

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHNEĞSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İNSAN ŞEKLİNDE ROBOTUN ELEKTRONİK DEVRE  
TASARIMI, İMALATI VE İLGİLİ KONTROL YAZILIMININ YAPILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sabri BİCAKCI**

**Balıkesir, Ocak - 2009**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHNEĞSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İNSAN ŞEKLİNDE ROBOTUN ELEKTRONİK DEVRE**  
**TASARIMI, İMALATI VE İLGİLİ KONTROL YAZILIMININ YAPILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sabri BİCAKCI**

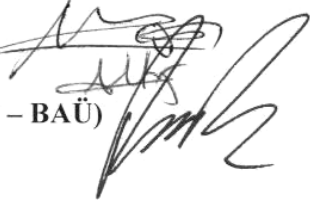
**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ**

**Sınav Tarihi : 13/01/2009**

**Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ (BAÜ)**

**Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ (BAÜ)**

**Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ (Danışman – BAÜ)**



**Balıkesir, Ocak - 2009**

## ÖZET

### İNSAN ŞEKLİNDE ROBOTUN ELEKTRONİK DEVRE TASARIMI, İMALATI VE İLGİLİ KONTROL YAZILIMININ YAPILMASI

**Sabri BİCAKCI**

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ)**

**Balıkesir, 2009**

Bu çalışmada, insan şeklindeki robotun elektronik devre tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Ayrıca robotun matematiksel ifadeleri çıkarılıp, ilgili kontrol sisteminin yazılımı gerçekleştirilmiştir.

Robotun anatomisi, insanın anatomisini andırmaktadır. Robotun toplam 23 serbestlik derecesi vardır ve her eklem bir DC motor tarafından sürülmektedir. Eklemler arası konumları ölçmek için manyetik artımsal encoder ve servo potansiyometre kullanılmıştır.

Robotun kontrolü için çift işlemcili iş istasyonu (work station) tipi masa üstü bilgisayar kullanılmıştır. Robot ile kontrol bilgisayarı arasındaki bilgi akışı göbek bağı (umbilical cord) adı verilen kablolar tarafından sağlanmıştır. Robot üzerindeki sensörlerden alınan sinyaller, tasarlanan elektronik devreler üzerinden geçerek kontrol bilgisayarına ulaşmaktadır.

Sistemin kinematik ve dinamik denklemleri MATLAB programının Symbolic Toolbox 'u kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemler, motor ve elektronik devre karakteristikleri ile bir araya getirilerek MATLAB 'da benzetimleri yapılmıştır. Uygun görülen geri besleme kontrol matris değerleri BorlandC dilinde yazılan kontrol programına aktarılmıştır. Bu değerlerle robotun hareket etme, yürüme deneyleri yapılmıştır. Toplanan deneysel veriler MATLAB benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak tekrar incelenmiştir. Bu süreç iteratif olarak en iyi sonuçlar elde edilinceye kadar devam etmiştir.

Deneyler sonucunda robotun öne – arkaya, sağa – sola statik ve dinamik yürümesi gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarlanan ve imalatı yapılan elektronik

devreler ile yazılımı yapılan kontrol sisteminin başarılı bir şekilde robotu kontrol edebilmesi gerçekleştirilmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER :** insansı robot / elektronik devre / kontrol / benzetim / kinematik / dinamik.

## **ABSTRACT**

### **ELECTRONIC CIRCUIT DESIGN AND PRODUCTION FOR CONTROL SYSTEM OF A HUMONOID BIPED ROBOT**

**Sabri BİÇAKCI**  
**Balıkesir University, Institute of Science,**  
**Department of Electric – Electronics Engineering**

**(Master Thesis / Supervisor : Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ)**

**Balıkesir - Turkey, 2009**

In this study, electronic circuits design and production of a humanoid robot were realized. Also mathematical equations of the robot were obtained and software of control system was written.

Anatomy of the robot resembles to those of humans'. The robot has 23 degrees of freedom and each joint has been driven by a single DC motor. To measure positions of the joints, magnetic incremental encoders and servo potentiometers were used.

A work station PC with dual processors capability was used to control the robot. The data transfer between the robot and the control computer was carried via umbilical cord. The signals from onboard sensors pass through custom electronic circuits before reaching to the host computer.

Kinematics and dynamic equations of the system were computed by using Symbolic Toolbox of MATLAB. The equations coupled with characteristics of motor and electronic circuits simulated in MATLAB. Suitable values of control system feedback matrices were transferred to the control software which was written in BorlandC. Locomotion experiments of the robot were carried out with these values of matrices. The gathered experimental data were analyzed by using MATLAB. These iterative processes were continued until the most satisfactory results were obtained.

As conclusions, forward – backward and side ways locomotion of the robot was realized successfully. These results prove that electronic circuits and control

software work harmoniously and successfully indicating that the initial objectives were reached.

**KEY WORDS :** humanoid robot / electronic circuit / control / simulation / kinematics / dynamic.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. MEKANİK YAPININ TANITIMI .....	3
3. ELEKTRONİK DONANIMIN TANITIMI.....	7
3.1 DC Motorlar .....	7
3.2 Sensörler.....	11
3.2.1 Encoder .....	12
3.2.2 Potansiyometre.....	13
3.3 Anti-Aliasing Filtre Devresi.....	14
3.3 Ara Yüz Devresi.....	14
3.4 DAQ Kartının Özellikleri.....	17
3.5 Kontrol Bilgisayarı.....	18
3.6 Filtre Devresi.....	18
3.7 Motor Sürücü Devresi .....	19
4. BÜTÜN SİSTEMİN İŞLEYİŞİ .....	21
5. ROBOT' UN MATEMATİKSEL MODELİ.....	23
5.1 Kinematik Denklemler .....	23
5.2 Dinamik Denklemler.....	27
5.3 Eklem Konumlarının Belirlenmesi .....	28
6. KONTROL SİSTEMİ.....	31
7. MATLAB HESAPLAMALARI VE DOĞRULANMASI .....	33
7.1 Symbolic Math Toolbox Kullanımı .....	33
7.2 Mathematica ile Matlab Sonuçlarının Doğrulanması .....	34
7.3 Kinematik Denklem Çözümleri .....	34

7.4	Doğrusallaştırma Yoluyla Denklem Çözümü .....	35
7.5	Kontrol Sisteminin Bir Robot Hareketi İçin Dinamik Benzetimi.....	36
8.	DENEYLER.....	42
8.1	Robotun Öne ve Arkaya Yürümesi.....	43
8.2	Ağırlık Merkezinin Yana Kaydırılması .....	58
8.3	Robotun Yan Yan Yürümesi.....	61
9.	SONUÇ .....	65
	KAYNAKÇA.....	67
	EKLER.....	69



## SEMBOL LİSTESİ

$K_T$	Tork sabiti	mN m/A
$R_T$	Rezistans	$\Omega$
$L$	Endüktans	mH
$I_{NL}$	Yüksüz akım	mA
$I_P$	Maksimum akım	A
$J$	Atalet momenti	$g\text{ cm}^2$
$m_i$	Kütle	kg
$r_i$	Kütle merkezini gösteren vektör	
$q_i$	Eklemler arasındaki mesafe	m
$n^c$	Normal doğrultusu	
$R^c$	Uzay düzlemi	
$C_n$	İki ayağın birbirine göre konumu	m
[a]	Atalete ilişkin katsayı matrisi	
[b]	Hız ve pozisyona ilişkin katsayı matrisi	
{f}	Harici kuvvetler	
$E^T \Lambda$	Eklemleri sınırlandırıcı etkiler	
$\Phi$	Durum matrisi	
$\Gamma$	Sisteme giren sinyallerin katsayı matrisi	
$C$	Çıkış matrisi	
$x(k)$	Sistemin hız ve konumlarını içeren vektör	

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Bir eklem parçası. ....	3
Şekil 2.2 Robotun imal edilmiş bazı parçaları. ....	4
Şekil 2.3 Robotun gövde altı. ....	5
Şekil 2.4 Robotun montajlı hali. ....	5
Şekil 3.1 Sistemin genel yapısı. ....	7
Şekil 3.2 Motor şaftına doğrudan bağlantılı eklem yapısı. ....	8
Şekil 3.3 Konik dişli aktarma elemanı. ....	9
Şekil 3.4 Düz dişli aktarma elemanı. ....	9
Şekil 3.5 Motorlar. ....	11
Şekil 3.6 Encoder çıkış sinyalleri. ....	12
Şekil 3.7 74HC126 Tampon entegresi. ....	13
Şekil 3.8 40 Hz Alçak geçiren filtrenin açık şeması. ....	14
Şekil 3.9 Ara yüz devresi. ....	15
Şekil 3.10 4076 Çıkış kontrol entegresi. ....	16
Şekil 3.11 Ara yüz devresi testi. ....	17
Şekil 3.12 Motor sürücü devresi. ....	19
Şekil 3.13 LM12CLK Opampının içyapısı. ....	20
Şekil 5.1 Sagittal Plane için eklem koordinatları. ....	26
Şekil 5.2 Robotun ayaklarının başlangıç konumlaması. ....	29
Şekil 6.1 LQR kontrol sistemi. ....	32
Şekil 7.1 Lateral ayak bileği referansı ve eklem konumu. ....	37
Şekil 7.2 Lateral destek kalça eklemi referans ve eklem konumu. ....	38
Şekil 7.3 Lateral salınım kalça eklemi referans ve eklem konumu. ....	38
Şekil 7.4 Lateral gövde üzeri referans ve eklem konumu. ....	39
Şekil 7.5 İki ayak arasındaki mesafenin lateral eksenindeki eklem konum değişimi. ..	39
Şekil 7.6 Ağırlık merkezinin zemine izdüşümü. ....	40
Şekil 7.7 MATLAB benzetimlerinde yazılan GUI. ....	41
Şekil 8.1 Bir ters sarkaç sistemi. ....	46
Şekil 8.2 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları. ....	48
Şekil 8.3 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları. ....	49
Şekil 8.4 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları. ....	49
Şekil 8.5 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları. ....	50
Şekil 8.6 Robot öne doğru yürürken eklemelere gönderilen kontrol sinyalleri. ....	50
Şekil 8.7 Robot öne doğru yürürken eklemelere gönderilen kontrol sinyalleri. ....	51
Şekil 8.8 Robot öne doğru yürürken eklemelere gönderilen kontrol sinyalleri. ....	51
Şekil 8.9 Robot öne doğru yürürken eklemelere gönderilen kontrol sinyalleri. ....	52
Şekil 8.10 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemelerin deneysel konumları. (İkinci deney). ....	52
Şekil 8.11 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemelerin deneysel konumları. ....	53

Şekil 8.12 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemlerin deneysel kontrol sinyalleri. (Üçüncü deney). ....	54
Şekil 8.13 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemlerin deneysel kontrol sinyalleri. (Üçüncü deney). ....	55
Şekil 8.14 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları. ....	56
Şekil 8.15 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri. ....	57
Şekil 8.16 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları. ....	57
Şekil 8.17 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri. ....	58
Şekil 8.18 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem referansları, konumları. ....	59
Şekil 8.19 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem kontrol sinyalleri. ....	59
Şekil 8.20 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem referansları, konumları. ....	60
Şekil 8.21 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem kontrol sinyalleri. ....	60
Şekil 8.22 Robot yan yan yürürken eklem referansları ve konumları (Birinci deney) ....	62
Şekil 8.23 Yan yan yürüme eklem kontrol sinyalleri (Birinci deney). ....	63
Şekil 8.24 Yan yan yürüme eklem referansları ve konumları (İkinci deney). ....	64
Şekil 8.25 Yan yan yürüme eklem kontrol sinyalleri (İkinci deney). ....	64

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım esnasında her türlü imkânını kullanımına sunan, bilgi birikim ve tecrübelerini benden esirgemeyen ve her konuda bana destek olan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ 'a teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tez çalışması, TÜBİTAK Kariyer programı tarafından desteklenen 105E115 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Maddi imkânları ile çalışmalarım sırasında bana destek sağlayan, ülkemizin gelişiminde büyük katkıları olan TÜBİTAK – BİDEP 'e teşekkür ederim.

Kendinden fedakârlık edip manevi desteğini benden esirgemeyen eşim İlkay BİÇAKCI 'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

**Balıkesir, 2009**

**Sabri BİÇAKCI**

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimi ile robotik mekanizmalar üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Dünyadaki en gelişmiş varlık insan olduğu ve dünya üzerindeki sistemlerin tümü insana uygun tasarlandığı için en çok taklit edilmeye çalışılan mekanizma da insan bedenidir. Bu sistemlerin yaşamımızı kolaylaştırabilmesi için otomasyona geçirilmesi gerekmektedir. Bütün dünyadaki sistemlerin yenilenerek otomasyona geçirilmesi çok maliyetli olacaktır. Bu nedenle insansı robotların geliştirilerek bu sistemleri kontrol edebilecek düzeye getirilmesi daha mantıklıdır [1-4]. Böylece insanlar için tehlikeli olan ortamlarda da bu robotlar kullanılabilir (Nükleer tesisler, yangına müdahale, savaş alanları gibi). Ayrıca ev ve iş yerleri gibi çeşitli alanlarda da hizmetlerde bulunabileceklerdir.

İnsanın hareket etmesini sağlayan temel mekanizma eklemleridir. Eklem hareketlerini sağlayabilmek amacıyla birçok sistem geliştirilmiştir.  rnek olarak hidrolik sürücüler [5], pnömatik sürücüler (yapay kaslar) [6-7], elektrik motorlu sürücüler [8-9] verilebilir.

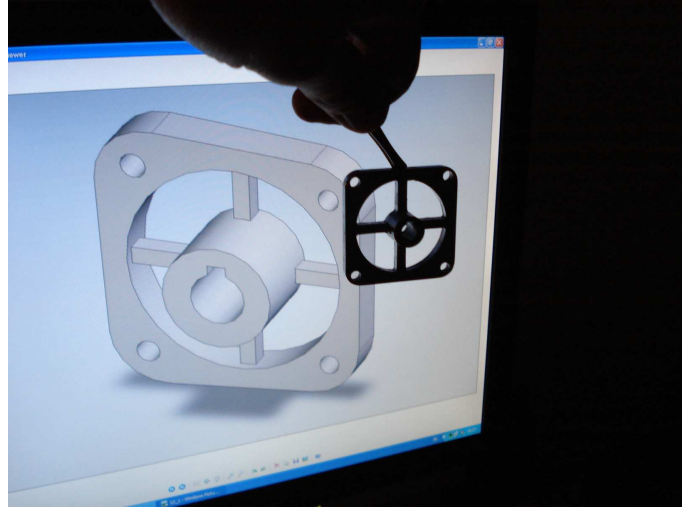
Löffler K., Gienger M. ve Pfeiffer F.  alışmalarında robotun uyguladığı ve robota gelen kuvvetleri ölçebilmek için tork sensörü kullanmışlar ve böylece robotun daha seri hareket edebilmesini sağlamışlardır [10]. Bazı araştırmacılarda eğimli yüzeylerde robotu yürütebilmek amacıyla eklemlerin mutlak açısını belirleyebilmek için eğim l erler (gyroscop) kullanmışlardır [11]. Robotun y r d ğu ortamdaki nesnelere algılayabilmek için kamera ve ultrasonik sensörler gibi harici algılayıcılar kullanılmıştır. Inaba robotun kafasına yerleştirdiği k  k bir kamera ile robotun düşüp düşmeyeceğini algılayabilmiştir [12]. Kajita Metran II adlı robotunda k  k nesnelere ultrasonik sensörle algılamış ve eklem yörüngelerini bu bilgileri kullanarak yeniden düzenlemiştir [13]. Bu çalışmada eklemler arasındaki göreceli açıyı belirleyebilmek için dâhili sensörlerden potansiyometre ve encoder kullanılmıştır.

Bu alışmada, Balıkesir niversitesindeki TÜBİTAK destekli robot projesinin elektrik motorlu eklem sürücülerinin kontrolünü sağlayabilecek bir elektronik sistem tasarlanmıştır. Böyle sistemler genel olarak sensörler, motor sürücü devreleri, filtreler, konum belirleyiciler ve bilgisayarlardan oluşmaktadır.

## 2. MEKANİK YAPININ TANITIMI

İnsanın yaşam alanına ayak uydurabilmesi için, robotun tasarımında insanın vücut yapısı örnek alınmıştır. İnsanın temel hareket kabiliyetlerinden olan yürüme, merdiven çıkma ve dışarıdan uygulanan harici bir kuvvete karşı dengesini koruyabilme robotun yapabilmesi istenilen hareketlerdir. Bu hareketleri gerçekleştirebilmesi için 23 ana ekleme ihtiyacı vardır.

Robot önce bilgisayar ortamında CAD programları kullanılarak oluşturulmuştur. Robotun her parçası detaylı bir şekilde çizilmiştir. Şekil 2.1’ de robotun bütün eklemlerinde kullanılan bir parça ve bunun bilgisayar ortamında detaylı çizimi (üç boyutlu) görülmektedir.



Şekil 2.1 Bir ekleme parçası.

Bu çizimler kullanılarak parçaların imalatı gerçekleştirilmiştir. Robot 130 değişik parçadan oluşmaktadır. Toplam imal edilen parça sayısı 700 civarındadır. Hazır alınan parçalarda göz önüne alındığında (vida vs.), robot ta yaklaşık 800

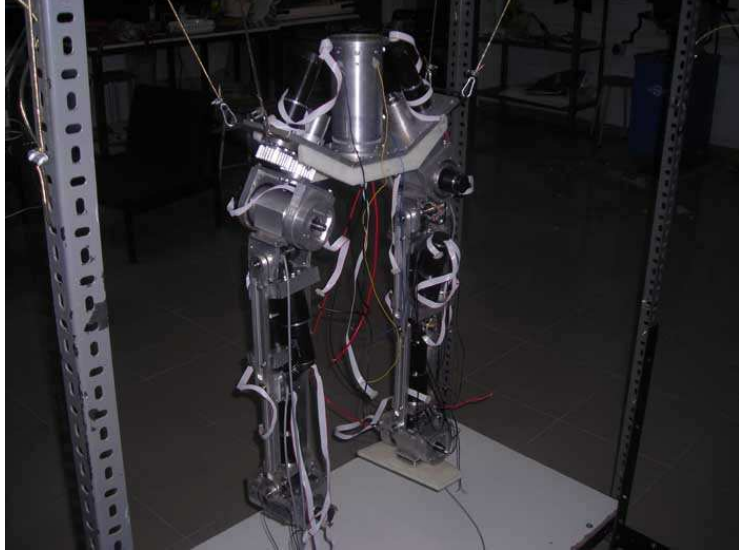
mekanik parça bir araya getirilmiştir. Şekil 2.2' de imal edilmiş parçalardan bazıları görülmektedir.



Şekil 2.2 Robotun imal edilmiş bazı parçaları.

Robotun birçok parçası, ucuzluğu ve hafifliği nedeniyle alüminyumdan imal edilmiştir. Fakat alüminyum çok dayanıklı bir malzeme olmadığı için aşırı yük taşıması gereken bazı parçalar sertleştirilmiş çelikten imal edilmiştir. Robot yaklaşık 145 cm boyunda ve 55 kg ağırlığındadır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4' te robotun motorları ile mekaniğinin birleştirilmiş halleri görülmektedir.





Şekil 2.3 Robotun gövde altı.



Şekil 2.4 Robotun montajlı hali.

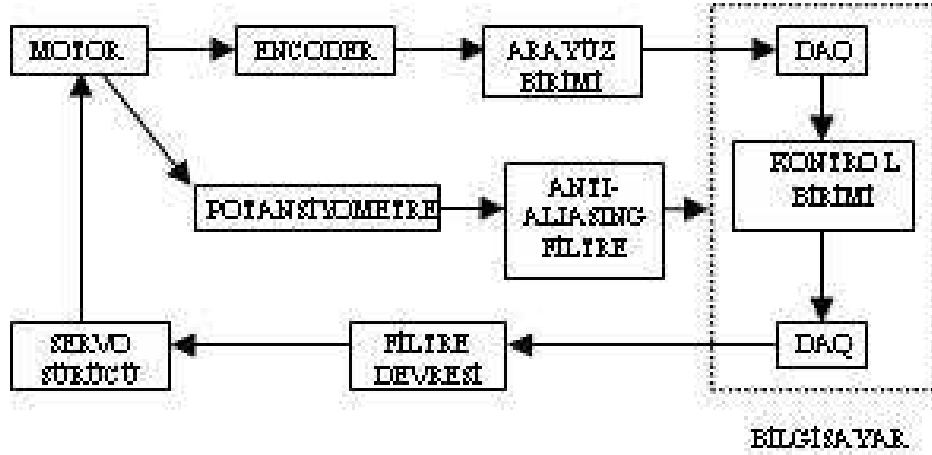
Her ne kadar robotun mekanik tasarımında insan örnek alınmışsa da bazı eklemlerinin hareket kabiliyeti insaninkilerden farklıdır. Örneğin, robotun diz eklemlerinde diz kapağı gibi bir mekanizma yoktur. Böylece robotun dizleri öne ve arkaya olmak üzere her iki yönde kıvrılabilmektedir, dolayısıyla robotta öne ve arkaya yapılan hamlelerde bir farklılık bulunmamaktadır. Aynı simetri özelliği robotun diğer eklemlerinde de bulunmaktadır. Eklemlerin hareket sahası da insaninkinden daha fazladır. Eklemlerin bu yapısı robotta değişik yürüme stillerini de deneme olanağı sağlamaktadır.

Atalet momentlerini en azda tutabilmek için eklemler arasındaki mesafeler mümkün olduğunca kısa tutulmuştur. Bu da daha az moment ve güç gereksinimi anlamına gelmektedir. Kalçada ise iki bacak dikey eksene göre 15 derece açıda birbirine zıt yönlerde yerleştirilmiştir. Mekanik imalatta ön görülen hata paylarından dolayı robotun eklemleri arasında, ayak eklemlerinde olduğu gibi, 4-5 derecelik mekanik boşluklar bulunmaktadır. Bu boşlukların oluşturacağı olumsuz etki kontrol sistemi ile telafi edilmektedir.

Robot diz eklemleri insanın yürüyüşüne benzer biçimde hiç bükülmeden ayakta durabilmekte ve dik bir yürüyüş sergileyebilecek kapasitededir.

### 3. ELEKTRONİK DONANIMIN TANITIMI

Şekil 3.1' te sistemin genel yapısı görülmektedir. Motorun hareketi kullanılan encoder sistemi ile algılanmakta ve eklemin konumu bu sistemin yüksek hız gereksinimi için özel olarak tasarlanan ara yüz birimi ile hesaplanmaktadır. Ayrıca potansiyometre aracılığı ile de eklemlerin gerçek konumları voltaj olarak tespit edilmektedir. Buradan alınan konum bilgisi DAQ kartı aracılığı ile bilgisayardaki kontrol sistemine iletilmektedir. Burada kontrol algoritması ile yapılmak istenen harekete bağlı olarak ulaşılması gereken konum hesaplanmakta ve buna uygun çıkış sinyali DAQ cihazı aracılığı ile filtre devresinden geçirilip motor sürücü üzerinden motora uygulanmaktadır.

