İkinci hedef olarak, noktanın $x=32$, $y=8$ birim öteye yerleştirildiği ve robotun bu hedef noktayı arayarak bulması beklenmiştir. Simülasyon neticesinde robotun izlediği yörüngeyi

gösteren grafik Şekil 7.9’da verilmiştir. Ayrıca, Şekil 7.10’da iterasyona bağlı olarak hatanın değişim grafiği gösterilmiştir.

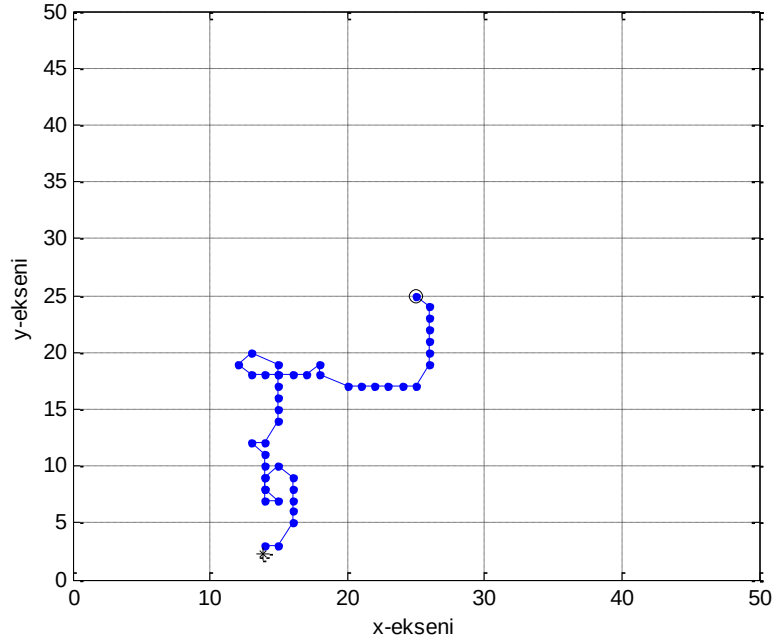


Şekil 7.9. Robotun $x=32$, $y=8$ hedefine ulaşması

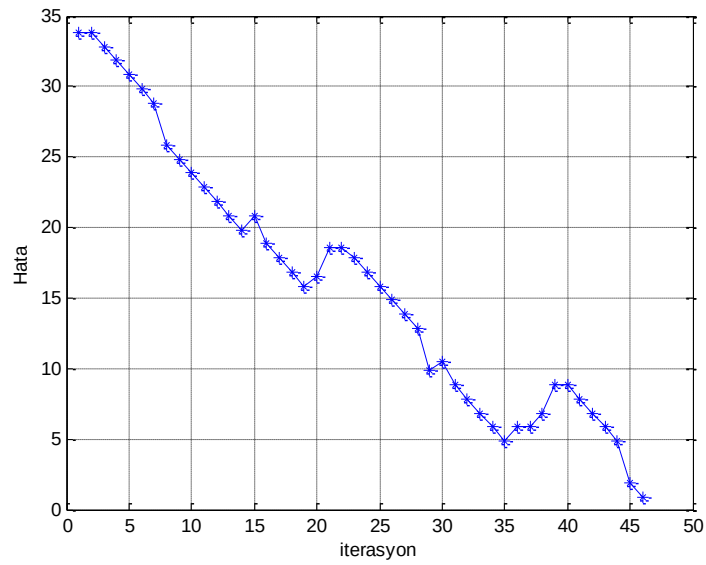


Şekil 7.10. Robotun $x=32$, $y=8$ hedefine ulaşırken hatanın değişimi

Üçüncü hedef olarak, noktanın $x=14$, $y=2$ birim öteye yerleştirildiği ve robotun bu hedef noktayı arayarak bulması beklenmiştir. Simülasyon neticesinde robotun izlediği yörüngeyi gösteren grafik Şekil 7.11’de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 7.12’de iterasyona bağlı olarak hatanın değişim grafiği gösterilmiştir. Hedef bulma uygulamasının algoritması, EK.3.’te verilmiştir.



