

İç Ortam Konumlandırma Sistemi (İÇKON) Performansının İyileştirilmesi

Hikmet Yücel

DOKTORA TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2014

Performance Improvement Of The Indoor Positioning System (ICKON)

Hikmet Yücel

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Electric Electronic Engineering

June 2014

İç Ortam Konumlandırma Sistemi (İÇKON) Performansının İyileştirilmesi

Hikmet Yücel

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon ve Sinyal İşleme Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Rifat Edizkan

Bu tez, İnovasyon Mühendislik Tek. Gel. Dan. San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından yürütülen TÜBİTAK 7100932 nolu ve 7120742 nolu Kobi Ar-Ge Başlangıç Destek Programları kapsamında desteklenmiştir.

Haziran 2014

ONAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Hikmet Yücel'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "İç Ortam Konumlandırma Sistemlerinin Performanslarının İyileştirilmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Rifat EDİZKAN

İkinci Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAZICI

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Rifat EDİZKAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAZICI

Üye : Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Üye : Prof. Dr. Aydın AYBAR

Üye : Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

İç ortam konumlandırma, günümüzde giderek artan birçok uygulamanın ihtiyacı haline gelmiştir. Farklı uygulamaların isterlerini karşılamak için farklı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerden İÇKON, İnovasyon Mühendislik Ltd. tarafından geliştirilmiş olup sadece sesüstü sinyalleri kullanmaktadır. Bu tez kapsamında İÇKON sisteminin performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır.

İÇKON sisteminin performansının iyileştirilmesi için farklı konum hesaplama algoritmaları üzerinde çalışılmış ve yeni bir geometrik iteratif konum hesaplama algoritması geliştirilmiştir. Sisteme, hesaplanan konumun doğruluğunu, GDOP (Geometric Dilution of Precision) açısından kontrol eden bir geometri tabanlı konum kontrol algoritması ilave edilmiştir. Oluşturulan sıkı bağlı bir yapı içerisinde İÇKON sistemi ile Pioneer 3DX gezgin robotun sağladığı enkoder tabanlı bağıl konumlandırma birleştirilmiştir. Bu kapsamda İÇKON sistemi, özgün bir yöntemle baş açısı hesaplaması için geliştirilmiştir. İÇKON baş açısı, bağıl konumlandırmadan elde edilen baş açısı ile Kalman Filtre ve bazı dönüşümler kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirilmiş baş açısı kullanılarak gezgin robotun bağıl konumlandırma sonuçları iyileştirilmiştir. Düzeltilmiş bağıl konumlandırma sonuçları ile Adaptif Kalman Filtre kullanılarak İÇKON sisteminin performansı arttırılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda, yapılan iyileştirmelerin İÇKON performansını; doğruluk, kesinlik, gürbüzlük, süreklilik, ölçeklenebilirlik açılarından arttırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İç Ortam Konumlandırma, İÇKON, Bağıl Konumlandırma, Sıkı Bağlı Yapı, Adaptif Kalman Filtre, Enkoder, Baş Açısı

SUMMARY

Indoor positioning, is becoming the need of lots of applications whose number is growing rapidly today. Different systems were developed for the requirements of different applications. One of those, ICKON, is developed by Inovasyon Muhendislik Inc and only uses ultrasonic signals. In this study, the work done on performance improvement of ICKON system.

For performance improvement of ICKON, different localization algorithms are studied and a new geometric, iterative positioning algorithm is developed. A position control algorithm, which checks the results from the GDOP (Geometric Dilution of Precision) point of view is integrated to the system. ICKON system is used with relative positioning supplied by Pioneer 3DX mobile robot in a tightly coupled structure. For this purpose, ICKON system is developed to calculate heading with a novel method. ICKON heading and the heading from relative positioning are fused with Kalman Filter and some transformations. The results of relative positioning are corrected with the usage of this fused heading. ICKON performance is improved with the corrected results of relative positioning by using Adaptive Kalman Filter.

In experimental studies, it is shown that the performance of ICKON has been improved in terms of accuracy, precision, robustness, continuity and scalability.

Keywords: Indoor Positioning, ICKON, Relative Positioning, Tightly Coupled Structure, Adaptive Kalman Filter, Encoder, Heading

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda, her talebimde bana vakit ayıran ve beni motive eden değerli danışmanlarım Doç. Dr. Rifat EDİZKAN ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAZICI'ya, firma bünyesinde emeği ve desteği ile yanımda olan Uğur YAYAN'a ve diğer iş arkadaşlarıma, bugüne kadar benden hiçbir fedakarlığı esirgemeyen sevgili babam Osman YÜCEL'e ve annem Fatma YÜCEL'e, tez çalışmalarını yapabilmem için iki oğlum ile tek başına başeden eşim H. Betül YÜCEL'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. İÇ ORTAM KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİ	8
2.1. Topolojiler	9
2.2. Ölçüm Çeşitleri	11
2.3. Sinyal Tipleri	12
2.3.1. Radyo Dalgaları	12
2.3.2. Sesüstü ve Kızılötesi	14
2.3.3. Diğer Sinyaller	15
2.3.4. Sinyal Kombinasyonları	16
2.4. Konum Hesaplama Yöntemleri	17
2.4.1. Mutlak Konumlandırma	17
2.4.2. Bağıl Konumlandırma ve Kullanılan Sensörler	20
2.4.3. Mutlak ve Bağıl konumlandırmanın Birlikte Kullanımı	27
2.5. Performans Ölçütleri	33
3. İÇ ORTAM KONUMLANDIRMA SİSTEMİ	36
3.1. Mesafe Farkı Ölçümü	39
3.2. Konum Hesaplama	42
3.3. Hüzme Açısı Tabanlı Konum Kontrolü	44
4. İÇKON PERFORMANS İYİLEŞTİRMELERİ	46

4.1. Konum Hesaplama Yöntemi Üzerine Yapılan Çalışmalar	48
4.1.1. Direkt Doğrusallaştırma Yöntemi.....	48
4.1.2. GPS Konumlandırma Algoritması.....	52
4.1.3. İteratif İÇKON Konumlandırma Algoritması.....	55
4.2. Geometri Tabanlı Konum Kontrolü.....	60
4.3. Bağlı Konumlandırma ile Birleştirme.....	62
4.3.1. Baş Açısı İyileştirme Çalışmaları	68
4.3.2. Bağlı Konumlandırma Sonucunun İyileştirilmesi	77
4.3.3. Kalman Filtre Tabanlı Konum İyileştirme.....	78
4.3.4. Kalman Filtre İyileştirmeleri	81
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	85
5.1. Deney Ortamı ve Veritabanlarının Hazırlanması	85
5.2. İyileştirme Öncesi İÇKON Performansı.....	91
5.3. İyileştirme Sonrası İÇKON Performansı.....	98
5.4. Deney Sonuçların Değerlendirilmesi	104
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR DİZİNİ	108
EKLER	117
ÖZGEÇMİŞ	128

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Dolaylı uzak konumlandırma topolojisi	10
Şekil 2.2 Gaussian tek darbe UWB sinyalleri	14
Şekil 2.3 Sesüstü darbe sinyali	15
Şekil 2.4 Üçgenleme yöntemi ile konum hesaplama.....	18
Şekil 2.5 Daire kesişimi yöntemi ile konum hesaplama.....	18
Şekil 2.6 Hiperbol kesişimi yöntemi ile konum hesaplama	19
Şekil 2.7 Bir iç ortam için sinyal şiddeti haritası.....	20
Şekil 2.8 Baş açısı.....	21
Şekil 2.9 Tekerlek hızları ile baş açısı değişimi	22
Şekil 2.10 Mekanik jiroskop (Jiroskop, 2014).....	24
Şekil 2.11 Pusula ve jiroskop verilerinin Kalma Filtre ile birleştirilmesi	25
Şekil 2.12 Microbotics firmasının MIDG-2 INS cihazı	26
Şekil 2.13 Kalman filtre işleyişi	31
Şekil 2.14 Doğruluk ve kesinlik	34
Şekil 3.1 İÇKON Sistemi'nin temsili gösterimi	37
Şekil 3.2 Pioneer gezgin robota entegre edilmiş GAB	38
Şekil 3.3 ASK modülasyonu.....	40
Şekil 3.4 İÇKON Sistemi'ne ait vericilerin yayın zamanlamaları.....	40
Şekil 3.5 Verici yayını veri katarı	41
Şekil 3.6 Sabit ve Dinamik Eşik Uygulaması.....	41
Şekil 3.7 Hüzme açısı tabanlı konum kontrolü.....	45
Şekil 4.1 Bir İÇKON hücresinde vericiler ve GAB.....	49
Şekil 4.2 Daire kesişimlerinden oluşturulan doğrular	57
Şekil 4.3 Yüksek GDOP sağlayan geometrik yerleşim	60
Şekil 4.4 Düşük GDOP sağlayan geometrik yerleşim.....	61
Şekil 4.5 Microbotics firmasının MIDG2 ataletsel navigasyon sistemi	63
Şekil 4.6 Dairesel hareket için MIDG2 benzetim sonuçları-1	63
Şekil 4.7 Dairesel hareket için MIDG2 benzetim sonuçları-2.....	64
Şekil 4.8 Kare gezme hareketi için hesaplanan konum sonuçları	65
Şekil 4.9 İÇKON ve bağıl konumlandırma sonuçlarının birleştirilmesi	66
Şekil 4.10 Kare rota ve enkoderlerden hesaplanan bağıl konum.....	67
Şekil 4.11 Kare rota denemesinde enkoderlerden hesaplanan baş açısı	67
Şekil 4.12 Gezgini Algılayıcı Birim (GAB) üzerindeki alıcılar	69
Şekil 4.13 GAB ile baş açısı hesaplama akış şeması.....	70
Şekil 4.14 GAB ile baş açısı hesaplanması	71
Şekil 4.15 Kare gezme denemesinde GAB ile hesaplanan baş açısı	72
Şekil 4.16 Bağıl konumlandırma ile İÇKON konum sonucunun birleştirilmesi.....	72
Şekil 4.17 Baş açısı iyileştirme bloğu.....	73
Şekil 4.18 Baş açısında Kalman Filtre öncesi düzeltmeler-1	74

Şekil 4.19 Baş açısında Kalman Filtre öncesi düzeltmeler-2	74
Şekil 4.20 Baş açısında Kalman Filtre öncesi düzeltmeler akış şeması	75
Şekil 4.21 Baş açısı Kalman Filtre sonucu	76
Şekil 4.22 Baş açısı iyileştirme bloğu detay gösterim	76
Şekil 4.23 Bağlı konumlandırma sonucunun iyileştirilmesi	77
Şekil 4.24 Bağlı konumlandırma ve İÇKON sisteminin birleştirilmesi blok şeması	80
Şekil 4.25 GAB baş açısı ölçüm hatası	82
Şekil 5.1 Deneysel çalışma ortamı ve İÇKON verici yerleşimleri	86
Şekil 5.2 Deneysel çalışmada kullanılan gezgin robot rotaları	86
Şekil 5.3 Gezgin robot arka görünümü	87
Şekil 5.4 Fayans geçişlerinde oluşturulan cetvel	88
Şekil 5.5 Web kameradan kaydedilen örnek görüntü	89
Şekil 5.6 Cetvel üzerinden konum okuma	89
Şekil 5.7 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 konum grafiği	94
Şekil 5.8 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 hata grafiği	94
Şekil 5.9 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 hata histogramı	95
Şekil 5.10 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 hata dağılımı	95
Şekil 5.11 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 konum grafiği	96
Şekil 5.12 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 hata grafiği	96
Şekil 5.13 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 hata histogramı	97
Şekil 5.14 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 hata dağılımı	97
Şekil 5.15 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 konum grafiği	100
Şekil 5.16 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 hata grafiği	100
Şekil 5.17 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 hata histogramı	101
Şekil 5.18 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 hata dağılımı	101
Şekil 5.19 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 konum grafiği	102
Şekil 5.20 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 hata grafiği	102
Şekil 5.21 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 hata histogramı	103
Şekil 5.22 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 hata dağılımı	103

ÇİZELGELER DİZİNİ**Çizelge****Sayfa**

Çizelge 5.1 Gerçek konum veritabanı.....	90
Çizelge 5.2 Bağlı konumlandırma veritabanı.....	90
Çizelge 5.3 GAB ham verileri veritabanı.....	91
Çizelge 5.4 İyileştirme öncesi Rota-1 için hesaplanan hatalar.....	92
Çizelge 5.5 İyileştirme öncesi Rota-2 için hesaplanan hatalar.....	93
Çizelge 5.6 İyileştirme sonrası Rota-1 için hesaplanan hatalar.....	98
Çizelge 5.7 İyileştirme sonrası Rota-2 için hesaplanan hatalar.....	99
Çizelge 5.8 Rota-1 için iyileştirme çalışmaların performans üzerine etkisi.....	104
Çizelge 5.9 Rota-2 için iyileştirme çalışmaların performans üzerine etkisi.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklamalar
AKF	Adaptive Kalman Filter – Adaptif Kalman Filtre
ASK	Amplitude Shift Keying - Genlik Kaydırmalı Anahtarlama
CDF	Cumulative Distribution Function – Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
CDMA	Code Division Multiple Acces – Kod Paylaşımlı Çoklu Erişim
EKF	Extended Kalman Filter – Genişletilmiş Kalman Filtre
FOG	Fiber Optic Gyro – Fiber Optik Jiroskop
GAB	Gezgin Algılayıcı Birim
GDOP	Geometric Dilution of Precision – Geometrik Dağılım Kesinliği
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema - Küresel Uydu Navigasyon Sistemi
GPS	Global Positioning System – Küresel Konumlandırma Sistemi
GSM	Global System for Mobile Communications - Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
HF	High Frequency – Yüksek Frekans
HKB	Hücre Kontrol Birimi
IMU	Inertial Measurement Unit – Ataletsel Ölçüm Birimi
INS	Inertial Navigation System – Ataletsel Navigasyon Sistemi
ISM	Industrial, Scientific, Medical – Endüstriyel, Bilimsel, Medikal
İSB	İletişim Sistemi Birimi
LF	Low Frequency – Düşük Frekans
MEMS	Micro Electro Mechanic System – Mikro Elektomekanik Sistem
MKB	Merkezi Kontrol Birimi
PD	Phase Difference - Faz Farkı
PDOA	Phase Difference of Arrival - Varış Fazı Farkı
RF	Radio Frequency – Radyo Frekansı
RFID	Radio Frequency Identification - Radyo Frekansı ile Tanımlama
RFID	Radio Frequency Identification – Radyo Frekans Tanımlama
RSSI	Received Signal Strength Indication - Alınan Sinyal Gücü
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping – Eşzamanlı Konumlama ve Haritalama
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol – Aktarım Kontrol Protokolü / Internet Protokol
TDOA	Time Difference of Arrival - Varış Zamanı Farkı
TOF	Time of Flight - Uçuş Süresi
UHF	Ultra High Frequency – Aşırı Yüksek Frekans
UKF	Unscented Kalman Filter – Unscented Kalman Filtre
UWB	Ultra Wide Band - Aşırı Geniş Bant
Wi-Fi	Wireless Fidelity – Kablosuz Erişim
WLAN	Wireless Local Area Network – Kablosuz Yerel Alan Ağı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Konum ölçme, yeni kıtaların keşfi için açık denizlere çıkan denizciler ile önem kazanmış, hava araçlarının gelişmesi ile navigasyon en önemli teknoloji alanlarından biri haline gelmiştir. Uydu tabanlı sistemlerden önce Decca, Omega, Loran-C gibi radyo dalgaları tabanlı yerel konumlandırma sistemleri gemiler ve uçaklar tarafından yoğun olarak kullanılmıştır. Bu sistemler yer istasyonları yardımı ile çalıştığından sadece kapsama alanı içerisinde kullanılabilmektedir.

Günümüzde ise küresel konumlandırma sistemleri (Global Positioning Systems) daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Hatta pek çok otomobilde navigasyon sistemi standart donanım arasında yer almaktadır. Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri'nin NAVSTAR GPS ve Rusya'nın GLONASS sistemi olmak üzere aktif hizmet veren iki farklı küresel konumlandırma sistemi bulunmaktadır. Bu sistemler, dünya çevresinde görüş alanındaki farklı uydulardan aldıkları radyo dalgalarının gecikme değerlerine bağlı olarak metre hassasiyetinde enlem, boylam ve yükseklik hesabı yapmaktadırlar.

Küresel konumlandırma sistemleri uydulardan sinyal alabildikleri sürece konumlandırma yapabilirler. Bu sistemlerin konumlandırma doğruluğu, dış ortamda uydu ile direk görüşün kesilebildiği bulutlu havalarda, dağların arasında, yüksek binaların olduğu yerlerde, ağaç altı vb. yerlerde görülen uydu sayısına bağlı olarak düşmektedir.

İç ortamlarda ise, uydulardan gelen sinyaller, zayıf şiddette olması sebebi ile bina içine nüfuz edemez. Bu sebeple iç ortamlarda küresel konumlandırma sistemleri çalışmamaktadır. İç ortamlarda konumlandırma, ekipman takibi (Paul, et al., 2009), kişi navigasyonu (Segura, et al., 2012), insansız otonom araçlar / robotlar (Yazıcı, et al.,

2009), yaşlı ve engelli kişilerin izlenmesi (Ahn, et al., 2012), konum bazlı servisler (Dey, et al., 2010), gibi pek çok uygulamanın temel ihtiyacıdır. Otonom gezgin araçlar, günümüzde endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmakta olup fabrikalarda hammadde yada ürün taşıma bu uygulamaların başında gelmektedir. Bu taşıma araçları market arabası kadar küçük olabildiği gibi forklift kadar büyük de olabilmektedir. Büyük lojistik depolarında, ürünlerin depolama yerlerinden toplanması ve istenilen bölgeye getirilmesi genellikle robotlar tarafından yapılmaktadır. Günlük kullanımda da yaşlı ve engelli insanların taşınması için otonom elektrikli sandalyeler geliştirilmiştir (Yayan, et al., 2013; Akar, et al., 2013). Sandalyeye oturan kişi gitmek istediği hedefi, bir arayüz üzerinden belirtmekte ve tekerlekli sandalye kendi konumu dikkate alarak kişiyi otonom olarak götürmektedir. Gelişmiş bazı otonom temizlik araçları, konumun kullanıldığı diğer bir insansız gezgin araç uygulamasıdır. Temizlenecek ortamı kendisi gezen temizlik araçları endüstri de olduğu gibi ev ortamında da kullanılmaktadır (Kim, et al., 2006; Neato, 2014).

İç ortam konumlandırma sisteminin performansını incelemek için doğruluk, kesinlik, karmaşıklık, gürbüzlük, süreklilik, ölçeklenebilirlik, maliyet ve kurulum kolaylığı gibi farklı ölçütler mevcuttur (Liu, et al., 2007). Performans değerlendirmede doğruluk ve kesinlik en bilinen ölçütlerdir. Doğruluk, sistemin sonuçlarındaki olası hatayı, kesinlik ise sonuçlar arasındaki dağılımı ifade eder. Karmaşıklık, sistem altyapısı ve konum hesaplama için kullanılan yöntemlerin basitlikten uzaklığı ifade eder. Gürbüzlük, oluşabilecek hata vb. durumlardan sistemin ne kadar az etkilendiğini gösterir. Süreklilik, sonuçların hangi ortamlarda ve hangi sıklıkta üretilebildiği ile alakalıdır. Ölçeklenebilirlik, sistemin diğer performans ölçütlerinden ödün vermeden kapsama alanının genişletilir olmasını ifade eder. Maliyet, sistemin kurulum maliyeti, kapladığı hacim, enerji tüketimi vb. harcamalar olarak değerlendirilir. Kurulum kolaylığı, sistemin bir ortama kurulabilmesi için gerekli ekipman ve işçilik ihtiyacını ifade eder.

Bir iç ortam konumlandırma sisteminde, kullanılan sinyal tipi ve ölçüm çeşidi, performansı önemli oranda etkilemektedir. İç ortam konumlandırma için temel olarak RF sinyal kullanan (Smith, et al., 2007; Bahl, et al., 2000; Ekahu, 2014; Pavani, et al.,

2006; Xiang, et al., 2004; Youssef, et al., 2003; Hightower, et al., 2000; Ni, et al., 2004; Awarepoint, 2014; Q-Track, 2014; Ubisense, 2014; Zebra, 2014), RF ve sesüstü sinyali birlikte kullanan (Harter, et al., 1997; Priyantha, 2005; Fukuju, et al., 2003), sadece sesüstü kullanan (Hexamite, 2014; Wu and Tsai, 2001; Yazıcı, et al., 2012) geliştirilmiş sistemler bulunmaktadır.

RF sinyali kullanan iç ortam konumlandırma sistemlerinin doğruluğu, RF sinyalin çok hızlı yayılması ve ortamdaki engellerden geçerken engele bağlı olarak farklı oranda sönümlenmesi sebebi ile düşüktür. Bununla birlikte, RF sinyalin uzak mesafelere ulaşabilmesi, günümüzde birçok cihazda haberleşme amacıyla halihazırda yaygın olarak kullanılması ortama kurulacak altyapının seyrek ve düşük maliyetli olmasına imkan vermektedir. Bu sebeple RF tabanlı sistemler iç ortam konumlandırmada yaygın olarak kullanılmaktadır (Smith, et al., 2007). Günümüzde kablosuz yerel ağ (WLAN) altyapısı son derece yaygınlaşmıştır. WLAN sistemler 2.4GHz frekansında çalışmakta olup 50-100m kapsama alanına sahiptir. Microsoft RADAR (Bahl and Padmanabhan, 2000), WLAN sinyal gücünü ölçerek 2-3m doğrulukla konumlandırma yapabilmektedir. Ticarileşmiş bir ürün olan Ekahu (Ekahu, 2014), ortamda mevcut WLAN sinyallerinin şiddetini kullanarak metre seviyesinde doğrulukla konumlandırma yapmaktadır. Bu konuda başka birçok çalışma da mevcuttur. (Pavani, et al., 2006; Xiang, et al., 2004; Youssef, et al., 2003). Sinyal şiddeti kullanımında, konumlandırma yapmadan önce, ortamdaki sinyal şiddetlerinin ölçülerek ortamın RF haritasının oluşturulması gerekmektedir. RF sinyal ile konumlandırmada, RF tabanlı kimlik belirleme (RFID) uygulamaları oldukça yaygındır. RFID sistemler, etiketler ve okuyuculardan oluşur. Etiketler, sorgulama yapıldığında kimlik bilgisini RF sinyal ile yayınlayan küçük cihazlardır. Aktif ve pasif olarak iki tiptir. Pasif etiketler batarya gerektirmez ve okuyucunun sinyaline bilgi yükleyerek 1-2m mesafeye geri yansıtırlar. Aktif etiketler ise batarya ile çalışır ve yayın mesafeleri daha büyüktür. RFID okuyucular ise etiketleri sorgulayan ve yayınladıkları kimlik bilgilerini okuyan cihazlardır. SpotOn (Hightower, et al., 2000) ve LANDMARC (Ni, et al., 2004) sistemleri, gezgin nesnelerdeki aktif etiketlerin sinyallerini okuyan ortama yerleştirilmiş RFID okuyuculardan oluşmakta ve 2m doğrulukla konum hesaplayabilmektedir. Bu alanda ticari ürün üreten firmalar olarak Awarepoint(Awarepoint, 2014) ve Real Time

Location Systems Inc. (Real Time Location Systems Inc, 2014) firmaları sayılabilir. Farklı bir ürün olan Qtrack (Q-Track, 2014) sisteminde, gezgin nesneden yayınlanan RF sinyalinin ortamdaki alıcılarda oluşturduğu elektik ve manyetik alan arasındaki faz farkı ölçülmekte ve verici – alıcı arasındaki mesafe hesaplanarak metre seviyesinde doğrulukla konumlandırma yapılmaktadır.

RF sinyallerde, farklı engeller farklı frekansların sönümlenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca engellerden yansımalar, alıcıda önemli gürültülere sebep olmaktadır. Bu problemleri aşmak için aşırı geniş bant sinyalleri (Ultra-Wide-Band, UWB) kullanan sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerde vericiler çok kısa süreli ($>1\text{ns}$) RF darbe'ler üretmektedir. Bu sinyaller 3,1 ile 10,6 Ghz arasında geniş bir frekans bandına sahiptir. Yayınlanan sinyal, geniş bir banda sahip olduğu için birçok engelden geçebilmekte ve çok kısa süreli olduğu için yansımalarından ayrıştırılabilmektedir. Bu sistemler ile 30cm seviyesinde doğrulukla konumlandırma yapılabilmektedir (Ubisense, 2014, Zebra, 2014). UWB sistemler çok kısa zaman aralıklarını ($>1\text{ns}$) ölçmeleri gerektiği için karmaşık ve pahalı sistemlerdir.

Konumlandırma sisteminin doğruluğunu arttırmak için RF sinyali ile birlikte sesüstü sinyalleri de kullanılmaktadır. Sesüstü sinyalin uçuş hızının görece yavaş olması sebebi ile zaman ölçümlerindeki hatalar, mesafe hesaplamalarını daha az etkilemektedir. Active Bat (Harter, et al., 1997) sisteminde, gezgin nesne yaydığı RF ve sesüstü sinyaller ile kimlik bilgisini göndermekte ve ortama yerleştirilmiş altyapıdaki sesüstü alıcıların bağlı olduğu sunucu da gezgin nesnenin konumu yaklaşık 10cm doğruluk ile hesaplanmaktadır. Cricket sisteminde (Priyantha, 2005), ortama yerleştirilen ızgara yapısındaki vericiler RF ve sesüstü sinyalleri aynı anda yaymaktadır. Gezgin nesnedeki alıcı, ulaşan sinyaller arasındaki zaman farklarını ölçmekte ve vericilere olan mesafeleri hesaplayarak 10cm doğruluk ile konum bulmaktadır. Dolphin (Fukuju, et al., 2003)'de ortam altyapısındaki düğümler konum hesaplama kapasitesine sahiptir ve 15cm doğruluk ile konum hesaplayabilmektedir.

İç ortam konumlandırma sistemlerinde en yüksek doğruluğa sahip sistemler sesüstü sinyal kullananlardır. Aynı zamanda, sesüstü verici ve alıcı sistemlerin

ekonomik olması ve sesüstü sinyalin hızının düşük olmasından dolayı daha basit elektronik donanımların yeterli olması onları maliyet etkin sistemler kılmaktadır. Ancak sesüstü sinyalin ortamda hızlı sönümlenmesi ve duvar gibi engellerden geçememesi sebebi ile çok sayıda vericiden ve cihazdan oluşan bir altyapı gerektirmektedir. Endüstriyel ortamlarda sesüstü bantta harmonik gürültülerin çok olması sebebi ile gürbüz çalışamazlar. Sesüstü konumlandırma sistemleri, RF sinyalin tercih edilmediği hastane, çocuk kreşi vb. ortamlarda ve robotik laboratuvarları gibi deney ortamları için uygun çözümlerdir. Sadece sesüstü sinyal kullanan Hexamite (Hexamite, 2014) sisteminde ortamda bir alıcı ağı kurulmuş ve bu ağ bir bilgisayara bağlanmıştır. Ortamdaki gezgin nesne üzerindeki sesüstü vericiden yayınlanan sinyaller, alıcı ağı tarafından alınmakta ve konumu 10cm doğrulukla hesaplanmaktadır. Bir diğer çalışmada (Wu and Tsai, 2001) gezgin robotun konumu ve yönü, üç adet sesüstü verici ve iki adet sesüstü alıcı kullanılarak hesaplanmıştır. İÇKON sistemi (Yazıcı, et al., 2012) hücresel yapıda ölçeklenebilir olarak geliştirilmiştir. Hücrelerdeki vericiler belirlenen zamanlarda, verici kimliği kodlanmış sinyaller yayınlamakta ve gezgin robot üzerinde yer alan Gezin Algılayıcı Birim(GAB), sesüstü sinyalleri okuyarak, sinyaller arasındaki ulaşma zaman farklarını ölçmekte ve konum hesaplamaktadır.

İç ortam konumlandırma sistemlerinde bağıl konumlandırma desteği ile doğruluk, gürbüzlük, süreklilik gibi sistem performans ölçütleri iyileştirilebilmektedir. Bu kapsamda (Chai, et al., 2012) çalışmasında, WiFi tabanlı iç ortam konumlandırma sistemini ataletsel navigasyon birimi (INS) ve Adaptif Kalman Filtre (AKF) kullanarak iyileştirilmiştir. WiFi parmakizi yöntemi ile yapılan konumlandırma sonucunu, ataletsel sensör bilgileri ve Kalman Filtre kullanarak iyileştiren çalışmalar da yapılmıştır. (Xiao, et al., 2011; Lee, et al., 2011). Cep telefonu ile gerçekleştirilen konumlandırma (Kim, et al., 2012) çalışmasında, telefonda bulunan ataletsel sensörler ve WiFi sinyal şiddeti ölçümleri birleştirilerek konumlandırma yapılmıştır. (Frank, et al., 2009) çalışmasında WLAN tabanlı konumlandırma sistemi, ataletsel sensörler ve manyetik alan ölçer ile EKF kullanılarak iyileştirilmiştir. (Jimenez, 2012) çalışmasında RFID ölçümleri ile gerçekleştirilen kişi konumlandırma sonuçları, ayağa bağlanan ataletsel ölçüm birimi (IMU) verileri ve EKF kullanılarak iyileştirilmiştir. (Wang, et al., 2004) çalışmasında ise NAV200 adlı konumlandırma sistemi, enkoder desteği ile EKF kullanılarak

iyileştirilmiştir. (Sun, et al., 2004) çalışmasında bir kablosuz sensör ağı kurulmuş ve konumlandırma için kullanılan sinyal şiddeti ölçümleri, ivmeölçer ve oryantasyon sensörlerinden gelen bilgiler ile UKF kullanılarak birleştirilmiştir. (Raitoharju, et al., 2013) çalışmasında WLAN tabanlı konumlandırma sistemi IMU verileri ile iyileştirilmiştir. (Lee, et al., 2009) çalışmasında bir gezgin robotun konumlandırılmasını, aktif vericilere sahip bir konumlandırma sistemi verilerinin 3 eksenli bir IMU verileri ile Kalman filtre kullanılarak birleştirilmiştir. (Kim, et al., 2013) çalışmasında sesüstü mesafe ölçümleri ile konumlandırma yapan sistem odometri verileri ile EKF kullanılarak iyileştirilmiştir. Bu sistemde altyapıda bulunan vericiler, robottan RF üzerinden gelen komutla aynı anda hem RF hemde sesüstü sinyal yayınlamaktadır. Robot üzerinde 3 adet sesüstü verici yer almaktadır. RF sinyalin geliş anı baz alınarak sesüstü verici ile 3 alıcı arasındaki mesafeler hesaplanmaktadır. EKF robotun konum ve yönelimini dikkate alarak ölçülen mesafelerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında İÇKON sisteminin performans iyileştirmesi üzerine çalışılmıştır. Uygulama bir gezgin robotun konum ölçümü ile yapılmıştır. İÇKON sisteminde konum hesaplaması için farklı algoritmalar üzerinde çalışılmış ve özgün bir geometrik, iteratif konumlandırma algoritması geliştirilmiştir. Hatalı hesaplanan konumların atılması için GDOP (Geometrik Dilution of Precision) tabanlı bir konum filtresi ilave edilmiştir. Ayrıca sisteme Kalman filtre kullanarak bağıl konumlandırma desteği entegre edilmiştir. Bu entegrasyonda sıkı bağlı (tightly coupled) bir yapı kullanılmıştır. İÇKON sisteminden özgün bir yaklaşımla baş açısı üretilmiş ve bu baş açısı bağıl konumlandırmanın iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Düzeltile bağıl konum bilgisi, İÇKON sisteminin konum bilgisi ile birleştirilmiş ve doğruluk, kesinlik, gürbüzlük, süreklilik açılarından performansta iyileşme sağlanmıştır.

Bölüm 2’de iç ortam konumlandırma sistemlerinde kullanılan topolojiler, ölçüm çeşitleri, sinyal tipleri, konum ve baş açısı hesaplama yöntemleri detaylandırılmış ve iç ortam konumlandırma sistemlerinde performans ölçütleri verilmiştir. Bölüm 3’te İÇKON sistemi detayları verilmiştir. Bölüm 4’te ise tez kapsamında İÇKON sisteminde

yapılan performans iyileştirme çalışmaları anlatılmaktadır. Bölüm 5’te yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ve Bölüm 6’da ise sonuç ve öneriler verilmektedir.

BÖLÜM 2

İÇ ORTAM KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİ

İç ortamlarda konumlandırma için ilk bölümde detayları verilen pekçok farklı sistem geliştirilmiştir. Bir iç ortam konumlandırma sisteminin isterleri, kullanılacağı uygulama alanına göre farklılık gösterir. Sürekli aynı hatlar üzerinde gidip gelen bir robot için hat üzerindeki belirlenen noktalardan geçti bilgisi yeterli iken ortamdaki herhangi bir noktaya gidebilen bir araç için en az iki boyutlu bir konumlandırma sistemine ihtiyaç vardır. Gezgin aracı bir yükleyicinin önüne götürebilmek için konum metre altı konum doğruluğu yeterli iken şarja bağlanmak için konum doğruluğunun santimetre seviyesinde olması gereklidir. Endüstriyel üretim bandına bağlı çalışan bir insansız araç için kullanılan konumlandırma sisteminin gürbüzlüğü, bir mobil robot araştırma laboratuvarında çalışan konumlandırma sisteminin gürbüzlüğünden daha iyi olmalıdır ve dolayısı ile maliyeti de yüksek olacaktır. Uygulamada, konumlandırma yapılacak alanın büyüklüğü arttıkça kurulum kolaylığı önem kazanır. Binlerce m² alanda çalışacak bir sistemin kurulum kolaylığı, bir odada çalışacak sisteme göre çok daha önemlidir.

Farklı isterler için geliştirilmiş iç ortam konumlandırma sistemleri de, kendi aralarında, kullandıkları topolojiler, ölçüm çeşitleri, sinyal tipleri, konum hesaplama yöntemleri vb. açılardan farklılıklar göstermektedir. Topolojik farklılıklar; konum hesaplamanın, gezgin birim’de veya sistem altyapısında yapılması ile oluşmaktadır. Konumlandırma için kullanılan farklı ölçüm çeşitleri mevcuttur. Yakınlık ölçümü bölge bazlı konumlandırmada kullanılırken; açı, mutlak mesafe, mesafe farkı, sinyal şiddeti, görüntü, odometri verileri vb. noktasal konumlandırma için kullanılan temel ölçümlerdir. İç ortam konumlandırma sistemlerinde kullanılan sinyal tipi açısından da farklılıklar vardır. Konumlandırma için; RFID, WiFi, Bluetooth, GSM, UWB gibi RF sinyalleri, sesüstü, kızılötesi, lazer, ışık sinyalleri ve odometri sensörlerinin sinyalleri

gibi farklı sinyalleri veya bu sinyallerin kombinasyonlarını kullanılmaktadır. İç ortam konumlandırma sistemlerinin bazıları konum hesaplamada mutlak konumlandırma bazıları bağıl konumlandırma, bazıları ise mutlak ve bağıl konumlandırmanın bileşimini kullanırlar. Mutlak konumlandırma için geometrik ve geometrik olmayan farklı yöntemler de mevcuttur.

Devam eden kısımlarında iç ortam konumlandırma sistemlerinin aralarındaki farklılıkları oluşturan kullandıkları topolojiler, ölçüm çeşitleri, sinyal tipleri, konum hesaplama yöntemleri detaylandırılmaktadır.

2.1. Topolojiler

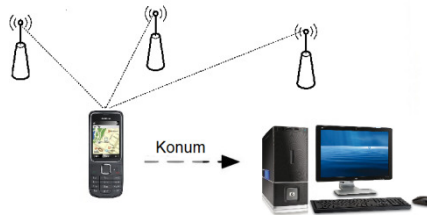
Konumlandırma uygulamalarında, konum hesaplamasının hangi birimde yapıldığına göre dört farklı topoloji bulunmaktadır (Drane, et al., 1998):

- Kendini konumlandırma,
- Uzak konumlandırma,
- Dolaylı kendini konumlandırma
- Dolaylı uzak konumlandırma.

