

168342

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**


**TEKERLEKLİ GEZGİN ROBOTLARDA SİSTEMATİK
ODOMETRİ HATALARININ BELİRLENMESİ VE
AZALTILMASI**

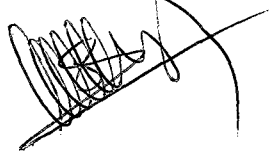
Elektrik Müh. Türker TÜRKER

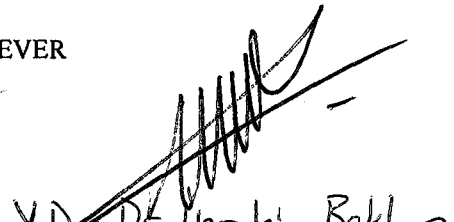
FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Kontrol ve Otomasyon Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Galip CANSEVER


Doç. Dr. Herman SEDEF




Y. Doç. Dr. İbrahim Bekler
KÜÇÜKDEMİRAL

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Gezgin Robotların Kullanım Alanları.....	2
2. TEKERLEKLİ GEZGİN ROBOTLARIN KİNEMATİK MODELİ	4
2.1 Tekerlekli Gezgin Robotlarda Taban Yapıları.....	4
2.1.1 Ackerman Sürüş.....	4
2.1.2 Senkron Sürüş	5
2.1.3 Omni Sürüş	5
2.1.4 Diferansiyel Sürüş.....	5
2.2 Tekerlekli Diferansiyel Sürülen Gezgin Bir Robotun Kinematik Denklemleri	8
3. GEZGİN ROBOTLARDA KULLANILAN ALGILAYICI VE HAREKETLENDİRİCİLER	12
3.1 Gezgin Robotlarda Kullanılan Algılayıcılar	12
3.1.1 Potansiyometreler	12
3.1.2 Enkoderler.....	12
3.1.3 Kızılötesi Algılayıcılar	14
3.1.4 Sonar Algılayıcılar	14
3.1.5 Lazer Mesafe Bulucular	16
3.1.6 Jiroskoplar.....	16
3.2 Gezgin Robotlarda Kullanılan Hareketlendiriciler	18
3.2.1 Doğru Akım Motorları	18
3.2.2 Adım Motorları	21
4. GEZGİN ROBOTLARDA KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ.....	25
4.1 Yer İşaretleri ile Konum Belirleme.....	25
4.2 Ataletsel Konum Belirleme	26
4.3 Odometri ile Konum Belirleme	26
4.3.1 Odometriden Kaynaklanan Hatalar	26

4.3.1.1	Sistematik Hatalar	27
4.3.1.2	Sistematik Olmayan Hatalar	27
4.3.2	Sistematik Odometri Hatalarının Belirlenmesi	27
5.	SİSTEMATİK ODOMETRİ HATALARININ AZALTILMASI	29
5.1	Uygulamada Oluşturulan Tekerlekli Gezgin Robot	31
6.	SONUÇ	35
KAYNAKLAR		36
EKLER		39
Ek 1 Uygulamada kullanılan motor sürme devresi		40
Ek 2 Program akış diyagramı		41
Ek 3 3m'lik hareketi sağlayan assembly program kodu		42
Ek 4 3m'lik hareket ile beraber sonrasında 90°'lik dönüşü sağlayan assembly program kodu		52
Ek 5 Bir kenarı 3m olan kare etrafındaki hareketi sağlayan assembly program kodu		64
ÖZGEÇMİŞ		76

SİMGE LİSTESİ

A	DRAM'nda bir adımlık dönüş açısı
b	Dönüş merkezine yakın olan tekerlek ile dönüş merkezi arasındaki mesafe
C_l	Sol tekerleğin 360°'lik dönüşü için kat edeceği mesafe
C_r	Sağ tekerleğin 360°'lik dönüşü için kat edeceği mesafe
C_t	Enkoderin bir tam tur dönüşünde alınan darbe sayısı
d	Tekerlekler arasındaki mesafe
d_s	Sonardan alınan mesafe bilgisi
ds_L	Robotun sol tekerleğinin bir örnekleme süresi içindeki yer değişimi
ds_{min}	Sonarın ölçebileceği minimum mesafe
ds_{max}	Sonarın ölçebileceği maksimum mesafe
ds_R	Robotun sağ tekerleğinin bir örnekleme süresi içindeki yer değişimi
D	Robotun yer değiştirme mesafesi
D_l	Sol tekerleğin yer değiştirme mesafesi
D_r	Sağ tekerleğin yer değiştirme mesafesi
e_x	x ekseninde oluşan hata
e_y	y ekseninde oluşan hata
e_θ	Yönelim hatası
N_L	Sol enkoderden alınan darbe sayısı
N_r	DRAM rotor diş sayısı
N_R	Sağ enkoderden alınan darbe sayısı
N_s	DRAM stator diş sayısı
r	Potansiyometrenin anlık direnci
R	Potansiyometrenin nominal direnci
R_{ADM}	Robotun merkezi ile ADM arasındaki mesafe
R_{EL}	Sol tekerleğin gerçek yarıçapı
R_{ER}	Sağ tekerleğin gerçek yarıçapı
R_L	Sol tekerlek yarıçapı
R_R	Sağ tekerlek yarıçapı
t	Zaman
t_b	Sonarın gönderdiği darbe süresi
t_e	PWM işaretinin etkinlik süresi
t_w	Sonarda iki darbenin gönderilmesi arasında geçen süre
T	PWM işaretinin periyodu
v	Robotun hızı
v_l	Sol tekerleğin hızı
v_r	Sağ tekerleğin hızı
v_s	Ses hızı
V_o	Çıkış gerilimi
V_{ref}	Referans gerilimi
ω_l	Sol tekerlek dönüş oranı
ω_r	Sağ tekerlek dönüş oranı
X, X_A, X_B	Robotun x eksenine göre konumu
Y, Y_A, Y_B	Robotun y eksenine göre konumu
$\theta, \theta_A, \theta_B$	Robotun referans eksene göre yönelimi
Φ	Radyan cinsinden tekerlek dönüşü
α	Robotun ADM'ye göre çizdiği yayın açısı değeri

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog to Digital Converter
ADM	Anlık Dönüş Merkezi
DC	Direct Current
DRAM	Değişken Relüktanslı Adım Motorları
GPS	Global Positioning System
LMB	Lazer Mesafe Bulucular
MEMS	Mikro Elektromekanik Sistemler
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
SMAM	Sabit Miknatıslı Adım Motorları
TGR	Tekerlekli Gezgin Robotlar



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Ackerman sürüş	4
Şekil 2.2 Dört tekerlekli senkron sürülen bir robot tabanının alttan (a) ve üstten (b) görünümü	5
Şekil 2.4 Tekerleklerin aldıkları yola göre yönelimin değişimi	7
Şekil 2.5 Tekerleklerin yere deyme noktalarındaki belirsizlikler.....	7
Şekil 2.6 Tekerleğin üzerindeki yüke göre yarıçap değişimi.....	8
Şekil 2.7 ADM'li ve ADM'siz TGR yapıları	9
Şekil 2.8 Diferansiyel TGR dt süresi içindeki hareketi	10
Şekil 3.1 Enkoder pencere yapısı ve A,B ve Z fazlarına ait işaretler	13
Şekil 3.2 50 kHz'lik frekansta sonar yayılma örneği	15
Şekil 3.3 Eksen takımları ve yaw eksenli bir jiroskoplara roll (yalpa) eksenini ölçümü.....	16
Şekil 3.4 Rezonans silikon kütleli coriolis etkisine cevabı.....	17
Şekil 3.5 Rezonasyon kütleli çerçevenin dış çerçeveye bağlantısı.....	18
Şekil 3.6 Tek sargılı iki kutuplu DC motor	19
Şekil 3.7 Örnek bir PWM işareti	20
Şekil 3.8 Örnek bir H-köprü devresi.....	20
Şekil 3.9 Örnek bir röle yarı iletken güç devresi	21
Şekil 3.10 Değişken relüktanslı adım motorunun basit yapısı	23
Şekil 3.11 Sırası ile BCDA fazları enerjilendirildiğinde rotorun dönüşleri	24
Şekil 3.12 Adım motoru sürme sinyalleri.....	24
Şekil 4.1 İşaretler ile konum belirlemenin temel prosedürü.....	25
Şekil 4.2 Kare testi için bir örnek	28
Şekil 5.1 Oluşturulan sistemin genel blok diyagramı	34
Şekil Ek 1.1 Uygulamada kullanılan motor sürme devresi	40

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1 3m'lik harekette oluşan hatalar.....	33
Çizelge 5.2 3m düz 90° dönüş hareketinde oluşan hatalar	33
Çizelge 5.2 3m kenarı olan kare etrafında hareket	34



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın oluşumu süresince hiçbir konuda benden yardımını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Galip Cansever'e, sabırlarından ve anlayışlarından dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu tezin hazırlanması esnasında bana her fırsatta destek olan çalışma arkadaşlarım Arş.Gör. Muharrem Mercimek ve Arş.Gör. Janset Kuvulmaz'a, ve yine tez için gerekli donanımların hazırlanmasında sürekli bir şeyler yapmaya çalışan Emre Günaşan ve Onur Akbatı'ya yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Yine bu çalışmanın sonlandırılmasında büyük pay sahibi olan, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayıp her zaman yanımda olduğunu hissettiren, arkadaşım Arş.Gör. Akın Delibaşı'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Günümüzde özellikle insanların çalışamayacağı veya insanların çalışmasının tehlikeli olduğu ortamlarda robotlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Robot manipulatörlerin özellikle endüstri alanında fazlaca kullanıldığı bilinmektedir. Manipulatörler bir yere sabit olup, çalışabildikleri alan kendi boyutlarıyla sınırlıdır. Bu dezavantajın giderilmesi açısından gezgin robotların kullanımı önem kazanmaktadır. Gezgin robotlar konumunu değiştirebilen özerk veya yarı özerk sistemler olarak bilinmektedirler.

Gezgin robotlarda en önemli problemlerden bir tanesi robotun konumunu hatasız bir şekilde belirleyememesidir. Bunun için çeşitli yöntemler mevcut olup bunlardan en yaygın olarak kullanılanı odometridir. Odometride robotun tekerleklerinden alınan dönüş bilgisi yer değiştirme bilgisine dönüştürülerek, kısa örnekleme zamanlarıyla robotun konumu belirlenmektedir. Fakat robotun mekanik özellikleri, tekerlekler arası mesafenin belirsizliği, tekerlek çaplarının farklılığı gibi sebeplerle konum bilgisinde hatalar meydana gelmektedir. Bu oluşan hataları minimuma indirmek konumlama çalışmalarında üzerinde durulması gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada tekerlekli gezgin robotlarda odometri hatalarının belirlenmesi ve azaltılması konuları incelenmiştir. Bunun için diferansiyel sürülen bir tekerlekli gezgin robot sistemi oluşturulmuş ve hatalar belirlenerek azaltılmaya çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Gezgin robotlar, konumlama, odometri.

ABSTRACT

There has been an extensive usage of the robots recently, especially for some applications in which human employment is extremely dangerous. Robot manipulators are widely applied to industrial areas. Manipulators are the stationary structures and they can operate in a limited area limited with their dimensions. To supply a satisfying operation effectiveness to overcome this disadvantage, mobile robots are used. Mobile robots are known as either autonomous or semi-autonomous structures that can achieve replacement.

That robots cannot determine their position in the space accurately, is one of the most important problems. Among a number of methods, odometry is the most common one. In odometry, the position of the robots is determined by converting the rotation information of the wheels to displacement information in short time periods. However, there exist some errors due to some reasons such as, uncertainties of effective point of contact between wheel and floor, variations of the wheel diameters, and mechanical features of the robots. Minimizing these errors is a very important issue in positioning applications on mobile robots.

The main focus of this thesis is determination and reduction of the odometry errors of the wheeled mobile robots. In this study, a differential drive wheeled mobile robot system is constructed to determine odometry errors and reduce them.

Keywords: Mobile robots, dead-reckoning, odometry.

1. GİRİŞ

Gezgin robotların kısmi veya tam özerk (otonom) olmasına bağlı olarak bilinmeyen ortamları keşif amaçlı kullanılması en temel özellikleridir. Gezgin robotlar için akıllı davranış ve özerklik açısından birçok ilginç teorik bakış açısının bulunması ve insan aktivitelerinde uygulanabilirliği olmasından dolayı gezgin robotlar konusu mühendislik sistemlerinde oldukça yaygın bir konudur. Gezgin robot sistemleri için bir tanım bulunmaması ile birlikte robot kelimesi Çekoslovakça'daki 'robota' sözcüğünden gelmekte olup Webster's sözlüğünde şu şekilde tanımlanmıştır: "insanların işlerini yapabilen otomatik alet". Bu tanıma göre günlük hayatta kullanılan birçok küçük büyük alete robot denilmelidir, fakat gerçekte durum bu şekilde değildir. Amerikan Robot Enstitüsü daha kesin olan şu açıklamayı yapmıştır: "robot; özel aletleri, parçaları bir yerden bir yere götürmek için tasarlanmış, tekrar programlanabilir çok fonksiyonlu bir makinedir" (Delibaşı, 2004). Ayrıca Uluslararası Standartlar Organizasyonu endüstriyel robotu şu şekilde tanımlamaktadır: "Otomatik, servo kontrollü, serbestçe programlanabilen, çalışma parçalarını, araçları ve bazı özel aletleri tutmak için kullanılan birkaç eksenli çok amaçlı manipülatördür" (Nwokah ve Hurmuzlu, 2002).

Yukarıdaki açıklamadan anlaşılacağı üzere endüstriyel robot terimi manipülatör kelimesi ile aynı anlamda kullanılmıştır, bunun anlamı mekanik bir sistemin bir tabana sabitlenmesidir. Ayrıca şu görülmektedir; bir robot programlanabilir kontrol sistemine sahip olmalıdır, böylece farklı amaçlar için kullanım olanağı doğmaktadır. Bir gezgin robotun bu tanımlamalarda bulunmayan iki gerekli özelliği bulunmaktadır ki bunlar konum değişikliği ve özerklidir. Konum değişikliği robotun, sonlu bir zamanda (X_A, Y_A, θ_A) konumundan (X_B, Y_B, θ_B) konumuna geçebilme yeteneğidir. Endüstriyel, iyi yapılanmış bir ortamda bir robot manipülatörü bir görevi yerine getirmek üzere programlamak zor değildir, diğer taraftan gezgin bir robot endüstriyel bir ortamda bulunabildiği gibi doğal bir ortamda veya insanların yaşam alanında bulunabilir. Endüstriyel gezgin robotlara otomatik, operatörlü araçlarda denilmektedir. Bu araçlar tipik olarak taban döşemesinin altına sabitlenmiş bir elektromanyetik kaynak ile yönlendirilirler. Buna dayanarak operatörlü araçlar özerk bir robot olarak tanımlanamaz. Özerk bir sistem bir görevi insan asistan veya elektronik rehber sistem olmadan yerine getirebilmelidir, ortamı tanımlayabilmek için planlama ve keşif özelliklerine sahip olmalıdır. Bu anlatımdan sonra özerk gezgin robot tanımı şu şekilde yapılabilir: "doğal veya yapay engellerin bulunduğu bir ortamda bağımsızca dolaşabilen özerk bir sistemdir. Gövdesinde tekerlekler veya bacaklar bulunabilir ayrıca çeşitli görevler için üzerinde bir robot manipülatör bulunabilir. Birçok önceden planlanmış operasyonu, ortamın mevcut durumunu

göz önüne alarak programlanmış bir keşif stratejisi ile yerine getirir” (Nwokah ve Hurmuzlu, 2002).

Gezgin robotların çalışma alanı birçok disiplin arasında paylaşılmıştır. Bunların başlıcaları makine mühendisliği (araç tasarımı, bazı hareket mekanizmaları), bilgisayar bilimleri (algılama ve planlama algoritmaları), elektrik mühendisliği (sistem birleşimi, algılayıcılar) olarak belirtilebilir.

1.1 Gezgin Robotların Kullanım Alanları

Günümüzde gezgin robot sistemleri çoğunlukla deneysel olarak kullanılmasına rağmen, endüstriyel ortamlarda kullanılması günden güne artmaktadır. Günümüz gezgin robotlarının başarıyla kullanıldığı gerçek uygulamalar olarak bir insan operatörün olmaması, potansiyel yüksek ücret ve insanların çalışmak istemediği ortamlar sayılabilir. Robotlar özellikle aşağıdaki karakterde olan görevler için uygundur.

- İnsanların çalıştırılmasının çok pahalı veya çok tehlikeli olabileceği durumlar.
- İnsanların gönderilmesinin çok zor olması veya çok zaman alacağı durumlar. Örnek olarak insanlar tarafından ulaşılamaz mikroskobik ortamlar.
- Çok uğraştırıcı veya yorucu işler.
- Bir insanın yapmaktan hoşlanmayacağı işler.

Gezgin robotlarda başarılı endüstriyel uygulamalar bu karakteristiklerin bir veya birkaçını içermektedir. Örnek olarak yeraltı kaynaklarında bir uygulama düşünebiliriz. Bu ortam çökme olabilmesi veya ölümcül gaz sızıntıları açısından oldukça tehlikelidir, ayrıca burada çalışacak olan insanlar çalışma ortamına ulaşmak için çok uzun mesafe gitmelidirler. Kaya yüzeyinde madenci dar, loş, sıcak ve tehlikeli bir ortamda çalışmak durumunda kalmaktadır (Dudek ve Jenkin, 2000).

Genel bir bakışla mobil robotların kullanım alanları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Sağlık hizmetleri,
- Askeri uygulamalar,
- Hapishane ve güvenlik ortamları,
- Tehlikeli ortamlar,

- Petrol boru hatları,
- Yaşam alanları,
- Eğlence,
- Uzay ve gezegen keşifleri,
- Su altı uygulamaları,
- Ulaştırma,
- Madencilik,
- Bomba ve mayın tarama.