Şekil 7.11. Robotun $x=14$, $y=2$ hedefine ulaşması



Şekil 7.12. Robotun $x=14$, $y=2$ hedefine ulaşırken hatanın değişimi

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dört ayaklı bir robotun mekanik tasarımı Solid Works programı ile tasarlanarak, imalatı ve montajı gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, kinematik ve dinamik analizleri yapılarak, robotun bacaklarının kontrolü için klasik PID kontrolör tasarlanmış, simülasyonlar MATLAB paket programında gerçekleştirilmiştir. Sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiş ve kontrolün referans noktalarını oldukça başarılı bir şekilde yakalayabildiği görülmüştür.

Simülasyonlar sonucunda eklem cevaplarında bir miktar salınımların olduğu görülmüştür. Bu sonuç ile uzuvların dinamik etkilerinin de göz önünde bulundurulduğu kontrol yöntemlerinin uygulanması gerekliliğine ulaşılmaktadır. Robotlarda yaygın olarak kullanılan hesaplanmış tork kontrol yöntemi veya parametrik belirsizliğe duyarsızlığı ile bilinen kayan kipli kontrol gibi gelişmiş kontrol yöntemlerinin uygulanması önerilebilir.

Ayrıca, uygulanan kontrol sisteminde yer alan kontrol parametrelerinin deneme yanılma tekniği ile bulunması hatayı minimuma götüremeyecektir. Özellikle, bu kontrol parametrelerinin sayısının artması işlemi hem zorlaştırır hem de oldukça eziyetli bir hale getirir. Bunun için seçilecek uygun bir optimizasyon tekniği ile hatayı, belirlenen tolerans dahilinde minimuma ulaştırabilecektir.

Robotun ilk tasarım aşamasında uygulama ve hesap kolaylığı açısından bacakların 3 serbestlik dereceli olmasına karar verilmiş ve ortaya çıkan sonuçta oldukça başarılı bir yürüme hareketi elde edilmiştir. Bununla birlikte, robotun geliştirilmesine yönelik bacakların eklem sayısı bir artırılarak 4 ayaklı canlıların yürüme hareketlerine daha yakın davranışlar elde edilebilir.

Robot üzerine bu çalışmada, ultrasonik sensör ile alkol gaz algılama sensörü yerleştirilerek uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Robotun kullanım amacı doğrultusunda mikroişlemciye geliştirilen farklı algoritmalar yüklenerek uygulamaların çeşitliliği artırılabilir. Çevresel tepkiler veya özellikle koku algılamaya yönelik benzeri alanlarda robotun belli bir amaç için kullanılmasının zemini hazırlanmıştır.

Bu tez kapsamında, 4 bacaklı robotlara farklı işlevler kazandırılarak farklı misyonların yüklenebileceği uygulamalı olarak ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmaların pratikte uygulama sahası bulabileceğini ve bu sayede insanoğlunun yaşamında karşılaşılabileceği birçok zorluğun aşılmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca,