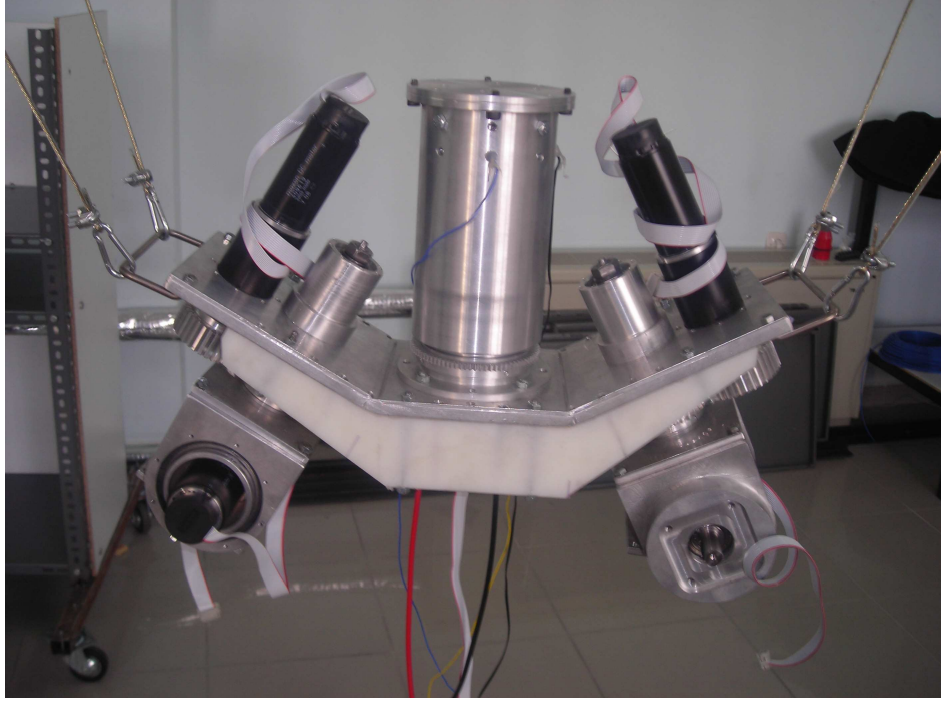


Şekil 3.1 Sistemin genel yapısı.

#### 3.1 DC Motorlar

Robotun hareket etmesini sağlayan 23 adet DC motor bulunmaktadır. Eklemleri hareket ettirebilmek için değişik mekanik tasarımlar kullanılmıştır. Yükün fazla

olduğu eklemler doğrudan motorun Şaftına bağlanmıştır. Motor Őaftının zarar görmemesi için bağlantı elemanları arasına yük taŐıyıcı rulmanlar kullanılmıştır. Şekil 3.2’ de robotta kullanılan bu eklem bağlantı Őeklinin bir rneği görülmektedir.



Şekil 3.2 Motor Şaftına doğrudan bağlantılı eklem yapısı.

Yükün fazla olmadığı ve motor Őaftının eklem doğrudan bağlantısının mümkün olmadığı durumlarda, değişik aktarma elemanları kullanılarak eklemlerin hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Bu aktarma elemanları konik dişli ve düz diŐlilerdir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’ te bu elemanların eklem bağlantılarının yapılmıŐ hali görülmektedir.



Şekil 3.3 Konik dişli aktarma elemanı.



Şekil 3.4 Düz dişli aktarma elemanı.

Bu eklemlerde, robotun temel hareketlerini sağlayabilecek gücü elde etmek için Maxon firmasının 20 W, 70 W ve 150 W olmak üzere üç farklı güçte motoru kullanılmıştır. Aşağıda bu motorların parametreleri verilmiştir [14];

20 Watt için;

Tork Sabiti (*Torque Constant,  $K_T$* ) : 23.4 mNm/A

Rezistans (*Resistance,  $R_T$* ) : 2.32  $\Omega$

Endüktans (*Inductance,  $L$* ) : 0.24 mH

Yüksüz Akım (*No – Load Current,  $I_{NL}$* ) : 37 mA

Maksimum Akım (*Peak Current,  $I_P$* ) : 10.4 A

Atalet Momenti (*Rotor Inertia,  $J$* ) : 10.3 gcm<sup>2</sup> (*with encoder*)

70 Watt için;

Tork Sabiti (*Torque Constant,  $K_T$* ) : 36.4 mNm/A

Rezistans (*Resistance,  $R_T$* ) : 0.316  $\Omega$

Endüktans (*Inductance,  $L$* ) : 0.20 mH

Yüksüz Akım (*No – Load Current,  $I_{NL}$* ) : 105 mA

Maksimum Akım (*Peak Current,  $I_P$* ) : 21.5 A

Atalet Momenti (*Rotor Inertia,  $J$* ) : 67.7 gcm<sup>2</sup> (*with encoder*)

150 Watt için;

Tork Sabiti (*Torque Constant,  $K_T$* ) : 30.2 mNm/A

Rezistans (*Resistance,  $R_T$* ) : 1.11  $\Omega$

Endüktans (*Inductance,  $L$* ) : 0.08 mH

Yüksüz Akım (*No – Load Current,  $I_{NL}$* ) : 137 mA

Maksimum Akım (*Peak Current,  $I_P$* ) : 75.9 A

Atalet Momenti (*Rotor Inertia,  $J$* ) : 134 gcm<sup>2</sup> (*with encoder*)

Sürtünmeleri ihmal ettikten sonra motorların matematik modeli aşağıdaki gibi elde edilir [15];

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{s(JLs^2 + JRs + K_E K_T)} \quad (3.1)$$

150 Watt'lık motor 2.2 Nm döndürme kuvvetini 24 V, 75.9 A lik güç değerlerinde üretebilmektedir. Motorun zaman sabiti 4.8 ms dir. Fakat motorun nominal torku 0.17 Nm, nominal akımı ise 5.7 A dir. Motorun hasar almadan

güvenli bir şekilde çalışabilmesi için eklemine göre en az 25 Nm tork gerekmektedir. Gerekli gücü motorlar hasar almadan karşılayabilmek için Maxon firmasının planet dişli kutusu kullanılmıştır. Bu dişli kutusu 150:1' lik dönüştürme oranına sahiptir [14]. Böylece tork 150 kat arttırılmıştır. Aynı durum 70 Watt ve 20 Watt' lık motorlar içinde geçerlidir. Şekil 3.5' de kullanılan motorlardan örnekler görülmektedir.



Şekil 3.5 Motorlar.

### 3.2 Sensörler

Robotlarda hareketleri etkileyen değişkenleri kontrol edebilmek için kullanılan çok çeşitli sensörler mevcuttur. Bu sensörler şöyle sıralanabilir.

- Çevredeki cisimleri algılayabilmek için kamera ve hareket sensörleri
- Ses algılayabilmek için mikrofonlar
- Kuvvet algılayabilmek için kuvvetölçerler (strainage)
- Eklem konumlarını algılayabilmek için encoder ve potansiyometreler
- Hareket yönünü algılayabilmek için gyroscope

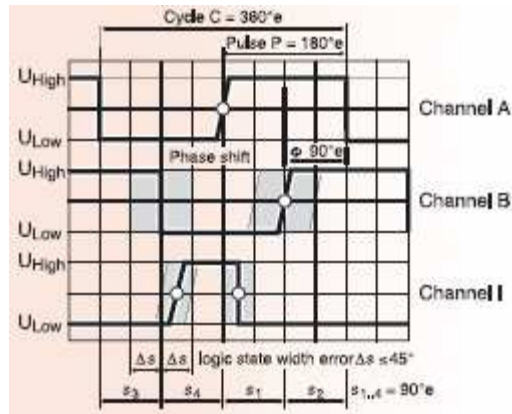


- Herhangi bir fiziksel teması algılayabilmek için basınç sensörleri

Bu robotta eklem konumlarını algılayabilmek için potansiyometre ve encoderin her ikisi de kullanılmıştır. Ayrıca ileriki aşamalarda kullanılmak üzere kuvvetölçerlerin bağlanması için mekanik parçalar hazırlanmış fakat kuvvetölçerler henüz kontrol sistemine dâhil edilmemiştir.

### 3.2.1 Encoder

Motorların tur sayısını ve dönüş yönünü belirleyebilmek için yine Maxon firmasının *HEDL 5540* model manyetik encoder sistemi kullanılmıştır. Bu encoder sistemi 1/500 (tur/adım) hassasiyetinde algılama yapabilmektedir ve maksimum çalışma frekansı 100 kHz dir [14]. Motor, dişli kutusu ve encoder sistemi Maxon firması tarafından birleştirilmiştir ve tam bir bütünlük arz etmektedir. Encoder çıkışlarından elde edilen bilgi sinyali *EIA Standard RS 422* standardında ve Şekil 3.6' da gösterilen formattadır;

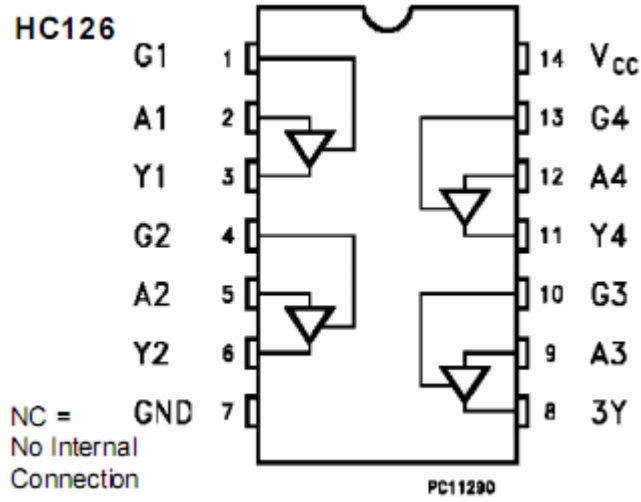


Şekil 3.6 Encoder çıkış sinyalleri.

Encoderden konum bilgisi sayısal olarak elde edildiği için gürültü ihtiva etmemektedir. Hareketin aktarma elemanları ile sağlandığı eklemlerde encoder doğrudan motor şaftına bağlı olduğu için eklem boşluklarını algılayamamaktadır. Bu kayıp her bir eklem için yaklaşık 4-5 derece civarındadır.



Robot ile ara yüz devrelerinin bulunduğu sistem arasında encoder çıkışlarını aktarmak için 15 metrelik elektromanyetik korumalı sinyal taşıma kabloları kullanılmıştır. Kablonun uzun olması sebebi ile statik elektrik yüklenmeleri olabilmektedir. Buda CMOS teknolojisi ile çalışan encoderlerin hasar almasına sebep olmaktadır. Bu yüzden encoder çıkışlarında tampon devreleri kullanılmıştır. Böylece encoderler korunmaktadır. Şekil 3.7' de tampon devresinde kullanılan entegre görülmektedir.



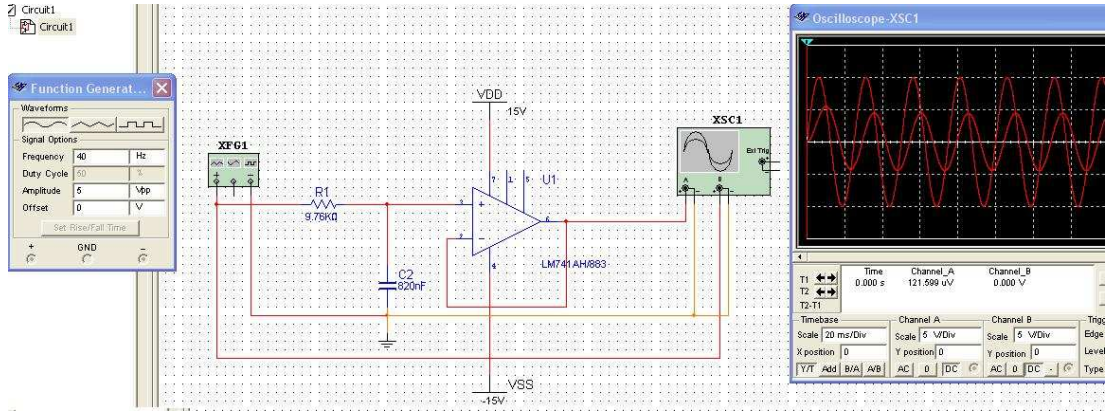
Şekil 3.7 74HC126 Tampon entegresi.

### 3.2.2 Potansiyometre

Eklemler arasındaki açığı algılayabilmek için kullanılan diğer sensör ise sonsuz türlü servo potansiyometredir. Potansiyometre eklem şaftına doğrudan bağlı olduğu için eklemler arasındaki boşlukları algılayabilmektedir. Fakat potansiyometre ile konum ölçümü analog olarak gerçekleştirdiğinden çevresel gürültülerden etkilenebilmektedir. Bu tip sensörlerde hassasiyet encoderli sistemlere nazaran oldukça düşüktür. Dolayısı ile hassasiyetin önemli olduğu noktalarda encoder, eklem boşluklarının en aza indirilmesi gerektiği durumlarda ise potansiyometre kullanılmaktadır.

### 3.3 Anti-Aliasing Filtre Devresi

Anti-aliasing filtresi bir alçak geçiren filtredir. Sistemin doğal frekansından daha yüksek frekanstaki sinyallerin DAQ kartı tarafından örneklenerek yanlış okumalara sebep vermemesi için bu filtre kullanılmıştır. Filtrenin kesim frekansı 40 Hz dir. Böylece potansiyometrenin çevresel gürültülerden etkilenmesi azaltılmıştır. 50 Hz şebeke gürültüsü dâhil 40 Hz in üzerindeki çevresel gürültüler bastırılmıştır. Filtrenin açık şeması ve benzetim sonuçları Şekil 3.8’ de görülmektedir.



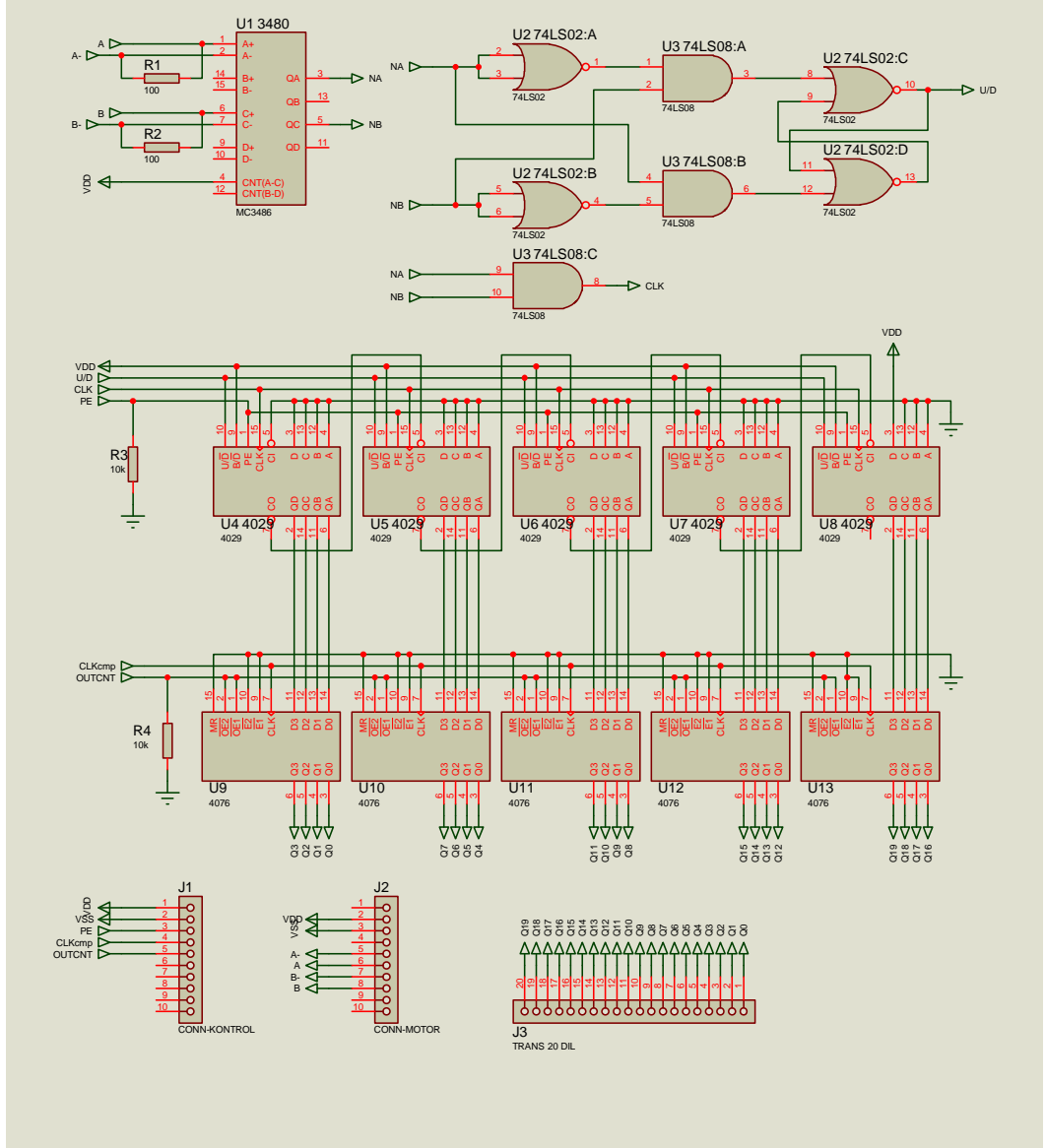
Şekil 3.8 40 Hz Alçak geçiren filtrenin açık şeması.

Filtre çıkışından alınan sinyal DAQ kartının analog girişlerine uygulanmaktadır. Burada konum bilgisine dönüştürülmektedirler.

### 3.4 Ara Yüz Devresi

Robotta sistem dinamikleri hızlıdır. Bundan dolayı sistemin işleyişi daha hızlı olmalıdır. Bu hız gereksinimini karşılayabilmek için encoder çıkışındaki bilgiyi konum bilgisine dönüştüren sistemin de bu hız seviyesine uygun olması

gerekmektedir. Bu nedenle hazır bir yapının satın alınması yerine temel kapı elemanları ve sayıcı entegrelerinden oluşan yeni bir ara yüz devresi tasarlanmıştır. Şekil 3.9’ da bu ara yüz devresinin şeması gösterilmektedir.

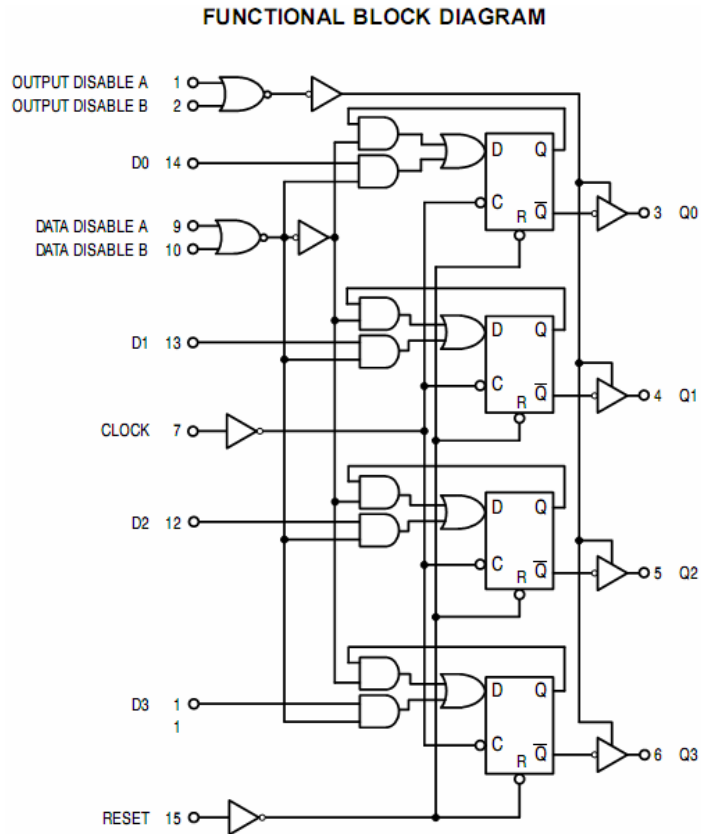


Şekil 3.9 Ara yüz devresi.

Tasarlanan ara yüz devresi encoderin çıkış hızının çok üzerinde bir hızla (yaklaşık 2 MHz) çalışabilmektedir. Encoder çıkışlarındaki 90° lik faz farkının yönünden motorun dönüş yönü ve motorun adım atıp atmadığı belirlenmektedir. Yüksek hassasiyet gereksiniminden dolayı 20 bitlik konum bilgisi kullanılmıştır. Ara yüz devresi 0.0004 radyanlık değişimleri algılayabilmektedir. Bu hassasiyet

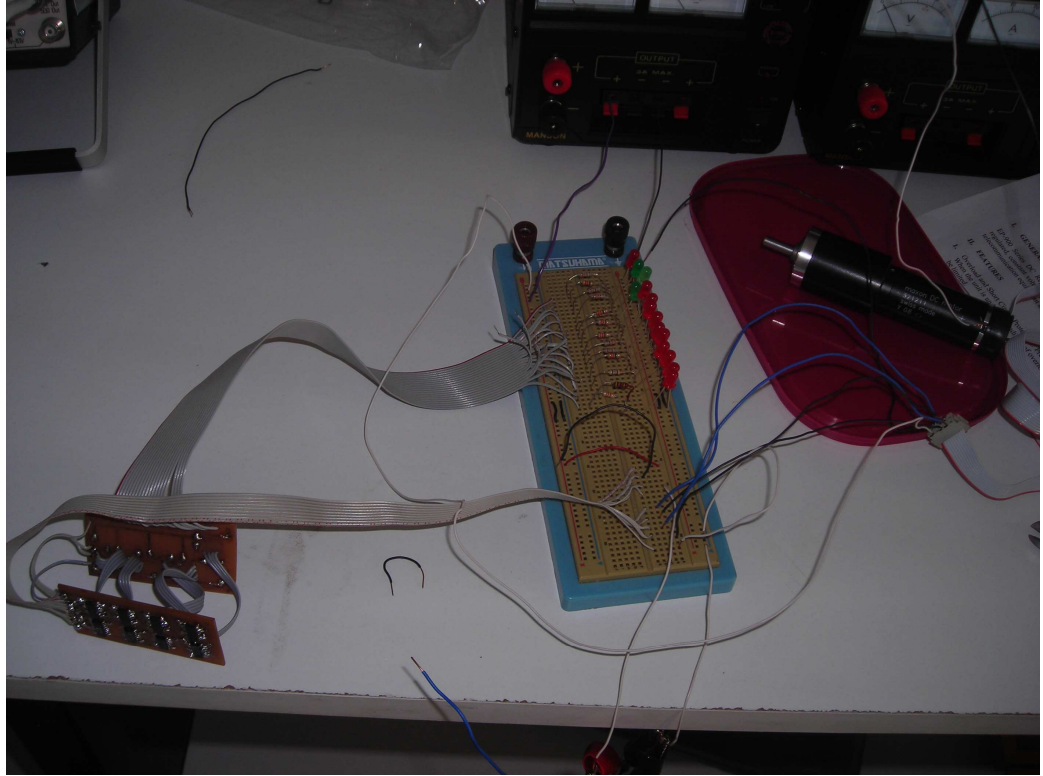
değeri dünyadaki diğer insansı robotlarınkinden oldukça fazladır (Asimo, Gonzales [9]).

Robotta 23 adet motor bulunmaktadır. Dolayısıyla 23 adet encoder ve buna bağlı olarak ta 23 adet ara yüz devresi bulunmaktadır. Her bir ara yüz devresinin 6 girişi (A,/A,B,/B,Out Control ve Clock) ve 20 çıkış portu (20 bitlik konum bilgisi) vardır. Her bir ara yüz devresini ayrı ayrı DAQ kartına bağlamak için  $20 * 23 + 2 * 23 = 503$  adet I/O portuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle ara yüz devrelerindeki çıkış kontrol entegrelerini kontrol eden bir yol verme devresi yapılmıştır. Böylece sadece 20 (ara yüz çıkışları) + 7 (yol verme devresi kontrol sinyalleri) = 27 adet I/O portu ile 23 adet ara yüz devresinin çıkışları sırasıyla okunmuştur. Kullanılan çıkış kontrol entegresi 4076' nın içyapısı Şekil 3.10' da görülmektedir.



