

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ROBOT KONTROL SİSTEMLERİNDEKİ  
ALGILAYICILARDA MEYDANA GELEN ARIZALARIN  
TESPİT VE TEŞHİSİ İÇİN ALGORİTMALAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Hakan AKKOÇ**

**Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2008**

**ROBOT KONTROL SİSTEMLERİNDEKİ  
ALGILAYICILARDA MEYDANA GELEN ARIZALARIN  
TESPİT VE TEŞHİSİ İÇİN ALGORİTMALAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Hakan AKKOÇ  
504031108**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007  
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Ocak 2008**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Fikret ÇALIŞKAN  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Çingiz HACIYEV  
Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ**

**OCAK 2008**

## **ÖNSÖZ**

Tez çalışmamın başlangıcından bu yana, bana her konuda yardımcı olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Fikret ÇALIŞKAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu proje İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından desteklenmiştir.

Ocak 2008

Hakan AKKOÇ

*Elektrik Mühendisi*

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ÖZET</b>	<b>x</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. MOBİL ROBOTLAR</b>	<b>5</b>
2.1. Robot Türleri	6
2.1.1. Robot Kollar	6
2.1.2. Mobil Robotlar	7
2.2. Robotların Kullanım Alanları	9
2.2.1. Endüstriyel Robotik	9
2.2.2. Operasyonel Robotik	9
2.2.3. Tıp ve Sağlık Alanında Robotik	10
2.2.4. Sibernetikte Robotik	10
2.2.5. Hobi ve Eğlence Sektöründe Robotik	10
2.2.6. Askeri Alanda Robotik	10
2.3. Mobil Robot Modeli	10
2.4. Mobil Robotlarda Meydana Gelen Arızalar	14
2.5. Mobil Robotlarda Kullanılan Algılayıcılar	15
2.5.1. Dokunma Algılayıcıları	15
2.5.2. Basınç Algılayıcıları	16
2.5.3. Eğim ve Denge Algılayıcıları	17
2.5.4. Işık Algılayıcıları	18
2.5.5. Fotodirençler	19
2.5.6. Kızılötesi Algılayıcılar	19
2.5.7. Fototransistörler	19
2.5.8. Yansıma Algılayıcıları	20
2.5.9. Uzaklık ve Engel Tanıma Algılayıcıları	20
2.5.10. Mesafe Ölçüm Algılayıcıları	21
2.5.11. Enkoderler	22
2.5.12. Ultrasonik Algılayıcılar	22
<b>3. KALMAN FİLTRESİ</b>	<b>24</b>
3.1. Kalman Filtresi	25
3.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi	30

<b>4. ARIZA TESPİTİ VE TEŞHİSİ</b>	<b>36</b>
4.1. Arıza Tespit ve Teşhis Algoritması	39
4.2. Arıza Tespit ve Teşhisi Algoritması için Simülasyon Çalışması	40
4.2.1. Arızasız Durum	41
4.2.2. Arızalı Durum	42
4.2.3. Yeniden Yapılandırma Sonrasında Durum	45
<b>5. GERÇEK MOBİL ROBOT ÜZERİNDE UYGULAMA</b>	<b>46</b>
5.1. Mikrokontrolör	48
5.2. Mesafe Algılayıcıları	50
5.2.1. Çalışma Mantığı	51
5.2.2. Algılayıcı İç Yapısının Blok Diyagramı	52
5.3. Elektronik Pusula	53
5.3.1. Pusulanın Kalibrasyonu	54
5.3.2. Elektronik Pusulanın Devre İçerisinde Kullanımı	57
5.4. Motor Sürücüsü	58
5.5. Güç Kaynağı	59
5.6. Uygulama Senaryosu	60
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>62</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>65</b>
<b>EKLER</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>71</b>

## KISALTMALAR

<b>ATT</b>	: Arıza Tespit ve Teşhisi
<b>GPS</b>	: Global Positioning System
<b>LED</b>	: Light Emiting Diode
<b>IR</b>	: Infra-Red
<b>UV</b>	: Ultra-Violet
<b>CMOS</b>	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
<b>LDR</b>	: Light Dependant Resistor
<b>GKF</b>	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
<b>USB</b>	: Universal Serial Bus
<b>ADC</b>	: Analog-Digital Converter
<b>I2C</b>	: Inter-Integrated Circuit
<b>PWM</b>	: Pulse Width Modulation
<b>SPP</b>	: Serial Protocol Profile
<b>MSSP</b>	: Master Synchronous Serial Port
<b>SPI</b>	: Serial Peripheral Interface
<b>USART</b>	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
<b>PLL</b>	: Phase Locked Loop
<b>EEPROM</b>	: Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory
<b>MBD</b>	: Model Based Diagnosis

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 4.1</b> Rezidü yapılandırması.....	40
<b>Tablo 5.1</b> Mesafe algılayıcısının genel özellikleri.....	51
<b>Tablo 5.2</b> Mesafe algılayıcısının elektriksel özellikleri.....	51
<b>Tablo 5.3</b> Elektronik pusulanın yazmaçlarının açıklaması.....	54

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : “Asimo” ve “Opportunity” .....	2
Şekil 2.1 : Robot kollar robotikte en çok kullanılan uygulamalardandır.....	6
Şekil 2.2 : Mobil robotlar robotiğin diğer geniş uygulama alanlarındandır...	7
Şekil 2.3 : Bir mobil robotun genel blok diyagramı.....	9
Şekil 2.4 : Diferansiyel tip ve araba tipi mobil robotlar.....	11
Şekil 2.5 : Mobil robotun (x-y) eksenleri üzerindeki görünüşü.....	11
Şekil 2.6 : Robotlarda meydana gelen arızaların sınıflandırılması.....	15
Şekil 2.7 : En basit dokunma algılayıcıları.....	16
Şekil 2.8 : Basınç algılayıcılarının yapısı.....	17
Şekil 2.9 : Demir bilyeli eğim algılayıcısı.....	17
Şekil 2.10 : Işık kaynaklarının insan gözü algılamasına göre durumu.....	18
Şekil 2.11 : Fotodirençlerin dış görünümü.....	19
Şekil 2.12 : Fototransistörlerin genel kullanımı.....	20
Şekil 2.13 : Engel tanıma algılayıcıları.....	21
Şekil 2.14 : Mesafe ölçüm algılayıcıları.....	21
Şekil 2.15 : Enkoderlerin genel görünümü.....	22
Şekil 2.16 : Bir ultrasonik algılayıcı.....	23
Şekil 3.1 : Bir sistemin genel blok diyagramı.....	25
Şekil 3.2 : Sisteme gürültü eklenmiş durum.....	26
Şekil 3.3 : Sistemin ölçüm gürültülerinin de eklendiği durumu.....	26
Şekil 3.4 : Sistemin benzeri, sistemin durumlarının tahmini için kullanılır...	27
Şekil 3.5 : Doğrulamanın eklendiği blok diyagramı.....	27
Şekil 3.6 : Robotun gerçek yörüngesi ve GKF tahmini.....	34
Şekil 4.1 : Sistemin genel blok diyagramı.....	38
Şekil 4.2 : GKF dizisi.....	39
Şekil 4.3 : Robota verilen görev yörüngesi.....	41
Şekil 4.4 : Simülasyon sonucunda sistemin gerçek ve tahmin edilen yörüngeleri.....	41
Şekil 4.5 : x ve y eksenleri ve $\theta$ algılayıcıları çıkışları.....	42
Şekil 4.6 : x eksenli algılayıcısına ait rezidü.....	42
Şekil 4.7 : Arıza durumundaki gerçek robot yörüngesi ve GKF tahmini.....	42
Şekil 4.8 : GKF 1'in y eksenli ve $\theta$ algılayıcısına ait rezidüleri.....	43
Şekil 4.9 : GKF 2'nin x eksenli ve $\theta$ algılayıcısına ait rezidüleri.....	43
Şekil 4.10 : GKF 3'ün x ve y eksenli algılayıcısına ait rezidüleri.....	44
Şekil 4.11 : GKF dizisinde oluşturulan rezidülerin toplu gösterimi.....	44
Şekil 4.12 : Yeniden yapılandırma sonrasında gerçek ve tahmini robot yörüngeleri .....	45
Şekil 4.13 : Yeniden yapılandırma sonrasında x eksenli algılayıcısına ait rezidü.....	45
Şekil 5.1 : Yapılan robotun algılayıcıları.....	46
Şekil 5.2 : Mobil robotun blok diyagramı.....	47



<b>Şekil 5.3</b>	: PIC 18F4550 mikrokontrolörünün bacak isimleri.....	49
<b>Şekil 5.4</b>	: PIC 18F4550'nin çalıştırılması için gerekli en temel devre.....	49
<b>Şekil 5.5</b>	: GP2Y0A02YK mesafe algılayıcısı.....	50
<b>Şekil 5.6</b>	: Mesafe algılayıcısının uzaklık-gerilim dönüşüm grafiği.....	50
<b>Şekil 5.7</b>	: GP2Y0A02YK mesafe algılayıcısının çalışma mantığı.....	51
<b>Şekil 5.8</b>	: GP2Y0A02YK algılayıcısının iç yapısının blok diyagramı.....	52
<b>Şekil 5.9</b>	: Mesafe algılayıcılarına ait kurulan devre.....	52
<b>Şekil 5.10</b>	: CMPS03 Elektronik pusula.....	53
<b>Şekil 5.11</b>	: I2C haberleşme protokolü.....	54
<b>Şekil 5.12</b>	: CMPS03 Elektronik pusulanın mekanik boyutları.....	55
<b>Şekil 5.13</b>	: Dünyanın manyetik alan haritası.....	56
<b>Şekil 5.14</b>	: CMPS03 Elektronik pusulanın kuzey yönü.....	56
<b>Şekil 5.15</b>	: CMPS03 Elektronik pusulanın çalıştırılma devresi.....	57
<b>Şekil 5.16</b>	: LMD18200T H-Köprüsü motor sürücüsü.....	58
<b>Şekil 5.17</b>	: LMD18200T motor sürücüsünün iç blok diyagramı.....	58
<b>Şekil 5.18</b>	: Motor sürücüler devresi.....	59
<b>Şekil 5.19</b>	: Mobil robotun güç devresi.....	59
<b>Şekil 5.20</b>	: Mobil robotun yandan görünüşü.....	60
<b>Şekil 5.21</b>	: Mobil robotun önden görünüşü.....	60
<b>Şekil 5.22</b>	: Arızasız durumda mobil robotun yörüngesi.....	61
<b>Şekil 5.23</b>	: 1. metrede algılayıcı arızası oluşma durumundaki robotun yörüngesi.....	61
<b>Şekil 5.24</b>	: Yedek algılayıcının devreye girmesi durumunda robot yörüngesi.....	61

## SEMBOL LİSTESİ

<b>A, B</b>	: Sistem durum matrisleri
<b>b</b>	: İki tekerlek arası mesafe
$\tilde{\mathbf{e}}_{x_j}, \tilde{\mathbf{e}}_{z_j}$	: Yaklaşık tahmin hatası ve ölçüm hatası
<b>H</b>	: Ölçüm matrisi
<b>K</b>	: Kalman filtresi kazancı
$\mathbf{P}_j^-$	: Öncül kovaryans
<b>Q</b>	: Sistem gürültüsü kovaryansı
<b>R</b>	: Ölçüm gürültüsü kovaryansı
<b>T</b>	: Örnekleme zamanı
$\mathbf{u}_j$	: Giriş işaretleri vektörü
$\mathbf{v}_L, \mathbf{v}_R$	: Sol ve sağ tekerlek doğrusal hızları
$\omega_r, \omega_l$	: Sağ ve sol tekerleklerin açısal hızları
<b>v</b>	: Ölçüm gürültüsü
$\mathbf{v}_r, \mathbf{v}_l$	: Sağ ve sol tekerleklerin doğrusal hızları
$\mathbf{v}_j, \mathbf{w}_j$	: Robotun doğrusal ve açısal hızları
$\mathbf{X}_I, \mathbf{Y}_I$	: Genel referans eksenleri
$\mathbf{X}_R, \mathbf{Y}_R$	: Robotun referans eksenleri
$\mathbf{x}, \mathbf{y}, \theta$	: Robotun durum değişkenleri (x ve y konumu ve doğrultu açısı)
$\hat{\mathbf{x}}_j$	: Durum değişkenlerinin soncul tahmini
$\hat{\mathbf{x}}_j^-$	: Durum değişkenlerinin öncül tahmini
$\mathbf{x}_j$	: Durum değişkenleri vektörü
$\tilde{\mathbf{x}}_j, \tilde{\mathbf{z}}_j$	: Yaklaşık durum ve ölçüm vektörleri
<b>w</b>	: Sistem gürültüsü
<b>W</b>	: Sistem gürültüsüne ait Jacobian matrisi
<b>V</b>	: Ölçüm gürültüsüne ait Jacobian matrisi
$\mathbf{z}_j$	: Ölçüm vektörü
$\hat{\mathbf{z}}_j$	: Çıkış işaretlerinin tahmini
$\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3$	: Sistemin çıkış değişkenleri

## ROBOT KONTROL SİSTEMLERİNDEKİ ALGILAYICILARDA MEYDANA GELEN ARIZALARIN TESPİT VE TEŞHİSİ İÇİN ALGORİTMALAR

### ÖZET

Gelişen teknolojiye bağlı olarak mobil robotlar dünyada ve uzayda yapılan araştırmaların en önemli parçalarından biri olmuşlardır. Mobil robotlar genellikle insanların kendi başlarına baş edemeyecekleri volkanlar veya bir hortumun için gibi doğanın en tehlikeli yerlerinde bazı özel deneyler gerçekleştirmeleri için tasarlanırlar. Hedeflerine ulaşmak için bu zorlu koşullarda ölçüm, hareket ve iletişim yeteneklerini kaybetmeyecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir.

Mobil robotlar otonomluklarını arttırmak için birçok algılayıcı ile donatılırlar. Bu çoklu algılayıcı sistemden gelen bilgilerin içerisinde bir kısmı arızalı olabilir. Sebep bir algılayıcının bozulması veya robotun çalışma ortamında bir algılayıcının yetersiz kalması olabilir. Robotun tekerlekleri veya sürücülerini gibi kritik parçalarda büyük bir kırılma olmadığı sürece yedek veriler kullanılarak, arızalı bir algılayıcı veya hareket elemanı ile robotun görevini tamamlayabilmesi için bazı yeniden yapılandırma yöntemleri bulunur.

Bu çalışmada, iki tekerlekli diferansiyel tip bir mobil robotun arızalı algılayıcı ölçümlerine sahip olması durumundaki davranışı incelenmiştir. Sistemin yedek bilgilerinin elde edilmesi için bir genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) tasarlanmıştır. Bir hata oluştuğunda, ana Kalman filtresi tarafından elde edilen rezidü, Arıza Tespit ve Teşhis (ATT) işlemi başlatmak ve sonrasında da gerçek ve tahmini çıkışlar arasındaki farkı en küçük duruma getirecek yeniden yapılandırma yönteminin devreye alınması için kullanılır.

Mobil robot bulunduğu ortamda yol alabilmek için odometrik algılayıcıları kullanır. Robotu kontrol eden iki adet motor her bir tekerde bir tane olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Robotun üzerine, x eksenini ile arasındaki açıyı ve dolayısıyla rotasyon bilgisini sağlayacak bir elektronik pusula yerleştirilmiştir. Robotun x ve y eksenlerindeki konumu, aracın dört tarafında bulunan ve birbirleri ile uyumlu çalışan dört adet mesafe algılayıcısı yardımı ile ölçülmektedir.

GKF'den elde edilen rezidü, çeşitli algılayıcılarda oluşan arızaların tespit edilmesinde kullanılır. Tespit edilemeyen bir arıza robotun istenmeyen bir duruma girmesine neden olabilir. Böyle bir durumun engellenmesi için arızanın derhal tespit ve teşhis edilmesi oldukça önemlidir. Bunun gerçekleştirilmesi için bir Kalman filtresi dizisi geliştirilmiştir. Filtre dizisi  $m + 1$  Kalman filtresinden oluşur. Burada  $m$  mobil robot kontrol sistemi tarafından sistemin gözlenmesi için kullanılan algılayıcıların sayısıdır. Her bir Kalman filtresi ayrı bir arıza durumunu teşhis edecek şekilde tasarlanmıştır. Kalman filtrelerinin paralel çalıştığı bu ATT yapısı ile her bir arıza için ayrı rezidü elde edilir. Bir algılayıcı arızalandığında o algılayıcı ile ilgili çalışan Kalman filtresine ait rezidü hızla artmaya başlar. Sonuç olarak, bu rezidü kullanılarak mobil robottaki arızalar tespit edilebilir ve bu algılayıcı izole edilebilir.

Bu durumda robotun işlevini yerine getirebilmesi için sağlıklı yedek algılayıcı devreye alınır.

Yukarıda anlatılan algoritma üzerine bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda, robota verilen görev 1m kenarlara sahip bir kare yörünge üzerinde yol olarak başlangıç konumuna geri dönmesidir. 15inci saniyede x eksenindeki konumu ölçen algılayıcıda bir arıza meydana gelir ve ATT algoritması kullanılarak bu arıza tespit ve teşhis edilir. Arızalı algılayıcı sağlıklı yedeği ile yer değiştirir ve aracın bu sayede kısa bir gecikme ile görevini başardığı gözlenir. Simülasyon sonrasında aynı algoritma gerçek bir mobil robot üzerinde de uygulanır. Uygulama çalışmasında robotun görevi x eksenine paralel bir şekilde 2,5m'lik yolu kat etmektir. Araç 1m ilerledikten sonra y eksenindeki konumu ölçen algılayıcıda arıza meydana gelir. Algoritma arızayı başarılı bir şekilde tespit eder ve arızalı algılayıcı izole edilerek yerine sağlıklı yedek algılayıcı devreye alınarak robotun nihai görevini başarması sağlanır.

# **ALGORITHMS TO DETECT AND ISOLATE SENSOR FAULTS IN MOBILE ROBOT CONTROL SYSTEMS**

## **SUMMARY**

Due to the innovations in advanced technology, mobile robots have become a very important part of the scientific researches on earth and even in outer space. Mobile robots are usually designed to implement some specific experiments in very dangerous places in nature that human beings can not deal with by their own, e.g. in volcanoes or in the eye of a tornado. To achieve their goals, mobile robots should be devised to survive of harsh conditions by sustaining their ability to perform without any failures in their measurement, actuating and communication capabilities.

Mobile robots are supplied with many sensors to increase their autonomy. Among information received from the multisensor system, some may be faulty. The reason must be either a failure of the sensor device or the inadequacy of the sensor in the work environment of the robot. Unless a major breakdown occurs in robot's actuators and other main parts like tires, there exist some reconfiguration methods to enable the robot to perform its objectives even with a failed sensor or actuator by using redundant data.

In this study a two-wheeled differential drive mobile robot's behavior with faulty sensor measurements is considered. An extended Kalman filter (EKF) is devised to obtain redundant data of the system. When an error occurs, the estimated data obtained by the main Kalman filter, are used to determine the residual which will start the Fault detection and Isolation (FDI) process and afterwards the reconfiguration to minimize the error between the estimated and actual outputs.

Mobile robot uses odometric sensors in order to navigate in the environment. There are two independent motors, which control the robot, on each wheel. A magnetic compass for the measurement of the orientation according to the x-axis is placed on top of the vehicle. In order to measure the distance to x and y axes, range sensors are used as position sensors.

The residual obtained from the EKF is used to detect faults that occur at the various sensors. Any undetected sensor faults, may cause the robot to drive into an undesirable operating condition. It is critical to detect and isolate failed sensors as soon as possible so that such a situation can be avoided. To address this issue, a bank of Kalman filters is developed. The bank of filters is composed of  $m + 1$  Kalman filters, where  $m$  is the number of sensors being used by the mobile robot control system and, thus, in need of monitoring. Each Kalman filter is designed on the basis of a unique fault hypothesis so that it will be able to maintain its performance if a particular fault scenario, appointed by that particular filter, takes place. With this FDI architecture, where the Kalman filters are running in parallel, each Kalman filter generates a fault indicator signal (residual) that indicates the existence of faults being monitored. When a sensor fails, all the Kalman filters generate large fault indicator

signals except for the one that is using the correct hypothesis. Consequently, sensor faults on the mobile robot can be detected and isolated and the auxiliary sensors will be activated in order to maintain robots function.

A simulation has been implemented on the algorithm described above. In the simulation, the robots duty is to travel on a square route that has 1m edge distance and reaches back to its initial position. On the 15<sup>th</sup> second a fault occurs on the x axis sensor and the FDI algorithm detects and isolates the fault and a healthy redundant sensor is replaced with the faulty one. After simulation study the algorithm is applied on a real mobile robot. This time the robots duty is to travel on a straight 2,5m long line paralel to x axis. When the robot travels 1m, a fault occurs on the y axis sensor. The algorithm can successfully detects and isolates the faulty sensor and replaces is with the redundant distance sensor. With a very small delay the robot reaches its target place.

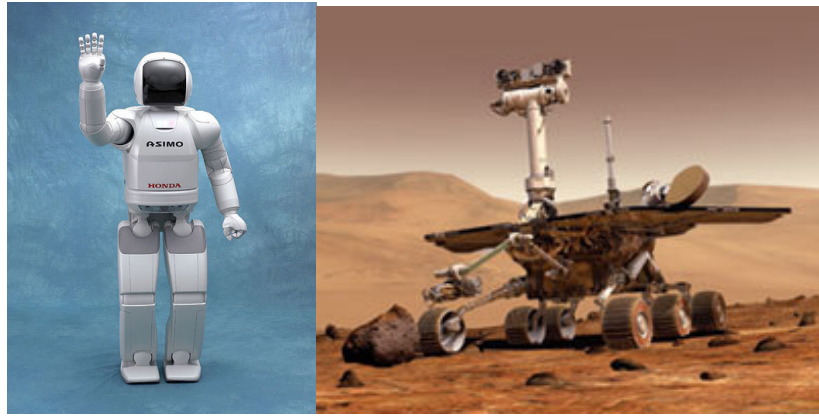
## 1. GİRİŞ

Teknoloji ilerledikçe robotların insan yaşamındaki önemi giderek artmaya başlamıştır. İnsanların yapamayacağı zorluktaki işleri yapmak robotlar için oldukça kolay olabilmektedir. Örneğin bir hortumun merkezindeki rüzgâr hızının ölçülmesi, volkanın içinden değerli bir taşın çıkarılması veya başka bir gezegende deneysel amaçlı çalışmaların yapılması gibi insan hayatını riske sokabilecek görevler robotların yardımı ile başarılabilmektedir [1]. Robotlar yalnızca insanların yapamayacağı işler için değil aynı zamanda insanların işlerini kolaylaştırmak veya hızlandırmak için de kullanılabilirler. Fabrikalarda kullanılan kaynak, boya ve depolama robotları gibi endüstriyel robotlar insanların işini oldukça hızlandırır [2]. Robotlar tıp alanında da ameliyatlarda doktorlara hassas ve oldukça isabetli çalışan uzuvları sayesinde yardımcı olur ve hata yapma riskini en aza indirirler.

Robotlar dış dünyayı algılamak için birçok algılayıcı, hareket etmek için sürücü, motor ve mekanik parçalara, karar alabilmek için de çeşitli işlemcilerle sahiptirler. Robotlar yapacakları göreve uygun olarak çok çeşitli algılayıcılarla donatılmışlardır [3]. Bu algılayıcıların arasında kameralar, mesafe algılayıcıları, ultrasonik algılayıcılar, enkoderler, dokunmatik algılayıcılar, basınç algılayıcılar, manyetik pusulalar gibi birçok algılayıcı tipi sayılabilir. Bu algılayıcılar sayesinde dış dünya algılanır ve robotun yapacağı işe uygun olarak karar alma merkezi olan mikrodenetleyicilere dış dünya ile ilgili bilgiler iletilir. Bu bilgiler mikrodenetleyicilerde değerlendirilir ve robotun eklemlerini hareket ettirecek olan motor sürücülerine görevin gerektirdiği komutlar gönderilir. Bu komutları alan sürücüler motorları (veya bazı uygulamalarda piston gibi farklı hareket elemanlarını) hareketlendirir ve robotun uzvunun görevini yapması sağlanır.

Robotların birçok türü vardır ancak genel olarak iki gruba ayrılabilirler. Durağan robotlar ve mobil robotlar olarak ta adlandırılan hareketli robotlar. Durağan robotlar genellikle bir yere sabitlenerek kullanılırlar. Bir araba fabrikasındaki araçların montaj işlemlerini yapan robotlar veya bir ameliyat sırasında cerraha yardımcı olan robotlar bu grup arasında sayılabilirler. Tekerlekli robotlar veya bacakları üzerinde

gezebilen robotlar mobil robotlar sınıfında sayılabilirler. Bu robotlar herhangi bir noktaya sabitlenmeden buldukları ortam içerisinde gezibildikleri için bu şekilde adlandırılırlar. Güncel örnekler verilecek olursa Honda şirketinin tasarladığı “Asimo” ve Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi NASA’nın Mars gezegenine gönderdiği “Opportunity” (Şekil 1.1) mobil robotlar denilince ilk akla gelenlerdir. Ancak bacakları yardımı ile hareket eden robotların tasarlanmasının tekerlekli robotların tasarlanmasına göre daha zor olduğu için tekerlekli mobil robotlar daha fazla uygulama alanı bulmuşlardır. Dolayısıyla mobil robot denilince akla ilk olarak tekerlekli robotlar gelmektedir.



**Şekil 1.1:** “Asimo” (solda) ve “Opportunity” (sağda).

Mobil robotların çalıştırıldıkları yerler zorlu doğa koşullarına sahip olabilirler. Bu zorlu koşullarda eğer robotun herhangi bir parçasında bir arıza meydana gelir ise bunun telafisi oldukça zor olabilmektedir. Örneğin başka bir gezegene gönderilen bir mobil robotun kamerasının bozulması durumunda eğer bu duruma karşı herhangi bir önlem alınmamışsa robotun kaybedilmesine neden olabilecek olaylar gerçekleşebilir ve bu da oldukça büyük maliyet kaybı anlamına gelecektir. Robotlarda meydana gelen arızaların zamanında tespit ve teşhis edilmesi oldukça önemli bir konudur. Zamanında tespit edilen bir arızaya gerekli müdahalenin yapılması durumunda, bakım ve tamir işlemlerinin de zamanında gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Problem yazılım ile çözülebiliyorsa gerekli çözüm yapılacak veya parça değişimi gerekiyorsa ihtiyaç duyulan parça yedeği ile değiştirilecektir. Hatta bazı durumlarda robotun tamamen sahadan çekilebilmesi bile gerekebilir. Ancak her durumda maliyet kaybı en az düzeyde tutulmuş olacaktır.