teknolojik gelişmelerde ÷lkemizin dışa bağlılığını azaltmaya yönelik artan Ar-Ge çalışmalarına katkı sağlayabileceği dñř÷n÷lmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ayyıldız, S.**, 2009. Kendi Robotunu Kendin Yap, Altaş Yayınları.
- [2] **TÜRK CAD**, 2008. Robot Tarihi. <http://www.turk-cad.com/content/view/920/218/>.
- [3] **Çetinkaya, Ö.**, 2009. Bir Kolun Hareketlerini Takip Eden Dört Mafsallı Robot Kolu Tasarımı ve Deneysel Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, pp.3-6.
- [4] **Bayrak, A.**, 2007.Beş Eksenli Bir Robot Kolunun Simülasyonu ve Kontrolü, Tıp ve Sağlıkta Robotik. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Jakopec, M., Baena F. R., Haris S. J.,Gomes P, Cobb J. Davies B. L.**, 2003, The Hands-On Orthopaedic Robot “Acrobot”: Early Clinical Trials of Total Knee Replacement Surgery, IEEE Transactions On Robotics And Automation.
- [6] **Milli Eğitim Bakanlığı.**, 2011, “Elektrik-Elektronik Teknolojisi – Servo Motor ve Sürücüler”.
- [7] **Tübitak Bilim.**, 2011, Teknoloji <http://www.biltek.tubitak.gov.tr> , <http://www.mcu-turkey.com/hc-sr04-ultrasonic-sensor-ile-cisim-algilama-ve-mesafe-olcumu/>.
- [8] **Krishna and Gupta.**, 1997. Mechanics And Control of Robotics, Mechanical Engineering Series, University of Illinois, Chicago.
- [9,10] **Bingül, Z., Küçük, S.**, 2005. Robot Tekniği I, Birsen Yayınevi, pp.104-200, pp.13-15.
- [11] **Maxwell, E. A.**, 1900.General homogeneous coordinates in space of three dimensions, Cambridge. U.K.: Cambridge Univ.
- [12] **Denavit, J., Hartenberg R. S.**, June 1955. A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices. ASME Jappl. Mechan. pp. 215-221.
- [13] **Közkurt, C., Soyaslan, M.**, 2011. Euler Bilekli Scara Robot Kolu İçin Kinematik Analizi Yazılımı Geliştirilmesi. IATS’11, Elazığ, pp.1.
- [14] **Altan, A.**,RPR (Dönel Prizmatik Dönel) Eklem Yapısına Sahip Bir Robotun Dinamik Denklemlerinin Vektör-Matris Formda Türetilmesi, Hitit Üniversitesi, pp. 1.
- [15] **Schilling, J, R.**, 1990. Fundamentals of Robotics Analysis And Control, pp. 204-219.
- [16] **MEGEP.**, 2009. Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri, Kapalı Çevrim Kontrolü.
- [17] **Gürsel, K.**, 2010. Otomatik Kontrol ve Ölçme Teknikleri, Ankara.
- [18] **Güllü, A.**, 2010. Kontrolör Arayüzü Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Rice, J, R.**, 1983.Numerical Methods, Software and Analysis, Mc-Graw Hill, New York.
- [20] **Tonbul, T, S., Sarıtaş, M.**, 2003. Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlaması.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Burak TATAR, 1989 yılında Elazığ'da doğdu. Orta öğrenimini Elazığ Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümünden 2012 yılında mezun oldu. 2012 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başladı. 2014 yılında Adıyaman Üniversitesi'nde Arş. Gör. Olarak göreve başladı. 2015 yılının Ocak ayından beri yüksek lisans eğitimini tamamlamak için Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne görevlendirme ile gelerek görevini burada devam ettirmektedir.

EKLER

EK.1. Düz - Ters Kinematik Analiz İçin Gerekli olan MATLAB Programı Kodları

```
function y= tatar(Q,alfa,d,a)
y=[cos(Q) -sin(Q)*cos(alfa) sin(Q)*sin(alfa) a*cos(Q)
    sin(Q) cos(Q)*cos(alfa) -cos(Q)*sin(alfa) a*sin(Q)
    0 sin(alfa) cos(alfa) d
    0 0 0 1];

clear all, clc
syms Q0 alfa0 d0 a0 Q1 alfa1 d1 a1 Q2 alfa2 d2 a2 Q3 alfa3 d3 a3
nx ny nz ox oy oz px py pz ax ay az
A0=tatar(Q0,alfa0,d0,a0);
A1=tatar(Q1,alfa1,d1,a1);
A2=tatar(Q2,alfa2,d2,a2);
A3=tatar(Q3,alfa3,d3,a3);
A=(A1*(A2*A3));

A1_= subs(A1,[Q1,alfa1,d1,a1],[Q1,pi/2,0,0]);
A2_= subs(A2,[Q2,alfa2,d2,a2],[Q2,0,0,a2]);
A3_= subs(A3,[Q3,alfa3,d3,a3],[Q3,0,0,a3]);
A_= subs(A,[A1,A2,A3],[A1_,A2_,A3_]);

T=[nx ox ax px;
    ny oy ay py;
    nz oz az pz;
    0 0 0 1];
inv(A2_)*inv(A1_)*T;
simplify (inv(A2_)*inv(A1_)*T)
```