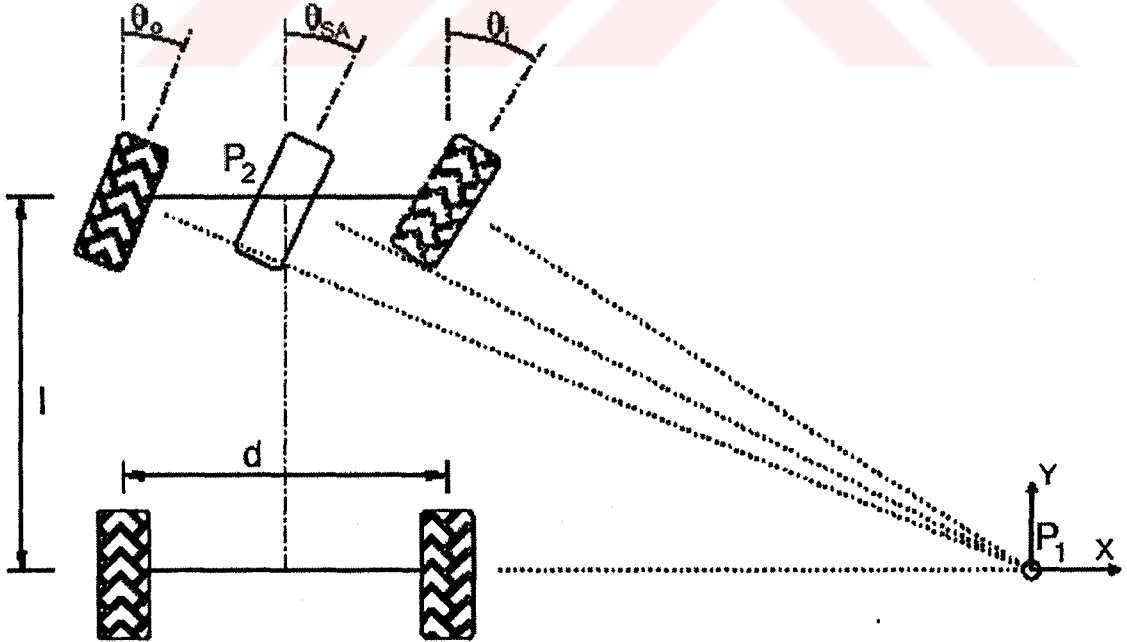
2. TEKERLEKLİ GEZGİN ROBOTLARIN KİNEMATİK MODELİ

2.1 Tekerlekli Gezgin Robotlarda Taban Yapıları

Gezgin robotlarda kullanılan taban iki boyutta hareket edebilmelidir. Tabanın en basit şekli 3 serbestlikli olup bu serbestlikler x, y konum ve θ yönelimdir. Bu serbestliklerin sayısı arttıkça taban yapısı da karmaşıklaşır. Bununla beraber gezgin robot araştırmaları için kullanılan taban yapılarının büyük kısmı tek parça olup bu tabanlarla konum ve yönelim kolayca kontrol edilebilir. Gezgin robotlarda hareketin sağlanabilmesi açısından taban yapılarının önemi büyüktür. Robottan yapılması istenilen göreve göre robotun nasıl hareket edeceği ve ne gibi donanımlara sahip olması gerektiği belirlenir, bu etkenler robotun taban yapısını doğrudan etkiler. Gezgin robotlarda sürüş teknikleri, taban yapılarına göre belirlenmektedir, yaygın olarak kullanılan sürüş teknikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

2.1.1 Ackerman Sürüş

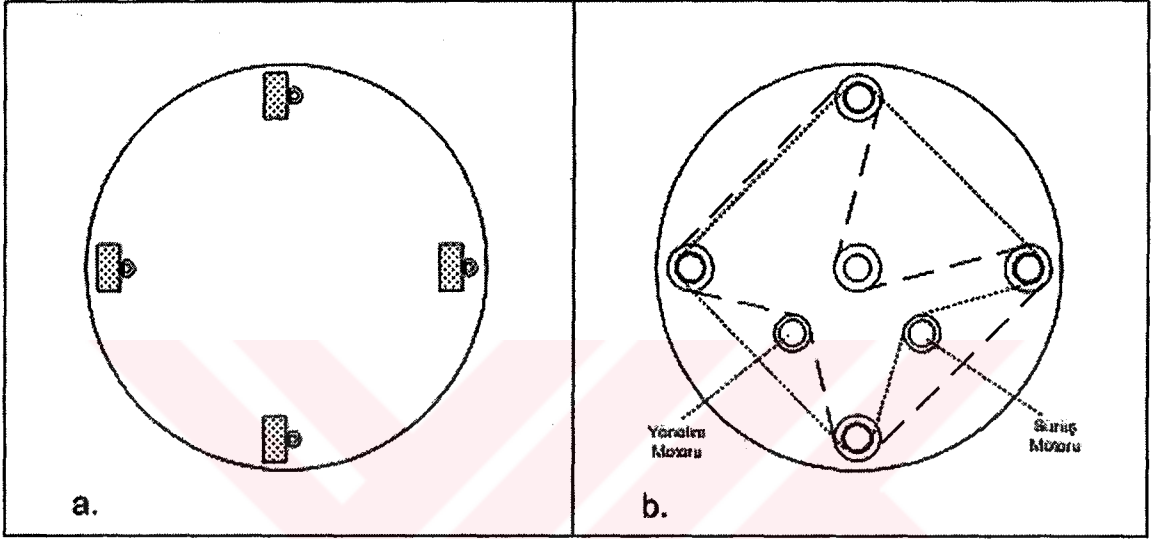
Ackerman tip gezgin robotlar günlük hayatta kullanılan arabalar ile aynıdır. Bu tip sürüşte mekanik bir sürüş mekanizması sayesinde dönüş esnasında ön kısımdaki sürüş tekerleklerinde herhangi bir kayma oluşmaz. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi öndeki tekerleklere farklı açılarda dönüşler yaptırılarak bu sağlanmış olur. (Everett, 1995)



Şekil 2.1 Ackerman sürüş

2.1.2 Senkron Sürüş

Bu teknik kapalı alanlarda kullanılan gezgin robotlar için uygun olup özel bir sürüş çeşididir. Bu sürüş tipinde robot 3 veya daha fazla tekerleğe sahiptir. Tüm tekerlekler aynı yönde ve aynı hızda dönebilecek şekilde mekanik olarak birbirine bağlanmıştır ve dönüş esnasında sürüş eksenine bağlı olarak eş zamanlı yön alırlar. Bu sürüşte, tüm tekerlekler tüm zamanlarda eşit ve paralel kuvvet vektörleri üreteceğinden, kaymanın azalmasıyla birlikte odometri hataları azalmış olur.



Şekil 2.2 Dört tekerlekli senkron sürülen bir robot tabanının alttan (a) ve üstten (b) görünümü

2.1.3 Omni Sürüş

Bu sürüşteki taban yapısı senkron sürüştekine benzer, fakat her tekerlek herhangi bir yönde dönebilecek şekilde karmaşık bir mekanizmaya sahiptir.

2.1.4 Diferansiyel Sürüş

Bu tip sürüşte robotun iki tarafında birbirinden bağımsız hareketlendirilebilen iki tekerlek bulunmaktadır. Dengenin sağlanması açısından robotun ön veya arka kısmına birer adet kastor tekerlek monte edilir. Bu yapı robotun dikey ekseninde rahatça dönüş yapabilmesine izin verir. Motor hızları motorlara akuple edilmiş enkoderler sayesinde ölçülebilir ve hesaplanabilir. Yüksek çözünürlüklü bir enkoder bir tekerlek dönüşü için binlerce darbe üretebilir. Böylece odometri hesaplamaları için oldukça ayrıntılı yer değişimi ve hız bilgileri elde edilebilir.

Robotun hareket boyunca yer değiştirmesi aşağıdaki denklemle verilir.

$$D = \frac{D_l + D_r}{2} \quad (2.1)$$

benzer şekilde hızda,

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (2.2)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Sol tekerleğin tam bir dönüş için alacağı mesafeyi hesaplamak için denklem (2.3) ve (2.4) kullanılır.

$$C_l = 2\pi(d + b) \quad (2.3)$$

$$C_l = \frac{2\pi D_l}{\theta} \quad (2.4)$$

(2.3) ve (2.4) eşitlikleri yardımıyla,

$$\theta = \frac{D_l}{d + b} \quad (2.5)$$

olarak hesaplanır. Benzer işlemler iç yay içinde yapıldığında,

$$C_r = 2\pi b \quad (2.6)$$

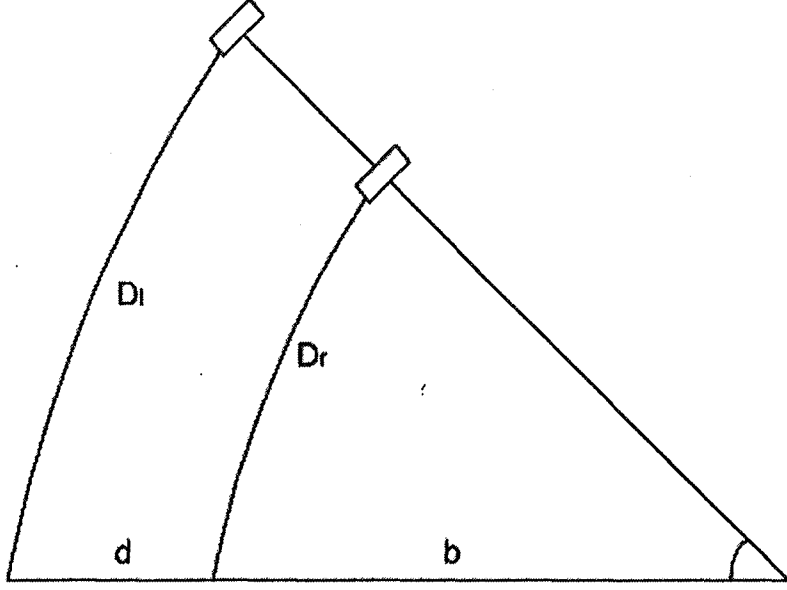
$$C_r = \frac{2\pi D_r}{\theta} \quad (2.7)$$

$$b = \frac{D_r}{\theta} \quad (2.8)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (2.8), (2.5)'de yerine konulduğunda,

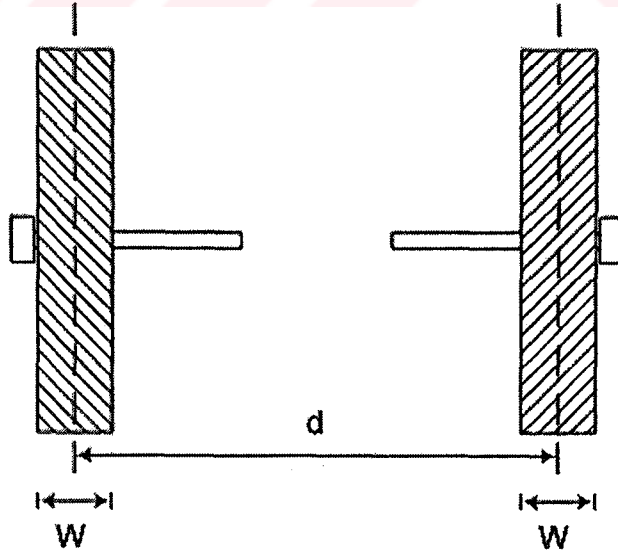
$$\theta = \frac{D_l - D_r}{d} \quad (2.9)$$

olarak hesaplanabilir.



Şekil 2.4 Tekerleklerin aldıkları yola göre yönelimin değişimi

Araç yönelimindeki bu değişim tanımı, sağ ve sol tekerleklerin yer değişiminin bir fonksiyonudur ve gidilen mesafeden tamamen bağımsızdır. Bununla birlikte paydadaki d değeri Şekil 2.5’de gösterildiği gibi tekerleklerin deyme noktası ile bağlantılı belirsizliklerden dolayı bir hata kaynağı olarak düşünülmelidir. Tekerlekler arası mesafe basitçe merkezden merkeze olarak belirlenir. Robotun hareket yüzeyindeki düzlemsel olmama gibi bozukluklar, tekerleklerin etkin noktasının kayması ile araç yönünün değişmesine neden olabilir.

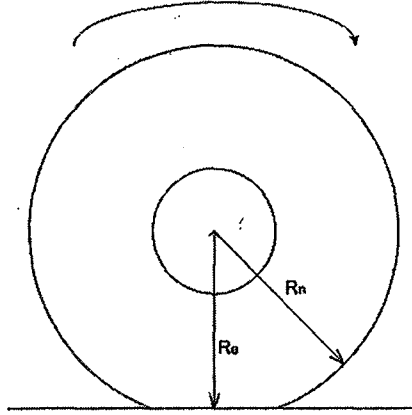


Şekil 2.5 Tekerleklerin yere deyme noktalarındaki belirsizlikler

Şekil 2.6’yı göz önünde bulundurduğumuzda,

$$D_l = \phi \cdot R_{el} \quad (2.10)$$

olduğundan, enkoderden gelen bilgiye göre,



Şekil 2.6 Tekerleğin üzerindeki yüke göre yarıçap değişimi

$$D_l = \frac{2\pi N_l}{C_l} R_{el} \quad (2.11)$$

olup, aynı eşitlik sağ tekerlek içinde yazılabilir.

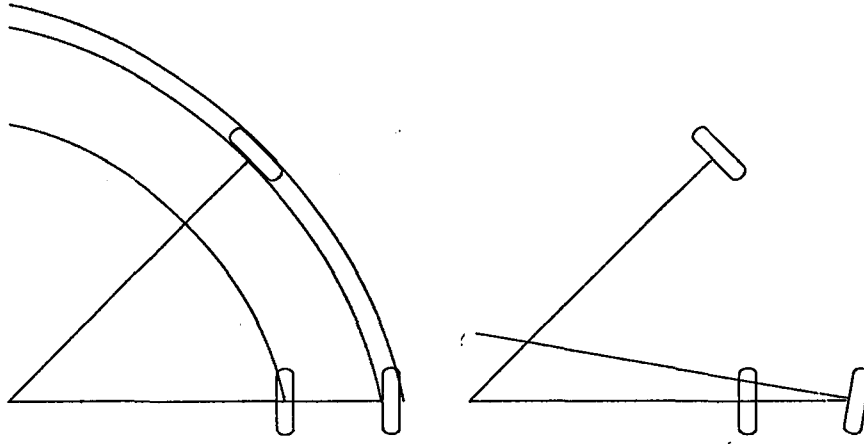
$$D_r = \frac{2\pi N_r}{C_r} R_{er} \quad (2.12)$$

2.2 Tekerlekli Diferansiyel Sürülen Gezgin Bir Robotun Kinematik Denklemleri

Tekerlekli gezgin robotların (TGR) kinematik denklemlerinin oluşturulmasında anlık dönüş merkezi (ADM) yöntemi geometrik bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. ADM yönteminde tüm tekerleklerin dönme eksenlerinin bir noktada kesiştiği kabul edilir. Eğer bu kabul doğru ise, her tekerlek kayma olmadan dönebilir ve robot merkezi ADM olan bir yay etrafında hareket edebilir.

Şekil 2.7’de iki farklı 3 tekerlekli robot yapısı görülmektedir. Soldaki yapıda, her tekerleğin dönme eksenini bir noktada kesişmektedir, böylece robot, tekerlekleri kaymadan hareket edebilir. Sağdaki yapıda ise tekerleklerin dönme eksenleri kesişmemektedir. Bu durumda dönme hareketi mümkün değildir ve robot, tekerlekleri kaymadan hareket edemez.

ADM yöntemi ile kinematik yapıda robot ADM etrafında bir yay çizer. Her bir tekerlek sabit bir süre içinde eşit yay açıları kat ederler. ADM yöntemi ile robot kinematik denklemleri için aşağıdaki hesaplamalar yapılabilir.



Şekil 2.7 ADM'li ve ADM'siz TGR yapıları

1. Robotun kinematik modelinin çıkarılması,
2. Her tekerleğin döner eksen boyunca hatlarının çıkarımı ve ADM'nin tanımlanması,
3. Her tekerlek için yay genişliği ile tekerlek dönüşü arasındaki bağıntıların çıkarılması,
4. ADM'nin robot parametrelerinin fonksiyonu gibi türetilmesi,
5. 3 ve 4. adımlardaki denklemlerin robotun geometrik denklemleri ile birleştirilmesi,
6. Sistemin robot kinematik denklemleri ile çözülmesi.

Diferansiyel TGR yapısı kapalı ortamlardaki en basit ve en yaygın kinematik yapıdır (Dudek ve Jenkin, 2000). Diferansiyel sürülen bir TGR, iki adet bağımsızca sürülebilen sürüş tekerleği ve bir veya daha fazla kaster tekerlekten oluşur. Gövde dengesi için kullanılan bu kaster tekerlekler kinematik modelde hesaba katılmazlar.

Robotun kinematik durumu,

$$K = [X \ Y \ \theta]^T \quad (2.13)$$

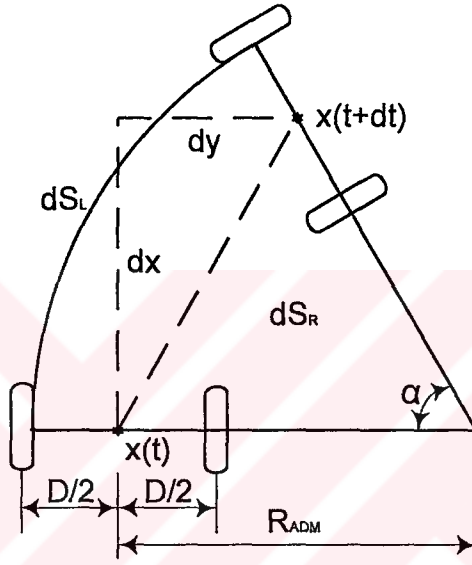
vektörü ile verilir. Şekil 2.8 belirli bir sürede robotun hareketini basitçe göstermektedir. ADM, robotun referans koordinat takımından R_{ICR} kadar uzaklıkta bulunur. Tekerlekler tarafından oluşturulan yaylar ADM'ye göre eşit bir açı tararlar. Her tekerleğin çizdiği yay uzunlukları hesaplandığında,

$$dS_L = \alpha \left(\frac{D}{2} + R_{ADM} \right) \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{dS_L}{\left(\frac{D}{2} + R_{ADM}\right)} \quad (2.15)$$

$$dS_R = \alpha \left(\frac{D}{2} - R_{ADM}\right) \quad (2.16)$$

$$\alpha = \frac{dS_R}{\left(\frac{D}{2} - R_{ADM}\right)} \quad (2.17)$$



Şekil 2.8 Diferansiyel TGR dt süresi içindeki hareketi

Denklem (2.15) ve (2.17)'deki yay açısı değerleri birbirine eşitlendiğinde tekerlek yol yayları, tekerlek tabanı ve ADM arasındaki ilişki ortaya çıkar.

$$\frac{dS_L}{\left(R_{ADM} + \frac{D}{2}\right)} = \frac{dS_R}{\left(R_{ADM} - \frac{D}{2}\right)} \quad (2.18)$$

Tekerlek yarıçapı ve tekerlek dönüş oranı tekerleğin yay genişliğini verir,

$$dS_L = dt \cdot \omega_L R_L \quad (2.19)$$

$$dS_R = dt \cdot \omega_R R_R \quad (2.20)$$

(2.18), (2.19) ve (2.20) denklemlerinden robotun merkezi ile ADM arasındaki mesafe çekilirse,

$$R_{ICR} = \frac{\frac{1}{2}D(\omega_R R_R + \omega_L R_L)}{(\omega_R R_R - \omega_L R_L)} \quad (2.21)$$

(2.18) ve (2.21) denklemleri çözüldüğünde diferansiyel sürülen TGR için diferansiyel değişim kinematik model,

$$\frac{d}{dt} [X \ Y \ \theta]^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} R_L \cos \theta & \frac{1}{2} R_R \cos \theta \\ \frac{1}{2} R_L \sin \theta & \frac{1}{2} R_R \sin \theta \\ \frac{-R_L}{D} & \frac{-R_R}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

şeklinde üretilir (McNamee, 2003).