Mobil robotların emniyeti ve güvenilir çalışmalarının önemi nedeni ile mobil robotlardaki Arıza Tespit ve Teşhisi (ATT) konularında son zamanlarda yapılan çalışmaların sayısı artmıştır [4]. Tekerlekli mobil robotlarda güvenilirlik ve arıza teşhisi konularında son zamanlarda yapılan çalışmalar gerçek zamanlı sistemlerde işlenmeye başlanmıştır [5]. Roumeliotis mobil robotlarda ATT için çoklu model uyarlanabilir tahmin tekniğinin üzerinde çalışmalar yapmıştır [6,7]. [8]'da Washington, Rover'lar için devre üzerinde durum tahmini ve arıza tespiti konularında çalışma yapmıştır. Djath mobil robotlarda çoklu algılayıcıların yeniden yapılandırması üzerine bir çalışma yapmıştır [3]. ATT konusunda yapılmış daha genel araştırmalar da mevcuttur.

Öncelikle arızanın tespit edilmesi daha sonra arızalı kısmın teşhis edilmesi ve bir yeniden yapılandırma yöntemiyle arızanın tolere edilmesi gerekmektedir. Arıza tespit ve yalıtımında gözlemleyiciler sıklıkla kullanılırlar. Gözlemleyiciler genellikle yazılımda bulunan bir kod parçasıdır. Gözlemleyici, robotun bir kopyası gibi çalışarak robotun modelini giriş ve çıkışlarını kullanarak robotun davranışlarını taklit veya bir diğer deyişle tahmin eder. Gözlemleyici ile sistemin gerçek çıkışları arasındaki fark kullanılarak herhangi bir hatanın oluşup oluşmadığı denetlenir. Eğer arada önceden belirlenen eşik değeri geçen bir fark oluşmuşsa bir arızanın oluştuğuna karar verilir. Ancak bu durum yalnızca bir uyarının ötesine geçemez, çünkü önemli olan arızanın nerede olduğunun bilinmesidir yani arızanın teşhis edilmesi gerekmektedir. Bunun için yine çeşitli yöntemler olmakla beraber gözlemleyici bankı en çok kullanılan yöntemler arasındadır [6]. Sisteme ilişkin değişkenlerin her biri için ayrı ayrı tasarlanan gözlemleyiciler problemi değişken seviyesine indirir ve belirli bir sistem değişkeni ve o değişkene ait gözlemleyici tahminini kullanarak hatayı teşhis etmeye çalışır. Bu farklar kullanılarak ve çeşitli karar alma mekanizmaları kullanılarak hatanın robotun hangi parçasında oluştuğu teşhis edilir. Teşhis edilen arızalı parça için uygun yeniden yapılandırma algoritması devreye girer. Bu parçanın yerine ya yazılım veya donanım olarak yedeği yerleştirilir. Bu şekilde robotun görevini arızalı parçaya sahip olmasına rağmen sorunsuz olarak tamamlaması sağlanır.

Bu çalışmada, manyetik pusula ve mesafe algılayıcılarına sahip diferansiyel tip bir mobil robotun mesafe algılayıcılarında meydana gelen bir arızanın gözlemleyiciler yardımı ile tespit ve teşhisi konusunda simülasyon ve pratik uygulama çalışması

gerçekleştirilmektedir. Gözlemleyici olarak Kalman filtreleri kullanılmaktadır. Kalman filtresi doğrusal sistemler ile kullanıldığı ve üzerinde çalışılan mobil robot modelinin doğrusal olmaması nedeni ile ilk olarak bu model doğrusallaştırılır. Daha sonra bu doğrusallaştırılan model Kalman filtresi içinde kullanılarak sistemin durumlarının tahmini elde edilir. Bu tahmin değerleri ve gerçek robot durum değerleri arasındaki fark değerlendirilerek herhangi bir arıza olup olmadığına karar verilir. Yapay olarak mesafe algılayıcılarının bir tanesinden alınan bilgi kaybedilerek ve gözlemleyici bankı da kullanılarak bu arızalı algılayıcının hangi algılayıcı olduğunu bulan bir simülasyon çalışması sunulmaktadır. Arızalı algılayıcı teşhis edildikten sonra bu algılayıcı kısa bir süre içerisinde yedeği ile yer değiştirilir ve arızanın etkisinin en aza indirilmesi sağlanır.

Simülasyonu yapılan bu çalışma gerçek bir mobil robot üzerinde de uygulanır. Kullanılan dört adet mesafe algılayıcısı ve bir adet manyetik pusula ile robotun koordinat ekseninde x ve y eksenleri üzerindeki konumu ve aracın doğrultusunun x eksenine ile arasında yaptığı açı ölçülmektedir. Bu ölçümler Kalman filtresinde kullanılarak mobil robotun durum değişkenleri tahmin edilmektedir. Bu durum değişkenleri tahminleri ve gerçek çıkışlar arasındaki fark bilgisi ile hata tespit ve teşhisi gerçekleştirilmektedir. Robotun hareketinden bir süre sonra yapay olarak yazılımdan x eksenindeki kat edilen mesafeyi ölçen algılayıcıdan gelen bilgi kaybedilmektedir. Bu senaryoya uygun olarak çalıştırılan hata tespit ve teşhis yazılımı C programlama dili ile yazılır ve mikrodenetleyici olarak PIC 18F4550 mikrodenetleyicisi kullanılmaktadır. Hata teşhis edildiği anda yedek mesafe algılayıcısı devreye alınmış ve robotun görevini zamanında bitirmesi sağlanır.

Birinci bölümde mobil robotlar ve bu robotların modelleri üzerinde durulacaktır. İkinci bölümde hata tespit ve teşhis algoritmasında kullanılan gözlemleyici olan Kalman filtresi ve Kalman filtresi bankında kullanılan matematiksel işlemler açıklanacaktır. Üçüncü bölümde ATT algoritmasında kullanılan karar alma mantığı açıklanacaktır. Dördüncü bölümde yapılan simülasyon çalışmasının sonuçları üzerinde durulacak ve son olarak beşinci bölümde gerçek mobil robotta kullanılan elektronik devreler ve yazılım üzerinde durulduktan sonra, uygulama çalışmasının sonuçlarından bahsedilecektir.

## 2. MOBİL ROBOTLAR

Bir robot, bu konuda çalışmalarıyla tanınan Maja Mataric'in yaptığı tanıma göre, ortamdaki topladığı verileri dünyası hakkında sahip olduğu bilgiyle sentezleyerek, anlamlı ve amaçlarına yönelik bir şekilde hareket edebilen ve bunu güvenli bir biçimde yapabilen bir makinedir. Bu tanıma girebilmesi için öncelikle robot diye adlandırdığımız makinenin fiziksel bir varlığının olması gerekiyor. Robotlar, mobil ve mobil olmayan robotlar şeklinde iki kısımda incelenmek istenirse şu tanımlamaların yapılması uygun olacaktır. Bir robotun ulaşabileceği maksimum noktalar kümesinden oluşan yüzeyin hacmine çalışma hacmi denir. Eğer bir robotun çalışma hacmi bir referans koordinat sistemine göre yer değiştirmiyorsa bu robota mobil olmayan robot, yer değiştiriyorsa bu robota mobil robot denilebilir. Bu projede üzerinde çalışılan robotlar mobil robotlardır.

Robot kelimesi ile ilk olarak 1920'lerin başında yazılmış bir oyunda karşılaşılır. Çek oyun yazarı Karel Čapek' in R.U.R. ( Rossum'un Evrensel Robotları ) adlı oyununda mekanik ve otonom, ama insanca duygulardan yoksun yaratıklar olarak kullanılan robot, daha sonra birçok bilim kurgu romanına konu olmuştur. Karel Čapek angarya, zorunlu iş anlamındaki robota kelimesi ile işçi anlamına gelen robotnik kelimelerini birleştirerek “robotik” kelimesini türetmiştir ve bu kelime günümüzde de halen insanca duygulardan yoksun yaratıkları tanımlamak için kullandığımız kelimedir.

İnsanlar fiziksel yapılarından dolayı bedensel olarak bütün işleri yapma imkânına sahip olmadıkları için, gücünün yetmediği yerlerde kullanmak üzere değişik makineler geliştirmiştir [9]. İlk çağlarda ilkel ve fonksiyonel olmayan bu makineler, teknolojinin gelişme süreci içerisinde insanlar tarafından geliştirilmiş ve insan meziyetlerine yakın meziyetlere sahip olan makineler üretilmiştir. İlk önceleri insan yardımı ile çalışan bu makineler, zamanla geliştirilerek ve çeşitli çevre birimlerini de beraberinde kullanarak insana ihtiyaç duymadan otomatik olarak çalışır hale getirilmiştir. Sanayide kullanılmak için tasarlanmış birçok robot bulunmaktadır. Robotlar genellikle, üretim maliyetini düşürmek ve daha kaliteli üretim yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca insan sağlığının zarar görme riskinin olduğu işlerde

(kimyasal enerji, nükleer enerji, çok yüksek ısı, titreşim, yüksek ses v.b) ve insan elinin ulaşamayacağı yerlerde robotlar kullanılmaktadır.

18. yüzyılda tekstil endüstrisinde otomatik makinelerin kullanılmaya başlaması, robotlar bakımından teknoloji alanında atılan ilk adımdır. Jacquard'ın dokuma tezgâhını kontrolde kullandığı delikli kart ilk adım olarak bilinmektedir.20. yüzyılda ise kendi kendini kontrol eden ve ölçebilen programlanabilir makineler icat edilmiştir. 1950'lerde otomasyonun, elektroniğin ve haberleşmenin gelişmesi ile birlikte robot teknolojisinde büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu gün robot kullanımı hayatımızın birçok alanına girmiş olup, özellikle insan sağlığını aşırı derecede tehdit eden iş kollarında, yüksek ısı, titreşim, kimyasal ve nükleer enerji ile çalışılan yerler vb. kullanımı çok daha yaygındır [10].

## **2.1. Robot Türleri**

Robotlar robot kollar ve mobil robotlar olarak iki grup halinde incelenebilirler.

### **2.1.1. Robot Kollar**

Robot kollar (Şekil 2.1) sabit bir alanda çalışabilen ve kol benzeri bir mekanizma sistemi içeren robot türleridir. Bir robotun insana benzeyen en önemli özelliği onun koludur. Tutma ve yerleştirme işlemlerinde robot kolu kullanılır. Robot kolu, başka bir makineyle birleştirilerek, malzemenin yüklenmesi ve takım değiştirme işlemini yapmaktadır. Kesme, şekil verme, yüzey kaplama, silindirik ve düzlem yüzey taşlama gibi imalat işlemlerini gerçekleştirir. Montaj ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır.



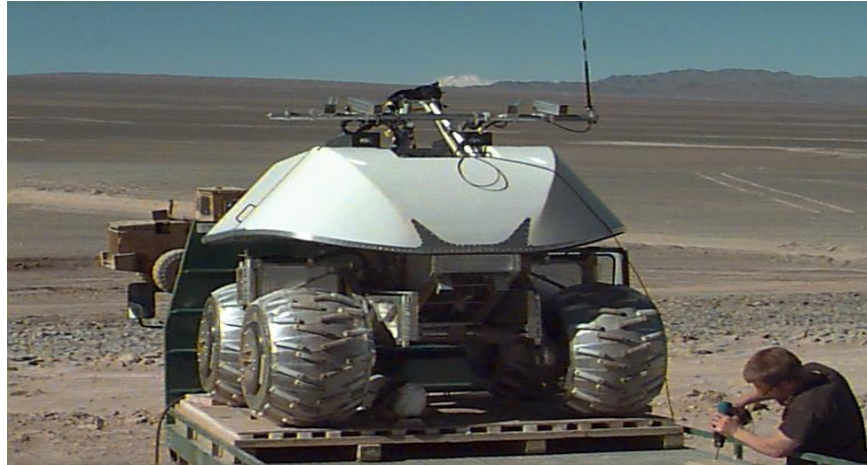
**Şekil 2.1:** Robot kollar robotikte en çok kullanılan uygulamalardandır.

Bir robot hareketinin kapasitesi, kontrol edilebilmesi mümkün olan eksenlerdeki hareketlerle belirlenir. Sayısal denetimdeki hareketlere çok benzerdir. Robot kollar değişik tip ve boyutlarda yapılmaktadırlar. Çeşitli kol hareketlerini yapabilirler ve farklı hareket sistemlerine sahiptirler. Robot kollar (endüstriyel robotlar) genel olarak şu yapılandırmalarla üretilmektedirler:

1. Küresel (polar coordinate) yapılandırma
2. Silindirik koordinat yapılandırma
3. Mafsallı kol (jointed arm) yapılandırma
4. Kartezyen koordinat yapılandırma

### 2.1.2. Mobil Robotlar

Robotlar bilgisayar kontrollü, programlanabilir, fonksiyonel sistemler olarak tanımlanabilirler. Robot kollar ise yukarıda da bahsettiğimiz gibi genellikle endüstriyel alanda kullanılan sabit tabanlı kol sistemleridir. Robot kollar yaklaşık olarak 50–60 yıldır birçok endüstriyel sektörde, ancak özellikle otomotiv sektöründe olmak üzere yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Son yıllarda, robot kollarının sabit istasyonlar şeklinde çalışmasının robot kolunun performansına ve kullanım alanlarına getirdiği kısıtlamaları fark eden araştırmacılar, bu sistemleri hareketli hale getirmek üzere çalışmalar yapmaktadır. Bu durum da bağımsız hareketli diğer adıyla da “mobil robotlar”ın doğuşu olmuştur.



**Şekil 2.2:** Mobil robotlar robotiğin diğer geniş uygulama alanlarındandır.

Mobil robotların evrimi endüstriyel robotlardan farklı olarak daha uzun zaman almaktadır. Bunun sebebi ise, teknolojik gelişmelere rağmen bu tür robotların

çalışma ortamlarının insanlarla aynı olması ve bu durumda da karmaşık kontrol sistemlerine ve yüksek performanslı algılayıcılara gerek duymalarıdır. Karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç kısmi olarak yapay zekâ uygulamaları ile aşılmış bulunmaktadır. Ancak, yapay zekâ uygulamalarının sınırlı mobil sistem elektriksel gücü ile desteklenmesi zorluklarına, görüntü işleme ve karar verme mekanizmaları da eklenince söz konusu robotlar karmaşık sistemler halini almaktadırlar. Dolayısıyla mobil robot sistemleri, tasarımdan ilk örneğin (prototip) üretilmesine kadar karmaşık fonksiyonlar ve işlemleri içeren zor bir işlemdir.

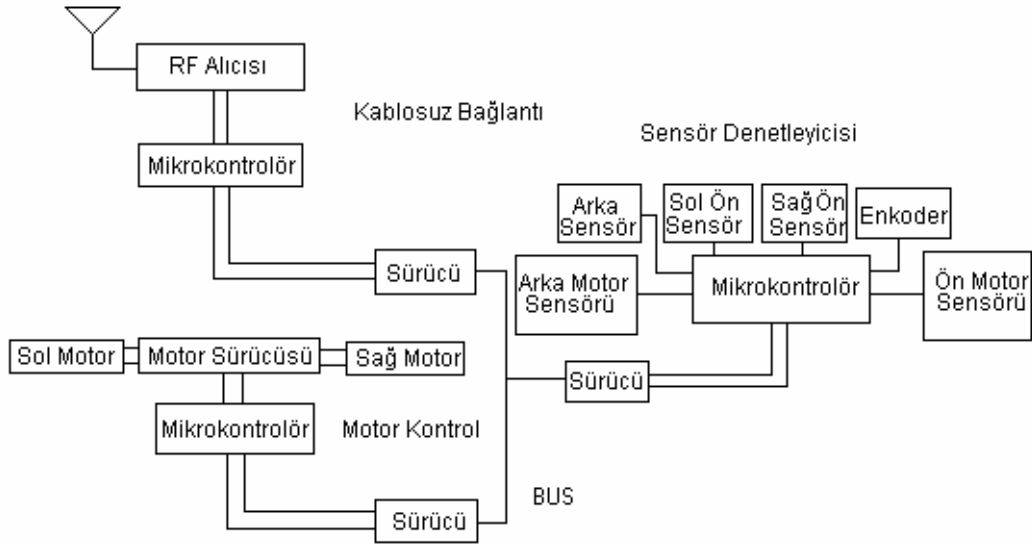
Uluslararası platformda robotlar alanında yapılan çalışmalar içinde mobil robotlara olan ilginin her geçen gün artmasının sebebi de geleceğin robotlarının akıllı fonksiyonel mobil robotlar olacağı gerçeğinin bu günden kabullenilmiş olmasıdır.

Mobil robotlar hareket sistemleri açısından tekerlekli, paletli ve ayaklı tipler olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Paletli ve tekerlekli sistemler düz arazi şartları için uygun görülmekle beraber özellikle bozuk yüzey şartlarında ayaklı tipler tercih edilmektedir.

Mobil robotların yüksek performanslı olmaları canlıların hareket sistemine benzer sistemlere kavuşması ile mümkün olabilecektir. Mobil robotlar için kullanılan günümüz sistemleri ve performans özellikleri araştırmacıları bilinen metotların dışına çıkılmaya zorlamaktadır. Bu çalışmalardan özellikle ilginç olan yapay kaslarla hareket sağlayan robotlardır.

Mobil robotlar erişilmesi imkânsız ve tehlikeli olan yerlerin araştırılması, bomba araştırması yapılması, hastane ilaç dağıtımı ve müze güvenliğinin sağlanması gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Genel bir mobil robotun blok diyagramı Şekil 2.3'de görülmektedir. Robotun beyni olarak da tabir edilebilen bir veya birkaç tane mikrokontrolör üzerinde koşan yazılım, çeşitli algılayıcılardan aldığı bilgileri değerlendirdikten sonra iletişim hatlarından motor sürücülerine yapılacak hareket ile ilgili uygun komutları gönderir. Robot ile ilgili bilgiler kablosuz bir haberleşme hattı ile bir dış kaynağa da gönderilebilir.



**Şekil 2.3:** Bir mobil robotun genel blok diyagramı.

## 2.2. Robotların Kullanım Alanları

### 2.2.1. Endüstriyel Robotik

Robotların karmaşıklığı arttıkça endüstrideki kullanım alanları da genişlemektedir. Endüstriyel robotiğin temel işlevi, tanımlanmış rutin görevlerin aynı şekilde ve sürekli tekrar edildiği üretim endüstrileri otomasyonudur. Otomotiv endüstrisi bu geniş ve karmaşık robotların görev aldığı en belirgin örnektir. Robotlar boyamada, sızdırmazlıkta, parçaların üretiminde ve birleştirilmesinde kullanılır. Robotların bu görevlere uygun olmasının nedeni, sürecin kontrolü için çok az geribildirim yeterli olmasıdır. Endüstriyel robotlar çeşitli boyutlarda üretilebilirler ve bir insanın yapabileceğinden daha büyük işleri yapabilirler.

### 2.2.2. Operasyonel Robotik

İnsanın yaşamasına, sürekli çalışmasına elverişli olmayan radyasyon ortamı, sualtı, volkan kraterleri, uzay gibi ortamlarda ve mayın temizlenmesi, zehirli atık arıtımı, madencilik gibi insan için tehlike arz edebilecek işlemlerde çalışmak üzere operasyonel robot sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler programlanabilir ve kendi kendine çalışabilir olmaktan çok uzaktan kontrollüdür. Yüksek teknoloji gerektirirler ve çalışma prensipleri amaca özeldir. Uzaktan yönetim için güç aktarım sistemleri (Hidrolik, Pnömatik gibi) veya radyo frekansı kullanılır.

### **2.2.3. Tıp ve Sağlık Alanında Robotik**

Sağlık alanında robotların taşıma işlevinden başka iki temel kullanım alanı mevcuttur. Bunlar ortopedi ve cerrahidir. Diğer tıp dallarında da kullanımları giderek artmaktadır.

### **2.2.4. Sibernetikte Robotik**

Sibernetik, makine ve canlıların sistemlerinin çalışma tarzını ve fonksiyonlarını daha iyi anlatabilmek amacıyla kontrol ve iletişim yöntemlerinin karşılaştırmalı araştırmasına dayanan bir teoridir. Yapay sinir ağlarının robotikteki en güçlü kullanım alanı sibernetiktedir. Sibernetikteki temel amaçlardan biri, insanla robot arasındaki farkın azaltılmasıdır. Cyborg, android gibi terimler daha tam olarak gerçekleştirilmemiş olmalarına rağmen, telaffuz edilmeye başlanmıştır.

### **2.2.5. Hobi ve Eğlence Sektöründe Robotik**

Robotların sıklıkla kullanıldığı sektörlerin içinde hobi ve eğlence sektörü kategorileri arasında oyuncak ve kişisel hobi robotları ile sinema sektöründe kullanılan robotlar sayılabilir.

### **2.2.6. Askeri Alanda Robotik**

Askeri alanda robotik özellikle insansız uçak ve tank denemelerinde yaygın olarak yer almaktadır. Robotların casusluk ve keşif görevleriyle birlikte özellikle savunma yıkıcı ve yok edici olarak da tasarlanıyor olduğu bilinmektedir. Mayın arama robotları da bu kategoriye dâhil edilebilir.

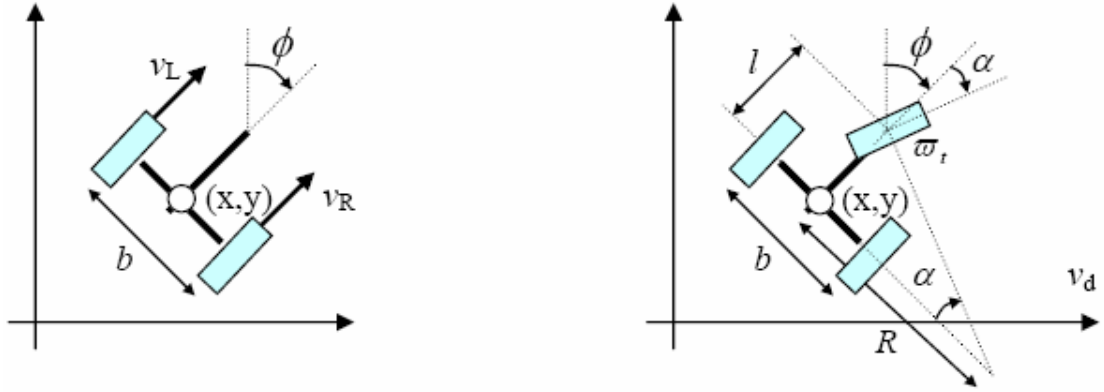
## **2.3. Mobil Robot Modeli**

Mobil robotlar, hareket yetenekleri açısından çeşitli matematik modellere sahiptirler. Bununla birlikte bu yalnızca tek başına hareket eden mobil robotlar için geçerlidir çünkü eğer robota turlardaki gibi ilave yapılırsa robot modelleme oldukça karmaşık bir hale gelecektir. Havaalanlarındaki bagaj treni robotları bunlara örnek olarak verilebilir.

Mobil robot modelleri genel olarak diferansiyel tip ve araba tipi modeller olmak üzere ikiye ayrılabilir [11]. Şekil 2.4'te diferansiyel tip ve klasik araba tipi robotların basit birer genel çizimi görülmektedir. Diferansiyel tip robot iki boyutlu bir yüzeyde



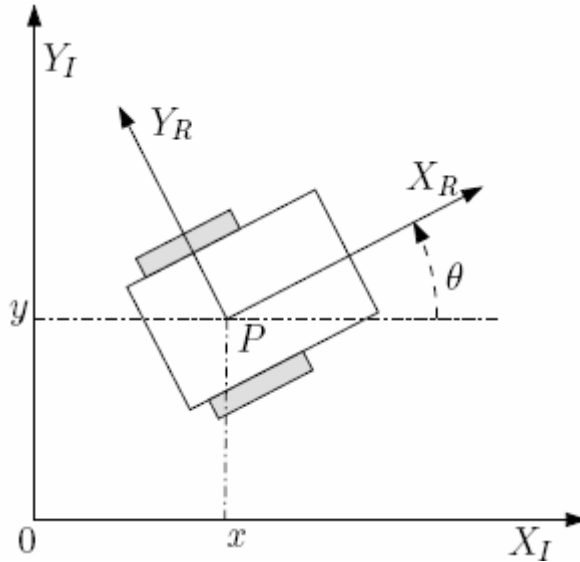
$\Phi$  oryantasyonu ile  $(x,y)$  noktasına ulaşabilmek için sağ ve sol teker hızlarını ayrı ayrı kontrol eder (Şekil 2,4'te  $v_L$  ve  $v_R$ ). Araba tipi robotlar ise istenen hedefe ulaşabilmek için tek bir açısal kontrol ve doğrusal hız kontrolü kullanırlar. Yani aracın arkasındaki iki tekerlek beraber kontrol edilir.



**Şekil 2.4:** Diferansiyel tip (solda) ve araba tipi (sağda) mobil robotlar.

Bu çalışmada sağ ve sol tekerlekleri ayrı ayrı kontrol edilen diferansiyel tip bir mobil robot kullanılmıştır.

Diferansiyel tip bir mobil robotta her bir tekerlek robotun hareketine ayrı ayrı etki ve ayrı kısıtlamalar getirir [12]. Dolayısı ile her bir tekerin kısıtlamaları bütün robot hareketine ait kısıtlamaları da etkiler.



**Şekil 2.5:** Mobil robotun  $(x,y)$  eksenleri üzerindeki görünüşü.

Robotun hareketini modellemek için her bir tekere ait kısıtlamalar ve kuvvetler düzgün ve sabit bir referans noktasına göre ifade edilmelidirler. Böylece robotun konumunu belirlemek için robot 2 boyutlu bir eksen üzerinde tekerlekleri ile hareket eden üç serbestlik derecesine sahip (ikisi yataydaki konumunu belirtmek için ve biri de aracın x eksenine ile arasındaki açısı veya oryantasyonu için) katı bir cisim olarak düşünülür. Daha sonra robotun konumu, genel bir referans eksen ve aracın kendisine ait referans eksen arasındaki ilişki kurularak belirlenebilir. Örneğin Şekil 2.5'teki  $X_I$  ve  $Y_I$  ile gösterilen eksenler genel referans eksenini belirtirken,  $X_R$  ve  $Y_R$  ile gösterilen eksenler aracın kendisine ait referans eksenini gösterir. Robotun konumu  $\{X_I, Y_I\}$  eksenindeki  $x$  ve  $y$  koordinatlarında ki P noktası ve  $X_I$  ve  $X_R$  eksenleri arasındaki açı olan  $\theta$  ile belirlenir.

$$\mathbf{P}_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Genel durumda robotun konumu aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$\dot{x} = u \cos(\theta) - v \sin(\theta) \quad (2.2)$$

$$\dot{y} = u \sin(\theta) + v \cos(\theta) \quad (2.3)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (2.4)$$

Eğer daha toplu bir şekilde yazılırsa,

$$\dot{\mathbf{P}}_I = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Bu denklemde  $u$  ve  $v$  doğrusal hızın aracın referans eksenine ile birleştirilmiş referans eksen üzerindeki bileşenleridir.  $\omega$  açısal hızdır ve  $\mathbf{R}$  de ortogonal rotasyon matrisidir.  $\mathbf{R}$  şu şekilde gösterilebilir.

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Şekil 2.5’de gösterilen diferansiyel tip mobil robotlarda tekerleklerin kaymadığı farz edilirse hız bileşenleri  $u$  ve  $\omega$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u = \frac{\omega_r r + \omega_l r}{2} \quad \omega = \frac{\omega_r r - \omega_l r}{b} \quad (2.7)$$

Burada  $\omega_r$  ve  $\omega_l$  sırasıyla robotun sağ ve sol tekerleklerinin açısal hızlarını gösterirken  $r$ , tekerlek yarıçapını ve  $b$  iki tekerlek arasındaki mesafeyi belirtir.

