

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YUVARLANAN KÜRESEL ROBOTLARDA HAREKETLİ
BACAK MEKANİZMASI TASARIM VE SİMÜLASYONU**

**Hazırlayan
Şükriye Gülden ATALAY**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Mayıs 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YUVARLANAN KÜRESEL ROBOTLARDA HAREKETLİ
BACAĞ MEKANİZMASI TASARIM VE SİMÜLASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Şükriye Gülden ATALAY**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN**

**Mayıs 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Şükriye Gülden ATALAY

İmza

“Yuvarlanan Küresel Robotlarda Hareketli Bacak Mekanizması Tasarım ve Simülasyonu” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Şükriye Gülden ATALAY

İmza

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

İmza

Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim hayatıma başladığımdan beri bana her zaman destek olan, tez çalışmalarımın süreci boyunca tez konu seçimimde, tezin yazım aşamalarında ve sonucu ulaşmasında benden emeğini hiç esirgemeyen ve her konuda destekleyen sayın danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN 'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezime başladığım andan bitirdiğim zamana kadar vermiş olduğu katkılardan dolayı Özcan ÖZALTIN 'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni hep destekleyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca bana vermiş olduğu sevgi, destek ve anlayış için sevgili babaannem Şükrüye ATALAY'a teşekkür ederim. Bugünlere gelmemdeki büyük emekleri için bu çalışmayı babaanneme armağan ediyorum.

Şükriye Gülden ATALAY

Mayıs 2023, KAYSERİ

YUVARLANAN KÜRESEL ROBOTLARDA HAREKETLİ BACAK MEKANİZMASI TASARIM VE SİMÜLASYONU

Şükriye Gülden ATALAY

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2023
Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

ÖZET

Küre şeklindeki robotlar, her yöne hareket edebilen geometrik yapıya sahip robotlardır. Küresel robotlar yapısı gereği yokuş çıkamaz ve engelle karşılaştığında bunları aşamazlar. Bu tez çalışmasında küresel mobil robotlara hem yeni hareket kabiliyetleri katacak hem de yokuş çıkmak ve engel aşmak gibi ek özellikler kazandırabilecek, hareketli bacaklara sahip yeni kabuğun geliştirilmesi hedeflenmiştir. Mevcut durumdaki küresel robotların hareket mekanizmalarında kontaklı bir yapı veya birden fazla eksenle sarkaç bulunduran karmaşık hareket mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu yapıların kullanılması durumunda kontaklarda zamanla birbirinden ayrılma veya kaymalar görülebilir. Bu sebepten çalışmada tek eksenle bir sarkacın sabit şafta bağlı olduğu ve yönlenmenin içerideki bir kayar kütle yardımı ile sağlandığı küresel mobil robot tipi seçilmiştir. Robotun rampa çıkma veya zıplama hareketleri gerçekleştirebilmesi için kabuk kısmına hareketli bir bacak mekanizması eklenmiştir. Klasik integratör tabanlı simülatörlerde zamanla değişebilen kontak ilişkileri gibi karmaşık dinamik durumların göz önünde bulundurulması zordur. Bu sebepten dolayı hareketli bacağın robota etkisinin gözlemlenebilmesi için kontak ilişkilerinin dikkate alınacağı Matlab/SimMechanics ile geliştirilmiş bir simülatörden yararlanılmıştır. SimMechanics'te geliştirilen simülatörün doğruluğunu ispatlamak için aynı robotun düz zemindeki hareketini simüle eden integratör tabanlı bir simülatörden faydalanılmıştır. Bacağın hareket ettirildiği birçok farklı durum için simülasyonlar detaylı olarak incelenmiş, oluşan kontak kuvvetlerin hareket dinamiğine uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca bu tez çalışmasında robotun hızını ve çıkabileceği düzlemin eğimini arttıracak, gerekli bacak tahrik sinyalinin frekansının nasıl elde edilebileceği matematiksel denklemler de üretilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Küresel Robot, Simülasyon, SimMechanics

DESIGN AND SIMULATION OF HINGED LEG MECHANISM IN ROLLING SPHERICAL ROBOTS

Şükriye Gülden ATALAY

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, May 2023

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Erdem ARSLAN

ABSTRACT

Spherical robots are robots with a geometric structure that can move in all directions. Spherical robots, cannot climb hills and cannot cross them when they encounter obstacles. In this thesis, it is aimed to develop a new shell with movable legs that will both add new mobility capabilities and provide additional features such as climbing uphill and overcoming obstacles. In the mechanisms of spherical robots, complex movement mechanisms with a contact structure or pendulum in more than one axis are generally used. For this reason, a spherical mobile robot type in which a single axis pendulum is connected to the fixed shaft and the orientation is provided with the help of an internal sliding mass has been chosen. A movable leg mechanism has been added to the shell part so that the robot can perform movements such as ramping or jumping. In classical integrator-based simulators, it is very difficult to consider complex dynamical situations such as time-varying contact relationships. For this reason, a simulator developed with Matlab/SimMechanics, in which contact relations can be taken into account, was used to observe the effect of the moving leg on the robot. In order to validate the accuracy of this simulator developed in Simmechanics, an integrator-based simulator simulating the movement of the same robot on a flat surface was used. Simulations for many different situations in which the leg is moved have been examined in detail, and it has been seen that the resulting contact forces give results in accordance with the dynamics of movement. Furthermore, in this thesis, mathematical equations have been tried to be produced on how to obtain the frequency of the required leg drive signal, which will increase the speed of the robot and the inclination of the plane.

Keywords: Spherical Robot, Simulation, SimMechanics

İÇİNDEKİLER

İKİ TAHİRİK MEKANİZMALI KÜRESEL ROBOTUN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii

1. BÖLÜM

GİRİŞ

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Küresel Robotlar	9
2.1.1. Ağırlık Merkezini Değiştirerek Hareket.....	9
2.1.1.1. Hamster Topu.....	10
2.1.1.2 Tekerlek Tabanlı.....	10
2.1.1.3. Universal Tekerlek.....	11
2.1.1.4. Sarkaç Tabanlı	12
2.1.1.5. Çift Sarkaç Tabanlı.....	14
2.1.1.6. Ağırlık Merkezinin Değiştirerek Hareket Eden Farklı Küresel Robot Tasarımları	15
2.1.2. Kabuk Deformasyonu İle Hareket	17
2.1.2.1. Şişebilen Kauçuk Balonlar	17
2.1.2.2. Şekil Değiştirebilen SMA Tekerlekleri.....	17
2.1.2.3. IRobot.....	18
2.1.3. Açısal Momentumunun Korunumu İle Hareket.....	18

2.1.3.1 Tek Tekerlekli Jiroskop Robot	19
2.1.3.2. Sürüş Mekanizmasında Rotor Bulunan Robot	19
2.1.3.3. Ağırlık Merkezinde Jiroskop Bulunan Robot	20
2.1.3.4. İki Bağımsız Yarım Küreden Oluşan Robot	21
2.2 Literatür Değerlendirme	22

3. BÖLÜM

KÜRESEL YUVARLANAN ROBOTUN DİNAMİK MODELİ

3.1. Robot Modeli	27
3.2. Kinematik ve Dinamik Modelleme	29
3.2.1. Yuvarlanma Hareketinin Kinematığı Ve Modellenmesi	29
3.2.2. Küresel Robotun Dinamik Hareket Denklemi	31

4. BÖLÜM

SİMÜLASYON PLATFORMU

4.1 Küresel Robotun Simülasyonu	45
4.2. Dinamik Modelin Simülasyonu.....	47
4.3. Küresel Robota Ait Dinamik Modelin Simülasyonu	50
4.3.1 Küresel Robotun Kontrolü.....	50
4.3.2 Kaydırıcı Mekanizmaya Eklenen Ağırlığın Kompanzasyonu	51
4.3.3 Sarkaç Açısının Etkisinin İncelenmesi.....	52
4.3.4 Kayar Kütle Konumunun Etkisinin İncelenmesi.....	55
4.4 Matlab Simulink / SimMechanics.....	56
4.4.1. Küresel Robotun SimMechanics ile Simülasyonu.....	57
4.4.2 Zemin ile Robot Arasındaki Kontak İlişkisinin Simülasyonu	60

5. BÖLÜM

HAREKETLİ BACAK MEKANİZMASI TASARIMI VE SİMÜLASYONU

5.1. Hareketli Bacak Mekanizması Tasarımı	67
5.2. Mekanizmanın Düz Zemin Üzerindeki Harekete Etkisinin Simülasyonu.....	68
5.3 Mekanizmanın Düz Zemin Üzerindeki Harekete Katkısı.....	71
5.3.1 Kabuk Tahrik Frekansının Elde Edilmesi.....	73
5.3.2 Kabuğa Ait Tasarım Parametrelerin Hareket Performans Üzerine Etkisi.....	74

5.4. Mekanizmanın Eğimli Zemin Üzerindeki Harekete Etkisinin Simülasyonu ...	77
5.5. Mekanizmanın Engel Aşma Hareketinin Simülasyonu.....	79
5.5.1 Zıplama Yüksekliğinin Hesaplanması	81

6. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMA

KAYNAKÇA	89
ÖZGEÇMİŞ.....	97



KISALTMALAR

BCO	: Barycenter Ofset
DAE	: Diferansiyel Cebirsel Denklemler
IDU	: İç Tahrik Ünitesi
ODE	: Ordinary Differential Equations
PDE	: Kısmi Diferansiyel Denklemler
PID	: Proportional Integral Derivative
ROS	: Robot İşletim Sistemi



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şeki 1.1.	Küresel robotlarda sarkaç mekanizması.	3
Şekil 1.2.	Roball küresel robot.....	5
Şekil 1.3.	Rosphere küresel robot	5
Şekil 1.4.	Su altı küresel robot	5
Şekil 1.5.	Şaftı sabit olan bir kaydırıcı ve bir sarkaçtan oluşan küresel robot.	6
Şekil 2.1.	1893'te yapılan yaylı küresel robot oyuncak.....	9
Şekil 2.2.	Hamster topun örnek tasarımı.....	10
Şekil 2.3.	Tekerlek tabanlı robot.....	11
Şekil 2.4.	HIT robot tasarımı	11
Şekil 2.5.	SAR Robotu.....	12
Şekil 2.6.	Roball robotu	12
Şekil 2.7.	Rotundus sarkaç robot.	13
Şekil 2.8.	Groundbot robot.....	13
Şekil 2.9.	Zhao tarafından tasarlanan çift sarkaçlı robotun mekanik yapısı	14
Şekil 2.10.	Kisbot II için sarkaçların dönme eksenleri	14
Şekil 2.11.	Kisbot I tasarımı.....	15
Şekil 2.12.	August robot tasarımı.....	15
Şekil 2.13.	Dört bacaklı küresel robot.....	16
Şekil 2.14.	ARIES robot tasarımı.....	16
Şekil 2.15.	Şişebilen kauçuk balon tasarımı	17
Şekil 2.16.	Deforme olabilen SMA tekerleklerinin anlık görüntüsü	18
Şekil 2.17.	IRobot tasarımı	18
Şekil 2.18.	Tek tekerlekli jiroskop robot.....	19
Şekil 2.19.	Açısal momentum korunumu ile hareket eden robot tasarımı	20
Şekil 2.20.	İki dâhili rotor bulunan tasarım robot	20
Şekil 2.21.	BHQ-5 robotun tasarımı	21
Şekil 2.22.	İki bağımsız küreden oluşan robot.....	21
Şekil 3.1.	Küresel robotunun şematik diyagramı.	27
Şekil 3.2.	Küresel robotun eksen takımları.	28
Şekil 3.3.	Küresel robotun yuvarlanma hareketinin hayali koni modeli.....	29
Şekil 4.1.	Kontrol Sistemi Bölümleri.....	45
Şekil 4.2.	Küresel bir robotun dinamik kontrolör planı.	51

Şekil 4.3.	Kaydırıcı mekanizmada yerçekimi yönünde oluşan kuvvet	52
Şekil 4.4.	Robot sarkaç mafsal açısına uygulanan Sinüs sinyali girişi ile çıkış mafsal açısının karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.5.	Robot sarkaç mafsal açısına uygulanan Step sinyali girişi ile çıkış mafsal açısının karşılaştırılması	53
Şekil 4.6.	Robot sarkaç hızı için uygulanan Sinüs sinyali girişi ile çıkış hızının karşılaştırılması	54
Şekil 4.7.	Robot sarkaç hızı için uygulanan Step sinyali girişi ile çıkış hızının karşılaştırılması	54
Şekil 4.8.	Kaydırıcı mekanizmanın Y ekseninde sola dönüş hareketinin grafiksel gösterimi	55
Şekil 4.9.	Kaydırıcı mekanizmanın Y ekseninde sağa dönüş hareketinin grafiksel gösterimi	55
Şekil 4.10.	SimMechanics 'teki kaydırıcı ve sarkaç tahrikli robotun 3 boyutlu mekanik bileşenleri ve bunlarla karşılık gelen bloklarla gösterimi	59
Şekil 4.11.	SimMechanics 'teki X-Y Düzleminde robotun dairesel hareketi.....	59
Şekil 4.12.	Sphere to Plane Force bloğu	61
Şekil 4.13.	Sphere to Plane Force Bloğu gösterimi	61
Şekil 4.14.	Sphere to Plane Force Fonksiyonun İç Yapısı.....	62
Şekil 4.15.	Forces Bloğunun Fonksiyonun İç Yapısı.....	63
Şekil 4.16.	Küresel robotun temas yüzeyi ile arasında uygulanan FSph kuvvetinin zamana bağlı grafiksel gösterimi	65

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Mobil robotlar endüstriden evlere kadar hayatımızın her alanında bulunmaktadır [1]. Küresel robot, küresel geometriye sahip kabuğun içine kontrol ve tahrik mekanizmasının yerleştirilmesi ile meydana gelen bilye şeklinde mobil robot türüdür [2]. Bunun yanında küresel robot terimi, zemin üzerinde küresel kabuğun yuvarlanarak hareket etmesinden dolayı top şeklinde olan mobil bir robot olarak tanımlanır [3]. Şeklinden dolayı küresel robotların içerisindeki tüm ekipmanlar çarpışma, toz, nem, yağmur gibi dış çevresel etkenlerden korunmaktadır [4]. Aynı zamanda küresel şekli daha iyi hareket etmesini sağlar [5]. Küresel robotun iç ekipmanları mobil robotlara göre daha karmaşıktır. Bu durum diğer mobil robotlara göre kontrolün daha karmaşık olmasına neden olur [1].

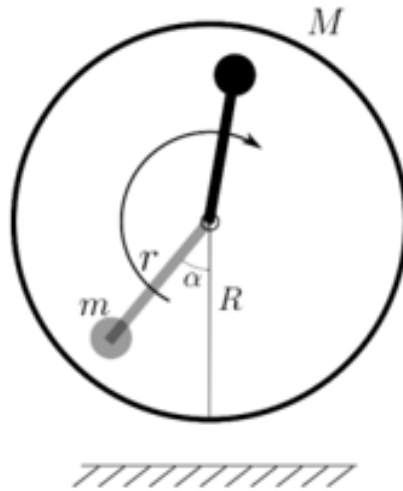
Küresel robotlar diğer mobil robotlara göre son yıllarda daha ilgi çekici bir robot türü olmuştur. Askeri ve güvenlik gibi uygulamalarda kullanılan mobil robotlarda hareketi sağlamak için tekerlek veya bacak mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu durum mobil robotlar için dezavantaj oluşturmaktadır. Tekerlekli robotlar dengesini kaybederek devrilebilir ve bacaklı robotlar engebeli arazilerde düşerek etkisiz hale gelebilir [6]. Mobil robotlar baş aşağı düştükleri zaman işe yaramaz hale gelirken küresel robotlarda bu durum böyle değildir [7]. Küresel robotlarda düşme, devrilme gibi durumlarda hareket kabiliyetlerini kaybetme durumu yoktur ve küresel robotların diğer mobil robotlara göre en avantajlı özelliklerinden biridir [8]. Daha yüksek kararlılığa sahip olması, engellerle çarpışma, devrilme gibi durumlarda kararlı hale geliş süresinin çok kısa olması, yolu en az çaba ile takip edebilme kabiliyeti gibi başka avantajları da bulunmaktadır. Bu özellikler küresel mobil robotun geometrik yapısından kaynaklanmaktadır [9]. Son olarak küresel robotun manevra kabiliyetinin iyi olmasından dolayı ve diğer mobil robotlara göre daha küçük boyutlarda olmasından dolayı küresel çapı robotun çapından biraz büyük olan

yerlerden kolaylıkla geçebilir. Bu, küresel robotların deprem gibi doğal afetlerde bilinmeyen yerlerde navigasyon amaçlı kullanılmasına imkân sağlar [10].

Küresel robotlar birkaç çekici özelliğe sahiptirler. Bunların başında küresel kabuklarının iç mekanizmalarını toz ve kirletici etkenlerden koruması gelir[11]. İkincisi ise küresel robotların küresel yapısı sayesinde zeminle tek bir temas noktası olduğundan sürtünmeyi en aza indirmesidir. Bu da tekerlekli ve bacaklı mobil robotlarla kıyasla daha fazla enerji verimliliği sağlar. Üçüncü olarak küresel geometri alt veya üst gibi kavramlara sahip olmadığı için ters çevrilemez. Dördüncüsünde ise küresel geometriye sahip olan robotlar küresel geometrileri sayesinde çok yönlü simetrikler bu da her yöne hareket kabiliyeti sağlar. Beşinci olarak küresel robotların herhangi bir kenarı olmadığı için engellerden etkilenmezler [13] . Son olarak bir kürenin yüzeyinden kaynaklı zemin basınç değeri düşüktür. Böylece küresel robotun kum, kar, çim ve bitki örtüsü gibi yumuşak ortamlarda daha rahat hareket etmesini sağlar [14]. Küresel robotların mobil robotlara göre daha küçük olması nedeniyle daha az parça ile daha ucuza yapılabilir veya tek kullanımlık olabilirler [7]. Bu avantajlara ek olarak küresel robotlar iyi dinamik bir kararlılıkla hareket edebilir. Amfibi ortamlara uyum sağlar [15]. Bunun yanında küresel robot küresel tasarımı nedeniyle bazı iç güvenlik, savunma, askeri ve kolluk uygulamalarında kullanılabilme avantajına sahiptir. Uygun sensörler yardımıyla silah algılama, keşif, gözetleme gibi riskli işler için kullanılabilirler [14].

Robot tasarımlarında doğru orantıların sağlanması önemlidir. Robotun düşüşten sonra kendi kendini kaldırması en temel görevleri arasında yer alır. Bir insan operatörün müdahale etmesinin imkânsız olduğu koşullarda robotun düşüşü robotu işlev dışı hale getirebilir. Bu tür kazalar engebeli arazilerde ve uygun olmayan zemin koşullarında robotların çalışma performansını azaltıcı bir etkidir [16]. Düz arazilerde ve eğimli arazilerde küresel yapı yüksek hızlı yuvarlanma için etkilidir. Bacakların geometrik olarak yerleştirilmesinden kaynaklanan simetrik yapı, aynı zamanda pozisyon kontrolü ve yeniden düzelme mekanizması ihtiyacını da ortadan kaldırır [17]. Küresel robotlar tüm vücut yüzeylerini yuvarlanma yüzeyi olarak kullanabilme kabiliyetine sahiptirler. Geleneksel bir küresel robotun tahrik mekanizması kabuğun içinde yer alır ve dış kabuğun yuvarlanması için tahrik mekanizmasının dış kabuğa güç aktarmasını sağlar. Dişli gibi sabit mekanik bir mekanizma olmaksızın küresel robota istediği yönde hareket edebilen bir tahrik mekanizması sağlanmış olur. Mobil robotlarda iç mekanizmanın

kabuktan bağımsız olarak hareket etmesi gerekir ancak küresel robotlarda kabuk ile tahrik mekanizmasının bir şekilde birleşmesi gerekmektedir. Bu da küresel robotlar için tasarım zorluğuna sebep olmaktadır. Tasarımdaki bu zorluğu çözenin birçok yolu vardır, ancak her bir yöntemin kendi içinde farklı zorlukları bulunmaktadır. Bu sistemlerin bazıları basit, bazıları da zor algoritmalara ve karmaşık tasarımlara sahiptir. Tasarımların en güncel olanı, ağırlık merkezini değiştirerek kürenin yuvarlanması sağlayacak ilkelerden oluşmaktadır[18]. Bu yuvarlanmada tahrik yöntemleri şu şekildedir, ilki küresel bir kabuğun içine yerleştirilmiş başka bir tekerlekli robottan oluşur. Kabuk iç cihaz tekerleklerinin kabuk üzerine yaptığı tahrik ile yuvarlanır. Kabuk ve iç tekerin arasında sürtünme, robotu tahrik yönünde hareket ettirir. İkinci olarak küresel kabuğun içine yerleştirilmiş bir veya daha fazla sarkaç hareketleri ile küresel robotu hareketlendirir. Sarkaç hareketleri ile kürenin kütle merkezi küre düşey merkezinden ayrılır. Küre düşey merkezinden kayan kütle merkezi tekrar dengeye gelebilmek için küre üzerinde yuvarlanma hareketine neden olur [13,17,19].



Şeki 1.1. Küresel robotlarda sarkaç mekanizması.

Küresel robotların dezavantajı bulunmaktadır. Bunların başında denge sorunu, yalpalama ve savrulma durumları gelmektedir ve bu durumlar küresel robotların geometrik şekillerinden kaynaklanmaktadır. Problemi çözmek için küresel robotların jiroskopik dengeleyiciler kullanması bile yeterli olmamıştır [4]. Bu tip robotların küresel şeklinden dolayı hareket etmesi kolay olsa da kontrolleri zor bir problem haline gelebilir. Çünkü hareket halindeyken hem kayabilir hem de yuvarlanabilir [12]. Aynı zamanda yuvarlanma hareketi nedeniyle küresel robotun hareketlerinin holonomik olmayan kısıtlar

sınırlanmasına sebep olmaktadır [20]. Küresel robotlar küçük torklar ile çalışabilir. Bunun nedeni küresel robotların kabuklarına belli torku aktarabilmeleridir. Küresel robotlar engebeli ve dik arazilerde hareket etmelerinde güçlük çekmektedir [2]. Dik yokuşlara tırmanmak küresel robotlarda dezavantaj oluşturur [7]. Engebeli arazilerde robot hareketleri için bacaklara ihtiyaç duyulur. Bu tür ortamlarda çalışmak için robotlar dışarıdan yardıma ihtiyaç duyar. Böyle durumlarda robotların görevlerini yerine getirmesi için sağlam ve dayanıklı bir tasarıma sahip olması gerekir [21]. Yukarı doğru olan yokuşlarda hareket problemini çözmek için robotun alt kısmına bir destekleyici yerleştirilebilir. Destekleyici zeminle temas ederek gövdenin hızlı bir şekilde itilmesini sağlayabilir. Bunun için kabukta bir açıklık olabilir. Bir başka fikir de kürenin altından hızla açılabilen ve robotu yukarı fırlatabilen bir itici olabilir. Başka bir seçenek ise iç kütleinin momentumunu kullanarak robotun hızla yukarı doğru hareketini sağlamaktır [7].

Küresel robotlarda kabuğunun boyutundan dolayı çevresel sensörlerin kullanımının da kısıtlamalar vardır. Küresel robotların kabuk ve tahrik mekanizmasının birleştirilmesinde yaşanan zorluk nedeniyle tasarımlar karmaşık olabilir [2].

Küresel robotlar balıkçılık, endüstri, deprem, sel gibi doğal afetler, saldırı ve savunma sanayi, gezegen keşfi, su altı araştırması, okyanus içi görevler vb. alanlarda kullanılmaktadır [22–24]. Hareket verimliliği ve az enerji harcaması nedeniyle endüstride de küresel robotlar kullanılmaktadır [25]. Başka Gezegenlerin keşiflerinde için tarih boyunca kullanılan mobil robot türü genellikle tekerlekli robotlar olmuştur. Tekerlekli robotun tercihinin sebebi, daha kararlı ve güvenilir olmasıdır. Ayrıca düz arazide hareket eden mobil robotlarda tekerlek kullanımı avantajlar sunar [17]. Küresel robotlarda mobil robotlarda olduğu gibi gezegen keşif araştırmalarında kullanılmaktadır [3]. Öte yandan tekerlekli mobil robotların engebeli ve kullanışsız alanlarda manevra kabiliyeti bakımından ciddi dezavantajları vardır. Kraterler gibi engebeli zeminlerde sürüş süresiz hale gelir. Bu durumlarda robotun zeminle etkileşime girme yeteneği yüksek olmalıdır. Küresel robotlar yuvarlak şekli sebebiyle hareketi daha verimli hale getirir [17].

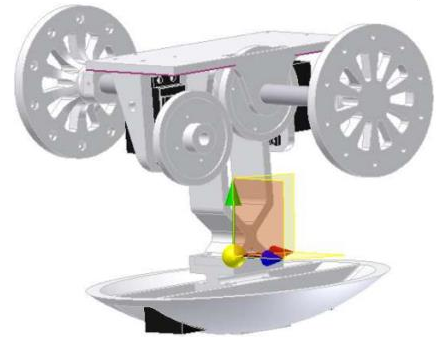
Literatürde küresel robotların çocuk gelişiminden, su altı araştırmalarına ve tarım uygulamalarına kadar çeşitli kullanım alanları görülmektedir [5]. Örneğin Şekil 1.2'deki Roball adlı küresel robotun hareket kontrolünde mesajları, sesleri ve ışıklı kısmı algılayan sensörler kullanılmıştır. Bu sayede küçük çocukların dil, duyu, motor ve sosyal

becerilerinin gelişmesine katkıda bulunmaktadır [26]. Diğer bir örnek ise Şekil 1.3'deki Rosphere adlı bir robottur. Tarımda kullanılan bir küresel robot olma özelliği ile nem ölçümlerinin yapılmasını sağlamaktadır [27]. GroundBot isimli robot uzaktan kumanda yardımıyla ara yüzeyinde ki donanım sayesinde küresel robotun güvenlik amaçlı kullanım uygulamalarına örnektir [28].

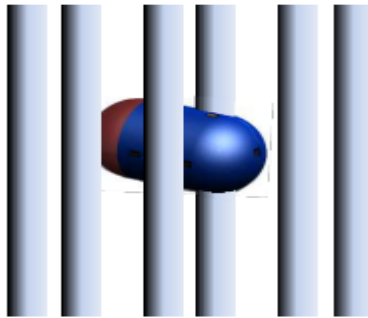
Küresel robotların başka bir örneğinde ise küresel amfibi bir robot ekolojik gözlemlemeyi amaçlamıştır. Amfibi robota yakın gözlem yapabilmek için hedef tespit ve takip sistemleri algoritmaları tasarlanmıştır [29]. Bur robot endüstriyel gözetleme robotudur ve ilaveten kamera ve bazı sensörler eklenerek daha da geliştirilebilir [1] . Küresel robotlar geçmişten Mars keşfinde kullanılmaktadır [30]. İlginç bir örnek ise nükleer reaktör soğutma sistemlerinde bulunan kaçakları bulmak için yapılan Şekil 1.4'deki su altı küresel robottur [8]. Bu robot su altı hassas denetim yapabilmek için yüksek manevra yeteneğine sahiptir [31]. Bu araçlar geleneksel makinelerinin kullanılmadığı durumlara faydalı olmaktadır [32].



Şekil 1.2. Roball küresel robot [26] .

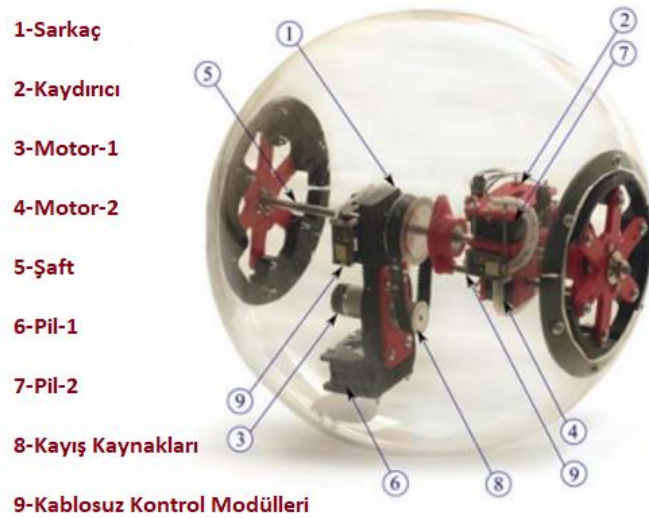


Şekil 1.3. Rosphere küresel robot [27].



Şekil 1.4. Su altı küresel robot [31].

Küresel robotların şeklinden dolayı hareket etmesi kolay olsa da kontrol edilmesinde bazı sorunlar bulunmaktadır. Bu çalışmada robot şaftının sabit olması ve içeride kayma olmaması sebebiyle Şekil 1.5'deki gibi bir küresel robotunu seçilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılması planlanan robot, sistemi hareket ettiren iki mekanizmadan oluşmaktadır. Bu mekanizmalar sabit bir şaft üzerine yerleştirilmiş olup doğrusal ve döner olmak üzere iki tahlirliidir. Döner mekanizma mile bağlı bir sarkaç ile tork uygulayarak küresel robotun ileri-geri yuvarlanma hareketi için tork oluşturur. Doğrusal mekanizma ise robotun ağırlık merkezini enine kaydırarak robotun sağa-sola yuvarlanmasına yani dönme hareketin gerçekleşmesine neden olur [33]. Küresel robotun Şekil 1.5 gösterildiği gibi küresel bir kabuk içerisine yerleştirilmiş sabit bir mil ve mil üzerinde bulunan kaydırıcı ve döner sarkaç mekanizmadan oluşmaktadır. Kaydırıcı ve döner sarkaç mekanizmaları küresel robotun enine ve boyuna hareket etmesini sağlar.[4]



Şekil 1.5. Şaftı sabit olan bir kaydırıcı ve bir sarkaçtan oluşan küresel robot.

Bu tasarımın avantajı matematiksel modelindedir [33]. Böyle bir küresel robotun, tasarımında X ekseninde ve Y ekseninde karmaşık dinamik hesaplamaların ayrı ayrı yapılması matematiksel hesaplamalardaki doğruluğu arttırmıştır. Bu nedenle, bu tasarımda yörünge takibi daha doğru bir şekilde yapılmaktadır. Bu yapının dinamiklerini elde etmek için Lagrange-Euler tekniği kullanılmıştır.

Küresel robotların hareketini ve nasıl davranacağını tanımlayabilmek için kinematik ve dinamik denklemlerinin belirlenmesi gerekmektedir [2]. Newton-Euler denklemleri bir

robotun doğrusal ve açısal hareketlerinde yararlanarak zaman bağılı dinamik denklemler elde eder. Lagrange-Euler yönteminde ise robotun dinamik denklemleri bulunurken zamandan bağımsız olarak sistemdeki toplam kinetik enerjiden toplamla potansiyel enerjinin farkı alınarak dinamik denklemler elde edilir [34]. Newton-Euler ile Lagrange-Euler yapılan iş aslında aynıdır. Ancak Lagrange-Euler’ de koordinat sistemi değişse de zamana bağılı olarak değişmemektedir [35]. Newton-Euler yönteminde kuvvet ve moment açısından dinamik denklemler oluşturulurken Lagrange-Euler yönteminde ise genelleştirilmiş koordinatlar kullanılarak toplam iş ve enerji açısından dinamik denklemler oluşturulur. Newton-Euler de matematiksel modeli oluşturmak daha basittir ancak Lagrange-Euler de yoğun matematiksel işlemler olmasına karşın elde edilen terimlerde vektörel çarpım terimleri ile matris işlemleri yapılmasından dolayı bugün kullanılan bilgisayarlarda ileri ve ters dinamik denklemlerini elde etmek daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu sebeplerden Lagrange-Euler daha çok tercih edilmektedir [36]. Bu çalışmada robotun dinamik büyüklükleri olan ivme, hız vb. durumların, belirli bir zaman sonrasında zamana bağımlı olarak büyük değişimler gösterdiği bilindiği için, zamandan bağımsız analiz yapmaya imkan sağlayan Lagrange-Euler yönteminin kullanımı tercih edilmiştir

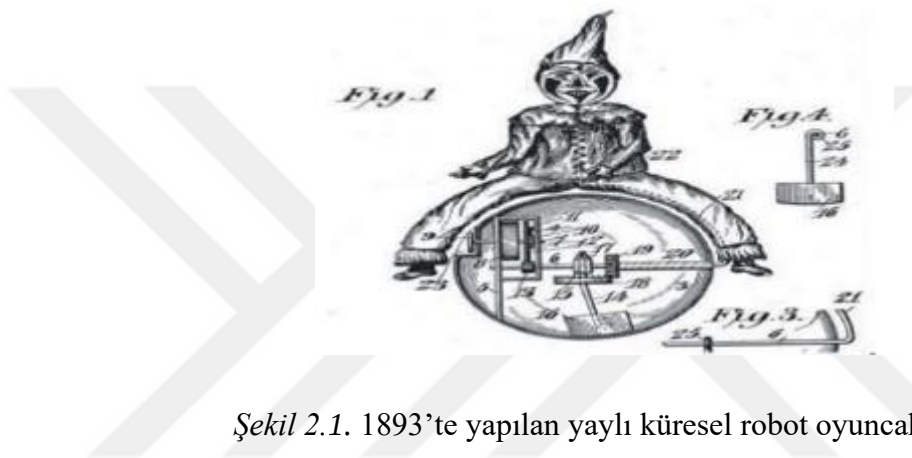
2. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırma sürecinde, incelenen çalışmalar da, küresel mobil robotların diğer mobil robotlara göre yeni bir tür mobil robot olduğu ve bu robotların avantajlarının küresel şekillerinden kaynaklandığı sonucuna sık sık değinilmiştir [9]. Bu robotların küresel şekli, tekerlek, palet veya bacak gibi diğer yüzey tabanlı hareket biçimlerine göre daha avantajlıdır. Mobil robotlarda kullanılan tekerlekler, paletler veya bacaklar hasar görebilir ve robotun hareket kabiliyetini sınırlayabilir. Küresel robotlarda ise dış kabuk, dış ortam ile içerdeki ekipmanlar arasında koruyucu bir bariyer görevi görebilir. Aynı zamanda iç mekanizmayı darbelere karşı korur ve tehlikeli kimyasallara ve çevresel koşullara karşı engel oluşturabilir [3]. İkincisi küresel robotların yuvarlanması esnasında zemin ile tek bir temas noktası vardır. Bu durumdan dolayı sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Bu durum küresel robotlarda için enerji tasarrufu sağlar. Üçüncüsü ise küresel robotlar boyutlarının küçük olması nedeniyle dar alanlarda kolayca hareket edebilirler ve boyutundan biraz büyük yerlere kolayca girip çıkabilirler. Dördüncüsü ise bazı küresel robotlar kabukları sayesinde sıvı ve gaz ortamlarda dahi çalışabilir [8]. Beşincisi ise küresel yapılarından dolayı her yöne hareket edebilirler. Son olarak da çarpışma durumlarında veya yüksekte düşüklerinde hızlı şekilde toparlanarak hareketine devam edebilirler [37]. Tüm bunlarla birlikte, mobil robotların küresel robotlardan daha üstün olduğu yönler de vardır. Engelleri geçmek, yokuş çıkmak, denge ve sürüş kontrolü sağlaması bakımından tekerlekli ve bacaklı robotların manevra kabiliyeti çok daha iyidir [6]. Bu sebeple, son yıllarda yapılan araştırmalarda küresel robotların bahsedilen bu kabiliyetlerini arttırmak için hareket biçimlerini geliştirme çalışmaları yapılmaktadır [17]. Literatür taramasında yapılan araştırmalara göre mobil robot sürüş mekanizması ve kontrolü hakkında daha çok araştırmaların yapıldığı fark edilmiştir [9].

