

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME AMAÇLI MOBİL ROBOT  
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet KIZILHAN**

**Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Zafer BİNGÜL**

**KOCAELİ, 2010**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME AMAÇLI MOBİL ROBOT  
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

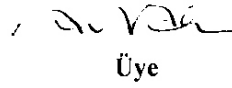
**Ahmet KIZILHAN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Aralık 2009**

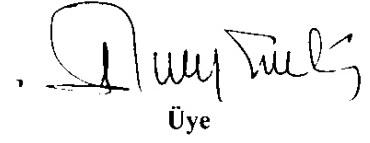
**Tezin Savunulduğu Tarih: 12 Ocak 2010**

  
Tez Danışmanı

**Doç. Dr. Zafer BİNGÜL**

  
Üye

**Doç. Dr. Ahmet AKBAŞ**

  
Üye

**Yrd. Doç. Dr. Serdar KÜÇÜK**

**KOCAELİ, 2010**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, mayın gibi tehlikeli ortamlarda yer altında gizlenmiş nesnelere görüntülenmesi amacıyla mobil robot tasarımı yapılmıştır.

Tez çalışmasının gerçekleşmesinde ve bugünlere gelmesinde, sabırlı desteklerinden ve değerli bilgi birikimlerini esirgemeyip, gerekli yönlendirmeleriyle tez çalışmasının sonuçlanmasında desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Zafer BİNGÜL'e , tasarlanan robotun gerçekleşmesi için desteklerini sunan TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'ne, Uluslararası Yüksek Teknoloji Laboratuvarı yöneticimiz Prof. Dr. Alexey VERTİİ' ye ve TÜBİTAK MAM Başkan Yardımcısı Sn. Doç. Dr. Sunullah ÖZBEK'e , mikrodalga bilgilerini esirgemeyen Sn. Igor VOYNOVSSKY'ye, akademik çalışmalarında desteklerini ve motivasyonlarını sürekli hissettiğim değerli hocalarım, Doç. Dr. Ahmet AKBAŞ'a ve Sn. Yrd. Doç. Dr. Serdar KÜÇÜK'e, tasarım tecrübelerini bıkmadan öğreten Sn. Güneş BUDAK'a ve dostlarım ile aileme ve Kocaeli yolunda sabrımı ve merakımı esirgemeyen Anneme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iii
TABLO DİZİNİ .....	v
SEMBOLLER .....	vi
ALT İNDİSLER .....	vi
KISALTMALAR .....	vi
ÖZET: .....	vii
İNGİLİZCE ÖZET .....	viii
1.MOBİL ROBOT YAPISI, MODELLEMESİ VE KONTROLÜ .....	1
1.1.Mekanik Yapı .....	1
1.2.Kinematik Model .....	4
1.2.1.İleri kinematik model deneysel sonuçları .....	8
1.2.2.Ters kinematik model deneysel sonuçları .....	13
1.3.Dinamik Model .....	16
1.2.1.Dinamik model deneysel sonuçları .....	20
1.4.Robot Konum ve Yörünge Kontrolü .....	26
1.4.1.Robot konum kontrolü .....	26
1.4.2.Robot yörünge kontrolü deneysel sonuçlar .....	28
1.4.3.Robot yörünge kontrolü .....	32
1.4.4.Robot yörünge kontrolü deneysel sonuçları .....	34
2.ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME .....	38
2.1.Üç Boyutlu Görüntüleme Türleri ve Amaçları .....	38
2.2.Üç Boyutlu Görüntüleme Sensörü ve Görüntü Elde Etme .....	40
2.2.1.Yüzey altı tomografi teorisi .....	40
2.2.2.Üç boyutlu görüntüleme sensörü yapısı .....	42
2.2.3.Üç boyutlu görüntüleme sensörü testleri .....	46
3.ROBOT BİLEŞENLERİ .....	49
3.1.Mikrodenetleyici tabanlı robot kontrol kartı .....	50
3.2.Sistemde Kullanılan Sensörler .....	52
3.2.1.Üç eksen jiroskop ve ivmeölçer .....	52
3.1.1 Küresel konumlandırma sistemi (GPS) .....	55
3.1.2 Ultrasonik yaklaşım sensörü .....	57
3.1.3 Motor konum geribildirim enkoderleri .....	60
3.2 Sistemde Kullanılan Motorlar ve Sürücüleri .....	61
3.2.1 Robot hareket sağlayıcı olarak doğru akım motorları ve sürücüleri .....	61
3.2.2 Ölçüm sistemi hareket sağlayıcı olarak doğru akım motoru ve sürücüsü .....	63
3.3 Mobil Robot Bilgisayar Yazılımları .....	64
3.3.1 Mobil robot kontrol yazılımları .....	64
3.4 Üç Boyutlu Görüntüleme Yazılımı .....	68
4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	70
KAYNAKLAR .....	76
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	79

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Kara mayınları tespit amaçlı robot uygulaması [1].....	1
Şekil 1.2: Uzaktan kontrollü mayın bulma ve temizleme robotu [2].....	2
Şekil 1.3 : Mobil robotun SolidWorks programında hazırlanan modeli.....	3
Şekil 1.4: Mobil robot motor ve motor sürücüleri.....	3
Şekil 1.5:Robot Görünümü .....	3
Şekil 1.6 : Evrensel düzlemde mobil robot konumlandırması.....	5
Şekil 1.7: Mobil robot ileri kinematik denklemlerinin bilgisayar benzetim kodu .....	9
Şekil 1.8: Robot tekerleklerine uygulanan hızlar .....	9
Şekil 1.9 : Robot üzerindeki çizgisel hız.....	10
Şekil 1.10 : Robot üzerindeki açısal hız.....	10
Şekil 1.11 : Kartezyen koordinatlarda $X$ ve $Y$ eksenlerindeki robota ait hızlar .....	11
Şekil 1.12 : Robotun $X$ eksenini ile yaptığı açının zamana bağlı değişimi .....	11
Şekil 1.13 : $X$ ve $Y$ eksenlerindeki yer değiştirmeler .....	12
Şekil 1.14 : Uygulanan hızlar ve hesaplamalar sonrasında robot yer değiştirmesi ....	12
Şekil 1.15: Mobil robot ters kinematik denklemlerinin bilgisayar benzetim kodu ....	13
Şekil 1.16 : Ters kinematik denklemleri deneyleri için $X$ ve $Y$ konumları .....	13
Şekil 1.17 : Ters kinematik deneyleri $X$ ve $Y$ eksenlerindeki konumlar .....	14
Şekil 1.18 : Ters kinematik deneyleri robotun $X$ eksenini ile yaptığı yönelim açısı .....	14
Şekil 1.19 : Ters kinematik deneyleri için robotun $X$ eksenini ile yaptığı açısal hızı....	15
Şekil 1.20 : Belirlenen yol için tekerleklere uygulanması gereken hızlar. ....	15
Şekil 1.21 : Doğru akım motor modeli .....	19
Şekil 1.22 : Robot dinamik modelinin çözümü .....	20
Şekil 1.23 : Robot dinamik denklemlerinin MATLAB benzetiminde kullanılan kod.....	22
Şekil 1.24 : Motorlara uygulanan gerilimler ve benzetim değerleri.....	23
Şekil 1.25 : Motor tekerleklerindeki açısal hızlar .....	23
Şekil 1.26 : Robotun çizgisel hızı .....	24
Şekil 1.27: Kartezyen koordinatlarda Robotun yönelim açısı.....	24
Şekil 1.28: Robotun Kartezyen koordinatlarda zamana bağlı yer değiştirmesi .....	25
Şekil 1.29: Robot motorlarına uygulanan gerilimler sonucu elde edilen yer değiştirme .....	25
Şekil 1.30 : Robot konum değişimi. ....	27
Şekil 1.31: Robot konum kontrolü şeması .....	28
Şekil 1.32: Konum kontrolü için elde edilen tekerlek hızları.....	29
Şekil 1.33 : Konum kontrolü için elde edilen robot çizgisel hızı .....	30
Şekil 1.34: Konum kontrolü sırasında oluşan robot açısal hızı .....	30
Şekil 1.35 : Konum kontrolü sırasında robot yönelimi.....	31
Şekil 1.36 : Konum kontrolü için $X$ ve $Y$ eksenleri yer değiştirmeleri .....	31
Şekil 1.37 : Konum kontrolü sırasında elde edilen yer değiştirme.....	32
Şekil 1.38 : Yörünge planlama kontrol şeması.....	33
Şekil 1.39 : Robot $X$ eksenini konumu.....	34
Şekil 1.40 : Robot $Y$ eksenini konumu.....	35
Şekil 1.41 : Robot $X$ eksenini hatası .....	35
Şekil 1.42 : Robot $Y$ eksenini hatası .....	36
Şekil 1.43 : $X$ ve $Y$ eksenlerinde Robot konumu ve benzetimi.....	36

Şekil 1.44 : Yörünge kontrolü sırasında elde edilen motor hızları .....	37
Şekil 2.1 : Lazer tarayıcı vasıtası ile görüntülenmiş bina içi [8] .....	38
Şekil 2.2: AFM Yapısı [9].....	39
Şekil 2.3 : AFM ölçümü ile elde edilen kompakt disk(CD) görüntüsü [10].....	39
Şekil 2.4 : Verici antenden yayılan dalganın alıcı antene dönüşü .....	42
Şekil 2.5 : RF Sensör modülü blok şeması[11] .....	43
Şekil 2.6 : RF Sensör modülü blok şeması .....	44
Şekil 2.7 : RF modülasyon ve yükselteç Devresi .....	45
Şekil 2.8 : Lock-In yükselteç ve modülasyon sinyali üreteç devresi.....	45
Şekil 2.9: Mermer altına yerleştirilmiş metal boru .....	46
Şekil 2.10 : Metal borunun mermer plakaları altındaki dikey kesit bilgisayar görüntüsü.....	47
Şekil 2.11 : Mermer ve ytong plakalar altına yerleştirilmiş metal boru .....	48
Şekil 2.12 : Metal borunun mermer ve beton plakaları altındaki dikey kesit görüntüsü .....	48
Şekil 3.1: Mobil robot donanımı blok şeması .....	49
Şekil 3.2: Mobil robot kontrol bloğu .....	50
Şekil 3.3: PIC18F8527 tabanlı Mobil robot kontrol kartı.....	51
Şekil 3.4 : ADIS16355 jiroskop ve ivme ölçeri blok şeması .....	53
Şekil 3.5 : ADIS16355 SPI haberleşme şeması.....	54
Şekil 3.6: Jiroskop ve İvme-ölçer ölçüm sonuçları .....	54
Şekil 3.7: GPS sinyali bileşenleri .....	55
Şekil 3.8: GPS uyduları.....	55
Şekil 3.9: ET-308 GPS modülü blok şeması [16] .....	56
Şekil 3.10: GPS – PC bağlantı birimi .....	57
Şekil 3.11: PING))) ultrasonik sensör uygulama şeması .....	58
Şekil 3.12: Haberleşme ve sonar sinyal şeması.....	58
Şekil 3.13: Sonar sensör yerleşimi.....	59
Şekil 3.14 : Robot konumu ve sonar sensörlerin engelleri tespiti .....	59
Şekil 3.15 : Ultrasonik sensörleri ölçüm sonuçları .....	60
Şekil 3.16 : HEDS-9100 sensörü mekaniksel görünüm [18]. .....	60
Şekil 3.17: HEDS-9100 sensörü çıkış sinyali grafiği[18].....	61
Şekil 3.18: GM9236S021 Doğru Akım Motoru [19] .....	62
Şekil 3.19: Sabertooth 2x25 DC Motor Sürücü.....	62
Şekil 3.20: Redüktörlü Doğru akım motoru.....	63
Şekil 3.21: SyRen10 30Vdc 10A Doğru akım motor sürücüsü .....	64
Şekil 3.22: Robot haberleşme yazılımı .....	65
Şekil 3.23: Robot kontrol yazılımı.....	66
Şekil 3.24: Kumanda kolu .....	67
Şekil 3.25: Yüzey altı görüntüleme yazılımı.....	68
Şekil 3.26: Yüzey altı görüntüleme yazılımı X-Z dikey kesit görüntüsü .....	68
Şekil 3.27: Yüzey altı görüntüleme yazılımı X-Y yatay kesit görüntüsü .....	69
Şekil 4.1 : Yer altına gizlenmiş teflon disk .....	71
Şekil 4.2 : Yer altına gizlenmiş teflon diske ait dikey kesit görüntüsü .....	72
Şekil 4.3 : Yer altına gizlenmiş teflon diske ait yatay kesit görüntüsü.....	72
Şekil 4.4: Yer altına gizlenmiş kestimid disk .....	73
Şekil 4.5 : Yer altına gizlenmiş kestimid diske ait dikey kesit görüntüsü.....	73
Şekil 4.6 : Yer altına gizlenmiş kestimid diske ait yatay kesit görüntüsü.....	74

## **TABLO DİZİNİ**

Tablo 1.1: Mobil robot yapısal sabitleri.....	16
---	----

## SEMBOLLER

$x$	: Kartezyen uzayda robot konumunun x eksenini iz düşümü
$y$	: Kartezyen uzayda robot konumunun y eksenini iz düşümü
$\theta$	: Kartezyen uzayda robot konumunun x eksenini ile yaptığı açı
$v$	: Robot çizgisel hızı
$\omega$	: Robot açısal hızı
$\varphi$	: Tekerlek açısal hızı
$r$	: Tekerlek çapı
$b$	: Tekerlekler arası mesafe
$m_C$	: Robot şase kütlesi
$m_W$	: Robot tekerlek kütlesi
$I_W$	: Tekerleklere ait eylemsizlik momenti
$I_C$	: Robot şasesine ait eylemsizlik momenti
$T$	: Kinetik enerji
$L$	: Lagrange Fonksiyonu
$\lambda$	: Lagrange çarpanı
$\tau_R, \tau_L$	: Tekerlekler için tork değerleri
$\varepsilon$	: Dielektrik sabiti – elektriksel geçirgenlik

## ALT İNDİSLER

$R$	: Sağ tekerlek
$L$	: Sol tekerlek
$C$	: Robot kasası
$W$	: Tekerlek
$ARM$	: Armatür

## KISALTMALAR

AFM	: Atomic Force Microscopy (Atomik Güç Mikroskobu)
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
ME	: Malzeme Enstitüsü
UYTL	: Uluslararası Yüksek Teknoloji Laboratuvarı
RF	: Radyo Frekansı
SPI	: Serial Peripheral Interface
USB	: Universal Serial Bus
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
PC	: Personal Computer (Kişisel Bilgisayar)



# ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME AMAÇLI MOBİL ROBOT TASARIMI

AHMET KIZILHAN

**Anahtar Kelimeler:** Mobil robot, üç boyutlu görüntüleme, yer altı görüntüleme, mayın tespiti, konum ve yörünge kontrolü.

**Özet:** İnsanlar için tehlikeli olarak görülen ortamlarda hareket etmesi ve insanların fiziksel olarak limitlerini zorlayan işlemleri yapması için mobil robotlar tasarlanmaktadır. Bu tezde, yer altına gizlenmiş nesnelere tespit etmek için, üç boyutlu görüntü üreten sensörle desteklenen bir mayın tarama robotu geliştirilmiştir.

Mayın gibi yeraltına gizlenmiş nesnelere tespit etmek için birçok farklı sensörler vardır. Bunların her birinin üstünlük ve eksiklikleri mevcuttur. Bu tezde, yer altındaki nesnenin üç boyutlu görüntüsünü üreten mikrodalga sensörü ve tomografi yazılımı kullanılmıştır. Bu sensör 2-4GHz arasında elektromanyetik dalgalar üreterek, yer altında 30cm derinliğe kadar gizlenmiş nesnelere tespit etmektedir.

Mobil robot, arazi koşullarında kullanılacağından dolayı paletli olarak geliştirilmiştir. Robot üzerinde, yer altını gözlemlemek için mikrodalga sensörü, çevresini algılayabilmek için ise ultrasonik sensörleri ve kamera sistemi kullanılmıştır. Robotun hız, ivme ve yönelim açısı bilgilerini ölçebilmek için, ADIS16355 içerisinde bulunan ivmeölçer ve jiroskop kullanılmıştır. Ayrıca robotun dünya üzerindeki konumunu belirlemek üzere, GPS alıcısı yerleştirilmiştir.

Mikrodalga sensöründen ölçülen derinlik bilgisi ile birleştirilen robot konum bilgisi vasıtasıyla yer altına gömülmüş her türlü nesnenin (plastik, metal, gibi..) yeri ve üç boyutlu görüntüsü 1cm hassasiyetle tespit edilmektedir.

## **A MOBILE ROBOT DESIGN FOR OBTAINING 3-D IMAGING**

**AHMET KIZILHAN**

**Key Words:** Mobile robot, 3-D imaging, underground imaging, mine detection, position control, trajectory control.

**Abstract:** Mobile robots are designed to do jobs which challenge the limits of humans physically and to move in areas which are seen highly dangerous for humans. In this thesis, a mine detection robot which is supported by sensor to produce 3D images, has been developed to detect hidden objects in underground

There are a lot of different kinds of sensors to detect objects which are hidden underground such as mines. All of these have precedence and deficiencies. In this thesis, a microwave sensor which produces the 3-D image of an object hidden underground and tomography software is used. This sensor detects the objects which are hidden underground up to 30 cm depth by creating electromagnetic waves between 2GHz and 4GHz.

The Mobile Robot is designed as a tracked vehicle in order to be used in terrain conditions. A microwave sensor is used on the robot in order to observe underground and ultrasonic sensors and a camera system are used to perceive the environment. In order to evaluate the speed, acceleration and orientation angle of the robot, an accelerometer which is in the ADIS16355 and a gyrometer is used. Also a GPS receiver is located so as to designate the position of the robot on the world.

By the information of the robot's position which is combined with the depth information evaluated by the microwave sensor, a 3-D image of any object hidden underground such as plastic, metal etc is detected by 1 cm resolution.

## 1.MOBİL ROBOT YAPISI, MODELLEMESİ VE KONTROLÜ

Yer altı görüntülemesi amacı ile tasarlanan mobil robot, mekanik yapısı, kinematiği ve dinamiği olmak üzere üç ayrı başlık altında incelenmiştir. Mobil robotun kinematik ve dinamik denklemleri elde edilerek, konum kontrolü ve yörünge takibi gerçekleştirilmiştir.

### 1.1.Mekanik Yapı

Robotun mekanik yapısı, uygulamanın yapılacağı arazi koşullarına uygun olmalıdır. Robotun, mayın bulma gibi zor arazi şartlarında dahi hareketini sınırlandırmayacak ve devamlılığını sağlayacak özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler benzer çalışmalar göz önüne alınarak belirlenmiş ve robot tasarımı yapılmıştır.

Najjarana, H., Goldenbergb (2006), kara mayınları tespit sensörü içeren otonom bir robot için, harita çıkarmışlar ve bu harita üzerinde yörünge planlamışlardır. Lazer ve ultrasonik mesafe sensörleriyle robot desteklenmiştir. Bu sensörler vasıtasıyla, harita oluşturmadaki hatalı durumlar giderilmeye çalışılmıştır. Mayın tespitinde kullanılan sensör için tarama kolu kullanılmış ve sensör robotun dışına alınmıştır [1].



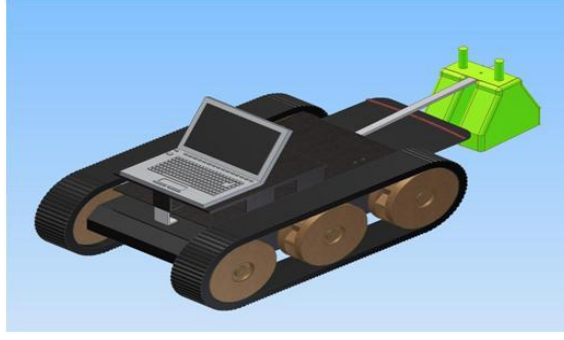
Şekil 1.1: Kara mayınları tespit amaçlı robot uygulaması [1]

Fukushima, E.F., Debenest ve arkadaşları (2005) tarafından, pantograf ağırlık dengeli bir manipülatörün bir mobil platform üzerine monte edilmesinden oluşan, mayın algılama ve kaldırma görevleri için tasarlanmış tümüyle yeni basit ama etkili bir sistem önerilmiş ve tasarlanmıştır[2].

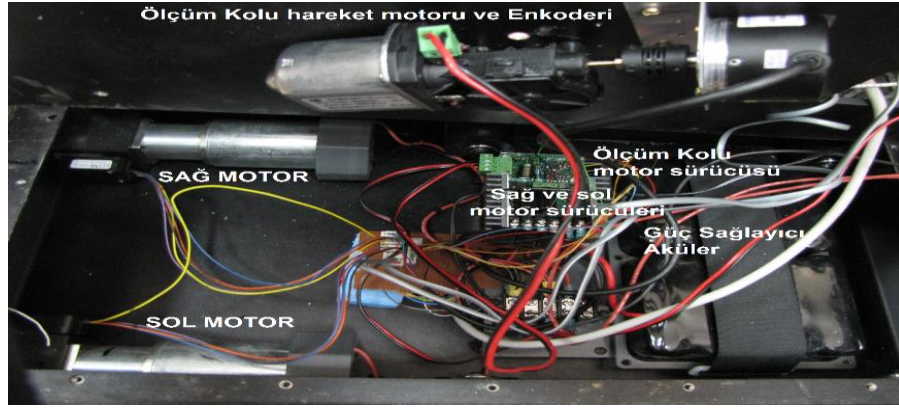


Şekil 1.2: Uzaktan kontrollü mayın bulma ve temizleme robotu [2]

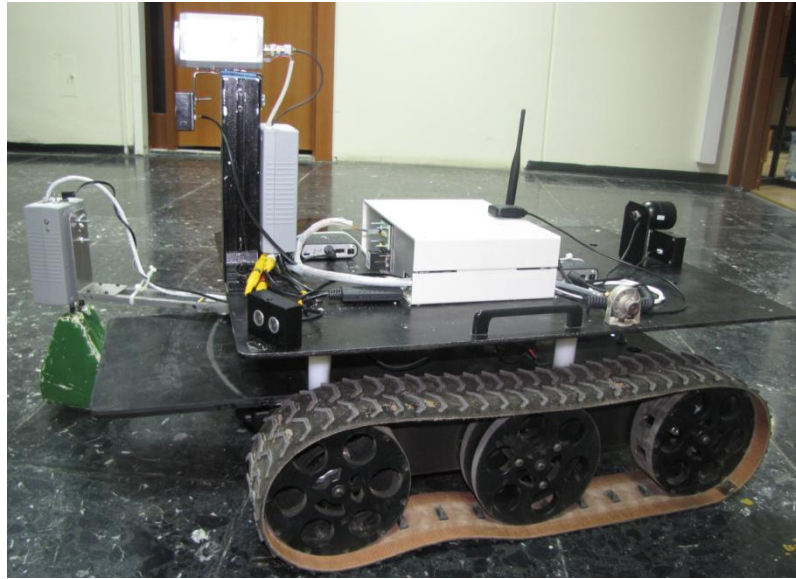
Üç Boyutlu görüntüleme için tasarlanan robot, iki kısımdan oluşur. Şekil 1.3' de SOLIDWORKS programında hazırlanan, mobil robotun katı hal modeli verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere robot iki kısımdan oluşmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Machine Labs. firmasından temin edilen mobil araç ilk kısımdır. İkinci kısım ise sensör ve tarama koludur. Şekil 1.4'te robotun iç yapısı (motorlar, sürücüler ve güç üniteleri) verilmiştir. Şekil 1.5'te gerçekleştirilen mobil robot gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, arazi için palet sistemi, hesaplamalar, kontrol ve kumanda için bilgisayar sistemi, çevresini algılamak için ultrasonik sensör ve kamera sistemi, mayın taraması için ise mikrodalga sensörü ve tarama kolu ile donatılmıştır.



Şekil 1.3 : Mobil robotun SolidWorks programında hazırlanan modeli.



Şekil 1.4: Mobil robot motor ve motor sürücüler



Şekil 1.5: Robot Görünümü

## 1.2.Kinematik Model

Kinematik, mekanik sistemlerin nasıl davranış göstereceğini anlayabileceğimiz ve fiziksel büyüklüklerini görebileceğimiz bir çalışmadır.

Mobil robot kinematik modellemesi eklem sayısı göz önünde bulundurulduğunda endüstriyel tip robotlara göre daha basittir. Zira bir endüstriyel kaynak robotunda 6 serbestlik derecesi mevcut iken, basit bir mobil robotta göz önünde bulundurulması gereken serbestlik derecesi yalnızca ikidir.

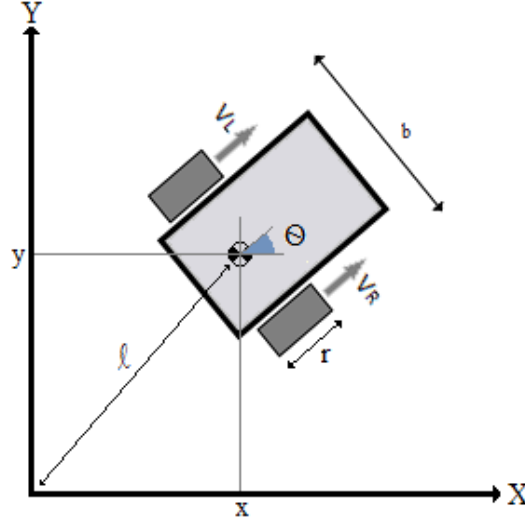
Mobil robot modellemesi sırasında, robot aşağıdan yukarıya doğru değerlendirilmeli ve her bir tekerlek için kuvvetler ve bağımlılıklar ayrı ifade edilmelidir. Bu analiz ile robot katı bir gövde üzerindeki tekerlekler ile yatay düzlemde modellenir. Bu modellemede, robot iki konum olarak düzlem üzerinde ve düzleme dik bir döner eksen olmak üzere üç farklı eksen ile ölçülendirilir.

Mobil robot,  $O: \{X,Y\}$  hareket düzlemi üzerinde hareket eden rigid bir yapı olarak ele alınmıştır. Bu yapı üzerindeki tekerlekler ve diğer yapı ile ilgili özellikler, modelleme sırasında değişmez olarak kabul edilir. Bu özellikler ;

- Tekerlekler ve yatay düzlem arasında temas noktası tek bir noktadır
- Tekerlekler dönme eksenleri sabitlenmiştir
- Her bir teker, yatay düzleme diktir
- Tekerlekler kendi yatay düzlemlerinde dönerler ve bu dönme hareketi düzlemi robot düzlemine sabitlenebilir.

Teker temas noktası ve bu noktanın temas ettiği yatay düzlem aşağıdaki varsayımlar ile kabul edilir;

- Yalnızca tekerleklerde dönme hareketi olur
- Hareket esnasında temas noktasında kayma olmaz



Şekil 1.6 : Evrensel düzlemde mobil robot konumlandırması.

Tanımladığımız düzlemde robotun konumunu belirleyebilmek için Şekil 1.6’de görüldüğü üzere evrensel düzlem ile yerel robot düzlemi arasında bir ilişki belirlenmelidir.  $X$   $Y$  eksenleri evrensel düzlemi gösterir ve  $O: \{X,Y\}$  merkezi ile tanımlanır. Robotun konumunu tanımlayabilmek için bir  $P$  noktası seçilir. Bu  $P$  noktası robot yerel düzleminde başlangıç kabul edilerek robotun yerel düzlemi tanımlaması için  $x$  ve  $y$  eksenleri yerleştirilir.  $P$  konumunu evrensel düzlem üzerinde  $x,y$  noktaları ile tanımlanır. Robotun  $X$  eksenine yaptığı yönelim açısı ise  $\theta$  ile gösterilir. Bu noktayı (1.1) denkleminde olduğu gibi genelleyebiliriz.

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Robot düzleminin hızları  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$  hızları  $X$  ve  $Y$  referans düzlemine göre hesaplanabilir. Robotun kendi doğrultusundaki hızı iki motorun hızlarının ortalamasıdır

$$v = \frac{v_L + v_R}{2} \quad (1.2)$$

Her iki motorun hızlarının farkından ise robotun ağırlık merkezi etrafındaki dönme açısal hızı bulunur

$$\varpi = \frac{v_L - v_R}{b} \quad (1.3)$$

Her bir motorun çizgisel hızları motorların açısal hızları vasıtası ile tespit edilir.

$$\begin{aligned} v_L &= r\varphi_L \\ v_R &= r\varphi_R \end{aligned} \quad (1.4)$$

Denklem (1.4)'ün türevi alınarak motorlara ait ivmeler hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \dot{v}_L &= r\dot{\varphi}_L \\ \dot{v}_R &= r\dot{\varphi}_R \end{aligned} \quad (1.5)$$

Denklem (1.2),(1.3)ve(1.4) birleştirilerek motorlardan elde edilen hızlara karşılık robotun çizgisel ve açısal hızları ve bu hızların türevlerinin alınmaları vasıtasıyla robotun çizgisel ve açısal ivmeleri bulunabilir.

$$\begin{aligned} v &= \frac{r(\varphi_R + \varphi_L)}{2} \\ \varpi &= \frac{r(\varphi_R - \varphi_L)}{b} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{r(\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L)}{2} \\ \dot{\varpi} &= \frac{r(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L)}{b} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Aşağıdaki denklemler vasıtasıyla robotun, X-Y Kartezyen koordinatlarındaki çizgisel ve açısal hızları bulunabilir

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \varpi \end{aligned} \quad (1.8)$$

Kartezyen koordinatlardaki ivme değerleri denklem (1.8)'in türevi alınarak bulunur.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -v\dot{\theta} \sin \theta + \dot{v} \cos \theta \\ \ddot{y} &= v\dot{\theta} \cos \theta + \dot{v} \sin \theta \\ \ddot{\theta} &= \dot{\varpi} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Mobil robotun, mekanik yapısının (non-holonomic) getirdiği koşullar nedeniyle bazı sınırlamaları vardır. Bu sınırlı çalışma şartları aşağıdaki denklemler ile ifade



edilmiştir. Denklem (1.10) robotun yalnızca kendi doğrultusunda gidebildiğini, denklem (1.11) robotun sağ motor hızına bağlı olarak saat yönünün aksine, denklem (1.12) ise sol motor hızına bağlı olarak ise saat yönünde döndüğünü belirtir.

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (1.10)$$

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta = r\dot{\varphi}_R - b\dot{\theta} \quad (1.11)$$

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta = r\dot{\varphi}_L + b\dot{\theta} \quad (1.12)$$

Bu sınırlamalar, matris formunda (1.13) ifadesi şeklinde yazılabilir.

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (1.13)$$

$$A = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & b & -r & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -b & 0 & -r \end{bmatrix}$$

Bu denklem iki koşulu içerisinde saklar. Bu koşulların ilki, robotun verilen Kartezyen koordinatlardaki çizgisel hızlarıyla ve tekerleklerin açısal hızlarıyla maksimum ne kadar dönme gerçekleştirebileceğini belirler. İkinci koşul ise bunun tam tersini ifade eder ve robotun verilen açıda dönmesi için yukarıda ifade edilen hızların ne olması gerektiğini ifade eder.

Yukarıdaki denklemler vasıtasıyla, robotun tekerleklerine hareket veren motorların hızlarının, robotun kartezyen koordinatlardaki konumuna nasıl etki ettiğinden bahsedildi. Robotun kartezyen koordinat sisteminde hareket etmesi istenen hızların  $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$  bilinmesi durumunda motor hızları bulunabilir. Non-holonomic bağımlılıklar olan denklem (1.11), (1.12) ve denklem (1.6)'dan robotun kartezyen koordinatlardaki hareketlerine karşılık, robota ait çizgisel ve açısal hızlar tespit edilebilir.