Şekil 3.10 4076 Çıkış kontrol entegresi.

Ara yüz devresi 2 MHz lik bir hızla motorun dönüş yönüne bağlı olarak yukarı, aşağı ikili (binary) tabanda saymaktadır. Devre çıkışları yüksek empedans konumuna alınsa bile devre sürekli olarak güncel motor konumunu saymaktadır. Çıkış kontrol entegresi sayesinde 23 motorunda o anlık konumları hafızaya alınmakta ve bunlar sırasıyla DAQ kartı vasıtasıyla kontrol bilgisayarına yüklenmektedir. Böylece sayma işlemi sürekli devam ederken anlık konum okumaları da kolaylıkla sağlanabilmektedir. Şekil 3.11’ de imal edilen ara yüz devresi test edilirken görülmektedir.



Şekil 3.11 Ara yüz devresi testi.

### 3.5 DAQ Kartının Özellikleri

Tasarlanan sistemin dinamiklerinin hızlı olmasından dolayı yüksek hızlarda veri alış verişi yapabilen Adlink firmasının DIO ve DAC modeli DAQ cihazları kullanılmıştır. Bu cihazlar, 32 tek uçlu (*single ended*) giriş için, 500 ksmp/s

örnekleme hızına ve 16 bit çözünürlüğe sahiptir. DAQ kartının analog çıkışları  $\pm 10$  V' luk voltaj aralığına sahiptir ve her bir çıkış biriminden en fazla 10 mA akım çekilebilmektedir [16].

DAQ kartının dijital giriş birimleri dâhili olarak pull-up dirençlerine sahiptir. Bu girişlere sinyal gönderirken, “lojik 0” girişe herhangi bir sinyalin uygulanmaması ya da +5 V uygulanması ile “lojik 1” ise girişin, kartın kendi toprağına bağlanması ile sağlanmaktadır. Bu şartı sağlayabilmek için ara yüz birimi ile DAQ kartı arasında yüksek hızlı anahtarlama devresi tasarlanmıştır.

### **3.6 Kontrol Bilgisayarı**

DAQ kartlarının bağlandığı ve kontrol işleminin yapıldığı birim kontrol bilgisayarıdır. Bu bilgisayar çift Pentium III 800 MHz işlemcili bir sistemdir. İşletim sistemi olarak MS-DOS kullanılmaktadır. Robotun dinamiklerinin yüksek olması sebebi ile bütün sistemin bu hıza ayak uydurması gerekmektedir. Bu nedenle Windows tabanlı işletim sistemlerine nazaran daha hızlı çalışan MS-DOS işletim sistemi seçilmiştir. Kullanılan DAQ kartları için de MS-DOS işletim sistemine uygun sürücüler yazılmıştır. Böylece bilgisayar ve DAQ kartları oldukça yüksek bir hızda çalışmaktadırlar. Bu sistem bütünüyle, bir saniyede 30000 kontrol döngüsüne sahiptir. Buda robotun yürüyebilmesi için gerekli olan hızın oldukça üzerindedir. Bu hız ileriki çalışmalarda kontrol sistemine farklı algılama elemanlarının da eklenmesine olanak sağlamaktadır (kamera, kuvvet algılayıcıları, ses algılayıcıları gibi).

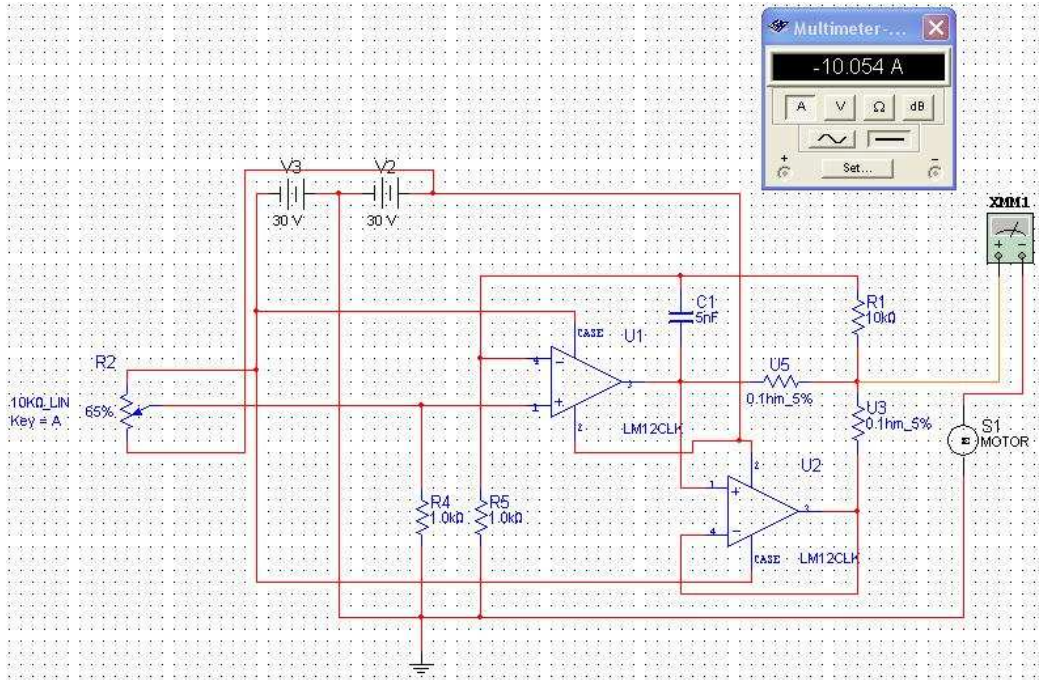
### **3.7 Filtre Devresi**

Alçak geçiren filtre dijital kartın oluşturduğu süreksizlik noktalarını sürekli hale getirmektedir. Böylece o noktalarda güç elektroniğinin gürültü sinyallerini güçlendirmesi engellenmektedir. Ayrıca motorların tepki veremeyeceği yüksek

frekanslı sinyaller azaltılmaktadır. Filtrenin kesim frekansı 50 Hz dir. Böylece büyük ölçüde güç tasarrufu da sağlanmaktadır.

### 3.8 Motor Sürücü Devresi

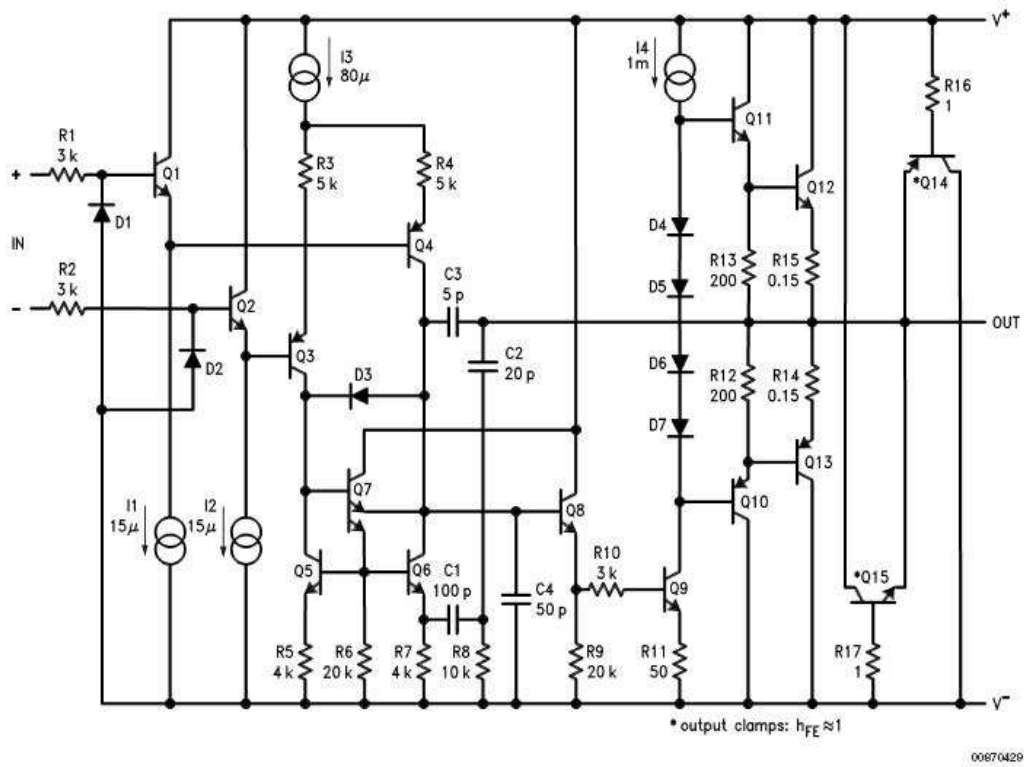
Eklemlerin mevcut konumlarına ve robotun matematik modeline göre belirlenen yeni eklem konumlarına ulaşmak için kontrol sistemi tarafından kontrol sinyalleri üretilir. Bu sinyalleri kontrol bilgisayarından filtre ve sürücü devrelerine aktaran DAQ kartının portlarından en fazla port başına 10 mA akım alınabilmektedir. Motorları sürmek için gerekli akım değerleri ise 0.1 A – 50 A arasında değişmektedir. Bu güç gereksinimini sağlayabilmek için motor sürücü devresi kullanılmaktadır. Ayrıca DAQ kartının çıkış voltaj aralığı  $\pm 10$  V dur. Motorlar ise  $\pm 24$  V' luk gerilim değerleri altında çalışabilmektedirler. Gerekli voltaj kazancını da bu devre sağlamaktadır. Şekil 3.12' de motor sürücü devresi görülmektedir.



Şekil 3.12 Motor sürücü devresi.



Motor sürücü devresi güç opamplarının (LM12) paralel bağlantısından oluşmaktadır. Her bir opamp 10 A'lık bir akım sağlayabilmektedir. Akımı attırabilmek için bu opamplar birbirine paralel bağlanmıştır. Bu bağlantı esnasında opampların birbirlerini sürmelerini engellemek için aralara kenetleme (clamp) diyotları konmuştur ve bazı yerlerine de filtreler eklenmiştir. Şekil 3.13' de LM12CLK opampının içyapısı görülmektedir.



Şekil 3.13 LM12CLK Opampının içyapısı.



#### 4. BÜTÜN SİSTEMİN İŞLEYİŞİ

Robotun eklemlerine doğrudan ya da dolaylı olarak bağlı olan motorlarla robotun hareket edebilmesi sağlanmaktadır. Eklemler aynı insanlarda olduğu gibi birbirleri ile koordineli olarak, ağırlık merkezini robotun ayakları üzerinde tutacak şekilde çalışmalıdırlar. Böylece robot düşmeden yürüyebilecek ve yapması planlanmış hareketleri yerine getirebilecektir. Bundan dolayı yürümeden önce, temel amaç robotun ağırlık merkezini dengeyi sağlayabilecek şekilde ayarlayabilmesidir. Daha sonra yürüme ve diğer işlemler gelmektedir.

Ağırlık merkezini belirleyebilmek için robotun matematik modelinin çıkarılması gerekmektedir. Uzunlarının fiziksel özellikleri belirlenip, diğer faktörler göz önüne alınarak robotun matematik modeli çıkarılmıştır. Eklem konumları sensörlerden alınan sinyallerin işlenmesi ile elde edilerek matematik modelde yerlerine konularak, ağırlık merkezi hesaplanmaktadır. Daha sonra robotun ağırlık merkezinin ayakların üzerine kaydırılabilmesi için eklemlerin olması gerektiği konumlar hesaplanmaktadır. Eklemlerin mevcut konumları ile istenen konumları arasındaki farkı kapatabilmek için motorlara gönderilmesi gereken kontrol sinyalleri kullanılan kontrol türüne (P, PI, PID, Optimal Kontrol, Bulanık Mantık gibi) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu sinyaller kontrol bilgisayarına bağlı olan DAQ kartlarının analog sinyal çıkışları ile filtre devresine uygulanmaktadır. Filtre devresinde kontrol sinyali gürültülerden ve motorun cevap veremeyeceği frekanslardaki sinyallerden arındırılmaktadır. Filtre çıkışlarındaki sinyal motor sürücü devrelerine aktarılmaktadır. Burada kontrol sinyali motorları sürebilecek seviyeye ve güce getirilerek, çıkışları motorlara uygulanmaktadır.

Robotun ağırlık merkezinin dengede kalabilecek şekilde ayarlanmasından sonra, robotun yürümesi için ağırlık merkezine göre bir harita oluşturulmalıdır. Bu haritaları çıkartmak için birçok metot mevcuttur. Bunlar kısaca, en baştan haritayı

belirleme (off-line) ve gerçek zamanlı harita belirleme olarak sınıflandırılabilir [3,13,22].

Belirlenen ağırlık merkezi haritasına göre robot ağırlık merkezini kaydırarak yürüme işlemini gerçekleştirebilir.

Merdiven çıkma işleminde de ağırlık merkezinin öne kaydırılmasından ibarettir. Fakat ağırlık merkezi kaydırılırken robotun hamleleri merdiven yüksekliği gözle alınarak gerçekleştirir.

## 5. ROBOT' UN MATEMATİKSEL MODELİ

Kinematik denklemler robot eklemlerinin değişik yapılandırmalarda analizlerinin yapılmasına olanak vermektedir. Örneğin, robotun değişik eklemlerinin birbirlerine göre konumları ve ağırlık merkezinin izdüşümlerinin belirlenmesi gibi.

Eklemlerin göreceli konumlarının bilinmesi özellikle yürüme işlemini gerçekleştirilirken, iki ayağın birbirine çarpmaması ve her bir ayağın istenen konumlarda olmasını sağlamada kullanılmaktadır. Ayrıca, gövde üstündeki eklemlerinde, değişik hareketler esnasında, robotun vücudunun diğer kısımları ile etkileşimini belirlemektedir.

Ağırlık merkezinin izdüşümlerinin bilinmesi ve istenilen doğrultuda yönlendirilmesi robotun hareket edebilmesine olanak sağlamaktadır.

### 5.1 Kinematik Denklemler

Değişik durumlar için farklı kinematik denklemlerin (KD) çıkarılması gerekmektedir. Örneğin robotun iki ayak üzerinde iken durumunun belirlenmesi ve eklemlerin göreceli konumlarının hesaplanması için bir takım KD çıkartılırken; robotun tek ayak üzerinde durması için başka bir takım denklemlerin çıkarılması gerekli olmaktadır.

Denklemlerin mümkün olduğunca basit olması da önemlidir. Kabul edilen başlangıç koşullarından fazla uzaklaşmadığı sürece iki boyutlu (2B veya 2D denklemler) denklemlerin vermiş olduğu değerler ve bu denklemlerin çözümleri üç boyutlu (3B veya 3D denklemler) denklemlere çok yakın sonuçlar vermektedir. Bazı durumlarda ise belirli çalışma noktası civarında doğrusal olmayan (non-linear)

denklemler Taylor serisine açılarak hesaplamaların daha hızlı olmasına olanak verilmektedir [9,17].

Denklemler ne kadar hızlı çözülebilirirse, robot kendi yürüme koordinatlarını gerçek zamanlı olarak üretebilme olanağına o kadar hızlı sahip olacaktır. Ayrıca robotun alt ve üst kısmını ayrı ayrı hesaplamak da denklemleri sadeleştirebilmektedir. Yine burada da değişik kabullerin yapılması ve bu kabullerin tutarlılığının test edilmesi gerekmektedir. Çalışmalarda yapılan her kabul, değişik durumlar altında test edilmiştir. Örneğin, robotun bir ayağını öne atması durumunu düşünülürse, havadaki ayağın zemine göre paralelliğinin sağlanması gereklidir. Aksi takdirde robotun ayağının belirli kısımları zeminle temas edebilir ve hareketi olumsuz etkileyebilir.

İki ayaklı yürüyen robotlar sabit platformlar (manipülator) değildir. Örneğin, “robot kollar” (manipülator) da, kolun bir ucu rijit bir zemine montelidir ve robot kolunun uç noktasının konumunu hesaplamak ve kontrol etmek son derece kolaydır. Fakat bu robotta destek ayağı dahi hareketli olabilmektedir ve bu durum kontrol işlemini son derece zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, bir kabul yapılmak zorundadır. Burada her zaman destek ayağının zeminle tam temas ettiği kabul edilmiştir. Ayak bileğinin yan ve ön düzlemlerindeki eklemleri (Sagittal ve Lateral Planes) için gerçek zamanlı referans noktaları üretilmektedir. Amaç, diğer eklemlerin olası konumlama hatalarına (tracking error) rağmen ayağın zemine paralel olmasıdır. Fakat bu kabul aynı zamanda ağırlık merkezi ve göreceli ayak konumları hakkında kabul yapılmasını gerektirmektedir. Yapılması gerekli kabul ise salınım yapan ayağın (Swing leg) diz altı ve diz eklemi ile birleştirilmesidir.

Bu kabulden sonra değişik durumlar için yapılan sağlamalar da, robotun hareket alanı içerisinde yapılan kabulün ağırlık merkezi ve ayak konumlarına etkisinin 1mm ve altında olduğu hesaplamıştır. Salınım yapan ayağın (Swing leg) gerçek zamanlı olarak, diğer eklemlerin hareketini de göz önünde bulundurarak kendi referansını üreterek ayak bileğini konumlamasını gösterir deneyin video görüntüleri [18] de verilmiştir.

Yapılan kinematik hesaplamalara bir örnek teşkil etmesi için, örnek bir ağırlık merkezi hesaplaması verilmiştir.

$m_i$  robotun  $i$ . eklemının tek noktada toplanmış kütlesi.  $i=1,\dots,k$ ,  $k$  hesaba katılan eklem sayısı.

$r_i$  robotun  $i$ . eklemının kütle merkezini gösteren vektör.  $i=1,\dots,k$

$q_j$  iki eklem arasındaki mesafe.  $j = 2,\dots,k$

$n^c$  ise  $R^c$  de her bir vektörün doğrultusunu ifade eder.

Bu durumda, 3 üç boyutlu (3D), doğrusal olmayan denklem,

$$F_3 = m_1 r_1 n^1 + m_2 (q_2 n^1 + r_2 n^2) + m_3 (q_2 n^1 + q_3 n^2 + r_3 n^3) + \dots + m_k (\dots + q_k n^{k-1} + r_k n^k) \quad (5.1)$$

şeklinde kapalı form da yazılabilir. Denklem 5.1, iki boyuttaki (2D) denklemler içinde benzer şekilde yazılabilir. Benzer bir vektörel işlemle yan düzlemde hareket eden eklemler (Sagittal Plane) için iki ayağın göreceli konumları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Denklem 5.1, çok uzun olduğu için, son hali burada verilmemiştir. İşlemlere örnek olması için sadece gövde altını içeren ağırlık merkezi denklemleri ve Denklem 5.1' in ilk kısmı ek olarak verilmiştir (EK A). “Open chain” matematik model olarak değerlendirilen denklemde, salınım yapan (swing leg) ayak bilekleri hesaba katılırken aynı ayağın diz eklemine parametreler eklenmiştir. Böylece denklem büyük ölçüde kısaltılmış olmaktadır. Gövde üzeri içinde benzer bir denklem elde edilmiştir. Sonra her birinin ağırlık merkezleri süper pozisyonla birleştirilmiştir.

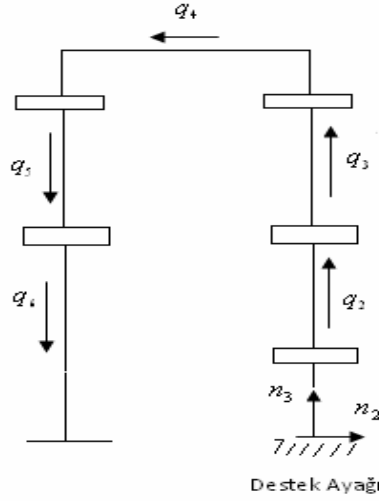
Ayrıca Denklem 5.1 de bazı indeks notasyonları gösterilmemiştir.

İki ayağın öne doğru, birbirinden açıklığı  $SepSn_1$  ise,

$$SepSn_1 = q_2 \sin(x_1) + q_3 \sin(x_1 + x_2) - q_5 \sin(x_1 + x_2 - x_3 - x_4) - q_6 \sin(x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5) \quad (5.2)$$

İki ayağın zemine göre birbirinden yükseklik farkı  $SepSn_3$  ise,

$$SepSn_3 = q_2 \cos(x_1) + q_3 \cos(x_1 + x_2) - q_5 \cos(x_1 + x_2 + x_3 - x_4) - q_6 \cos(x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5) \quad (5.3)$$



Şekil 5.1 Sagittal Plane için eklem koordinatları.

Yukarıdaki kinematik eşitlikler robotun sol ayak üzerinde olduğu (sol ayak destek ayağı) kabul edilerek çıkarılmıştır. Şekil 5.1' de,  $q_2 = q_3 = q_5$  dir.

Farklı bir yaklaşımla, robotun kalçasından askılı bir durumda olduğu durum için de denklemler çıkarılmıştır. Burada, her iki ayak da serbest hareket edebilmektedir.

$S_{i0}$  bir  $i$  eklemının  $R^0$  eklemine göre dönüşüm matrisi olsun. Bu durumda, robotun iki ayağı arasında, öne doğru olan açıklık aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$SepSn_1 = (l_{1y} - l_{1z}) - l_2 S_{10} - l_2 S_{20} - l_3 S_{30} + (l_{1y} + l_{qz}) + l_2 S_{40} + l_2 S_{50} + l_3 S_{60} \quad (5.4)$$

Denklem 5.4' de,  $l_{1y}$  ve  $l_{1z}$  gövde ortasından ayak bağlantı noktalarına olan mesafeleri ifade eder.  $l_2$  diz ve kalça, aynı zamanda diz ve ayak bilekleri arasındaki mesafedir.  $l_3$  ayak bileğinden ayak altına kadar olan mesafeyi gösterir.

Benzer şekilde diğer uzuvlar arasında ki mesafelerin değişik düzlemlerdeki izdüşümleri hesaplanmıştır. Bu ağırlık merkezi iz düşümlerini de kapsamaktadır.

## 5.2 Dinamik Denklemler

Dinamik denklemler kinematik eşitliklerle benzerlik göstermekle beraber ilave terimlerle sistem hakkında daha fazla bilgi edinilmesini sağlarlar. Dinamik denklemler, yukarıda açıklanan durumlara benzer şekilde, robot tek ayak üzerinde iken (open chain) veya kalçalarından havaya asılı iken yada iki ayak da yere sıkı bir şekilde temas etmişken farklı şekillerde çıkarılmıştır.

Burada robotun tek ayak ve çift ayak üzerinde durması hallerindeki denklemlerden kısaca bahsedilecektir.

$$[a] \{\ddot{x}\} + [b] \{\dot{x}\} = \{f\} \quad (5.5)$$

Eşitlik (5.5) dinamik denklemin genel formunu göstermektedir. Burada robot tek ayak üzerindedir (open chain).

$$A(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = f + E^T(\theta)\Lambda \quad (5.6)$$

Denklemler (5.6) KD' in sınırlandırılmış halidir. Başka bir deyişle robot iki ayak üzerindedir (closed chain).

Denklemler (5.5) ve Denklemler (5.6) motor denklemleri ile birleştirildiğinde,

$$M = N\eta \frac{K_t}{R_a} \vartheta - \eta \frac{K_t}{R_a} K_b N^2 \dot{\theta} - J_m \eta N^2 \ddot{\theta} \quad (5.7)$$

Bir DC motora ait bir ifadedir.