3. GEZGİN ROBOTLARDA KULLANILAN ALGILAYICI VE HAREKETLENDİRİCİLER

Gezgin robotlarda, robottan istenilen görevlerin yerine getirilebilmesi açısından algılayıcılar ve hareketlendiriciler önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle özerk gezgin robotlarda robot karar verme yeteneğine sahip olmalıdır. Bunun anlamı algılayıcılardan elde edilen bilgiler doğrultusunda, robot amaca yönelik olarak, hareketlendiriciler vasıtasıyla yoluna devam etmesi veya gereken işlemleri gerçekleştirmesidir. Bu aşamada robotun amacına yönelik algılayıcılar ile donatılması temel problem olup robotun amacını gerçekleştirmesi büyük ölçüde üzerindeki donanımlara ve bu donanımlardan alınan bilgilerin doğru bir şekilde yorumlanmasına bağlıdır. Bu bölümde gezgin robotlarda kullanılan başlıca algılayıcılar ve hareketlendiricilere değinilecektir.

3.1 Gezgin Robotlarda Kullanılan Algılayıcılar

Gezgin robotların büyük bir bölümü tekerlekli hareket sistemlerine sahip olduğu için, tekerlek dönüşünü algılayabilecek donanımlar odometri açısından oldukça önemlidir. TGR'larda yaygın olarak potansiyometre ve enkoderler odometri algılayıcıları olarak kullanılırlar.

3.1.1 Potansiyometreler

Potansiyometreler düşük fiyatlı dönüşsel yer değiştirme algılayıcıları olarak sıkça kullanılmaktadırlar. Potansiyometrelerin bir başka temel özelliği ise uygulamadaki kullanım kolaylığıdır. Çıkış gerilimi,

$$V_0 = V_{ref} \frac{r}{R} \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir. Lineer potansiyometreler için r/R oranı, anlık direncin, tam skala direncine oranıdır. Uygulamada, çıkış geriliminin referans gerilimin lineer bir fonksiyonu olmasına rağmen, iyi regüle edilmiş, gürültüsüz kaynak kullanılmalıdır.

Robot hareket ederken hareketlendiricilere büyük bir sürtünme kuvveti getirmesi ve üretimdeki hataların yol açacağı az güvenilirlik en büyük dezavantajlarından. Bu gibi dezavantajlardan dolayı pratikte potansiyometrelerin günümüzde kullanımı az olup, potansiyometreler yerlerini artımsal enkoderlere bırakmışlardır.

3.1.2 Enkoderler

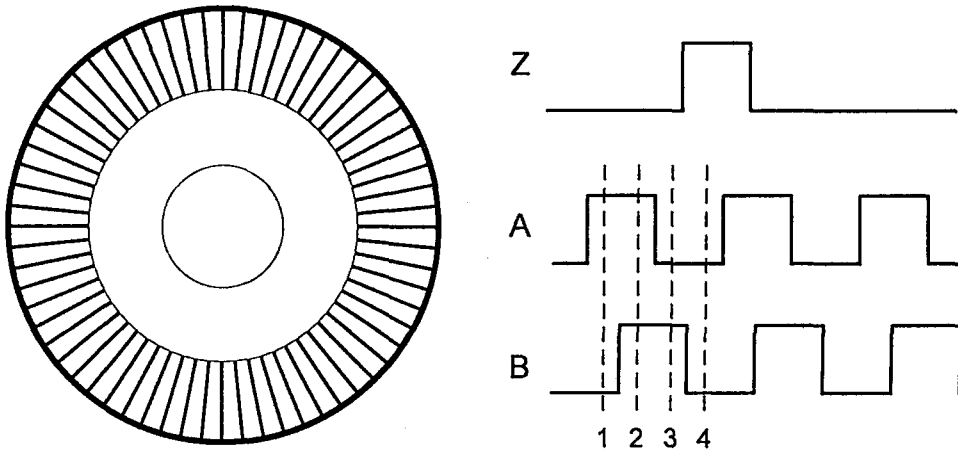
İlk optik enkoderler Baldwin Pişano şirketi tarafından elektrikli aletlerin diğer müzik

aletlerini taklit etmelerine izin veren “ton tekerlekleri” gibi kullanılması için 1940’lı yılların ortalarında geliştirilmiştir (Everett, 1995). Günümüzün optik enkoderleri ise basit olarak ters modlu mesafe algılayıcıların minyatürleştirilmiş versiyonlarını kapsamaktadır. Bir foto detektöre karşılık gelen odaklanmış ışık huzmesi, motor miline akuple edilmiş bir dönen disk üzerindeki kod tarafından kesilir. Optik enkoderlerin açık kod çözme düzenleri ve sayısal çıkış işaretleri, gürültünün azlığı ile birlikte düşük ücretli ve güvenilir olmaları büyük avantajlarıdır.

Uygulamada optik enkoderler artımsal ve mutlak olmak üzere iki tipte mevcuttur. Artımsal versiyon konum bilgisine bağlı dönüş hız değerini ölçerken, mutlak modeller hız bilgisine bağlı olarak doğrudan açısal konum değerini verir. Değişken olmayan konum bilgisi gerekmedikçe, artımsal enkoderler genelde kolay kullanımlı olup, aynı çözünürlükteki mutlak enkoderlerden daha ucuzdur.

Artımsal enkoderin en basit çeşidi milin her tam tur dönüşü için belirli sayıda darbe veya sinüs üreten, temel olarak mekanik ışık bölmelerinden oluşan tek kanallı takometre enkoderdir. Darbelerin sayısı arttıkça, çözünürlükle birlikte fiyatta artmaktadır. Bu nispeten pahalı olmayan cihazlar kontrol sistemleri açısından oldukça kullanışlı algılayıcılardır, bununla beraber çok düşük hızlarda gürültü ve kararlılık problemleri ortaya çıkar.

Düşük hız kararsızlıklarına bağlı olarak, tek kanallı takometre enkoderler ayrıca dönüş yönünü algılayamazlar ve konum için kullanılmazlar. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi faz-dörtleyici artımsal enkoderde bu tek kanala 90°’lik faz farkı ile bir kanal daha eklenerek bu problem çözülür. Bu teknik hangi kanalın önce geldiğini hesaplayarak dönüş yönünü bulmaya izin verir. Bununla beraber çözünürlükte dört katına çıkarılmış olur.



Şekil 3.1 Enkoder pencere yapısı ve A,B ve Z fazlarına ait işaretler

Faz-dörtleyici çıkış sinyallerinin artımsal durumu açısıl konumun her çözünürlüğünü, mutlak enkoderin tersi gibi yalnızca bir özel referansa bağlı olmaya zorlar. Bir referansı saptamak birkaç şekilde olabilir. 360°'lik sürekli dönüşü içeren uygulamalarda, hemen hemen bütün enkoderler milin bir tam dönüşünde bir darbe üreten ayrı bir sıfır fazına sahiptir. Milin diğer konumları bu bilinen sıfır konumundan enkoder yukarı ve aşağı sayımlarının sayısı ile sonradan özel hale getirilebilir. Bu yaklaşımın dezavantajı enerji kesilmesi ile tüm bu konum bilgilerinin kaybolmasıdır.

3.1.3 Kızılötesi Algılayıcılar

Kızılötesi algılayıcılar, gezgin robotlarda engelleri algılamak amacı ile kullanılan, en basit şekildeki temassız algılama araçlarıdır.

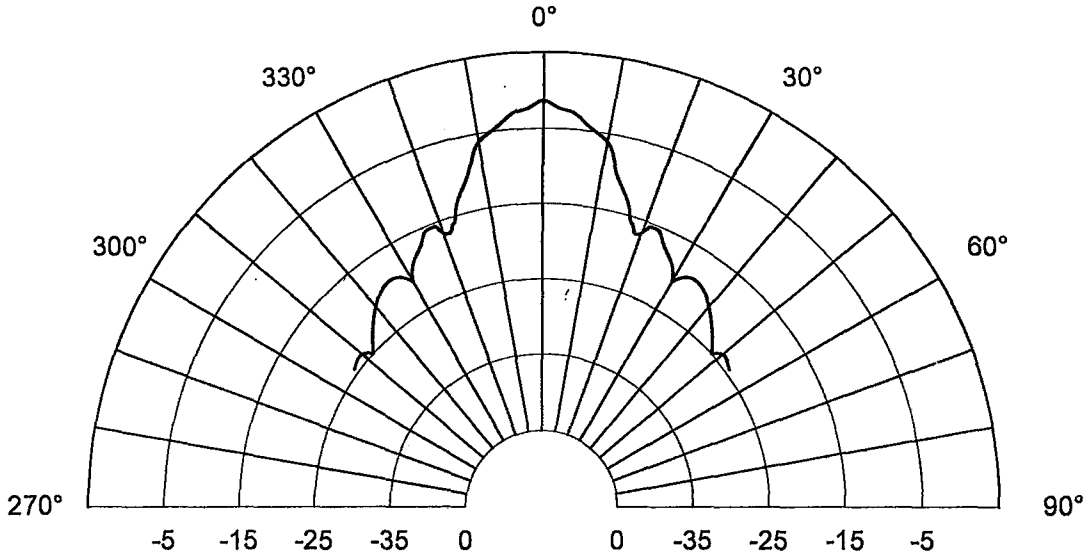
Kızılötesi algılayıcılar kızılötesi ışığı gönderip, ışığın karşıda bulunan bir cisimden geri dönüp dönmediğini algılayarak çalışırlar. Gönderilen kızılötesi ışığı, çevrede güneş veya floresandan vb. kaynaklanan kızılötesi ışıktan ayırt etmek için, gönderilen sinyal özel bir frekans ve fonksiyon ile genellikle modüle edilir. Kızılötesi algılayıcılar nesnelere ile arasındaki mesafeyi ölçmek için kalibre edilebilir, geri dönen ışığın yoğunluğu, mesafenin karesi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca bu değeri nesnelere şekli ve rengi de doğrudan etkilemektedir. Beyaz renk ışığı çok iyi yansıtırken, siyah renk kızılötesi alıcı için görünmez olabilir. Bu sebeple kızılötesi algılayıcılar efektif olarak engel algılamada kullanılır, fakat mesafe ölçümünde pek kullanışlı değildirler.

Eğer alıcı tarafından bir ışık görülürse karşıda bir cisim olduğuna karar verilebilir fakat aynı şey tersi için her zaman geçerli değildir. Bunun anlamı eğer bir sinyal alınamıyorsa karşıda bir cisim olmadığına karar vermek her zaman doğru olmaz. Bu sebepten engel algılamada da kızılötesi algılayıcılar tam güvenilir değildirler. Ayrıca algılanan kızılötesi ışığın miktarı sadece mesafenin değil aynı zamanda yüzey renginin de bir fonksiyonu olmasından dolayı robot için cisme olan uzaklığı hakkında bir bilgi yoktur. Uygulamada bir sinyal algılandığı gibi cisimden kurtulmaya çalışmak en iyi yoldur.

3.1.4 Sonar Algılayıcılar

Robotlardaki sonar algılayıcıların temel çalışma prensibi yarasalarınki ile çok yakındır. Belli bir frekans aralığında kısa ve güçlü bir darbe gönderilir ve cisme çarpıp dönen sinyal bir alıcı tarafından algılanır. Sonar alıcının hassasiyeti sabit değildir fakat her biri yarasanınkiye benzeyen ana ve yan loplardan oluşur. Şekil 3.2'de buna bir örnek gösterilmektedir, 20°'lik

bir koni içerisinde yayılma hassasiyeti 10dB değerine kadar inmektedir.



Şekil 3.2 50 kHz'lik frekansta sonar yayılma örneği

Sesin hızı bilindiğinden, işaretin gönderilmesi ile alınması arasında geçen süreden, cisimle olan mesafe şu şekilde hesaplanabilir,

$$d_s = \frac{1}{2} v_s t \quad (3.2)$$

Sonar algılayıcının ölçebileceği minimum mesafe (3.3) denklemi ile verilebilir. Burada t_b gönderilen darbe süresini göstermektedir, bu değer 1.2 ms ayarlandığında minimum mesafe 21 cm civarında olmaktadır.

$$d_{s \min} = \frac{1}{2} v_s t_b \quad (3.3)$$

Ölçülebilecek maksimum mesafe ise gönderilen darbeler arasındaki süreye bağlı olarak,

$$d_{s \max} = \frac{1}{2} v_s t_w \quad (3.4)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Sonar algılayıcı okumaları ile ilişkili birkaç kesin olmayan durum mevcuttur. İlk olarak algılanan cismin kesin konumu bilinmemektedir. Algılayıcıya d_s kadar mesafede olduğu algılanan bir cisim sonar koninin herhangi bir yerinde robottan d_s kadar bir mesafede olabilir.

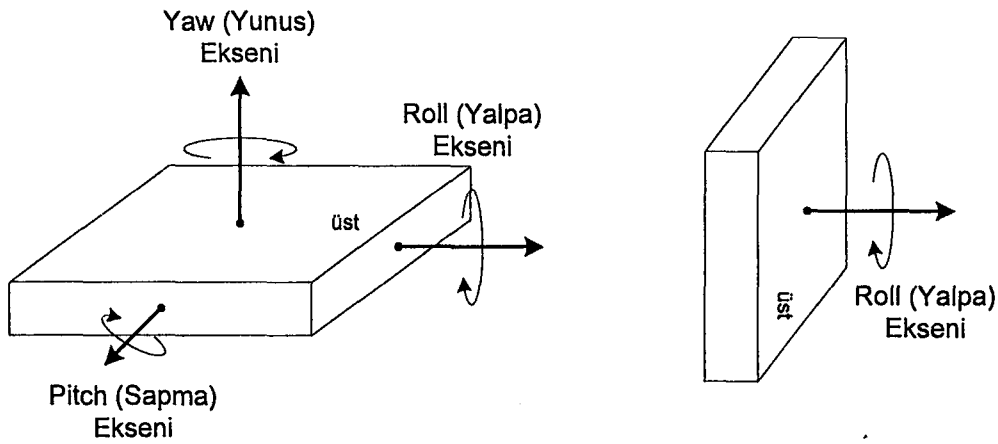
İkinci olarak sürekli aynı işaretleri yayınlayan bir sonarda, çok uzak mesafedeki bir cisimden dönen ses algılandığı zaman cisim çok yakında gibi algılanabilir.

3.1.5 Lazer Mesafe Bulucular

Lazer mesafe bulucular (LMB), mesafe ve algılanan cisimlerin hız ve ivmelerini ölçmek için günümüzde sıkça kullanılmaktadırlar. LMB'lerin temel çalışma prensibi sonar algılayıcılar gibidir, sadece burada kısa bir ses darbesi yerine, gönderilen kısa ışık darbesidir ve gönderme ve alma arasında geçen süreden mesafe ölçülmektedir. LMB'de kızılötesi dalga genişliğine yakın olan bir ışık sonar darbeye olduğundan çok daha kısa bir süre ile uygulanır. Mevcut olan LMB'de ölçülen mesafe birkaç yüz metre kadar olabilmektedir ve uygulamaya göre daha küçük maksimum mesafeler mevcuttur.

3.1.6 Jiroskoplar

Jiroskoplar dönüşün açısal oranını veya başka bir deyişle bir cismin ne kadar hızlı döndüğünü ölçerler. Dönüş genellikle 3 eksenenden biri referans alınarak ölçülür (Krakauer, 2003). Şekil 3.3 jiroskopun sabit bir zemine oturtulduktan sonraki eksenlerini göstermektedir. Tek eksen ile bir jiroskop için farklı montaj yeri seçmek, diğer eksenlerin ölçülmesine izin verir. Örneğin 33.33 devir/dakika ile dönen bir cismin üzerine monte edilmiş yaw (yunus) eksenli bir jiroskop için $360^\circ \times 33.33/60s$ yani $200^\circ/s$ 'lik bir dönüş değeri ölçer. Tam skala aralığı ölçülebilecek maksimum açısal oranı gösterir, yani bu örnekte kullanılacak jiroskop en az $200^\circ/s$ 'lik bir skala aralığına sahip olmalıdır.



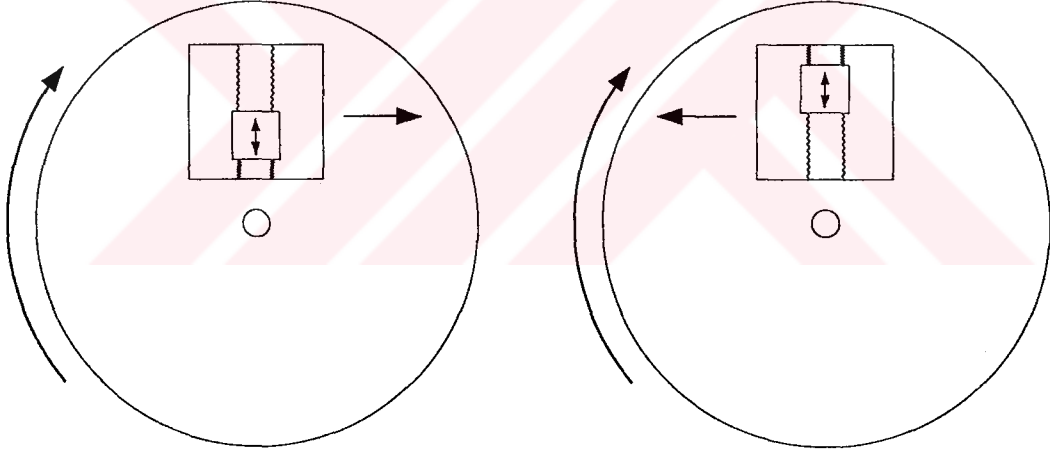
Şekil 3.3 Eksen takımları ve yaw eksenli bir jiroskopla roll (yalpa) eksenini ölçümü

Daha güncel bir örnek olarak bir jiroskopun dönüş hızı ölçmek amacı ile bir arabaya monte edildiği düşünülebilir. Arabanın kontrol dışı dönüşleri jiroskop yardımıyla algılanarak, aktif

süspansiyon veya fren sistemleri vb. aracı tekrar kontrol altına sokmak için devreye alınabilir. Ayrıca açılal oranın zaman içerisinde integrali alınarak açılal konumda hesaplanabilir.