Kullanılacak topolojiye, yapılacak olan uygulamaya ve kullanılacak teknolojiye göre karar verilir. Kendini konumlandırma topolojisinde, gezici birim kendi konumunu kendisi hesaplar. Dış ortamlar için kullanılan GPS sistemi, kendini konumlandırma topolojisinde çalışmaktadır. GPS ile yapılan araç takip uygulamaları ise dolaylı uzak konumlandırma topolojisindedir. Kendini konumlandırma topolojisinde, hesaplanan konumun gizliliğinin korunabilir olması, gezgin birim sayısında sınırlama olmaması avantaj iken, her gezgin birimde yeterli işlemci gücünün bulunması gerekliliği dezavantajdır. Bu sebeplerle genellikle personel navigasyonu uygulamalarında tercih edilir.

Gezgin birimlerin konumları, konumlandırma altyapısı tarafından hesaplanırsa uzak konumlandırma topolojisi gerçekleşir. Bu topolojinin bir başka uygulamasında hesaplanan konum bilgisi kablosuz olarak aktarılabilir. Uzak konumlandırma topolojisinde, tüm gezgin birimlerin konumlarının takip edilebilmesi bir avantaj iken gezgin birim sayısının artması ile altyapıda gerekli işlem gücünün artması gerekliliği dezavantajdır. Uzak konumlandırma, genellikle gezgin birimde konum bilgisinin gerekli olmadığı ekipman takip uygulamalarında tercih edilir. Bu topoloji ile takip edilecek ekipmanların üzerine işlem gücü çok düşük, ucuz etiketler yerleştirmek yeterli olmaktadır.

Gezgin birim, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi hesapladığı konumu altyapıya aktardığında dolaylı uzak konumlandırma, altyapı hesapladığı konumu gezgin birimlere aktarırsa dolaylı kendini konumlandırma topolojileri ortaya çıkar.



Şekil 2.1 Dolaylı uzak konumlandırma topolojisi.

Otonom araç navigasyonu uygulamalarında ise konum gizliliği gerekli olmadığından dolaylı kendini konumlandırma veya dolaylı uzak konumlandırma topolojileri de kullanılabilir. Hangi topolojinin kullanılacağını, otonom araçtaki ve altyapıdaki işlem gücü, sistemde konumlandırılacak araç sayısı, otonom araç konum bilgisinin gerçek zamanlılık ihtiyacı vb. kriterler belirler.

2.2. Ölçüm Çeşitleri

Konumlandırma sistemleri konum hesaplamayabilmek için bazı ölçümlere ihtiyaç duyar. Bu ölçüm çeşidi, kullanılan sinyale, konum hesaplama yöntemine, istenilen performansa göre farklılık gösterir.

Konumlandırma sistemlerinde en temel ölçüm yakınlık (proximity) ölçümüdür. Bu ölçüm ile verici ve alıcı çiftinin birbirleri ile haberleşmesi sonucu ikisinin de haberleşme mesafesi içinde olduğu doğrulanır. Bunlardan birinin konumu bilindiğinde bölge bazında konumlandırma yapılır.

Açı ölçümünde alıcı verici arasındaki hattın bilinen bir yöne göre açısı ölçülür (Wong, et al., 2008). Açı ölçümü teknik olarak zor bir ölçümdür ve konumlandırma sonucu, açı ölçümündeki hataya oldukça duyarlıdır. Bu sebeplerle iç ortam konumlandırma uygulamalarında genellikle tercih edilmemektedir.

Mesafe ölçümü konumlandırmada en çok kullanılan ölçümdür. Mutlak mesafe ölçümü verici alıcı arasındaki uzaklığın tespit edilmesine dayanır. Bu amaçla çeşitli fiziksel kanunlardan faydalanılır. Uçuş zamanı ölçümünde sinyalin uçuş süresi ölçülür ve yayılma hızı ile çarpılarak mesafe bulunur. Sinyalin uçuş süresinin ölçülebilmesi için alıcı verici arasında zaman senkronizasyonu gereklidir. Bu gereklilikten kurtulmak için bazı uygulamalarda yankı mantığı kullanılır ve sinyal geri yansıtılır. Gidiş dönüş zaman farkı aynı noktada ölçülerek ikiye bölünür ve uçuş zamanı bulunur (Svecova, et al., 2008). Bir diğer yöntem yayın şiddetinin mesafe ile azalmasına dayanır. Verici sabit güçle yayın yapar ve alıcı bulunduğu noktada ölçtüğü sinyal şiddetini sönümleme modelini kullanarak mesafeye çevirir (Zhang, et al., 2009). Bu yöntemde sönümleme modelinin doğruluğu önemlidir ve ortamın dinamik olarak değişmesi temel hata kaynağıdır. Faz açısı ölçümünde, zaman senkronizasyonu gerekliliğinden kurtulmak için sinyal diğer noktadan yansıtılır. Giden ve dönen sinyallerin aralarındaki faz farkı ikiye bölünür ve dalgaboyu ile çarpılarak mesafe bulunur. Mesafe ölçümleri ile merkezi belirli daireler tanımlanmış olur. Bölüm 2.4.1.1’de verildiği üzere bu dairelerin kesişim noktası hesaplanarak konumlandırma yapılır.

Mesafe farkı ölçümünde verici çifti ile alıcı yada alıcı çifti ile verici arasındaki mesafe farkı bulunur (Yayan, et al., 2011). Bu farkın hesaplanmasında genellikle ulaşma zamanı farkı (TDOA) ölçümü kullanılır. Mesafe farkı hesaplanmasında, zaman ölçümlerinin aynı birimde yapılması, alıcı verici arasındaki zaman senkronizasyonu zorunluluğunu ortadan kaldırır. Elde edilen mesafe farkı, iki merkezi belirli olan hiperbol tanımlar. Bölüm 2.4.1.1’de anlatıldığı üzere tanımlanan bu hiperbollerin kesişimi ile konum hesaplanır.

Diğer ölçümler olarak görüntü ve odometri sayılabilir. Görüntü, konumlandırma için kullanılan bir başka sinyal ölçümü olarak değerlendirilebilir. Görüntü üzerinde yapılan sinyal işleme ile bilinen noktalara göre konum tespiti yapılabilmektedir. Bu yöntem ile eşzamanlı konumlandırma ve haritalama (SLAM) yapılabilmektedir. Odometri’de kullanılan sensörlerden alınan başlıca ölçümler gidilen mesafe, ivme, yatma (tilt) açıları, baş açısıdır. Bu ölçümler ile konum değişimleri hesaplanıp bir önceki adımdaki konumun üzerine eklenerek bağıl konumlandırma gerçekleşir.

2.3. Sinyal Tipleri

Konumlandırma sistemlerinde, konum hesaplama için gerekli ölçümlerin yapılabilmesi amacı ile farklı sinyal tipleri kullanılmaktadır. Bu kısımda bunlardan başlıcaları olan RFID, WiFi, Bluetooth, UWB, ISM gibi RF sinyaller ile ultrasonik, kızılötesi, lazer, ışık, odometri sensörleri sinyalleri detaylandırılacaktır.

2.3.1. Radyo Dalgaları

En yaygın olarak üzerinde çalışılan sinyal radyo dalgaları olmuştur. Radyo dalgaları duvar vb. engellerden geçebildiği, yüksek hızda veri taşıyabildiği ve iletişim sistemlerinde halihazırda kullanıldığı için tercih edilmektedir. RFID (radyo frekansı ile

tanımlama) yakınlık ölçümü, bölge temelli konumlandırma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu sistemlerde, RFID okuyucu ile RFID etiketleri kullanılarak konum bilgisi sorgulaması yapılır. Sistemde kullanılan RFID etiketler pasif yada aktif olabilmektedir. Pasif RFID, küçük, ucuz olduğu ve güç tüketmediği için gezgin birimlerde tercih edilmektedir. Ancak bu etiketler için haberleşme mesafesi 1-2 metre ile sınırlıdır. Pasif RFID sistemler genellikle LF, HF, UHF ve mikrodalga frekans bantlarında çalışır. Aktif RFID etiketler batarya ile çalışır ve haberleşme mesafesi onlarca metre olabilir. Aktif RFID etiketler kullanılarak sinyal şiddeti ölçümleri ile de konumlandırma yapılabilmektedir.

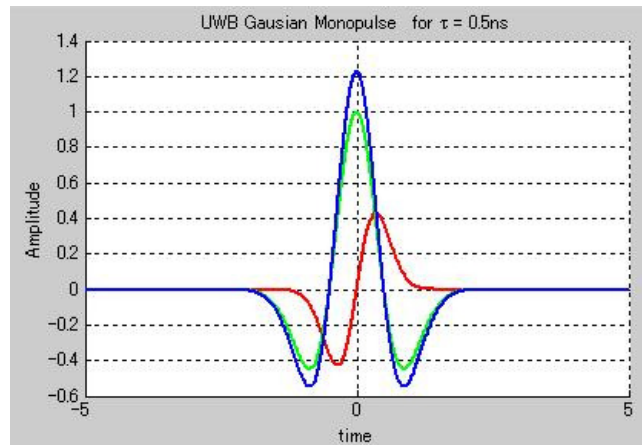
Bluetooth sinyali (IEEE 802.15) 2,4GHz ISM bantta yer alır ve 10-15m mesafeden okunabilir (Hallberg, et al., 2003). Günümüzde PDA, cep telefonu, tablet vb. pek çok mobil cihazda bluetooth yer almakta olup bluetooth etiketleri oldukça küçüktür. Her bluetooth cihaz ve etiket eşsiz bir kimliğe sahiptir ve bu kimlik gezgin birimlerin tanınmasında kullanılabilir. Bluetooth sinyali ile yakınlık ölçümü ve sinyal şiddeti ölçümleri alınabilir.

WiFi (IEEE 802.11), 2,4GHz ISM bantta ve 5GHz bantta veri aktarımı için oluşturulmuş bir standart olup son yıllarda kablosuz internet bağlantısı için son derece yaygınlaşmıştır (Saha, et al., 2003). WiFi için a, b, g ve n protokolleri mevcut olup her farklı veri hızları sağlamaktadır. WiFi sinyalleri 100m'ye kadar okunabilmektedir. Günümüzde kapalı alanlarda internet bağlantısı için pek çok WiFi erişim noktası bulunabilmekte ve sinyal şiddeti ölçümü yapılarak konumlandırma yapılabilmektedir. Bu yaklaşım yeni bir altyapı kurma yükünü hafiflettiği için oldukça yaygındır.

GSM ve CDMA mobil ağlar cep telefonu haberleşmesi için kullanılmaktadır. İç ortamlarda bu ağların sinyalleri kullanılarak sinyal şiddeti ölçümü ile konumlandırma yapılabilmektedir (İbrahim, et al., 2012). Bu konumlandırmanın doğruluğu genelde düşüktür ve baz istasyonu sayısının artması ile doğruluk artmaktadır.

UWB sinyalleri genellikle 1ns altında ultra kısa süreli ve düşük görev çevrimine sahip darbelerdir. Bu darbeler 3,1 GHz'den 10,6GHz'e kadar çok geniş bir frekans

bandını kaplayabilir (Chung, et al., 2003). Şekil 2.2’de tek darbe UWB sinyalleri gösterilmiştir. Bu sinyallerin sürelerinin çok kısa olması sebebi ile oluşturulması çok az güç tüketimi gerektirir ve yansımalarından kolayca ayırt edilebilir. UWB sinyallerinin geniş bant kaplaması sebebi ile engellerden geçmeleri diğer radyo sinyallerine göre daha kolaydır. UWB sinyalleri ile hassas şekilde uçuş zamanı, uçuş zamanı farkı ölçümleri yapılabilir ve konumlandırma doğruluğu yüksek sistemler kurulabilir. UWB sistemlerinde verici alıcıya göre daha basit yapıdadır. Bu sebeple uzak konumlandırma topolojisine daha uygundur. Bu sistemler hassas zaman senkronizasyonuna ihtiyaç duyduğundan karmaşık ve pahalı sistemlerdir (Ubisense, 2014).

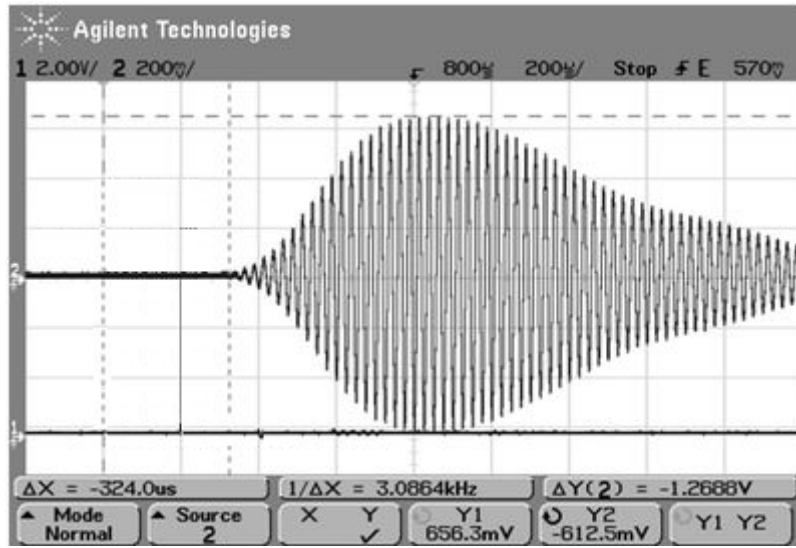


Şekil 2.2 Gaussian tek darbe UWB sinyalleri

2.3.2. Sesüstü ve Kızılötesi

Sesüstü sinyaller insan kulağının duyma eşiği olan 20KHz üzerindeki ses sinyalleridir. Genellikle 25 kHz ve 40KHz’lik frekanslar kullanılır. Duvar vb. engellerden geçemezler; bu sebeple oda ayrımı için kullanılırlar. Sesüstü sinyaller, RF radyasyonu istenmediği yerlerde tercih edilirler. Şekil 2.3’te bir sesüstü darbe gösterilmiştir. Vericilerin ataletinden dolayı darbe Şekil 2.3’te gösterildiği gibi bir zarfa sahip olmaktadır. Sesüstü sinyallerin yayılma hızı RF sinyallere göre çok düşük (340m/s) olduğu için uçuş zamanı, ulaşma zamanı farkı gibi zaman ölçümleri basit sistemler ile yapılabilir. Sesüstü sinyallerle konumlandırmada zaman

senkronizasyonunda çok hassas doğruluk istenmez. Ultrasonik sinyaller üzerine veri kodlaması ile yakınlık ölçümü yapılarak bölge temelli konumlandırma yapılabilmekte olduğu gibi, zaman ölçümleri ile konum da hesaplanabilmektedir (Yazici, et al., 2011). Endüstriyel çalışma ortamlarında sesüstü bantta gürültü olabildiğinden endüstriyel uygulamalarda sesüstü sistemler gürbüz olmayabilir.



Şekil 2.3 Sesüstü darbe sinyali

Kızılötesi sinyaller insan gözünün görme eşiği olan kırmızı rengin frekans olarak altındaki bölgedeki ışık sinyalleridir. Kızılötesi sinyaller üzerine veri kodlaması yapılabilir ve ışık hızı ile yayılırlar. Duvar vb. engellerden geçemedikleri için oda ayırımında kullanılabilirler (Want, et al., 1992). Yayılma hızları yüksek olduğu ve engellerden yansydıkları için genellikle zaman ölçümleri ile kullanılmazlar. Güneş ışığı kızılötesi sinyaller de içerdiği için güneş ışığı alan ortamlarda gürültüye maruz kalırlar.

2.3.3. Diğer Sinyaller

Lazer, eş frekanslı ve eş fazlı ışık demetidir. Eş fazlı olduğu için hüzmeye açısı sıfıra yakındır. Ulaşma fazı farkı veya son teknolojiler ile uçuş zamanı ölçülerek mesafe

ölçümü yapılabilmektedir. Bina içerisindeki bilinen noktalara yerleştirilen aynalara olan mesafelerin ölçümü ile konum hesaplama yapılabilmektedir (NAV350, 2014). Konumlandırma sistemlerinde insan gözüne zarar vermeyecek frekanstaki ve güçteki lazer ışınları kullanılır.

İnsan gözünün algıladığı frekanstaki ışık ile veri aktarımı son zamanlarda popüler çalışma alanlarından (Rajagopal, et al., 2012). Bu sistemlerde LED lambalar ile insan gözünün algılamayacağı hızda anahtarlama yapılarak veri aktarılabilir. Bu mantıkta çalışan optik etiketler ile kimlik yayını yapılarak yakınlık ölçümü ile bölge temelli konumlandırma yapılabilmektedir.

Görüntü işleme teknikleri ile çevre görüntüsü işlenerek eş zamanlı konumlandırma ve haritalama uygulamaları yapılabilmektedir. Bu uygulamalarda bir yandan alınan görüntülerden özellikler çıkartılarak tanıma ile konumlandırma yapılırken bir yandan da gezilen bölgenin haritası çıkartılmaktadır.

Konumlandırma için kullanılan diğer sinyallerden odometri için kullanılan sensörlerin sinyalleri sayılabilir. Ataletsel sensörler olan ivmeölçer, jiroskop vb. sensörler farklı elektriksel çıkışlar vermekte ve bu veriler ile de konum hesabı yapılabilmektedir.

2.3.4. Sinyal Kombinasyonları

Geliştirilen konumlandırma sistemlerinin bazılarında önceki bölümde verilen sinyal çeşitlerinin kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu kombinasyonlara örnek olarak RF ve sesüstü (Priyantha, 2005), RF ve kızılötesi, sesüstü ve kızılötesi, lazer ve ataletsel sensörlerin sinyalleri verilebilir. Bu sistemler genellikle iki sinyal çeşidinin farklı özelliklerini (duvardan geçme / geçmeme) yada aynı özelliğin nicelik farkını (yayıma hızındaki fark) kullanmaktadır.

2.4. Konum Hesaplama Yöntemleri

Konum hesaplama yöntemleri temel olarak daha önce hesaplanmış konumların kullanıp kullanılmadığına göre bağıl ve mutlak konumlandırma olarak iki sınıfa ayrılabilir.

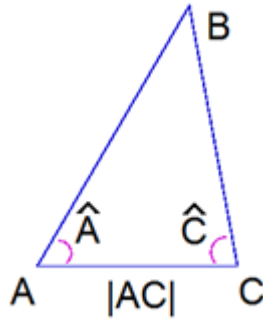
2.4.1. Mutlak Konumlandırma

Mutlak konumlandırma, bir nesnenin konumunu tespit etmek için daha önceki bilgilere ihtiyaç duyulmamasını ifade eder. Bulunan her konum bir önceki konumdan bağımsızdır. Konum tespiti için çeşitli ölçümler yapılır ve bu ölçümler kullanılarak konum hesaplanır. Bu sebeple sistemin çalışmasında bir başlangıç noktası vermek gerekmez ve bulunan bir konumdaki hata, bir sonraki konum hesaplamasına etki etmez, hata kümülatif olarak birikmez. Bundan dolayı mutlak konumlandırmada uzun süreli çalışan sistemlerde tercih edilmektedir.

Mutlak konumlandırma ile konum hesaplama için farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler gerektirdikleri hesaplama yükü, analitik veya iteratif olmaları, kullandıkları algoritmalar vb. yönlerden farklılıklar gösterir.

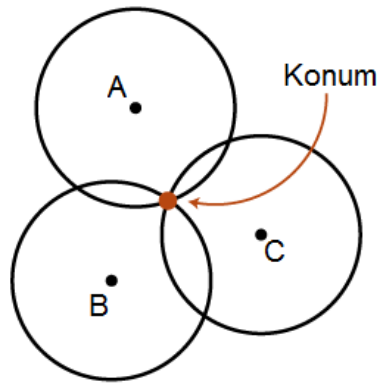
2.4.1.1. Deterministik Yöntemler

Üçgenleme, daire kesişimi, hiperbol kesişimi konumlandırma için kullanılan temel geometrik yöntemlerdir. Üçgenleme yönteminde, üçgenin bir köşesi, hesaplanmak istenen konumdur. Üçgenin bilinen iki kenar uzunluğu ve bir açı değeri ile yada bir kenar uzunluğu ve iki açı değeri ile Şekil 2.4'te gösterildiği gibi üçgenin bilinmeyen köşesinin konumu hesaplanır.



Şekil 2.4 Üçgenleme yöntemi ile konum hesaplama

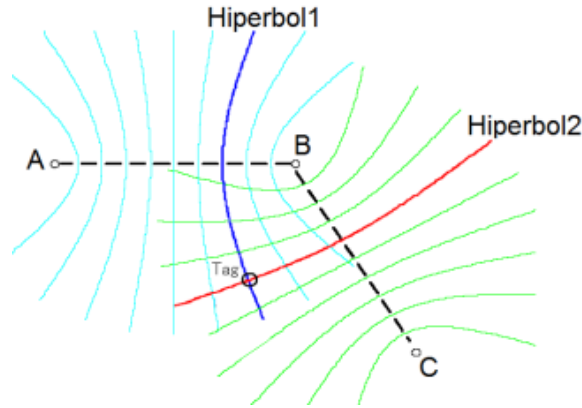
Daire kesişiminde, Şekil 2.5’de verildiği üzere mesafe ölçümleri ile merkezleri bilinen daireler oluşturulur ve dairelerin kesişimi hesaplanarak konum bulunur. Bu yöntemde bilinen noktalar genellikle konumlandırma altyapısındaki alıcı yada vericilerdir. 2 boyutta konum hesaplama için en az 3 mesafe ölçümü, 3 boyutta konum hesaplama için en az 4 mesafe ölçümü gereklidir. Daha fazla mesafe ölçümü ile aşırı tanımlı denklem sistemi oluşturulur ve ölçüm hatalarından kaynaklanan konum hatası minimize etmek için en az kareler yöntemi ile çözülür.



Şekil 2.5 Daire kesişimi yöntemi ile konum hesaplama

Mesafe farkları Şekil 2.6’da gösterildiği gibi geometrik olarak iki merkez noktası bilinen bir hiperbol tanımlar. Hiperbollerin kesişim noktası bulunarak konum hesaplanabilir (Yazici, et al., 2011). Bu yöntemde mesafe farkı kullanıldığı için, daire kesişimindeki alıcı verici zaman senkronizasyonu gerekli değildir. Buna karşın mesafe

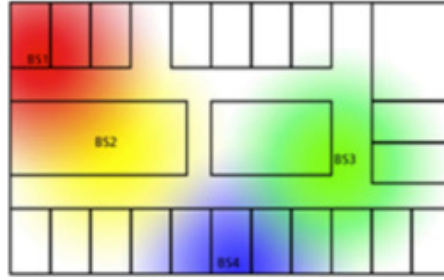
farkının elde edilebilmesi için fazladan bir verici yada alıcı kullanmak gerekir. Daire kesişiminde 2 boyutlu ortam için 1 alıcı ve 3 verici yeterli iken, hiperbol kesişiminde 1 alıcı ve 4 verici gereklidir.



Şekil 2.6 Hiperbol kesişimi yöntemi ile konum hesaplama

2.4.1.2. Deterministik Olmayan Yöntemler

Bu yöntemde iç ortamın karakteristiğini elde etmek için Şekil 2.7’de örnek verildiği gibi bir sinyal şiddeti haritası oluşturulur. Konum ölçümü için bu haritanın kullanılması parmak izi yöntemi (fingerprinting) olarak bilinir (Youssef, et al., 2003). Bu yöntem en çok WiFi sinyal şiddeti ölçümleri ile kullanılmaktadır. İlk olarak konumlandırma ortamı için sinyal şiddeti haritası çıkartılır. Konum bulma aşamasında, konumu tespit edilecek noktada sinyal şiddetleri ölçülür ve bu ölçümlerin sinyal şiddeti haritasında hangi noktaya en yakın olduğu bulunur. Harita üzerinde yapılan yakınlık analizi için olasılıksal metodlar, kNN, yapay sinir ağları, destek vektör makinesi vb. pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 Bir iç ortam için sinyal şiddeti haritası

2.4.2. Bağlı Konumlandırma ve Kullanılan Sensörler

Bağlı konumlandırma, önceden hesaplanan konum yada konumların kullanıldığı konum hesaplama yöntemidir. Son konum hesaplama anından itibaren mevcut ana kadar gezgin aracın hareketi, kullanılan sensör verileri yardımı ile hesaplanır ve son konuma ilave edilerek yeni konum bulunur.

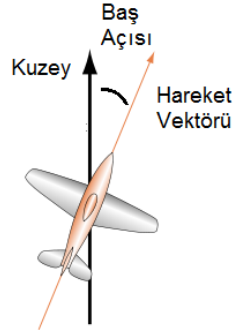
Bağlı konumlandırmanın en büyük dezavantajı, her ölçüm adımında oluşan hataların birikmesi ve doğruluğun giderek azalmasıdır. Bu sebeple hareketi hesaplamada kullanılan matematiksel modelin ve sensör ölçümlerinin doğruluğu ve tazeleme hızı önemlidir.

Bağlı konumlandırmada hareketin hesaplanabilmesi amacıyla farklı sensör yada sensör kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu bölümde bu sensörlerin başlıcalarına yer verilecek, çalışma prensipleri üzerinde durulacak ve avantaj, dezavantajları değerlendirilecektir.

2.4.2.1. Manyetik Alan Sensörü

Bağlı konumlandırmada önemli problemlerden birisi hareketin yönünü belirlemektir. Hareketin yönünü belirlemek için referans yön olarak alınan kuzey yönünün bilinmesi gerekir. Kuzey yönünden hareket vektörüne saat yönünde olan açı

baş açısı (heading) olarak adlandırılmaktadır. Baş açısı tanımı Şekil 2.8’de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.8 Baş açısı

Baş açısının mutlak ölçümü için dünyanın manyetik alanından faydalanılır ve manyetik alan ölçen sensörler kullanılır. Bunlardan en bilineni iki boyutlu ortamda ölçüm yapan pusuladır. Günümüzde hem 3 boyutta ölçüm yapabilmek hem de sayısal çıktı alabilmek için 3 eksenli manyetik alan ölçen sensörler bir entegre olarak bulunabilmektedir. Bu entegreler cep telefonu gibi birçok mobil cihazda kullanılmaktadır.

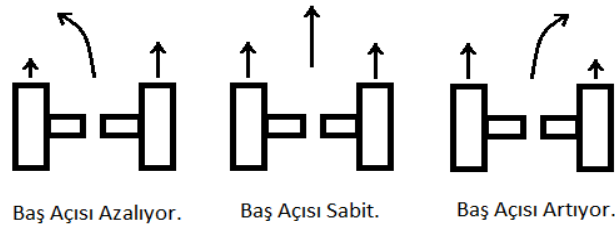
İç ortamda yer alan metal nesneler ve ekran vb. elektrikli cihazlar malesef manyetik alan ölçümlerini etkilemekte ve ölçümlerde hatalara sebep olmaktadır. Bu sebeple iç ortamda manyetik kuzey ölçümü oldukça zordur ve bölgesel olarak ciddi sapmalar görülebilmektedir.

2.4.2.2. Enkoder

Enkoder, dönme derecesini ölçen sensördür. Tekerlekli kara araçlarında, enkoder tekerleğe kuple edilerek tekerleğin dönme miktarı ölçülür ve tekerlek çapı kullanılarak tekerleğin aldığı yol bulunabilir.

Tekerlek çapındaki zamanla olabilen değişmeler her ölçüm adımında hataya sebep olur ve bu hatalar bağıl konumlandırmada birikerek artar. Tekerleğin kayma yapması durumunda da alınan mesafe ile ölçüm sonuçları arasında farklılıklar oluşur.

Enkoder, araçta birden fazla tekerleğe takılmış ise araç kinematiği kullanılarak uygun bir matematiksel model ile baş açısındaki değişimler de hesaplanabilir. Bu hesaplamaların doğruluğu, kullanılan enkoderin hassasiyetine, kullanılan matematiksel modelin doğruluğuna ve tazeleme hızına bağlıdır. şekil 2.9’da tekerlek hızlarına göre baş açısı değişimi verilmiştir. Enkoder, temiz i ortamlarda çalışan tekerlekli araçlarda bağıl konumlandırma amacı için yaygın olarak kullanılmaktadır.



şekil 2.9 Tekerlek hızları ile baş açısı değişimi

2.4.2.3. İvme ler

Hareketin lmnde kullanılan sensörlerden biri de ivmelerdir. İvme ler en basit hali ile bir piezo kristalin üzerine konulmuş bir kütleden oluşur. İvme ile kütlenin piezo kristale bindirdiği yk artar yada azalır. Bu ise piezo kristalin (+) ve (-) voltaj üretmesine sebep olur.

Ölçülen ivmenin zamana göre 2 defa integralinin alınması ile alınan yol bulunmaktadır. Tazeleme hızının yüksek olması durumunda iki ölçüm arasındaki ivme sabit kabul edilebilir. Bu durumda denklem 2.1 kullanılarak alınan yol elde edilebilir.

$$x = \frac{1}{2}at^2 \quad (2.1)$$

Bağıl konumlandırma için ölçülen ivmenin yönü önemlidir. Bu sebeple sadece ivme ölçmek tek başına yeterli olmaz, aynı zamanda ivmenin yönü de ölçülmeli ve alınan yol vektörel olarak elde edilmelidir. İvme yönünün yanlış ölçülmesi, alınan yolun farklı yönde hesaplanmasına ve kısa sürede bağıl konumlandırma doğruluğunun düşmesine sebep olacaktır. Bu yüzden ivme ölçer ile yön ölçen sensörün birbirlerine göre mümkün olan en az hata ile yerleştirilmesi önem taşımaktadır.

İvme ölçerler, farklı teknolojiler kullanılarak imal edilmektedir. Bunlardan en ekonomik ve yaygın olanı mikro elektromekanik sistemlerdir (MEMS). Bu teknoloji ile 3 eksenli ivme ölçer bir entegre olarak üretilmektedir.

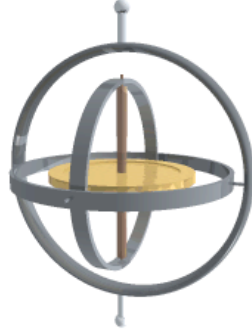
İvme ölçer sensörlerinin ölçüm sonuçlarında karşılaşılan 2 önemli sorun vardır. Birincisi, ölçüm sonuçlarındaki gürültüdür. Gürültünün filtrelenmesi amacı ile düşük geçiren filtreler kullanılmaktadır. Ancak bu durumda ise ivmede oluşan ani değişiklikler, sonuca daha yansımamaktadır. İkinci sorun zaman ile değişen ofset değeridir. Ofset değerinin zaman ile değişimi rastgele olduğunda modellenemediği için etkisi giderilememektedir.

2.4.2.4. Jiroskop

Jiroskop, sistemin uzaydaki yöneliminde oluşan dönme miktarını ölçen sensördür. Çalışma prensibi açısal momentin korunması ilkesine dayanır. Açısal moment dönen bir cismin sahip olduğu vektörel bir büyüklüktür. Açısal moment dışarıdan bir döndürme kuvveti (tork) etki etmediği müddetçe yön olarak korunur.

$$\vec{H} = I\vec{\omega} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de $\vec{H}$, açısal moment; I , atalet momenti (moment of inertia) ve $\vec{\omega}$ açısal hızı göstermektedir. Açısal momentin yönü, açısal hızın yönü ile aynıdır. Bu kanuna uygun olarak dönen bir diskin dönme yönü dışarıdan bir etki olmadığı sürece değişmez. Uzayda yerleşimi değişen bir nesnede eğer dönen bir diski dışarıdaki etkilerden yalıtılacak Şekil 2.10’da verildiği gibi bir yapı oluşturulursa, nesnenin yönelimi, diskin dönme eksenini referans alınarak ölçülebilir.



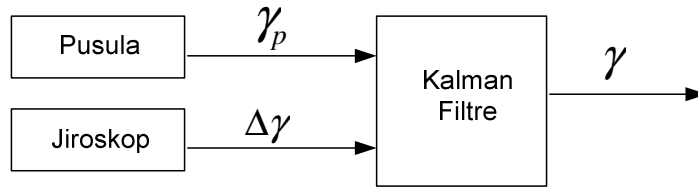
Şekil 2.10 Mekanik jiroskop (Jiroskop, 2014)

Jiroskoplar geçmişte Şekil 2.10’da gösterildiği gibi mekanik olarak imal edilirken günümüzde optik ve MEMS jiroskoplar kullanılmaktadır. Optik jiroskoplar, aynı yolu ters yönlerde kateden iki lazer ışını arasındaki faz değişimini ölçerler. Bunlara lazer ring ve fiber optik jiroskoplar örnek verilebilir. MEMS jiroskoplar ise entegre olarak imal edilmekte ve günümüz cep telefonu vb. mobil cihazlarda kullanılmakta olup doğrulukları optik jiroskoplara göre düşük sensörlerdir.

2.4.2.5. Baş Açısı Referans Sistemi

Baş açısı bilgisini daha doğru üretebilmek amacıyla farklı sensörlerin verilerini birleştiren cihazlardır. Mutlak baş açısı ölçümü veren manyetik alan ölçer ile baş açısındaki değişimleri veren jiroskop sonuçları Şekil 2.11’de verildiği gibi Kalman

Filtre yardımı ile birleştirilmekte böylece iki sensöründe avantajından faydalanan yeni bir sensör ortaya konmuş olmaktadır.



Şekil 2.11 Pusula ve jiroskop verilerinin Kalma Filtre ile birleştirilmesi

2.4.2.6. Ataletsel Ölçüm Birimi ve Ataletsel Navigasyon Sistemi

Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit, IMU), 3 boyutta ivmelenmeleri yönleri ile birlikte çıkış veren bir sensördür. IMU; genel olarak 3 eksen ivme ölçer, 3 eksen jiroskop, 3 eksen manyetik alan ölçer ve hesaplamalar için bir mikroişlemci içerir.

İçerisindeki sensörlerden aldıkları verileri Kalman filtre ile tümleştirerek gerekli hesaplamaları yaparlar. Ataletsel ölçüm biriminden alınan ivme verilerinin zamana göre iki kez integrali alınarak gidilen yol elde edilir ve bağıl konumlandırma yapılır. Ataletsel ölçüm biriminde bulunan sensörlerin kalitesi, bağıl konumlandırmanın doğruluğunu ve IMU'nun birim fiyatını doğrudan etkilemektedir.

Ataletsel Navigasyon Sistemi (Inertial Navigation System, INS), ataletsel ölçüm birimi barındıran ve birimin verilerini kullanarak bağıl konumlandırma yapan sistemlerdir. Bu sistemlerde en büyük problem, ivmeölçer verilerinin zaman ile kayan ve öngörülemez ofset değerlerinden dolayı konumun doğruluğunun zaman içinde azalmasıdır. INS cihazlarının; navigasyon seviyesi, taktik seviye, endüstri seviyesi, otomotiv seviyesi gibi farklı sınıfları vardır. Şekil 2.12'de tez çalışmalarında kullanılan ataletsel navigasyon sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Microbotics firmasının MIDG-2 INS cihazı

Navigasyon seviyesi sistemlerin fiyatları 100.000 USD civarındadır. GPS ile birleştirildiğinde dış ortamda gerçek zamanda cm seviyesinde konum bilgisi üretebilirler. Buna örnek olarak Honeywell HG9900 INS verilebilir.

Taktik seviye sınıf sistemler kendi başına navigasyon için sadece birkaç dakika kullanılabilir. Fiyatları yaklaşık 5.000 – 30.000 USD aralığındadır. Genellikle fiber optik jiroskop (FOG) ve MEMS ivme ölçer kullanırlar.

Endüstriyel seviye sistemler 500 – 2.000 USD aralığındadır. Endüstride yaygın olarak hareket takibi, ucuz insansız hava araçları ve su altı robotik uygulamalarında kullanılırlar. Kendi başına navigasyon için sadece birkaç saniye kullanılabilir.