Eğer sisteme bağlı filtre devreleri varsa, filtre dinamikleri de dinamik denklemlere uygun bir şekilde katılmalıdır. Robotumuzda anti aliasing ve smoothing filtreleri vardır.

Dinamik denklemler bilgisayar ortamına taşındığında

$$\begin{aligned}x_s(k+1) &= \Phi_s x_s(k) + \Gamma_s u_s(k) \\y_s(k) &= C_s x_s(k)\end{aligned}\tag{5.8}$$

Denklem (5.8) elde edilir.

Yukarıdaki değişik dinamik denklemler, robotun bilgisayar ortamında değişik şartlar altında davranışlarını belirlemede yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu denklemler robotun eklemlerini belirlenen yerlere sürmede kullanılan ve robotun kararlılığını sağlayan kontrol sisteminin parametrelerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

### 5.3 Eklem Konumlarının Belirlenmesi

Eklem konumları (joint trajectories) robotun hangi hareketi gerçekleştireceğini belirlemektedir. Robotun herhangi bir ekleminin gitmesini istediğimiz nokta doğrudan belirlenebileceği gibi KD'lerin belirli şartlar altında çözülmesi sonucu da bulunabilir.

#### a) Konum değerlerinin doğrudan verilmesi

Bu ilk denemeler için tercih edilen bir yöntemdir. Fakat bu durumda uzuvların uç kısımlarının konumlarının hassas olarak belirlenmesi gerekmektedir ve ağırlık merkezinin yeri tam olarak belirlenememektedir.

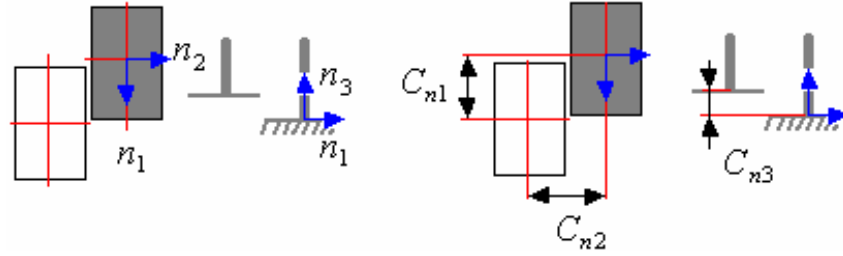


## b) Denklem çözümleri

Robot herhangi bir harekete, başlıca iki konumdan başlamaktadır. Birincisi iki ayağın uçlarının birbirine eşit olması, ikincisi ise Şekil 5.2' de gösterildiği gibi bir ayağın diğerinin önünde olmasıdır.

Hangi başlangıç noktasının seçileceğini yapılacak hareket belirlemektedir. Fakat bir ayağın diğerine göre biraz önde veya arkada olması daha kararlı bir duruş vermektedir. Bundan sonra yapılması gereken ilk şey ağırlık noktasının konumlarının seçilmesidir. Burada seçim olasılıkları sonsuzdur. İlk hareket anında ağırlık merkezi iki ayak arasında iken daha sonra destek ayağının altında bir noktaya getirilmiştir. Bu durumda diğer ayağın yerden teması kesilebilir ve ağırlık merkezi destek ayağı altında kaldığı sürece diğer ayak istenen noktaya hareket ettirilebilir.

Şekilde  $n$ ' ler birim dik vektörleri ifade eder,  $C_n$ ' ler ise iki ayağın birbirine göre konumunu verir.



Şekil 5.2 Robotun ayaklarının başlangıç konumlaması.

İstenen adımın büyüklüğüne göre ve yürüme tarzına göre ağırlık merkezi konumu ve eklemlerin uç noktalarının konumları belirlenebilir. Burada da seçim sonsuzdur.

Bazen yürümenin daha verimli olması da istenebilir. Verimlilik kriterleri belirlendiğinde, mevcut denklemlerin üretecekleri eklem konumları da farklı olacaktır.

Robot ta, robotun eklemlerinin belirli sıralı hareketleri icra edilirken, eklemin gideceği iki nokta arasındaki mesafenin mümkün olduğunca küçük olması istenmiştir. Bu da verimlilik ölçütü olmaktadır. Denklem çözümleri her zaman göze hoş gelen robot oryantasyonları üretememektedir. Bu gibi durumlarda, verimlilik ölçütlerini belirleyen şartlar biraz daha esnetilebilmektedir.

Literatürde değişik verimlilik ve yürüme ölçütleri verilmektedir. Kimi araştırmacılar sadece bilgisayar ortamında yürüme hareketlerini gerçekleştirirken diğerleri de deneysel sonuçlarla değişik teorileri denemektedirler. Her bir deneysel robot diğerlerinden belirli ölçütlerde farklı olduğundan, bir robot için verilen sonuçların diğer için doğru olacağı da düşünülmemelidir.

## 6. KONTROL SİSTEMİ

En genel hali ile robotun kontrol sisteminin temel alacağı dinamik model Denklem 6.1' deki gibidir.  $[a]$  ataletle ilişkin katsayı matrisi,  $[b]$  hız ve pozisyona ilişkin katsayı matrisi,  $\{f\}$  harici kuvvetler ve  $E^T \Lambda$  eklemleri sınırlandırıcı etkileri içerir. Bu matrislerin boyutları kontrol eklemlerin sayıları ile belirlenir. Burada elde edilen teorik model sınırlandırılmış açık zincir prensibi (constrained open-chain) kabulü üzerine çıkarılmıştır.

$$[a] \{\ddot{x}\} + [b] \{\dot{x}\} = \{f\} + E^T \Lambda \quad (6.1)$$

Denklem (6.1) doğrusallaştırılarak durum-uzay (state-space) formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

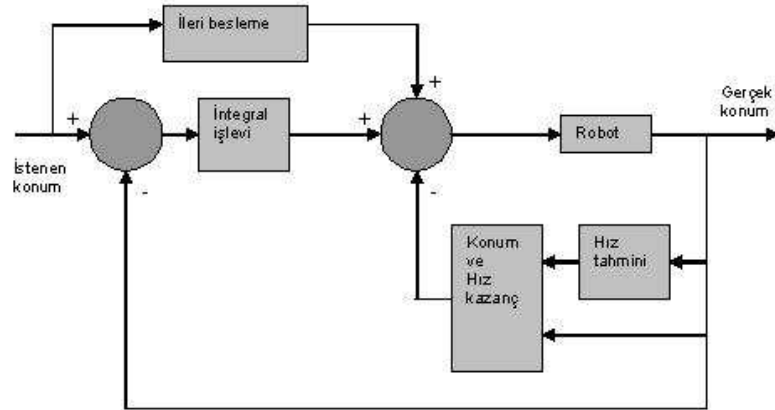
$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Burada  $\Phi$  durum matrisi,  $\Gamma$  sisteme giren sinyallerin katsayı matrisi,  $C$  çıkış matrisidir ve  $x(k)$  sistemin hız ve konumlarını içeren vektördür. İlk aşamada, iki eklem için, iki değişik kontrol sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bunlar PID (Proportional, Integral, Derivative) ve LQR (Linear Quadratic Regulator) kontrol teknikleridir. Eklem sayısı başlangıçta sınırlı tutulmuştur. Böylece sistem en basitten başlayarak tasarlanırken, benzetimler ve deneylerle değişiklik etkileri gözlemleyebilme olanağı elde edilmiştir. Robotta temel amaç yürümedir. İnsanlarda olduğu gibi, yürüme işleminde eklemlerin tam konum kontrolünden ziyade, kontrol sisteminin karalılığı daha önemlidir. Ayrıca yürüme işlemi, eklemlerde olabilecek konum osilasyonlarına karşı son derece hassastır. Bu sebeplerden dolayı PID tekniğinin sadece P kısmı ile kontrol yapıldı. LQR kontrol tekniğinde ise Denklem

(6.3) ile verilen sınırlandırıcı eşitlikte, pozisyonla ilgili terim  $Q_d$  daha etkin yapılmıştır. Buradaki alt index  $d$  kontrol sisteminin içinde yer alabilecek diğer bileşenleri de içerdiğini belirtmektedir.

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_d(k)^T Q_d x_d(k) + u(k)^T R_d u(k)) \quad (6.3)$$

Şekil (6.1) robotta başarı ile test edilmiş LQR kontrol sistemini göstermektedir. Geri beslemede kullanılacak hız değerleri “Observer” aracılığı ile hesaplanmaktadır. Observer sistemi kendi dinamiklerini içerdiği için gürültü ve benzeri etkilere karşı daha iyi sonuç vermektedir. Kontrol sistemi ve parametre değerleri kaynak [8-9]’ dan alınmıştır.



Şekil 6.1 LQR kontrol sistemi.

## 7. MATLAB HESAPLAMALARI VE DOĞRULANMASI

### 7.1 Symbolic Math Toolbox Kullanımı

Matlab mühendisler için vazgeçilemez bir araç olmuştur. Elle yapılması neredeyse imkânsız olan veya çok uzun zaman alan işlemler çok kısa sürede yapılabilmektedir. Özellikle robotik alanında hesaplamaların sonucunda elde edilen denklemlerde bir kütlelin veya eklemün uzunluğunun, denklemin nasıl etkilendiğini görmek önemlidir. Ayrıca çıkan sonuçların sembolik olması denklemin yorumunun daha rahat yapılmasını sağlamakta ve denklemin doğru olup olmadığını daha rahat anlaşılmaktadır. Çünkü hesaplamalar yapılırken, tecrübeye dayalı olarak sonucun nasıl çıkması gerektiği bilinebilmektedir. Bu nedenle rakamlardan oluşan bir sonuca göre sembolik sonuçlar daha önemlidir ve istenildiğinde rakamsal sonuçlarda bunlardan elde edilebilmektedir.

```
t=sym('t','real');
syms x1 x2
syms m1 m2
syms r1 r2
syms q2 q3
s10=[1 0 0;0 cos(x1) sin(x1);0 -sin(x1) cos(x1)];
mv1n1=(m1*[0 0 r1]*s10)*[1;0;0];
mv2n1=m2*([0 0 q2]*s10+[0 0 r2]*s20)*[1;0;0];
.
.
.
```

Şeklinde iki eklem için basitçe işlemler yukarıda gösterilmiştir. Fakat Matlab'ın da doğru çözdüğünden emin olunmak durumundadır. Bu nedenle Matlab çözümlerinin doğruluğu Mathematica programı ile test edilmiştir.

## 7.2 Mathematica ile Matlab Sonuçlarının Doğrulanması

```
s10 =  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}[\alpha[t]] & \text{Sin}[\alpha[t]] \\ 0 & -\text{Sin}[\alpha[t]] & \text{Cos}[\alpha[t]] \end{pmatrix}$  (* lateral ankle left leg*)  
{(1, 0, 0), (0, Cos[α[t]], Sin[α[t]]), (0, -Sin[α[t]], Cos[α[t]])}  
mv1n1 = FullSimplify[m1*(0 0 r1).(s10).Transpose[(1 0 0)]]  
{(m1 r1 Sin[α[t]])}  
  
mv2n1 = FullSimplify[(m2*((0 0 q2).(s10) + (0 0 r2).(s20)).Transpose[(1 0 0)]]  
{(m2 (q2 Sin[α[t]] + r2 Sin[α[t]] + β[t]))}
```

Buradan elde edilen sonuçlar birbirini doğrulamıştır. Tüm kinematik ve dinamik işlemlerde bu türden doğrulamalar gerçekleştirilmiştir.

Yukarıdaki hesaplar örnek olarak verilmiştir. Sadece hesaplamaların bir kaç adımını göstermektedirler. Eşitliklerin tamamı gibi anlaşılmalıdır.

## 7.3 Kinematik Denklem Çözümleri

Matlab denklem çözümlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Hem hazır sunulan çözüm fonksiyonları hem de m-file yazma imkânı, denklemleri çözmeye büyük kolaylık sağlamıştır. Optimisation Toolbox fonksiyonlarından bazıları çözüm üretmek için kullanılmıştır. “fmincon” oldukça başarılı çözümler üretmektedir. Bunun yanında diğer minimize fonksiyonları da çözüm üretmede kullanılmıştır. “fmincon” aşağıdaki gibi bir m-file içerisinde çağırılmıştır.

```
 $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon});$ 
```

burada

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases}$$

Şeklinde bir ifade Matlab tarafından verilmektedir. Önceki bölümlerde açıkladığımız gibi, değişik KD' ler ve değişik verimlilik ölçütleri için  $f(x)$  tanımlanmalıdır. Bu robotta tanımlamalar, eklemlerin mümkün olduğunca az hareket etmesidir. Yani çözümler eklemleri en az hareket ettirecek şekilde elde edilmelidir. Bunun yanında belirli eklemler için ağırlık değerleri de tanımlanmıştır (weighting coefficients).

İki ayağın birbirine göre hareketleri ve yan düzleme sınırlandırılmış ağırlık merkezi hareketleri durumunda, aşağıdaki değerlerle, sonuçlar olması istenen aralıklar belirlenebilmektedir.

$$\begin{aligned} lbS &= [-0.5 \ -0.7 \ -0.7 \ -0.7 \ -0.7 \ -0.1]; \\ ubS &= [ \ 0.5 \ -0.05 \ 0.7 \ 0.7 \ -0.05 \ 0.1]; \end{aligned}$$

*nonlcon* değişik kinematik fonksiyonların tanımlanmasına ve  $f(x)$ 'in bu denklemlere göre çözülmesine olanak veren Matlab fonksiyonudur.

Yukarıdaki ifadeler sadece birer örnek olası için kısaca verilmiştir. M-file'in tamamı değildir.

#### 7.4 Doğrusallaştırma Yoluyla Denklem Çözümü

Doğrusal olmayan denklemlerin çözümleri oldukça zaman almaktadır ve robotu kontrol eden bilgisayar da gerçek zamanlı çözümleri mümkün değildir. Bu nedenle çalışma noktaları etrafında doğrusal olmayan denklemler Taylor serisine açılarak doğrusallaştırma da yapılmıştır.

**Not:** Burada hem doğrusal olmayan hem de doğrusal çözümler üretilmiştir. Her iki yöntemin birbirine göre doğrulukları açısından kontrolleri de yapılmıştır.

$$f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{f^{(3)}(a)}{3!}(x-a)^3 + \dots ,$$
$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n , \quad (7.1)$$

Yukarıda  $a$  bir eklem için çalışma noktasını ifade eder. Bu doğrusallaştırma ile ortaya çıkan denklemler sıradan matris işlemleri ile kolayca çözülmüştür. Çıkan sonuçlar doğrusal olmayan denklem çözümlerinden 1cm'ye kadar farklı çözüm üretmiştir. Fakat kontrol sisteminin referans eklem konumlarını izleme hataları göz önünde bulundurulduğunda, bu farklılığın çok da önemi olmadığı görülmüştür. Ayrıca basit matris işlemlerinin robot tarafından gerçek zamanlı olarak çözülme olasılığı da vardır. Bu konuda henüz bir çalışma yapılmamıştır, fakat bu tür gerçek zamanlı eklem yörüngelerinin belirlenmesi gibi konularda araştırmalara devam edilecektir.

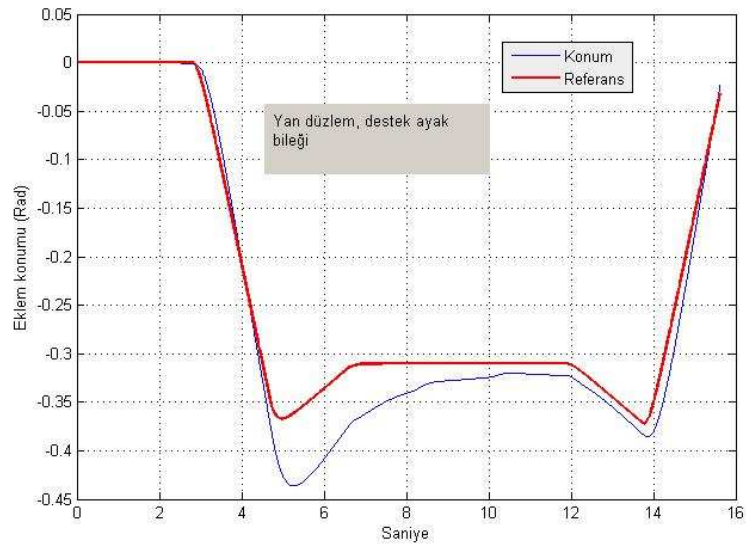
## 7.5 Kontrol Sisteminin Bir Robot Hareketi İçin Dinamik Benzetimi

Matlab m-file'larını kullanarak istenen şartlar altında robotun her türlü benzetimini yapmak mümkündür. Her türlü yürüme benzetimi yapılabilir. Fakat, bu benzetimler, ne kadar gerçekçi model ve teorilere dayansa dahi, deneysel çalışmanın yerini tutmamaktadır. Yinede, deneylere geçmeden önce sistem hakkında belirli bilgilerin edinilmesine olanak sağlarlar. Daha önceden de bahsedildiği gibi, kontrol sistemi test edilirken değişik matematik modeller kullanılmıştır. Bunlar bireysel PID den, 3D çok değişkenli (multivariable) tekniklerine kadar değişmektedir. Aşağıda sadece yan düzlem için 2D matematik modeline dayalı Matlab benzetimleri verilmiştir.

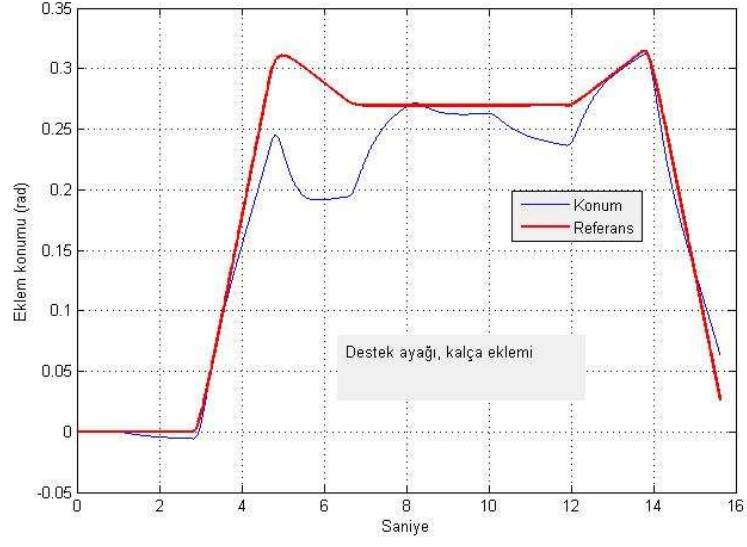


Şekil 7.1-7.7 de, kırmızı referans sinyali, mavi ise dinamik denklemin Matlab benzetimine göre cevabıdır. Kontrol sistemi tasarlanırken belirli bir eklem konum izlemesi kabul edilmiştir. Bu kabul robotun büyüklüğüne göre değişebilir. Bu robotta ise, kabul robotun ağırlık merkezinden çıkmayacağı kadardır. Başka bir deyişle eklemün üreteceği hata öne doğru  $\pm 10$  cm ve yanlara doğru  $\pm 7$  cm den fazla olmamalıdır. Şekillerdeki hata değerleri bu sınırları aşacak durumda değildir.

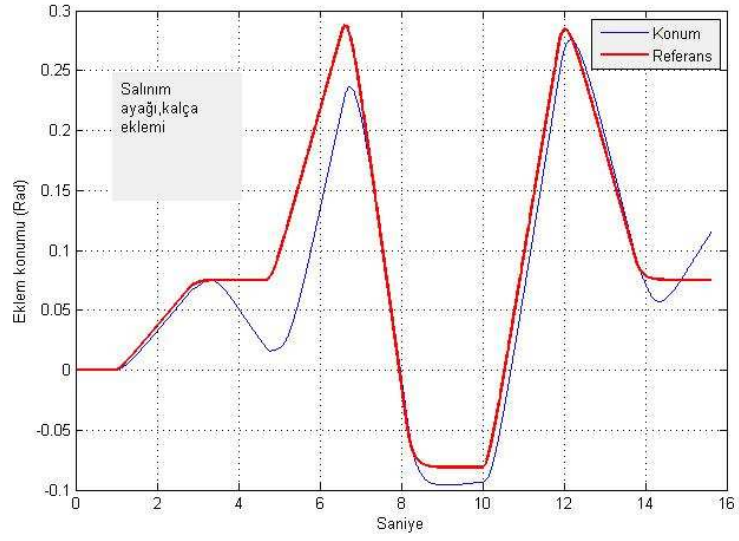
Ayrıca robotun eklemleri çok rijit bir şekilde sürülmemelidir. Sonuçta robotun her eklemi birbiri ile etkileşimde olduğu gibi, robotun zeminle etkileşimi de söz konusudur. Laboratuvar deneylerinde zeminin düz, pürüzsüz ve robotun ayaklarının kaymasını da engelleyecek şekilde olduğu kabul edilir. Fakat gerçek deneylerde bu durum her zaman sağlanamaz. Örneğin, robotun ayağının zeminle teması esnasında, küçük bir pürüz, robotun ayağında 2-3 dereceden daha büyük hatalara neden olabilir. Bu sebeple robotun eklemleri, referans noktalarının hatalarını çok küçük değerlerde tutacak kadar yüksek kazanç değerlerine sahip olmamalıdır. Bu durum deneysel olarak gözlemlendiğinde, yüksek kazanç değerlerinin bu gibi durumlarda robotu kararsız hale getirebildiği görülmüştür. Aşağıdaki şekiller bu açıdan yorumlandığında, sonuçların iyi değerler olduğu görülebilir.



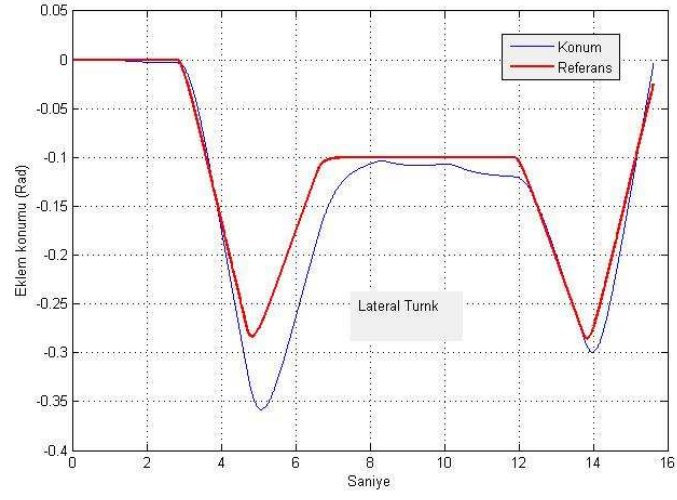
Şekil 7.1 Lateral ayak bileği referansı ve eklem konumu.



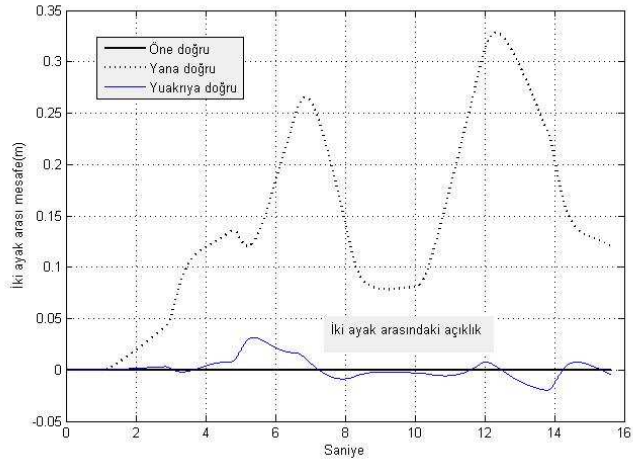
Şekil 7.2 Lateral destek kalça eklemi referans ve eklem konumu.



