

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOKLU ALGILAYICI FÜZYONUNUN ÇOKLU ROBOT SİSTEMLERİNDE EŞ
ZAMANLI KONUM BELİRLEME VE HARİTALAMA PROBLEMİNE
UYGULANMASI**

GÜRKAN TUNA

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE OTOMASYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. KAYHAN GÜLEZ**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOKLU ALGILAYICI FÜZYONUNUN ÇOKLU ROBOT SİSTEMLERİNDE EŞ
ZAMANLI KONUM BELİRLEME VE HARİTALAMA PROBLEMİNE
UYGULANMASI**

Gürkan TUNA tarafından hazırlanan tez çalışması 10/07/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Yrd. Doç. Dr. Vehbi Çağrı GÜNGÖR
Bahçeşehir Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Vehbi Çağrı GÜNGÖR
Bahçeşehir Üniversitesi

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halit PASTACI
Haliç Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Olcay KURŞUN
İstanbul Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2010-04-02-ODAP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında tecrübe ve değerli görüşleri ile beni yönlendiren ve çalışmanın yürütülmesine olanak sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ'e çok teşekkür ederim.

Çok değerli yardım, yorum, destek ve ilgisini bu çalışmamda bir an olsun esirgemeyen tez ikinci danışmanım Yrd. Doç. Dr. Vehbi Çağrı GÜNGÖR'e minnettarım.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşan ve bana yol gösteren tez izleme komitesinin değerli üyeleri Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ ve Prof. Dr. Halit PASTACI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez sınavı jürisinin değerli üyeleri Yrd. Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Olcay KURŞUN'a yapıcı eleştirileri ve tavsiyeleri için teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında her zaman güleryüz, yardım ve ilgi gösteren elektrik mühendisliği ve kontrol ve otomasyon mühendisliği bölümü öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine başta değerli arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN ve Arş. Gör. Tarık Veli MUMCU olmak üzere teşekkür etmek istiyorum.

Robotik keşif stratejileri konusundaki çalışmalarım sırasında değerli bilgilerini paylaşan, Melbourne Üniversitesi'nde doktora sonrası araştırmacı olarak çalışan arkadaşım Julian de HOOG'a çok teşekkür ederim.

Tüm bunların yanında çalışmam süresince özveri ile desteklerini her zaman arkamda hissettiğim aileme çok teşekkür ederim.

Haziran, 2012

Gürkan TUNA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Orijinal Katkı.....	4
BÖLÜM 2	
ROBOTİK KEŞİF VE HARİTALAMA	6
2.1 Robotik Keşif Stratejileri	12
2.1.1 Literatürdeki Robotik Keşif Stratejileri	12
2.1.2 Çoklu Robot Keşif Stratejileri	14
2.1.2.1 Çoklu Robot Sistemlerinin Keşif Stratejilerindeki Avantajları	16
2.1.2.2 Literatürdeki Çoklu Robot Keşif Stratejileri.....	17
2.1.2.3 Çoklu Robot Keşif Stratejilerinde Haberleşme	26
2.1.2.4 Çoklu Robot Keşif Stratejilerinde Koordinasyon	27
2.2 Robotik Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama	30
2.2.1 Robotik Uygulamalarında Kullanılan Harita Modelleri.....	32
2.2.2 SLAM Problemine Olasılıksal Yaklaşımlar	32
2.2.2.1 Kalman Filtresi Tabanlı SLAM	33
2.2.2.2 Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı SLAM	35
2.2.2.3 Sıkıştırılmış Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı SLAM	38

SONUÇ VE ÖNERİLER	111
5.1 Gerçekleştirilen Çalışmaların Literatüre Katkıları	111
5.2 Gelecekteki Çalışmalar için Açık Araştırma Konuları	112
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	127

SİMGE LİSTESİ

α_{ij}	Çoklu robot sistemleri uzlaşma problemindeki düğümlere sahip grafın yay seti
α, β	Tek mercekli kameranın dikey görsel açısı ile y eksenini arasındaki açılar
$\nabla F_x(k)$	Durum geçiş matrisinin Jacobieni
$\nabla H_x(k)$	Gözlem modelinin Jacobieni
$\mathcal{E}_{kontrol}$	Kontroldeki gürültü
$\mathcal{E}_{ölçüm}$	Algılamadaki gürültü
θ	Tek mercekli kameranın yatay görsel açı yansıması ile y eksenini arasındaki açı
θ_s^R	Hough dönüşümünde robot koordinat çerçevesinde çizginin yönü
ρ_s^R	Hough dönüşümünde robot koordinat çerçevesinde çizginin orijine uzaklığı
η	Bayes kuralındaki normalizasyon faktörü
nW	Alıcı ve gönderici arasındaki maksimum engel sayısı
$O()$	Hesaplama karmaşıklığı gösterimi
$P(d_0)$	d_0 referans mesafesindeki dBm olarak güç
s_t	Bayes filtresinde t anındaki robot pozunu
s_x	Robot pozunun x koordinat eksenindeki değeri
s_y	Robot pozunun y koordinat eksenindeki değeri
s_θ	Robot pozunun açısal değeri
u_t	$[t-1, t]$ aralığında robota verilen hareket komutu
x_t	t anındaki durum
$\hat{x}$	Tahmin edilen durum
$\hat{z}$	Tahmin edilen ölçüm
z_t	t anında alınan algılayıcı ölçümü (gözlem)

- Z_p^k P . algılayıcı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen gözlemler seti
- $\mathbb{Z}_p(k)$ ilk p algılayıcısı tarafından k anında gerçekleştirilen gözlemler seti
- $\mathbb{Z}_p^k$ ilk p algılayıcısı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen tüm gözlemler seti

2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional
4WD	Four Wheeled
ANN	Artificial Neural Network
API	Application Programming Interface
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CCD	Charge Coupled Device
CCDA	Combined Constrained Data Association
CEKF	Compressed Extended Kalman Filter
CLSF	The Constrained Local Submap Filter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CTS	The Constant Time SLAM
EKF	Extended Kalman Filter
GCB	Geometric Constraints Branch and Bound
GPS	Global Positioning System
IC	Individual Compability
ICP	Iterative Closest Point
IDC	Iterative Dual Correspondence
IMRP	Iterative Matching Range Point
JCBB	Joint Compability Branch and Bound
KF	Kalman Filter
LMJ	Local Map Joining
LOS	Line of Sight
LRF	Laser Range Finder (Laser Scanner)
LVQ	Learning Vector Quantization
MSE	Mean Square Error
MSF	Multi-Sensor Fusion
NN	Nearest Neighbor
PCA	Principal Component Analysis
PDF	Probability Density Function
PF	Particle Filter
RFID	Radio Frequency Identification

PNG	Portable Network Graphics
RJC	Randomized Joint Compability
ROS	Robot Operating System
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SLSJF	Sparse Local Submap Joining Filter
SNR	Signal to noise ratio
SVM	Support Vector Machine
SWKF	Sparse Weight Kalman Filter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UKF	Unscented Kalman Filter
URF	Ultrasonic Range Finder
UT	Unscented Transform
WAF	Wall Attenuation Factor
WSN	Wireless Sensor Network

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Odometrik bilgideki küçük bir hatanın robotik haritalamadaki etkisi [31].... 9
Şekil 2. 2	Katmanlı kontrol mimarisi..... 29
Şekil 2. 3	SLAM problemi [40] 30
Şekil 2. 4	Çoklu robotlarla haritalama 31
Şekil 2. 5	EKF tabanlı SLAM algoritmasının adımları 37
Şekil 2. 6	PF çalışma prensibi..... 39
Şekil 2. 7	Parçacık seti olarak olasılık dağılımı..... 40
Şekil 2. 8	Rao Blackwellized parçacık filtresi 41
Şekil 3. 1	Chung Cheng [10]..... 47
Şekil 3. 2	Security Warrior [10] 48
Şekil 3. 3	İzden ize füzyon..... 67
Şekil 3. 4	Tek mercekli kamera modeli..... 70
Şekil 3. 5	2D Lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera ile gerçekleştirilen füzyon..... 72
Şekil 3. 6	Ses üstü mesafe ölçer ve tek mercekli kamera ile gerçekleştirilen füzyon . 73
Şekil 3. 7	Hough dönüşümü ile özellik çıkarımı 74
Şekil 4. 1	EKF tabanlı SLAM (1. Benzetim)..... 80
Şekil 4. 2	EKF tabanlı SLAM (2. Benzetim)..... 80
Şekil 4. 3	CEKF tabanlı SLAM (1. Benzetim)..... 81
Şekil 4. 4	CEKF tabanlı SLAM (2. Benzetim)..... 81
Şekil 4. 5	UKF tabanlı SLAM (1. Benzetim) 82
Şekil 4. 6	UKF tabanlı SLAM (2. Benzetim) 82
Şekil 4. 7	EKF Mono SLAM uygulaması..... 84
Şekil 4. 8	İki robotla gerçekleştirilen keşif işlemi [155] 86
Şekil 4. 9	Üç robotla gerçekleştirilen keşif işlemi [155]..... 86
Şekil 4. 10	Cooperative Exploration Strategies uygulaması 88
Şekil 4. 11	Keşif işlemi uygulanacak ortam 89
Şekil 4. 12	Keşif oranlarının karşılaştırılması 91
Şekil 4. 13	Pioneer P3-DX robot 95
Şekil 4. 14	DM-USAR_red ortamı 95
Şekil 4. 15	Ortalama hata sınırları (x (cm)) 96
Şekil 4. 16	Ortalama hata sınırları (y (cm))..... 96
Şekil 4. 17	Ortalama hata sınırları (açı (°))..... 96
Şekil 4. 18	Corobot otonom gezgin robot platformu 99
Şekil 4. 19	Laboratuvar ortamında SLAM sürecinin gerçekleştirilmesi..... 100

Şekil 4. 20	Robotun SLAM sürecine başlarken elde ettiği LRF verileri	101
Şekil 4. 21	Robotun SLAM sürecinde elde ettiği bir kamera görüntüsü	101
Şekil 4. 22	2D lazer tarayıcı ile SLAM.....	102
Şekil 4. 23	2D lazer tarayıcı hata sınırları (x (cm))	102
Şekil 4. 24	2D lazer tarayıcı hata sınırları (y (cm))	103
Şekil 4. 25	2D lazer tarayıcı hata sınırları (açı (°)).....	103
Şekil 4. 26	Çoklu algılayıcı füzyonu – 2D lazer tarayıcı hata sınırları (x (cm)).....	103
Şekil 4. 27	Çoklu algılayıcı füzyonu – 2D lazer tarayıcı hata sınırları (y (cm)).....	104
Şekil 4. 28	Çoklu algılayıcı füzyonu – 2D lazer tarayıcı hata sınırları (açı (°))	104
Şekil 4. 29	Karşılaştırmalı hata sınırları (x (cm))	105
Şekil 4. 30	Karşılaştırmalı hata sınırları (y (cm))	105
Şekil 4. 31	Karşılaştırmalı hata sınırları (açı (°))	105
Şekil 4. 32	Ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (x (cm)).....	106
Şekil 4. 33	Ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (y (cm)).....	106
Şekil 4. 34	Çoklu algılayıcı füzyonu – ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (x (cm)).....	107
Şekil 4. 35	Çoklu algılayıcı füzyonu – ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (y (cm)).....	107
Şekil 4. 36	Karşılaştırmalı hata sınırları (x (cm))	108
Şekil 4. 37	Karşılaştırmalı hata sınırları (y (cm))	108

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1	Benzetim çalışmalarında kullanılan sistemlerin özellikleri 78
Çizelge 4. 2	Mikroişlemci frekansları ve performans karşılaştırmaları [109] 79
Çizelge 4. 3	EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM işlem süreleri 83
Çizelge 4. 4	EKF Mono SLAM işlem süreleri 84
Çizelge 4. 5	Benzetimi yapılan keşif stratejilerinin işlem süreleri 90
Çizelge 4. 6	Genel hata sınırları (USARSim benzetiminde elde edilen)..... 97
Çizelge 4. 7	Corobot otonom gezgin robotların teknik özellikleri [12] 98
Çizelge 4. 8	2D LRF ve çoklu algılayıcı füzyonunun başarısının karşılaştırılması 106
Çizelge 4. 9	URF ve çoklu algılayıcı füzyonunun başarısının karşılaştırılması..... 108

**ÇOKLU ALGILAYICI FÜZYONUNUN ÇOKLU ROBOT SİSTEMLERİNDE EŞ
ZAMANLI KONUM BELİRLEME VE HARİTALAMA PROBLEMİNE
UYGULANMASI**

Gürkan TUNA

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Vehbi Çağrı GÜNGÖR

Teknolojideki gelişmeler robotların farklı amaçlar için kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Arama ve kurtarma çalışmaları, bilinmeyen bölgelerin keşfi, tehlikeli bölgelerde inceleme, gözetleme ve güvenlik gibi birbirinden farklı özellikler taşıyan ve farklı gereksinimleri olan görevler için robotlar kullanılabilir. İnsan hayatını tehlikeye sokabilecek görevler için robotların kullanılması olası can kayıplarının önüne geçilmesini sağlayacaktır.

Robotlar için öngörülen çoğu görev kısmi ya da tam otonom çalışabilen robotların kullanımını gerektirmektedir. Bunun nedeni hem robotları kontrol eden operatörlerin görevini hafifletmek hem de görevin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktır. Bunlara ilave olarak kullanılan robotlar ile kesintisiz iletişimi ve tam koordinasyonu sağlamak her zaman mümkün olmayabilir.

Gezgin bir robotun otonom çalışabilmesinin ilk koşulu bulunduğu ortamı tanımasıdır. Çoğu durumda önceden oluşturulmuş bir haritanın robota yüklenmesi ve robotun bulunduğu noktadan hareketle yüklenmiş olan haritaya göre verilen bir güzergâhı takip etmesi mümkün olmayabilir. Önceden bir harita yükleme olanağı olsa bile dinamik ortamlarda ortamın tanınması gereksinimi devam etmektedir. Dolayısıyla gezgin robotlar kendilerini konumlandırma ve eş zamanlı olarak bulundukları ortamları

haritalama kabiliyetlerine sahip olmalıdır. Gezgini bir robotun bilinmeyen bir bölgede bilinmeyen bir pozisyondan başlayarak ortamın haritasını oluşturması ve eş zamanlı olarak harita içinde kendisini konumlandırması literatürde Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama (SLAM) problemi olarak bilinir. Olasılıksal yöntemlerin kullanımıyla bir haritanın oluşturulması için SLAM süreci robot algılayıcılarından gelen gürültülü yer işaretçisi ölçüm dizisini kullanır. Bir SLAM sürecinin başarısında robotlarda kullanılan dahili ve harici algılayıcıların performansları önemli rol oynar. Bu nedenle farklı yetenekleri olan birden çok algılayıcıdan elde edilen verilerin birleştirilmesi prensibine dayanan çoklu algılayıcı füzyonu metotları SLAM süreçlerinin performansını ve doğruluğunu arttırabilir.

Bu çalışmada ilk olarak robotik keşif ve haritalama teknikleri performans, işlem yükü ve bellek gereksinimleri açısından incelenmektedir. Daha sonra, robotik keşif operasyonları ve eş zamanlı konum belirleme ve haritalamada kullanılabilecek çoklu algılayıcı füzyonu metotları sunulmaktadır. Önerilen metotların performansları hem benzetim çalışmaları hem de gerçekleştirilen saha çalışmalarının sonuçları ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: oklu algılayıcı füzyonu, gezgini robot, robotik keşif, eş zamanlı konum belirleme ve haritalama

**THE IMPLEMENTATION OF MULTI-SENSOR FUSION TO SIMULTANEOUS
LOCALIZATION AND MAPPING PROBLEM IN MULTI-ROBOT SYSTEMS**

Gürkan TUNA

Department of Electrical Engineering

Ph.D. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kayhan GÜLEZ

Co-Advisor: Asst. Prof. Dr. Vehbi Çağrı GÜNGÖR

Advancements in technology make it possible to use robots for different purposes. Robots can be used for tasks having different characteristics and different requirements such as search and rescue missions, exploration of unknown terrain, inspection in hazardous areas, surveillance and security. The use of robots for tasks which may endanger human life can prevent possible loss of life.

Most tasks envisaged for robots require robots working with partial or full autonomy. The reason of this both to reduce the load on operators and to reduce the time required to complete the task. In addition to these, it may not be possible to communicate with robots and provide coordination all the time.

The first requirement of the autonomous operation of a mobile robot is the sensing of environment around itself. In most cases, it may not be possible to load a priori map to the robot, and to follow a given trajectory from the point where it is by using the preloaded map. Even if it is possible to load a map, the requirement of the sensing of environment still continues in dynamic environments. Hence, mobile robots need to have the capabilities of self localization and mapping the environment around themselves at the same time. The ability of a mobile robot, starting from an unknown position in an unknown environment, to build up a map of this environment and,

simultaneously, self-locate inside the map is known as simultaneous localization and mapping (SLAM) problem in the literature. To build a map by the use of probabilistic methods, a SLAM process uses a sequence of noisy landmark measurements obtained from robot sensors. In the success of a SLAM process, the performances of internal and external sensors play import roles. Therefore, multi-sensor fusion methods which are based on the principle of integrating data from multiple sensors with different capabilities can increase the performance and accuracy of SLAM processes.