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Denklem (1.2) ve denklem (1.3) den

$$\begin{bmatrix} \varphi_R \\ \varphi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & \frac{-b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Hız denklemindeki  $[\varphi_R \ \varphi_L]^T$  hız bileşenleri, denklem (1.14) denklem (1.15) de yerine konulursa

$$\begin{bmatrix} \varphi_R \\ \varphi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{r} & \frac{\sin \theta}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{\cos \theta}{r} & \frac{\sin \theta}{r} & \frac{-b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Buradan robot platformunun kartezyen koordinatlardaki  $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$  hızları için  $[\varphi_R \ \varphi_L]^T$  motor hızları bulunabilir;

$$\varphi_R = \frac{\dot{x} \cos \theta}{r} + \frac{\dot{y} \sin \theta}{r} + \frac{\dot{\theta} b}{r} \quad (1.17)$$

$$\varphi_L = \frac{\dot{x} \cos \theta}{r} + \frac{\dot{y} \sin \theta}{r} - \frac{\dot{\theta} b}{r} \quad (1.18)$$

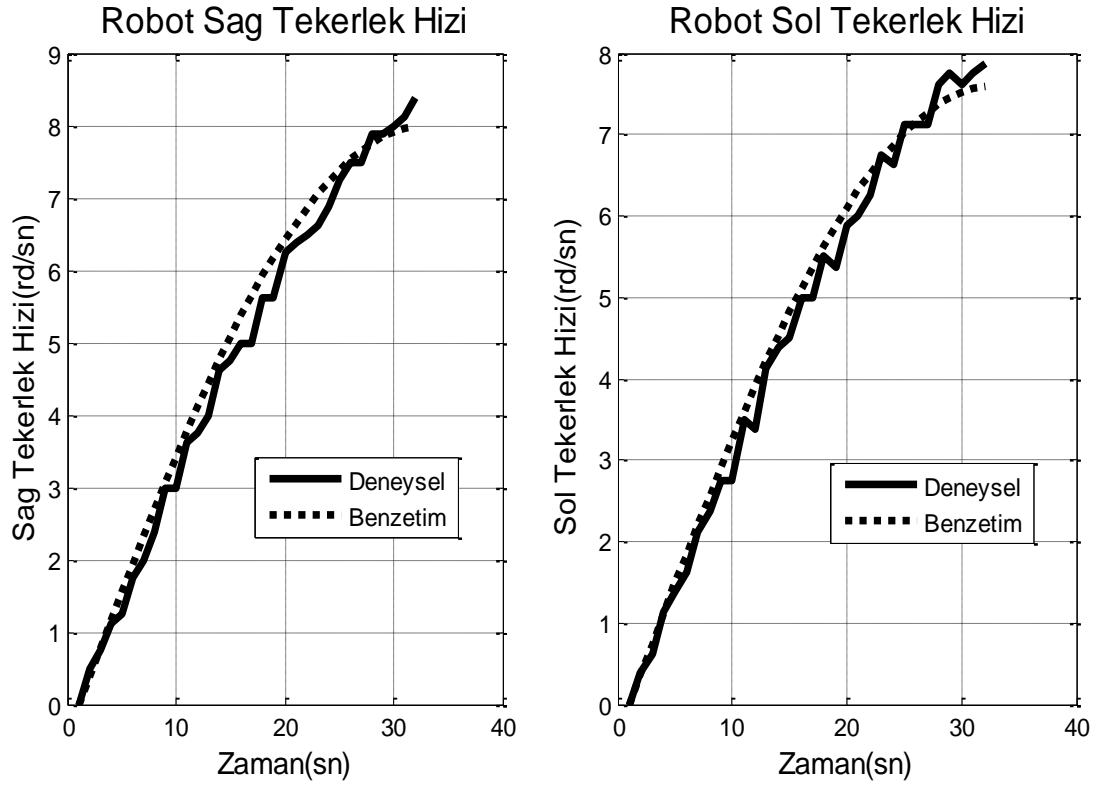
### 1.2.1.İleri kinematik model deneysel sonuçları

Bu kısımda çeşitli deneyler yapılarak mobil robotun kinematik denklemleri doğrulanmıştır. Benzetim sonuçlarını elde etmek için kinematik denklemler MATLAB ortamında m dosyası şeklinde yazılmıştır (Şekil 1.7). Şekil 1.8’de robotun sağ ve sol tekerleklerine uygulanan hızlar görülmektedir. Şekil 1.9’de ise uygulanan tekerlek hızlarına karşılık üretilen çizgisel hız görülmektedir. Şekil 1.10’da aynı şekilde robotun açısal hızı gösterilmektedir. Şekil 1.11’de robot kartezyen koordinatlarındaki hızları ve Şekil 1.12’ de robotun yönelim açısının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 1.13’de robotun X ve Y eksenlerindeki anlık konumları ve Şekil 1.14 de robotun bu hızlar sonucunda kartezyen koordinatlarda X-Y eksenleri boyunca aldığı yol gösterilmektedir.

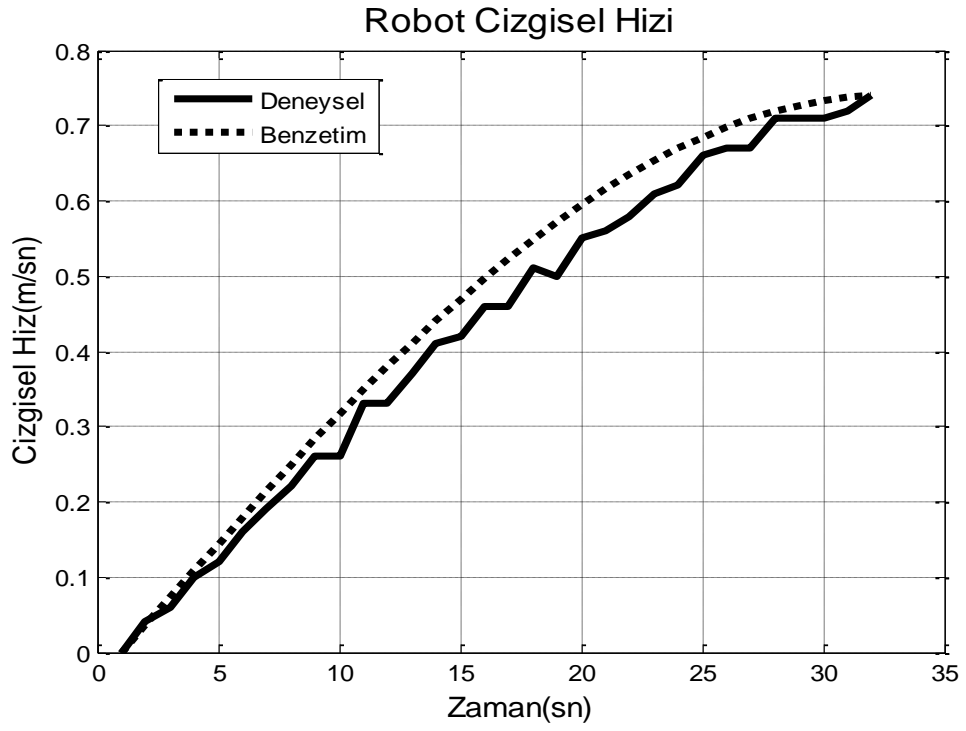
```
[x y q vx vy v w]=MobRobKin(r,l,0,0.5,0.2);

function [x y q vx vy v w] = MobRobKin(R,L,p,b,r)
% R:sag motor acisal hiz(rd/sn)      L:sol motor acisal hiz(rd/sn)
% p:baslangic acisi
% b:tekerlekler arasi mesafe
% r:tekerlek yari caplari
v=r*(R+L)/(2);%denklem(1.2)
w=r*(R-L)/(b);%denklem(1.3)
x(1)=0; y(1)=0; q(1)=p;
for i=1:l:length(v);
    q(i+1)=q(i)+w(i);    vx(i)=v(i)*cos(q(i));    vy(i)=v(i)*sin(q(i));
    x(i+1)=x(i)+vx(i);    y(i+1)=y(i)+vy(i);
end
```

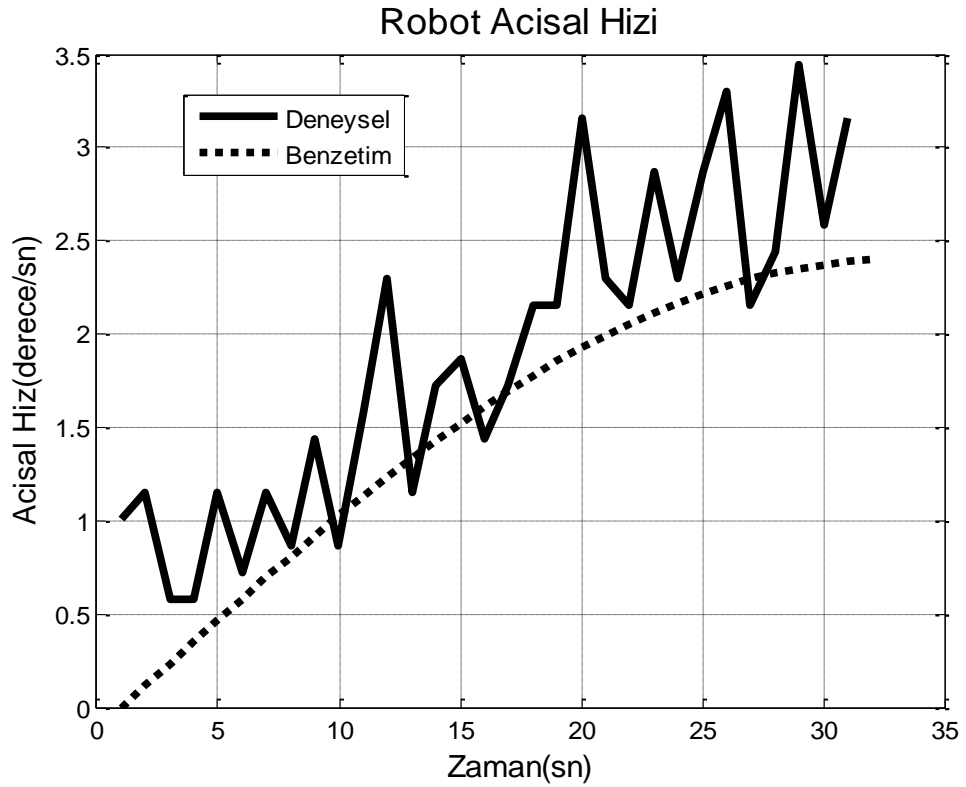
Şekil 1.7: Mobil robot ileri kinematik denklemlerinin bilgisayar benzetim kodu



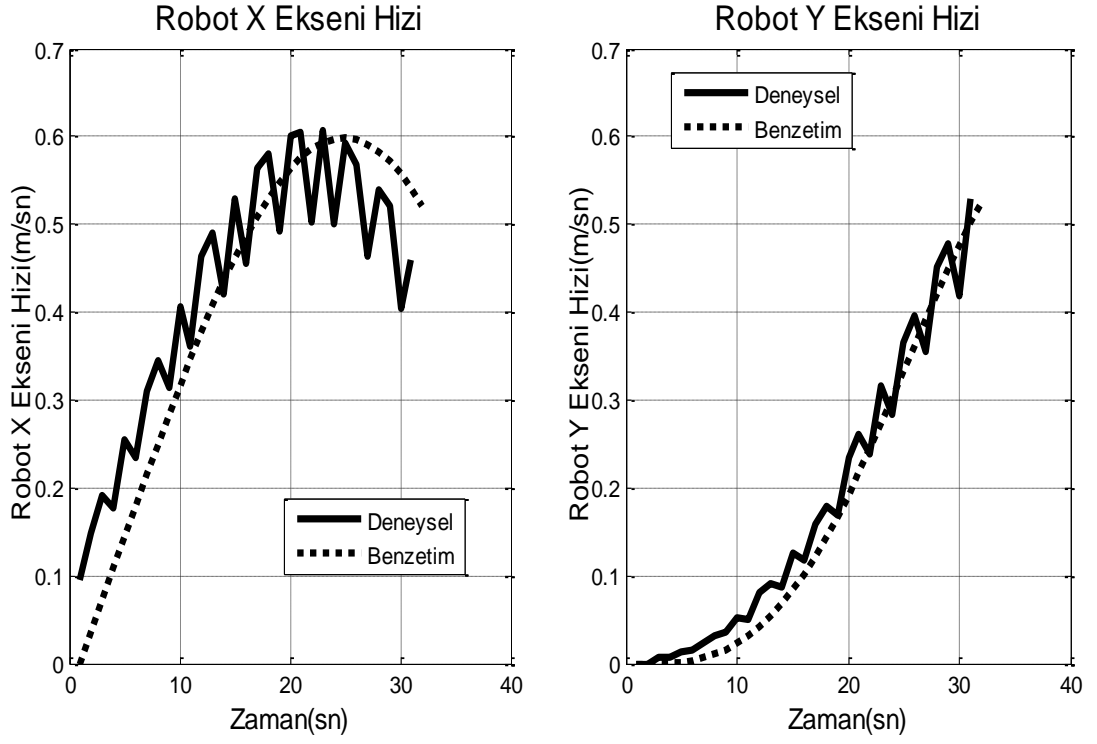
Şekil 1.8: Robot tekerleklerine uygulanan hızlar



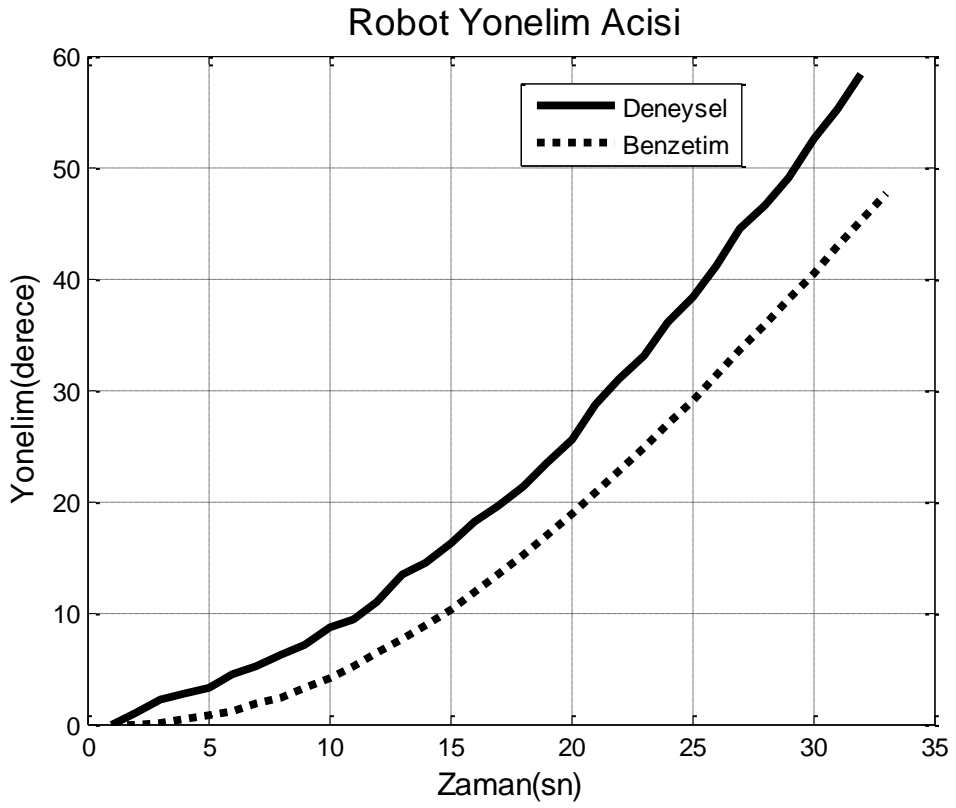
Şekil 1.9 : Robot üzerindeki çizgisel hız



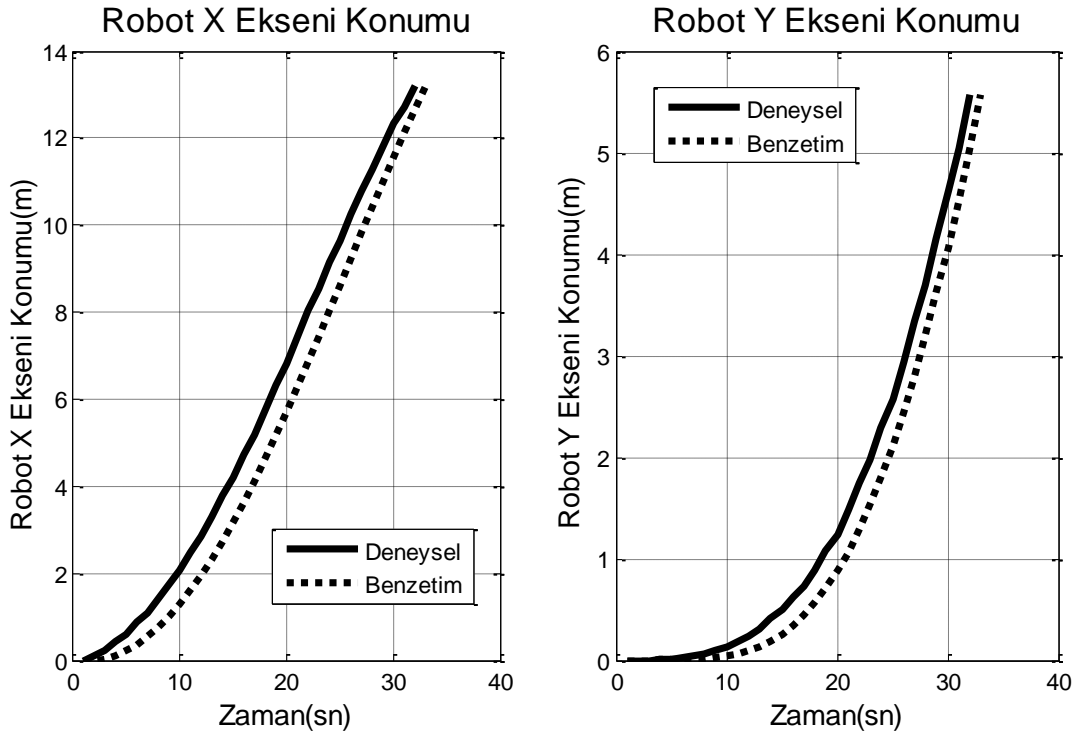
Şekil 1.10 : Robot üzerindeki açisal hız



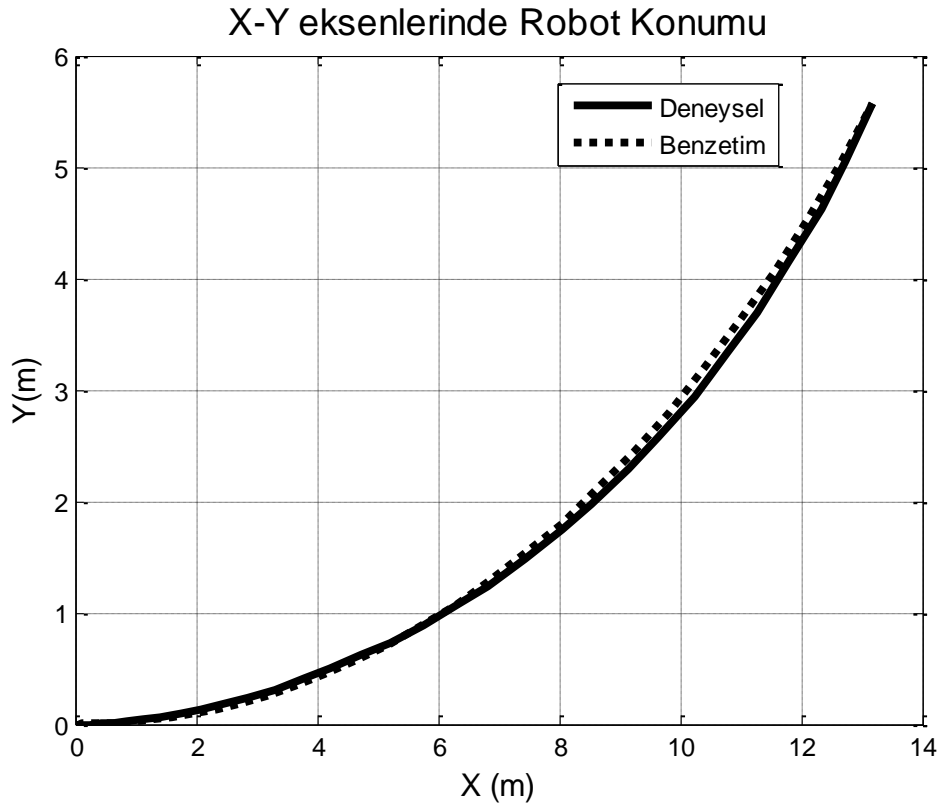
Şekil 1.11 : Kartezyen koordinatlarda X ve Y eksenlerindeki robota ait hızlar



Şekil 1.12 : Robotun X eksenine yaptığı açının zamana bağlı değişimi



Şekil 1.13 : X ve Y eksenlerindeki yer değiştirmeler



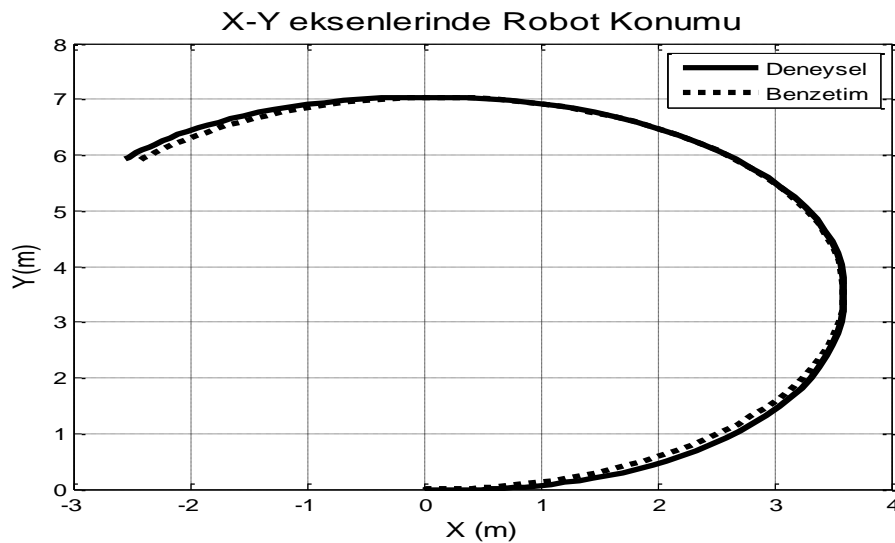
Şekil 1.14 : Uygulanan hızlar ve hesaplamalar sonrasında robot yer değiştirmesi

## 1.2.2. Ters kinematik model deneysel sonuçları

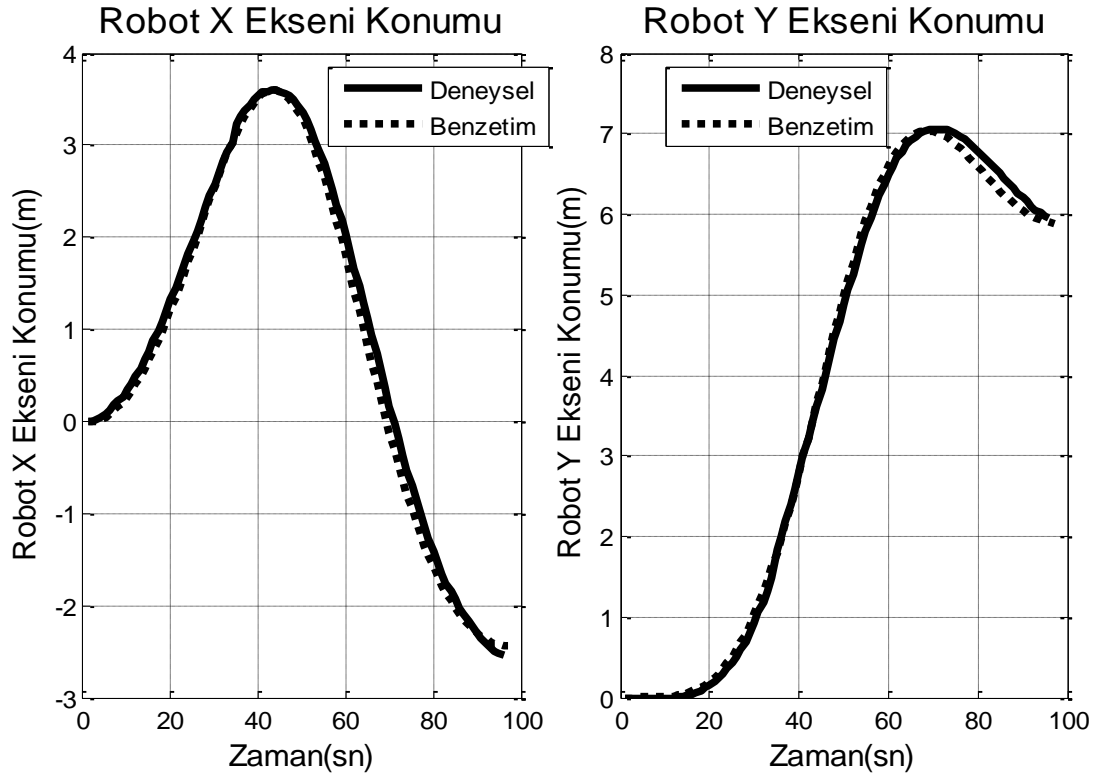
Mobil robot ileri kinematik denklemlerinin deneysel doğrulanması sonrasında mobil robotun ters kinematik denklemleri deneysel olarak doğrulanmıştır. Benzetim sonuçlarını elde etmek için kinematik denklemler MATLAB ortamında m-dosyası şeklinde yazılmıştır (Şekil 1.15). Şekil 1.16'de verilen X-Y eksenlerindeki hareket için (1.17) ve (1.18) denklemleri ile motor hızları tespit edilmiştir (Şekil 1.20). Bu hızlar sonucunda robot yönelimi Şekil 1.18' de gösterilmektedir. Şekil 1.17'de gösterilen robot kartezyen koordinatlarında aldığı konumlar için robot yönelim açısı Şekil 1.18'de, robot açısal hızı ise Şekil 1.19'da gösterilmektedir.

```
function [ R,L ] = MobRobInvKin( x,y,p,b,r )
% x: x ekseninde yer degistirme
% y: y ekseninde yer degistirme
% p: robot baslangic acisi
% b: tekerlekler arasi mesafe
% r: tekerlek yari caplari
dx=diff(x);
dy=diff(y);
q(1)=p;
q(2:length(x))=atan2(diff(y),diff(x));
w=diff(q);
q=intgrl(w,q(1));
s=length(q);
R=(dx.*cos(q(2:s))+dy.*sin(q(2:s))+w*b/2)/r;%denklem (1.16)
L=(dx.*cos(q(2:s))+dy.*sin(q(2:s))-w*b/2)/r;%denklem (1.17)
```

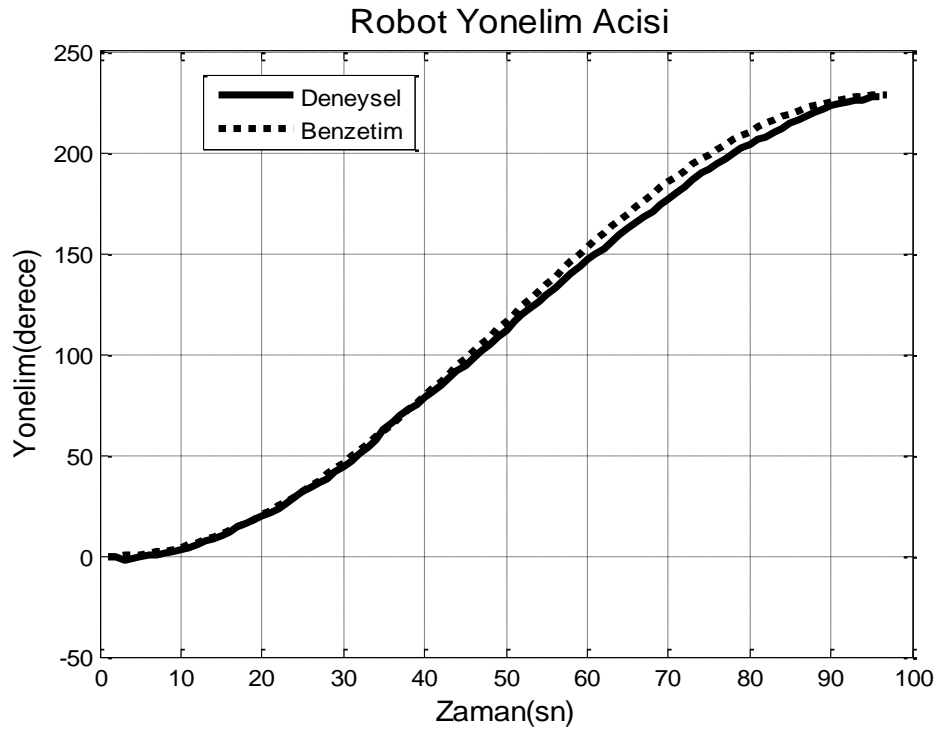
Şekil 1.15: Mobil robot ters kinematik denklemlerinin bilgisayar benzetim kodu



Şekil 1.16 : Ters kinematik denklemleri deneyleri için X ve Y konumları

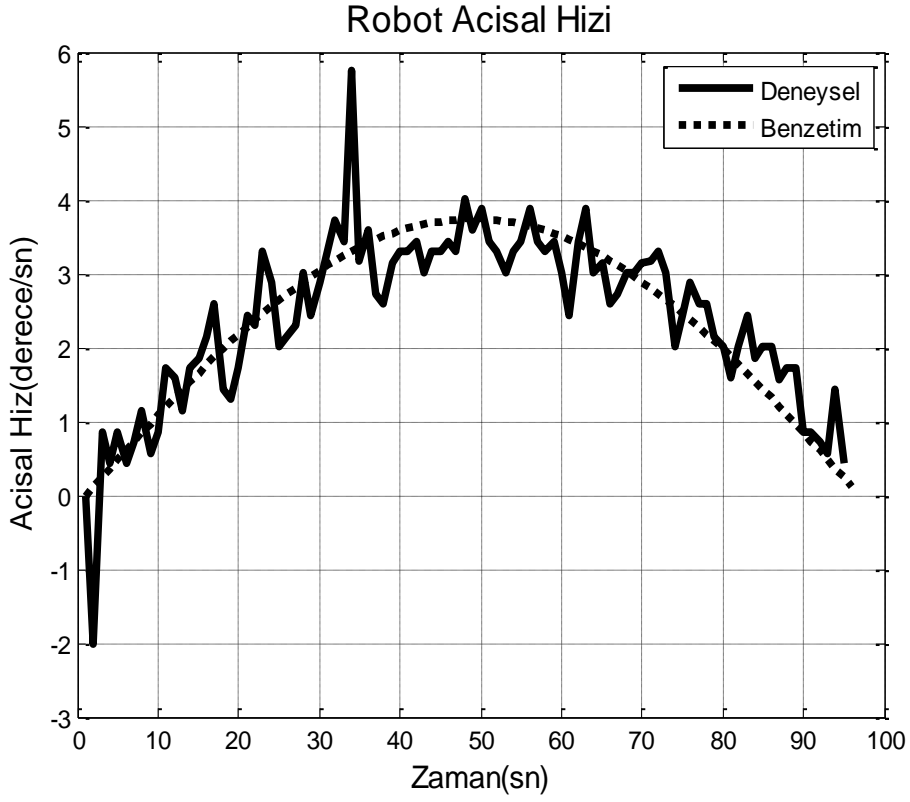


Şekil 1.17 : Ters kinematik deneyleri X ve Y eksenlerindeki konumlar

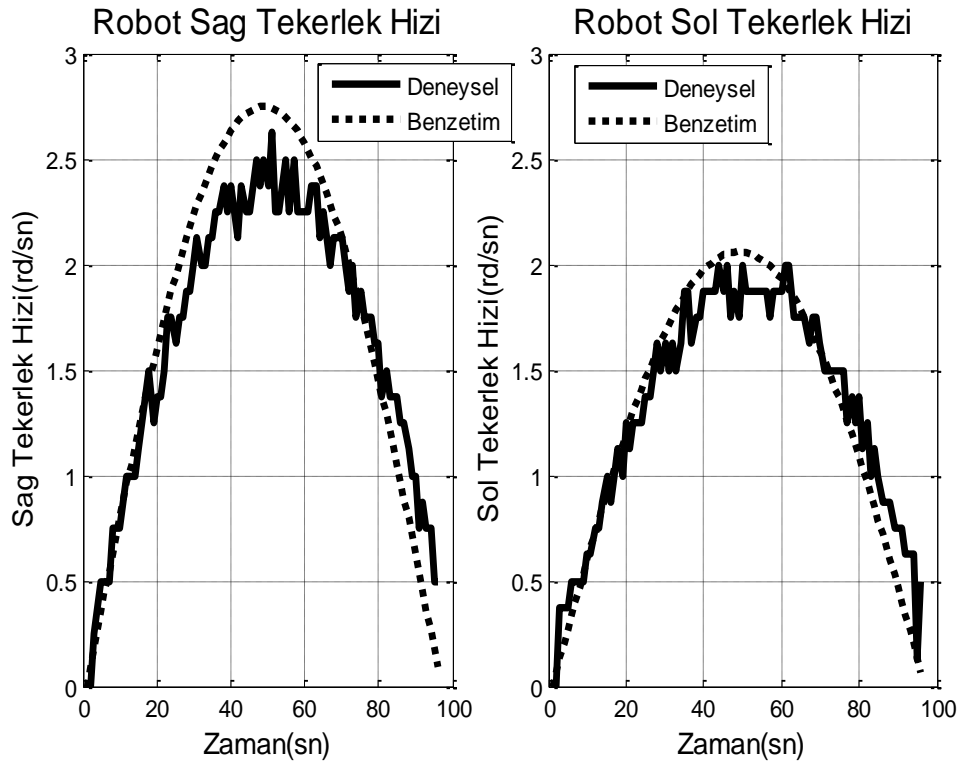


Şekil 1.18 : Ters kinematik deneyleri robotun X eksenini ile yaptığı yönelim açısı





Şekil 1.19 : Ters kinematik deneyleri için robotun X eksenini yaptığı açısız hızı



Şekil 1.20 : Belirlenen yol için tekerleklere uygulanması gereken hızlar.