EK.2. PID Kontrolör İçin Yapılan Algoritmanın MATLAB Programı Kodları

```
function FourLeg_Yorunge
clc, clear all, close all
a1=0.06; a2=0.085; m1=0.14; m2=0.025; b1=0; b2=0; b3=0;
Kp1=800; Kd1=5; Ki1=2;
Kp2=500; Kd2=10; Ki2=10;
Kp3=700; Kd3=3; Ki3=3;

qo=[0 0 0 0 0 0]; to=0;
qref0=[[20 20]', [50 50]', [60 60]']*pi/180;
hs=.001; qdo=[0 0 0 0 0 0]';

ei1=0; ei2=0; ei3=0; TorkLimit=1;
ornekleme=100; ref_i=1; qr(1,:)=qref0(ref_i,:);
qrd(1,:)=zeros(1,3);
nn=ornekleme*(size(qref0,1)+1);
for i=1:nn

    if mod(i,ornekleme)==0,

        if ref_i<size(qref0,1),
            ref_i=ref_i+1; qr(1,:)=qref0(ref_i,:);
            if ref_i==size(qref0,1)
                qrd(1,:)=zeros(1,size(qref0,2))/(ornekleme*hs);
            else
                qrd(1,:)=(qref0(ref_i+1,:)-
qref0(ref_i,:))/(ornekleme*hs);
            end
        end
        end

        e1= qr(1,1)-qo(1,1);
        e2= qr(1,2)-qo(1,3);
        e3= qr(1,3)-qo(1,5);
        de1= qrd(1,1)-qo(1,2);
        de2= qrd(1,2)-qo(1,4);
        de3= qrd(1,3)-qo(1,6);
        ei1=ei1+e1*(mod(i,ornekleme)*hs);
        ei2=ei2+e2*(mod(i,ornekleme)*hs);
        ei3=ei3+e3*(mod(i,ornekleme)*hs);
        t(i,:)=to; q(i,:)=qo;
        %u=[0 0 0];
        u1=Kp1*e1+Kd1*de1+Ki1*ei1;if abs(u1)>TorkLimit,
u1=TorkLimit*u1/abs(u1);end
        u2=Kp2*e2+Kd2*de2+Ki2*ei2;if abs(u2)>TorkLimit,
u2=TorkLimit*u2/abs(u2);end
        u3=Kp3*e3+Kd3*de3+Ki3*ei3;if abs(u3)>TorkLimit,
u3=TorkLimit*u3/abs(u3);end
        u=[u1 u2 u3];
        %*****
        % RUNGE KUTTA ***
        %*****
        k_1=robot(to,qo,u); %
        k_2=robot(to+hs/2,qo+(hs/2).*k_1,u); %
```

```

k_3=robot(to+hs/2,qo+(hs/2).*k_2,u); %
k_4=robot(to+hs,qo+hs.*k_3,u); %
qo=qo+(hs/6)*(k_1+2*k_2+2*k_3+k_4); %
to=to+hs; %
%*****
u1_(i)=u1;
u2_(i)=u2;
u3_(i)=u3;

ee1_(i)=e1;
ee2_(i)=e2;
ee3_(i)=e3;

teta1=qo(1,1); teta2=qo(1,3); teta3=qo(1,5);
A1_=[cos(teta1) 0 sin(teta1) 0;sin(teta1) 0 -cos(teta1) 0;0 1 0
0;0 0 0 1];
A2_=[cos(teta2) -sin(teta2) 0 a1*cos(teta2);sin(teta2) cos(teta2)
0 a1*sin(teta2);0 0 1 0;0 0 0 1];
A3_=[cos(teta3) -sin(teta3) 0 a2*cos(teta3);sin(teta3) cos(teta3)
0 a2*sin(teta3);0 0 1 0;0 0 0 1];

A1_A2_=A1_*A2_;
A1_A2_A3_=A1_*(A2_*A3_);
eksen1(i,:)=[A1_A2_(1:3,4)]';
eksen2(i,:)=[A1_A2_A3_(1:3,4)]';
end
clf;
figure(1)
subplot(3,1,1),plot(t,q(:,1)*180/pi),ylabel('teta1');
% subplot(3,2,2),plot(t,q(:,2)),ylabel('omega1');
subplot(3,1,2),plot(t,q(:,3)*180/pi),ylabel('teta2');
% subplot(3,2,4),plot(t,q(:,4)),ylabel('omega2');
subplot(3,1,3),plot(t,q(:,5)*180/pi),ylabel('teta3');
% subplot(3,2,6),plot(t,q(:,6)),ylabel('omega3');
figure(2)
subplot(3,1,1),plot(t,u1_),ylabel('Tork1');
subplot(3,1,2),plot(t,u2_),ylabel('Tork2');
subplot(3,1,3),plot(t,u3_),ylabel('Tork3');

figure(3)
subplot(3,1,1),plot(t,ee1_),ylabel('Hata1');
subplot(3,1,2),plot(t,ee2_),ylabel('Hata2');
subplot(3,1,3),plot(t,ee3_),ylabel('Hata3');

e_limits=(a1+a2)*1.1;
figure(4),
for i=1:nn
    clf,
    tet1=zeros(1:nn,1); tet2=qref0(:,2); tet3=qref0(:,3);
    Px=cos(tet1_).*(a2*cos(tet2_+tet3_) + a1*cos(tet2_));
    Py=sin(tet1_).*(a2*cos(tet2_+tet3_) + a1*cos(tet2_));
    Pz=a2*sin(tet2_+tet3_) + a1*sin(tet2_);

    plot(Pz,-Px,'r*-'),
    hold on
    plot(eksen2(1:i,3),-eksen2(1:i,1),'k')