2.1. Küresel Robotlar

Küresel robotlar her yöne hareket edebilen bir mobil robot türüdür. Mobil robot, kendini hareket ettirebilen, genellikle tekerlekler veya paletler gibi hareketli sistemlerle donatılmış otonom veya yarı otonom bir robottur. Küresel robotlar 100 yılı aşkın bir süredir mevcut durumdadır. En eski küresel robotlar 1800 yılların sonunda geliştirilen yaylı oyuncaklardır [33]. Şekil 2.1’de verilen 1893’te tasarlanan bu oyuncak ABD patentlidir [8].



Şekil 2.1. 1893’te yapılan yaylı küresel robot oyuncak [8].

Günümüzde mevcut olan küresel robotlar ise sensörler, eyleyiciler ve bilgisayar tabanlı kontrolörler içerir [33]. Küresel robotları hareket şekillerine göre sınıflandırılırsa;

- ağırlık merkezini değiştirerek hareket
- kabuk deformasyonu ile hareket
- açisal momentumunun korunumu ile hareketi ile olmak üzere 3 temel başlık ele alınabilirler.

2.1.1. Ağırlık Merkezini Değiştirerek Hareket

Ağırlık merkezini değiştirmek terimini tanımlamak için literatürde Barycentric offset (BCO) ifadesi kullanılmaktadır. Denge halinde olan bir robotik kürede iç mekanizma hareket ettikçe küresel robotun ağırlık merkezi değişecektir bu durumda robot top gibi yuvarlanmaya başlayacak ve ağırlık merkezi tekrar dengeye gelmeye çalışacaktır [18]. Bu yöntemin sınırlamaları ağırlık merkezi kabuğun dışına çıkamayacağı için robotun belli bir tork seviyesi ile sınırlanmış olmasıdır [18].

2.1.1.1. Hamster Topu

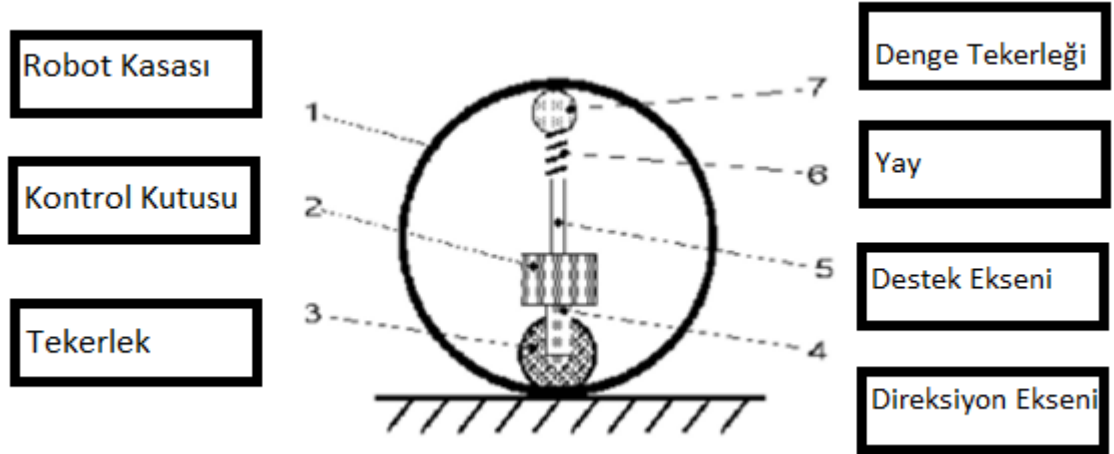
BCO terimi için çok kullanılan bir tasarım olmasından dolayı hamster topu da denmektedir. Bunun nedeni, topun içindeki bir hamster gibi hareket etmesinden dolayıdır. Küresel robotun içinde bulunan tekerlekli mekanizma uzaktan kontrol edilip hareket ettirilerek robotun ağırlık merkezinin değişmesini ve yuvarlanmasını sağlar. Bunun için tek tekerlekli, iki tekerlekli ve dört tekerlekli mekanizmalar kullanılabilir. Bu robotun dezavantajı robot ve mekanizma hareket halindeyken iki hareket arasında bir miktar kayma olmasıdır. Diğer bir dezavantajı da sürtünmeye bağlı olarak enerji kaybının olmasıdır [18].



Şekil 2.2. Hamster topun örnek tasarımı [48].

2.1.1.2 Tekerlek Tabanlı

Şekil 2.3' de görüldüğü gibi bu tasarımda küresel robotun iç kısmının tepe noktasına bir yay takılır ve yayın diğer ucuna yük ve tekerlek bağlanır. Bu tasarımdaki amaç tekerlek ile kabuğun sürekli temas halinde olmasını engellemektir. Bu sayede iç kabuk yüzeyi boyunca daha az sürtünme ile hareket sağlanır. Tasarım maliyet olarak düşük maliyetli olsa da, bu yapının yüksek torklarda kontrol edilmesinde zorluk yaşanmaktadır. Aynı zamanda tekerlek ile kabuk arasında istenmeyen kaymalar oluşabilir [18]. Tekerleğin üst kısmında güç ve iletimi sağlamak için İç Tahrik Ünitesi (Internal Drive Unite) bulunmaktadır. Tekerlek ve IDU tek bir eksen üzerine yerleştirilmiştir [7].



Şekil 2.3. Tekerlek tabanlı robot [18].

2.1.1.3. Universal Tekerlek

Bu tasarıma sahip robotlar hamster tekerleği ve IDU tasarımındaki robotların bir benzeridir. Bu robotların en güzel örneği Boltzman-Hamel denklemlerinden oluşan BHQ serisi robotlarıdır. Bu robotlar iki dc tahrik motoru tarafından kontrol edilir. İlk motor iç mekanizmanın yönünü kontrol ederken, diğer motor tekerleğin hızını kontrol eder. Bu robotlar için Şekil 2.4'deki HIT küresel robot örnek verilebilir [18]. HIT küresel robotunda robotun tüm mekanizmaları her yöne dönebilir ve robot ağırlık merkezinin değiştirilmesi prensibi ile hareket eder [49].



Şekil 2.4. HIT robot tasarımı [49].

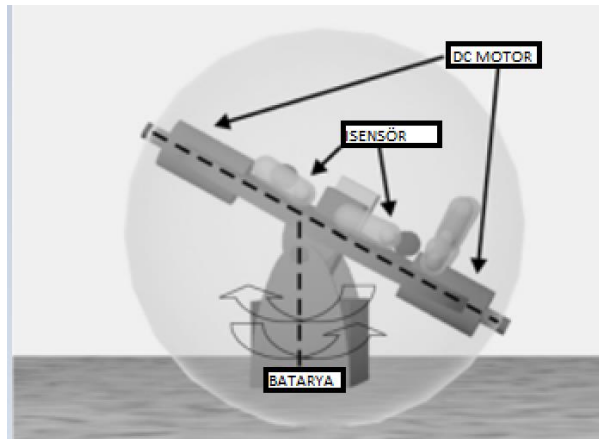
Şekil 2.5’deki küresel Otonom Robot (SAR) robotunda 3 holonomik tekerlek bulunur. Holonomik tekerleklerin üçgen şeklinde yer alması robotun çok yönlü hareketine imkân sağlar [3].



Şekil 2.5. SAR Robotu [3]

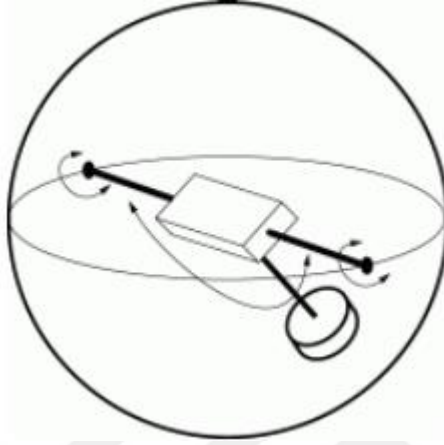
2.1.1.4. Sarkaç Tabanlı

Bu robotun tasarımı, enine ekseninde sabit bir şekilde bulunan şaftın etrafında dönen sarkaç ve bobinden oluşmaktadır. Sarkacın hareketi ile ağırlık merkezi değişir ve robot yuvarlanmaya başlar [18]. Bu robot modeline örnek olarak Şekil 2.6’daki Roball robotu verilebilir. Robotun şaft ekseninde ağırlık olarak pil kullanılmıştır. Bu ağırlık robotun alt kısmındadır ve küresel robot bu ağırlığa bağlı hareket etmektedir [50].



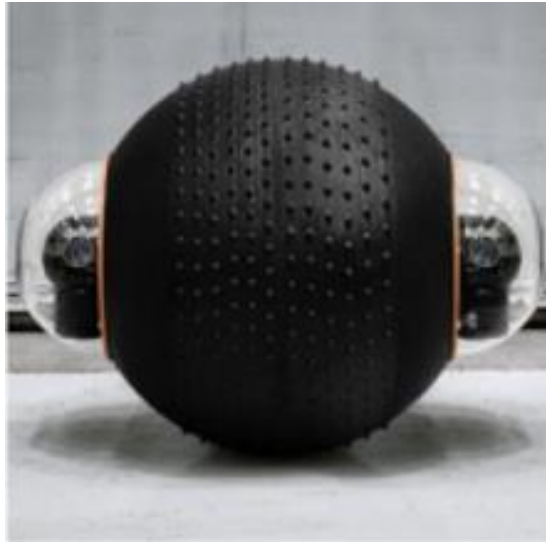
Şekil 2.6. Roball robotu [50].

Şekil 2.7’deki Rotundus adlı robot kürenin yatay eksenine bağlı bulunan bir motor ve motora bağlı bulunan ağırlık merkezinden geçen sarkaçtan oluşmaktadır. Sarkacın öne arkaya tam tur atacak şekilde sallanması ile robot yuvarlanmaktadır [7].



Şekil 2.7. Rotundus sarkaç robot. [7]

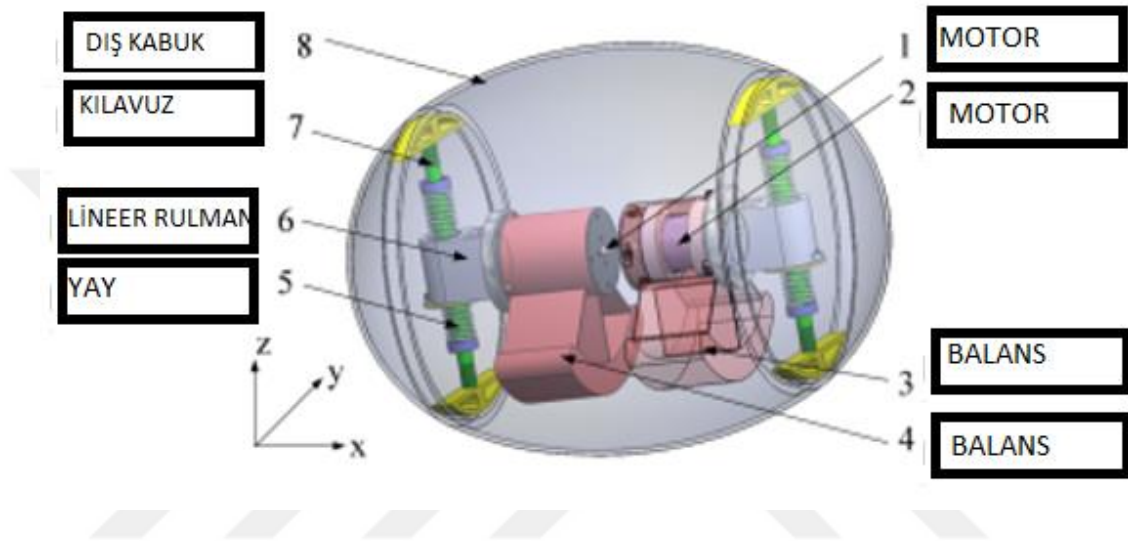
Rotundus sarkaç robotunun hareket ilkesinin en güzel örneklerinden biri Şekil 2.8’deki Grounbot robotudur. Groundbot isimli robotta bulunan sarkaç mekanizması iki eksenlidir ve sarkaç iki dikey motora bağlıdır [51].



Şekil 2.8. Groundbot robot [51]

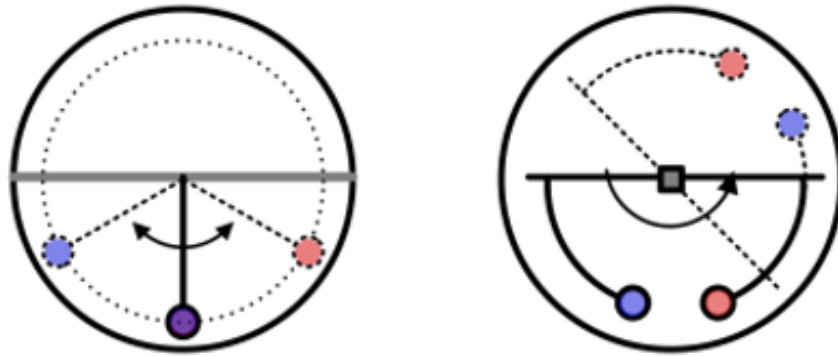
2.1.1.5. Çift Sarkaç Tabanlı

Çift sarkaç tabanlı küresel robot için Şekil 2.9'daki B.Zhao tarafından gerçekleştirilen robot örnek verilebilir. Bu küresel robot elipstik bir şekle ve çift sarkaca sahiptir. Bu robot tipi “Çubuk-Kaydır” prensibi ile dönme hareketini gerçekleştirmektedir [18]. Bir çubuk ile birbirine bağlanan sarkaçlar zıt yönde dönerler. Robot zeminle statik sürtünme kuvvetinden daha büyük bir kuvvet elde edince kaymaya ve dönmeye başlar [52]



Şekil 2.9. Zhao tarafından tasarlanan çift sarkaçlı robotun mekanik yapısı [52].

Bu küresel robot için başka bir örnek olarak Şekil 2.10'daki Kisbot II verilebilir. Kisbot I de tek sarkaç tasarımı ve merdiven çıkmasını sağlayan ayakları vardır. Kisbot II de sarkaçlar hareket esnasında dönecekleri eksene dik bir eksenle dönerek hareket etmektedir [53].

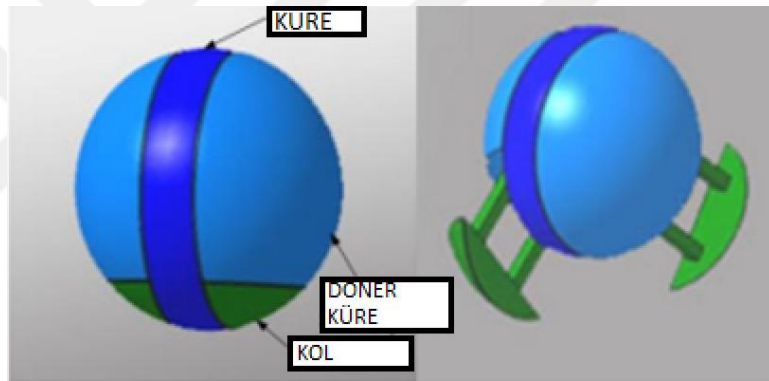


Şekil 2.10. Kisbot II için sarkaçların dönme eksenleri [53].

2.1.1.6. Ağırlık Merkezinin Değiştirilerek Hareket Eden Farklı Küresel Robot Tasarımları

Küresel robotlarda farklı tasarımlar yapılarak veya kullanım amacına göre yeni eklemeler yapılarak hareketlerindeki dezavantajlar giderilmeye çalışılmaktadır. Küresel robota sensörler, kameralar, bacaklar eklenerek yeni tasarımlar gerçekleştirilmektedir.

Bu duruma ilk verilecek örnek Şekil 2.11'deki Kisbot I küresel robottur. Kisbot I robotunda hareket hem sarkaçlar ile hem de bacaklar ile sağlanmaktadır. Sarkaç modunda iken robot diğer sarkaçlı robotlar gibi çalışmakta ve yuvarlanmaktadır. Bacaklı modunda ise küresel robottan çıkan iki uzatılabilir kol ile farklı arazi tiplerinde hareket verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır [11].



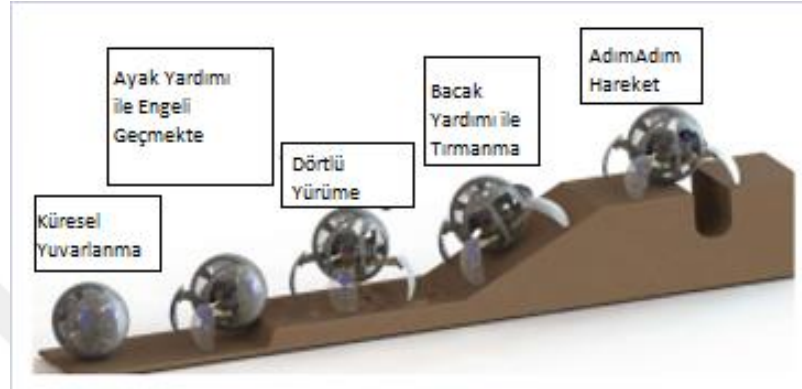
Şekil 2.11. Kisbot I tasarımı [11] .

Şekil 2.19'daki August isimli robotta kütle merkezinde bulunan dört eksene monte edilmiş step motorlar bulunmaktadır. Step motorlar üzerindeki ağırlık bir vida yardımıyla kütle merkezine iletir. Motorların yer değiştirilmesi ile ağırlık merkezi değişmekte ve robot hareket etmektedir [54].



Şekil 2.12. August robot tasarımı [54].

Başka bir robot örneğinde Şekil 2.13’de görülmektedir. Bu robot yuvarlanma hareketi için dâhili bir tahrik mekanizmasına aynı zamanda yürüme hareketini gerçekleştirebilmek içinde dörtlü ayağa sahiptir. Bu robot bacaklarını hareket ettirerek ağırlık merkezini değiştirir ve istediği yöne hareket edebilir [55].



Şekil 2.13. Dört bacaklı küresel robot [55].

Otonom Robotik Akıllı Gezgin Küresi (ARIES) olarak adlandırılan Şekil 2.14’deki robot tasarımı, iki serbestlik dereceli, ağırlık merkezinde bulunan sarkaç ile tahrik edilmektedir [5].



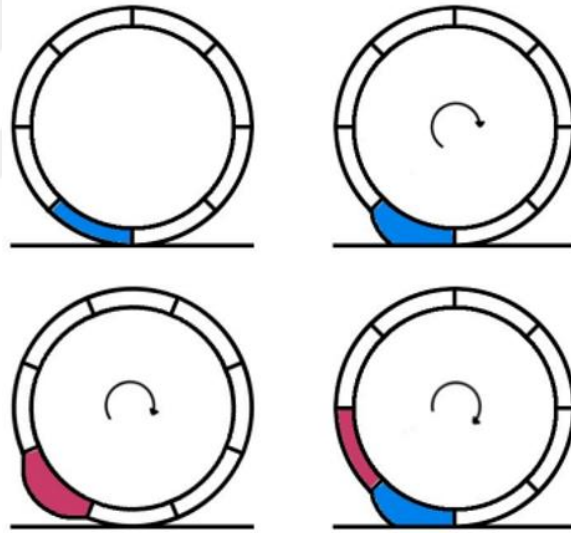
Şekil 2.14. ARIES robot tasarımı [5].

2.1.2. Kabuk Deformasyonu İle Hareket

Kabuk deformasyonu yapılarak küresel robotu hareket ettirmek yeni kullanılan bir yöntemdir. Robot hareketinde diğer küresel robotlarda bulunan karmaşık mekanizmalar yerine kabuğu deforme ederek hareket etme amaçlamaktadır.

2.1.2.1. Şişebilen Kauçuk Balonlar

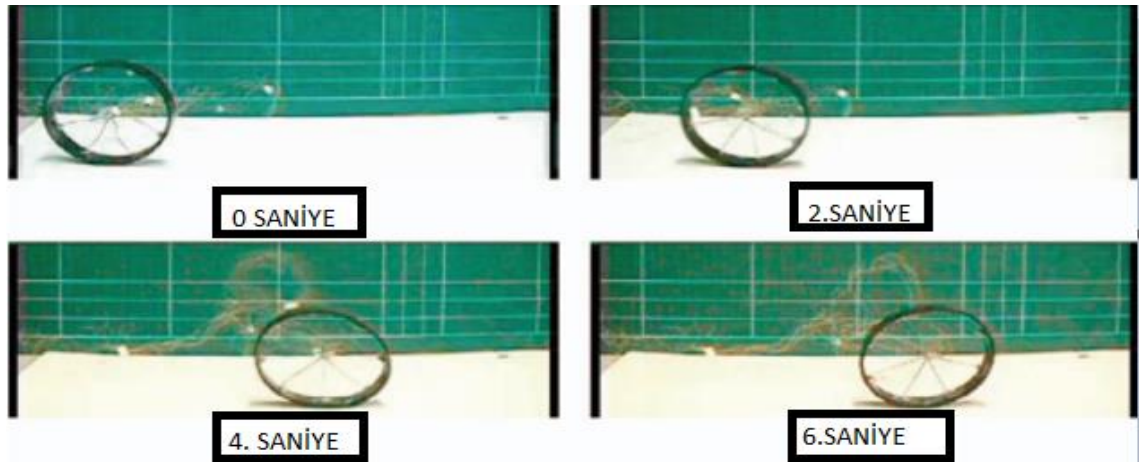
Bu robot örneğinde küreyi saran ve ayrı ayrı şişirilebilen kauçuk balonlar vardır. Bu balonlardan bir ya da daha fazlasının şişirilmesi ile küre hareket etmektedir. Balonlar koordineli bir şekilde şişirilirse kürenin hareketine yön verilmektedir [19]. Aşağıdaki şekilde gösterildi üzere küre yuvarlanacağı zaman yere temas eden noktada şişmeye başlar ardından o noktanın yerle teması bittikten sonra söner ve diğer bölüm şişer.



Şekil 2.15. Şişebilen kauçuk balon tasarımı [19].

2.1.2.2. Şekil Değiştirebilen SMA Tekerlekleri

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi esnek yapıları ve şekil hafızalı alaşım (SMA) sürücülerinin sayesinde hem bir tekerlek hem de bir küresel robot olarak değerlendirilmektedir [56]. SMA telleri harekete bağlı olarak daralıp genişlemesi ile tekerleğin deforme olmasına ve yuvarlanmasına neden olmaktadır [3].



Şekil 2.16. Deforme olabilen SMA tekerleklerinin anlık görüntüsü [56].

2.1.2.3. IRobot

Şekil 2.17'deki IRobot hareketi esnasında sıkışıp deforme olabilen yumuşak, şişebilen silikon bir robottur. İçi boş küre üçgen kesitlerden oluşmaktadır. Bu kesitler esnek bir yapıdadır. Küre hareket edeceği zaman bir bölümüne vakumlama işlemi uygulanır ve orası sertleşir. Küre asimetrik olarak deforme edilip rijit bir yapı elde edildikten sonra rijit olmayıp esnek olan kısma basınç uygulanır. Kürede bu şekilde yuvarlanma hareketini ortaya koyar [57].



Şekil 2.17. IRobot tasarımı [57].

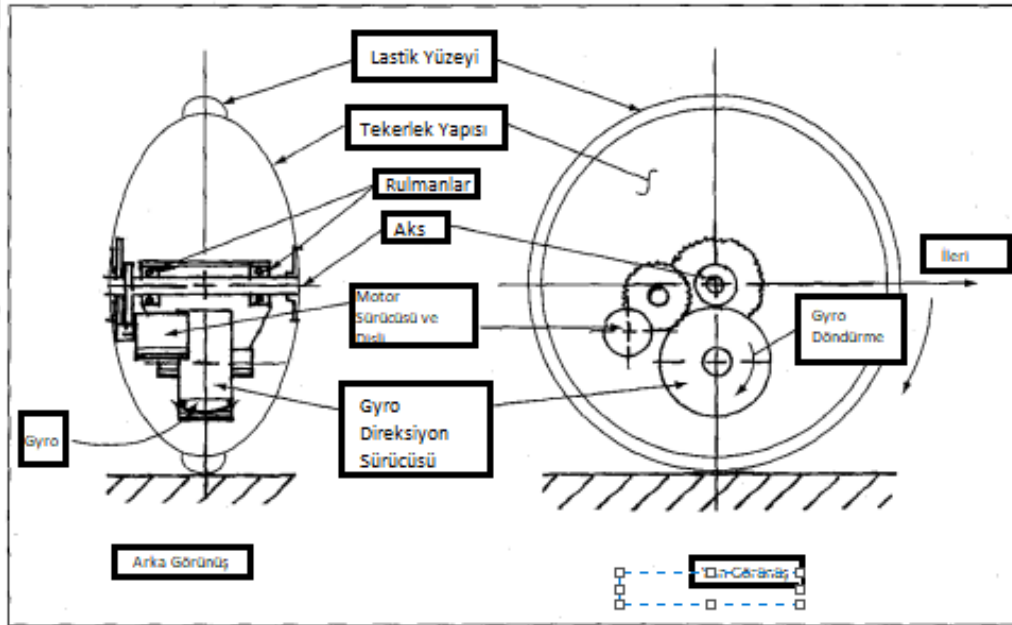
2.1.3. Açısal Momentumunun Korunumu İle Hareket

Ağırlık merkezini değiştirerek gerçekleştirilen hareketlerde; kütle kürenin dışına çıkamadığı için belli bir tork sınırı oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle küresel robotlarda kürenin daha hızlı dönmesini sağlamak için, bu robotlara jiroskoplar

eklenmeye başlanmıştır. Jiroskopların hızı artıkça çıkış torku da artmaktadır. Burada kürenin hareketini kontrol etmek için açısal momentum korunumu yasalarından faydalanmaktadır. Bu tarz küresel robotlarda çıkış torkunun kontrol edilebilmesi çok önemlidir. Eğer kontrol edilemezse robot farklı yönlere gidebilir. [18].

2.1.3.1 Tek Tekerlekli Jiroskop Robot

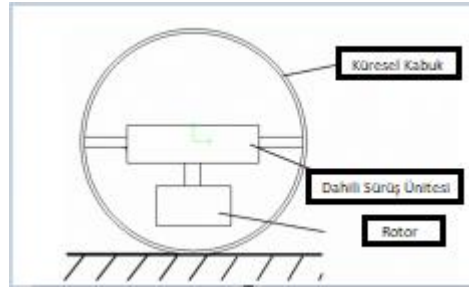
Şekil 2.18'deki bu robot tasarımında hareketini sağlamak için jiroskop kullanılmıştır. Böylece yüksek tork değerleri elde edilmektedir ve robottun torku yüksek olduğu için robotun yüksek hızlarda ve engebeli arazilerde kullanılabileceği belirtilmiştir. Öte yandan robot devrilirse tekrar dengeye gelmesi çok zordur [58].



Şekil 2.18. Tek tekerlekli jiroskop robot [58] .

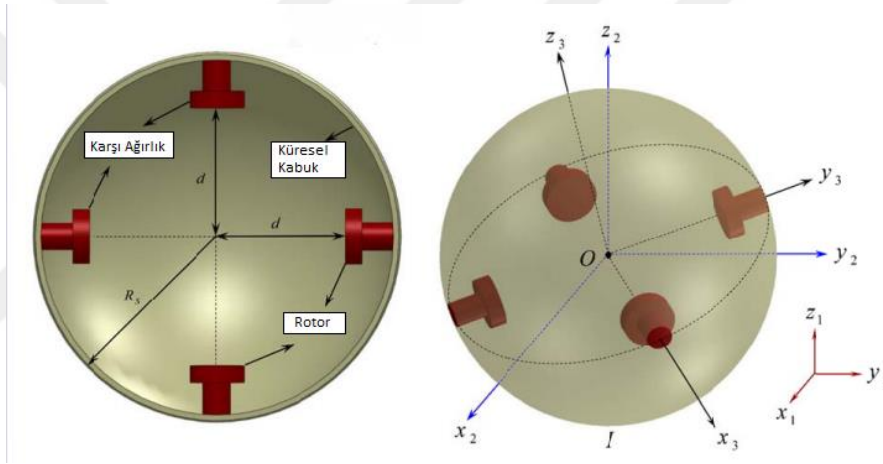
2.1.3.2. Sürüş Mekanizmasında Rotor Bulunan Robot

Şekil 2.19'deki bu tasarımda dâhili sürüş mekanizmasına sarkaç gibi bağlı bulunan bir rotor bulunur. Açısal momentumun korunumu ilkesi ile iç rotor hızlı bir şekilde döndüğünde ve sürtünme katsayısı küçük olduğunda küresel robot ters yönde dönecektir. Rotorun hızı ve yönü değiştirilerek küresel robotun hızı ve yönü değiştirilebilir. [59].



Şekil 2.19. Açıl momentum korunumu ile hareket eden robot tasarımı [59].

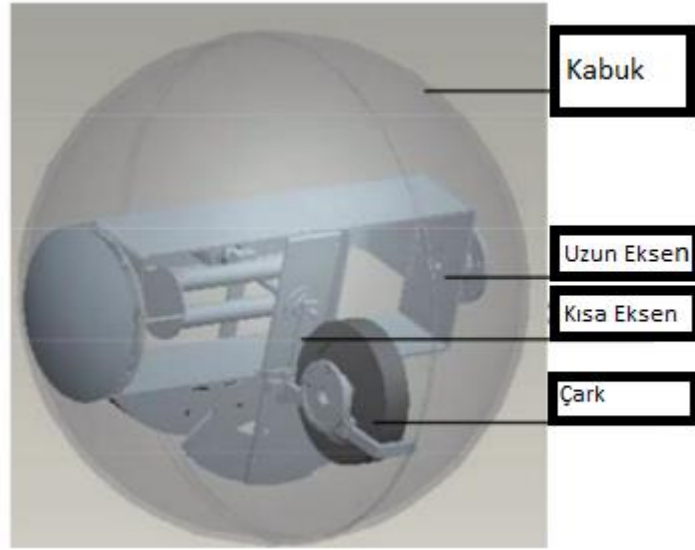
Bu robot tasarımına bir başka örnek olarak Şekil 2.20'deki iki dâhili rotor tarafından hareket ettirilen aşağıdaki tasarım örnek verilebilir. Robotun matematiksel modeli açıl momentum ilkesine dayalı olarak türetilmiştir [37].



Şekil 2.20. İki dâhili rotor bulunan tasarım robot [37].

2.1.3.3. Ağırlık Merkezinde Jiroskop Bulunan Robot

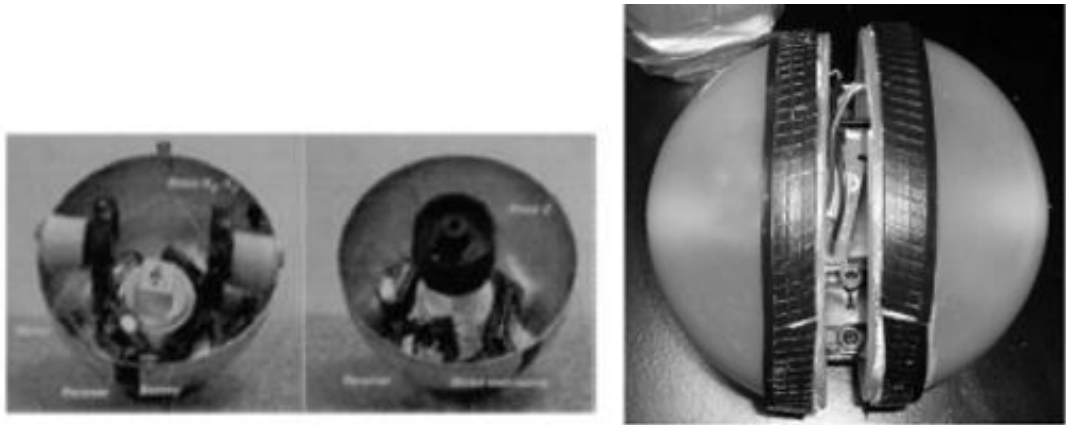
BHQ serisinin beşinci robotu olan Şekil 2.21'deki tasarımda dengeyi sağlamak için kontrol momentli jiroskoplu sarkaç kullanılmaktadır [60]. Küresel robotun ağırlık merkezine yerleştirilen jiroskop, robotun hangi yönde ve nasıl yuvarlanacağını belirlemektedir. Bu tasarım sayesinde normal sarkaçlı küresel robottan çok daha fazla tork elde edilebilmektedir [61]. Bu robot ayda yapılacak keşiflerde kullanılmak için tasarlanmıştır [15].