In this study, firstly, robotic exploration and mapping techniques are investigated in terms of performance, processing load and memory requirements. And then, multi-sensor fusion methods which can be used in robotic exploration missions and simultaneous localization and mapping are presented. The performances of proposed methods are shown with both the results of simulation studies and field tests.

Key words: Multi-sensor fusion, mobile robot, robotic exploration, simultaneous localization and mapping

1.1 Literatür Özeti

Çoklu algılayıcı füzyonu çoklu algılayıcılardan gelen bilgilerin birleştirilmesiyle daha güvenilir ve daha doğru bilginin elde edilmesidir. Çoklu algılayıcı füzyonu birçok avantaj getirmekte olup otomatik hedef tespiti, savaş alanında gözetim, otonom araçların yönetim ve kontrolü, karmaşık makinelerin izlenmesi, tıbbi teşhis ve robotik başta olmak üzere farklı birçok alanda uzun yıllardır kullanılmaktadır.

Son yıllarda, çoklu algılayıcı füzyonu özellikle robotik alanında çalışan araştırmacıların ilgisini çekmiş olup, kullanım oranı artmıştır. Tayvan’da National Chung Cheng Üniversitesi’nde çoklu algılayıcı füzyonu kullanılan güvenlik amaçlı gezgin robotlar geliştirilmiştir [10]. “Chung-Cheng” ve “Security Warrior” adlı robotlar dinamik ortamlarda hizmet sunmuştur. Robotlarda mesafe algılama ve nesne şekli çıkarımı için kullanılan lazer mesafe bulucu, sonar mesafe algılayıcı zinciri, kızılötesi mesafe bulucu ve CCD kamera gibi farklı algılayıcılar bulunmaktadır. Bu algılayıcılar dışında alev algılayıcı, sıcaklık algılayıcı ve duman algılayıcı da yer almaktadır. Bu robotlar yangın söndürebilme yeteneğine de sahip olan kollu robotlardır. İlgili robotlarda kullanılan çoklu algılayıcı füzyonu tekniği robotları üreten ekip tarafından geliştirilmiş olan Luo-Kay Çoklu Algılayıcı Füzyonu Kategorizasyonu’dur. Önerilen bu kategorizasyon tekniğinde çoklu algılayıcı füzyonu süreci düşük seviye, orta seviye ve yüksek seviye olmak üzere üç seviyeden oluşmaktadır.

Hizmet sektörünün yapısından dolayı insanlara rutin ve sıkıcı gelen görevler dolayısıyla gelecekte robotların yaygın olarak kullanılabileceği bir sektör olarak düşünülmektedir.

Bu konuda çalışmalar yapılmaktadır. “Catering Service Robot” restoranlarda kullanılması düşnlen ve garson görevi üstlenecek robottur [150]. Bu robotta çoklu algılayıcı füzyonu yanında insan robot etkileşimini kolaylaştıracak teknikler de kullanılmaktadır.

Çoklu algılayıcı füzyonu tekniği kullanılan bir diğer robot olan “Pygmalion” İsviçre’de Computer 2000 ticaret fuarı sırasında her gün yüzlerce ziyaretçiye hizmet sunmuştur [4]. Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama (SLAM) algoritmasında çoklu algılayıcı füzyonu tekniği kullanılan robot fuar alanı içerisinde 5 km’lik bir alanda dolaşmıştır. Gerçek bir uygulama olan bu çalışma çoklu algılayıcı füzyonunun önemini ortaya koymuştur. Robotu geliştiren araştırmacılar tek lazer mesafe bulucu ile CCD kamera ve lazer mesafe bulucu kullanılan konumlandırma yöntemlerini karşılaştırmışlar ve çoklu algılayıcı füzyonu tekniğinin robotik haritalama uygulamalarında genellikle belirsizliği azalttığını kanıtlamışlardır.

Çoklu algılayıcı füzyonu insan robot etkileşimi uygulamalarında da önemli bir yere sahiptir. “Robox” adlı gezgin robot 2002 İsviçre Ulusal Fuarı sırasında ziyaretçilere hizmet etmesi için geliştirilmiştir [4]. Fuar sırasında Robox robotlar kablosuz ağ üzerinden birbirleri ile haberleşmiş ve ışıkları söndürme, fotoğraf çekme ve diğer robotları kontrol etme gibi bazı eylemler gerçekleştirmişlerdir.

“Mesa” adlı servis robotu üzerinde Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve Graph-SLAM tekniklerinde çoklu algılayıcı füzyonu tekniğinin kullanılması sonucu elde edilen başarı oranları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir [65]. Elde edilen sonuçlar çoklu algılayıcı füzyonunun farklı SLAM tekniklerinde farklı başarı oranları verdiğini göstermektedir.

Çoklu algılayıcı füzyonunun potansiyel uygulama alanları olan robotik keşif ve haritalama uygulamaları getirdikleri sayısız avantajlar dolayısıyla araştırmacıların yoğun ilgisini çeken konulardır. Literatürde farklı robotik keşif stratejileri bulunmakla birlikte [24] son yıllarda iki temel strateji üzerinde çalışmalar ve iyileştirmeler yapılmaktadır. Hem [42] hem de [43] çoklu-robot keşif stratejileri olmakla birlikte birbirlerinden temel çalışma prensipleriyle ayrılmaktadırlar. Yamauchi tarafından [42] de açıklanan stratejide gezgin robotlar grubu keşfedilen bölgeden keşfedilmemiş bölgeye doğru yönlendirilir. Bu stratejide robotlar algısal bilgiyi paylaşmakla birlikte her bir robot

kendi genel haritasını oluşturur ve saklar. Bununla birlikte her bir robot keşfedeceği bölge konusundaki kararı kendisi verir. Zlot ve arkadaşları tarafından [43] te açıklanan strateji bir keşif görevinin alt görevlere bölünmesi prensibine dayanır. Bu stratejide robotlar alt görevler için teklif verirler ve keşif işlemini yerine getirirler.

Robotik haritalama uzun yıllardır üzerinde çalışılmakta olan bir konudur. Başlangıçta metrik ve topolojik yaklaşımlar üzerinde çalışılmıştır. Metrik haritalarda ortamın geometrik özellikleri saklanırken topolojik haritalarda ise farklı yerlerin bağlantıları tanımlanmaya çalışılır [26]. Metrik haritalar topolojik haritalara göre daha detaylı haritalardır. Elfes [54], [55] ve Moravec [56] bir metrik harita çeşidi olan doluluk ızgaraları (occupancy grid) haritalama algoritmasını ortaya atmışlardır. Bu yaklaşımda bilinmeyen bir ortamın haritası dama tahtası gibi eşit boyutlu karelerden oluşur. Dolu veya boş durumunda olabilen bu kareler ortamın haritasını oluşturur. Karelerin boyutu küçüldükçe ortam daha detaylı haritalanmış olur. Ancak kare boyutu küçüldükçe işlem yükü ve bellek gereksinimi de artar. Chatila ve Laumond [57] farklı bir metrik haritalama algoritması geliştirmişler ve bilinmeyen bir ortamın çok yüzlü cisimler setiyle tanımlanmasını sağlamışlardır. Mataric [59] ve Kuipers [58] topolojik yaklaşımlar kullanmışlardır.

Robotik keşif stratejilerinin ve otonom gezgin robotlar kullanılan uygulamaların çoğunun temelinde robotik haritalama süreçleri bulunur. Robotik haritalama süreçlerinin hemen hemen tamamında olasılıksal teknikler kullanılır. Eş zamanlı konum belirleme ve haritalamanın dayanağı olan olasılıksal tekniklerin temelleri Smith, Self ve Cheeseman [52], [53] tarafından ortaya atılmıştır. Kalman Filtresi (KF) kullanan olasılıksal teknikler ortamın haritasını ve robot konumunu kestirim esasına dayanır. Bu tekniklerle elde edilen haritalarda genellikle haritalanan ortamda bulunan yer işaretçisi ve önemli özelliklerin konumları bulunur. Beklenti Enbüyüklenme (expectation maximization) [60] haritalama algoritmalarında kullanılan bir diğer yaklaşımdır. Bu yaklaşım haritalamadaki veri ilişkilendirme probleminde kullanılmaktadır. Görüntü işleme tekniklerindeki gelişmeler ortamda bulunan cisimlerin şekil çıkarımı yöntemiyle tanımlanmasını sağlayan olasılıksal tekniklerin ortaya atılmasına neden olmuştur [26].

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışmasının ana amacı çoklu algılayıcı füzyonu metotlarının gezgin robotlarla gerçekleştirilen keşif operasyonları ve eş zamanlı konum belirleme ve haritalama uygulamalarına uyarlanmasıdır. Robotik keşif operasyonları ve SLAM uygulamalarının arama ve kurtarma, bilinmeyen bölgelerin keşfi, gözetleme, güvenlik ve savunma başta olmak üzere birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Öngörülen uygulamalarda robotların üzerinde bulunan dahili ve harici algılayıcılardan kaynaklanan ölçüm hatalarının neden olabileceği performans kayıplarını engellemek ve uygulama başarısını arttırmak için çoklu algılayıcı füzyonu tekniklerinin kullanımı önerilmiştir. Çalışmanın amaçları aşağıda gruplanarak özetlenmiştir:

- Çoklu algılayıcı füzyonu metotlarını incelemek,
- Literatürdeki SLAM teknikleri ile algılayıcı türlerini inceleyerek senaryoya bağlı olarak uygun çoklu algılayıcı füzyonu metodunu seçmek,
- Literatürdeki robotik keşif stratejilerinde çoklu algılayıcı füzyonu metodunun kullanımının sağlayabileceği avantajları ortaya koymak,
- Çoklu algılayıcı füzyonun metodunun getirebileceği avantajları benzetim ve saha çalışmalarıyla ortaya koymak ve elde edilen sonuçları literatürdeki araştırma sonuçlarıyla karşılaştırmaktır.

1.3 Orijinal Katkı

Tezin literatüre getirdiği yenilik çoklu algılayıcı füzyonu metotlarının robotik keşif operasyonları ve SLAM süreçlerine uygulanmasıdır. Literatürdeki SLAM tekniklerinin çalışma prensiplerine göre farklı füzyon metotları uyarlanmıştır. Çoklu algılayıcı füzyonunun sağladığı avantajlar, gezgin robot gruplarıyla gerçekleştirilen robotik keşif operasyonları ve SLAM uygulamalarının performansını ve başarısını arttırmaktadır. 2D lazer tarayıcı (LRF) ile tek mercekli kamera ve ses üstü mesafe ölçer (URF) ile tek mercekli kamera çiftlerine EKF tabanlı çoklu algılayıcı füzyonu metotları Ubuntu işletim sistemi üzerinde Robot İşletim Sistemi (ROS) platformunda uygulanmıştır. Farklı algılayıcıların avantajları bir araya getirilerek uygulamaların başarısı arttırılmış ve algılayıcılarının ölçüm hatalarından kaynaklanan performans kayıpları azaltılmıştır.

Unified System for Automation and Robot Simulation (USARSim) benzetim ortamı, Player / Stage benzetim ortamı ve MATLAB programında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına ilave olarak otonom gezgin robotlarla gerçekleştirilen saha çalışmalarından elde edilen sonuçlarla önerilen metotların doğrulukları kanıtlanmıştır.

BÖLÜM 2

ROBOTİK KEŞİF VE HARİTALAMA

Robotların çeşitli görevlerde insanların yerini alabileceği ortaya konmuştur. Robotların insanların ulaşamayacağı küçüklükte yerlere ulaşabilmeleri, farklı algılayıcılara sahip olabilmeleri, farklı ortam koşullarına dayanıklı olabilmeleri ve belirli durumlarda insanlardan daha çabuk karar verebilmeleri robotların insanlara göre önemli avantajlarıdır. Robotların kullanılabileceği birçok uygulamanın temelini robotik keşif ve haritalama oluşturur.

Keşif ve gözetleme operasyonları farklı sivil ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Robotların keşif ve gözetleme operasyonlarında kullanılması olası can kayıplarının önüne geçilmesini sağlayacaktır. Günümüzde askeri keşif ve gözetleme uygulamalarında küçük insansız hava araçları yaygın olarak kullanılmaktadır. Keşif ve gözetleme operasyonlarında robotların kullanılması durumunda elde edilebilecek başarı oranı görevin türüne ve kullanılan robotların özelliklerine bağlıdır. Otonom çalışabilme, algılama yetenekleri, tasarım özellikleri, iletişim kabiliyetleri, konumlandırma ve yöngüdümleri robotların sahip olması gereken özelliklerden önemli olanlarıdır. Eğer operasyon sırasında birden fazla robot kullanılırsa bu özellikler dışında robotlar arasında koordinasyonda sağlanmalıdır.

Keşif ve gözetleme operasyonları dışında gezgin robotlar tehlikeli bölgelerde inceleme operasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsanlar keşif ve gözetleme operasyonlarının hedefi iken, tehlikeli bölgelerde inceleme operasyonları çevresel tehlikelere odaklanmıştır. Robotların bu operasyonlarda tercih edilmesinin nedeni ortam koşullarının insanlara zarar verebilmesi ihtimalidir. Mayınlı bölge incelemesi,

patlayıcı madde imhası, nükleer atıkların incelenmesi yaygın olarak gerçekleştirilen robotik inceleme türleridir. Bu operasyon türünde görev türüne göre özel olarak tasarlanmış dayanıklı robotlar tercih edilmektedir. Otonom çalışabilme yeteneği, yöngüdüm ve engelden kaçınma gibi yetenekler önemli olsa da bazı durumlarda robotların bir operatör tarafından uzaktan yönetilmesi tercih edilmektedir.

Arama ve kurtarma robotları felaket sonrası afetzedelerin kurtarılması için geliştirilmiş robotlardır. Depremler, maden ocaklarında meydana gelen göçükler, terörist saldırılarından kaynaklanan çökmeler sonrasında robotların kullanılması öngörülmektedir. Arama ve kurtarma operasyonlarında kullanılabilecek robotların birçok yeteneği bir arada bulundurması gereklidir. Olası operasyon alanları bilinmeyen ve karmaşık bölgeler olabilir. Bunun yanında operasyon sırasında robotların iletişim yetenekleri sınırlı olabilir. Arama ve kurtarma robotlarının karmaşık bölgelerde çalışabilecek kadar küçük olması ve farklı engelleri aşabilecek yeteneklere sahip olması gereklidir.

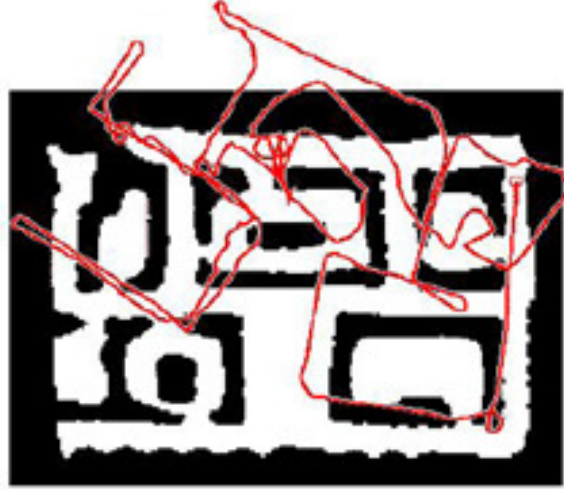
Uzak bölgelerin keşfedilmesi robotlar tarafından gerçekleştirilebilecek diğer bir operasyon türüdür. Bu operasyon türünde robotlar için otonom çalışabilme, konumlandırma, yöngüdüm, haritalama ve bilgi aktarımı önemli unsurlardır. Bunlar dışında kooperatif keşif operasyonlarında koordinasyon ve iletişim yönetimi gibi unsurlar da ön plana çıkmaktadır.

Robotlar için öngörülen operasyonların birbirlerinden farklı gereksinimleri olsa bile tüm operasyon türlerinin temel ortak gereksinimleri vardır. Bu gereksinimler aşağıda sıralanmıştır:

- Robotlar tarafından toplanan bilgiler analiz için operatörlere ya da merkezi kontrol birimine aktarılmalıdır.
- İletişimin bazı durumlarda kesilebileceği ya da hiç olmayabileceği göz önüne alınmalıdır.
- Operatörlerin yükünü azaltmak için robotlar otonom çalışabilmelidir.
- Aynı işlemin farklı robotlar tarafından yerine getirilme ihtimali düşünülerek robotlar arasında koordinasyon sağlanmalıdır.

Robotik haritalama bir robotun bulunduğu ortamın modelini çıkarması olarak özetlenebilir. Haritalar genellikle robotun konumlandırılması ve yönlendirilmesi için kullanılır [31]. Robot haritayı elde edebilmek için dış dünyayı algılamalıdır. Robotlar üzerinde kullanılan algılayıcılara örnek olarak kameralar, lazer mesafe bulucular, ses üstü mesafe bulucular, kızılötesi mesafe bulucular, pusulalar ve Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System (GPS)) algılayıcıları verilebilir. Algılayıcılar çalışma prensiplerine göre aktif ve pasif algılayıcılar olarak ikiye ayrılır. Tüm algılayıcı türleri ölçüm gürültüsü adı verilen bir hata payına sahiptir [159]. Birçok algılayıcı türü belirli bir mesafeden algılama yapabilir. Bazı algılayıcı türleri belirli ortamlarda çalışmazlar. Örneğin lazer mesafe bulucular cam, parlak metal ve siyah kauçuk yüzeylerde yanlış sonuçlar verirken, ses üstü mesafe bulucular ise sıcaklık değışimi olan ortamlarda yanlış sonuçlar vermektedir.