Mobil robot ileri ve ters yönlü kinematik denklemleri doğruluk deneyleri sırasında, mobil robot kapalı çevrim olarak çalıştırılmamaktadır. Yönelim ve konum hataları, kontrol yöntemleri ile giderilebilmektedir.

### 1.3.Dinamik Model

Dinamik model sayesinde, hareket sağlayıcı motorlara uygulanacak gerilimlere karşılık robotun nasıl hareket edeceği tespit edilebilir.

Mobil robot, temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, robot şasesi, tekerlekler ve motorlardır. Bunların ayrı ayrı dinamik toplamları, robotun toplam dinamiğini üretmektedir.

İlk olarak robot yapısından gelen sabitlerin tanımlanması gerekir. Bu sabitler Tablo-1 de verilmiştir

Tablo 1.1: Mobil robot yapısal sabitleri

Robota ait sabitler	Kısaltması	değeri	Birimi
Tekerlekler arası mesafe	$b$	0.405	$m$
Robot şase ağırlığı	$m_c$	30	$kg$
Robot eylemsizlik momenti	$I_c$	0.15625	$kgm^2$
Tekerlek çapları	$r$	0.185	$m$
Tekerlek ağırlığı	$m_w$	0.5	$kg$
Tekerlek eylemsizlik momenti	$I_w$	0.0025	$kgm^2$
Doğru akım motoru armatür direnci	$R_{ARM}$	2.45	$\Omega$
Doğru akım motoru armatür endüktansı	$L_{ARM}$	0.0026	$H$
Doğru akım motoru tork sabiti	$K_M$	0.0458	$\frac{Nm}{A}$
Doğru akım motoru EMF sabiti	$K_{EMF}$	0.0458	$\frac{Nm}{A}$

Robot şasesine ait toplam kinetik enerji, robotun çizgisel ve açısal hızları sonucu yaptığı hareketlerde oluşan enerjilerin toplamıdır.

$$T_c = \frac{1}{2} m_c v^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2 \quad (1.19)$$

Robota uygulanan kuvvetler, tekerleklere uygulanan kuvvetler vasıtasıyla bulunur.

$$\begin{bmatrix} F_V \\ F_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_R + F_L \\ (F_R - F_L)b \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Burada  $F_V$  çizgisel kuvveti,  $F_W$  açısasal kuvveti ifade eder.  $F_R$  ve  $F_L$  ise sağ ve sol motorlara uygulanan kuvvetleri ifade eder. Yukarıdaki ifadede (1.20) çizgisel kuvvet ve açısasal kuvvet için  $F_V = m_C \dot{v}$  ve  $F_W = I_C \dot{w}$  ifadeleri yerine konulursa denklem (1.21) elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} m_C \dot{v} - F_R - F_L \\ I_C \dot{w} - (F_R - F_L)b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Bu eşitlikte robotun çizgisel ve açısasal ivmeleri bulunabilir.

$$\dot{v} = \frac{F_R - F_L}{m_C \dot{v}} \quad (1.22)$$

$$\dot{w} = \frac{(F_R - F_L)b}{I_C \dot{w}} \quad (1.23)$$

Kartezyen koordinatlarındaki ivme denklemlerini elde etmek için, denklem (1.9)'da açısasal ve hız değerleri yerine, denklem(1.22) ve denklem(1.23) konulur. Bu işlem sonucunda, uygulanan kuvvetlere göre Kartezyen koordinatlarda robota ait ivme değerleri denklem (1.26)'daki gibi bulunabilir.

Toplam kinetik enerji, robot şasesi ve tekerlerin kinetik enerjilerinin toplamı şeklinde yazılabilir

$$\ddot{x} = -v\dot{\theta} \sin \theta + \frac{(F_R - F_L) \cos \theta}{m_C \dot{v}} \quad (1.24)$$

$$\ddot{y} = v\dot{\theta} \cos \theta + \frac{(F_R - F_L) \sin \theta}{m_C \dot{v}} \quad (1.25)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(F_R - F_L)b}{I_C \dot{w}} \quad (1.26)$$

$$T_T = T_C + T_R + T_L \quad (1.27)$$

Tekerleklerin sahip oldukları kinetik enerjiler, tekerleklerin robot hareketinden gelen çizgisel hızları ile kendi açısal hızları tarafından üretilir. Bu hızların tekerlekler için meydana getirdikleri kinetik enerjiler denklem (1.28)'deki gibi tarif edilir.

$$\begin{aligned} T_R &= \frac{1}{2} m_w v^2 + \frac{1}{2} I_w \varphi_R^2 \\ T_L &= \frac{1}{2} m_w v^2 + \frac{1}{2} I_w \varphi_L^2 \end{aligned} \quad (1.28)$$

Denklem (1.4), denklem (1.28)'da yerine konulursa;

$$\begin{aligned} T_R &= \frac{1}{2} m_w r^2 \varphi_R^2 + \frac{1}{2} I_w \varphi_R^2 \\ T_L &= \frac{1}{2} m_w r^2 \varphi_L^2 + \frac{1}{2} I_w \varphi_L^2 \end{aligned} \quad (1.29)$$

Denklem (1.19)' da açısal ve çizgisel hızları denklem (1.6)'da yerlerine koyalım.

$$T_C = \frac{1}{2} m_c \left( \frac{r(\varphi_R + \varphi_L)}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_c \left( \frac{r(\varphi_R - \varphi_L)}{b} \right)^2 \quad (1.30)$$

Denklem (1.27) bu ifadeler ile tekrar yazılabilir ve toplam kinetik enerji aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} T_T &= \left( \frac{1}{4} m_c r^2 - \frac{I_c r^2}{b^2} \right) \varphi_R \varphi_L + \left( \frac{1}{2} \frac{I_c r^2}{b^2} + \frac{1}{8} m_c r^2 + \frac{1}{2} m_w r^2 + \frac{1}{2} I_w \right) \varphi_R^2 \\ &+ \left( \frac{1}{2} \frac{I_c r^2}{b^2} + \frac{1}{8} m_c r^2 + \frac{1}{2} m_w r^2 + \frac{1}{2} I_w \right) \varphi_L^2 \end{aligned} \quad (1.31)$$

Toplam kinetik enerjiye Euler-Lagrange denklemleri uygulandığı durumda,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} = \tau_i - a_{1i} \lambda_i - a_{2i} \lambda_i, \quad i = R, L \text{ ifadesi şeklinde yazılabilir ve tekerlekler}$$

ait hızlar için tork değerleri bulunabilir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_R} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_R} = \tau_R \quad (1.32)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_L} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_L} = \tau_L \quad (1.33)$$

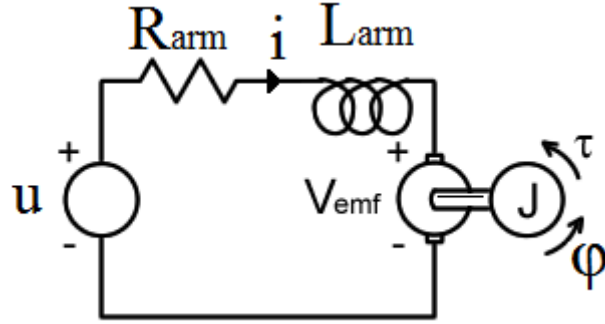
$$\begin{bmatrix} \left( \frac{1}{4} m_C r^2 - \frac{I_C r^2}{b^2} \right) \dot{\phi}_R + \left( \frac{1}{4} m_C r^2 - \frac{I_C r^2}{b^2} + m_W r^2 + I_W \right) \dot{\phi}_L - \tau_R \\ \left( \frac{1}{4} m_C r^2 - \frac{I_C r^2}{b^2} + m_W r^2 + I_W \right) \dot{\phi}_R + \left( \frac{1}{4} m_C r^2 - \frac{I_C r^2}{b^2} \right) \dot{\phi}_L - \tau_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

Denklem(1.34)'den tekerleklere ait açısal ivmeler ( $\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L$ ) çekilebilir.

$$\dot{\phi}_R = \frac{1}{2 b^2 m_C r^4 m_W + b^2 m_C r^2 I_W + 2 b^2 m_W^2 r^4 + 4 b^2 m_W r^2 I_W + 2 b^2 I_W^2 + 2 I_C r^4 m_C + 4 I_C r^4 m_W + 4 I_C r^2 I_W} (4 I_C r^2 \tau_L + 4 I_C r^2 \tau_R - b^2 m_C r^2 \tau_L + 4 b^2 I_W \tau_R + 4 b^2 m_W r^2 \tau_R + b^2 m_C r^2 \tau_R) \quad (1.35)$$

$$\dot{\phi}_L = \frac{1}{2 b^2 m_C r^4 m_W + b^2 m_C r^2 I_W + 2 b^2 m_W^2 r^4 + 4 b^2 m_W r^2 I_W + 2 b^2 I_W^2 + 2 I_C r^4 m_C + 4 I_C r^4 m_W + 4 I_C r^2 I_W} (b^2 m_C r^2 \tau_L - b^2 m_C r^2 \tau_R + 4 b^2 m_W r^2 \tau_L + 4 b^2 I_W \tau_L + 4 I_C r^2 \tau_L + 4 I_C r^2 \tau_R) \quad (1.36)$$

Son olarak robot dinamik denklemlerine motor dinamik denklemlerini de ekleyebiliriz. Bu amaçla öncelikle robot üzerinde kullanılan doğru akım motorları modellenmelidir.



Şekil 1.21 : Doğru akım motor modeli

$$u = R_{ARM} i + L_{ARM} \frac{di}{dt} + K_{EMF} \varphi \quad (1.37)$$

Doğru akım motoru modeli matematiksel modeli, denklem (1.37)de verilmiştir. Bu denklem vasıtasıyla her iki motora ait denklemler tekrar yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} i_R(t) = \dot{i}_R = \frac{u_R - K_{EMF} \varphi_R - R_{ARM} i_R}{L_{ARM}} \quad (1.38)$$

$$\frac{d}{dt} i_L(t) = \dot{i}_L = \frac{u_L - K_{EMF} \varphi_L - R_{ARM} i_L}{L_{ARM}} \quad (1.39)$$

Mobil robot dinamik denklemleri vasıtasıyla, robot hareket sağlayıcıları olan motorlara ait hızlar, tork değerleri ve bu tork değerleri için gerekli motor akımlarına

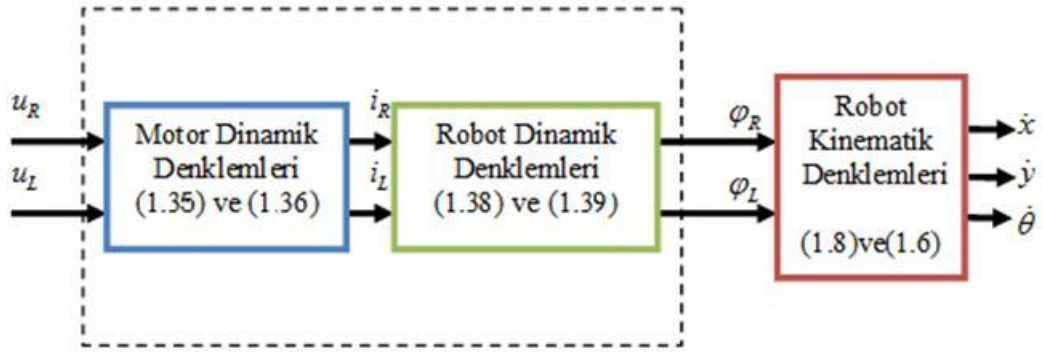
ait denklemler üretilebilir. Uygulanan torklar, motor tork sabitleri ile akımlarının çarpımları vasıtasıyla bulunur.

$$\begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_M i_R \\ K_M i_L \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

$$\dot{\varphi}_R = \frac{1}{2} \frac{(4I_C r^2 \tau_L + 4I_C r^2 \tau_R - b^2 m_C r^2 \tau_L + 4I_W b^2 \tau_R + 4m_W r^2 b^2 \tau_R + b^2 m_C r^2 \tau_R)}{(b^2 m_C r^4 m_W + b^2 m_C r^2 I_W + 2b^2 m_W^2 r^4 + 4b^2 m_W r^2 I_W + 2b^2 I_W^2 + 2I_C r^4 m_C + 4I_C r^4 m_W + 4I_C r^2 I_W)} \quad (1.41)$$

$$\dot{\varphi}_L = \frac{1}{2} \frac{(r^2 b^2 m_C \tau_L - r^2 b^2 m_C \tau_R + 4r^2 b^2 m_W \tau_L + 4b^2 I_W \tau_L + 4I_C r^2 \tau_L + 4I_C r^2 \tau_R)}{(b^2 m_C r^4 m_W + b^2 m_C r^2 I_W + 2b^2 m_W^2 r^4 + 4b^2 m_W r^2 I_W + 2b^2 I_W^2 + 2I_C r^4 m_C + 4I_C r^4 m_W + 4I_C r^2 I_W)} \quad (1.42)$$

Öncelikle denklem (1.38) ve (1.39) deki akım denklemleri çözülerek sağ ve sol motorlardaki akımlar ve torklar elde edilir. Daha sonra denklem (1.41) ve (1.42)'da bu değerler kullanılarak sağ ve sol tekerlek hızları elde edilir. Şekil 1.22'de dinamik denklemlerin nasıl ele alındığını göstermektedir.



Şekil 1.22 : Robot dinamik modelinin çözümü

### 1.2.1. Dinamik model deneysel sonuçları

Mobil robota ait dinamik yapıdan bahsederken, hareket sağlayıcıları olan motorların robot dinamik denklemlerinin MATLAB ortamında benzetimleri yapılabilir. Şekil 1.23'de MATLAB ortamında gerçekleştirilen yazılım verilmiştir. Benzetim yapılabilmesi için robota ait sabitler ve robotun başlangıç durumları belirlenmelidir. Robota ait sabitler Tablo-1 de verilmişlerdi. Robot başlangıç durumları ise; her iki motora ait akımlar, motorlara ait açısal hızlar, robotun konumunun ve yöneliminin sıfır olduğu kabul edilir. Başlangıç değerleri sıfır olarak kabul edildikten sonra motorlara uygulanacak gerilimler sırasıyla denklemlere uygulanır. Şekil 1.24'de

motorlara uygulanan giriş gerilimleri gösterilmektedir. Uygulanan gerilimler sonrası oluşan tekerlek hızları ise Şekil 1.25’de verilmiştir. Şekil 1.26 robotun çizgisel hızı, Şekil 1.27 robotun yönelim açısını ve Şekil 1.29 uygulanan gerilimler sonrası elde edilen toplam yer değiştirmeyi göstermektedir.

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlarla benzetim sonuçları arasında farklılıklar oluşmuştur. Bu farklılıkların oluşma sebeplerinden ilki; robotlara ait dinamik denklemlerde kullanılan sabitlerin her iki motorda farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda robot denklemleri çıkartılırken yapılmış olan kabullerden bazıları deney sırasında korunamadığı görülmüştür. Bu kabuller, robotun hareket sırasında kaymaması veya robot tekerleklerinin yerle yaptıkları temas noktalarının değişkenliğindedir.

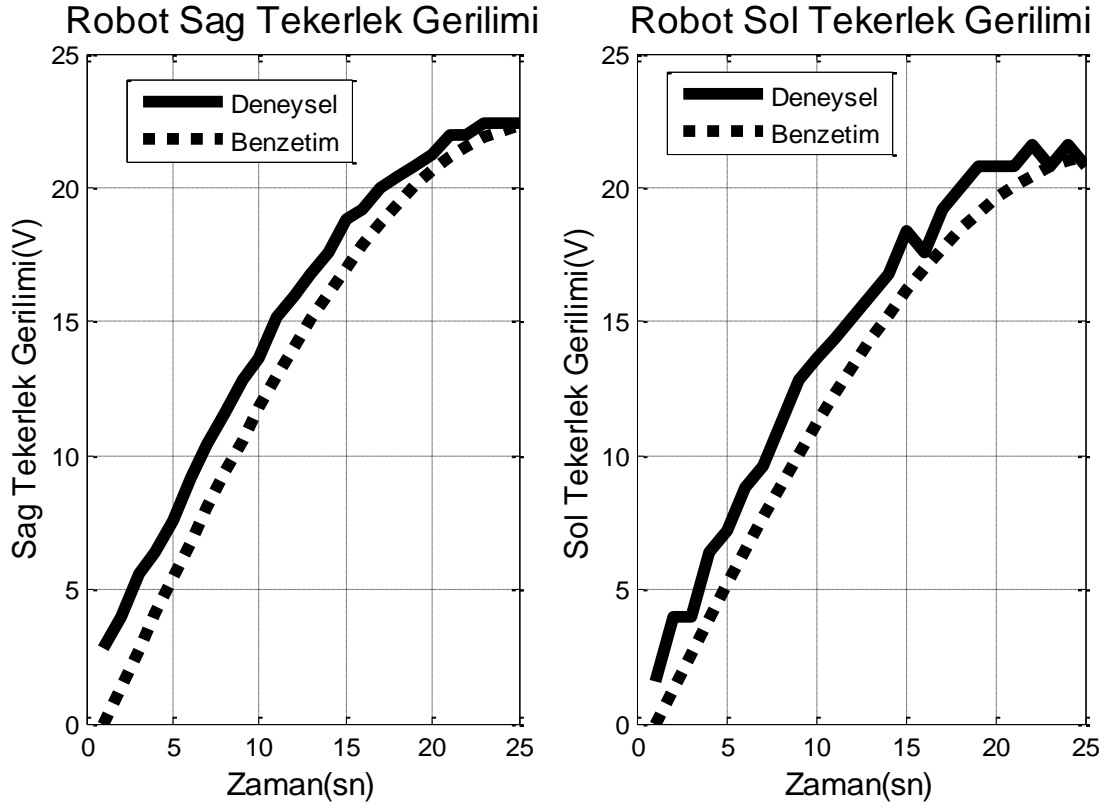
```

clear all;
clc;
Ra=2.49;%motor armatur direnci
La=2.63;%motor armatur enduktansi
Kemf=0.0458;%motor ters emk sabiti
KMotor=0.0458;%motor
r=0.181;%tekerlek yarıçapı
b=0.454;%tekerlekler arası mesafe
mw=2;%tekerlek ağırlığı
mc=30;%robot ağırlığı
Iw=0.000071;%tekerlek eylemsizlik moment sabiti
Ic=0.15625;%robot eylemsizlik moment sabiti
iL=0;%sol motor akım başlangıç değeri
iR=0;%sağ motor akım başlangıç değeri
wL=0;%sol motor acisal hızı başlangıç değeri
wR=0;%sağ motor acisal hızı başlangıç değeri
v=0;%robot çizgisel hızı başlangıç değeri
w=0;%robot acisal hızı başlangıç değeri
x=0;%kartezyen koordinatlarda robotun x eksenindeki başlangıç konumu
y=0;%kartezyen koordinatlarda robotun y eksenindeki başlangıç konumu
q=0;%kartezyen koordinatlarda x eksenine göre robotun yönelim açısı
başlangıç değeri
uL=12*sin(0:0.1:2*pi);%robot sol tekerlek motoruna uygulanan gerilimler
uR=12*sin(0.01:0.1:2*pi+0.01);%robot sağ tekerlek motoruna uygulanan
gerilimler
for indx=1:length(uR)
    diR = -(Ra*iR(indx)-uR(indx)+Kemf*wR(indx))/La;%denklem (1.32)
    diL = -(Ra*iL(indx)-uL(indx)+Kemf*wL(indx))/La;%denklem (1.31)
    iR(indx+1)=iR(indx)+diR;
    iL(indx+1)=iL(indx)+diL;
    tauR(indx) = KMotor*iR(indx);%denklem (1.35)
    tauL(indx) = KMotor*iL(indx);%denklem (1.34)
    %denklem (1.36)
    dwR = 0.5*(4*Ic*r^2*tauL(indx)+4*Ic*r^2*tauR(indx)-
b^2*mc*r^2*tauL(indx)+4*Iw*b^2*tauR(indx)+4*mw*r^2*b^2*tauR(indx)+b^2*mc*r^
2*tauR(indx))/(b^2*mc*r^4*mw+b^2*mc*r^2*Iw+2*b^2*mw^2*r^4+4*b^2*mw*r^2*Iw+2
*b^2*Iw^2+2*Ic*r^4*mc+4*Ic*r^4*mw+4*Ic*r^2*Iw);
    %denklem (1.37)
    dwL = 0.5*(b^2*mc*r^2*tauL(indx)-
b^2*mc*r^2*tauR(indx)+4*b^2*mw*r^2*tauL(indx)+4*b^2*Iw*tauL(indx)+4*Ic*r^2*
tauL(indx)+4*Ic*r^2*tauR(indx))/(b^2*mc*r^4*mw+b^2*mc*r^2*Iw+2*b^2*mw^2*r^4
+4*b^2*mw*r^2*Iw+2*b^2*Iw^2+2*Ic*r^4*mc+4*Ic*r^4*mw+4*Ic*r^2*Iw);
    %acisal tekerlek ivmelerinden acisal hızların elde edilmesi
    wR(indx+1)=wR(indx)+dwR;
    wL(indx+1)=wL(indx)+dwL;
    %acisal tekerlek hızlarından robot acisal ve çizgisel hızlarının elde
    edilmesi
    v(indx)=r*(wR(indx)+wL(indx))/2;
    w(indx)=r*(wR(indx)-wL(indx))/b;
    %robot acisal hız değerinden robotun yönelim açısının hesaplanması
    q(indx+1)=q(indx)+w(indx);
    %robot yönelim açısından kartezyen koordinatlardaki eksenel hızların
    bulunması
    vx(indx)=v(indx)*cos(q(indx));
    vy(indx)=v(indx)*sin(q(indx));
    %robot eksenel hızlarından, kartezyen koordinatlardaki eksenel yer
    degistirmelerin bulunması
    x(indx+1)=x(indx)+vx(indx);
    y(indx+1)=y(indx)+vy(indx);
end

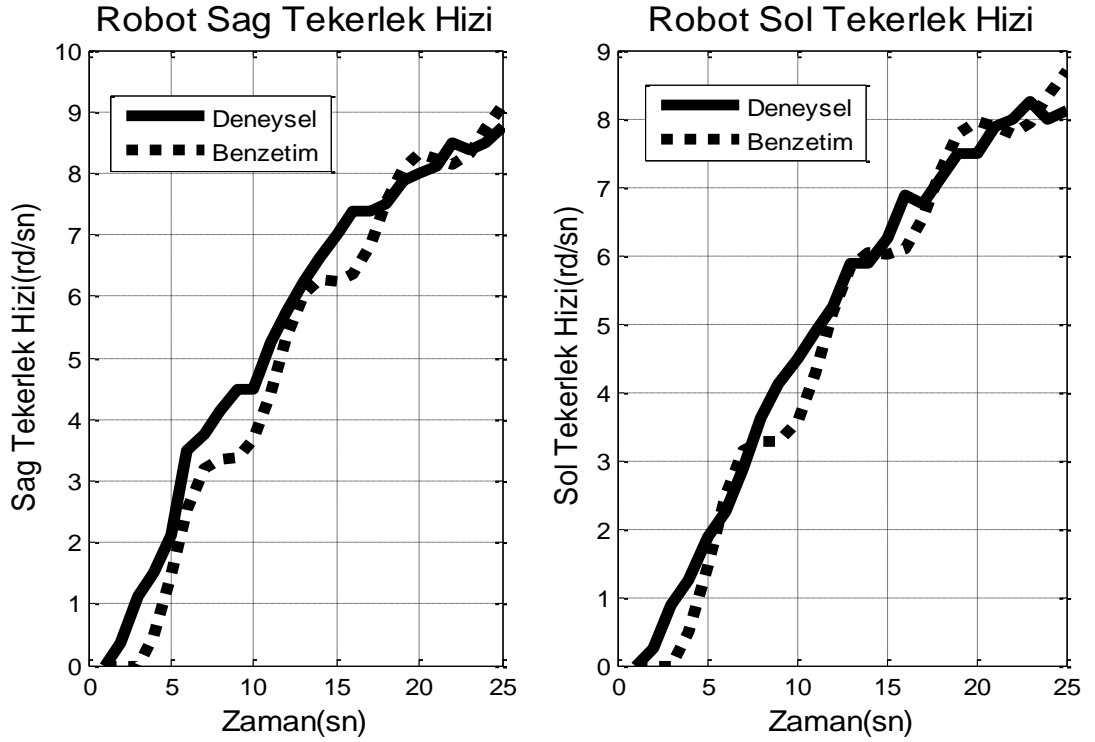
```

Şekil 1.23 : Robot dinamik denklemlerinin MATLAB benzetiminde kullanılan kod

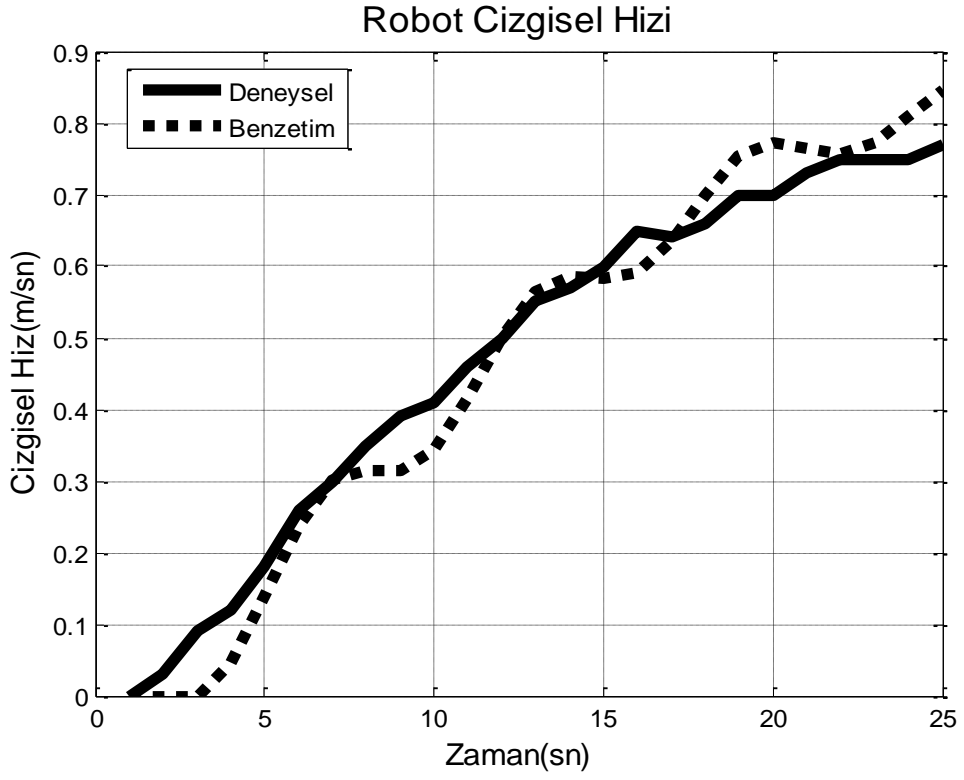




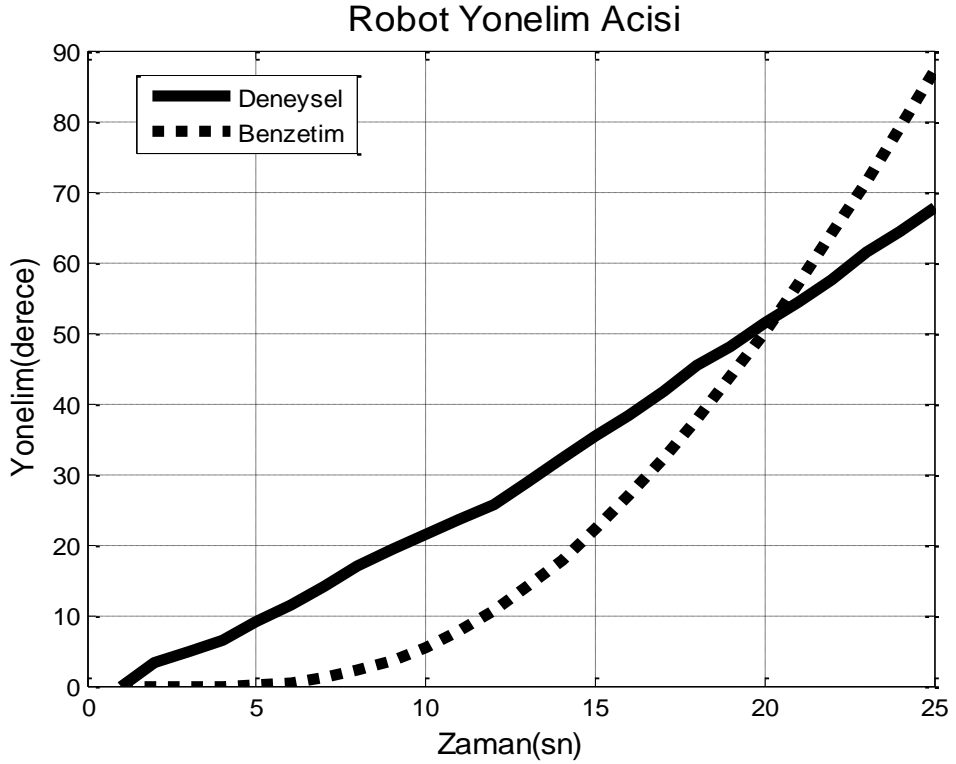
Şekil 1.24 : Motorlara uygulanan gerilimler ve benzetim değerleri



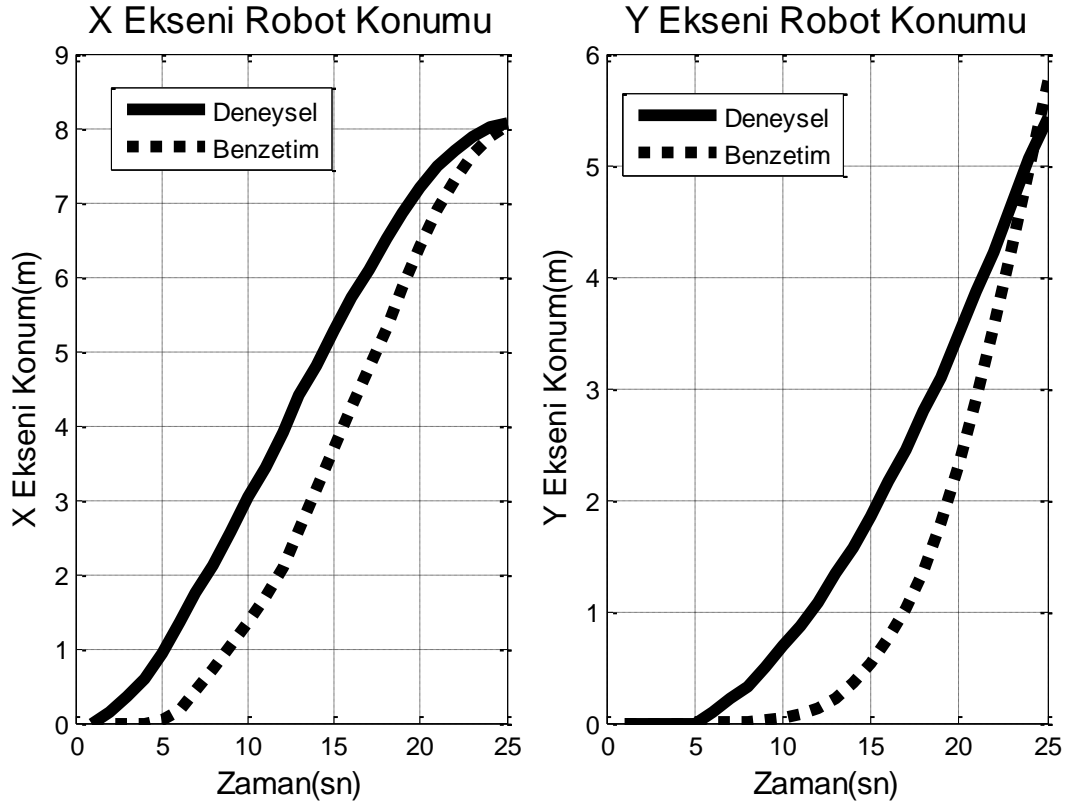
Şekil 1.25 : Motor tekerlerindeki açısai hızlar



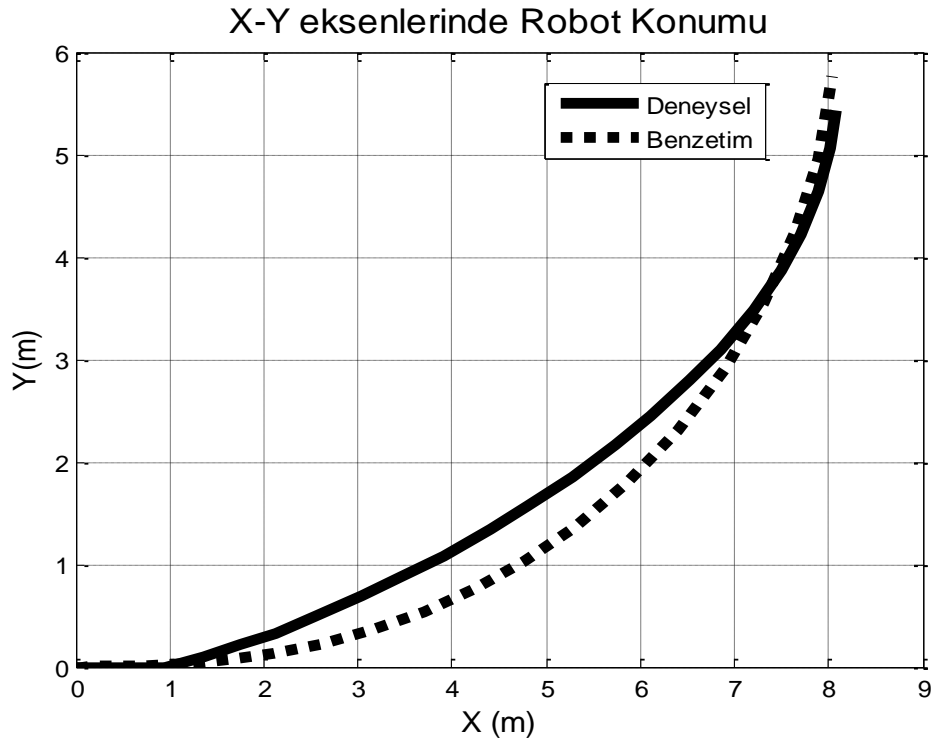
Şekil 1.26 : Robotun çizgisel hızı.