Otomotiv seviyesi sistemler GPS gibi diğer navigasyon sistemleri ile birleştirilseler bile navigasyon için kullanılamazlar. Bunlar genellikle ABS, hava yastığı, aktif suspansiyon sistemleri gibi otomobil uygulamalarında kullanılır.

Devam eden kısımda, buraya kadar detayları verilen mutlak konumlandırma ve bağıl konumlandırma sistemlerinin birlikte kullanımları verilmektedir.

2.4.3. Mutlak ve Bağıl konumlandırmanın Birlikte Kullanımı

Mutlak konumlandırmada, her adımda yeni alınan ölçümler kullanılarak konum hesaplanır ve daha önce hesaplanan konum bilgilerini kullanılmaz. Bu nedenle mutlak konumlandırmada hataların birikmesi söz konusu olmaz ve konum doğruluğu zamanla azalmaz. Ancak ölçümlerde oluşan hatalar sebebi ile hesaplanan konumlar arasında sıçramalar olabilir. Konumlandırmada gerekli ölçümlerin alınabilmesi için ise bina içerisinde kurulacak bir altyapıya ihtiyaç vardır.

Bağıl konumlandırmada, önceden hesaplanan konumlar kullanıldığı için zamanla hata birikir ve doğruluk düşer. Hesaplanan konumlar arasında sıçramalar görülmez. Ataletsel ölçümler için bir altyapı ile alışveriş gerekmediğinden; sistem, ölçümleri kendi içerisinde alabilir ve bina içerisinde bir altyapı kurma ihtiyacına gerek kalmayabilir.

Görüldüğü üzere mutlak ve bağıl konumlandırma, farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu iki yöntem birlikte kullanıldığında, iki yöntemin de avantajlarından faydalanılabilir. İki yöntemin birleştirilmesinde Bayesian teknikler kullanılabilir. Bayesian teknikler ile konum hesaplamada gezgin birimin konumu daha önceki konumlara dayalı hesaplanan olasılık dağılımı ile modellenmektedir.

Bayesian tekniklerde gezgin birimin konumu tahmin ve düzeltme adımı ile iki adımda hesaplanır. Tahmin adımı bir sonraki adımdaki konum, daha önceki konumlara dayalı olarak durum modeli ile hesaplanır. Durum modeli gezgin birim tarafından taşınan sensörlerden veri alabilir. Bu adımda ayrıca konum hatasının kovaryansı da hesaplanır. Düzeltme adımı tahmini konum, yapılan ölçümlere dayalı gözlem modeli kullanılarak düzeltilir. Ayrıca konum hatasının kovaryansı da güncellenir. Durum modelinde işlem gürültüsü ve gözlem modelinde gözlem gürültüsü modellerin güvenilirliklerine dair ölçütlerdir.

Kalman filtre (Kwon, et al., 2006), konum hatasının sıfır ortalamalı ve Gaussian dağılım gösterdiği durumlarda uygulanan Bayesian yöntemdir. Partikül Filtre (Cen, et

al., 2006), ise konum tahminine ait olasılık dağılımının adaptif olarak örneklendiği etkili bir Bayesian yöntemdir.

Bu tez çalışmasında Kalman Filtre kullanılarak mutlak konumlandırma ile bağlı konumlandırma birleştirilmiş ve İÇKON sisteminin performansı iyileştirilmiştir. Devam eden kısımlarda Kalman Filtre ve türleri detaylandırılmaktadır.

2.4.3.1. Kalman Filtre

Havacılık ve kontrol mühendisliği alanlarında sıkça kullanılan Kalman Filtre, eksik ve gürültülü ölçümlerden doğrusal sistem modelleri kullanarak yararlı sinyaller elde etmeyi sağlar (Kalman, 1960).

Kalman Filtre, durum uzayı modeli ile gösterilen bir dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edilebilen filtredir. Gözlemlene teorisi, karar verilen bir bakış açısı temelinde, sistemin durum tahmini için izlenecek bir yoldur. Eğer sistemin stokastik veya rasgele gürültülü yönü hesaba katılırsa minimum varyans tahmini veya Kalman Filtre çok uygun olmaktadır. Kalman Filtre, geleneksel tahmin edicilerde olduğu gibi filtreleme özelliğine rağmen, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin etmede çok başarılıdır.

Kalman filtresi, durum uzay modeli biçiminde gösterilen dinamik bir sistemde, verilen gözlemleri kullanarak, sistemdeki gözlenemeyen durum değişkenlerini en az hata ile tahmin etmek için geliştirilmiş indirgemeli bir tahmin algoritmasıdır. Kalman filtresinin temel amacı bir sistemin durum (gözlenemeyen) değişkenlerini minimum varyansla tahmin etmektir. Kalman filtresi iteratif tahmin yöntemidir ve bu yöntemde parametreler her iterasyonda güncelleştirmektedir.

Durum-uzay modeli, durum ve gözlem eşitliğinden oluşur. Durum eşitliği; sistemin durumunu gösteren ancak gözlenemeyen $\{ x_k, k = 0,1,2,... \}$ stokastik süreci

ifade eder. Gözlem eşitliği ise gözlenebilen, $\{z_k, k = 0,1,2,\dots\}$ stokastik süreci gösterir. Durum ve gözlem eşitlikleri sırası ile denklem 2.3 ve denklem 2.4'te verilmiştir.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (2.3)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2.4)$$

Denklem 2.3'de $x_k \in R_q$, sistem durum kestirimini, A , $q \times q$ boyutlu durum geçiş modelini, B , $q \times m$ boyutlu kontrol girdisi modelini, $u_k \in R_m$, kontrol girdisini, $w_k \in R_q$ proses gürültüsünü göstermektedir. Denklem 2.4'de $z_k \in R_m$, gözlemi, H , $m \times q$ boyutlu gözlem modelini ve $v_k \in R_m$ gözlem gürültüsünü göstermektedir. w_k ve v_k gürültüleri (hata terimleri) sıfır ortalamalı beyaz gürültüdür ve bu gürültülerin kovaryansları sırası ile Q ve R matrisleridir.

Buna göre model varsayımları aşağıda verilmiş olup P_k , ($q \times q$ boyutlu matris) durum kestiriminin (x_k) kovaryansıdır.

$$\begin{aligned} E(x_n) &= \overline{x_n} \\ E(w_n) &= 0 \\ E(v_n) &= 0 \\ Kov(x_n) &= E[(x_n - \overline{x_n})(x_n - \overline{x_n})'] = P_n \\ E(w_n w_j') &= \begin{cases} Q_n, n = j \\ 0, n \neq j \end{cases} \\ Kov(v_n v_j') &= \begin{cases} R_n, n = j \\ 0, n \neq j \end{cases} \\ E(w_j v_n') &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Kalman filtresi, denklem 2.3 ve denklem 2.4'te yer alan A , B , u , w , H , v sistem matrislerinin, x_0 , P_0 başlangıç durum değişkenlerinin ve Q , R kovaryans matrislerinin bilindiği varsayımı altında çalışmaktadır.

Kalman filtresinin yineleyici (recursive) tahmin edici olmasından dolayı, bir önceki adımda tahmin edilen durum değişkenlerine ve durum değişkenlerinin içinde bulunduğu adımdaki tahmini yapabilmek için bu dönemin gözlem değişkenlerine ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, algoritma temel olarak iki aşama veya iki grup denklem içermektedir. Bunlar, tahmin adımı ve güncelleme adımı olarak adlandırılmaktadır. Tahmin adımında yer alan denklemler, durum değişkenlerini ve hata kovaryanslarını kullanarak bir sonraki adım için ilk tahmin değerleri oluşturmaktadır. Güncelleme adımında yer alan denklemler de gözlem değişkenlerinden aldıkları bilgileri de kullanarak, bu ilk tahmin değerlerini güncellemektedir. Denklem 2.6'da tahmin adımı ve denklem 2.7'de güncelleme adımı denklemleri verilmiştir.

Tahmin adımı:

$$\begin{aligned} x_{k+1|k} &= Ax_{k|k} + Bu_k \\ P_{k+1|k} &= AP_{k|k}A^T + Q \end{aligned} \quad (2.6)$$

Güncelleme adımı:

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1|k}H^T(HP_{k+1|k}H^T + R)^{-1} \\ x_{k+1|k+1} &= x_{k+1|k} + K_{k+1}(z_{k+1} - Hx_{k+1|k}) \\ P_{k+1|k+1} &= (1 - K_{k+1}H)P_{k+1|k} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Yukarıdaki adımlarda $x_{k+1|k}$ tahmin edilen durum kestirimini, $P_{k+1|k}$ durum kestirim hatasının tahmin edilen kovaryansını, $x_{k+1|k+1}$ güncellenen durum kestirimini, $P_{k+1|k+1}$ durum kestirim hatasının güncellenen kovaryansını göstermektedir. Şekil 2.13'te Kalman Filtre'nin işleyişi özetlenmiştir.



Şekil 2.13 Kalman filtre işleyişi

Kalman filtresinin en büyük dezavantajı yöntemin karışık olması, ciddi bir programlamaya ihtiyaç duyması ve dolayısıyla uygulanmasının zor olmasıdır. Ayrıca, Kalman filtresine ilişkin parametrelerin başlangıç değerlerinin dışsal olarak belirlenmesi ve sonuçların başlangıç değerlerine duyarlı olabilmesi de diğer önemli bir konudur.. Ancak, Kalman filtresi tekniğinin gözlenemeyen değişkenlerin tahminlerinin belirsizliğini ölçen güven aralıklarını kurabilmesi, yöntemin en güçlü tarafı olarak nitelendirilmektedir. Güven aralıklarının belirlenmesiyle, gözlenemeyen değişken tahmininin belirsizliği ölçülebilmektedir.

2.4.3.2. Diğer Kalman Filtre Türleri

Kalman filtreden geliştirilmiş farklı türler vardır. Bunların içinde en yaygın kullanılanları Genişletilmiş Kalman Filtre (Extended Kalman Filter, EKF), Unscented Kalman Filtre (UKF), Kalıcı Durum Kalman Filtre (Steady State Kalman Filtre) ve adaptif Kalman Filtredir.

Genişletilmiş Kalman Filtre (Extended Kalman Filtre, EKF):

Durum ve gözlem modelinin doğrusal olmadığı durumlar için geliştirilmiş Kalman Filtre şeklidir. Durum ve gözlem modelini oluşturan ve doğrusal olmayan fonksiyonlar türevlenebilir olmalıdır. Bu fonksiyonlardan kısmi türevler matrisi olan Jacobian matris hesaplanır. Her adımda mevcut durum değerleri için Jacobian matris hesaplanır. Bu işlem ile doğrusal olmayan denklemler, mevcut durum değerleri etrafında doğrusallaştırılmış olur. (Jimenez, 2012; Kim, et al., 2013)

Unscented Kalman Filtre (UKF):

Tahmin ve güncelleme fonksiyonları yüksek dereceli doğrusal olmayan denklemler için EKF düşük performans sergilemektedir. UKF, ortalama etrafında örneklem noktalarından bir minimum set olan sigma noktalarının seçimi için bir deterministik örneklem yöntemi olan unscented dönüşüm kullanmaktadır. Bu yöntemle ortalama ve kovaryansı daha az hata ile tahmin ederek daha başarılı sonuçlar vermektedir (S rkk , 2007; Julier, et al., 2005; Sun, et al., 2004)

Kalıcı Durum Kalman Filtre (Steady State Kalman Filtre):

Özellikle gömülü sistem uygulamalarında işlem yükünü azaltmak için kullanılmaktadır. Kalman filtre çalışmaya başladıktan bir süre sonra durum kestirim hatasının kovaryans matrisi belli değere inmekte ve genellikle sabit kalmaktadır. Kalman filtrenin bu türü, durum kestirim hatası kovaryansını sabit olarak kullanmakta ve her adımda g ncelememektedir. Bu şekilde işlem yükünü azaltmaktadır.

Adaptif Kalman Filtre:

Proses gürültüsü kovaryansı ve gözlem gürültüsü kovaryansı standart kalman filtre uygulamasında sabit alınmaktadır. Adaptif Kalman Filtre, bu matrislerin her adım için yeniden hesaplanması ile  alışan Kalman Filtre Türüdür. (Chai, et al., 2012; Akca et al., 2012)

Ayrıca yukarıda sayılanlardan başka uygulamaya özel geliştirilen Kalman Filtre türleri de mevcuttur.

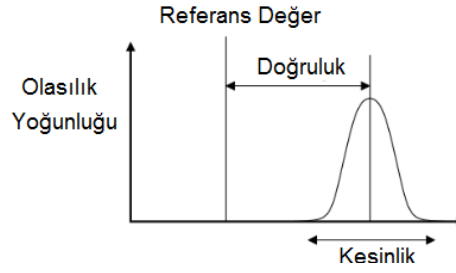
Bu kısma kadar verildiği üzere iç ortam konumlandırma sistemleri kullandıkları topolojiler, ölçüm çeşitleri, sinyal tipleri, konum hesaplama yöntemleri gibi açılardan pekçok farklılıklara sahiptir. Bu farklılıklar sebebi ile konumlandırma sistemleri aynı zamanda farklı avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler. Bu sebeple bir iç ortam konumlandırma sisteminin performansını doğruluk gibi tek bir ölçüt ile ifade etmek mümkün değildir. Devam eden kısımda bir konumlandırma sisteminin performansını değerlendirmek için kullanılan ölçütler üzerinde durulacaktır.

2.5. Performans Ölçütleri

Literatürde bir konumlandırma sisteminin performansını değerlendirmek için doğruluk, kesinlik, karmaşıklık, gürbüzlük, süreklilik, maliyet, kurulum kolaylığı vb. farklı ölçütler ortaya konmuştur.

Doğruluk en önemli ölçütlerden biridir. Genellikle doğruluk ifadesi olarak gerçek konum ile hesaplanan konum arasındaki hataların (öklit uzaklıklarının) ortalaması kullanılır. Daha düşük değerler, daha yüksek doğruluk ve daha doğru konumlandırma anlamına gelir. Doğruluk ile diğer performans ölçütleri arasında genellikle ters ilişki vardır. (Liu, et al., 2007).

Kesinlik, doğruluktan farklı olarak konumlandırma sisteminin ürettiği sonuçlar arasındaki yakınlığı ifade eder. Konum kesinliğini, konum hatasının standart sapması olarak tanımlayan çalışmalar olsa da genellikle hataların kümülatif olasılık yoğunluğu fonksiyonu (CDF) ile ifade edilir. Pratikte, konum kesinliği %95, 1.5m içindedir örneğinde olduğu gibi yüzdesel olarak tanımlanır. İki sistem doğruluğu aynı ise kesinliği yüksek olan sistemin performansı daha yüksektir. Şekil 2.14'te kesinlik ve doğruluk ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Doğruluk ve kesinlik

Karmaşıklık, bir konumlandırma sisteminin altyapısı ve kullandığı teknikler ile ilgilidir. Açık, uçuş zamanı gibi bazı ölçümler için karmaşık ve pahalı sistemler gerekebilir. Kullanılan konum hesaplama yönteminin işlem yükü karmaşıklık açısından önemli bir faktördür. Uzak konumlandırma topolojisinde, gezgin birim sayısı arttıkça işlem yükü gittikçe önem kazanacaktır. Kendini konumlandırma topolojisinde ise yüksek işlem yükü gerektiren konum hesaplama, gezgin birimlerdeki enerji tüketimini ve sistem kaynaklarını olumsuz etkiler. Bu aynı zamanda konum tazeleme hızı üzerinde de etkili olacaktır. Konum tazeleme hızı özellikle gezgin birimin hızlı hareket ettiği uygulamalarda önemlidir. Sistem birimlerinin, altyapısının, kullandığı tekniklerin ve konum hesaplama yönteminin karmaşıklığının düşük olması sistem karşılaştırmalarında bir ölçüt olarak değerlendirilmektedir.

Gürbüzlük, konumlandırma için sistemde oluşabilecek hatalarda yada ortam değişimlerinde doğru sonuçlar üretmeye devam etmek olarak ifade edilebilir. Gürbüz bir sistem, bir vericinin sinyali bloke olması, zor çalışma şartlarında bir vericinin arızalanması, ortamdaki nesnelerin yer değiştirmesi gibi durumlarda çalışmasına devam edebilen sistemdir. Bu anlamda gürbüz bir sistemin ortamdaki değişimlerden etkilenmemesi ve konumlandırma sonuçlarını doğru üretmesi istenir.

Süreklilik, bir sistemin konumlandırma alanını ne kadar kapsadığı ve hangi sıklıkta sonuç üretebildiğini ifade eder. İç ortamda yer alan farklı engellerden dolayı, sistem her noktada konum üretemeyebilir yada bazı noktalarda tazeleme hızı düşebilir. Yapılacak uygulamanın ihtiyacına göre sistemin sağladığı süreklilik değerlendirilmelidir.

Ölçeklenebilirlik, sistemin konumlandırma alanının ve konumlandırma yapılan nesnelerin doğruluk, kesinlik gibi diğer performans kriterlerinden ödün vermeden arttırılabilmesi anlamına gelir. Konumlandırma alanı genişlediğinde yada gezgin birim sayısı arttığında kullanılan sinyallerin karışma olasılığı artar. Uzak konumlandırma topolojisinde gezgin birim sayısının artması, altyapıdaki işlem gücünün artması anlamına gelir ve altyapıdan kaynaklı bir sınır vardır. Kendini konumlandırma topolojisinde gezgin birimler sadece alıcı ise, ortamda kullanılabilecek gezgin birim sayısı sadece fiziksel boyutlar ile ilgilidir.

Maliyet, ticarileşmiş bir konumlandırma sistemi için en önemli ölçütlerdendir. Maliyet sadece kurulum maliyeti olarak değil, zaman, hacim, ağırlık ve enerji tüketimi boyutları ile de ele alınmalıdır. Kompleks sistemlerin kurulum maliyetleri yüksektir. Bu sistemlerin teslim zamanları ve arızaların çözüm sürelerinin de yüksek olması beklenir. Sistemin birimlerinin özellikle gezgin birimin boyutları ve ağırlıkları, taşınabilmesi açısından önemlidir. Sistemin enerji tüketimi batarya ile yapılan uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bu anlamda pasif RFID gibi teknolojiler enerji harcaması olmadığı için tercih edilmektedir.

Kurulum kolaylığı, sistemin kurulumunda yapılacak kablolar, sabit birimlerin yerlerinin tespit edilmesi, gerekli sabit birim sayısı, kullanılacak RF bant genişliği ve frekansı gibi parametreler ile oluşan bir ölçüttür. Kurulum kolaylığı, ölçeklenebilirlik ve maliyet ölçütleri ile de ilgilidir.

Devam eden bölümde tez kapsamında üzerinde çalışılan İÇKON sisteminin bu bölümdeki başlıklar kapsamında detayları verilmektedir.

BÖLÜM 3

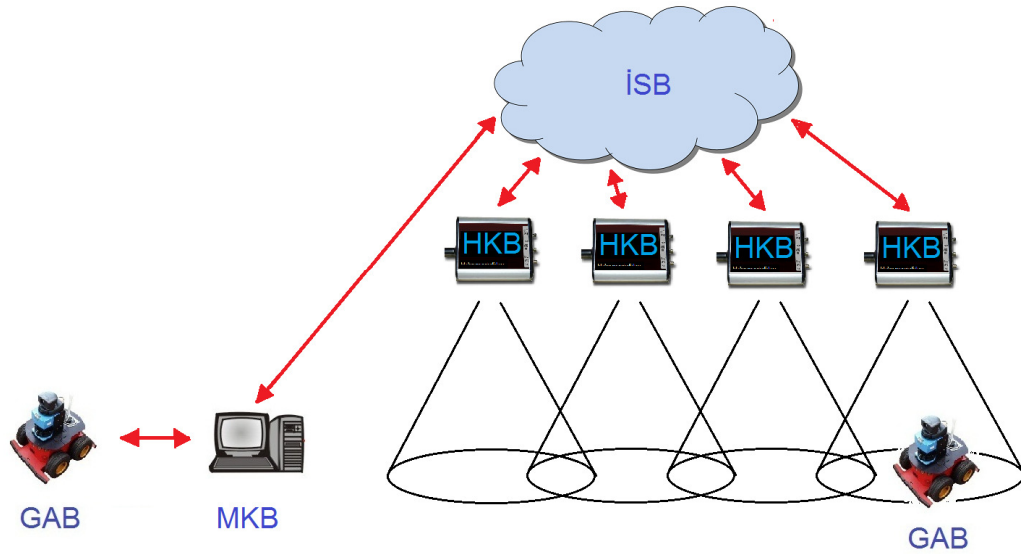
İÇ ORTAM KONUMLANDIRMA SİSTEMİ

İç ortam konumlandırma sistemi (İÇKON), GPS gibi uydu tabanlı konumlandırma çözümlerinin çalışmadığı iç ortamlarda, sadece sesüstü sinyalleri kullanarak konumlandırma için geliştirilmiş bir sistemdir (Yazıcı, et al., 2012). İÇKON hücresel yapıda ölçeklenebilir olarak tasarlanmış olup konumlandırma alanı yeni hücrelerin eklenmesi ile genişletilebilmektedir.

İÇKON sistemi kendini konumlandırma topolojisinde çalışmaktadır. Altyapıda yer alan sesüstü vericilerin yaptığı yayınları alan gezgin birim, sinyaller arasındaki ulaşma zaman farkını kullanarak deterministik bir yöntem olan hiperbol kesişimi ile kendi konumunu hesaplamaktadır.

İÇKON sisteminde hiperbol kesişiminin hesaplanması için en az kareler yöntemi kullanılmaktadır. Sistem, iç ortamda vericilerin yerleştirildiği konumlar ve gezgin birimin konumuna bağlı olarak görüş alanında olan iç ortamlarda cm seviyesi doğrulukta konum hesaplayabilmektedir.

İÇKON sisteminde; Merkezi Kontrol Birimi (MKB), Hücre Kontrol Birimi (HKB), Gezgin Algılayıcı Birim (GAB), İletişim Sistemi Birimi (İSB) olmak üzere dört adet alt birim bulunmaktadır. Şekil 3.1’de sistemin temsili gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1 İÇKON Sistemi'nin temsili gösterimi

MKB, sisteme ait verilerin saklandığı ve sistemin kontrol edildiği birim olup Intel i5 işlemciye sahip güncel konfigürasyonda bir bilgisayar donanımı ve üzerinde windows7 işletim sisteminde çalışan bir kontrol yazılımından oluşmaktadır. MKB, sistemdeki hücrelerin koordineli çalışabilmesi amacı ile ethernet tabanlı İSB üzerinden HKB'lere kontrol ettiği vericilerin kimlik bilgileri, yayın zamanları vb. bilgileri gönderir. HKB'lerin senkronizasyonunu sağlayan eşzamanlayıcı da MKB tarafından kontrol edilmektedir. MKB, sistem kurulumu öncesi ortamın modellenmesi ve vericilerin yerleşim yerlerine göre kapsama alanının hesaplanması fonksiyonlarına da sahiptir.

HKB hücreye ait vericileri kontrol eden bir birimdir. HKB, ASK(Amplitude Shift Keyin) modülasyonlu 40KHz sinyalleri oluşturur ve en az 3 adet sesüstü vericisine gönderir. Hücre içindeki sinyal çevrimi eşzamanlayıcıdan gelen sinyal ile başlatır ve MKB tarafından bildirilen zamanlarda vericilerin yayın yapmasını sağlar.

GAB, gezgin araçta yer alan ve sesüstü sinyaller arasındaki ulaşma zaman farklarını ölçen ve konum hesaplayan birimdir. Sinyaller üzerindeki kimlik bilgisini

özmler ve hafızasında yüklü olan çizelgeden yayın yapan vericinin koordinatlarını elde eder. Sinyaller arasındaki ulaşma zaman farkı, merkezleri iki vericinin konumları olan bir hiperbol tanımlar. İki hiperbolün kesişme noktasını en az kareler yöntemi ile hesaplayarak konumunu bulur. GAB sadece sesüstü alıcılara sahiptir ve yayın yapmaz. GAB, hareket halinde iken konuma bağlı olarak bulunduğu yatay seviyenin üzerinde her yönden gelen sinyali alabilmelidir. GAB üzerinde kullanılan sesüstü alıcıların hüzme açısı 90° dir. Bu sebeple alıcılar yataya 45° aı ile yerleştirilmiştir. Sistemin daha gürbüz olması için hüzme açısı 60° kabul edilmiş ve yatayda tüm yönlerden gelen sinyallerin alınabilmesi için GAB üzerinde 60° aralıklar ile 6 sesüstü alıcı yerleştirilmiştir. şekil 3.2’de Pioneer gezgin robota entegre edilmiş GAB görülmektedir.



şekil 3.2 Pioneer gezgin robota entegre edilmiş GAB

İSB ise MKB ve HKB’ler arasındaki haberleşmenin gerçeklenmesi için ethernet tabanlı TCP/IP mimarisinde yıldız topolojisinde bir ağ alt yapısı ve HKB’ler arası senkronizasyonu sağlayan eşzamanlayıcıdan oluşur. Eşzamanlayıcı, MKB’den aldığı komutla her çevrim başında HKB’lere sinyal yayınlar.

İÇKON sisteminin temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

i-Konumlandırma Alanı: İç ortamlar için konumlandırma alanı hücre sayısına bağlı olarak genişleyebilmektedir.

ii-Hassasiyeti: Görüş alanındaki iç ortamlarda 5cm.

iii-Konum Bilgisi Tazeleme Hızı: Saniyede en az 2 güncelleme.

iv-Sistemden Faydalabilecek Gezici Birim Sayısı: Ortama fiziksel olarak yerleştirilebilecek birim adedinde.

v-Kullanıcı Arayüzü: RS-232.

vi- Kompanzasyon: Sıcaklık kompanzasyonu.

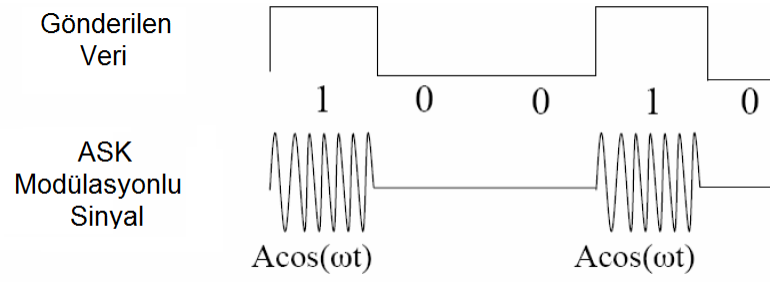
vii- Veri Formatı: Yerel koordinat sistemi.

Devam eden kısımlarda İÇKON sisteminde mesafe farkı ölçümü, konum hesaplama ve konum kontrolünün detaylarına yer verilecektir.

3.1. Mesafe Farkı Ölçümü

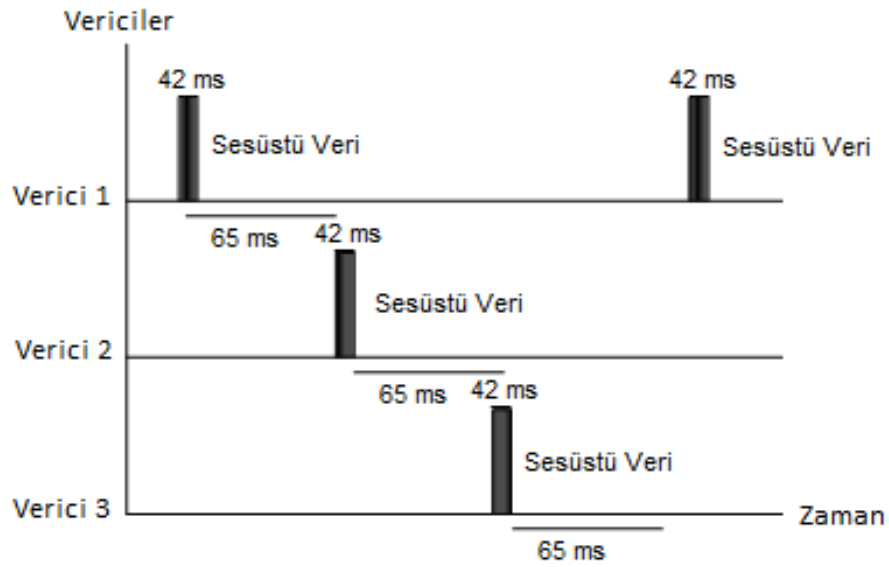
Sistem, MKB'nin eşzamanlayıcıya ilgili komutu göndermesi ile çalışmaya başlar. Eşzamanlayıcı her çevrim başında, HKB'lere senkronizasyon sinyali yayınlar. HKB, eşzamanlayıcıdan gelen sinyale senkronize olur ve programlanan zamanlarda hücre içinde yer alan sesüstü vericileri çalıştırır.

Sesüstü vericilerin hepsi 40KHz frekansında yayın yapmaktadır. Sesüstü sinyallerin karışmasını önlemek amacıyla vericiler, belirlenen gecikmeler ile sırayla yayın yapar. Bu gecikmeler, sesüstü sinyalin ortamda tamamen sönümlenmesi için geçen süre temel alınarak belirlenmiştir. Her vericinin yaydığı sinyale vericinin kimlik bilgisi Şekil 3.3'te gösterildiği üzere ASK modülasyonu ile kodlanmıştır.



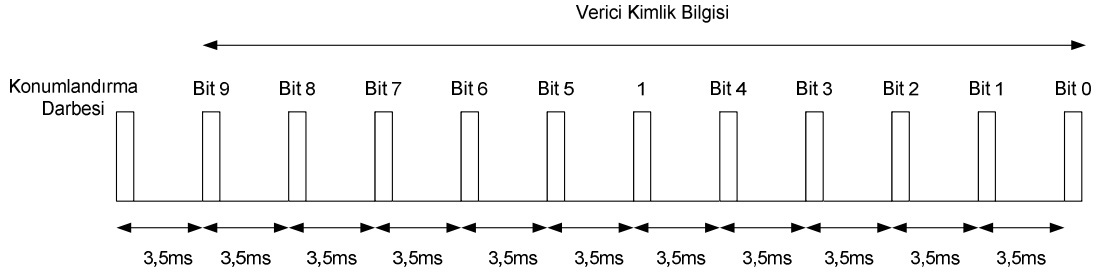
Şekil 3.3 ASK modülasyonu

Hücre içindeki vericilerin yayın zamanlamaları Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4 İÇKON Sistemi’ne ait vericilerin yayın zamanlamaları

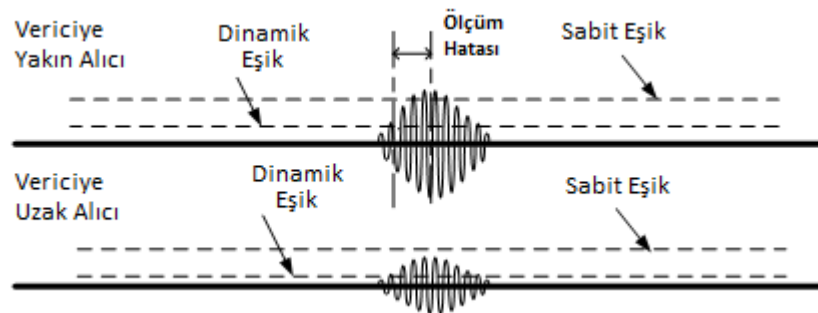
Sesüstü vericilerin yaptığı yayınların GAB’a ulaşma anının hassas olarak ölçülebilmesi gerekmektedir. Bu sebeple yayının başına konumlandırmada kullanılması için zaman ölçümü amacıyla bir darbe konmuştur. Verici yayını veri katarı Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 Verici yayını veri katarı

GAB, 35ms boyunca sesüstü yayının olmadığı bir boşluk arar. Boşluk tespiti ile yayın başlangıcı beklenmeye başlanır. GAB, üzerindeki 6 ultrasonik alıcıyı hızlı bir şekilde tarar. Sinyalin ilk ulaştığı alıcı, bu yüksek hızlı tarama ile tespit edilir. Devamında bu alıcının sinyali yüksek hızla örneklenir. Bu örneklemenin amacı ise sinyalin geliş anını hassas tespit edebilmek amacıyla dinamik eşik uygulamasına hazırlıktır.

Vericiye yakın olan alıcı sinyali daha güçlü alırken, uzak olan alıcı daha zayıf almaktadır. Sinyalin geliş anını tespit etmek için sabit bir eşik değeri kullanıldığında, zayıf ve güçlü sinyaller aynı anda ulaşırsa bile sabit eşik değerini farklı zamanda geçmektedir. Bu ise geliş anını tespit etmede hatalara sebep olmaktadır. Eşik seviyesinin yüksek kalması durumunda ise zayıf sinyallerin tespit edilememe ihtimali vardır. Bu durum Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 Sabit ve Dinamik Eşik Uygulaması

Dinamik eşik uygulamasında, sinyalin zarfı yüksek hızda belli bir süre örneklenmekte ve örnek değerleri, zaman etiketleri ile birlikte hafızada saklanmaktadır. Saklanan örneklerin en büyük değeri bulunmakta ve bu değerin %50'sine sahip ilk örneğin zamanı, sinyalin geliş zamanı olarak alınmaktadır. Böylece zayıf ve güçlü sinyaller için geliş anı tespitindeki hatalar ortadan kaldırılmıştır. Geliş anının doğru tespit edilebilmesi için sinyal zarfındaki en yüksek eğim anının kullanılması önemlidir. Zarfın en yüksek eğimi ise şiddetin, en yüksek seviyenin yarısı civarında oluşmaktadır. Bu sebeple %50 oranı seçilmiştir.

GAB, kendisine ulaşan iki yayın arasındaki zaman farkını ölçer. Üzerinde bulunan sıcaklık sensöründen okuduğu sıcaklık değeri ile 40KHz sesüstü sinyalin hızını hesaplar ve zaman farkı ile çarparak mesafe farkına çevirir.

Hesaplanan mesafe farkı, merkezleri verici koordinatları olan bir hiperbol tanımlar. Üç verici sinyalinden, vericilerin konumlarının merkezleri olduğu 2 hiperbol elde edilmektedir. GAB, bu iki hiperbolün kesişimi hesaplayarak kendi konumu bulmaktadır.