Robotun bütün hareketi iki temel hareket ile açıklanabilir:  $X_I$  yönündeki ilerleme ve P noktasında dikey eksen etrafındaki rotasyon. Buna ilaveten doğrusal hızın  $v$  bileşeni sıfırdır (çünkü araç yatay hareket yapamaz, yalnızca kendi doğrultusu üzerinde ilerler). Bu sonuçlara göre hareket denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\dot{x} = u \cos(\theta) \quad (2.8)$$

$$\dot{y} = u \sin(\theta) \quad (2.9)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (2.10)$$

Bu denklemler sürekli zaman için geçerli denklemlerdir. Ancak gerçek dünyadaki uygulamada mikroişlemci mantığına uyum nedeni ile ayrık denklemlerin kullanılması gerekmektedir.

Denklemler ayrık şekilde yazıldığında kullanılan mobil robotun modeli aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır.

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{j-1} \\ y_{j-1} \\ \theta_{j-1} \end{bmatrix} + T \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{j-1} + T \cdot \omega_{j-1}) & 0 \\ \sin(\theta_{j-1} + T \cdot \omega_{j-1}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{j-1} \\ w_{j-1} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Burada  $x_j$  robotun x eksenindeki konumunu (metre) gösterirken,  $y_j$  robotun y eksenindeki konumunu (metre) göstermektedir.  $\theta_j$ , robotun burun doğrultusunun x eksenine ile arasındaki açıyı (radyan) göstermektedir.  $v_j$  ve  $w_j$  sırasıyla robotun doğrusal hızı ve açısal hızını (rad/s) göstermektedir. T saniye olarak örnekleme zamanıdır.

Robotun açısal ve doğrusal hızları aşağıdaki gibi sağ teker ve sol teker hızları cinsinden ifade edilebilirler,

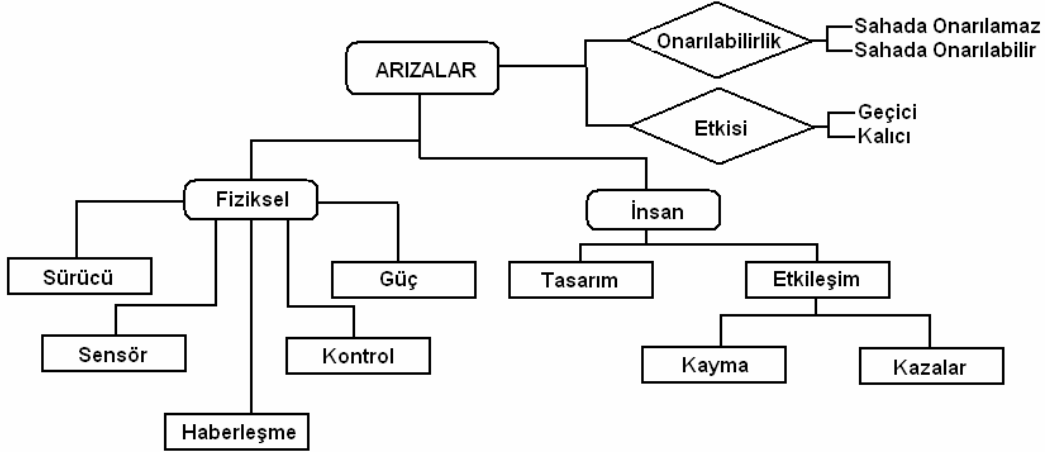
$$v_j = \frac{vr_j + vl_j}{2} \quad w_j = \frac{vr_j - vl_j}{b} \quad (2.12)$$

Burada  $vr_j$  sağ tekerin hızını belirtirken  $vl_j$  sol tekerin doğrusal hızını göstermektedir.

#### 2.4. Mobil Robotlarda Meydana Gelen Arızalar

Mobil robotlarda meydana gelen arızalar genel olarak ikiye ayrılabilirler [13]. Bunlar insan kaynaklı olan arızalar ve fiziksel arızalardır. İnsan kaynaklı arızalar tasarımın aşamasında yapılan hatalardan kaynaklanabilir. Örneğin robotun motor sürücülerinde teknik olarak gerekenden daha güçsüz transistörler kullanılırsa bu transistörler bir süre sonra yanacaklar ve bir sürücü arızası meydana gelecektir. İnsan kaynaklı bir diğer arıza grubu da çevre ile olan etkileşim sonucu oluşur. Yani malzeme seçimi sonucu oluşacak kaymalar ve diğer kazalar bu gruba dahil edilebilir. İkinci önemli arıza kaynağı ise fiziksel arızalardır. Bunların arasında robotun sürücülerinde, güç sisteminde, algılayıcılarında, kontrol sisteminde oluşabilecek arızaların yanı sıra haberleşme problemleri nedeni ile ortaya çıkabilecek arızalar sayılabilir. Aynı zamanda robotlar onarılabirlik durumlarına göre de sınıflandırılabilirler. Örneğin bazı arızaların sahada tamir edilmesi mümkün olmayabilir ve aracın olduğu yerden kendi kontrolleri kullanılmadan kaldırılması gerekebilir. Bir tekerleğin insanların ulaşamayacağı bir yerde aracın hareketini tamamen engelleyecek şekilde kırılması bu duruma örnek olarak verilebilir. Birtakım arızalar oluştuğunda arıza tespit ve teşhis edildikten sonra uygun yeniden yapılandırma yöntemi kullanılarak aracın kendi kendisini tamir etmesi sağlanabilir veya uzman ekip araca müdahale edebilir. Bu durumlar onarılabir arızalar sınıfına girer. Arızalar etkilerine göre geçici veya kalıcı olarak da ayrılabilirler.

Mobil robotlarda meydana gelebilecek arızalar bir sınıflandırmaya tabi tutulursa Şekil 2.6'da görülen diyagram çizilebilir.



**Şekil 2.6:** Robotlarda meydana gelen arızaların sınıflandırılması.

Bu çalışmada fiziksel, sahada onarılabilir ve kalıcı algılayıcı arızaları üzerinde durulmaktadır. Bu konu ile ilgili sonraki bölümlerde ayrıntılı anlatım yapılacaktır.

## 2.5. Mobil Robotlarda Kullanılan Algılayıcılar

Mobil robotlar dış dünyayı algılamak için algılayıcılarını kullanırlar [14]. Robotlarda kullanılan algılayıcılar doğadaki canlılardan esinlenerek tasarlanmışlardır. Örneğin yarasaların gece görüşünde kullandığı ultrasonik seslerden esinlenerek imal edilen ultrasonik algılayıcılar gibi. Algılayıcılar bir dış uyarıyı işlenebilen, ölçülebilen elektrik sinyallerine dönüştürürler. Algılayıcıların verilerini kullanabilmek için her tip algılayıcının uygun bir ara yüzle robotun kontrol kartına bağlanması gerekir.

Robotlarda en çok kullanılan algılayıcılar mekanik dokunma algılayıcıları (dokunma, çarpma, bıyık, tampon, eğim, basınç), ışık algılayıcıları (güneş pili, LDR, LED, fotodirenç, fotodiyot, fototransistör, IR, kamera), ses algılayıcıları (mikrofon, ses tanıma, ultrasonik), uzaklık algılayıcıları, konum algılayıcıları (opto-komütatörler, enkoderler, odometre, takometre, elektronik pusula, GPS), hareket algılayıcıları, UV algılayıcılar, ısı algılayıcıları, koku algılayıcıları, nem algılayıcıları, vs.

Bu algılayıcılardan en çok kullanılanları ile ilgili kısa açıklamalar yapılmıştır.

### 2.5.1. Dokunma Algılayıcıları

Robotlar hareketleri esnasında cisimlere temas ederek, dokunarak yön bulabilirler. Robotun dokunma algılayıcısı hiçbir şeye dokunmuyorsa önünün açık olduğunu, bir

cisim ile temas ettiğinde algılayıcının cinsine göre bir engel, bir duvar, bir rakip önünde olduğunu veya sınırdaki olduğunu anlar ve yüklü programına göre davranır.

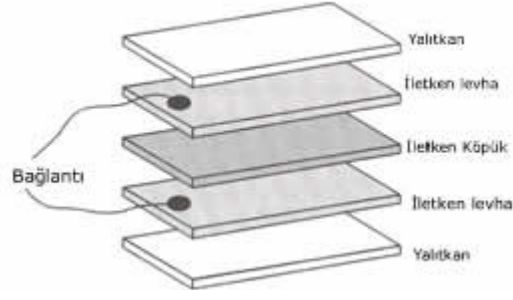
Dokunma algılayıcıları (Şekil 2.7) genel olarak lojik tip {0-1, var-yok, kapalı-açık} bilgi veren devre açma/kapama anahtarlarıdır. Bıyık tipi, dokunma algılayıcılarının en basitidir. Bu tip algılayıcının imalatında kullanılan mikro devre açma/kapama anahtarının Şekil 2.7’de üst tarafında görünen yaylı levye uzatılarak kedi bıyığı benzeri bir bıyık dokunma algılayıcısı elde edilir. Bu uzatılan kol herhangi bir engele çarpınca bağlı olduğu devreyi açar veya kapatır. Bunun sonucunda robotun tasarımına, ayarına veya programına göre robot durur, geri gider veya sağa-sola dönüş yaparak yön değiştirir, böylece robot engelden kaçır.



Şekil 2.7: En basit dokunma algılayıcıları.

### 2.5.2. Basınç Algılayıcıları

Basınç algılayıcıları bir engel veya çarpma algılamak için kullanılan diğer araçlardan biridir. CMOS entegre devrelerin ambalajlanması, taşınması esnasında kullanılan iletken köpükten imal edilir. Bu basınç algılayıcısının içinde 2 iletken ince plaka (alüminyum veya bakır levha) arasında bu iletken köpükten bir bant vardır ve metal plakalardan bağlantı telleri alınıp, arabirim devresine bağlandığında, bir basınç algılayıcısı elde edilir (Şekil 2.8).



**Şekil 2.8:** Basınç algılayıcılarının yapısı.

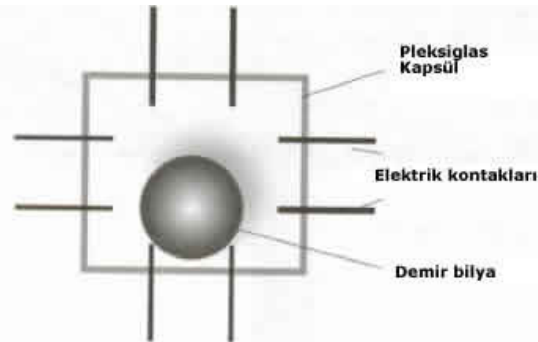
Bu tip algılayıcılar bir robotun tüm çevresine bir kuşak gibi yerleştirilebilir. Çarpma anında robot gövde şasi etrafında oluşan basınç anında ölçülebilir.

Bu tip algılayıcının diğer bir kullanım alanı ise bir robot kol kısıkcıdır. Kısıkcının kavradığı nesne üzerinde, kavrama esnasında uyguladığı basınçlar ölçülebilir. Bu basınç varyasyonları, gerilim varyasyonlarına çevrilerek elde edilen bilgiler işlenerek, kısıkcının kavradığı nesne üzerine uyguladığı kuvvet hesaplanır.

### 2.5.3. Eğim veya Denge Algılayıcıları

Bir robotun veya bir parçasının dikey veya yatay doğrultuya göre pozisyonunu ya da dengesini bilmek önemli olabilir. Yokuş yukarı veya yokuş aşağı eğimli durumlarda, gerekli bir eylemin başlatılması gerekebilir.

Bunun için yerçekimine göre kumanda edilen basit tersleyiciler vardır. Bu tersleyiciler, içinde bir cıva damlası veya metal bir misket bilye olan bir kapsül, bir veya birden fazla kablo tel çıkışından oluşmaktadır. Yatay veya dikey doğrultuya göre açı değiştiğinde, cıva damlası veya bilye hareket ederek, bir veya birçok anahtarı kapatır. Robot açılıp kapanan anahtarlara göre davranır. Aşağıdaki resimler bir eğim denge algılayıcısının çalışma prensiplerini göstermektedir.

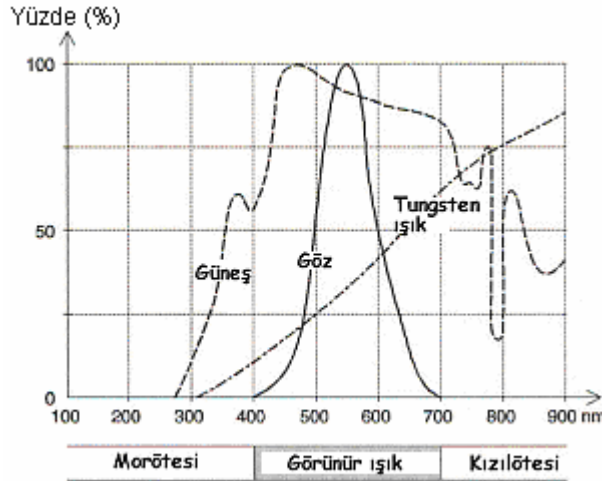


**Şekil 2.9:** Demir bilyeli eğim algılayıcısı.

Metal bilyeli eğim algılayıcısı (Şekil 2.9), pleksiglas kapsül içinde metal bilye olan, uzayın üç yönüne doğru birçok çift anahtar çıkışları olan bir algılayıcıdır. Şeffaf kapsül, bilyenin pozisyonunun gözetlenmesini sağlar. Robot engebeli bir yerde hareket ettiğinde, bilye yerçekiminin etkisiyle hareket ederek bir anahtarın kapanmasını diğer bir anahtarın açılmasını sağlar.

#### 2.5.4. Işık Algılayıcıları

Işık algılayıcıları sıkça robot kontrolünde ve güdümünde kullanılır. Çünkü ışık enerjisi birçok elektronik eleman üzerinde etki yapar: LDR, fototransistör, fotodiyot, fotovoltaik hücreler (güneş pilleri) gibi. Görünen veya görünmeyen ışık bilgilerini kullanan tüm algılayıcılar bu kategoride yer alır: Fotodirençler, fototransistörler, fotodiyotlar, piro-elektrik detektörler, kameralar gibi.



**Şekil 2.10:** Işık kaynaklarının insan gözü algılamasına göre durumu.

Bir modelin veya ötekinin seçimi, dalga boyuna veya okuma hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. Dalga boyu, mor ötesinden kızıl ötesine (görünen ışık dahil) ışık kaynağının rengini belirler. Yukarıdaki grafik (Şekil 2.10) bilinen ışık kaynaklarının (güneş, tungsten ampul,) insan gözü algılama özelliklerine göre durumunu göstermektedir.

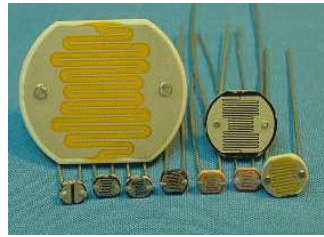
Bir algılayıcının etkiye cevap zamanı, bu bilgiyi geçerli kılmak için gerekli hesaplama zamanı üzerinde çok önemli bir faktördür. Fotodiyotlar ve fototransistörler çok hızlı iken, fotodirençler ve kameralar yavaşlardır. Fototransistörler, baz, kollektör bacaklar ters kutuplandığında, fotodiyot gibi



davranan transistörlerdir. Bu tip "fotodiyotun" akımı, transistörün yükseltici etkisinden faydalanır.

### 2.5.5. Fotodirençler

Fotodirençler veya LDR (light dependent resistor)'ler, ışık ortamına göre değeri değişen dirençlerdir (Şekil 2.11). (Yaygın deyim ile "fotosel") LDR'ler genellikle kadmiyum sülfitten (CdS) yapılmış, maruz kaldığı ışık yoğunluğuna göre değeri değişen bir dirençtir. Işık yoğunluğu düşünce direnç değeri yükselir. Karanlıkta 100 k $\Omega$  olan değer, gün ışığında 10 k $\Omega$ 'a kadar düşebilir.



Şekil 2.11: Fotodirençlerin dış görünümü

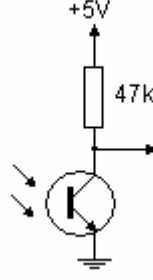
### 2.5.6. Kızılötesi Algılayıcılar

Foto-diyotlar ve foto-transistörlerde ışığı algırlarlar. LDR'lerin çalışması için bir besleme akımı gerekirken, ışığa maruz kalan fotodiyot ise bir jeneratör gibi akım üretir. (1 $\mu$ A /Lux değerinde kısa devre akımı). Fotodiyotlar, fotodirençlerden daha hızlıdır. Kızılötesi algılayıcılar fototransistör veya fotodiyotturlar. Fotodiyotların ve fototransistörlerin ışık tayfı kızılötesi bölgesinde en üst düzeydedir.

Kodlanmış (şifrelenmiş) bir emisyonu (TV kumandası, vb gibi...) algılamak gerektiğinde fotodiyotlar tercih edilir. Ancak alınan sinyal bir ara yüzle yükseltilerek kuvvetlendirilmelidir. Fotodiyotlar kontrol kartına doğrudan bağlanamazlar.

### 2.5.7. Fototransistörler

Fototransistörler, ortam ışığındaki değişiklikleri (varyasyonları) hızlıca algılamak için fotodirençlerin yerine kullanılırlar. Fotodirençler gibi, basit bir ara yüzle, kontrol kartına bağlanırlar (Şekil 2.12).



**Şekil 2.12:** Fototransistörlerin genel kullanımı

Fototransistörler genellikle LED'ler gibi bir ışık kaynağı ile beraber kullanılırlar. Böylece bir basit yansıma algılayıcısı elde edilir.

LED'ler ortam ışığının algılayıcı üzerindeki etkilerini azaltmak için kullanılırlar. Çıkan (üretilen) foton miktarını ayarlamak için bir değişken dirençle kutuplanırlar. Böylece algılayıcının aşırı yoğun fotonlarla doyup bloke olması ve çalışmaz hale gelmesi önlenir. Yük direncinin değeri modele göre değişir. Optimal değer deneylerle bulunur.

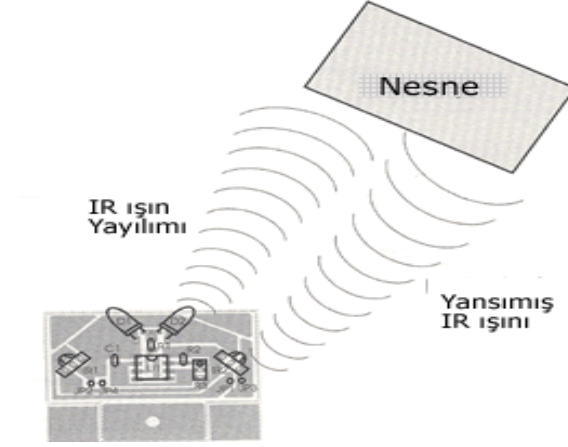
#### **2.5.8. Yansıma Algılayıcıları**

Bu tip algılayıcının bir ışık yayıcı (IR veya LED) ve bir ışık toplayıcı parçası vardır. Işık yayıcı ve ışık toplayıcı parçalar aralarına bir engel konularak yan yana monte edilirler. Bu sisteme bir nesne yaklaştığında, ışık yayıcı tarafın yaydığı ışığın nesneye çarpıp geri yansyarak ışık toplayıcı parçaya gelmesi prensibiyle çalışır. Bu parçalardan birisinin gönderdiği ışığın, öteki tarafından toplanma yüzdesi algılayıcının çıktı sinyalini verir. Yansıma algılayıcıları düz bir zemindeki renk varyasyonlarını algılamada kullanılırlar. Zemin rengi koyu ise fotonlar emilirler ve transistör bloke olur. Zemin açık renkli ise ışık fototransistöre yansır onu doyurur. Optimal algılama mesafesi 4 - 5mm'dir. Mesafe değişikçe, algılama performansı değişir, bozulur.

#### **2.5.9. Uzaklık ve Engel Tanıma Algılayıcıları**

Prensip biraz daha geliştirilmiş haliyle yansıma algılayıcıları gibidir. IR kızılötesi ışın emisyonu kodlanmış olmalı (TV kumandası IR ışığı gibi), emisyon devamlı değil, anlık aralıklı atımlarla yapılarak parazit kızılötesi ışınların (güneş, ısı kaynakları) ters etkisi önlenir. Robotun önüne bir engel çıkarsa, IR ışık geri yansır ve alıcı modül tarafından algılanır ve kaynak emisyonla karşılaştırılır. Sistemin etkinliği

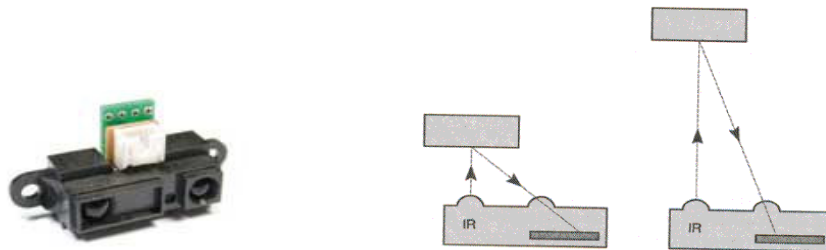
IR ışığın gücüne, yansıma açısına, engelin doğasına, şekline, rengine ve alıcı modülün hassasiyetine bağlıdır. Bu tip algılayıcılardan robotun etrafına birçok algılayıcı yerleştirilerek bir detektörler kuşağı elde edilebilir. Diğer bir yöntem ise algılayıcıyı, bir servo motorla sağa ve sola döndürülebilen bir parça üzerine monte etmektir. Böylece algılayıcı daha geniş bir alanı tarayabilir (Şekil 2.13).



**Şekil 2.13:** Engel tanıma algılayıcıları.

#### 2.5.10. Mesafe Ölçüm Algılayıcıları

Çok kısa bir menzilde bile mesafe ölçümü çok önemlidir. Bu bazı metotlarla hesaplanan robotun konumunun belirlenmesine yardımcı olur. Günümüzde en ekonomik şekilde Sharp algılayıcılarının yardımıyla uzaklıklar kızılötesi ile ölçülebiliyor (Şekil 2.14). Ölçülebilen mesafe, 4cm ile 150cm arasında değişebilir. Bu algılayıcılar, fotodiyotun yaydığı kızılötesi ışık huzmesinin geri yansırken algılayıcı üzerinde oluşturduğu üçgenin açısının değişmesine göre bir nesnenin varlığı veya robota göre uzaklığı ölçülür.

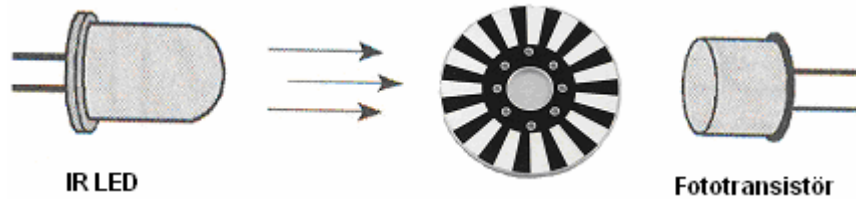


**Şekil 2.14:** Mesafe ölçüm algılayıcıları

Algılayıcı, aralıklarla anlık kızılötesi ışık huzmesi atımları yapar. Işık huzmesi algılayıcının görüş alanında yol alır. Görüş alanında bir nesne yoksa ışık huzmesi kaybolur, algılayıcıda önünü boş algılar. Ancak, önünde bir cisim varsa nesneye çarparak geri yansır. Geri yansımaları halinde, ışığın çıkış noktası, algılanan nesne üzerindeki yansıma noktası ve alıcı arasında bir üçgen oluşur. Üçgenin alıcı köşesindeki açısı ise, algılanan nesnenin uzaklık mesafesine göre değişir. Detektörün merceği algılayıcının hassasiyetini belirler. Detektör yansıma açısını okur ve nesnenin uzaklığını hesaplar. Uzaklık ve alınan değerler arasındaki ilişki doğrusal değildir. Ya belirli aralıklarla uzaklıkların değerleri ölçülmeli ve bir tabloya yazılmalıdır ya da uygun işlemler ile belirli yaklaşıklıkta doğrusallaştırma formülleri uygulanmalıdır. Bir modelin veya ötekinin seçimi, robotta kullanılan kontrol kartının tipine, imkânlarına, analogik girişlerin serbest olup olmamasına bağlıdır.

### 2.5.11. Enkoderler

Bu tip algılayıcı bir eksenin açısal dönme hareketi sonucunda oluşan pozisyon ve hız bilgilerini verebilir. Dönen bir tekerleğin paraleline dişli, çentikli bir çark, delikli bir disk veya üstü siyah renk dilimleri ile boyalı dairesel şeffaf pleksiglas disk yerleştirilir. Işık yayıcı LED ve ışık toplayıcı (fototransistör) parçalar dişli, çentikli çark, delikli veya şeffaf disk aralarında ortada kalacak şekilde karşılıklı yerleştirilir (Şekil 2.15). Bir taraftan LED ışığı verildiğinde çarkın dişlileri ışığın öteki tarafta bulunan fototransistöre ışığın geçişini aralıklarla keserek geçireceklerdir. Işığın kesilme / görünme sayısı işlenerek robotun hızı veya aldığı yol hesaplanabilir.

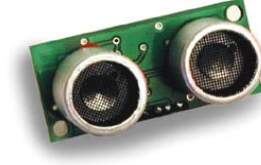


Şekil 2.15: Enkoderlerin genel görünümü

### 2.5.12. Ultrasonik Algılayıcılar

Sesle engel tanıma veya uzaklık ölçümü ultrasonik (ses ötesi) ses dalgaları ile yapılabilir. Ultrasonik algılayıcı çevresine ses dalgaları yayıp, engele çarpıp geri gelen yankı dalgalardan konum kontrolü yapan alettir. Menzilleri diğer algılayıcılara göre çok daha fazladır. Bir IR algılayıcı en fazla 2m ölçebilirken, ultrasonik

algılayıcılar uygun koşullarda, 30 metreye kadar ölçebilir. Fiyatları normal ışık algılayıcılarına göre biraz yüksektir (Şekil 2.16).



**Şekil 2.16:** Bir ultrasonik algılayıcı.

### 3. KALMAN FİLTRESİ

Robot kontrol sistemlerinin en önemli bölümlerinden birisi de gözlemlemedir. Gözleme için birçok yaklaşım bulunmasına rağmen bunlardan biri arızalar ile ilgili bilgi taşıyan rezidülerin oluşturulmasını içerir. Rezidü, bir arıza durumundaki gerçek algılayıcı çıkışı ve bu algılayıcı çıkışına ait tahmini değer arasındaki fark bulunarak oluşturulur. Robot kontrol sistemlerindeki rezidülerin bulunması için kullanılan yöntemlerin başında robotun tam bir matematiksel modelini kullanan gözlemleyiciler ve durum tahminicileri gelir.