Şekil 1.27: Kartezyen koordinatlarda Robotun yonelim açısı



Şekil 1.28: Robotun Kartezyen koordinatlarda zamana bağlı yer değıştirmesi



Şekil 1.29: Robot motorlarına uygulanan gerilimler sonucu elde edilen yer değıştirme

#### **1.4.Robot Konum ve Yörünge Kontrolü**

Tanımlanan konuma ulaşması isten mobil robot için kontrol sistemleri tasarlanmalıdır.

Chen Wuwei ve arkadaşları, otomatik güdümlü araçlar için, bir yay üzerinde aday noktaları bulma tabanlı gezinim yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem karmaşık ve hareketli ortamlarda basit ve verimli bir gezinim sağlamaktadır [3].

F.Diaz del Rio ve arkadaşları, farksal gezgin robotlar için, neredeyse her türlü hareket planlarında uygulanabilecek yeni bir yüksek verimli yol takibi kontrol yöntemi geliştirmişlerdir [4].

Prado, M (2008) ve diğerleri, sabit ortamlarda veya hareketli engellerin bulunduğu ortamlarda gezgin robotlar için mekân içerisinde en iyi zaman-hız profili sunabilecek bir yöntem sunmuşlardır [5].

R. Rajagopalan ve N. Barakat(1997), tekerlekli gezgin robotlarda kartezyen hız kontrolü için tork kontrol hesabı geliştirmişlerdir. Tork kontrolü ile çalışma ortamı ve robot dinamiklerinin değişimine karşın, istenilen yörüngede ve hızda hareket edebilen robot uygulaması gerçekleştirilmiştir [6].

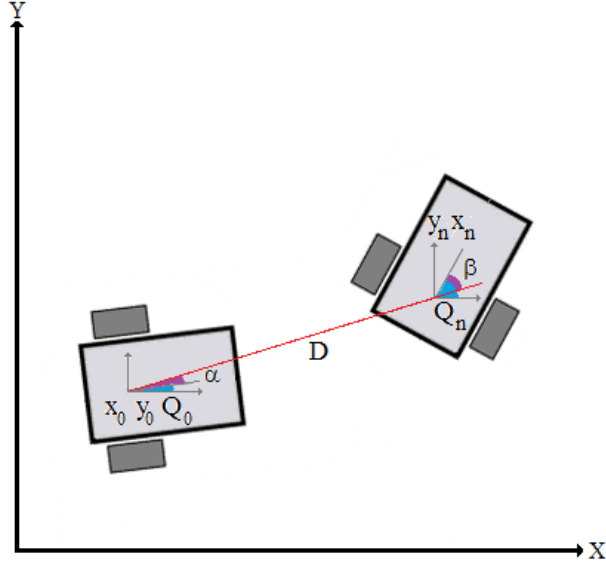
J. Miyata ve T. Murakami(2007), gezgin robotlar için, hareketli nesnelere gibi köşelere sahip engeller içerisinde yol planlama amacıyla akış modeli tabanlı yörünge planlama geliştirmişlerdir. Yörünge planlama, hız hesaplama ve yol belirlenmesi amacıyla, geçiş noktaları tespitleri yapılmış, akış modeli çeşitli ortam değişikliğine rağmen gezgin robot kontrolünde işlem yükünü arttırmamıştır [7].

Yapılan bu çalışmalar mobil robotların çevresel faktörler ile hareket kabiliyetlerinin sınırlandırıldığı ortamlarda hareket planlamasının farklı uygulamalarını göstermektedir

##### **1.4.1.Robot konum kontrolü**

Mobil robot hareket denklemlerinin bulunması sonrasında, robotun istenilen konuma getirilmesi için gerekli konum denklemleri hesaplanmalıdır. Bu denklemler, ileri ve

ters kinematik denklemleri vasıtasıyla, robotun gitmesi istenilen konumu ile başlangıç konumu arasındaki farklar vasıtasıyla bulunur. Bu farklar sonucu hız denklemleri elde edilebilir. Robot çizgisel hızı; robotun çizgisel olarak alması gereken yoldan, robot açısal hızı ise; robotun son durumda olması istenilen yönelim açısı ve başlangıç yönelim açısı farkları ile bulunur.



Şekil 1.30 : Robot konum değişimi.

Kartezyen koordinatlarda  $x_0$   $y_0$   $\theta_0$  konumundaki robot,  $x_n$   $y_n$   $\theta_n$  koordinatlarına hareket etmesi istenildiği durumda robot çizgisel ve açısal hızları (1.43) ve (1.44) denklemleriyle hesaplanır.

$$v = k_D D \quad (1.43)$$

$$w = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \quad (1.44)$$

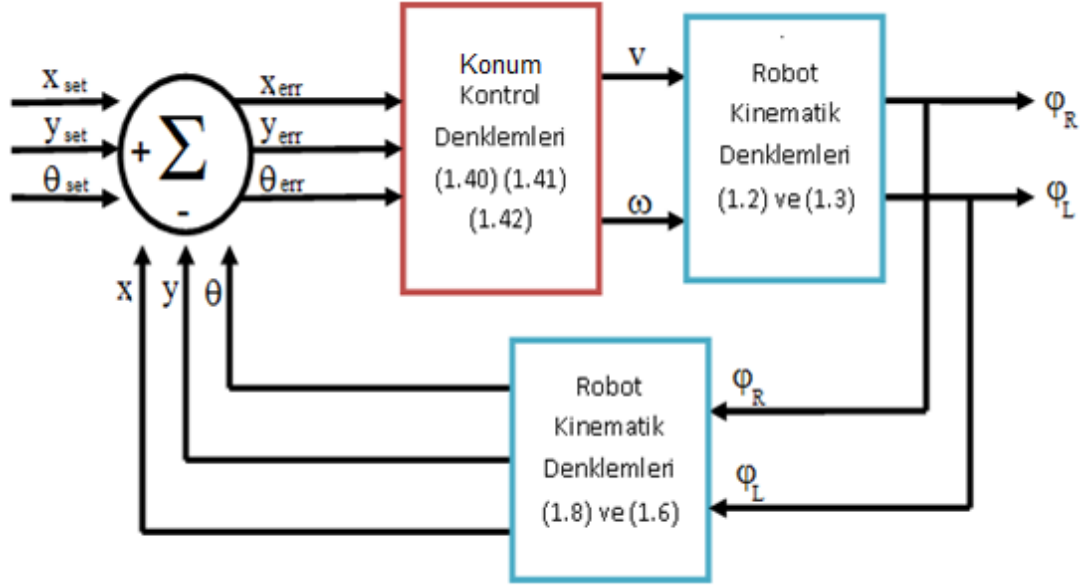
Burada Şekil 1.31 den de görüleceği üzere,  $D$  başlangıç noktası ile varılması istenen nokta arasındaki uzaklığı,  $\alpha$  anlık yönelim açısı ile robotun gitmesi istenilen doğrultu arasındaki açısal farkı ve  $\beta$  ise anlık yönelim açısı ile varılması istenilen açısal durum arasındaki farklılıkları gösterir. Aşağıdaki denklemlerde bu büyüklükler hesaplanır.

$$D = \sqrt{(x_n - x(t))^2 + (y_n - y(t))^2} \quad (1.45)$$

$$\alpha = \arctan 2(y_n - y(t), x_n - x(t)) \quad (1.46)$$

$$\beta = \theta_n - \theta(t) \quad (1.47)$$

Bulunan hız değerleri (1.2) ve (1.3) denklemleri vasıtasıyla tekerlek hızlarına dönüştürülür ve robota uygulanır.



Şekil 1.31: Robot konum kontrolü şeması

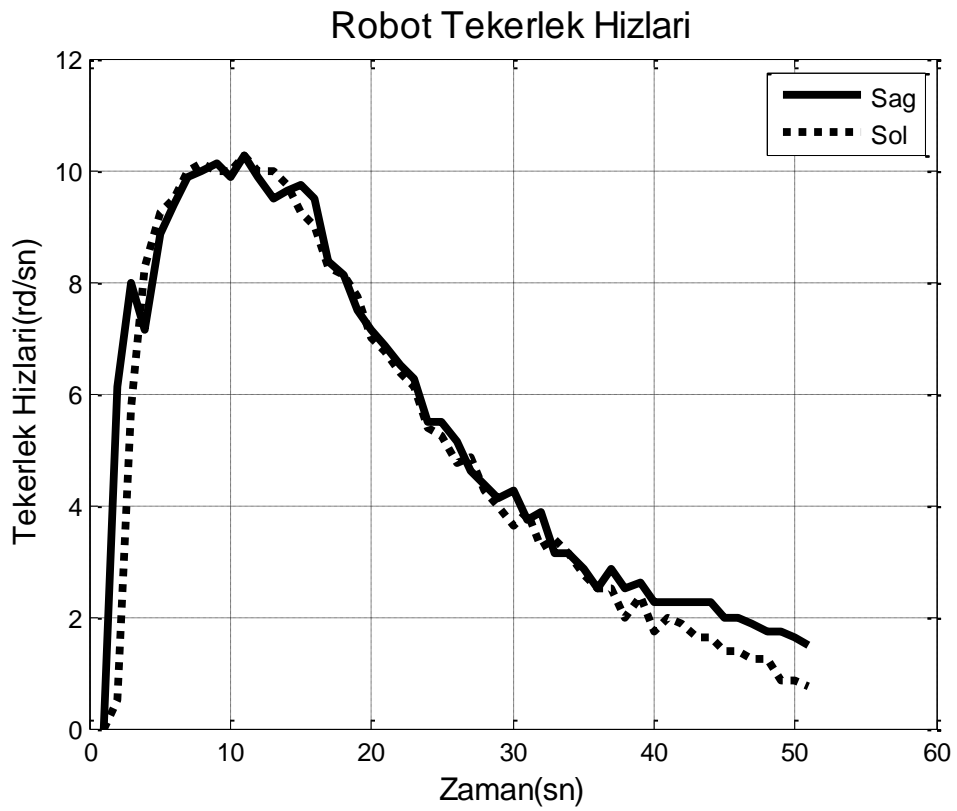
Şekil 1.31’de robot konum kontrolü şemasında görüldüğü üzere referans konum değerleri ile robotun anlık konumu arasındaki fark, konum kontrol denklemleri vasıtasıyla açısal ve çizgisel hızları üretilmektedir. Sonrasında bu hızlar kinematik denklemleri vasıtasıyla tekerlek hızlarına dönüştürülür. Anlık tekerlek hızları kinematik denklemler vasıtasıyla anlık konuma çevrilir ve bu konum ile referans konumlar karşılaştırılarak referans noktaya robotun hareketi sağlanır.

#### 1.4.2. Robot yörünge kontrolü deneysel sonuçlar

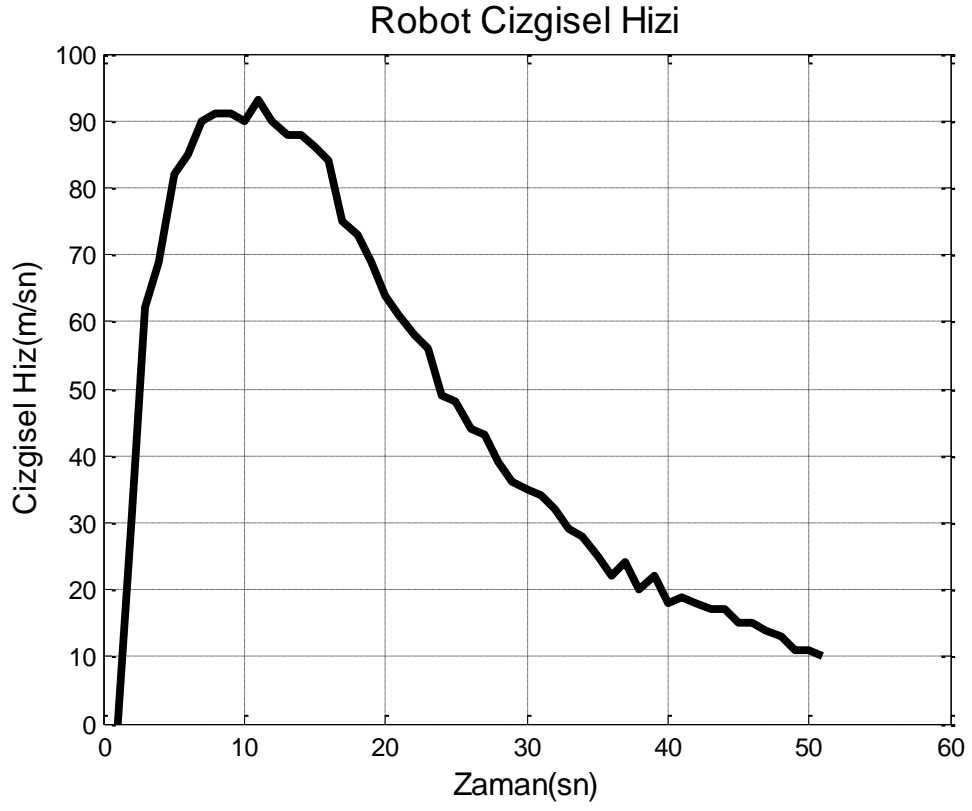
Mobil robot konum kontrolü sırasında, robot konumu gerçek zamanlı olarak ölçülür ve anlık konum ile varılmak istenen konum arasındaki farka bağlı olarak gerekli hızlar hesaplanır. Bu amaçla yukarıdaki kontrol sistemi tasarlanmış ve gerçek zamanlı olarak robota uygulanmıştır. Referans konumlar verilerek yaptığı hareket incelenmiştir. Robot konum kontrolü  $\{x=0, y=0, \theta=0^\circ\}$  başlangıç noktasından,  $\{x=10m, y=10m, \theta=45^\circ\}$  konumuna hareket etmesi için denenmiştir. Bu uygulama sırasında, kontrol denklemlerinde çizgisel hız denklemi olan (1.43)’ de  $k_D$

ve açısız hız denklemi (1.44)'da bulunan  $k_\alpha$  ,  $k_\beta$  farklı değerler ile denenmiş ve hızlanma eğrisi için uygun bir değer seçilmiştir. Bu seçimler sonrasında robot yaklaşık olarak istenilen konuma hareket etmiştir.

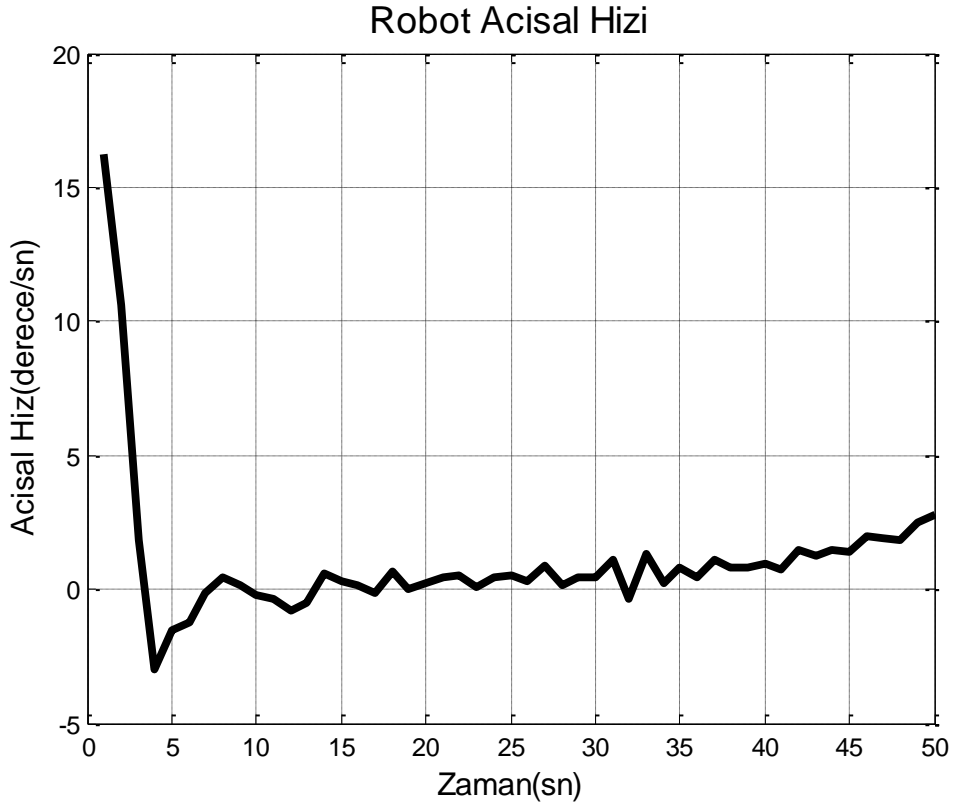
Şekil 1.32'de konum kontrolü sırasında elde edilen tekerlek hızları göstermektedir. Robotun konum kontrolü sırasında elde edilen çizgisel hızı Şekil 1.33'de ve Şekil 1.34' de ise robotun bu açısız hızı gösterilmektedir. Şekil 1.35' de konum kontrolü esnasında oluşan yönelim verilmiştir. Şekil 1.37'de ise hareket edilmesi istenilen referans noktası ile robotun aldığı yol karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.32: Konum kontrolü için elde edilen tekerlek hızları

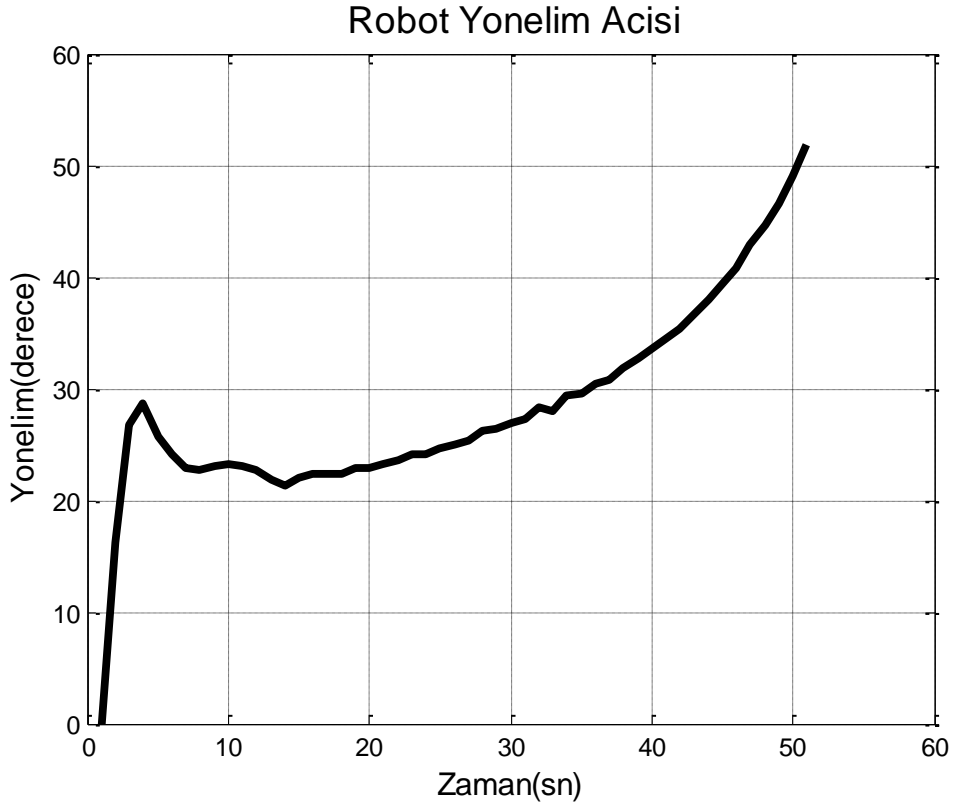


Şekil 1.33 : Konum kontrolü için elde edilen robot çizgisel hızı

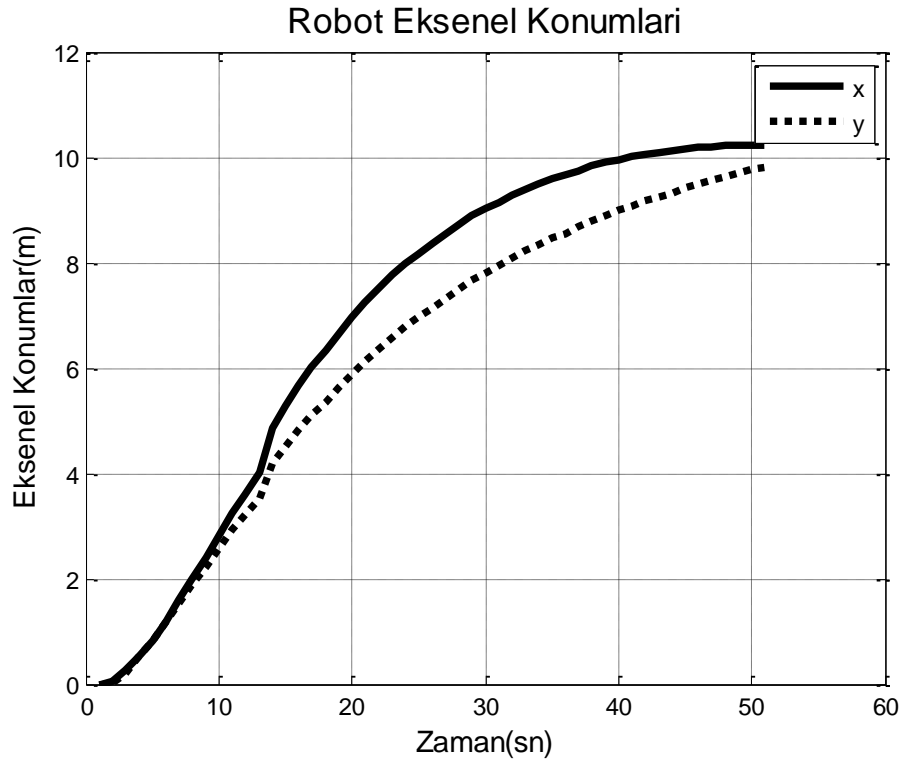


Şekil 1.34: Konum kontrolü sırasında oluşan robot açısal hızı

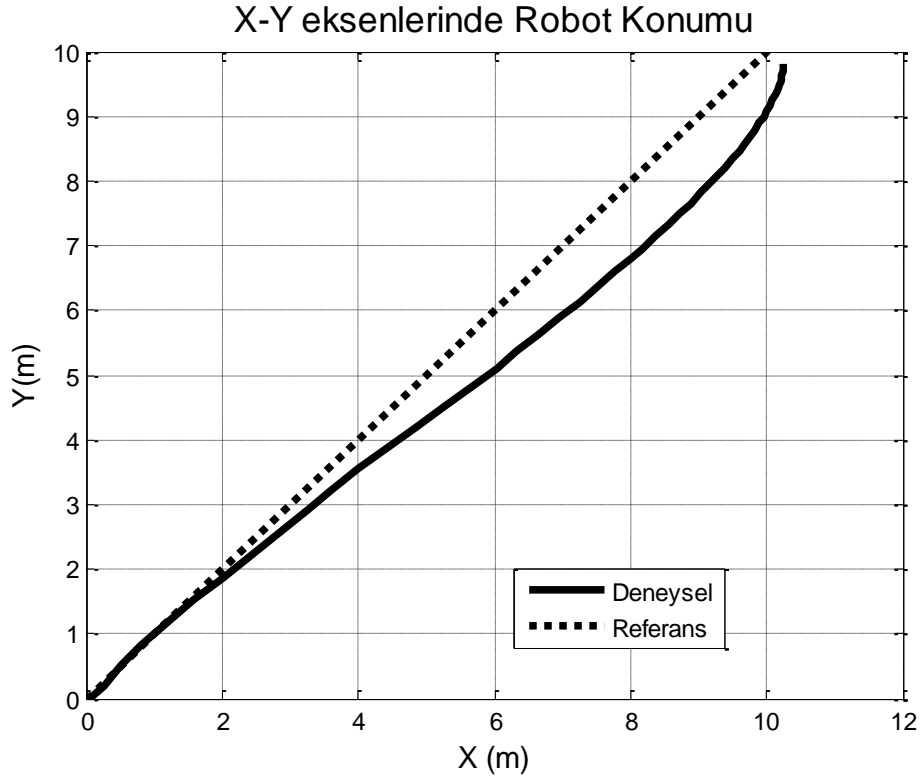




Şekil 1.35 : Konum kontrolü sırasında robot yönelimi



Şekil 1.36 : Konum kontrolü için X ve Y eksenleri yer değiştirmeleri



Şekil 1.37 : Konum kontrolü sırasında elde edilen yer değiştirme

### 1.4.3. Robot yörünge kontrolü

Robotun zamanla konum kontrolünde, robotun gitmesi istenen nokta belirtilir. Robotun en kısa yoldan bu noktaya gitmesi beklenir. Oysa yörünge kontrolünde bu noktaya giderken zamana bağlı olarak hangi noktalardan geçmesi gerektiği ve bu noktalardan geçerken hangi hızlara sahip olması gerektiği belirtilir. Robot hareket etmesi istenilen nokta için hareket eğrisi tanımlanabilir ve bu eğrinin türevi ile hız denklemi elde edilebilir. Zamana bağlı konum için,

$$P(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (1.48)$$

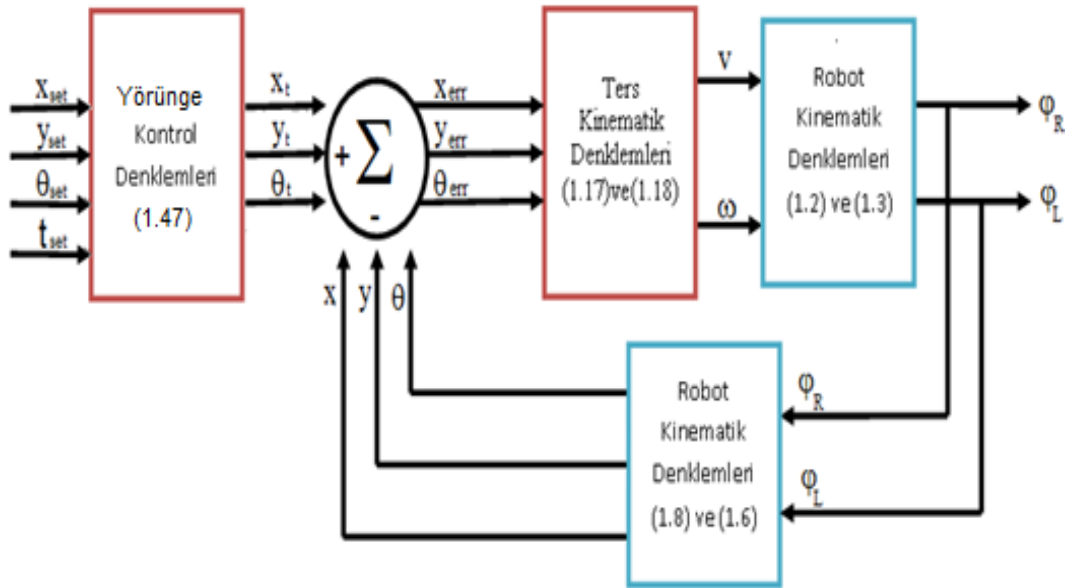
şeklinde üçüncü dereceden bir polinom seçilebilir. Zamana bağlı hız fonksiyonu ise bu durumda, konumun türevi olarak

$$\dot{P}(t) = V(t) = b + 2ct + 3dt^2 \quad (1.49)$$

şeklinde yazılabilir. Hareket başlangıç ve bitiş anında hızların  $V(t_0)=0$  ,  $V(t_s)=0$  ve konumların  $P(t_0)=P_0$  ,  $P(t_s)=P_s$  olması durumunda polinom katsayıları  $a=P_0$  ,  $b=0$  ,  $c=\frac{3}{t_s^2}(P_s-P_0)$  ,  $d=-\frac{2}{t_s^3}(P_s-P_0)$  şeklinde bulunur.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \frac{3}{t_s^2}(x_s-x_0)t - \frac{2}{t_s^3}(x_s-x_0)t^2 \\ \dot{y}(t) &= \frac{3}{t_s^2}(y_s-y_0)t - \frac{2}{t_s^3}(y_s-y_0)t^2 \\ \dot{\theta}(t) &= \frac{3}{t_s^2}(\theta_s-\theta_0)t - \frac{2}{t_s^3}(\theta_s-\theta_0)t^2 \\ \theta(t) &= \theta_0 + \frac{3}{t_s^2}(\theta_s-\theta_0)t^2 - \frac{2}{t_s^3}(\theta_s-\theta_0)t^3\end{aligned}\tag{1.50}$$

Şekil 1.38' de verilen yörünge planlama kontrolü şemasında görüldüğü üzere referanslar konum yörünge kontrol denklemleri ile zamana bağlı olarak üretilir. Bu referans konumlar sonrasında anlık robot konumu ile karşılaştırılarak farkları alınır. Elde edilen farklar sonrasında ters kinematik denklemleri robotun açısal ve çizgisel hızlarını üretir. Bu hızlar kinematik denklemleri ile tekerlek hızlarına çevrilir ve referans noktalarına karşılık tekerlek hızları üretilmiş olur.