3.2. Konum Hesaplama

GAB yazılımında, hiperbol kesişimi hesaplamada en az kareler kullanılarak gerçekleştirilen algoritma aşağıda verilmiştir; Bu formüllerde; (x, y, z) , hesaplanacak GAB konumunu; (x_i, y_i, z_i) , i nolu vericinin konumunu; r_i , i nolu vericiden hesaplanan mesafeyi; r_{ij} , $r_i - r_j$ mesafe farkını göstermektedir. Denklem 3.1'de vericilerin merkez olduğu dairelerin denklemleri verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 (x - x_1) + (y - y_1) + (z - z_1) &= r_1^2 \\
 (x - x_2) + (y - y_2) + (z - z_2) &= (r_1 + r_{21})^2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 (x - x_i) + (y - y_i) + (z - z_i) &= (r_1 + r_{i1})^2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

En az kareler yönteminde, hiperbol denklemlerini oluşturmak için ilk vericinin denklemi, diğer vericilerin denklemlerinden çıkartılır. Denklem 3.1'deki eşitlikler, matris formunda denklem 3.2'de gösterilmektedir.

$$2 \begin{bmatrix} x_2^f & y_2^f & z_2^f \\ x_3^f & y_3^f & z_3^f \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i^f & y_i^f & z_i^f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^f \\ y^f \\ z^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2^f - r_{21}^2 \\ k_3^f - r_{31}^2 \\ \dots \\ k_i^f - r_{i1}^2 \end{bmatrix} + 2r_1 \begin{bmatrix} -r_{21} \\ -r_{31} \\ \dots \\ -r_{i1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

(x^f, y^f, z^f) , denklem 3.3'te; (x_i^f, y_i^f, z_i^f) ise denklem 3.4'te tanımlanmaktadır.

$$x^f = x - x_1, \quad y^f = y - y_1, \quad z^f = z - z_1 \quad (3.3)$$

$$x_i^f = x_i - x_1, \quad (i = 2, 3, \dots) \quad (3.4)$$

Denklem sistemini sadeleştirmek için denklem 3.5'te verilen tanımlama yapılmıştır.

$$k_i^f = (x_i^f)^2 + (y_i^f)^2 + (z_i^f)^2, \quad (i = 2, 3, \dots) \quad (3.5)$$

Yukarıda verilen tanımlamalar kullanıldığında denklem (3.2), aşağıda verilen denklem 3.6 formunda yazılabilir.

$$2As = c + 2r_1 d$$

$$A = \begin{bmatrix} x_2^f & y_2^f & z_2^f \\ x_3^f & y_3^f & z_3^f \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i^f & y_i^f & z_i^f \end{bmatrix} \quad s = \begin{bmatrix} x^f \\ y^f \\ z^f \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} k_2^f - r_{21}^2 \\ k_3^f - r_{31}^2 \\ \dots \\ k_i^f - r_{i1}^2 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} -r_{21} \\ -r_{31} \\ \dots \\ -r_{i1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Bunun en az kareler çözümü ise denklem 3.7'de verilmiştir.

$$s = \frac{1}{2} (A^T A)^{-1} A^T (c + 2r_1 d) \quad (3.7)$$

İÇKON sistemi 3 boyutlu ortamda çalışmaktadır. Ancak GAB'ın yüksekliğinin sabit olmasından dolayı en az kareler yöntemi üzerinde bazı sadeleştirmeler yapılmıştır. Denklem 3.6'da bulunan matrislerin, İÇKON sistemi için uyarlanmış şekilleri, denklem 3.8'de gösterilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} x_2^f & y_2^f \\ x_3^f & y_3^f \\ \dots & \dots \\ x_i^f & y_i^f \end{bmatrix} \quad s = \begin{bmatrix} x^f \\ y^f \end{bmatrix} \quad c_n = \begin{bmatrix} k_2^f - r_{21}^2 - z_2^f z^f \\ k_3^f - r_{31}^2 - z_3^f z^f \\ \dots \\ k_i^f - r_{i1}^2 - z_i^f z^f \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} -r_{21} \\ -r_{31} \\ \dots \\ -r_{i1} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de, z eksenini değeri sabit olduğu için c matrisine dâhil edilerek c_n matrisi oluşturulmuştur. Bu işlem ardından s matrisinin çözümü denklem 3.7'de verildiği gibi yapılmaktadır.

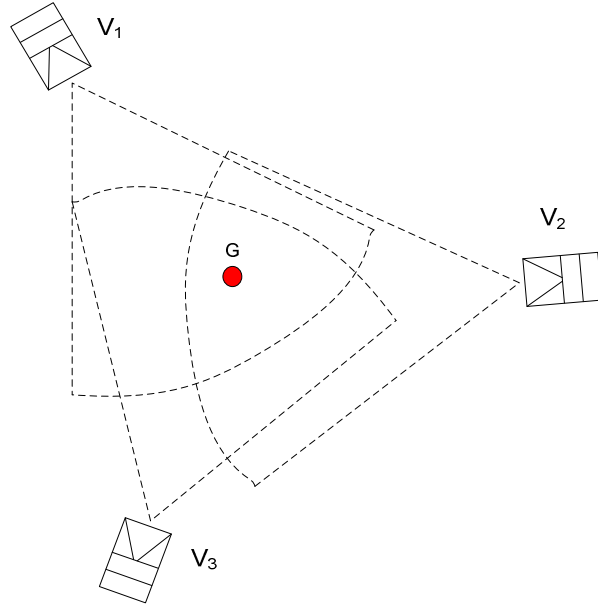
Burada nadir de olsa, $A^T A$ matris çarpımının tersinin alınamaması gibi bir durum söz konusu olabilmektedir. Bu durum vericiler aynı koordinatlara konulduğunda gerçekleşmektedir. Böyle bir durumda vericilerden birinin koordinatlara milimetrenin binde biri kadar fark ilave edilmesi, işlemlerde sıfıra bölmeyi önlemektedir.

3.3. Hüzme Açısı Tabanlı Konum Kontrolü

Sesüstü sinyaller, iç ortamda bulunan duvar vb. engellerden geçememekte ve geri yansımaktadır. Yansımalarından gelen sinyaller, orijinal sinyalin üzerine binmekte ve verici kimliğinin yanlış okunmasına sebep olabilmektedir. Bazı durumlarda ise yayınlanan sinyal GAB'a direkt ulaşamamakta ve sadece yansıması ulaşmaktadır. Bu durumda sinyalin yolu uzadığından GAB'a daha geç ulaşmaktadır. Yansımalarından kaynaklanan hatalar sebebi ile konum yanlış hesaplanabilmektedir.

Yansımalarından kaynaklı hesaplanan yanlış konumların tespit edilmesi için hüzme açısı tabanlı konum kontrol algoritması geliştirilmiştir. Sistemde yayın yapan vericiler, belirli bir hüzme açısına sahiptir. Bu sebeple bu hüzme açısı dışında yayınları

yok kabul edilebilir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda sistemde kullanılan sinyalin 7m'den daha uzak mesafelerde sağlıklı algılanamadığı tespit edilmiştir. Bu durumda bir vericinin yayın alanı, 7m uzunluğunda ve vericinin hüzmeye açısında bir koni ile temsil edilebilir. Konum hesaplamada kullanılan vericilerin koordinatları ve bakış yönleri, GAB tarafından bilinmektedir. Bu durumda GAB tarafından hesaplanan konumun, sinyali kullanılan her vericinin hüzmeye açısı içinde ve en fazla 7m uzaklığında kalması gereklidir. Şekil 3.7'de, V_1 , V_2 ve V_3 vericilerinin sinyalleri kullanılarak hesaplanan G konumu ve vericilerin 7m'lik hüzmeleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere G konumu 3 vericinin de hüzmeleri içerisinde kalmaktadır.



Şekil 3.7 Hüzmeye açısı tabanlı konum kontrolü

Bu mantıktan yola çıkarak, GAB hesapladığı konumun, sinyali kullanılan vericilerin hüzmeye açılarının kesişiminde ve en fazla 7m mesafede kalıp kalmadığını kontrol eder. Eğer bu şart sağlanmıyorsa, bu durumda yansımalarından gelen bir sinyalin kullanıldığı kabul edilmekte ve hesaplanan konum atılmaktadır.

BÖLÜM 4

İÇKON PERFORMANS İYİLEŞTİRMELERİ

Tez çalışması öncesindeki İÇKON sistemi, hücresele bir yapıya sahip, sesüstü sinyallerin ulaşma zamanını hassas tespit etmek için sıcaklık düzeltmesi ve dinamik eşik uygulaması kullanan, ulaşma zaman farkları ile hiperboller oluşturup en az kareler yöntemini kullanarak ardışıl sinyaller ile konum hesaplayan ve hüzme açıları tabanlı konum kontrolü ile hatalı konumları eleyen bir sistemdir. Bu bölümde İÇKON sisteminin performansını olumsuz etkileyen şartlar incelenmiş ve bu durumlarda sistemin performansının iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar verilmiştir.

İÇKON sisteminde kullanılan en az kareler yöntemi kuadratik sonuç vermektedir. Köklerden birisinin sanal kısma sahip olması yada hesaplanan konumlardan birinin hüzme açıları dışında kalması durumunda bu çözüm yazılımda atılmaktadır. Ancak bazı şartlarda en az kareler ile hesaplanan iki çözümde gerçek ve hüzme açıları içinde kalabilmektedir. Bu durumda hangi çözümün gerçek konum olduğu bilinmemektedir.

Konum hesaplamada kullanılan vericilerin ve GAB'ın oluşturduğu geometri de, hesaplanan konumun doğruluğunda önemli bir yere sahiptir. GAB tarafından konum hesaplamada kullanılan 2 vericinin GAB'a göre yakın yönlerde olması durumunda hesaplanan konumun hatası daha yüksek olmakta ve sistemin doğruluğu düşmektedir. Bu durumlarda hesaplanan konumlar sistemin doğruluk ve kesinliğini düşürmektedir.

İÇKON sistemi hücresele bir yapıya sahiptir ve GAB konum hesaplamak için en az 3 vericinin sinyalini almak zorundadır. Altyapıdaki vericilerin ortama yerleştirilmesinde konumlandırma alanındaki her noktaya en az üç vericinin sinyalinin ulaşması esas alınmaktadır. İç ortamlar yerine göre karışık bir yapıya sahip olabilmekte, görüş alanını engelleyen kolon, duvar vb. yapılar bulunabilmektedir. Bu sebeple her

zaman tüm noktalarda 3 vericiden sinyal alınamayabilir. GAB bu noktalarda konum hesaplayamamakta ve konum bilgisi kesintiye uğramaktadır. Bu kesinti özellikle hücre geçişlerinde ortaya çıkmaktadır. Ortama yerleştirilen vericilerin arızalanması sonucu yine benzer kesintiler oluşmaktadır. Bu sorunlar sistemin süreklilik ve gürbüzliğini düşürmektedir.

İÇKON sistemi mutlak konumlandırma yaptığı için hesaplanan her konum önceden hesaplanan konumlardan bağımsızdır. Bu sebeple ardışıl sonuçlar arasında gürültü mevcuttur ve sıçramalar olabilmektedir. Bu sıçramalar özellikle otonom robot kontrolünde sıkıntılara yol açabilmektedir.

Tez kapsamında en az kareler ile konum hesaplama yöntemi yerine kullanılabilecek farklı algoritmalar çalışılmış ve iteratif bir konum hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca hesaplanan konumlardan düşük GDOP (Geometric Dilution of Precision) değerlerine sahip kötü geometrilerden elde edilen çözümlerini elemek için geometri tabanlı bir konum kontrol algoritması sisteme eklenmiştir. GAB'ın üç vericiden sinyal alamadığı ve bu sebeple konum üretemediği noktalarda konumun çıktısının devam ettirilmesi ve hesaplanan konumlardaki gürültülerin azaltılması için sistem odometri ölçümlerine dayalı bağıl konumlandırma ile desteklenmiştir. Mutlak ve bağıl konumlandırma verilerinin birleştirilmesi için sıkı bağlı bir yapı tasarlanmıştır. Bu yapının kurulmasında bağıl konumlandırmadaki en önemli problemin baş açısındaki kayma olduğu görülmüş ve GAB, doğruluğu düşük ancak mutlak olarak baş açısı ölçmesi için geliştirilmiştir. GAB'ın ürettiği baş açısı ile bağıl konumlandırma desteklemiş ve bağıl konumlandırma sonucu ile de GAB konum çıktısı birleştirilmiştir. Bu birleştirme çalışmalarında kullanılan Kalman Filtre katsayıları adaptif hale getirilerek sistem performansı artırılmıştır.

Devam eden kısımlarda geliştirilen konumlandırma algoritması, geometri tabanlı konum kontrolü ve sistemin bağıl konumlandırma ile desteklenmesine yer verilmiştir.

4.1. Konum Hesaplama Yöntemi Üzerine Yapılan Çalışmalar

İÇKON sistemi ulaşma zaman farklarını kullanarak hiperbol kesişimi ile konum hesaplamaktadır. 3 boyutta merkezleri (V_{1x}, V_{1y}, V_{1z}) ve (V_{2x}, V_{2y}, V_{2z}) olan hiperboloid eşitliği denklem 4.1’de verilmiştir.

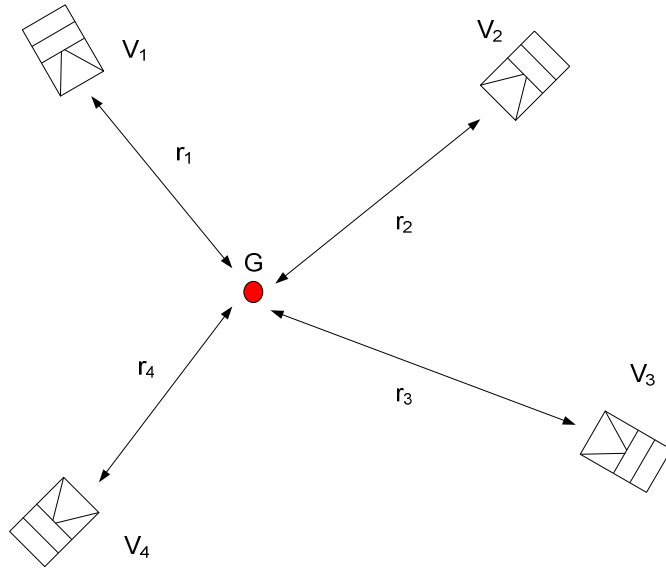
$$\sqrt{(x - V_{1x})^2 + (y - V_{1y})^2 + (z - V_{1z})^2} - \sqrt{(x - V_{2x})^2 + (y - V_{2y})^2 + (z - V_{2z})^2} = C_1 \quad (4.1)$$

Bir İÇKON hücresinde V_1, V_2, V_3, V_4 olmak üzere 4 verici bulunmaktadır. 3 boyutlu uzayda noktasal olarak konum hesaplamak için 3 hiperboloid gereklidir. Bu hiperboloidler sırasıyla $(V_1, V_2), (V_1, V_3)$ ve (V_1, V_4) ikililerinden elde edilir. Görüldüğü üzere 3 boyutlu uzayda noktasal konum hesaplamak için 4 vericiye ihtiyaç vardır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda İÇKON sistemi bir kat üzerinde uygulanmış ve Pioneer 3-DX araştırma robotu kullanılmıştır. Bu durumda GAB’ın yüksekliği bilindiğinden konum sadece x ve y eksenlerinde hesaplanmıştır. Bu durumda noktasal konum hesaplamak için 3 verici yeterli olmaktadır.

Devam eden kısımlarda, doğrusal olmayan hiperbol denklemlerini çözmek için çalışılan yöntemler verilmektedir.

4.1.1. Direkt Doğrusallaştırma Yöntemi

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere ortamda V_1, V_2, V_3, V_4 ile gösterilen 4 adet sesüstü verici ve G ile gösterilen GAB yer alsın. (x_g, y_g) noktası, bulmak istediğimiz GAB konumunu; (V_{ix}, V_{iy}) , i nolu İÇKON vericisinin konumunu; r_i , GAB ile i nolu verici arasındaki mesafeyi; t_i , i nolu vericiden sinyalin ulaşma anını; v , ses hızını gösterebilir.



Şekil 4.1 Bir İÇKON hücresinde vericiler ve GAB

GAB konumu olan G noktası, merkezlerinde vericiler olan 4 dairenin kesişim noktasıdır. i nolu vericinin, merkezi olduğu dairenin formülü, denklem 4.2’de verilmiştir.

$$r_i^2 = (x_g - V_{2x})^2 + (y_g - V_{2y})^2 + (z_g - V_{2z})^2 \quad (4.2)$$

GAB’ın yüksekliği olan z_g , sabit olduğu ve bilindiği için denklem 4.3’te verilen tanımlama yapılabilir.

$$C_i = (z_g - V_{iz})^2 \quad (4.3)$$

Denklem 4.2’de, denklem 4.3 yerine konur ve parantezler açılarak yazılır ise denklem 4.4 elde edilir.

$$r_i^2 = x_g^2 - 2x_g V_{ix} + V_{ix}^2 + y_g^2 - 2y_g V_{iy} + V_{iy}^2 + C_i \quad (4.4)$$

GAB ile vericiler arasındaki mesafelerin farkı, ses hızı ile ilişkilendirildiğinde denklem 4.5 bulunur.

$$r_i - r_1 = v(t_i - t_1) \quad (4.5)$$

Denklem 4.6'daki tanımlama yapılır ve denklem 4.5'te yerine konulur ise denklem 4.7 elde edilir.

$$t_{i1} = t_i - t_1 \quad (4.6)$$

$$r_i = v \cdot t_{i1} + r_1 \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'de eşitliğin iki tarafının da karesi alındığında denklem 4.8, yeniden düzenlendiğinde denklem 4.9 bulunur.

$$r_i^2 = (v \cdot t_{i1})^2 + 2v \cdot t_{i1} r_1 + r_1^2 \quad (4.8)$$

$$-2r_1 = v \cdot t_{i1} + \frac{r_1^2 - r_i^2}{v \cdot t_{i1}} \quad (4.9)$$

Denklem 4.9'da, denklem 4.4 yerine konulur ve gruplanır ise denklem 4.10 elde edilir.

$$-2r_1 = v \cdot t_{i1} + \frac{-2(V_{1x} - V_{ix})x_g + V_{1x}^2 - V_{ix}^2 - 2(V_{1y} - V_{iy})y_g + V_{1y}^2 - V_{iy}^2 + C_1 - C_i}{v \cdot t_{i1}} \quad (4.10)$$

Bu denklemde, bilinen değerler gruplanıp denklem 4.11, 4.12 ve 4.13'te verilen tanımlamalar yapılabilir:

$$a_i = \frac{-2(V_{1x} - V_{ix})}{v \cdot t_{i1}} \quad (4.11)$$

$$b_i = \frac{-2(V_{1y} - V_{iy})}{v \cdot t_{i1}} \quad (4.12)$$

$$d_i = v \cdot t_{i1} + \frac{V_{1x}^2 - V_{ix}^2 + V_{1y}^2 - V_{iy}^2 + C_1 - C_i}{v \cdot t_{i1}} \quad (4.13)$$

Bu tanımlar yerine konulduğunda denklem 4.14 elde edilir.

$$-2r_1 = a_i x_g + b_i y_g + d_i \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'teki eşitlik, $i = 2$ ve $i = 3$ için yazılıp birbirine eşitlendiğinde denklem 4.15 bulunur. Benzer denklem 4.13, $i = 3$ ve $i = 4$ için yazılıp birbirine eşitlenirse denklem 4.16 elde edilir.

$$a_2x_g + b_2x_g + d_2 = a_3x_g + b_3x_g + d_3 \quad (4.15)$$

$$a_2x_g + b_2x_g + d_2 = a_4x_g + b_4x_g + d_4 \quad (4.16)$$

Denklem 4.15 ve denklem 4.16, çözülmek istenen (x_g, y_g) için yeniden düzenlenirse, denklem 4.17'de verilen eşitlikler bulunur.

$$\begin{aligned} (a_2 - a_3)x_g + (b_2 - b_3)x_g &= d_3 - d_2 \\ (a_2 - a_4)x_g + (b_2 - b_4)x_g &= d_4 - d_2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Bu denklem çiftinin çözümü için denklem 4.18'de verilen tanımlar yapılabilir:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_2 - a_3 & b_2 - b_3 \\ a_2 - a_4 & b_2 - b_4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} x_g \\ x_g \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} d_3 - d_2 \\ d_4 - d_2 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Bu durumda çözüm denklem 4.19'de verilmiştir.

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad (4.19)$$

Bu yöntem alınan ulaşma zaman farkları kullanılarak Matlab yazılımı ile denenmiş ve çalışırılığı görülmüştür. Bu yöntem ile aslında iki hiperbol denkleminde, hiperbollerin kesişimlerinden geçen doğrunun denklemi elde edilmektedir. İki hiperbol çiftinden iki doğru denklemi elde edilmekte doğruların kesişimi ile konum hesaplanmaktadır.

Bu yöntem ile Matlab'da yapılan denemelerin olumlu sonuç vermesinin ardından, yöntem C ile GAB'ta çalıştırılmak üzere kodlanmış ancak yapılan

denemelerde olumlu sonuçlar alınamamıştır. Yapılan inceleme ve karşılaştırmalarda, denklemin çözümü sırasında bazı değişkenlerin değerlerinin çok büyük rakamlara ulaştığı ve GAB'da kullanılan DsPIC 30F6014 mikroişlemcinin bu değerleri yeterli hassasiyet ile saklayamadığı görülmüştür. Bu sebeple bu yöntem İÇKON sisteminde kullanılamamıştır.

Yapılan bu çalışmanın GAB'da gerçekleştirilememesi sebebi ile kullanılabilecek diğer yöntemlerin arayışına girilmiş ve dış ortamda konumlandırma için GPS sisteminde kullanılan konumlandırma algoritmasının İÇKON sisteminde kullanılabileceği düşünülmüştür.

4.1.2. GPS Konumlandırma Algoritması

GPS'te konum hesaplama için farklı bir iteratif yöntem kullanılmaktadır. GPS yapısında da vericiler olan uydular ile alıcılar arasında zaman senkronizasyonu yoktur. Bu sebeple uydulardan yayınlanan sinyallerin uçuş zamanı ölçülememektedir. Ancak sistemde fazladan bir uydu kullanılarak verici ile alıcı arasındaki zaman farkı da hesaplanmaktadır. Sistem 4 uydudan sinyal alırsa 4 denklem oluşturmakta ve bu denklem sistemini enlem, boylam, yükseklik ve zaman farkı için çözmektedir. 3 uydudan sinyal alındığında enlem, boylam ve zaman farkı bulunmaktadır.

GPS konumlandırma algoritması, iteratif bir yöntem olup mesafe varsayımları ile çalışmaktadır. Alıcının konumu (x, y, z) olarak öngörülür ise (x_s, y_s, z_s) konumundaki uyduya olan geometrik uzaklık, denklem 4.20'de verilmiştir.

$$R(x, y, z) = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} \quad (4.20)$$

c , sinyalin yayılma hızı olan ışık hızı ise, (x, y, z) konumundaki alıcının t_b saat kayması ile mesafe ölçümü denklem 4.21'de verilmiştir.

$$\rho(x, y, z, t_b) = R(x, y, z) + ct_b \quad (4.21)$$

Doğrusallaştırma için (x, y, z) noktası etrafında, ilk terimler ile Taylor açılımı ile yapıldığında denklem 4.22 elde edilir.

$$\rho(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t) \approx \rho(x, y, z, t) + \frac{\partial \rho}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \rho}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial \rho}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t \quad (4.22)$$

Kısmi türevler denklem 4.23'te verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{x-x_s}{R} \quad \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{y-y_s}{R} \quad \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{z-z_s}{R} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = c \quad (4.23)$$

Kısmi türevler yerine konulduğunda denklem 4.24 ve denklem 4.25 bulunur.

$$\rho(x', y', z', t'_b) \approx \rho(x, y, z, t_b) + \frac{x-x_s}{R} \Delta x + \frac{y-y_s}{R} \Delta y + \frac{z-z_s}{R} \Delta z + c \Delta t_b \quad (4.24)$$

$$\Delta \rho_s = \frac{x-x_s}{R_s} \Delta x + \frac{y-y_s}{R_s} \Delta y + \frac{z-z_s}{R_s} \Delta z + c \Delta t_b \quad (4.25)$$

4 bilinmeyenli denklemin çözümü için 4 uydu kullanılarak 4 denklem oluşturulması gerekir. Matris yapısındaki sistem denklem 4.26'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_1}{R_1} & \frac{z-z_1}{R_1} & c \\ \frac{x-x_2}{R_2} & \frac{y-y_2}{R_2} & \frac{z-z_2}{R_2} & c \\ \frac{x-x_3}{R_3} & \frac{y-y_3}{R_3} & \frac{z-z_3}{R_3} & c \\ \frac{x-x_4}{R_4} & \frac{y-y_4}{R_4} & \frac{z-z_4}{R_4} & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t_b \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Bu sistem denklem 4.27'de ifade edilmiş ve çözümü denklem 4.28'de verilmiştir.

$$\Delta \rho = H \cdot \Delta d \quad (4.27)$$

$$\Delta d = H^{-1} \cdot \Delta \rho \quad (4.28)$$

GPS konumlandırma algoritmasının adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Alıcının konumu olan (x, y, z) başlangıç değeri olarak öngörülür.
2. Alıcının konumu ve uydu konumları kullanılarak geometrik mesafeler hesaplanır.
3. Alıcının saati doğru kabul edilerek uydulara olan mesafe ölçümleri yapılır.
4. Geometrik mesafelerden, mesafe ölçümleri çıkartılarak $\Delta\rho$ değerleri hesaplanır.
5. Denklem sistemi çözülerek Δd hesaplanır.
6. Alıcının konumu, Δd ilavesi ile güncellenir.
7. $\Delta d > \epsilon$ ise 2 nolu adıma geri dönülür.

Algoritmanın çalışma mantığı ise kısaca şu şekilde özetlenebilir: Alıcı kendi konumu ve zaman farkı için bir varsayım yapar. Bu iterasyonun başlangıç değerleridir. Genellikle başlangıç konumu, GPS alıcısında en son hesaplanan konum olarak alınmaktadır. Eğer son hesaplanan konum mevcut değil ise başlangıç konumu olarak dünyanın merkezi alınır. Başlangıç konumu kullanılarak alıcı ile vericiler arasındaki mesafeler hesaplanır. Hesaplanan bu mesafeler ile alınan ölçümler karşılaştırılır ve yeni konum, zaman farkı varsayımı yapılarak döngü tekrarlanır.

Algoritma Matlab ile kodlanmış ve örnek girdiler ile başarı ile çalıştırılmıştır. Ardından kodlanan algoritma İÇKON sisteminden alınan ham veriler ile denenmiştir. Yapılan denemelerde çoğu durumda iterasyonun ıraksadığı görülmüştür. İnceleme sonucunda problemin iterasyonun başında seçilen alıcı konumu öngörüsünden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Algoritmada, denklem sistemi başlangıç konumu etrafında Taylor serisi açılımı ile doğrusallaştırılmaktadır. Farklı başlangıç noktaları ile yapılan denemelerde çözüme yakın başlangıç noktaları ile algoritmanın çalıştığı, çözümden uzak başlangıç noktalarında iterasyonun ıraksadığı gözlemlenmiştir.

Yapılan araştırmada Taylor serisi ile yapılan doğrusallaştırmanın geçerli olması için alıcı konumu öngörüsündeki hatanın, vericilere olan mesafeye göre oldukça küçük olması gerektiği bulunmuştur. GPS alıcılarında alıcı konumu öngörüsü olarak en kötü durumda dünyanın merkezi verilmektedir. Hata yaklaşık dünyanın yarıçapı olan 6000km'dir. GPS uyduları dünya merkezinden yaklaşık 26000km mesafededir. GPS için bu algoritma ortalama 4 iterasyonda sonuç bulmaktadır. İÇKON sisteminde ise

vericilere olan mesafeler metre seviyesindedir ve öngörü hatası da metre seviyesinde olabilmekte ve iterasyon ıraksamaktadır.

Bu algoritmanın İÇKON sisteminde kullanılamayacağı değerlendirilmiş ve benzer şekilde iteratif çalışan ancak doğrusallaştırma için Taylor açılımı kullanmayan özgün bir konum hesaplama algoritması geliştirilmiştir.

4.1.3. İteratif İÇKON Konumlendirme Algoritması

İÇKON sisteminde alıcı ve vericiler arasında zaman senkronizasyonu olmadığından uçuş zamanı değil, ulaşma zamanı farkı bilinmektedir. Bu sebeple hiperbol kesişimi ile konum hesaplanmaktadır. Uçuş zamanının bilinmesi durumunda konum hesaplama için daire kesişimi kullanılabilir.

Oluşturulan denklemler doğrusal değildir ve Taylor serisi açılımı gibi doğrusallaştırma teknikleri kullanıldığında başlangıç öngörüsündeki hatanın büyüklüğüne bağlı olarak doğrusallaştırılan denklem çözüm noktasında geçerli olmayabilir.

Geliştirilen algoritma, Taylor açılımı yerine direkt doğrusallaştırma kullanmakta ve böylece sistemin başlangıç noktası hassasiyeti sorunu ortadan kalkmaktadır. Ayrıca hiperbol kesişiminde çıkan büyük değerlerden kurtulmak için hiperbol kesişimi yerine iteratif şekilde daire kesişimi kullanılmaktadır. Algoritmanın detayları aşağıda verilmiştir:

Alıcı olan GAB'ın konumu (x_g, y_g, z_g) , i nolu vericinin konumu (V_{ix}, V_{iy}, V_{iz}) , olarak gösterilir ise, GAB ile i nolu verici arasındaki geometrik uzaklık denklem 4.29'da verilmiştir.

$$r_i(x_g, y_g, z_g) = \sqrt{(x_g - V_{ix})^2 + (y_g - V_{iy})^2 + (z_g - V_{iz})^2} \quad (4.29)$$

3 boyutlu uzayda iki kürenin kesişimi, bir daire olur. i ve j nolu vericilerden elde edilen kürelerin kesişimi olan daireyi bulmak için yukarıdaki denklem . i ve j için yazılır ve (x_g, y_g, z_g) değerleri için tekrar düzenlenirse denklem 4.30 bulunur.

$$\begin{aligned} 2x_g(V_{ix} - V_{jx}) + 2y_g(V_{iy} - V_{jy}) + 2z_g(V_{iz} - V_{jz}) = \\ r_j^2 - r_i^2 - (V_{ix} - V_{jx})^2 - (V_{iy} - V_{jy})^2 - (V_{iz} - V_{jz})^2 + \\ 2V_{ix}(V_{ix} - V_{jx}) + 2V_{iy}(V_{iy} - V_{jy}) + 2V_{iz}(V_{iz} - V_{jz}) \end{aligned} \quad (4.30)$$

İÇKON sisteminde alıcının yüksekliğini olan z_g bilindiği ve sabit olduğu için denklem sistemi iki boyuta indirgenebilir. Bu durumda i ve j nolu vericilerin oluşturduğu dairelerin kesişim noktalarından geçen bir doğru bulunabilir. Bu doğru denklem 4.31’de tanımlanmıştır.

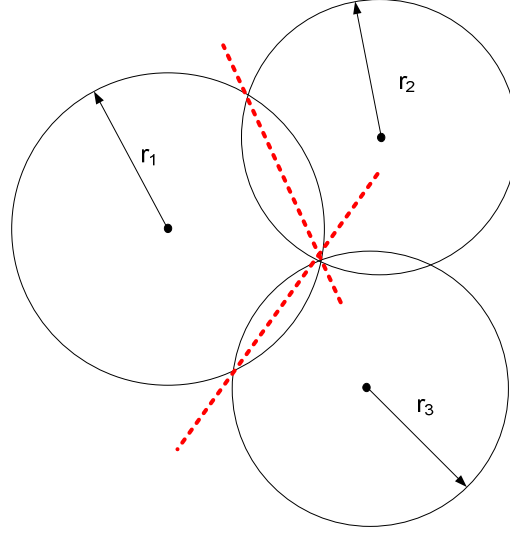
$$\begin{aligned} 2x_g(V_{ix} - V_{jx}) + 2y_g(V_{iy} - V_{jy}) = \\ r_j^2 - r_i^2 - 2(z_g - V_{iz})(V_{iz} - V_{jz}) - (V_{ix} - V_{jx})^2 - \\ (V_{iy} - V_{jy})^2 - (V_{iz} - V_{jz})^2 + 2V_{ix}(V_{ix} - V_{jx}) + 2V_{iy}(V_{iy} - V_{jy}) \end{aligned} \quad (4.31)$$

Denklem 4.32 yapılan tanımlamalar kullanıldığında, denklem 4.33 elde edilir.

$$\begin{aligned} c_{ij} = 2(z_g - V_{iz})(V_{iz} - V_{jz}) - (V_{ix} - V_{jx})^2 - (V_{iy} - V_{jy})^2 - (V_{iz} - V_{jz})^2 \\ d_{ij} = 2V_{ix}(V_{ix} - V_{jx}) + 2V_{iy}(V_{iy} - V_{jy}) \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$2x_g(V_{ix} - V_{jx}) + 2y_g(V_{iy} - V_{jy}) = r_j^2 - r_i^2 - c_{ij} + d_{ij} \quad (4.33)$$

$(i, j) = (1, 2)$ ve $(i, j) = (1, 3)$ alınarak elde edilen iki doğrunun kesişimi, Şekil 4.2’de gösterildiği üzere çözüm noktasını verecektir.



Şekil 4.2 Daire kesişimlerinden oluşturulan doğrular

İdeal şartlarda $(i, j) = (2, 3)$ için elde edilecek doğru da aynı çözüm noktasından geçer. Bu çözümü bulabilmek için dairelerin yarıçapları olan r_i değerlerinin bilmek gerekir. Ancak, İÇKON sisteminde alıcı olan GAB ile vericiler arasında zaman senkronizasyonu bulunması için uçuş zamanından (TOF) hesaplanabilen r_i değerleri elde edilemez. r_i değerlerinin elde edilmesinin diğer bir yöntemi de GAB konumu kullanılarak geometrik yöntemler ile hesaplamadır. Ancak denklem sistemi zaten GAB konumunun hesaplanması için geliştirilmiştir, dolayısı ile GAB konumu bilinmemektedir. Bu sebeple algoritma iteratif bir yapıda geliştirilmiştir. GAB konumu, algoritmanın başında iterasyon başlangıç noktası olarak öngörülmektedir. Bu öngörü hatalı olacağı için vericilerin merkezleri olan daireler bir noktada kesişmezler. Daire kombinasyonlarından elde edilen doğrular farklı noktalarda birbirlerini keser. 3 verici kullanıldığında, 3 farklı kesişim noktası; 4 verici kullanıldığında 6 farklı kesişim noktası elde edilir. İterasyon yakınsayarak sonuca ulaştığında, bu farklı kesişim noktaları, çözüm noktasında çakışır. İterasyonun yakınsaması için bu aşırı tanımlı denklem sistemi en az kareler ile çözülerek yeni alıcı konumu öngörüsü oluşturulur.

Denklem sistemi yeniden düzenlenerek matris formunda yazıldığında denklem 4.34 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} 2(V_{ix} - V_{jx}) & 2(V_{iy} - V_{jy}) \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j^2 - r_i^2 - c_{ij} + d_{ij} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

3 verici kullanıldığında $(i, j) = (1, 2), (1, 3), (2, 3)$ kombinasyonlarından 3 doğru elde edilir. Elde edilen denklem sistemi denklem 4.35'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 2(V_{1x} - V_{2x}) & 2(V_{1y} - V_{2y}) \\ 2(V_{1x} - V_{3x}) & 2(V_{1y} - V_{3y}) \\ 2(V_{2x} - V_{3x}) & 2(V_{2y} - V_{3y}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2^2 - r_1^2 - c_{12} + d_{12} \\ r_3^2 - r_1^2 - c_{13} + d_{13} \\ r_3^2 - r_2^2 - c_{23} + d_{23} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Benzer şekilde 4 verici kullanıldığında ise $(i, j) = (1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)$ kombinasyonlarından altı doğru elde edilir. Bu denklem sistemlerinin çözümü için denklem 4.36'te verilen tanımlamalar yapılmıştır.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 2(V_{ix} - V_{jx}) & 2(V_{iy} - V_{jy}) \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} r_j^2 - r_i^2 - c_{ij} + d_{ij} \\ \dots \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Bu tanımlamalar denklem 4.35'te yerine konulduğunda denklem 4.37 bulunur.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{G} = \mathbf{B} \quad (4.37)$$

Denklem 4.37'nin en az kareler çözümü ise denklem 4.38'de verilmiştir.

$$\mathbf{G} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (4.38)$$

Geliştirilen iteratif algoritmanın işleyişi aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. GAB konumu olan (x_g, y_g) başlangıç değeri olarak öngörülür.
2. GAB konumu ve verici konumları kullanılarak geometrik mesafeler olan r_i değerleri hesaplanır.
3. r_i değerleri ile denklem sistemi oluşturulur ve en az kareler ile çözümlenerek yeni GAB konumu hesaplanır.
4. İki ardışıl sonuç arasındaki fark ϵ değerinden büyükse 2 nolu adıma geri dönülür.