Şekil 2.21. BHQ-5 robotun tasarımı [61].

2.1.3.4. İki Bağımsız Yarım Küreden Oluşan Robot

Şekil 2.22’deki tasarımda her bir motor ve rotor iki yarım küreye yerleştirilmiştir. Küresel robot rotorların açısal momentumundan yararlanarak hareket etmektedir. Bu tasarımda rotorlar yüksek hızlarla döndüğü için performansı iyi olan motorlara ihtiyaç duymaktadır. Öte yandan küre çok hızlı dönerse, kullanılan için motorlar yetersiz kalabilir [7].



Şekil 2.22. İki bağımsız küreden oluşan robot [7]

2.2 Literatür Değerlendirme

Literatür araştırmasında küresel robotların 100 yılı aşkın bir süredir var olmasına rağmen son yıllarda bu alanda gelişmeler gösterdiği ve mobil robotlar kategorisinde yeni bir tür olarak değerlendirildiği görülmüştür. Küresel robotların küresel şeklinden dolayı diğer mobil robotların sahip olduğu tekerlek, palet, bacak tabanlı hareket türlerine göre hareket avantajları vardır. Her yöne hareket ediyor olmaları, çarpışmalarda zemini ve tepesi olmadığından hiçbir zaman ters dönme gibi bir durum gerçekleşmemesi bu avantajlara örnektir. Hızlı şekilde dengesini toparlanarak hareketine sabit devam edebilirler. Boyutları nedeniyle dar ve engebeli yerlerde takılmadan hareket edebilmeleri küresel robotlarda hareket avantajı sağlamaktadır. Tekerlekli ve bacaklı mobil robotların küresel robotlardan üstün olduğu yönler ise engelleri geçmek, yokuş çıkmak ve dengeli bir sürüş kontrolünün olmasıdır. Yapılan literatür araştırmasında küresel robotların hareket kabiliyetini arttırmak ve kontrollü bir sürüş gerçekleştirmek için farklı hareket türleri geliştirilmeye çalışıldığı gözlenmiştir.

Küresel robotların hareket mekanizmalarında sarkaç, tekerlek, rotor sensörler, aktüatörler ve bilgisayar tabanlı kontrollörler bulunabilir. Bu çalışmada küresel robotlar hareket şekillerine göre ayrılmıştır. Ağırlık merkezini değiştirerek hareket, kabuk deformasyonu ile hareket, açısal momentumunun korunumu ile hareket şeklinde üçe ayrılır. Yapılan literatür araştırmasında ağırlık merkezi değiştirerek hareketin diğer hareket yöntemlerine göre daha çok tercih edildiği görülmüştür. Ağırlık merkezi değiştirerek hareket diğer tasarımlara göre daha az karmaşık bir yöntemdir ve kontrol edilmesi daha kolaydır. Bu harekette robot ağırlık merkezi kabuğun dışına çıkamadığı için aktarılan tork sınırlıdır. Bu yüzden çok yüksek hızlarda hareket edemez. Ağırlık merkezini değiştirerek harekette yaygın olarak kullanılan yöntemler, tek ve çift sarkaç mekanizmaları, tekerlek tabanlı mekanizma, araba modellenmiş mekanizma ve universal tekerlek mekanizmalı modeller olmuştur. Ağırlık merkezini değiştirerek hareket yöntemindeki güç aktarım dezavantajını giderecek bir yöntem açısal momentumun korunumu ile hareket yöntemidir. Bu hareket yönteminde robota jiroskop yerleştirilir. Jiroskop tek eksen veya üç eksenli yönlendirerek tork oluşturmaktadır. [18]. Jiroskopun hızı arttıkça, çıkış torku da artmaktadır ve küresel robot daha hızlı hareket etmektedir. Bu tarz küresel robotlarda önemli olan çıkış torku kontrolüdür. Bu hareket yönteminin dezavantajı robotun kontrolün zor olmasıdır. Gelecekteki çalışmalarda hızlı ve çevik küresel robotların elde edilmesi, mevcut

tasarımların kontrollerinin iyileştirilmesi ile mümkün hale gelebilir. Kabuk deformasyonu ile hareket yöntemi oldukça yeni bir yöntemdir. Bu kategorideki robotlar için tasarım zorluğu yaşanmaktadır ancak en önemli avantajı yok denecek kadar az hesaplama yöntemi ile kontrol edilebilir olmalarıdır. [18].

En eski küresel robot yaylı bir oyuncak olarak kullanılsa da, günümüzde küresel robotlar savunma alanında gözetleme ve güvenlik amaçlı, engeli gezegenlerde içerisine kamera yerleştirilerek keşif amaçlı, doğal afet durumlarında arama ve kurtarma amaçlı, endüstriyel alanda ölçümlerin yapılması için, çocuk gelişimde hareket, ses ve ışık sensörleri yardımıyla çocukların dil, duygu ve motor becerilerinin gelişmesi amaçlı, su altı araştırmalarına ve balıkçılıkta amfibi küresel robotlar kullanılarak keşif amaçlı olmak üzere birçok alan uygulanır hale gelmişlerdir.

Bu çalışmada ağırlık merkezini değiştirerek hareket eden ve küresel robotlarda sorun olan çift kayma problemini gideren küresel bir robot seçildi. Çift kayma problemi, küresel robotların mekanizmasında ortaya çıkan bir sorundur Bu nedenle, çift kayma problemi genellikle robotun dönme eksenleri arasındaki dönme hareketlerinin hesaplamasında ortaya çıkar. Seçilen küresel robotta sabit bir şaft üzerinde bulunan kaydırıcı mekanizma ve şafta bağlı bulunan döner bir mekanizma bulunmaktadır. Gövdenin sabit bir şaft üzerinde yer alması, küresel robotun hareket ederken sarkaçta ikinci bir kayma olması problemini ortadan kaldırmıştır. Kaydırıcı mekanizma şaft üzerinde kayarak robotun ağırlık merkezini değiştirir ve robotun sağa ya da sola hareket etmesine neden olur. Döner mekanizma ise şafta tork uyularak robotun ileri ya da geri hareket etmesini sağlar. Bu küresel robotun tercih edilmesindeki bir diğer neden ise X ve Y eksenlerindeki hareketinin ayrı ayrı hesaplanmasından dolayıdır ayrıca robot hareket ederken daha iyi yörünge takibi yapılmasına imkân vermektedir. Bu yapının dinamiklerini elde etmek için de Lagrange-Euler tekniği kullanılmıştır.

Küresel robotlar, şekillerinden dolayı kolay hareket edebilirler ancak yapısı gereği yokuş çıkamaz ve engellerle başa çıkamazlar. Bu soruna çözüm arayışı kapsamında, bu tez çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında, küresel robotun yokuşları tırmanabilmesi ve engelleri aşabilmesi için hareketli bacak mekanizması geliştirilmiştir. Hareketli bacaklar, bir engelle karşılaştığında açılarak zıplama hareketi gerçekleştirerek engeli aşar. Yokuş çıkarken ise bacaklar arkadan açılarak küresel robotu ileri itmekte ve yokuşları

tırmanabilmesini sağlamaktadır. Hareketli bacak mekanizmasının tasarımı SolidWorks kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bacak mekanizması, ağırlık merkezini değiştirerek hareket eden iki tahrik mekanizmalı küresel robota entegre edilerek simülasyonu için Matlab/SimMechanics kullanılmıştır.

Simülatörün doğruluğunu test etmek için ise Matlab/Simulink ile önceden literatürde çalışması yapılan iki tahrik mekanizmalı küresel robotun Lagrange-Euler ile elde edilmiş simülatör kullanılmıştır. Matlab/Simulink ile yapılan simülatör de zemin ile robot arasında bulunan kontak ilişkisinin simülasyona dahil edilmesi zordur. Bu yüzden SimMechanics ile kontak ilişkisi ile üretilen kuvvetin doğruluğu detaylı olarak incelenmiş ve hareket dinamiğine uygun sonuçlar elde edilmiştir. Hareketli bacak mekanizmasının performansını değerlendirmek amacıyla düz zemin üzerinde ilerlerken, yokuşları tırmanırken ve engelleri aşarken farklı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, hareketli bacak mekanizmasının düz zemin üzerindeki performansı incelenmiştir. Simülasyonlar, robotun düz bir zeminde nasıl hareket ettiğini ve bu sırada bacak mekanizmasının nasıl çalıştığını göstermektedir. Bu sayede, robotun düz zeminde istikrarlı bir şekilde ilerleyebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Daha sonra, yokuş tırmanma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Robot, belirli bir eğime sahip yokuşlarda hareket etme yeteneğini test edilmiştir. Hareketli bacaklar robot yokuş çıkarken arkadan açılarak yokuşları tırmanmasını sağlamıştır. Bu sayede, robotun yokuşları başarıyla tırmanabilme kabiliyeti gözlemlenmiştir. Son olarak, engel aşma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Robotun engelle karşılaştığı zaman aşabilme yeteneği test edilmiştir. Hareketli bacak mekanizması, engellerin üzerine zıplama hareketi yaparak robotun engelleri başarıyla aşmasını sağlamıştır.

Bu ayrı ayrı gerçekleştirilen simülasyonlar, hareketli bacak mekanizmasının farklı koşullarda nasıl performans gösterdiğini ve küresel robotun düz zeminde ilerlerken, yokuşları tırmanırken ve engelleri aşarken nasıl davrandığını değerlendirmek için yapılmıştır. Öte yandan robotun hızı ve eğimine bağlı olarak gerekli periyodik sinyal frekansının belirlenmesi için matematiksel denklemlerin nasıl elde edilebileceği açıklanmaya çalışılmıştır.

3. BÖLÜM

KÜRESEL YUVARLANAN ROBOTUN DİNAMİK MODELİ

Küresel robotlar küresel şekillerden dolayı her yöne hareket etmekte ve kabuk yapısına sahip olmalarından dolayı iç mekanizmalarını toz, kir gibi dış etkenlerden ve darbelerden koruyabilmektedir. Robotun boyutları nedeniyle dar alanlarda hareket ediyor olmaları ve çarpışmalarda devrilmeden dengeyi sağlayarak sabit hareket edebilmelerinden dolayı tercih sebebi olmuştur.

Küresel robotun hareketi için birçok mekanizma kullanılmaktadır. Bu mekanizmalar kendi içinde de farklı tasarımlara sahiptir. Küresel robotların hareket yöntemlerin genel olarak sınıflandıracak olursak ağırlık merkezini değiştirmek, açısal momentum korunumundan faydalanmak ve kabuk deformasyonu ile hareket ettirmek olarak sınıflandırılabilir.

Bu çalışmada ağırlık merkezini değiştirerek hareket eden bir küresel robot seçilmiştir. Bu mekanizmanın seçilme nedeni ise gövdenin sabit bir şafta sahip olması, dolayısı ile küresel robot hareket ederken sarkaçta ikinci bir kayma olmamasıdır. Matematiksel modeli hesaplamaları yapılırken X ve Y ekseninde karmaşık dinamik hesaplamalarının ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrı ayrı hesaplama yapılması matematiksel hesaplamalarının doğruluğu arttırdığı gibi aynı zamanda yörünge takibinin de doğru gerçekleşmesini sağlamıştır [4].

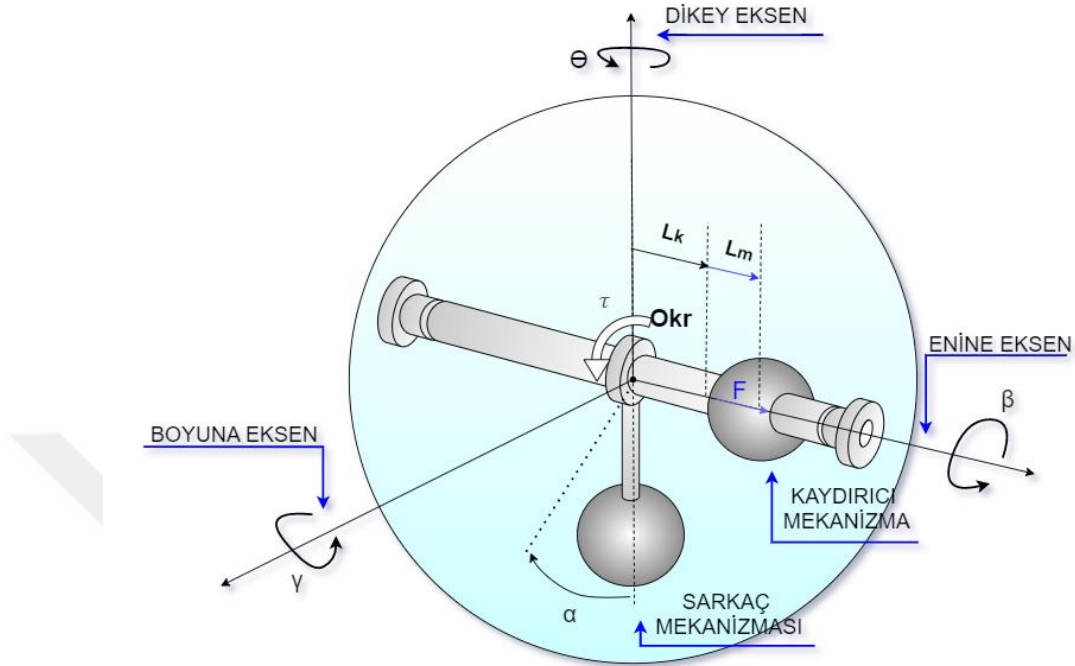
Bu bölümde kaydırıcı ve sarkaç tahrikli küresel robotun tasarımı tanıtılacak ve ardından kinematik ve dinamik modeli açıklanacaktır. Bu tezde kullanılacak mobil küresel robotun iki tahrik mekanizması vardır; bu mekanizmaların ilk parçası olarak küresel robotun şaftı üzerinde bulunan kaydırıcı tahrikli mekanizmadır. Diğer tahrik mekanizması ise küresel robotun şaftına bağlı bulunan döner sarkaçtır. Bu iki parçanın muhtelif hareketleri küresel robotun yuvarlanma ve dönüş hareketlerini gerçekleştirmesini sağlar. Kaydırıcı mekanizmanın robotun şaft üzerinde kayması ile robotun sağa ve sola dönmesini, sarkaç

mekanizmasının tam tur atmadan simetrik olmayan bir şekilde sallanması da robotun ileri ve geri yuvarlanma hareketini gerçekleştirir.

Küresel robotun kinematik ve dinamik denklemlerin elde edilmesi için bazı varsayımlar yapılmıştır: İlk olarak küre hareket düzlemi üzerinde kaymadan yuvarlandığı varsayımıdır. İkinci olarak ise kaydırıcı tahrik mekanizması ile döner sarkacın nokta kütle olduğu kabul edilmiştir. Son olarak küresel robotun şaftına bağlı bulunan sarkaç çubuğunun kütesiz olduğu kabul edilmiştir.

Küresel robotlarda hareketin kontrol edilebilmesi için dinamik ve kinematik denklemlerinin çıkarılması gerekmektedir. Bu çalışmada robotun dinamik denklemleri bulunurken ivme hız gibi dinamik büyüklüklerin zamana bağlı olarak fazla değişim göstermediği gözlemlendiğinden Lagrange-Euler yöntemi tercih edilmiştir. Lagrange-Euler ile Newton-Euler yöntemlerinde yapılan işlem benzerdir. Newton-Euler ile robotun doğrusal ve açısal hareketlerinden yararlanarak zamana bağlı denklem elde edilirken, Lagrange-Euler ise zamandan bağımsız olarak sistemdeki toplam kinetik enerji ile toplam potansiyel enerjinin farkını alınarak elde edilir. Newton-Euler yöntemin de matematiksel model oluşturmak daha basittir. Fakat Newton-Euler tekniği ile sistemin sadece o andaki durumu hesaplanırken, Lagrange-Euler tekniği ile üretilen model de sistemin tüm zamanlarda davranışı temsil edilebilir. Bununla birlikte Lagrange-Euler yönteminde daha karmaşık matematiksel ifadeler vardır. Buna rağmen vektörel ve matris işlemleri bugün ki bilgisayarlarda daha hızlı yapılmasından dolayı ileri ve ters dinamik denklemleri elde etmek daha kolaydır.

3.1. Robot Modeli



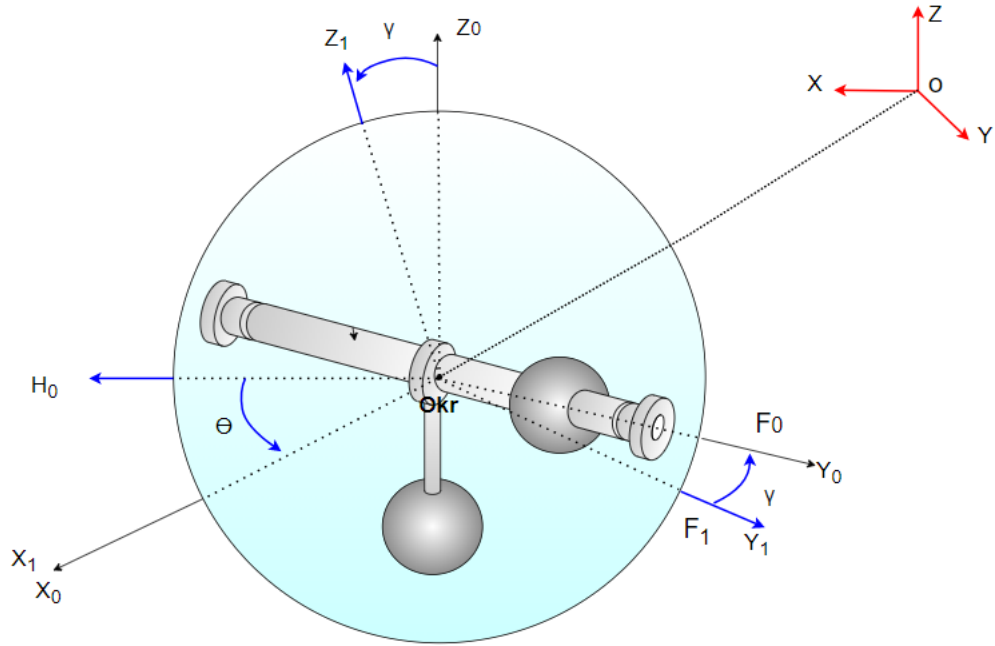
Şekil 3.1. Küresel robotunun şematik diyagramı.

Şekil 3.1’ de küresel robotun şematik diyagramı gösterilmektedir. Küresel robot sert bir kabuk içerisinde boydan boya uzanan bir mil üzerinde doğrusal yerleştirilmiş kaydırıcı mekanizma ve mile bağlı bulunan sarkaç mekanizmasından oluşmaktadır. Sarkaç mekanizması yuvarlanma hareketini sağlamak için mil etrafında tork uygulamaktadır. Bu tork kürenin yatay ve enine eksen boyunca ileri-geri gitmesine yardımcı olur. Kaydırıcı mekanizmada meydana gelen kuvvet vasıtası ile shaft üzerinde ötelenir. Bu öteleme hareket ile küresel robotun ağırlık merkezinin yer değiştirmesi sağlanır ve kürenin enine eksen etrafında dönüşlerini gerçekleştirir. Böylece küresel robot hem boyuna eksen yönünde yuvarlanması hem de enine eksen etrafında dönme hareketine sahip olur.

Küresel robota bir kuvvet veya tork uygulanmadığı zaman sarkaç mekanizması zemine dik olarak, kaydırıcı mekanizmada enine eksende yatay durumda olduğundan statik dengededir. O_{kr} Küresel robotun ağırlık merkezinden geçer. m_s sarkaç mekanizmasının kütlesi, m_k kaydırıcı mekanizmasının kütlesi, L_k kaydırıcı mekanizma ile kürenin arasındaki merkezi arasındaki mesafedir.

Şekil 3.1’de küresel robotun koordinatları gösterilmektedir. β ve γ sırasıyla kürenin enine ve boyuna eksenlerde dönüş açılarıdır. γ küresel robotun eğilme açısıdır. Tork ile tahrik edilen sarkacın şaft etrafında dönmesi ile α açısına neden olur. Bu açı aynı zamanda β dönüşüne ters yöndedir. F kuvveti ile tahrik edilen kaydırıcı mekanizmada L_m , küre merkezi ile kaydırıcı mekanizmanın merkezi arasında şaft boyunca meydana gelen yer değiştirmedir.

Referans eksen takımları T ile ve eksen takımları kümesi {T} ile gösterilmektedir. Döndürme matrisini ise $R_{T_B T_A}$ ile gösterilir. Bu ifade A’nın B’ye döndürülmesini ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Küresel robotun eksen takımları.

Şekil 1.2’ de küresel robotun denklemlerini türetmekte yardımcı olmak adına kullanılan eksen takımları gösterilmektedir. O-XYZ sabit referans eksen takımıdır ve $\{T_s\}$ ile gösterilmektedir. Küresel robotun $\{T_s\}$ ’deki konumu şu şekilde gösterilir.

$${}^{T_s}p_{kr} = {}^{T_s}[X_{kr}(t), Y_{kr}(t), 0]^T \quad (1)$$

O_1 merkezi O_{kr} ’de bulunan $O_1-X_1Y_1Z_1$ küre referans eksen takımıdır. X_1 ve Y_1 sırasıyla boyuna ve enine eksen takımıdır ve Z_1 ise dikey eksen takımıdır. O_0 merkezli şaft referans

eksen takımı ise $O_0-X_0Y_0Z_0$ 'dur. X_0 ve Y_0 sırasıyla boyuna ve enine eksen takımıdır ve Z_0 ise dikey eksen takımıdır.

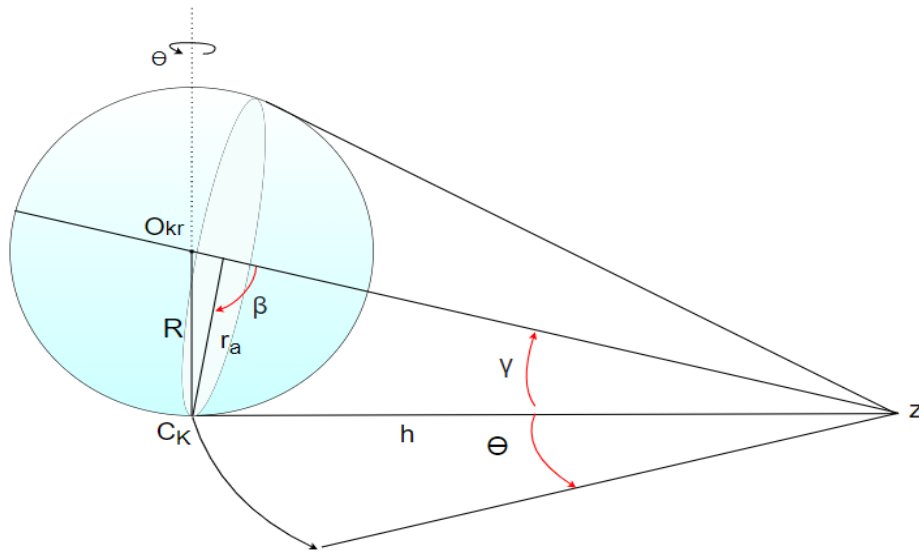
Şekilde görüldüğü gibi X_1 ve Y_1 eksenleri yatay bir konumdadır ve sabit referans eksenleri olan X ve Y 'ye paraleldir. Küresel robot Z_1 etrafında dönüş açısı da θ ile gösterilmektedir. Diğer bir ifadeyle, X_1 ve X arasındaki açı θ 'dır. Son olarak ise $\{I,J,K\}, \{i_1,j_1,k_1\}, \{i_0,j_0,k_0\}$ sırasıyla $\{T_s\}, \{T_1\}, \{T_0\}$, eksen takımlarının birim vektörlerini temsil eder.

3.2. Kinematik ve Dinamik Modelleme

Bu bölümde ilk olarak küresel robotun kinematik denklemleri açıklanmış ardından Euler-Lagrange yöntemi ile dinamik denklemleri elde edilmiştir.

3.2.1. Yuvarlanma Hareketinin Kinematiği Ve Modellenmesi

Küresel robotun sabit bir dönme merkezi etrafında dönme hareketi şekil 3.3'de gösterilmiştir. Küresel robotun eğim açısının γ olduğundan daha önce bahsedilmiştir. Eğim açısının iki katı kadar olan tepe açısı 2γ olan hayali bir koni kullanarak zemin üzerinde yuvarlanma hareketini gerçekleştirir. Z hayali koninin tepe noktasından geçen ve yere temas ettiği, C_k küresel robotun yere temas ettiği noktadır.



Şekil 3.3. Küresel robotun yuvarlanma hareketinin hayali koni modeli.

Varsayım olan kaymadan yuvarlanma şartına göre koninin dairesi için eşit yay uzunluğu kuralına dayanarak (3) numaralı denklemi elde ederiz:

$$r_a \dot{\beta} = h \dot{\theta} , \quad (2)$$

Burada r_a koninin taban dairesinin yarıçapıdır, h koninin tepe noktası ile kürenin temas noktası arasında kalan eğrilik yarıçapıdır. R kürenin yarıçapıdır. Buna göre şu ifadeler elde edilir:

$$r_a = R C_\gamma , \quad (3)$$

$$h = -R C_\gamma / S_\gamma . \quad (4)$$

Burada C_γ ve S_γ sırasıyla $\cos(\gamma)$ ve $\sin(\gamma)$ temsil eder. Denklem (4) ve (5)'i (3) numaralı denklemde yerine yazarsak (6) numaralı denklemdeki ifade elde edilir.

$$\dot{\theta} = -\dot{\beta} S_\gamma \text{ elde edilir.} \quad (5)$$

Ardından C_k 'ya göre O_{kr} 'nin $\{T_1\}$ eksenindeki konum vektörü şu şekilde yazılabilir:

$$\overline{{}^{T_1}C_k O_{kr}} = R k_1 , \quad (6)$$

Kürenin açısal hız vektörü (6) numaralı denklemden itibaren tanımlanan β ve γ ' ya göre aşağıdaki gibi yazılır:

$${}^{T_1}\dot{w}_{kr} = \dot{\gamma} i_1 + \dot{\beta} C_\gamma j_1 - \dot{\beta} S_\gamma k_1. \quad (7)$$

Buradan $\{T_1\}$ eksen takımına göre kürenin O_{kr} 'deki çizgisel hızı hesaplanabilir:

$${}^{T_1}\dot{v}_{kr} = {}^{T_1}\dot{w}_{kr} x^{T_1} p_{C_k} = R \dot{\beta} C_\gamma i_1 = R \dot{\gamma} j_1. \quad (8)$$

${}^{T_1}\dot{v}_{kr}$ 'de , Z_1 yönünde kürenin çizgisel hızı ${}^{T_1}\dot{w}_{kr}=0$ 'dır, dolayısıyla bu ifade de şu şekilde gösterilebilir:

$${}^{T_1}\dot{v}_{kr} = {}^{T_1}[u_{kr} , v_{kr} , 0]^T \quad (9)$$

Şekil 3.2' de gösterildiği üzere, $\{T_1\}$ 'in $\{T_s\}$ ' ye rotasyon matrisi Z_1 eksenini ve θ açısına göre aşağıdaki gibidir:

$$Rot_{T_s T_1} = \begin{bmatrix} C_\theta & S_\theta & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

(9) ve (11) numaralı eşitliklerden yararlanarak O_{kr} 'nin çizgisel hızı $\{T_s\}$ 'de şu şekilde hesaplanabilir:

$${}^{T_s}v_{kr} = Rot_{T_s T_1} x^{T_1} v_{kr}.$$

Tüm bu denklemlerden aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned} {}^{T_s}\dot{X}_{kr} &= R\dot{\beta}C_\gamma C_\theta + R\dot{\gamma}S_\theta, \\ {}^{T_s}\dot{Y}_{kr} &= R\dot{\beta}C_\gamma S_\theta + R\dot{\gamma}C_\theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Buraya kadar dinamik etkenlerden bağımsız olarak küresel robotun dikey eksen etrafında yapmış olduğu çizgisel ve açısal hızlar hesaplanmıştır. Çizgisel ve açısal hızlardan sabit referans eksen takımı ve kürenin referans eksen takımına göre denklemler yazılarak bahsedilmiştir.

3.2.2. Küresel Robotun Dinamik Hareket Denklemi

Bu kısımda küresel robotun hareket dinamiği Euler-Lagrange metodu kullanılarak ifade edilecektir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \varepsilon_i, \quad i=1,2,3,4. \quad (12)$$

Robotun hareketini tanımlayan bağımsız genelleştirilmiş koordinatlar kümesi $q = [\beta, \alpha, \gamma, L_m]$ 'dir. Uygulanan dış torklar ve kuvvetlere karşı gelen genelleştirilmiş koordinatlar kümesi ise $\varepsilon = (\varepsilon_\beta, \varepsilon_\alpha, \varepsilon_\gamma, \varepsilon_{L_m})$ 'dir. ε_β terimi kürenin enine dönüş açısındaki dış kuvveti veya torku, ε_γ terimi kürenin boyuna dönüş açısındaki dış kuvveti veya torku, ε_α terimi sarkacın mil etrafında yaptığı açıdaki dış kuvveti veya torku, ε_{L_m} terimi kaydırıcının yer değiştirmesindeki dış kuvveti veya torku temsil eder. L ise lagrange fonksiyonudur.

$$L(q, \dot{q}) = E_k(q, \dot{q}) - E_p(q), \quad (13)$$

Burada E_k ve E_p sırasıyla küresel robotun toplam kinetik enerji ve potansiyel enerjiyi gösterir.

Küresel robotta E_p 'i hesaplanırken kürenin yüksekliği $\{T_1\}$ eksen takımında değişmediğinden potansiyel enerjiyi hesaplarken sarkaç mekanizması ile kaydırıcı mekanizma hesaba katılır. Şekil 3.1'de sarkacın mil etrafındaki dönüşü α ile gösterilir ve bu dönüş kürenin yuvarlanma hareketine zıt yöndedir. Sarkacın statik denge noktasında olduğunu varsayalım. Bu durumda iki açı arasındaki fark olan $\alpha - \beta$, bize sarkaç ile başlangıç noktası arasındaki açıyı ölçer. Böylece $\{T_0\}$ 'daki sarkacın konum vektörü şu şekilde yazılır:

$${}^{T_0}p_s = LS_{\alpha\beta}i_0 - Lsj_o - LC_{\alpha\beta}k_o, \quad (14)$$

Burada ${}^{T_0}p_s$ sarkacın $\{T_0\}$ 'daki konumunu göstermektedir. L sarkacın uzunluğudur. $S_{\alpha\beta}$ ve $C_{\alpha\beta}$ sırasıyla $\sin(\alpha - \beta)$ ve $\cos(\alpha - \beta)$ temsil eder. Ayrıca şekil 1.2 de gösterildiği gibi $\{T_0\}$ eksen takımı, $\{T_1\}$ eksen takımının x_1 ekseninde γ açısıyla döndürülmesiyle elde edilir. Şu şekilde tanımlanır:

$$Rot_{T_1T_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\gamma & S_\gamma \\ 0 & -S_\gamma & C_\gamma \end{bmatrix}, \quad (15)$$

Denklem (15) ve (16) kullanılarak sarkacın $\{T_1\}$ 'deki konumu şu şekilde yazılır:

$${}^{T_1}p_s = Rot_{T_1T_0} {}^{T_0}p_s = LS_{\alpha\beta}i + (-L_sC_\gamma + LC_{\alpha\beta}S_\gamma)j - (LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_sS_\gamma)k. \quad (16)$$

Kaydırıcının L_k ve L_m 'ye göre $\{T_0\}$ 'daki konumu;

$${}^{T_0}p_k = (L_k + L_m)j_o, \quad (17)$$

İle hesaplanırken kaydırıcının $\{T_1\}$ 'deki konumu ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$${}^{T_1}p_k = Rot_{T_1T_0} {}^{T_0}p_k = (L_k + L_m)C_\gamma j + (L_k + L_m)S_\gamma k. \quad (18)$$

Bu yapıdaki potansiyel enerjiyi hesaplamak için denklem (17) ve (19)'daki sarkaç ağırlığı ve kaydırıcı konumları kullanılabilir ve potansiyel enerji denklem (20)'deki gibi şu şekilde yazılır:

$$E_p = m_k g (L_k + L_m) S_\gamma - m_s g (L C_{\alpha\beta} C_\gamma + L_s S_\gamma). \quad (19)$$

Kinetik enerjinin hesaplanması için küresel robotun tüm bileşenleri olan küre, sarkaç ve kaydırıcının kinetik enerjileri hesaba katılır.

$$E_k = E_{k_{kr}} + E_{k_s} + E_{k_k}$$

$$E_{k_{kr}} = \frac{1}{2} (m_{kr} \| {}^{T_1}\dot{v}_{kr} \|^2 + I_{kr} \| {}^{T_1}\dot{w}_{kr} \|^2)$$

$$E_{k_s} = \frac{1}{2} (m_s \| {}^{T_1}\dot{v}_s \|^2 + I_s \| {}^{T_1}\dot{w}_s \|^2)$$

$$E_{k_k} = \frac{1}{2} (m_k \| {}^{T_1}\dot{v}_k \|^2 + I_k \| {}^{T_1}\dot{w}_k \|^2). \quad (20)$$

Denklem (21)'de $E_{k_{kr}}$ terimi küre kinetik enerjini, E_{k_s} sarkaç kinetik enerjisini, E_{k_k} kaydırıcı kinetik enerjisini temsil etmektedir. Küre, kaydırıcı ve sarkaç için kinetik enerji hesaplamaları hem dönme hem de öteleme kinetik enerjileri hesaplanarak yapılmaktadır. Denklemde ${}^{T_1}\dot{v}$ ve ${}^{T_1}\dot{w}$ ile gösterilen ifadelerin her biri sırasıyla çizgisel hız ve açısal hız vektörleridir. Denklem (21)'de kr, s, k alt simgeleri sırasıyla küre, sarkaç ve kaydırıcı mekanizmaları temsil eder. Ayrıca küresel robotta kabuk ve şaft birbirine sabitlendiğinden tek bir kütle olarak kabul edilir ve kürenin kütlesi m_{kr} ile gösterilir. I_{kr} , I_s , I_k ifadeleri sırasıyla $\{T_1\}$ 'e göre kürenin, sarkacın, kaydırıcının atalet matrislerinin momentleridir. Aşağıda kinetik enerjiyi hesaplamak için küresel robotun çizgisel ve açısal hızlar türetilmiştir.