Bilinmeyen bir bölgenin keşfi ve haritalanması sırasında robota verilen hareket/kontrol komutları önemlidir. Bunun nedeni algılayıcı ölçümlerinin alındığı konum bilgilerini bu komutların sağlamasıdır. Robotik haritalama uygulamalarında genellikle robot sabit bir hızla ilerler. Kayma ve sürtünme gibi çeşitli faktörler dolayısıyla robot hareketi de hatalara maruzdur. Dolayısıyla göreceli robot pozı (konum ve açı) sadece kontrol komutları ile belirlenemez [24], [26], [31]. Robotik haritalama uygulamalarındaki belirsizlik hem dahili hem de harici algılayıcıların ölçüm gürültüsünden kaynaklanır [24], [31], [6]. Robotik haritalama uygulamalarındaki temel zorluklardan biri ölçüm hatalarının istatistiksel olarak birbirine bağı olmasıdır. Robot hareketindeki ölçüm hataları birikerek algılayıcı ölçümlerinin yorumlanmasını etkiler. Özellikle açısız değerdeki çok küçük bir ölçüm hatası bile robotun oluşturacağı haritada büyük bir sapmaya neden olur. Dolayısıyla bu tür sistematik hataları tolere edebilmek için oldukça karmaşık algoritmalar kullanmak kaçınılmaz hale gelmektedir [31].



Şekil 2. 1 Odometrik bilgideki küçük bir hatanın robotik haritalamadaki etkisi [31]

Robotik haritalama uygulamalarındaki ikinci temel zorluk haritalanacak ortamda bulunan doğal/yapay cisim sayısından kaynaklanır [51]. Örneğin bir iç ortam; koridor, köşe, odalar ve kapılar kullanılarak tanımlanabilir ve böylece haritadaki cisim sayısı düşük tutulabilir. Haritadaki cisim sayısının az olması hem işlem yükünün hem de bellek gereksiniminin az olmasını sağlar. Robotik haritalama uygulamalarında belirli bir başlangıç noktasının sıfır kabul edildiği, x ve y koordinatları kullanılan iki boyutlu haritalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç boyutlu haritalar belirli bir bölgenin ayrıntılı olarak tanımlanmasını sağlar. Üç boyutlu haritalarda birçok detay bulunur ve bu tür haritaların çok yüksek hesaplama yükü ve bellek gereksinimleri vardır. Robotik haritalama uygulamalarındaki üçüncü problem veri ilişkilendirme olarak bilinir. Bu problemin temelinde farklı zaman dilimlerinde alınan ölçümlerin ortamdaki aynı fiziksel cisimlere karşılık gelip gelmediğini tespit etme yatar. Robotik haritalama uygulamalarındaki dördüncü problem ortamların zaman içinde değişmesidir. Dinamik ortamlarda haritalama üzerinde yoğun çalışmalar yapılan oldukça karmaşık bir konudur. Robotik haritalamadaki bir diğer önemli konu haritalama sırasında robotun hangi yöne gideceğini seçmesidir. Bu problem robotik keşif uygulamasının bir parçasıdır. Robotik keşif bilinmeyen bir bölgenin haritalanması sırasında gerçekleştirilecek robot hareketinin belirlenmesidir.

Literatürde bulunan tüm robotik haritalama algoritmalarının ortak bir noktası hepsinin olasılıksal yöntemler olmasıdır. Tüm yöntemlerde ortamın ve robotun olasılıksal modelleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde algılayıcı ölçümlerinin haritalara dönüştürülmesi sırasında olasılıksal kestirim yapılır [26], [27]. Robotik haritalama uygulamalarının en temel özellikleri belirsizlik ve algılayıcı gürültüsü olduğu için olasılıksal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Olasılıksal tüm algoritmalarda farklı gürültü türleri ve algılama üzerindeki etkileri açık olarak modellenir.

Bütün olasılıksal haritalama algoritmalarının temel prensibi Bayes kuralıdır [24].

$$p(x|d) = \eta p(d|x)p(x) \quad (2.1)$$

(2.1) numaralı denklemde x öğrenilmek istenilen değeri, d ise ölçüm verilerini göstermektedir. Ölçüm verileri robotun üzerinde bulunan dönüştürücülerden gelen odometrik bilgi veya harici algılayıcılardan gelen mesafe bilgisidir. Odometrik bilgi robotun ne kadar mesafe aldığını ve hangi açıyla ilerlediğini gösterir. Bayes kuralına göre bu problem iki terimin çarpılmasıyla çözülebilir: $p(d|x)$ ve $p(x)$. $p(d|x)$ terimi x hipotezi altında d ölçümünün gözlenebilme olasılığını gösterir. $p(x)$ ise öncül olarak adlandırılır. η normalize etmek için kullanılır. Bu terim Bayes kuralının sol tarafının geçerli bir olasılık dağılımı olduğunu garanti eder [64].

Robotik haritalama uygulamalarında algılayıcı ölçümleri ve kontrol bilgisi olmak üzere iki tür veri bulunmaktadır. Algılayıcı ölçümleri genellikle z değişkeni ile kontrol bilgisi ise u ile gösterilir. Zaman indeksi alt simge olarak yazılır.

$$z_1, u_1, z_2, u_2, z_3, u_3, \dots,$$

z_t t anında alınan algılayıcı ölçümüdür. u_t ise $[t-1, t]$ zaman aralığındaki robota verilen hareket komutudur. Robota verilen hareket komutları yerine bazen odometrik bilgiler kullanılır. Odometrik bilgiler robotun gerçek hareketi hakkında hareket komutlarından daha gerçekçi bilgi verir.

Bayes filtresi Bayes kuralını geçici tahmin problemlerine uyarlayan ve robotik haritalama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir filtredir. Bayes filtresi direkt olarak gözlenemeyen niceliklerin soncul olasılık dağılımlarını hesaplamayı sağlayan yinelemeli bir kestirim mekanizmasıdır.

Zaman indeksi t ile gösterilir ve x_t 'nin durum olarak adlandırılan bilinmeyen nicelik olduğu kabul edilirse x_t durumu üzerinden soncul olasılık dağılımı (2.2) numaralı yineleyen denklem ile hesaplanabilir. Denklem soncul olasılık dağılımını bir önceki adımdakini kullanarak hesaplar. Üstsimge t anına kadar olan tüm verileri göstermek için kullanılır. Dolayısıyla t anına kadar olan gözlemlerden elde edilen algılayıcı ölçümleri ve kontrol komutları aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$z_t = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_t\}$$

$$u_t = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_t\}$$

$$p(x_t | z^t, u^t) = \eta p(z_t | x_t) \int p(x_t | u_t, x_{t-1}) p(x_{t-1} | z^{t-1}, u^{t-1}) dx_{t-1} \quad (2.2)$$

Bayes filtresinde durum x_t zaman içinde çoklu noktalardaki algılayıcı ölçümlerini etkileyebilecek bütün bilinmeyen nicelikleri içermelidir. Dolayısıyla robotik haritalama uygulamalarında harita ve robot pozu gibi zaman içinde algılayıcı ölçümlerini içerebilecek unsurlar Bayes filtresinde bulunmalıdır. Robotik haritalamada harita ve robot pozu kestirimi birlikte yapılmalıdır. Haritanın m , robot pozunun s ile gösterildiği kabul edilirse (2.3) numaralı denklemdeki Bayes filtresi elde edilir.

$$p(s_t, m_t | z^t, u^t) = \eta p(z_t | s_t, m_t) \int \int p(s_t, m_t | u_t, s_{t-1}, m_{t-1}) p(s_{t-1}, m_{t-1} | z^{t-1}, u^{t-1}) ds_{t-1} dm_{t-1} \quad (2.3)$$

Robotik haritalama algoritmalarının çoğunda statik bir ortam varsayımı olduğu ve robot hareketinin haritaya bağlı olmadığı kabul edildiği için Bayes filtresi (2.4) numaralı denklemdeki durumuna dönüşür.

$$p(s_t, m | z^t, u^t) = \eta p(z_t | s_t, m) \int p(s_t | u_t, s_{t-1}) p(s_{t-1}, m | z^{t-1}, u^{t-1}) ds_{t-1} \quad (2.4)$$

(2.4) numaralı denklemdeki $p(s_t | u_t, s_{t-1})$ ve $p(z_t | s_t, m)$ olasılık dağılımları zamandan bağımsızdır. Bu nedenle $p(s | u, s')$ ve $p(z | s, m)$ olarak yazılabilirler. $p(z | s, m)$ olasılığı algısal model olarak adlandırılır. Algısal model farklı robot pozları ve haritalar için algılayıcı ölçümlerinin nasıl yaratıldığını tanımlayan bir modeldir. $p(s | u, s')$ olasılığı hareket modeli olarak adlandırılır. Hareket modeli u kontrolünün s durumu üzerindeki etkisini gösterir.

2.1 Robotik Keşif Stratejileri

Robotik keşif stratejileri üzerine son yıllarda yoğun olarak çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle de felaket sonrası kurtarma çalışmaları ve askeri amaçlarla kullanım üzerine çeşitli çalışmalar ve deneyler yapılmaktadır. Araştırmalar belirli ortam koşullarında çalışabilecek robotlar yerine, karmaşık ve dinamik ortamlara hızlı adapte olabilecek robotlara yoğunlaşmaya başlamıştır. Bu robotlarda keşif yetenekleri ile birlikte konumlandırma ve haritalama yetenekleri de bulunmaktadır. Aslında bu iki yetenek türü birbirine sıkı sıkıya bağlıdır. Bir robotun ortam haritası olmaksızın keşif gerçekleştirmesi zordur; etkili bir keşif stratejisi olmadan haritalama yapabilmesi de bir o kadar zordur.

2.1.1 Literatürdeki Robotik Keşif Stratejileri

Askeri amaçlı, güvenlik amaçlı ve sivil amaçlı gerçekleştirilen keşif ve gözetleme operasyonları konularında literatürde birçok çalışma [108], [109], [110], [111] bulunmaktadır. Robotik keşif operasyonlarının temelinde, robotların kullanımıyla genellikle tehlikeli, geniş veya uzak olan belirli bir bölge hakkında bilgi toplama yatar [161]. Burada amaçlanan insanların görevlerini yerine getirmeden önce ortam koşullarına hazır olmalarını sağlamaktır. Gözetleme operasyonlarının temelinde ise genellikle askeri bir bölgede yaşanan hareketliliğin izlenmesi yatar. Rybski vd. [108] de büyük robotların birçok algılayıcıya sahip olan daha küçük robotları taşıyıp belirli bir ortama dağıtması yoluyla ortam izlenmesini önermiştir. Benzer bir yaklaşım olan [110] da Barnes vd. ortam izlemesi için bir kamera bulunduran küçük robotlar kullanılarak askeri amaçlarla izlemeyi önermişlerdir. Howard vd. [111] de 80 robottan oluşan bir robot takımıyla bir binanın haritasını oluşturmuş, binaya izinsiz giren kişileri robotlarla izlemiş ve takip etmişlerdir. Ayrıca elde edilen bilgi uzak bir noktadaki operatöre iletilmiştir. Lideri takip etme prensibi ile keşif takımının ortama dağıtılmasını sağlayan bu çalışmadaki robot takımı az sayıda yetenekli robot ile çok sayıda basit robottan oluşmaktadır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında hedef tespiti robot takımı tarafından yerleştirilen akustik algılayıcı ağı ile gerçekleştirilmiştir.

Keşif ve gözetim operasyonlarında insansız hava araçlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Özellikle askeri amaçlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bu araçlar polisler tarafından da kullanılmaya başlanmıştır [112].

Robotlar tehlikeli bölgelerde uzun zamandır kullanılmaktadır. Stone ve Edmonds [113] te tehlikeli maddeleri tanımlayabilen ve kimyasal sızıntı durumlarında sorunun çözümüne yardımcı olabilen bir robotun geliştirilmesini açıklamışlardır. Çalışmada önerilen robot gerektiğinde sorun olan bölgeye giderek kilitli kapıları açma yeteneğine sahiptir. Robotlar patlayıcı madde imhası, mayın tespiti ve temizleme gibi amaçlarla emniyet güçleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Tojo vd. [114] te mayın temizleme araçlarının ulaşmasının zor olduğu bölgelerde kullanılmak üzere özel bir kola sahip bir araç tasarlamıştır. Bengel vd. [115] de açık denizlerdeki petrol rafinelerinde kullanılmak üzere bir robot tasarlamışlardır. Çalışmada açıklanan robot farklı ölçme ve hesaplama araçlarının izlenmesi, vanaların incelenmesi, sızıntı tespiti gibi farklı operasyonlarında kullanılabilmektedir. Önerilen robot sistemi, bir sorun durumunda çözüm işlemlerinde yardımcı olabileceği gibi sistemin etkinliği ve güvenliği açısından da önemlidir. Nawaz vd. [116] da üzerinde çalıştıkları nükleer atık saklama havuzlarının izlenmesi için kullanılacak olan robot sistemi hakkında bilgiler vermişlerdir.

Japonya'da 2011 yılı Mart ayında yaşanan Tohoku depremi sırasında Fukushima nükleer santralinin reaktörlerinde yaşanan çökme sonrası oluşan sızıntı, tüm dikkatleri felaket senaryosu sırasında kullanılabilecek robot sistemlerine çevirmiştir [117]. Japonya gibi sayısız robot platformu geliştirilmiş olan bir ülkede, Fukushima nükleer santralinde hiçbir robot platformu bulunmaması dolayısıyla Japonya eleştirilere maruz kalmıştır [161].

Kurtarma robotları konusunda yoğun çalışmalar sürdürülmektedir. Japonya'da 1995 yılında yaşanan Kobe depremi sonrasında kurtarma robotları için özel bir proje oluşturulmuş ve bu proje ile arama ve kurtarma robotları konusunda çalışmalar başlatılmıştır [118]. Amerika'da 1995 yılında yaşanan Oklahoma şehrindeki bombalama felaketi sonrasında mevcut kurtarma robotlarının fazla büyük, hantal ve yavaş olduğu ortaya çıkmıştır [119]. Yaşanan olayların neticesinde elde edilen gerçeklerden sonra kurtarma robotları alanında çalışmalar yürütecek CRASAR Enstitüsü kurulmuştur.

CRASAR Enstitüsü 11 Eylül 2001’de Dünya Ticaret Merkezi’ne yapılan saldırı sonrasında kullanılmıştır [120]. Bu olay sırasında kullanılan robotlar sağ olan kurbanları bulamasa da cesetlerin bulunmasına yardımcı olmuşlardır. Kurtarma çalışmaları hem yetersizlikleri hem de kurtarma robotları ve kurtarma ekiplerinin sahip olması gereken yetenekleri ortaya çıkarmıştır.

Olası felaketler sırasında yaşanabilecek iletişim problemlerinin çözümüne yardımcı olmak için insansız hava araçları kullanılarak atlamalı iletişim ağı kurulması için çalışmalar yapılmaktadır [121]. Önerilen iletişim ağı hem robotlar arası koordinasyonun sağlanması hem de kurtarma ekipleri ile iletişim için kullanılabilecektir.

Mars robotları belki de bilinen en ünlü robot platformlarıdır. Bu robotlar Mars gezegeninin yüzeyinde yaşam izleri araştırmakta, Mars gezegeninin jeolojik yapısı ve iklimi hakkında bilgiler toplamaktadır [122].

Karada hareket eden robotlar ve insansız hava araçları dışında kullanılan bir diğer otonom araç türü de bilimsel araştırmalar ve askeri amaçlarla uzun yıllardır kullanılmakta olan otonom sualtı araçlarıdır [161]. Bu araçlar deniz ve okyanus yüzeyinde incelemeler yapma, deniz ve okyanuslardaki su kalitesini inceleme, atık maddeleri yok etme, limanları gözetleme gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. [123] te su altında iki farklı tür robot ve bir algılayıcı ağı ile birçok deneysel çalışmanın sonuçları gösterilmektedir. 2010 yılında BP firmasının akaryakıt yüklü gemilerinden birisinin tankında meydana gelen sızıntı robotların kullanımıyla giderilmiştir [124].

Robotların kullanılabileceği diğer uzak ortamlar mağara ve madenlerdir. Maden ocakları gibi insan sağlığına zararlı gazlar içeren ve göçük riski taşıyan ortamlarda robotların kullanılması, olası can kayıplarının önüne geçilmesini sağlayacaktır. Madenlerde farklı robotlar kullanılarak gerçekleştirilen birçok çalışma bulunmaktadır [125], [126], [127].