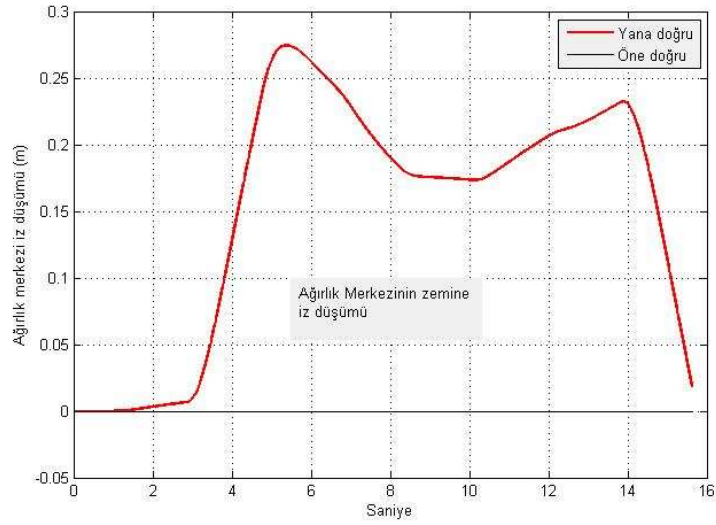
Şekil 7.3 Lateral salinim kalça eklemi referans ve eklem konumu.



Şekil 7.4 Lateral gövde üzeri referans ve eklem konumu.

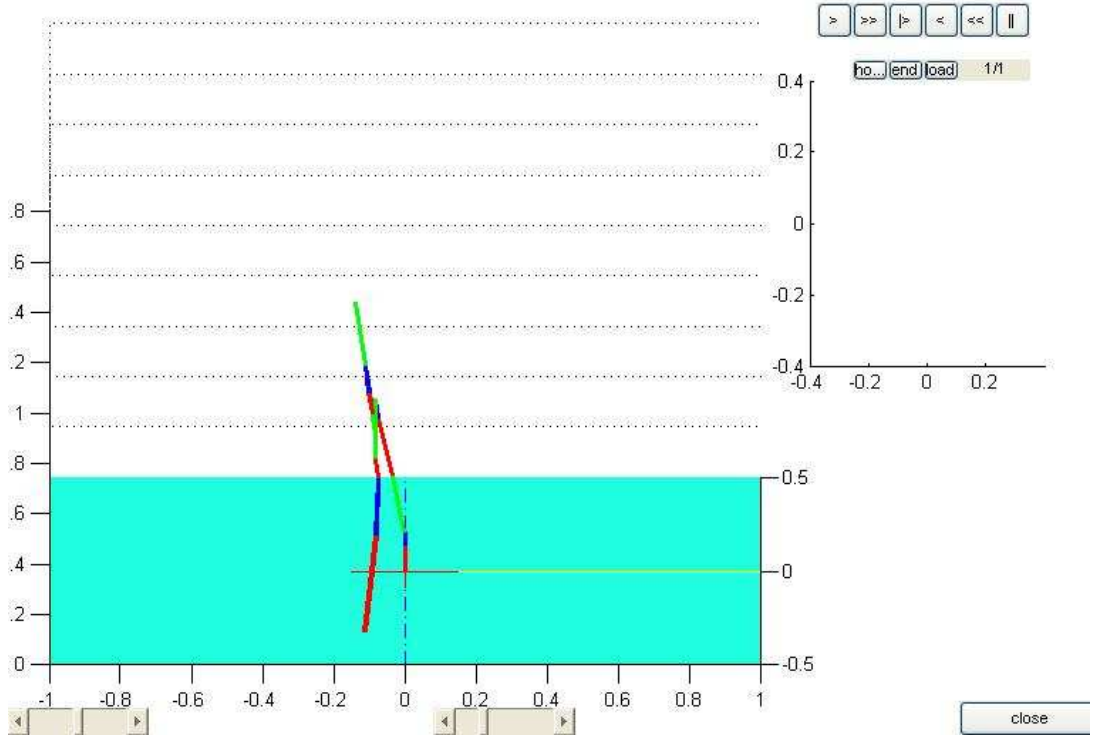


Şekil 7.5 İki ayak arasındaki mesafenin lateral eksenindeki eklem konum değişimi.



Şekil 7.6 Ağırlık merkezinin zemine izdüşümü.

Şekil 7.1-7.6 da görüldüğü gibi kontrol sistemi robotu başarı ile dengelemektedir. Kontrol sisteminin referans sinyallerini sıfır hata ile takip etmesi beklenmemektedir. Önemli olan referans sinyallerini sıfır hata ile takip etmesi değil, dengeyi koruyarak takip etmesidir. Bu yönüyle biped robotlar kol robotlardan farklı kontrol karakteristiğine sahiptirler. Biped robotun kontrol sistemi konum hataları, robotun ayakları zemine temas ettiğinde belirli uyarılama sağlanması için son derece önemlidir. Bu durum insanlarda da aynıdır. Örneğin, patika yol, çimen veya kumda yürürken zeminin düz olup olmadığına tam bakılmaz, insan ayaklarındaki kas sistemi zemine göre ayağı kendi kendine yönlendirir. Bu robotun da, zeminden veya kalibrasyondan kaynaklanabilecek küçük hatalara karşı sınırlı da olsa adaptasyonu için kontrol sistemi yukarıdaki şekillerde gösterilen karakteristiğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 7.7' de Matlab benzetimleri için hazırlanmış bir GUI (Graphical User Interface) programının görünümü verilmiştir.



Şekil 7.7 MATLAB benzetimlerinde yazılan GUI.

Şekillerde ki verilen benzetimler sadece örnek teşkil etmesi için verilmiştir. Ayrıca sisteme dışarıdan girebilecek gürültü ve Analog-Dijital (AD) sinyal çevriminde oluşabilecek etkiler de benzetime kolayca katılabilir.

$$u(:,i)=-L12*(z(:,i)+K*x(1:4,i))-L11*x(1:4,i)-L2*xa(:,i)+L11*r(:,i); \quad (7.2)$$

$$x(:,i+1)=sysd.a*x(:,i)+sysd.b*u(:,i) +gravity + 5e-4*[round(2*quan(i,:));zeros(4,1)] \quad (7.3)$$

Denklem (7.2), kontrol işleminin sadece yanal eklemeler için hesaplanışını vermektedir. Denklem (7.3) ise durum güncelleme denklemi, yerçekimi ve AD çevrim etkisini de içermektedir.

## 8. DENEYLER

Robota herhangi bir deney yapmadan önce yapılan ilk işlem Matlab benzetiminin gerçekleştirilmesidir. Daha sonra BorlandC de tasarlanan hareketin programı yazılmaktadır. Robot kalçalarından havada asılı durumda iken yazılan BorlandC programı çalıştırılır ve hareketleri gözlemlenir. Eğer hareketler de herhangi bir sorun yoksa, robot yere konularak deneyleri gerçekleştirilir.

Robotun konum bilgilerini okumak için iki ayrı sensör mevcuttur. Birincisi “artımsal encoder” ve diğeri ise potansiyometre dir. Bu iki sensor hemen hemen hiçbir zaman aynı değerleri okumamaktadır. Bunun sebebi; encoder motor şaftına bağlı iken potansiyometre eklem şaftına bağlıdır. Dişliler ve eklemlerin sebep olduğu boşluklar nedeniyle bazen 8 dereceye varan farklı okuma değerleri ortaya çıkmaktadır.

Başlangıçta sadece “artımsal encoder” dan veriler alınarak konum kontrolü yapılmaktaydı. Fakat bu konum değeri eklemde gerçekte olduğu değeri verememiştir. Bu sebeple eklemlerin şaftına potansiyometre eklenmiştir. Var olan AD kartı 16 bit çözünürlükte sinyal dönüştürebilmektedir. Bu çözünürlük değeri de yeterlidir.

“Artımsal encoder” da başka bir sorunda sıfır noktasının belirlenememesidir. Her robotun çalıştırılmasından önce eklemler el ve göz yordamıyla sıfırlanmaya çalışılmaktaydı ve bu da çok sağlıklı olmamaktaydı.

Potansiyometre de ise bir kere yapılacak olan dikkatli kalibrasyon sayesinde deneyler çok daha sağlıklı gerçekleştirilmektedir.

## 8.1 Robotun Öne ve Arkaya Yürümesi

Robotun Matlab benzetimlerinde ve deneylerde eklemler arasındaki açılar ölçülmekte ve kontrol edilmektedirler.

Robotun yürüme deneyleri yapılırken, ilk önce kontrol sistemi robotu başlangıç konumuna getirmektedir. Bu başlangıç konumu, iki ayak paralel veya bir ayağın önde olması gibi değişik değerler olabilir. Deneylerde değişik başlangıç değerleri seçilmiş ve sayısız deneyler yapılmıştır. Robotun yürüme yörüngeleri tasarlanırken ilk başlangıç noktası esas alınarak referanslar üretilmektedir. Yürümede simetri olması açısından, doğrusal yürümede bir ayak önde başlatılması ideal olurken, yan yan yürümede iki ayağın aynı hizada olması ideal olmaktadır.

Robot başlangıç değerini aldıktan sonra caraskal sayesinde robot zemine konulmaktadır ve yan koruma kabloları (askı kabloları) 10-15 cm boşalacak kadar gevşetilmektedirler. Bu konumda robot tamamen yere temas etmektedir. Robot havada asılı değildir. Bu yan koruma kabloları her zaman robotta mevcut olacaktır.

Askı sistemi robotu korumak için aşağıdaki üç sebepten dolayı yapılmıştır:

- a) Deneysel bir projede hatalar olabilir. Robotun yanlış programlanması örnek olarak verilebilir. Bu durumda robotun yere düşüp hasar almasının engellenmesi gerekir. Bunun yolu da koruma kablosudur. Bu koruma kablosu robotu yere düşmeden yakalamak içindir.
- b) Deneysel çalışmalarda mekanik veya elektriksel arızalar oluşabilir. Bu durumda askı koruma kablosu olmasa, robot zemine çarpıp parçalanabilir.
- c) Robotun tam yürüme anında elektrik kesintisi meydana gelirse robot düşer. Bu durumda robotun zemine çarpmasını askı kablosu önler.

Ayrıca “The Massachusetts Institute of Technology (MIT)” [19] ve Waseda Üniversitesi robotları [20], hatta Asimo'nun [21] ilk yıllarındaki deneylerde bu koruma kablosu kullanılmıştır.

Şekil 8.2-8.13 robotun öne yürümesi sırasında elde edilen verilerdir. Deney üç defa tekrarlanmıştır. İlk deney verileri daha ayrıntılı olarak verilmiştir (Şekil 8.2-8.9). Şekil 8.10-8.11 ikinci deneye ait referans ve kontrol sinyalleridir. Şekil 8.12-8.13 ise üçüncü deneye ait referans ve kontrol sinyalleridir.

Şekil 8.2 de sol ayağın (yürümeye başlangıçta destek ayağı) yan düzlem ayak bileği (lateral ankle), ön düzlem ayak bileği (sagittal ankle) ve sol diz eklemi için referans ve konum bilgilerini gösterilmektedir. Kalın çizgiler tüm şekillerde ilgili eklem referans sinyalini ve hemen referansı takip eden sinyal ise deney esnasında eklem olduğu noktayı göstermektedir.

Tüm deneylerde potansiyometre konum okumaları ve kontrol sinyalleri üretiminde kullanılmıştır.

Şekil 8.2-8.13 arasındaki tüm referans ve eklem konumlarına ilişkin veriler kontrolörün oldukça iyi bir şekilde robotun eklemlerini istenen konumlara sürdüğünü göstermektedir. Şekil 8.6-8.9 yürümenin gerçekleşmesi esnasında uygulanan kontrol sinyallerini göstermektedir. Kontrol sinyalleri her zaman +6 Volt ile -6 Volt arasında kalmıştır. Bunun anlamı deney esnasında her zaman için yaklaşık  $10V - 6V = 4$  Volt kadar bir rezerv kontrol sinyali mevcuttur. Bu rezerv voltaj robotun biraz daha hızlı hareket ettirilmesine veya eklemleri biraz daha büyük değerlere sürmeye olanak verecektir.

Şekil 8.14-8.15 ikinci deneyin verileridir. Bu deney biraz daha hızlı referans değerleri ile elde edilmiştir. Aynı durum Şekil 8.16-8.17 için de geçerlidir (üçüncü deney). Deney iki ve üçün hızları aynıdır. Burada aynı referans verileri ile iki ayrı deney sonuçları verilerek, robotun tek sefer için değil de, her defasında kararlı bir şekilde istenen hareketleri başarı ile gerçekleştirebileceğini göstermesi amaçlanmıştır.

Deney sayısı burada verilen grafiklerle sınırlı değildir. Daha değişik hızlarda (daha yavaş veya hızlı) ve daha değişik referans değerleriyle deneyler



gerçekleştirildi. Her yapılan deney robot, kontrol sistemi ve referans noktaları seçimi hakkında daha fazla bilgi vermiştir.

Ayrıca bu teknik ekte gereksiz yere yer kaplamaması için Şekil 8.14-8.17' de tüm referanslar ve ilgili kontrol sinyalleri tek bir grafikte gösterilmiştir. Sadece genel bir kanı oluşması için bahsi geçen şekiller buraya eklenmiştir.

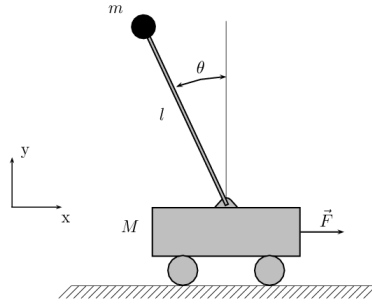
Robotun diz kapağı olmadığı için aynı referans sinyalleri, sol ayak yerine sağ ayaktan başlayarak uygulandığında, robot geri geri yürüyebilmektedir. Yalnız, ilgili sinyaller için pozitif veya negatif değerlere dikkat edilmelidir.

Aşağıdaki deneylerde eklem referans noktasını küçük bir zaman gecikmesi ile takip etmektedir. Bu durum yürümenin kararlılığını herhangi bir şekilde olumsuz olarak etkilememektedir. Robotun referans sinyali uygulandıktan sonra yaklaşık 0.1 saniyeden daha az bir zamanda tepki vermesi çok önemli değildir. İnsanların yürümesinde olduğu gibi tam zamanlamadan ziyade gerçek zamanda robotun kararlılığı önemlidir. Robot her örnekleme ile birlikte eklemlerin konumlarını ve ağırlık merkezi konumlarını takip edebilecek durumdadır. Bu robotun dâhili kontrolü referans sinyalini ve gerçek zamanlı eklem konum değerlerini karşılaştırarak sağlanmaktadır. Eklem istenen referans değerine ulaşmadan, bir sonraki referans değeri robot tarafından değerlendirilmemektedir. Robotun genel yürüme hızı dikkate alındığında şekillerdeki zaman farkı çok belirleyici değildir. Ayrıca gecikmemin asıl kaynağı robotun dinamikleri değil, filtrelerdir.

Tüm eklemler için referans, deneysel konum ve kontrol sinyalleri Şekil 8.2-8.13 da iki ayrı deney için verilmiştir. Bu eklemlerden yürüme sırasında sıfır (rad) konumunda durmaları istenmiştir. Şekil 8.2-8.13, robotun tüm eklemlerini aynı anda kontrol altında tutabildiğini göstermektedir. Şekil 8.2-8.13 robotun yürümesi esnasında tüm 23 ekleminin koordineli bir şekilde çalışabildiğini göstermektedirler.

Tüm deneysel sonuçlarda görüldüğü gibi uzun süreli olarak eklemleri sıfır noktasında tutmak mümkün olmamaktadır. Bunun sebebi kutup noktalarının (Singularities) varlığıdır.

Kutup noktaları özellikle yürüyen robotlar için çok büyük sorundur. Robotumuzda Encoder motor şaftına ve potansiyometre eklem şaftına bağlıdır. Robotun eklemleri arasındaki boşluklar potansiyometreler tarafından algılanabilmektedir. Kutup noktaları pozisyon kontrolünün kaybolduğu noktadır. Bu durumda eklem hareketi belirsizdir.



Şekil 8.1 Bir ters sarkaç sistemi.

Şekil 8.1’ de gösterilen ters sarkaç kutup noktalarının görüldüğü en basit örneklerden biridir. Sarkacı arabaya bağlayan eklemden sürtünme sıfır olduğunda, ters sarkacın  $\theta = 0$  rad konumunda sabit durması imkânsızdır. Bu nedenle arabanın  $x$  eksenini doğrultusunda sürekli olarak ileri-geri hareket etmesi gerekir. İyi dizaynlarda sürtünme katsayısı çok küçüktür. Fakat sürtünmenin (statik ve dinamik sürtünme) yüksek olduğu sistemlerde ise ters sarkacı sıfır noktasında arabayı hareket ettirmeden tutmak mümkündür. Örnek bir ters sarkaç videosu [18] de görülebilir. Eğer sarkaç 2’li ters sarkaç ise, sistemde 2 adet kutup noktası görülür.

Geliştirilen robotun kutup noktası sayısı oldukça fazladır. Lateral Kalça, Yaw Kalça, Trunk Yaw, Omuz ve kollardaki eklemler hariç (bu eklemlerde geometri gereği singularity yoktur) 13 adet kutup noktası vardır. Bu durum sadece bu robota ait özel bir sorun değildir. Birçok araştırmacı biped robotlarında bu durumu kısmen aşmışlardır. Örneğin Asimoda dizler her zaman bükülüdür ayrıca eklemlerde özel dişli mekanizmaları kullanmışlardır. Özel dişliler kutup noktalarının etkili olduğu hareket alanını daraltmıştır. Dizlerin bükülü olması ile gövde altı sagittal plane

eklemleri her zaman yüklü olmaktadır. Ayrıca mutlak (absolute) açıların sıfır noktasından uzak olmasına da dikkat edilmelidir.

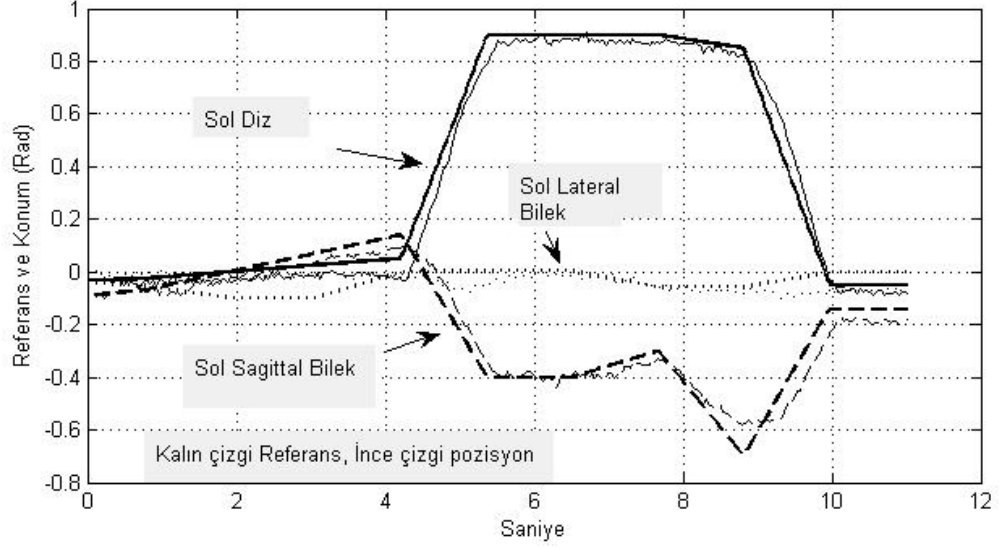
Robot dizayn olarak Asimo ve benzer robotlardan farklı tasarlanmıştır. Diz eklemlerinde herhangi bir sınırlama yoktur. Değişik yürüme modlarını test etmek için tüm eklemler yeryüzüne dikey olan eksene göre (sıfır noktası) her iki yönde hareket edebilmektedir. Ayrıca imalattan kaynaklanan hatalar nedeniyle eklemler arasında 8 dereceye varan boşluklar vardır. Robotun hareket yörüngeleri tasarlanırken, eklemler çok küçük açılarla da olsa yük altında bırakılmaktadır (dünyadaki diğer biped robotlarda olduğu gibi). Burada amaç robotun hareketi esnasında kutup noktasının kontrolsüzlük etkileri altında kalmamaktır. Fakat robotun herhangi bir ekleminde ortaya çıkabilecek bozucu bir moment, bazı durumlarda tüm robotun kararlılığını bozabilmektedir. Örneğin, robotu besleyen güç kablolarının salınımı robotun kararlılığını etkileyebilmektedir.

En büyük sorun robotun yürüme hızı arttırılmaya çalışıldığında ortaya çıkmaktadır. Momentler eklemlerin hızları ile ilişkilidir, yüksek sayılabilecek hızlara ulaşmak için hızlanma ve yavaşlamalar (ivme), robotta yer çekiminin dışında, moment kuvvetlerini de belirgin hale getirmektedir.

Robotun eklem sayısının yüksek olduğu düşünülürse, 13 ayrı kutup noktasının etkisi ve aynı anda robotun belirli yörüngeleri de takip etmesi gerektiği de düşünülürse, statik yürümenin de ne kadar büyük zorlukları içerdiği kolayca görülebilir. Yukarıda bahsedildiği gibi, robotun imalatında meydana gelen kusurlar robotun kontrolünü ve yürümesini son derece olumsuz etkilemektedir.

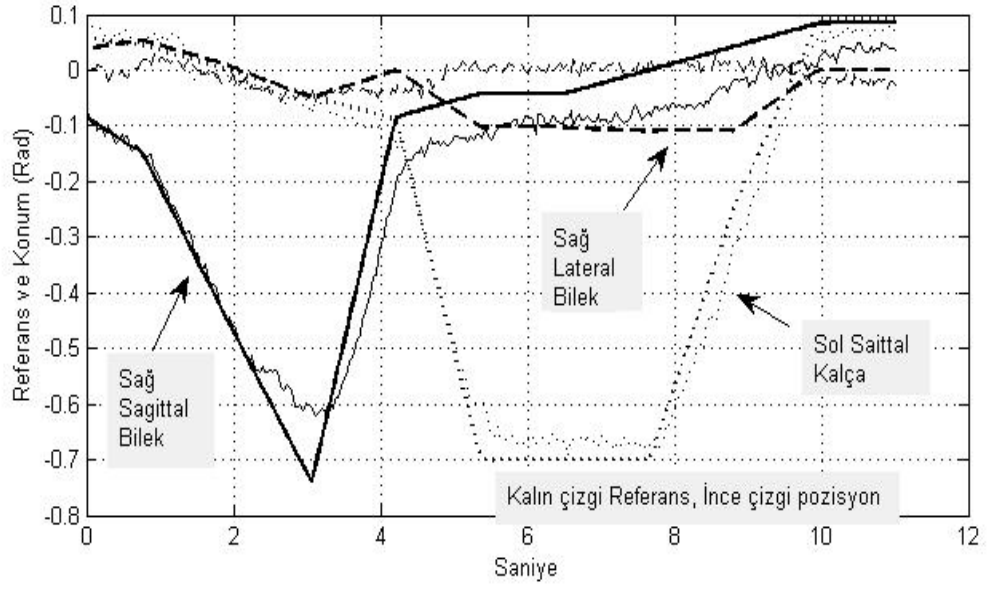
Robotun eklemleri referans sinyallerini daha iyi takip etmeye çalışıldığında kutup noktasının etkisi robotun kontrol sisteminin dinçlik özelliğini oldukça zayıflatmaktadır. Hatta kararsız (unstable) hale getirdiği deneylerde gözlemlenmiştir. Oysa Matlab benzetimleri robotun daha büyük hassasiyette referans sinyallerini takip edebileceğini göstermiştir. Gerçek hayattaki her parametreyi veya rasgele (random) olasılığı modele eklemek mümkün olmamaktadır.