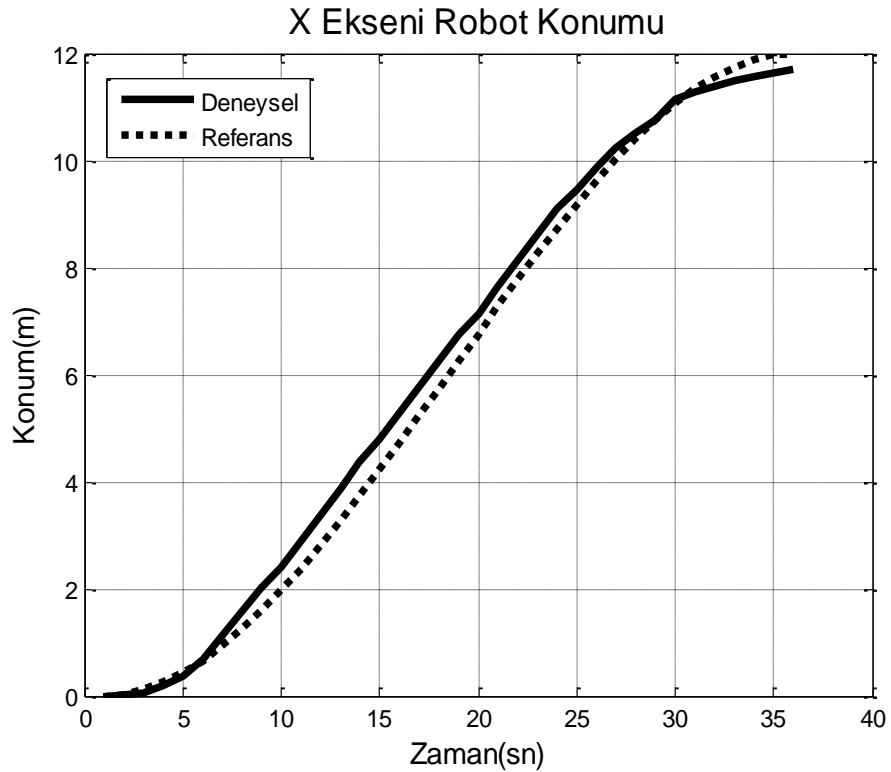
Şekil 1.38 : Yörünge planlama kontrol şeması

#### 1.4.4.Robot yörünge kontrolü deneysel sonuçları

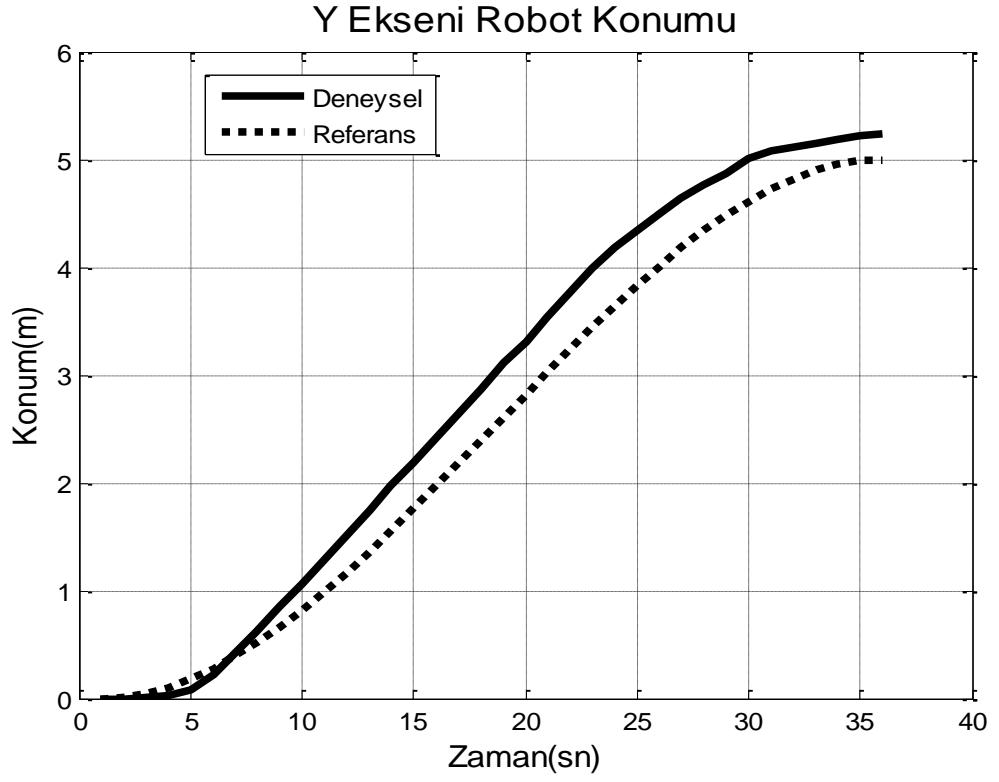
Robot hareketi için istenen hız değerleri belirli bir zaman aralığı için (1.50) denklemlerinden bulunabilir. Ulaşılmak istenen nokta için hesaplanan motor hızları robota uygulanır ve hareket edilen konum tespit edilir. Denklem (1.50) ile elde edilen hız bilgileri denklem (1.17) ve (1.18)'e uygulanır ve motor hızları elde edilir. Sonrasında robotun gerçek konumu ile anlık olması gereken konumu arasındaki fark ile tekrar yeni hız değeri tespit edilip robota uygulanır.

Robot, X ekseninde 12m ve Y ekseninde 5m hareket etmesi için robot yörünge planlaması test edilmiş ve PID kontrolörü vasıtasıyla robot istenilen yolda hareket etmesi denenmiştir.

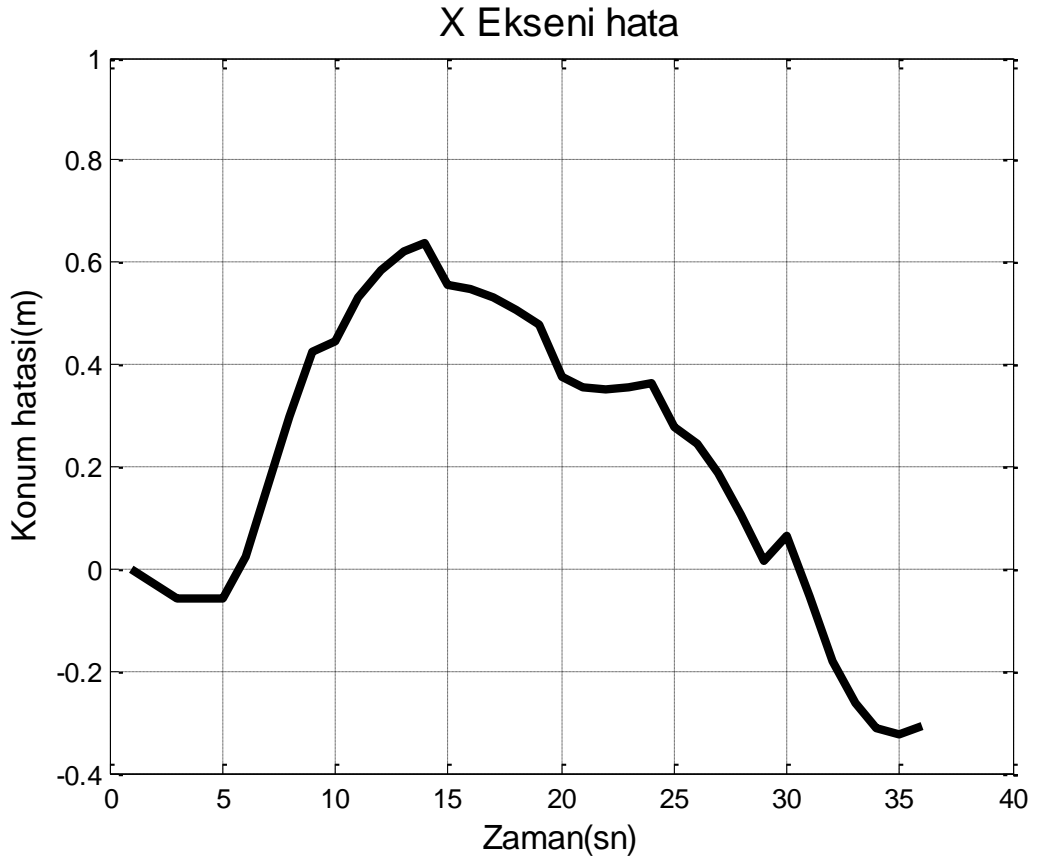
Yapılan deney sonucunda, Şekil 1.39 de görülen X eksenı boyunca alınan yol ve Şekil 1.40'de görülen Y eksenı boyunca alınan yol sonucunda Şekil 1.41'da görülen X eksenindeki hata ve Şekil 1.42'de görülen Y eksenı hatası elde edilmiştir. Şekil 1.43'de görülen X-Y konumlarında yörünge tanımlanan robot içi, Şekil 1.44'deki motor hızları elde edilmiştir.



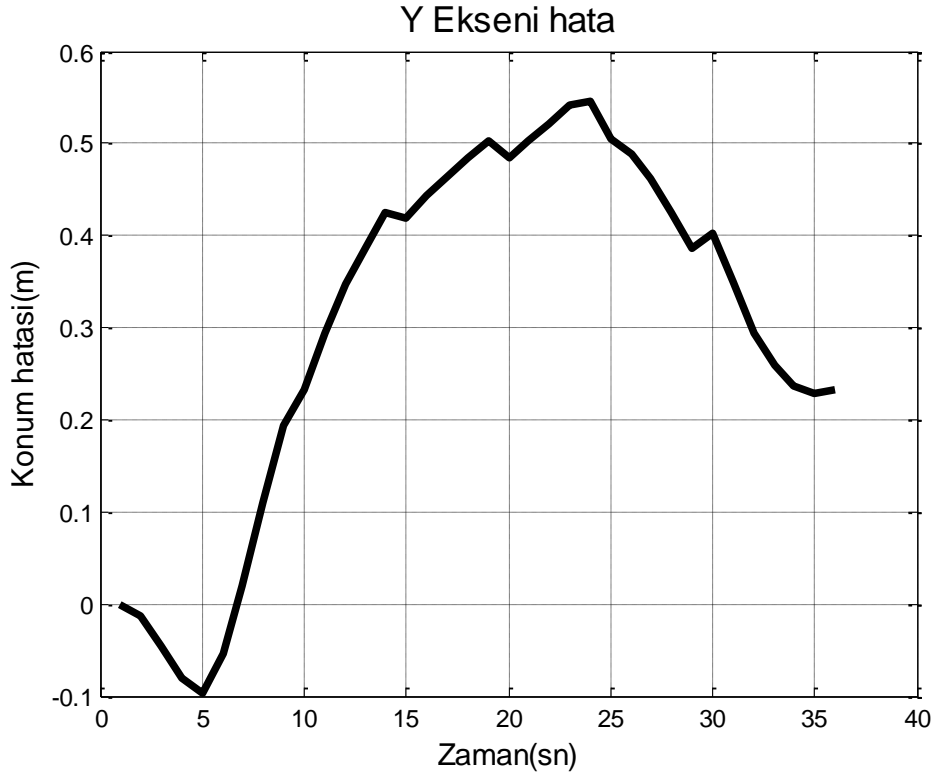
Şekil 1.39 : Robot X eksenı konumu



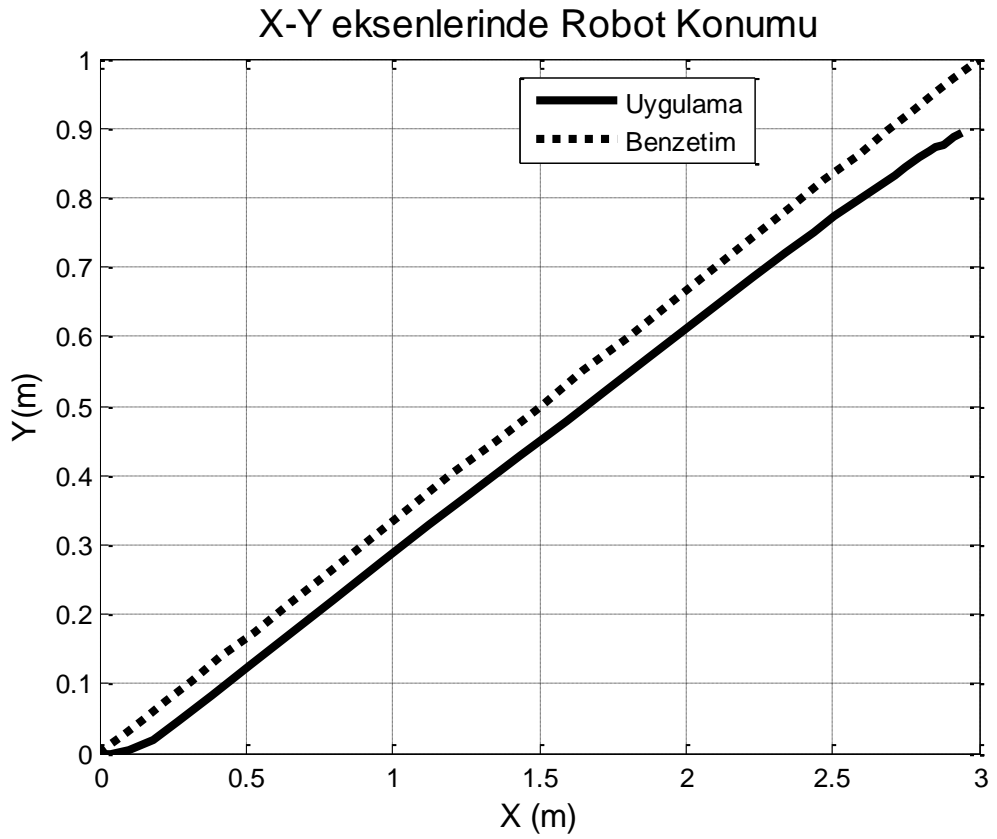
Şekil 1.40 : Robot Y eksenini konumu



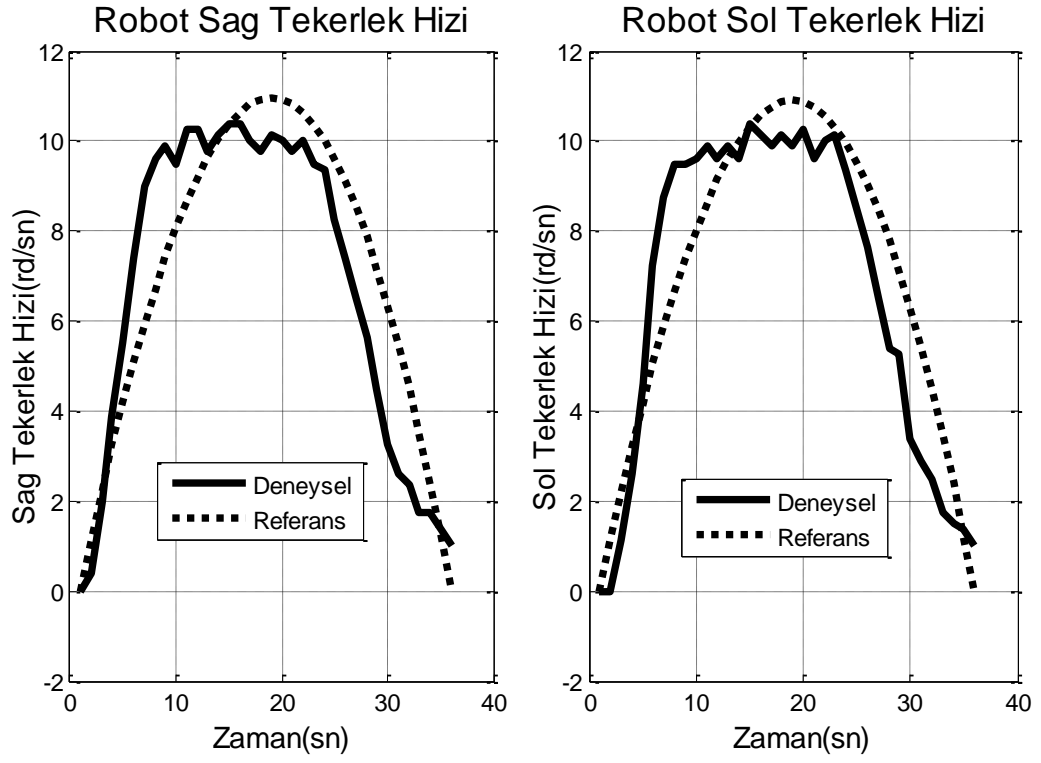
Şekil 1.41 : Robot X eksenini hatası



Şekil 1.42 : Robot Y eksenine hatası



Şekil 1.43 : X ve Y eksenlerinde Robot konumu ve benzetimi



Şekil 1.44 : Yörünge kontrolü sırasında elde edilen motor hızları

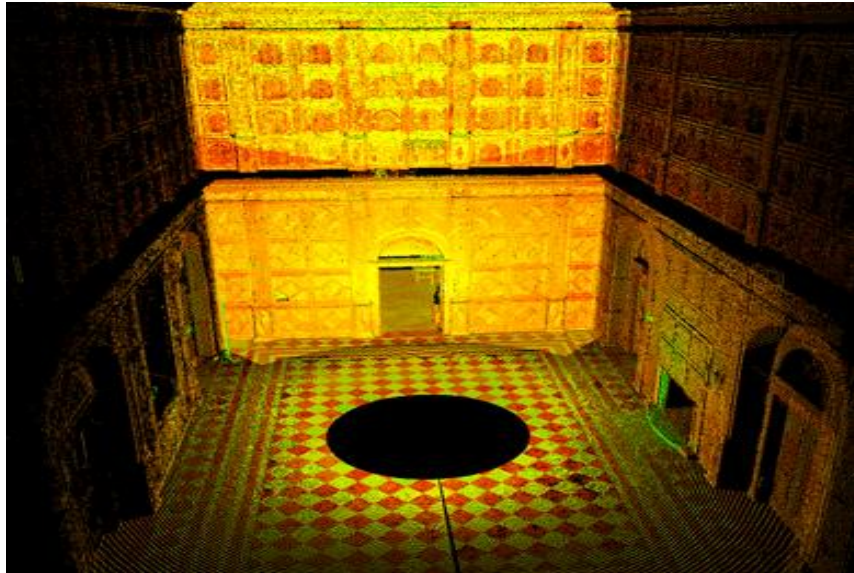
## 2.ÜÇ BOYUTLU GÖRÜNTÜLEME

### 2.1.Üç Boyutlu Görüntüleme Türleri ve Amaçları

Modelleme, inceleme ve tespitlerde bulunabilmek her türlü nesnenin bilgisayar ortamında saklanması gerekebilir. Nesnelerin içerikleri, konumları ve ebatları için farklı uygulamalar ve ihtiyaçlar söz konusudur. Örnek olarak, anne karnındaki bebeğin gelişimi hareketi gibi görüntüleri ile veya oda içerisindeki nesnelerin konumlarının kayıt altına alınması amacıyla yapılan üç boyutlu görüntüleme uygulamalardan bahsedilebilir.

Tıbbi uygulamalarda, Manyetik Rezonans Tomografisi ve X-Ray tomografisi gibi uygulamalar klasik uygulamalardan sayılabilir.

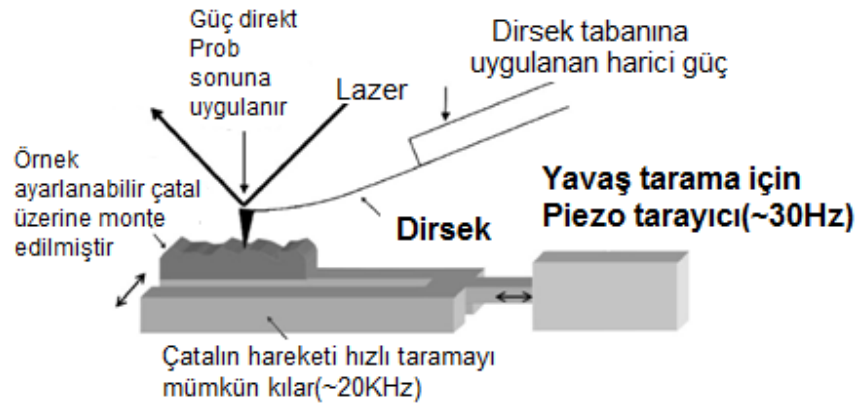
Üç boyutlu görüntüleme medikal alanlarda olduğu gibi, mühendislik uygulamalarında da her geçen gün artan ihtiyaç konusu olmuştur. Kapalı veya açık mekanların ölçülendirilip bilgisayar ortamında incelenmesi için Şekil 2.1'deki gibi lazer ölçüm sistemleri mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.



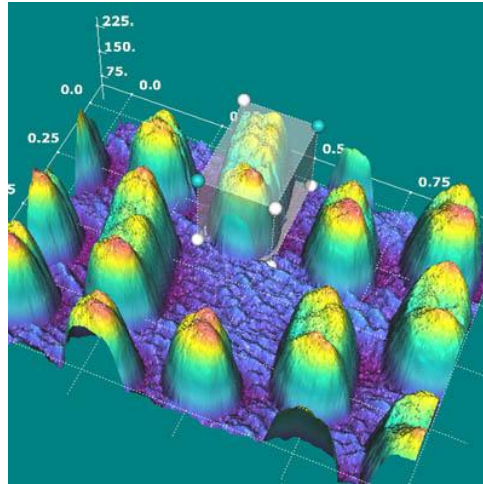
Şekil 2.1 : Lazer tarayıcı vasıtası ile görüntülenmiş bina içi [8]



Üç boyutlu görüntüleme yöntemleri, yüzey görüntüleme ve kapalı alanlardaki farklılıkları görüntüleme olarak iki farklı şekilde ele alınabilir. Yüzey görüntüleme yöntemleri daha çok bir ortamdan yansıyan bilgi vasıtası ile elde edilir. Örnek olarak; lazer ile üç boyutlu görüntüleme (profil çıkartma) bu tip uygulamaların başlıca yöntemlerinden biridir. Genellikle optik yöntemlerin kullanıldığı yüzey görüntülenmesi, yüzey formunun önemli olduğu durumlarda sıkça kullanılır. AFM (Atomik Force Microscope) bu yaklaşımın kullanıldığı bir ölçüm biçimi olarak sıkça kullanılır. Şekil 2.2’ de görülen AFM yapısı, hareket eden bir yüzeye paralel olan bir ucun yansıttığı lazer vasıtasıyla yapılan bir görüntüleme türüdür. Bu yöntem sonucu elde edilmiş CD görüntüsü Şekil 2.3’ de verilmiştir.



Şekil 2.2: AFM Yapısı [9]



Şekil 2.3 : AFM ölçümü ile elde edilen kompakt disk(CD) görüntüsü [10]

Yüzey üzeri görüntülenmesinden farklı olarak yüzey altı görüntülemelerde amaç, özellikle optik olarak ulaşılamayan bölgelerin görüntülenmesidir. Bu tür

görüntülemelerin başlıca uygulaması X-Ray ışınları ile yapılan tıbbi ölçümlerdir. Yüzey altı görüntüleme, yüzeyin içine nüfuz edebilen herhangi bir fiziksel büyüklüğün, ölçülen ortama göre değişen yapısına bakılarak görüntü elde edilebilir. X-Ray ışınları, uygulandıkları ortamdaki daha az geçirgen ve daha çok geçirgen malzemelerin farkını görüntüler. Dolayısıyla bu değişimin izlenmesi ile X-Ray görüntüleme elde edilir. Aynı şekilde günümüzde yaygın olarak bilinen diğer bir görüntülenme yöntemi olan manyetik rezonans ile, vücuttaki ölçülmek istenen bölgenin yüksek manyetik ortamdaki tepkileri dikkate alınır ve buradaki değişimlere göre görüntü elde edilir.

Manyetik alan ile çalışan Manyetik Rezonans veya X ışınları ile görüntüleme sağlayan X-Ray gibi, radyo dalgaları da bazı objeler içerisinde geçebilir ve bazılarında ise yansiyabilirler. Elektromanyetik dalgalar uygulandığı ortama göre geçebileceği ve yansiyabilecekleri objenin veya ortamın yapısına bağlı olarak değişim gösterirler. Uygulanan sinyalin geri dönüşünde, genlik ve faz olarak farklılıklar meydana gelir. Bu gibi elektromanyetik dalgalar ile yapılan görüntülemeler, kapalı cisimlerin içeriklerinin görüntülenmesi için yeni ve hızla gelişen alternatif çözümler üretmektedir.

## **2.2.Üç Boyutlu Görüntüleme Sensörü ve Görüntü Elde Etme**

Robot üzerinde, yüzey altı görüntüleme tekniği ile yer altı görüntüleme amaçlı yüksek frekanslı vektörel ölçüm sistemi kullanılmıştır. Ölçülmek istenen yüzeye gönderilen yüksek frekanslı radyo dalgaları, geriye yansiyarak ölçüm yapılır ve görüntüleme algoritması tarafından derinlik bilgisi oluşturulur.

### **2.2.1.Yüzey altı tomografi teorisi**

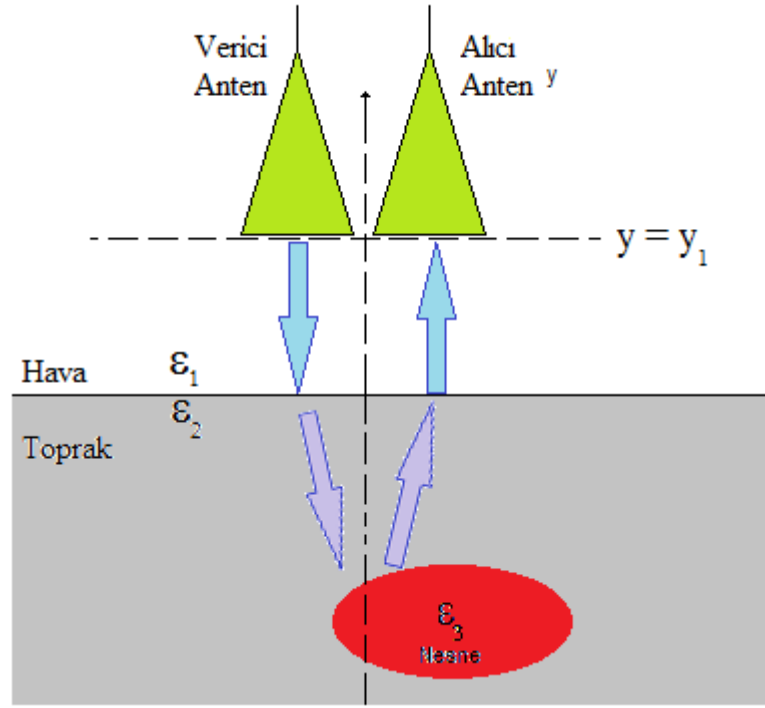
Elektromanyetik dalgalar, uygulandığı malzemenin geçirgenlik katsayısına bağlı olarak bazı maddelerden geçebilir iken bazı maddelerden yansır. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar, kum, toprak gibi materyaller içerisinde belli mesafeler boyunca ilerleyebilirler. Toprak yapısındaki homojenliği bozan farklı malzemeler,

elektromanyetik dalgaların saçılmasına, dolayısı ile geriye yansımalarına sebep olurlar.

Üç boyutlu görüntüleme amaçlı ölçüm sistemi olarak, TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü UYTL bünyesinde tasarlanan ve geliştirilen ve 2-4GHz frekansları arasında çalışan vektörel RF ölçüm sistemi ve bu sistem ile beraber Yüzey altı Tomografi (Subsurface Tomography) algoritması kullanılmıştır.

Ölçüm sisteminde, yer üzerine (Şekil 2.4)' de görüldüğü gibi  $y=y_1$  çizgisinden yayılan elektromanyetik alan öncelikle hava ortamından toprak ortamına geçerek cisme çarpar. Cisimden yansıyan dalgalar, toprak ve hava olmak üzere tekrar alıcı anten tarafından algılanır. Verici anten ile gönderilen dalgalar, alıcı anten tarafından alınmasından sonra elde edilen sinyal genliğinde görülen zayıflama; nesnenin iletkenlik yapısına dair bilgi verir. Gönderilen ve alınan sinyaller arasında yalnızca zayıflama olmaz. Aynı zamanda bu sinyaller arasında nesnenin antenlerden uzaklığına bağlı olarak faz farkı da görülür. Alınan sinyalde görülen faz farkı ve zayıflama sonucunda, toprak altına gizlenmiş nesnenin, içeriği (metal veya plastik oluşu) ve nesnenin antenden uzaklığı tespit edilebilir. Nesnenin gönderilen sinyalleri yansıtma ve zayıflatma özelliği gibi benzer etkiler topraktan ve havadan da görülebilir. Anten seviyesinin yer ile uzaklığı ve antenlerin birbirlerine olan açısı ile mesafeleri, verici anteninden yayılan dalgaların yere ulaşmadan alıcı antene ulaşmasına sebep olabilir. Bu durumda yerden yansıyan dalgalar, havadan direkt olarak iletilen dalgalardan daha düşük seviyeli olacağından nesnenin algılanmasını zorlaştıracaktır. Bu nedenle, antenlerin yer ile olan yükseklikleri düşük tutulmalıdır. Antenler birbirlerinden etkilenmeyecek şekilde paralel olmalı ve yer düzlemine dik veya dike yakın konumlandırılmalıdır. Bu amaçla robota yerleştirilen kol antenleri yüzeye dik ve birbirlerine paralel tutmalıdır.

Sensör ile yapılan ölçümler, yüzey altı nesnelerin derinlik ve şekillerini belirlemek için geliştirilmiş olan Yüzey altı Tomografi yazılımına iletilmektedir. Bu yazılım vasıtasıyla ölçüme ait verici-alıcı iletim oranı, ve faz farkları görüntülenir. Aynı zamanda bu yazılım vasıtasıyla, ölçüm sonuçları dikey ve yatay kesitler olarak üç boyutlu bir biçimde görüntülenmektedir.

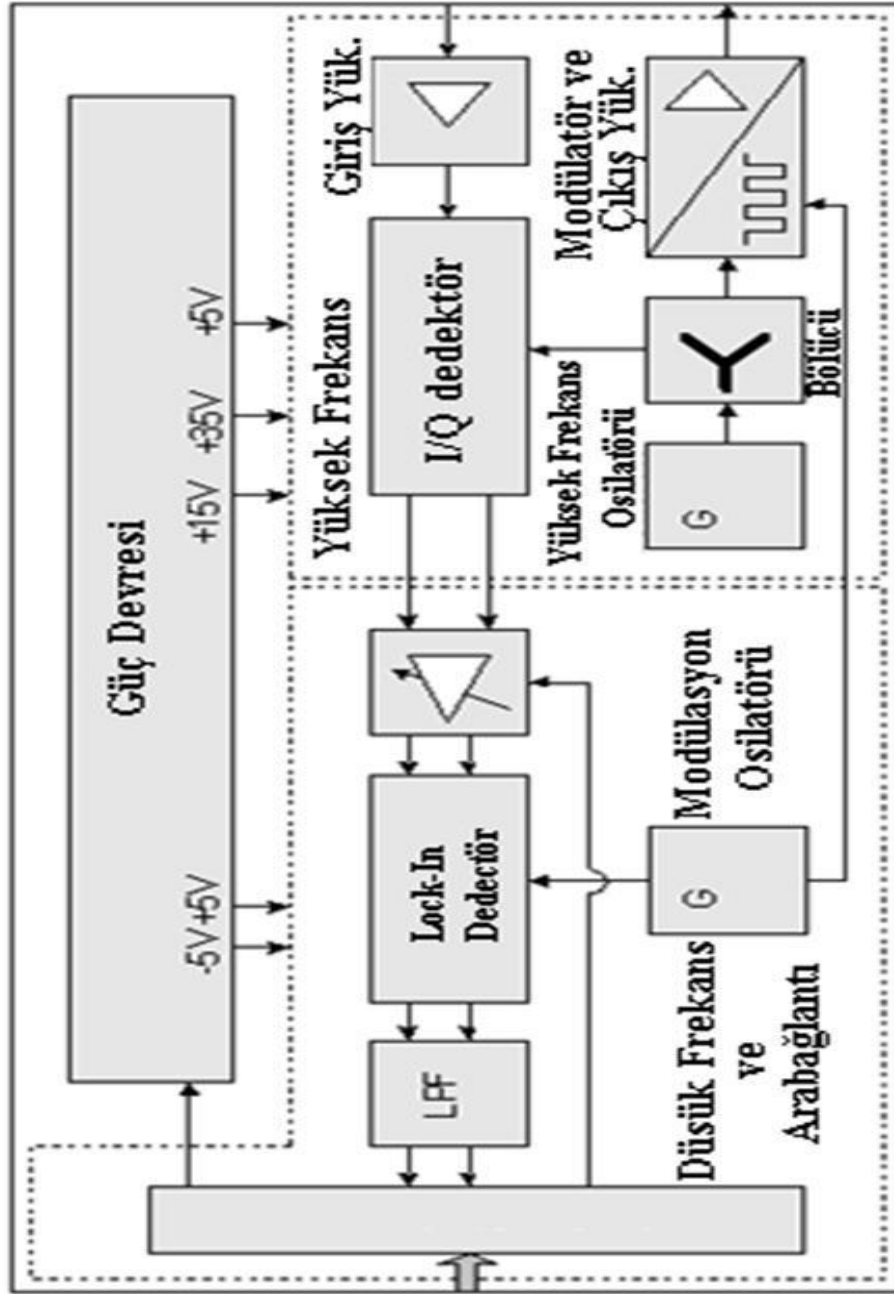


Şekil 2.4 : Verici antenden yayılan dalganın alıcı antene dönüşü

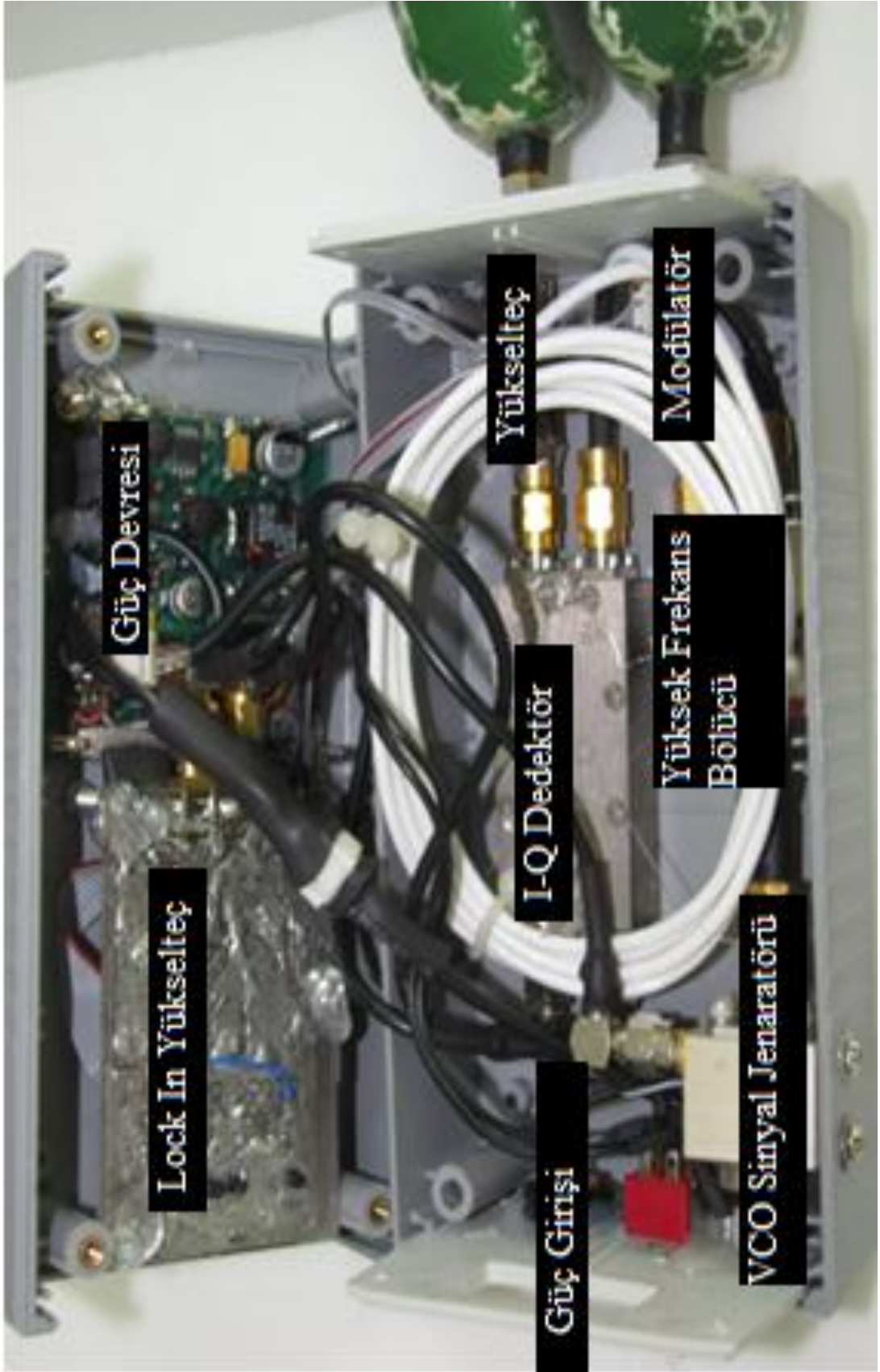
### 2.2.2. Üç boyutlu görüntüleme sensörü yapısı