Durumların bazılarının doğrudan ölçümlerinin bulunmadığı durumlarda, durumlar bir gözlemleyici yardımı ile yaklaşık olarak elde edilebilirler. Eğer sistem gözlemlenebilir ise bu ölçümü yapılan ölçümler sonucu bulunamayan durum değişkenlerinin tahmini bir değerini elde etmek mümkündür.

Başka bir sistemin durum değişkenlerinin tahmini değerlerine yaklaşan durum değişkenlerine sahip bir dinamik sistem ilk sistemin bir gözlemleyicisi olarak adlandırılır. Bu terim 1964 yılında Luenberger tarafından ilk kez kullanılmış olup daha sonra geliştirilmiştir.

Gözlemleyicilerde iki nokta önemlidir. Birincisi, sistemin modeli olabildiğince gerçeğe yakın olmalıdır. Yani model gerçek sistemi tam olarak benzetilmeyebilmelidir. İkinci olarak, sistemin giriş ve çıkışları zamanla değişebilir olabileceği için gözlemleyicinin dinamikleri sistemin kendisinden çok daha hızlı olmalıdır.

Kalman ve Bucy (1960, 1961) sistemin ve algılayıcıların değişkenlerinin gürültüler nedeni ile bozulduğu durumlarda, tahmindeki hatanın kovaryansını en çok oranda azalttığı için optimal (en iyi) olarak adlandırılan bir durum tahmincisi tanımladılar. Şu anda bu durum tahmincisi, en uygun gözlemleyici olarak değerlendirilen Kalman filtresi olarak anılmaktadır.

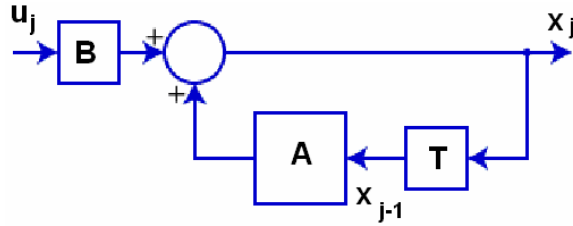
### 3.1. Kalman Filtresi

Gürültülü algılayıcı ölçümlerinden stokastik tahminler yapmaya yarayan matematiksel araçların içerisinde en iyi bilinenlerden ve en sık kullanılanlardan biri Kalman Filtresi'dir [15]. Kalman filtresi, Rudolph E. Kalman'ın 1960 yılında yayınladığı makalesinde doğrusal ayrık-veri filtreleme problemi için geliştirdiği yöntemin ismi olarak ortaya çıkmıştır. Kalman Filtresi, tahmin edici – doğrulayıcı tipi bir filtre aracılığı ile tahmini hata kovaryansını minimize ettiği için en uygun (optimal) olarak adlandırılan bir matematiksel denklemler grubudur. Ortaya çıktığı ilk zamanlarda özellikle otonom veya kısmi otonom yön bulma alanında olmak üzere oldukça geniş bir araştırma sahasına sahip olmuştur. Bunun nedeni aynı zamanda bilgisayarlarda geliştirilen sayısal hesaplama tekniklerindeki ilerleme ve filtrenin görece basitliği ve dayanıklı yapısıdır.

Ayrık zamanlı doğrusal sistemler durum denklemleri ile aşağıdaki gibi temsil edilirler;

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{A}\mathbf{x}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j \quad (3.1)$$

Burada,  $\mathbf{x}_j$  durum değişkenlerini,  $\mathbf{A}$  durum geçiş matrisini,  $\mathbf{u}_j$  de giriş işaretlerini temsil eden vektördür. Yukarıdaki ayrık zamanlı doğrusal sistemin blok diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir (T; birim zaman gecikmesi).

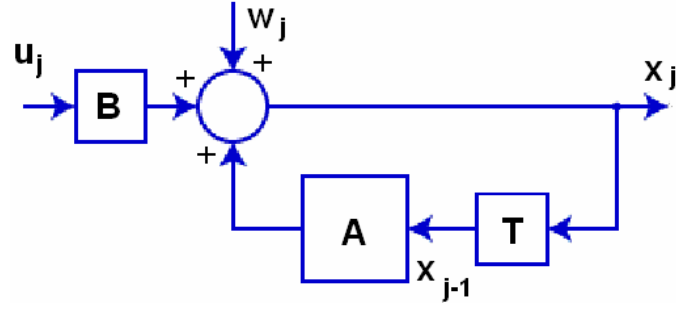


Şekil 3.1: Bir sistemin genel blok diyagramı.

Bu denkleme sistemdeki gürültüleri temsil eden bir  $\mathbf{w}_j$  işaretini de ekleyebiliriz. Bu durumda denklem,

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{A}\mathbf{x}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j + \mathbf{w}_j \quad (3.2)$$

şekline gelir. Buradaki  $\mathbf{w}$ , ortalaması 0 olan,  $\mathbf{Q}$  kovaryansına sahip olan ve giriş işareti ile bir bağlantısı bulunmayan beyaz gürültü kaynağıdır. Bu durumda sistem Şekil 3.2'deki blok diyagram ile temsil edilebilir.

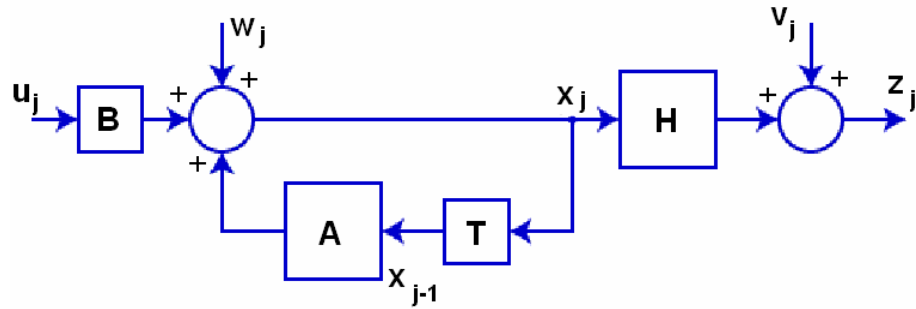


Şekil 3.2: Sisteme gürültü eklenmiş durum.

Bu durumda şöyle bir soru gündeme gelebilir.  $w$ 'nın etkilerini en düşük hale getirecek şekilde  $x$  filtrelenebilir mi? Bu sorunun cevabı Kalman filtresi ile “evet” olacaktır. Çıkış sinyali ölçümünün aşağıdaki gibi gösterildiğini düşünelim.

$$z_j = Hx_j + v_j \quad (3.3)$$

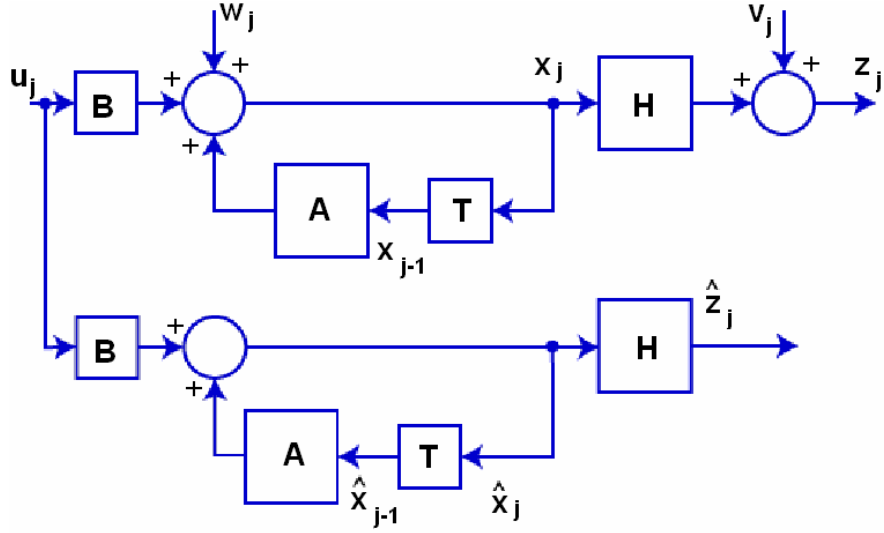
Ölçülen  $z$  değeri,  $H$  kazancı ile bağıntılı şekilde  $x$  değerine bağımlı olacaktır. Bu arada ölçümün de kendisine has bir  $v_j$  gürültüsü olacaktır.  $v_j$  gürültüsü  $w_j$  ile bir bağlantısı olmayan, 0 ortalamalı,  $R$  kovaryansına sahip ve giriş işareti ile de bir bağlantısı bulunmayan bir beyaz gürültü kaynağıdır. Her iki gürültü de giriş işaretinden ve birbirlerinden bağımsızdırlar (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Sistemin ölçüm gürültülerinin de eklendiği durumu

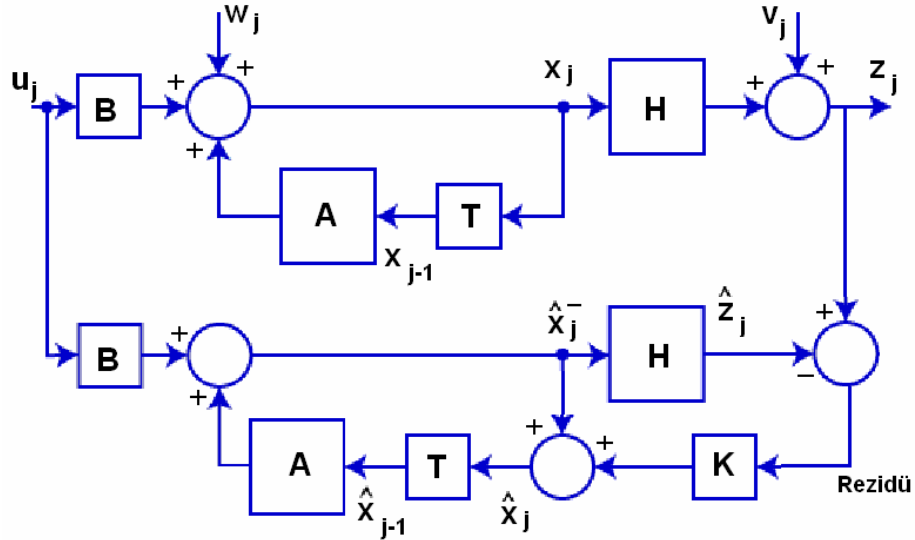
Bu durumda Kalman filtresinin görevi şu şekilde belirlenebilir. Yukarıdaki gibi blok diyagramı olan bir sistemde,  $w$  ve  $v$  'nin etkilerinin en aza indirilerek  $x$ 'i tahmin etmek için  $z$  nasıl filtrelenebilir? Sistemin tahminini elde etmek için sistemin bir kopyası oluşturulur. Burada tahmini  $x_j$  veya  $\hat{x}_j$ 'nin dahil olduğu diyagram aşağıdadır.





Şekil 3.4: Sistemin benzeri, sistemin durumlarının tahmini için kullanılır.

Şekil 3.4'deki blok diyagramında iki zayıf nokta vardır. Birincisi, bir doğrulama sistemi eksiktir. Eğer  $A$ ,  $B$  ve  $H$ 'nin değerlerini tam olarak bilinemezse, tahmini  $x$  değeri  $\hat{x}$ , gerçek  $x$  değerini iyi bir şekilde takip edemeyecektir. İkincisi, eklenen  $v$  ve  $w$  gürültü kaynakları için bir kompanzasyon yapılmamaktadır. Her iki problem için önlem içeren blok diyagram aşağıdadır.



Şekil 3.5: Doğrulamanın eklendiği blok diyagramı.

Bu şekil bir öncekine benzemekle beraber, asıl  $x_j$ ,  $\hat{x}_j^-$  olarak isimlendirilmiştir. Bu, öncül tahmin olarak adlandırılacaktır.

$$\hat{x}_j^- = A\hat{x}_{j-1} + Bu_j \quad (3.4)$$

Bu öncül tahmini  $\hat{z}_j$  çıkışının tahmini değerini oluşturmak için kullanılır. Gerçek çıkış ve bu tahmini çıkış arasındaki farka rezidü denir.

$$\mathbf{Rezidü} = \mathbf{z}_j - \hat{\mathbf{z}}_j = \mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^- \quad (3.5)$$

Eğer rezidü küçükse tahminin iyi olduğu, eğer büyükse tahminin kötü olduğu söylenir. Bu bilgi  $\mathbf{x}_j$ 'nin tahmininin iyileştirmesi için kullanılabilir. Bu yeni tahmine soncul tahmin,  $\hat{\mathbf{x}}_j$  denir. Eğer rezidü küçükse yapılan iyileştirme de küçüktür. Blok diyagramdan aşağıdaki denklem çıkarılabilir.

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\mathbf{Rezidü}) = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-) \quad (3.6)$$

Burada yapılacak iş  $\hat{\mathbf{x}}_j$ 'yi bulmak için kullanılacak  $\mathbf{K}$  değerinin ayarlanmasıdır ve bu Kalman filtresinin en önemli kısmıdır.

Bütün Kalman filtresi uygulamaları  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  ve  $\mathbf{H}$  matrislerine gereksinim duyar. Durum değişkenleri  $\mathbf{x}$ , giriş  $\mathbf{u}$  ve çıkış  $\mathbf{z}$  ile gösterilir. Zaman indeksi burada  $j$  ile gösterilmiştir.

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{A}\mathbf{x}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j + \mathbf{w}_j \quad (3.7)$$

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{H}\mathbf{x}_j + \mathbf{v}_j \quad (3.8)$$

İşlem iki adımdan oluşur; birinci adım, tahmin etme adımıdır (ki burada sadece çıkış göz önünde bulundurularak bir sonraki durum tahmin edilir), ikinci adım doğrulama adımıdır (ki bu adımda da önceki adımda elde edilen tahmin değeri şimdiki değer kullanılarak doğrulanır). Öncül tahmin, giriş ve önceki tahmin temel alınarak oluşturulur ve bu adım tahmin adımıdır.

$$\hat{\mathbf{x}}_j^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j \quad (3.9)$$

Bu durumda öncül kovaryans hesaplanabilir.

$$\mathbf{P}_j^- = \mathbf{A}^2\mathbf{P}_{j-1} + \mathbf{Q} \quad (3.10)$$

Bu iki denklemin soncul tahminin önceki değerlerini ve kovaryansını kullandığına dikkat etmek gerekir. Bu yüzden Kalman filtresinin ilk iterasyonunda bu iki değer

tahmini kullanılır (çoğunlukla rasgele değerler seçilir). Zamanla tahminler gerçek değere yaklaştığı için bu ilk durumda oluşan fark önemsizdir. Sadece kötü bir tahmin daha uzun zaman alacaktır. Öncül tahminin doğrulanması için Kalman filtresi kazancı  $\mathbf{K}$ 'ya ihtiyaç vardır ve bu adım doğrulama adımıdır.

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{H}\mathbf{P}_j^- (\mathbf{H}^2\mathbf{P}_j^- + \mathbf{R})^{-1} \quad (3.11)$$

Bu kazanç öncül tahminin doğrulanması sonucunda soncul tahminin elde edilmesini sağlar.

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}_j(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-) \quad (3.12)$$

Aşağıdaki denklem ile soncul kovaryans hesaplanabilir.

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{P}_j^- (\mathbf{I} - \mathbf{H}\mathbf{K}_j) \quad (3.13)$$

Denklemler incelenecek olursa şu sonuçlar gözlenecektir;

Eğer öncül hata küçükse,  $\mathbf{K}$ 'da küçüktür ve doğrulama da küçüktür. Yani yeni ölçümlerin kullanılmasına gerek yoktur ve yeni tahminler önceki tahminler kullanılarak oluşturulabilir. Eğer ilk tahmin iyi ise bunu doğrulama ihtiyacı da küçüktür.

Eğer öncül hata büyükse, (bu durumda paydadaki ölçüm hatası terimi  $\mathbf{R}$  önemsizdir) ve  $\mathbf{K} \approx 1/\mathbf{H}$ 'dir. Bu, yeni tahminin elde edilmesinde önceki tahminin kullanılmaması gerektiğini ve ölçüm sonuçlarının temel alınması gerektiğini belirtir.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_j &= \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\text{Rezidü}) = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-) \\ &= \hat{\mathbf{x}}_j^- + \frac{1}{\mathbf{H}}(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-) \\ &= \frac{\mathbf{z}_j}{\mathbf{H}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Eğer ölçüm gürültüsü  $\mathbf{R}$  çok büyükse,  $\mathbf{K}$  yine küçüktür ve bu durumda yine ölçümler hesaba katılmadan önceki tahmin sonuçları kullanılır. Bu durum da anlamlı bir durumdur, çünkü eğer ölçüm gürültüsü büyükse bu ölçüme duyulan güven de azdır ve önceki tahminlerin kullanılması gerekir.

Bu projenin konusu olan mobil robotların modelleri doğrusal olmadığı için Kalman filtresi doğrudan kullanılamaz. Onun yerine bu modelin doğrusallaştırılması sonucu elde edilmiş olan model ile “Genişletilmiş Kalman Filtresi” kullanılır.

### 3.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi

Çalışma anındaki ortalama ve kovaryans etrafında doğrusallaştırılmış Kalman filtresine Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) denir. Doğrusal olmayan durumlarda, tahminleri hesaplamak için sistem ve ölçme fonksiyonlarının kısmi türevleri kullanılarak o andaki tahmin değeri etrafında doğrusallaştırma yapılabilir. Bu sefer bu doğrusal olmayan sistemin aşağıdaki gibi gösterildiğini kabul edelim.

$$\mathbf{x}_j = f(\mathbf{x}_{j-1}, \mathbf{u}_j, \mathbf{w}_j) \quad (3.15)$$

Ölçüm denklemi de şu şekilde gösterilir.

$$\mathbf{z}_j = h(\mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j) \quad (3.16)$$

Burada  $\mathbf{w}_j$  sistemdeki gürültüyü ifade ederken,  $\mathbf{v}_j$  da ölçümdeki gürültüyü temsil etmektedir. Bu durumda  $f$  doğrusal olmayan fonksiyonu durum değişkenlerinin  $j$  ve  $j-1$  zamanları arasındaki ilişkilerini temsil eder. Bu ifade  $\mathbf{u}_j$  giriş işaretini ve  $\mathbf{w}_j$  sistem gürültüsünü de içerir. Doğrusal olmayan  $h$  fonksiyonunda  $\mathbf{x}_j$  durum değişkenlerinin  $\mathbf{z}_j$  ölçümleri ile arasındaki ilişkiyi gösterir.

Doğrusal olmayan sistem ve ölçüm fonksiyonlarına göre tahmin işlemini gerçekleştirebilmek için doğrusallaştırılmış denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{x}_j = \tilde{\mathbf{x}}_j + \mathbf{A}(\mathbf{x}_{j-1} - \hat{\mathbf{x}}_{j-1}) + \mathbf{W}\mathbf{w}_j \quad (3.17)$$

$$\mathbf{z}_j = \tilde{\mathbf{z}}_j + \mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \tilde{\mathbf{x}}_j) + \mathbf{V}\mathbf{v}_j \quad (3.18)$$

Burada,

- $\mathbf{x}_j$  ve  $\mathbf{z}_j$  durum ve ölçüm vektörleridir,
- $\tilde{\mathbf{x}}_j$  ve  $\tilde{\mathbf{z}}_j$ , (3.15) ve (3.16) denklemlerinden çıkarılan yaklaşık durum ve ölçüm vektörleridir,
- $\hat{\mathbf{x}}_j$ ,  $j$  adımında durumun soncul tahminidir,

- $\mathbf{A}$ ,  $f$ 'nin  $\mathbf{x}$ 'e göre kısmi türevlerinden oluşan Jacobian matrisidir.

$$\mathbf{A}_{[m,n]} = \frac{\partial f_{[m]}}{\partial x_{[n]}}(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \mathbf{u}_j, 0) \quad (3.19)$$

- $\mathbf{W}$ ,  $f$ 'in  $\mathbf{w}$ 'ye göre kısmi türevlerinin alındığı Jacobian matrisidir.

$$\mathbf{W}_{[m,n]} = \frac{\partial f_{[m]}}{\partial w_{[n]}}(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \mathbf{u}_j, 0) \quad (3.20)$$

- $\mathbf{H}$ ,  $h$ 'in  $\mathbf{x}$ 'e göre kısmi türevlerinin alındığı Jacobian matrisidir.

$$\mathbf{H}_{[m,n]} = \frac{\partial h_{[m]}}{\partial x_{[n]}}(\tilde{\mathbf{x}}_j, 0) \quad (3.21)$$

- $\mathbf{V}$ ,  $h$ 'in  $\mathbf{v}$ 'ye göre kısmi türevlerinin alındığı Jacobian matrisidir.

$$\mathbf{V}_{[m,n]} = \frac{\partial h_{[m]}}{\partial v_{[n]}}(\tilde{\mathbf{x}}_j, 0) \quad (3.22)$$

Yazım basitliği açısından  $j$  bu denklemlerde gösterilmemiştir. Bu durumda tahmin hatası için aşağıdaki denklem yazılabilir,

$$\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}_j} = \mathbf{x}_j - \tilde{\mathbf{x}}_j \quad (3.23)$$

Ve ölçüm hatası da şu denklem ile gösterilebilir,

$$\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_j} = \mathbf{z}_j - \tilde{\mathbf{z}}_j \quad (3.24)$$

Pratikte (3.23) denklemindeki  $\mathbf{x}_j$ 'ya erişim yoktur, çünkü bu durum vektörüdür, yani tahmin edilecek olan değerdir. Diğer taraftan, (3.24)'deki  $\mathbf{z}_j$ 'ya erişim vardır, çünkü bu gerçek ölçümdür ve  $\mathbf{x}_j$ 'nin tahmin edilmesinde kullanılır. Hata için (3.23) ve (3.24) kullanılarak aşağıdaki denklemler yazılabilir,

$$\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}_j} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_{j-1} - \hat{\mathbf{x}}_{j-1}) + \boldsymbol{\varepsilon}_j \quad (3.25)$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_j} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}_j} + \boldsymbol{\eta}_j \quad (3.26)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_j$  ve  $\boldsymbol{\eta}_j$ , 0 ortalamalı ve  $\mathbf{WQW}^T$  ve  $\mathbf{VRV}^T$  kovaryansına sahip değişkenlerdir.

Denklem (3.24)'deki gerçek ölçüm rezidüsü  $\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_j}$ , (3.25)'de verilen tahmin hatasını

$\tilde{\mathbf{e}}_{x_j}$  'yı bulmak için kullanılabilir.  $\hat{\mathbf{e}}_j$  olarak adlandırılan bu hata, doğrusal olmayan sistem için soncul tahminlerin elde edilmesinde kullanılır.

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \tilde{\mathbf{x}}_j + \hat{\mathbf{e}}_j \quad (3.27)$$

Denklem (3.25) ve (3.26)'deki değişkenler yaklaşık olarak aşağıdaki olasılık dağılımlarına sahiptirler.

$$p(\tilde{\mathbf{e}}_{x_j}) \approx N(0, E[\tilde{\mathbf{e}}_{x_j} \tilde{\mathbf{e}}_{x_j}^T]) \quad (3.28)$$

$$p(\boldsymbol{\varepsilon}_j) \approx N(0, \mathbf{W}\mathbf{Q}_j\mathbf{W}^T) \quad (3.29)$$

$$p(\boldsymbol{\eta}_j) \approx N(0, \mathbf{V}\mathbf{R}_j\mathbf{V}^T) \quad (3.30)$$

Bu yaklaşık ifadeler göz önünde bulundurulursa ve  $\hat{\mathbf{e}}_j$  'nın tahmini değerinin 0 olduğu öngörülürse  $\hat{\mathbf{e}}_j$  'yı tahmin etmek için kullanılacak Kalman filtresi denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$\hat{\mathbf{e}}_j = \mathbf{K}_j \tilde{\mathbf{e}}_{z_j} \quad (3.31)$$

Denklem (3.31), denklem (3.27)'de yerine konulursa,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_j &= \tilde{\mathbf{x}}_j + \mathbf{K}_j \tilde{\mathbf{e}}_{z_j} \\ &= \tilde{\mathbf{x}}_j + \mathbf{K}_j (\mathbf{z}_j - \tilde{\mathbf{z}}_j) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Denklem (3.32), denklem (3.15) ve denklem (3.16)'dan gelen  $\tilde{\mathbf{x}}_j$  ve  $\tilde{\mathbf{z}}_j$  ve denklem (3.11)'den gelen  $\mathbf{K}_j$  ile birlikte genişletilmiş Kalman filtresinde ölçüm güncellemesi için kullanılabilir.

Bütün GKF denklemleri aşağıda görüldüğü şekildedir.

Güncelleme adımı,

$$\hat{\mathbf{x}}_j^- = f(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \mathbf{u}_j, 0) \quad (3.33)$$

$$\mathbf{P}_j^- = \mathbf{A}_j \mathbf{P}_{j-1} \mathbf{A}_j^T + \mathbf{W}_j \mathbf{Q}_{j-1} \mathbf{W}_j^T \quad (3.34)$$

denklemleri ile ve doğrulama adımı,

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{P}_j^- \mathbf{H}_j^T (\mathbf{H}_j \mathbf{P}_j^- \mathbf{H}_j^T + \mathbf{V}_j \mathbf{R}_j \mathbf{V}_j^T)^{-1} \quad (3.35)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}_j (\mathbf{z}_j - h(\hat{\mathbf{x}}_j^-, \mathbf{0})) \quad (3.36)$$

$$\mathbf{P}_j = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_j \mathbf{H}_j) \mathbf{P}_j^- \quad (3.37)$$

denklemleri ile ifade edilir. Ölçüm güncelleme denklemleri  $\mathbf{z}_j$  ölçümü ile durum ve kovaryans tahminlerinin doğrulanmasını yapar. Denklem (3.36)'daki  $h$  denklem (3.16)'dan gelmektedir ve  $\mathbf{H}_j$  ve  $\mathbf{V}_j$ ,  $j$  zamanındaki ölçüm Jacobian matrisleridir.  $\mathbf{R}_j$ 'da  $j$  zamanındaki ölçüm gürültü kovaryans denklemdir.