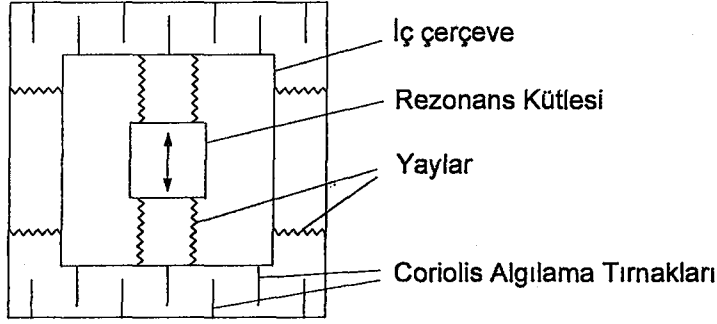
Genel olarak jiroskoplar açılal oranı coriolis ivmesi ile ölçerler. Dönen bir platformun merkezine yakın bir yerde durduğumuzu ve toprağa göre konumumuzu korumaya çalıştığımızı düşünelim, bunu başarmak için dönüş yönünün tersine belirli bir hızda hareket etmemiz gerekir. Bu durumda merkezden uzaklaştıkça konumu korumak için daha hızlı hareket etmek gerekir. Yapılan dairesel harekete dik yönde olan bu hızdaki artışa coriolis ivmesi denir.

Jiroskoplar birisinin dönen bir platformun üzerinde durmasına benzer olarak bir rezonans kütlesi kullanarak bu etkiden yararlanırlar. Kütle, polisilikon ve polisilikona bağlanmış çerçeveden yerine yerleştirilir. Böylece kütlenin sadece bir yönde rezonans hareketi yapması sağlanır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi rezonanstaki kütlenin, dönüşün dış kenara doğru hareketinde sola doğru bir kuvvet, dönüşün merkezine doğru hareketinde ise sağa doğru bir kuvvet kütleye etki eder.



Şekil 3.4 Rezonans silikon kütlenin coriolis etkisine cevabı

Coriolis ivmesini ölçmek üzere, kütleyi içeren çerçeve, şekil 3.5'te olduğu gibi, rezonans hareketine 90° 'lik açı yapacak şekilde bir alt seviyede bulunan başka bir yapıya bağlanır. Şekil 3.5 ayrıca kapasitif ivmenin algılanmasında kullanılan coriolis algılama tırnaklarını da göstermektedir.



Şekil 3.5 Rezonasyon kütlesini içeren çerçevenin dış çerçeveye bağlantısı

3.2 Gezgin Robotlarda Kullanılan Hareketlendiriciler

Mekatronik uygulamalarında hareketlendirici olarak elektrik motorlarının kullanım alanı oldukça fazladır. Kullanılacak elektrik motoru seçimini genellikle uygulamanın mekaniksel özellikleri belirler. Bu konuda motor ve sürme sisteminin moment-hız karakteristikleri oldukça önem kazanır. Gezgin robotların hareket etmelerini sağlamak amacı ile çoğunlukla elektrik motorları kullanılmaktadır. Gezgin robotlar çevreden bağımsız, hareketli sistemler oldukları için alternatif akım motorları gezgin robot uygulamalarında tercih edilmezler. Yaygın olarak kullanılan motor çeşitleri ise DC motorlar ve adım motorlarıdır.

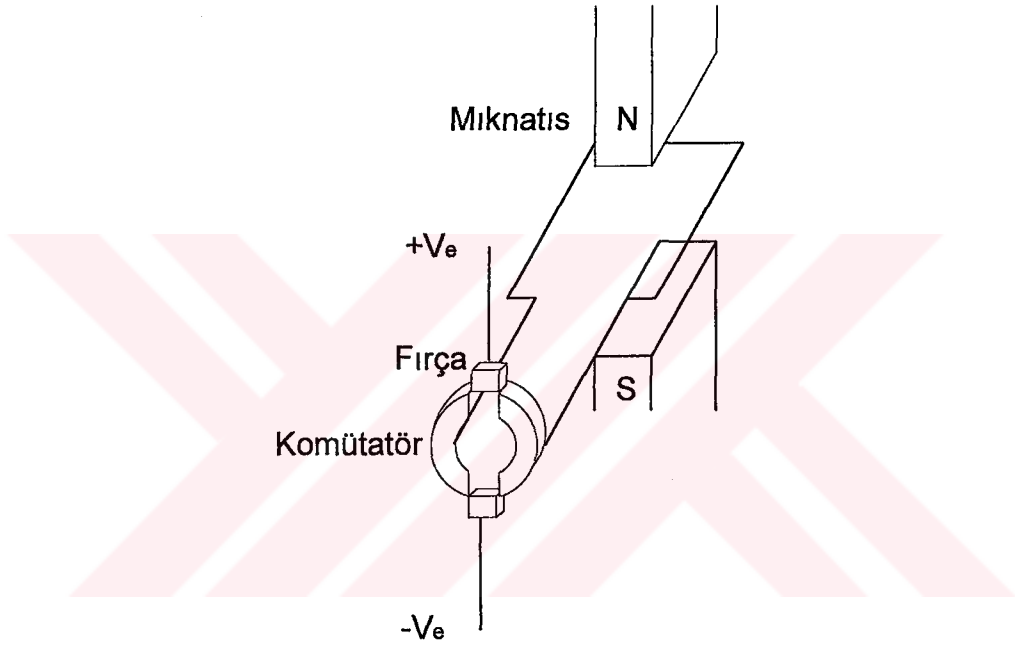
3.2.1 Doğru Akım Motorları

Tüm geleneksel elektrik motorları, aralarında hava aralığı bulunan bir sabit ve bir dönen elemandan oluşur. Doğru akım (DC) motorlarında sabit eleman, manyetik alan üretmek üzere ince tabakalara ayrılmış ve etrafına bobin sarılmış parçalardan yapılan çıkıntılı kutuplardan oluşur. Parçaların ince tabakalara ayrılmış olmasının fonksiyonu akımdan kaynaklanan kayıpları azaltmaktır. Dönen elemana rotor adı verilir ve slotlar arasına yerleştirilmiş bobin serilerinden oluşur. Şekil 3.6'da DC motorun en basit hali gösterilmiştir.

Tek bir bobin basit bir mıknatısın ters kutupları arasında konumlandırılmıştır. Bobin dik eksenle aynı hizaya getirildiğinde elektronlar pozitif terminalden negatif terminale akarlar. Komütatör parçaları ile bağlantıyı sağlayan kaynak fırçaların bir yanından diğer yanına doğrudur. Manyetik alan içerisindeki bobin üzerinden akan akımın yönü değiştiğinde bobin dönmeye zorlanır ve bu zorlama momenti oluşturur.

DC motorlar, hız ve güvenilirlik açısından gezgin robotlarda fazlaca kullanılırlar. Fakat özellikle diferansiyel sürüşte robot tek eksenle hareket ederken iki motorun hızının farklı olması büyük bir problem teşkil eder. Böyle bir durumda robot bir doğru üzerinde hareket

edemez ve hız farklarına bağlı olarak belirli bir süre içerisinde, hızlı dönen tekerlek diğer tekerleği hiç dönmez hale getirebilir. Bu problemi gidermenin ilk yolu motorların hızlarını kontrol etmektir. DC motorlarda hız kontrolü pratikte oldukça kolay bir şekilde sağlanabilmekte olup en basit yöntem rotor gerilimini PWM sinyalleri sayesinde değiştirmektir. Şekil 3.7'de görülen PWM sinyali basit bir osilatör devresi veya mikro kontrolör yardımı ile üretilebilir. Belirli bir frekansın üzerindeki bu sinyal bir güç devresinden geçirilerek armatür uçlarına uygulanır ve bu PWM sinyali motor tarafından sabit bir DC gerilim gibi algılanır. Darbenin etkinlik süresinin (t_e), periyoduna (T) oranı değiştirilerek motorun hız kontrolü sağlanır.

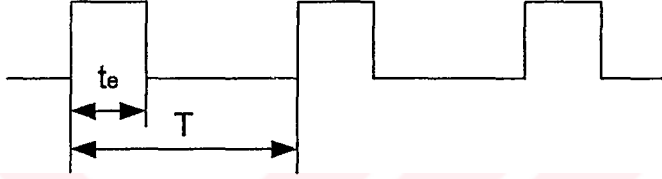


Şekil 3.6 Tek sargılı iki kutuplu DC motor

PWM işareti ile hız her ne kadar ayarlanıyor olsa da, devir sayısı yüksek iki motoru geri besleme olmaksızın aynı hızda döndürmek uygulamada pek mümkün değildir. Fakat geri beslemeli bir sistemde herhangi bir kontrolcü ile bunu sağlamak mümkündür. Pratikte ise gerek istenilen momenti sağlamak ve gerekse hız farkını en aza indirmek için redüktör kullanmak en iyi yoldur.

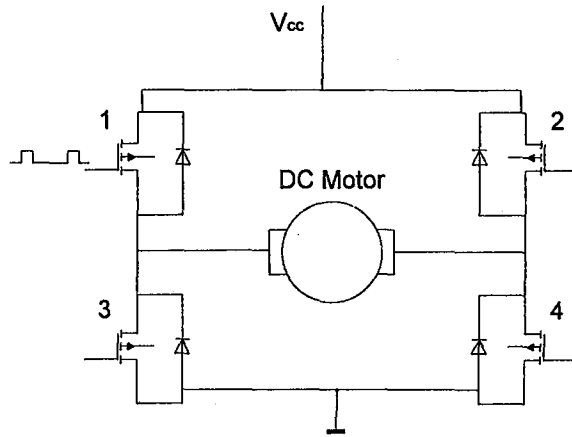
Üretilen PWM sinyali ile DC motor arasındaki güç katı ise genellikle yarı iletken elemanlardan oluşur. PWM sinyali bir yarı iletken eleman üzerinden DC motora uygulanır ve motorun hız kontrolü sağlanır. Tek bir yarı iletken ile motorun iki yönlü hareketi sağlanamayacağı için genellikle güç katı olarak H-köprü adı verilen devreler kullanılır. H-köprünün temel çalışma

prensibi şu şekildedir, şekil 3.8’de görülen 1 ve 4 numaralı elemanlar tetiklendiğinde motor bir yöne, 2 ve 3 numaralı elemanlar tetiklendiğinde ise motor diğer yöne döner. Burada dikkat edilmesi gereken durum yarı iletken elemanların iletme girme ve çıkma süreleri olup, kullanılacak PWM sinyalinin frekansına göre bu yarı iletken elemanlar seçilmelidir. Ayrıca yaygın olarak kullanılan bir başka güç katı bir röle ile birlikte bir yarı iletken elemandan oluşur. İki grup normalde açık ve kapalı anahtarlara sahip olan rölenin ortak uçları arasına DC motor bağlanır. Bir tarafın normalde kapalı anahtarı ile diğer tarafın normalde açık anahtarı besleme ucuna, diğer ikisi ise yarı iletken elemandan geçirilerek toprağa götürülür. PWM işareti yarı iletkene uygulanarak motorun istenilen hızda dönmesi sağlanır. Röle enerjilendirilerekte motorun dönüş yönü değiştirilir (Şekil 3.9).

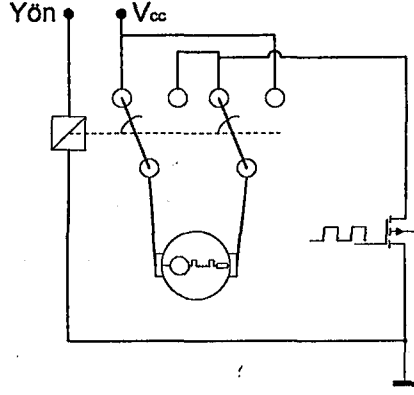


Şekil 3.7 Örnek bir PWM işareti

DC motorların istenilen konuma ulaşıldığında enerjisi kesilir fakat motor üzerindeki atalet ile hareketine devam eder ve konumlama hatası oluşur. Bunu yok etmenin yolu DC motorun hızını ve konumunu kapalı çevrim bir kontrol sistemi ile kontrol etmektir. Bir başka yol ise motorun enerjisi kesildiği anda mekanik bir freni devreye almak olarak karşımıza çıkar. DC motorların bu dezavantajına ek olarak özellikle manipülatörlerde eklem istenilen konuma getirildikten sonra o konumdan üzerindeki yük, yerçekimi vb. etkenler ile çıkması dezavantaj olarak gösterilebilir.



Şekil 3.8 Örnek bir H-köprü devresi



Şekil 3.9 Örnek bir röle yarı iletken güç devresi

3.2.2 Adım Motorları

Adım motorları DC darbe dizilerini, millerinde oransal mekanik dönüşü çeviren elektrik makineleri olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle ise adım motorları senkron motorların ayrı çalışır şeklindedir. Adım motorlarının ayrı hareketi bu motorların, mikro kontrolör gibi sayısal tabanlı kontrol sistemleri ile kontrol edilmesine olanak tanır ve avantaj sağlar. Günümüzde bu motorların robotik alanında uygulamaları pek fazla olmamakla beraber, özellikle konumlamanın önemli olduğu uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Adım motorlarının birçok uygulamada seçilmesinin sebeplerini birkaç genel karakteristiği ile açıklayabiliriz.

Adım motorları ± 1 adım hassasiyeti ile açık çevrim olarak çalıştırılabilirler, fakat burada motorun adım kaçırmaması için yeterince yavaş çalıştırılması gerekmektedir. Böylece eğer özel bir açı belirtilmiş ise, motora istenilen açı kadar dönmesi için uygun sayıda adım atılabilir ve motor miline akupile edilmiş mekanik elemanların istenilen mesafede hareket etmesi sağlanabilir. Adım motorları küçük açısız hızlarda yüksek moment sağlayabilir ve ayrıca yüksek tutma momentine sahip olmalarından dolayı rotor sabitken kendi kendini kilitleme gibi bir özelliğe sahiptirler.

Bunların yanında adım motorlarının DC motorlara tercih edilmesi için birkaç avantaj daha gösterilebilir. Adım motorları sayısal kontrol teknikleri ile doğrudan kontrol edilebilirler. Adım motorları konumlamanın hassas olduğu uygulamalar için ideal olup mükemmel konum kesinliği sağlarlar. Adım motorları ile açık çevrim kontrol yapılabilmesinden dolayı genel olarak tako jeneratör, enkoder gibi elemanların kullanılması gerekmez, buda uygulamanın maliyetini aşağılara doğru çeker.

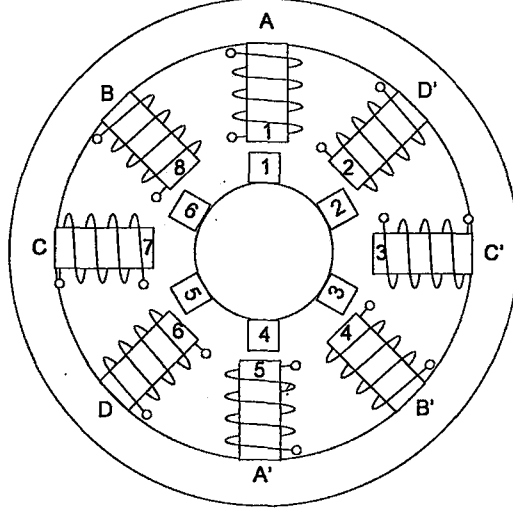
Bu özelliklerden birkaçı adım motorlarını bazı robotik uygulamaları için oldukça kullanışlı hale getirir, en büyük avantaj ise DC motorlara göre ucuz olmalarıdır. Adım motorlarını robot eklemlerinde kullanmak için en büyük sebep tutma momenti olarak gösterilebilir fakat hızlarının çok düşük olması büyük bir dezavantajdır. Güvenilirlik ve maliyet adım motorlarının avantajları olmasına rağmen, açık çevrim kontrol yapıldığı için kontrolörün motorun gerçekte hareket edip etmediğini bilmemesi dezavantaj olarak karşımıza çıkar. Kontrolör, motorun gereken açığa dönmesi için tüm işaretleri gönderir ve istenilen konuma ulaşıldığını düşünür. Fakat motor herhangi bir engelle karşılaştıysa bu fark edilemez ve büyük konum hataları ortaya çıkar (Klafter vd., 1999).

Ayrıca, rotoru izin verilenin üzerinde bir hızda dönmeye zorlamakta konum hatalarına neden olabilir. Böyle bir durumda motor, kontrolörden gelen işaretlere yeteri kadar hızlı cevap veremez ve bunun sonucu olarak her darbe milde bir adım üretilmesini sağlamayabilir.

Adım motorları temelde

1. Değişken Relüktanslı Adım Motorları (DRAM)
2. Sabit Miknatıslı Adım Motorları (SMAM)
3. Hibrit Adım Motorları

olmak üzere 3 grup altında toplanabilir. DRAM'nın genel yapısı şekil 3.10'daki gibidir. Bu motorun temel özelliği rotor ve stator diş sayılarının eşit olmamasıdır. Örneğin şekil 3.10'daki motor yapısını ele alırsak, stator aralarında 45° 'lik fark bulunan 8, rotor ise aralarında 60° 'lik fark bulunan altı dişten oluşmuştur. DRAM'nın çalışma prensibi oldukça basittir. Minimum relüktans prensibine bağlı olarak, manyetik yol içerisindeki hava boşluğunu minimuma indirmek üzere, manyetik yapı her zaman kendi kendini yerini değiştirmeye zorlar. Şekil 3.10'da görülen yapıda A fazı enerjilendirildiğinde 1 ve 4 numaralı rotor dişleri, 1 ve 5 numaralı stator dişleri ile aynı hizaya gelirler. Sadece A fazı enerjili olduğu durumda, motor miline uygulanacak bir moment tutma momentinden büyük olmadığı sürece motor milinin konumu değişmez, tutma momenti ise o anda sargıdan geçen akıma bağlıdır.