TÜBİTAK MAM ME UYTL bünyesinde üretilen RF Sensör (Şekil 2.5); 2-4GHz arasında bir frekans bölgesinde isteğe bağlı olarak seçilen aralıkta ölçüm yapılmasına izin verir ve vektörel ölçüm bileşenleri olan Genlik ve Faz bilgisi elde edilir. 2-4GHz arasında, 1- 512 nokta arasında seçilebilen frekans sayısı kadar farklı frekans tarayabilir. Gerilim kontrollü osilatör vasıtasıyla üretilen sinyaller modülatör görevi yapan yükselteç (Şekil 2.7) vasıtasıyla verici antenine iletilir. Verici anteni mikrodalga sinyali ölçüm alanına gönderir ve alıcı anteni vasıtası ile iletilen sinyal alınır ve yükseltip  $I - Q$  detektöre iletilir.  $I - Q$  detektör gelen sinyali, osilatörden aldığı referans sinyali ile karşılaştırarak, faz ve genlik farkının tespitinde kullanılır.  $I - Q$  bileşenleri, karmaşık ölçüm bileşenleridir ve gelen ve giden sinyallerin sinüs ve kosinüs karşılıklarını verir.  $I - Q$  detektör sonrasında sinyal Lock-In yükselteç (Şekil 2.8) vasıtası ile modülasyon sinyaline kilitlenir.  $I - Q$  sinyalleri modülasyon sinyaline göre tespit edilir. Lock-In yükselteçler, bilinen bir taşıyıcıyı (modülasyon sinyalini) barındıran sinyallerin gürültülü ortamlarda dahi tespit edilmesine izin veren türde bir

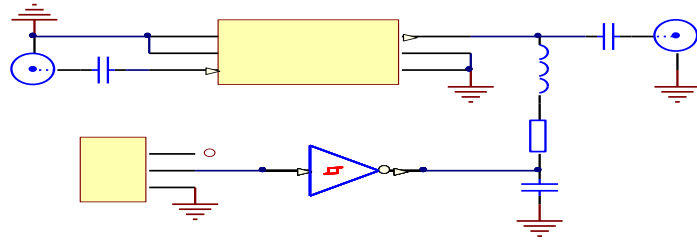
yükseltilmiştir. Şekil 2.6’da görüleceği üzere, mikrodalga sensörü tek bir paket içerisine yerleştirilmiştir. Sensörün dış ortam koşullarında sorunsuz kullanılabilmesi için her türlü bağlantı elemanı yapıştırıcılar vasıtasıyla sabitlenmiştir.[11-13]



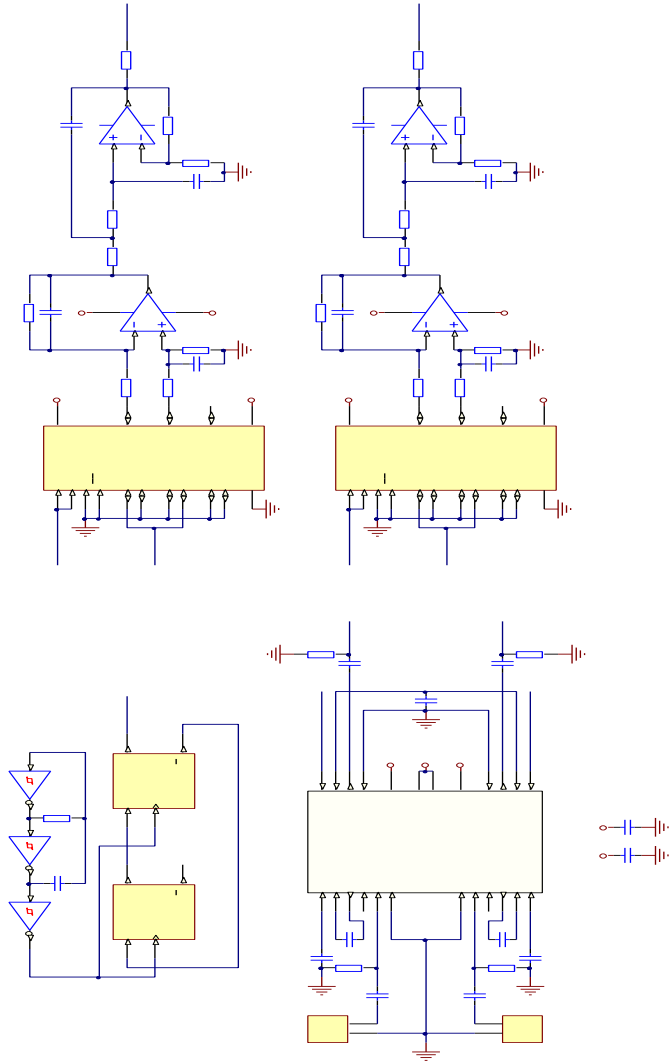
Şekil 2.5 : RF Sensör modülü blok şeması[11]



Şekil 2.6 : RF Sensör modülü blok şeması



Şekil 2.7 : RF modülasyon ve yükselteç Devresi.



Şekil 2.8 : Lock-In yükselteç ve modülasyon sinyali üretic devresi

Yüksek frekanslı çıkış sinyali (Şekil 2.7) MGA82563 yükselteç entegresi ile aynı zamanda modüle edilerek yükseltilir. Modülasyon için, modülasyon sinyali yükselteç

entegresinin besleme gerilimi anahtarlanarak yapılır. Evirici entegre devresi 74HC14 ile modülasyon sinyali üretilir. 74HC74 entegre devresi ile bu sinyalin pozitif ve negatif alternans sürelerinin eşit olması sağlanır. Lock-In yükselteç devresinde, çok düşük genlikleri yükseltebilen AD604 entegresi ile  $I-Q$  detektör çıkışındaki sinyal yükseltilir. 4053 anahtarlama entegresi ile yükseltiletilen sinyal modülasyon sinyaline kilitlenip yükseltiletilerek sinyal işleme devresine gönderilir. AD604 entegresi, yükseltme oranını harici sinyal işleme devresi tarafından alır.

### 2.2.3.Üç boyutlu görüntüleme sensörü testleri

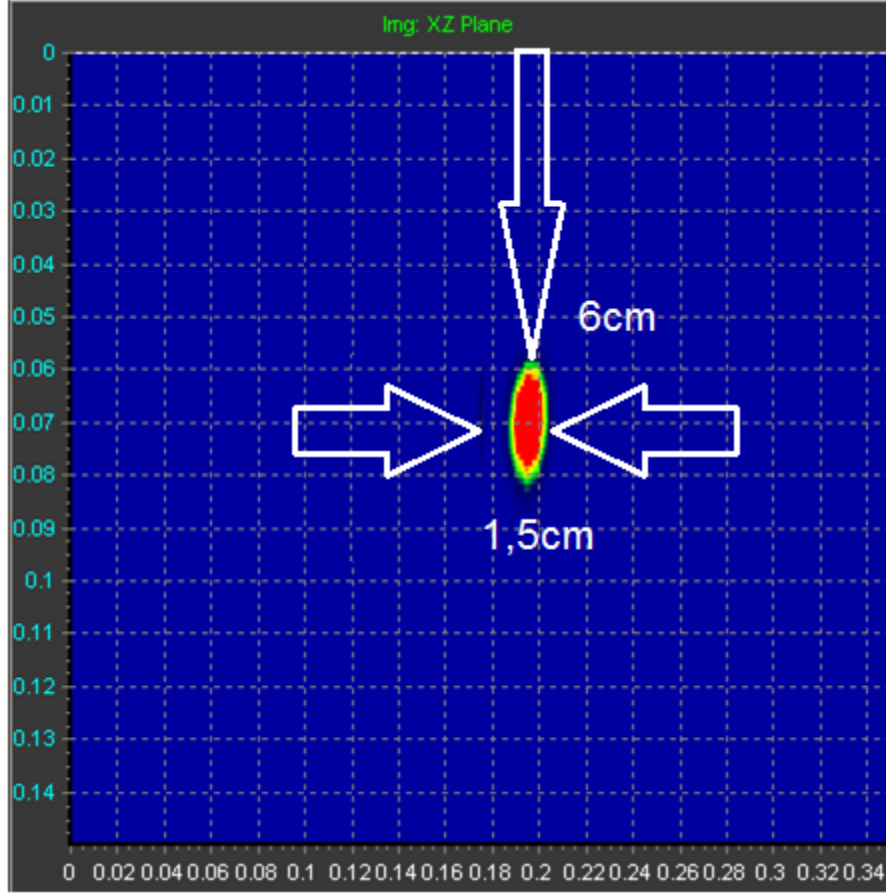
Robot üzerinde kullanılan görüntüleme sensörü, robot ile kullanılmadan önce çeşitli materyaller ile test edilmiş, farklı derinliklerde görüntü elde edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 2.9 da mermer bloklar altına konulmuş metal boru test edilmiştir. Mermer bloklar altındaki çapı 2cm olan metal borunun zemin ile olan derinliği 8cm dir.



Şekil 2.9: Mermer altına yerleştirilmiş metal boru



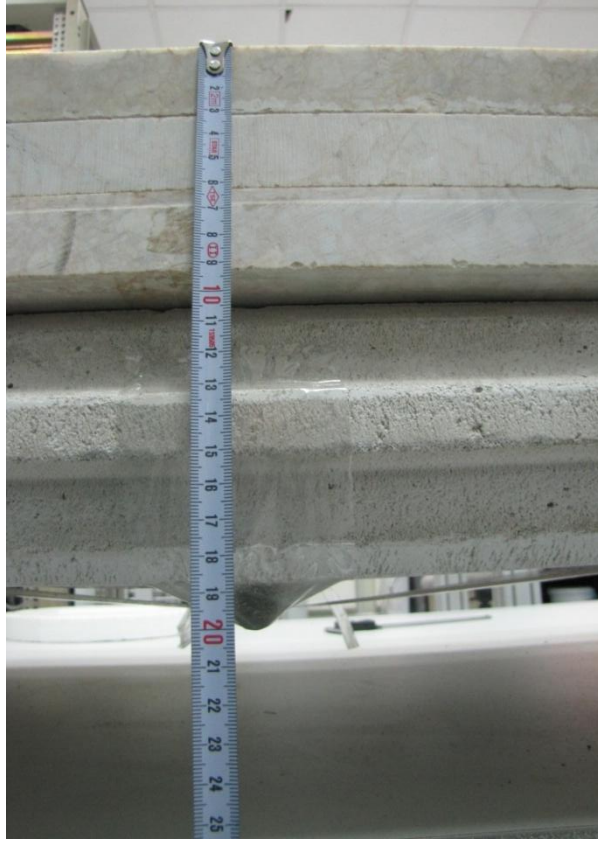


Şekil 2.10 : Metal borunun mermer plakaları altındaki dikey kesit bilgisayar görüntüsü

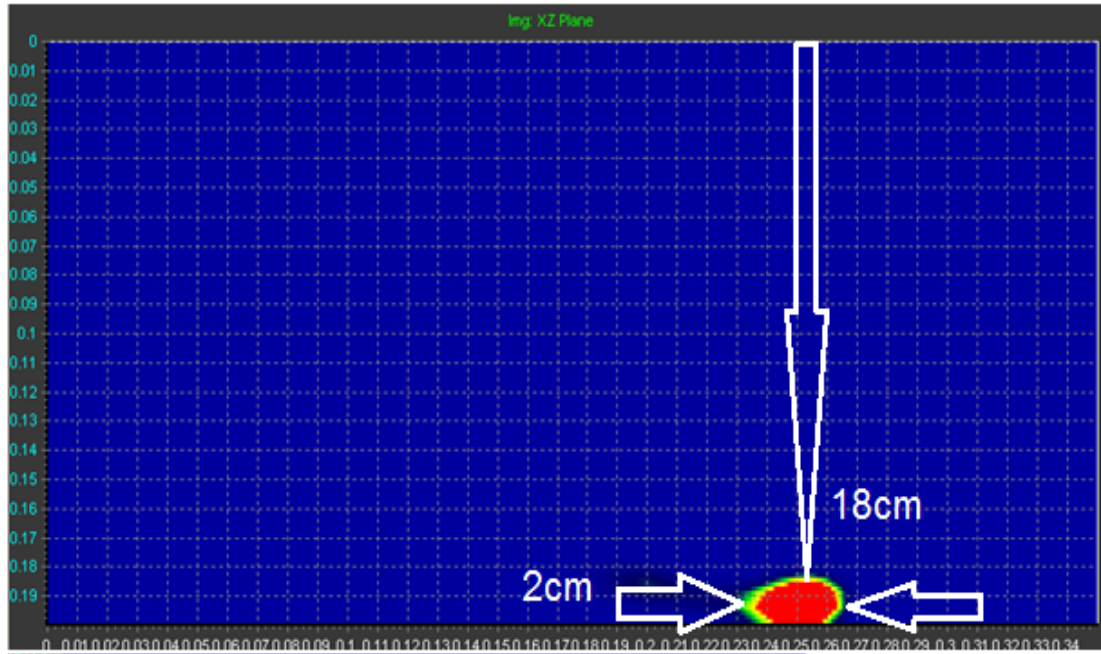
Ölçüm sonrasında elde edilen sonuçlar Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu sonuçta 8cm derinlikte bulunan metal boru 6cm de görülmüş ve 2cm olan çapı ise 1,5cm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 2.11'de görülen deneyde metal boru, 3 adet 5cm kalınlığındaki mermer blokların altına yerleştirilmiş 9cm kalınlığındaki beton plakası altına toplam 19cm derinliğe gizlenilmiştir. Çapı 2cm olan boru Şekil 2.12'de görüleceği üzere 2cm genişliğinde ve 18cm derinlikte algılanmıştır.

Yapılan bu deneyler sonucunda, mikrodalga sensörünün algılama mesafesi denenmiş ve 19cm'e kadar derinlikteki metal boruyu tespit edebildiği görülmüştür. İçi boş olan metal boru, şekilden görüleceği üzere tamamen dolu gibi görülmüştür.



Şekil 2.11 : Mermer ve ytong plakalar altına yerleştirilmiş metal boru

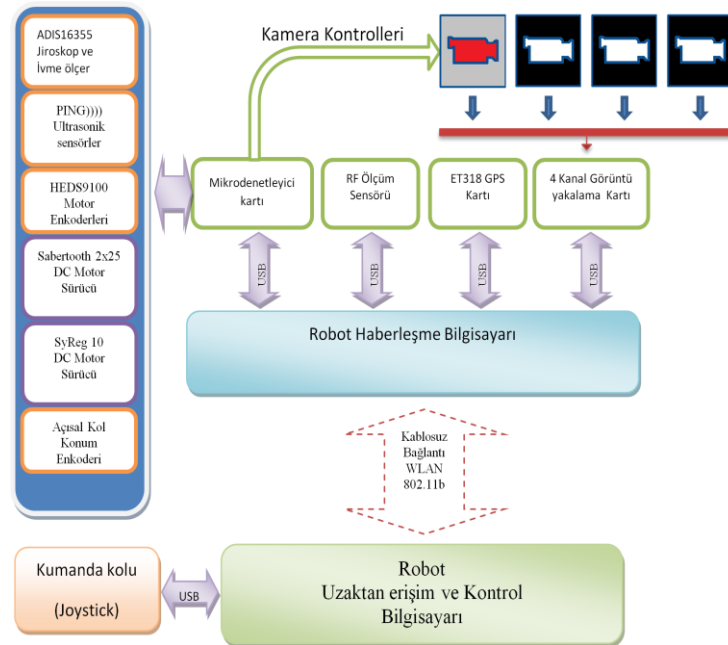


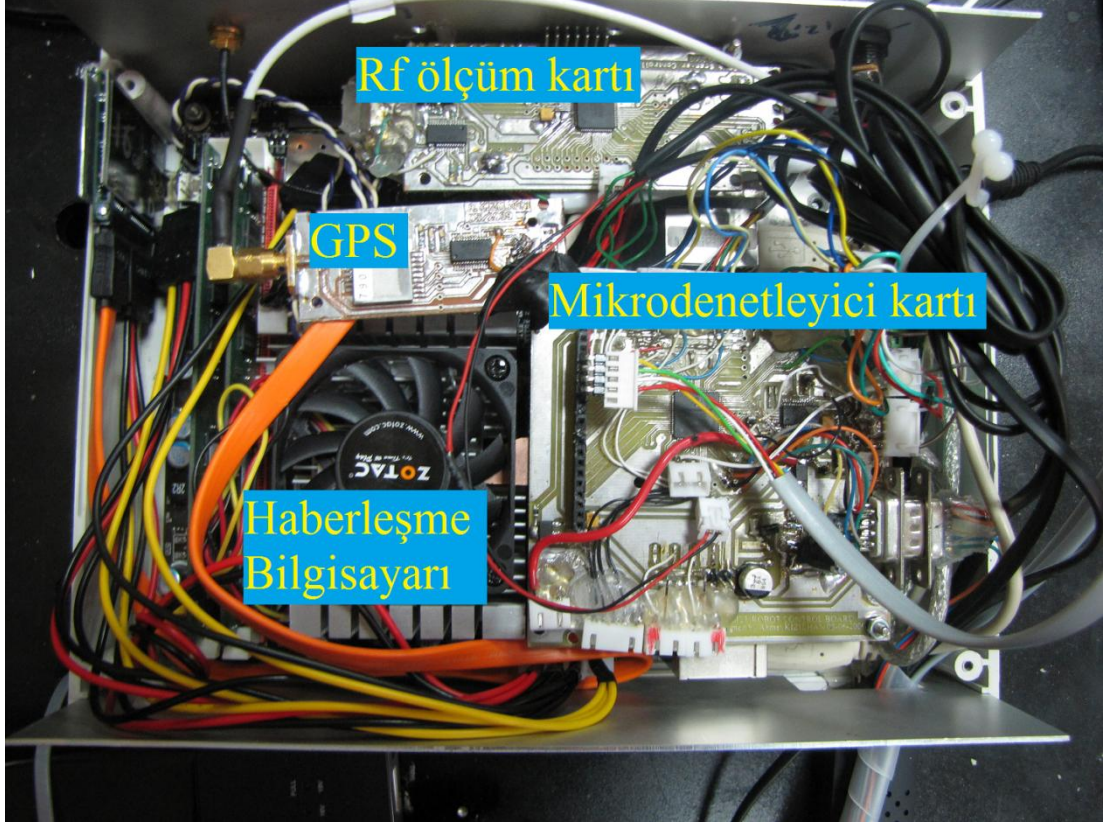
Şekil 2.12 : Metal borunun mermer ve beton plakaları altındaki dikey kesit görüntüsü

### 3.ROBOT BİLEŞENLERİ

Mobil robot çeşitli donanımsal çevrebirimlerini kontrol eden elektronik devrelerden ve bu devreleri kontrol eden bilgisayarlardan oluşmaktadır. Robot üzerinde dış ortam koşullarını algılayan sensörler ve hareketi sağlayan motorlar mevcuttur. Sensörlere ve motorların kontrol kartlarına gerekli komutları verebilmek için bilgisayar arabirimli bir kontrol devresi tasarlanmıştır. Robot üzerinde uzaktan erişim için bir bilgisayar kullanılmış ve tüm arabirimlerin bu bilgisayar üzerinden uzaktaki bir başka bilgisayar ile haberleşmesi sağlanmıştır.

Şekil 3.1’de mobil robot üzerindeki donanım şeması verilmiştir. Burada robot haberleşme bilgisayarı ile haberleşen çeşitli elektronik devreler mevcuttur. Mikrodenetleyici kartı vasıtasıyla, jiroskop ve ivme ölçer, ultrasonik sensörler, motor kontrol ve geri besleme sensörleri kontrol edilmektedir. aynı şekilde RF ölçüm sensörü bilgisayar tarafından kontrol edilmekte ve ölçümler yapılmaktadır. Robot üzerinde küresel konumlandırma için kullanılan GPS alıcısı da bu bilgisayar vasıtası ile kullanılmaktadır. Son olarak robot çevresini görüntüleme amacıyla kullanılmış olan çok kanallı kamera sistemi mevcuttur.





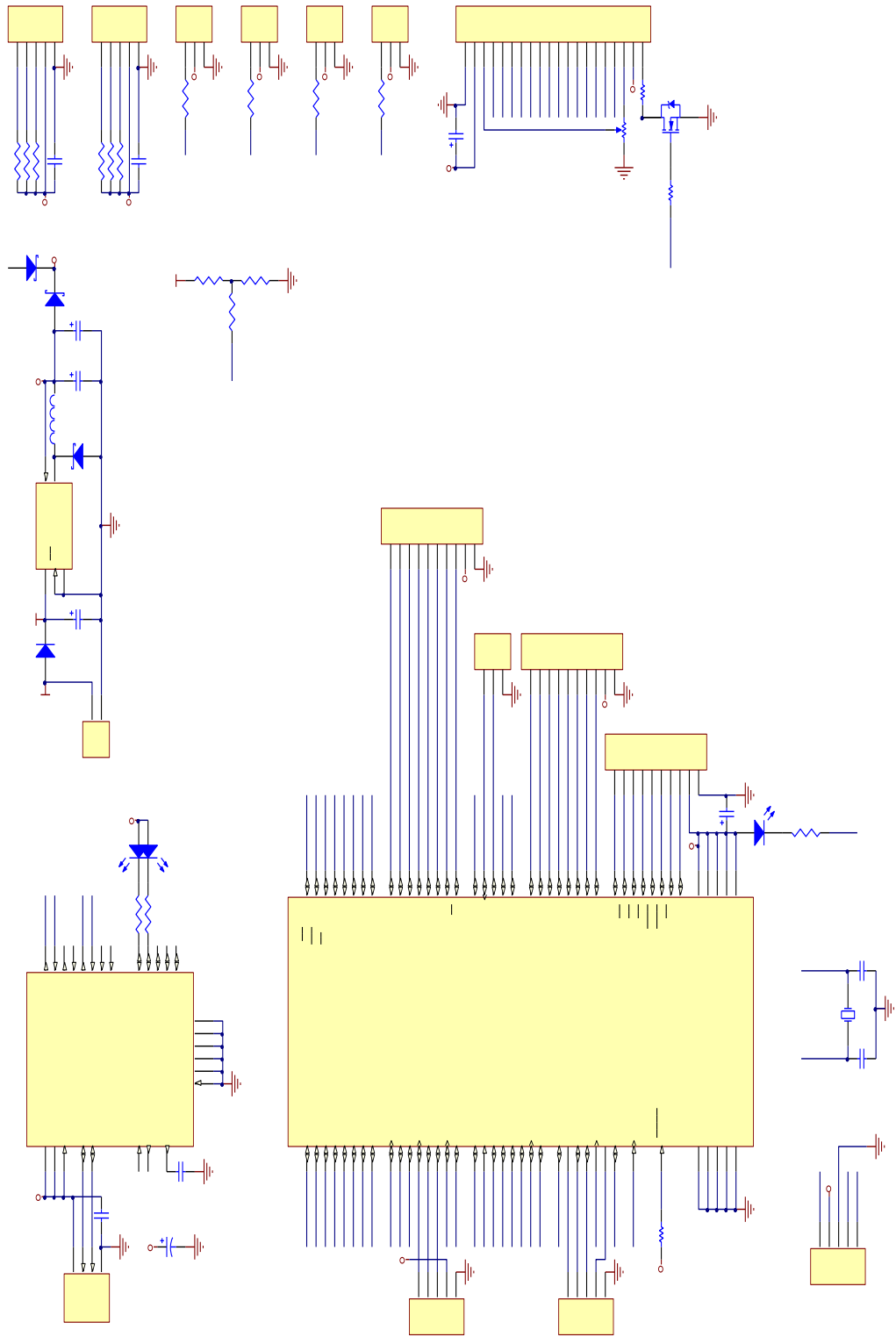
Şekil 3.2: Mobil robot kontrol bloğu

Şekil 3.2 de robot haberleşme bilgisayarı, küresel konumlandırma sistemi alıcısı, mikrodalga sensörü RF ölçüm kartı ve mikrodenetleyici kartları yerleşimleri gösterilmiştir.

### 3.1.Mikrodenetleyici tabanlı robot kontrol kartı

Sonar sensör, motor sürücüleri ve enkoderleri ile jiroskop, ivme ölçer sensörlerinin kontrol edilebilmesi ve bilgisayar tarafından erişilebilmesi için Microchip firmasının üretmiş olduğu PIC18F8527 denetleyicisi kullanılmıştır (Şekil 3.3). Kontrol kartının bilgisayar ile haberleşme arabirimi olarak FTDI firmasının FT232RL usb-seri çevirici entegresi kullanılmıştır.

PIC18F8727, saniyede 10 milyon işlem yapabilen 8 bit çekirdeğe sahip 70 adet giriş çıkış yapılabilen 80 pin kılıfında sahip genel amaçlı bir mikrodenetleyicidir.



Şekil 3.3: PIC18F8527 tabanlı Mobil robot kontrol kartı

Mikrodenetleyici içerisinde çalıştırılan program vasıtasıyla, bilgisayar ortamından alınan referans hız veya referans konum gibi komutlar motor kontrol sürücülerine gönderilir. Robot hız bilgileri robot üzerindeki sensörler vasıtası ile ölçülür.

Mikrodenetleyici vasıtasıyla hız ve pozisyon kontrolleri gerçek zamanlı olarak mikrodenetleyici üzerinde gerçekleştirilir. Mikrodenetleyici yazılımı 0.1sn yenileme ve örnekleme zamanı ile robot hız bilgisini ölçer ve motorlara uygun hız değerleri gönderilir.

### **3.2.Sistemde Kullanılan Sensörler**

Mobil robot sisteminde, yapılan hareketi ve bu hareket sırasında çevre koşullarını ölçen sensörler bulunmaktadır.

#### **3.2.1. Üç eksen jiroskop ve ivmeölçer**

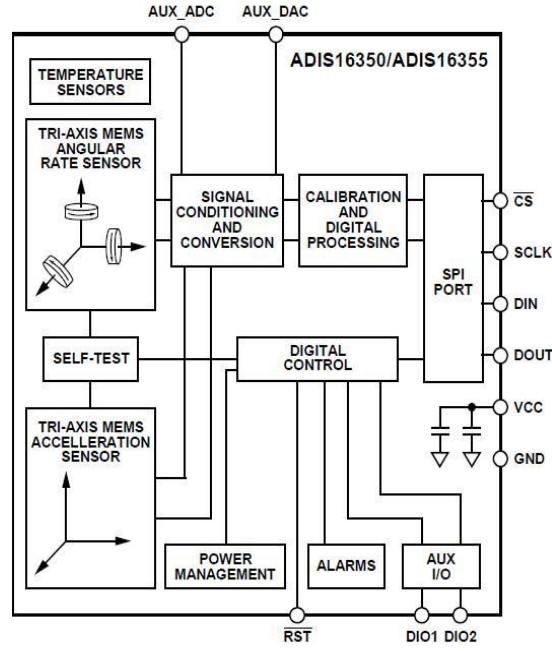
Robot hareketi sırasında oluşan kaymalar ve enkoderlerin düşük hassasiyet ile çalışmaları dolayısıyla, robot hareketleri enkoderler ile tam olarak doğru ölçülememektedir. Oluşan bu hatalar, hareket esnasında her iki sensör için ölçülen değerlerin karşılaştırılması sonucu görülmektedir. Bu amaçla, motorlar üzerindeki enkoderlerden ayrı olarak konum bilgisi üretebilecek bir sensör kullanılmıştır.

Analog Devices firmasının hareketli sistemlerin açısal hız ve ivmesel konum bilgilerinin algılanmasını sağlamak için ürettiği altı serbestlik dereceli bu sensör ile mobil robota ait, açısal hız ve çizgisel ivme ölçülebilmektedir. Robotun hareket sınırlandırmasından dolayı iki eksen, açısal hız ve çizgisel ivme yeterli iken, üçüncü eksenin algılanması ile zemin eğimine dair bilgiler alınabilmektedir.

ADIS16355, altı serbestlik derecesini sağlayan, üç eksen açısal konum bilgisi içeren, 14bit çözünürlüklü jiroskop ve üç eksen 14bit çözünürlüklü ivmeölçer barındırmaktadır(Şekil 3.4). İvmeölçerler, jiroskoplar ile aynı yönlü eksenlere yerleştirilmişlerdir. Paket içerisinde her bir sensör bilgisi analog-dijital çeviriciler ile sayısal bilgiye çevrilmiş ve ölçüm sonuçları üzerinde sayısal işlem gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal işlemler sonucunda ölçüm sonuçları doğrulama tabloları vasıtasıyla düzenlenmiş ve seri haberleşme vasıtası ile dışarıya aktarılmıştır (Şekil 3.4).

Jiroskop, MEMS açısal oran sensörleri ile rezonatör jiroskop prensibi ile çalışmaktadır ve her eksen için açısal hız bilgileri üretir. Bu hız bilgilerinin toplanması sonucu açısal konum bulunur.

Polislikon yayların hareketleri ve bu hareketlerin farksal kondansatörler ile ölçülmesi sonucu ivme ölçümü yapılır.