2.1.2 Çoklu Robot Keşif Stratejileri

Çoklu robot keşif stratejileri birden fazla robotun kullanımını esas alan keşif stratejileri olup maksimum alanın minimum zamanda keşfedilmesini amaçlayan stratejilerdir [45], [46]. Harcanan zaman ve keşfedilen bölgenin büyüklüğü dışında robotlar tarafından

katedilen mesafe ve her bir robotun keşif işlemindeki payı gibi performans kıstasları bulunmaktadır. Keşif stratejilerinde kullanılabilecek robotların temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Keşif stratejilerinde kullanılabilecek robotlar karada hareket eden tekerlekli, paletli ya da yürüyen robotlar olabileceği gibi operasyon türüne bağlı olarak uçabilen ya da deniz üstünde veya altında hareket edebilen robotlar olabilir. Tüm bu yeteneklere sahip robotların da üretilmesi mümkündür.
- Keşif stratejileri için kullanılacak robotlarda operasyon alanının haritalanabilmesi ve robotların kendilerini bulundukları ortamda konumlandırabilmeleri için SLAM kabiliyeti olması gereklidir. SLAM kabiliyeti için lazer tarayıcı, ses üstü mesafe ölçer gibi robot ile etraftaki cisimler arasındaki mesafeyi ölçen algılayıcılar dışında kamera gibi görüntü temelli algılayıcılar kullanılabilir. Lazer tarayıcılar özellikle kara robotlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Algılayıcı seçimi operasyon bölgesine bağlıdır. Örneğin karada çok başarılı sonuçlar veren lazer tarayıcılar deniz altında kullanılamamakta deniz altında sonar algılayıcılar tercih edilmektedir. SLAM oldukça karmaşık bir problemdir. İki boyutlu SLAM için birçok başarılı teknik önerilmiş ve hayata geçirilmiş olmakla birlikte üç boyutlu SLAM uygulamalarının karmaşık ortamlarda gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar hala sürmektedir. Çoklu keşif operasyonlarında operasyona katılan robotların hepsi hem bulundukları yeri bilmek zorunda hem de gidecekleri yere karar vermelidir. Birden fazla robotun kullanıldığı keşif uygulamalarında robotlar genellikle önceden belirlenmiş noktalarda bir araya gelirler. Bunun nedeni randevu noktalarında gerçekleştirilecek bilgi alışverişi sayesinde robotlar birlikte konumlandırma yapabilir ve oluşturdukları haritaları düzeltebilir. Robotların oluşturduğu haritalarda keşfedilen yerlerin takibi yapılmalıdır. Bu bilgi randevu noktalarının hesaplanması için gereklidir.
- Çoklu robot uygulamalarında genellikle robotlar ile iletişim halinde olan ve sabit olarak konumlandırılmış bir kontrol merkezi kullanılır. Kontrol merkezinde bulunan operatör, toplanan bilginin analizini yapar. Kontrol merkezi kullanılmayan dağıtık çoklu robot sistemleri de gerçekleştirilebilir.

- Çoklu robot sistemlerinde robotların ortak bir referans sistemi kullandığı kabul edilir. Robotlar farklı noktalarda ya da farklı zamanlarda keşif operasyonuna başlasa bile harita paylaşımı gerçekleştirebilmek için genel referans sisteminde başlangıç noktalarını bilmeleri gereklidir [49], [50]. Robotların farklı referans sistemleri kullandığı sistemler de önerilmiştir. Bu sistemler için önerilmiş harita birleştirme algoritmaları bulunmaktadır.

Çoklu robot keşif sistemleri için önerilen ilk çalışmalarda hareket planlama ve çarpılma engelleme teknikleri ele alınmıştır. Güncel çalışmalarda koordinasyon ve birlikte çalışma üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Yapay zeka ve farklı haberleşme modellerinin keşif uygulamalarında kullanımı üzerine önerilen metotlar da bulunmaktadır.

2.1.2.1 Çoklu Robot Sistemlerinin Keşif Stratejilerindeki Avantajları

Çoklu robot sistemlerinin gerçek saha uygulamalarında bazı zorlukları olmakla birlikte tek bir robota göre sayısız avantajı vardır. Bu avantajlardan önemli olanları aşağıda sıralanmıştır:

- Birden fazla robot belirli bir bölgeyi tek bir robota göre daha kısa sürede kapsayabilir.
- Eş zamanlı gözlem sayesinde çoklu robot sistemlerinde daha yüksek başarıya sahip konumlandırma performansı elde edilebilir.
- Birden fazla robot kullanılan sistemler yedekli yapılarından dolayı daha dayanıklıdır.
- Belirli operasyon türlerinde farklı robotların kullanılması avantaj sağlayabilir.
- Çoklu robot sistemlerinde robotlar arasında algılayıcı bilgilerinin paylaşımı gerçekleştirilebilir ve ortam farklı açılardan algılanabilir.
- Gerçekleştirilen operasyonun özelliklerine bağlı olarak birden fazla robot ortamda bulunan engellerin üstesinden gelmeyi ya da engelleri hareket ettirmeyi sağlayabilir.

- Karmaşık tek bir robot yerine aynı işlemi gerçekleştirmek için daha basit birden fazla robotun üretilmesi mümkün olabilir.

2.1.2.2 Literatürdeki Çoklu Robot Keşif Stratejileri

Literatürde çoklu robot sistemleri ile keşif işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için ortaya atılmış farklı yaklaşımlar bulunmaktadır.

Lider-Takip Eden Yaklaşımları: Lider-takip eden yaklaşımlarında bir ya da daha fazla robot, lider olan bir robotu takip eder. Bu yaklaşımlarda genel olarak robotların direkt olarak birbirlerinin iletişim alanında bulunduğu görüş açısı modeli kullanılır. Robotik uygulamalarında görüş açısı bir robotun başka bir robotu görsel olarak tespit edilebilmesi anlamı dışında kablosuz ağlar kullanılan haberleşme altyapılarında iki robotun direkt iletişim mesafesinde bulunması anlamında da gelir. Bu yaklaşımla ilgili ilk örneklerden birinde Rekleitis vd. tarafından [66], [67] de lider-takip eden yaklaşımının iki örneği sunulmaktadır. [66] da önerilen yaklaşım bir adet hareketli robot ve bu robotun arkasında bulunan iki adet sabit robottan oluşmaktadır. [67] de önerilen sistem ise birbirini takip eden robot çiftlerinden oluşmakla birlikte [66] da önerilen sisteme benzer olarak belirli bir anda robotlardan sadece birisi hareket etmektedir.

Arkin ve Diaz tarafından [68] de bir robot takımının keşif operasyonu için kendi kendini organize etmesi açıklanmaktadır. Bu çalışmada robotlar arasında iletişim mesafesini koruyan üç farklı strateji önerilmektedir. Bu çalışma, çoklu robot sistemlerinde robotlar arasındaki bağlantıyı inceleyen ilk çalışmalardan birisidir. Ancak çalışmada önerilen keşif stratejilerinde takımı oluşturan robotların çoğu keşif sırasında durağan pozisyonda olduğu için çalışmada önerilen yaklaşımlar çok başarılı değildir. Sgorbissa ve Arkin [69] da dinamik, karmaşık ve iletişimin sınırlı olduğu bir ortam varsayımında bulunmuşlardır. Bu çalışmada her bir robota ulaşması gereken konumlar seti sunulmakta olup robotlara operasyon öncesinde bir görev tanımı yapılmaktadır. Robotlar direkt iletişim mesafesinde iken birbirlerine yardım edebilmektedir.

Nguyen vd. tarafından [70] de lider-takip eden yaklaşımı ile ilgili pratik bir sistem önerilmiştir. Bu sistemde kısa mesafede yüksek kapasiteli iletişim yeteneğine sahip

olan robotlar iki farklı rolde kullanılmaktadır. Bir lider robot köle adı verilen robotlar tarafından izlenmektedir. Kölelerin görevi, lider robotun algılayıcılarından gelen verileri kontrol merkezine aktarmaktır. Bu yaklaşımda köleler ağın durumuna göre dinamik olarak konumlarını belirleme yeteneğine sahiptir. Benzer bir yaklaşım Howard vd. tarafından [71] de önerilmektedir. Dağıtık yapı önerilen bu çalışmada robotlar arasında minimum iletişim olduğu kabul edilmiş ve doluluk ızgaraları yöntemiyle haritalama tercih edilmiştir. Çalışmada önerilen yöntem yinelemeli keşif işlemleri gerçekleştirilmesine neden olsa bile başarılı sonuçlar vermiştir. Benzer bir çalışma olan [72] de Stump vd. çok atlamalı iletim modelinde aktarıcı robotlar üzerinden keşif işlemini yerine getiren robot ile kontrol merkezi arasında iletişimin sağlanmasını açıklamıştır. Tekdas vd. [73] te çoklu robot sistemlerinde yönlendirme problemini işlemiştir. Bu çalışmada keşif işlemini yerine getiren robot ile kontrol merkezi arasında iletişim sağlanması için gerekli olan minimum robot sayısını hesaplayan bir algoritma verilmektedir. Buna ilave olarak ortamın kapsanması için gerekli olan robot sayısının da hesaplanma yöntemi açıklanmaktadır.

Lider-takip eden yaklaşımları direkt görüş açısı iletişim modeli kullanılması durumunda robotlar ile kontrol merkezi arasında güvenilir iletişimi sağlamaktadır. Bu yaklaşımda robotlar genellikle takımı oluşturan diğer robotlara ya da kontrol merkezine güvenilir iletişimi sağlayacak şekilde operasyona başlatılır. Tüm robotların kontrol merkezi tarafından ulaşılabilir olması operatörlerin anlık müdahalesine olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşımların temel kısıtlaması bir robot takımı tarafından keşfedilebilecek olan bölgenin büyüklüğünün sınırlı olmasıdır. Çok büyük alanlarda bu yaklaşımlar ile keşif işlemi gerçekleştirilmesi durumunda zaman kısıtlaması varsa keşfedilmeyen bazı alanlar kalabilir. Lider-takip eden yaklaşımlarında tek bir robotun keşif işlemini gerçekleştirmesi bu yaklaşımların başarısını sınırlandırmaktadır.

Sınır ve Fayda Temelli Yaklaşımlar: Bu yaklaşımlarda ilgilenilen alan, beklenen bilgi kazanımı, yol maliyeti, kesintisiz iletişimin olasılığı gibi belirli bir kıstasa bağlı olarak değerlendirilir ve alana bir değer atanır. Her bir robot-sınır çifti için farklı bir değer olabilir. Değer atamasından sonra robotlar bu alanların keşif işlemine atanır.

Yamauchi [42] de sınır temelli keşif yaklaşımlarının temellerini atmıştır. Bu yaklaşımlarda robotlar keşfedilmiş bölgeden keşfedilmemiş olan bölgeye doğru hareket eder. Keşif işlemleri için mesafe bulan algılayıcılar kullanılır. Takımı oluşturan robotlar yeni bir sınıra ulaştığında bu bilgiyi ve elde ettikleri gözlem sonuçlarını takım arkadaşları ile paylaşır. Her robot kendi yerel haritasını oluşturur ve yönetir.

Simmons vd. [74] te beklenen bilgi kazanımı ve katedilecek yol maliyetinin tahminine dayalı olarak tekliflerin oluşturulması için bir metot önermiştir. Önce teklifler merkezi bir birime gönderilir. Merkezi birim tüm takım üyelerinden gelen teklifleri değerlendirir ve elde edilecek faydayı maksimuma çıkaracak şekilde görev atamalarını yapar. Bu yaklaşımda her robot kendi haritasının oluşturur. Elde edilen yerel haritalar, merkezi birim tarafından birleştirilerek genel harita oluşturulur. Maksimum olabilirlik kestirimleri ile robotlar hem kendilerini konumlandırır hem de ortamda bulunan cisimlerin konumlarını belirler.

Burgard vd. [75] te değer iterasyonu adını verdikleri bir yöntemle dar geçitlere ve engellere ceza uygulayarak sınırlara olan maliyetleri hesaplamışlardır. Bu yöntemde robot ile sınır bölgesi ataması merkezi olarak yapılmamakta, birbirine bağlı küçük robot takımları tarafından yapılmaktadır. Yöntemin farklı sınır bölgesi atamalarında robot takımlarının koordinasyonunu daha iyi sağladığı kanıtlanmıştır.

Meier vd. [76] da robotların bant genişliği kısıtlamalarını hesaba katarak sınırlayıcı poligonlar yardımıyla haritalarınının kaba gösterimlerini paylaşmaları tekniğini önermiştir. Hedefler robotlara dağınık bir yapıda atanmaktadır.

Fox vd. [77] de çoklu robot sistemlerinde sınır temelli keşif sistemini kullanmıştır. Bu çalışmada robotların birbirlerinin başlangıç pozisyonlarını bilmedikleri ve operasyona farklı noktalardan başlayabileceği kabul edilmiştir. Robotlar karşılaştıklarında tüm algılayıcı değerlerini paylaşırlar. Robotların sık sık karşılaşmaları birbirlerinin konumları hakkında sahip oldukları hipotezleri doğrulama olanağı sağladığı için robotlar belirli zamanlarda bir araya gelirler. Hipotezler doğrulandıktan sonra robotlar bir keşif kümesi meydana getirerek birlikte keşif işlemine devam ederler.

Rooker vd. [78] de kontrol merkezi kullanılmayan dağınık yapıda çalışan sınır temelli bir keşif stratejisini çoklu robot sistemlerine uygulamıştır. Bu çalışmada bir robot grubu

içinde kesintisiz iletişimi sağlayan ve gruptaki robotların serbest olarak keşif işlemi gerçekleştirmesine izin veren bir keşif stratejisi önerilmiştir. Robot davranışlarını belirlerken sınır hücreleri için ödüllendirme, ulaşılması zor ya da iletişim mesafesi dışındaki bölgeler için de cezalandırma sistemi uygulanmıştır.

Visser ve Slamet [79] da bir ödünleşim mekanizması önermiştir. Buna göre bilgi kazanımının değer arttırılırsa iç ortam uygulamalarında robotların koridorları keşfetme ihtimalinin daha yüksek olduğu, katedilen yol maliyetinin değeri arttırılırsa robotların odaları keşfetme ihtimalinin yüksek olduğu ortaya konmuştur. Bu mekanizma kullanılırsa robot davranışı tek bir parametre ile belirlenebilmektedir. Aynı yazarlar [80] de bilgi kazanımını hesaplarken iletişimin hesaba katılmasını önermişlerdir. Bu yaklaşıma göre bir robotun bir sınır bölgesine olan ilgisi sadece keşfedilecek alana ve yol maliyetine değil o bölgede iletişimin olabilirliğine de bağlıdır. İletişim gücü belirli zaman aralıklarında hesaplanmaktadır. Sınır bölgelerinde elde edilebilecek sinyal gücü en yakın komşu tekniği ile tahmin edilmekte ve sonuç olarak robotların ait oldukları takımın iletişim mesafesinde olmaları sağlanmaktadır.

Stachniss vd. [81] de sınır bölgeleri yerine ortamın özelliklerinin belirlenmesini sağlayan semantik yer etiketlendirme yöntemini kullanmıştır. Lazer taramasının bir koridora ait olup olmadığının belirlenmesini sağlayan sınıflandırıcının eğitilmesi için AdaBoost algoritması kullanılmıştır.

Wurm vd. [82] de bilinmeyen alanların bölümlere ayrılması prensibini açıklamıştır. Bu prensipte bölümler Voronoi diyagramı kullanılarak belirlenmektedir. Daha sonra robotlara bu bölümler atanmaktadır.

Sınır ve fayda temelli yaklaşımlar robotları keşfedilmemiş yeni bölgelere merkezi veya dağıtık yapıda yönlendiren keşif stratejileridir. Bu yaklaşımlarda her bir robot keşif operasyonuna belirli ölçüde katkı yapar ve lider-takip eden keşif stratejilerine göre daha hızlı keşif işlemi gerçekleştirilir. Bu yaklaşımların temel dezavantajı ise sınırlı ya da kesintili iletişim problemlerine bir çözüm getirmemeleridir. Örneğin robotlar ters yönde hareket edebilir ve birbirlerinin iletişim alanından çıkabilirler. Dolayısıyla bazı robotlar daha önce diğer takım üyeleri tarafından keşfedilmiş olan bölgeleri tekrar keşfedebilir. [78, 83, 76, 80] gibi çalışmalar iletişimi de hesaba katarak bu probleme

çözüm getirmeye çalışmaktadır. Sonuç ise genellikle robotların sadece takım üyelerinin veya kontrol merkezinin iletişim mesafesinde olan bölgeleri keşfetmesi ve bazı keşfedilmemiş bölgelerin kalması ya da robot gruplarını oluşturan robotların kontrol merkezi ile olan iletişimi sürdürmeden birbirlerinin iletişim alanında kalarak keşif işlemini gerçekleştirmesidir.

Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşımlar: Bu yaklaşımların temelinde ekonominin prensipleri yatmaktadır. Robotların kendi kişisel kazançlarını maksimuma çıkarmak için rekabet etmeleri ve böylece takımın bundan kazançlı çıkması ya da robotların alt görevler için teklifler verdiği ihale tarzı bir davranışla bu gerçekleştirilir.

Dias ve Stentz [84] te çoklu robot sistemlerinin dağıtık kontrolü için serbest piyasa prensiplerine dayanan bir mimari önermişlerdir. Bu çalışmaya göre her bir robotun kendi kazanımını maksimuma çıkarmaya çalışması sonuçta en uygun davranış modelinin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Bu yaklaşımda robotlar gelir ve maliyet fonksiyonlarını kullanarak her bir görevin olası kazancını hesaplamaktadır.

Gerkey ve Mataric [85] te açık arttırma tarzı bir görev atama sistemi önermişlerdir. Bu sistem kaynak merkezli özel bir iletişim modeline dayalıdır. Bu modelde mesajlar alıcıya göre değil konuya göre iletilmektedir. Önerilen yöntem iki farklı senaryoda denenmiştir. Elde edilen sonuçlar hem aniden ortaya çıkan robot arızalarında hem de rastgele eklenen yeni görevlerde yöntemin bu olaylara çok çabuk cevap verdiğini göstermiştir.