İterasyonun durma kriteri olarak ardışıl iki çevrimde hesaplanan GAB değerleri arasındaki farka bakılmakta ve bu fark 1cm altına indiğinde iterasyon durdurulmaktadır. 1cm, konum için hassas bir değer olup bu değere algoritma 5-6 iterasyonda ulaşabilmektedir. Geliştirilen iteratif algoritma, deneysel çalışmada GAB'tan elde edilen ham veriler ile kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

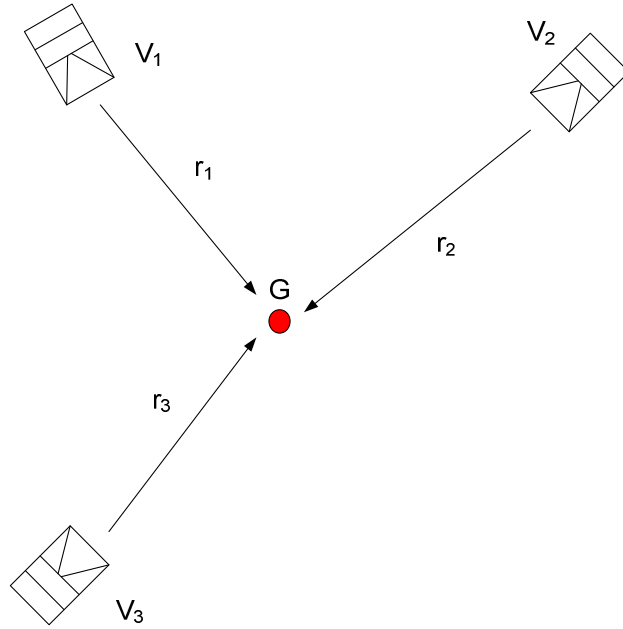
Geliştirilen algoritmanın tez kapsamında çalışılan yöntemlere göre avantajları şunlardır:

- Yöntemde doğrusallaştırma kullanılmadığı için ilk GAB konum öngörüsü önemli değildir. Sinyalleri alınan vericilerden birinin koordinatları GAB konumu olarak verilebilir. Bu yönüyle GPS konumlandırma algoritmasından üstündür.
- Yöntem genellikle 5-6 iterasyonda sonuç bulmaktadır. Hızlı yakınsaması açısından mikroişlemci üzerinde çalıştırılabilir.
- Yöntem, tek konum çıktısı üretmekte olup bu yönü ile daha önce kodlanan ve iki konum çıktısı üretebilen en az kareler algoritmasından üstündür.
- Yöntem, çalışması esnasında büyük sayılar üretmediğinden direkt doğrusallaştırma yönteminden üstündür.

Elde edilen konum sonucu, vericilerin ve alıcının oluşturduğu geometri sebebi ile hatalı olabilmektedir. Hatalı olması olası konumların elenmesi amacı ile İÇKON sisteminde mevcut olan hüzme açısı tabanlı konum kontrolüne ek olarak tez kapsamında geometri tabanlı konum kontrolü algoritması geliştirilmiştir.

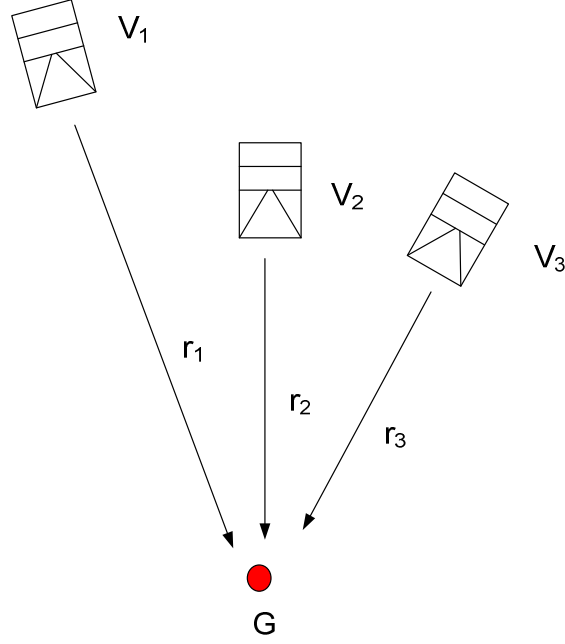
4.2. Geometri Tabanlı Konum Kontrolü

Konum hesaplanmasında kullanılan vericilerin ve GAB'ın oluşturduğu geometrik yerleşim, hesaplanan konumun ölçüm hatalarına karşı duyarlılığını belirlemektedir. Bu sebeple, konum hesaplamasında kullanılan verici yerleşimi için GDOP hesaplaması yapılmıştır. İyi bir geometrik yerleşimde (well contioned), GDOP sonucu yüksek çıkmakta ve ölçümlerde oluşan hatalar konum sonucunu cm seviyesinde saptırmaktadır. Bu duruma örnek Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Yüksek GDOP sağlayan geometrik yerleşim

Kötü bir geometrik yerleşimde (ill conditioned) ise GDOP sonucu düşük çıkmakta ve ölçümlerde oluşan hatalar konum sonucunu metre seviyesinde saptırabilmektedir. Bu yerleşime örnek Şekil 4.4'te verilmiştir



Şekil 4.4 Düşük GDOP sağlayan geometrik yerleşim

Tez kapsamında GDOP hesaplaması yapılmış ve belirlenen eşik altında kalan yerleşimden hesaplanan konumlar atılarak sistemin hatalı konum vermesi önlenmiştir. Bunun için yazılımda, hesaplanan konum ile konumun hesaplandığı vericiler arasında vektörler hesaplanmıştır. Herhangi iki vektör arasındaki açı 20 dereceden daha az ise bu geometrinin düşük GDOP vermesinden dolayı hesaplanan konum hatalı kabul edilmiş ve atılmıştır.

α_{ij} , hesaplanan GAB konumundan başlayan ve sırası ile i ve j nolu vericilere olan vektörlerin arasındaki açı olsun. Konum hesaplamada kullanılan her verici kombinasyonu ve hesaplanan GAB konumu için α_{ij} açısının 15 derece olarak belirlenen eşik değerinden büyük olması beklenmektedir. Hesaplanan GAB konumu G ve konum hesaplamada kullanılan her i nolu verici konumu V_i için denklem 4.39’de verilen koşul $\alpha_{ij} = 15^\circ$ için sağlanmalıdır. (Yayan, et al., 2014; Yücel, et al., 2012).

$$\frac{\overrightarrow{GV_i}}{|\overrightarrow{GV_i}|} \cdot \frac{\overrightarrow{GV_j}}{|\overrightarrow{GV_j}|} \leq \cos(\alpha_{ij}) \quad (4.39)$$

Koşul sağlanmadığı takdirde, hesaplanan konum hatalı kabul edilmiş ve atılmıştır. Böylece sistemin hatalı konum üretmesi engellenmiştir.

4.3. Bağlı Konumlandırma ile Birleştirme

İÇKON sistemi, büyük iç ortamlarda çalışması için hücresel yapıda tasarlanmıştır. İç ortamın kapsanabilmesi için ortama bağlı olarak çok sayıda hücre kurulmaktadır. İç ortamın karmaşıklığına bağlı olarak 3 farklı vericinin sinyalinin alınamadığı noktalar olabilmektedir. Bu noktalarda konum hesaplanamadığından konum çıktısı kesintiye uğramaktadır.

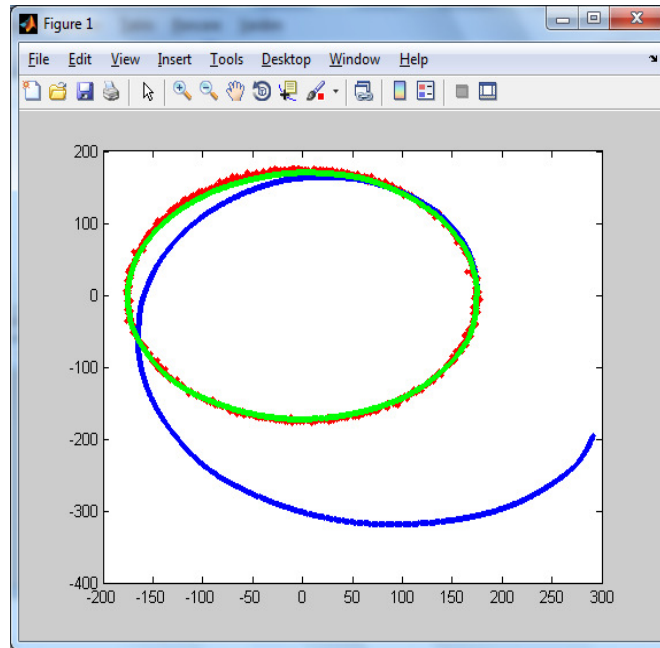
İÇKON sistemi mutlak konumlandırma sistemi olup konum çıktısı, öncesinde hesaplanan konumlardan tamamen bağımsızdır. Bu sebeple hesaplanan konumdaki hata her yönde dağılım gösterebilmektedir. Bu ise gezgin robotun rotasında gürültü oluşturmakta ve otonom navigasyon algoritmalarında sıkıntıya yol açmaktadır.

Bu problemlerin üstesinden gelmek için İÇKON sisteminin bağlı konumlandırma ile desteklenmesi hedeflenmiştir. Bağlı konumlandırma için ivmeölçer, manyetik alan sensörü ve jiroskop ölçümlerinin kullanılması için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda Şekil 4.5'te verilen Microbotics firmasının MIDG2 ataletsel navigasyon sistemi kullanılmıştır. Cihazdan bu sensörlerin hepsinin ham verileri alınabilmektedir. Bu verilerden, önce cihazın 3B uzaydaki yönelim açıları hesaplanmalı, bu açılar yardımı ile ivme verilerinin x, y, z yönlerindeki değerleri hesap edilmelidir. Bu cihaz aynı zamanda sensörlerden alınan bilgilerin farklı seviyelerde işlenmiş değerlerini de verebilmektedir. İşlenmiş değerlerin içinde x, y, z yönlerinde hesaplanmış ivme değerleri de bulunmaktadır. Başlangıç olarak bu işlenmiş değerler ile çalışılmasına karar verilmiştir.

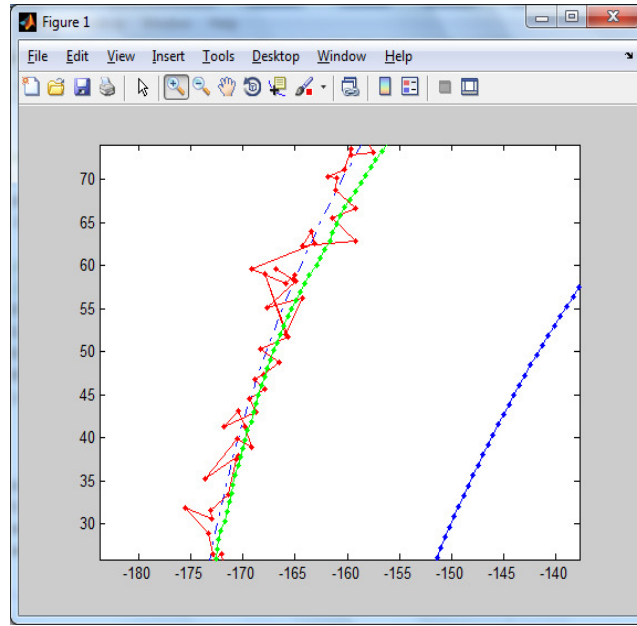


Şekil 4.5 Microbotics firmasının MIDG2 ataletsel navigasyon sistemi

MIDG2 cihazından alınan ivme değerlerinin kullanılarak İÇKON konum sonuçlarının desteklenmesi için bir Kalman Filtre tasarlanmıştır. Cihazın teknik verilerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda dairesel bir hareket sonucunda üreteceği ivme verileri benzetim ortamında oluşturulmuştur. Bu veriler ile yapılan benzetim sonuçları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu şekillerde kırmızı renk, İÇKON sonucunu, mavi renk ivme değerleri ile hesaplanan konum sonucunu, yeşil renk ise Kalman Filtre konum sonucunu göstermektedir.



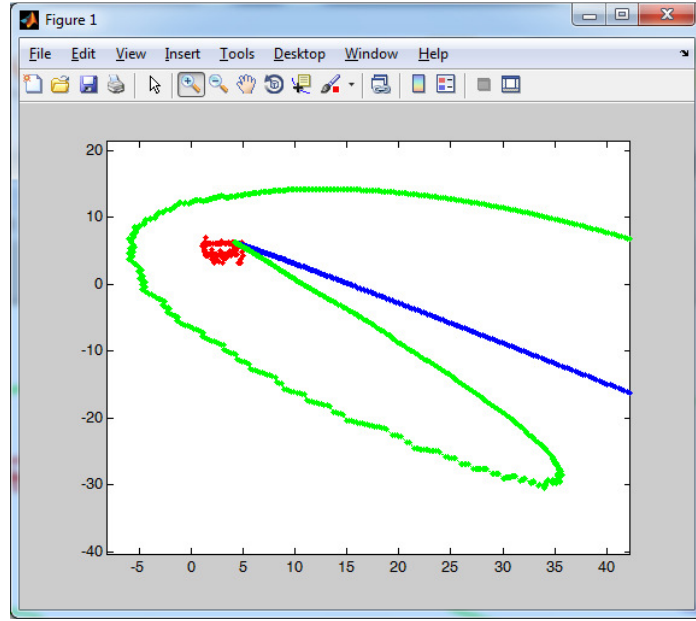
Şekil 4.6 Dairesel hareket için MIDG2 benzetim sonuçları-1



Şekil 4.7 Dairesel hareket için MIDG2 benzetim sonuçları-2

Şekil 4.6’da mavi renk çizgide görüldüğü üzere sadece ivme verileri ile hesaplanan konum, hatanın kümülatif birikmesi sebebi ile, beklendiği üzere, zamanla kayma göstermiştir. Yeşil çizgi ile gösterilen Kalman Filtre sonucu ise, İÇKON sonucu ile birlikte hareket etmekte ve kayma göstermemekte, aynı zamanda Şekil 4.7’de görüleceği üzere İÇKON sonucundaki gürültüleri de içermemektedir.

Benzetim ortamında başarılı sonuçların alınmasının ardından, MIDG2 cihazı ile bir kare gezme denemesi yapılmış ve ivme değerleri kaydedilmiştir. Bu ivme değerleri ile aynı Kalman Filtre kullanılarak hesaplanan sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Kare gezme hareketi için hesaplanan konum sonuçları

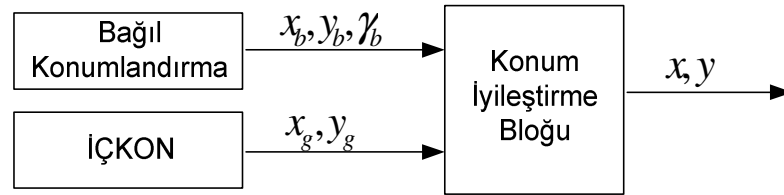
Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, ivme verileri ile hesaplanan ve mavi çizgi ile gösterilen konum sonucu çok hızlı bir şekilde kayma göstermiştir. Bu girdiler ile Kalman Filtre sonucunda da, benzer şekilde kayma görülmüştür. Yapılan araştırmalarda ivme verilerinde yaşanan bu kaymanın sebebinin, MEMS ivme ölçerlerde zamana bağlı rastgele oluşan offset olduğu anlaşılmıştır. Bu offset değerlerinin rastgele olması, konumdaki hatayı tahmin edilemez duruma getirmektedir. Daha kaliteli ivmeölçer kullanımı, cihazın fiyatını yükseltmekte ve alımını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple ivme verilerinin İÇKON konum sonucunun iyileştirilmesinde kullanımından vazgeçilmiştir.

İÇKON sisteminin genellikle tekerlekli kara araçlarında kullanılması öngörüldüğü için bağıl konumlandırmada, tez kapsamında kullanılan gezgin robotun tekerleklerine bağlı olan enkoderlerden alınan ölçümlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Kullanılan gezgin robot Pioneer P3-DX serisi olup farksal sürüş sistemine ve 2’si motor ile sürülen ve 1’i sarhoş olmak üzere 3 adet tekerleğe sahiptir. Motor ile sürülen tekerleklere enkoder kuple edilmiştir. Gezgin robot üzerindeki anakart saniyede 10 kez enkoderleri okumakta ve robotun kinematik denklemlerini kullanarak x, y yönündeki $\Delta x, \Delta y$ ilerlemelerini ve baş açısındaki $\Delta \gamma$ değişimlerini hesaplamaktadır. Bu

delta değerlerinin denklem 4.40'da verildiği gibi toplanması ile robotun konumu ve baş açısı bağıl konumlandırma ile bulunmaktadır.

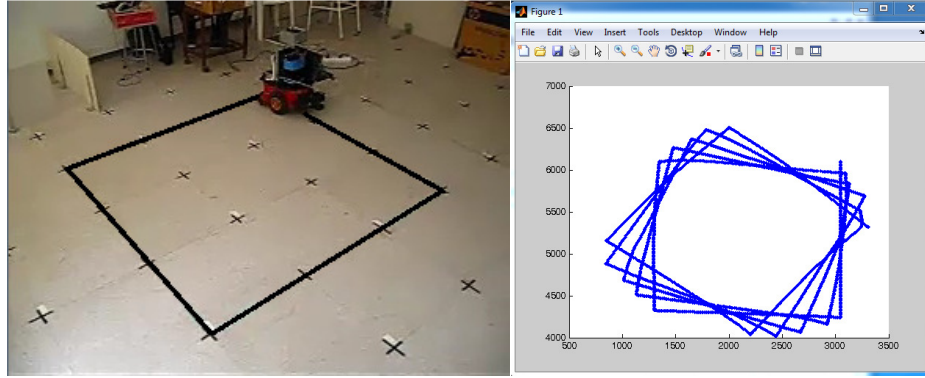
$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + \Delta x \\y_{k+1} &= y_k + \Delta y \\\gamma_{k+1} &= \gamma_k + \Delta \gamma\end{aligned}\tag{4.40}$$

Gezgin robotun yazılımında değişiklik yapılarak, robotun anakartında bağıl konumlandırma ile hesaplanan konum sonuçlarının seri port üzerinden dışarı verilmesi sağlanmıştır. Robotun anakartından alınan bağıl konumlandırma sonuçları ile İÇKON sonuçlarının birleştirilerek Şekil 4.9'da verildiği üzere konum sonucunun iyileştirilmesi hedeflenmektedir.



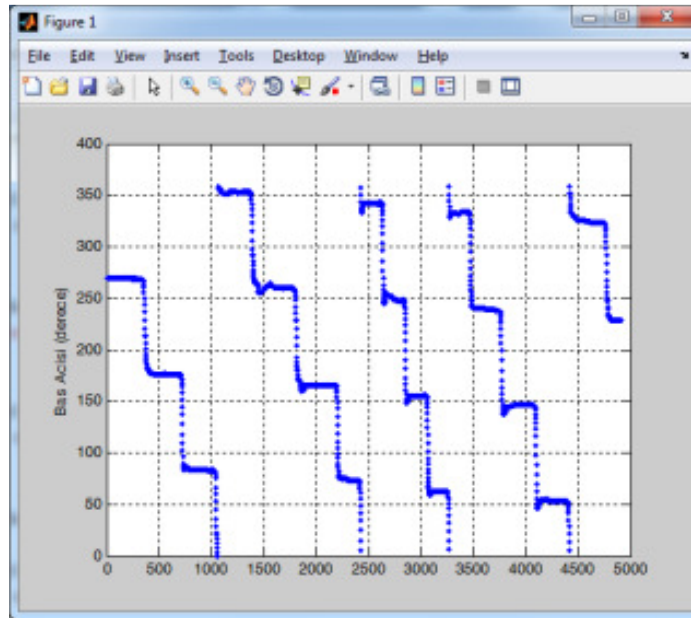
Şekil 4.9 İÇKON ve bağıl konumlandırma sonuçlarının birleştirilmesi

Bağıl konumlandırma sistemlerinde hatanın kümülatif birikmesi sebebi ile her adımda elde edilen ilerlemenin doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.10'da Pioneer 3DX robot ile yapılan ve enkoder verisi kullanılarak robotun anakartı tarafından hesaplanan bağıl konum gösterilmiştir. Robot bir kare rota üzerinde 4 tur gezdirilmiş ve hesaplanan konumlar çizdirilmiştir. Görüldüğü üzere bağıl konumlandırma sonucu aynı rota gezildiği halde her turda dönme yaparak bozulmuştur.



Şekil 4.10 Kare rota ve enkoderlerden hesaplanan bağıl konum

Bağıl konumlandırma sonucunun bozulmasının sebebi, robotun kinematiği kullanılarak hesaplanan baş açısı bilgisi zamanla kaymasıdır. Dolayısı ile öncelikle bağıl konum hesaplamada kullanılan baş açısı düzeltilmelidir. Kare gezme deneyi için enkoderler kullanılarak hesaplanan baş açısı grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Kare rota denemesinde enkoderlerden hesaplanan baş açısı

Grafikten incelendiğinde beklendiği üzere robotun karenin kenarlarında ilerlediği kısımlarda grafik sabit devam etmiş, robotun karenin köşelerinde döndüğü

kısımlarda ise baş açısı değeri hızlı şekilde azalmıştır. Ancak robot tekrar aynı karenin kenarlarını gezmesine rağmen grafikteki yatay çizgiler aynı seviyede değildir. Örneğin ilk turda 180° baş açısında görülen kenar, 4. turda 150° baş açısında görülmektedir. Her tur sonrasında karenin aynı kenarı farklı bir açıda algılanmıştır. Grafikte baş açısındaki kayma açıkça görülmektedir.

Bu kaymayı önlemek için baş açısı bilgisi veren baş açısı referans sensörü kullanılması düşünülmüştür. Bu amaçla Polulu firmasının CHR-UM6 baş açısı referans sensörü temin edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda baş açısı referans sensöründe yer alan manyetik alan sensörünün iç ortamda yer alan pek çok cihaz ve metal nesnelerden etkilendiği görülmüş ve iç ortamda baş açısı referans sensörünün kullanımından vazgeçilmiştir.

Bu problemi aşmak için İÇKON sisteminde özgün bir yöntemle doğruluğu düşük ancak mutlak şekilde hesaplanan, önceki sonuçlardan bağımsız bir baş açısı değeri elde edilmiştir. İlerleyen bölümlerde bu çalışmalar aktarılmaktadır.

4.3.1. Baş Açısı İyileştirme Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında, baş açısı elde edilmesi için İÇKON sisteminin birimlerinden olan GAB'ın kullanılabileceği değerlendirilmiştir. GAB ile baş açısı elde edilmesi tezin özgün yönlerinden biridir.

4.3.1.1. GAB İle Baş Açısı Ölçümü

GAB üzerinde Şekil 4.12'de verildiği üzere 60° aralıklar ile yerleştirilmiş 6 adet sesüstü alıcı bulunmaktadır. GAB donanımında sesüstü alıcılardan gelen sinyal doğrultularak zarfı çıkartılmakta ve belirlenen bir eşik değerini geçtiği anın tespiti için

bir karşılaştırıcıya iletilmektedir. Donanımda her sesüstü alıcı için bir karşılaştırıcı bulunmaktadır.



Şekil 4.12 Gesgin Algılayıcı Birim (GAB) üzerindeki alıcılar

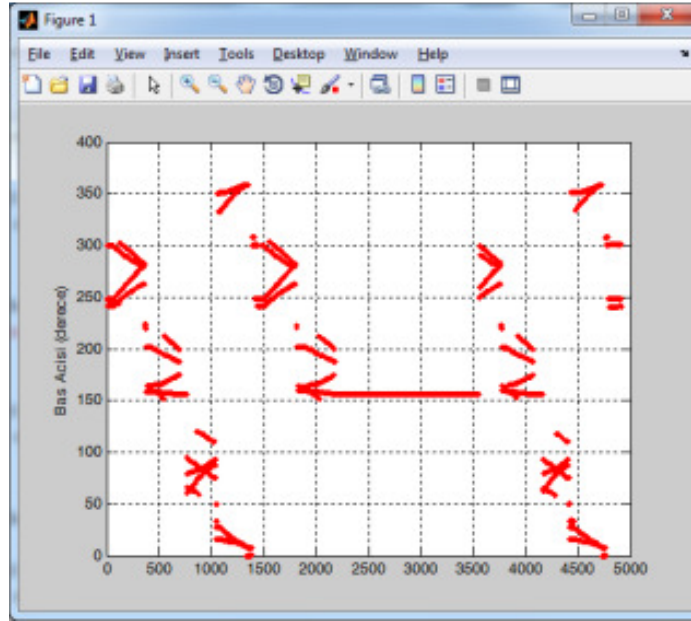
GAB ile baş açısı bulunabilmesi için tez kapsamında GAB yazılımı geliştirilmiştir. İşlemci yüksek hızda karşılaştırıcıların çıkışlarını taramakta ve ilk çıkış veren karşılaştırıcı, dolayısı ile sesüstü sinyalin ilk ulaştığı alıcı bulunmaktadır. Alınan sesüstü sinyal üzerindeki kimlik çözümlendiğinde bu sinyalin hangi vericiden geldiği bulunmaktadır. Vericilerin koordinatları GAB'ın hafızasında saklandığı için gelen sesüstü sinyalin yayınlandığı koordinat belirlenebilmektedir.

GAB, aldığı sesüstü sinyalleri kullanarak konumunu hesaplamaktadır. GAB'ın konumu, sesüstü sinyal yayınlayan vericinin konumu ve sinyalin ilk ulaştığı sesüstü alıcının yönü kullanılarak GAB'ın baş açısı hesaplanmıştır. Baş açısı hesaplamadaki adımlar Şekil 4.13'teki akış şemasında verilmiştir.



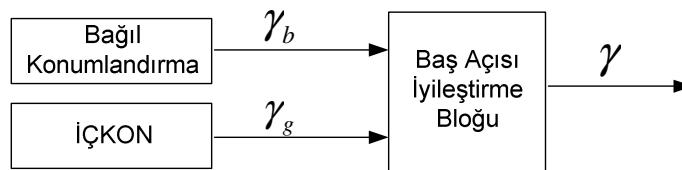
Şekil 4.13 GAB ile baş açısı hesaplama akış şeması

GAB üzerinde 60° aralıklar ile yerleştirilmiş 6 adet sesüstü alıcı olduğundan, hesaplanan baş açısında en fazla $\pm 30^\circ$ hata olabilmektedir. Burada yapılan baş açısı ölçümü mutlak bir ölçüm olup daha önce yapılan ölçümlerden bağımsızdır. Şekil 4.14'te verilen örnek üzerinde vericinin sinyalini $i = 1$ nolu alıcı almıştır. (x_g, y_g) , GAB'ın konumu; (V_x, V_y) , vericinin konumu olarak alınır ise, baş açısı denklem 4.41 ile hesaplanır.



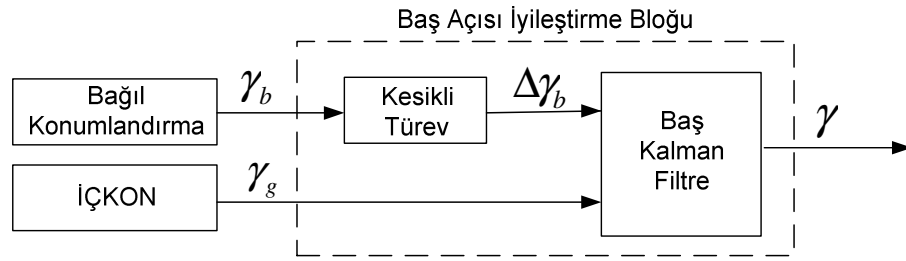
Şekil 4.15 Kare gezme denemesinde GAB ile hesaplanan baş açısı

Bu grafikte robotun karenin kenarlarında ilerlediği zaman alınan baş açısı değerleri toplamda 60 derecelik gürültü bandı içerisinde kalmıştır. Grafikte düz çizgi olarak görünen zaman diliminde İÇKON sistemi kapatılmış ve dolayısı ile son alınan baş açısı değeri sabit kalmıştır. (İÇKON sisteminin neden kapatıldığı ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır). Grafik incelendiğinde turlar arasında aynı kenarlarda baş açısı değerinin aynı seviyede kaldığı görülmektedir. Örneğin ilk turda 240° - 300° baş açısı aralığında görülen kenar, tüm turlarda aynı aralıkta görülmektedir. Baş açısı değeri doğruluğu düşük elde edilmesine karşın zaman ile kayma yapmamaktadır. GAB'tan elde edilen baş açısı değerinin bağıl konumlandırmadan elde edilen baş açısı ile Şekil 4.16'da verildiği üzere birleştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 4.16 Bağıl konumlandırma ile İÇKON konum sonucunun birleştirilmesi

GAB'dan elde edilen ölçümler mutlak, enkoder'den elde edilen ölçümler ise bağıl ölçümler olduğundan Kalman Filtre ile birleştirmek için uygundur. Tek boyutlu bir kalman filtre ile ölçüm sonuçları birleştirilmiş ve bağıl konumlandırmada sürekli olarak elde edilen fakat zamanla kayma gösteren baş açısı bilgisinin GAB'tan baş açısı hesaplandıkça düzeltilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.17'de baş açısı iyileştirme bloğu gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Baş açısı iyileştirme bloğu

Baş açısı iyileştirme bloğunda kullanılan Kalman Filtre'nin durum ve gözlem modelleri denklem 4.42'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Durum Modeli:} \quad & \gamma_{k+1} = \gamma_k + \Delta\gamma + w \\ \text{Gözlem Modeli:} \quad & \gamma_g = \gamma_k + v \end{aligned} \quad (4.42)$$

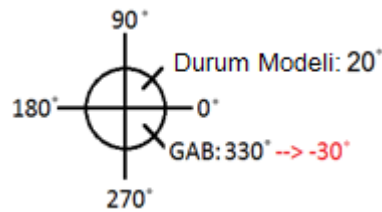
Burada w , proses gürültüsü; v ise gözlem gürültüsüdür. Robot kinematiği ile hesaplamalarda iki adım arasında baş açısında oluşabilecek hatanın varyansı 2° olarak alınmıştır. GAB'tan hesaplanan baş açısında ise hata en fazla $\pm 30^\circ$ olabildiğinden, hatanın varyansı 900° olarak alınmıştır. Dolayısı ile Baş Kalman Filtre'de $Q = 2$, $R = 900$ olarak kullanılmıştır.

Kalman filtrede önce durum modeli ile tahmin yapılmakta daha sonra gözlem modeli ile düzeltme yapılmaktadır. Burada Kalman Filtre'nin uygulanmasında açı bilgisinin çevrimsel olması sorunlara neden olmaktadır. Bu sebeple tahmin ve düzeltme

adımları arasına GAB baş açısı için çevrimsel düzeltmeler ilave edilmiştir. Şekil 4.18 ve şekil 4.19’de bu sorunun olduğu iki durum örnek üzerinde açıklanmıştır.

1. Durum modeli çıktısı + 180° < GAB Baş açısı

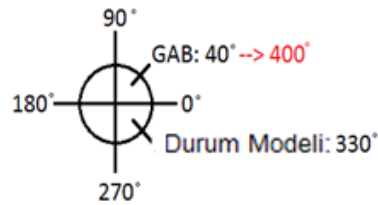
Bu durumda, Kalman Filtre, durum modeli çıktısını azaltarak düzeltme yapması gerekirken arttırmaktadır. Bu sebeple düzeltme adımı çalıştırılmadan önce GAB baş açısından 360 derece çıkartılmaktadır.



Şekil 4.18 Baş açısında Kalman Filtre öncesi düzeltmeler-1

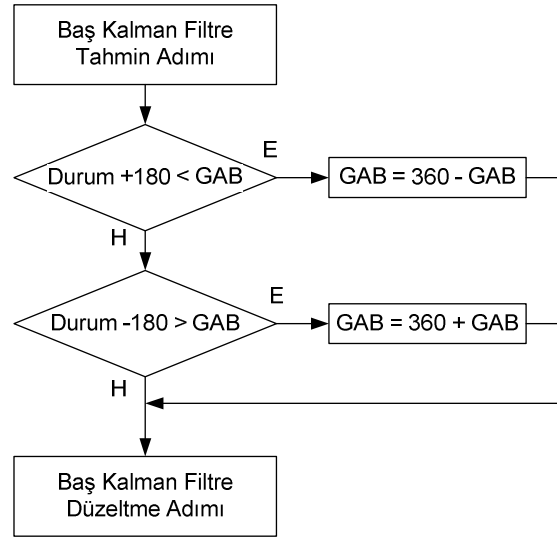
2. Durum modeli çıktısı - 180° > GAB Baş açısı

Bu durumda, Kalman Filtre durum modeli çıktısını artırarak düzeltme yapması gerekirken azaltmaktadır. Bu sebeple düzeltme adımı çalıştırılmadan önce GAB baş açısına 360 derece eklenmektedir.



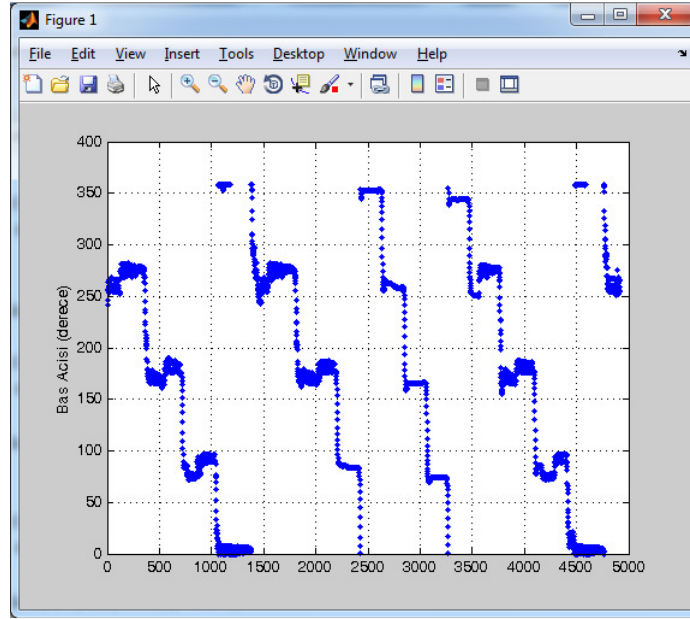
Şekil 4.19 Baş açısında Kalman Filtre öncesi düzeltmeler-2

Bu işlemlerin akış şeması Şekil 4.19’da verilmiştir. Bu şemada, Durum ifadesi ile durum modeli baş açısı çıktısı, GAB ifadesi ile GAB baş açısı belirtilmiştir.



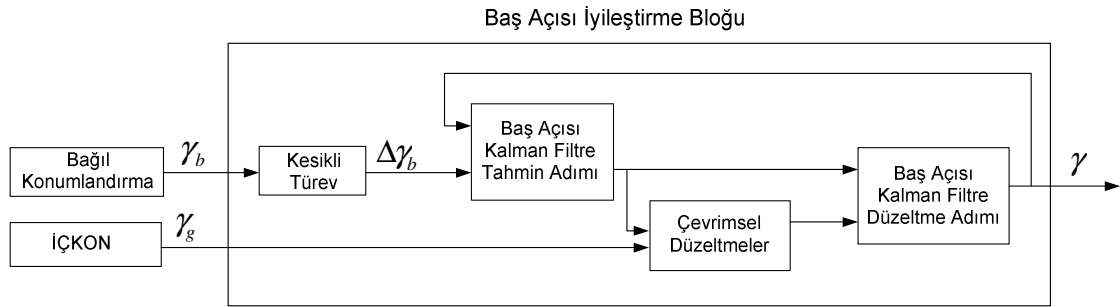
Şekil 4.20 Baş açısında Kalman Filtre öncesi düzeltmeler akış şeması

Kalman Filtre sonucunda elde edilen baş açısı bilgisinin grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir. Bu deneyde Kalman Filtre’nin doğru çalışırılığının denemek için 3. turda İÇKON sistemi devre dışı bırakılmış ve kalman filtre çıktısı bağıl hesaplanan baş açısı sonucu ile birlikte kaymaya başlamıştır. İÇKON sisteminin devreye alınması ve GAB’tan sonuç alınması ile birlikte Kalman Filtre çıkışındaki kayma düzelmiştir. Örneğin 1.turda 180° olarak görülen kenar, 2.turda yine 180° olarak görülmekte, 3. turda İÇKON sisteminin devre dışı bırakılması ile kaymaya başlamakta ve 160° civarına düşmekte, 4. turda İÇKON sisteminin devreye alınması ile tekrar 180° seviyesinde görülmektedir.



Şekil 4.21 Baş açısı Kalman Filtre sonucu

Baş açısının iyileştirilmesi için yapılan işlemler Şekil 4.22’de verilen blok şema ile özetlenebilir:



Şekil 4.22 Baş açısı iyileştirme bloğu detay gösterim

Bu bölümde anlatılan işlemler sonucu elde edilen iyileştirilmiş baş açısının, bağıl konumlandırma sonucunu iyileştirmekte kullanılması devam eden bölümlerde verilmiştir.