Önceki bölümde verilen doğrusal olmayan sistem modeli Kalman filtresinde kullanılabilmesi için ilk olarak doğrusallaştırılmıştır. Ayrık zamanda doğrusal olmayan robot modeli aşağıdaki biçimdedir:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{j-1} \\ y_{j-1} \\ \theta_{j-1} \end{bmatrix} + T \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{j-1} + T \cdot w_{j-1}) & 0 \\ \sin(\theta_{j-1} + T \cdot w_{j-1}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{j-1} \\ w_{j-1} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Burada,

$$f_1 = x_{j-1} + T \cdot v_{j-1} \cdot \cos(\theta_{j-1} + T \cdot w_{j-1}) \quad (3.39a)$$

$$f_2 = y_{j-1} + T \cdot v_{j-1} \cdot \sin(\theta_{j-1} + T \cdot w_{j-1}) \quad (3.39b)$$

$$f_3 = \theta_{j-1} + T \cdot w_{j-1} \quad (3.39c)$$

olarak belirlenir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

işlemi sonucunda  $\mathbf{A}$  matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T.v_{j-1} \cdot \sin(\hat{\theta}_{j-1} + T.w_{j-1}) \\ 0 & 1 & T.v_{j-1} \cdot \cos(\hat{\theta}_{j-1} + T.w_{j-1}) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

**B** matrisi de aşağıdaki gibi bulunur.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v} & \frac{\partial f_1}{\partial w} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v} & \frac{\partial f_2}{\partial w} \\ \frac{\partial f_3}{\partial v} & \frac{\partial f_3}{\partial w} \end{bmatrix}$$

işlemi sonucunda,

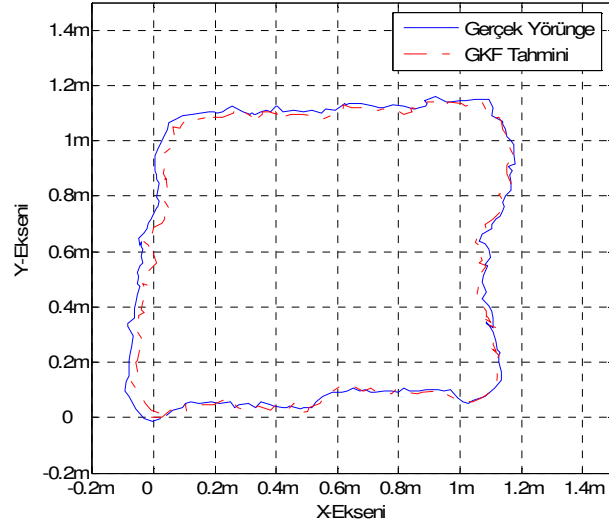
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} T \cdot \cos(\hat{\theta}_{j-1} + T.w_{j-1}) & -T^2 \cdot v_{j-1} \cdot \sin(\hat{\theta}_{j-1} + T.w_{j-1}) \\ T \cdot \sin(\hat{\theta}_{j-1} + T.w_{j-1}) & T^2 \cdot v_{j-1} \cdot \cos(\hat{\theta}_{j-1} + T.w_{j-1}) \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

olarak elde edilir. **H** ölçüm matrisi ise aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Kalman filtresi bu doğrusallaştırılmış sistem modeli ile birlikte kullanıldığında yapılan simülasyon sonucunda GKF'nin sistemi başarılı bir şekilde izlediği gözlemlenmiştir. Robotun (0,0) noktasından yola çıkıp her 1 metrede 90° sola dönerek başladığı noktaya tekrar dönmesi amaçlandırılmıştır.





**Şekil 3.6:** Robotun gerçek yörüngesi ve GKF tahmini

Şekil 3.6'da mavi renkli çizgi robotun x-y eksenleri üzerindeki yörüngesini göstermekte ve kesikli kırmızı çizgi ise GKF tahminini göstermektedir.

#### 4. ARIZA TESPİT VE TEŞHİSİ

İnsanlar makineleri imal etmeye başladığından beri onların çalışma durumları ve problemleri ile sürekli ilgilenmişlerdir. Yüzyıllarca arızalar veya konumları ile ilgili tek bilgi kaynağı bu makinelerin duysal işaretleri idi. Yani makinenin kokusu, rengi, çıkardığı seslerdeki değişimler, ısısı veya herhangi bir şeyler akıtıp akıtmadığı gibi duysal özelliklerine bakılarak makinenin durumu hakkında bir karara varılıyordu [16]. Daha sonra önemli fiziksel değişkenler hakkında daha keskin bilgiler veren ölçüm aletleri ortaya çıktı. Bununla birlikte bu cihazların (algılayıcıların) arızaya eğilimli veya bazen yanlış ölçümler yapabildikleri görüldü. Bu hatalar, insanların dahil olmadığı veya çok az müdahale ettiği otomatik kontrol sistemlerinde çok daha kritik bir hal aldı. Çünkü sonuçlar insanların dahil olduğu sistemlerde arıza meydana gelmesinden çok daha fazla zarara neden olabilmektedir.

Bilgisayarların gelişi ve onların gerçek zamanlı uygulamalarıyla önemli gelişmeler yaşanmıştır. Makinelerin gözetiminde bilgisayarlar daha güvenilirlerdir. Birçok kaynaktan gelen bilgileri toplayabilmekte ve çok karmaşık sistemlerdeki arızaların yerlerini kolaylıkla belirleyebilmektedir. Bilgisayarların artan hızı da makinelerdeki arızaların zamanında tespit edilebilmelerinde önemli ilerlemeler sağlamıştır.

Başlangıçta, bilgisayarlar karmaşık ve işletimleri için özel ortamlar gereken cihazlardı. Kendisi de pahalı ve karmaşık olan makineler ile birlikte kullanılabilirlerdi. Büyük endüstriyel üretim tesisleri, elektrik santralleri, petrol rafinerileri, kimyasal tesisler, kağıt üretim tesisleri bilgisayarlı gözetim sistemlerinin ilk uygulandıkları yerlerdir. Daha sonra bu sistemler gemiler ve uçaklar gibi ulaşım vasıtalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu gibi sistemlerde bilgisayar yüzlerce ve hatta binlerce ölçümü okumak ve yüzlerce kontrol döngüsünü denetlemek durumundadır.

Mikroişlemcilerin ortaya çıkması ile durum hızlı bir şekilde değişmeye başlamıştır. İşlemciler birçok cihazın içerisine yerleştirilebilecek kadar ucuz ve çok değişik koşullarda çalışabilen cihazlar durumuna gelmişlerdir. Bu gelişmeler ileri haberleşme tekniklerinin ortaya çıkması ile oldukça hızlanmış ve bunun sonucunda

merkezi gözleme ve kontrol sistemlerinden dağıtık gözleme sistemlerine bir geçiş yaşanmıştır. Yani artık sistemin bir kısmının gözlenmesi işlemi sadece o kısmın kendi içerisinde yapılabilir bir hale geldi. Daha da önemlisi mikrokontrolörler arabalar, merkezi ısıtma sistemleri ve ev eşyaları gibi tüketici ürünlerinin birçoğunun içerisine yerleştirilmeye başlandı. Böylece bilgisayarlı durum izleme, her ne kadar insanlar görmese de, gelişmiş toplumun günlük hayatının bir parçası haline gelmiştir.

Güvenilir sistemler tasarlanmanın bir yolu yüksek kaliteli malzemeler kullanmaktır. Ancak yüksek kaliteli malzemeler her zaman sistem arızalarının oluşma olasılığını düşürmezler. Sistemde oluşan arızaları telafi edebilecek yöntemlere ihtiyaç bulunmaktadır. Arıza, bir sistem parçasının kendisinde bulunan veya içerisinde bulunan bir hata nedeni ile tamamlaması gereken görevini tamamlayamamasına denir[17]. Nedenler arasında tasarım hataları, sistemin çalışması sırasında oluşan hatalar, üretim problemleri, hasar, zorlu ortam koşulları gibi dış etkenler, elektromanyetik etkileşim ve beklenmedik girişler sayılabilir. Dış etkenlerin etkileri birçok sistem parçasına etkiyebilir. Hata, sistemdeki bir değişkenin değerinin amaçlanan değerinden sapmasının bir göstergesidir.

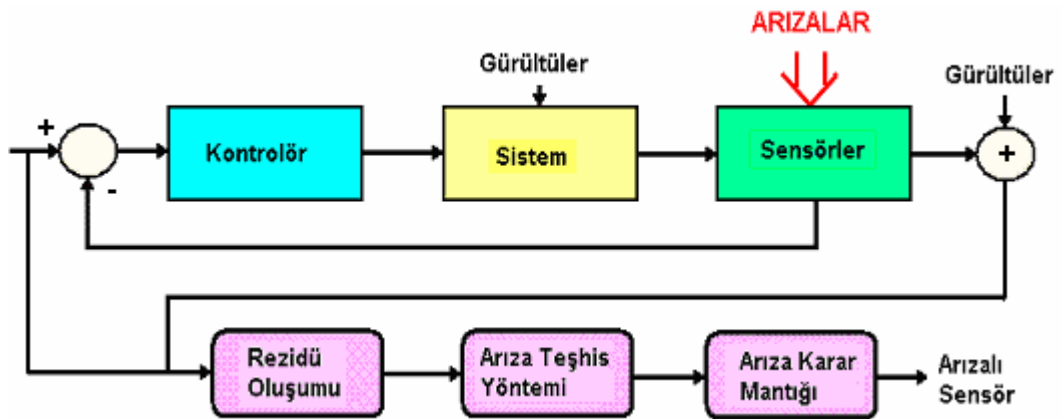
Arıza geçici, kalıcı veya kesik kesik olmak üzere üç tip süreklilik derecesi ile ifade edilebilir. Geçici bir arıza, genelde belirli bir süre aktif olan dış etkenlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Kesikli arıza durumu sistemde kararsız çalışan bir cihaz nedeni ile sistemin arızalı durum ve sağlam durum arasında gidip gelmesinin bir sonucu olarak meydana gelir. Kalıcı arızalar ise herhangi bir parçanın bozulması, fiziksel hasar veya tasarım hatası sonucu ortaya çıkar. Geçici ve kesikli arızaların tespit edilmesi kalıcı arızaların tespit edilmesine nazaran çok daha zordur çünkü hataya neden olduktan sonra bir anda tekrar kaybolabilirler.

Güvenilirlik,  $t = 0$  anında tam olarak çalıştığı farz edilen bir sistemin bir  $t$  anında görevini hala yerine getirebilme olasılığı olarak tanımlanır. Mobil robotlar gibi birçok gerçek zamanlı sistem yüksek güvenilirliğe gereksinim duyar çünkü oluşabilecek bir hata oldukça maliyetli olan robotun kaybedilmesine neden olabilmektedir. Görev sırasında güvenilirliği sağlamak için ve otomatik tamir işleminin yapılması için sistemin yedek bazı kaynaklara sahip olması zorunludur. Bu durum sistemin genel çalışmasında kalite düşüklüğüne neden olsa da gereklidir.

Mobil robotlar, kendi başlarına hareket kabiliyetlerinin artırılması için birçok algılayıcıyla donatılmışlardır [3]. Genellikle daha güvenilir sistemlerin oluşturulması için her bir bilgi türü, farklı veya aynı türdeki birden fazla algılayıcıdan toplanan bilgiler ile elde edilmektedir. Bu çoklu algılayıcı sisteminden gelen bilginin bir kısmı hatalı veya algılayıcılardan bazıları arızalı olabilmektedir. Sebep, bir algılayıcının bozulması veya robotun çalışma ortamına bağlı olarak, kullanılan algılayıcının yetersizliği olabilmektedir. Arıza tespit ve teşhis algoritmasının amacı bozulmamış bilgileri toplamak ve ihtiyaç olduğu durumlarda diğer algılayıcıları da bu duruma göre koordine ederek sistemin en az kayıpla bu olumsuz durumu atlatabilmesini sağlamaktır. Yani kısaca robota güvenilir bilgiyi bulmak ile yükümlüdür. Tekerleklerin kırılması veya sürücülerin tamamen bozulması gibi büyük arızalar olmadığı sürece, yedek bilgiler ile bozuk algılayıcı ve sürücüler kullanılarak robotun verilen görevi başarı ile tamamlamasını sağlayacak yeniden yapılandırma yöntemleri mevcuttur.

Bu çalışmada arızalı algılayıcılara sahip bir diferansiyel tip mobil robotun davranışı üzerinde durulmuştur. Yedek algılayıcı bilgisinin elde edilmesi için bir GKF tasarlanmıştır. Bir hata oluştuğunda ana Kalman filtresi tarafından elde edilen tahmini bilgi, rezidü oluşturulması ile ATT işlemini başlatarak ve sonrasında uygun yeniden yapılandırma yöntemi kullanılarak, tahmini ve gerçek sistem çıkışları arasındaki farkı en küçük duruma getirmek için kullanılmıştır.

Tasarlanan sistemin en genel blok diyagramı Şekil 4.1'deki gibidir. Arızalanan gelen algılayıcının izole edilmesi için algılayıcılardan gelen veriler giriş işareti ile birlikte rezidü oluşturulması ve arıza teşhisi algoritmasında kullanılmaktadır.

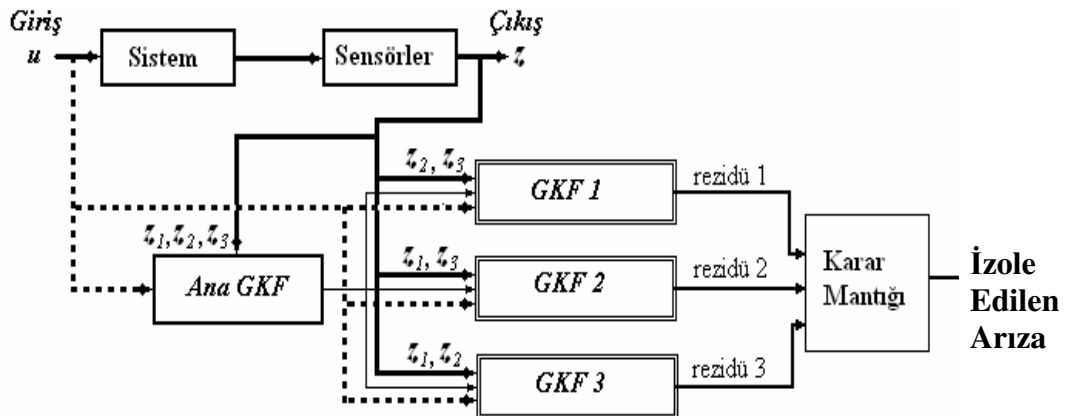


Şekil 4.1: Sistemin genel blok diyagramı

#### 4.1. Arıza Tespit ve Teşhis Algoritması

Tasarlanan mobil robot ortamda yön bulmak için odometrik algılayıcıları kullanmaktadır. Robotu kontrol etmek için sağ ve sol tekerlerde iki ayrı motor bulunmaktadır. Robotun doğrultusunun açısını bulmak için bir elektronik pusula, ve x ve y eksenlerine olan mesafenin ölçülebilmesi için de mesafe algılayıcıları kullanılmaktadır.

Belirlenemeyen algılayıcı arızaları robotun istenmeyen çalışma koşulları ile karşı karşıya kalmasına neden olabilir. Böyle koşulların oluşmasının engellenmesi için arıza bir an önce tespit edilmek durumundadır. Algılayıcılardan alınan bilgilerin tahminleri tasarlanan bir GKF ile edilmektedir. Bu GKF'nin çıkışında oluşturulan rezidü eğer bir eşik değerden büyükse sistemde bir arıza oluştuğuna karar verilir. Bu durumda arıza tespit edilmiştir ancak bu sadece bir uyarı niteliğindedir çünkü önemli olan arızanın nerede olduğunun bulunmasıdır. Bunun için her bir algılayıcı ölçümüne göre ayrı ayrı tasarlanmış olan GKF'ler kullanılır. Her bir algılayıcı için tasarlanan GKF'lerden oluşan sisteme Kalman filtresi dizisi (Bank of Kalman Filters) denir (Şekil 4.2). GKF dizisinde her bir algılayıcı için ayrı rezidüleri oluşturulur. GKF 1; y eksenini algılayıcısı ve  $\theta$  açısını ölçen algılayıcıların ( $z_2, z_3$ ) çıktılarını kullanır. GKF 2; x eksenini algılayıcısı ve  $\theta$  açısını ölçen algılayıcıların ( $z_1, z_3$ ) çıktılarını kullanır. GKF 3; x eksenini algılayıcısı ve y eksenini algılayıcısı ( $z_1, z_2$ ) çıktılarını kullanır. Bu rezidülerden gelen değerler uygun kara alma yöntemi ile değerlendirilerek hangi algılayıcının arızalı olduğu teşhis edilir.



Şekil 4.2: GKF Dizisi

İzolasyon işlemi veya arıza karar alma mantığı, her biri belirli bir arızaya duyarlı olmayan ve diğer arızalara karşı duyarlı olan bir rezidü değerlendirme yapısına dayanmaktadır (Tablo 4.1).

**Tablo 4.1:** Rezidü yapılandırması

Rezidü Yapısı	Rezidü 1	Rezidü 2	Rezidü 3
Arıza 1 (x-ekseni algılayıcısı arızası)	0	1	1
Arıza 2 (y-ekseni algılayıcısı arızası)	1	0	1
Arıza 3 ( $\theta$ açısı algılayıcısı arızası)	1	1	0

Yukarıdaki tabloya göre rezidüler aşağıdaki şekilde ifade edilebilirler,

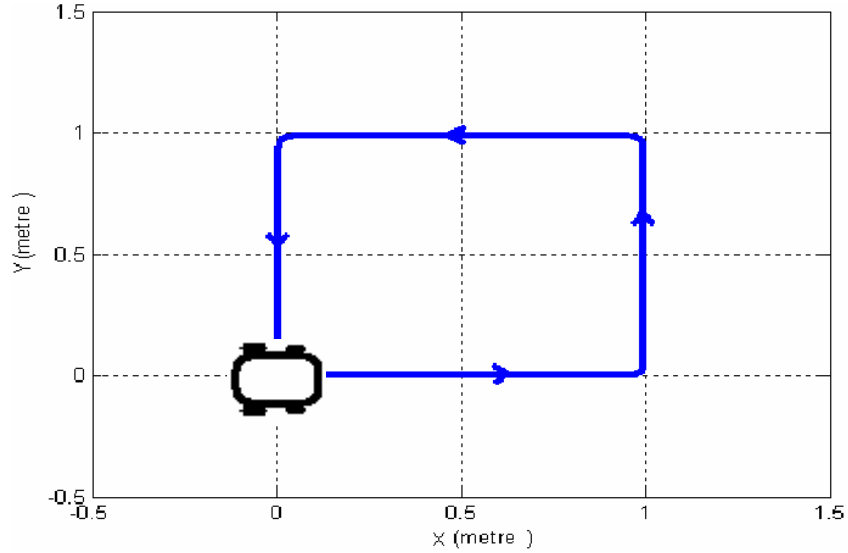
$$rezidü\_1 = \begin{bmatrix} y_j - \hat{y}_j \\ \theta_j - \hat{\theta}_j \end{bmatrix} \quad rezidü\_2 = \begin{bmatrix} x_j - \hat{x}_j \\ \theta_j - \hat{\theta}_j \end{bmatrix} \quad rezidü\_3 = \begin{bmatrix} x_j - \hat{x}_j \\ y_j - \hat{y}_j \end{bmatrix}$$

Robotun bulunduğu noktadan y eksenine olan mesafeyi ölçen algılayıcıda yani x eksenindeki konumu belirleyen algılayıcıda bir arıza meydana gelirse, GKF 2 ve GKF 3 bu arızaya duyarlı olacaklardır ve GKF 1 duyarsız olacaktır. Rezidü 2 ve rezidü 3'ün birinci terimlerinde bir artış meydana gelecek ve x eksen algılayıcısının arızalı olduğuna karar verilecektir. Benzer şekilde eğer elektronik pusulada bir arıza meydana gelirse bu algılayıcı çıktıklarına duyarlı olan GKF 1 ve GKF 2'den elde edilen rezidü 1 ve rezidü 2'nin elektronik pusula ile ilgili teriminde ( $\theta_j - \hat{\theta}_j$ ) bir artış meydana gelecektir. Bu durumda bu algılayıcının arızalı olduğu ve sağlam olan yedeğinin devreye alınması gerektiği söylenebilecektir.

#### 4.2. Arıza Tespit ve Teşhisi Algoritması için Simülasyon Çalışması

Mobil robot kontrol sistemlerindeki arızaların tespit ve teşhis edilmesi konusu ile ilgili bir simülasyon çalışması yapılmıştır [19]. Simülasyon senaryosu şu şekildedir; Mobil robot (0,0) noktasında x eksenine paralel bir şekilde (yani  $\theta = 0$ ) başlangıç pozisyonu alır. 0.2m/s hız ile harekete geçerek 1m ilerler ve  $90^0$  açı ile sola döner. Aynı işlemi üç kere tekrarladıktan sonra başlangıç konumuna tekrar gelir (Şekil 4.3). Aynı senaryo robot hareket halinde iken 15. saniyede x eksen algılayıcısından alınan

bilgi kaybedilecek şekilde tekrarlanmaktadır. Bu durumda Kalman filtresi çıktıları incelenir ve daha önce açıklanan karar alma mekanizmalarına göre eğer 10cm olarak belirlenen eşik değeri aşılmış ise arızalı algılayıcı sağlıklı yedeği ile yer değiştirmektedir. Son olarak aynı görev yedek algılayıcının devreye girmesi durumunu da içerecek şekilde tekrarlanmaktadır.

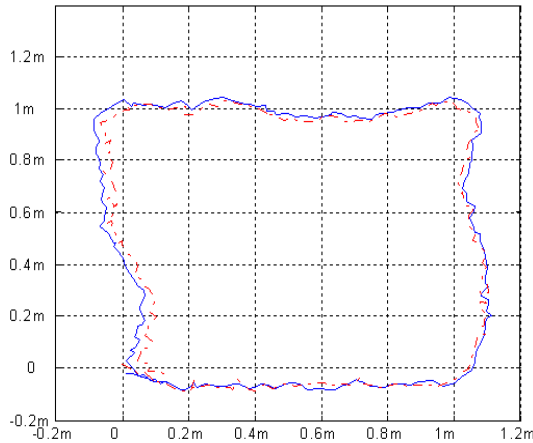


Şekil 4.3: Robota verilen görev yörüngesi.

İlk olarak bütün algılayıcıların sağlam olduğu durumdaki durum incelenmiştir.

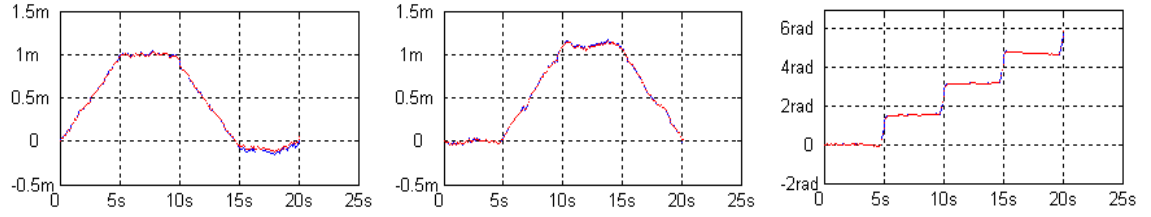
#### 4.2.1. Arızasız Durum

Hiçbir algılayıcıda arıza olmaması durumunda robot yörüngesi (mavi düz çizgi) ve GKF çıktısı (kırmızı kesikli çizgi) Şekil 4.4'de görüldüğü gibidir. Gerçek araç konumu ve tahmin edilen yörünge arasında büyük bir fark olmadığı açıkça görülmektedir. Bu sonuca göre araçta herhangi bir problemten bahsedilemez.



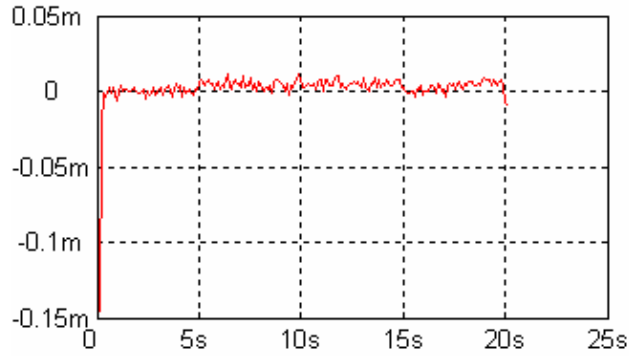
Şekil 4.4: Simülasyon sonucunda robotun gerçek ve tahmin edilen yörüngeleri.

Eğer algılayıcıların yaptığı ölçümler ve GKF çıktıları için her bir algılayıcı için ayrı ayrı inceleme yapılırsa aşağıdaki şekildeki sonuçlar elde edilecektir.



**Şekil 4.5:** x (solda) ve y (ortada) eksenleri ve  $\theta$  (sağda) algılayıcıları çıkışları.

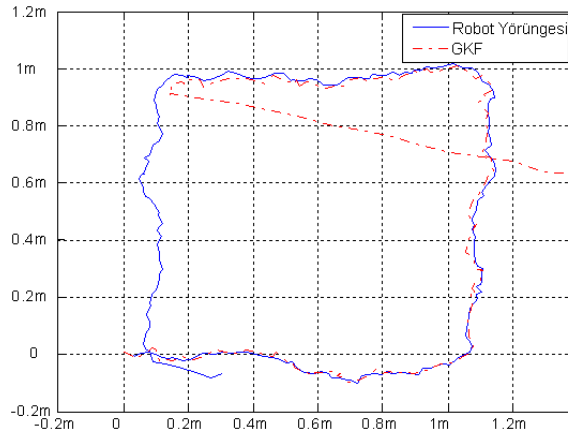
X eksenindeki konumu ölçen mesafe algılayıcısındaki rezidü incelenirse Şekil 4.6'daki gibi olduğu ve eşik değeri aşmadığı görülür.



**Şekil 4.6:** x eksenine algılayıcısına ait rezidü.

#### 4.2.2. Arızalı Durum

Araç yola çıktıktan 15 saniye sonra robotun x eksenindeki konumunu gösteren mesafe algılayıcısındaki değer herhangi bir neden ile 0'a düşer yani algılayıcıdan gelen bilgi tamamen kaybedilir. Bu durumdaki genel robot yörüngesi mavi düz çizgi ile ve GKF tahmini kırmızı kesikli çizgi ile Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

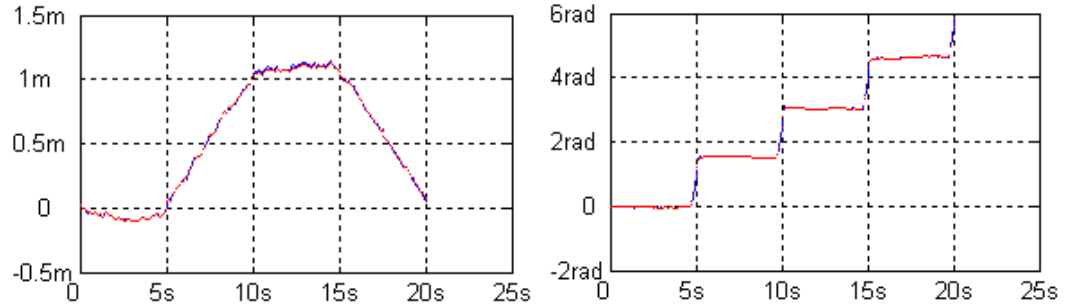


**Şekil 4.7:** Arıza durumundaki gerçek robot yörüngesi ve GKF tahmini



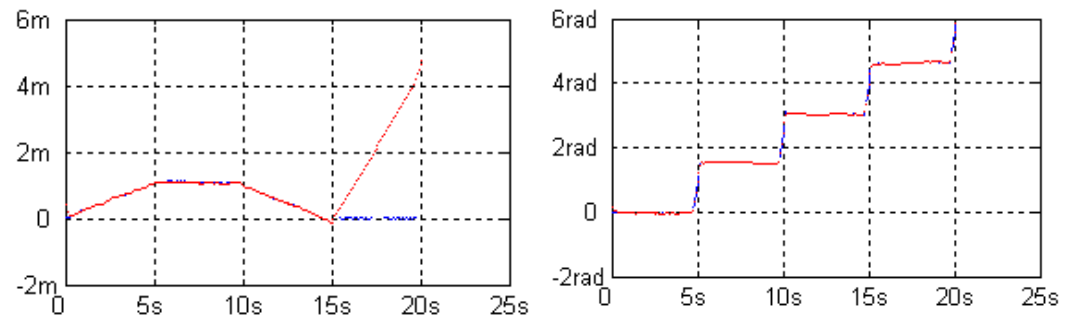
Şekilden de görüldüğü üzere 15. saniyede GKF sistemi takip etmeyi bırakmıştır ve rezidü eşik değeri aşmıştır. Bu durumda bir arıza meydana geldiğinden bahsedilebilir ancak hangi algılayıcıda arıza oluştuğunun belirlenmesi için GKF dizisi çalıştırılmıştır.