Küre için açısal ve çizgisel hızlar (8) ve (9) numaralı denklemlerde belirtilmiştir. Sarkaç için çizgisel hız şu şekilde yazılır:

$${}^{T_1}\dot{v}_s = v_s^{bgl} + {}^{T_1}\dot{v}_{o_0} + {}^{T_1}\dot{w}_{T_0} x^{T_1} p_s \quad (21)$$

v_s^{bgl} ifadesi $\{T_s\}$ 'sabit olduğunu düşünürsek sarkacın $\{T_1\}$ cinsinden bağıl hızıdır. ${}^{T_1}\dot{v}_{o_0}$ ifadesi ise $\{T_s\}$ 'nin $\{T_1\}$ 'deki orijine göre bağıl çizgisel hızıdır ve ${}^{T_1}\dot{w}_{T_s}$ ise $\{T_s\}$ 'nin $\{T_1\}$ 'deki açısal hızıdır. ${}^{T_1}p_s$ sarkacın (17) numaralı denklemde sunulan konum vektörüdür. Denklem (22)'yi türetmek için hesaplama adımları aşağıda sunulmuştur. Sarkacın $\{T_0\}$ 'daki açısal hızı şöyledir:

$${}^{T_0}\dot{w}_s = (\dot{\beta} - \dot{\alpha})j_0. \quad (22)$$

Ayrıca ${}^{T_0}\dot{v}$ şu şekilde hesaplanabilir:

$${}^{T_0}\dot{v}_s = {}^{T_0}\dot{w}_s \times {}^{T_0}p_s = L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})C_{\alpha\beta}i_o + L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}k_o \quad (23)$$

Daha sonra (16) ve (24) numaralı denklemleri kullanarak şu ifadeler yazılabilir:

$$\begin{aligned} v_s^{bgl} &= Rot_{T_1T_0} \times {}^{T_0}\dot{v}_s \\ &= L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})C_{\alpha\beta}i - L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}S_\gamma j + L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}C_\gamma k. \end{aligned} \quad (24)$$

${}^{T_1}\dot{w}_{T_0} = \gamma i$ olduğu bilinirse denklem (17)'den yararlanarak denklem (22)'deki denklemdaki ${}^{T_1}\dot{w}_{T_0} \times {}^{T_1}p_s$ ifade aşağıdaki formu alır:

$${}^{T_1}\dot{w}_{T_0} \times {}^{T_1}p_s = (L_s S_\gamma + L C_{\alpha\beta} C_\gamma \dot{\gamma})j + (L C_{\alpha\beta} S_\gamma \dot{\gamma} - L_s C_\gamma)k. \quad (25)$$

o_0 ve o_{kr} aynı noktada çakıştığı için ${}^{T_1}\dot{v}_{o_0} = {}^{T_1}\dot{v}_{o_{kr}}$ 'dir. Denklem (9)'dan yararlanarak şu şekilde ifadeler yazılabilir:

$${}^{T_1}\dot{v}_{o_0} = R\dot{\beta}C_\gamma i - R\dot{\gamma}j. \quad (26)$$

Şimdi denklem (25),(26),(27) 'i denklem (22)'de yerine yazılırsa denklem (28)'deki ifadeler elde edilir:

$$\begin{aligned} {}^{T_1}\dot{v}_s &= (R\dot{\beta}C_\gamma + L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})C_{\alpha\beta})i + \\ &(-L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}S_\gamma + (L_s S_\gamma + L C_{\alpha\beta} C_\gamma - R)\dot{\gamma})j + \\ &(L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}C_\gamma + (-L_s C_\gamma + L C_{\alpha\beta} S_\gamma \dot{\gamma}))k \end{aligned} \quad (27)$$

Sarkacın açısal hızını hesaplamak için (16) ve (23) numaralı denklemleri kullanarak şu şekilde hesaplanır:

$${}^{T_1}\dot{w}_s = Rot_{T_1T_0} \times {}^{T_0}\dot{w}_s = \dot{\gamma}i + (\dot{\beta} - \dot{\alpha})C_\gamma j - (\dot{\beta} - \dot{\alpha})S_\gamma k. \quad (28)$$

Benzer şekilde sarkaç gibi kaydırıcının çizgisel hızı yazılır:

$${}^{T_1}\dot{v}_k = v_k^{bgl} + {}^{T_1}\dot{v}_{o_0} + {}^{T_1}w_{T_0} x^{T_1} p_k \quad (29)$$

Burada v_k^{bgl} ifadesi $\{T_s\}$ 'sabit olduğunu düşünürsek sarkacın $\{T_1\}$ cinsinden bağlı hızıdır. Kaydırıcı mekanizmanın hareketi her zaman Y_0 mil eksenini boyuncadır. Kaydırıcının $\{T_s\}$ 'deki çizgisel hızı şu şekilde yazılabilir:

$${}^{T_0}\dot{v}_k = \dot{L}_m j_0 . \quad (30)$$

Ardından denklem (16) ve (31) 'den yararlanarak v_k^{bgl} şu hale dönüşür:

$$v_k^{bgl} = Rot_{T_1 T_0} x {}^{T_0}\dot{v}_k = \dot{L}_m C_\gamma j + \dot{L}_m S_\gamma k. \quad (31)$$

${}^{T_1}w_{T_0} = \gamma i$ olduğu bilindiğine göre denklem (19) 'ı , denklem (30)'in son terimine ekleyerek şu sonuca varılır:

$${}^{T_1}w_{T_0} x^{T_1} p_k = -(L_m + L_k) S_\gamma \dot{\gamma} j + (L_m + L_k) C_\gamma \dot{\gamma} k . \quad (32)$$

Böylece denklem (27),(32),(33)'deki ifadeler denklem (30)'da yerine yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\begin{aligned} {}^{T_1}\dot{v}_k &= (R\dot{\beta} C_\gamma) i + (\dot{L}_m C_\gamma + (-R - (L_m + L_k) S_\gamma) \dot{\gamma}) j + \\ &(\dot{L}_m S_\gamma + (L_m + L_k) C_\gamma \dot{\gamma}) k. \end{aligned} \quad (33)$$

Son olarak ${}^{T_1}w_k$ türetmek için şu ifadeler elde edilir:

$${}^{T_0}w_s = \dot{\gamma} i_0 + \dot{\beta} j_0, \quad (34)$$

$\{T_1\}$ 'e döndürmek için denklem (16)'da kullanırsak;

$${}^{T_1}w_s = \dot{\gamma} i + \dot{\beta} C_\gamma j - \dot{\beta} S_\gamma k \quad (35)$$

ifadesi elde edilir. Buradan , kürenin kinetik enerjisini denklem (8) ve (9)'dan yararlanarak hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} E_{k_{kr}} &= \frac{1}{2} m_{kr} \left((R\dot{\beta} C_\gamma)^2 + (-R\dot{\gamma})^2 \right) + \frac{1}{2} I_{kr}^x \dot{\gamma} + \frac{1}{2} I_{kr}^y (\dot{\beta} C_\gamma)^2 + \\ &\frac{1}{2} I_{kr}^z (-\dot{\beta} S_\gamma)^2 . \end{aligned} \quad (36)$$

Yukarıdaki denklemde gösterilen $I_{kr}^x, I_{kr}^y, I_{kr}^z$ ifadeleri eylemsizlik momenti toplamı olan I_{kr} 'nin köşegen elemanlarıdır. Eylemsizlik momenti I_{kbb} ve $I_{\text{şft}}$ ile gösterilen sırasıyla kabuk ve şaftın toplamına eşittir. Kabuğun küresel şekli nedeniyle, I_{kbb} şu şekilde yazılır:

$$I_{kbb} = \text{diag}[I_{kbb}^x, I_{kbb}^y, I_{kbb}^z]$$

$$I_{kbb}^x = I_{kbb}^y = I_{kbb}^z = \frac{2}{3} m_{kbb} R^2 . \quad (37)$$

Burada $I_{kbb}^x, I_{kbb}^y, I_{kbb}^z$ $\{T_1\}$ eksenleri etrafındaki eylemsizlik momentleridir ve m_{kbb} kabuğun kütlesidir. Milin uzunluğunu $2R$ olarak ve X_1 ekseninde γ açısıyla döndürülen eğik bir çubuk olarak düşünülürse, $I_{\text{şft}}$ şu şekilde yazılabilir:

$$I_{\text{şft}} = \text{diag}[I_{\text{şft}}^x, I_{\text{şft}}^y, I_{\text{şft}}^z]$$

$$I_{\text{şft}}^x = \frac{1}{3} m_{\text{şft}} R^2 \quad I_{\text{şft}}^y = I_{\text{şft}}^x S_\gamma^2 \quad I_{\text{şft}}^z = I_{\text{şft}}^x C_\gamma^2 . \quad (38)$$

Burada da $I_{\text{şft}}^x, I_{\text{şft}}^y, I_{\text{şft}}^z$ $\{T_1\}$ eksenleri etrafındaki eylemsizlik momentleridir. Şimdi denklem (38) ve (39) kullanarak kürenin eylemsizlik momenti hesaplanabilir:

$$I_{kr}^x = I_{kbb}^x + I_{\text{şft}}^x ,$$

$$I_{kr}^y = I_{kbb}^y + I_{\text{şft}}^y S_\gamma^2 ,$$

$$I_{kr}^z = I_{kbb}^z + I_{\text{şft}}^z C_\gamma^2 . \quad (39)$$

Denklem (23) ve (24) kullanarak E_{k_s} elde etmek için ifadeler şu şekilde düzenlenir:

$$E_{k_s} = \frac{1}{2} m_s ((R\dot{\beta} C_\gamma + L(\dot{\alpha} - \dot{\beta}) C_{\alpha\beta})^2 + ((L_s S_\gamma + L C_{\alpha\beta} C_\gamma - R)\dot{\gamma} - L(\dot{\alpha} - \dot{\beta}) S_{\alpha\beta} S_\gamma)^2 + (L(\dot{\alpha} - \dot{\beta}) S_{\alpha\beta} C_\gamma + (-L_s C_\gamma + L C_{\alpha\beta} S_\gamma)\dot{\gamma})^2) + \frac{1}{2} I_s^x \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} I_s^y ((\dot{\beta} - \dot{\alpha}) C_\gamma)^2 + \frac{1}{2} I_s^z ((\dot{\alpha} - \dot{\beta}) S_\gamma)^2 . \quad (40)$$

Burada I_s^x, I_s^y, I_s^z sarkacın $\{T_1\}$ eksenleri etrafındaki eylemsizlik momentidir. Sarkaç bobini nokta kütle olarak kabul edildiğinden eylemsizlik momentleri şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned}
I_s^x &= m_s(L_s^2 + (LC_{\alpha\beta})^2), \\
I_s^y &= m_s(LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_sS_\gamma)^2 \\
I_s^z &= m_s(L_sC_\gamma - LS_\gamma)^2.
\end{aligned} \tag{41}$$

Benzer şekilde denklem (34) ve (35) kullanılarak E_{k_k} ifadesi aşağıdaki formu alır:

$$\begin{aligned}
E_{k_k} &= \frac{1}{2}m_k((R\dot{\beta}C_\gamma)^2 + (\dot{L}_mC_\gamma - (R + (L_m + L_k)S_\gamma)\dot{\gamma})^2 + (\dot{L}_mS_\gamma \\
&+ (L_m + L_k)C_\gamma\dot{\gamma})^2) + \frac{1}{2}I_k^x\dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2}I_k^y(\dot{\gamma}C_\gamma)^2 + \frac{1}{2}I_k^z(-\dot{\gamma}S_\gamma)^2.
\end{aligned} \tag{42}$$

Kaydırıcı bir nokta kütle olarak düşünülürse zaman, I_k aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
I_k &= diag[I_k^x, I_k^y, I_k^z] \\
I_k^x &= m_k(L_m + L_k)^2, \quad I_k^y = m_k((L_m + L_k)S_\gamma)^2, \quad I_k^z = m_k((L_m + L_k)S_\gamma)^2.
\end{aligned} \tag{43}$$

Son olarak (14) numaralı denklemi (37), (41), (43) ve (20) numaralı denklemler ile değiştirerek ve (40), (42), (44) numaralı denklemlerde gösterilen eylemsizlik momentlerini kullanarak, Lagrange fonksiyonu şu hali alır:

$$\begin{aligned}
L &= E_{k_{kr}} + E_{k_s} + E_{k_k} - E_p \\
&= \frac{1}{2}m_{kr}((R\dot{\beta}C_\gamma)^2 + (-R\dot{\gamma})^2) + \frac{1}{2}(I_{k_{bk}} + I_{s_{ft}})\dot{\gamma}^2 \\
&+ \frac{1}{2}(I_{k_{bk}} + I_{s_{ft}}S_\gamma^2)(\dot{\beta}C_\gamma)^2 + \frac{1}{2}(I_{k_{bk}} + I_{s_{ft}}C_\gamma^2)(-\dot{\beta}S_\gamma)^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_s((R\dot{\beta}C_\gamma + L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})C_{\alpha\beta})^2 + ((L_sS_\gamma + LC_{\alpha\beta} - R) \\
&\dot{\gamma} - L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}S_\gamma)^2 + (L(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}C_\gamma + (-L_sC_\gamma + LC_{\alpha\beta}S_\gamma)\dot{\gamma})^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_s(L_s^2 + (LC_{\alpha\beta})^2)\dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2}m_s(LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_sS_\gamma)^2((\dot{\beta} - \dot{\alpha})C_\gamma)^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_s(L_sC_\gamma - LS_\gamma)^2((\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_\gamma)^2 + \frac{1}{2}m_p((R\dot{\beta}C_\gamma)^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +((\dot{L}_m C_\gamma - (R + (L_m + L_k)S_\gamma)\dot{\gamma})^2 + (\dot{L}_m S_\gamma + (L_m + L_k)C_\gamma\dot{\gamma})^2 \\
& + \frac{1}{2}m_k(L_m + L_k)^2\dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2}m_k((L_m + L_k)S_\gamma)^2(\dot{\beta}C_\gamma)^2 \\
& + \frac{1}{2}m_k((L_m + L_k)C_\gamma)^2(-\dot{\beta}S_\gamma)^2 \\
& - m_k g(L_m + L_k)S_\gamma + m_s g(LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_s S_\gamma).
\end{aligned} \tag{44}$$

Sonunda, denklem (13)'ü denklem (45)'te kullanarak, küresel robotun hareket denklemi aşağıdaki formu alacak şekilde düzenlenebilir

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \mathcal{E}. \tag{45}$$

Burada $M \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ atalet matrisidir, $C \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ coriolis ve merkez kaç matristir, $G(q) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ yerçekimi torkları ve kuvvetleri vektörüdür. $\mathcal{E}$ vektörünün değeri, dışarıdan herhangi bir zorlama olmadığı durumda, hareketin gerçekleştiği koordinatlarda sıfır değerini alır. $\mathcal{E}_\beta$ ve $\mathcal{E}_\gamma$ terimleri dışarıdan bir hareket girişi olmadığı için sıfırdır. $\mathcal{E}_\alpha$ terimi ise sarkaca uygulanan tork değerine ve $\mathcal{E}_{L_m}$ terimi ise kaydırıcıya uygulanan kuvvete eşittir. Dolayısıyla $\mathcal{E}_\beta = 0$, $\mathcal{E}_\alpha = T$, $\mathcal{E}_\gamma = 0$, $\mathcal{E}_{L_m} = F$ (46) numaralı denklemin eleman bazında gösterimi şu şekildedir:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\beta} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{L}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{L}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix} \tag{46}$$

Küresel robotun hareket denklemlerini türetmek için (47) numaralı denklemde sunulan terimlerle için gerçekleştirilen hesaplama adımları aşağıda gösterilmiştir. Lagrange-Euler tekniğini kullanarak her bir genelleştirilmiş q koordinatı için $\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$ hesaplaması yapılır. Ardından ortaya çıkan her bir terimi aşağıdaki gibi toplanır.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \sum_{j=1}^4 M_{ij}\dot{q}_j = M_{i1}\dot{\beta} + M_{i2}\dot{\alpha} + M_{i3}\dot{\gamma} + M_{i4}\dot{L}_m. \tag{47}$$

$q_1 = \beta$ için, L' in $q_1 = \beta$ 'e göre kısmi türevi şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} = M_{11}\dot{\beta} + M_{12}\dot{\alpha} + M_{13}\dot{\gamma} + M_{14}\dot{L}_m. \quad (48)$$

M_{11} 'den M_{14} 'e kadar şu şekilde yazılır:

$$\begin{aligned} M_{11} = & L^2 m_s C_{\alpha\beta}^2 (1 + C_\gamma^4) - 2LL_s m_s C_\beta S_\beta^3 \\ & + 2Lm_s C_{\alpha\beta} C_\gamma (L_s C_\gamma^2 S_\gamma - R) + L^2 m_s S_\gamma^2 (S_{\alpha\beta}^2 + S_\gamma^2) \\ & + C_\gamma^2 (I_{kbbk} + (m_s + m_k + m_{kr})R^2 + L^2 m_s S_{\alpha\beta}^2) \\ & + (I_{sft}^x + 2(L_s^2 m_s + m_s (L_m + L_k)^2)) S_\gamma^2, \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} M_{12} = & -m_s (L^2 C_{\alpha\beta}^2 (1 + C_\gamma^4) - 2LL_s C_\beta S_\beta^3 + LC_{\alpha\beta} C_\gamma (2L_s C_\gamma^2 S_\gamma - R) \\ & + L^2 S_\gamma^2 (S_{\alpha\beta}^2 + S_\gamma^2) + C_\gamma^2 (L^2 S_{\alpha\beta}^2 + 2L_s^2 S_\gamma^2)), \end{aligned} \quad (50)$$

$$M_{12} = Lm_s S_{\alpha\beta} (L_s - RS_\gamma), \quad (51)$$

$$M_{14} = 0. \quad (52)$$

$q_2 = \alpha$ için, L ' ın $q_2 = \alpha$ 'e göre:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} = M_{21}\dot{\beta} + M_{22}\dot{\alpha} + M_{23}\dot{\gamma} + M_{24}\dot{L}_m. \quad (53)$$

M_{21} 'den M_{24} 'e kadar aşağıdaki gibi yazılır:

$$M_{21} = M_{12} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} M_{22} = & m_s (L^2 C_{\alpha\beta}^2 + L^2 C_\gamma^2 S_{\alpha\beta}^2 + S_\gamma^2 ((L_s C_\gamma - LS_\gamma)^2 + L^2 S_{\alpha\beta}^2) \\ & + C_\gamma^2 (LC_{\alpha\beta} C_\beta + L_s S_\gamma)^2), \end{aligned} \quad (55)$$

$$M_{23} = -Lm_s S_{\alpha\beta} (L_s - RS_\gamma), \quad (56)$$

$$M_{24} = 0. \quad (57)$$

$q_3 = \gamma$ için, L ' ın $q_3 = \gamma$ 'e göre:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\gamma}} = M_{31}\dot{\beta} + M_{32}\dot{\alpha} + M_{33}\dot{\gamma} + M_{34}\dot{L}_m. \quad (58)$$

M_{31} 'den M_{34} 'e kadar aşağıdaki gibidir:

$$M_{31} = M_{13} \quad (59)$$

$$M_{32} = M_{23} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} M_{33} = & I_{kbbk} + I_{sft}^x + 2m_k(L_m + L_k)^2 + (m_s + m_k + m_{kr})R^2 \\ & + m_s(L^2(1 + C_{2\alpha\beta}) + 2L_S^2 - 2RLC_{\alpha\beta}C_\gamma) \\ & + 2R(m_k(L_m + L_k) - L_S m_s)S_\gamma \end{aligned} \quad (61)$$

$$M_{34} = -m_s R C_\gamma. \quad (62)$$

Sonunda $q_4 = L_m$ için, L ' ın $\dot{q}_4 = \dot{L}_m$ 'e göre:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{L}_m} = M_{41}\dot{\beta} + M_{42}\dot{\alpha} + M_{43}\dot{\gamma} + M_{44}\dot{L}_m. \quad (63)$$

M_{41} 'den M_{44} 'e kadar şu şekilde ifade edilir:

$$M_{41} = M_{14}, \quad (64)$$

$$M_{42} = M_{24}, \quad (65)$$

$$M_{43} = M_{34}, \quad (66)$$

$$M_{44} = m_k. \quad (67)$$

Bir sonraki adımımızda denklem (46)'yı oluşturmak için $C(q, \dot{q})$ ve $G(q)$ terimleri oluşturulacaktır. C 'deki elemanlar için özgün bir ayarlama olmadığı gösterilebilir. Kontrol tasarım uygulamaları için C matrisi tercih edilir.

$$N(q, \dot{q}) = \dot{M}(q, \dot{q}) - 2C(q, \dot{q}), \quad (68)$$

$N^T = -N$ çarpık simetrik olsun. Bu amaçla C elemanları şu şekilde yazılır:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^4 c_{kij} \dot{q}_k \quad (69)$$

ve,

$$c_{kij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial M_{ik}}{\partial q_j} + \frac{\partial M_{kj}}{\partial q_i} \right). \quad (70)$$

c_{kij} birinci türden olan sözde Christoffel [34] sembolleridir. Bu sebeple (70) ve (71) numaralı denklemler kullanılarak $q_1 = \beta$ için C_{11} ve C_{14} arasındaki terimler şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} C_{11} = & C_\gamma \left(Lm_s(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta} \left(R - C_\gamma^2(LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_sS_\gamma) \right) m_k(L_m + \right. \\ & L_k)L_mS_\gamma S_{2\gamma} \left. \right) + \frac{1}{8}\dot{\gamma}((LL_s m_s C_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2 C_{4\gamma} + 8Lm_s(-L_s C_{2\gamma} S_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2 + RC_{\alpha\beta}S_\gamma) - \\ & 2S_{2\gamma}(2I_{kbb} + 2(m_s + m_k + m_{kr})R^2 + L^2m_s(C_{2\alpha\beta} - 1) + S_{4\gamma} \left(2I_{\dot{s}ft}^x + \right. \\ & \left. 4L_s^2m_s(L_m + L_k)^2 - L^2m_s(3 + C_{\alpha\beta}) \right)), \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} C_{12} = & Lm_sC_\gamma(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}(LC_{\alpha\beta}C_\gamma^3 + L_sC_\gamma^2S_\gamma - R) \\ & + \frac{1}{4}m_s\dot{\beta}(8L^2C_{\alpha\beta}^2C_\gamma^3S_\gamma - 2LC_{\alpha\beta}(L_s(C_{2\gamma} + C_{4\gamma}) + RS_\gamma), \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} C_{13} = & \frac{1}{8}(8LL_s m_s C_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2 C_{4\gamma}(\dot{\beta} - \dot{\alpha}) + 8LL_s m_s C_{2\gamma}(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2 - \\ & 8L^2m_s\dot{\beta}S_{2\alpha\beta} - 4Lm_sRC_{2\alpha\beta}(\dot{\alpha} - 2\dot{\beta})S_\gamma \\ & + 2((L^2m_s(1 - C_{2\alpha\beta}) - 2I_{kbb} - 2(m_s + m_k + m_{kr})R^2)\dot{\beta} - 2L^2m_s\dot{\alpha}S_{\alpha\beta}^2)S_{2\gamma} + \\ & (m_s\dot{\alpha}(L^2(3 + C_{2\alpha\beta}) - 4L_s^2) + (2I_{kbb} - 3L^2m_s + 4L_s^2m_s + 4m_k(L_m + L_k)^2 - \\ & L^2m_sC_{2\alpha\beta})\dot{\beta})S_{4\gamma}), \end{aligned} \quad (73)$$

$$C_{14} = 2m_k\dot{\beta}(L_m + L_k)C_\gamma^2S_\gamma^2. \quad (74)$$

Aynı şekilde $q_2 = \alpha$ için C_{21} ve C_{24} arasındaki terimler yazılır:

$$\begin{aligned} C_{21} = & Lm_sC_\gamma^3(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}(LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_sS_\gamma) + \frac{1}{4}m_s\dot{\gamma}(8L^2C_{\alpha\beta}^2C_\gamma^3S_\gamma - \\ & 2LC_{\alpha\beta}(L_s(C_{2\gamma} + C_{4\gamma}) + RS_\gamma + 4LS_\gamma(L_sS_{3\gamma} - LC_\gamma) + (L^2 - 2L_s^2)S_{4\gamma}), \end{aligned} \quad (75)$$

$$C_{22} = -Lm_sC_\gamma^3(\dot{\alpha} - \dot{\beta})S_{\alpha\beta}(LC_{\alpha\beta}C_\gamma + L_sS_\gamma)$$

$$-\frac{1}{4}m_s\dot{\gamma}(-4LC_\gamma(L_sC_{\alpha\beta}C_{3\gamma}+LS_\gamma-2LC_{\alpha\beta}^2C_\gamma^2S_\gamma)+4LL_sS_\gamma S_{3\gamma}+(L^22L_S^2)S_{4\gamma}), \quad (76)$$

$$\begin{aligned} C_{23} = & \frac{1}{8}m_s(8LL_sC_{\alpha\beta}^2C_{4\gamma}(\dot{\alpha}-\dot{\beta})+8LL_sC_{2\gamma}(\dot{\beta}-\dot{\alpha})S_{\alpha\beta}^2+8L^2\dot{\gamma}S_{2\alpha\beta}- \\ & 4LR\dot{\beta}S_\gamma+4L^2(\dot{\alpha}-\dot{\beta})S_{\alpha\beta}^2S_{2\gamma}-(L^2(3+C_{2\alpha\beta})-4L_S^2) \\ & (\dot{\alpha}-\dot{\beta})S_{4\gamma})8L^2m_s\dot{\beta}S_{2\alpha\beta}-4Lm_sRC_{2\alpha\beta}(\dot{\alpha}-2\dot{\beta})S_{4\gamma}), \end{aligned} \quad (77)$$

$$C_{24} = 0 \quad (78)$$

Sonra, $q_3 = \gamma$ için C_{31} ve C_{34} arasındaki terimleri yazılır:

$$\begin{aligned} C_{31} = & Lm_s(2LC_{\alpha\beta}-RC_\gamma)\dot{\gamma}S_{\alpha\beta}+\frac{1}{4}m_s\dot{\alpha} \\ & (2L(-4LC_{\alpha\beta}^2C_\gamma^3S_\gamma+C_{\alpha\beta}(L_s(2+C_{2\gamma}+C_{4\gamma})-RS_\gamma)+LS_{2\gamma}-2L_sS_\gamma S_{3\gamma}) \\ & -(L^2-2L_S^2)S_{4\gamma}) \\ & +\frac{1}{8}\dot{\beta}\left(-8LL_s m_s\left(C_{\alpha\beta}+C_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2C_{4\gamma}\right)+8LL_s m_sC_{2\gamma}S_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2\right) \\ & +\left(2I_{kbbk}+L^2m_s(C_{2\alpha\beta}-1)+2R^2(m_s+m_k+m_{kr})\right)S_{2\gamma} \\ & -(2I_{sft}^x-3L^2m_s+4L_S^2m_s+4m_k(L_m+L_k)^2-L^2m_sC_{2\alpha\beta})S_{4\gamma} \end{aligned} \quad (79)$$

$$\begin{aligned} C_{23} = & \frac{1}{8}m_s(8LL_s(C_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2C_{4\gamma}(\dot{\beta}-\dot{\alpha})+8LL_s m_sC_{2\gamma}(\dot{\alpha}-\dot{\beta})S_{\frac{(\alpha\beta)}{2}}^2 \\ & +8LR\dot{\gamma}C_\gamma S_{\alpha\beta}+8LC_{\alpha\beta}(L_s\dot{\beta}-L_s\dot{\alpha}S_{\alpha\beta})4LRC_{\alpha\beta}(2\dot{\alpha}-\dot{\beta})S_\gamma \\ & +4L^2(\dot{\beta}-\dot{\alpha})S_{\alpha\beta}^2S_{2\gamma}+(L^2(3+C_{2\alpha\beta})-4L_S^2)(\dot{\alpha}-\dot{\beta})S_{4\gamma})), \end{aligned} \quad (80)$$

$$\begin{aligned} C_{33} = & Lm_s(-2LC_{\alpha\beta}-RC_\gamma)(\dot{\alpha}-\dot{\beta})S_{\alpha\beta}+m_k\dot{L}_m(2(L_m+L_k)+RS_\gamma) \\ & +R\dot{\gamma}((m_k(L_m+L_k)-L_sm_s)C_\gamma+Lm_sC_{\alpha\beta}S_\gamma), \end{aligned} \quad (81)$$

$$C_{34} = m_k\dot{\gamma}(2(L_m+L_k)+RS_\gamma). \quad (82)$$

En son $q_4 = L_m$ için C_{41} ve C_{44} arasındaki terimleri yazılır:

$$C_{41} = -2m_s(L_m + L_k)C_\gamma^2\dot{\beta}S_\gamma^2, \quad (83)$$

$$C_{42} = 0, \quad (84)$$

$$C_{41} = -2m_s(L_m + L_k)\dot{\gamma}, \quad (85)$$

$$C_{44} = 0. \quad (86)$$

Son adımda da aşağıda yazılan eşitliği kullanarak $G(q)$ hesaplanmaktadır:

$$G_i(q) = \frac{\partial E_P}{\partial q_i}. \quad (87)$$

$q_1 = \beta$ den $q_4 = L_m$ 'e 'e kadar yazılırsa aşağıdaki gibi olur:

$$G_1 = -gLm_sC_\gamma S_{\alpha\beta}, \quad (88)$$

$$G_2 = gLm_sC_\gamma S_{\alpha\beta}, \quad (89)$$

$$G_3 = g((m_k(L_m + L_k) - L_s m_s)C_\gamma + +Lm_s C_{\alpha\beta} S_\gamma), \quad (90)$$

$$G_4 = gm_k S_\gamma \quad (91)$$

Denklem (47)'deki $M(q)$, $C(q, \dot{q})$, $G(q)$ matrisin hesaplanan terimleri yerleştirilerek küresel robotun dinamik denklemi tamamlanır.

4. BÖLÜM

SİMÜLASYON PLATFORMU

Sistemin genel olarak tanımlaması ortak tarafları bulunan küçük parçalardan oluşan kendi içinde ve diğer sistemler ile bağlantı durumunda iken bir amaç doğrultusunda yapılan ve sürekli tekrarlayarak devam eden bütün bir çalışmadır [62]. Sistem, bir amaca yönelik sürekli beraber çalışan ve çalışırken de bir birini tamamlayan parçaların bütünüdür [63].

Elde edilen verilerden matematiksel bir modele geçiş yapma süreci mühendislik alanında temeldir. Sistemin dinamik modelinde girdileri ve çıktıları bilinerek kontrol alanındaki bu sürece sistem tanımlanması denilmektedir. Sistem tanımlamasında sistemin özellikleri birkaç parametreye kadar bilindiği durumlarda, fiziksel sabitlerin olduğu sistem modelleri oluşturma sürecini kapsar [64]. Sistem tanımlama, problemin ne olduğunun belirlendiği ve oluşturulan sisteme ihtiyaç duyulma sebeplerinin ve amaçlarının ortaya konduğu bir süreçtir [65]. Sistem tanımlama yöntemleri, matematiksel modelleme gerektiren işlemlerden daha hızlı ve doğru şekilde çözüm üretmemizi sağlar. Sistem tanımlama yönteminde ilk olarak sistemden alınan veriler ile sistemin dinamik modeli oluşturulur. Ardından oluşturulan dinamik modelin çıktıları ile sistemden elde edilen çıktılar aynı ya da denk olana kadar model üzerindeki parametreler ile düzeltme yapılır. Modelden alınan çıktılar ile sistemden elde edilen gerçek veriler birbiri ile benzer ise oluşturulan dinamik model doğru demektir. [66].

Örnek bir çalışmada hedef takibi için otonom olarak hareket eden İnsansız Hava Aracının RRR eklem yapısındaki 3 eksenli yalpa sistemi için girişindeki motor hızları ve çıkışındaki uç işlevcisinin pozisyon verilerine göre modellenmesi için sistem tanımlama metodu kullanılmıştır [67].



Şekil 4.1. Kontrol Sistemi Bölümleri.

Bir sistem davranışının istenilen çıkışı verecek şekilde çalışmasını sağlamak amacı ile yapılan çalışmalara ise kontrol denir [68]. Mekanizmalarda talep edilen kontrolün sağlanabilmesi için farklı stratejiler barındıran sistemlere kontrol sistemi denir. Kontrol sistemi 3 ana birimden oluşur: Giriş, kontrol sistemi elemanları, çıkış. Kontrol sisteminin elemanları aşağıdaki şekil 4.1’de gösterilmektedir.