4.3.2. Bağıl Konumlandırma Sonucunun İyileştirilmesi

Tez kapsamında çalışılan gezgin robot farksal sürüş sistemine sahip olup aktif iki tekerleğine de enkoder kuple edilmiştir. Enkoder çıktıları ve robotun kinematik denklemleri kullanılarak x, y eksenleri yönünde alınan Δx ve Δy mesafe adımları hesaplanmaktadır. Baş açısındaki kayma sonucunda, mesafe adımlarının yönleri hatalı hesaplanmakta ve konumda da kayma yaşanmaktadır.

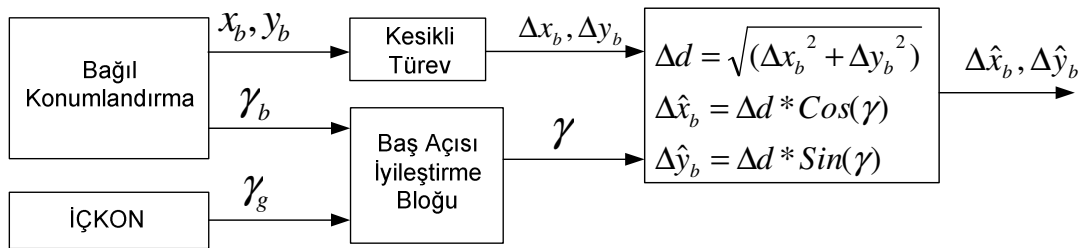
Enkoder verileri ile hesaplanan Δx ve Δy değerlerinden denklem 4.43 ile bileşke mesafe adımı hesaplanabilir.

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta x_b^2 + \Delta y_b^2)} \quad (4.43)$$

Δx ve Δy değerleri hatalı olsa da, bileşke mesafe adımının büyüklüğü baş açısı ile ilgili olmadığından, zamanla kayma göstermez. Bu bileşke mesafe adımı ise düzeltilmiş baş açısı kullanılarak Denklem 4.44’de verildiği gibi tekrar bileşenlerine ayrılabilir. Böylece her adımda bu işlem uygulanarak Δx ve Δy değerleri düzeltilebilir.

$$\begin{aligned} \Delta \hat{x}_b &= \Delta d \cdot \cos(\gamma) \\ \Delta \hat{y}_b &= \Delta d \cdot \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Yapılan işlemlerin akış şeması Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23 Bağıl konumlandırma sonucunun iyileştirilmesi

4.3.3. Kalman Filtre Tabanlı Konum İyileştirme

Bu aşamaya kadar yapılan işlemler ile bağıl konumlandırmada sonucu iyileştirilmiş, x ve y yönlerindeki mesafe adımları olan $\Delta \hat{x}_b$ ve $\Delta \hat{y}_b$ elde edilmiştir. Bu bölümde ise bağıl konumlandırma sonucu ile İÇKON konum sonucunun 2B bir Kalman Filtre kullanılarak birleştirilmesi anlatılacaktır. Bu Kalman Filtre tek boyutlu iki filtre olarak da tasarlanabilir. Denklem 4.45'te Kalman Filtre'nin durum modeli verilmiştir.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \Delta \hat{x}_b + v_x \\ y_{k+1} &= y_k + \Delta \hat{y}_b + v_y \end{aligned} \quad (4.45)$$

Buna göre sırasıyla durum vektörü, girdi vektörü, durum geçiş ve kontrol girdi modeli denklem 4.46'da verilmiştir:

$$s = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_b \\ \Delta \hat{y}_b \end{bmatrix} \quad A = B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

İşlem gürültüsü kovaryansı baş açısının düzeltilmiş olması ve sistem modelinin basitliği sebebi ile denklem 4.47'de verildiği gibi alınmıştır.

$$Q = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Oluşturulan gözlem modeli denklem 4.48'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} x_g &= x + w_x \\ y_g &= y + w_y \end{aligned} \quad (4.48)$$

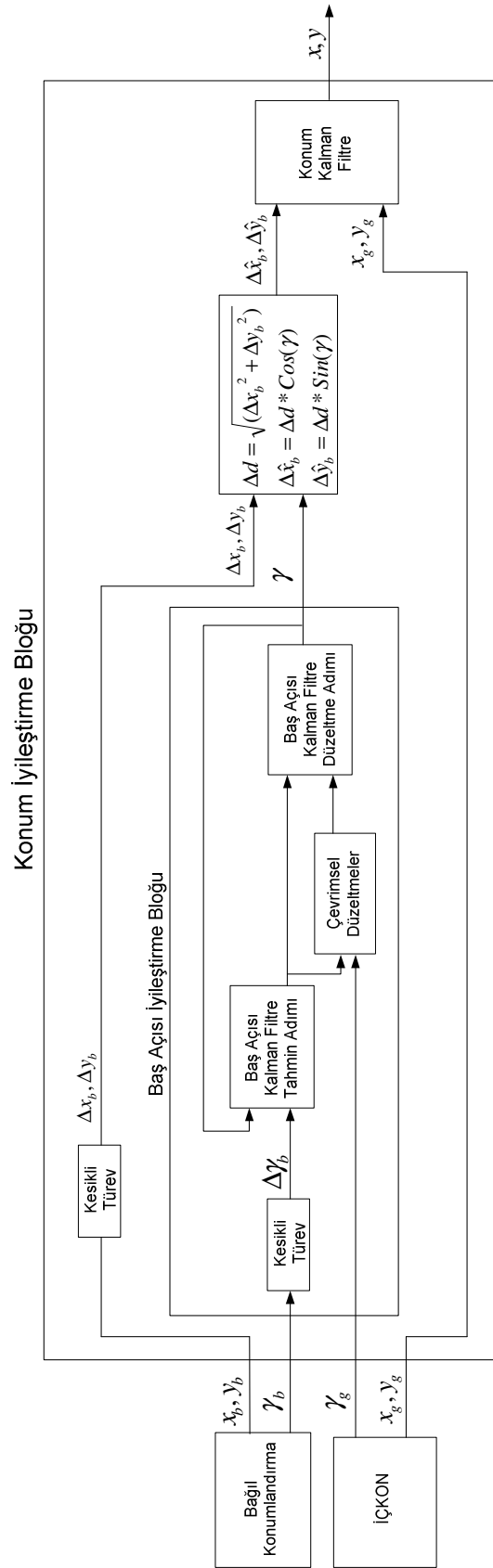
Buna göre gözlem vektörü ve gözlem modeli denklem 4.49'da verilmiştir.

$$z = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

İÇKON sisteminin hatası, test yapılan noktaya göre farklılık göstermekle beraber, her iki eksen için de gözlem gürültüsü kovaryansı denklem 4.50’de verildiği gibi alınmıştır.

$$R = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Konum için kullanılan Kalman Filtre’nin de eklenmesi ile Konum İyileştirme Bloğu tamamlanmış olmaktadır. Son durumda ise sistem blok şeması Şekil 4.24’te verilmiştir:



Şekil 4.24 Bağıl konumlandırma ve İÇKON sisteminin birleştirilmesi blok şeması

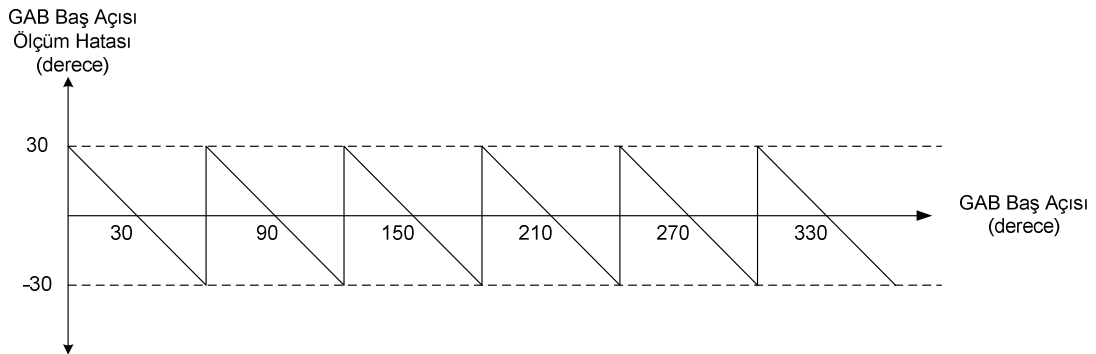
4.3.4. Kalman Filtre İyileştirmeleri

Hem baş açısı için kullanılan Kalman Filtre’de hem de konum için kullanılan Kalman Filtre’de işlem gürültüsü kovaryansı ve gözlem gürültüsü kovaryansı sabit olarak alınmıştır. Bu değerler, aslında her adım, her ölçüm için aynı değildir. Bu değerlerin şartlara göre adaptif hale getirilmesi ile diğer bir deyişle Adaptif Kalman Filtre kullanımı ile sistemin performansı doğruluk ve kesinlik açısından iyileştirilebilir. Bu bölümde bu değerlerin adaptif hale getirilmesi üzerinde yapılan çalışmalar anlatılacaktır.

Baş açısı için kullanılan Kalman Filtre’de işlem gürültüsü varyansı, baş açısının iki enkoderden gelen değerler kullanılarak hesaplanması sırasında oluşabilecek hatalar ile ilgilidir. Bu değeri etkileyen iki faktör, enkoderin doğru ölçüm alması ve hesaplamalarda kullanılan matematiksel modellerinin doğruluğudur. Enkoderin doğru ölçüm almasında oluşabilecek problemler olarak tekerlekleğin kayma yapması, enkoder kuplajının doğru olmaması, enkoderin çözünürlüğünün düşük olması sayılabilir. İÇKON sistemi, iç ortamlarda için tasarlanmış ve yapılan testler kuru fayans zemin üzerinde ve lastik tekerlekler kullanılarak yapılmıştır. Fayans geçişlerinde iki fayans arasındaki olabilen kot farkı, kullanılan Pioneer robot için hafif sarsıntılara ve küçük yön değişimlerine sebep olabilmektedir. Bunlar gözönüne alındığında enkoderin iki adımı arasında oluşabilecek hata mm seviyesindedir denebilir. Baş açısı hesaplanmasında kullanılan formülasyonlarda ise tekerlek çapının hava seviyesindeki değişimlerden dolayı hatalı alınması, iki tekerlek arasındaki çap farkı, kullanılan matematiksel modelin doğruluğu, baş açısı hesaplarının tazelenme hızı hata kaynakları olarak sayılabilir. Testlerde tekerlek çaplarının doğru ölçüldüğü, matematiksel modelde anlık dönme yarıçapı hesaplandığı, tazeleme hızının 10Hz olduğu gözönüne alındığında burada oluşan hatanın mm seviyesinde olduğu kabul edilmiştir. Bu sebeplerle işlem gürültüsü varyansları sabit kabul edilmiş ve 4 derece olarak alınmıştır.

Baş açısı için kullanılan Kalman Filtre’de gözlem gürültüsü varyansı, GAB’ın hesapladığı konum, GAB’ta yer alan alıcılar arasındaki yönelim farkı, alıcıların hassasiyet farkları ve alıcıların taranma hızı ile ilgilidir. GAB’ın konum hesaplama

yöntemi alınan ulaşma zamanı ölçümleri ve yansılardan etkilenmektedir. Ulaşma zamanı ölçümlerinin performansını arttırmak için dinamik eşik uygulaması geliştirilmiş ve yansılardan ve kötü geometriden kaynaklı hesaplanan hatalı konumların atılması için hüzmeye açısı ve geometri tabanlı iki filtreleme geliştirilmiştir. Bu geliştirmelerden sonra GAB'ın konum hatasındaki standart sapma 10cm olarak alınmıştır. İç ortamda ultrasonik sinyalin 7 metreye kadar yol aldığı ve vericilerin 2m üzeri bir yüksekliğe yerleştirildiği düşünüldüğünde konumdaki 10cm hatanın açı hesaplamada oluşturacağı hatanın ihmal edilebilir olacağı açıktır. GAB'ta yer alan alıcılar 60 derece aralıklar ile dizilmiştir. En kötü durumda sinyali ilk alan alıcı, GAB'ın 60 derecelik bir aralıkta dönmesi ile değişmeyecektir. Alıcıların yönelim farkından kaynaklanan GAB'ın baş açısı ölçüm hatası Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.25 GAB baş açısı ölçüm hatası

Bu grafikteki hatanın standart sapması 15 derece olarak hesaplanmıştır. Alıcılar, GAB'a monte edilmeden önce testleri yapılmış ve yakın hassasiyetteki alıcılar seçilerek kullanılmıştır. Ayrıca dinamik eşik uygulaması alıcılar arasındaki hassasiyet farkının oluşturduğu problem için de çözüm sağlamaktadır. Alıcıların taranması esnasında GAB'da yer alan ve 30MIPS hızında çalışan DsPIC mikrodenetleyici sadece bu görevi yerine getirmektedir. Ayrıca alıcıların sinyali donanımsal olarak paralel işlenmekte ve bir eşik değeri ile karşılaştırılmaktadır. Mikrodenetleyici sadece 6 karşılaştırıcının sayısal çıkışlarını taramaktadır. Bu sebepler ile alıcıların taranma hızı, ses hızı ile karşılaştırıldığında çok yüksektir ve tarama hızından kaynaklanan hata ihmal edilebilir.

seviyededir. Sonuç olarak baş açısı için gözlem gürültüsündeki standart sapma büyük tutulmuş ve sabit 30 derece olarak alınmıştır.

Konum için kullanılan Kalman Filtrede, öncelikle x ve y eksenlerindeki hataların birbirlerinden bağımsız olduğu kabul edilmiştir dolayısı ile gerek işlem gerekse gözlem gürültüsü kovaryans matrislerinde köşegen haricindeki değerler sıfırdır. İşlem gürültüsünün hem x hem de y eksenindeki standart sapması, baş açısının düzeltilmesi ile azaltılmış ve 2cm olarak sabit alınmıştır. Gözlem gürültüsünün yine 2 ekseninde de standart sapması yapılan iyileştirmelerden sonra 10cm olarak sabit alınmıştır. Ancak yapılan testlerde tüm bu sayılan iyileştirmelere rağmen GAB'ın hatalı konum üretebildiği görülmüştür. Kalman Filtre, GAB'a gözlem gürültü kovaryansında tanımlandığı kadar güvenmektedir. GAB'dan, gözlem gürültüsü kovaryansında tanımlanandan büyük hataya sahip bir sonuç geldiğinde, Kalman Filtre çıktısı, GAB'tan gelen bu hatalı sonuca kayma göstermektedir.

Bu durumda, gözlem gürültüsü kovaryansının adaptif yapılması ile, bir başka deyişle Adaptif Kalman Filtre kullanımı ile konum çıktısı iyileştirilebilir. Zaman ile değişen gürültü kovaryans matrislerinin tahmin edilmesinde innovation temelli ve residual temelli olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır (Chai, et al., 2012). Innovation temelli AKF'nin hesaplama prosedürlerinde nümerik problemler oluşabildiği ve iterasyonun ıraksayabildiği rapor edilmiştir (Zhou, et al., 2010). Bu çalışmada residual temelli AKF yöntemi kullanımı tercih edilmiştir.

Residual temelli AKF yaklaşımında GAB sonucunun doğruluğu, Kalman Filtrenin çıktısından farkı ile tahmin edilebilir. İki çıktı arasındaki büyük farklar GAB sonucundaki hatayı işaret eder. Bundan dolayı gözlem gürültüsü kovaryansı, GAB sonucu olan (x_g, y_g) ile Kalman Filtre sonucu olan (x, y) değerleri arasındaki farka bağlı olarak denklem 4.51'de verildiği üzere adaptif yapılmıştır.

$$R_{konum} = c_{konum} * \begin{bmatrix} (x - x_g)^2 & 0 \\ 0 & (y - y_g)^2 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

c_{konum} katsayısı deneysel olarak belirlenmiştir. Bölüm 5’te verildiği üzere yapılan deneysel çalışmalarda en iyi sonuç 0,025 değeri kullanıldığında alınmış ve c_{konum} katsayısı 0,025 olarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

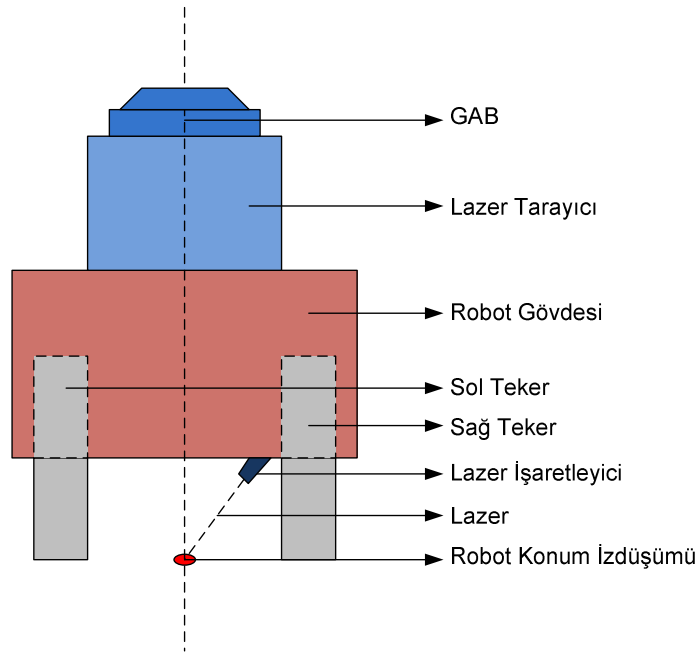
İÇKON sisteminin performansının arttırılması için yapılan çalışmaların sonuçlarını izlemek için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Teknopark Binası'nda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Zemin katta gerçekleştirilen denemelerde robotik laboratuvarlarında yaygın olarak üzerinde çalışılan Pioneer 3DX gezgin robot kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmaların amacı; tez kapsamında yapılan çalışmaların İÇKON sistemi performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Devam eden kısımlarda, deneysel çalışmalar için hazırlanan deney ortamı, çalışmalar sonucu elde edilen veritabanları, iyileştirme öncesi İÇKON performansı, iyileştirme sonrası İÇKON performansı ve yapılan karşılaştırmaların değerlendirmeleri verilecektir.

5.1. Deney Ortamı ve Veritabanlarının Hazırlanması

Deney ortamı olarak, koridor, kolon, antre, merdiven gibi farklı iç ortam yapılarının bulundurması sebebi ile zorlu bir ortam olan ESOGÜ teknopark binası zemin kat seçilmiştir. Deney ortamından bir görüntü ve kroki üzerinde verici yerleşimleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Bu veritabanlarında tutulan bilgilerin aralarında zaman senkronizasyonunun sağlanması önemlidir. Geliştirilen sistemin konum sonucunun hatasının ortaya konması ancak kayıtlar arasındaki zaman senkronizasyonu ile mümkündür. Zaman senkronizasyonunun sağlanması için zaman kaynağı tek olmalı ve bu kaynaktan alınan zaman bilgisi tüm verilerin üzerine etiketlenmelidir. Yapılan deneysel çalışmada robotun üzerine bir dizüstü bilgisayar yerleştirilmiş ve zaman kaynağı olarak dizüstü bilgisayarın saati ms seviyesinde kullanılmıştır. Sayılan 3 veritabanının da kayıtları bu bilgisayarın diskine bilgisayarın saati etiketlenerek kaydedilmiştir.

İlk veritabanını oluşturmak için kullanılan gezgin robotun gerçek konum-zaman bilgisi kayıt altına alınmalıdır. Robotun konumu için referans olarak, enkoder kuple edilen iki aktif tekerin merkezlerinin orta noktası alınmıştır. Bu noktanın yerdeki izdüşümünü tespit edebilmek için robotun altına bir lazer işaretleyici takılmış ve zemin üzerinde işaretleme sağlanmıştır. Şekil 5.3'te gezgin robotun arka görünümünün çizimi verilmiştir.



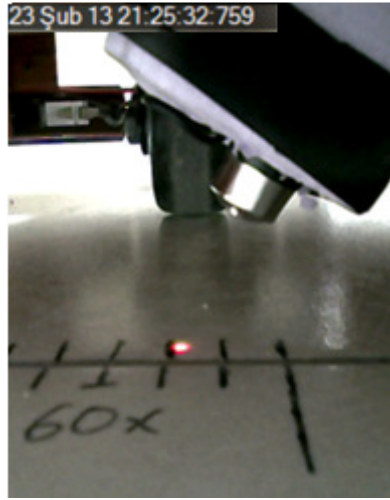
Şekil 5.3 Gezgin robot arka görünümü

Denemelerin yapılabilmesi için zemin kat, cm bazında ölçeklendirilmiştir. Bu ölçeklendirmede yerde mevcut olan fayanslardan ızgara olarak faydalanılmıştır. Bu ölçeklendirme, robotun gerçek konumunun ve İÇKON vericilerinin konumlarının tespit edilmesi için kullanılmıştır. İÇKON vericilerinin konumlarının tespiti için vericilerin, bir lazer şarkül ile yere izdüşümleri alınmıştır. İzdüşümlerin koordinatları ve vericilerin yükseklikleri ölçülerek vericilerin konumları elde edilmiştir. Robotun konumunun ölçülmesi için ise belirlenen 2 rotanın üzerinde yer alan fayans geçişleri Şekil 5.4'te gösterildiği üzere cm seviyesinde işaretlenerek fayans geçişlerinde cetvel oluşturulmuştur.



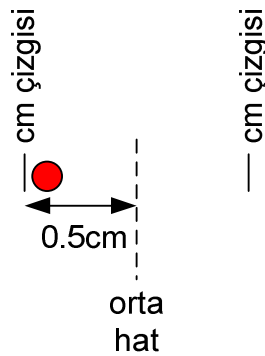
Şekil 5.4 Fayans geçişlerinde oluşturulan cetvel 50

Robot üzerine yerleştirilen lazer işaretleyicinin, fayans geçişlerinde işaretlediği noktaların, robotun gerçek konumu olarak referans alınması planlanmıştır. Bu noktaların tespit edilebilmesi amacı ile robot üzerine bir web kamera yerleştirilmiştir. Web kamera, lazer işaretleyicinin işaretlediği noktayı görüntüleyecek şekilde robotun ön tarafına alt kısma yerleştirilmiş ve USB bağlantısı ile robotun üzerindeki dizüstü bilgisayara bağlanmıştır. Şekil 5.5'te web kameradan kaydedilen örnek görüntü yer almaktadır. Bu görüntüde robotun arkasında yer alan sarhoş teker, lazer işaretleyici ve fayans geçisi görülmektedir. Alınan görüntünün zamanının kaydedilemesi için görüntünün üzerine ücretsiz bir yazılım ile bilgisayarın saati basılmıştır.



Şekil 5.5 Web kameradan kaydedilen örnek görüntü

Web kameradan alınan video kayıtları denemelerden sonra izlenerek her fayans geçişindeki zaman ve konum bilgisi manuel olarak okunmuş ve gerçek konum – zaman için bir veritabanı oluşturulmuştur. Bu okumalarda 0,5cm rahatlıkla görülebilmektedir. İşaretlenen noktanın, Şekil 5.6’da örnek olarak gösterildiği üzere cm çizgisine mi, iki çizgi arasındaki orta hatta mı daha yakın olduğu rahatlıkla seçilebilmektedir. Bu sebeple okumalardaki hata en fazla 0.25cm’dir.



Şekil 5.6 Cetvel üzerinden konum okuma

Bu veritabanında kayıtlar aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilen formatta saklanmıştır.

Çizelge 5.1 Gerçek konum veritabanı

X	Y	Gün	Ay	Yıl	Saat	Dk.	Sn.	Ms.
400	1001,2	23	2	2013	14	41	26	91
800	999,6	23	2	2013	14	41	36	749
1200	998,5	23	2	2013	14	41	47	388

Deneysel çalışmada oluşturulan diğer veritabanı robotun anakartından alınan bağıl konumlandırma sonucudur. Gezgin robotun yazılımı üzerinde yapılan modifikasyon ile robot tarafından enkoderlerden okunan verilerden kinematik model kullanılarak hesaplanan konum ve baş açısı sonucu, RS232 bağlantısı üzerinden dışarıya aktarılmıştır. Bu bilgiler, robot üzerine yerleştirilen dizüstü bilgisayarın seri portundan okunmuş ve bilgisayarın zaman bilgisi ile etiketlenerek kaydedilmiştir. Bu veritabanındaki kayıt formatı Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Bağıl konumlandırma veritabanı

X Değeri	Y Değeri	Baş Açısı	Ay	Gün	Yıl	Saat	Dk	Sn	Ms
683	5656	4	2	23	2013	20	37	44	917
678	5656	4	2	23	2013	20	37	44	999
674	5655	4	2	23	2013	20	37	45	99

İlerideki çalışmalarda da kullanılabilmesi için GAB’tan ham sesüstü sinyal verileri alınarak üçüncü veritabanı oluşturulmuştur. GAB’tan ham veri alınabilmesi için GAB yazılımında revizyon yapılmış ve GAB’ın aldığı her sesüstü sinyal ile ilgili bilgiyi RS232 üzerinden çıkış vermesi sağlanmıştır. Bu çıkış, gezgin robot üzerine yerleştirilen dizüstü bilgisayarın seri portundan okunmuş ve bilgisayar zamanı ile etiketlenip

kaydedilerek veritabanı oluşturulmuştur. Çizelge 5.3'te bu veritabanının formatı verilmiştir.

Çizelge 5.3 GAB ham verileri veritabanı

Verici Kimlik	Alıcı Kimlik	GAB Zamanı (us)	Ses Hızı (mm/sn)	Ay	Gün	Yıl	Saat	Dk	Sn	Ms
2	6	1150613760	333519	2	23	2013	20	36	4	50
0	2	1152388992	333519	2	23	2013	20	36	5	814
1	3	1152495744	333149	2	23	2013	20	36	5	922

GAB veritabanındaki ölçüm sonuçları, tez kapsamında geliştirilen algoritmalarda işlenerek baş açısı ve konum hesaplanmıştır. Bu sebeple GAB'ın robot üzerindeki yerleşimi önemlidir. GAB, konumların kıyaslanabilmesi amacıyla, lazer işaretleyicinin işaretlediği ve gerçek konum olarak alınan iki teker arasındaki orta nokta ile aynı düşey eksene yerleştirilmiştir. Bu eksen Şekil 5.3'te verilmiştir.

Devam eden kısımlarda bu veritabanları kullanılarak iyileştirme öncesi İÇKON sisteminin, ardından da iyileştirme sonrası İÇKON sisteminin deneysel çalışma sonuçlarına yer verilmiştir. Ardından elde edilen veriler karşılaştırılarak tez kapsamında yapılan çalışmaların performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

5.2. İyileştirme Öncesi İÇKON Performansı

Hazırlanan veritabanları kullanılarak iyileştirme öncesi İÇKON sisteminin ürettiği konum sonuçları hesaplanmıştır. Gerçek konum verileri, zaman etiketleri referans alınarak en yakın zamanda hesaplanan konumlar ile eşleştirilmiştir.

Belirlenen rotanın bir defa gezilerek veri toplanması tur olarak isimlendirilmiştir. Her tur için gerçek konum veritabanında 60 nokta vardır. Her turda bu 60 nokta için gerçek konum ile hesaplanan konum arasındaki oklit uzaklığı, hata değeri olarak kullanılmıştır. Çizelge 5.4'te Rota-1 turlarının sonuçları, çizelge 5.5'te Rota-2 turlarının sonuçları tablo olarak verilmiştir. Performans kriterlerinden doğruluk; hatanın ortalaması, kesinlik ise standart sapması ile ilgilidir. Kesinlik pratikte hatanın hangi yüzde ile hangi değerin altında kaldığı şeklinde ifade edilmektedir. Bu kriterlere ışık tutmak için oluşturulan çizelgelerde tur için hataların ortalaması, hataların standart sapması ile 30mm, 60mm ve 100mm altında kalan hata değerlerinin yüzdeleri verilmiştir. 100mm değeri, İÇKON sisteminin performansında hedeflenen bir değer olduğu için seçilmiş, 30mm ve 60mm değerleri ise fikir vermesi açısından düşünülmüştür. Ayrıca çizelgelerin son satırında tüm turların ortalamaları verilmiştir.

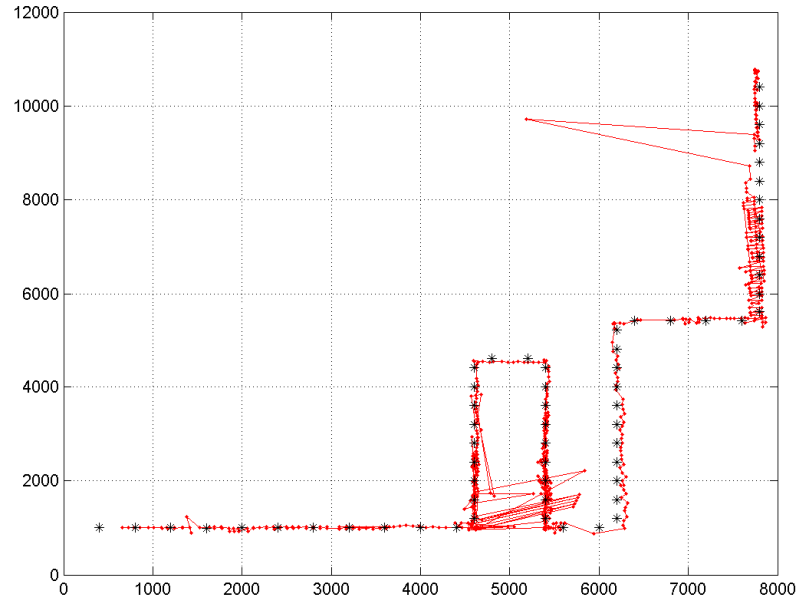
Çizelge 5.4 İyileştirme öncesi Rota-1 için hesaplanan hatalar

Tur Numarası	Hata Ortalama (mm)	Hata Standart Sapma (mm)	Hata < 30mm (%)	Hata < 60mm (%)	Hata < 100mm(%)
1	97,0894	96,8736	19,7	41	68,9
2	113,5284	186,3281	8,2	34,4	68,9
3	96,2950	108,3066	13,1	41	63,9
4	98,5377	95,0093	13,1	32,8	68,9
5	114,1395	124,6162	8,2	39,3	67,2
6	83,3157	68,8716	11,4	49,2	72,1
7	111,2539	148,9318	13,1	34,4	72,1
8	139,7447	239,4574	18	42,6	67,2
9	93,1726	86,5432	6,6	32,8	68,9
10	83,8998	89,3910	13,1	45,9	78,7
Ortalama	103,0977	124,4329	12,45	39,34	69,68

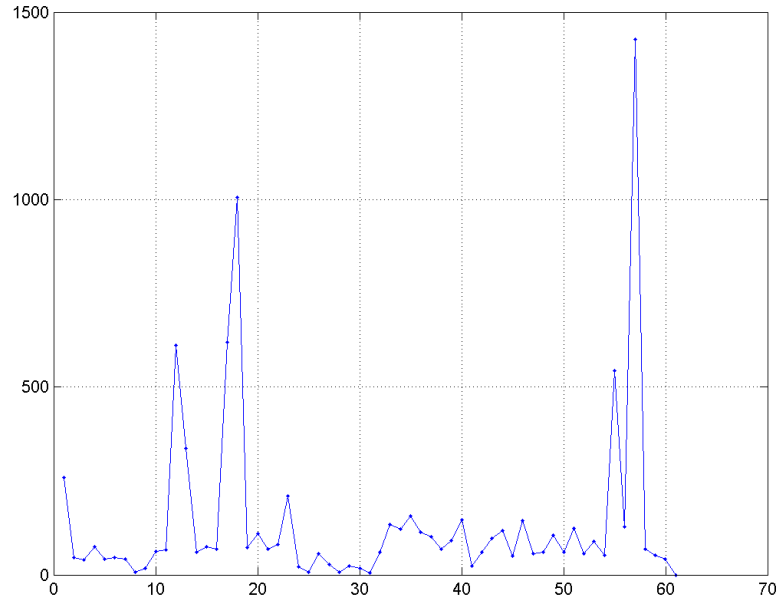
Çizelge 5.5 İyileştirme öncesi Rota-2 için hesaplanan hatalar

Tur Numarası	Hata Ortalama (mm)	Hata Standart Sapma (mm)	Hata < 30mm (%)	Hata < 60mm (%)	Hata < 100mm(%)
1	96,8735	103,0318	10,2	35,6	72,9
2	91,2836	106,7584	10,2	42,4	76,3
3	81,1425	62,5438	15,3	44,1	74,6
4	110,4131	214,6630	17,0	42,4	78,0
5	164,4397	403,2164	8,5	49,2	74,6
6	106,2452	113,0545	10,2	33,9	64,4
7	103,0245	208,4908	17,0	45,8	72,9
8	104,0677	175,4169	8,5	39,0	76,3
9	131,4264	228,9444	13,6	44,1	69,5
10	139,3386	246,8815	6,8	32,2	66,1
Ortalama	112,82548	186,3002	11,73	40,87	72,56

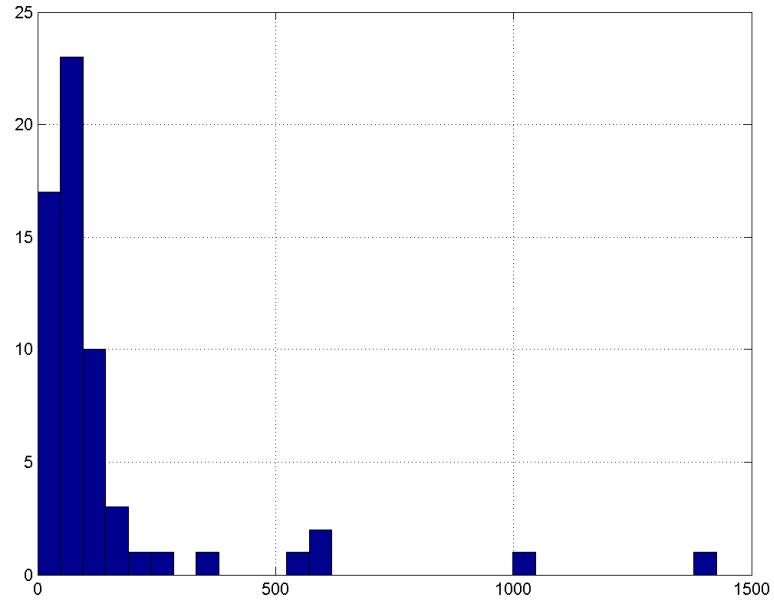
Performans ölçütleri olan doğruluk ve kesinlik ile ilgili olarak konum grafiği, hata grafiği, hata histogramı ve hata dağılımı olmak üzere 4 farklı grafik çizdirilmiştir. Bu grafikler örnek olması ve fikir vermesi açısından sadece Rota-1'den ve Rota-2'den birer tur için hazırlanmıştır. Rota-1 Tur-8 için hazırlanan grafikler Şekil 5.7 – Şekil 5.10'da, Rota-2 Tur 2 için hazırlanan grafikler Şekil 5.11 – Şekil 5.14'te verilmiştir. Konum grafiğinde gerçek konum yıldız işareti ile, hesaplanan konum ise çizgi ile gösterilmiştir. Buradaki eksenler yerel koordinat sistemi olup değerler mm birimindedir. Hata grafiğinde, tur için referans alınan 60 noktadaki hataların değerleri, y ekseninde mm biriminden verilmiştir. Hataların dağılımı grafiğinde, x ve y eksenleri mm biriminde olup daireler 30mm, 60mm ve 100mm yarıçapındadır ve hatalar yıldız işareti ile gösterilmiştir. Konum grafiği ve hata grafiği, doğruluk hakkında; histogram ve hata dağılımı grafiği ise kesinlik hakkında görsellik sağlamaktadır.