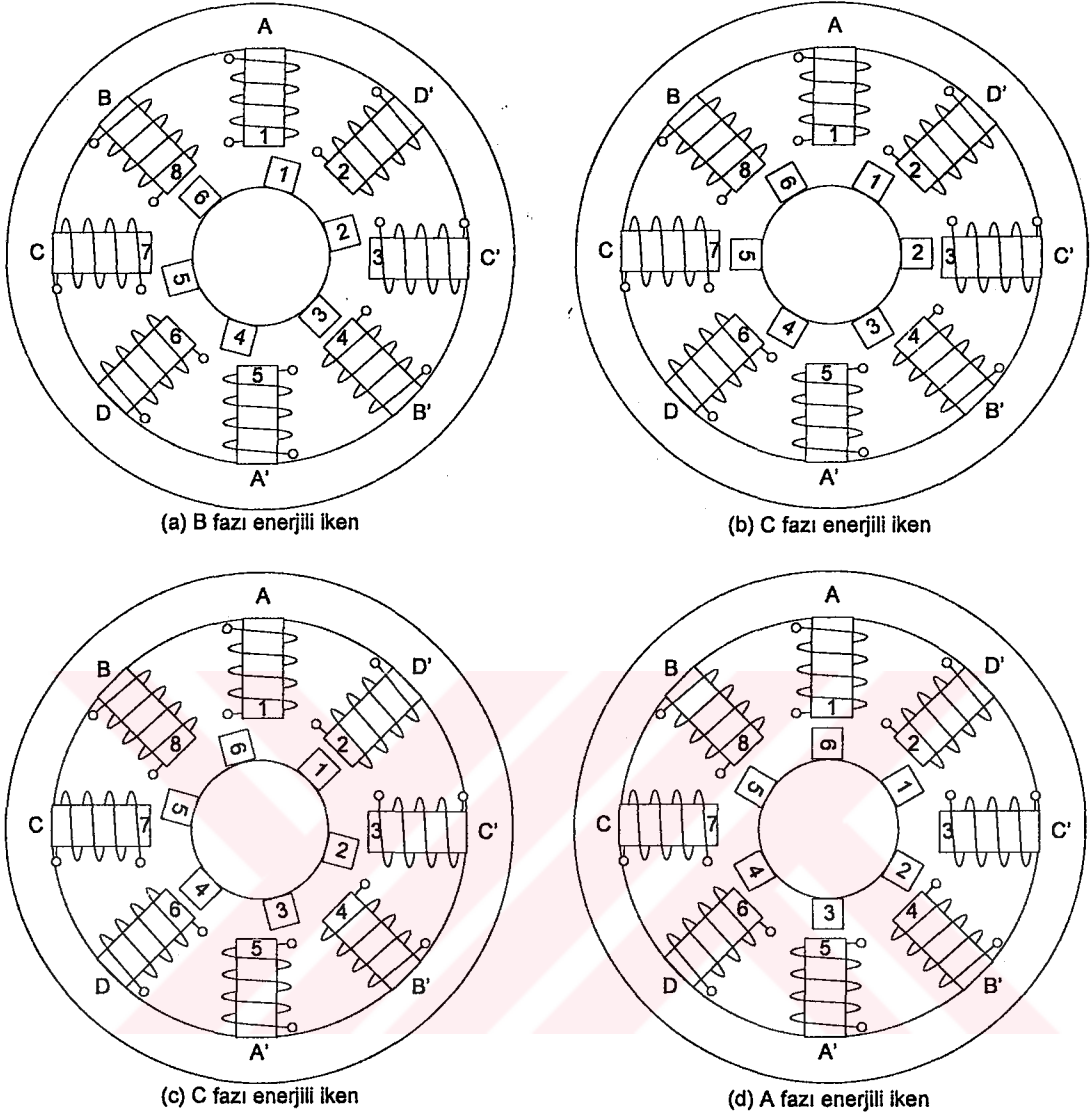
Şekil 3.10 Değişken relüktanslı adım motorunun basit yapısı

Şimdi A fazının enerjisini kesip B fazını enerjilendirdiğimizi düşünelim. Bu durumda rotor saat yönünde 15° 'lik bir hareket yaparak rotorun 3 ve 6 numaralı dişleri, statorun 4 ve 6 numaralı dişleri ile aynı hizaya gelir. Şekil 3.11'de görülebileceği gibi bu şekilde her faza sırayla enerji verilerek motorun dönüşü sağlanır, faz sırasının yönü değiştirildiğinde motorun dönüş yönü değişir. Şekil 3.12a'da motora uygulanması gereken sinyaller görülebilir. Bu tekniğe tam adım sürme denir. DRAM'nın adım açısı stator ve rotor diş sayılarından aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

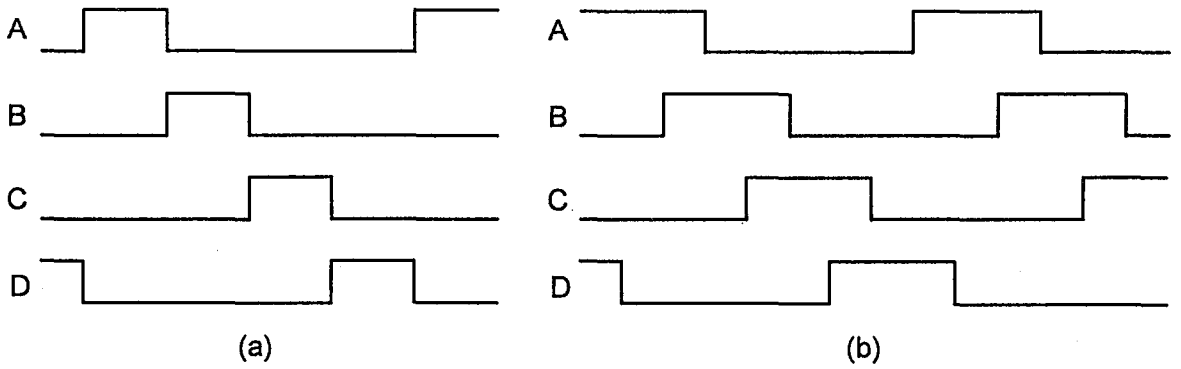
$$A = \frac{|N_s - N_r|}{N_s N_r} \quad (3.5)$$

Adım motorları bir turdaki adım sayısına göre çok çeşitli olarak üretilirler. Maliyette göz önüne alındığında pratikte adım açısı 1.8° olan motorlar en uygun adım motorlarıdır. Bazı uygulamalarda daha küçük adım açlarına ihtiyaç duyulur. Bu durumda tam adım sürme yerine yarım adım sürme tekniği kullanılabilir. Bu teknikte öncelikle sadece bir faz enerjilendirilir, daha sonra dönüş yönüne göre fazın enerjisi kesilmeden ona en yakın fazda enerjilendirilir. Şekil 3.12b'de görülebileceği gibi işaretler bu şekilde verilmeye devam edilir. Böylece motor adımları tam adımda olduğunun yarısına iner ve hassasiyet artar.

SMAM, DRAM'na göre daha yaygın olarak kullanılırlar. SMAM, çok fazlı stator ve iki kısımlı sabit mıknatıslı rotordan oluşmaktadır. SMAM'da tam ve yarım adımlı olarak çalıştırılabilirler.



Şekil 3.11 Sırası ile BCDA fazları enerjilendirildiğinde rotorun dönüşleri



Şekil 3.12 Adım motoru sürme sinyalleri

4. GEZGİN ROBOTLARDA KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ

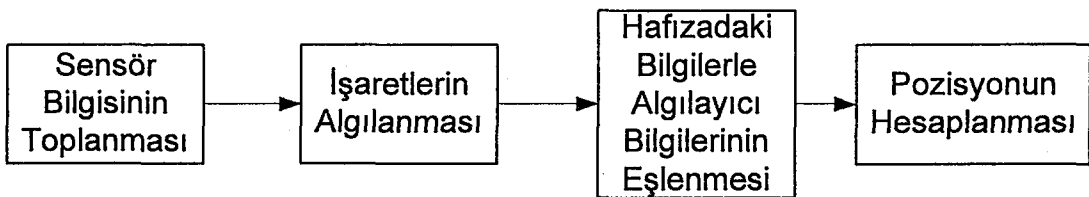
4.1 Yer İşaretleri ile Konum Belirleme

Gezgin robotların keşif sistemlerinde yer işaretleri önemli bir yer tutmaktadır. Robotun çevreden konumu ile ilgili bilgi alması güvenilirlik ve kesinlik açısından bakıldığında oldukça avantajlıdır. Ortamdan kızılötesi ışıklar, lazer ışınları, ses dalgaları, radyo dalgaları vb. işaretler alınarak robot o anki konum bilgisini elde eder. Ayrıca global konumlama sistemleri de günümüzde gezgin robotlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yer işaretleri doğal veya yapay olabilirler. Yapay işaretler konum bilgisi almak amacı ile özel olarak tasarlanmış nesne veya işaretler olup robot için en uygun konuma yerleştirilebilirler. Ayrıca yapay işaretler robota bir takım sinyaller göndererek kolayca algılanabilirler. Doğal işaretçiler ise daha önceden yapılmış ortamlarda ağaçlar, duvarlar, ya da özel olarak konumlandırılmış bir takım nesnelere olabilirler. Burada en büyük problem doğal işaretlerin kararlılığı konusudur.

Yer işaretleri geometrik şekiller olabileceği gibi ek olarak robotun konumu için gerekli bilgileri de içerebilirler. Genel olarak işaretler bilinen bir noktadadırlar ve robot bu işaretlere göre konumunu belirler. Kullanılacak olan işaretler kolayca ayırt edilmek üzere dikkatlice seçilmelidirler. Robot keşif için işaretleri kullanmadan önce, işaretlere ait karakteristik bilgileri bilmeli ve hafızasında bulunduruyor olmalıdır. İşaretler ile konumlamada ana görev robotun işaretleri algılaması ve konumunu hesaplamasıdır. Robotun ortamdaki işaretler ile konumunu belirlemesinin prosedürü şekil 4.1'de olduğu gibidir (Borenstein vd., 1996a).

İşaretlerden bilgi alma problemini basitleştirmek üzere, robotun konumunu ve yöneliminin yaklaşık olarak bilindiği düşünülür, böylece robot sadece kısıtlanmış bir alanda işaretleri aramaya ihtiyaç duyar. İşaretler sadece konum bilgisi olarak değil izlenecek yörünge bilgisi olarak ta karşımıza çıkabilmektedir. Örneğin Van Turenout vd. (1992) bir koridorun içerisinde robotun yörüngeyi izlemesi amacı ile robot duvarları takip ettirmişlerdir.



Şekil 4.1 İşaretler ile konum belirlemenin temel prosedürü

4.2 Ataletsel Konum Belirleme

Teknolojinin hızla gelişip hayatımıza girmesi gezgin robotlarda konumlama sistemleri için kullanılabilecek mikro elektromekanik sistemleri (MEMS) ortaya çıkarmıştır. Bu cihazlar günümüzde ivmeölçerler ve jiroskoplar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İvmeölçerlerin konulamada kullanılmasında temel mantık hareketin ivmesinin ölçülüp bu değerinin hız ve konum bilgisine dönüştürülmesidir. İvmeölçerler integral işleminden kaynaklanan hataların sürekli toplanarak artması ve önüne geçilememesi dolayısıyla gezgin robotlarda pek kullanılmamaktadırlar. Jiroskoplar ise önceki bölümde açıklandığı üzere açısal oran algılayıcılar olup özellikle gezgin robotların yönelim bilgisini elde etmede kullanılırlar. Bu sistemlerin en büyük dezavantajları kararlı olmamaları, ölçüm bilgilerinin lineer olmaması ve dış etkenlerden kolayca etkileniyor olmalarıdır. Ölçüm bilgilerinin sürekli hatalar içeriyor olması ölçüm değerlerinin mutlaka bazı algoritmalarla tahmin edilmesi ve filtrelenmesi gerekmektedir. Özellikle jiroskop ölçümlerinde ortaya çıkan hataların azaltılması için birçok çalışma yapılmıştır (Park vd., 1997; Borenstein 1998; Chung vd. 2001a;2001b). Ataletsel konum belirlemenin en büyük avantajı ise ölçüm için dışarıdan herhangi bir hareket bilgisine ihtiyaç olmamasıdır.

4.3 Odometri ile Konum Belirleme

Odometri gezgin robotların konumlamasında en yaygın olarak kullanılan keşif yöntemi olup tekerleklerin dönüş sayılarına göre alınan yolun hesaplanarak konum ve yönelimin belirlenmesidir. Odometrinin alınan kısa mesafelerde kesinliği olması, pahalı olmaması ve yüksek örnekleme oranlarına izin vermesi iyi bilinmektedir. Bununla beraber, odometrinin genel fikri zaman içerisinde alınan artımsal hareket bilgisinin toplamının konum ve yönelim bilgisinde kullanılmasıdır ve bu yöntem kaçınılmaz olarak hataların birikmesine yol açar. Özellikle yönelim hatalarının bu şekilde birikmesi robot tarafından kat edilen mesafeyle orantılı olarak artarak büyük pozisyon hatalarına sebep olur. Tüm bu olumsuzluklara rağmen birçok araştırmacı robot konumlama sisteminin bir parçası olarak odometrinin önemi konusunda hemfikirdir. Odometride kesinlik geliştirildiği takdirde konumlama görevi basitleştirilebilir. Kesinliği geliştirmek üzere odometri ile diğer konum belirleme yöntemleri kullanılabilir.

4.3.1 Odometriden Kaynaklanan Hatalar

Odometri kolayca yerine getirilebilen ve artımsal enkoderlerden veri alınarak hesaplanan denklemlere dayanır ve tekerleklerden alınan dönüş miktarı bilgisinin tabana bağlı olarak

lineer bir şekilde mesafeye dönüştürüldüğü kabul edilir. Bu kabulün geçerliliği oldukça kısıtlıdır. Örneğin robotun bir tekerleği boşa döndüğünde enkoderden alınan dönüş bilgisi herhangi bir yer değiştirmeye karşılık gelmeyebilir. Bu örneğin dışında alınan bilginin yanlış olduğu birkaç hata daha bulunur. Tüm bu hata kaynakları sistematik ve sistematik olmayan olmak üzere iki grup altında toplanabilirler. Sistematik ve sistematik olmayan hataların ayırt edilmesi odometri hatalarının azaltılması açısından oldukça önemlidir. Sistematik hatalar sabit olarak artarlar. Düzgün bir yüzeyde oluşan hatalar genellikle sistematiktir, bununla beraber düzgün olmayan yüzeylerde sistematik olmayan hatalar fazladır ve umulmadan ortaya çıkıp büyük konum hatalarına sebep olurlar (Borenstein ve Feng, 1996b).

4.3.1.1 Sistematik Hatalar

Sistematik hatalar robotun mekanik yapısından kaynaklanan hatalar olup aşağıdaki gibi sıralanabilirler.

- Tekerlek çaplarının eşit olmaması
- Gerçek tekerlek çapı ortalamasının nominal tekerlek çapından farklı olması
- Tekerlekler arası mesafenin belirsiz olması
- Tekerleklerin aynı ekseninde olmaması
- Düşük çözünürlüklü enkoder kullanılması.

4.3.1.2 Sistematik Olmayan Hatalar

Sistematik olmayan hataların kaynağı robotun bulunduğu ortam olup bu hatalar aşağıdaki gibi sıralanabilirler.

- Üzerinde hareket edilen yapının bilinmemesi
- Ortam bilinmeyen nesnelere üzerinden geçilmesi
- Tekerleklerin kayması.

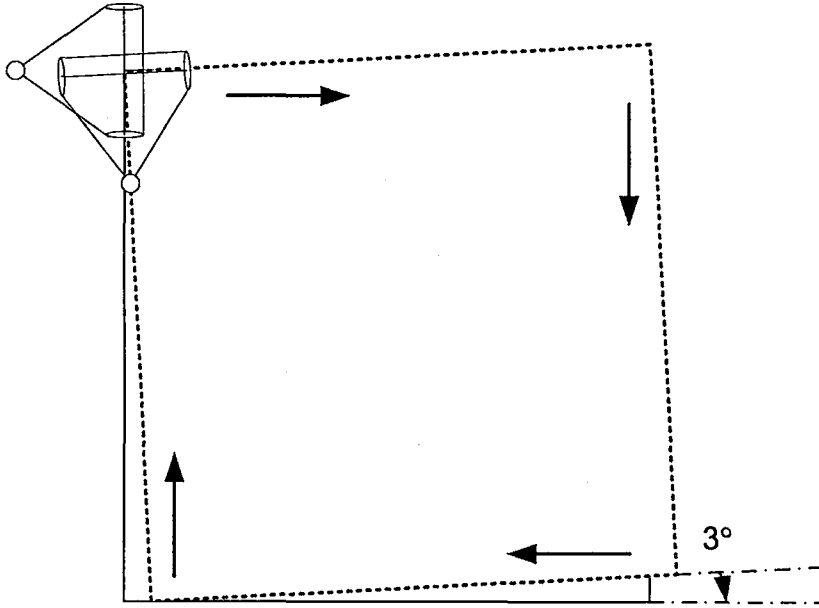
4.3.2 Sistematik Odometri Hatalarının Belirlenmesi

Odometriden kaynaklanan hataların kullanıcı tarafından bilinip modellenebilmesi çok temel bir konudur. Odometri hatalarının miktarının ölçülmesi için iyi tanımlanmış ölçüm prosedürlerinin olmaması kalibrasyon olanaksızlığı gibi bir sorun ortaya çıkarır. Odometri hataları çok iyi tanımlanıp analiz edilmelidir.

Sistemik odometri hatalarını belirlemek üzere robot kare testine tabi tutulabilir. Bu testte robot bir karenin kenarları üzerinde hareket ettirilir. Başlangıç noktası için en iyi konum karenin köşesi olup, genellikle bu köşeye yakın bir nokta referans olarak seçilmelidir. Örneğin duvarların kesişim noktası gibi bir referans çok uygun olup, robot üzerinde birkaç nokta seçilip, referans nokta ile bu noktalar arasındaki mesafeler ölçülür ve deneye başlanır. Robotun kat ettiği yol robotu harekete ilk başladığı konum ve yönüne getirir fakat robot başlangıç konumu ve yöneliminde olamaz. Kare yolun tamamlanması ile robotun pozisyonu referansa göre tekrar ölçülür ve bu değerler robotun başlangıç değerleri ile karşılaştırılarak odometri hataları hesaplanır.