Zlot vd. [43] te mükemmel bir iletişime dayanmayan ve hiçbir iletişim olmasa bile çalışan çok robotlu keşif sistemi için piyasa prensiplerine dayalı bir yaklaşım ortaya atmıştır. Bu yaklaşıma göre her bir robot keşif işlemini gerçekleştireceği hedef noktalarını içeren bir tur programı oluşturur. Oluşturulan tur programı robotlar arası iletişim ile güncelleştirilir. Bilgi kazanımını içeren bir gelir fonksiyonu robotun kazançlarını belirler. Maliyet ise robotun ilgili bilgi kazanımını elde edebilmesi için gereken kaynaklar ile belirlenir. Gelirler merkezi bir koordinasyon birimi tarafından ödenir. Fiziksel robotlar ile gerçekleştirilen saha çalışmaları yöntemin başarısını ortaya koymuştur.

Sheng vd. [86], [87] de merkezi bir koordinasyon birimi kullanılmayan ve piyasa prensiplerine dayalı olan çok robotlu keşif sistemi önermiştir. Sistem ayrık zamanlı dağıtık ihalelere dayalıdır. Bu yöntemde bütün robotlar tekliflerini veri boyutunu azaltan özel bir iletişim mekanizması ile tüm takım üyelerine gönderir. Teklifler bilgi kazanımı ve yol maliyetine dayalıdır. Yol maliyeti Dijkstra'nın en kısa mesafe algoritmasına göre hesaplanır. Benzetim çalışmaları yöntemin iletişim yükünü azalttığını ve robotları kümeleme davranışına sevk ettiğini göstermiştir.

Piyasa prensiplerine dayalı yaklaşımlar robot takımlarının yönetimi anlamında etkin olsa bile merkezi ya da dağıtık ihale mekanizmaları ile iyi bir koordinasyon gerektirmektedir.

Graf Teorisine Dayalı Yaklaşımlar: Graf teorisine dayalı keşif stratejileri robot takımlarının koordinasyonunu sağlamak için graf teorisini kullanır. Robotlar graftaki düğümler ile iletişim hatları ise kenarlar ile temsil edilir.

Basu ve Redi [88] de çoklu robot sistemlerinin graf ile temsil edilebileceğini gösteren ilk modellerden birisini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada robot takımları tarafından oluşturulan düzensiz ağ yapılarında ikili bağlantının arzu edilen bir özellik olduğu kabul edilir. Eğer takımdaki her bir robot takımda bulunan diğer iki robota bağlı ise robotlardan birinde meydana gelebilecek arıza diğer robot çiftleri arasındaki bağlantıyı etkilemez.

Vazquez and Malcolm [89] da davranış temelli tamamen dağıtık bir mimari önermişlerdir. Bu davranış modelinin amacı robotları hareket halindeyken düzensiz atlamalı bir ağ yapısında tutmaktır. Graf teorisinin temellerine dayanarak yazarlar robot hareketlerine kısıtlamalar uygulamış ve bağlı bir ağ yapısını sürdürmüşlerdir.

Yao ve Gupta [90] da robot takımlarına bağlı kalma zorunluluğu uygulamışlar ve takımın omurgasını meydana getiren robotları graf teorisi prensiplerini kullanarak üç farklı türe ayırmıştır. Omurgayı meydana getirmeyen diğer robotlar lider-takip eden davranışıyla omurgaya bağlı kalırlar. Ortamda engeller bulunsa bile takım sürekli olarak birbirine bağlıdır.

Franchi vd. [91] de algılayıcı tabanlı rastgele graf modeli önermiştir. Bu grafta her bir düğüm yerel güvenli bölge içerirken, yollar ise düğümler arasındaki güvenli yolları

temsil eder. Yaylar birbirine yeterince yakın mesafede olan iki düğümün birleştirilmesi veya robotların ilerlemeleri ile oluşturulmaktadır. Robotların ilerleyeceği gerçek yön yerel düğüm konfigürasyonundaki sınır hücrelerine bakılarak belirlenir. Benzer bir yaklaşım Julia vd. [92] de açıklanmıştır. Güvenli bölgeler ve sınırlar graflar ile temsil edilmiştir.

Mukhija vd. [93] te sabit bir baz istasyonu varsayımı altında robotların keşif ağacı bünyesinde aktarıcı düğümler ve keşif düğümleri olarak iki kategoriye ayrılmasını önermiştir. Robotlar farklı yönlerden birisine gidebilir. Ağaca yeni düğümler eklenebilir. Eğer eklenen düğümler aktarıcı düğüm olarak davranıyorlarsa sabit pozisyonda durmaları gereklidir.

Gerçek saha koşullarının graf olarak modellenmesi kolay değildir. Graf temelli metotlar haritalama ve yöngüdümler problemlerine başarılı olarak uygulanmıştır.

Etiketleme Yöntemi ile Keşif: Veri depolayabilen çok küçük elektronik etiketlerin robotlar tarafından keşif sırasında belirli noktalara bırakılması ve böylece takımdaki diğer robotlara yardım edilmesi prensibine dayanan bu yaklaşım son yıllarda popüler olmaya başlamıştır. Etiketler küçük boyutlu ucuz bileşenler olup konumlandırma ve güzergâh tespiti sırasında operatörlere yardımcı olabilirler.

Kleiner vd. [94] te radyo frekanslı tanımlama etiketlerinin keşif işlemi sırasında uygun konumlarda bırakılmasını önermiştir. Bu çalışmada önerilen yöntem Luo ve Milios tarafından [95] te önerilen yöntemdeki tarama eşleştirme algoritmasını esas almıştır. Etiketler sınır hücrelerinin ve ziyaret edilen hücrelerin göreceli konumlarını saklar. Böylece daha sonra geçen robotlar kendi bilgilerini güncelleştirebilir.

Ziparo vd. [96] da arama bölgesinin büyüklüğünü oldukça azaltan RFID etiketlerini yerleştiren robot takımının benzetimi yapmıştır. Robotlar otonom çalışma modunda etiketleri yerleştirmekte ve bu etiketler koordinasyon noktaları olarak hareket etmektedir. Robotlar izleyecekleri yollara kendileri karar verir. Ancak genel koordinasyon sistemi robotları gerektiğinde yönlendirir.

Ferranti vd. [97] de keşif sırasında tam dağıtık yapıda ortam etiketlendirmesi yapan bir sistem önermiştir. Takım arkadaşlarının etiketlere kaydettiği bilgileri alan robotlar, keşif işlemini olabildiğinde etkin hale getirmek için izlemeleri gereken yola karar verirler.

Etiketleme mekanizması etiketlerin yerleştirilmesi, gerektiğinde bulunması ve okunması gibi detayları beraberinde getirir bile etiketlerin keşif işlemlerinde sunabileceği birçok avantaj bulunmaktadır.

Kapsam Tabanlı Keşif Yaklaşımları: Keşif uygulamalarındaki kapsam problemi bir görevin yerine getirilmesi için bilinen bir bölgedeki her bir konumun ziyaret edilmesi olarak tanımlanabilir. Lazer tarayıcı ve kameralar gibi düşük maliyetli yüksek kaliteli algılayıcılara sahip olan robotların bir bölgeyi incelemek için o bölgedeki tüm noktaları ziyaret etmesine gerek yoktur.

Koenig vd. [98] de kapsam problemi konusunda karınca robotlar kullanarak yaptıkları araştırmaları açıklamışlardır. Karınca robotların tercih edilmesinin nedeni tasarımlarının kolay olması, üretim maliyetlerinin düşük olması, programlanmalarının kolay olması ve kolay dağıtılabilmeleridir. Ayrıca, fazla sayıda kullanılabilirliklerinden dolayı hata toleransı ve paralellik sağlayabilirler. Bu çalışmada Koenig vd. gerçek zamanlı öğrenen A* algoritmasının da içinde bulunduğu birçok algoritma üzerinde çalışmış ve bu algoritmaları uygulamışlardır.

Agmon vd. [99] da kapsama ağacı algoritmasını kullanarak kapsama için gerekli olan zamanın azaltılmasını sağlamıştır. Benzetim sonuçlarına ile geri izleme yapmayan çoklu robot kapsama ağacı ile kapsamanın diğer algoritmalarından başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Benzetim çalışmalarında ızgara tabanlı ortamlar kullanılmış ve ortam bilgisinin önceden sağlandığı kabul edilmiştir.

Poduri ve Sukhatme [100] de yapay potansiyel alanlara bağlı bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşımda bilinmeyen bir ortamda her bir robotun sabit sayıda komşusu olacak şekilde dağılımını yapmayı amaçlamışlardır. Robot takımının üyeleri arasındaki etkileşimler takımın ayrışmasına yol açan bir püskürtücü güç ve iletişim kesintilerini önleyen çekici bir güç tarafından yönetilir.

Esposito ve Dunbar [101] de engellerle dolu bir ortamda hareket eden robot sürülerinde kesintisiz bağlantının sürdürülmesi için gereken kontrol kanunları setini belirlemişlerdir. Bu yaklaşımda bir takımdaki tüm robotlar bağlantının sürdürülebilmesi için engellerin aynı tarafından geçmelidir. Yaklaşımın doğruluğu hem benzetim ortamında hem de Koala robotlarla gerçekleştirilen saha çalışmalarıyla ispatlanmıştır.

Schwager vd. [102] de robotların arzulanan algılama konfigürasyonlarına sürülmesi için gereken kontrol kanunlarını önermiştir. Ortamdaki bölgelerin göreceli algılayıcı önemi bilgisi verildiğinde, robotların kendi Voronoi bölgelerinin tahmini merkezine doğru ilerlediği gösterilmiştir.

Kapsam problemi yeterince incelenmesine rağmen literatürdeki yöntemlerin birçok keşif operasyonuna uygulanması çok olası değildir.

Keşif Stratejilerine Diğer Yaklaşımlar: Pimentel ve Campos [103] te çoklu keşif takımlarını, takım üyelerinin hepsinin düzensiz atlamalı ağ yapısında birbirinin ve merkezi kontrol biriminin iletişim mesafesinde olduğu varsayımı altında modellemişlerdir. Ortaya attıkları tahmin modelinde tüm robotlardan gelecek konum ve ivme verilerini kullanarak ağ topolojisinin sonraki olası durumunun kestirimini yapmışlardır. Robotlar ağ bağlantıları, ortam ve göreve ilişkin çeşitli parametrelerin kullanımıyla hareketlerini belirlemektedir.

Newman vd. [104] te robotları bilinmeyen yeni bölgelere doğru süren bir hareket seçimi algoritması önermişlerdir. Bu algoritmada izlenecek güzergâhlar algılanan özelliklere göre planlanmaktadır. Algılanan özelliklerin konumları bir olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ile belirlenmektedir. Olası her bir hedef için yeni bölgeleri keşfetme ve daha önce keşfedilmiş olan bölgelerden uzak durma gibi kriterler ile faydalar hesaplanmaktadır.

Baxter vd. [105] te çoklu robot sistemleri için bir potansiyel alan paylaşımı sistemi önermiştir. Bu yaklaşımda her bir robot, kendi etrafında bulunan 8 ayrı noktadaki potansiyel alanların güçlerini hesaplamakta ve en çok ilgi çeken noktaya doğru hareket etmektedir. İki ayrı potansiyel alan paylaşım yöntemi ile robotlar ortamda bulunan engellerin konumlarını birbirlerine dolaylı olarak aktarmaktadır.

Mosteo vd. [106] da aynı çerçeveyi esas alan dört farklı algoritma önermişlerdir. Bu yaklaşımlarda robotların rotaları artımlı olarak belirlenir. Kullanılan hareket kontrol mekanizması robot takımını oluşturan robotların operasyon süresince birbirine bağlı kalmasını garanti etmektedir.

Bruggemann vd. [107] de henüz ziyaret edilmemiş bölgelerdeki gerçek sinyal gücünün tahmini için bir model önermişlerdir. Önerilen tahmin modeli farklı ortam koşullarına

göre anlık olarak kendini ayarlamaktadır. Yazarlara göre olası iletişim kalitesini bilmek keşif stratejilerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir.

2.1.2.3 Çoklu Robot Keşif Stratejilerinde Haberleşme

Çoklu robot keşif stratejilerinde farklı iletişim modelleri kullanılabilir [83]. Bu çalışma kapsamında incelenen ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilen iletişim modelleri aşağıda açıklanmaktadır.

Statik Çember İletişim Modeli: Herhangi iki robot, önceden belirlenmiş olan iletişim çemberi kapsamında iken ortamda bulunan engeller dikkate alınmaksızın birbirleri ile haberleşebilir. İletişim mesafesi kablosuz ağ donanımının özellikleri ile belirlenir.

Görüş Alanı İletişim Modeli: İki robot eğer direkt görüş alanlarında bir engel yoksa birbirleri ile haberleşebilir. Bu modelde yüksek frekans radyo dalgalarının yayılma karakteristiği kullanılır. Gönderici anten ile alıcı anten arasındaki her engel, yüksek frekanstaki ve atmosferin alt katmanlarındaki sinyali bloke eder.

Hem alıcı antenin hem de gönderici antenin yeryüzünden bir h mesafesi kadar yüksekte olduğu kabul edilirse görüş açısı modeline göre maksimum iletişim mesafesi (2.5) kullanılarak hesaplanır.

$$d_{LOS} = 2\sqrt{2hR + h^2} \cong 2\sqrt{2Rh} \cong 3.57\sqrt{h} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te R dünyanın yarıçapı olup 6.38×10^6 m değerindedir.

Yayılma Modeli: Bu model gerçekçi bir iletişim modeli olup ortamda bulunan engellerin kalınlığını hesaba katmaktadır. Bu modelde iletişim mesafesi Bahl ve Padmanabhan tarafından [129] da açıklanan modele göre hesaplanmaktadır. Standart yol kayıp modeli ile bir duvar zayıflatma faktörü (WAF) içeren bu model birçok benzetim platformu tarafından da desteklenmektedir.

Binalardaki duvarlardan kaynaklanan sinyal zayıflamalarını hesaplamada kullanılan WAF, alıcı ve gönderici anten arasındaki duvar vb. engelleri göz önüne almaktadır. WAF modeli (2.6) ile tanımlanmaktadır.

$$P(d) = P(d_o) - 10n \log \left(\frac{d}{d_o} \right) - \begin{cases} nW * WAF & nW < C \\ C * WAF & nW \geq C \end{cases} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da n yol kaybının mesafeyle artış oranını, $P(d_o)$ d_o referans mesafesindeki dBm olarak gücü, d ise göndericiden alıcıya doğru olan mesafeyi göstermektedir. Zayıflatma faktörünün fark oluşturduğu maksimum engel sayısı ile C , alıcı ve gönderici arasındaki engel sayısı nW ile gösterilmektedir. Genellikle C ve WAF deneysel olarak hesaplanır. $P(d_o)$ ise kablosuz ağ donanımının özellikleri kullanılarak ya da deneysel olarak hesaplanabilir.

Önerilen sistemin ağ mimarisi gezgin robotların ve bir adet sabit pozisyonda olan kontrol merkezinin oluşturduğu kablosuz ağdan oluşur. Bu mimaride kablosuz erişim cihazları kullanılmaz. Aktif kablosuz bağlantının sinyal gürültü oranı (SNR) değerlerini dikkate alarak gezgin robotlar atlamalı kablosuz ağ yapısını oluştururlar. Fiziksel ve veri iletim katmanlarında saha çalışmalarında kullanılacak olan robotlar tarafından desteklenen IEEE 802.11g standardı kullanılmaktadır. Kablosuz ağ 2.4 GHz'lik kanal üzerinde 54 Mbps iletim hızını desteklemektedir. Kablosuz kanalın zayıflama oranı, açık alan yayılma prensibine göre hesaplanmaktadır. Keşif ortamında engeller varsa ilave zayıflatma faktörleri de dikkate alınmalıdır.

Küçük bir log-normal gölgeleme faktörü ekstra engelleri modellemek ve köşelerdeki sinyal kayıplarını ve yansımaları hesaba katmak için eklenmektedir. Önerilen sistemde her bir robot aldığı tüm paketleri komşu robotlara iletmektedir. Ağ katmanında kullanılan bu yayımlı mimaride paketler hedef robota ulaşınca kadar iletilir. Gelen paket, robot tarafından daha önceden iletiliyse tekrar iletilmez. Bu yönlendirme protokolü basit bir model olup ağda aynı paketin birçok kopyasının oluşmasına neden olmaktadır. Buna rağmen gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bu protokolün küçük kablosuz ağ yapılarında tatmin edici bir performans sergilediği görülmüştür [130], [131].

2.1.2.4 Çoklu Robot Keşif Stratejilerinde Koordinasyon

Çoklu robot sistemlerindeki koordinasyon ve görev paylaşım stratejileri, sistemi oluşturan robotlar arasında bilgi paylaşımı gerektirir. Çoklu robot uygulamalarında

senaryoya bağılı olarak paylaşılan bilgi; yerel haritalar, robotların göreceli pozisyonları ya da hızı gibi farklı bilgiler olabilir. Birden fazla robot arasındaki işbirliği, robotların koordinasyon verisinde uzlaşmaya varmasını gerektirir [128]. Çoklu robot sistemlerindeki uzlaşma problemi (2.7) kullanılarak ifade edilebilir.

$$x_i(t+1) = \sum_{j=1}^N \alpha_{i,j}(t) x_j(t) \quad (2.7)$$

(2.7) numaralı denklemdeki x_i i numaralı robotun bilgi durumunu (robotların koordinasyonu için gereken bilgi), t zaman adımını, N ise toplam robot sayısını gösterir. Konsensus noktası tüm robotların bilgi durumlarının birleştiği değerdir. Robotları birbirine bağlayan iletişim ağı bir graf tarafından modellenir.