Deneysel çalışma ile, kontrol sisteminin parametreleri en iyi (optimum) şekilde, etkileri deneylerle gözlemlenerek, belirlenmektedir (Şekil 8.2-8.17).

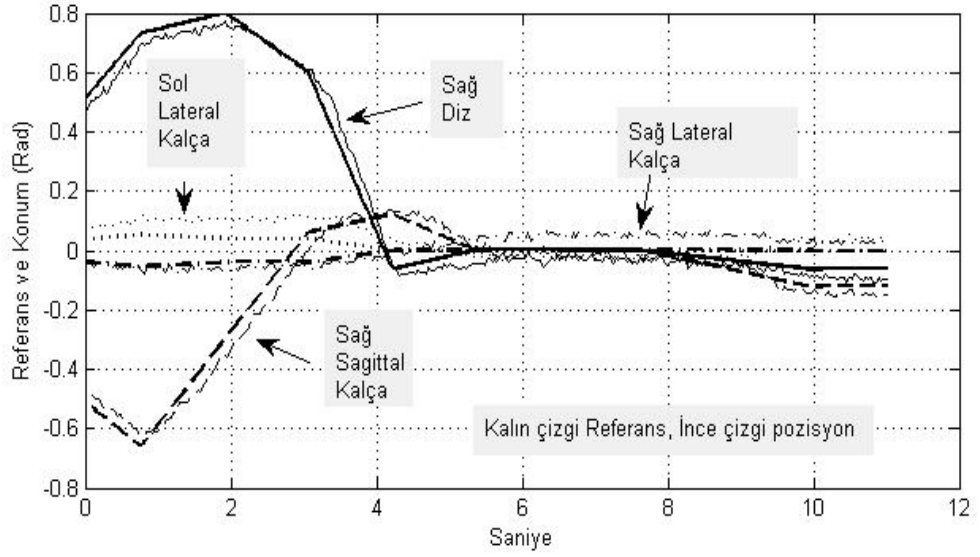


Şekil 8.2 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.

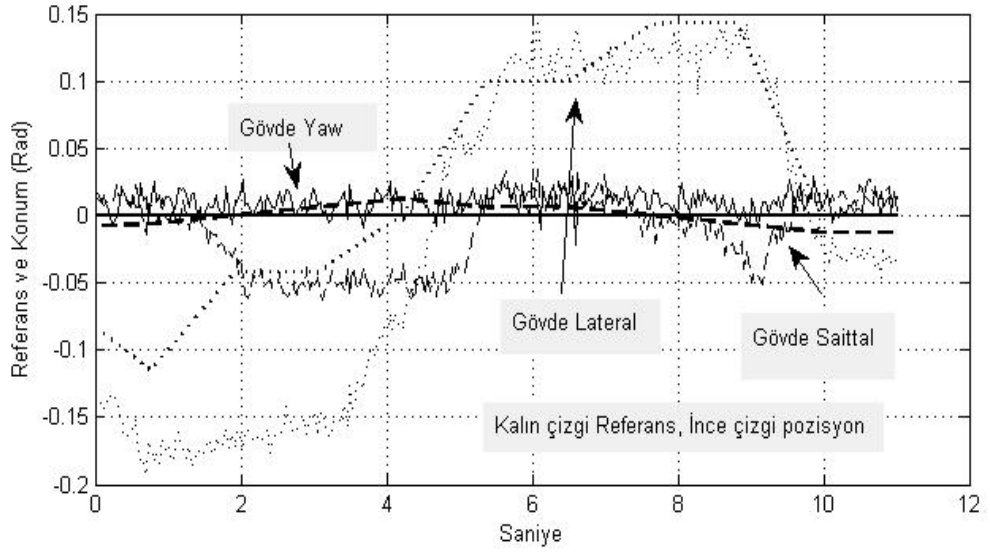
Robot kontrol sistemi referans yörüngelerini başarılı bir şekilde takip etmektedir. Referans ile konum arasında küçük farklar ve gecikmeler vardır. Küçük farklar robotun dinç olması açısından önemlidir. Robotun ayaklarının oluşturduğu poligon içerisinde kaldığı sürece bu tür farkların biped robotların kontrolü açısından bir sorunu yoktur. Zaman gecikmesi de aynı şekildedir. Robotun belirtilen süreden 0.1 saniye kadar sonra adım atmaya başlaması ve aynı süre kadar sonra bitirmesinde herhangi bir sorun yoktur. Bu yönüyle de biped robotlar, süreç denetimi işlemlerinde kullanılan sabit robotlardan farklı özelliğe sahiptirler.



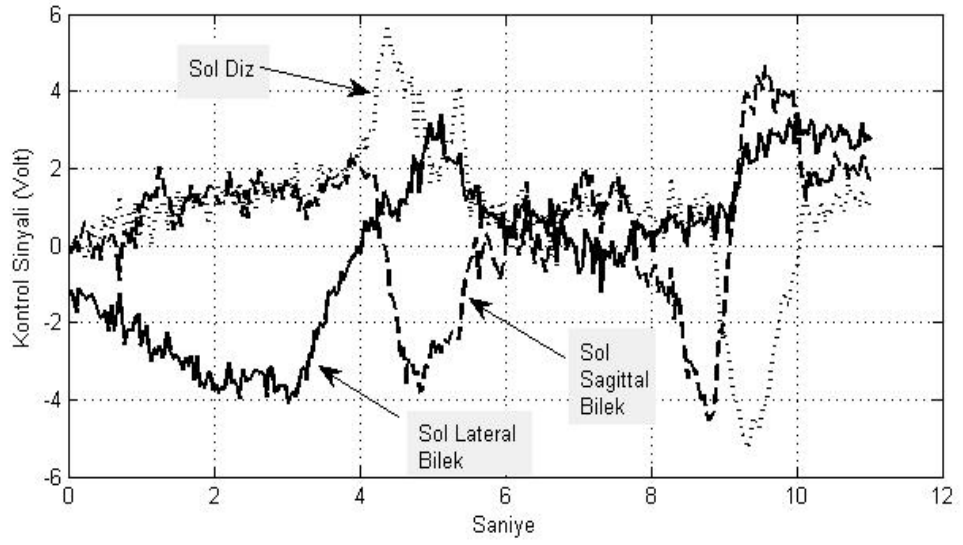
Şekil 8.3 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.



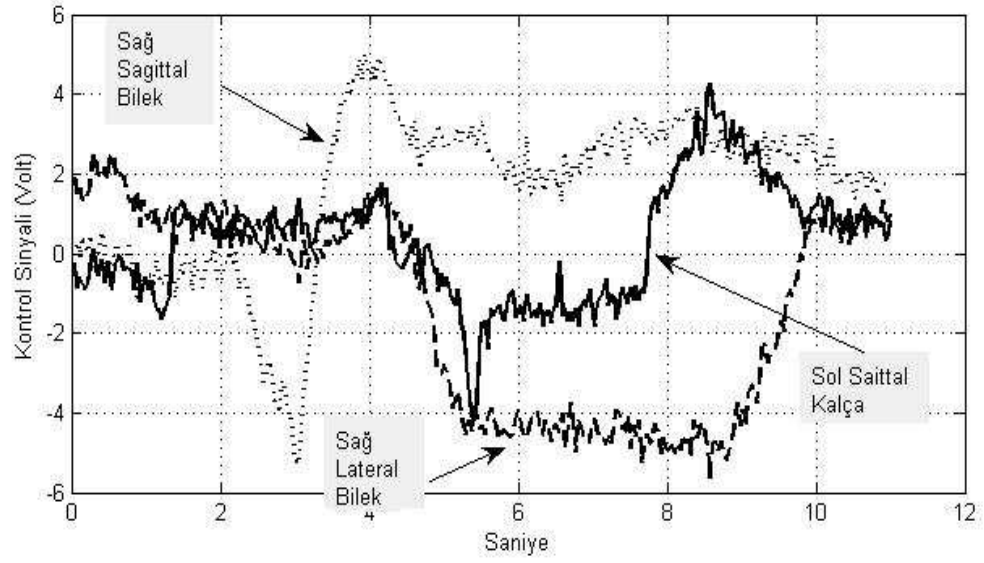
Şekil 8.4 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.



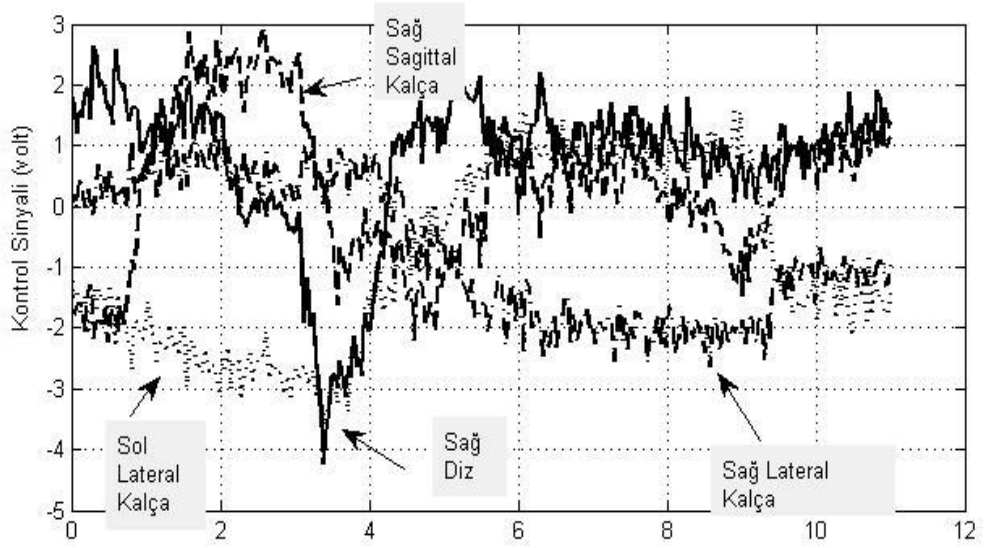
Şekil 8.5 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.



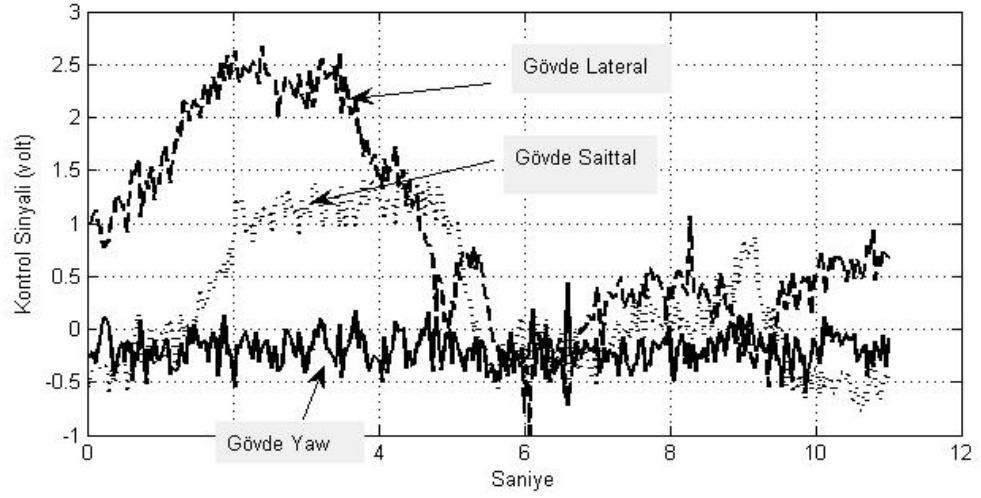
Şekil 8.6 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.



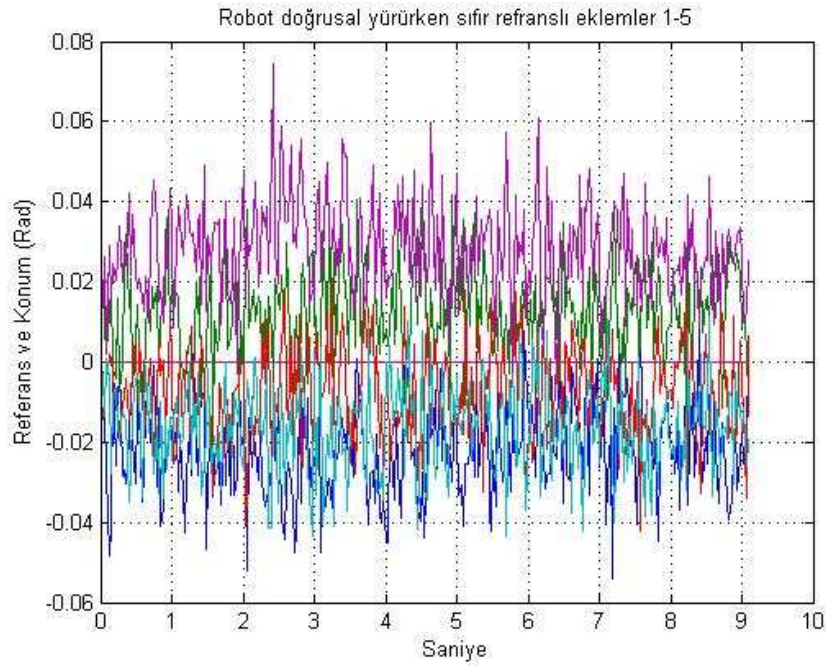
Şekil 8.7 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.



Şekil 8.8 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.



Şekil 8.9 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.



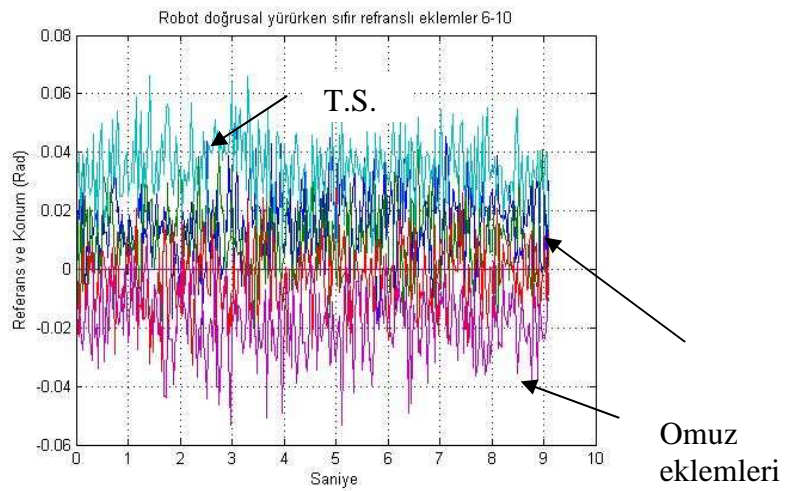
Şekil 8.10 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemlerin deneysel konumları. Eklemler kalça yaw eklemleri, trunk sagittal eklemi takip eden ilk üç eklem. (İkinci deney).

Robotun Şekil 8.10' daki sinyallerin ait olduğu eklemlerin kontrolünün başarı ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Gönderilen konum referansı sıfırdır ve eklem konumlarında sıfır civarındadır. Robotun yürümesi esnasında Şekil 8.9' da gösterilen sinyallerin ait olduğu eklemler, kendilerine fiziksel olarak bağlı bulunan Şekil 8.10'

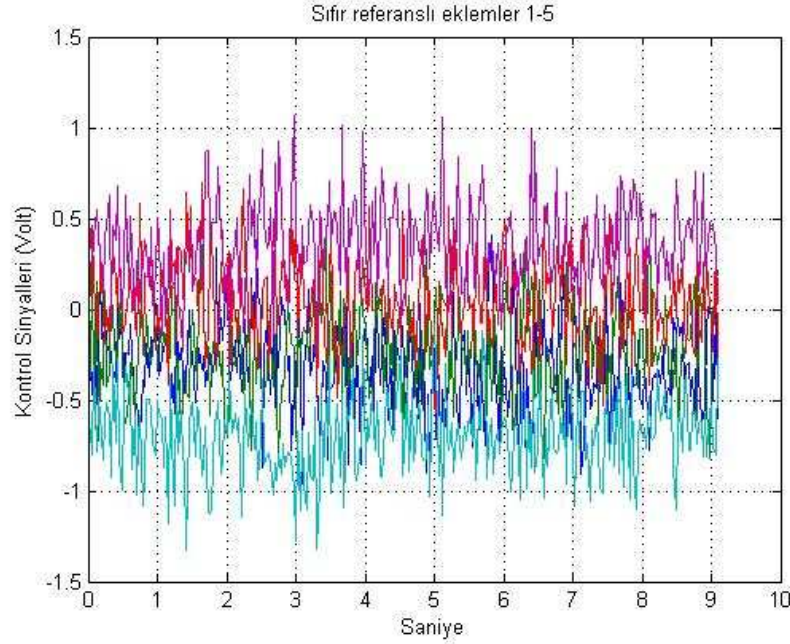


daki sinyallerin ait olduğu eklemlerle etkileşimdedir. Tüm şekillerde gösterilen referans ve eklem konumları görecelidir/bağıldır (relative angles). Bu sebeple Şekil 8.10 ve 8.11’ deki eklem açılarının mutlak (absolute) değerleri göz önüne alındığında mutlak referans açısının sıfırdan farklı olduğu görülür. Herhangi bir eklem için mutlak (absolute) açısını bulmak için aynı düzlemede, kendinden önce gelen tüm eklemlerin göreceli/bağıl (relative) açıların toplanması gerekir. Yürüme esnasında robot harekete sol ayaktan başlamıştır. Bu nedenle sol ayak bileği, dizi, kalçası ve gövdenin ilgili eklemlerinin göreceli açıları toplanarak omuz ve kol açıları bulunabilir. Fakat kontrol sistemi bağıl açıları kontrol etmektedir. Çünkü bağıl eklemler arasında elektrik motorları montelidir.

Şekil 8.10 ve Şekil 8.11’ de eklemler teker teker, şekiller üzerinde gösterilmemiştir. Bunun sebebi hepsinin referansı sıfırdır ve her eklem  $\pm 0.05$  rad aralığındadır. Şekil 8.10 ve Şekil 8.11’ de sinyaller eklemlerin yüksek frekanslarda titrediği gibi yorumlanmamalıdır. Çünkü kablonun boyundan ve diğer sebeplerden dolayı sisteme  $\pm 0.04$  rad civarı gürültü girmektedir. Gürültüler analog filtrelerden geçirilerek bilgisayarın DAQ kartına girmektedir. Ayrıca bilgisayarın içerisinde de tekrar dijital filtreleme yapılmaktadır. Sonuçta robotun yumuşak bir kontrolü yapılmaktadır.



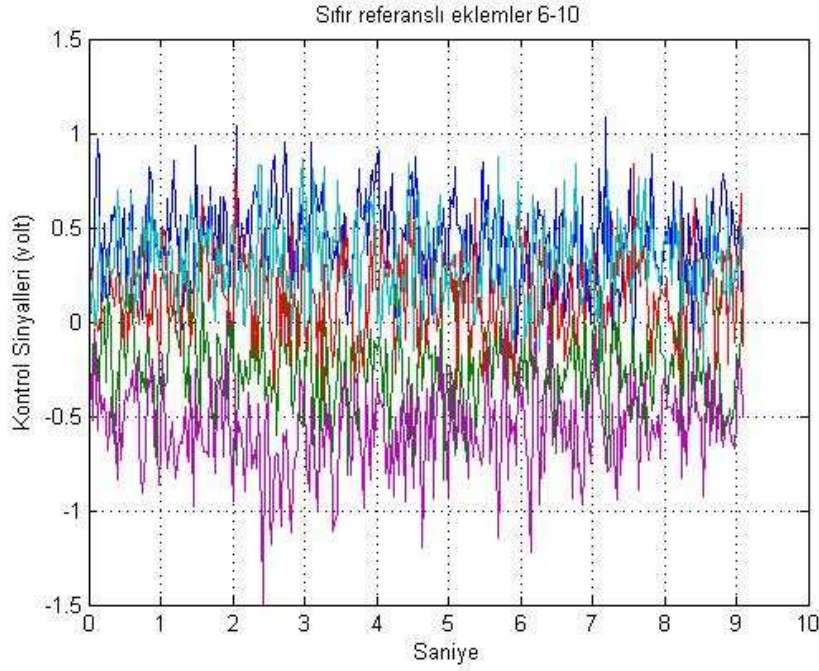
Şekil 8.11 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemlerin deneysel konumları. Şekil 8.10’ da belirtilen eklemlerden sonra gelen beş eklem. Birinci deney. T.S. (Trunk Sagittal 2) anlamındadır, gövde sagittal 2. eklem



Şekil 8.12 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemlerin deneysel kontrol sinyalleri. Eklemler kalça Yaw eklemleri, trunk sagittal eklemi takip eden ilk üç eklem. (Üçüncü deney).

Şekil 8.12 ve Şekil 8.13 iki farklı deney için (robotun yürümesi sırasında) ilgili kontrol sinyallerini göstermektedir. Motorlara gönderilen kontrol sinyalleri yaklaşık olarak  $\pm 1$  Volt aralığındadır (anlık değerler hariç). Eklemin mutlak açısına göre kontrol sinyali yaklaşık bir zarf (dış sillüet) ortaya çıkarmaktadır. Bu da diğer bağımlı eklemlerin hareketine göre, bu eklemlerin etkileşimidir. Burada çok değişkenli bir sistemin kontrol karakteristiği açıkça görülmektedir. Şekil 8.10-8.13'te verilen eklemlerin bağıl veya göreceli (relative) açısının referansı sıfır olmasına rağmen mutlak açısı her zaman sıfırdan farklıdır. Bu durum diğer biped robotlarda da uygulanan yaygın bir tekniktir. Eklemler küçük de olsa, bir yükleme altında bırakılarak, eklem boşlukları ve kutup noktası etkisiyle periyodik osilasyon' a (cyclic oscillation) girmesi engellenmiştir.

Bu şekillerdeki genel dalgalanma diğer eklemlerle etkileşim (mekanik bağlantı) ve az oranda sisteme giren gürültüden kaynaklanmaktadır. Sistemin dengesini bozacak bir durum deneylerde gözlemlenmemiştir.

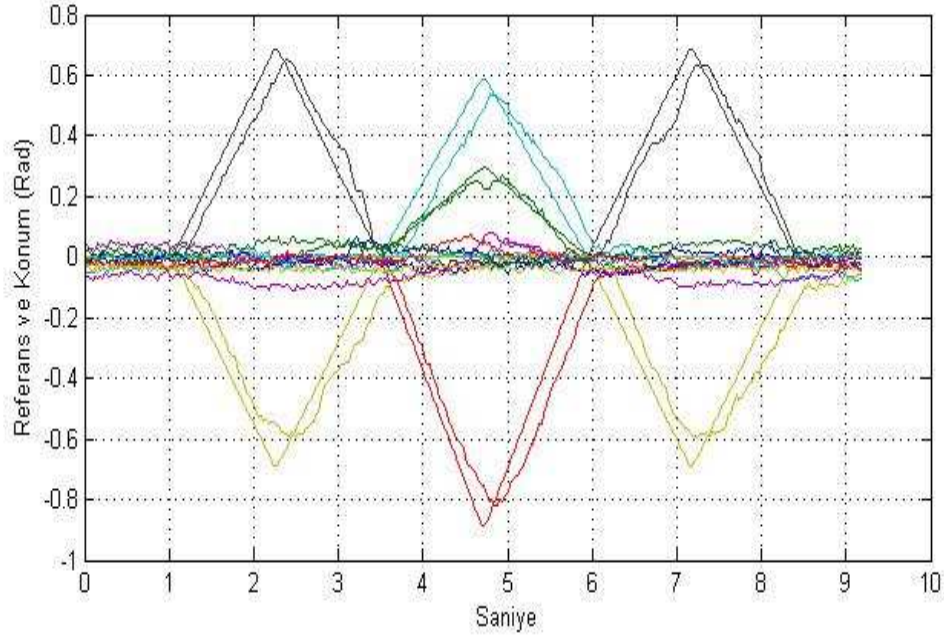


Şekil 8.13 Robot öne yürürken sıfır referans gönderilerek, mevcut konumlarını tutması istenen eklemlerin deneysel kontrol sinyalleri. Şekil 8.10' da belirtilen eklemlerden sonra gelen beş eklem. (Üçüncü deney).