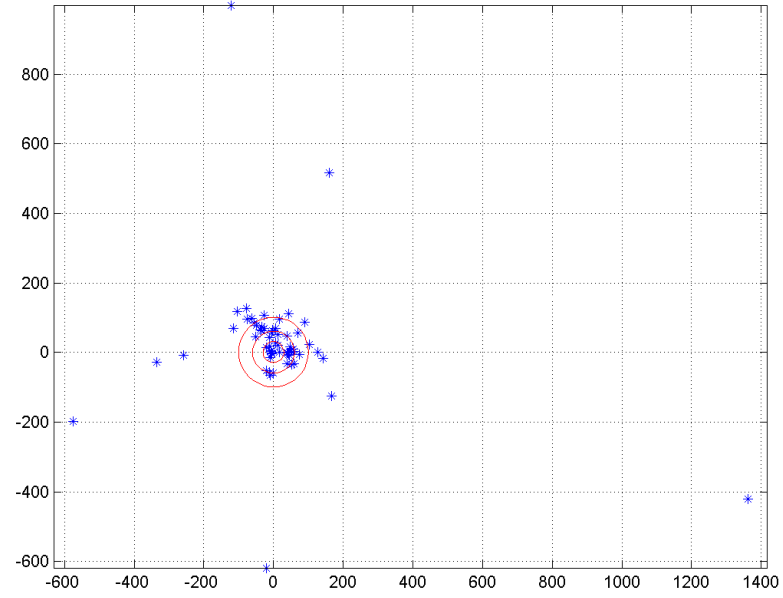
Şekil 5.7 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 konum grafiği



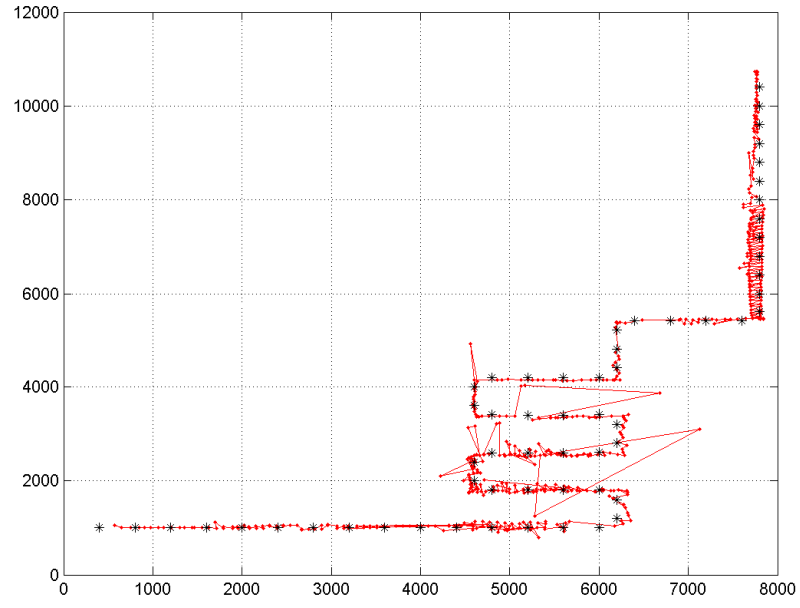
Şekil 5.8 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 hata grafiği



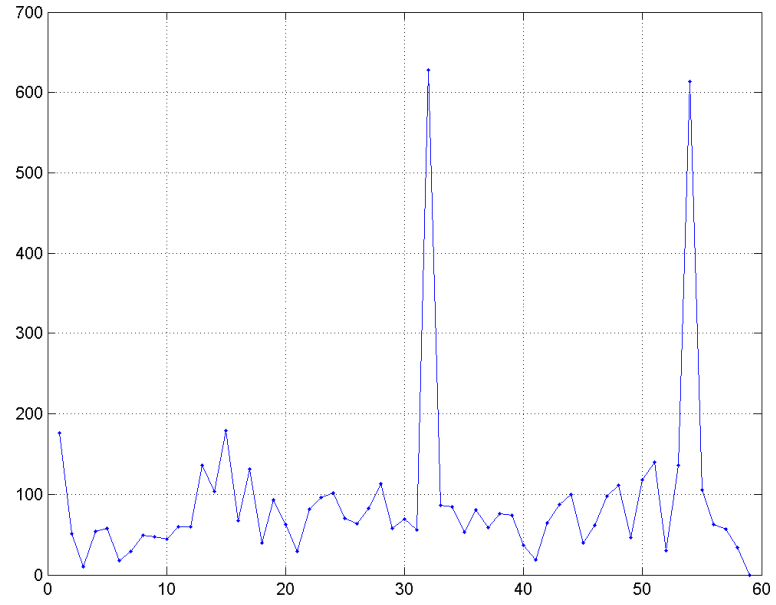
Şekil 5.9 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 hata histogramı



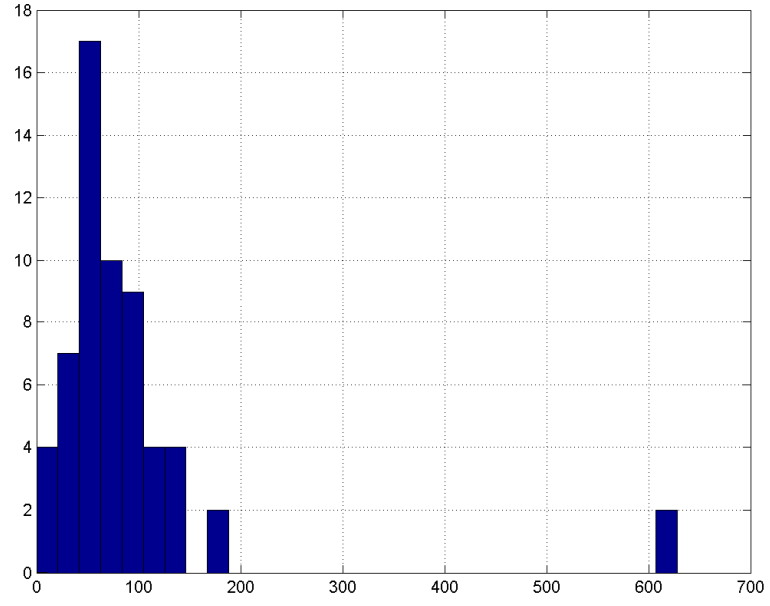
Şekil 5.10 İyileştirme öncesi Rota-1 Tur-8 hata dağılımı



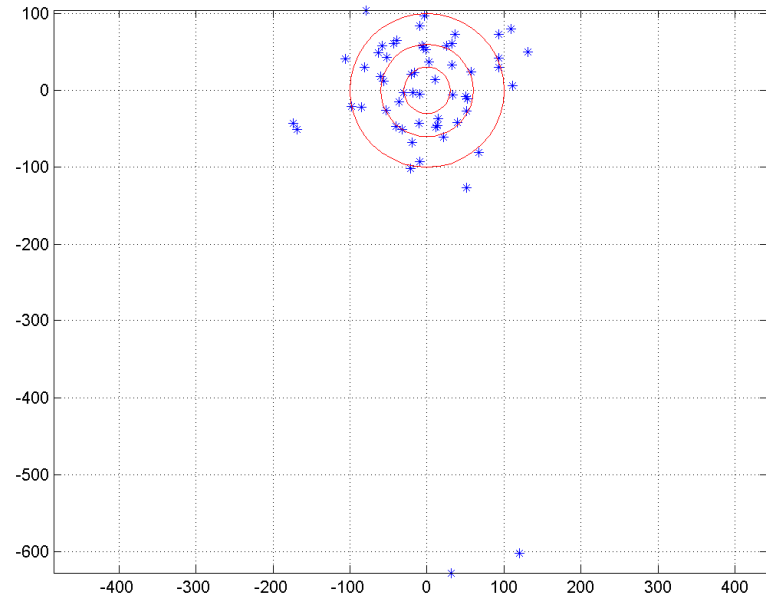
Şekil 5.11 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 konum grafiği



Şekil 5.12 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 hata grafiği



Şekil 5.13 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 hata histogramı



Şekil 5.14 İyileştirme öncesi Rota-2 Tur-2 hata dağılımı

5.3. İyileştirme Sonrası İÇKON Performansı

Hazırlanan veritabanları ile Bölüm 4'te verilen işlemler yapılarak konum hesaplanmıştır. Gerçek konum verilerinin zaman etiketleri referans alınmış ve bu ana en yakın zamanda hesaplanan konum ile eşleştirilmiştir. Geliştirilen sistemin konum tazeleme hızı en az 10Hz olduğundan eşlemede oluşabilecek zaman hatası, en fazla 50ms ve mesafe hatası en fazla 10mm olmaktadır.

İyileştirme sonrası performans sonuçları Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5 ile aynı formatta hazırlanmıştır. Çizelge 5.6'da Rota-1 için, Çizelge 5.7'de ise Rota-2 için hesaplanan hatalar tablo olarak verilmiştir.

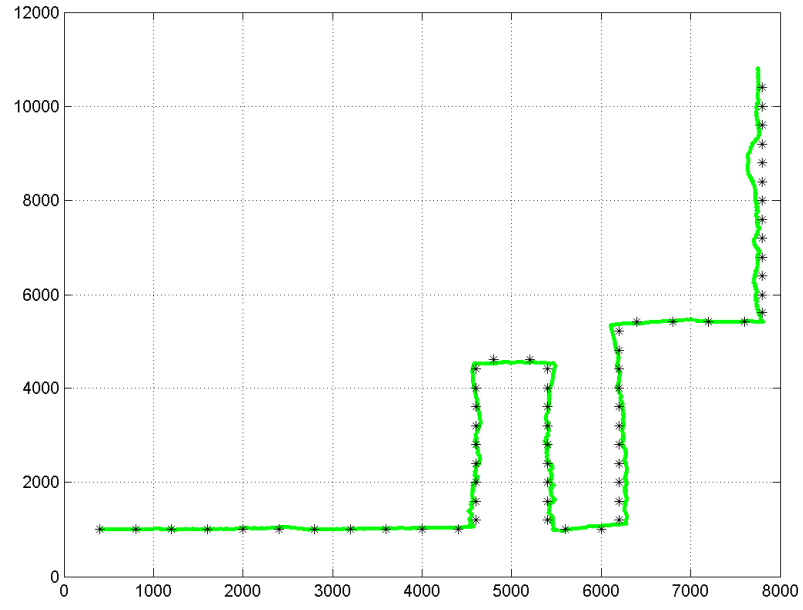
Çizelge 5.6 İyileştirme sonrası Rota-1 için hesaplanan hatalar

Tur Numarası	Hata Ortalama (mm)	Hata Standart Sapma (mm)	Hata < 30mm (%)	Hata < 60mm (%)	Hata < 100mm(%)
1	77,6495	66,0210	11,6	41,6	81,6
2	78,2445	47,7852	8,3	41,6	76,6
3	64,7396	26,5731	5,0	50,0	86,6
4	66,3645	37,0366	11,6	48,3	88,3
5	153,1672	169,0250	10,0	26,6	56,6
6	63,8699	38,7508	11,6	63,3	86,6
7	66,5926	35,7090	16,6	45,0	83,3
8	74,1261	64,2015	21,6	53,3	78,3
9	69,1652	47,0929	18,3	50,0	80,0
10	64,7667	34,0992	13,3	48,3	86,6
Ortalama	77,86858	56,62943	12,8	46,8	80,5

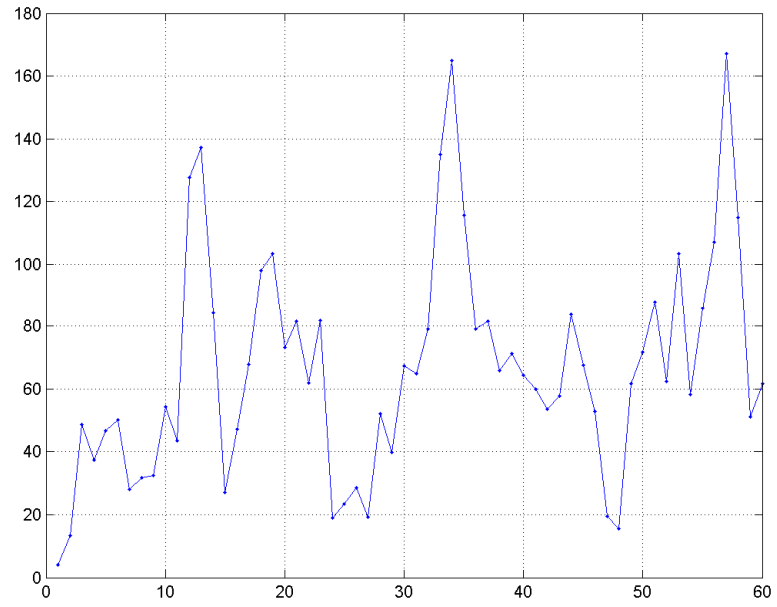
Çizelge 5.7 İyileştirme sonrası Rota-2 için hesaplanan hatalar

Test No	Hata Ortalama (mm)	Hata Standart Sapma (mm)	Hata < 30mm (%)	Hata < 60mm (%)	Hata < 100mm (%)
1	60,6120	35,6394	15,0	58,3	88,3
2	70,4070	60,6932	15,0	58,3	80,0
3	58,1539	39,4905	25,0	56,6	88,3
4	57,1994	34,5692	16,6	56,6	90,0
5	61,6636	30,5436	13,3	51,6	91,6
6	77,2056	46,8964	10,0	36,6	81,6
7	56,4712	33,2880	15,0	70,0	86,6
8	60,5326	30,1034	8,3	61,6	90,0
9	58,4897	34,9986	13,3	65,0	90,0
10	64,2701	38,5111	13,3	51,6	80,0
Ortalama	62,50051	38,47334	14,5	56,6	86,6

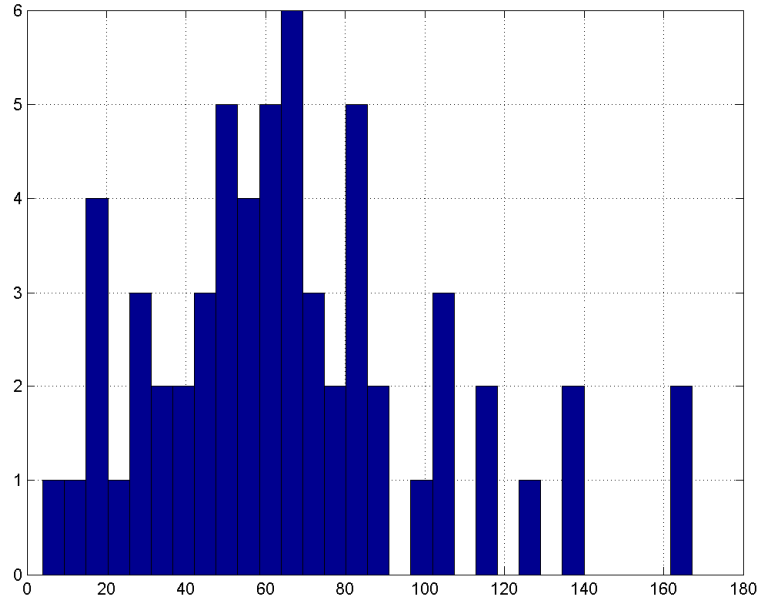
Rota-1 ve Rota-2'deki her tur için hazırlanan grafiklerin tümü Ekler Bölümü'nde verilmiştir. Ekler Bölümünde her tur için bir şekil verilmiş olup alt şekillerde (a) konum grafiği, (b) hata grafiği, (c) hataların histogramı ve (d) hataların dağılımı grafikleri verilmiştir. Grafiklerin formatları, iyileştirme öncesi İÇKON için oluşturulan grafikler ile tamamen aynıdır. Bu sebeple grafikler ile ilgili açıklamalar burada tekrar edilmemiştir. Örnek olması ve fikir vermesi açısından, bu bölüme sadece Rota-1 Tur-7 için (Şekil 5.15 – Şekil 5.18) ve Rota-2 Tur-3 için (Şekil 5.19 – Şekil 5.22) hazırlanan grafikler verilmiştir.



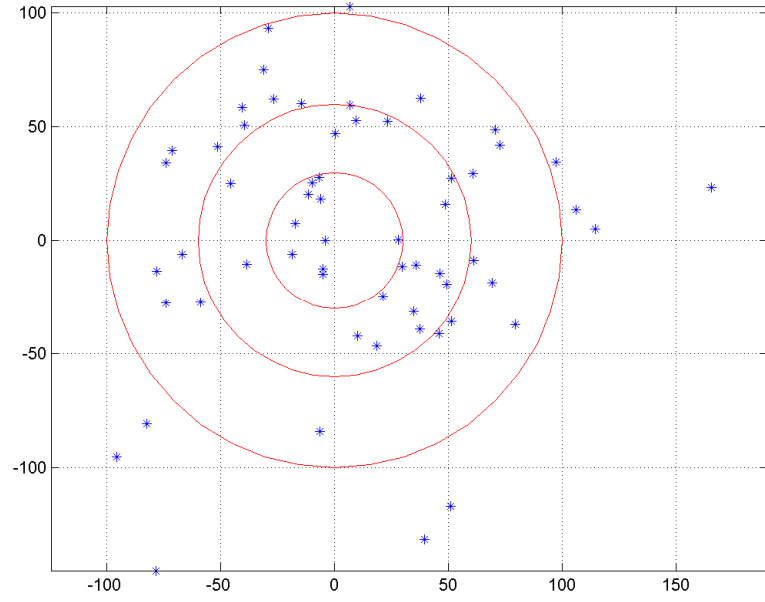
Şekil 5.15 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 konum grafiği



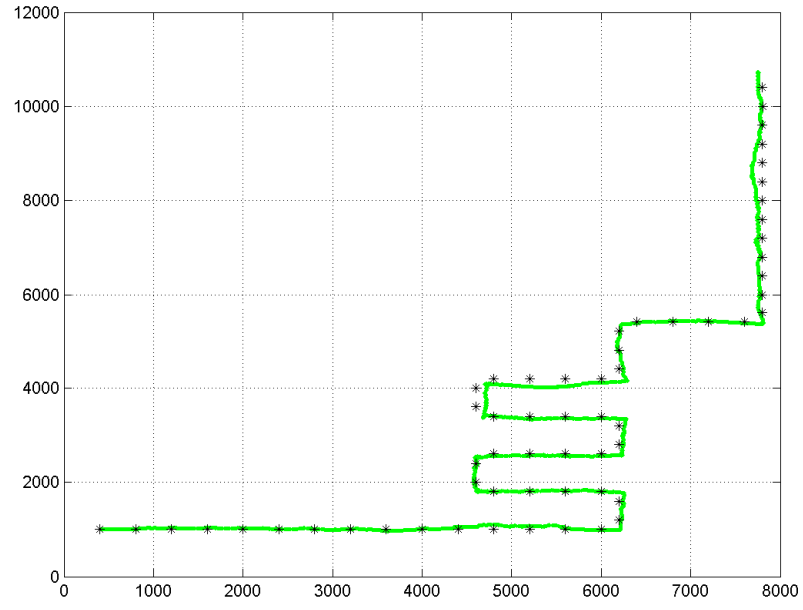
Şekil 5.16 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 hata grafiği



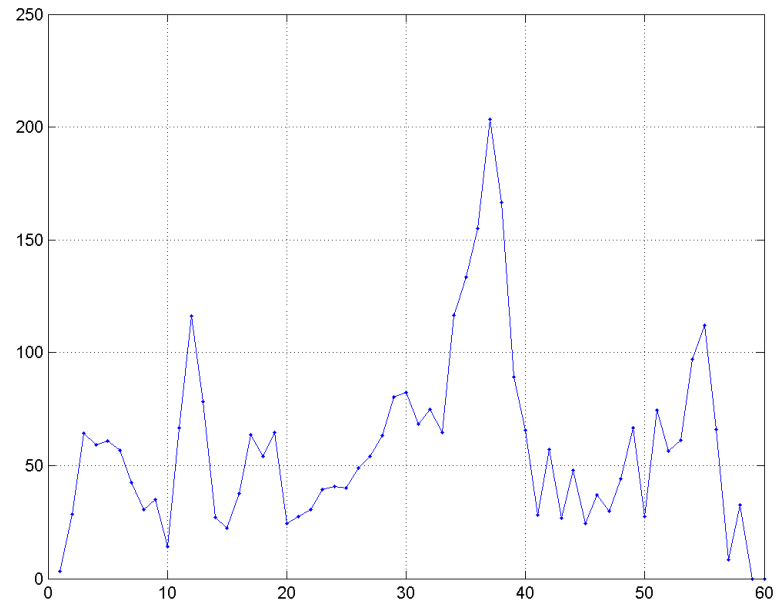
Şekil 5.17 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 hata histogramı



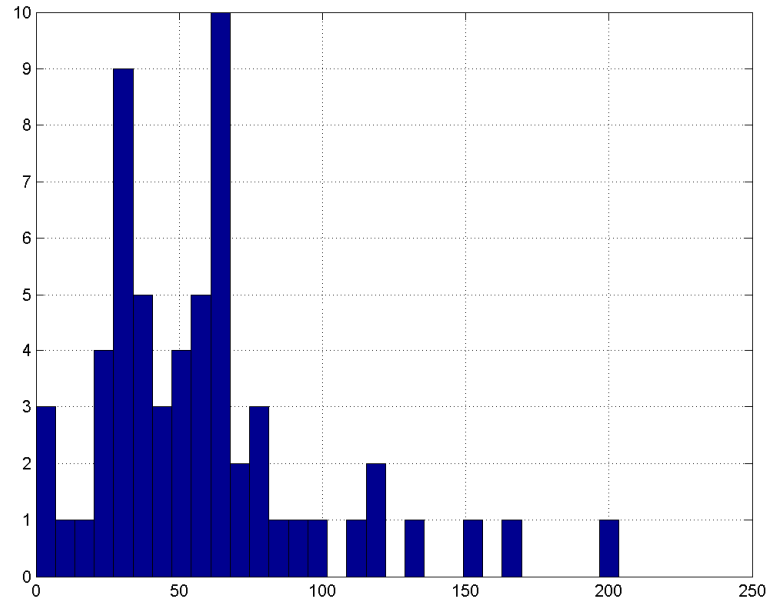
Şekil 5.18 İyileştirme sonrası Rota-1 Tur-7 hata dağılımı



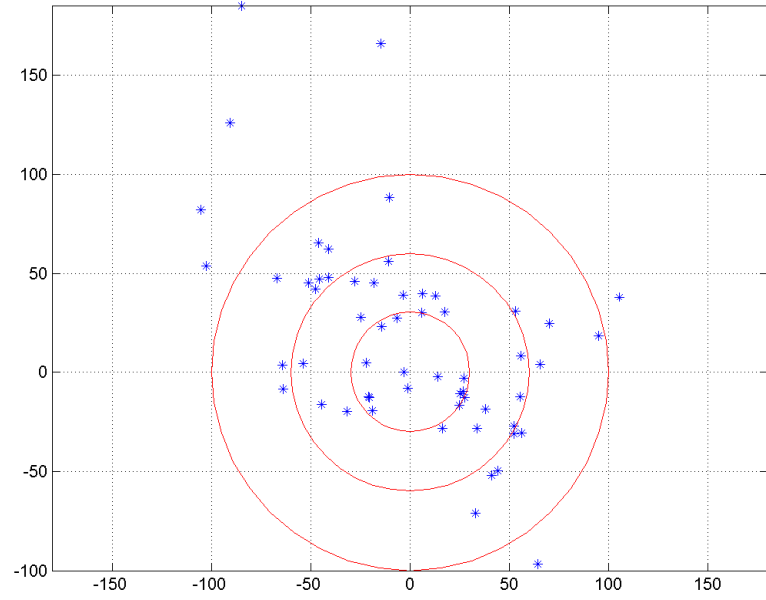
Şekil 5.19 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 konum grafiği



Şekil 5.20 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 hata grafiği



Şekil 5.21 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 hata histogramı



Şekil 5.22 İyileştirme sonrası Rota-2 Tur-3 hata dağılımı

Devam eden kısımda, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi verilmektedir.

5.4. Deney Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan deneysel çalışmalarda iyileştirme öncesi ve sonrası İÇKON sistemi için toplanan veriler karşılaştırılarak, yapılan çalışmaların sistemin performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.8’da Rota-1 için, Çizelge 5.9’da da Rota-2 için iyileştirme öncesi ve iyileştirme sonrası için çıkartılan özet tablolar verilmiştir.

Çizelge 5.8 Rota-1 için iyileştirme çalışmalarının performans üzerine etkisi

Rota-1	Hata Ortalama (mm)	Hata Standart Sapma (mm)	Hata < 30mm (%)	Hata < 60mm (%)	Hata < 100mm(%)
İyileşme Öncesi	103,0977	124,4329	12,45	39,34	69,68
İyileşme Sonrası	77,86858	56,62943	12,8	46,8	80,5
İyileşme Yüzdesi	24,47108	54,48999	2,8	19,0	15,5

Çizelge 5.9 Rota-2 için iyileştirme çalışmalarının performans üzerine etkisi

Rota-2	Hata Ortalama (mm)	Hata Standart Sapma (mm)	Hata < 30mm (%)	Hata < 60mm (%)	Hata < 100mm(%)
İyileşme Öncesi	112,82548	186,3002	11,73	40,87	72,56
İyileşme Sonrası	62,50051	38,47334	14,5	56,6	86,6
İyileşme Yüzdesi	44,60426	79,34874	23,6	38,5	19,3

Performans ölçütlerinden olan doğruluk, hatanın ortalama büyüklüğünü ifade etmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda Rota-1 için hata ortalaması 103,1mm'den 77,9mm'ye indirilmiş ve %24,5 performans artışı sağlanmış; Rota-2 için ise hata ortalaması 112,8mm'den 62,5mm'ye indirilmiş ve %44,6 performans artışı sağlanmıştır.

Kesinlik ölçütü hatanın dağılımı ile ilgilidir. Yapılan çalışmalar ile hatanın standart sapması Rota-1 için %54,5, Rota-2 için %79,3 azaltılmıştır. Hatanın 100mm içinde kalma yüzdesi Rota-1 için %15,5 arttırılarak %80,5 oranına ulaşılmış ve Rota-2 için %19,3 arttırılarak %86,6 oranına ulaşılmıştır.

İyileştirme sonrası İÇKON sistemi 70mm doğruluk ve %83,5 oranla 100mm altında kalan hata ile ifade edilebilecek kesinlik ölçütleri ile, iç ortam konumlandırma sistemleri arasında performans sıralamasında üst sıralarda yer almaktadır.

Kesinlik kapsamında değerlendirilebilecek diğer bir konu ise ardışıl konum çıktıları arasındaki gürültüdür. Otonom araçlar için geliştirilen kontrol algoritmalarında, okunan konumun doğruluğu kadar, okunan ardışıl konumların kendi içinde tutarlılığı da önemlidir. İÇKON sisteminde hesaplanan konumlar mutlak yöntemle hesaplandığı için ardışıl iki konum birbirinden bağımsızdır ve ölçümlerde oluşan hatalar, her yönde gürültüye sebep olabilmektedir. Ayrıca filtrelenemeyen hatalı konum değerleri konum çıktısında sıçramalara sebep olmaktadır. Bu gürültüler Şekil 5.7 ve Şekil 5.11'de açıkça görülmektedir. Geliştirilen sistemde kullanılan Adaptif Kalman Filtre ile bu gürültüler giderilmiş ve ardışıl konum çıktıları arasındaki kesinlik arttırılmıştır.

Karmaşıklık ölçütü açısından değerlendirildiğinde, tez kapsamında yapılan çalışmalar sistem karmaşıklığını az da olsa arttırmıştır. İlave olarak gezgin robotun üzerinden enkoder değerlerinin okunması ve bu değerlerin kullanılması için robot üzerindeki işlem gücünün arttırılması gerekmektedir.

Gürbüzlük ölçütü, yapılan çalışmalar ile önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Sistem artık konum hesaplamada sadece sesüstü sinyallere bağlı değildir. Sesüstü vericilerin

veya sistemdeki HKB'lerin arızalanması durumunda yada sesüstü sinyallerin ortamdaki engellerden dolayı GAB'a ulaşamaması durumunda konum çıktısı kesintiye uğramamakta ve bağıl konumlandırma ile devam ettirilmektedir. Bu anlamda sistemin kendisinde veya ortamdaki değişikliklerden yada arızalardan etkilenmesi önemli ölçüde azaltılmıştır.

Süreklilik açısından bakıldığında, İÇKON sisteminin bağıl konumlandırma ile desteklenmesi ile kapsama alanının her noktasında konum üretebilmesini sağlamış ve konum hesaplanamayan nokta kalmamıştır. Kullanılan bağıl konumlandırma sisteminde 100ms'lik peryotlar ile enkoderlerden ölçüm alınmaktadır. Ayrıca GAB vericilerden sinyal aldıkça mutlak konum hesaplanmaktadır. Bu durumda sistemin konum tazeleme hızı en az 10Hz olmaktadır. Süreklilik anlamında hem kapsama alanı hem de tazeleme hızı iyileştirilmiştir.

Ölçeklenebilirlik ölçütü açısından, bağıl konumlandırma entegrasyonu sayesinde sistemin merdiven, kolon, koridor vb. farklı yapıları barındıran iç ortamlara kurulması ve çalıştırılması kolaylaştırılmıştır. Ayrıca, yine bağıl konumlandırma desteği sayesinde iç ortamın tamamen sesüstü vericiler ile kapsanması gerekliliği de ortadan kalkmıştır.

Gezgin robot üzerinde ilave ölçüme ve bu ölçümleri işleyecek işlem gücüne ihtiyaç duyulması, maliyeti arttırsa da; kurulması gereken hücre sayısının azaltılabilir olması maliyeti düşürmektedir. Diğer maliyet kriterleri açısından bir değişiklik yoktur.

Kurulum kolaylığı açısından değerlendirildiğinde, bağıl konumlandırma desteği ile gerekli İÇKON hücre sayısının azaltılabilir olması önemlidir. Bu sayede, kurulum da kolaylaştırılmış olmaktadır.

Tez kapsamında yapılan çalışmaların, İÇKON sisteminin performansını farklı ölçütler açısından iyileştirdiği, deneysel çalışmaların sonuçları ile ortaya konulmuştur.

Devam eden bölümde tez kapsamında yapılan çalışmalar değerlendirilerek sonuç ve öneriler verilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

İç ortamlarda konumlandırma ihtiyacı ile her geçen gün artmakta olup bu ihtiyacı karşılamak için farklı sistemler önerilmiştir. Uygulama isterlerine bağlı olarak iç ortam konumlandırma sisteminden beklentiler de değişmektedir. Bu beklentiler farklı performans ölçütleri ortaya konmasına sebep olmuştur.

İÇKON, sadece sesüstü sinyalleri kullanan, İnovasyon Mühendislik Ltd. tarafından geliştirilmiş bir iç ortam konumlandırma sistemidir. Tez kapsamında İÇKON sisteminin performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, yeni bir iteratif konum hesaplama yöntemi geliştirilmiş, geometri uygunluğuna dayalı bir konum kontrol algoritması oluşturulmuş, bağıl konumlandırma ile entegrasyon sağlanmıştır. Bağıl konumlandırma ile entegrasyon için sisteme özgün bir yöntemle baş açısı hesaplama özelliği kazandırılmış ve sıkı bağlı bir yapı içerisinde bağıl konumlandırma ve İÇKON sistemi birleştirilmiştir. Bu yapıda baş açısı için ve konum için iki farklı Kalman Filtre kullanılmıştır. Konum için kullanılan Kalman Filtre, adaptif hale getirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda; doğruluk ve kesinlik başta olmak üzere pekçok performans ölçütünün önemli oranda iyileştirildiği görülmüştür.

İleriye yönelik olarak, İÇKON sisteminin hesapladığı konum sonucundaki hatanın kestirimine yönelik detaylı çalışmalar yapılabilir, böylelikle Kalman Filtre'lerin daha doğru çalışması sağlanabilir. Daha fazla sensör verisinin kullanılması ile daha doğru ve güvenilir konum sonuçları alınabilir. Bu kapsamda sistemin ortam krokisini bilmesi ve engellere olan mesafelerin ölçülmesi ile elde edilen veriler de, İÇKON ve bağıl konumlandırma sonuçları ile birleştirilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ahn H. S. ve Ko K. H., Oct. 2009, Simple Pedestrian Localization Algorithms Based On Distributed Wireless Sensor Networks, IEEE Transactions Industrial Electronics., Vol. 56, No. 10, 4296–4302 p.

Akar B., Yayan U., Yücel H., Bayar V., ve Yazıcı A., Eylül 2013, Akıllı Tekerlekli Sandalye Kontrolü İçin Sonlu Durum Makinesi Tasarımı, TOK2013, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'13) Bildiriler Kitabı, Malatya Türkiye, 119-124 p.

Akca,T., ve Demirekler M., Apr. 2012, An Adaptive Unscented Kalman Filter for Tightly Coupled INS/GPS Integration, Position Location and Navigation Symposium (PLANS), IEEE/ION, 389-395 p.

Awarepoint (RFID), 2014, <http://www.awarepoint.com>.

Bahl P. ve Padmanabhan V. N., Feb. 2000, Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System, Microsoft Corp., Tech. Rep. MSR-TR- 2000–12,

Cen G., Matsuhira N., Hirokawa J., Ogawa H., ve Hagiwara I., 14-17 Oct. 2008, Mobile Robot Global Localization Using Particle Filters, In International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2008, 710-713 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chai W., Chen C., Edwan E., Zhang J., ve Lof-feld O., Mar. 2012, INS/Wi-Fi based indoor navigation using adaptive Kalman filtering and vehicle constraints, In Proceedings of 9th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2012 (WPNC'12), 36-41 p.
- Chung W. C. ve Ha D. S., Nov. 2003, An accurate Ultra Wideband (UWB) Ranging for Precision Asset Location, In Int. Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies, Reston, VA, 389–393 p.
- Dey A. K., Hightower J., de Lara E., ve Davies N., Jan. 2010, Location-based services, IEEE Pervasive Computing, vol. 9, no. 1, 11–12 p.
- Drane C., Macnaughtan M., ve Scott C., Apr. 1998, Positioning GSM telephones IEEE Commun. Mag., vol. 36, no. 4, 46–54, 59 p.
- EkaHau, Inc. EkaHau Positioning Engine 2.0, 2014, <http://www.ekahau.com/>
- Frank K., Krach B., Catterall N., ve Robertson P., Sep. 2009, Development and Evaluation of a Combined WLAN and Inertial Indoor Pedestrian Positioning System, In: 4th International Symposium on Location and Context Awareness. ION GNSS 2009, 22 -25 p.
- Fukuju Y., Minami M., Morikawa H. ve Aoyama T., May 2003, DOLPHIN: An Autonomous Indoor Positioning System in Ubiquitous Computing Environment, IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems, 53-56 p.
- Jiroskop, 2014, <http://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hallberg, J., Nilsson, M., ve Synnes, K., Mar. 2003, Positioning with Bluetooth, Proceedings of ICT 2003. vol.2., 954- 958 p.

Harter A. ve Hopper A., Oct. 1997, A New Location Technique for the Active Office, IEEE Personal Communications, 43–47 p.

Hexamite, 2014, www.hexamite.com.

Hightower J., Want R. ve Borriello G., Feb. 2000, SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, Univ. Washington, Seattle, Tech. Rep. UW CSE 2000–02-02,

Ibrahim M. ve Youssef M., Jan. 2012, CellSense: An accurate energy-efficient GSM positioning system, IEEE Trans. Veh. Technol. , vol. 61, no. 1, 286–296 p.,

Jimenez Ruiz A. R., Jan. 2012, Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted IMU and RFID measurements, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 61, no. 1, 178–189 p.

Julier S.J ve Uhlmann J.K, Mar. 2004, Unscented Filtering and Nonlinear Estimation, Proceedings of the IEEE, Vol 92, No.3, 401-422 p.

Kalman, R. E., Mar. 1960, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transaction of the ASME Journal of Basic Engineering, 35-45 p.