Şekil 4.2 robotun başlangıç pozisyonunu, kat ettiği yolu ve son konumundan 90° dönmeden önceki konumunu göstermektedir. Deneyin sonuçları analiz edilirken iki ayrı sonuç elde edilebilir. Bu deneydeki hatalar tekerlek çaplarının farklı olmasından veya tekerlekler arası mesafenin tam doğru olarak hesaplanamamasından kaynaklanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken konu bu hataların her birinin ayrı tespit edilip kalibre edilmesinin gerekliliğidir. Sadece bir hata kalibre edilirse robot kare testini başarılı bir şekilde sonlandırabilir fakat karenin kenarları olan yörünge tam anlamıyla izlenemeyebilir.

Böyle bir durumda kare yöntemi yetersiz gibi görülebilir. Aynı test iki yönlü olarak yapıldığında performans artırılabilir (Borenstein ve Feng, 1995). Böylece bir yönde birbirini kompanze eden iki odometri hatası, diğer yönde toplamları kadar bir hata oluşturacaklardır.



Şekil 4.2 Kare testi için bir örnek

5. SİSTEMATİK ODOMETRİ HATALARININ AZALTILMASI

Sistematik odometri hatalarının azaltılması için öncelikle hataların iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Hatalar analiz edilip modellenerek kalibre edilip azaltılabilirler. Bir önceki bölümde anlatılan kare testleri robota uygulanarak hataların tespiti yapılabilir, hata modelleri üretilip robot iyi bir şekilde kalibre edilerek robotun hatalarının azaltılması sağlanabilir. Bunun dışında belirlenen bu hataları azaltmak üzere birçok öneri bulunmaktadır.

Fan vd. (1995) hataları azaltmak üzere sürüş tekerlekleri ile aynı eksene bağımsız iki adet tekerlek eklemiş ve enkoderleri bu tekerleklere bağlamıştır. Bu yöntem ile tekerleklerin boşa dönmesinden dolayı oluşabilecek bir hata yok edilmiş olur. Ayrıca tekerleklerin yere değdikleri nokta ince tekerleklerle çok küçük tutularak tekerlekler arası mesafenin belirsizliği azaltılabilir.

Rogers (1998) aktif tekerleklerinde enkoder olan gezgin robotun tabanına radar algılayıcılar eklenmiştir ve bu şekilde robot ile yer arasında hareket olup olmadığı kontrol edilip tekerleklerin boşa dönmesi durumunda hatalar giderilmiştir. Ayrıca enkoderlerden okunan bilgiye ek olarak radar hareket algılayıcıların bilgisi eklenmiştir ve özellikle dönüşlerde iki bilgi karşılaştırılıp odometri hataları azaltılmıştır. Bu çalışmaya benzer bir yaklaşım olarak Rondo ve Ohnishi (2004) radarlar yerine optik algılayıcılar kullanmışlardır. Yine optik algılayıcılar ile kayma olup olmadığı tespit edilmiş ve bu algılayıcılardan alınan bilgiler odometride de kullanılarak hatalar azaltılmıştır.

Chong ve Kleeman (1997) odometride oluşan hataları kare testleri ile tespit edip bir hata modeli üretmişlerdir. Bu model gezgin robotun odometri hatalarını azaltmakta kullanılmıştır.

Golfarelli vd. (2001) yer işaretlerini ayırt edebilen bir robotun ortamın keşfi esnasında yaptığı odometri hatalarını düzeltmek üzere elastik düzeltme adı verilen bir teknik geliştirilmişlerdir. Bu yöntemde elde edilen bilgi düşey çizgi ve kavislerin yer işaretleri ve rotayı gösterdiği bir grafik ile modellenmiştir. Elastik düzeltme, ortamın grafik modellenmesi ve mekanik yapı arasındaki paralellik üzerine yapılandırılır. Haritaya, her rotanın elastik bir ölçü çizgisini ve her yer işaretinin bir düğümü gösterdiği bir demet gözüyle bakılır. Hatalar, kararsız ölçülerin alındığı bir yapıdan ortaya çıkan zorlamaların neden olduğu deformasyonlardan yola çıkarak düzeltilir. Yapıyı karakterize eden elastikiyet değişkenleri odometride kararsızlıkları modellemede kullanılır. Sonuçlar harita oluşturmada algılayıcı hatalarının azaltıldığını göstermiştir.

Makela ve Koskinen (1991) odometri ile birlikte yer işaretlerini, ormanlık alanda robotun önceden belirlenmiş bir yörüngeyi izlemesi amacı ile kullanılmıştır. Ormanlık alan içerisindeki yola yansıtıcı işaretler yerleştirilmiş ve bu işaretlerin algılanması için bir algoritma geliştirilmiştir. Odometrinin böyle bir ortamda tek başına yörünge takibi için yeterli olmadığı görülmüş fakat yer işaretleri ile birlikte biriken hataların azaltılması sağlanmış ve yörünge takibi gerçekleştirilmiştir.

Iwaki vd. (1989) geniş bir bölgede araçlarda çok kullanışlı olacak bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Bu sistemde odometri ile birlikte radyo sinyalleri kullanılmıştır. Uzun mesafelerde odometri hataları kaçınılmazdır ve başlangıçta konum değerlerinin mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Radyo sinyalleri ile konum bilgisi her zaman kesin olarak elde edilebilir fakat sinyallerin her yere ulaşabilmesi için devasa bir ağ gerekmektedir. Belirli yerlere vericiler yerleştirilerek, radyo sinyallerinin kesildiği yerde odometriden alınan bilgilerden yararlanılmış ve sinyallerin devreye girmesi ile kesin pozisyon bilgisi tekrar elde edilmiştir.

Martinelli vd. (2003) odometri ile birlikte LMB'ı kullanmışlardır. LMB odometri hatalarının azaltılmasına ölçümler ile katkı sağlamıştır. Yamamoto vd. (1999) ise benzer bir sistem üzerinde çalışmışlar ve bir koridorda hareket eden robot için LMB ile duvarlara olan mesafeler ölçülmüş ve odometri hataları azaltılmıştır.

Moon vd. (1999) gezgin robotun kinematik hatalardan kaynaklanan odometri hatalarını azaltmak için bir yöntem sunmuşlardır. Yönelim hatasını kompanze eden yeni bir yörünge oluşturulmuştur. Bu hız yörüngesine bağlı olarak, sürüş tekerleklerinin ikisinden birinin hızı gezgin robot tarafından kat edilen mesafeye bağlı olarak değiştirilmiş ve böylece oluşan hata kompanze edilmiştir. Kinematik yanlışlıklar her ne kadar düzeltilse de robotun düz bir çizgiyi dahi tam olarak izleyemediği gösterilmiştir.

Chenavier ve Crowley (1992) gezgin bir robotun bilinen bir çevrede hareketi için bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde odometriden elde edilen konum bilgisi, bir kameradan elde edilen konum bilgisi bir kameradan elde edilen çevre gözlemleri ile birleştirilmiştir. Ortamdaki sabit nesnelere robotun hafızasında olup yer işareti ile aradaki açılar hesaplanıp odometri hataları azaltılmıştır.

Xu vd. (2002) kinematik ve dinamik belirsizliklerden kaynaklanan hataları azaltmak üzere odometri yöntemini irdemişlerdir. Bu çalışmada gezgin robot beş tekerleğe sahiptir. Bunlardan ikisi sürüş tekerlekleri, ikisi enkoder tekerlekleri ve biri kastordur. Enkoder

tekerlekleri ölçüm amacı ile sürüş tekerleklerinin hemen yanında konumlandırılmışlardır. Bu tekerlekler pasif olup, tekerlekler arası mesafenin belirsizliğini azaltmak üzere yere deyme noktaları çok incedir. Kastor tekerleğe monte edilmiş iki enkoder bulunup, biri kastorun aldığı yolu ve diğeri kastorun yönelimini ölçme amacı taşımaktadır. Robotun konum ve yönelim bilgileri bu dört enkoderden elde edilmektedir. Bu sistem odometri ile konumlamada güvenilirlik ve kesinliği büyük ölçüde geliştirmiştir.

Borenstein ve Feng (1996); Borenstein (1998); Park vd. (1997); Chung vd. (2001a; 2001b); Van Der Hardt vd. (1996); Azizi ve Houshangi (2004); Sauer vd. (2001) çalışmalarında enkoder ile sağlanan odometri ile birlikte, odometri hatalarının azaltılmasında jiroskop kullanmışlardır. Enkoder ve jiroskopun birlikte kullanılmasında robot bir doğrultuda hareket ederken enkoderlerden alınan bilgi ile odometri uygulanmaktadır, buna ek olarak dönüş açıları ise jiroskop ile tespit edilip özellikle farklı tekerlek çaplarından kaynaklanan odometri hataları azaltılmıştır.

Berman ve Powell (1998); Wada vd. (2000); Yun ve Kim (1999) çalışmalarında enkoder ve jiroskop ile birlikte GPS bilgilerini de konumlamada kullanmışlardır. GPS verileri oldukça kesin bilgi verdiği için dolayı GPS konumlama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GPS sinyallerinin bulunmadığı ortamlarda ise odometri kullanılarak konum bilgileri sağlanmaktadır. Ayrıca odometri hataları, GPS ile odometri bilgileri karşılaştırılarak odometri hataları azaltılabilmektedir.

5.1 Uygulamada Oluşturulan Tekerlekli Gezgin Robot

Odometride oluşan hataları izleyebilmek ve bu hataları azaltma çalışmalarında bulunmak üzere diferansiyel sürülen bir TGR uygulaması yapılmıştır. Bu robot birer DC motorla hareketlendirilen 2 adet sürüş tekerleği ve dengeyi sağlaması açısından bir kastor tekerlekten oluşmaktadır. Her bir sürüş tekerleğine ayrıca dışarıdan bir tam turda 500 darbe üreten 2 kanallı enkoder akuple edilmiştir. Böylece robotun konumu, enkoderlerden alınan bilgi mesafe bilgisine dönüştürülerek hesaplanabilmektedir.

Robotun kontrolü 8 bitlik bir mikro denetleyici olan Motorola MC68HC908GP32 ile sağlanmıştır. Bu denetleyicinin genel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- 8 MHz dahili çalışma frekansı,
- 512 byte RAM,

- 32 Kbyte FLASH hafıza,
- Seri çevre arabirim modülü,
- Seri haberleşme arabirim modülü,
- İki adet 2 kanallı 16 bitlik zamanlayıcı modülü,
- 8 kanallı 8 bitlik ADC,
- Saat darbesi oluşturma modülü,
- 33 adete kadar genel amaçlı giriş çıkış bağlantısı,
- 8 bit klavye bağlantısı,
- 16 bitlik indeks yazmacı,
- Hafızadan hafızaya veri transferi.

Denetleyicinin bünyesinde bulunan zamanlayıcı ile 8 bitlik PWM işareti üretilebilmektedir ve ayrıca kare dalga işaretler zamanlayıcı tarafından algılanıp seçilen şekilde yükselen veya düşen kenarlarda kesme oluşturulabilmektedir.

Mikro denetleyicide üretilen PWM sinyalleri bir güç devresinden geçirilerek DC motorlara ayrı ayrı uygulanmıştır, böylece bu iki motora bağlanmış olan tekerleklerin dönüş hızları ve yönleri birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Bu sistem uygulamada oldukça avantajlı olup bu avantajlardan en önemlisi robotun, merkezi tekerleklerin merkezi olan bir daire alanı tarayarak dönebilmesidir. Bu avantaj özellikle hareket planlarında ön plana çıkmaktadır.

Ayrıca tekerleklere bağlanan enkoderlerden mikro denetleyicinin giriş tutma modülü sayesinde bilgi alınmakta olup belirli aralıklarla robotun konumu hesaplanabilmektedir. Robotun tekerlek hızları her ne kadar farklı ayarlanabiliyor olsa da robotun bir çizgi üzerinde hareket etmesi pratikte olanaksız gibidir. Enkoderlerden alınan bilgi sayesinde bu problemin üstesinden kısmen gelinebilmektedir.

Odometri hatalarını belirlemek ve azaltmak üzere robot kare testine tabi tutulmuştur. Kare testinin sağlanması amacı ile robota üç ayrı yörünge takip ettirilmiştir. Bu çalışmalara geçilmeden önce PWM işaretleri ayarlanarak, robotun açık çevrim kontrol ile olabildiğince düz gitmesi sağlanmıştır.

Bir sonraki adımda robot düz bir çizgi üzerinde 3m hareket ettirilmiştir. Robota bu hareket yaptırılarak tekerlek çaplarının farklı olması veya gerçek tekerlek çaplarının bilinmemesi gibi konulardan kaynaklanan hatalar belirlenebilir. Bu çalışmayı sağlamak amacı ile 3m mesafe için tekerleklerin ne kadar dönmesi gerektiği hesaplanmış ve her iki tekerlekten alınan bilgi bu değere eşit olana kadar robot hareket ettirilmiştir. Burada her bir örnekleme zamanında sağ ve sol tekerleklerden alınan değerler karşılaştırılmış ve oluşan hata motorlara uygulanan PWM işareti değiştirilerek azaltılmaya çalışılmıştır. Robotun bu şekilde üç kez çalışmasında oluşan konum ve yönelim hatalarına ait değerler çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 3m’lik harekette oluşan hatalar

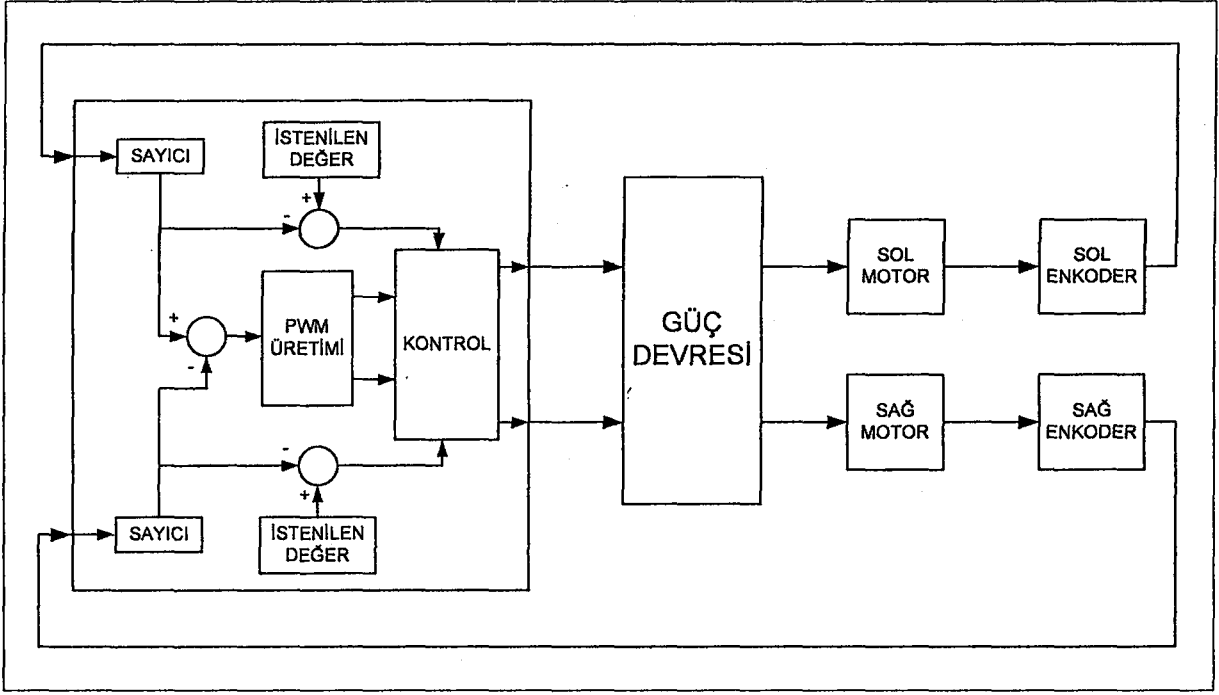
	$e_x(\text{mm})$	$e_y(\text{mm})$	$e_\theta(^{\circ})$
1	1	3	0.29
2	-1	2	1.15
3	1	0	1.15
Ortalama hata	1	1.7	0.86

İkinci çalışmada amaçlanan hareket ise robotun 3m düz gidip daha sonra olduğu yerde saat yönünün tersine 90°’lik bir dönüş yapmasıdır. Böylece tekerleklerin arasındaki mesafenin belirsizliği ortadan kaldırılmış olup bu değerler daha kesin olarak elde edilebilir. Denemelerden üç tanesine ait konum ve yönelim hataları çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 3m düz 90° dönüş hareketinde oluşan hatalar

	$e_x(\text{mm})$	$e_y(\text{mm})$	$e_\theta(^{\circ})$
1	13.2	5	-0.97
2	-51	10	-8.3
3	-17	7	3.2
Ortalama hata	27.06	7.3	4.15

Üçüncü çalışma ise robotun bir kare etrafında hareket ettirilmesinden oluşmaktadır. Bu çalışmada robot hareketini tamamladıktan sonra başlangıç konumu ve yönelimine geri dönmelidir, fakat bu pratikte olanaksızdır. Üç denemeye ait konum ve yönelim hataları çizelge 5.3’te verilmiştir. Burada oluşturulan sistemin genel blok diyagramı şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Oluşturulan sistemin genel blok diyagramı

Çizelge 5.2 3m kenarı olan kare etrafında hareket

	$e_x(\text{mm})$	$e_y(\text{mm})$	$e_\theta(^{\circ})$
1	114	147	-0.4
2	42	16	0.9
3	65	88	-1.8
Ortalama hata	73.7	251	1.3

6. SONUÇ

Özerk bir gezgin robot için en önemli konu robotun o anki konumunu bilmesidir. Aksi takdirde robot iki boyutlu düzlemde amacını uygulayamaz ve ortamda kaybolup hiçbir iş yapamaz hale gelir. TGR'da sistematik odometri hatalarının azaltılması uygulamada birçok çalışmanın temelini oluşturan bir konudur.