4.1 Küresel Robotun Simülasyonu

Küresel mobil robotun simülasyonu için geliştirilen yöntem şu şekilde olacaktır. Daha önceki bölümde modellediğimiz küresel mobil robotta kontrol edilmesi gerekli iki tahrik büyüklüğü bulunmaktadır. Bunlardan ilki küresel robotun şaftı üzerinde bulunan kaydırıcı tahrikli mekanizma, ikincisi ise küresel robotun şaftına bağlı bulunan döner sarkaçtır. Bu iki mekanizma küresel robotun yuvarlanma ve dönüş hareketini gerçekleştirmesini sağlar. Küresel robotun girişindeki hareketi gerçekleştirmek için durum vektörlerimiz $(\beta, \gamma, \alpha, L_m)$ ’dir. Çıkışında ise hareket sağlamak için gerekli kaydırıcı mekanizmaya uygulanacak kuvvet ve sarkaç mekanizması için tork verileri elde edilerek modelleme için gerekli sistem tanımlanması sağlanmış olmaktadır. β küresel robotun enine dönüş açısı, γ , küresel robotun boyuna dönüş açısı aynı zamanda eğilme açısıdır. L_m ise küre merkezi ile kaydırıcı mekanizmanın merkezi arasında şaft boyunca meydana gelen yer değiştirmedir. α ‘da sarkaç mekanizmasının tahrik sonucu oluşan şaft ile arasında yaptığı açıdır.

Kontrol sistemi elemanları ise kontrol edilen sistemin verilen amaca yönelik çıkışları üretmesi için gerekli olan kontrol işaretlerini üreten elemanlardır [68]. Bir sistemin girdi ve çıktısını, var olan bir sistem yada sistem modellemesi yapılması ile elde edilen giriş

ve çıkış verileri oluşturur. Sistemin nasıl olduğu belirlenirse sistemin davranışı da hakkında yorum yapılabilir [69] .

Model, bir sistemin fiziksel, matematiksel veya mantıksal gösterimidir. Simülasyon ise modelin tekrar tekrar uygulanmasıdır. Nesne ya da olgunun nasıl davranacağını gösterir. Simülasyonun modellenmesi fiziksel bir sistemin bilgisayarla işlenmesi ve matematiksel modelinin oluşturulup deneyler yerine kullanılması olarak tanımlanır.

Simülasyon, kompleks bir sistemi tasarlanmak ve analiz etmek için kullanılan bir uygulamadır. [70]. Simülasyonların kullanım alanları arasında, üretim, imalat planlama, ulaşım sektörü, iç lojistik sistemleri ve bilgisayar sistemleri gibi birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Simülasyon modellemesinin kullanım amaçları şu şekilde örneklendirilebilir, bir sistemin nasıl işlediğini anlamak, sistemi daha iyi işler hale getirmek, darboğaz analizleri yapmak, yeni kurulacak sistemin kurulmadan önce test etmek gibi amaçlar arasında gösterilebilir. Simülasyonun uygulama alanlarına bilgisayar sistemlerin donanımsal ve yazılımsal ihtiyaçlarının belirlenmesi, stok sistemleri için sipariş yöntemlerinin oluşturulması ve finansal ve ekonomik sistemlerin analiz verilebilir [70]. Simülasyon modellenmesinin avantajları arasında öngörüye imkân vermesi, sistemde riski azaltması, aksamayı önlemesi, veri toplamayı desteklemesi, tasarım iyileştirmeleri yapması ve bütün sürecin performansını gözden geçirmesi sayılabilir [69]. Simülasyonun birçok avantajı olmasına rağmen de bazı dezavantajları vardır. Dezavantajı olarak, sistem simülasyonunun girişi hatalı olursa yanlış sonuç verebilmesi, simülasyonun karmaşık problemler zor çözümülemesi ve simülasyon modellerinin geliştirilmesin zor olması söylenebilir.

Simülatör mevcut bir sistemin davranışını ve durumlarını gerçeğe yakın şekilde yazılımsal, donanımsal ve grafiksel elde eden araçtır. Simülatör uygulamalarına örnek olarak bilgisayar oyunları verilebilir [71]. Simülatör gerçekte sistemde denenmesi mümkün olmayan konular ya da gerçek olmayan sistemlerin davranışlarının gözlenmesi ve incelenmesi için kullanılır. Simülatörler kurulumu maliyetli olsa da, bu sistemler kısa sürede kendini amorti ederek kara geçebilmektedir [72].

Simülatörün kullanıldığı örnek bir uygulama olarak endüstriyel robotik uygulamalarında kullanılan altı eksenli bir robot üzerine yapılan araştırmalar verilebilir. Bu araştırmalarda

daha önce dinamik modeli çıkarılan sistemler üzerine simülatör kullanılarak kontrol işlemleri test edilebilmektedir. Örnek bir araştırmada ABB firmasına ait IRB 140 robotun referans alınarak yapılmıştır [73]. Öncelikle dinamik modeli Newton-Euler kullanılarak elde edilmiştir. Robotun her bir eklem takımı için tork, konum ve hız değerleri eklem değişkenlerine bağlı olarak hesaplandıktan sonra simülasyon için matlab programı kullanılmıştır [73].

Mobil robotlar alanında da simülatör uygulamalarına rastlanılmaktadır. Hareketi, dört tahrik tekerliğine bağlı olan bir robot için konum kontrolünün yapıldığı araştırmalar mevcuttur. Örnek bir çalışmada mobil robotta sistem performansını amaçlayan ve gerçek zamanlı davranışını tahmin etmek için kullanılan Gazebo simülatörü ve Robot İşletim Sistemi (ROS) kullanılmıştır. Tank sürürlü mobil robot modellenmiş ve simüle edilmiştir [74].

Başka bir çalışmada iki eklemlili bir scara robot manipülatörünün değerleri hesaplanmıştır Tork yöntemi ile noktadan noktaya yörünge kontrolü yapılmıştır. Manipülatöre ivme referansı vermeden gideceği noktadan diğer noktaya büyük doğrulukla gitmesi sağlanmış ve noktadan noktaya transfer olayı gerçekleştirilmiştir [75].

Simülasyon işleminde kullanılan matematiksel modellerin elde edilmesinde ilk akla gelen yol dinamik denklemlere temel fiziksel kanunlardan yola çıkarak ulaşılmasıdır. Bu yöntem literatür de beyaz kutu yaklaşımı olarak bilinmektedir [76]. Bu yöntemin en büyük dezavantajı uygulamada karmaşık olan ve anlaşılması zor bir sistem için model oluşturulması zordur. Ayrıca pratiğe geçildiği zaman modelin içyapısını anlamak zaman alabilir ve çok daha fazla maliyetli olması durumu söz konusudur [76]. Bu sistemde modellenecek tüm fiziksel değişimlerin denklemlerinin birbirleri ile uyumlu olarak çözümleri gerekmektedir.

4.2. Dinamik Modelin Simülasyonu

Bu çalışmada küresel robotun hareketini ve nasıl davranacağını belirlemek için kinematik ve dinamik denklemleri bir önceki bölümde elde edilmiştir. Elde edilen dinamik modelde robotun hareketini tanımlayan genelleştirilmiş koordinatlar ve hızlar kümesi $q = [\beta, \alpha, \gamma, L_m]$ 'dir. Elde edilen sisteme ait dinamik denklemler aşağıdaki formda sunulmuştur.

$$\tau = M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \quad (92)$$

Denklemden verilen terimlerin aşağıda büyüklükleri temsil edilmektedir

M = Atalet matrisidir. Sistem dinamikleri koordinatlarının ve ivmelerinin çarpımı sonucu elde edilir. Sarkaca ve kaydırıcı mekanizmayı hızlandırmak için gereken torku verir.

$\ddot{q}$ = ivmedir.

C = Coriolis terimidir. Küresel robota etki eden jiroskopik ve diğer kuvvetleri temsil eder.

$\dot{q}$ = hızdır.

G = yerçekiminden kaynaklanan torku temsil eder.

$\tau(q, \dot{q}, \ddot{q})$ fonksiyonu istenilen hız, pozisyon ve ivme profilindeki hareketleri gerçekleştirebilmek için robota uygulanması gereken torku hesaplamaya yarayan fonksiyondur.

Diğer bir ifade ile sistemin istenen hareketi gerçekleştirmesi için verilen dış kuvvetlerin bir kısmı, atalet bileşenlerini yenmeye, bir kısmı coriolis ve merkez kaç bileşenlerini yenmeye, bir kısmı yerçekimi etkisini yenmeye ve bir kısmıda hareket esnasında kısıtların sağlanması için gerekli olana kuvveti yenmeye harcanmaktadır. Özetle bu dış kuvvet uygulandığında, sistem tüm dinamik etkileri göz önünde bulundurarak bir hareket gerçekleştirmiş olur.

Denklemden ifadenin integralini alabilmek için bu ifade yeniden düzenlenir ve sonuçta $\ddot{q}$ için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilir.

$$\ddot{q} = \frac{(\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q))}{M^{-1}(q)} \quad (93)$$

$\ddot{q}$ = ifadesinin zamana göre integrali alınır $\dot{q}$ ifadesini verir.

$$\dot{q} = \int \ddot{q} dt \quad (94)$$

$\dot{q}$ = ifadesinin zamana göre integrali alınır q ifadesi elde edilir.

$$q = \int \dot{q} dt \quad (95)$$

Bu denklem dizisine ileri dinamik denir. İleri dinamik robota uyguladığımız torku konum, hız ve ivmeye bağlayan bir fonksiyondur. Bu dinamik denklemler simülasyon yapmak için kullanılır. Robota uygulanacak torklar ve kuvvetler bilinirse robotun izleyeceği q , $\dot{q}$, $\ddot{q}$ noktalarında zamana bağlı fonksiyonlar hesaplanabilir. Bu işlemlerin sonucunda sistemin belirli bir süre içerisinde göstereceği tepkiler simüle edilebilmektedir.

Çoğu zaman bu dinamik denklemler türevsel ifadeler barındırmaktadır. Bu türevsel ifadelerin çözümü sayısal çözücüler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Sabit veya değişken adımlı olarak alternatifleri bulunan bu tekniklerin uygulanması diferansiyel denklemlerdeki başlangıç değer problemi olarak adlandırılmaktadır. Başlangıç değeri bilinen, tek değişkenli fonksiyonların türevlerini ilişkilendiren diferansiyel denklemleri çözme tekniğine literatürde ilk değer problemi denilmektedir [77].

Dinamik denklemi çıkarılan bir sistemi simüle etmek için endüstriyel fizik simülatörleri ve integrasyon yaklaşımı kullanılabilir. Sistem dinamiği bilinen bir sistemin hızlı ve doğru bir şekilde çözülebilmesi integrasyon işlemi ile gerçekleşebilir. İntegrasyon yaklaşımında endüstriyel simülatörlerin aksine programlanması ve yorumlanması daha kolaydır. Öte yandan integrasyon işleminde kısıt denklemlerinin sisteme uygulanması zordur. Kısıt parametrelerinin sisteme dikkatli bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

İntegrasyon yaklaşımında sistemde bulunan değişkenlerin o anki başlangıç değerleri bilinmekte ve bir sonraki adımda oluşacak değerler integratör yardımı ile elde edilebilmektedir. Birçok tipi bulunabilen (ODE45, ODE23S, FOI, vs) bu integratörlerde temel mantık sistemin o an göstermiş olduğu temel eğim değerinin bilinmesi ve bir sonraki adımda oluşacak durum vektörünün bu değer üzerinden rekürsif olarak hesaplanması temeline dayanmaktadır. Sıradan Diferansiyel Denklemler (ODE'ler), Diferansiyel Cebirsel Denklemler (DAE'ler), Kısmi Diferansiyel Denklemler (PDE'ler), doğrusal ve doğrusal olmayan denklem sistemlerini kullanıcı müdahalesi olmadan direk algılar ve çözer [78]. Adi Diferansiyel Denklemler mühendislik ve fizik probleminde en çok karşılaşılan matematik modellerdir [79].

Endüstriyel fizik simülatörleri karmaşık sistemleri birinci derece diferansiyel denklem takımı haline getirip bunları sabit veya değişken zamanlı bir çözücü yapısı ile integre ederek çözüm bulmaya çalışır. Örnek bir endüstriyel fizik simülatörü olan Mcd (Mekatronik Konsept Tasarımı) simülatör çalışmasında rijit cisimlerde kinematik eklemleri tanımlanarak robotun istenilen şekilde hareket etmesi gerçekleştirilir [80]

4.3. Küresel Robota Ait Dinamik Modelin Simülasyonu

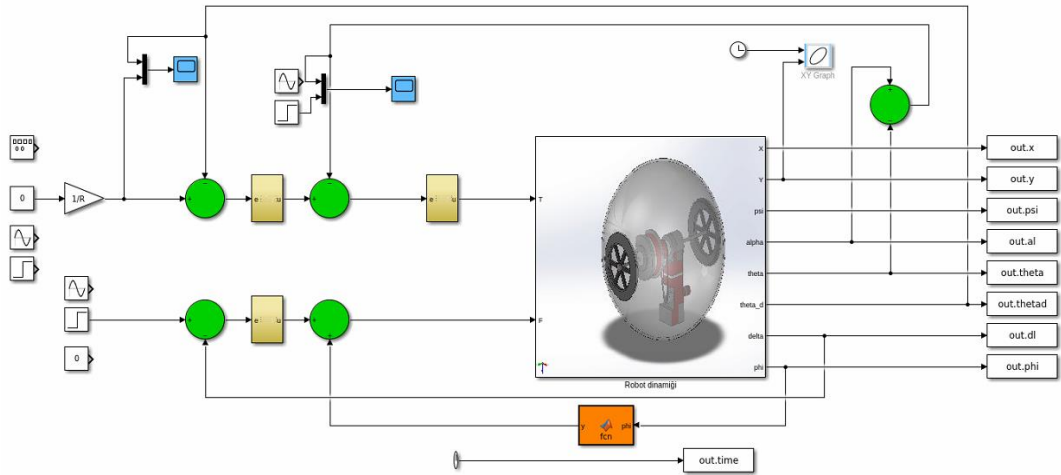
İntegratör tabanlı simülatörlerin altyapısında kullandığı temel fonksiyonlar en temelde üçüncü bölümde elde edilen matematiksel ve diferansiyel denklem barındıran modellere dayanmaktadır. Bu bölümde daha önce elde edilen dinamik modelin belirli kısıtlar altında nasıl simüle edileceği anlatılmaktadır.

4.3.1 Küresel Robotun Kontrolü

Küresel robotun bir düzlem üzerindeki hareketini tanımlamak için dört adet durum vektörü $q = [\beta, \alpha, \gamma, L_m]$ kullanılmıştır. Bu yüzden sistem dinamiğinin iki tahrik sinyali ve dört durum değişkeni arasındaki ilişkiyi tamamlayacak şekilde olması gerekmektedir. Küresel robotunun simülasyonunu gerçekleştirmek için küresel robotun dönme açısal hızı $\dot{\beta}$ ve kaydırıcı yer değiştirme L miktarları için sabit değerler belirlenmiştir. Sarkaç mekanizmasına uygulanacak T değeri ve kaydırıcı mekanizmaya uygulanacak F değerini uygulamak için dinamik kontrolör kullanılmıştır. Bu çalışmadaki küresel mobil robotun simülasyonunu gerçekleştirilirken ikinci derece bir integratörden faydalanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen simülatör ile iki girişe uygulanan farklı dış kuvvetlere göre sistem durum değişkenlerinin nasıl bir yol izlediği gözlemlenebilmektedir.

Sarkaca uygulanan tork ve kaydırıcıya uygulanan kuvvet değerlerini kontrol edebilmek için PID kontrol kullanılmıştır. Şekil 4.2' de verilen kontrol diyagramında mafsala uygulanacak torkun hesaplanması için iki adet PID kontrolörden faydalanılmıştır. Sistem girişine yakın olan ilk kattaki PID kontrolör, sarkaç açısını küre kabuğuna göre sabit tutmaya yarar. Bunun önünde ki ikinci katman PID'de ise ilerleme hızını sabit tutmak için ihtiyaç duyulan mafsal açısının hesaplanması işlemi gerçekleştirilmektedir.

Sistemin sağa ve sola hareketinin kontrol etmek için küre düzlemine göre yatay ekseninde bulunan bir şaft üzerinde kayar bir ağırlık bulunmaktadır. Robotun ileri yöndeki hareketi esnasında bu ağırlığın sağa veya sola kaydırılması durumunda robotun açısal konumu da değişecektir. Dolayısı ile bu ağırlığın yatay pozisyonu kontrol edilirse robotun açısal yönlenmesi de kontrol edilmiş olur. Bu sebepten dolayı sistemin açısal yönlenmesi ölçülerek çıkış referans bir değerle karşılaştırılmakta ve hata bir PID yardımıyla kayan kaydırıcı mekanizmaya uygulanacak kuvveti belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Küresel robot eğildiği zaman kaydırıcının kaymasını önlemek için yerçekimine karşı $gm_k \sin(\gamma)$ fonksiyonu kaydırıcı PID kontrolör çıkışında yer değiştirme hatasını telafi edecek şekilde eklenmiştir.

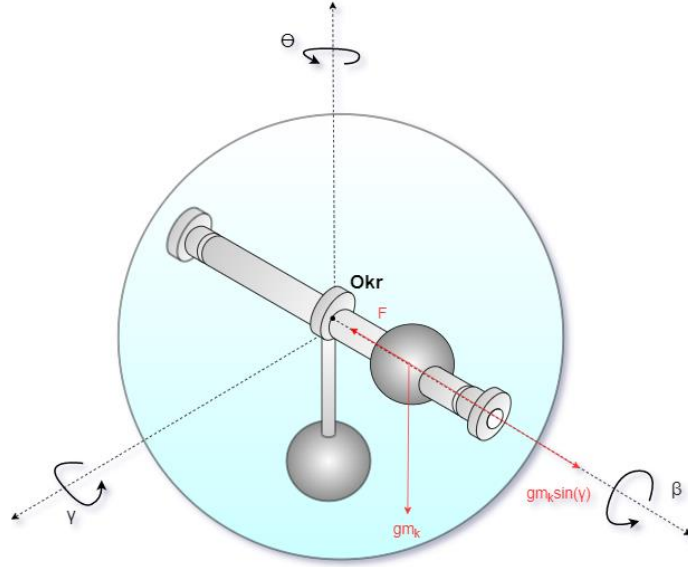


Şekil 4.2. Küresel bir robotun dinamik kontrolör planı.

4.3.2 Kaydırıcı Mekanizmaya Eklenen Ağırlığın Kompanzasyonu

Küresel robotun sağa ve sola hareketi, kaydırıcı mekanizmanın yer değiştirmesi ve buna bağlı olarak robotun ağırlık merkezinin değişmesiyle gerçekleşir. Kaydırıcı mekanizmanın yer değiştirmesi, uygulanan F kuvvetine bağlı olarak belirlenmektedir. Ağırlık merkezinin yer değiştirmesi ise robotun eğilmesine neden olur ve bu durum kaydırıcı mekanizmaya yerçekimi kuvveti etki etmesine neden olmaktadır. Şekil 4.3' de görüldüğü üzere kaydırıcı mekanizmasının yer değiştirmesi sonucu oluşan yer çekimi kuvveti görülmektedir. Kaydırıcı mekanizmanın kaymasını önlemek ve yer değiştirme

hatasını telafi etmek için robot kontrol edilirken $gm_k \sin(\gamma)$ fonksiyonu kontrolöre eklenmiştir.

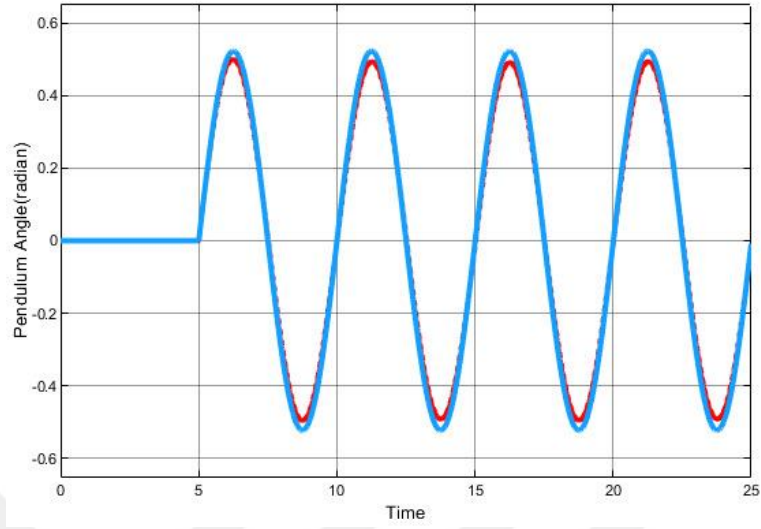


Şekil 4.3. Kaydırıcı mekanizmada yerçekimi yönünde oluşan kuvvet

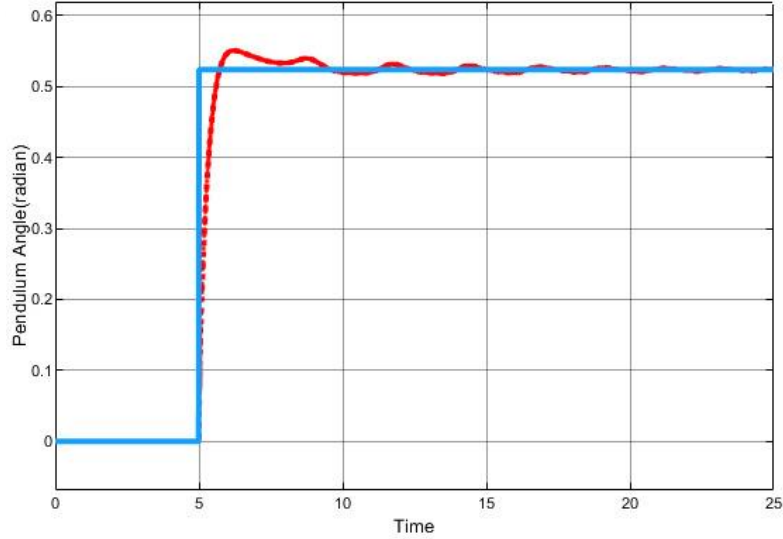
4.3.3 Sarkaç Açısının Etkisinin İncelenmesi

Kontrolör, bir sistemin davranışını yönlendiren ve istenen hedeflere ulaşmasını sağlayan yazılım programıdır. Kontrolörler, geri besleme mekanizmalarıyla birlikte çalışarak sistemin istenen çıkışlarını elde etmek için girişleri düzenler ve sistem parametrelerini ayarlar. Kontrolörler farklı tiplerde olabilir. Bu robotta kontrolör olarak PID (Proportional-Integral-Derivative) kullanılmıştır. Sarkaca uygulanan torkun kontrol edilebilmesi için iki adet PID kontrolörden faydalanmıştır. İki adet PID kontrolör için P katsayısı 10, I katsayısı 5 ve D katsayısı 1 olarak seçilmiştir.

Robot sarkaç mafsalları için uygulanan Step ve Sinüs sinyal girişi ile çıkış mafsalları açısının karşılaştırılması Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, giriş sinyaliyle çıkış sinyali arasında bir senkronizasyon ve uyum olduğu gözlemlenmektedir. Giriş sinyalindeki değişimlere paralel olarak çıkış sinyali benzer bir davranış sergilemektedir, yani çıkış sinyali giriş sinyalini takip etmektedir. Bu durum, sistemin istenen yanıtı doğru bir şekilde verdiğini ve girişin etkisine bağlı olarak çıkışın düzenli bir şekilde değiştiğini göstermektedir.



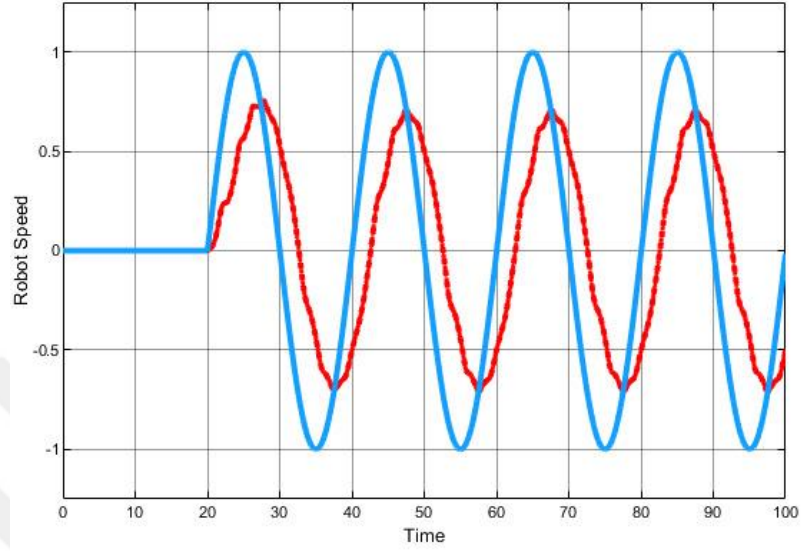
Şekil 4.4. Robot sarkaç mafsal açısına uygulanan Sinüs sinyali girişi ile çıkış mafsal açısının karşılaştırılması



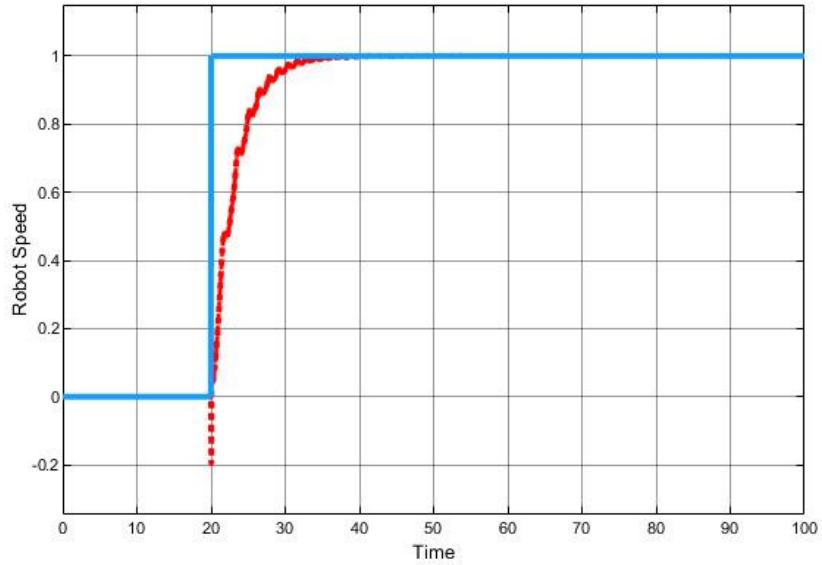
Şekil 4.5. Robot sarkaç mafsal açısına uygulanan Step sinyali girişi ile çıkış mafsal açısının karşılaştırılması

Robot sarkaç hızı için uygulanan Step ve Sinüs sinyal girişi ile çıkış hızının karşılaştırılması şekil 4.6 ve şekil 4.7’ da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde robotun hızının zamana göre değişimi, sarkaç hızı ile benzerlik göstermektedir. Robotun hızındaki

artışlar ve azalmalar, sarkacın hızındaki benzer değişimlere paralel olarak gerçekleşmektedir.



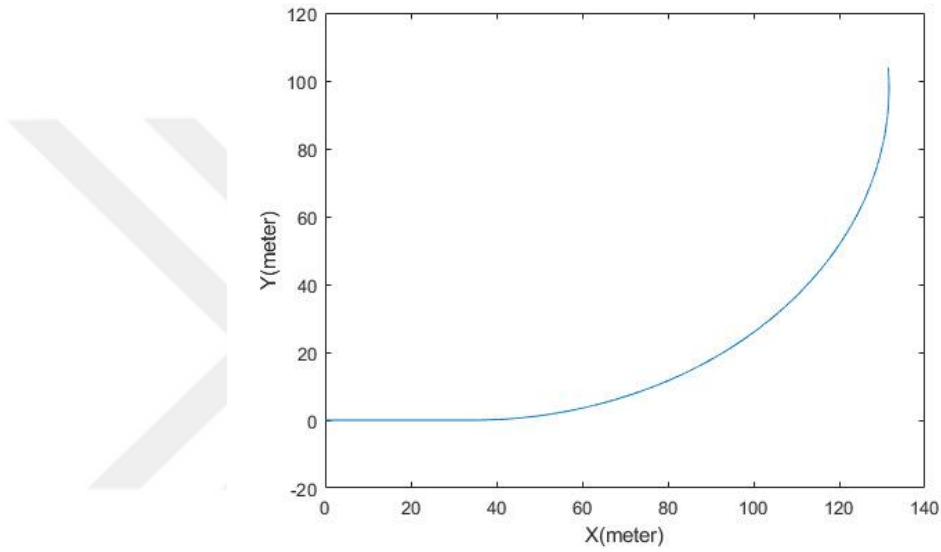
Şekil 4.6. Robot sarkaç hızı için uygulanan Sinüs sinyali girişi ile çıkış hızının karşılaştırılması



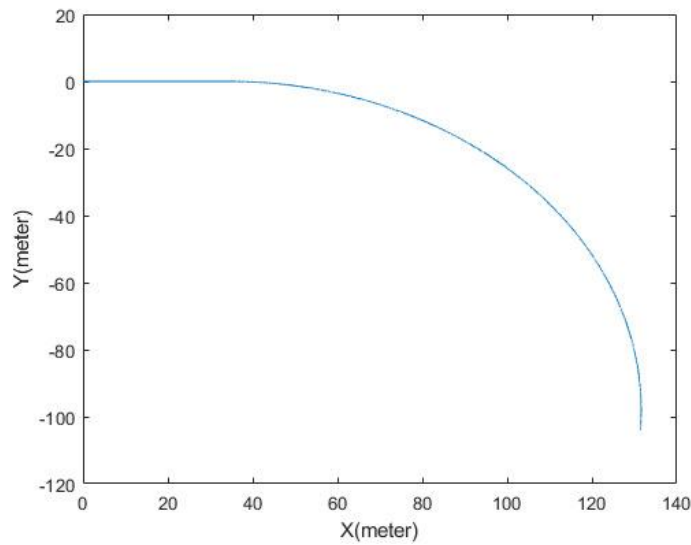
Şekil 4.7. Robot sarkaç hızı için uygulanan Step sinyali girişi ile çıkış hızının karşılaştırılması

4.3.4 Kayar K t le Konumunun Etkisinin İncelenmesi

Kaydırıcı mekanizmanın Y ekseninde sağa ve sola dönüş hareketinin grafiksel gösterimi Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ekspansiyel fonksiyon 20. Saniyeden sonra sola dönüş için +0.01 olarak, sağa dönüş için -0.01 olarak verilmiştir. Kaydırıcıya uygulanan kuvvetin kontrol edilebilmesi için PID kontrolörden faydalanılmıştır. PID kontrolör için P katsayısı 8, I katsayısı 4 ve D katsayısı 1 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.8. Kaydırıcı mekanizmanın Y ekseninde sola dönüş hareketinin grafiksel gösterimi



Şekil 4.9. Kaydırıcı mekanizmanın Y ekseninde sağa dönüş hareketinin grafiksel gösterimi

Robot sarkaç mafsal açısı için uygulanan Step ve Sinüs sinyal girişi ile çıkış mafsal açısının karşılaştırılması ve robot sarkaç hızı için uygulanan Step ve Sinüs sinyal girişi ile çıkış hızının karşılaştırılması grafikleri verilmiştir. Sarkaç mafsal açısı için incelenen grafiklerde, çıkış sinyalinin giriş sinyaline paralel bir şekilde değiştiği görülmektedir. Bu durum, sistemin doğru yanıtı verdiğini ve girişin etkisiyle çıkışın düzenli bir şekilde değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, step sinyali uygulandığında grafik kararlı bir duruma ulaşmaktadır. Sarkaç hızı için uygulanan grafikler incelendiğinde robotun hızının zamana göre değişimi, sarkaç hızı ile benzerlik göstermektedir. Robotun hızında meydana gelen artış ve azalmalar, sarkacın hızındaki benzer değişimler ile paralel olarak gerçekleşmektedir. Sarkaç mafsal açısında uygulanan step sinyalinde olduğu gibi sarkaç hızı için step sinyali uygulandığı zaman da grafiğin kararlığa ulaştığı görülmektedir. Kaydırıcı mekanizmanın da Y ekseninde sağa ve sola dönüş hareketleri grafiklerde görülmektedir.

4.4 Matlab Simulink / SimMechanics

Robotlar, tasarımındaki mekatronik yaklaşımı dikkate alındığında robot mekaniği ve tahrik mekanizmaları ile oldukça karmaşık elektromekanik sistemlerdir. Bir robotun kontrolörü tasarlanırken, her bir motoru için ihtiyaç duyulan tork ve dönme açısının hesaplanması gerekir. Bu işlemin yapılabilmesi için her bir alt sistemin matematiksel modelini elde edilmesi gerekmektedir [81].

Matlab Simulink SimMechanics, Matlab Simulink 'in bir uzantısı olarak tasarlanmıştır ve mekanik sistemlerin 3 boyutlu modellenmesine, simülasyonu ve analizine imkân sağlamaktadır. SimMechanics, mekanik sistemleri tasarlamak ve en uygun hale getirmek için kullanılır. Birbirine bağlı bloklar biçimindeki SimMechanics program şeması, robotun geometrik ve kinematik ilişkilerine sahip fiziksel bileşenlerin karşılıklı olarak nasıl birbirine bağlı olduğunu göstermektedir. SimMechanics programı, mekanik sistemleri gövdelere ve eklemlere göre modellemeyi, hareketlerini simüle etmeyi, yapıyı kolayca değiştirmeyi, sistem parametrelerini optimize etmeyi ve sonuçları Simulink ortamında analiz etmeyi sağlar [81].

SimMechanics aracı ile SolidWorks CAD montajları birbirine entegre halinde kullanılabilir. Solidworks CAD Montajlarının SimMechanics simülasyon ve tasarım

ortamına sorun olmadan entegre olması SimMechanics' in mühendislik analizlerinin daha doğru yapılmasına imkan sağlamaktadır.

Bu bölümde daha önce Matlab Simulink ile simülasyonu gerçekleştirilen kaydırıcı ve sarkaç tahrikli küresel robotun, SolidWorks programı kullanılarak CAD modeli geliştirilmesinin ardından SimMechanics ile 3 Boyutlu simülasyonu tanıtılacaktır.