Şekil 3.4 : ADIS16355 jiroskop ve ivme ölçeri blok şeması

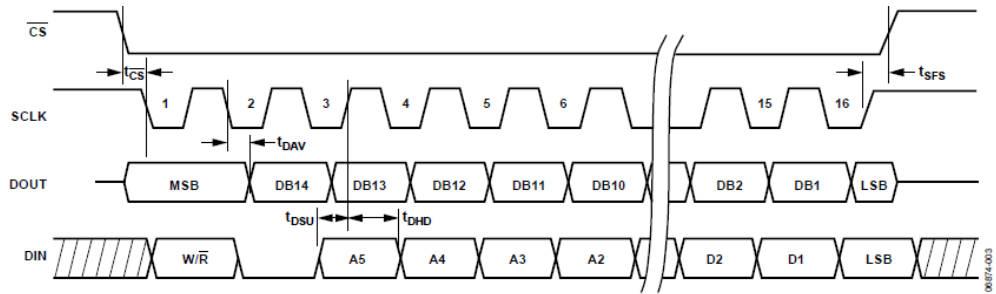
Sensörün başlıca kullanım alanları şunlardır;

- Yol bulma ve kontrol
- Platform kontrol ve sabitleme
- Pozisyon kontrol ve analiz
- İvme ölçüm sistemleri
- Genel navigasyon
- Görüntü sabitleme
- Robot uygulamaları

SPI protokolüne sahip olan ADIS16355 sensörünün ivme ve açısal konum bilgisi, mobil robot kontrol kartı tarafından okunarak bilgisayara aktarılır. Çizgisel ivme ve

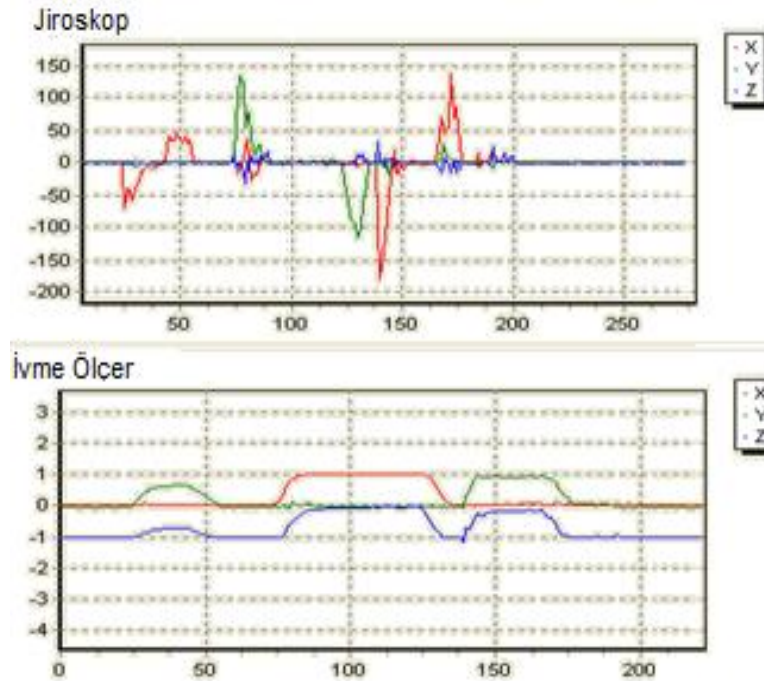
açılmal hız değeri, dönüşümler yapılarak konum bilgisine çevrilir. Bu konum bilgisi, mikrodenetleyici içerisinde konum kontrolü sırasında kullanılır aynı zamanda bilgisayar ortamına aktarılır.

ADIS16355, SPI portundan gönderilen her komut sırasında bir önceki gönderilen komutun cevabını gönderir. Bu çift yönlü haberleşme dolayısıyla, bilgi transferi daha hızlı olabilmektedir (Şekil 3.5) [14].



Şekil 3.5 : ADIS16355 SPI haberleşme şeması

Her ölçüm sonucunda, X,Y,Z eksenlerinde jiroskop açı hızları ve çizgisel ivme değişimleri ölçülerek toplanır ve anlık hız ve pozisyon bilgileri elde edilir. (Şekil 3.6).



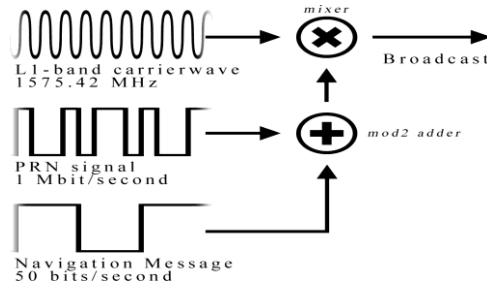
Şekil 3.6: Jiroskop ve İvme-ölçer ölçüm sonuçları



### 3.1.1 Küresel konumlandırma sistemi (GPS)

Mobil robot ile yapılan ölçümlerin gerçek koordinatlar ile eşleştirilmeleri ve daha sonra ölçülen alanın tekrar incelenmesi için küresel koordinatlarda referans noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca yönelik çözümlerden birisi de, açık arazilerde kullanılabilen GPS sistemidir.

GPS (Global Positioning System; Küresel Yer Belirleme Sistemi ya da Küresel Konumlandırma Sistemi), Şekil 3.7' de görüldüğü gibi düzenli olarak kodlanmış bilgi yollayan bir uydu ağıdır ve uydularla arasındaki mesafeyi ölçerek Dünya üzerindeki alıcı konumunu tespit etmeyi mümkün kılar.



Şekil 3.7: GPS sinyali bileşenleri

Bu sistem, ABD Savunma Bakanlığı'na ait, yörüngede sürekli olarak dönen uydulardan oluşur (Şekil 3.8). bu uydular tarafından gönderilen sinyaller(Şekil 3.7) GPS alıcısı tarafından alınarak, uydu uzaklıkları tespit edilir. Bu uzaklıkların tespiti ile üçten fazla uydu sinyalinden elde edilen uydu konumları çakışması sonucu alıcı konumu tespit edilir.



Şekil 3.8: GPS uyduları

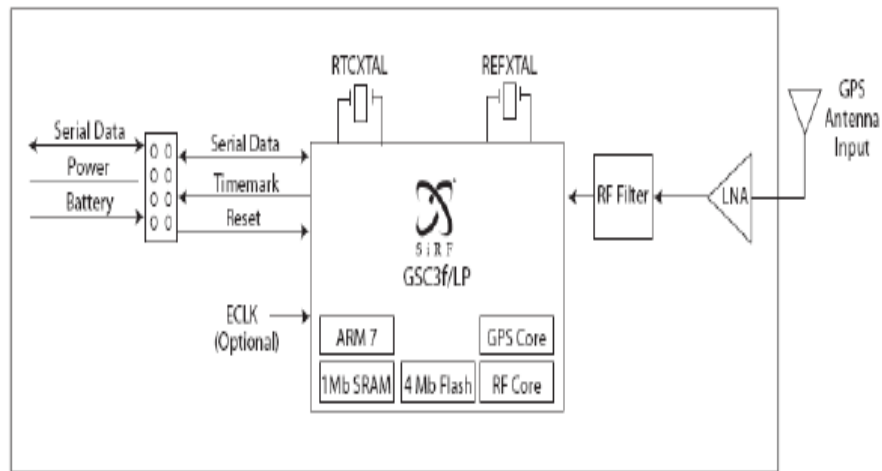
Bu sistemin ilk kuruluş hedefi tamamen askeri amaçlar içindi. GPS alıcıları yön bulmakta, askeri çıkartmalarda ve roket atışlarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Ancak, 1980'lerde GPS sivil kullanıma da açılmıştır [15].

Dünya üzerinde belirli uzaklıklarda bulunan GPS uydularından gelen konum ve atom saati bilgileri GPS alıcısı tarafından ölçülür ve karşılaştırılır. Üç farklı uydudan yeterli seviyede sinyal alabilen alıcılar, konum bilgisini bu üç farklı uydunun konumlarına göre hesaplayabilirler (Şekil 3.8) [15]. Aynı şekilde dördüncü uydu bilgisi ile de konum bilgisi yanında yükseklik bilgisi de hesaplanabilir.

GPS sinyalleri, uyduların konumlarını, saat bilgisi gibi ölçüm cihazının pozisyonunu belirlemede kullanılan bilgiler içeren bir taşıyıcı ile gönderilirler ve bu taşıyıcılara özel alıcılar bulunmaktadır. Bu alıcılar, çalıştıkları taşıyıcı frekanslara göre sınıflandırılırlar ve uygulama alanları bu sınıflandırmalara göre seçilir.

Robot üzerinde GlobalSat firmasının ET-318(Şekil 3.9) modeli, GPS alıcı modülü kullanılmıştır. Genel özellikleri;

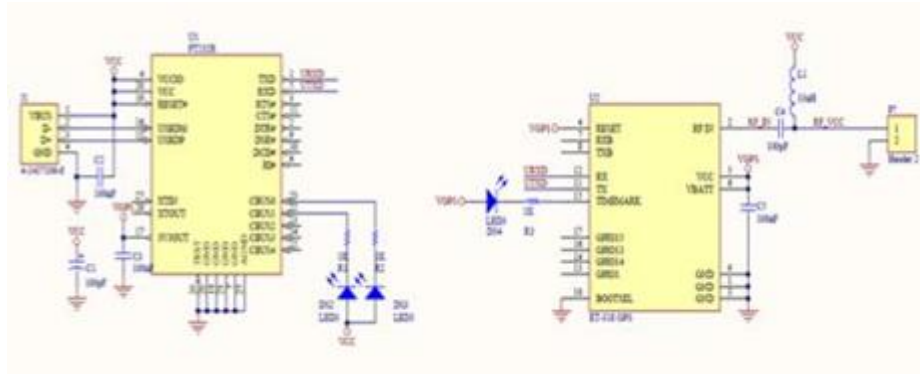
- SIRF star III yüksek performanslı GPS yonga setini
- Çok yüksek hassasiyetli alıcı girişi
- Düşük sinyal seviyelerinde dahi kısa başlangıç süresi
- İki farklı seri haberleşme birimi
- Dahili düşük gürültülü yükselteç
- Küçük ebatlar



Şekil 3.9: ET-308 GPS modülü blok şeması [16]

Seri port çıkışı sağlayan ET-318 modülü, USB-Seri port çevirici entegresi olan FT232R vasıtası ile Bilgisayara bağlanılarak(Şekil 3.10), pozisyon bilgisinin bilgisayara aktarılması sağlanır. Çözünürlüğü yaklaşık 10metre olan GPS, daha düşük çözünürlük ihtiyacı olan mobil robot için yalnızca gerçek referans noktaları oluşması amacıyla kullanılmıştır. Alınan konum bilgileri üç boyutlu görüntüleme sırasında ölçüm sonuçlarının küresel konumlarda referansları olarak kullanılmıştır.

GPS modülü konum ve hız gibi bilgileri haberleşme protokolü olarak NMEA-0183 protokolü kullanmaktadır. Bu protokol farklı bilgiler içeren cümlelerden oluşur ve \$GP karakterlerinden sonra gelen üç bytelık mesaj bilgisi ile sonrasında gelen bu mesaja ait bilgiler ile çözülür [15].



Şekil 3.10: GPS – PC bağlantı birimi

### 3.1.2 Ultrasonik yaklaşım sensörü

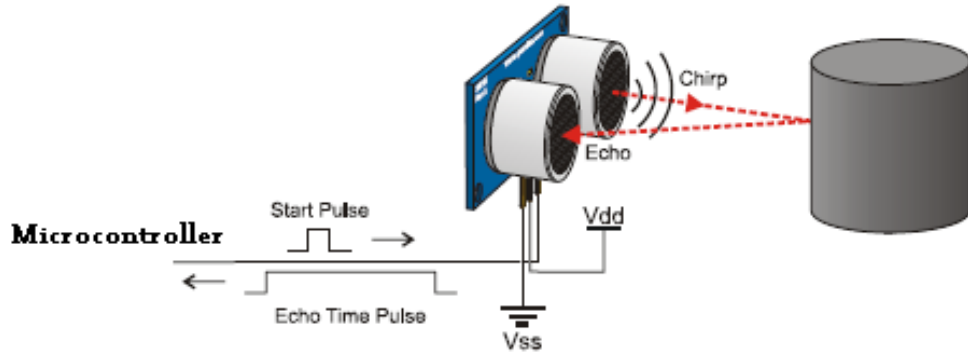
Mobil sistemler, çevresel değişimlerden bağımsız olmadıklarından, değişimleri tespit etmek için gerekli donanımlara sahip olmalıdırlar. Hareket eden objeleri veya hareket edilmesi gereken yoldaki engelleri tespit etmek, robotu istenmeyen çarpışmalardan korumak için önemli ve gereklidir. Yaklaşım ve nesne tespiti için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar;

- Isı farklılığı algılanması (Kızıl ötesi algılayıcılar)
- Ses farklılığı algılanması (Ses sensörleri – Ultrasonic Ses Sensörleri)
- Işık farklılığı algılanması (Lazer ve Kızıl ötesi algılayıcılar)
- Radyo Frekanslı Algılayıcıları (Yüksek ve düşük frekanslı malzeme dedektörleri)

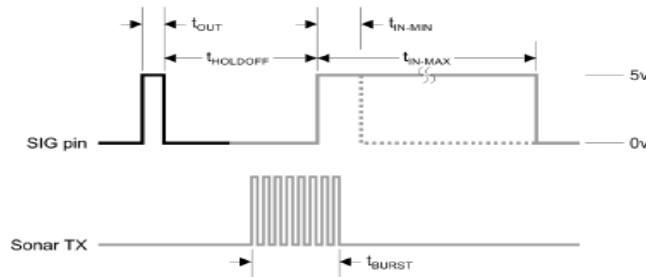
Robot uygulamasında yaklaşım sensörü olarak maliyet ve performans yeterliliği dolayısıyla Parallax firmasının (PING))) adlı ultrasonic mesafe sensörü kullanılmıştır.

Bu sensörün genel özellikleri;

- 2 cm 3m arası ölçüm kabiliyeti
- Tek terminal üzerinden haberleşme kabiliyeti
- Düşük maliyeti
- Farklı yüzeylerde (cam-metal) çalışabilme yeteneği şeklinde sıralanabilir.



Şekil 3.11: PING))) ultrasonik sensör uygulama şeması



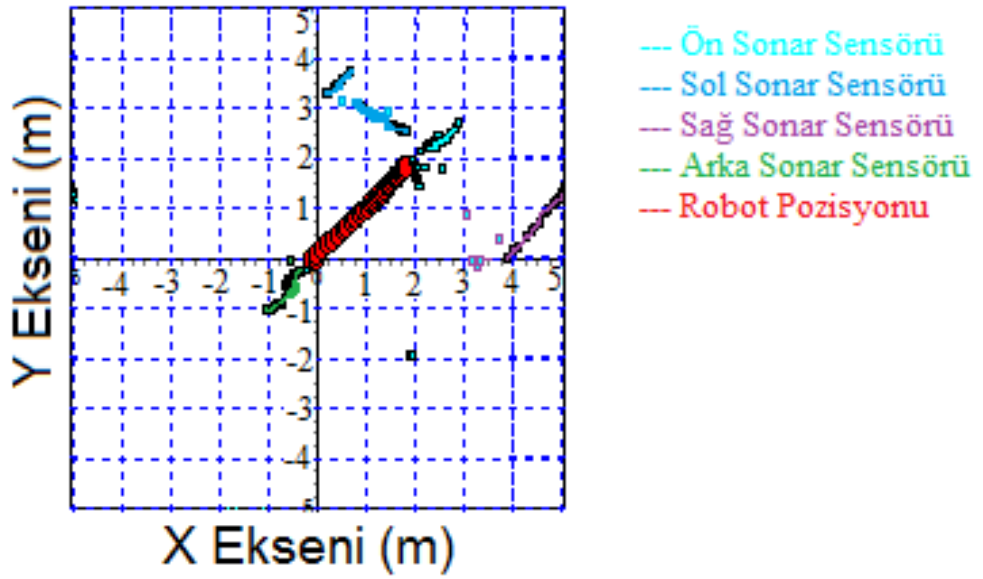
Şekil 3.12: Haberleşme ve sonar sinyal şeması

Mikrodenetleyici tarafından uygulanan yaklaşık beş mikro saniye uzunluğundaki pozitif darbe sonrasında PING))) sensörü verici çıkışından yüksek frekanslı ses üretir. Bu ses dalgası nesneye çarpıp geriye döner. Geriye dönen ses sinyalindeki gecikme, PING))) sensörü ile algılanarak pozitif darbe üretir(Şekil 3.12). Pozitif darbeler arasındaki süre ile karşıdaki cismin mesafesi tespit edilebilir. İki darbe arasındaki süre, ses sinyallerinin havada aldıkları hız ve yansıma yapan cismin mesafesine oranını verir. Buradan bilinen ses hızı değeri ile geçen süre oranlanır ve cismin yeri tespit edilir(Şekil 3.11)[17].

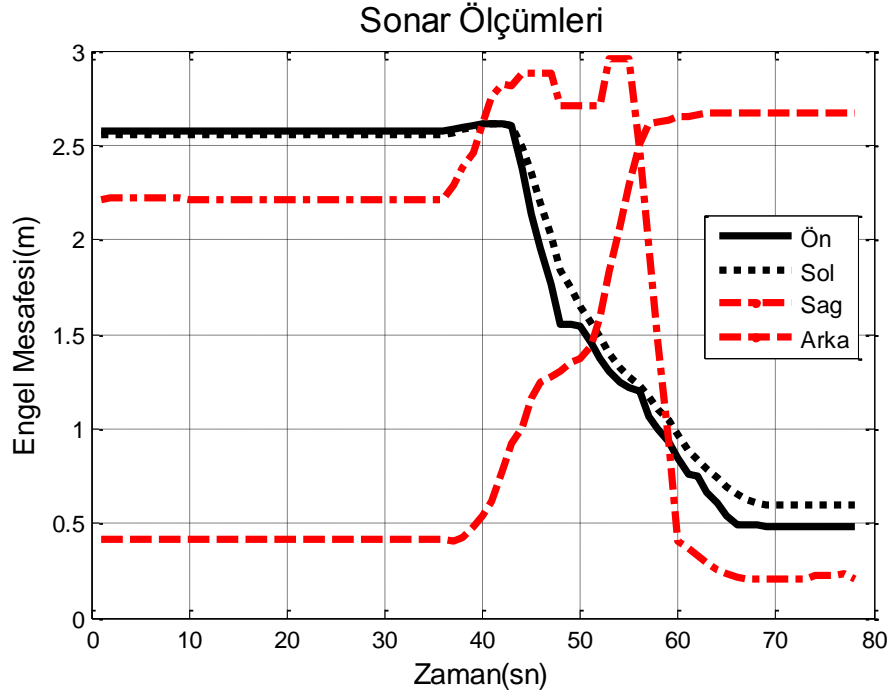
Ultrasonik sensör görünümü Şekil 3.13’ de gösterilmiştir. Yapılan deneylerde hareket eden robot üzerindeki ultrasonik sensörlerin ürettikleri nesne konumları Şekil 3.14 te görülmektedir



Şekil 3.13: Sonar sensör yerleşimi



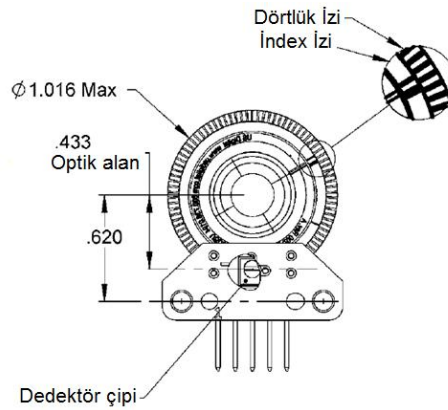
Şekil 3.14 : Robot konumu ve sonar sensörlerin engelleri tespiti



Şekil 3.15 : Ultrasonik sensörleri ölçüm sonuçları

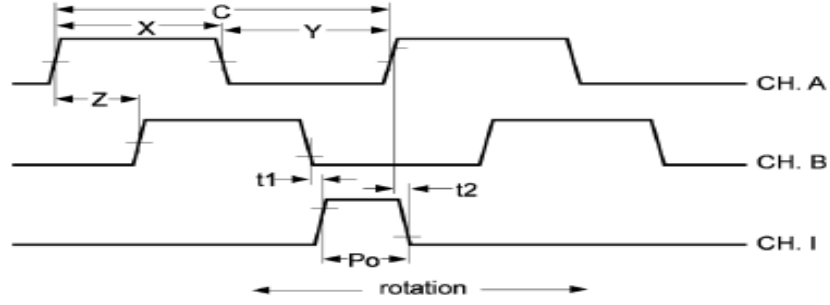
### 3.1.3 Motor konum geribildirim enkoderleri

Hareket sağlayıcı olarak kullanılan motorların hızlarının ve ivmelerinin kontrol edilebilmesi için genellikle motora bağlı hız ölçüm sistemleri kullanılır. Bu sistemlerin en yaygın olanları ve yüksek verimlilikle çalışanlarından birisi de Enkoderleridir. Robot hareketini sağlayan iki farklı doğru akım motoru bulunmaktadır ve bu motorlar üzerinde Hewlett Packard firmasının ürettiği HEDS9100 enkoderleri kullanılmıştır.



Şekil 3.16 : HEDS-9100 sensörü mekaniksel görünüm [18].

HEDS-9100, bitişik olarak yerleştirilmiş iki optokuplörün önünden geçen bir disk üzerindeki eşit aralıkların sırasıyla optokuplör çıkışlarını aktif hale getirmesi ile çalışır(Şekil 3.16). Her dönüşte bu optokuplör çıkışlarında yarık sayısı kadar darbe üretilir. Bu darbelerin sırasına göre dönüş yönü tespit edilir.



Şekil 3.17: HEDS-9100 sensörü çıkış sinyali grafiği[18]

CH.A ve CH.B (Şekil 3.17) sinyalleri, birbirlerine 90 derece faz farkı ile üretilen enkoder sinyalleridir. Disk üzerinde 500 adet bölme vardır ve her turda 500 adet C tam alternansı üretilir. C süresine bakılarak motorun dönme hızı tespit edilebilir.

### 3.2 Sistemde Kullanılan Motorlar ve Sürücüleri

Mobil robot hareket mekanizması olan paletlere güç aktarmak ve yer altı görüntüleme ölçüm sensörü anteninin yer üzerini taraması için motorlar kullanılmıştır.

#### 3.2.1 Robot hareket sağlayıcı olarak doğru akım motorları ve sürücüleri

Mobil robot, paletleri kontrol eden iki farklı doğru akım motoru ile hareket eder. Bu motorların dönüş yönleri ve hız farklarına göre robotun hareket yönü ve hareket yönünün dönme açısı değişir.

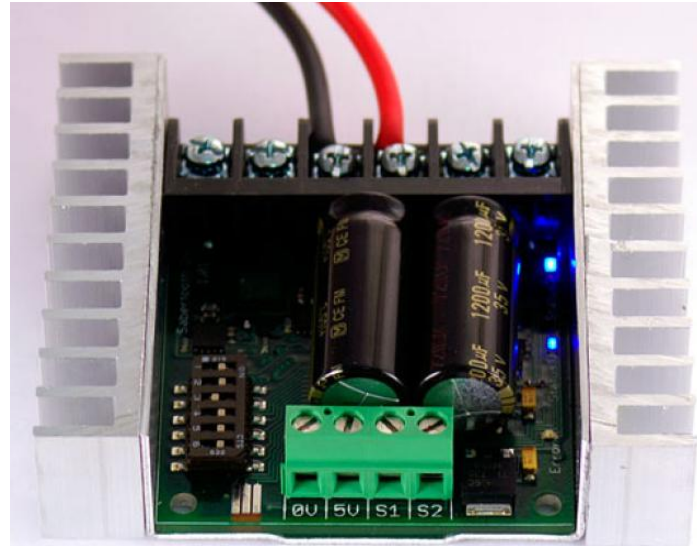
Kullanılan doğru akım motoru, robot sistemi içerisinde hazır bulunan PittmanExpress GM9236S021 modeli sabit mıknatıslı redüktörlü doğru akım motorudur(Şekil 3.18).



Şekil 3.18: GM9236S021 Doğru Akım Motoru [19]

Motor, ortalama 24VDC da kullanılır ve yüksüz olarak bu gerilimde dakikada 236 devir döner. Motordan alınabilecek en yüksek tork, sürekli halde; 1.1N/m kısa süreli tepe gücü ise 6.1N/m olarak çıkış gücüne sahiptir [19].

Motorları kontrol etme amacı ile robot sistemi içerisinde DimesionEngineering firmasının SABERTOOTH 2x25 modeli motor sürücüsü kullanılmıştır(Şekil 3.19). Bu motor sürücüsü üzerinde, iki adet motor çıkışı mevcuttur. Bu çıkışların her birisi sürekli halde 25A verebiliyorken kısa süreli anlık akım çıkış tepe değeri 50A olarak verilmiştir.



Şekil 3.19: Sabertooth 2x25 DC Motor Sürücüsü



Her iki motor için ayrı kontrol girişleri mevcuttur. Bu girişler 0-5V analog hız girişi olarak tanımlanabilirken, seri haberleşme protokolleri ile hız bilgisi aktarılabilir[20].

Motor sürücü hız bilgisi, mikrodenetleyici kart tarafından seri bilgi şeklinde iletilmektedir. Hesaplanan hızlar mikrodenetleyici kartı vasıtasıyla 1-127 arasındaki değerleri gönderildiğinde sağ motor için, 128-255 değerleri gönderildiğinde ise sol motor için hız bilgisi gönderilir. Motor sürücüsüne 0 bilgisi gönderilmesi sonucu her iki motor da ani olarak durdurulur.

### 3.2.2 Ölçüm sistemi hareket sağlayıcı olarak doğru akım motoru ve sürücüsü

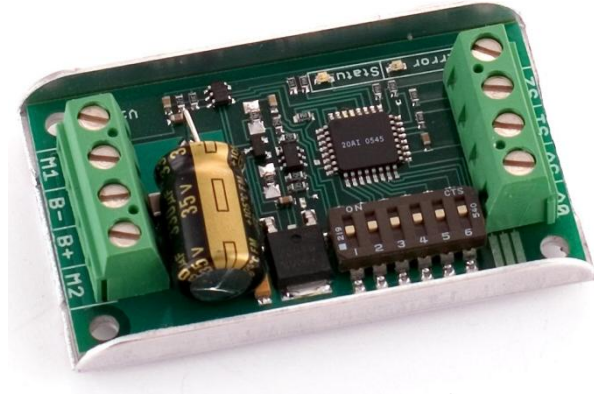
Mobil robot üzerinde bulunan görüntüleme sensörünün, sabit bir yarıçap ile yere paralel olarak tarama yapabilen bir eksen boyunca hareket ettirilmesi gerekmektedir. Sensörün hareketi için bir kol bulunmakta ve bir merkezden yay hareketi çizerek ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm açısı düşük tutulmuş dolayısıyla yay hareketi doğrusal harekete benzer olarak algılanmıştır.

Kolu hareket ettiren motor olarak, otomobil cam silme sistemlerinde kullanılan doğru akım motoru motoru seçilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20: Redüktörlü Doğru akım motoru

Doğru akım motorunu kontrol edebilmek için Dimension Engineering firmasının SyRen10 modeli motor sürücüsü kullanılmıştır.



Şekil 3.21: SyRen10 30Vdc 10A Doğru akım motor sürücüsü

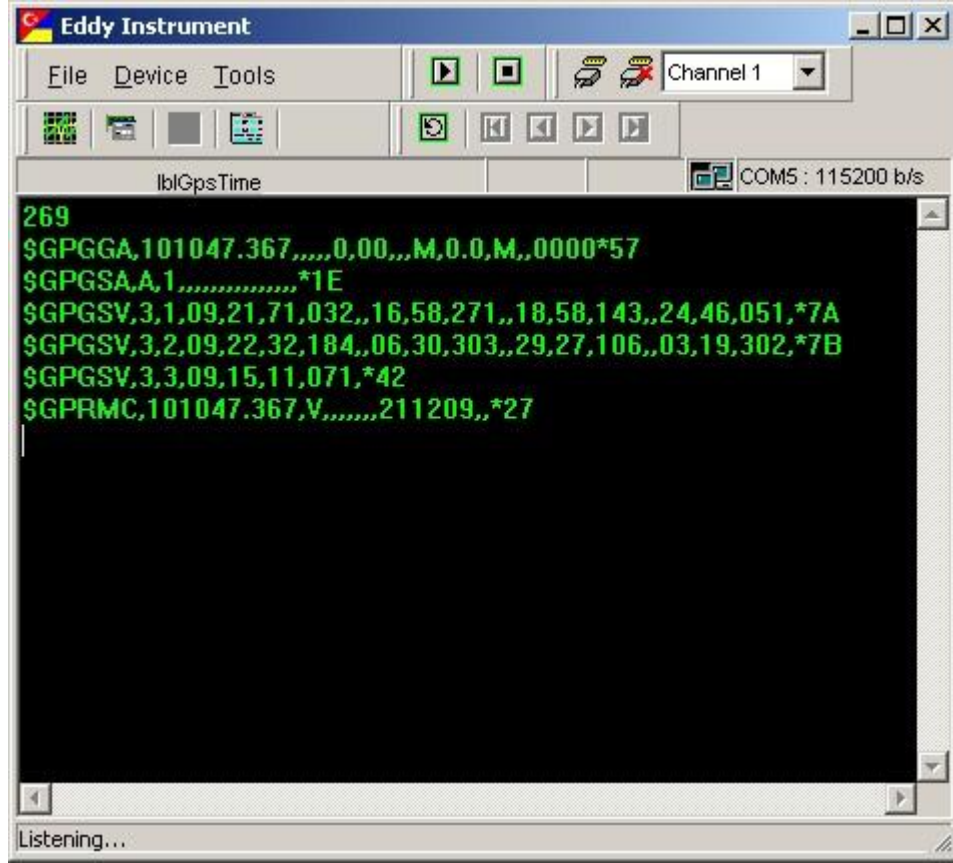
Robot hareket motorlarının sürücüsü olan SABERTOOTH 2x25 ile benzer kontrol özellikleri bulunan SyRen10 (Şekil 3.21) motor sürücüsü mikrodenetleyici kartı vasıtasıyla seri haberleşme portu üzerinden basit seri haberleşme protokolü ile kontrol edilir. Mikrodenetleyici tarafından gönderilen 0 hariç her bilgi motor hızlarını belirtirken 0 gelmesi durumunda motoru ani olarak durdurur.

### 3.3 Mobil Robot Bilgisayar Yazılımları

Mobil robot kontrolü ve RF mikrodalga sensörü sistemi ölçümü için çeşitli yazılımlar kullanılmışlardır.

#### 3.3.1 Mobil robot kontrol yazılımları

Mobil robot sisteminde, robot bilgisayarı ve kontrol bilgisayarı üzerinde, bu bilgisayarların bilgi aktarımı için iki farklı program geliştirilmiştir. bu programların ilki olarak Şekil 3.22'de gösterilen ve robot haberleşme bilgisayarı üzerinde çalışan haberleşme ve mikrodalga sensörü kontrol programıdır. Bu program ana bilgisayar tarafından gönderilen komutları, bilgisayara bağlı bulunan kontrol kartına iletir ve arada herhangi bir işlem yapmadığı için etkisiz olarak algılanabilir. Aynı şekilde GPS alıcısından gelen bilgiler herhangi bir işleme tabi tutulmadan ana kontrol yazılımına aktarılır.

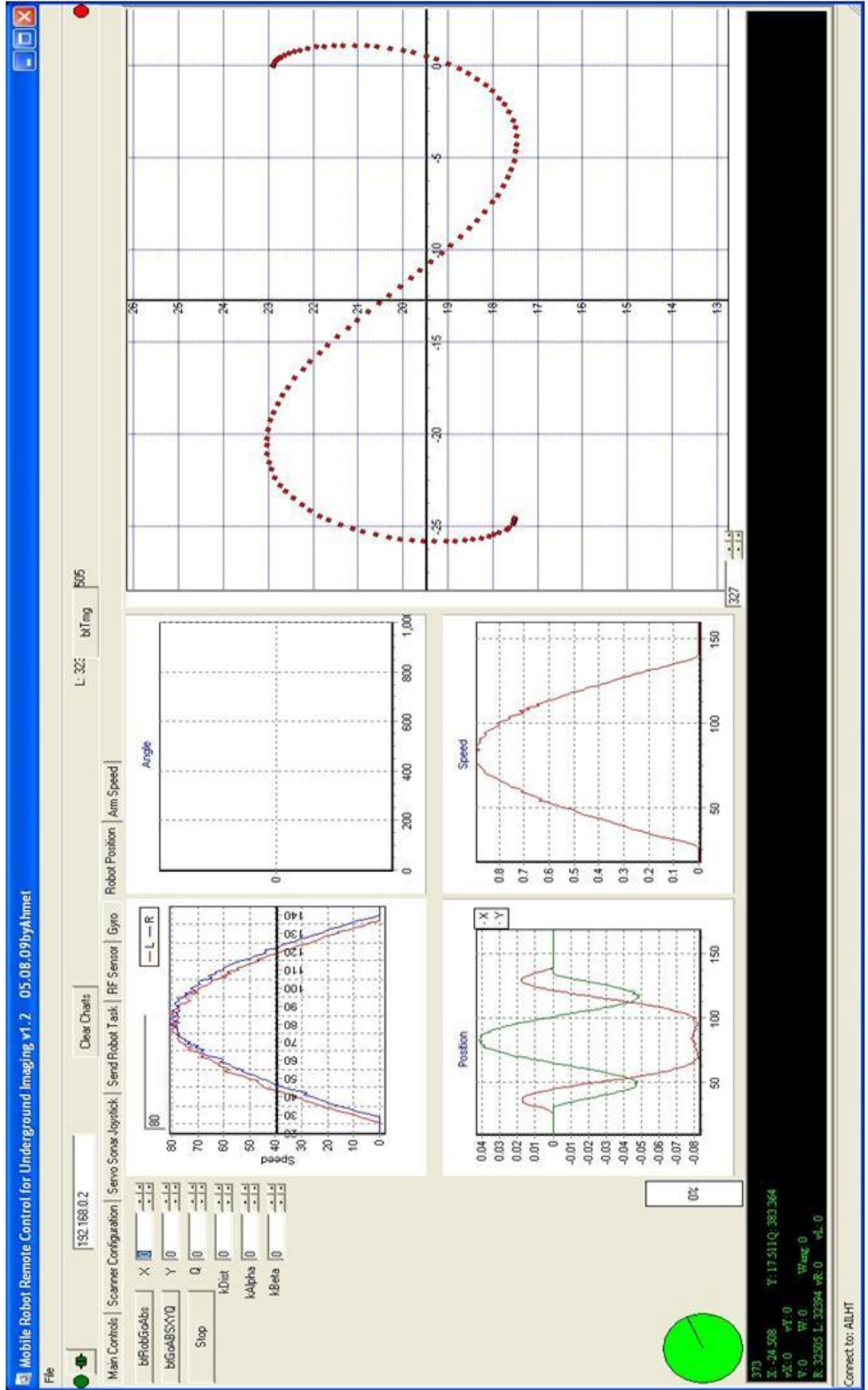


Şekil 3.22: Robot haberleşme yazılımı

Kontrol bilgisayarı üzerinde çalışması için tasarlanmış kontrol yazılımı Şekil 3.23'te verilmiştir. Bu yazılım vasıtasıyla, robot için tanımlanan tüm işlemler haberleşme yazılımına ve oradan da mikrodenetleyici kartına iletilmektedir. Bu program üzerinde, robot konumu ve yönelimi ile ilgili grafikler mevcuttur. Aynı zamanda, robot yörünge kontrolü veya konum kontrolü için gerekli değerler mikrodenetleyici kartına gönderilir ve istenilen konumlama sağlanır.