GKF 1, y eksenini algılayıcısına ve  $\theta$  açısına duyarlı bir filtredir. Bu değişkenlerin durumu Şekil 4.8’de görülmektedir. Tahmin edilen değerler ve gerçek algılayıcı ölçümleri arasında büyük bir fark gözlenmemektedir.



**Şekil 4.8:** GKF 1’in y eksenini (solda) ve  $\theta$  algılayıcısına (sağda) ait rezidüleri.

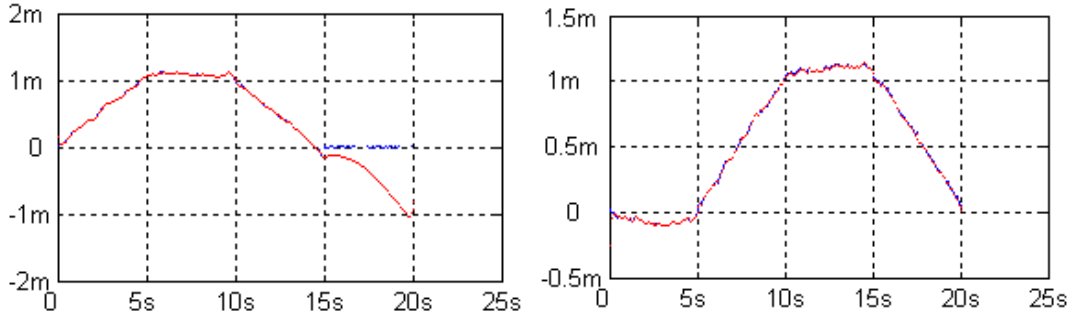
GKF 2 x eksenini algılayıcısına ve  $\theta$  açısına duyarlı bir filtredir. Bu değişkenlerin durumu Şekil 4.9’da görülmektedir. Tahmin edilen değerler ve gerçek algılayıcı ölçümleri arasında x eksenini için 15. saniyeden sonra bir artış gözlenmektedir.  $\theta$  açısını ölçen algılayıcı için böyle bir durum söz konusu değildir. x eksenindeki konumu ölçen algılayıcıda bir problem olabileceği düşünülebilir ancak son kararı vermek için GKF 3’ün durumunun incelenmesi gerekmektedir.



**Şekil 4.9:** GKF 2’nin x eksenini (solda) ve  $\theta$  algılayıcısına (sağda) ait rezidüleri.

GKF 3 x eksenini algılayıcısına ve y eksenini algılayıcısına duyarlı bir filtredir. Bu değişkenlerin durumu Şekil 4.10’da görülmektedir. Tahmin edilen değerler ve gerçek algılayıcı ölçümleri arasında x eksenini için 15. saniyeden sonra bir artış gözlenmektedir. y eksenindeki mesafeyi ölçen algılayıcı için böyle bir durum söz

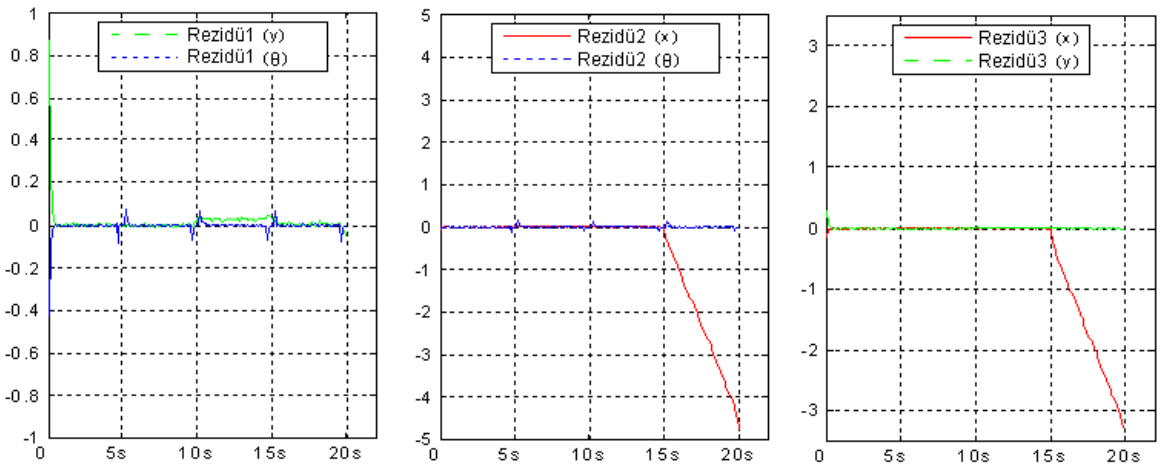
konusu değildir. Bu sonuçlara göre x eksenindeki konumu ölçen algılayıcıda bir problem olduğuna karar verilmiştir.



**Şekil 4.10:** GKF 3'ün x (solda) ve y (sağda) eksenini algılayıcısına ait rezidüleri.

Araç arıza esnasında GKF tahmini ile gerçek ölçüm arasındaki farkı kapatmaya çalışacağı için bir dönüş hareketi başlatacaktır. Bu dönüş hareketi mikrokontrolör için doğru bir hareket ancak robotun gerçek görevi açısından yanlış bir hareket olacaktır ve robot rotasından çıkmış olacaktır.

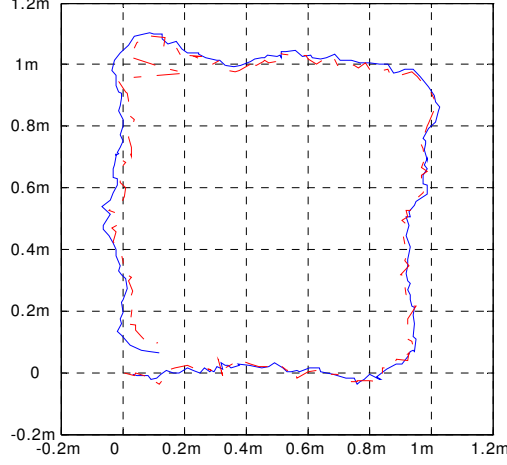
Şekil 4.11'de her bir GKF'de oluşturulan rezidüleri toplu olarak görülmektedir. Yeşil ve mavi kesikli çizgiler ile sırasıyla y eksenindeki konumu ölçen mesafe algılayıcısı ve  $\theta$  açısını ölçen algılayıcıya ait rezidüleri kırmızı düz çizgi ile de x eksenindeki konumu ölçen mesafe algılayıcısına ait rezidüleri görülmektedir. x eksenini algılayıcısına duyarlı olan GKF 2 ve GKF 3'ün her ikisinde de bu bileşenin atış göstermesi nedeni ile x algılayıcısının arızalı olduğu ortaya çıkmış ve bu algılayıcı izole edilmiştir.



**Şekil 4.11:** GKF dizisinde oluşturulan rezidüleri toplu gösterimi.

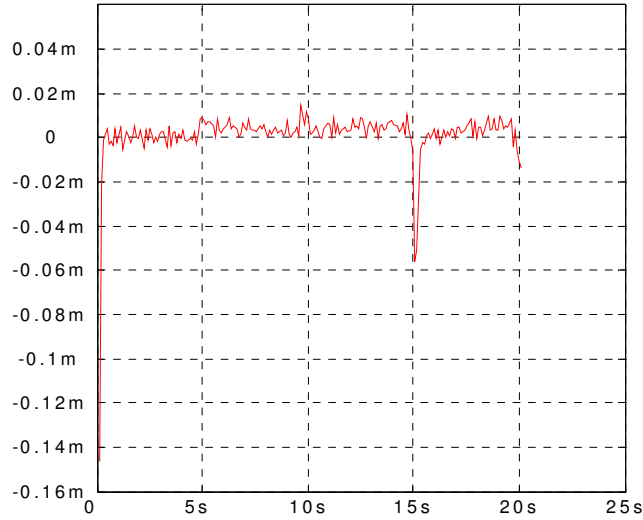
### 4.2.3. Yeniden Yapılandırma Sonrasında Durum

Yeniden yapılandırma yöntemi olarak arıza meydana geldikten 20ms sonra arızalı algılayıcı devreden çıkarılarak yerine sağlıklı yedek algılayıcı devreye alınmıştır. Yedek algılayıcının devreye alınmasından sonra aracı takip ettiği yörünge Şekil 4.12’de görülmektedir.



**Şekil 4.12:** Yeniden yapılandırma sonrasında gerçek ve tahmini robot yörüngeleri.

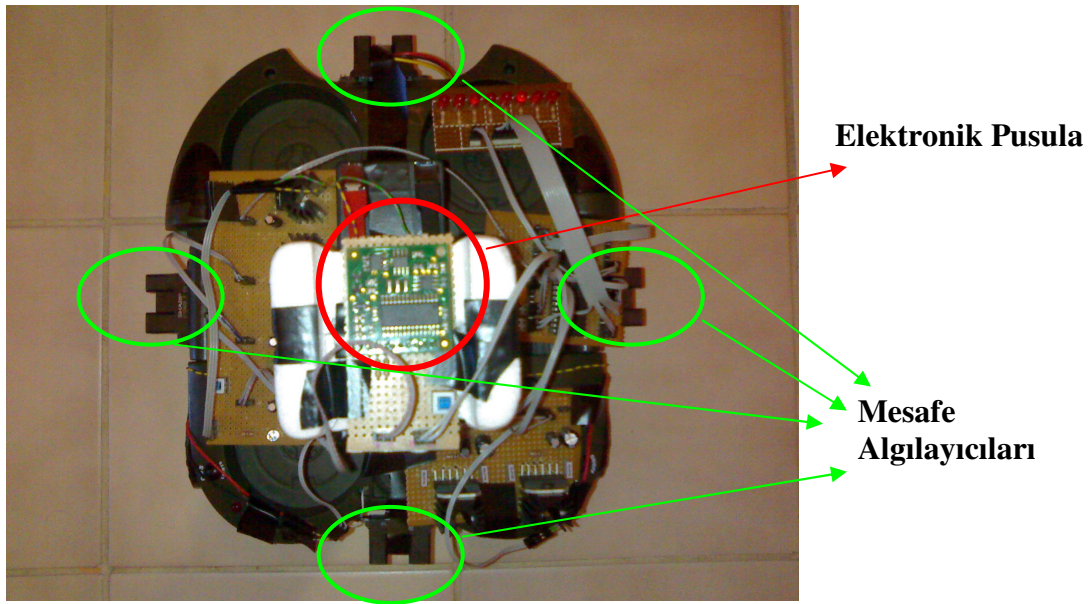
Şekil 4.13’de gösterilen x eksenini algılayıcısına ait rezidü incelenirse çok kısa bir süre boyunca rezidünün artışa geçtiği ancak yedek algılayıcının devreye alınmasından sonra tekrar azaldığı görülmektedir.



**Şekil 4.13:** Yeniden yapılandırma sonrasında x eksenini algılayıcısına ait rezidü.

## 5. GERÇEK MOBİL ROBOT ÜZERİNDE UYGULAMA

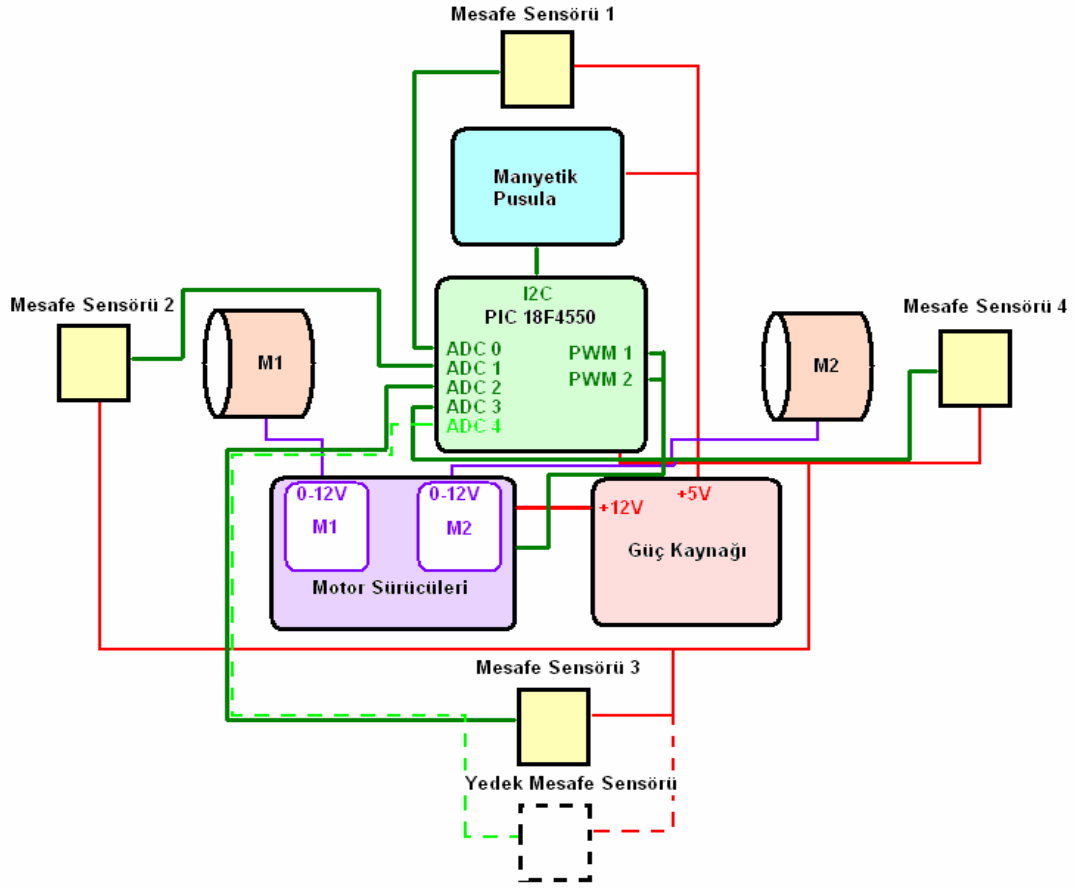
Bir önceki bölümde benzetim çalışması yapılan arıza tespit ve teşhis algoritmasının uygulaması yapılmıştır. Algılayıcı olarak 4 adet mesafe algılayıcısı ve 1 adet elektronik pusula kullanılmıştır. Mesafe algılayıcıları aracın dört bir yanına yerleştirilmiştir. Ön ve arkaya yerleştirilen mesafe algılayıcılarından alınan bilgiler robotun x eksenindeki pozisyonunun belirlenmesi amacı ile beraber kullanılmaktadır. Aynı şekilde aracın sağ ve soluna yerleştirilen mesafe algılayıcıları da aracın y eksenindeki konumunu vermektedir. Elektronik pusulanın başlangıç pozisyonunda okuduğu değer ile çalışma anındaki değer arasındaki fark aracılığı ile aracın doğrultusu ve x eksenindeki açı yani  $\theta$  açısı elde edilmektedir (Şekil 5.1). Bu algılayıcıların çalışma prensipleri sonraki kısımlarda detaylı olarak açıklanacaktır.



**Şekil 5.1:** Mobil robotun algılayıcıları.

ATT algoritmasının çalıştırılacağı mikrodenetleyici olarak PIC 18F4550 seçilmiştir. Bu mikrodenetleyicinin seçilme nedeni hızlı uygulamalar için uygun olması (aslında bu çip USB uygulamaları için daha çok kullanılmaktadır) ve bellek miktarının diğer PIC çiplerine nazaran daha fazla olmasıdır. Araç sağ ve solda olmak üzere iki adet

doğru akım motoru ile sürülmektedir. Motor sürücüsü olarak iki adet LMD18200T H-köprüsü entegre devreleri kullanılmaktadır. Güç kaynağı 12V–1.5A'lık bir aküdür.



Şekil 5.2: Mobil robotun blok diyagramı.

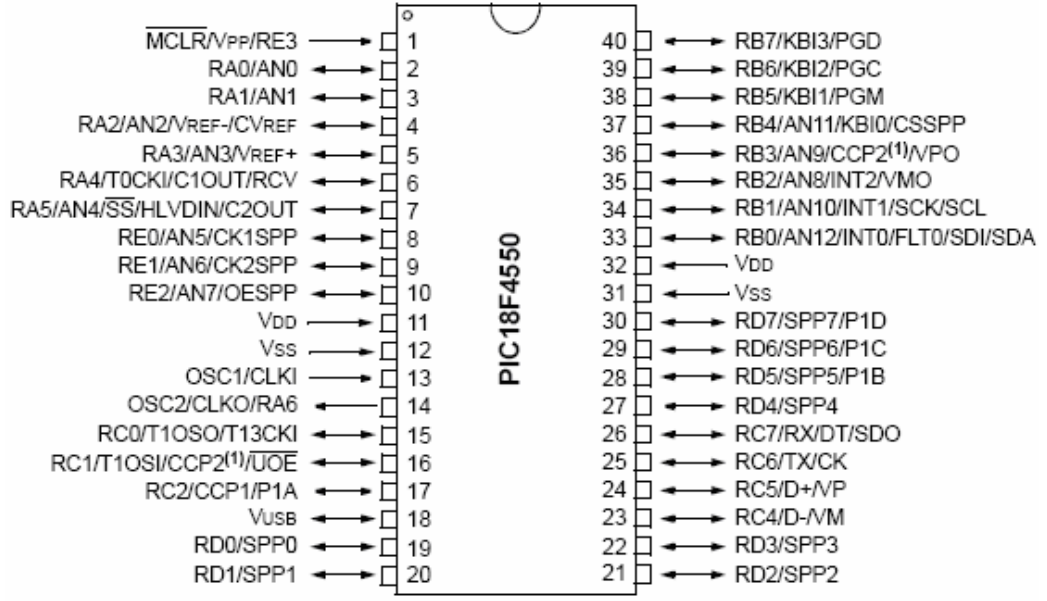
Sistemin genel çalışması şu şekildedir; PIC mikrodeneleyicileri için kullanılan MikroElektronik firmasına ait MikroC derleyicisinde C programlama dili ile yazılan program mikrodeneleyiciye yüklenmektedir. Algılayıcı ve motor sürücülerini için gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra robota enerji verilmektedir. Mesafe algılayıcılarından gelen bilgiler mikrodeneleyicinin ADC (Analog-Digital Converter)'leri vasıtasıyla okunmaktadır. Elektronik pusuladan gelen açı bilgisi ise I2C (Inter-Integrated Circuit) haberleşme protokolü vasıtasıyla mikrodeneleyiciye aktarılmaktadır. Algılayıcılardan alınan bu ölçümler ana programın içerisindeki ATT algoritmasına sokularak bu ölçümlerin tahmini değerlerinin bulunması sağlanmıştır. Bu tahminler ile gerçek ölçümler arasındaki fark olan rezidüenin artıp artmadığı sürekli kontrol edilmektedir. Eğer artmaya başlamışsa bir hatanın bulunduğuna karar verilir ve GKF dizisinin ürettiği sonuçlara göre arıza izolasyonu yapılır ve yedek algılayıcı devreye alınır. Algoritma içerisinde elde edilen sonuçlara göre motor

sürücülerine gönderilecek giriş işaretleri üretilir. Bu işaretler PWM (Pulse Width Modulation) sinyalleri ile motor sürücülerine iletilirler ve aracın hareketi sağlanmış olur. Sisteme ait blok diyagram Şekil 5.2'deki gibidir. Şekilde yalnızca aracın arkasında bulunan algılayıcı için yedek algılayıcı çizilmiştir ancak yedek algılayıcı araçtaki bütün algılayıcılar için konulabilir. Mobil robotu oluşturan parçalar ayrı ayrı incelenecektir.

## 5.1. Mikrokontrolör

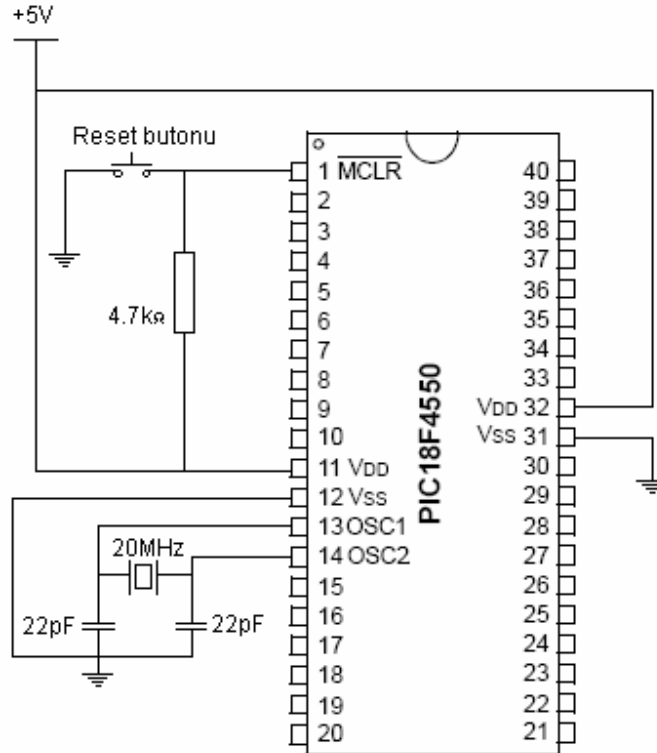
Projede Microchip firmasına ait PIC 18F4550 mikrokontrolörü kullanılmıştır. Bu mikrokontrolörün kullanılma sebebi USB uygulamaları için tasarlanmış olması ve bu nedenle hızlı olmasıdır. Ayrıca 8 bitlik mikrokontrolörler arasında bellek miktarı en fazla olan yongalardan biridir. Bunun yanında projede gereksinim duyulan I2C, PWM, ADC gibi önemli birtakım özelliklere de sahip olması bu yonganın seçilme nedenidir. PIC 18F4550'nin genel özellikleri aşağıdadır.

- 32KB flash program belleği
- 2048B sram veri belleği
- 256B eeprom bellek
- 35 I/O kapısı (giriş-çıkış portu)
- 13 kanal 10 bit ADC
- 1 adet PWM modülü
- Seri iletişim SPP, MSSP (Master Synchronous Serial Port) dahilinde SPI (Serial Peripheral Interface) ve I2C (master-slave) desteği, 1 adet USART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
- 1 adet 8 bit zamanlayıcı, 3 adet 16 bit zamanlayıcı
- 48MHz'e ulaşabilen iki harici saat modu
- 4 farklı kristal modu, (USB uygulamaları için hassas PLL desteği)
- 2 adet karşılaştırıcı
- C programlama dili derleyicileri ile uyumlu mimari komut seti



**Şekil 5.3:** PIC 18F4550 mikrokontrolörünün bacak isimleri.

PIC 18F4550 mikrokontrolörünün bacak diyagramı Şekil 5.3’de görülmektedir. Bu yonganın çalıştırılabilmesi için kurulması gereken en temel devre Şekil 5.4’de görülmektedir. Yonga 20MHz’lik bir kristal ile çalıştırılmaktadır. Eğer programın yeniden başlatılması istenirse MCLR bacağı reset butonuna basılmak suretiyle toprağa çekilir.



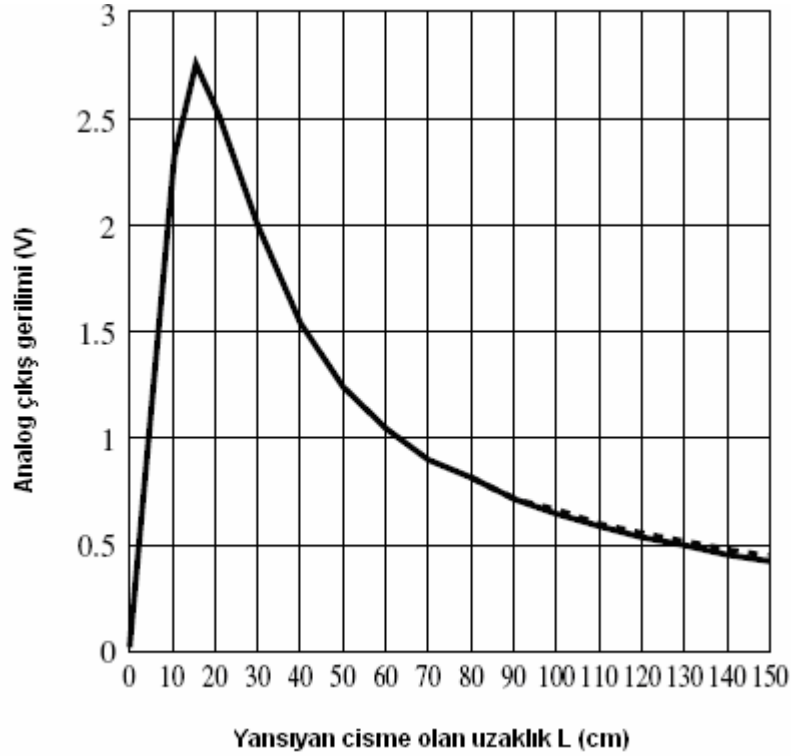
**Şekil 5.4:** PIC 18F4550’nin çalıştırılması için gereken en temel devre.

## 5.2. Mesafe Algılayıcıları

Projede kullanılan Sharp GP2Y0A02YK mesafe algılayıcısı (Şekil 5.5), 20-150cm arasındaki mesafeyi 0-5V arası analog gerilime dönüştürebilen bir mesafe algılayıcısıdır. Bu algılayıcı robotun x ve y eksenlerine olan uzaklığını ölçmek için kullanılmaktadır. Algılayıcının mesafeye göre çıkışından verdiği gerilim Şekil 5.6'dan görülebilir.



Şekil 5.5: GP2Y0A02YK mesafe algılayıcısı



Şekil 5.6: Mesafe algılayıcısının uzaklık-gerilim dönüşüm grafiği.

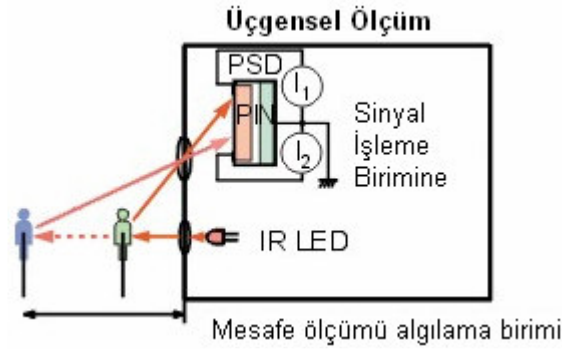
Grafikten görüldüğü üzere algılayıcıdan elde edilen gerilim ve mesafe arasındaki ilişki doğrusal değildir. Bu ilişki aşağıdaki formül ile belirtilir. Böylece yazılım içerisinde yapılan hesaplamalar oldukça kolaylaştırılır.



$$Mesafe = \frac{0.008271 + 939.6 * Gerilim}{1 - 3.398 * Gerilim + 17.339 * Gerilim^2} \quad (5.1)$$

### 5.2.1. Çalışma Mantığı

Ölçülecek olan cisme kızılötesi ışık gönderilir. Bu cisimden geri yansıyan ışığın algılayıcı ile yaptığı açıdan cismin uzaklığı bulunur (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: GP2Y0A02YK mesafe algılayıcısının çalışma mantığı.