Şekil 8.14-8.15 robotun öne doğru yürümesini göstermektedirler (yürümenin tekrarlanması). Bu şekillerde eklemler topluca gösterilmiştir. Deney, yukarıda verilen detaylı deneylerin aynı referans sinyali ile tekrar test edilmesi sonucunda elde edilmiştir. Robot kararlı bir şekilde referansları takip etmektedir. Daha önceki deney sonuçlarında belirtildiği gibi, referans ve eklem konumu arasında küçük bir fark ve az bir zaman gecikmesi vardır. Yürüme süreci genel olarak eklemlerin hassas takip edilmesine dayanmamaktadır. Önemli olan nokta biped robotun ağırlık merkezinin zemine izdüşümünün ayağın/ayakların oluşturduğu poligonun dışına çıkmamasıdır. Ayrıca küçük zaman gecikmesi süreç kontrolünden farklı olarak yürüme deneylerinde olumsuz bir etki oluşturmamaktadır. Eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri  $\pm 6$  Volt aralığındadır, bu aralık sistemin nominal değerlerle çalışması için oldukça iyi değerlerdir.

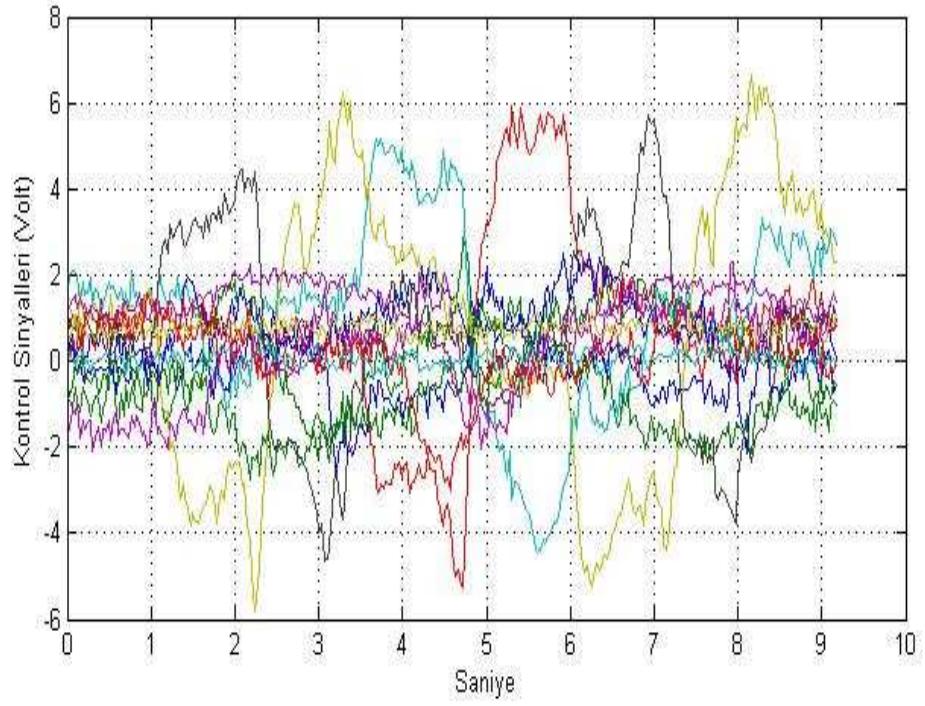
Motorların deneyler esnasında ölçülen nominal akım değeri 5.77 Amperdir. Motorun maksimum akım değeri ise yaklaşık 50 Amperdir. Bu 50 Amper değeri sadece ilk harekete başlangıçta ve 0.01 saniyeden daha az bir zamanda olmaktadır. Bu nedenle her motora 25 Amperlik kablolama yapılmıştır. Motorun ilk hareketinde yumuşak kalkış yaparak 15 Amperin üzerine çıkmayacak eklem yörüngeleri belirlenmiştir. Yumuşak kalkışla birlikte robotun dengesini bozacak ani hareketler de önlenmiş olmaktadır.

Ayrıca kablolar ağırlıkları nedeniyle robota harici bir çekme kuvvet uygulamaktadırlar. Hatta yüksek hızlarda kabloların momentleri sistemin dengesini bozucu bir etki bile oluşturmaktadırlar. Bu nedenle 0.01 saniye kadar az zamanlarda ortaya çıkacak olan yüksek kalkınma akımları için, iki kat kablolama yapılmamıştır. Çünkü her ekstra kablo, robota gelecek ekstra bir harici kuvvet ve moment anlamına gelir.

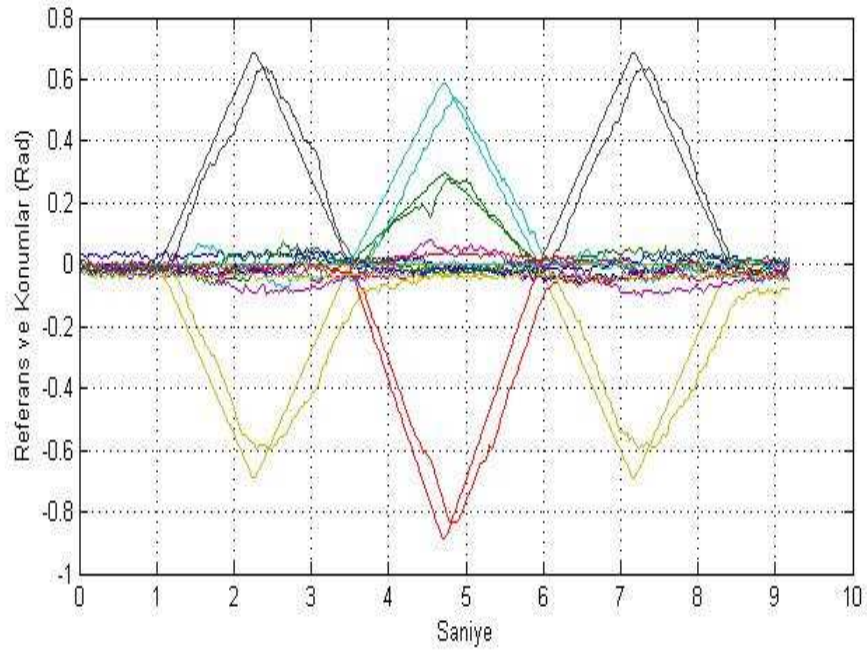


Şekil 8.14 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.

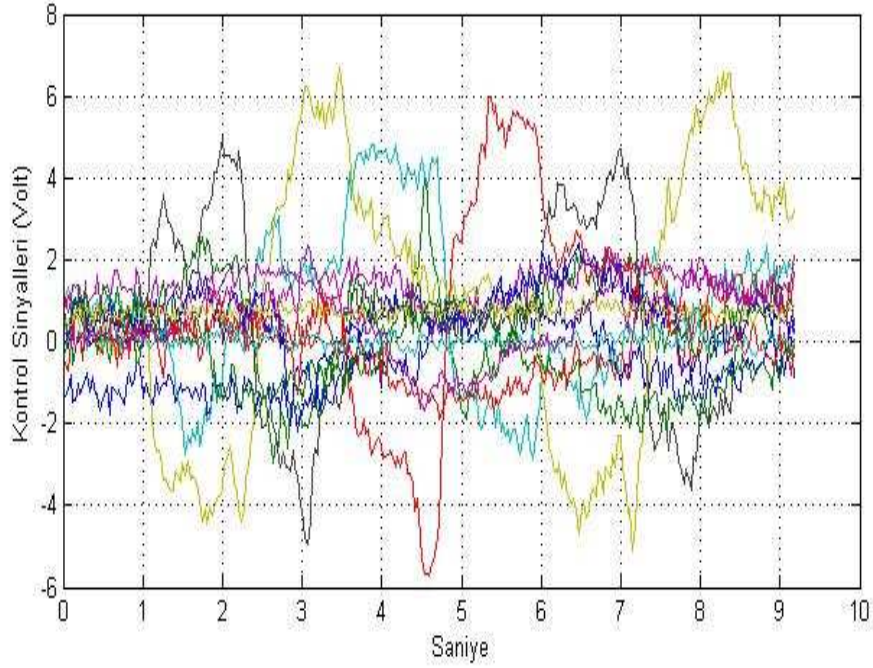




Şekil 8.15 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.



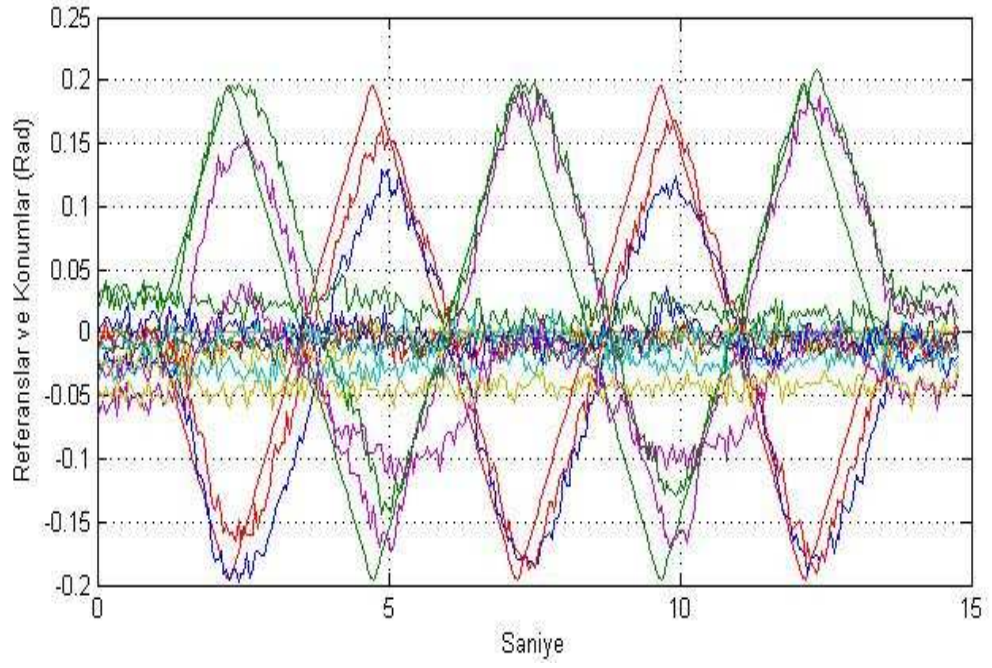
Şekil 8.16 Robot öne doğru yürürken eklem referansları ve konumları.



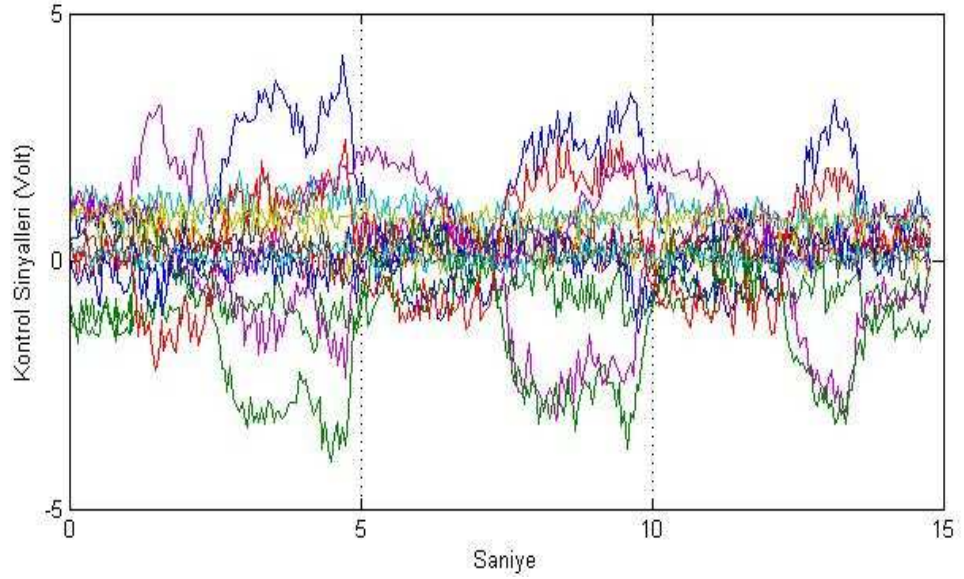
Şekil 8.17 Robot öne doğru yürürken eklemlere gönderilen kontrol sinyalleri.

## 8.2 Ağırlık Merkezinin Yana Kaydırılması

Bu deneyde robotun ağırlık merkezi sola ve sağa doğru kaydırılıyor ve kısa süreliğine robotun diğer ayağının zeminle olan sıkı teması kesilmektedir. Burada yine iki farklı deney sonuçları verilmiştir. İki deney yapılmasının amacı aynı şartlarda aynı sonuçların alınıp alınmadığını gözlemlemektir. Her iki deneyde de referanslar aynıdır. Tüm referanslar ve konumlar bir şekilde toplanmıştır. Burada amaç, tüm eklemleri aynı anda göstererek genel bir kanaat oluşturmaktır. Her iki deneyde de hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir.

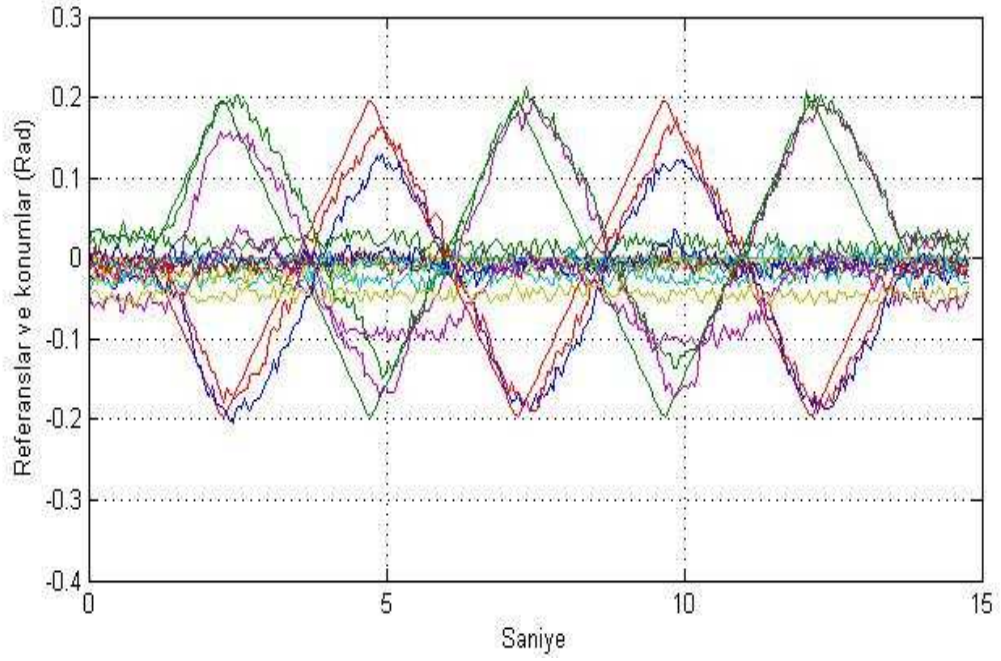


Şekil 8.18 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem referansları ve konumları.

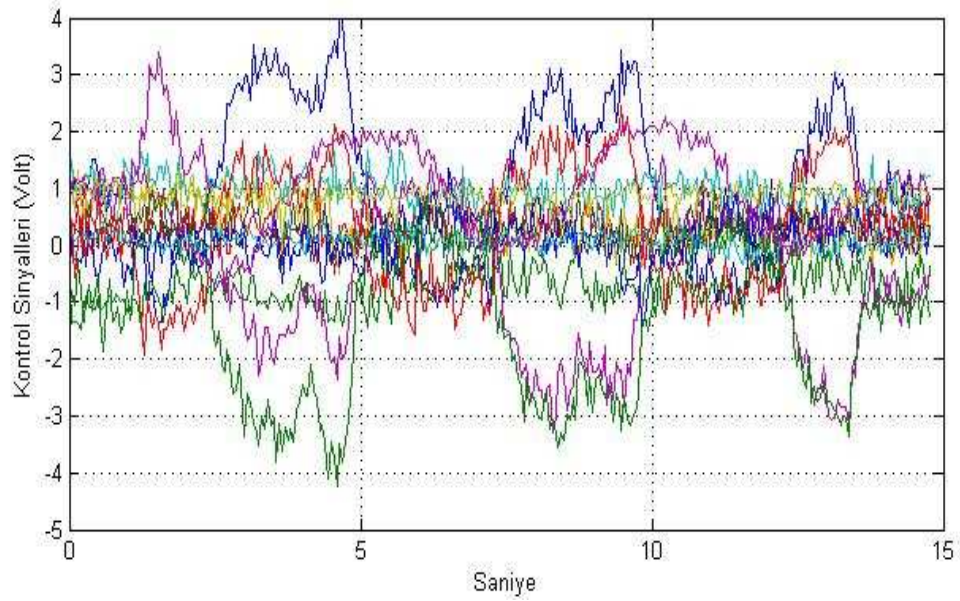


Şekil 8.19 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem kontrol sinyalleri.





Şekil 8.20 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem referansları ve konumları.



Şekil 8.21 Robot yana ağırlık merkezini kaydırırken eklem kontrol sinyalleri.

Şekil 8.18-8.21 robotun başarı ile eklemlerini kontrol ederek ağırlığını istediği gibi kaydırabildiğini göstermektedir. Yine kontrol sinyalleri maksimum uygulanabilecek sinyal olan 10 Volt 'u geçmemiştir. Eklem konumlarında görülen



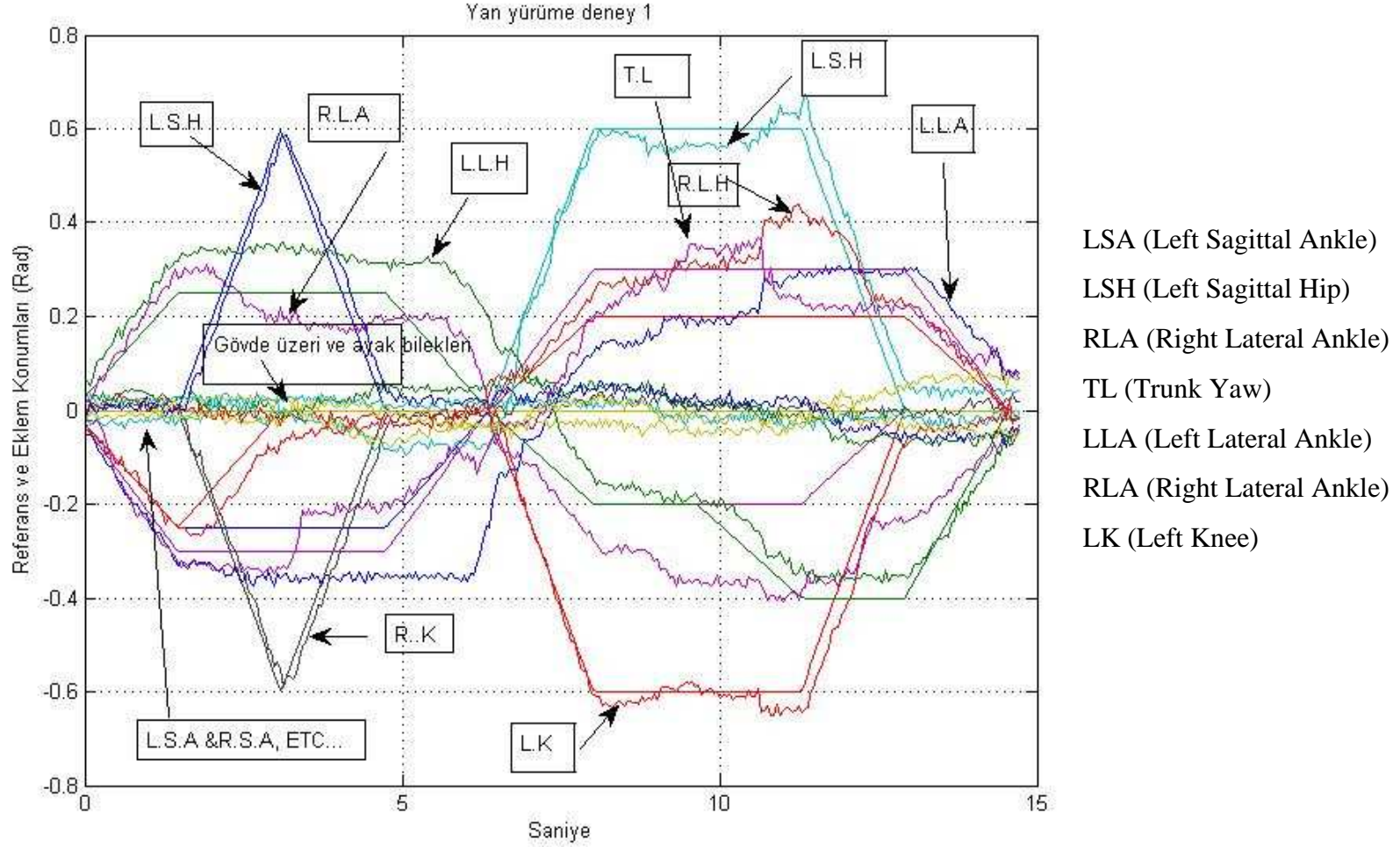
küçük dalgalanmalar büyük ölçüde sisteme giren gürültüden kaynaklanmıştır. Bunları robot hareketsizken bile belirli oranlarda gözlemledi.

### 8.3 Robotun Yan Yan Yürümesi

Yürüyen iki ayaklı robotlarda her “konum izleme” hatasının kötü olmadığı, tam tersine yürüme hareketinde olumlu olabileceği açıklanmıştır. Robot kollarında ise, kolun uç noktasının konumu önemli olabilir, fakat bu durum yürümede çok geçerli değildir. Örneğin, biz insanların attığı hiçbir adım standart değildir. Bir adım 30cm uzunluğunda ise bir sonraki kesinlikle 30 cm değildir.