Bilgisayarlar arasındaki haberleşme TCP/IP protokolü ile gerçekleştirilmiş ve bu protokol için kullanılan haberleşme ortamı ise WLAN seçilmiştir.

Mobil robot kontrol ve haberleşme yazılımları Borland C++ Builder yazılımı vasıtası ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23: Robot kontrol yazılımı

Mobil robotun, konum ve yörünge kontrolü gibi kontrol işlemleri gerçekleştirilebiliyorken, daha basit bir kontrole de ihtiyacı vardır. Bu ihtiyaç belirsiz ve ani konum değişikliklerinde ortaya çıkmaktadır. Robotun daha basit kullanımı için robot kontrol yazılımına, bilgisayar oyunlarında kullanılan Şekil 3.24’te gösterilmiş olan oyun çubuğu, kumanda kolu olarak eklenmiştir.



Şekil 3.24: Kumanda kolu

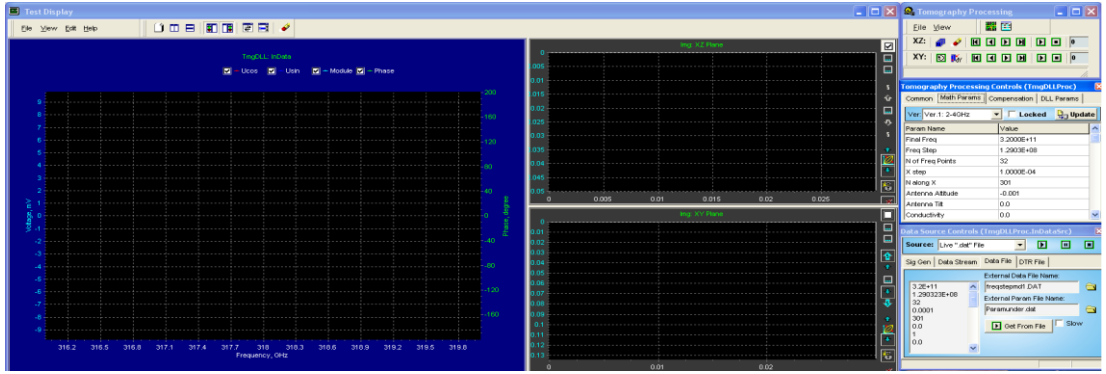
Kumanda kolu vasıtasıyla robot, serbest kullanım sırasında farklı yönlere, kol üzerindeki butonlarla veya x-y kolu ile hareket ettirilebilir. Hareket sırasında x-y kolunun eski pozisyonuna gelmesi ile robot hareketini bitirir ve durur.

Kumanda kolu üzerinde, iki farklı analog ayar kolu mevcuttur. Bu kolların her bir eksen için 16bit değerler üretilmektedir. Alınan bu değerler ile hız bilgileri üretilir.

### 3.4 Üç Boyutlu Görüntüleme Yazılımı

Mobil robot platformu üzerindeki mikrodalga sensör tarafından üretilen sinyaller, tomografi görüntüleme yazılımına aktarılmaktadır. Tarayıcı kolu kontrol eden motor üzerindeki enkoderden gelen darbe sinyalleri, mikrodalga sensör tarafından algılanır ve bu darbe sinyalleri ile ölçüm yapılır ve görüntüleme yazılıma aktarılır.

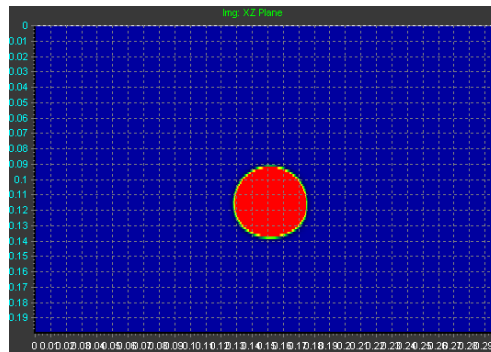
Görüntüleme yazılımı (Şekil 3.25)(TmgPrg.exe), yüzey altı görüntüleme algoritmaları içeren bir program olup Tübitak MAM Malzeme Enstitüsü UYTL bünyesinde geliştirilmiştir.



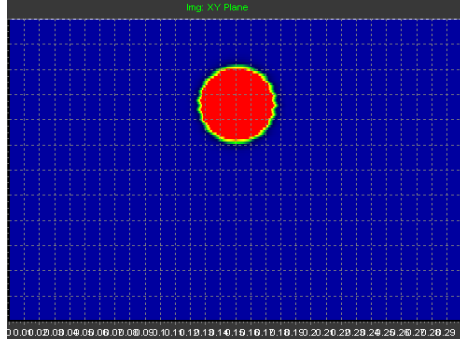
Şekil 3.25: Yüzey altı görüntüleme yazılımı

Her bir tarama sonucunda,  $X$  eksenini tanımlayan tarama eksenine karşılık  $Z$  derinlik bilgisi oluşturulur ve bu derinlik içerisinde tespit edilen homojen olmayan yapı mavi renkten kırmızıya doğru renklendirilir(Şekil 3.26).

Dikey kesitlerin görüntülediği her tarama sonrasında  $X$ - $Y$  doğrultusunda ölçüm ve hesaplama sonuçları elde edilerek  $X$ - $Y$  görüntüsü yatay düzleme paralel olarak görüntülenebilir(Şekil 3.27).



Şekil 3.26: Yüzey altı görüntüleme yazılımı  $X$ - $Z$  dikey kesit görüntüsü



Şekil 3.27: Yüzey altıgörüntüleme yazılımı  $X$ - $Y$  yatay kesit görüntüsü

#### 4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mobil robot uygulamalarından olan, arazi koşullarında gizlenilmiş nesnelere tespiti üzerine çalışma yapılmıştır. Yer altına gizlenen nesnelere tespit edilmiş ve bu nesnelere yatay ve dikey kesitleri görüntülenerek üç boyutlu görüntülemesi yapılmıştır.

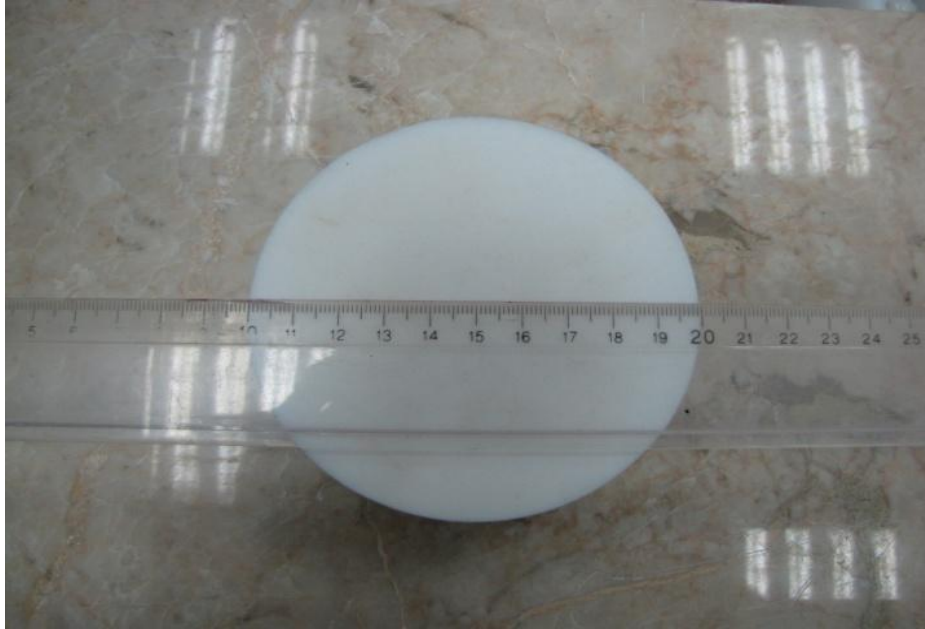
Mobil robot kontrol sistemi tasarlanırken, robotun mekanik yapısı kinematik ve dinamik yapılar olarak modellenmiştir. Tanımlanan model üzerinden deneysel ve benzetimsel uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalar sonucunda, benzetim ile benzer başarılı deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve benzetim ile deneyler arasında oluşan hataları aza indirmek için kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sistemlerinde ilk olarak robotun istenilen konuma ulaşması için konum kontrolü gerçekleştirilmiş ve konum hataları kapalı çevrim çalışma ile azaltılmıştır. Gerçekleştirilen diğer bir kontrol sisteminde ise, robotun istenilen konuma, seçilmiş zaman aralığında ve belirlenen yollar ile ulaşması için yörüngeler tanımlanmış ve yörünge kontrol sistemi geliştirilmiştir. Yörünge kontrolü sırasında, koordinat sisteminde her bir eksen için farklı yörüngeler belirlenmiştir. Yörünge kontrolü,  $X$ - $Y$  eksenleri ve  $\theta$  açısal konumu ile denenmiş ve istenilen yörüngelere yakın değerler elde edilmiştir.

Değişken ve dış ortamlar için tasarlanmış olan robot, çevresindeki nesnelere algılamak için sensörler ile donatılmıştır. Bu sensörlerden ultrasonik sonar sensörü vasıtasıyla çevredeki nesnelere 3m ile 2cm arasında algılanmış ve hareket yönündeki cisimlerle çarpışma engellenmeye çalışılmıştır. Aynı şekilde sonar sensörleri ile çevresel engeller tespit edilmiş ve konumları hakkında fikir elde edilmiştir. Sonar ile beraber çevresel durumları izleyebilmek için robot üzerine kamera sistemi yerleştirilmiş ve dört farklı kamera ile robot çevresinin görüntüsü elde edilmiştir. Robot konum algılaması için yerel düzeyde hareketlerin incelenmesi ve robotun kapalı çevrim uygulaması için jiroskop ve ivmeölçer kullanılmıştır. Jiroskop ve ivmeölçer ile robot hareketleri izlenebiliyorken, robotun dünya üzerindeki



konumunun algılanması için ise küresel konumlandırma sistemi olan GPS alıcısı ile dünya üzerindeki konum algılanmıştır.

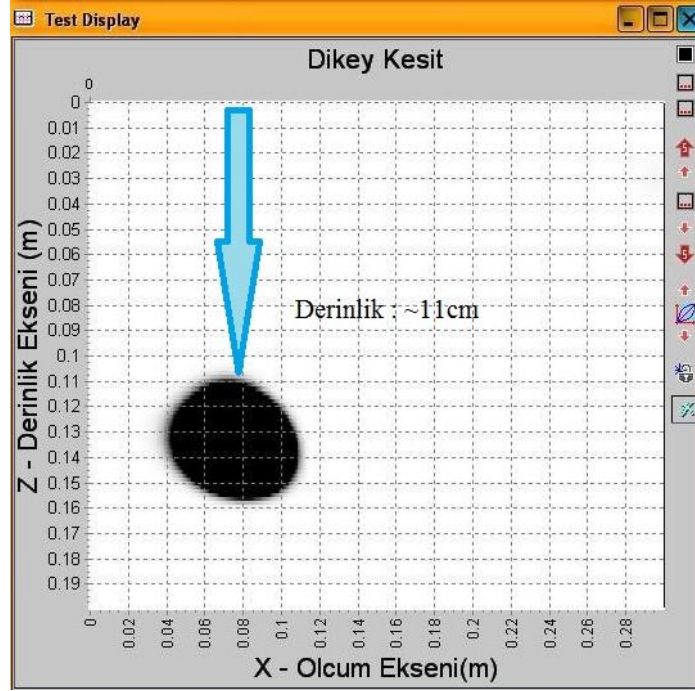
Mobil robot ile üç boyutlu görüntüleme için günümüzde ihtiyaç duyulan ve birçok araştırmaya sebep olan mayın araması uygulama alanı olarak seçilmiştir. Bu amaçla, yer altına gizlenmiş metal ve plastik nesnelere tespit etmek için deneyler yapılmıştır. Robot 5 metrelik bir doğrultuda tarayıcı kol vasıtasıyla 30cm genişliğinde ölçümler yapmış ve bu ölçümler sonucunda yer altına gizlenmiş olan teflon disk tespit edilmiştir. Tespit edilmesi için yere gömülmüş teflon disk için, sıklıkla karşılaşılabilen VS-50 anti-personel tipi mayın benzeri bir nesne kullanılmıştır.



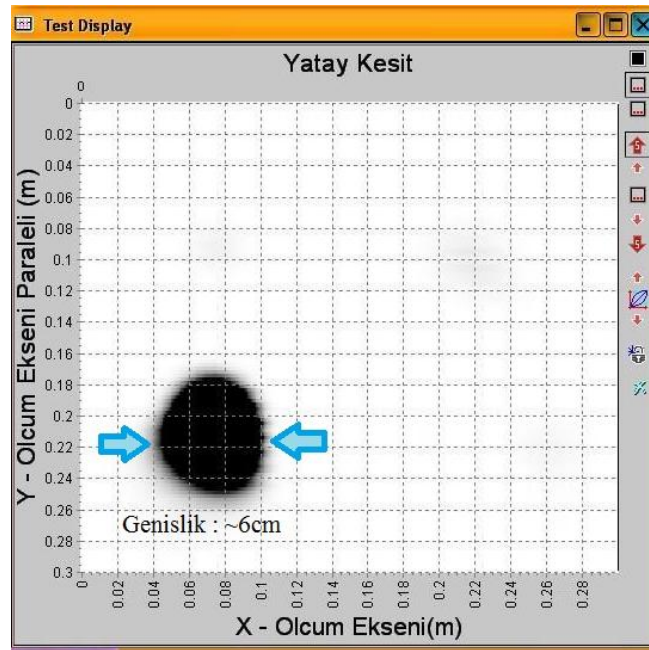
Şekil 4.1 : Yer altına gizlenmiş teflon disk

Teflon disk yer altına gizlenmeden önceki resmi Şekil 4.1’de verilmiştir. Disk çapı 10cm olarak ölçülmüşken Şekil 4.3’de elde edilen ölçüm sonrasında sonuç yaklaşık 6cm olarak tespit edildiği görülmektedir. Disk 14cm derinlikte bulunmaktayken Şekil 4.2’de görüldüğü üzere yaklaşık olarak 11cm de tespit edilmiştir. Yer altında yaklaşık 13cm derinliğe gizlenmiş olan kestamid disk Şekil 4.4’de verilmiştir. Kestamid disk için tespit edilen derinlik Şekil 4.5’de görüleceği üzere yaklaşık 11cm de tespit edilmiştir. Şekil 4.6’da elde edilen kestamid disk yatay kesiti görülmektedir. Kestamid disk ölçümü sonucunda genişliği 9cm olarak doğru bir şekilde tespit edilmiştir. Bu ölçümlerde oluşan hatalar, nesnenin gömüldüğü ortamın homojen olmaması ve ölçüm sisteminden kaynaklanan hatalardan meydana gelmektedir. Bu

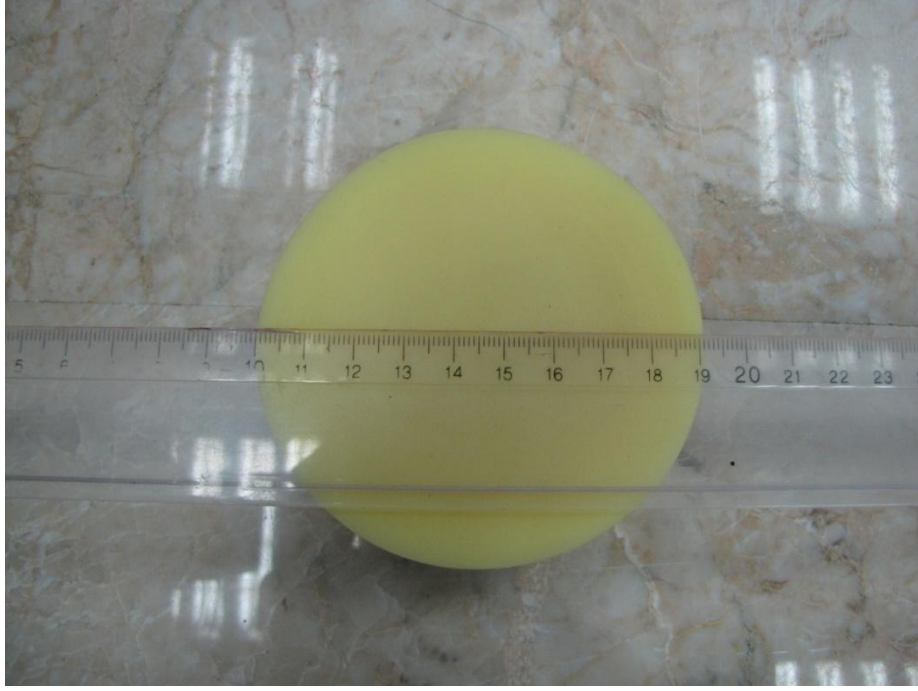
hatalar, hareket kolunun ölçüm çözünürlüğü ve ölçüm sensörü donanımının (anten ve tüm yüksek frekans bileşenleri) yapısından gelen kayıplardan kaynaklanmaktadır. Hataların iyileştirilmesi için, daha yüksek hassasiyetli bir tarama kolu ve daha yüksek hızlı ve yüksek dinamik yapıya sahip bir sensör kullanılabilir.



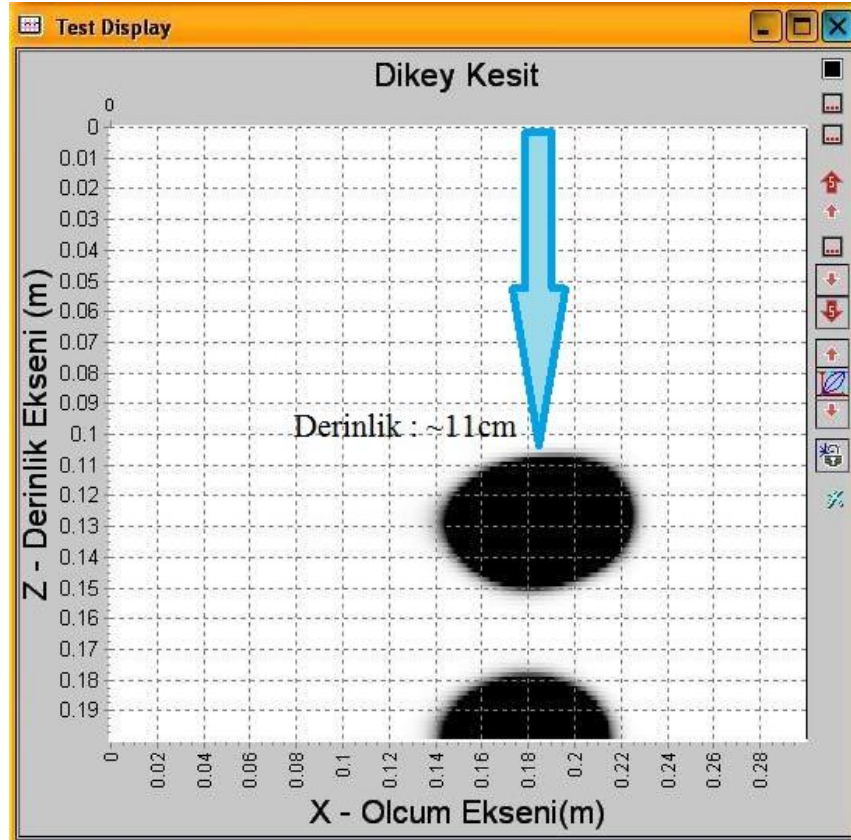
Şekil 4.2 : Yer altına gizlenmiş teflon diske ait dikey kesit görüntüsü



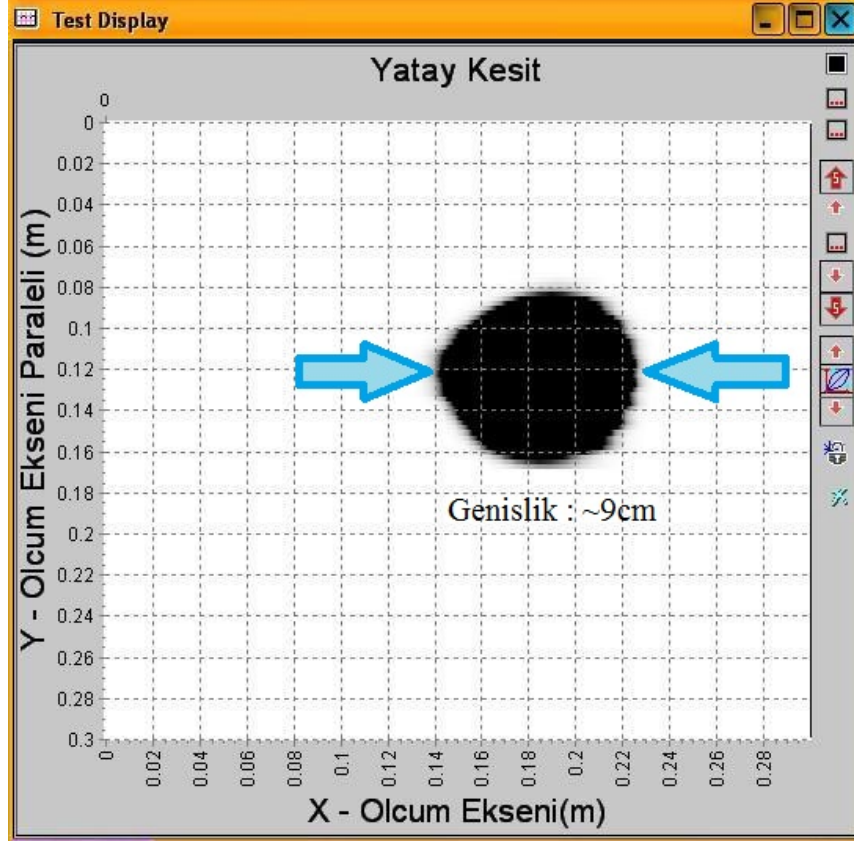
Şekil 4.3 : Yer altına gizlenmiş teflon diske ait yatay kesit görüntüsü



Şekil 4.4: Yer altına gizlenmiş kestamid disk



Şekil 4.5 : Yer altına gizlenmiş kestamid diske ait dikey kesit görüntüsü



Şekil 4.6 : Yer altına gizlenmiş kestamid diske ait yatay kesit görüntüsü

Elektromanyetik dalgalar ile çalışsan mikrodalga sensörü, dalgaların derine nüfuz edip, yayılmasının engellendiği ortamlarda işlevsiz kalırlar. Bu ortamlar, metal kapalı bir yüzey olabileceği gibi, ıslak veya su içeren bir zemin de olabilir. Dolayısıyla mayın gibi, tespit edilememesi durumunda tehlikeli durumlar oluşabilecek nesnelere için, bu sensör tek başına yeterli olmamaktadır. Mayın tespitinde kullanılacak bu sistem, farklı ölçüm sensörleri ile desteklenmelidir. Bu gibi özel durumlarda işlevsiz kalan sensörlerin çalışmadığı koşullarda çalışabilecek sensörler ölçümleri güvenli kılmak için kullanılmalıdır.

Robot kontrolü sırasında, konum ve hız komutlarını tam olarak yerine getiremediği ve hatalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu hatalar, robotun hareketini sağlayan motorların hızlı ve dinamik bir şekilde kontrol edilememesinden kaynaklanmaktadır. Mobil robot kasası ile temin edilen motorların ve sürücülerinin, yüksek hassasiyetteki görevler için tasarlanmadığı tespit edilmiştir. Robot, gözetleme ve taşıma gibi görevleri yerine getirebilecekken, hassas konumlandırma gerektiren uygulamalarda (mayın temizlemesi gibi) yeterince hassas konumlandırılmayacaktır. Bu amaçla

kullanılmak istenen bir robot üzerinde, daha hassas konum algılayıcıları ve yüksek çözünürlüklü hız kontrolü sağlayan motorlar ve sürücüler kullanılmalıdır.

Küresel robot konumu algılaması için kullanılan GPS alıcısı, robotun hareketleri göz önüne alındığında çok büyük hareketleri dahi algılayamaz. Standart uygulamalar için geliştirilen bu alıcı yerine daha hassas GPS alıcıları kullanılabilir. Bu durumda 10m çözünürlüğü olan ticari GPS alıcısı yerine, 50cm hassasiyetli ve yüksek maliyetli askeri GPS alıcısı kullanılabilir.

Çevresel engellerin algılanması için kullanılan ultrasonik sensörler, mobil robot çalışması sırasında robot doğrultusundaki kısıtlı alanda ölçümler yapabilmektedir. Daha yüksek çözünürlüklü çevre bilgisi istenmesi durumunda(haritalandırma gibi çalışmalarda) yüksek hassasiyetli lazer tarayıcılar kullanılabilir. Bu tarayıcılar, yalnızca robotun çarpma ihtimali olan nesnelere algılamak için değil aynı zamanda çevredeki tüm yapıyı görüntülemek için kullanılabilir.

Tasarlanan robot üzerindeki sensörler vasıtasıyla, yalnızca belirlenmiş yörüngeleri takip etme ve ölçüm yapma gibi uygulamalar denenmiştir. Bu uygulamaların ötesinde, karar verme yeteneği olan sistemler de geliştirilebilir. Bu amaçla tasarlanabilecek robot üzerinde, yüksek işlem gücüne sahip denetleyici sistemleri geliştirilmeli ve kullanılmalıdır.

Robot haberleşmesi için kullanılan WLAN, kısa mesafeli çalışma alanlarında kullanılabilecek bir haberleşme ortamıdır. Mobil robotun, daha uzak mesafelerden kontrol edilmek istenmesi durumunda, GSM veya 3G altyapıları kullanılabilir.

Yapılan bu çalışma sonrasında, elde edilen bilgiler ve tecrübeler doğrultusunda, daha yüksek başarılı ölçüm ve imha robotları gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Najjarana, H., Goldenberg, A., “Real-time motion planning of an autonomous mobile manipulator using a fuzzy adaptive Kalman filter”, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 55, Issue 2, Pages 96-106 (2007).
- [2] Fukushima, E.F., Debenest, P., Tojo, Y., Takita, K., Freese M., Radrich H., Hirose S., “Teleoperated Buggy Vehicle and Weight Balanced Arm for Mechanization of Mine Detection and Clearance Tasks”, *IARP International workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining*, (2005).
- [3] Wuwei, C., Mills, J.K., Wenwu, S., “A New Navigation Method for an Automatic Guided Vehicle”, *Journal of Robotic Systems*, Volume 21 Issue 3, Pages 129 – 139, (2004).
- [4] Río, F.D., Jiménez, G., Sevillano, J.L., Vicente, S., Balcells, A.C., “A path following control for unicycle robots”, *Journal of Robotic Systems*, Volume 18 Issue 7, Pages 325 – 342, (2001).
- [5] Prado, M., Simon, A., Carabias, E., Perez, A., Ezquerro, F., “Optimal Velocity Planning of Wheeled Mobile Robots on Specific Paths in Static and Dynamic Environments”, *Journal of Robotic Systems*, Volume 20 Issue 12, Pages 737–754, (2003).
- [6] Rajagopalan, R., Barakat, N., “Velocity control of wheeled mobile robots using computed torque control and its performance for a differentially driven robot”, *Journal of Robotic Systems*, Volume 14 Issue 4, Pages 325 – 340, (1997).
- [7] Miyata, J., Murakami, T., “Trajectory Tracking Control of Mobile Robot by Fluid Model”, *Electronics and Communications in Japan*, Volume 91 Issue 5, Pages 41 - 48, (2008).
- [8] 3D Laser Scanning Surveys , 3D Laser Scanning -ALS Surveys, Building Surveyors in the UK[online], <http://www.laser-scanning-buildings.co.uk/> (**Ziyaret Tarihi: 17 Nisan 2009**)
- [9] A. D. L. Humphris, M. J. Miles, J. K. Hobbs “A mechanical microscope: High-speed atomic force microscopy” *Applied Physics Letters* 86 (2005)
- [10] ScienceGL, 3D visualization of the surface measured with an atomic force microscope using semicontact height mode [online], [http://www.sciencegl.com/3dsurf/shots/dvd\\_spm.html](http://www.sciencegl.com/3dsurf/shots/dvd_spm.html) (**Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2009**)
- [11] A. A. Vertiy, S. P. Gavrilov, S. Aksoy, I. V. Voynovskyy, A. M. Kudelya, V.N. Stepanyuk, “Reconstruction of Microwave Images of the subsurface Objects by

Diffraction Tomography and Stepped-Frequency Radar Methods”, *Zarubejnaya Radioelektronika. Uspehi Sovremennoy Radioelektroniki (Russia)*, No: 7 pp. 17-52, (2001).

[12] A. Vertiy, S. Gavrilov, I. Voynovskyy, S. Aksoy, A.O .Salman, DIFFRACTION TOMOGRAPHY METHOD DEVELOPMENT IN WIDE FREQUENCY RANGE, *MMET 2000 Proceedings* (2000)

[13] A. A. Vertiy, S. P. Gavrilov, S. Aksoy, I. V. Voynovskyy, A. M. Kudelya, V.N. Stepanyuk, “Reconstruction of Microwave Images of the subsurface Objects by Diffraction Tomography and Stepped-Frequency Radar Methods”, *Zarubejnaya Radioelektronika. Uspehi Sovremennoy Radioelektroniki (Russia)*, No: 7 pp. 17-52, (2001).

[14] Analog Devices, ADIS16355: High-Precision Tri-Axis Inertial Sensor [online] <http://www.analog.com/en/other/multi-chip/adis16355/products/product.html> (**Ziyaret Tarihi: 31 Mayıs 2008**)

[15] Wikipedia, Global Positioning System [online] [http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System), (**Ziyaret Tarihi: 14 Ocak 2009**)

[16] GlobalSat, ET-318 GPS Engine Board[Online] [http://www.globalsat.com.tw/eng/product\\_detail\\_00000095.htm](http://www.globalsat.com.tw/eng/product_detail_00000095.htm) (**Ziyaret Tarihi: 15 Ocak 2009**)

[17] Parallax, PING))) Ultrasonic Sensor [Online], [www.parallax.com](http://www.parallax.com) (**Ziyaret Tarihi: 31 Ocak 2009**)

[18] USDIGITAL, HEDS Transmissive Optical Encoder Module, <http://usdigital.com/products/encoders/incremental/modules/heds/> (**Ziyaret Tarihi: 16 Aralık 2008**)

[19] AUTOMATION EXPRESS Pittman Series GM9000 Brush Commutated DC Gearmotors[Online] [http://www.automationexpress.com/Products/DC\\_Motors/GM9000\\_Series.aspx](http://www.automationexpress.com/Products/DC_Motors/GM9000_Series.aspx), (**Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2008**)

[20] Dimension Engineering , Sabertooth dual 25A motor driver [Online] <http://www.dimensionengineering.com/Sabertooth2X25.htm>, (**Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2008**)

## **KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER**

1. Kızılhan A., Toz M. , Aliustaođlu C., Bingöl Z., “Gezgin Robot Tasarımı ve Hareket Planlaması” *TOK'07 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Eylül 2007.



## **ÖZGEÇMİŞ**

1979 yılında Zonguldak'ta doğdu. Lise öğretimini 1995 yılında Tuzla Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı ve aynı yıl Tunçmatik AŞ. Firmasında çalışmaya başladı. Çalıştığı 3 sene içerisinde üretim sorumlusu olarak ve Ar-Ge asistanı olarak değişik bölümlerde çalıştı. 1998 yılında başladığı Marmara üniversitesi TBMYO'nda Elektronik Eğitimi aldı ve 2000 yılında mezun oldu. DGS sınavı ile Kocaeli üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde Elektronik öğretmenliği bölümüne başladı ve 2006 yılında mezun olduktan sonra Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Mekatronik Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005 yılında teknisyen olarak TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü UYTL 'da çalışmaya başladı ve 2006 yılından beri araştırmacı pozisyonunda çalışmaya devam etmektedir.