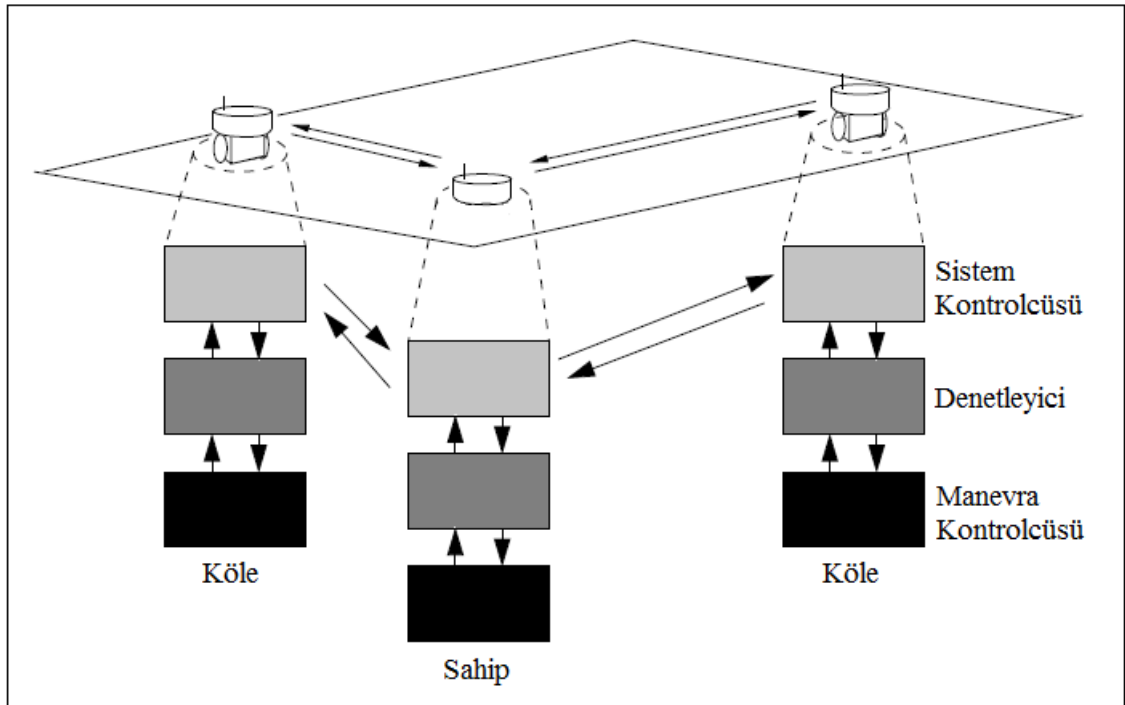
$\alpha_{i,j}$ düğümlere sahip grafın yay setini tanımlar. Graftaki düğümler robotlara karşılık gelir. Eğer $\alpha_{i,j}$ sıfırdan farklı ise i düğümü ile j düğümü arasında bir yay vardır. Eğer $\alpha_{i,j}=0$ ise i . robot ile j . robot arasında iletişim yoktur. Konsensus dinamiklerine bir maliyet fonksiyonu atanarak performans hesaplanabilir. Buradaki amaç $\alpha_{i,j}$ 'nin birleşmeyi garanti eden değerlerini belirleyerek maliyet fonksiyonunu minimize etmektir. Ancak gezgin robotlar genellikle holonomik olmayan mekanik sistemler olup diferansiyel kısıtlara bağlı parametreler seti ile tanımlanır ve rastgele bir yönde hareket edemez.

Son yıllarda veri iletişimde birçok ilerlemeler olmasına rağmen, iletişim kesintileri ve gecikmeler koordinasyon mimarilerinde dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı bu çalışmada gerçek senaryolarda kullanılabilecek özel bir mimari önerilmektedir.

İletişim bazı noktalarda kesilebileceği için bu çalışmada iletişim ve hareket aşamalarından oluşan iki aşamalı bir tasarım önerilmektedir. Her bir iletişim aşamasında robotlar kendi güzergâhlarını belirlemek için aralarında mesaj alışverişi yaparlar. Hareket aşamasında ise robotlar tanımlanmış olan güzergâhları takip ederler. Robotların koordinasyonu ve yönetimi *koordinasyon*, *yeniden konfigürasyon* ve *hareket* olmak üzere üç ayrık durumdan oluşan bir geçiş sistemi ile gerçekleştirilir. Bu üç aşama bir döngü şeklinde devam eder.

Bir gezgin robotlar grubunun koordinasyonu hem koordinasyon stratejisi ile ilgili ayrık dinamikler hem de kullanılan model ile ilgili sürekli dinamikler içerir. Bu nedenle Şekil

2.2’de gösterilen katmanlı kontrol mimarisinin kullanılması önerilmektedir. Önerilen kontrol mimarisi; sistem kontrolcüsü, yerel denetleyici ve manevra kontrolcüsü olmak üzere her bir robot için üç katmanlı olarak tasarlanmıştır. Sistem kontrolcüsü robotların olay tabanlı koordinasyonunu sağlar ve robotlara güzergâh ataması yapar. Denetleyici takip edilmesi gereken manevralar setini tanımlar. Denetleyici ayrıca olası hataların ele alınmasında sistem kontrolcüsüne yardımcı olur. Manevra kontrolcüsü denetleyici tarafından belirlenen manevraları algılayarak kontrol komutlarını hesaplar ve yürütür. Ayrıca manevranın başarılı olup olmadığı konusunda denetleyiciye bilgi verir. Çoklu robot sistemlerinde sistem kontrolcüsü robotların birlikte çalışmasından da sorumludur. Robotlarda bulunan sistem kontrolcüsü *sahip* ya da *köle* durumunda çalışabilir. Çalışma kapsamında önerilen çoklu keşif sisteminde bulunan kontrol merkezinde çalışan sistem kontrolcüsü sahip modunda; robotlarda bulunan sistem kontrolcüleri ise köle modunda çalışır. Kontrol merkezinde sahip modunda çalışan kontrolcü, köle modunda bulunan sistem kontrolcülerine girişler gönderir. Köle modunda bulunan sistem kontrolcüleri ise sahip modundaki sistem kontrolcüsüne raporlama yapar.

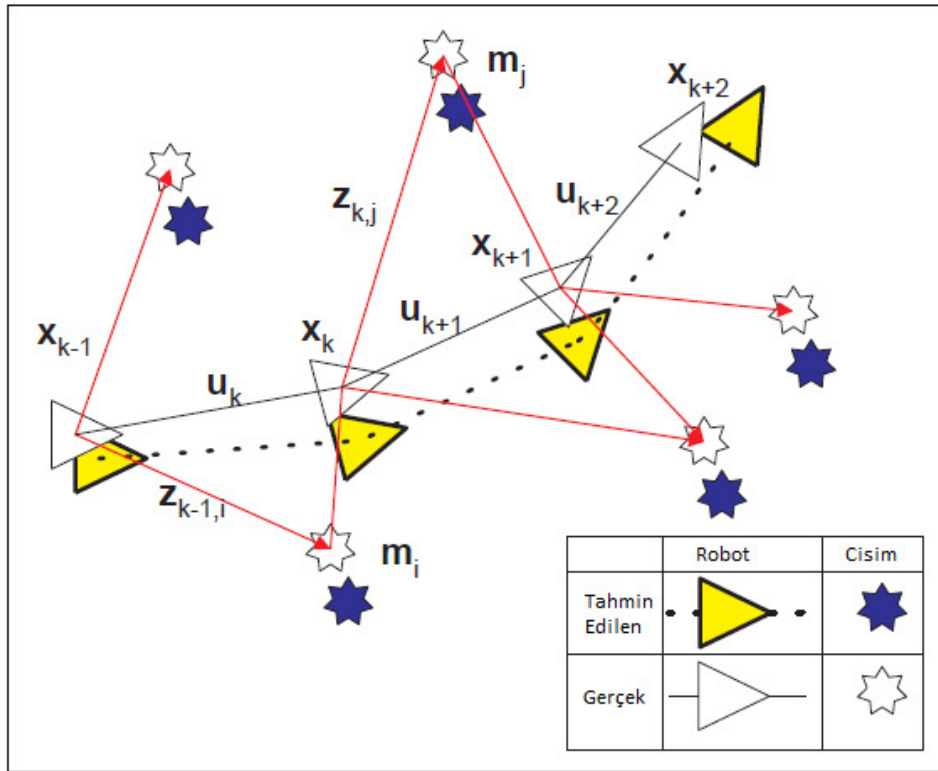


Şekil 2. 2 Katmanlı kontrol mimarisi

2.2 Robotik Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama

Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama (SLAM), hareket eden bir robotun gürültülü ölçüm sonuçlarından hareketle bilinmeyen bir ortamın haritasının çıkarılmasıdır [1], [2]. Robotlar, üzerlerinde bulunan algılayıcılardan gelen mesafe bilgileri sayesinde ortamın haritasını olasılıksal yöntemlerle çıkartır. Robotik haritalama uygulamalarında belirsizlik kaçınılmazdır. Belirsizliğin nedenleri ölçüm gürültüsü ve hareket gürültüsüdür [19], [23].

SLAM farklı alanlarda kullanılmaktadır. SLAM uygulamalarında iki sorunun cevabı aranır: *konum* ve *harita*. Robot, bilinmeyen bir ortamda ilerlerken algılayıcı ölçümlerini kullanarak olasılıksal yöntemlerle hem kendi konumunu belirler hem de haritayı oluşturur [40], [41], [20].



Şekil 2. 3 SLAM problemi [40]

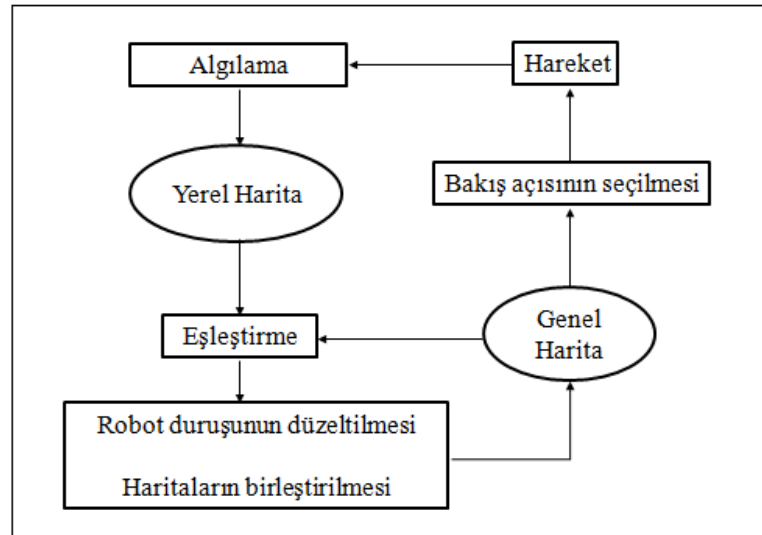
Şekil 2.3'te üçgen robotu, yıldız ise ortamda bulunan cisimleri göstermektedir. Sarı renk robotun tahmini konumlarını, mavi renk cisimlerin tahmini konumlarını

göstermektedir. Beyaz renk ise robotun ve cisimlerin gerçekteki konumlarını göstermektedir. Şekilde x robot konumunu, z ölçümü, u kontrol hareketini, m ise haritalanan yer işaretçilerini göstermektedir.

SLAM yinelenen bir işlemler bütünü olup aşağıdaki adımlardan oluşur:

1. Robot hareket eder.
2. Robot hareket ederken durum vektörü, durum kovaryans matrisi ve yeni ölçümlerin tahmini yapılır.
3. Yeni algılayıcı ölçümleri alınır.
4. Eğer yeni bir cisim tespit edilmişse cisim oluşturulur ve durum vektörüne eklenir.
5. Ölçüm sonucu ile tahmin edilen ölçüm değerinin farkı ve filtre kazancı hesaplanır.
6. Durum vektörü ve durum kovaryans matrisi güncellenir.

Çoklu robotlarla tek robota göre daha kısa sürede daha doğru bir genel harita oluşturulabilir. Çoklu robotlarla haritalama işleminde her robot kendi bölgesini haritalar. Robotlardan gelen yerel haritalar ortak noktalar kullanılarak birleştirilir ve genel harita oluşturulur.



Şekil 2. 4 Çoklu robotlarla haritalama

2.2.1 Robotik Uygulamalarında Kullanılan Harita Modelleri

SLAM algoritmaları haritalama sırasında harita modelleri kullanır. SLAM uygulamalarında yaygın olarak kullanılan üç harita modeli *doluluk ızgaraları*, *topolojik* ve *yer işaretçisi tabanlı* haritalardır. Doluluk ızgaraları tabanlı haritalarda ortam hücrelerden oluşan ayırık ızgaralar ile temsil edilir [26]. Her bir hücreye hücrenin doluluk olasılığını temsil eden bir değer atanır. Bu haritalarda kullanılan ızgaranın çözünürlüğü (hücrelerin boyutları) belirleyici etmendir. Izgara çözünürlüğü azaltıldıkça işlem yükü ve bellek gereksinimi azalır ancak ortalama konumlandırma hatası artar. Doluluk ızgaraları tabanlı haritaların dezavantajları, ayırıklaştırma hataları ve fazla bellek kaynakları gerektirmeleridir. Topolojik haritalar, düğümler ve kenarlardan oluşur. Düğümler belirli bir bölgeyi temsil ederken kenarlar ise iki bağlı düğüm arasındaki geçişleri temsil eder. Yer işaretçisi tabanlı haritalarda yer işaretçilerinin pozisyonları ile robotların konumları durum vektörlerinde metrik olarak saklanır. İki boyutlu olan yer işaretçisi tabanlı haritalarda yer işaretçilerinin pozisyonları Kartezyen koordinat sisteminde saklanır. Harita ile ilişkili olan kovaryans matrisi yer işaretçilerinin pozisyonlarındaki ve robotların konumlarındaki belirsizliği ifade eder [3]. Yer işaretçisi tabanlı haritaları saklamak için gerekli olan bellek boyutu doluluk ızgaraları tabanlı haritalara ve 3D haritalara göre daha küçüktür.

2.2.2 SLAM Problemine Olasılıksal Yaklaşımlar

SLAM probleminin çözümüne olasılıksal yöntemlerle yaklaşılabılır. SLAM algoritmaları, kullanılan harita tiplerine göre farklılık gösterir. Yaygın olarak kullanılan metrik haritalar için tasarlanmış olan gelişmiş teknikler robotların olasılıksal hareket modelleri ve belirsiz algılama modelleri kullandığı olasılıksal yaklaşımlardır [6]. Bu iki dağılımın, Kalman Filtresi ya da Parçacık Filtresi (PF) gibi bir Bayes filtresi ile entegre edilmesi ile gezgin bir robotun konumlandırmasının gerçekleştirilmesi mümkündür. Genellikle haritalama kestirim problemine bir eklenti olarak kabul edilir. Olasılıksal yaklaşımlarda kapalı döngüler önemli rol oynar. Kapalı döngü, ortamda daha önce ziyaret edilmiş bir bölgeye tekrar uğrama anlamına gelir. Döngünün kapatılması, topolojik olarak uyumlu bir modelin oluşturulabilmesi için hali hazırda mevcut olan haritanın tekrar

şekillendirilmesi yoluyla algoritmanın oluşan hataları sınırlamasını sağlar. SLAM probleminin çözümü için geliştirmiş birçok strateji bulunmaktadır.

SLAM probleminin çözümünde kullanılan algılayıcıların özellikleri önemli bir yer tutar. Bir algılayıcının karakteristiğini belirleyen üç temel özellik vardır:

1. Gürültü
2. Giriş verisinin boyutu
 - a. Düzlemsel lazer tarayıcılarda 2D noktalar
 - b. 3D lazer tarayıcılarda 3D nokta bulutu
 - c. Kameralarda kamera özelliklerine bağlı durumlar
3. Referans çerçevesinin boyutu
 - a. Robotun kendi referans çerçevesinde lazer tarayıcı ve kamera
 - b. Dünyanın koordinat çerçevesinde GPS
 - c. Ataletsel koordinat çerçevesinde ivme ölçer ve jireskop

2.2.2.1 Kalman Filtresi Tabanlı SLAM

Kalman filtresi tabanlı algoritmalar robotik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. [52], [53] Kalman filtresinin temellerinin ortaya atıldığı ilk çalışmalardır. Kalman filtresi harita ve robot pozu kestiriminin birlikte gerçekleştirilmesini sağlayan bir tekniktir. Kalman filtresi Gauss dağılımı ile soncul değerlerin $p(s_t, m | z^t, u^t)$ temsil edilmesini sağlar. Robotik haritalama algoritmalarında x durum vektörü s robot pozu ve m haritasından oluşur.

$$x_t = (s_t, m)^T \quad (2.8)$$

İki boyutlu düzlemde s robot pozu üç değişkenle ifade edilir. Robot pozu s_x, s_y kartezyen düzlemindeki koordinatlar ile s_θ açısından oluşur. Kalman filtresinde haritalar, nesnelerin kartezyen düzlemindeki koordinatlarını içerir. Haritada bulundurulabilecek nesnelere örnek olarak ortamda bulunan yer işaretçileri, ayırdedici

niteliği olan nesneler ve şekiller verilebilir. Haritada K adet nesne bulundurulacağı kabul edilirse durum vektörünün boyutu $2K+3$ olacaktır.

$$x_t = (s_{x,t}, s_{y,t}, s_{\theta,t}, m_{1,x,t}, m_{1,y,t}, m_{2,x,t}, m_{2,y,t}, \dots, m_{K,x,t}, m_{K,y,t})^T \quad (2.9)$$

Yukarıdaki denklemde $m_{k,x,t}$ ve $m_{k,y,t}$ haritadaki k numaralı cismin kartezyen koordinatlarıdır. Kalman filtresinde soncul değer dağılımı gösteren Gauss μ_t ortalama ve $\sum_t$ kovaryans matrisi ile verilir. Ortalama vektörünün boyutu $2K+3$, kovaryans ise $(2K+3)^2$ 'dir.