Bu algılayıcı yüzey renklerine ve yüzeydeki pürüzlere göre az hassastır. Dışarıdan bir kontrol devresine ihtiyaç duymadan doğrudan çalışabilir. Algılayıcı ile ilgili teknik özellikler aşağıdaki Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'den incelenebilir.

Tablo 5.1: Mesafe algılayıcısının genel özellikleri.

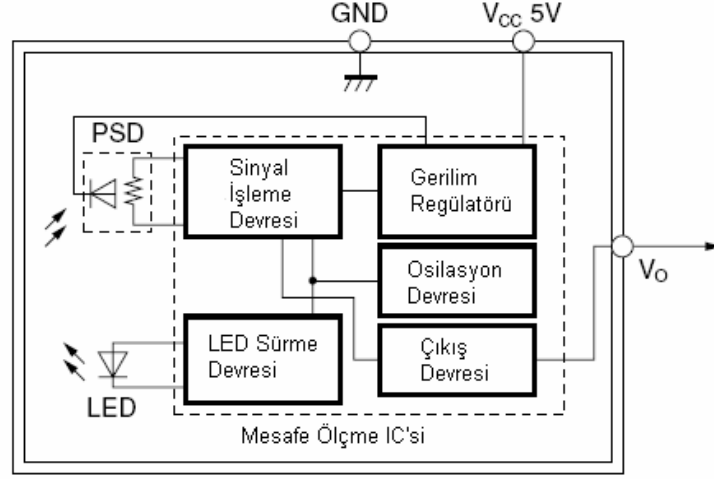
Parametre	Sembol	Değer	Birim
Besleme gerilimi	V <sub>cc</sub>	-0.3'ten 7'ye kadar	V
Çıkış gerilimi	V <sub>o</sub>	-0.3'ten V <sub>cc</sub> +0.3'e kadar	V
Çalışma sıcaklığı	T <sub>opr</sub>	-10'dan +60'a kadar	°C
Saklama sıcaklığı	T <sub>stg</sub>	-40'dan +70'a kadar	°C
Tavsiye edilen çalışma gerilimi	V <sub>cc</sub>	4.5'ten 5.5'e kadar	V

Tablo 5.2: Mesafe algılayıcısının elektriksel özellikleri.

Parametre	Sembol	Durumlar	En düşük	Tipik	En yüksek	Birim
Mesafe ölçüm sınırları	ΔL	-	20	-	150	cm
Çıkış terminal gerilimi	V <sub>o</sub>	L=150cm	0.25	0.4	0.55	V
Çıkış gerilimindeki fark	ΔV <sub>o</sub>	L=150cm'den 20cm'e	1.8	2.05	2.3	V
Ortalama akım	I <sub>cc</sub>	-	-	33	50	mA

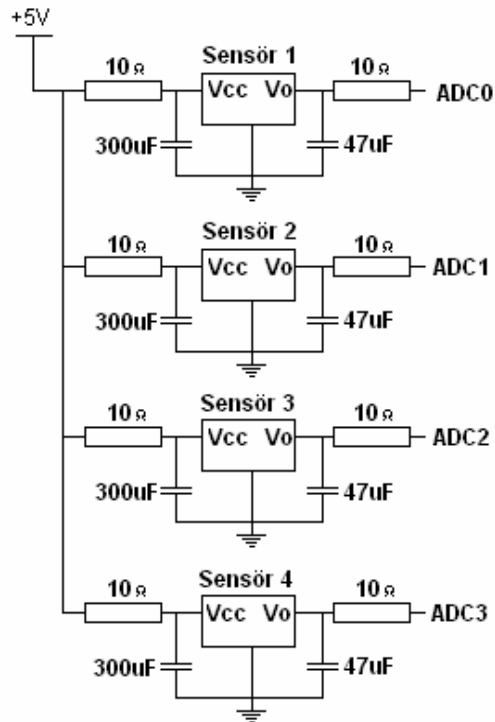
### 5.2.2. Algılayıcı İç Yapısının Blok Diyagramı

Algılayıcının iç yapısında, sinyal işleme devresi, gerilim regülatörü, osilasyon devresi, LED sürme devresi ve çıkış devreleri bulunmaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8: GP2Y0A02YK algılayıcısının iç yapısının blok diyagramı.

Bu çalışmada mesafe algılayıcılarından biri yedek olmak üzere toplam 5 adet kullanılmıştır. Robot üzerinde kurulan devre Şekil 5.9'daki gibidir. Kondansatörler sinyallerdeki gürültülerin filtrelenmesi için kullanılmışlardır. Elde edilen analog gerilimleri mikrokontrolörün ADC0, ADC1, ADC2 ve ADC3 kanallarına gönderilmektedirler.

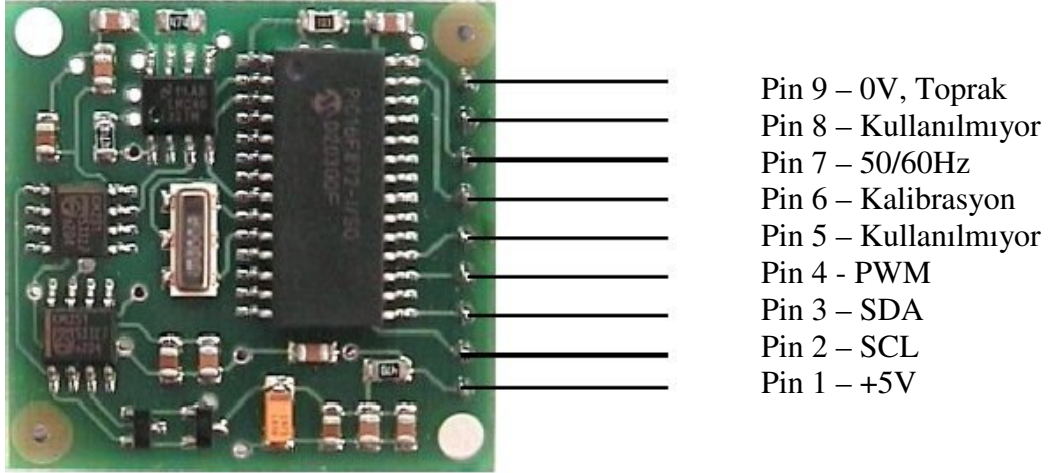


Şekil 5.9: Mesafe algılayıcılarına ait kurulan devre.

### 5.3. Elektronik Pusula

Devantech firmasına ait CMPS03 robot pusula modülü robotlarda yön bulmaya yardımcı olması için tasarlanmıştır (Şekil 5.10). Amacı, robotun yönünün özel bir sayı ile ifade edilebilmesidir. Pusula, dünyanın manyetik alanını tespit edebilmek için Philips KMZ51 manyetik alan algılayıcısını kullanır. Bu algılayıcılardan iki tanesinin çıktısı kullanılarak dünyanın manyetik alanının yatay bileşeni hesaplanır.

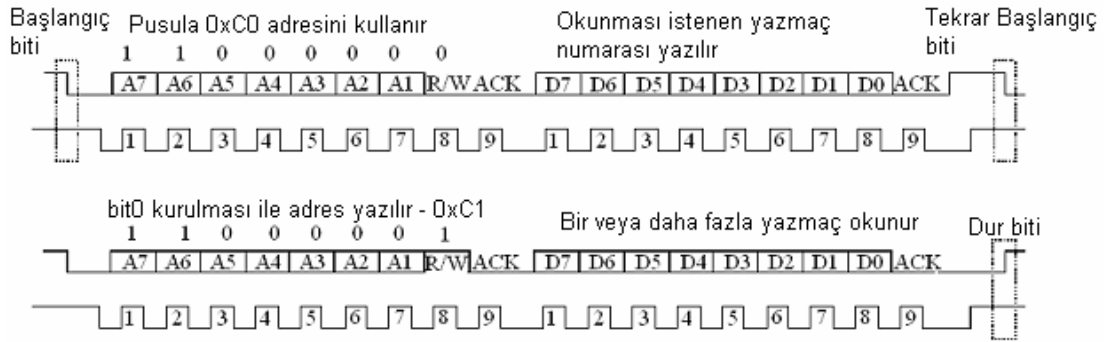
Pusula modülünün bacak bağlantıları Şekil 5.10'daki gibidir.



Şekil 5.10: CMPS03 Elektronik pusula.

Pusula modülü 15mA akım, 5V gerilim verebilen bir kaynağa ihtiyaç duyar. Modülden açI değerini almanın iki yolu vardır. Pin 4'te bir PWM sinyali ve pin 2 ve 3'tede bir I2C ara yüzü vardır.

PWM sinyali, pozitif bölgesinin genişliğinin açıyı temsil ettiği bir genişlik modülasyonlu sinyaldir. Sinyal genişliği 1ms ( $0^0$ )'den 36.99ms ( $360^0$ )'ye arasında değişir – diğer bir deyişle +1ms offset'li 100us/ $^0$  'lik bir işarettir. Sinyal işaretler arasında 65ms'de bir 0'a çekilir, böylece döngü zamanı 65ms+sinyal genişliği yani 66ms-102ms olur. Sinyal, 1us çözünürlüklü 16 bitlik bir zamanlayıcı tarafından üretilir. PWM çalışması sırasında SCL ve SDA pinlerinin, bu pinlerde pull-up dirençleri olmadığı için, 5V kaynağa bağlanmaları gerekmektedir. Pin 2 ve 3 I2C pinleridir ve bu pinlerden açI doğrudan okunabilir. Eğer I2C ara yüzü kullanılmayacaksa bu pinler 47k'lık dirençlerle +5V'a çekilmelidirler.



**Şekil 5.11:** I2C haberleşme protokolü.

I2C haberleşme protokolü 24C04 gibi popüler EEPROM’larda kullanılan protokolün aynısıdır. Önce modül adresi (0xC0) ile birlikte başlangıç biti gönderilir, sonra okunmak istenen yazmaç adresi gönderilir (Şekil 5.11). Bunun ardından tekrar başlangıç biti gönderilir ve modül adresi yeniden bu sefer oku/yaz biti ile gönderilir (0xC1). Buradan 8 bit veya 16 bit olarak açı değeri okunur. Pusula modülünün 16 yazmacı vardır (Tablo 5.3).

**Tablo 5.3:** Elektronik pusulanın yazmaçlarının açıklaması.

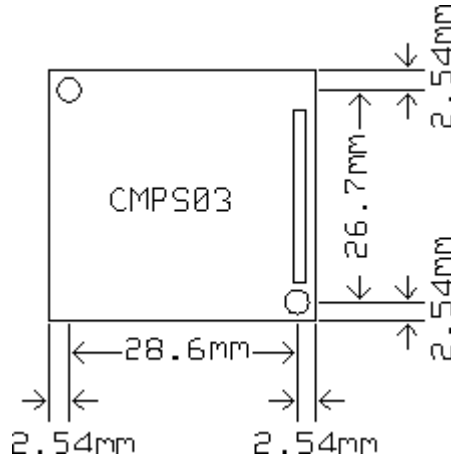
Yazmaç	Fonksiyon
0	Yazılım Versiyon Numarası
1	Pusula değeri bir byte olarak, yani tam çember için 0-255
2,3	Pusula değeri iki byte olarak, yani tam çember için 0-3599
4,5	İç Test - Sensor1 fark sinyali
6,7	İç Test - Sensor2 fark sinyali
8,9	İç Test – Kalibrasyon değeri 1
10,11	İç Test – Kalibrasyon değeri 2
12	Kullanılmıyor
13	Kullanılmıyor
14	Kullanılmıyor
15	Kalibrasyon komutu – Kalibrasyon yapmak için 255 yazılmalı

Yazmaç 0 yazılım sürüm numarasıdır. Yazmaç 1’de 0–360 derece arası açı değeri 0–255 arasında bir değer olacak şekilde yazılıdır. Daha yüksek çözünürlük gerektiren uygulamalarda yazmaç 2 ve yazmaç 3’te 2 byte’ta 0–3599 arası değer yazılıdır. Bu şekilde açı 359,9<sup>0</sup> olarak elde edilebilir. Yazmaç 4’ten 11’e kadar olan yazmaçlar iç yazmaçlardır. Yazmaç 12 ve 13 kullanılmamaktadır. Yazmaç 14 tanımsızdır. Yazmaç 15 kalibrasyon işlemi için kullanılır.

I2C ara yüzünde pull-up dirençleri olmadığı için bunlar master'ın yanında (başka bir yerde de olabilir) yerleştirilmelidir. Bu dirençler SCL ve SDA hattında birer adet olmalıdır, ancak bir defa yerleştirilseler bütün hat için yeterli olacaktır. Hattaki her eleman için pull-up direncine gerek yoktur. 400kHz'e kadar 1k8 ve eğer 1MHz'e kadar bir değerde çalışılıyorsa 1k2 veya 1k yeterli olacaktır. Pusula SCL'nin standart saat hızı olan 100kHz'de çalışacak şekilde tasarlanmıştır ancak 1MHz'de de çalıştırılabilir. Ancak 160kHz'in üzerinde I2C hattına CPU yeterince hızlı cevap veremeyeceği için okuma veya yazma işlemlerinin arasına 50us'lik gecikmeler konulmalıdır. Pusula modülü her zaman slave modunda çalışır.

Pin 7 50Hz(düşük) veya 60Hz(yüksek) seçmek için gerekli giriş pinidir. Gürültünün önlenmesi maksadı ile konulmuştur. 1,5° dereceye varabilen hata bu pin yardımı ile 0,2°'ye kadar indirilebilir. PWM ve I2C çıkışları arasında herhangi bir eşleme yoktur. Birinden biri kullanılsa bile sürekli olarak çıkış gönderirler.

Pin 6 pusulanın kalibrasyonu için kullanılmaktadır. Pin 6 devre üzerinde pull-up direncine sahiptir ve kalibrasyon sonrasında bağlantısız bırakılabilir. Pin 5 ve 8'e bağlantı yapılmaz.

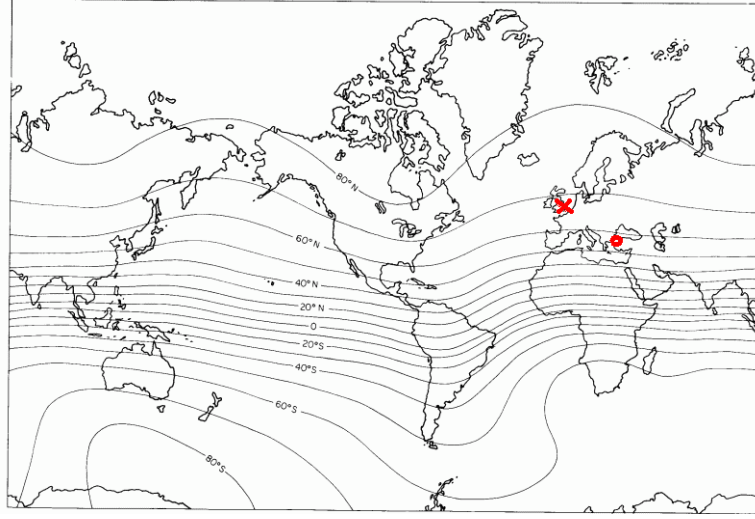


Şekil 5.12: CMPS03 Elektronik pusulanın mekanik boyutları.

### 5.3.1. Pusulanın Kalibrasyonu

Kalibrasyonun bir defa yapılması yeterlidir. PIC16F872 çipinin EEPROM'una kalibrasyon bilgisi kaydedilir. Modülün her çalıştırıldığında kalibre edilmesine gerek yoktur. Kalibrasyon pusula ilk üretildiğinde yapılmaktadır ancak Şekil 5.13'teki haritadan görüleceği üzere kırmızı çarpı ile gösterilen ilk kalibrasyonun yapıldığı yer olan 67 derecedeki Manchester ile pusulanın çalıştırılacağı 56 derecedeki İstanbul

(kırmızı daire) arasında manyetik alan farkı küçük olmadığı için yeniden yapılmıştır. Kalibrasyon, kuzey 0 değerini gösterecek şekilde yapılır.

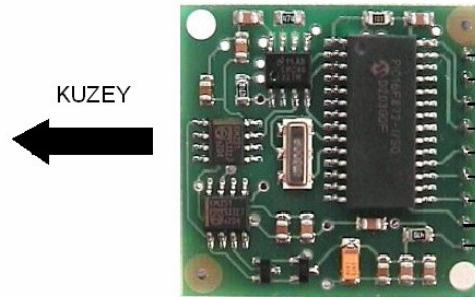


**Şekil 5.13:** Dünyanın manyetik alan haritası.

Pusula ile ilgili en önemli noktalardan biri de pusula çalışırken her zaman yere (dünya yüzeyine) paralel olmak zorundadır ve elektronik elemanlar yukarıda olmalıdır. Modül, metal veya manyetik alanlardan uzakta çalıştırılmalıdır.

Kalibrasyon işlemi sırasında pin 5 bağlantısız olur ve yazmaç 14 ihmal edilir. Kuzey, güney doğu ve batı yönleri tam olarak bilinmelidir. Gerçek bir pusula kullanılması gerekir. Kalibrasyon iki şekilde yapılabilir. I2C yöntemi ve pin yöntemi.

I2C yöntemi şu şekildedir; Bu yöntemde yazmaç 15'e bütün yönler için (kuzey, doğu, güney, batı) 255 yazılmalıdır. Her bir yön ayarlandıktan sonra 255 değeri kendiliğinden silinir. Yönlerin sırasının önemi yoktur.



**Şekil 5.14:** CMPS03 Elektronik pusulanın kuzey yönü.

Örnek kalibrasyon prosedürü;

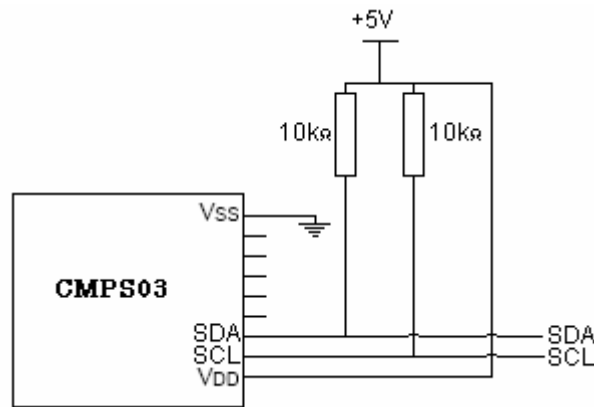
1. Pusula düz pozisyonda, kuzey doğrultusunda, yazmaç 15'e 255 yazılır
2. Pusula düz pozisyonda, doğu doğrultusunda, yazmaç 15'e 255 yazılır
3. Pusula düz pozisyonda, güney doğrultusunda, yazmaç 15'e 255 yazılır
4. Pusula düz pozisyonda, batı doğrultusunda, yazmaç 15'e 255 yazılır

Pin yöntemi şu şekildedir; Bu yöntemde pin 6 pusulayı kalibre etmek için kullanılır. Bu pinin devre üzerinde pull-up direnci olduğu için kalibrasyon sonrasında bağlantısız bırakılabilir. Kalibrasyon işlemi için kuzey, doğu, güney, batı olmak üzere bütün yönlerde pin 6 yüksek seviyede iken kalibrasyon anında düşüğe çekilir. Örnek kalibrasyon prosedürü;

1. Pusula düz pozisyonda, kuzey doğrultusunda, pin 6 yüksekte düşüğe çekilir
2. Pusula düz pozisyonda, doğu doğrultusunda, pin 6 yüksekte düşüğe çekilir
3. Pusula düz pozisyonda, güney doğrultusunda, pin 6 yüksekte düşüğe çekilir
4. Pusula düz pozisyonda, batı doğrultusunda, pin 6 yüksekte düşüğe çekilir

### 5.3.2. Elektronik Pusulanın Devre İçerisinde Kullanımı

Pusulanın SCL ve SDA bacaklarına 10KΩ'lık pull-up dirençleri bağlanır (Şekil 5.15). SCL ve SDA bacakları mikrokontrolörün aynı isimli bacaklarına doğrudan bağlanabilirler. Burada mikrokontrolör yöneten pusula yönetilen modundadır. Elektronik pusula çevresindeki metal cisimlerden veya manyetik cisimlerden kolaylıkla etkilenebilmektedir. Bu da pusuladan yanlış açılışların okunmasına neden olabilmektedir. Bu durumun önlenmesi maksadı ile elektronik pusula motorların tam ortasına gelecek şekilde ancak motorlardan yaklaşık 15cm yükseğe konulmuştur. Motorların manyetik alanlarından etkilenme en az duruma getirilmiştir.



Şekil 5.15: CMPS03 Elektronik pusulanın çalıştırılma devresi.

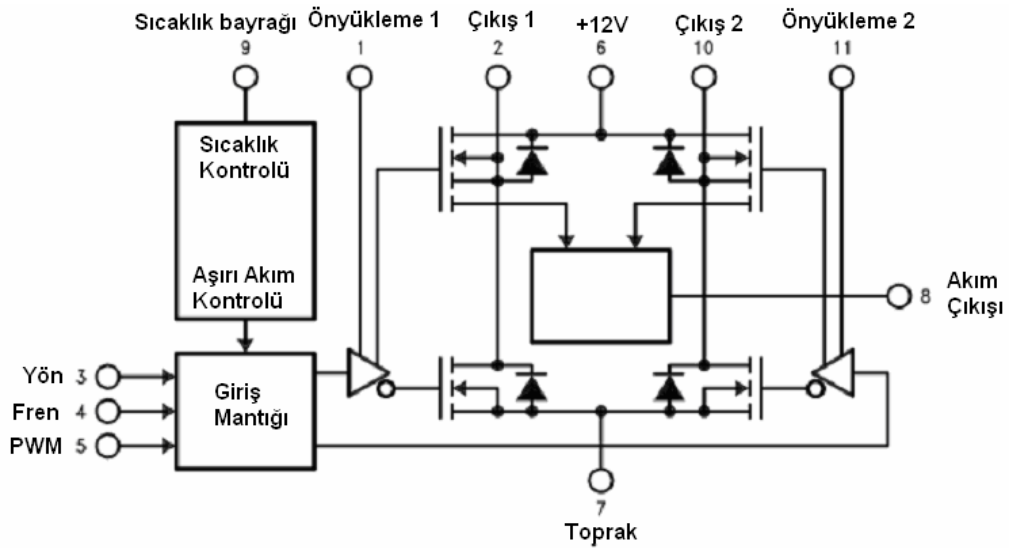
#### 5.4. Motor Sürücüsü

Mobil robotta sağ ve sol tarafta birer adet olmak üzere iki adet 12V doğru akım motoru vardır. Robotta kullanılan doğru akım motorlarının sürülmesi için iki adet LMD18200T motor sürücü entegresi kullanılmaktadır (Şekil 5.16). Bu entegre içerisinde H-köprüsü yapısına sahiptir. LMD18200T hareket kontrol uygulamaları için kullanılan 3A H-köprüsüdür. Doğru akım ve adım motorları için idealdir. 6A'lık ani akımlara dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. 55V gerilime kadar çalışabilmektedir. Tipik kullanım alanları konum ve hız servomekanizmaları, doğru akım ve adım motoru uygulamaları, fabrika otomasyonu robotları, sayısal kontrollü makineler ve bilgisayar yazıcı ve çizicileridir.



Şekil 5.16: LMD18200T H-köprüsü motor sürücüsü.

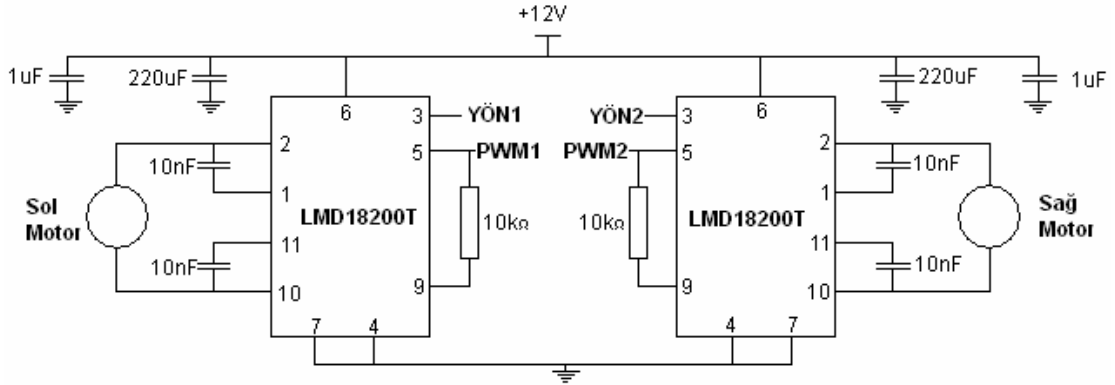
LMD18200T entegresinin iç blok diyagramı Şekil 5.17'de görülmektedir. Mikrokontrolörün gönderdiği PWM sinyalleri motor sürücü entegresinin PWM girişine verilmektedir. Aynı zamanda motorun hangi yöne doğru döneceği 3 numaralı yön bacağına 1 veya 0 işareti verilerek ayarlanmaktadır.



Şekil 5.17: LMD18200T motor sürücüsünün iç blok diyagramı.



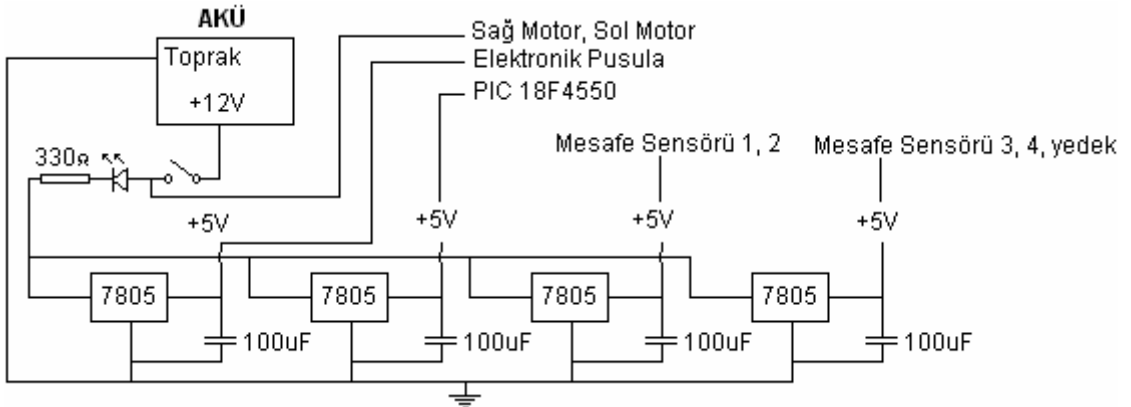
Robot devresinde motorların sürülmesi için kurulmuş olan devre aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 5.18: Motor sürücüler devresi.