4.4.1. Küresel Robotun SimMechanics ile Simülasyonu

Küresel robotların mevcut hareket mekanizmaları genellikle kontaklı bir yapıya veya birden fazla eksenle sarkaç içeren karmaşık mekanizmalara sahiptir. Bu tür kontaklı yapılar ve birden fazla eksenle sarkaç içeren mekanizmalar kullanıldığında, bazı sorunlar ortaya çıkabilir. Özellikle zamanla, kontak noktalarında ayrılma veya kayma gibi problemler yaşanabilir. Küresel robotların karmaşık mekanizmaları nedeniyle tasarımı ve kontrolü zordur. Kontak noktalarında kayma veya ayrılma gibi sorunların önlenme mekanizmasının doğru bir şekilde hesaplanması ve kontrol edilmesini sağlar.

Klasik integratör tabanlı simülatörlerin karmaşık dinamik durumları, özellikle zamanla değişen kontak ilişkilerini dikkate alması zordur. Bu sebeple klasik integratör tabanlı simülatörler karmaşık dinamik durumları doğru bir şekilde modellemekte ve hesaplamakta zorlanır. Bu durumda da simülasyon sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilir. Zamanla değişen kontak ilişkilerini dikkate alan simülasyonlar için daha gelişmiş ve özelleştirilmiş simülasyon araçları kullanmak önemlidir. Bu araçlar, kontak ilişkilerini gerçekçi bir şekilde modeller ve simülasyon sürecinde dinamik durumların doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar.

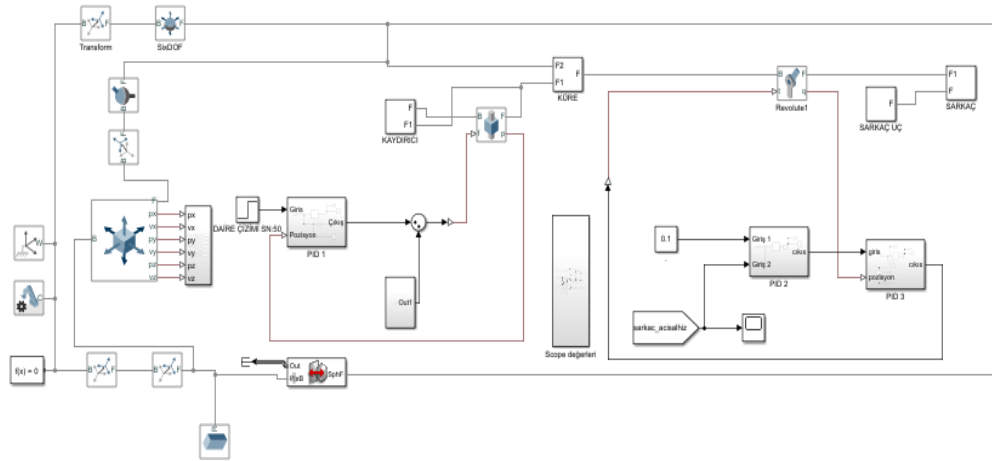
Hareketli bacağın robota etkisini gözlemlemek için, kontak ilişkilerinin de dikkate alındığı bir simülasyon yapmak için Matlab/SimMechanics kullanılarak geliştirilmiş bir simülatörden yararlanılmıştır. Matlab/SimMechanics, karmaşık mekanik sistemlerin simülasyonu için kullanılan güçlü bir araçtır.

Bu simülasyon ortamında, hareketli bacak mekanizmasının robot üzerindeki etkisini daha gerçekçi bir şekilde gözlemlemek mümkündür. Simülasyon sırasında, robotun zemine temas eden noktalarındaki kontak ilişkileri modellemeye dâhil edilir. Bu sayede, hareketli

bacak mekanizmasının robot üzerindeki etkileri, kontak noktalarındaki kuvvetler ve kayma miktarları gibi faktörler üzerinden analiz edilebilir.

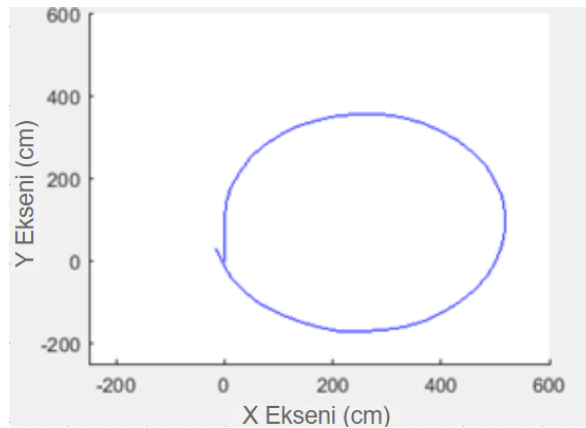
SolidWorks ile küresel robotun tasarımı gerçekleştirilmiştir ardından SimMechanics'e entegre edilmiştir. SimMechanics de kaydırıcı mekanizmanın hareketini tanımlamak için Prismatic Joint bloğu kullanılmıştır. Sarkaç mekanizmasının hareketini tanımlamak için de Revolute Joint kullanılmıştır. Prismatic Joint ile mil üzerinde kaydırıcı mekanizma öteleme hareketini gerçekleştirmektedir. Revolute Joint ile de sarkaç mekanizması bağlı olduğu mil etrafında dönme hareketini gerçekleştirmektedir. Zemin ile küre arasındaki kontak ilişkisini sağlamak için ise Matlab Contact Force Kütüphanesinden alınan Sphere to Plane Force bloğu kullanılmıştır. Bu bloğun içyapısı ayrıntılı tanıtılacaktır.

Burada sarkaç mekanizmasına tork, kaydırıcı mekanizmaya ise kuvvet uygulanmaktadır. Bu çalışmadaki küresel mobil robotun simülasyonunu gerçekleştirilirken iki girişe uygulanan farklı dış kuvvetlere göre sistem durum değişkenlerinin nasıl bir yol izlediği gözlemlenebilmektedir. Sarkaca uygulanan tork ve kaydırıcıya uygulanan kuvvet değerlerini kontrol edebilmek için PID kontrol kullanılmıştır. Şekil 5.1' de verilen blok diyagramında sarkaç mekanizmasına uygulanacak torkun hesaplanması için iki adet PID kontrolör kullanılmıştır. PID3 ile gösterilen kontrolör, sarkaç açısını küre kabuğuna göre sabit tutmaya yarar. PID2 de gösterilen kontrolör ise ilerleme hızını sabit tutmak için ihtiyaç duyulan mafsalsal açısının hesaplaması işlemi gerçekleştirilmektedir. Sistemin sağa ve sola hareketinin kontrol etmek için küre düzlemine mil üzerinde kayar bir ağırlık vardır. Robotun ileri yöndeki hareketi esnasında bu ağırlığın sağa veya sola kaydırılması durumunda robotun açısal konumu da değişecektir. Dolayısı ile bu ağırlığın yatay pozisyonu kontrol edilirse robotun açısal yönlenmesi de kontrol edilmiş olur. Bu sebepten dolayı sistemin açısal yönlenmesi ölçülerek çıkış referans bir değerle karşılaştırılmakta ve hata bir PID1 ile gösterilen kontrolör yardımıyla kayan kaydırıcı mekanizmaya uygulanacak kuvveti belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Önceki bölümde Matlab/Simulink ile yapılan simülasyonda olduğu gibi küresel robot eğildiği zaman kaydırıcının kaymasını önlemek için yerçekimine karşı $gm_k \sin(\gamma)$ fonksiyonu PID1 kontrolör çıkışında yer değiştirme hatasını telafi edecek şekilde eklenmiştir.



Şekil 4.10. SimMechanics 'teki kaydırıcı ve sarkaç tahrikli robotun 3 boyutlu mekanik bileşenleri ve bunlarla karşılık gelen bloklarla gösterimi

Aşağıda şekil 5.2'de kaydırıcı mekanizmaya step sinyali ve sarkaç mekanizmasına constant sinyali girilmesi sonucu robotun dairesel hareketi gösterilmiştir. Step sinyali, bir anda belirli bir değere geçen bir sinyal veya fonksiyondur. Adım adım artan veya azalan bir karakteristiğe sahip olan bu sinyal, aniden bir seviyeden diğerine geçer. Adım fonksiyonu veya basamak fonksiyonu olarak da adlandırılır. Burada Step sinyali 5. Saniye kadar sabit, beşinci saniyeden sonra 25 değeri verilmiştir. Constant sinyali, sürekli olarak aynı değeri temsil eden bir sinyal veya fonksiyondur. Bu sinyal, belirli bir süre boyunca veya tüm zaman boyunca sabit bir değere sahiptir. Constant sinyali olarak ise 0.1 değeri verilmiştir. PID 2 ve PID 3 kontrolörler için P katsayısı 10, I katsayısı 5 ve D katsayısı 1 olarak seçilmiştir. PID1 kontrolör için P katsayısı 8, I katsayısı 4 ve D katsayısı 1 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.11. SimMechanics 'teki X-Y Düzleminde robotun dairesel hareketi

Matlab/Simulink'de kullanılan integratör tabanlı simülatör ve Matlab/SimMechanics'de kullanılan simülatör arasındaki karşılaştırmalar sonucunda, iki simülatörün benzer sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırma, integratör tabanlı simülasyonun doğruluğunun SimMechanics ile gerçekleştirilen simülasyonla güvenilir bir şekilde doğrulandığını ortaya koymaktadır.

SimMechanics, sert cisimlerin mekaniğini modellemek için güçlü bir araç sunar. Herhangi bir matematiksel açıklama kullanmadan birçok eklemli oldukça karmaşık sistemlerin dinamiklerinin ve kinematiğinin modellenmesi için uygundur. Bu avantajlı özellikler için, robotik sistemlerin tasarımının ilk aşamasında, özellikle yeni modelin tasarımını tekrarlamaya gerek kalmadan belirli gövdelerin parametrelerini ve boyutlarını değiştirmenin basitliği nedeniyle sıklıkla kullanılır.

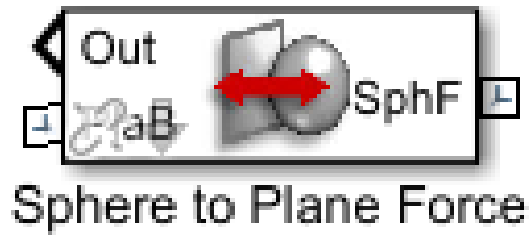
4.4.2 Zemin ile Robot Arasındaki Kontak İlişkisinin Simülasyonu

Bu tez çalışmasında hareketli kabuk mekanizması tasarlanmıştır. Hareketli bacak mekanizması hareketi esnasında zemin ile arasında kontak kuvveti oluşmaktadır. Oluşan bu kontak kuvvetlerinin klasik integratör tabanlı sistemlerde dâhil edilmesinin zordur. Bu nedenle kontak ilişkilerini göz önünde bulundurarak hareketli bacağın robota etkisini gözleyebilmek için Matlab/SimMechanics kullanılmıştır. Bu kısımda Matlab/SimMechanics kontak kütüphanesi ayrıntılı tanıtılacaktır.

Matlab Contact Force Library, Matlab Simulink kullanıcıları tarafından kullanılabilen açık kaynaklı bir kütüphanedir. Bu kütüphane, temas kuvvetlerinin hesaplanması için kullanılan matematiksel modellerin standartlaştırılması için tasarlanmıştır. Bu sayede, farklı mekanik sistemlerin analizi için farklı modeller oluşturmak yerine, bu kütüphanedeki fonksiyonlar kullanılarak standart bir yaklaşım benimsenebilir.

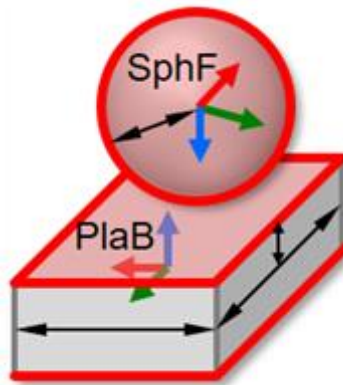
Matlab Simulink SimMechanics Contact, SimMechanics 'in bir parçasıdır ve 3D mekanik sistemlerin analizinde kullanılır. Mekanik sistemlerdeki temas noktalarında oluşan sürtünme, çarpışma, eğilme ve esneme kuvvetlerinin hesaplanmasına izin verir. Bu kuvvetler, Simulink modelleri ile entegre edilerek, mekanik sistemlerin davranışının daha gerçekçi bir şekilde simüle edilmesini sağlar. Mekanik sistemlere örnek olarak araç fren sistemi veya robotik kol gibi sistemleri örnek verilebilir. Bu sistemler SimMechanics Contact ile daha gerçekçi bir şekilde simüle edilir ve analiz yapılabilir.

Contact Force kütüphanesi küresel bir yüzeyin düz bir yüzeye temas kuvvetlerini hesaplamak için kullanılan Sphere to Plane Force bloğunu içerir. Bu çalışmada kontak ilişkisini gerçekleştirmek için Sphere to Plane Force bloğu kullanıldı. Küresel yüzeyin düz bir yüzeye temas ettiği durumlarda, temas noktasında normal ve sürtünme kuvvetleri oluşur. Normal kuvvet, küresel yüzeyin düzlem yüzeye dik olan kuvvettir ve temas noktasının hızı ile birlikte hesaplanır. Sürtünme kuvveti ise temas noktasında yatay bir kuvvettir ve sürtünme katsayısı ve normal kuvvet ile birlikte hesaplanır.



Şekil 4.12. Sphere to Plane Force bloğu

Sphere to Plane Force bloğu, soft kontak ilişkilerinin modellenmesinde kullanılan bir bloktur. Soft kontak, iki yüzey arasında oluşan temas kuvvetlerinin, yüzeylerin esnekliği nedeniyle tamamen elastik olmadığı durumlarda gerçekleşen bir temas şeklidir. Yani, iki yüzey temas ettiğinde, yüzeylerin deformasyonu nedeniyle kuvvetler tamamen elastik olmayabilir ve bu nedenle temas kuvvetleri bir miktar enerji kaybıyla gerçekleşebilir. Bu durum, genellikle malzemelerin içindeki boşlukların varlığı veya yüzeylerin pürüzlü veya esnek olması nedeniyle meydana gelir.



Şekil 4.13. Sphere to Plane Force Bloğu gösterimi

Burada “Penetrasyon” terimi bir cismin diğ er bir cisme g  m  lme veya içine batma durumunu ifade eder. Küresel yüzeyin düz bir yüzeye teması sırasında, penetrasyon durumu meydana gelebilir. Yani, küresel yüzey, düzlem yüzeyin içine gömülebilir veya içine batabilir. Bu durumda, Matlab Sphere to Plane Force fonksiyonu penetrasyonu da hesaba katarak temas kuvvetlerini hesaplar. Penetrasyon genellikle negatif bir değ erle ifade edilir ve iki yüzey arasındaki minimum mesafenin negatif değ eridir.

Matlab'da Sphere to Plane Force fonksiyonunda bulunan "Penetration Vel" (penetrasyon hızı) terimi, bir kürenin bir düzlem yüzeyine girdiğ i durumda, kürenin düzlem yüzeyine olan penetrasyon derinliğ i ile birlikte hesaplanan hız bileşenini ifade eder. Yani, penetrasyon hızı, kürenin düzlem yüzeyine doğ ru ilerleme hızının, düzlem yüzeyine olan penetrasyon derinliğ i ile bölünmesiyle elde edilen bir değ erdir. Eğ er küre, düzlem yüzeyine girmiş e (penetrasyon hızı pozitif), fonksiyon küreye düzlem yüzeyinden itme kuvveti uygular. Eğ er penetrasyon hızı negatif e, küreye düzlem yüzeyinden çekme kuvveti uygulanır.

"Spr Force" terimi ise bir küre ve bir düzlem yüzeyi arasındaki temas kuvvetini hesaplamak için kullanılan bir kuvvet bileşenini ifade eder. "Spr" kelimesi, "spring" kelimesinin kısaltmasıdır. Yani, "Spr Force" bileşeni, kürenin düzlem yüzeyine doğ ru olan hareketini sınırlamak için oluşturulan ve yay etkisini modelleyen bir kuvvettir. Spr Force bileşeni ile sınırlandırılarak, simülasyon sonuçları daha doğ ru ve gerçekçi hale getirilir.

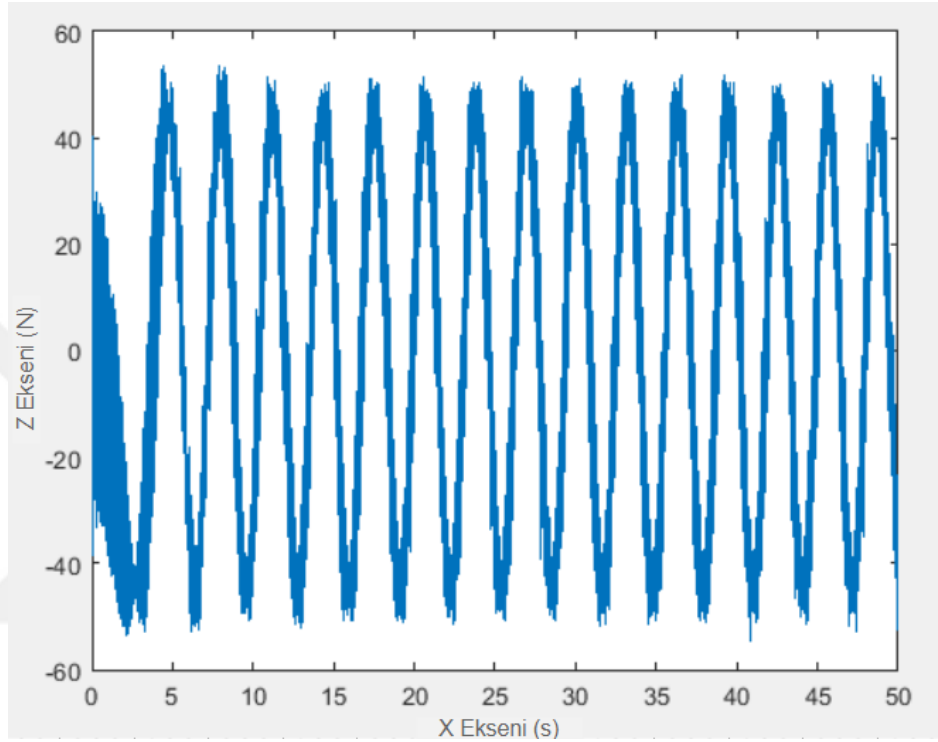
"Damp Force" terimi, bir küre ve bir düzlem yüzeyi arasındaki temas kuvvetlerinin hesaplanması sırasında kullanılan bir kuvvet bileşenini ifade eder. "Damp" kelimesi, "damping" kelimesinin kısaltmasıdır. Damp Force bileşeni, kürenin hareketine karşı bir s  n  leme kuvveti uygular ve böylece kürenin hareketi daha stabil ve düzgün hale getirilir.

"Normal Force" bileşeni, kürenin düzlem yüzeyine dik olan yönde etkili olan kuvveti ifade eder. Bu kuvvet, kürenin düzlem yüzeyine yapışmasını sağlar ve temas kuvvetini oluşturur. Kürenin penetrasyon hızına ve kürenin yüzey alanına bağlı olarak hesaplanır."

"Friction Force" bileşeni ise kürenin hareket yönüne paralel olarak etkili olan sürtünme kuvvetini ifade eder. Bu kuvvet, kürenin hareketini sınırlar ve kürenin düzlem yüzeyinde

kaymasını engeller. Kürenin penetrasyon hızına, sürtünme katsayısına ve kürenin yüzey alanına bağlı olarak hesaplanır.

Küresel robotun düzlem yüzeyi ile arasında uygulanan temas kuvvetinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 5.7 gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Küresel robotun temas yüzeyi ile arasında uygulanan FSph kuvvetinin zamana bağlı grafiksel gösterimi

Hareketli bacak mekanizması hareketi esnasında zemin ile arasında kontak kuvveti oluştuğunu ve oluşan bu kontak kuvvetlerinin klasik integratör tabanlı sistemlerde dâhil edilmesinin zorluğundan bahsedilmişti. Matlab/SimMechanics kontak kütüphanesinden Sphere to Plane Force fonksiyonunun kullanılarak zemin ile küresel robot arasında oluşan kuvvetlerden ayrıntılı olarak açıklanmıştır. FSph kuvveti, kürenin yüzeyine uygulanan kuvveti ifade eder. Bu kuvvet, kürenin düzlem yüzeyiyle temas halinde olduğu noktada, kürenin yüzeyine etki eden kuvvettir. Şekil 5.7 görüldüğü üzere küre hareket halindeyken kürenin düzlem yüzeyine uyguladığı kuvvet belli periyotlar arasında sürekli artıp azalmaktadır. Bu artış kürenin düzlem yüzeyine uyguladığı kuvvet arttıkça yani küre düzlem yüzeyine doğru hızlandıkça artmakta, küre düzlem yüzeyine daha az kuvvet uygulayıp yani düzlem yüzeyine doğru hızlanmıyorsa kuvvet azalmaktadır.

5. BÖLÜM

HAREKETLİ BACAK MEKANİZMASI TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Küresel robotlar günlük hayatta birçok yerde kullanılabilecek mobil robot türlerindedir. Küresel robotları diğer robotlardan ayıran en büyük özellikleri küresel bir geometrik yapıya sahip olmalarından kaynaklanır. Küresel robotların küresel geometrik yapısı her yönde hareket kabiliyeti sağlar. Küresel robot için tasarlanan hareketli bacak mekanizması ile küresel robot diğer küresel robotlardan farklı olarak engelleri geçebilecek, yokuş çıkabilecek, denge ve sürüş kontrolü bakımından diğer küresel robotlara göre daha kararlı olacaktır. Bacak mekanizması ile donatılmış küresel robotlar, daha çeşitli ve zorlu arazi koşullarında hareket edebilirler. Bu tez çalışmasında seçilen iki tahrik mekanizmalı küresel robotun üzerine, kabuk şeklinde hareketli bir bacak mekanizması tasarlanmış ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Hareketli bacak mekanizmasının tasarımı ve simülasyonu bu bölümde açıklanacaktır.

Tez çalışmasında seçilen iki tahrik mekanizmalı küresel robotun 4 bölümlerde simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçları verilmiştir. Bu küresel robotun seçilmesindeki neden şaftının sabit olması ve içerisinde kayma olmamasıdır. Seçilen küresel robotta bulunan tahrik mekanizması sabit bir şaft üzerine yerleştirilmiş doğrusal ve döner olmak üzere iki tahriklidir. Küresel robotta bulunan döner mekanizmaya mil bağlı bir sarkaç ile tork uygulanarak robotun ileri-geri yuvarlanma hareketi; mil üzerinde bulunan kaydırıcı mekanizma ise sağa-sola yuvarlanma yani dönme hareketi elde edilmiştir. Seçilen robotta iki tahrik mekanizması bulunması robotun kontrolün kolay olması sağlamıştır. Bununla birlikte seçilen bu küresel robot diğer mobil küresel robotlarda olduğu gibi yokuş çıkamamakta ve engel aşamamaktadır. Tasarlanan hareketli bacak mekanizması ile seçilen küresel robot engel aşabilmekte ve yokuş çıkabilmektedir.

Küresel robotlar için dezavantaj olarak değerlendirilen bu durum hareketli bacak mekanizması ile ortadan kaldırılmıştır.

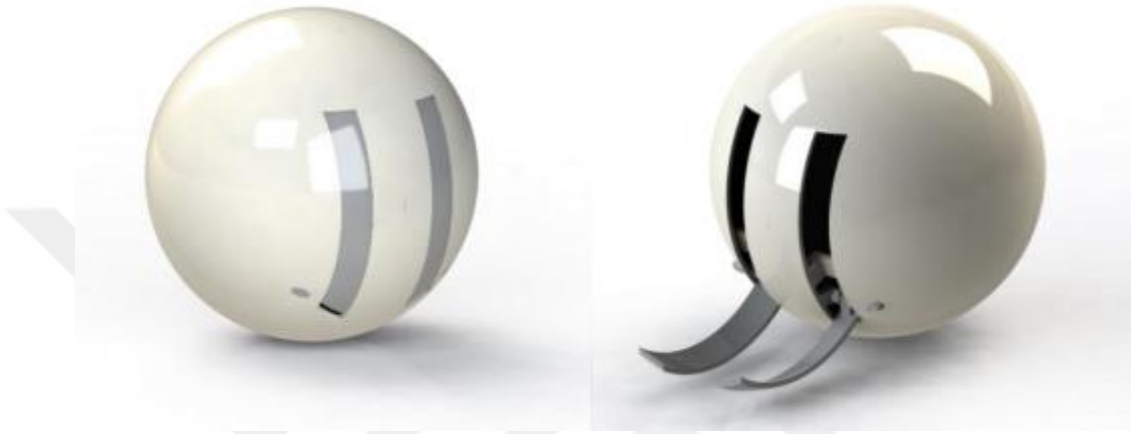
Dik yokuşlara tırmanmak ve engebeli arazilerde hareket etmek küresel robotlar için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu tür ortamlarda robotun hareket edebilmesi için dışarıdan bir yardıma ihtiyaç duyulur. Bu tez çalışmasında küresel robotun yokuş çıkabilmesi ve engel aşabilmesi için hareketli bir bacak mekanizması geliştirilmiş ve daha önce simülasyonu gerçekleştirilen iki tahrik mekanizmalı küresel robota kabuk olarak yerleştirilmiştir. Yeni tasarlanan hareketli bacak mekanizmasının simülasyonu Matlab Simulink / SimMechanics ile gerçekleştirilmiştir. Karmaşık dinamik durumların, zamanla değişebilen kontak ilişkileri gibi faktörlerin klasik integratör tabanlı simülatörlerde hesaba katılması oldukça zordur. Bu nedenle, hareketli bacağın robot üzerindeki etkisini gözlemlemek için kontak ilişkilerinin dikkate alındığı Matlab/SimMechanics ile geliştirilmiş bir simülatör kullanılmıştır. Kontak ilişkilerinin simülasyona dâhil edilmesi, hareketli bacak mekanizmasının robotun performansı üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmemizi sağlar. Hareketli bacak mekanizmasında bulunan bacakların zemin ile teması sırasında açılması, küresel robotun gövdesinin hızlı bir şekilde itilmesine ve bu sayede yokuş çıkmasını veya engel aşmasını sağlamaktadır.

5.1. Hareketli Bacak Mekanizması Tasarımı

Robotun 3 boyutlu modellemesi için SolidWorks programı tercih edilmiştir. Bu program, kolay kullanımı ve içerdiği statik ve dinamik analiz uygulamalarıyla 3 boyutlu modelleme açısından son derece kullanışlı bir araçtır.

Yuvarlanan küresel robota yerleştirilecek kabuktaki bacakların konumu ve yerleşimi robot dinamiği açısından önemli bir tasarım kriteridir. Tasarım kriteri olarak belirlenen küresel robotun yokuş çıkmasında performans artışı bu ayakların doğru ve koordine çalışması ile gerçekleştirilmiştir. Yokuş çıkma performansını artırmaya yönelik olarak tasarlanan yay şeklindeki ayaklar, robotun arkadan desteklenerek geri düşmesini engeller. Aynı zamanda bu ayaklar düz zeminde ilerlerken açılıp kapanma hareketi ile yörünge takibini kolaylaştırmaya yardımcı olacaktır. Bu ayakların yay şeklinde olması onlara esneklik kazandırarak hareketi sönümleyen bir etki oluşturacaktır. Robotun açılı olarak açılan ayakları sayesinde, yokuş tırmanışı sırasında farklı açılardaki yokuş eğimleri artık bir sorun olmaktan çıkacaktır. Benzer şekilde küresel robot engebeli arazide bir engel ile

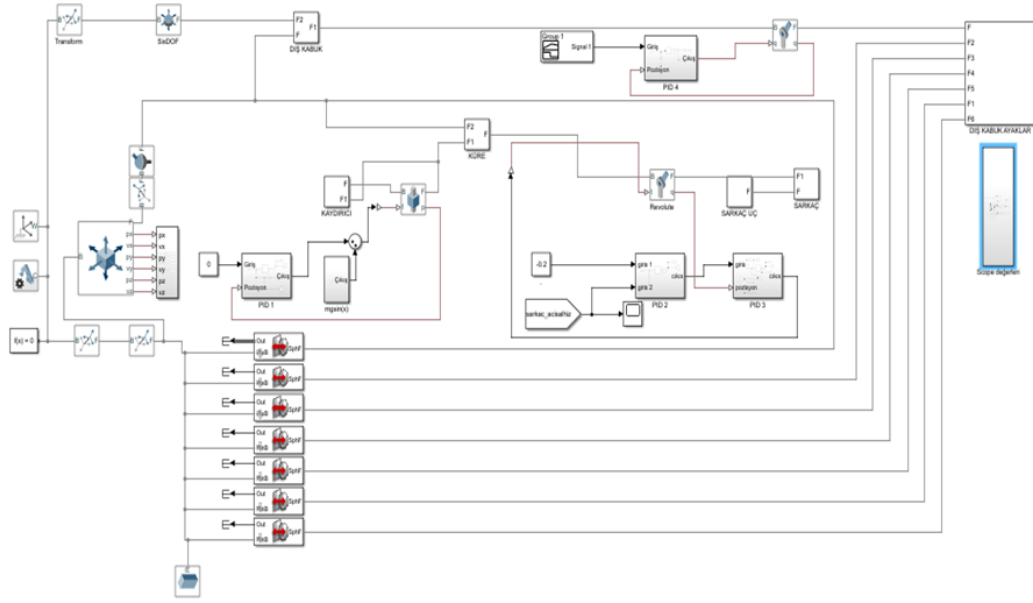
karşılaştığında robotun ayaklarının zemin ile temas ettiği sırada koordineli bir şekilde açılması sonucu zıplayacak ve engeli rahat bir şekilde aşabilecektir. Tasarımı gerçekleştirilen bacak mekanizması Şekil 6.1 'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Yuvarlanan küresel robotlarda hareketli bacak mekanizması tasarımı

5.2. Mekanizmanın Düz Zemin Üzerindeki Harekete Etkisinin Simülasyonu

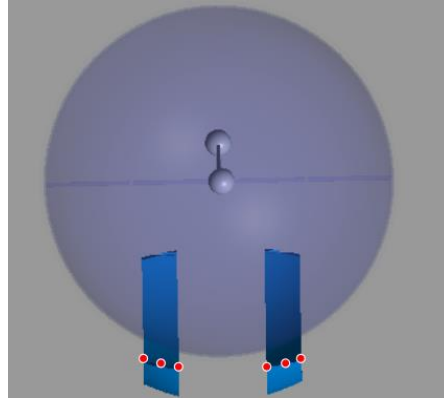
SolidWorks kullanılarak tasarlanan robot modeli, geometrik ve kinematik parametrelerle birlikte SimMechanics'e aktarılır. Bu entegrasyon süreci, tasarlanan küresel robotun SolidWorks modelini Matlab Simulink/SimMechanics ortamına aktararak, robotun simülasyon ve kontrol sistemlerini bir araya getirmeyi amaçlar. Şekil 6.2 de gösterildiği revolute joint bloğu ile hareket ettirilen bacaklar için PID 4 kontrolör bloğu kurulmuştur. PID kontrol bloğu ile bacakların açısının küresel robotta bulunan dış kabuğa göre kontrol edilmesini sağlar. Burada bacakların zemine temas ettikçe açılıp kapanmasını sağlamak için Signal Builder kullanılmıştır. Signal Builder ile zamana bağlı değişen sinyaller verilerek ayakların istenilen açılarda açılıp kapanması sağlanmaktadır.



Şekil 5.2. Yuvarlanan küresel robotlarda hareketli bacak mekanizmasının SimMechanics'deki 3 boyutlu mekanik bileşenleri ve bunlarla karşılık gelen bloklarla gösterimi

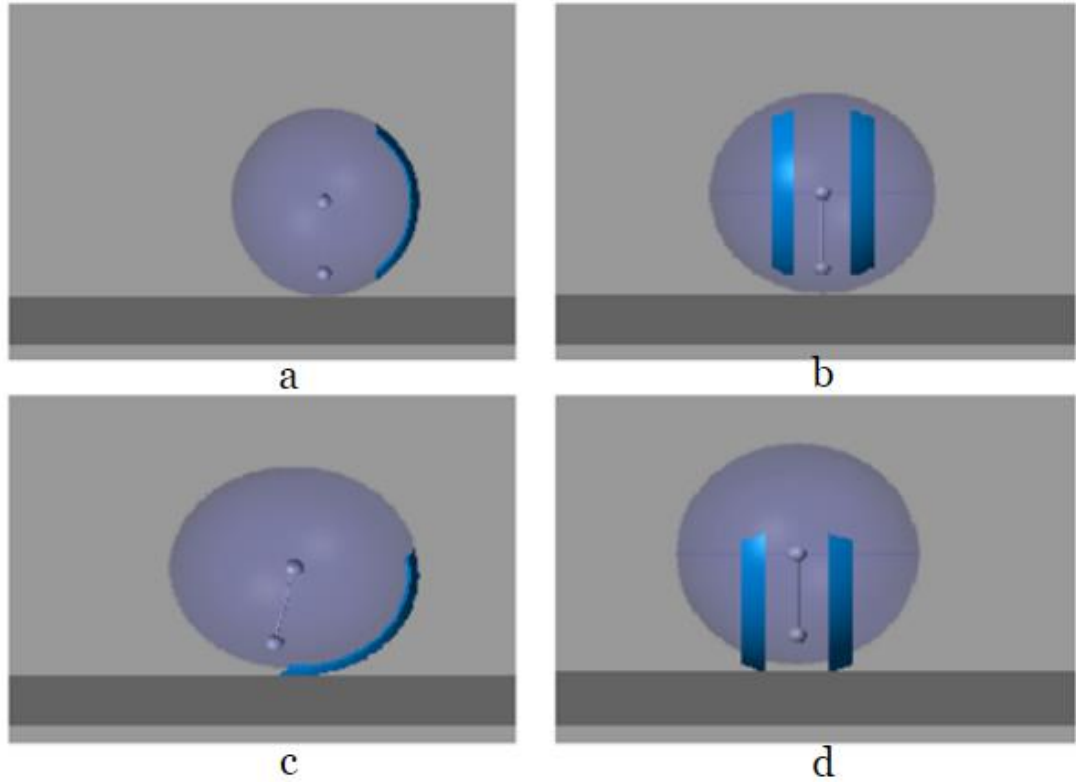
Signal Builder, kullanıcının grafiksel bir ara yüz aracılığıyla sinyalleri oluşturmaya, düzenlemeye ve yönetmesine olanak tanır. Sinyaller, zaman ve değerlerinin kolayca ayarlanabileceği grafikler şeklinde gösterilir. Simülasyonlar sırasında sinyallerin değiştirilmesine olanak tanır. Bu sayede, kullanıcılar farklı senaryoları test edebilir ve model performansını analiz edebilirler.