Kalman filtresi tabanlı haritalama üç temel varsayıma dayanır [31]. Birinci varsayım, hareket modelinin Gauss gürültüsü eklenmiş doğrusal bir model olmasıdır. İkinci varsayım, algısal modelin de doğrusal olmasıdır.

Üçüncü varsayım, başlangıç belirsizliğinin Gauss tipi olmasıdır. Robot pozu s_t ve harita m_t doğrusal olarak önceki robot pozu s_{t-1} , harita m_{t-1} ve kontrol u_t 'ye bağlıdır. Haritanın zaman içinde değişmediği kabul edilir. Gerçekte robot pozu s_t doğrusal olmayan bir davranışla önceki robot pozu s_{t-1} ve kontrol u_t 'ye bağlıdır.

Doğrusal olmayan davranışları barındırabilmesi için Kalman filtresinde, robot hareket modeline Taylor serileri açılımıyla elde edilen doğrusal bir fonksiyon kullanılarak yaklaşılır. Sonuçta elde edilen filtre modeli Genişletilmiş Kalman Filtresidir.

$$p(x|u, x') = Ax' + Bu + \varepsilon_{kontrol} \quad (2.10)$$

A ve B matrisleri x' durumları ve u hareket komutundan sonraki durum değişkeni x 'in elde edilmesini sağlar. Algılamadaki gürültü $\varepsilon_{kontrol}$ değişkeni yardımıyla modellenir. $\varepsilon_{kontrol}$ 'ün sıfır ortalama ve $\sum_{kontrol}$ kovaryanslı normal dağılımlı olduğu kabul edilir.

Algılayıcı ölçümleri Gauss tipi olmayan gürültüye sahip olup doğrusal değildir. Birinci dereceden Taylor serileri açılımı ile yaklaşım gerçekleştirilir.

$$p(z|x) = Cx + \varepsilon_{ölçüm} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki denklemde C bir matristir. $\varepsilon_{ölçüm}$ 'ün sıfır ortalama ve $\sum_{ölçüm}$ kovaryanslı normal dağılımlı olduğu kabul edilir.

Kalman filtresi yukarıda bahsedilen varsayımlar altında kullanılırsa Bayes filtresi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\mu'_{t-1} = \mu_{t-1} + Bu_t \quad (2.12)$$

$$\sum'_{t-1} = \sum_{t-1} + \sum_{kontrol} \quad (2.13)$$

$$K_t = \sum'_{t-1} C^T (C \sum'_{t-1} C^T + \sum_{ölçüm})^{-1} \quad (2.14)$$

$$\mu_t = \mu'_{t-1} + K_t(o - C\mu'_{t-1}) \quad (2.15)$$

$$\sum_t = (I - K_t C) \sum'_{t-1} \quad (2.16)$$

Kalman filtresinin temel avantajı, mevcut harita üzerinden tüm sonuçların kestirimini yapmasıdır. Bunun yanında tüm belirsizliği haritada muhafaza eder. Kalman filtresinin dezavantajı, Gauss tipi gürültü varsayımıdır. Ölçüm gürültüsünün önceki ölçüm gürültüsünden bağımsız ve Gauss tipi olduğu kabul edilir.

2.2.2.2 Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı SLAM

EKF; *durum tahmini, gözlem, ölçüm tahmini, eşleştirme* ve *kestirim* olmak üzere beş adımdan oluşur (Şekil 2.5). EKF yer işaretçisi tabanlı bir harita kullanır ve yinelemeli olarak iki aşamada gerçekleşir. Tahmin aşamasında $u(k)$ kontrolü ve robot hareket modeli kullanılarak robotun konumunun kestirimi yapılır. Güncelleme aşamasında ise yer işaretçilerinin pozisyonlarını güncellemek ve robotun konum kestirimini iyileştirmek için harici bir algılayıcıdan gelen $z(k)$ gözlemi kullanılır. Eşleştirme adımında NN, JCBB, CCDA, RJC ve harita birleştiren SLAM tekniklerinde GCBP gibi farklı teknikler kullanılabilir.

EKF tabanlı SLAM algoritmasında eş zamanlı olarak bir harita oluşturmak ve bu harita üzerinden robotun konum bilgisini elde etmek mümkündür. X matrisinin robotun güncel konumu $(x,y,duruş\ açısı)$ ile yer işaretçilerinin konumlarını (x,y) sakladığı ve bu durumlara ilişkin hata kovaryanslarının P matrisinde saklandığı kabul edilir.

Güncelleme aşaması gözlem modeli ve hata kovaryansının bir fonksiyonudur. Denklemlerde R ve Q matrisleri gözlem ve modeldeki gürültüyü simgeler. Gürültü robotik uygulamalarında ve insansız araçlarla gerçekleştirilen eş zamanlı konum belirleme ve haritalama uygulamalarında kaçınılmazdır.

EKF için kullanılan ayrık zamanlı doğrusal olmayan model (2.17) de gösterilmektedir. (2.17) de F doğrusal olmayan durum geçiş fonksiyonunu gösterir. Doğrusal olmayan gözlem modeli (2.18) ile ifade edilir.

$$x(k) = F(x(k-1), u(k), k) + w(k) \quad (2.17)$$

$$z(k) = H(x(k)) + v(k) \quad (2.18)$$

Durum tahmin denklemi (2.19) ile gösterilir.

$$\hat{x}(k | k-1) = F(\hat{x}(k-1 | k-1), u(k)) \quad (2.19)$$

Tahmin edilen kovaryans matrisi (2.20) ile gösterilir. (2.20) de $\nabla F_x(k)$ durum geçiş matrisinin Jacobienini gösterir.

$$P(k | k-1) = \nabla F_x(k) P(k-1 | k-1) \nabla F_x^T(k) + Q(k) \quad (2.20)$$

Bir gözlem gerçekleştirildiğinde durum vektörü (2.21) e göre güncellenir. (2.21) de $y(k)$ yeniliği gösterir. Yenilik denklemi (2.22) de gösterilmektedir.

$$\hat{x}(k | k) = \hat{x}(k | k-1) + W(k) y(k) \quad (2.21)$$

$$y(k) = z(k) - H(\hat{x}(k | k-1)) \quad (2.22)$$

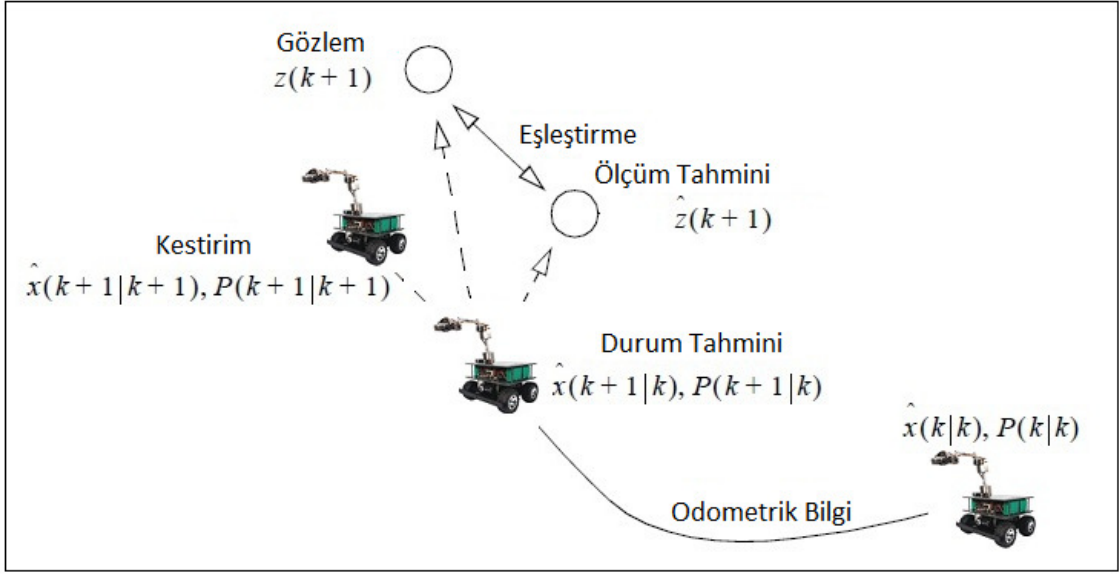
Kalman kazanç ve yenilik kovaryans matrisleri (2.23) ve (2.24) e göre hesaplanır. (2.24) te $\nabla H_x(k)$ gözlem modelinin Jacobienini gösterir.

$$W(k) = P(k | k-1) \nabla H_x^T(k) S^{-1}(k) \quad (2.23)$$

$$S(k) = \nabla H_x(k) P(k | k-1) \nabla H_x^T(k) + R(k) \quad (2.24)$$

Güncellenmiş kovaryans matrisi ise (2.25) ile ifade edilebilir.

$$P(k | k) = (I - W(k) \nabla H_x(k)) P(k | k-1) (I - W(k) \nabla H_x(k))^T + W(k) R(k) W^T(k) \quad (2.25)$$



Şekil 2. 5 EKF tabanlı SLAM algoritmasının adımları

KF tabanlı SLAM algoritmalarının iki dezavantajı bulunmaktadır. Birinci dezavantajları durum vektörüne eklenen her bir yer işaretçisi ile birlikte hesaplama karmaşıklığının artmasıdır. İkinci dezavantajları ise durum vektöründeki yer işaretçileri ile gözlemlerin eşleştirilmesi gerekliliğidir. İkinci dezavantaj kritik bir önem arz eder. Bunun nedeni yanlış veri eşleştirmelerinin filtrenin sapmasına neden olmasıdır [35]. KF tabanlı SLAM algoritmaları hesaplama karmaşıklığına neden olduğu için durum vektöründe saklanabilecek yer işaretçilerinin sayısı sınırlıdır [25] , [31].

Eğer K ortamda bulunan yer işaretçilerinin sayısını gösterirse EKF'nin her bir güncelleme adımı $O(K^2)$ mertebesinde karmaşıklığa sahiptir. EKF'nin toplam hesaplama karmaşıklığı ise $O(K^3)$ mertebesinde [28], [36]. Bu nedenle EKF'nin harici ortamlarda gerçekleştirilen uygulamalarda kullanılabilmesi için hesaplama karmaşıklığı ve bellek gereksinimini azaltan iyileştirmeler önerilmiştir [32]. CEKF [36], Seyrek Ağırlık Kalman Filtresi (SWKF) [38] ve Harita Birleştiren SLAM [37] bu iyileştirmelerden bazılarıdır. Bu yöntemler olasılıksal haritanın yerel bölgelerinde çalışarak toplam işlem yükünü azaltmayı amaçlamaktadır [28].

2.2.2.3 Sıkıştırılmış Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı SLAM

Sıkıştırılmış Genişletilmiş Kalman Filtresi (CEKF) çalışma prensipleri aynı olmasına rağmen EKF'den temel bir noktada farklılık gösterir. CEKF durum matrisini *aktif* ve *pasif* olarak iki parçaya ayırır. EKF'den farklı olarak yerel bir bölgede çalışırken sadece yerel bölgede güncelleme yapılır [36]. Tam SLAM güncellemesi yerel bölgeden çıkılırken gerçekleştirilir.

Deneyisel çalışmalar CEKF'nin EKF ile yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiğini göstermiştir. Eğer L yerel bölgede bulunan yer işaretçilerinin sayısını gösterirse CEKF'nin hesaplama karmaşıklığı $O(2L^2)$ mertebesindedir. Hesaplama yükü ve bellek gereksinimlerini önemli ölçüde azaltan CEKF özellikle harici ortam uygulamaları için ideal yöntemlerden birisi olarak kabul edilmektedir [36].

2.2.2.4 Kokusuz Kalman Filtresi Tabanlı SLAM

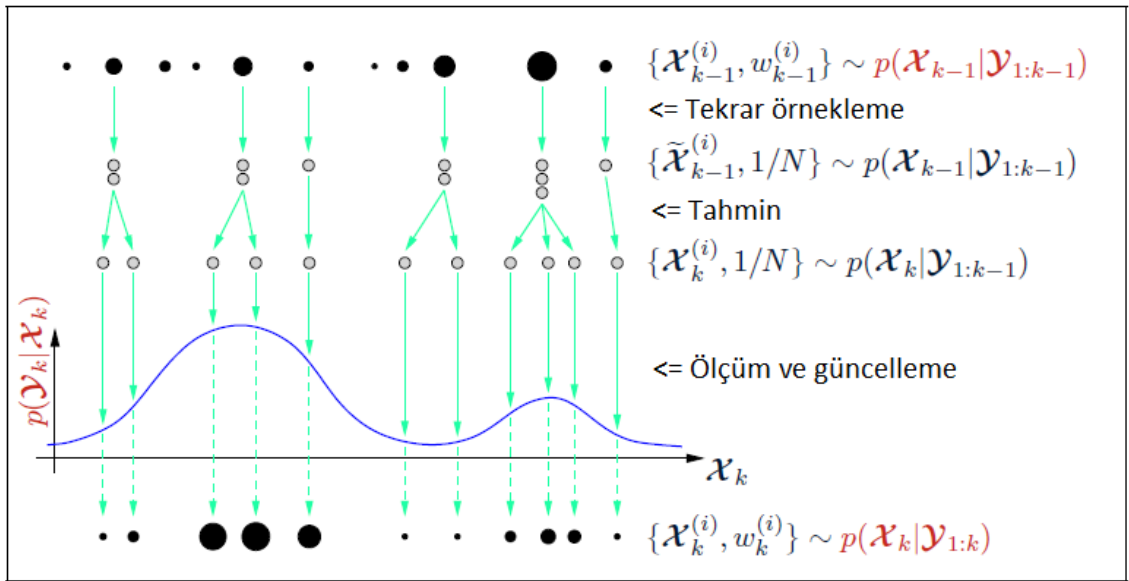
KF'nin bir diğer türevi de Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) dir. UKF kokusuz dönüşüm (UT)'e dayalıdır. UKF kestirim hatalarını azaltmakla birlikte EKF'den daha fazla hesaplama karmaşıklığı oluşturmaktadır. UKF'nin EKF ve CEKF'den farklı olan yanı Jacobian matrislerini gerektirmemesidir. Eğer K ortamdaki yer işaretçilerinin sayısını gösterirse UKF'nin hesaplama karmaşıklığı $O(K^3)$ mertebesindedir [132].

2.2.2.5 Parçacık Filtresi Tabanlı SLAM

Parçacık Filtresi (PF)'nin temel amacı Gauss tipinde olmayan ve potansiyel olarak çok doruklu PDF'e sahip olan bir değişkenin zaman içindeki değişimini izlemektir. Literatürde PF'nin çeşitli türevleri bulunmaktadır. Metodun temeli tüm PDF'in örneğe dayalı olarak temsilini oluşturmaktır [34], [133]. Bir modele göre gerçekleştirilen hareketler değişkenin durumunu değiştirir. Belirli anlarda elde edilen gözlemler ise değişkenin durumunu kısıtlar. Değişken, birçok parçacık kullanılarak temsil edilir. Her bir parçacığın kalitesini temsil eden bir ağırlık değeri vardır. Değişkenin kestirimi parçacıkların ağırlıklandırılmış toplamı ile elde edilir. PF algoritması yinelemeli olarak *tahmin* ve *güncelleme* adımlarında gerçekleşir.

- **Tahmin:** Gerçekleştirilen her hareket sonrasında her bir değişken bir modele göre değiştirilir. Gürültünün değişken üzerindeki etkisinin benzetimini yapmak için rastgele bir gürültü değeri eklenir.
- **Güncelleme:** Elde edilen son algılayıcı bilgileri ışığında her bir parçacığın ağırlığı tekrar değerlendirilir. Belirli anlarda düşük ağırlığa sahip parçacıklar tekrar örnekleme adı verilen işlemle yok edilir.

N adet durum örneği ve bunlara karşılık gelen ağırlıklar setinin $\{x_{k-1}^{(i)}, w_{k-1}^{(i)}, i = 1, \dots, N\}$ $k-1$ anındaki soncul yoğunluğu $p(x_{k-1} | y_{1:k-1})$ temsil ettiği varsayımı altında k anı için $p(x_k | y_{1:k})$ soncul yoğunluğunu temsil edecek parçacık setini güncellemek için Şekil 2.6'da gösterilen yöntem izlenir.