```

```

plot(0,0,'ko',eksen1(i,3),-eksen1(i,1),'ro',eksen2(i,3),-
eksen2(i,1),'bo');
line([0 eksen1(i,3)],[0 -eksen1(i,1)])
line([eksen1(i,3) eksen2(i,3)],[-eksen1(i,1) -eksen2(i,1)])
axis([-e_limits e_limits -e_limits e_limits]),grid on
pause(.0001),
end
function dx=robot(t,x,Tork)
T1=Tork(1);T2=Tork(2);T3=Tork(3);

a1=0.06; a2=0.085; m1=0.14; m2=0.025; b1=0; b2=0; b3=0;

dx(1)=x(2);
dx(2)= (-b1*x(2)+T1+9.81*(m1*(a1/2)*sin(x(1))-
m1*(a1/2)*sin(x(1))*cos(x(3))-m2*a1*sin(x(1))*cos(x(3))-
m2*(a2/2)*sin(x(1))*...
*cos(x(3)+x(5)))-x(2)*x(4)*((-
2/3)*m1*(a1^2)*cos(x(3))*(sin(x(3))^2)-2*m2*(a1^2)*cos(x(3))*...
*(sin(x(3))^2)-
2*m2*a1*a2*cos(x(3))*(sin(x(3))^2)*cos(x(5))+m2*a1*a2*sin(x(3))*...
*cos(x(3))*sin(x(5)))-
(2/3)*m2*(a2^2)*cos(x(3))*(sin(x(3))^2)*(cos(x(5))^2)+(2/3)*...
*m2*(a2^2)*sin(x(3))*(cos(x(3))^2)*(sin(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2^2)*s
in(x(3))*cos(x(3))*...
*sin(x(5))*cos(x(5)))-x(2)*x(6)*(-
m2*a1*a2*(cos(x(3))^2)*sin(x(5))-m2*a1*a2*cos(x(3))*...
*sin(x(3))*cos(x(5)))-
(2/3)*(m2*a2^2)*(cos(x(3))^2)*cos(x(5))*(sin(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2
^2)*...
*(sin(x(3))^2)*sin(x(5))*(cos(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2^2)*sin(x(3))*c
os(x(3))*sin(x(5))*cos(x(5)))*...
/((1/3)*m1*(a1^2)*(cos(x(3))^2)+(1/3)*m2*(a2^2)*(cos(x(3)+x(5))^2)
+m2*(a1^2)*(cos(x(3))^2)+m2*a1*a2*cos(x(3))*cos(x(3)+x(5))));
dx(3)=x(4);
dx(4)=(-b2*x(4)+T2+9.81*(-m1*a1/2*cos(x(1))*sin(x(3))-
m2*a1*cos(x(1))*sin(x(3))-m2*a2/2 ...
*cos(x(1))*sin(x(3))*cos(x(5))-
m2*a2/2*cos(x(1))*cos(x(3))*sin(x(5)))-x(6)*...
*(m2*(a2^2)/4+m2*a1*a2/2*cos(x(5)))-x(4)*x(6)*(-
m2*a1*a2*sin(x(5)))-((x(6))^2)*...
*(-m2*a1*a2/2*sin(x(5)))+(((x(2))^2)*(-
2/3*m1*(a1^2)*cos(x(3))*(sin(x(3))^2)*...
-
(2/3)*m2*(a2^2)*cos(x(3))*(sin(x(3))^2)*(cos(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2
^2)*sin(x(3))*...
*(cos(x(3))^2)*(sin(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2^2)*sin(x(3))*cos(x(3))*s
in(x(5))*cos(x(5))*...
-2*m2*(a1^2)*cos(x(3))*(sin(x(3))^2)-m2*a1*a2*sin(x(3))*cos(x(5))-
m2*a1*a2*cos(x(3))*sin(x(5)))/2))*...
/((1/3)*m1*(a1^2)+(1/3)*m2*(a2^2)+m2*(a1^2)+m2*a1*a2*cos(x(5))));
dx(5)=x(6);
dx(6)=(-b3*x(6)+T3+9.81*(-m2*a2/2*cos(x(1))*cos(x(3))*sin(x(5))-
m2*a2/2*cos(x(1))*sin(x(3))*cos(x(5)))*...
+(((x(4))^2)*(m2*a1*a2*sin(x(5)))-2*x(4)*x(6)*(-
m2*a1*a2/2*sin(x(5)))/2)+(x(2))^2)*...