Tasarımdaki robot ayaklarının zemin kontak ilişkisi sağlamak için 6 adet Sphere to Plane Force bloğu eklenmiştir. Ayakların açıldığı zaman zeminle kontak ilişkilerini sağlamak için ayakların uç noktalarına 6 adet robota etki etmeyen küçük küreler eklenmiştir. Bu kontak ilişkileri ayak açıldığı zaman yere temas ettiği noktalara yerleştirilmiştir. Küçük küreler ile zemin arasında kontak ilişkisi oluşturulmuştur. Şekil 6.3'de ayaklar açıkken küçük kürelerin hangi noktalara eklendiği gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Bacak mekanizmasına kontak ilişkisi için eklenen küçük kürelerin gösterimi

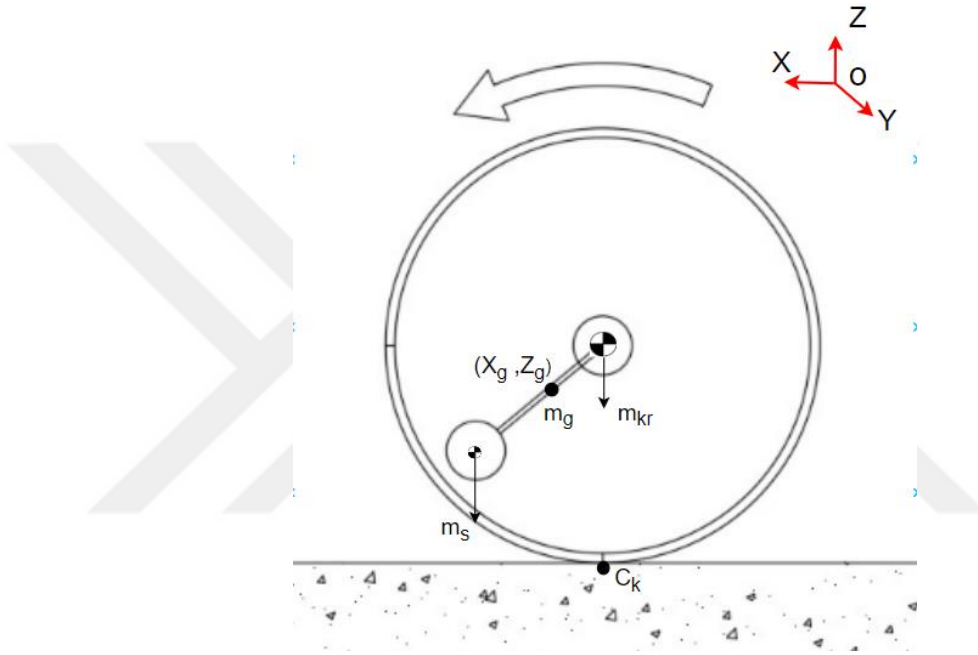
Simülasyonu gerçekleştirilen yuvarlanan küresel robotun hareketli bacak mekanizmasının simülasyonuna ait şekiller Şekil 6.4’de verilmiştir. Şekil 6.4’de a ve b de verilen şekillerde hareketli bacakların önden ve yandan görüntüsünde bacaklar kapalı konumdadır. Şekil 6.4’de c ve d verilen şekillerde ise hareketli bacaklar 5 derece açılmış şekildedir ve küresel robot sarkaç hareketi ile doğrusal bir hareket gerçekleştirmektedir.



Şekil 5.4. Hareketli Bacak Mekanizmasının Simülasyonu.

5.3 Mekanizmanın Düz Zemin Üzerindeki Harekete Katkısı

Küresel mobil robotun düz zemindeki hareketini daha hızlı bir hale getirebilmek için kabuğa yerleştirilen hareketli bir kabuk mekanizması kullanılabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan robotun hareket mekanizmasında robot hızlandırılmak istendiğinde robotun ortalama ağırlık merkezinin temas noktasının önünde tutulması gerekir. Bu durum Şekil 6.5 ile aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Robotun ağırlık merkezinin temas noktası önünde olduğunun gösterimi

Şekil 6.5’de C_k küre ile zemin arasındaki temas noktasını ifade etmektedir. Küresel robotun hareket ettiği sırada, ortalama ağırlık merkezi, robotun kendi ağırlık merkezi ile sarkacın ağırlık merkezi arasında bir hesaplama yaparak belirlenir. Sarkacın kütlesi m_s , koordinatları ise (X_s, Z_s) ile kürenin kütlesi m_{kr} , koordinatları ise (X_{kr}, Z_{kr}) ve toplam kütle m_g , koordinatları ise (X_g, Z_g) ile gösterilmektedir. Buna göre ortalama ağırlık merkezinin koordinatları şu şekilde hesaplanır:

$$X_g = \frac{(m_s X_s + m_{kr} X_{kr})}{(m_s + m_{kr})} \quad (96)$$

$$Z_g = \frac{(m_s Z_s + m_{kr} Z_{kr})}{(m_s + m_{kr})} \quad (97)$$

Ortalama ağırlık merkezi bulunduktan sonra küresel bir robotun hareket esnasında ulaşabileceği maksimum ivme şu şekilde hesaplanır:

$$\tau = m_g g X_g + m_g g Z_g \quad (98)$$

$$\tau = I \cdot \alpha_{max} \quad (99)$$

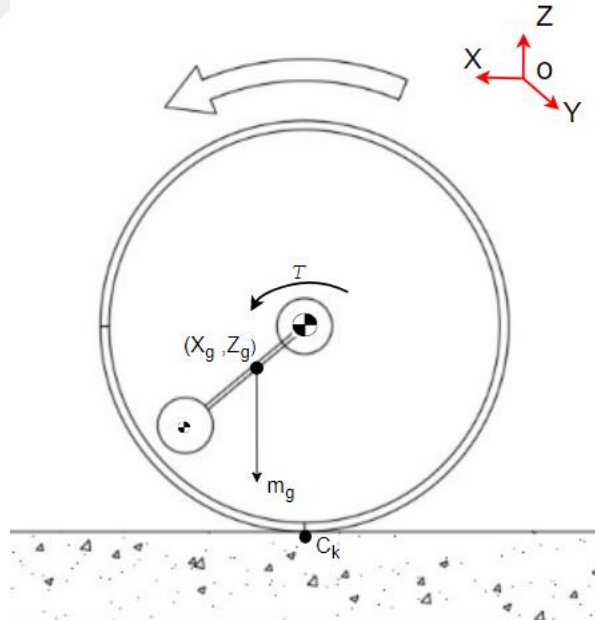
Yerçekimi g ile ifade edilmektedir. Kürenin kütesini tek bir kütle olarak düşünüp sarkaç, kaydırıcı ve kürenin kütlelerini toplayarak atalet momenti hesaplaması şu şekilde yapılır:

$$I = \frac{2}{5} m r^2 \quad (100)$$

$$m = m_s + m_k + m_{kr} \quad (101)$$

Buna göre robotun ulaşabileceği maksimum ivme formülü:

$$\alpha_{max} = \frac{5}{2} \frac{m_g g X_g + m_g g Z_g}{(m_s + m_k + m_{kr}) r^2} \quad (102)$$



Şekil 5.6. Küresel robot ile sarkaç arasındaki ortalama ağırlık merkezi gösterimi

Küresel bir robota maksimum ivme, robotun en yüksek hızlanma miktarını temsil eder. Küresel robot için maximum ivme hesaplanmak istenilirse denklem (102) sayısal

değerler konarak elde edilebilir. Maksimum ivme, robotun performansı ve hareket kabiliyeti için önemlidir.

Her ne kadar ağırlık merkezi önde tutulduğunda robot sürekli ivmeli bir hareket gösteriyor gibi gözükse de gerçek durumdaki küre ile yer arasında oluşan sürtünme kuvveti veya hava ile dönen küre etrafındaki aerodinamik etkiler gibi sebeplerden dolayı robotun ulaşabileceği hız sınırlı olmaktadır. Robotun ulaşabileceği net hız değerinin belirlenmesi için kontak dinamiği ve hava sürtünmesi gibi etkilerin net olarak modellenip bunların detaylı bir şekilde hesaplanmasına ihtiyaç duyulur. Bu tez kapsamında sadece kabuğun harekete olan katkısı araştırılmaya çalışıldığı için bu hız değerinin maksimumu 1m/s gibi bir değer kabul edilebilir. Bu değer kabuğun hareketi ve açılma frekansını belirlemek adına önceden bilinmelidir. Robot kontrolü ile hızın değil ivmenin kontrol edildiği düşünüldüğünde kaymadan dönme şartı altında modelden anlık olarak robotun lineer hızı çekilebilmektedir.

5.3.1 Kabuk Tahrik Frekansının Elde Edilmesi

Robotun o anki hızına göre kabukta bulunan bacağın açılma frekansı bu hız ile orantılı olmak durumundadır. Kabukta bulunan bacağın robotun hareketi esnasında robota ek bir dış kuvvet uygulaması hedeflenmektedir. Robotun hareketine en çok katkının sağlanması adına bu dış kuvvetin maksimum etki oluşturabilecek bir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı bacağın uç noktasının tam olarak yere temas ettiği durumda bacağın tetiklenmesi gerekir. Bu tetikleme sinyalinin frekansı hareket hızına göre değişmek durumundadır. Bu değer hız ile senkron tetiklenmemesi durumunda hızlanma için planlanan maksimum getiri elde edilememiş olur. Bacağın tetiklenme sinyalinin frekansı şu şekilde elde edilir.

Kürenin yuvarlanması sırasında, her turda yere temas ettiği nokta farklı bir nokta olacaktır. Bu nedenle, kürenin bacaklarının açılması için gereken frekans, kürenin bir turda döndüğü mesafeye bağlı olacaktır. Robotun hızı ve eğimine bağlı olarak gerekli periyodik sinyal frekansının belirlenmesi için matematiksel denklemleri şu şekilde elde edilebilir.

Öncelikle, kürenin hareketini tanımlayan basit hareket denklemlerini kullanarak, kürenin bir turda aldığı zamanı hesaplarız. Bu hesaplama, kürenin bir turda aldığı mesafenin, kürenin çevresi olan $2\pi r$ 'ye eşittir.

Kürenin bir turdaki hızını basit hareket denklemi olan $v=d/t$ kullanılır. Burada d, kürenin bir turda aldığı mesafe olan $2\pi r$, t ise kürenin bir turdaki zamanıdır. Dolayısıyla kürenin hızı:

$$v=2\pi r/t \text{ ' e eşittir.} \quad (107)$$

Kürenin yere temas ettiği her noktada bacakları belirli bir derece açılarak F kuvveti uygulanmaktadır. Bu açığı θ ile gösteririz. Yere temas ettiği nokta da bacakların açısı θ olduğuna göre, yere etki eden kuvvet:

$$F = mg\sin\theta \text{ olacaktır.} \quad (108)$$

Bacakların açıldığı süre, bir turdaki süreyle eşittir. Dolayısıyla, bu açılma süresi t'dir. Sonuç olarak, her turda bacakların açılma sayısı f, bir turdaki zaman t'nin bölümüdür. Bu nedenle;

$$f= 1/t \text{ şeklinde ifade edilebilir.} \quad (109)$$

Bu ifadeleri birleştirerek:

$$f = 1/t = 1/(2\pi r/v) = v / (2\pi r) \text{ olarak bulunur.} \quad (110)$$

Son olarak, bacakların açılma açısının θ 'nin etkisini de eklemek için $\sin\theta$ ile çarpılır:

$$f = v / (2\pi r \sin\theta) \text{ bulunur.} \quad (111)$$

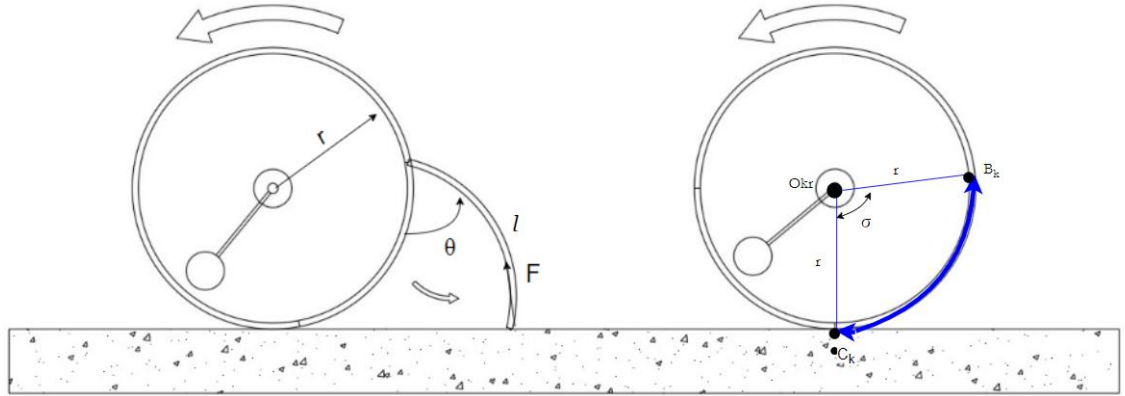
Bu denklem, kürenin hızına, yarıçapına ve bacakların açısına bağlı olarak, bacakların açılması için gereken periyodik sinyal frekansını hesaplamak için kullanılır.

5.3.2 Kabuğa Ait Tasarım Parametrelerin Hareket Performans Üzerine Etkisi

Küresel robota yerleştirilen hareketli kabuk mekanizması robotun ivmelenmesine dolaylı bir katkı sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında kabuk öncesi ve sonrası durumun sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için standart durumdaki robotun ulaşabileceği maksimum

açısal ivmelenme ve hareketli kabuk kullanılması durumunda elde edilecek ilave ivmelenmenin sayısal olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Aşağıda robotun kabuk mekanizmasının açık ve kapalı durumdaki hali üzerinde ilave ivmelenmeyi etkileyecek parametreler gösterilmeye çalışılmıştır.

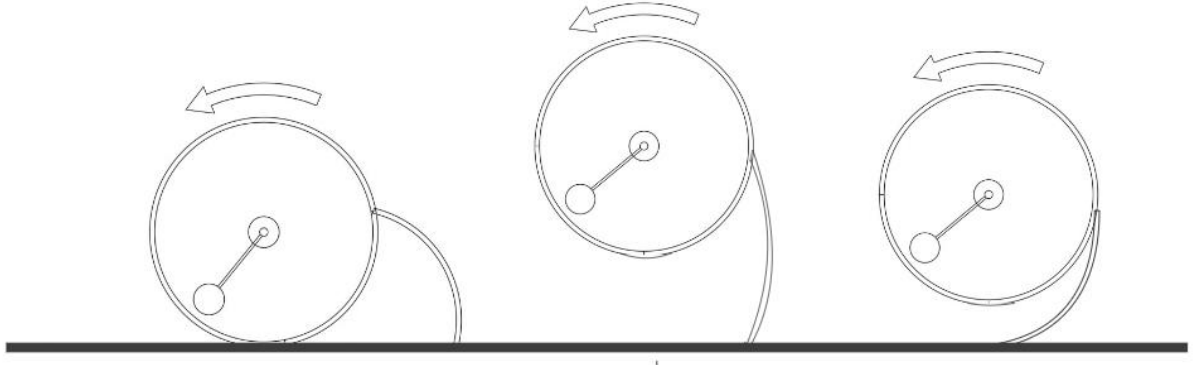


Şekil 5.7. Kabuk mekanizmasının açık ve kapalı durumdaki hali üzerinde ilave ivmelenmeyi etkileyecek parametreler

Bacak uzunluğu, yay açısıyla tanımlanabilen bir parametredir. Bacak uzunluğu l ve yay açısı σ ile gösterilmektedir. Diğer bir ifade ile ilave ivmelenme yüksek istenildiğinde daha büyük açılı bir yay uzunluğu tercih edilebilir Fakat bu durumun bir sınırı vardır.

Diğer bir taraftan bacağın açılabilirdiği maksimum açı robota ilave edilecek ivmelenmeyi doğrudan etkiler. Bacağın açılabilirdiği açı θ ile gösterilmiştir. Bu değerin çok büyük olması bacağın tek başına ivmelenmeye büyük bir katkı sağlayacağı anlamına gelmez. Önemli olan bir diğer parametrede bacağın kapalı konumundan açık konumuna geçmesini sağlayacak süredir.

Normal bir durumda bacağın uç noktasında oluşturacağı kontak kuvvetleri modellenenebilir fakat bacak kapalı konumdan açık hale geçerken bacağın uç noktasının yere temas açısı da zamanla değişebilmektedir. Bu sebepten dolayı kontak kuvvetinin zamana bağlı olarak ele edilmesi oldukça güçtür. Kontak kuvvetinin bacağın farklı konumlarında farklı değerlerde oluşması şekildeki 6.8'deki görselde anlatılmaya çalışılmıştır.



Şekil 5.8. Bacağın farklı açılarda gösterimi

Kontak kuvvetlerinin robota müdahale açısının ve değerinin net bir şekilde elde edilmesinin oldukça zor bir işlem olduğu yukarıdaki görselden anlaşılmaktadır. Bu tez kapsamında küresel mobil robota hareketli bir kabuk mekanizmasının bağlanması durumunda elde edilecek katkının belirlenmesine ihtiyaç vardır. Kontak kuvvetleri net bir şekilde elde edilemediği için robotun standart durumundaki hızlanma performansının analiz edildiği durumdaki gibi bir moment dengesinde katkı hesaplanamamaktadır. Bu sebepten kabuğun sağladığı ek hızlanmanın belirlenmesi için enerji tabanlı bir yöntemin daha sağlıklı sonuç vereceği düşünülmüştür.

Kürenin kinetik enerjisi hesaplanırken kürenin kütlesi tek bir nokta olarak düşünülmüş ve m ile ifade edilmiştir. Küre hareket ederken hızına v_1 dersek küresel robotun kinetik enerjisi:

$$E_{kin} = 1/2 m v_1^2 \text{ olarak hesaplanır.} \quad (112)$$

Bacakların açılması için uygulanan F kuvveti küresel robottun hızlanmasına neden olur. F kuvvetinin etkisi ile yapılan iş hesaplanıp ardından küresel robotta meydana gelen enerji değişimine dâhil edilmiştir.

$$W = l x F x \cos(\theta) \quad (113)$$

Kürenin sondaki hızı v dersek:

$$1/2 m v^2 = 1/2 m v_1^2 + l x f x \cos(\theta) \text{ eşitliği elde ederiz.} \quad (114)$$

Ardından denklem (114) den v' 'yi çekersek;

$$v = \sqrt{((2 * l * F * \cos(\theta)) / m) + v_1^2} \text{ bulunur.} \quad (115)$$

Enerji tabanlı bir yöntemde kontak kuvvetinin net bir şekilde bilinmesi gerekir. Bacağın uç noktasının yere temas ettiği süre boyunca kontak kuvveti ve hareket yörüngesini çarpımı bize küresel mobil robotun hızlanması için ilave robota uygulana enerji miktarını verir.

Diğer bir taratan yörünge lineer değildir. Bacağın daha efektif bir katkı kuvveti üretebilmesi için θ kabuk bacak açısının hareket hızına göre değişecek olan bir yörünge ile kontrol edilmesi gerekir. Bunun için robotun hareket edeceği yörünge boyunca bu açının hesaplanması ve buna uygun darbeli bir sinyal girilmesi gerekmektedir.

Her ne kadar bu denklemler analitik olarak ifade edilebilselerde, sürtünme, kayma ve kontak dinamiğindeki lineer olmayan parametreleri gibi bir çok sebepten dolayı, robota kabuğun sağlayacağı ilave katkı torkunun ne olduğunu birebir belirlemek oldukça zordur. Bu işlemi yapmanın iki yolu bulunmaktadır. Birinci durumda tüm bu lineer olmayan parametreleri simülatöre doğrudan veya dolaylı olarak dâhil edilmeli ve hesaplamalarda bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

İkinci durumda ise bu detaylı hesaplamalara girmeden Matlab/Simmechanicste geliştirilen simülatör üzerinde yapılacak bir çok deneme ile tork katkısının deneysel olarak belirlenmesi yoluna gidilebilir. Her iki durumda da bacağın sağlayacağı katkı belirlenmiş olur. Bu tez kapsamında tork katkısının sayısal olarak ifade edilmesi değil, hareketli kabuk tasarımındaki parametrelerin tork katkısına etkilerinin açıklanması amaçlanmıştır. Bu yüzden her ne kadar tork katkısı sayısal olarak ifade edilemese de kabuk tasarımının robotun düz zemin üzerinde hızını arttıracığı kanaatine varılmıştır.

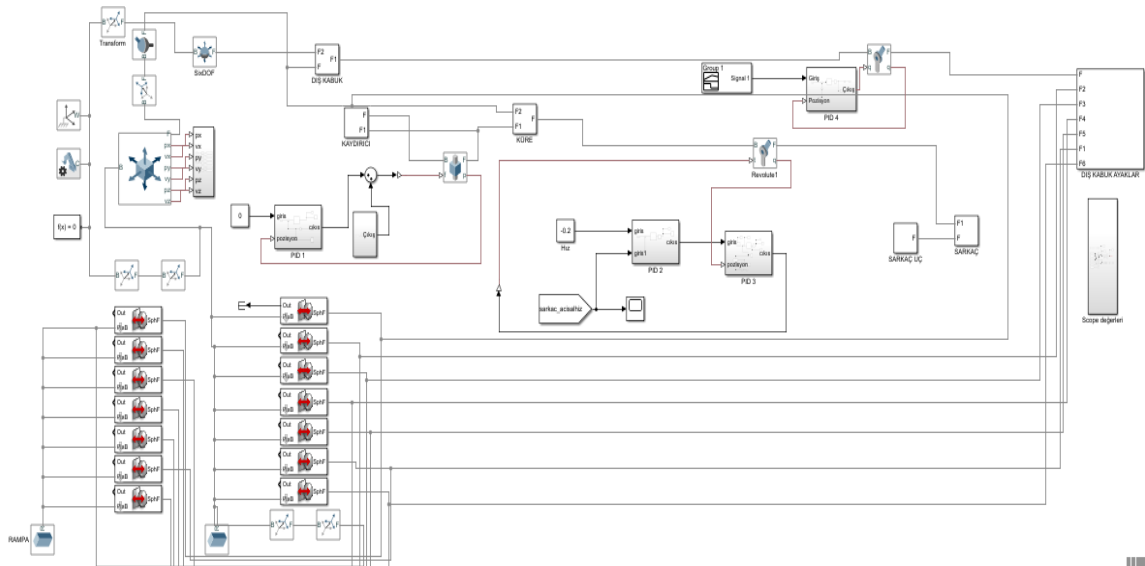
5.4. Mekanizmanın Eğimli Zemin Üzerindeki Harekete Etkisinin Simülasyonu

Küresel robotlarda bacak mekanizması, yokuş çıkma kabiliyetini artırmaya yardımcı olarak da kullanılabilir. Bacaklar, hem robotun yüzeyde daha iyi tutunmasını sağlar ve hem de yüksek eğimli yokuşları tırmanırken dengesini korumasına yardımcı olmaktadır. Bacak mekanizmasına sahip küresel robotlar, tekerlekli veya paletli robotlara göre daha iyi bir denge sağlayabilirler. Ayrıca bacaklar, eğimli yüzeylerde hareket ederken robotun

düşmesini önlemekte ve robotun yüzeye daha sıkı bir şekilde tutunmasını sağlamaktadır. Diğer bir taraftan, bacak mekanizması, robotun daha çeşitli ve zorlu arazilerde hareket etmesine olanak tanır. Tekerlekli veya paletli robotlar, bazı zorlu yüzeylerde hareket etmekte zorlanabilirken, bacak mekanizmasına sahip küresel robotlar, daha dağlık ve engelli yüzeylerde bile hareket etmesini olanak sağlar. Sonuç olarak, bacak mekanizması, küresel robotların yokuş çıkma kabiliyetlerini artırmakta ve daha çeşitli arazi koşullarında hareket edebilmelerini sağlamaktadır.

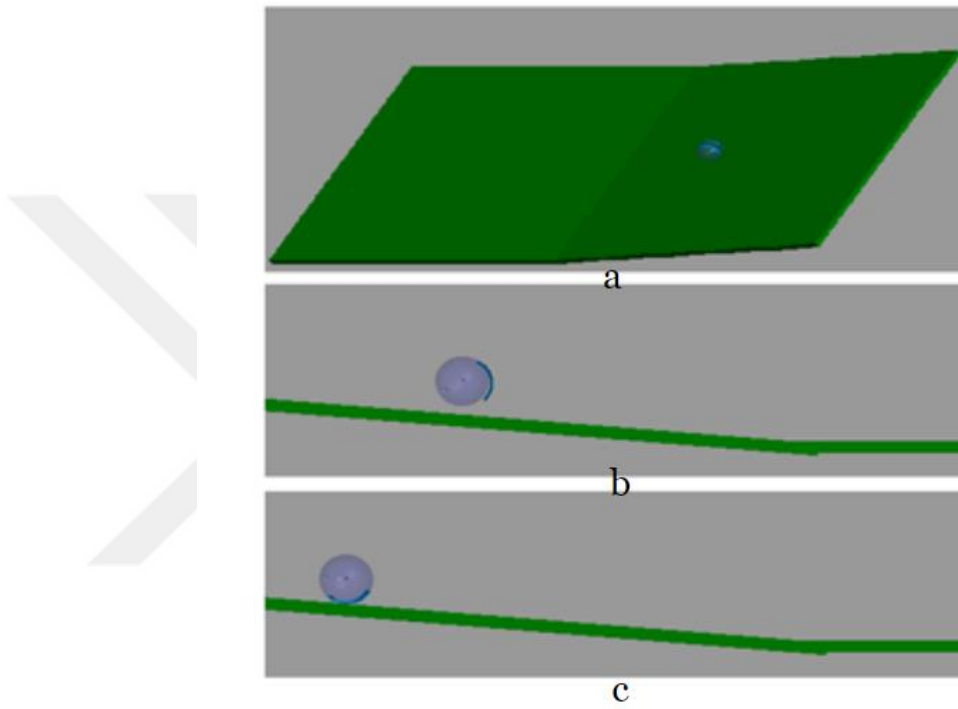
Daha önce simülasyonu gerçekleştirilen iki tahrik mekanizmalı küresel robot yokuş çıkamazken, küresel robot üzerine yerleştirilen kabukta tasarımı yapılan bacaklar sayesinde küresel robot yokuş çıkabilmektedir. Bacaklar robotun yüzeye daha iyi tutunarak, eğimli yerlerde tırmanırken dengesini koruyarak tırmanışa imkân verir. Tasarımı gerçekleştirilen bacaklar zemin ile temas ettikçe açılmakta ve bu açılma etkisi ile küresel robotun kendini ileri doğru atarak geriye düşmesini engellemektedir.

Matlab Simulink/ SimMechanics ile tasarlanan küresel robot için eğimli bir zemin oluşturulmuştur. Daha önce oluşturulan zemin ile yapılan kontak ilişkileri gibi bu eğimli yüzey ile de küresel robot arasında kontak ilişkileri Sphere to Plane Force bloğu ile sağlanmıştır. SimMechanicsdeki 3 boyutlu bloklar ile gösterimi Şekil 6.9’de verilmiştir.



Şekil 5.9. Rampalı Yüzeyde hareket eden bacaklı küresel robotun SimMechanicsdeki 3 boyutlu bloklar ile gösterimi.

Simülasyonu gerçekleştirilen yuvarlanan küresel robotun hareketli bacak mekanizmasının rampa çıkarken simülasyonuna ait şekiller şekil 6.10'da verilmiştir. Şekil 6.10 a' da robotun eğimli zeminin 3 boyutlu gösterimi verilmiştir. Şekil 6.10 b' de rampa çıkarken açılan ayakların açılmış hali ve şekil 6.10 c' de ise küresel robotun eğimli yüzeyde şekli gösterilmiştir.

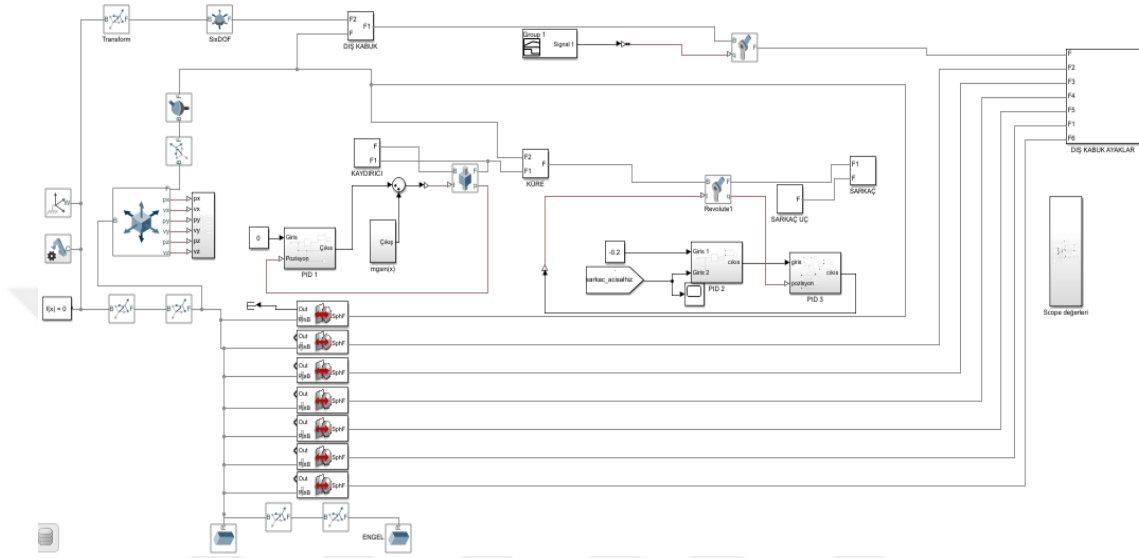


Şekil 5.10. Hareketli bacak mekanizmanın eğimli yüzeyde hareketinin gösterimi

5.5. Mekanizmanın Engel Aşma Hareketinin Simülasyonu

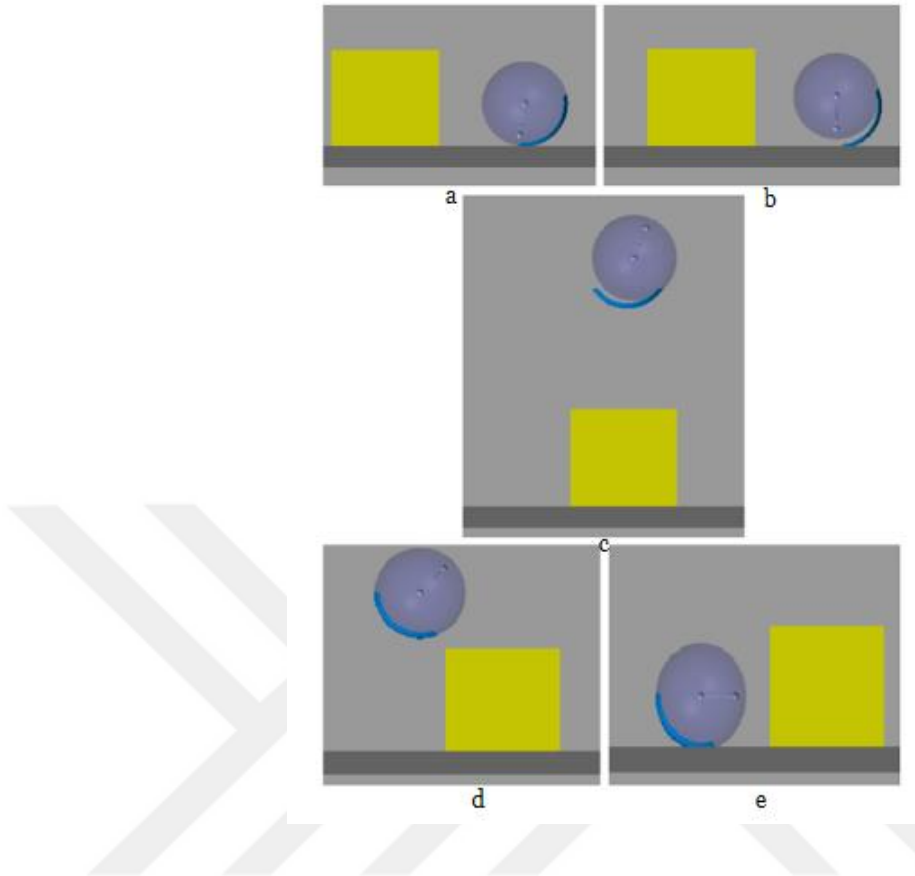
Küresel robotlarda bacak mekanizması robotun engel aşmasını imkân sağlamaktadır. Bacaklı küresel robotlar, tekerlekli veya paletli robotlara kıyasla daha çeviktir ve engelleri aşma konusunda daha iyi bir performans göstermektedir. Bacaklar, robotun yüksek engelleri aşmasına ve çeşitli zorlu yüzeylerde hareket etmesine olanak tanır. Bacaklı küresel robotlar engebeli arazilerde bacakları sayesinde hareket edebilmektedir. Daha önce simülasyonu gerçekleştirilen iki tahrik mekanizmalı küresel robot engelleri aşamazken, küresel robot üzerine yerleştirilen kabukta tasarımı yapılan bacaklar sayesinde küresel robot engelleri aşabilmektedir. Küresel robot bir engel ile karşılaştığı sırada bacaklar zemin ile temas ettiği noktada açılmakta ve engelli zıplayarak aşmaktadır.