Bununla beraber, sistematik odometri hatalarının tamamen giderilmesi söz konusu olamaz, ancak odometri ile diğer yöntemlerin kullanılması ile bu hataların azaltılmasında büyük aşamalar kaydedilebilir.

Bu çalışma özerk bir robotun harita oluşturması amacı ile başlanan bir projenin ilk adımlarını oluşturmaktadır. Çalışmada robota üç yörünge takip ettirilmiş olup robot kare testine tabi tutularak odometri hataları azaltılmıştır. Konum hataları azaltılan bir robotun hafızasında bulunduracağı harita bilgileri de daha verimli olacaktır. Böylece bilinmeyen bir ortamın analizinde robot daha az hatalı bir harita bilgisi verecektir.

KAYNAKLAR

- Azizi, F., Houshangi, N., (2004), "Mobile Robot Position Determination Using Data from Gyro and Odometry", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2-5 May. 2004, Niagara Falls.
- Berman, Z., Powell, J.D., (1998), "The Role of Dead Reckoning and Inertial Sensors in Future General Aviation Navigation", IEEE Position Location and Navigation Symposium, 20-23 Apr. 1998.
- Borenstein, B., Feng, L., (1995), "Correction of systematic odometry errors in mobile robots", IEEE Intelligent Robots and Systems'95, 5-9 Aug. 1995.
- Borenstein, J., Everett, B., Feng, L., (1996a), Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques, A. K. Peters, Wellesley.
- Borenstein, B., Feng, L., (1996b), "Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12(6):869-880.
- Borenstein, B., Feng, L., (1996c), "Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 22-28 Apr. 1996, Minnesota.
- Borenstein, J., (1998), "Experimental Evaluation of a Fiber Optics Gyroscope for Improving Dead-Reckoning Accuracy in Mobile Robots", IEEE International Conference on Robotics and Automation, May. 1998, Leuven.
- Chenavier, F., Crowley, J.L., (1992), "Position estimation for a mobile robot using vision and odometry", IEEE International Symposium on Robotics and Automation, 12-14 May. 1992, Nice
- Chong, K. S., Kleeman, L., (1997), "Accurate Odometry and Error Modelling for a Mobile Robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 20-25 Apr. 1997 Albuquerque.
- Chung H., Ojeda L., Borenstein J., (2001a), "Accurate Mobile Robot Dead-Reckoning with a Precision-Calibrated Fiber-Optic Gyroscope", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17(1):80-84
- Chung H., Ojeda L., Borenstein J., (2001b), "Sensor fusion for Mobile Robot Dead-reckoning With a Precision-calibrated Fiber Optic Gyroscope", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 21-26 May. 2001, Seoul.
- Delibaşı, A., (2004) "Üç Serbestlik Dereceli Anthropomorphic Robot Kolun Modellenmesi ve Ters Dinamik Kontrolü", YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Dudek, G., Jenkin, M., (2000), Computational Principles of Mobile Robotics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Everett, H.R. (1995), Sensors for Mobile Robots Theory and Application, A. K. Peters, Wellesley.
- Fan, Z., Borenstein, J., Wehe, D., Koren, Y., (1995) "Experimental evaluation of an Encoder Trailer for dead-reckoning in tracked mobile robots", IEEE International Symposium on Intelligent Control, 27-29 Aug. 1995.

- Golfarelli, M., Maio, D., Rizzi, S. (2001), "Correction of Dead-Reckoning Errors in Map Building for Mobile Robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(1):37-47.
- Iwaki, F., Kakihara, M., Sasaki, M., (1989), "Recognition of vehicle's location for navigation", *Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, 11-13 Sep. 1991.
- Klafter, R.D., Chmielewski, T.A., Negin, M. (1999), *Robotic Engineering An Integrated Approach*, Printice Hall, New Jersey
- Kondo, M., Ohnishi, K., (2004), "Constructing a platform of robust position estimation for mobile robot by ODR", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13(2):922-925.
- Krakauer, D., (2003), "A Unique Angular-Rate-Sensing Gyro", *Sensors*, September, Vol. 20, No. 9.
- Makela, H., Koskinen, K., (1991), "Navigation of Outdoor Mobile Robots Using Dead Reckoning and Visually Detected Landmarks", *Fifth International Conference on Advanced Robotics*, 19-22 Jun. 1991.
- Martinelli, A., Tomatis, N., Tapus, A., Siegwart, R., (2003), "Simultaneous Localization and Odometry Calibration for Mobile Robot", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 27-31 Oct. 2003, Nevada.
- McNamee, L.P., "Photogrammetric Calibration of Mobile Robot Kinematics", *School of Information Technology and Engineering, Master Thesis*.
- Moon, J.W., Park, C.K., Harashima, F., (1999), "Kinematic Correction of a Differential Drive Mobile Robot and a Design for Velocity Trajectory with Acceleration Constraints on Motor Controllers", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 17-21 Oct. 1999.
- Nwokah, Osita D., Hurmuzlu, Y., (2002), *Mechanical Systems Design Handbook*, CRC Press, New York.
- Park, K., Chung H., Choi, J., Lee, J. G., "Dead Reckoning Navigation for an Autonomous Mobile Robot Using a Differential Encoder and a Gyroscope", *ICAR'97*, 7-9 July 1997, Monterey.
- Rogers, R. M., (1998), "Improved Heading Using Dual Speed Sensors for Angular Rate and Odometry in Land Navigation", *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 20-23 Apr. 1998.
- Tar in Sauer, C., Brugger, H., Hofer, E.P., Tibken, B., (2001), "Odometry Error Correction by Sensor Fusion for Autonomous Mobile Robot Navigation", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 21-23 May. 2001, Budapest
- Van Turennot, P., Honderd, G., Van Schelven, L.J., (1992), "Wall-following control of a mobile robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 12-14 May. 1992, Nice.
- Wada, M., Yoon K.S., Hashimoto, H., (2000), "High accuracy multisensor road vehicle state estimation", *26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 22-28 Oct. 2000.
- Xu, D., Tan, M., Chan, G., (2002), "An Improved Dead Reckoning Method for Mobile Robot With Redundant Odometry Information", *ICARCV'02*, 2-5 Dec. 2002, Singapore.

Yamamoto, T., Maeyama, S., Ohya, A., Yuta, S., (1999), "An Implementation of Landmark-based Position Estimation Function as an Autonomous and Distributed System for a Mobile Robot", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 17-21 Oct. 1999.

Yamauchi, B., (1996), "Mobile Robot Localization in Dynamic Environments Using Dead Reckoning and Evidence Grids", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 22-28 Apr. 1996, Minnesota.

Yun, D.S., Kim, J.H., (1999), "The Sensor fusion of Gyro Controller System for the Smart Vehicle", IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 15-18 Aug. 1999, Taipei.

Von Der Hardt, H. J.Wolf, D., Husson, R., (1996), "The dead reckoning localization system of the wheeled mobile robot ROMANE", IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 8-11 Dec. 1996.

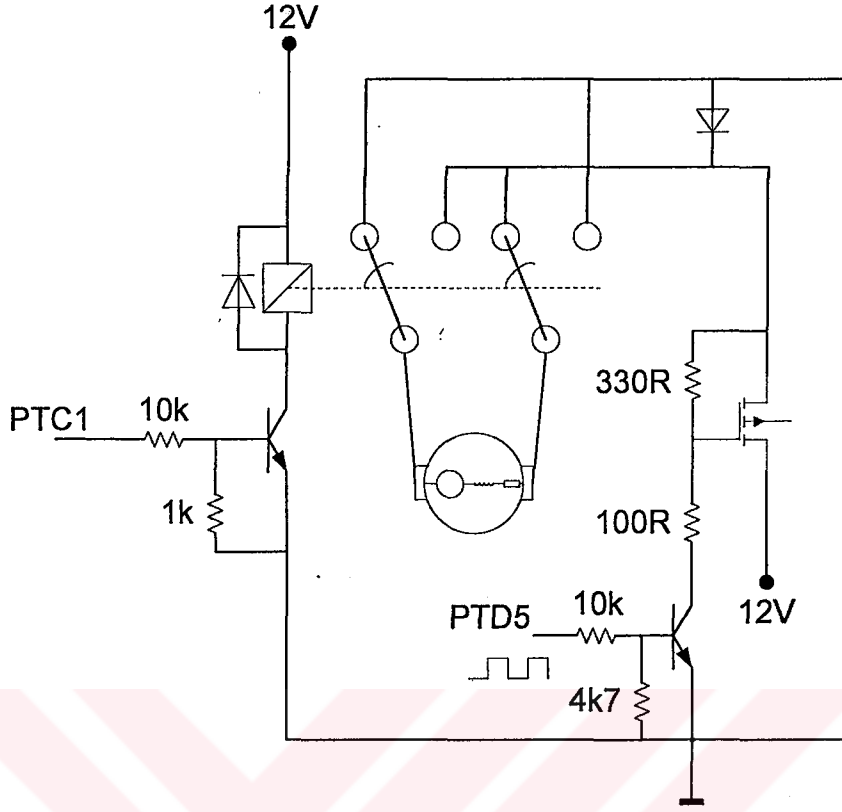


EKLER

- Ek 1 Uygulamada kullanılan motor sürme devresi
- Ek 2 Program akış diyagramı
- Ek 3 3m'lik hareketi sağlayan assembly program kodu
- Ek 4 3m'lik hareket ile beraber sonrasında 90°'lik dönüşü sağlayan assembly program kodu
- Ek 5 Bir kenarı 3m olan kare etrafındaki hareketi sağlayan assembly program kodu

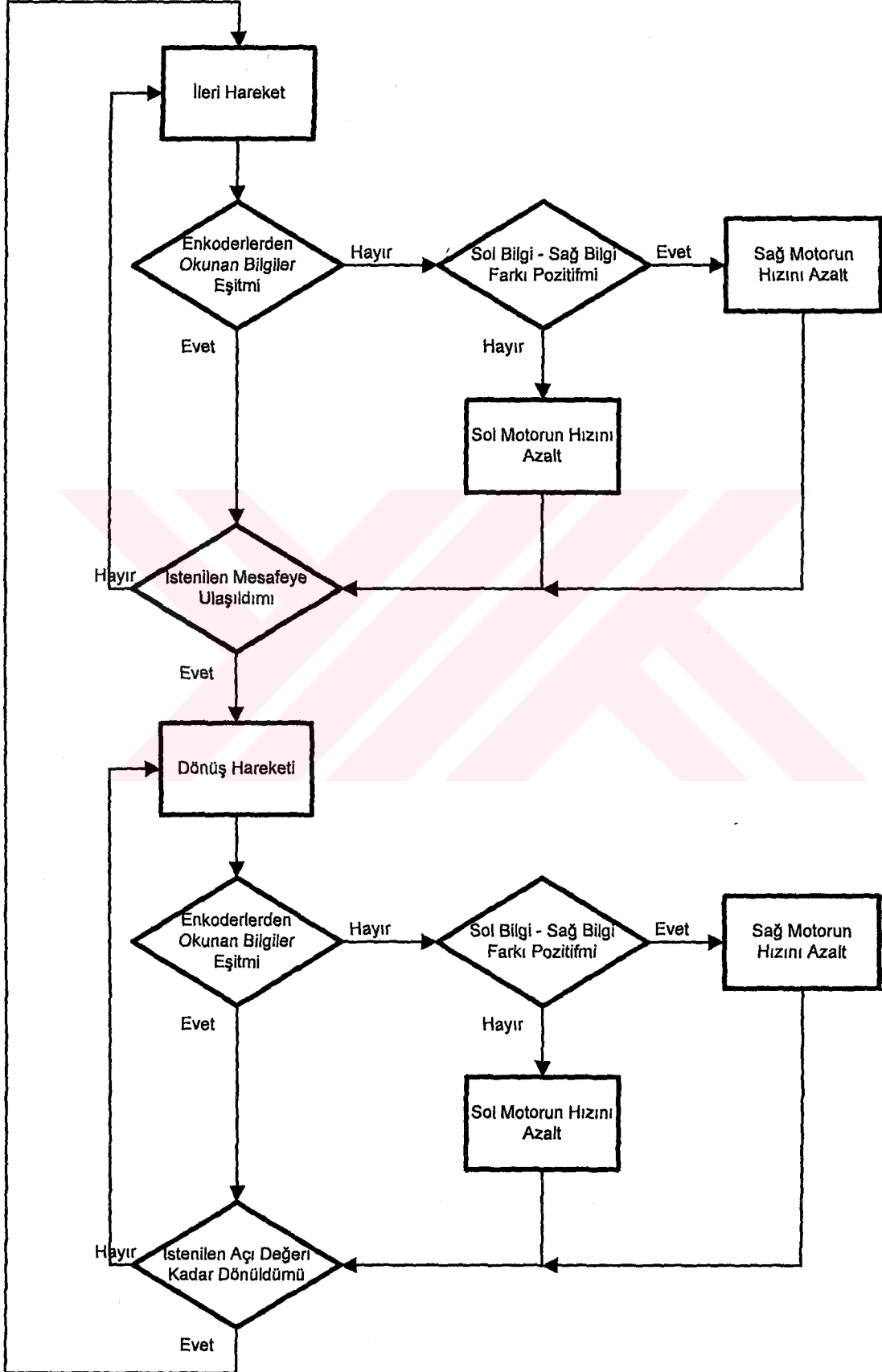


Ek 1 Uygulamada kullanılan motor sürme devresi



Şekil Ek 1.1 Uygulamada kullanılan motor sürme devresi

Ek 2 Program akış diyagramı



Ek 3 3m'lik hareketi sağlayan assembly program kodu

```
RAMStart EQU $0040
```

```
RomStart EQU $E000
```

```
VectorStart EQU $FFDC
```

```
$Include 'gpgtregs.inc'
```

```
org RamStart
```

```
internal_error ds 1
```

```
solpulse ds 1
```

```
sagpulse ds 1
```

```
sagust ds 1
```

```
sagalt ds 1
```

```
solust ds 1
```

```
solalt ds 1
```

```
count ds 3
```

```
count1 ds 3
```

```
hata ds 1
```

```
durum ds 1
```

```
org RomStart
```

```
gpio_init:
```

```
lda #$FF
```

```
sta PTA
```

```
sta PTB
```

```
clra
```

```
mov #$01,PTC
```

```
sta PTD
```

```
sta PTE
mov #01,DDRA
mov #0,DDRB
mov #$FF,DDRC
mov #$30,DDRD
mov #0,DDRE
mov #$06,PTAPUE
mov #$00,PTCPUE
mov #$C0,PTDPUE
rts
```

cgm_init:

```
mov #$01,PCTL
mov #$80,PBWC
mov #$01,PMSH
mov #$E9,PMSL
mov #$D1,PMRS
mov #$01,PMDS
bset 5,PCTL
brclr 6,PBWC,*
bset 4,PCTL
rts
```

timer_init:

```
bset 5,T1SC
bset 4,T1SC
mov #$0,T1MODH
mov #$FF,T1MODL
mov #$00,T1CH0H
mov #$FE,T1CH0L
mov #$00,T1CH1H
```

```
mov  #$FE,T1CH1L
mov  #$10,T1SC
mov  #$9E,T1SC0
mov  #$9E,T1SC1
bset 5,T2SC
bset 4,T2SC
mov  #$10,T2SC
mov  #$0,T2MODH
mov  #$FF,T2MODL
mov  #$44,T2SC0
mov  #$44,T2SC1
mov  #$00,T2CH0H
mov  #$00,T2CH0L
mov  #$00,T2CH1H
mov  #$00,T2CH1L
rts
```

Main: ; ilk ayarlamaların yapıldığı başlangıç rutini

```
rsp
clra
dbnza *
clrx
sta  internal_error
sta  solpulse
sta  sagpulse
sta  sagust
sta  sagalt
sta  solust
sta  solalt
sta  count
sta  count+1
```

```

sta  count1
sta  count1+1
sta  durum
sta  hata
mov  #$3A,count+2
mov  #$15,count1+2
mov  #$31,CONFIG1
jsr  gpio_init
jsr  cgm_init
bsr  timer_init
clra
bset 0,PTA

```

bekleme: ; Başlangıçta bir süre gecikme sağlar

```

dbnz count,bekleme
dbnz count+1,bekleme
dbnz count+2,bekleme
mov  #$15,count+2
bclr 5,T1SC
bclr 0,PTA

```

main_loop: ; robotun hareketinin başlatılması

```

bclr 2,PTC
mov  #$00,T1CH0H
mov  #$50,T1CH0L
mov  #$00,T1CH1H
mov  #$57,T1CH1L
cli

```

movement: ; hareket yönünün sorgulanması

```

lda  durum

```

```

cbeqa #00,ileri
cbeqa #01,ilerisag
cbeqa #02,ilerisol
jmp control

```

ileri: ; 3m için sağ tekerlek gereken dönüşü yaptımı

```

ldhx sagust
cphx #0D6A
bhs sagdur

```

ileril: ; 3m için sol tekerlek gereken dönüşü yaptımı

```

ldhx solust
cphx #0D6A
bhs soldur
jmp control

```

sagdur: ; sağ tekerleğin durdurulması

```

mov #00,T1CH1H
mov #FE,T1CH1L
lda T1CH0L
cbeqa #FE,ileribitti
mov #02,durum
bra ileril

```

soldur: ; sol tekerleğin durdurulması

```

mov #00,T1CH0H
mov #FE,T1CH0L
lda T1CH1L
cbeqa #FE,ileribitti
mov #01,durum
bra movement