```

```

* (-
(2/3)*m2*(a2^2)*(cos(x(3))^2)*cos(x(5))*(sin(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2
^2)*(sin(x(3))^2)...
*sin(x(3))*(cos(x(5))^2)+(2/3)*m2*(a2^2)*sin(x(3))*cos(x(3))*sin(x
(5))*cos(x(5))...
-m2*a1*a2*cos(x(3))*sin(x(5))-m2*a1*a2*sin(x(3))*cos(x(5))-
dx(4)*((1/3)*m2*(a2^2)+m2*(a1^2)...
+m2*a1*a2/2*cos(x(5)))-x(4)*x(6)*(-
m2*a1*a2/2*sin(x(5)))/((1/4)*m2*(a2^2));

```


EK.3. Hedef Bulma Algoritmasının MATLAB Programı Kodları

```
clear all, clf
x_top=50; y_top=50;
x_s=rand*x_top, y_s=rand*y_top
x=x_top/2; y=y_top/2;
aci=0; bolge=1; donme=-1; duz=0;
e0=abs(x-x_s)+abs(y-y_s); e=e0; e_p(1)=e; di=0; i=1;
xp(1)=x; yp(1)=y; fark_p(1)=0;

while e>1, i=i+1;
if duz==1,
if di<5, di=di+1; else, duz=0; di=0; end
if aci==0, x=x+1; y=y; end
if aci==90, x=x; y=y+1; end
if aci==180, x=x-1; y=y; end
if aci==270, x=x; y=y-1; end, end

if duz==0
if donme==1,
if bolge==1, bolge=4; aci=270; else, bolge=bolge-1; aci=aci-90;
end
end
if donme==1,
if bolge==4, bolge=1; aci=0; else, bolge=bolge+1; aci=aci+90;
end
end
if bolge==1, x=x+1; y=y+1; end
if bolge==2, x=x-1; y=y+1; end
if bolge==3, x=x-1; y=y-1; end
if bolge==4, x=x+1; y=y-1; end,end
e=abs(x-x_s)+abs(y-y_s); fark=e-e0; e0=abs(e);
if duz==1, if fark>0, donme=-donme; duz=0; end, end
if duz==0, if fark>0, donme=donme; else duz=1; end, end
xp(i)=x; yp(i)=y; fark_p(i)=fark; e_p(i)=e;
end

figure(1),
%subplot(211),
plot(xp,yp,'b.-'), hold on, plot(x_s,y_s,'k*'),
plot(x_top/2,y_top/2,'ko')
grid on, axis([0 x_top 0 y_top]), xlabel('x-ekseni'), ylabel('y-ekseni')

figure(2),
%subplot(212),
plot(e_p,'b*-'), grid on, xlabel('iterasyon'), ylabel('Hata')
```