Matlab Simulink/ SimMechanics ile tasarlanan küresel robot için 0.5 x 0.5 x 0.25 metrelik küp şeklinde bir engel oluşturulmuştur. Daha önce oluşturulan zemin ile yapılan kontak ilişkileri burada Sphere to Plane Force bloğu ile sağlanmıştır. SimMechanicsdeki 3 boyutlu bloklar ile gösterimi Şekil 6.11 verilmiştir.



Şekil 5.11. Engeli yüzeyde hareket eden bacaklı küresel robotun simmechanicsdeki 3 boyutlu bloklar ile gösterimi

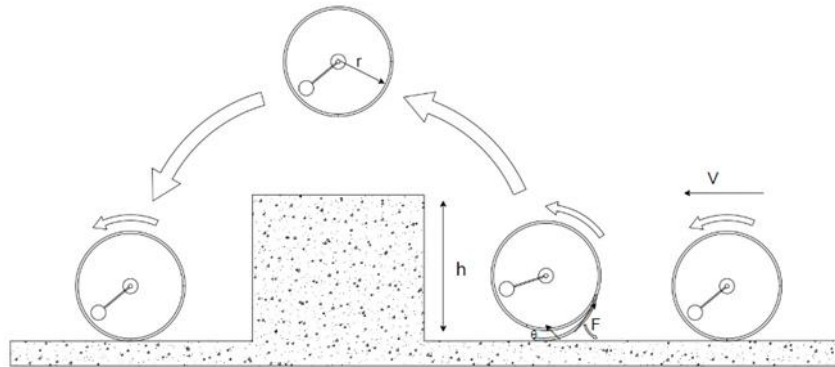
Simülasyonu gerçekleştirilen yuvarlanan küresel robotun hareketli bacak mekanizmasının bir engel ile karşılaştığında engeli aşması ait şekiller şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.12’de a ve b bulunan iki görselde küresel robot engel ile karşılaştığı sırada bacaklar 15 derece açılmaktadır. Şekil 6.12 c’de yer alan resimde küresel robotun bacakların zemin ile teması ile açılması ile robotu zıplattığı sıradaki bir görseldir. Şekil 6.12’de d ve e bulunan iki görselde ise engel aşma gerçekleşmesinin ardından bacak mekanizmasının kapandığını göstermektedir.



Şekil 5.12. Hareketli Bacak Mekanizmanın Bir Engel İle Karşılmasına Ait Hareketinin Gösterimi

5.5.1 Zıplama Yüksekliğinin Hesaplanması

Kürenin zıplama yüksekliği, kürenin kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisi arasındaki ilişkiyi kullanarak hesaplanabilir. Zıplama yüksekliği, potansiyel enerjinin kaybettiği kinetik enerjinin dönüşümüdür.



Şekil 5.13. Hareketli bacak mekanizmasının engel aşma simülasyonu

Kürenin yere temas ettiği andaki hızını V olarak belirtilmiştir. Küre tamamen durduğunda, potansiyel enerjisi en yüksek seviyeye ulaşacaktır ve yükseklik h , aşağıdaki gibi hesaplanır:

Kürenin yere temas ettiği anda ilerleme kinetik enerjisi:

$$E_{k_i} = \frac{1}{2} m v^2, \text{dir.} \quad (116)$$

Dönme kinetik enerjisi ise şu şekilde hesaplanır:

$$E_{k_d} = \frac{1}{2} I \omega^2. \quad (117)$$

$$I = \frac{2}{5} m r^2 \text{ ve } \omega = \frac{v}{r}. \quad (118)$$

Robotu tek bir kütle olarak düşünürsek denklem (118) kullanılabilir. Bu denklemin kutlaması durumunda denklem (117) geçiş yapılır. Daha hassas bir hesaplama yapılmak istenirse denklem (41) kullanılabilir.

Yerine yazarsak dönme kinetik enerjisi:

$$E_{k_d} = \frac{1}{5} m v^2, \text{dir.} \quad (119)$$

Kürenin kinetik enerjisi:

$$E_k = E_{k_d} + E_{k_i} \text{ 'dir} \quad (120)$$

Ardından potansiyel enerji hesaplanır.

$$E_p = mgh \text{ 'dir} \quad (121)$$

Küre, yerden yüksekliği h olduğunda, potansiyel enerjisi maksimum olmaktadır ve kinetik enerji sıfırdır. Bu nedenle, kinetik enerji, h 'ı bulmak için potansiyel enerji ile eşit olmalıdır:

$$\frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{5} m v^2 = mgh. \quad (122)$$

Bu denklemden h 'ı çekersek denklem şu hali alacaktır:

$$h = \frac{7v^2}{10g}. \quad (123)$$

Burada, g yerçekimi ivmesi, v ise kürenin yere temas ettiği anda sahip olduğu hızdır.

Bir sonraki adımda kürenin bacaklarından gelen F kuvvetin etkisi ile oluşan potansiyel enerji değişimi hesaplanmıştır. F kuvveti yukarı yönde etki ettiği $F \cos(\theta)$ olarak hesaplanmaktadır.

$F \cos \theta$ etkisi bulunduğu yerde zıplaması anlamına gelir. Zıplama hareketin daha kapsamlı için yer ile kontak etkisi sonucunda oluşacak F kuvvetinin net bir şekilde bilinmesi gerekir.

F kuvvetinin etki ettiği mesafe " r " olarak alındığında denklem şu şekilde yazılmaktadır:

$$mgh = F \cos(\theta) r. \quad (124)$$

Buradan h çekilirse:

$$h = \frac{F \cos(\theta) r}{mg} \text{ eşit olur.} \quad (125)$$

En son adımda kürenin zıplama yüksekliği denklemi elde edilir:

$$h = \frac{7v^2}{10g} + \frac{F \cos(\theta) r}{mg}. \quad (126)$$

Burada, F , bacak açılması ile oluşan kuvveti; θ , bacak açısı; r , kürenin yarıçapı; m , kürenin kütlesi ve g , yerçekimi ivmesi temsil etmektedir.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan literatür araştırmasında küresel robotların mobil robotlara göre hareket avantajı olduğu ve bu avantajları küresel şekillerinden kaynaklandığı görülmüştür. Küresel robotlara her yöne hareket edebilir ancak mobil robotlar tekerlek veya bacak mekanizmasından dolayı dengesini kaybederek devrilebilir veya düşebilir. Bu durum küresel robotlar için hareket avantajı oluşturmaktadır. Küresel robotlarda düşme, devrilme gibi durumlarda hareket kabiliyetlerini kaybetme imkânı yoktur. Bu durum küresel robotların mobil robotlara göre en avantajlı özelliklerinden biridir. Diğer bir avantajlı tarafı ise küresel robotun manevra kabiliyetinin iyi olmasından dolayı ve diğer mobil robotlara göre daha küçük boyutlarda olmasından dolayı küresel çapı robotun çapından biraz büyük olan yerlerden kolaylıkla geçebilir.

Tüm bunların yanında mobil robotların küresel robotlardan üstün olduğu taraf ise bir engel ile karşılaştığı zaman aşabilmesi ve yokuş çıkabilmesidir. Bu sebeple son yıllarda yapılan araştırmalarda küresel robotların bu kabiliyetini arttırmak için hareket biçimlerini geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar küresel robotların hareket kabiliyetini arttırmak için yeni mekanizmalar ve yöntemler geliştiren çalışmalardır. Örneğin, robotların daha doğru ve hassas hareket etmelerini sağlamak için kontrol algoritmaları geliştirilmektedir. Ayrıca, mekanik sistemlerin tasarımı da geliştirilmektedir. Bu tez de küresel robotların hareket kabiliyetlerini arttırarak engel aşmasını ve yokuş çıkması için hareketli bacak mekanizması tasarlanmıştır. Küresel robotların engel aşabilmesi ve yokuş çıkabilmesi için böyle bir mekanizma gerekmektedir.

Küresel robotların şeklinden dolayı hareket etmesi kolay olsa da kontrol edilmesinde sorunları bulunmaktadır. Bu çalışmada robot şaftının sabit olması ve içeride kayma olmaması sebebiyle böyle bir küresel robotunu seçilmiştir. Seçilen küresel robot da

kaydırıcı ve döner olmak üzere iki tahrik mekanizması bulunmaktadır. Kaydırıcı mekanizmaya şaft boyunca pozitif veya negatif bir kuvvet uygulanması durumunda robotun ağırlık merkezi değişmekte, böylece küresel robotun sağ-sol hareketi gerçekleştirilmektedir. Sarkaca bağlı döner mekanizmaya pozitif veya negatif tork uygulanması durumunda da küresel robotun ileri geri hareketi sağlamaktadır. Bu tasarımın avantajı matematiksel modelinde yatmaktadır. Böyle bir küresel robot tasarımında X ekseninde ve Y ekseninde karmaşık dinamik hesaplamaların ayrı ayrı yapılması matematiksel hesaplamalardaki doğruluğu arttırmıştır. Bu nedenle bu tasarımda yörünge takibi daha doğru bir şekilde yapılmaktadır. Bu yapının dinamiklerini elde etmek için Lagrange-Euler tekniği kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında Newton-Euler yerine Lagrange-Euler tercih edilmiştir. Newton-Euler denklemleri bir robotun doğrusal ve açısal hareketlerinde yararlanarak zaman bağlı dinamik denklemler elde eder. Lagrange-Euler yönteminde ise robotun dinamik denklemleri bulunurken zamandan bağımsız olarak sistemdeki toplam kinetik enerjiden toplamla potansiyel enerjinin farkı alınarak dinamik denklemler elde edilir. Bu çalışmada da belli bir zaman sonraki robotun durumu o zamanki dinamik büyüklükler ivme, hız vb. tespit edilirken, küresel robotun dinamik büyüklükleri zamana bağlı çok büyük değişimler gösterdiği için zamandan bağımsız olması nedeniyle Lagrange-Euler yöntemi tercih edilmiştir.

Küresel robotta hareket tanımlamak için dinamik ve kinematik denklemler çıkarılmıştır. Lagrange-Euler yöntemi ile elde edilen dinamik denklemler sonucunda simülatör ile iki girişe uygulanan farklı dış kuvvetlere göre sistem durum değişkenlerinin nasıl bir yol izlediği gözlemlenebilmektedir. Elde edilen grafikler sonucu robotun sarkaç mafsallının kontrol için verilen referans sinyali takip ettiği ve kaydırıcı mekanizmanın sağ veya sola dönüş hareketlerinin grafiksel gösterimleri verilmiştir.

Seçilen küresel robotun Matlab/Simulink ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Küresel robotunun simülasyonunu gerçekleştirmek için küresel robotun dönme açısal hızı β' ve kaydırıcı yer değiştirme L miktarları için sabit değerler belirlenmiştir. Sarkaç mekanizmasına uygulanacak T değeri ve kaydırıcı mekanizmaya uygulanacak F değerini uygulamak için üç adet PID kontrolörden faydalanılmıştır. Bu çalışmadaki küresel mobil robotun simülasyonunu gerçekleştirilirken ikinci derece bir integratörden

faýdalanılmıştır. Sarkaca uygulanan tork ve kaydırıcıya uygulanan kuvvet değerlerini kontrol edebilmek için PID kontrol kullanılmıştır.

Küresel robotların engel aşma ve yokuş çıkma problemini çözmek için hareketli bacak mekanizması tasarlanmıştır. Hareketli bacak mekanizmasının tasarımı SolidWorks ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen hareketli bacak mekanizması ile iki tahrikli küresel robota entegre ederek hareketli bacak mekanizmasının simülasyonu için Matlab/SimMechanics ile simülatör gerçekleştirilmiştir. Hareketli bacağın robota etkisini gözlemlemek için, kontak ilişkilerinin de dikkate alındığı bir simülasyon yapmak için Matlab/SimMechanics kullanılarak geliştirilmiş bir simülatörden yararlanılmıştır. Matlab/SimMechanics, karmaşık mekanik sistemlerin simülasyonu için kullanılan güçlü bir araçtır. Simülatörün doğruluğunu test etmek için önceden literatürde çalışması yapılan iki tahrik mekanizmalı küresel robotun Lagrange-Euler ile elde edilmiş simülatörden faydalanılmıştır.

Matlab/Simulink ile yapılan simülatör de zemin ile robot arasında bulunan kontak ilişkisinin simülasyona dahil edilmesi zordur. Bu nedenle, daha doğru sonuçlar elde etmek için SimMechanics kullanılarak kontak ilişkisi ile üretilen kuvvetin doğruluğu detaylı olarak incelenmiştir.

SimMechanics, Simulink ile birlikte kullanılan bir fiziksel modelleme aracıdır ve zemin ile robot arasındaki kontak ilişkisini modeller. Bu sayede, SimMechanics kullanılarak yapılan simülasyonlarda daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Bu tez çalışmasında, küresel robotun hareketli bacak mekanizmasının SimMechanics ile simülasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, hareket dinamiğine uygun olduğu görülmüştür.

Bu çalışma, küresel robotların karmaşık mekanizmalarının simülasyonu için daha doğru sonuçlar elde etmek için SimMechanics kullanımının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, hareketli bacak mekanizmasının simülasyonu, literatürde bulunan diğer küresel robotlardan farklı olarak ele alınmış ve bu konuda yeni bir bakış açısı sunulmuştur.

Tasarımı gerçekleştirilen hareketli bacak mekanizması, küresel robotların hareket kabiliyetini arttırmak için özellikle yokuş çıkma ve engel aşma gibi zorlu durumlar için tasarlanmıştır. Bu mekanizma, robotun farklı açılardan hareket etmesine ve istikrarlı bir şekilde ilerlemesine olanak sağlayan bir dizi bileşenden oluşur.

Bu tez çalışmasında, SimMechanics kullanılarak tasarlanan hareketli bacak mekanizmasının hem yokuş çıkma hem de engel aşma durumlarındaki simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonlar, robotun gerçek bir ortamda hareket ederken karşılaşılabileceği zorlu koşulları modellemek için tasarlanmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucu, küresel robotun yokuş çıkabildiği ve engel aşabildiği gösterilmiştir.

Küresel mobil robotun düz zemin üzerindeki hareketi sırasında ulaşabileceği maksimum ivme için matematiksel denklemler elde edilmeye çalışılmıştır. Düz zemin üzerinde robotun hızı ve eğimine bağlı olarak gerekli periyodik sinyal frekansının belirlenmesi için matematiksel denklemlerin nasıl elde edilebileceği açıklanmaya çalışılmıştır.

Bu tez kapsamında kabuk mekanizmasının küresel robotun hızlanmasına katkı sağlayacağı ancak sürtünme, kayma ve kontak dinamiğindeki lineer olmayan parametreleri gibi birçok sebepten dolayı, robota kabuğun sağlayacağı ilave katkı torkunun ne olduğunu birebir belirlemek oldukça zor olduğu anlaşılmıştır. Tork katkısının sayısal olarak ifade edilmesi değil, hareketli kabuk tasarımındaki parametrelerin tork katkısına etkilerinin açıklanması amaçlanmıştır. Bu yüzden her ne kadar tork katkısı sayısal olarak ifade edilememede kabuk tasarımının robotun düz zemin üzerinde hızını arttıracak kanaatine varılmıştır.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda kabuk mekanizmasının küresel robota sağlayacağı ilave katkı torku iki şekilde hesaplanabileceği öngörülmüştür. İlk olarak tüm sürtünme, kayma ve kontak dinamiğindeki lineer olmayan parametreleri simülátöre doğrudan veya dolaylı olarak dâhil edilip hesaplamaların buna göre yapılacağıdır. İkinci durumda ise bu detaylı hesaplamalara girmeden Matlab/Simmechanicste geliştirilen simülátör üzerinde yapılacak bir çok deneme ile tork katkısının deneysel olarak belirlenmesi yoluna gidilebilir.

Ayrıca robotun zıplama hareketi sırasında ulaşabileceği maksimum yükseklik denklemi üretilmeye uğraşılmıştır. Denklem, robotun zıplama hareketi esnasında etkili olan değişkenlerin analizi ve modellenmesiyle elde edilmeye çalışılmıştır. Robotun zıplama hızı, zıplama açısı gibi faktörler göz önünde bulundurularak, zıplama sırasında ulaşabileceği maksimum yüksekliği hesaplayan bir matematiksel ifade oluşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, küresel robotun yokuş çıkma ve engel aşma durumlarındaki performansını SimMechanics kullanarak gerçekleştirilen simülasyonlar ile başarıyla ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, küresel robotun farklı ortamlarda da kullanılabileceğini göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, küresel robotun daha engebeli arazilerde hareket ederken gösterdiği performansı simülatif olarak incelenebilecek ve farklı arazi koşulları için optimal bacak hareketlerin planlanmasında kullanılabilecektir. Bu çalışmalar, küresel robotun daha zorlu koşullarda kullanımını mümkün kılacak ve robotun daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlayacaktır.

Ayrıca Matlab/Simmechanics modeline yapılacak bazı ilavelerle küresel robotun su ortamında hareket etme kabiliyetinin de modellenmesi ve simülasyonunun yapılması mümkündür. Bu çalışmalar, küresel robotun su altı keşifleri ve diğer su ortamı uygulamaları için kullanılabilmesini mümkün kılacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, küresel robotların hareket kabiliyetinin artırılması ve farklı ortamlarda kullanımının mümkün hale getirilmesi için gelecekte yapılacak çalışmaların yolunu açmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] T. Dewi, P. Risma, Y. Oktarina, L. Prasetyani, Z. Mulya, 2019. The kinematics and dynamics motion analysis of a spherical robot, içinde: *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, ss. 101–105. doi:10.23919/EECSI48112.2019.8977011.
- [2] M. Bujňák, R. Pirník, K. Rástočný, A. Janota, D. Nemec, P. Kuchár, T. Tichý, Z. Łukasik, 2022. Spherical Robots for Special Purposes: A Review on Current Possibilities, **Sensors**. **22** 1–36. doi:10.3390/s22041413.
- [3] G.C. Schroll, Dynamic model of a spherical robot from first principles, 2010.
- [4] S. Moazami, H. Zargarzadeh, S. Palanki, 2019. Kinematics of Spherical Robots Rolling over 3D Terrains, **Complexity**. 1330–1335. doi:10.1155/2019/7543969.
- [5] B. Belzile, D. St-Onge, 2022. Design and modeling of a spherical robot actuated by a cylindrical drive, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 1169–1175.
- [6] S.S. Ahn, Y.J. Lee, 2014. Novel Spherical Robot with Hybrid Pendulum Driving Mechanism, **Advances in Mechanical Engineering**. **14**. doi:10.1155/2014-/456727.
- [7] V. Crossley, 2006. A literature review on the design of spherical rolling robots, *Pittsburgh, PA*. 1–6. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.86.4193&rep=rep1&type=pdf>.
- [8] İ.H. Sağsöz, 2021. Dynamic Modeling Of Two Identical Coupled Spherical Robots, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi.
- [9] S. Mahboubi, M.M.S. Fakhrabadi, A. Ghanbari, 2013. Design and implementation of a novel hybrid quadruped spherical mobile robot, **Robotics and Autonomous Systems**. **61** 184–194. doi:10.1016/j.robot.2012.09.026.
- [10] Y. Ping, S. Hanxu, Q. Zhongjiang, C. Jiazhen, 2016. Design and Motion Control of a Spherical Robot With Control Moment Gyroscope, *Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA*. (2016) 1276–1282. doi:10.1109/ICIEA.2016.7603781.
- [11] Y. Kim, S. Ahn, Y. Lee, 2010. KisBot: New Spherical Robot with Arms, *In 10th*

- WSEAS International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology, Hanzhaou, China.* 63–67.
- [12] J. Lee, W. Park, 2013. Design and path planning for a spherical rolling robot, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. 4 A 1–8. doi:10.1115/IMECE2013-64994.
 - [13] S.J. Ma, 2013. The Design of Two Pendulums Spherical Robot, **Applied Mechanics and Materials**. **312** 741–744. doi:10.4028/www.scientific.net/-AMM.312.741.
 - [14] T. Yanagida, R.E. Mohan, T. Pathmakumar, K. Elangovan, M. Iwase, 2017. Design and implementation of a shape shifting rolling-crawling-wall-climbing robot, **Applied Sciences (Switzerland)**. **7**. doi:10.3390/app7040342.
 - [15] Q. Jia, Y. Zheng, H. Sun, H. Cao, H. Li, 2009. Motion control of a novel spherical robot equipped with a flywheel, *2009 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2009*. 893–898. doi:10.1109/ICINFA.2009.-5205045.
 - [16] U. Saranlı, A.A. Rizzi, D.E. Koditschek, 2004. Model-based dynamic self-righting maneuvers for a hexapedal robot, **International Journal of Robotics Research**. **23** 903–918. doi:10.1177/0278364904045594.
 - [17] B. Wagenknecht, D. Apostolopoulos, 2010. Locomotion strategies and mobility characterization of a spherical multi-legged robot, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*. 2 1049–1058. doi:10.1115/DETC-2010-28153.
 - [18] R. Chase, 2014. Analysis Of A Dual Scissored-Pair, Variable-Speed, Control Moment Gyroscope Driven Spherical Robot.
 - [19] K.W. Wait, P.J. Jackson, L.S. Smoot, 2010. Self locomotion of a spherical rolling robot using a novel deformable pneumatic method, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 3757–3762. doi:10.1109/ROBOT.2010.5509314.
 - [20] Y. Hu, Y. Wei, M. Liu, 2021. Design and Performance Evaluation of a Spherical Robot Assisted by High-Speed Rotating Flywheels for Self-Stabilization and Obstacle Surmounting, **Journal of Mechanisms and Robotics**. **13**. doi:10.1115/-

1.4050623.

- [21] U. Saranlı, M. Buehler, D.E. Koditschek, 2000. Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod robot robot Recommended Citation Recommended Citation, **Robotics and Automation**. **3** 2589. https://repository.upenn.edu/ese_papers.
- [22] S. Pan, S. Guo, L. Shi, Y. He, Z. Wang, Q. Huang, 2014. A spherical robot based on all programmable SoC and 3-D printing, *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE ICMA 2014*. 150–155. doi:10.1109/ICMA.2014.6885687.
- [23] Y. He, S. Guo, L. Shi, S. Pan, Z. Wang, 2014. 3D printing technology-based an amphibious spherical robot, *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE ICMA 2014*. 1382–1387. doi:10.1109/ICMA.2014.-6885901.
- [24] B. Zhao, P. Wang, H. Hu, M. Li, L. Sun, 2009. Study on turning in place of a spherical robot based on stick-slip principle, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*. 771–775. doi:10.1109/ROBIO.-2009.5420575.
- [25] W. Jia, Z. Huang, Y. Sun, H. Pu, S. Ma, 2017. Toward a novel deformable robot mechanism to transition between spherical rolling and quadruped walking, içinde: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, 2018: ss. 1539–1544. doi:10.1109/ROBIO.2017.8324636.
- [26] F. Michaud, J.F. Laplante, H. Larouche, A. Duquette, S. Caron, D. Létourneau, P. 2005. Masson, Autonomous spherical mobile robot for child-development studies, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*. **35** 471–480. doi:10.1109/TSMCA.2005.850596.
- [27] J.D. Hernández, J. Barrientos, J. Del Cerro, A. Barrientos, D. Sanz, 2013. Moisture measurement in crops using spherical robots, **Industrial Robot**. **40** 59–66. doi:10.1108/01439911311294255.
- [28] M. Seeman, M. Broxvall, A. Saffiotti, P. Wide, 2006. An autonomous spherical robot for security tasks, içinde: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal*

- Safety, CIHSPS*, 2006: ss. 51–55. doi:10.1109/CIHSPS.2006.313312.
- [29] S. Guo, S. Pan, L. Shi, P. Guo, Y. He, K. Tang, 2017. Visual detection and tracking system for a spherical amphibious robot, **Sensors (Switzerland)**. **17** 1–21. doi:10.3390/s17040870.
- [30] T. Ylikorpi, 2005. A Biologically inspired rolling robot for planetary surface exploration.
- [31] A. Mazumdar, H. Harry Asada, 2011. A compact underwater vehicle using high-bandwidth coanda-effect valves for low speed precision maneuvering in cluttered environments, içinde: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*,: ss. 1544–1550. doi:10.1109/ICRA.2011.5980499.
- [32] M. Svinin, A. Morinaga, M. Yamamoto, 2012. On the dynamic model and motion planning for a class of spherical rolling robots, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 3226–3231. doi:10.1109/ICRA.2012.-6224795.
- [33] S. Moazami, M.-M. Naddaf-Sh, S. Palanki, H. Zargarzadeh, Design, 2019. Modeling, and Control of Norma: a Slider & Pendulum-Driven Spherical Robot, <http://arxiv.org/abs/1908.02243>.
- [34] M. Toz, 2008. Endüstriyel Robotların Dinamik Analizi İçin Robot Araç Kutusunun Gerçekleştirilmesi.
- [35] Z. Kasap, 2014. Weyl Manifoldları Üzerinde Euler-Lagrange Ve Hamilton Hareket Denklemlerinin Analizi.
- [36] S60 Robot'unun Dinamik Modelinin Çıkarılması, 2007.
- [37] M.R. Azizi, J. Keighobadi, 2017. Point stabilization of nonholonomic spherical mobile robot using nonlinear model predictive control, **Robotics and Autonomous Systems**. **98** 347–359. doi:10.1016/j.robot.2017.09.015.
- [38] M. Dal, 2006. Holonomik Olmayan Kısıtlara Sahip Mobil Robot Modellemesi, Simülasyonu Ve Tasarımı Yüksek.
- [39] E. Özcan, 2020. Robotlar ve Uygulamaları.
- [40] H. Özakyol, 2012. Kinematics Of Quadruped Walking.
- [41] M.F. Silva, J.A.T. Machado, 2007. An Historical Perspective of Legged Robots,

- Journal of Vibration and Control.** 13:1447–1486. doi:10.1177/107754630-7078276.
- [42] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, 2002. The intelligent ASIMO : System overview and integration, içinde: *EEE/RSJ International Conference*. doi:10.1109/IRDS.2002.1041641.
- [43] J.I.N.I. Yamaguchi, A. Takanishi, 1996. Development of a leg part of a humanoid robot-design of a biped walking robot having antagonistic driven joints using a nonlinear spring mechanism, **Advanced Robotics.** 11 633–652. doi:10.1163/-156855397X00128.
- [44] D. Application, S. 2018. Robot, SLEGS Robot'un Tasarımı ve 2B- Navigasyon Uygulaması, **Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi.** 30 203–208.
- [45] M.M. Soyguder, S., Genc, I. and Turan, 2015. Control and developed of SLEGS robot design. Undergraduate.
- [46] and J.-M.L. Han, In-Woo, Jae-Won An, 2013. Balancing control of unicycle robot, **Intelligent Autonomous Systems.** 12 663–670.
- [47] M. Lauria, I. Nadeau, P. Lepage, Y. Morin, P. Giguère, M. Lauria, I. Nadeau, D. Letourneau, F. Michaud, P. Lepage, Y. Morin, P. Giguere, F. Gagnon, 2006. Design and Control of a Four Steered Wheeled Mobile Robot, içinde: *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, ss. 4020–4025.
- [48] J.A. and J. Dias, 2003. Design and control of a spherical mobile robot, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering.* 217 457–467.
- [49] and Y.W. Y. Ming, D. Zongquan, Y. Xinyi, 2006. Introducing hit spherical robot: dynamic modeling and analysis based on decoupled subsystem, içinde: *Robotics and Biomimetics,. ROBIO'06. IEEE International Conference on*, 2006: ss. 181–186.
- [50] F.M. and S. Caron, Roball, 2002. the rolling robot, **Autonomous robots.** 12. 211–222.
- [51] V.K. and M. Seeman, 2010. Outdoor navigation with a spherical amphibious robot, içinde: *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, ss. 5113–5118.

- [52] And L.S. B. Zhao, P. Wang, H. Hu, M. Li, 2009. Study on turning in place of a spherical robot based on stick-slip principle, içinde: *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2009 IEEE International Conference on, ss. 771–775.
- [53] and Y.L. J. Yoon, S. Ahn, 2011. Spherical robot with new type of two-pendulum driving mechanism, içinde: *Intelligent Engineering Systems (INES)*, 2011 15th IEEE International Conference on, ss. 275–279.
- [54] A.H.J. and P. Mojabi, 2002. Introducing August: a novel strategy for an omnidirectional spherical rolling robot, içinde: *IEE International Conference on Robotics & Automation*,.
- [55] Z. Huang, W. Jia, Y. Sun, S. Ma, Z. Wang, H. Pu, Y. Tian, 2017. Design and analysis of a transformable spherical robot for multi-mode locomotion, içinde: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2017*, 2017: ss. 1469–1473. doi:10.1109/ICMA.2017.8016033.
- [56] S. Sugiyama, Y. Hirai, 2006. Crawling and Jumping by a Deformable Robot, **International Journal of Robotics Research**. 25 603–620.
- [57] and H.M.J. Mozeika, Annan, Erik Steltz, 2009. The first steps of a robot based on jamming skin enabled locomotion, içinde: *EEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [58] H.B.J. and Y. Xu, 1996. A single-wheel, gyroscopically stabilized robot,” in Robotics and Automation, içinde: *Robotics and Automation, 1996. Proceedings*, 1996 IEEE International Conference on, ss. 3658–3663.
- [59] Q.. C. Shu, G.; Zhan, 2009. Motion Control of Spherical Robot Based on Conservation of Angular Momentum, içinde: *In Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation*, ss. 599–604.
- [60] R. Chase, A. Pandya, 2012. A review of active mechanical driving principles of spherical robots, **Robotics**. 1 3–23. doi:10.3390/robotics1010003.
- [61] L. Qingxuan, J.; Yili, Z.; Hanxu, S.; Hongyu, C.; Hongyi, 2009. Motion Control of a Novel Spherical Robot Equipped with a Flywheel, içinde: *In Proceedings of International Conference on Information and Automation (ICIA'09)*, 2009: ss. 893–898.
- [62] G. Akça, Sistem nedir? Açık, yarı açık ve kapalı sistemin özellikleri nelerdir?

Günlük, (y.y.).

- [63] A.E. Şenaras, H.K. Sezen, 2017. Sistem Düşüncesi, **Journal of Life Economics**. 4 39–58. doi:10.15637/jlecon.187.
- [64] L. Ljung, 1998. System identification.
- [65] B. Atak, 2008. KOBİ'ler için ERP geliştirilmesi ve bir savunma sanayi işletmesi'nde uygulanması, Anadolu Üniversitesi.
- [66] G. Özkan, M. Alpbaz, 2005. Sürekli, Karıştırmalı Tank Prosesine Sistem Tanımlama Tekniğinin Matlab Ortamında Uygulanması, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**. 18 25–40.
- [67] A. Altan, R. Hacıoğlu, 2017. İnsansız hava aracı (İHA) üzerinde üç eksenli gimbal sisteminin dış karışıklıklar altında modellenmesi, içinde: 25. **İşaret İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SIU)**, ss. 1–4. doi:10.1109/SIU.2017.79-60196.
- [68] M. Arslan, 2005. İnternet tabanlı sıcaklık kontrol sistemi, Kırıkkale Üniversitesi.
- [69] E.D. Özkan, 2014. Ro-ro Terminallerinin Simülasyon Modellemesi Yöntemiyle Kapasite Analizleri, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [70] A. Özçift, 2010. Otomotiv endüstrisinde simülasyon çalışması, Kocaeli Üniversitesi.
- [71] Fatih Yardım, 2010. Bir tren eğitim simülatörünün CAN protokolü kullanarak gerçekleştirilmesi, Kocaeli Üniversitesi.
- [72] M.C. Çalışkan, 2014. Sürücü koltuğu simülatörü mekanik ve tahrik sistemi tasarımı, Sakarya Üniversitesi.
- [73] E. Daş, O. Türköz, U. Şanver, 2018. Altı Eksenli Endüstriyel Bir Robotun Dinamik Denklemlerinin Çıkarılarak Simülasyon ve Kontrolünün Gerçekleştirilmesi, içinde: *TOK 2013 Ulusal Kongresi*.
- [74] Y.B. Koca, B. Gökçe, Y. Aslan, 2020. ROS/Gazebo Ortamında Tank Sürüş Özellikli Mobil Bir Robotun Simülasyonu, 1: 29–41.
- [75] B. Çırak, 2014. İki Eklemlili Bir Scara Robot Manipülatörünün Hesaplanmış Tork Yöntemi İle Yörünge Kontrolü, **Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**. 7 77–91.
- [76] C. Öztürk, 2014. Learning Of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Using Big

Bang–Big Crunch Optimization, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [77] F.S. Gökhan, 2010. Optik fiberli brillouin ve dağınık raman kuvvetlendiricilerinin matlab nümerik çözümleri ile performans analizleri, Uludağ Üniversitesi.
- [78] P. Bunus, 2006. A simulation and decision framework for selection of numerical solvers in scientific computing, *39th Annual Simulation Symposium (ANSS'06)*. 178–187. doi:10.1109/ANSS.2006.9.
- [79] D. Gujarati, 2010. Sıradan Türevli Denklemlerin Sayısal Çözümünde Yüksek Boyutlu Model Gösterilimi Değişmezlik Ölçeni Eniyilemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [80] J. Wang, C. Dai, K. Shi, R. Qin, 2018. Research on Rigid Body Motion Tracing in Space based on NX MCD, içinde: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/320/1/012012.
- [81] R. Fedák, V., Ďurovsky, F., Üveges, 2014. Analysis of robotic system motion in simmechanics and matlab gui environment, *MATLAB Applications for the Practical Engineer*.
- [82] R. Arora, R., & Singh, 2018. Physical modeling of the tread robot and simulated on even and uneven surface, *In Intelligent Systems Design and Applications: 18th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*. 2 173–181.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Şükriye Gülden Atalay
Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mekatronik Müh.	Yıl
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mekatronik Müh.	2018
Lise	Melikgazi Mustafa Eminoğlu Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2021-Halen	Türkiye Radyo ve Televizyon Kurumu	18 ay

YABANCI DİL

İngilizce