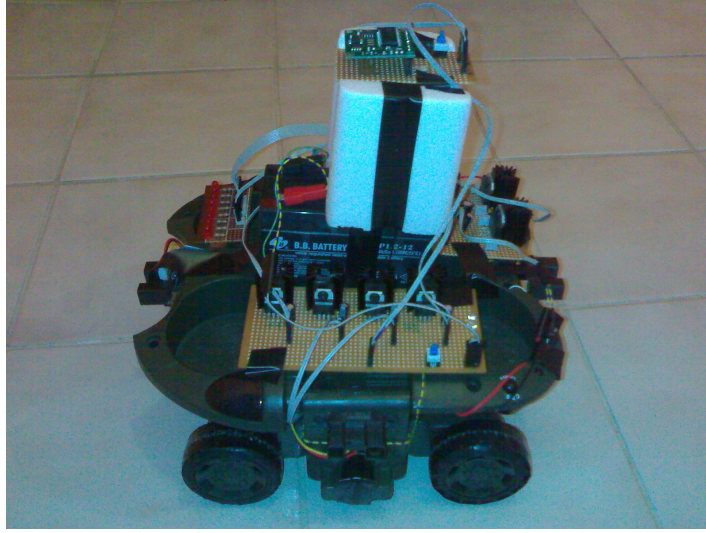
### 5.5. Güç kaynağı

Projede güç kaynağı olarak 12V 1.5A elektriksel değerlerine sahip bir akü kullanılmıştır. 7805 (3 bacaklı gerilim düzenleyicisi) entegresi ile 5V'a düşürülerek devreye dağıtım aşağıdaki şekilde yapılmıştır. Doğru akım motorları 12V ile çalıştıkları için motorlara yönelik herhangi bir gerilim düşürme işlemi yapılmamıştır. Mesafe algılayıcılarına 7805 entegresinden aşırı akım geçmemesi için güvenlik tedbiri olarak iki ayrı 7805 üzerinden güç verilmektedir. Robotun tekerleklerinin plastik olması nedeni ile aracın yol tutuşu oldukça kuvvetli olmaktadır. Bunun sonucunda da kaynaktan daha fazla akım çekilmektedir. Bu durumun engellenmesi için tekerleklerin etrafına bant sarılmış ve sürtünmeler azaltılmıştır.

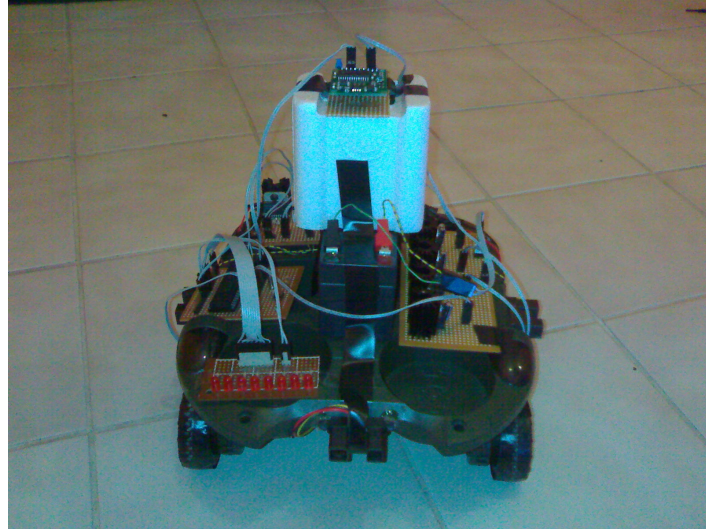


Şekil 5.19: Mobil robotun güç devresi.

Robotun bütün devreler eklendikten sonraki yandan ve önden görünüşü Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'deki gibidir.



Şekil 5.20: Mobil robotun yandan görünüşü.

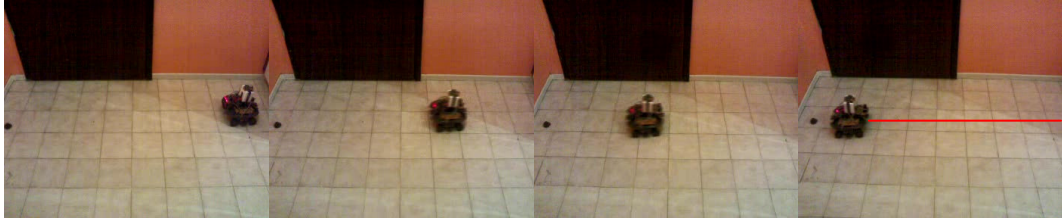


Şekil 5.21: Mobil robotun önden görünüşü.

## 5.6. Uygulama Senaryosu

Mobil robota verilen görev x eksenine paralel bir şekilde y ekseninde 40cm mesafeyi koruyarak yatayda 2,5m'lik yolu sorunsuz bir şekilde tamamlamasıdır. Robot 1 metre ilerlediğinde y eksenindeki konumu ölçen algılayıcı yazılım yolu ile arızalandırılır. Bu algılayıcıdan gelen değer sıfıra çekilerek bu arıza gerçekleştirilir. Arıza gerçekleştiği anda GKF algoritması hata olduğunu tespit eder ve GKF dizisini çalıştırır. Hangi algılayıcının arızalı olduğu bir önceki bölümde açıklanan karar alma

mantığı vasıtasıyla belirlenir. Sağlıklı yedek algılayıcı devreye girerek aracın sorunsuz bir şekilde görevini başarması sağlanır.



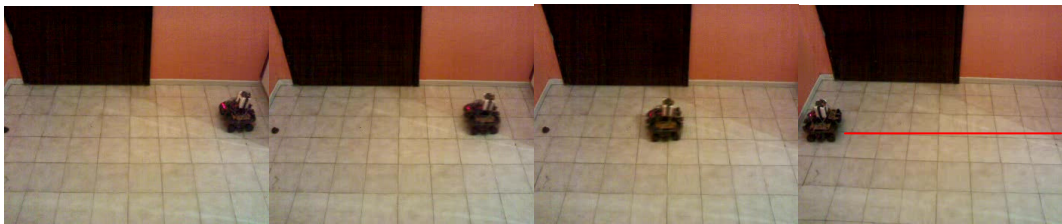
**Şekil 5.22:** Arızasız durumda mobil robotun yörüngesi.

Şekil 5.22’de robotun arıza durumu olmadan normal çalışması gösterilmiştir. Şekil 5.23’te senaryoya uygun olarak 1. metrede y eksenini algılayıcısı arızalandırılmıştır. Araç kontrol algoritması gereği oluşan rezidüyü kapatabilmek için sol tarafa doğru dönmeye başlamıştır. Ancak robot için doğru olan bu hareket gerçekte yanlıştır ve robot verilen görevi başaramamıştır.



**Şekil 5.23:** 1. metrede algılayıcı arızası oluşma durumundaki robotun yörüngesi.

Yedek algılayıcı devreye girdikten sonraki durum Şekil 5.24’te görülmektedir. Arıza tespit ve teşhis edilir edilmez sağlıklı yedek algılayıcı devreye girmiş ve aracın görevini başarı ile tamamladığı görülmüştür.



**Şekil 5.24:** Yedek algılayıcının devreye girmesi durumunda robot yörüngesi.

Simülasyon sonuçlarında görülen rezidüdeki bir anlık artış gerçek dünyadaki eylemsizlik etkisi nedeni ile hiç hissedilmemiştir.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada mobil robotların algılayıcılarında meydana gelen arızaların tespit ve teşhisi üzerine bir simülasyon ve uygulama çalışması sunulmuştur. İlk olarak robotlar ile ilgili genel bir inceleme yapılmıştır. Robotlarda kullanılan algılayıcılar ve robotlarda meydana gelebilecek arızalar incelendikten sonra arızaların tespiti için kullanılan algoritmalarından Kalman filtresi algoritması hakkında bilgi verilmiş ve bu algoritma kullanılarak bir simülasyon çalışması yapılmıştır.

Simülasyon çalışmasında diferansiyel tip bir mobil robota sembolik bir görev verilmiştir. Bu görev gereğince arızasız durumda robot x-y ekseninde (0,0) noktasında  $\theta = 0$  olacak şekilde başlangıç konumunda yerini almıştır. Daha sonra sabit hız ile x eksenine paralel bir şekilde 1 m yol kat ettikten sonra sola dönüş yapmış ve y eksenine paralel olarak 1 m daha yol gitmiştir. Aynı işlemi tekrar ederek yani bir kare yörünge çizerek tekrar başlangıç noktasına dönmüştür. Robotta 15inci saniyede yapay olarak bir arıza meydana getirilmiştir. Robotun x eksenindeki konumunu ölçen mesafe algılayıcısından alınan bilgi sıfır değerine düşürülerek araçtaki herhangi bir problem nedeni ile bu algılayıcıdan gelen değerlerin kaybolması durumu oluşturulmuştur. Bu durumda algılayıcı çıkışlarına ait GKF'nin tahmin ettiği değer ve gerçek değer arasındaki fark giderek artmıştır. Yani rezidü artmıştır. Bu hatanın tespit edildiği durumdur. Bu aşamada GKF dizisi devreye girmiş ve her bir algılayıcı için GKF tahminleri ayrı ayrı incelenmiştir. GKF dizisi verileri ile karar alma mantığı işletilerek arızanın hangi algılayıcıda meydana geldiği teşhis edilmiş ve bu algılayıcı izole edilmiştir. İzole edilen algılayıcının yerine sağlıklı yedek algılayıcı konularak aracın görevini başardığı görülmüştür.

Yapılan simülasyon çalışmasında kullanılan algoritma gerçek bir mobil robot üzerinde de uygulanmıştır. Mobil robotta algılayıcı olarak aracın dört tarafına yerleştirilen dört adet mesafe algılayıcısı ve aracın oryantasyonunun bulunması için bir adet elektronik pusula kullanılmıştır. Burada görev robotun x eksenine paralel bir şekilde 2,5m'lik yolu 40cm mesafeyi koruyarak yol almasıdır. Uygulama çalışmasında robota verilen görevin simülasyonda verilen görevden farklı olmasının

nedeni, kullanılan algılayıcıların uzun mesafelerde çalışamamaları nedeni ile yazılımın karmaşıklığının artmasının önlenmesidir. Bu çalışmada asıl amaç ATT olduğu için robotun farklı eksenlerde seyahat ederken veya bir ekseninde seyahat ederken algılayıcı arızası meydana gelmesinin herhangi bir farkı yoktur. Uygulama çalışmasındaki görevde, araç 1m gittikten sonra y eksenindeki konumunu ölçen algılayıcı yazılım aracılığı ile bozulmaktadır. Bu algılayıcıya ait ADC'den gelen veri dikkate alınmamaktadır. Bu durumda aracın oluşan rezidüyü kapatabilmek için rezidü değerini azaltıcı yönde hareket yaptığı ve aracın yörüngeden çıktığı görülmüştür. Arızalı algılayıcı izole edilerek sağlıklı yedek algılayıcı devreye alındığında robotun ulaşması gereken noktaya çok az gecikme ile ulaşabildiği gözlenmiştir.

Uygulama çalışmasında robotta kullanılan algılayıcıların ucuz ve basit olmaları nedeni ile görüş mesafeleri ve kabiliyetleri azdır. Bu nedenle senaryolar genelde küçük bir alanda gerçekleştirilmiştir. Daha gelişmiş algılayıcılar kullanılarak daha geniş alanlarda da çalışılabilir. Kızılötesi mesafe algılayıcıları yerine ultrasonik algılayıcılar kullanılarak mesafe artırılabilir. GPS (küresel konumlandırma sistemi) kullanılarak çalışma mekândan bağımsız bir hale de getirilebilir. Ancak bu durumda maliyet giderek artacaktır. Sonuç olarak yapılan çalışma küçük ölçekli de olsa sonuçların başarılı ve kullanılabilir olması nedeni ile malzemenin bağımsız olarak çok farklı sistemlerde de gerçekleştirilebilir.

Mobil robotlarda arıza tespit ve teşhisi konusunda en önemli problemler arasında farklı ve bilinmeyen çevresel koşullarda dayanıklılık, çoklu arıza teşhisi, hafif arızaların teşhisi, gerçek zamanlı arıza teşhisi ve yeniden yapılandırma yöntemleri sayılabilir. Bilinmeyen koşullarda çalışan mobil robotlar algılayıcılarla, modelle veya çevre ile ilgili birçok karmaşık belirsizlikler ile beraber çalışmak durumunda kalabilirler. Bu durumda ATT algoritması yanlış hata teşhislerine karşı dayanıklı olmalıdır. Şu anda birçok çalışmada hataların teker teker oluştuğu farz edilmektedir. Ancak sistemde bir anda birden fazla arıza meydana gelebilir. Bu konu ile ilgili model-tabanlı teşhis (MBD-Model Based Diagnosis) yöntemleri geliştirilmektedir [18] ama bu yöntemler bilinmeyen çevresel koşullardaki geçici hatalara karşı çok verimli çalışmamaktadırlar. Hafif arızaların teşhisi oldukça güçtür ve algılayıcı ölçülerinin seri bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Kapalı alanlarda bu gibi arızalar için devam eden çalışmalar mevcuttur [6]. Kısıtlı teknik donanımları bulunan

sistemlerde arızalara bir an önce müdahale etmesi beklenir. Bu da gerçek zamanlı arıza teşhisi ile mümkün olabilecektir. Ancak arızaların çok çeşitli olması işlemcilerdeki yükü ve harcanan zamanı oldukça arttırmaktadır. Mobil robotlar buldukları ortamlarda genelde tek başlarına çalıştıkları için kendi kendilerini tamir edebilme veya yeniden yapılandırılabilir bir yapıya sahip olmaları gerekmektedir. Buradaki en büyük zorluk da arızaların çok çeşitli olması, çevre ile ilgili çok az bilgi olması ve ihtiyaçları karşılayabilecek bir modelin oluşturulabilmesinin zor olmasıdır.

Bu çalışmada yalnızca algılayıcı arızaları üzerinde durulmuştur. Robotların sürücüleri veya hareket elemanları üzerinde de arızalar meydana gelebilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda hareket elemanları arızaları üzerinde durulabilir veya hem algılayıcı hem hareket elemanlarında meydana gelen arızaları tespit ve teşhis eden algoritmalar üzerinde çalışmalar yapılabilir. Aynı zamanda daha kabiliyetli algılayıcılar yardımı ile robotun karar merkezine ulaşan verilerin doğruluğu ve kalitesi artırılabilir.

Bu alanlarda yapılacak araştırma ve geliştirmeler sadece mobil robotlar veya robotik dalında değil birçok sistemin daha arızalara karşı daha güvenilir olmasını sağlayacaktır. Sistemlerin daha güvenilir olması ve arızalara karşı daha dayanıklı olmaları hem tehlikeli uygulamalarda can kaybı ve yaralanmaları önemli ölçüde azaltacak hem de ekonomik olarak büyük kazançlar sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Dubowsky, S. ve Iagnemma, K.**, 2000. Mobile Robot Rough-Terrain Control (RTC) for Planetary Exploration, *Proceedings of the 26<sup>th</sup> Biennial Mechanisms and Robotics Conference of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Baltimore, MD
- [2] **Bureš, J.**, 2004. Setting Up of Robot Welding Line for Car Bodies at BMW factory in Oxford UK, *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, Slovakia, Kasım 11-13
- [3] **Djath, K., Dufaut, M. ve Wolf, D.**, 2000. Mobile Robot Multisensor Reconfiguration, *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000*, Dearborn(MI), USA
- [4] **Cai, Z., Duan, Z. ve Yu, D.**, 2005. Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Wheeled Mobile Robots Under Unknown Environments, *Proceedings of the 2005 International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, Nisan 2005
- [5] **Gordon, G., Simmons, R., Thrun, S. ve Verma, J.V.**, 2004. Real-time fault diagnosis [robot fault diagnosis], *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11, no. 2, s.56-66, June, 2004
- [6] **Bekey, G.A., Roumeliotis, S.I. ve Sukhatme, G.S.**, 1998. Sensor fault detection and identification in a mobile robot, *IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*. s.1383-1388
- [7] **Dedeoğlu, G., Goel, P., Roumeliotis S.I. ve Sukhatme, G.S.**, 2000. Fault detection and identification in a mobile robot using multiple model estimation and neural network, *IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation*, s.2302-2309
- [8] **Washington, R.**, 2000. On-board real-time state and fault identification for rovers, *IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation*, s.1175-1181
- [9] **Çengelci, B. ve Çimen H.**, 2005. Teknik Not Endüstriyel Robotlar , *1. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, s.69-78, Afyonkarahisar
- [10] **De Silva, D.**, 1987. Reactions to Robots Engineering, s.227-230, Nisan, 1987
- [11] **Mireler, J. ve Ollero A.**, 2004. Kinematics of Mobile Robots, *Robotica: Manipuladores y Robots Moviles*

- [12] **Arrichiolo, F.**, 2006. Coordination Control of Multiple Mobile Robots s.13-14, *Doktora Tezi*, Universita Delgi Studi Di Cassino
- [13] **Carlson, J., Murphy, R.R. ve Nelson, A.**, 2000. Follow-up Analysis of Mobile Robot Failures, Center for Robot Assisted Search & Rescue, University of South Florida
- [14] **Url:**, <<http://www.robbot.org>>, 20.07.2007
- [15] **Bishop, G. ve Welch, G.**, 2001. An Introduction to the Kalman Filter, SIGGRAPH 2001
- [16] **Gertler, J.J.**, 1998. Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, s.1-2, Marcel Dekker Inc.
- [17] **Çalışkan, F. ve Hajiyev C.**, 2003. Fault Diagnosis and Reconfiguration in Flight Control Systems, s.3-4, Kluwer Academic Publishers
- [18] **Kleer, J. ve Williams, B.C.**, 1987. Diagnosing Multiple Faults, Artificial Intelligence, cilt 32, s.97-130
- [19] **Akkoç, H. ve Çalışkan, F.**, 2007. Sensor Fault Detection and Isolation in a Mobile Robot System, *Proceedings of the 16th International Conference on Systems Science*, 4-6 Eylül 2007, Wrocław, Polonya



## EK A

Bu kısımda Kalman filtresinin neden en iyi tahmin edici olduğu üzerinde durulacaktır.  $\mathbf{x}_j$  için

$$\hat{\mathbf{x}}_j^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j \quad (\text{A.1})$$

olarak yazıldığında en iyi durum tahminin aşağıdaki gibi olduğu belirtilmiştir.

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}_j(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-) \quad (\text{A.2})$$

Burada önemli olan birinci ifadenin doğru olup olmadığıdır. Eğer durum tahmin edilmek isteniyorsa, önceden bilinen üç değer kullanılabilir. Bunlar önceki tahmin, son giriş ve son ölçülen çıkıştır. Bu üç değer ile sistem durumlarının doğrusal bir tahminini oluşturmak için aşağıdaki gibi bir denklem kurulabilir.

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \boldsymbol{\alpha}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \boldsymbol{\beta}_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j \quad (\text{A.3})$$

Burada  $\boldsymbol{\alpha}_j$  ve  $\boldsymbol{\beta}_j$ , durum ve durumun tahmininin değerleri arasındaki hatayı en küçük duruma getirecek şekilde seçilen iki bilinmeyendir. Diğer bir deyişle hatanın ortalama değeri olan  $\mathbf{e}_j$ 'nin  $\boldsymbol{\alpha}_j$  ve  $\boldsymbol{\beta}_j$ 'ye bağlı olarak en küçük duruma getirilmesi istenmektedir.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_j &= \mathbf{E}\{(\mathbf{e}_j)^2\} = \mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - \hat{\mathbf{x}}_j)^2\} \\ &= \mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\boldsymbol{\alpha}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \boldsymbol{\beta}_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j))^2\} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Her bir değişkene göre minimizasyon yapmak için basitçe türev alınır ve sonuç sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial \mathbf{P}_j}{\partial \boldsymbol{\alpha}_j} = -2\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\boldsymbol{\alpha}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \boldsymbol{\beta}_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j))\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.5a})$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}_j}{\partial \boldsymbol{\beta}_j} = -2\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\boldsymbol{\alpha}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \boldsymbol{\beta}_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j))\mathbf{u}_j\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.5b})$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}_j}{\partial \gamma_j} = -2\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\boldsymbol{\alpha}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \boldsymbol{\beta}_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j))\mathbf{z}_j\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.5c})$$

Bu ifadeler aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$\mathbf{E}\{\mathbf{e}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.6a})$$

$$\mathbf{E}\{\mathbf{e}_j \mathbf{u}_j\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.6b})$$

$$\mathbf{E}\{\mathbf{e}_j \mathbf{z}_j\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.6c})$$

Son iki denklem ortogonallik koşulu olarak ta değerlendirilebilir. Yani, hata önceki tahmin, son giriş ve ölçülen çıkışın son değeri ile ortogonaldır. İlk ifade hatanın ortalama değerini en küçük değerine getiren  $\alpha_j$  için bir denklem kurulabilir. Eğer denkleme  $\alpha_j \mathbf{x}_{j-1}$  eklenip çıkartılırsa:

$$\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\alpha_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \beta_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j)) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.7a})$$

$$\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\alpha_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} - \alpha_j \mathbf{x}_{j-1} + \alpha_j \mathbf{x}_{j-1} + \beta_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j)) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.7b})$$

$$\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - \beta_j \mathbf{u}_j - \gamma_j \mathbf{z}_j) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \alpha_j \mathbf{E}\{(\hat{\mathbf{x}}_{j-1} - \mathbf{x}_{j-1} + \mathbf{x}_{j-1}) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \quad (\text{A.7c})$$

ifadeleri elde edilir.

$$\mathbf{e}_j = \hat{\mathbf{x}}_j - \mathbf{x}_j \quad (\text{A.8})$$

ve

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{H} \mathbf{x}_j + \mathbf{v}_j \quad (\text{A.9})$$

denklemleri kullanılarak,

$$\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - \beta_j \mathbf{u}_j - \gamma_j (\mathbf{H} \mathbf{x}_j + \mathbf{v}_j)) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{e}_{j-1} \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} + \alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1} \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \quad (\text{A.10})$$

denklemine ulaşılır. Ortogonallik bağıntılar nedeni ile sağ taraftaki ifadenin ilk terimi şu şekilde yazılabilir.

$$\alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{e}_{j-1} \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{e}_{j-1} (\alpha_j \hat{\mathbf{x}}_{j-2} + \beta_j \mathbf{u}_{j-1} + \gamma_j \mathbf{z}_{j-1})\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.11})$$

Önceki tahminin son ölçüm gürültüsü ile bağlantısı yoktur.

$$\mathbf{E}\{\mathbf{v}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.12})$$

Bu durumda eşitlik aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - \beta_j \mathbf{u}_j - \gamma_j \mathbf{H} \mathbf{x}_j) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1} \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \quad (\text{A.13a})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{(\mathbf{x}_j - (\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \beta_j \mathbf{u}_j) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} &= \\ \mathbf{E}\{((\mathbf{A} \mathbf{x}_{j-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_j)(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \beta_j \mathbf{u}_j) \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} &= \\ \mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1} \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} + (\mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \beta_j) \mathbf{E}\{\mathbf{u}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} &= \alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1} \hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \end{aligned} \quad (\text{A.13b})$$

Yukarıda yapılan işlemlerin aynısı türevlerin sıfıra eşitlendiği denklemlerin ikincisinden başlayarak yapılırsa aşağıdaki sonuca ulaşılır.

$$\mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1} \mathbf{u}_j\} + (\mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \beta_j) \mathbf{E}\{\mathbf{u}_j^2\} = \alpha_j \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1} \mathbf{u}_j\} \quad (\text{A.14})$$

Bu son iki denklem matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} & \mathbf{E}\{\mathbf{u}_j\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \\ \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\mathbf{u}_j\} & \mathbf{E}\{\mathbf{u}_j^2\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\alpha}_j \\ \mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\beta}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

Yukarıdaki gibi  $\mathbf{Ax} = 0$  şeklinde bir denklem için ya  $\mathbf{x} = 0$  ya da  $|\mathbf{A}| = 0$  olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile yukarıdaki denklem için ya

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\alpha}_j \\ \mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\beta}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

olacaktır ya da

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} & \mathbf{E}\{\mathbf{u}_j\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \\ \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\mathbf{u}_j\} & \mathbf{E}\{\mathbf{u}_j^2\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \text{ olacaktır.}$$

İkinci denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\}\mathbf{E}\{\mathbf{u}_j^2\} - \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\mathbf{u}_j\}\mathbf{E}\{\mathbf{u}_j\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{0} \quad (\text{A.16})$$

Son denklem eğer doğru ise bütün giriş işaretleri için doğru olması gerekir. Eğer giriş  $\mathbf{u}_j=c$  gibi bir sabitse,

$$c^2 \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = c^2 \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\}\mathbf{E}\{\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \quad (\text{A.17})$$

$$\mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} = \mathbf{E}\{\mathbf{x}_{j-1}\}\mathbf{E}\{\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\} \quad (\text{A.18})$$

Bununla birlikte

$$\mathbf{E}\{\mathbf{AB}\} = \mathbf{E}\{\mathbf{A}\}\mathbf{E}\{\mathbf{B}\} \quad (\text{A.19})$$

ifadesi yalnızca  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{B}$  bağımsız ise ve durumlar ve tahminleri bağımsız değil ise doğrudur. Dolayısıyla birinci ifade doğru olmalıdır. Yani,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\alpha}_j \\ \mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\beta}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

Buradan da

$$\mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\alpha}_j = \mathbf{0} \quad \text{ve} \quad \mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) - \boldsymbol{\beta}_j = \mathbf{0} \quad (\text{A.21})$$

veya

$$\boldsymbol{\alpha}_j = \mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) \quad \text{ve} \quad \boldsymbol{\beta}_j = \mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) \quad (\text{A.22})$$

olmalıdır. Bu denklemler A.3 denkleminde yerlerine konularlarsa

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_j &= \boldsymbol{\alpha}_j \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \boldsymbol{\beta}_j \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j \\ &= \mathbf{A}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}(\mathbf{I} - \gamma_j \mathbf{H}) \mathbf{u}_j + \gamma_j \mathbf{z}_j \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

$$= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j + \gamma_j(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}(\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j)) \quad (\text{A.24})$$

Bu sonuçlar incelendiğinde şu sonuçlar elde edilecektir.

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\text{Rezidü}) = \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-)$$

olduğu biliniyordu. Öncül tahmin aşağıdaki gibidir.

$$\hat{\mathbf{x}}_j^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j$$

Burada  $\mathbf{K} = \gamma_j$  olarak alınırsa bulunan en son denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_j &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j + \gamma_j(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}(\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_j)) \\ &= \hat{\mathbf{x}}_j^- + \mathbf{K}(\mathbf{z}_j - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_j^-) \end{aligned}$$

İki denklemin uyumuna dikkat edilirse görülecektir ki Kalman filtresi en iyi doğrusal filtredir.

## ÖZGEÇMİŞ

Hakan Akkoç 1980 yılında Eskişehir’de doğdu. 1998 yılında Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra 1999 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2003 yılında lisans eğitiminden mezun olduktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği yüksek lisans programına kayıt oldu. Halen aynı anabilim dalında eğitime devam etmektedir. Çok ileri seviye İngilizce ve orta seviye Almanca bilmektedir.