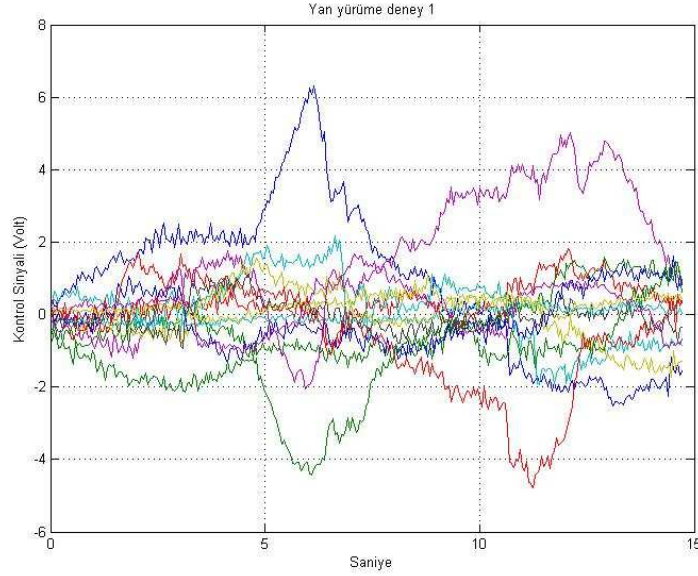
Robotun diğer eklemleri ve zeminle etkileşiminden dolayı belirtilen referans noktasından sapmalar ortaya çıkar. Bu bir çeşit uyarlamadır. Araştırmacılar yürüyen robotlarda kontrol sistemini tasarlarken “robust = dinç” olması özelliğini öne çıkarırlar. Robot kollarında ise performans ön planda olabilir. Bu uygulama alanına göre değişir.

Şekil 8.22-8.25’ de robotun yan yan yürürken elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Bu şekiller doğrusal yürümeden farklı olarak, lateral plane (ön düzlem) eklemlerinin de büyük açılarla hareketini göstermektedir. Robot ilk olarak ağırlık merkezini sol ayakaltına getirmektedir. Ağırlık merkezi sol ayakaltına geldiğinde sağ ayağın sagittal plane (yan düzlem) eklemleri 0.6 rad kadar bükülmektedir (bunlar diz ve kalça eklemleridir). Sonra sağ ayak, sola getirilmektedir. 6. ve 7. saniyeler arasında ağırlık merkezi tekrar iki ayak arasına getirilmektedir. Bu zaman aralığında eklemler sıfır noktalarına geri gelmektedirler. 8. saniyede ağırlık sağ ayakaltına getirilmekte, sol ayak sagittal plane eklemleri bükülmekte ve sonra sol ayak biraz daha yana açılmaktadır. Yana açılan sol ayak, sol ayağın sagittal plane (yan düzlem) eklemlerinin sıfıra çekilmesiyle zemine temas etmektedir. Bu sürecin tamamlanmasıyla, eklemler sıfır referans noktasına çekilerek, ağırlık merkezi iki ayak arasına getirilmektedir. Bu yürüme süreci sonunda robot yaklaşık 10 cm sola kaymıştır ve ilk başlangıç oryantasyonuna dönmüş olmaktadır.

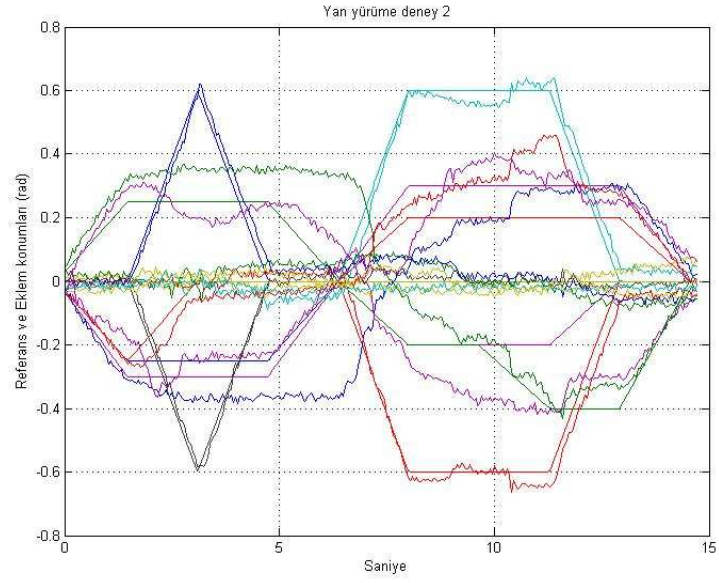


Şekil 8.22 Robot yan yan yürürken eklemler referansları ve konumları (Birinci deney).

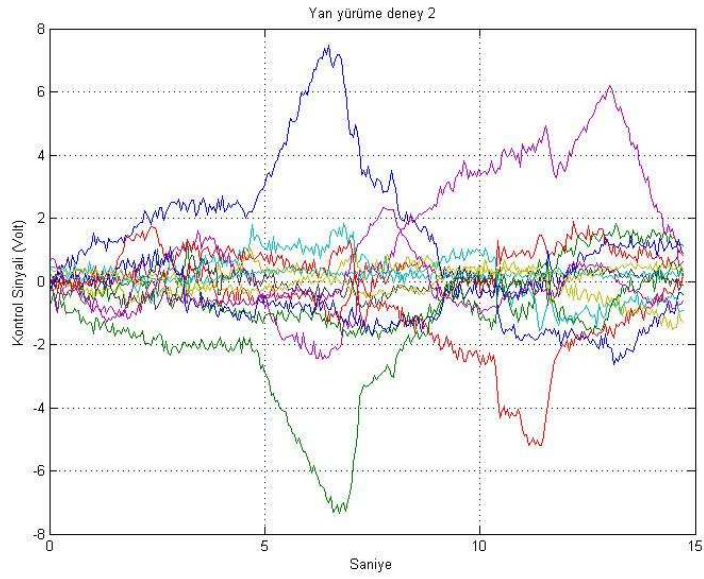
Yan yan yürümede hareketli ayağın zeminle her zaman temasının sağlanması yürüme kararlılığını arttırmıştır. Çünkü robotun dik bir konumda hareketi gerçekleştirmesi için, sagittal plane eklemlerinin göreceli ve mutlak açıları (relative ve absolute açıları) sıfır noktasına yakın tutulmuştur. Başka bir deyişle, robot ağırlık merkezini destek ayağı altına getirdiğinde, diğer ayak zeminde hafifçe kayarak diğer ayağın yanına gelmiştir. Bu sayede eklemlerdeki boşluklar nedeniyle (kutup noktası etkisiyle), robotun yürürken salınımı veya titreşimi gözle fark edilemeyecek kadar azaltılmıştır. Aşağıdaki referans ve konum grafiklerinde, ayağın zeminde kaydırılması sonucu “izleme hatası” (tracking error) biraz artmıştır. Fakat bu hata, robotun zeminde ayağını kaydırabilmesi için gereklidir. Hata arttıkça motorlara giden gerilim artmıştır ve robot zeminde ayağını kaydırabilecek kuvvete ulaştığında, robotun ayağı hareket etmiştir.



Şekil 8.23 Yan yan yürüme eklem kontrol sinyalleri (Birinci deney). Şekil 8.22, 8.23, 8.24 ve 8.25 için renk kodları aynıdır. Aynı renkler, aynı eklemi göstermektedir.



Şekil 8.24 Yan yan yürüme eklem referansları ve konumları (İkinci deney). Şekil 8.22, 8.23, 8.24 ve 8.25 için renk kodları aynıdır. Aynı renkler, aynı eklemi göstermektedir.



Şekil 8.25 Yan yan yürüme eklem kontrol sinyalleri (İkinci deney). Şekil 8.22, 8.23, 8.24 ve 8.25 için renk kodları aynıdır. Aynı renkler, aynı eklemi göstermektedir.

## 9. SONUÇ

Robotun mekanik ve elektronik sistemi başarılı bir şekilde bir araya getirilmiştir. Oluşturulan yazılım gerçek zamanda robotu kontrol etmektedir. Elde edilen matematik model ile yapılan benzetimler optimum kontrol sistemi parametrelerinin belirlenmesini sağlamıştır. Alınan deneysel sonuçlar robotun temel insan hareketlerini yerine getirebildiğini göstermektedir.

Sensörler, kontrol bilgisayarı ve tüm ara elektronik devrelerin birbiri ile uyumlu çalışması sağlanmıştır. Bütün elektronik sistem robotun kontrol döngüsünün 30 KHz' de çalışmasına olanak sağlamaktadır. Elde edilen çalışma hızı, yürüyen robotların kontrol edilebilmesi için yeterlidir. Dolayısıyla tasarlanan elektronik sistem diğer robotik mekanizmalara da uygulanabilir.

Daha sonraki çalışmalarda mevcut sistem farklı sensörlerin (gyroscope, kuvvet sensörleri, kameralar vb.) de kontrol döngüsüne katılabilmesi için geliştirilebilir.

Robotun metalden imal edilmesi zorluklar çıkartmıştır. Robotun ağırlığının yaklaşık 50 kg olması ile eklemler arası boşluklarla, kutup noktalarının kesiştiği noktaların çakışması (robotun ağırlığı nedeniyle), kararlılık problemini daha da zorlaştırmaktadır. İleriki çalışmalarda robotun plastik veya kompozit bir malzemeden yeniden üretilmesi daha uygun olabilir.

Mevcut robotta 23 eklemden sadece 16' sı robotun yürümesine aktif olarak etki etmektedir (yürümenin özelliğine göre). Özellikle, kalça üstü eklemler sadece, ağırlık merkezini kaydırmada dolaylı olarak kullanılmaktadır. Şuan ortaya çıkan sonuçlara göre robotun gövde üstü eklemlerinin sökülerek, sadece gövde altı eklemlerle yürümeye teşebbüs edilmesi ile robotun yürüme performansını çok daha arttıracığı görülmektedir.

Eklemler arasındaki boşluklar her zaman sabit değildir. Robotun ağırlığı ve oluşan momentlerle birlikte değişmektedir. Bu duruma bir çözüm robotun eklemlerinin bazılarının biraz daha değişik şekilde yeniden imal edilmesi olabilir. (Düz dişli yerine, helis diş profili kullanmak, eklem bağlantı noktalarını daha fazla noktadan desteklemek gibi).

Robotun arkasındaki kablo yığını normal bir durumda 7 kg'a kadar çekme kuvveti uygulayabilmektedir. Motorların nominal akım değeri 5.77 amperdir. Motorun maksimum akım değeri ise yaklaşık 50 Amper 'dir. Bu 50 Amper değeri sadece ilk harekete başlangıçta ve 0.01 saniyeden daha az bir zamanda olmaktadır. Bu nedenle her motora 25 Amperlik kablolama yapılmıştır. Motorun ilk hareketinde yumuşak kalkış yaparak 15 Amperin üzerine çıkmayacak eklem yörüngeleri belirlenmiştir. Yumuşak kalkışla birlikte robotun dengesini bozacak ani hareketler de önlenmiş olmaktadır.

Bu durumu ortadan kaldırmak için robotun ağırlığı azaltılabilir ve eklemler arasındaki mesafeler küçültülebilir. Ayrıca ilave dişli mekanizması konularak eklemlere uygulanabilecek momentler de arttırılabilir. Böylece düşük akımlarla aynı miktarda döndürme kuvveti oluşturulabilir. Eğer dişli konularak kuvvet arttırma yoluna gidilirse, güç elektroniği devreleri de küçültülerek robotun üzerine konulabilir. Böylece robotun besleme kablo sayısı azaltılabilir. Örneğin, bir motor 30 Amper çekerken diğeri 1 Amper çekebilir. Robotun çekeceği toplam akımı taşıyacak kesitte kablo bağlanarak, robota gelen bozucu kablo yükü etkisi azaltılabilir.

## KAYNAKÇA

- [1] Zheng, Y. F., and Sias, F. R., “Design and Motion Control of Practical Biped Robots”, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No.2, (1988), pp 70-78.
- [2] Fukuda, T., Komata, Y., and Arakawa, T., “Stabilisation Control of Biped Locomotion Robot based Learning with GAs having Self-adaptive Mutation and Recurrent Neural Networks”, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1997), pp 217-222.
- [3] Arakawa, T., and Fukuda, T., “Natural Motion Generation of Biped Locomotion Robot using Hierarchical Trajectory Generation Method Consisting of GA, EP Layers”, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1997), pp 211-215.
- [4] Yi, Y. K., “Locomotion of a Biped Robot with Compliant Ankle Joints”, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1997), pp 199-204.
- [5] Kato I. ve Tsuiki H., “Hydraulically Powered Biped Walking Machine with a High Carrying Capacity”, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on External Control of Human Extremities*, (1972), pp. 410-421.
- [6] Caldwell D. G., Tsagarakis N. ve Medrano-Cedra G. A., “Pneumatic Muscle Actuator Technology a Light Weight Power System for a Humanoid Robot”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium*, (May 1998), pp. 3053-3058.
- [7] Hosoda K., Takuma T., Nakamoto A. ve Hayashi S. "Biped robot design powered by antagonistic pneumatic actuators for multi-modal locomotion", *Robotics and Autonomous Systems* 56, (2008), pp. 46-53
- [8] Akdas D. ve Medrano-Cerda G. A., “Design of a Stabilizing Controller for a 10-degree of Freedom Bipedial Robot Using Linear Quadratic Regulator Theory”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, Vol. 215 No C1*, (2000), pp. 27-43

- [9] Akdas D. ve Medrano-Cedra G. A., "A Systematic Approach for Biped Robot Stabilization and Locomotion" , *International Conference on Information Technology in Mechatronics, Istanbul, Turkey*, (1-3 October 2001), pp. 197-202
- [10] Löffler K., Gienger M., Pfeiffer F., ve Ulbrich H., "Sensors and Control concept of a biped robot", *IEEE Transactions on Industrial Electronics Volume 51 No 5*, (2004)
- [11] Lin P. C., Komşuoğlu H., ve Koditschek D. E., "Sensor Data Fusion for Body State Estimation in a Hexapod Robot With Dynamical Gaits", *IEEE Transactions On Robotics*, Vol. 22, No. 5, (October 2006), pp. 932-943
- [12] Inaba M., Kanehiro M., Kagami F. S. ve Inoue H., "Two-Armed Bipedial Robot that can Walk, Roll Over and Stand Up", *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*, Vol. 3, (1995), pp 297-302
- [13] Kajita S. ve Tani K., "Adaptive Gait Control of a Biped Robot Based on a Real Time Sensing of the Ground Profile", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis*, (April 1996), pp. 570-577
- [14] Maxon Motors Data Sheet, [www.maxonmotor.com](http://www.maxonmotor.com)
- [15] Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado, "Control System Design", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001
- [16] ADLINK Technology INC, Data Sheets, <http://www.adlinktech.com/>
- [17] [http://robot.balikesir.edu.tr/Robot Onceki.html](http://robot.balikesir.edu.tr/Robot%20Onceki.html)
- [18] <http://robot.balikesir.edu.tr/>
- [19] <http://groups.csail.mit.edu/locomotion/index.html> , <http://www.mit.edu>
- [20] <http://www.humanoid.waseda.ac.jp/> , <http://www.waseda.jp/cie/index.html>
- [21] <http://world.honda.com/ASIMO/>
- [22] Medrano-Cerda, G. A., and Eldukhri, E. E., "Biped Robot Locomotion along the Sagittal Plane", *International Workshop on Advanced Robotics and Intelligent Machines*, (1996), Paper No. 16, ISBN: 1363-2698.



## EKLER

### EK A. GÖVDE ALTINI İÇEREN AĞIRLIK MERKEZİ DENKLEMLERİ

$$\text{COG1} = m_2 * r_2 * \sin(x(2)) + m_3 * (q_3 * \sin(x(2)) + r_3 * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + m_4 * (q_3 * \sin(x(2)) + \dots$$

$$q_4 * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2))) + r_4 * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \dots$$

$$\cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + m_5 * (q_3 * \sin(x(2)) + q_4 * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2))) + \dots$$

$$q_5 * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) - \dots$$

$$r_5 y * \sin(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \dots$$

$$r_5 z * \cos(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \dots$$

$$m_6 * (q_3 * \sin(x(2)) + q_4 * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2))) + q_5 * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2)))) + \dots$$

$$\cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) - q_6 * \sin(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2)))) + \dots$$

$$\cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + r_6 * (-\sin(x(6)) * (\cos(\pi) * \sin(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \dots$$

$$\sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \sin(\pi) * \cos(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \dots$$

$$\sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \dots \cos(x(6)) * (-\sin(\pi) * \sin(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) -$$

$$\sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \dots \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \cos(\pi) * \cos(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) -$$

$$\sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \dots$$

$$\cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + m_7 * (q_3 * \sin(x(2)) + q_4 * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2))) + \dots$$

$$q_5 * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) - \dots$$

$$q_6 * \sin(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \dots$$

$$q_7 * (-\sin(x(6)) * (\cos(\pi) * \sin(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \dots$$

$$\cos(x(3)) * \sin(x(2)))) + \sin(\pi) * \cos(x(5)) * (\sin(x(4)) * (\cos(x(3)) * \cos(x(2)) - \sin(x(3)) * \sin(x(2))) + \cos(x(4)) * (\sin(x(3)) * \cos(x(2)) + \dots$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2)))))+\cos(x(6))*(-\sin(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+r7*(\sin(x(7))*\cos(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))-...$$

$$\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(7))*(-\sin(x(6))*\cos(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-...$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\sin(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-...$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+... \cos(x(6))*(-\sin(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+...$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+...$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2)))))))+m8*(q3*\sin(x(2))+q4*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$q5*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2)))))-...$$

$$q6*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$q7*(-\sin(x(6))*\cos(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\sin(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-...$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+... \cos(x(6))*(-\sin(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2)))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-...$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+q8*(\sin(x(7))*\cos(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-...$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+... \cos(x(7))*(-\sin(x(6))*\cos(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2)))-$$

$$\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+...$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\sin(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+...$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2)))))+\cos(x(6))*(-$$

$$\sin(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+...$$

$$\begin{aligned} & \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+r8*(\sin(x(8))*(\cos(x(7))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))-\dots \\ & \sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))-\sin(x(7))*(-\sin(x(6))*(\cos(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2)))-\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\sin(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\dots \\ & \sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \\ & \cos(x(6))*(-\sin(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \end{aligned}$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots$$

$$\begin{aligned} & \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(8))*(\sin(x(7))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))-\dots \\ & \sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(7))*(-\sin(x(6))*(\cos(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2)))-\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\sin(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\dots \\ & \sin(x(3))*\sin(x(2))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \\ & \cos(x(6))*(-\sin(\pi)*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2)))+\dots \\ & \cos(x(3))*\sin(x(2)))+\cos(\pi)*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+m9*(q3*\sin(x(2))+q4*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \\ & q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))-\dots \\ & q9y*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \\ & q9z*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \\ & r9*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & m10*(q3*\sin(x(2))+q4*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \\ & \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))-q9y*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots \end{aligned}$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+q9z*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+q10*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\dots$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+r10*(-\sin(x(10))*(-\sin(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))-...$$

$$\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(9))*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(10))*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+m11*(q3*\sin(x(2))+q4*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))-...$$

$$q9y*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$q9z*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$q10*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$q11*(-\sin(x(10))*(-\sin(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(9))*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(10))*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$r11*(\sin(x(11))*(\cos(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\sin(x(9))*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(11))*(-\sin(x(10))*(-\sin(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(9))*\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(3))*\sin(x(2))))+\cos(x(10))*\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\cos(x(2))-\sin(x(3))*\sin(x(2))))+...$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\cos(x(2))+\cos(x(3))*\sin(x(2)))))/(mt);$$

$$\text{COG2}=6291364626685523/36028797018963968+(-m1*r1*\sin(x(1))+m2*(-q2*\sin(x(1))-r2*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+m3*(-q2*\sin(x(1))-...$$

$$q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+r3*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+m4*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+...$$

$$q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+r4*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+...$$

$$\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))+...$$

$$m5*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+...$$

$$\begin{aligned}
& q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))) * (\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))- \\
& r5y*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\dots \\
& r5z*(- \\
& \sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+m6*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+\dots \\
& \quad q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))-\dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& q6*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+r6*(-\sin(x(6))*(\cos(\pi)*\cos(x(5))*\cos(x(1))+\dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\sin(\pi)*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\dots \\
& \cos(x(6))*(-\sin(\pi)*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(\pi)*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+m7*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))+q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))-q6*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+q7*(-\sin(x(6))*(\cos(\pi)*\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))))+... \\
& \sin(\pi)*(- \\
& \sin(x(5))\cos(x(1))+\cos(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))))+... \\
& \cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+\cos(x(6))*(-\sin(\pi))(\cos(x(5))\cos(x(1))+... \\
& \sin(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))-... \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+\cos(\pi)*(- \\
& \sin(x(5))\cos(x(1))+\cos(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+... \\
& \sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+... \\
& r^7*(\sin(x(7))(\cos(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))) - \sin(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))-... \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))))+\cos(x(7))*(- \\
& \sin(x(6))(\cos(\pi))(\cos(x(5))\cos(x(1))+... \\
& \sin(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))-... \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+\sin(\pi)*(- \\
& \sin(x(5))\cos(x(1))+\cos(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+... \\
& \sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+... \\
& \cos(x(6))*(- \\
& \sin(\pi))(\cos(x(5))\cos(x(1))+\sin(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+... \\
& \cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+\cos(\pi))*(-\sin(x(5))\cos(x(1))+... \\
& \cos(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))-... \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+m^8*(-q^2\sin(x(1))- \\
& q^3\cos(x(2))\sin(x(1))+q^4(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))-... \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+q^5(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+... \\
& \cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))))- \\
& q^6(\cos(x(5))\cos(x(1))+... \\
& \sin(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))-... \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+q^7*(- \\
& \sin(x(6))(\cos(\pi))(\cos(x(5))\cos(x(1))+\sin(x(5))(\sin(x(4))(\cos(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+... \\
& \sin(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1))+\cos(x(4))(\sin(x(3))\sin(x(2))\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))\cos(x(2))\sin(x(1)))))+...
\end{aligned}$$



$$\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\dots$$

$$\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))))+\cos(x(8))*(\sin(x(7))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))-\dots$$

$$\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(7))*(-\sin(x(6))*(\cos(\pi)*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\dots$$

$$\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\dots$$

$$\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\sin(\pi)*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots$$

$$\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\dots$$

$$\cos(x(6))*(-\sin(\pi)*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(\pi)*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\dots$$

$$\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\dots$$

$$\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))))+m9*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\dots$$

$$\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))+q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))-q9y*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\dots$$

$$\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\dots$$

$$\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+q9z*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots$$

$$\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\dots$$

$$r9*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\dots$$

$$\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+m10*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+\dots$$

$$q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\dots$$

$$\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))-\dots$$



$$\begin{aligned}
& q9y*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))+... \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+q9z*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))+c \\
& \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-... \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+q10*(- \\
& \sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+... \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+... \\
& \quad r10*(-\sin(x(10))*(- \\
& \sin(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))-... \\
& \quad \sin(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(9))*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))+c \\
& \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-... \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(10))*(- \\
& \sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+... \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+... \\
& \quad m11*(-q2*\sin(x(1))-q3*\cos(x(2))*\sin(x(1))+q4*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& q5*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4) \\
& ))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-... \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))- \\
& q9y*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+... \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+... \\
& \quad q9z*(- \\
& \sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos \\
& (x(2))*\sin(x(1)))+... \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+q10*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1))))+c \\
& \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))-... \\
& \quad \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+q11*(-\sin(x(10))*(- \\
& \sin(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+... \\
& \quad \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(x(9))*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+s \\
& \sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+... \\
& \quad \cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))- \\
& \cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(10))*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+...
\end{aligned}$$

$$\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-...$$

$$\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+r11*(\sin(x(11))*(\cos(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+...$$

$$\sin(x(9))*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(11))*(-\sin(x(10))*(-\sin(x(9))*(\cos(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))-\sin(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(9))*(\cos(x(5))*\cos(x(1))+...$$

$$\sin(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))+\cos(x(10))*(-\sin(x(5))*\cos(x(1))+\cos(x(5))*(\sin(x(4))*(\cos(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1))+\sin(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))+\cos(x(4))*(\sin(x(3))*\sin(x(2))*\sin(x(1)))-\cos(x(3))*\cos(x(2))*\sin(x(1)))))))/(mt);$$