```

ilerisag: ; 3m için sol tekerlek durduktan sonra sağ tekerlek dönüşünü tamamladımı

```
ldhx sagust
cphx #0D6A
bhs sagdur
bra movement
```

ilerisol: ; 3m için sağ tekerlek durduktan sonra sol tekerlek dönüşünü tamamladımı

```
ldhx solust
cphx #0D6A
bhs soldur
bra movement
```

ileribitti: ; ileri hareketin sonlandırılması

```
mov #03,PTC
mov #03,durum
dbnz count,ileribitti
dbnz count+1,ileribitti
dbnz count+2,ileribitti
mov #15,count+2
clr sagust
clr sagalt
clr solust
clr solalt
bra *
```

control: ; sağ ve sol tekerleklerden alınan bilgilerin karşılaştırılması

```
lda sagpulse
sub solpulse
cbeqa #00,bitti
cmp #80
```

bhi solazalt

sagazalt: ; sağ tekerleğin hızının azaltılması

```
lda T1CH1L
inca
mov #$00,T1CH1H
sta T1CH1L
mov #$00,T1CH0H
mov #$50,T1CH0L
bra bitti
```

solazalt: ; sol tekerleğin hızının azaltılması

```
lda T1CH0L
inca
mov #$00,T1CH0H
sta T1CH0L
mov #$00,T1CH1H
mov #$57,T1CH1L
```

bitti:

```
jmp movement
```

sol: ; sol enkoder darbelerinin sayılması

```
psha
lda solpulse
inca
cbeqa #$FF,solreset
sta solpulse
```

solgel:

```
lda solalt
inca
```

```
cbeqa #$00,highsol
```

```
sta solalt
```

```
bra solcik
```

```
solreset:
```

```
lda solpulse
```

```
sub sagpulse
```

```
sta solpulse
```

```
clr sagpulse
```

```
bra solgel
```

```
highsol:
```

```
sta solalt
```

```
inc solust
```

```
solcik:
```

```
bclr 7,T2SC0
```

```
pula
```

```
rti
```

```
sag: ; sag enkoder darbelerinin sayılması
```

```
psha
```

```
lda sagpulse
```

```
inca
```

```
cbeqa #$FF,sagreset
```

```
sta sagpulse
```

```
saggel:
```

```
lda sagalt
```

```
inca
```

```
cbeqa #$00,highsag
```

```
sta sagalt  
bra sagcik
```

sagreset:

```
lda sagpulse  
sub solpulse  
sta sagpulse  
clr solpulse  
bra saggel
```

highsag:

```
sta sagalt  
inc sagust
```

sagcik:

```
bclr 7,T2SC1  
pula  
rti
```

dummy_isr:

```
inc internal_error  
rti
```

```
org VectorStart  
dw dummy_isr  
dw dummy_isr  
dw dummy_isr  
dw dummy_isr  
dw dummy_isr  
dw dummy_isr  
dw dummy_isr
```

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw sag

dw sol

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw main



Ek 4 3m'lik hareket ile beraber sonrasında 90°'lik dönüşü sağlayan assembly program kodu

```
RAMStart EQU $0040
```

```
RomStart EQU $E000
```

```
VectorStart EQU $FFDC
```

```
$Include 'gpptregs.inc'
```

```
org RamStart
```

```
internal_error ds 1
```

```
solpulse ds 1
```

```
sagpulse ds 1
```

```
sagust ds 1
```

```
sagalt ds 1
```

```
solust ds 1
```

```
solalt ds 1
```

```
count ds 3
```

```
count1 ds 3
```

```
hata ds 1
```

```
durum ds 1
```

```
org RomStart
```

```
gpio_init:
```

```
lda #$FF
```

```
sta PTA
```

```
sta PTB
```

```
clra
```

```
mov #$01,PTC
```

```
sta PTD
```

```
sta PTE
mov #01,DDRA
mov #0,DDRB
mov #$FF,DDRC
mov #$30,DDRD
mov #0,DDRE
mov #$06,PTAPUE
mov #$00,PTCPUE
mov #$C0,PTDPUE
rts
```

cgm_init:

```
mov #$01,PCTL
mov #$80,PBWC
mov #$01,PMSH
mov #$E9,PMSL
mov #$D1,PMRS
mov #$01,PMDS
bset 5,PCTL
brclr 6,PBWC,*
bset 4,PCTL
rts
```

timer_init:

```
bset 5,T1SC
bset 4,T1SC
mov #$0,T1MODH
mov #$FF,T1MODL
mov #$00,T1CH0H
mov #$FE,T1CH0L
mov #$00,T1CH1H
```

```
mov  #$FE,T1CH1L
mov  #$10,T1SC
mov  #$9E,T1SC0
mov  #$9E,T1SC1
bset 5,T2SC
bset 4,T2SC
mov  #$10,T2SC
mov  #$0,T2MODH
mov  #$FF,T2MODL
mov  #$44,T2SC0
mov  #$44,T2SC1
mov  #$00,T2CH0H
mov  #$00,T2CH0L
mov  #$00,T2CH1H
mov  #$00,T2CH1L
rts
```

Main: ; ilk ayarlamaların yapıldığı başlangıç rutini

```
rsp
clra
dbnza *
clrx
sta  internal_error
sta  solpulse
sta  sagpulse
sta  sagust
sta  sagalt
sta  solust
sta  solalt
sta  count
sta  count+1
```

```

sta count1
sta count1+1
sta durum
sta hata
mov #$3A,count+2
mov #$15,count1+2
mov #$31,CONFIG1
jsr gpio_init
jsr cgm_init
bsr timer_init
clra
bset 0,PTA

```

bekleme: ; Başlangıçta bir süre gecikme sağlar

```

dbnz count,bekleme
dbnz count+1,bekleme
dbnz count+2,bekleme
mov #$15,count+2
bclr 5,T1SC
bclr 0,PTA

```

main_loop: ; robotun hareketinin başlatılması

```

bclr 2,PTC
mov #$00,T1CH0H
mov #$50,T1CH0L
mov #$00,T1CH1H
mov #$57,T1CH1L
cli

```

movement: ; hareket yönünün sorgulanması

```
lda durum
```

```

cbeqa #$00,ileri
cbeqa #$01,ilerisag
cbeqa #$02,ilerisol
cbeqa #$03,donus
cbeqa #$04,donussag
cbeqa #$05,donussol
jmp control

```

ileri: ; 3m için sağ tekerlek gereken dönüşü yaptımı

```

ldhx sagust
cphx #$0D6A
bhs sagdur

```

ileri1: ; 3m için sol tekerlek gereken dönüşü yaptımı

```

ldhx solust
cphx #$0D6A
bhs soldur
jmp control

```

sagdur: ; sağ tekerleğin durdurulması

```

mov #$00,T1CH1H
mov #$FE,T1CH1L
lda T1CH0L
cbeqa #$FE,ileribitti
mov #$02,durum
bra ileri1

```

soldur: ; sol tekerleğin durdurulması

```

mov #$00,T1CH0H
mov #$FE,T1CH0L

```

```

lda TICHIL
cbeqa #\$FE,ileribitti
mov #\$01,durum
bra movement

```

ilerisag: ; 3m için sol tekerlek durduktan sonra sağ tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx sagust
cphx #\$0D6A
bhs sagdur
bra movement

```

ilerisol: ; 3m için sağ tekerlek durduktan sonra sol tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx solust
cphx #\$0D6A
bhs soldur
bra movement

```

donus: ; dönüş hareketinde sağ tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx sagust
cphx #\$0163
bhs sagdur1

```

donussol: ; dönüş hareketinde sol tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx solust
cphx #\$0163
bhs soldur1
jmp control

```

donussag: ; sol tekerlek durduktan sonra sağ tekerlek dönme hareketini tamamladımı

```

ldhx sagust
cphx #\$0163

```

```
bhs sagdur1
jmp movement
```

ileribitti: ; ileri hareketi sonlandırma ve dönüş hareketine başlama

```
mov #$03,PTC
mov #$03,durum
dbnz count,ileribitti
dbnz count+1,ileribitti
dbnz count+2,ileribitti
mov #$15,count+2
clr sagust
clr sagalt
clr solust
clr solalt
mov #$00,T1CH0H
mov #$50,T1CH0L
mov #$00,T1CH1H
mov #$57,T1CH1L
jmp movement
```

sagdur1: ; Dönüş hareketinde sağ tekerleği durdurma

```
mov #$00,T1CH1H
mov #$FE,T1CH1L
lda T1CH0L
cbeqa #$FE,donusbitti
mov #$05,durum
bra donussol
```

soldur1: ; Dönüş hareketinde sol tekerleği durdurma

```
mov #$00,T1CH0H
mov #$FE,T1CH0L
```

```

lda T1CH1L
cbeqa #$FE,donusbitti
mov  #$04,durum
jmp  movement

```

donusbitti: ; dönüş hareketini sonlandırma

```

mov  #$01,PTC
mov  #$00,durum
dbnz count1,donusbitti
dbnz count1+1,donusbitti
dbnz count1+2,donusbitti
mov  #$15,count1+2

clr  sagust
clr  sagalt
clr  solust
clr  solalt
bra

```

control: ; sağ ve sol tekerleklerden alınan bilgilerin karşılaştırılması

```

lda  sagpulse
sub  solpulse
cbeqa #$00,bitti
cmp  #$80
bhi  solazalt

```

sagazalt: ; sağ tekerleğin hızının azaltılması

```

lda T1CH1L
inca
mov  #$00,T1CH1H
sta T1CH1L
mov  #$00,T1CH0H

```

```
mov  #$50,T1CH0L
```

```
bra  bitti
```

solazalt: ; sol tekerleğin hızının azaltılması

```
lda  T1CH0L
```

```
inca
```

```
mov  #$00,T1CH0H
```

```
sta  T1CH0L
```

```
mov  #$00,T1CH1H
```

```
mov  #$57,T1CH1L
```

bitti:

```
jmp  movement
```

sol: ; sol enkoder darbelerinin sayılması

```
psha
```

```
lda  solpulse
```

```
inca
```

```
cbeqa #$FF,solreset
```

```
sta  solpulse
```

solgel:

```
lda  solalt
```

```
inca
```

```
cbeqa #$00,highsol
```

```
sta  solalt
```

```
bra  solcik
```

solreset:

```
lda  solpulse
```

```
sub  sagpulse
```

```
sta  solpulse
```

clr sagpulse

bra solgel

highsol:

sta solalt

inc solust

solcik:

bclr 7,T2SC0

pula

rti

sag: ; sag enkoder darbelerinin sayılması

psha

lda sagpulse

inca

cbeqa #\$FF,sagreset

sta sagpulse

saggel:

lda sagalt

inca

cbeqa #\$00,highsag

sta sagalt

bra sagcik

sagreset:

lda sagpulse

sub solpulse

sta sagpulse

clr solpulse

```
bra saggel
```

```
highsag:
```

```
sta sagalt
```

```
inc sagust
```

```
sagcik:
```

```
bclr 7,T2SC1
```

```
pula
```

```
rti
```

```
dummy_isr:
```

```
inc internal_error
```

```
rti
```

```
org VectorStart
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw sag
```

```
dw sol
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

```
dw dummy_isr
```

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw main



Ek 5 Bir kenarı 3m olan kare etrafındaki hareketi sağlayan assembly program kodu

```
RAMStart EQU $0040
RomStart EQU $E000
VectorStart EQU $FFDC
```

```
$Include 'gpgtregs.inc'
```

```
org RamStart
```

```
internal_error ds 1
solpulse ds 1
sagpulse ds 1
sagust ds 1
sagalt ds 1
solust ds 1
solalt ds 1
count ds 3
count1 ds 3
hata ds 1
durum ds 1
kenar ds 1
```

```
org RomStart
```

```
gpio_init:
```

```
lda #$FF
sta PTA
sta PTB
clra
mov #$01,PTC
```

```
sta   PTD
sta   PTE
mov   #01,DDRA
mov   #0,DDRB
mov   #$FF,DDRC
mov   #$30,DDRD
mov   #0,DDRE
mov   #$06,PTAPUE
mov   #$00,PTCPUE
mov   #$C0,PTDPUE
rts
```

cgm_init:

```
mov   #$01,PCTL
mov   #$80,PBWC
mov   #$01,PMSH
mov   #$E9,PMSL
mov   #$D1,PMRS
mov   #$01,PMDS
bset  5,PCTL
brclr 6,PBWC,*
bset  4,PCTL
rts
```

timer_init:

```
bset  5,T1SC
bset  4,T1SC
mov   #$0,T1MODH
mov   #$FF,T1MODL
mov   #$00,T1CH0H
mov   #$FE,T1CH0L
```

```

mov  #$00,T1CH1H
mov  #$FE,T1CH1L
mov  #$10,T1SC
mov  #$9E,T1SC0
mov  #$9E,T1SC1
bset 5,T2SC
bset 4,T2SC
mov  #$10,T2SC
mov  #$0,T2MODH
mov  #$FF,T2MODL
mov  #$44,T2SC0
mov  #$44,T2SC1
mov  #$00,T2CH0H
mov  #$00,T2CH0L
mov  #$00,T2CH1H
mov  #$00,T2CH1L
rts

```

Main: ; ilk ayarlamaların yapıldığı başlangıç rutini

```

rsp
clra
dbnza *
clrx
sta  internal_error
sta  solpulse
sta  sagpulse
sta  sagust
sta  sagalt
sta  solust
sta  solalt
sta  count

```

```

sta count+1
sta count1
sta count1+1
sta durum
sta hata
sta kenar
mov #$3A,count+2
mov #$15,count1+2
mov #$31,CONFIG1
jsr gpio_init
jsr cgm_init
bsr timer_init
clra
bset 0,PTA

```

bekleme: ; Başlangıçta bir süre gecikme sağlar

```

dbnz count,bekleme
dbnz count+1,bekleme
dbnz count+2,bekleme
mov #$15,count+2
bclr 5,T1SC
bclr 0,PTA

```

main_loop: ; robotun hareketinin başlatılması

```

bclr 2,PTC
mov #$00,T1CH0H
mov #$50,T1CH0L
mov #$00,T1CH1H
mov #$57,T1CH1L
cli

```

movement: ; hareket yönünün sorgulanması

```
lda durum
cbeqa #$00,ileri
cbeqa #$01,ilerisag
cbeqa #$02,ilerisol
cbeqa #$03,donus
cbeqa #$04,donussag
cbeqa #$05,donussol
jmp control
```

ileri: ; 3m için sağ tekerlek gereken dönüşü yaptımı

```
ldhx sagust
cphx #$0D6A
bhs sagdur
```

ileri1: ; 3m için sol tekerlek gereken dönüşü yaptımı

```
ldhx solust
cphx #$0D6A
bhs soldur
jmp control
```

sagdur: ; sağ tekerleğin durdurulması

```
mov #$00,T1CH1H
mov #$FE,T1CH1L
lda T1CH0L
cbeqa #$FE,ileribitti
mov #$02,durum
bra ileri1
```

soldur: ; sol tekerleğin durdurulması

```

mov  #\$00,T1CH0H
mov  #\$FE,T1CH0L
lda  T1CH1L
cbeqa #\$FE,ileribitti
mov  #\$01,durum
bra  movement

```

ilerisag: ; 3m için sol tekerlek durduktan sonra sağ tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx sagust
cphx #\$0D6A
bhs sagdur
bra  movement

```

ilerisol: ; 3m için sağ tekerlek durduktan sonra sol tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx solust
cphx #\$0D6A
bhs soldur
bra  movement

```

donus: ; dönüş hareketinde sağ tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx sagust
cphx #\$0163
bhs sagdur1

```

donussol: ; dönüş hareketinde sol tekerlek dönüşünü tamamladımı

```

ldhx solust
cphx #\$0163
bhs soldur1
jmp  control

```

donussag: ; sol tekerlek durduktan sonra sağ tekerlek dönme hareketini tamamladımı

```
ldhx sagust
cphx #0163
bhs sagdur1
jmp movement
```

ileribitti: ; ileri hareketi sonlandırma ve dönüş hareketine başlama

```
mov #03,PTC
mov #03,durum
dbnz count,ileribitti
dbnz count+1,ileribitti
dbnz count+2,ileribitti
mov #15,count+2
clr sagust
clr sagalt
clr solust
clr solalt
mov #00,T1CH0H
mov #50,T1CH0L
mov #00,T1CH1H
mov #57,T1CH1L
jmp movement
```

sagdurl: ; Dönüş hareketinde sağ tekerleği durdurma

```
mov #00,T1CH1H
mov #FE,T1CH1L
lda T1CH0L
cbeqa #FE,donusbitti
mov #05,durum
bra donussol
```

soldurl: ; Dönüş hareketinde sol tekerleği durdurma

```

mov  #$00,T1CH0H
mov  #$FE,T1CH0L
lda  T1CH1L
cbeqa  #$FE,donusbitti
mov  #$04,durum
jmp  movement

```

donusbitti: ; dönüş hareketini sonlandırma ve ileri harekete başlama

```

mov  #$01,PTC
mov  #$00,durum
dbnz  count1,donusbitti
dbnz  count1+1,donusbitti
dbnz  count1+2,donusbitti
mov  #$15,count1+2
clr  sagust
clr  sagalt
clr  solust
clr  solalt
lda  kenar
inca
cbeqa  #$04,karebitti
sta  kenar
mov  #$00,T1CH0H
mov  #$50,T1CH0L
mov  #$00,T1CH1H
mov  #$57,T1CH1L
jmp  movement

```

karebitti:

```
bra  *
```

control: ; sağ ve sol tekerleklerden alınan bilgilerin karşılaştırılması

```
lda sagpulse
sub solpulse
cbeqa #00,bitti
cmp #80
bhi solazalt
```

sagazalt: ; sağ tekerleğin hızının azaltılması

```
lda T1CH1L
inca
mov #00,T1CH1H
sta T1CH1L
mov #00,T1CH0H
mov #50,T1CH0L
bra bitti
```

solazalt: ; sol tekerleğin hızının azaltılması

```
lda T1CH0L
inca
mov #00,T1CH0H
sta T1CH0L
mov #00,T1CH1H
mov #57,T1CH1L
```

bitti:

```
jmp movement
```

sol: ; sol enkoder darbelerinin sayılması

```
psha
lda solpulse
inca
cbeqa #FF,solreset
```

sta solpulse

solgel:

lda solalt

inca

cbeqa #00,highsol

sta solalt

bra solcik

solreset:

lda solpulse

sub sagpulse

sta solpulse

clr sagpulse

bra solgel

highsol:

sta solalt

inc solust

solcik:

bclr 7,T2SC0

pula

rti

sag: ; sag enkoder darbelerinin sayılması

psha

lda sagpulse

inca

cbeqa #FF,sagreset

sta sagpulse

saggel:

```
lda sagalt
inca
cbeqa #00,highsag
sta sagalt
bra sagcik
```

sagreset:

```
lda sagpulse
sub solpulse
sta sagpulse
clr solpulse
bra saggel
```

highsag:

```
sta sagalt
inc sagust
```

sagcik:

```
bclr 7,T2SC1
pula
rti
```

dummy_isr:

```
inc internal_error
rti
```

```
org VectorStart
dw dummy_isr
dw dummy_isr
```

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw sag

dw sol

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw dummy_isr

dw main

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	16.03.1981	
Doğum yeri	Saray	
Lise	1994-1997	Selimiye Veteriner Sağlık Meslek Lisesi
Lisans	1997-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Programı
Çalıştığı kurum	2002-Devam ediyor	YTÜ Elektrik-Elektronik Fak. Araştırma Görevlisi