Kim G. ve Chung W., Oct. 2006, Tripodal schematic control architecture for integration of multi-functional indoor service robots, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 5, 1723–1736 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim S. J. ve Kim B. K., Oct. 2013, Dynamic ultrasonic hybrid localization system for indoor mobile robots, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 10, 4562–4573 p.
- Kim Y., Chon Y., ve Cha H., Jan. 2012, Smartphone-Based Collaborative and Autonomous Radio Fingerprinting, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 42, no. 1, 112–122 p.
- Kwon S., Yang K., ve Park S., Oct. 2006, An effective kalman filter localization method for mobile robots. In Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), 1524 – 1529 p.
- Lee S., Kim B., Kim H., Ha R., ve Cha H., Aug. 2011, Inertial sensor-based indoor pedestrian localization with minimum 802.15.4a configuration, IEEE Trans. Ind. Inf., vol. 7, no. 3, 455–466 p.
- Lee T., Shin J., ve Cho D., Jul. 2009, Position estimation for mobile robot using in-plane 3-axis IMU and active beacon, In Proc. IEEE Ind. Electronics, 1956–1961 p.
- Liu H., Darabi H., Banerjee P. ve Liu J., Nov. 2007, Survey of wireless indoor positioning techniques and systems, Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 6, 1067 –1080 p.
- Nav350, 2014, <https://www.mysick.com/eCat.aspx?go=FinderSearch&Cat=Row&AtFa&Cult=english&FamilyID=344&Category=Produktfinder&Selections=34430>
- Neato, 2014, <http://www.neatorobotics.com/>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ni L. M., Liu Y., Lau Y. C. ve Patil A. P., Nov. 2004, LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID, *Wireless Netw.*, vol. 10, no. 6, 701–710 p.
- Paul A. ve Wan E., Oct. 2009, RSSI-Based Indoor Localization and Tracking using Sigma-Point Kalman Smoothers, *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 3, no. 5, 860–873 p.
- Pavani T., Costa G., Mazzotti M., Conti A. ve Dardari D., May 2006, Experimental Results on Indoor Localization Techniques through Wireless Sensors Network, *Vehicular Technology Conference, VTC 2006-Spring. IEEE 63rd Volume 2*, 663 – 667 p.
- Priyantha N. B., 2005, *The Cricket Indoor Location System*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Raitoharju M., Nurminen H., ve Piche R. Oct. 2013, A Linear State Model for PDR+WLAN Positioning, In *Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, 113 – 118 p.
- Rajagopal S., Roberts R. D. ve Lim S. K. Mar. 2012, IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, 72 -82 p.
- Q-Track NFER, 2014, <http://www.q-track.com/>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Saha S., Chaudhuri K., Sanghi D., ve Bhagwat P., Mar. 2003., Location determination of a mobile device using IEEE 802.11 access point signals. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), New Orleans, LA., 1987–1992 p.
- Särkkä S., Sep. 2007, “On unscented Kalman filtering for state estimation of continuous-time nonlinear systems” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 52, no. 9, 1631–1641 p.
- Svecova, D. K., ve R. Zetik, Apr. 2008, Object Localization Using Round Trip Propagation Time Measurements, Radioelektronika, 2008 18th International Conference, Prague, Czech Republic, 1-4 p.
- Segura M., Mut V., ve Sisterna C., June 2012, Ultra wideband indoor navigation system, Radar Sonar & Navigation IET, vol. 6, no. 5, 402-411 p.
- Smith D. M., Adams J. D., Nierenberg N. C., ve Baker J. C., 2007, Wireless position location and tracking system, United States Patent 7312752.
- Sun C.J., May. 2010, A sensor based indoor mobile localization and navigation using unscented Kalman filter, 2010 IEEE on Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 327-331 p.
- UbiSense Company, 2014 <http://www.ubisense.net>.
- Wang D., Low C., He B., ve Pham M., Dec. 2004, Accurate Positioning for Real-Time Control Purpose: Integration of GPS, NAV200 and Encoder Data, ICARCV, Vol. 1, 161 - 166 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Want R., Hopper A., V. Falcao, ve J. Gibbons, Jan. 1992, The active badge location system, ACM Trans. Inf. Syst., 91–102 p.
- Wong C., Klukas R., ve Messier G., Sept. 2008, Using WLAN infrastructure for angle-of-arrival indoor user location, Vehicular Tech. Conf., VTC 2008-Fall. IEEE 68th, 1-5 p.
- Wu C. J. ve Tsai C.C., Mar. 2001, Localization of an Autonomous Mobile Robot Based on Ultrasonic Sensory Information, Journal of Intelligent and Robotic Systems 30: 267–277 p.
- Xiang Z., Song S., Chen J., Wang H., Huang J. ve Gao X., Sep. 2004, A WLAN based indoor positioning technology, IBM Journal of Research and Development, 617 – 626 p.
- Xiao W., Ni W. ve Toh Y. K. Sept 2011, Integrated Wi-Fi fingerprinting and inertial sensing for indoor positioning, 2011 Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Guimares, Portugal, 1-6 p.
- Yayan U., Yucel H., ve Yazıcı A., Jun. 2011, An ultrasonic based indoor positioning system, In Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) 2011 International Symposium on, 585-589 p.
- Yayan U., Akçakoca M., Kılıç İ., Yücel H., ve Yazıcı A., Eylül 2013, Akıllı Tekerlekli Sandalye İçin Düşük Seviyeli Denetleyici Tasarımı, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'13) Bildiriler Kitabı, Malatya Türkiye, 114-118 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yayan U., Yücel H., ve Yazıcı A., May 2014, A Low Cost Ultrasonic Based Positioning System for the Indoor Navigation of Mobile Robots, Journal of Intelligent & Robotic Systems, DOI:10.1007/s10846-014-0060-7.
- Yazıcı A., Sipahioglu A. ve Parlaktuna O., Jan. 2009, A Heuristic-Based Dynamic Route Planning Method for a Homogeneous Multi-robot Team, Advanced Robotics, v.23, 269-287 p.
- Yazıcı A., Yayan U. ve Yücel H., 11-13 Ekim 2012, İç Ortamlar için Konumlandırma Sistemi, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi 2012 Ulusal Toplantısı, Niğde Türkiye, vol. 2, 546-551 p.
- Yücel H., Edizkan R., Yazıcı A., ve Yayan U., Ekim 2012. İç ortamlar için konumlandırma sistemi'nde kodlayıcı desteği ile performans iyileştirme, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2012), Niğde, 552-557 p.
- Youssef M., Agrawala A. ve Shankar A. U., Mar. 2003, WLAN location determination via clustering and probability distributions, IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun, 143–151 p.
- Zebra Enterprise, 2014, <http://zes.zebra.com/products/rtps/index.jsp>.

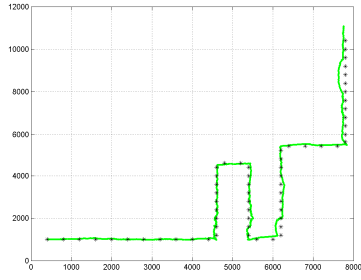
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhang Y., Fang Z., Li R., ve Hu W., Sep. 2009, The Design and Implementation of a RSSI-Based Localisation System, 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom), IEEE, 24-26, 1-4 p.

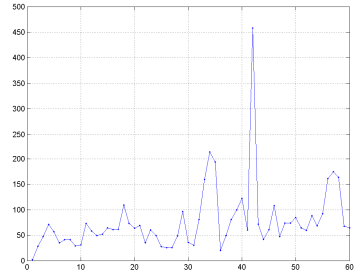
Zhou J., Knedlik S. ve Loffeld O., 2010, INS/GPS Tightly-coupled Integration Using Adaptive Unscented Particle Filter, The Journal of Navigation, vol. 63, no. 03, 491-511 p.

EKLER

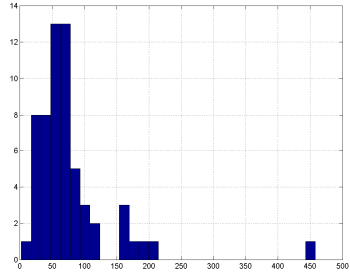
Rota-1 Deneysel Çalışma Sonuçları



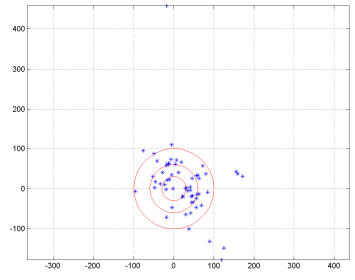
(a)



(b)

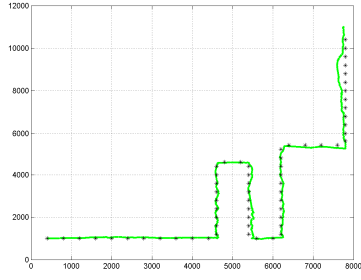


(c)

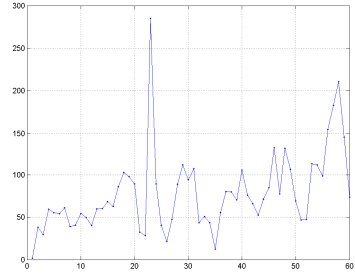


(d)

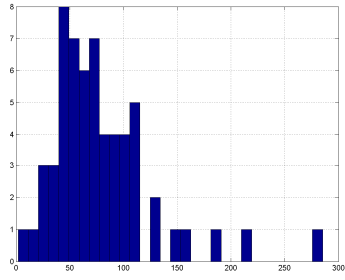
Rota-1, Tur-1 deney sonuçları



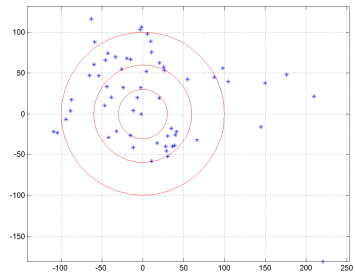
(a)



(b)

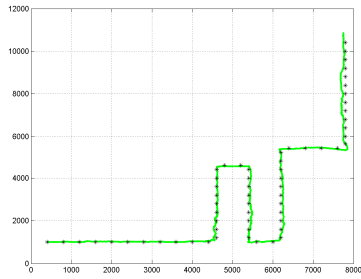


(c)

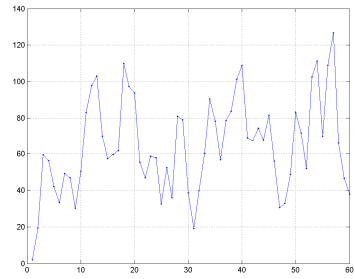


(d)

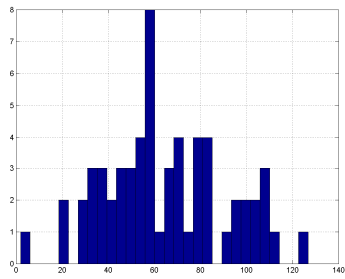
Rota-1, Tur-2 deney sonuçları



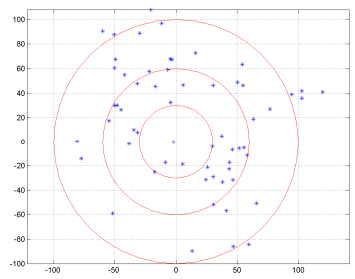
(a)



(b)

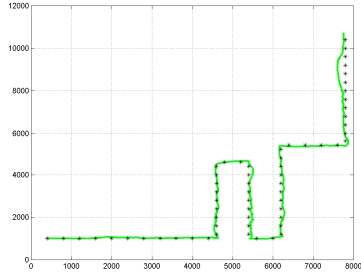


(c)

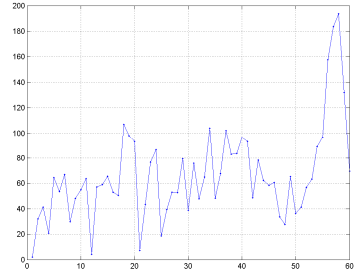


(d)

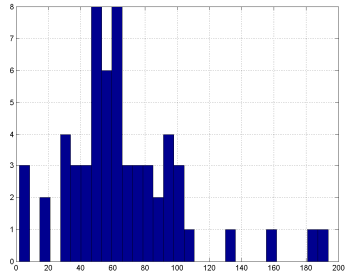
Rota-1, Tur-3 deney sonuçları



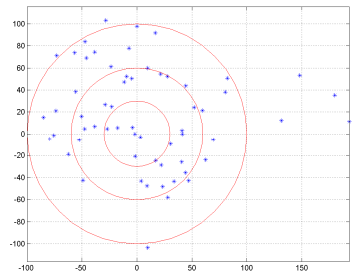
(a)



(b)

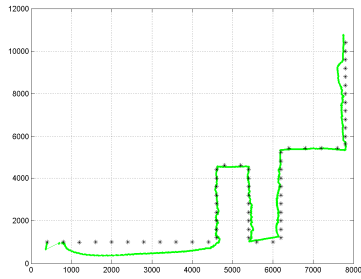


(c)

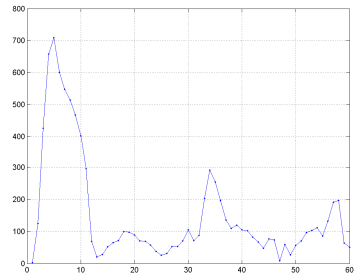


(d)

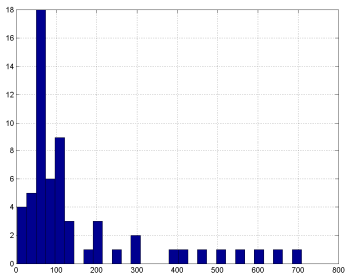
Rota-1, Tur-4 deney sonuçları



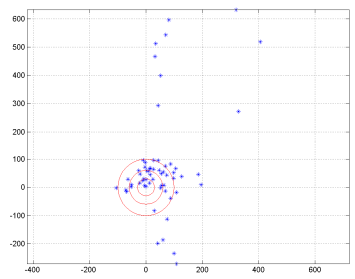
(a)



(b)

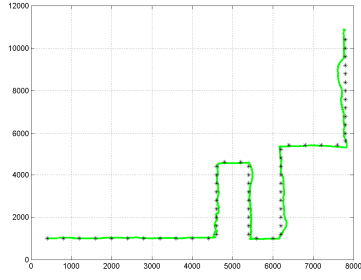


(c)

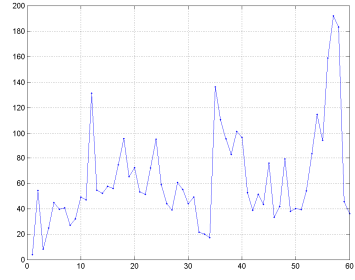


(d)

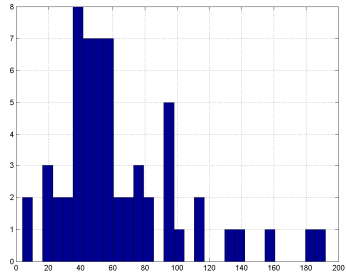
Rota-1, Tur-5 deney sonuçları



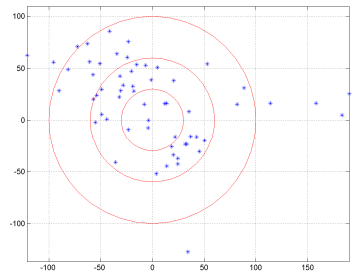
(a)



(b)

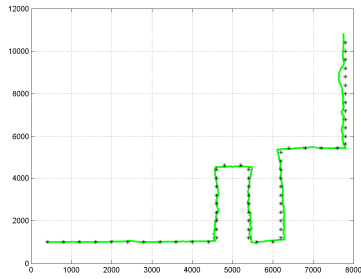


(c)

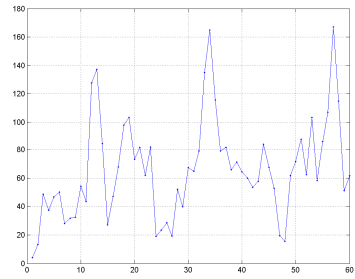


(d)

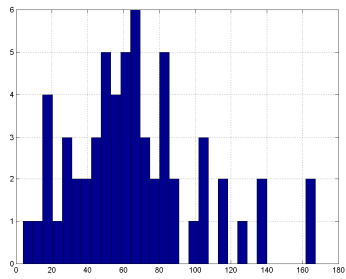
Rota-1, Tur-6 deney sonuçları



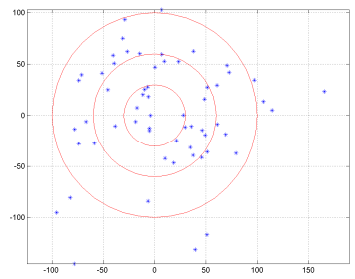
(a)



(b)

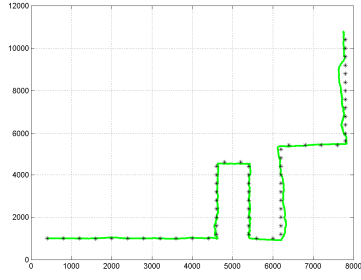


(c)

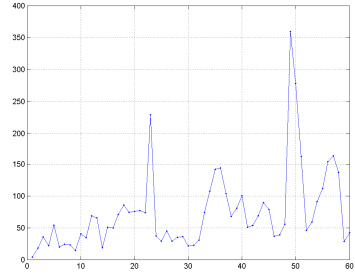


(d)

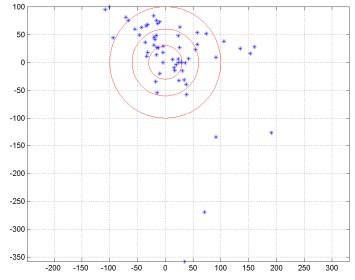
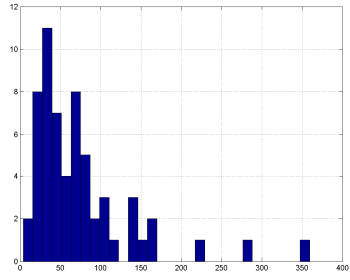
Rota-1, Tur-7 deney sonuçları



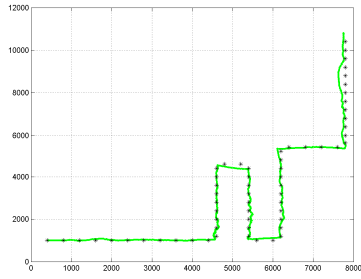
(a)



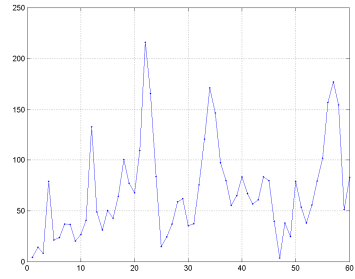
(b)



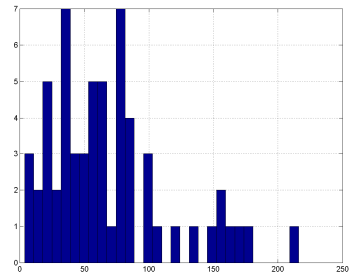
Rota-1, Tur-8 deney sonuçları



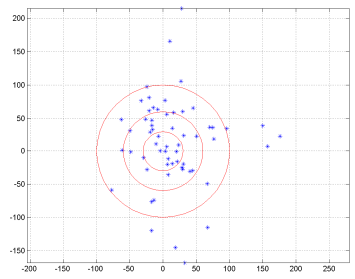
(a)



(b)

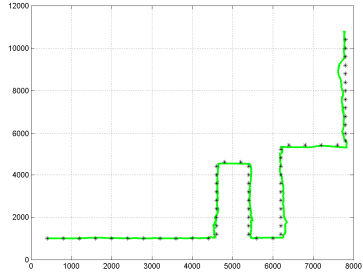


(c)

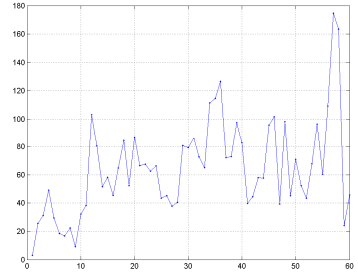


(d)

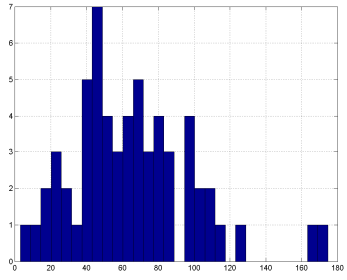
Rota-1, Tur-9 deney sonuçları



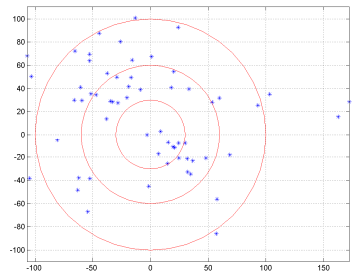
(a)



(b)



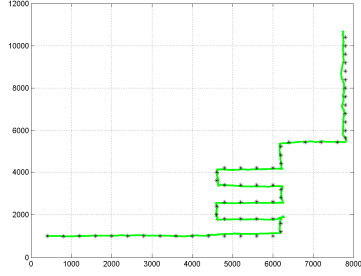
(c)



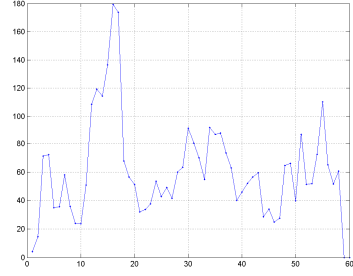
(d)

Rota-1, Tur-10 deney sonuçları

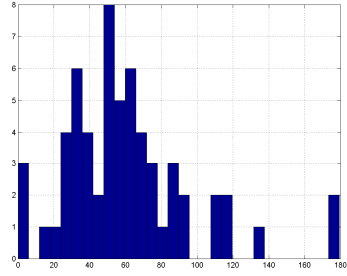
Rota-2 Deneysel Çalışma Sonuçları



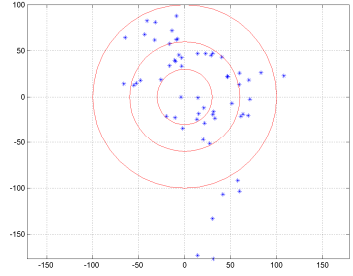
(a)



(b)

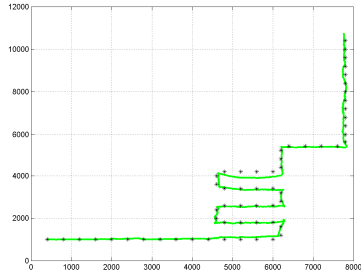


(c)

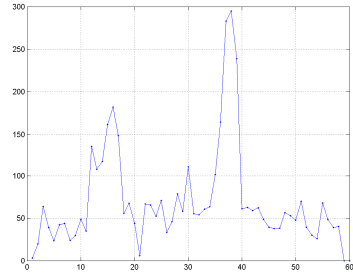


(d)

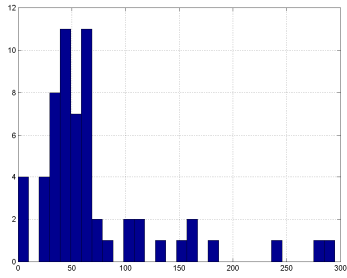
Rota-2, Tur-1 deney sonuçları



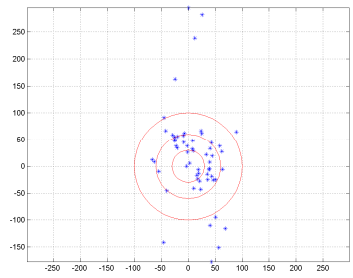
(a)



(b)

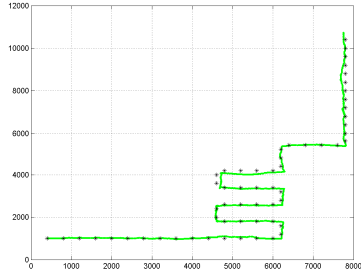


(c)

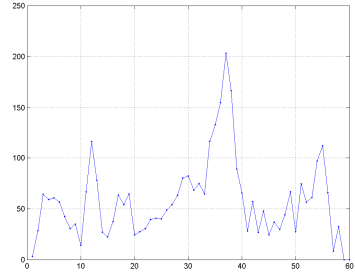


(d)

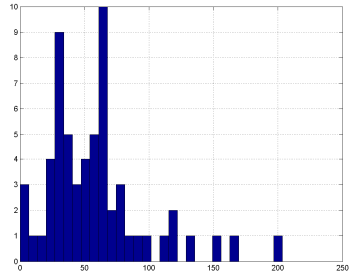
Rota 2, Tur-2 deney sonuçları



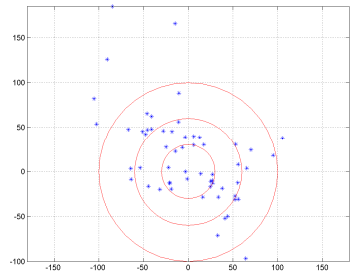
(a)



(b)

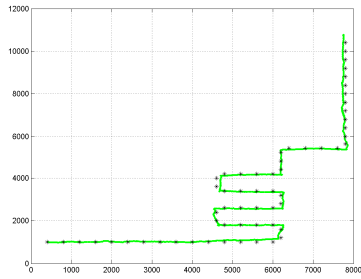


(c)

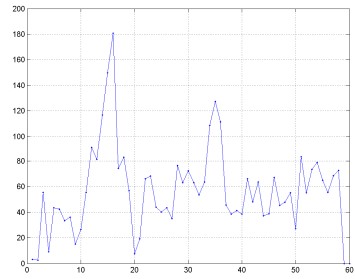


(d)

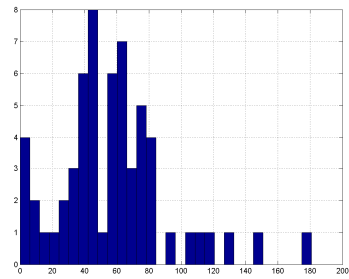
Rota-2, Tur-3 deney sonuçları



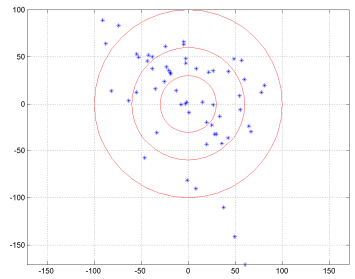
(a)



(b)

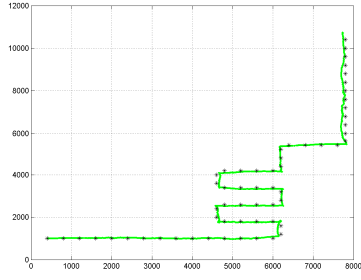


(c)

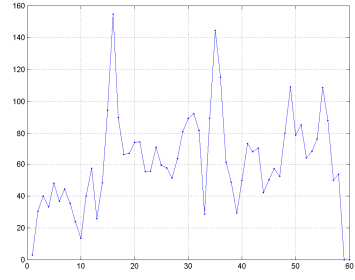


(d)

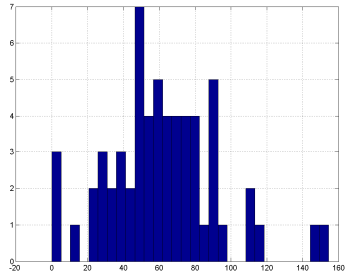
Rota 2, test 4 deney sonuçları



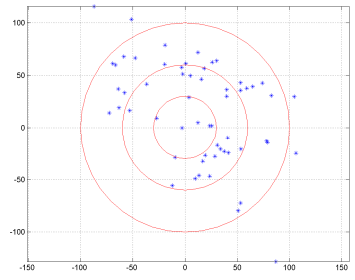
(a)



(b)

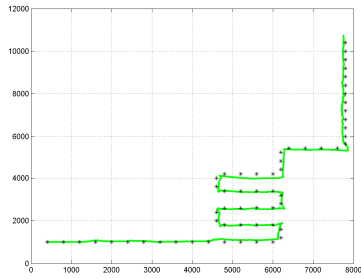


(c)

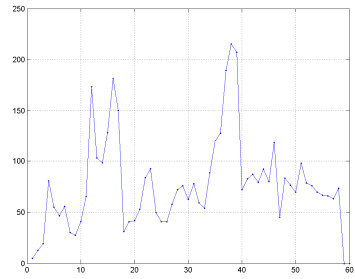


(d)

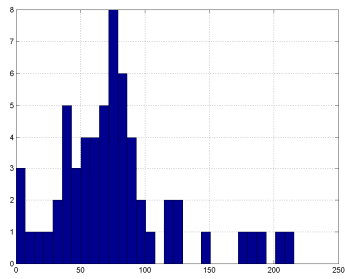
Rota 2, test 5 deney sonuçları



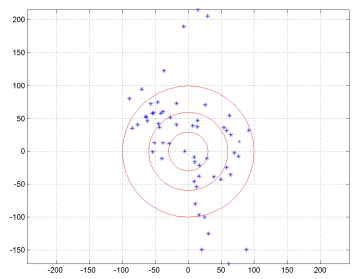
(a)



(b)

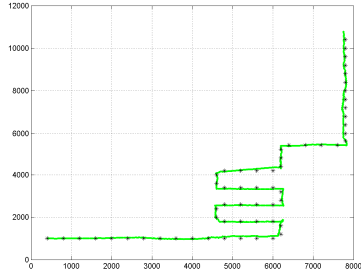


(c)

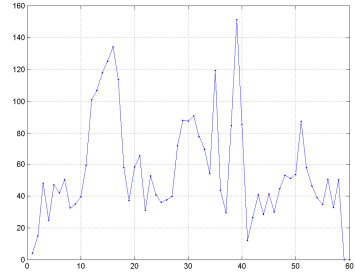


(d)

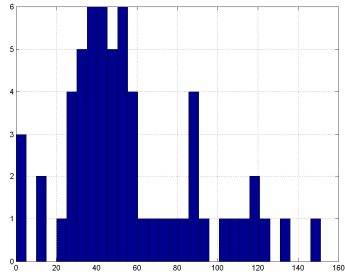
Rota 2, test 6 deney sonuçları



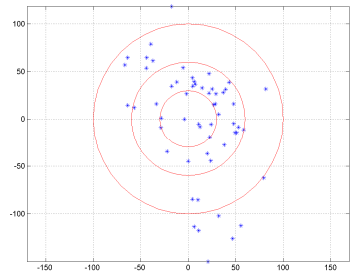
(a)



(b)

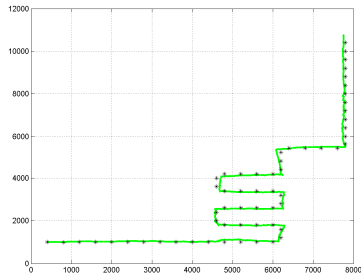


(c)

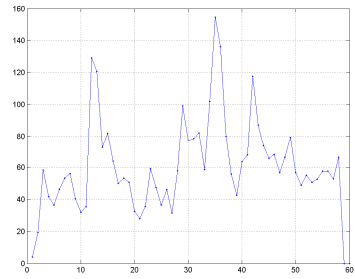


(d)

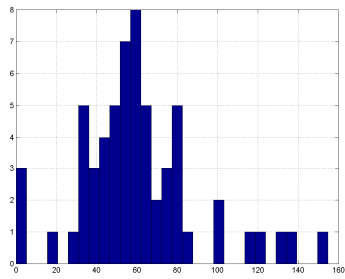
Rota-2, Tur-7 deney sonuçları



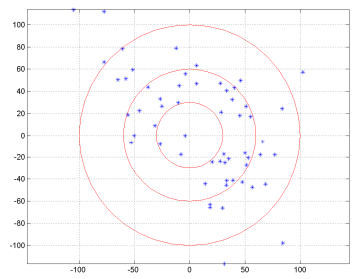
(a)



(b)

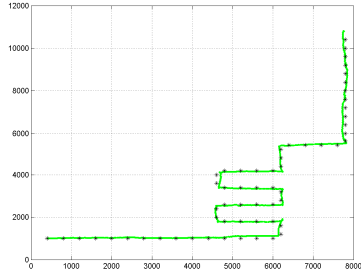


(c)

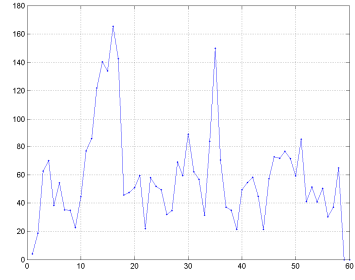


(d)

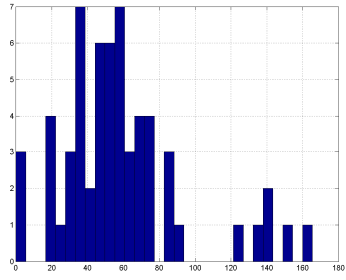
Rota-2, Tur-8 deney sonuçları



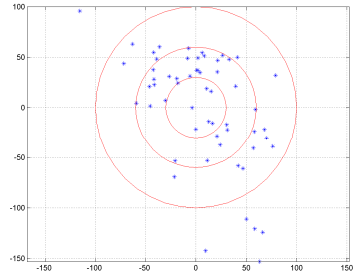
(a)



(b)

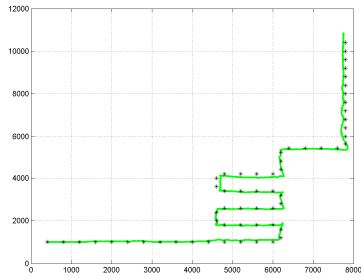


(c)

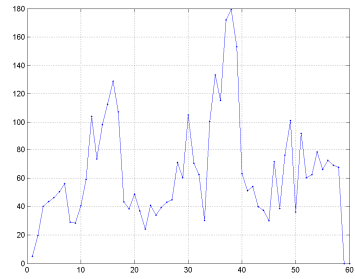


(d)

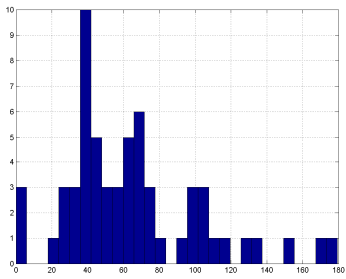
Rota-2, Tur-9 deney sonuçları



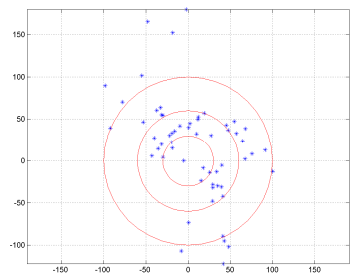
(a)



(b)



(c)



(d)

Rota-2, Tur-10 deney sonuçları

ÖZGEÇMİŞ

Hikmet Yücel, 1975 yılında Eskişehir’de doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi aynı ilde bitirdi. 1997 yılında ODTÜ Havacılık Mühendisliği’nden mezun oldu. Aynı yıl Eskişehir 1’nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı’nda Uçak Mühendisi olarak göreve başladı. 2003 yılında Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans derecesini aldı. 2007 yılında yedek subay olarak askerlik hizmetine başladı. 2009 yılında ortağı ile birlikte Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Osmangazi Teknopark’ta İnovasyon Mühendislik Ltd. firmasını kurdu. Halen İnovasyon Mühendislik Ltd. firmasında Genel Müdür olarak görev yapmaktadır. Yayınlarından bazıları aşağıda verilmiştir:

Yayan U., **Yücel H.**, Yazıcı A., May 2014, A Low Cost Ultrasonic Based Positioning System for the Indoor Navigation of Mobile Robots, Journal of Intelligent & Robotic Systems, DOI:10.1007/s10846-014-0060-7.

Yazıcı A., Yayan U., **Yücel H.**, An Ultrasonic Based Indoor Positioning System, INISTA 2011, International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, 2011, İstanbul Turkey, pp. 585-589.

Yayan U., Yazıcı A., **Yücel H.**, “İç Ortamlar için Konumlandırma Sistemi.” Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi 2012 Ulusal Toplantısı, 11-13 Ekim 2012, Niğde Türkiye, vol. 2, pp. 546-551.

Yücel H., Edizkan R., Yazıcı A., Yayan U., İç Ortamlar için Konumlandırma Sistemi (İÇKON)’nde Kodlayıcı Desteği ile Performans İyileştirme, TOK 2012, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi 2012 Ulusal Toplantısı, Niğde Türkiye, vol.2, pp. 552-557

Yücel H., Yazıcı A., Edizkan R., “A survey of indoor localization systems”, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), p: 1267-1270, 2014.