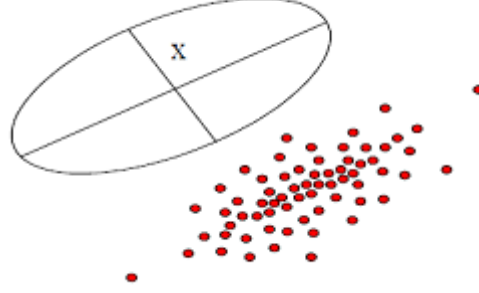
Şekil 2. 6 PF çalışma prensibi

2.2.2.6 FastSLAM

FastSLAM yaklaşımı [25], [35], [33] SLAM problemini parçacık filtrelerini kullanarak çözer. Parçacık filtreleri, olasılık dağılımını ayrık parçacıklar seti olarak gösteren matematiksel modellerdir.

Parçacık filtresinin güncellenme adımında hareket modeli ve uygulanan kontrol verildiğinde yeni bir parçacık dağılımı yaratılır. Her bir parçacık için parçacığın ölçüm tahmini ile gerçek ölçüm karşılaştırılır. Tahminleri gerçek ölçümler ile eşleşen parçacıklara yüksek ağırlık verilir. Daha sonra tekrar örnekleme adımında parçacıklar ağırlıklarına göre tekrar örneklenir.

Filtrenin örnekleme adımında her bir parçacığa ölçüm sonuçları ile parçacığın durum kestiriminin ne kadar eşleştiğine bağlı olarak bir ağırlık atanır. Daha sonra önceki olasılık dağılımından ağırlıklara bağlı olarak rastgele parçacıklar seçilerek yeni dağılım yaratılır.



Şekil 2. 7 Parçacık seti olarak olasılık dağılımı

FastSLAM yönteminde robotun sonculu Rao Blackwellized PF kullanılarak çözülür. Her bir yer işaretçisinin kestirimi 2x2 EKF ile gösterilir. Her bir parçacık diğerlerinden bağımsızdır ve M adet yer işaretçisi pozisyonunun kestirimini sürdürür. FastSLAM yöntemi robot pozundan haritayı meydana getiren özellikleri ayrıştırır.



Şekil 2. 8 Rao Blackwellized parçacık filtresi

FastSLAM yaklaşımında temel bir varsayım bulunmaktadır. Eğer robot pozu bilinirse tüm özellikler birbiri ile ilintisiz olacaktır. Bu durumda tüm özellik ölçümleri birbirinden bağımsız olarak işlenir. x_t t anındaki robot durumunu, l ortamın haritasını, $z_{1:t}$ t anına kadar olan algılayıcı ölçümlerini, $u_{0:t-1}$ ise $t-1$ anına kadar olan kontrol girişlerini gösterirse, (2.26) elde edilir.

$$p(x_{1:t}, l_{1:m} | z_{1:t}, u_{0:t-1}) = p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{0:t-1}) \cdot p(l_{1:m} | x_{1:t}, z_{1:t}) \quad (2.26)$$

Eğer (2.26) düzenlenirse (2.27) elde edilir. (2.27) bir konumlandırma problemi ile durumsal olarak bağımsız yer işaretçisi pozisyonlarından oluşur.

$$\begin{aligned} p(x_{1:t}, l_{1:m} | z_{1:t}, u_{0:t-1}) &= p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{0:t-1}) \cdot p(l_{1:m} | x_{1:t}, z_{1:t}) \\ &= p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{0:t-1}) \cdot \prod_{i=1}^M p(l_i | x_{1:t}, z_{1:t}) \end{aligned} \quad (2.27)$$

FastSLAM yönteminin KF tabanlı algoritmalarından farklı olan yanı SLAM problemini bir robot konumlandırma problemi ve yer işaretçisi kestirim problemleri olmak üzere iki parçaya ayırmasıdır. FastSLAM robotun güzergâhı üzerinden soncul değeri PF

kullanarak kestirir. Eğer K ortamdaki yer işaretçilerinin sayısını ve M kullanılan parçacık sayısını gösterirse her bir parçacık yer işaretçilerinin pozisyonlarının kestirimini yapan K adet birbirinden bağımsız KF'ne sahip olacaktır. Bu durumda FastSLAM $O(KM)$ mertebesinde bellek ve güncelleme için $O(M\log K)$ zaman gerektirmektedir. FastSLAM yöntemi 100.000 adet yer işaretçisi olan bir ortamda başarıyla kullanılmıştır [35]. FastSLAM ve geliştirilmiş versiyonu olan FastSLAM 2.0 yöntemlerinin yüksek hareket gürültüsü olan saha çalışmalarında başarıyla kullanıldığı gösterilmiştir [25].

2.2.2.7 3D SLAM

3D SLAM ortam farkındalığı anlamında 2D SLAM tekniklerine göre daha üstündür. Üç boyutlu olarak ortamda bulunan cisimler konumlandırılabilir. 3D haritalar, karmaşık engellerle çarpışmaları engellemek ve robotları altı serbestlik derecesinde (x, y, z, roll açısı, yaw açısı, pitch açısı) konumlandırmak için kullanılır. Genellikle 3D lazer tarayıcılar ve stereo kameralar ile 3D haritalama ve konumlandırma gerçekleştirilir.

2.2.2.8 Tarama Eşleştirme Yöntemi ile SLAM

Tarama eşleştirme yöntemi ile SLAM uygulamalarında robotların yer değişimleri birbirini takip eden mesafe taramaları kullanılarak gerçekleştirilir. Referans tarama ile en iyi örtüşmeyi elde etmek için pozisyon ve yön bilgisi içeren mevcut tarama düzeltilerek örtüşme sağlanır [134]. Tarama eşleştirme yöntemi genelde lazer tarayıcı ya da ses üstü mesafe ölçer kullanılarak gerçekleştirilir [135]. Literatürde hem 2D hem de 3D tarama eşleştirme yöntemleri bulunmaktadır.

Tarama eşleştirme yaklaşımları yerel ya da genel olabilir. Bunun yanında tarama eşleştirme yaklaşımları kullandıkları veri eşleştirme yöntemlerine göre *özellik-özellik*, *nokta-özellik* ya da *nokta-nokta* olarak sınıflandırılabilir. Özellik-özellik tarama eşleştirme yaklaşımlarında çizgi bölümleri, köşeler veya aralıklar lazer taramalarından çıkartılır ve eşleştirilir. Bu yaklaşımlar ortamda seçili olan bazı özelliklerin bulunmasını gerektirir ve elde edilen taramaları yorumlar. Nokta-özellik yaklaşımlarında tarama noktaları çizgi gibi özellikler ile eşleştirilir. Nokta-nokta yaklaşımlarında ortamın yapısal olması ve ortamda daha önceden tanımlanmış özelliklerin bulunması gerekmez. Nokta-

nokta eşleştirme yaklaşımlarına örnek olarak yinelemeli en yakın nokta (ICP), yinelemeli eşleşen aralık noktası (IMRP) ve yinelemeli ikili uygunluk (IDC) verilebilir.

Nokta-nokta eşleştirme yöntemine dayalı yaklaşımlarda doğru eşleştirmeler seçimleri sağlandığında mevcut taramadaki doğru poz bulunabilir. Doğru eşleştirmeler bilinmediği için birçok yineleme gerçekleştirilir. Eşleştirme her zaman doğru poza varmayabilir ve yerel minimumda saplanabilir. Uygulanan eşleştirme kurallarından dolayı eşleşen noktalar her iki taramada aranır. Dolayısıyla n adet tarama noktası durumunda $O(n^2)$ karmaşıklık oluşur. Her üç eşleştirme yöntemi Kartezyen koordinat çerçevesinde çalışır ve bu nedenle taramanın kendi kutupsal koordinat çerçevesinin avantajını kullanmaz.

Tarama eşleştirme algoritmalarında en yaygın kullanılan teknik ICP'dir. ICP yinelemeli çalışan bir algoritma olup bir nokta yığını ile bir referans yüzey arasındaki dönüşümü bulmayı amaçlar [156]. Bunu gerçekleştirirken eşleşen varlıklar arasındaki hataların karesini en aza indirmeyi esas alır. ICP iki adımdan oluşur. ICP'nin birinci adımı referans tarama ile elde edilen tarama noktaları arasındaki eşleşmeleri en yakın komşu algoritması kullanarak bulmayı içerir. ICP'nin ikinci adımı iki tarama arasındaki dönüşümü ve çevirimi bulmaktır. Bunu yaparken ortalama karesel hatayı (MSE) azaltır.

2.2.2.9 Literatürdeki Diğer Yöntemler

SLAM algoritmaları üzerinde uzun yıllardır çalışılmakta olan konulardır. DP-SLAM [137], biyolojik modellerden ilham alan RatSLAM [138], Graf tabanlı SLAM [139] gibi PF ve KF dışındaki teknikleri esas alan farklı SLAM yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler dışında GridSLAM [140] ve Gmapping [141] gibi Rao Blackwellized parçacık filtrelerini ya da bu filtrelerin geliştirilmiş sürümlerini kullanan SLAM yöntemleri de vardır. Lazer tarayıcı ve ses üstü mesafe ölçer gibi mesafe bilgisine dayalı algılayıcılar dışında görüntü tabanlı SLAM teknikleri de geliştirilmiştir. Bu tekniklere örnek olarak [148] ve [149] verilebilir.

Çoklu robot uygulamalarında yaygın olarak kullanılan küçük yerel haritalardan büyük bir genel haritanın elde edilmesini sağlayan ATLAS [142], SLSJF [143], CLSF [144], LMJ [37], CTS [146] ve Hiyerarşik SLAM [147] gibi yöntemler geliştirilmiştir.

2.2.3 Çoklu Robot Sistemleri ile SLAM

SLAM gezgin robot uygulamalarındaki en önemli konulardan birisidir. SLAM sürecinin bir parçası olan haritalama, algılayıcılardan gelen ölçümlerin ortamı tutarlı olarak tanımlayan bir haritaya uyarlanması problemi olarak tanımlanabilir. SLAM sürecinin diğer bir parçası olan *konumlandırma* ise bir robotun ortamdaki pozisyonunun belirlenmesi problemi olarak tanımlanabilir. Genellikle bu iki problem birlikte ele alınır ve çözülür. Haritalama sürecinde kullanılacak gözlemlerin bu işlem sırasında kullanılan robot tarafından nerede yapıldığı bilinmelidir. Etraftaki cisimleri gösteren bir harita olmaksızın robotun konumunun belirlenmesi zordur. Bu nedenle bu iki problemi aynı anda ele alan birçok SLAM algoritması geliştirilmiştir.

Çoklu robot sistemleri ile gerçekleştirilen SLAM uygulamalarında birden fazla robot tek bir harita oluşturmak için birlikte çalışır. Bu yaklaşımın en temel avantajı bir görevin daha küçük görevlere bölünmesi ve birden fazla robottan gelen algılayıcı ölçümlerinin kullanılmasıyla daha tutarlı sonuçların daha hızlı olarak elde edilmesidir [21], [22]. Ancak bunun gerçekleştirilmesi için birçok unsur ele alınmalıdır:

- **Algılayıcı ölçümlerinin bir araya getirilmesi:** Bütün robotlardan gelen algılayıcı ölçümlerinin tek bir haritaya entegre edilmesi için etkin bir çözüm bulunmalıdır. Buna ilave olarak genel haritayı oluşturmak için gerekli olan iletişimin minimumda tutulması tercih edilmektedir.
- **Robotların göreceli konumlarının belirlenmesi:** Eğer bir robotun başlangıç konumlarını bilmediği diğer robotlardan gelen algılayıcı ölçümlerini kullanması gerekiyorsa bu robotların göreceli konumlarını belirlemesi gereklidir.
- **İş bölümü:** Etkin keşif işlemi için stratejiler belirlenerek tekrarlı gözlemlerin sayısı azaltılmalıdır.
- **Hareket eden nesneler:** Aynı ortamda bulunan robotlar birbirlerinin ölçüm değerlerini etkileyebilir. Bu nedenle yakın konumlarda farklı robotların gözlem yapmasını engelleyecek stratejiler geliştirilmelidir.

- **Farklı türden robotlar:** SLAM süreçlerinde farklı algılayıcılara sahip farklı türlerden robotların kullanılması durumunda farklı tiplerdeki algılayıcı verilerinin bir araya getirilmesi ilave zorluklar oluşturur.

2.2.3.1 Çoklu Robot Sistemlerinin SLAM Uygulamalarındaki Avantajları

Çoklu robot sistemlerinin SLAM uygulamalarında kullanılması tek bir robotla gerçekleştirilen SLAM uygulamalarına göre daha fazla etkinlik, doğruluk ve güvenilirlik sağlar. Ancak birçok çoklu robot SLAM algoritması, ortam büyüklüğü ve robot sayısını göz önüne alan ölçeklenebilirlik unsurunu göz ardı etmekte ve haritaların bir araya getirilmesine odaklanmaktadır. Eğer bir SLAM problemi daha küçük problemlere bölünebilirse işlem yükü ve bellek kullanımı anlamında da daha başarılı sonuçlar elde edilebilir.

2.2.4 Dinamik Ortamlarda SLAM

Robotik haritalama için geliştirilmiş algoritmaların çoğunda statik bir ortam varsayımı bulunur. Dolayısıyla bu tür algoritmalar gerçek hayattaki dinamik ortamlarda başarılı olamaz. Bazı haritalama algoritmaları yapılacak düzenlemelerle dinamik ortamlarda kısmen başarılı olabilir. Örneğin yer işaretçilerinin yavaş yavaş hareket ettiği ortamlarda, yer işaretçisinin konumuna Gauss tip hareket değişkeni eklenerek Kalman filtresi bu tür ortamlarda kullanılabilir [31]. Yavaş hareketlerin gerçekleştiği dinamik ortamlarda, doluluk ızgaraları tabanlı haritalar da kullanılabilir. Ancak dinamik ortamlarda haritalama henüz tam anlamıyla çözülmüş bir konu olmayıp literatürdeki araştırılmaya açık konulardan birisidir.

ÇOKLU ALGILAYICI FÜZYONU

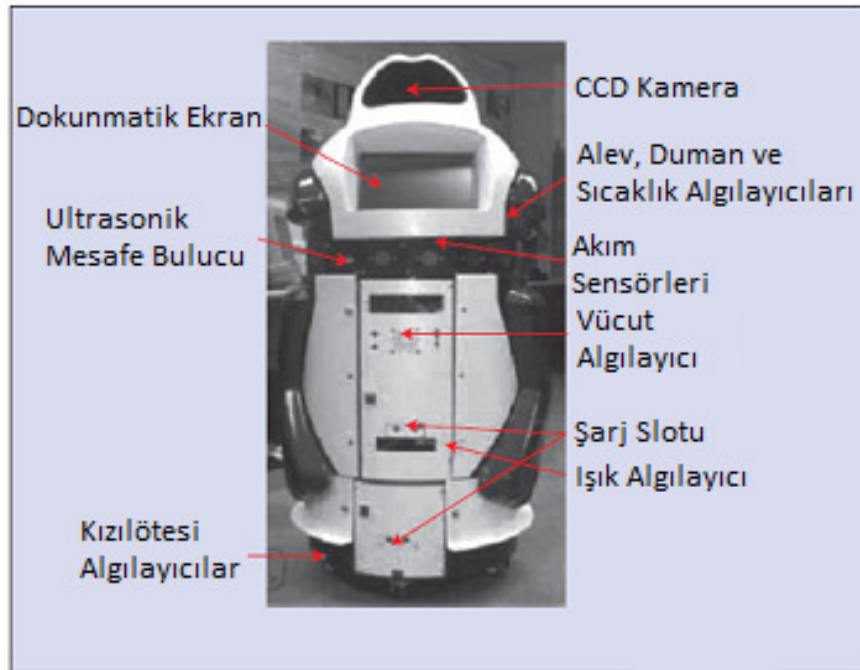
Dinamik olarak değişen bir çevre ve öngörülemeyen olaylar nedeniyle, akıllı sistemlerde bir operatör kontrolü olmadan çevre ile etkileşim için bir veya daha fazla algılayıcı bulunur [8]. Algılayıcılar bir sistemin bulunduğu ortam hakkında gerektiğinde bilgi sahibi olmayı sağlayarak sistemin kullandığı dış dünya modelini, gelen bilgilere göre güncellemeyi ve sistemin değişikliklere adapte olmasını sağlar [9]. Tek bir algılayıcı kullanımına göre sayısız avantajı beraberinde getiren çoklu algılayıcı füzyonunun birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Çoklu algılayıcı füzyonu, çoklu algılayıcılardan gelen bilgilerin birleştirilmesiyle daha güvenilir ve daha doğru bilginin elde edilmesidir [7].

Çoklu algılayıcı füzyonu algılayıcıların hassasiyetleri ve hatalarından kaynaklanan belirsizliğin azaltılmasını sağlar. Örneğin lazer tarayıcılar cam, parlak metal ve siyah kauçuk yüzeylerde yanlış sonuçlar verirken, ses üstü mesafe ölçerler sıcaklık değişimi olan ortamlarda yanlış sonuçlar vermektedir. Robotik eş zamanlı konum belirleme ve haritalama uygulamalarında küçük bir ölçüm hatası bile yanlış konumlamaya ve açısal sapmaya neden olabilmektedir. Ölçüm hatasındaki mesafe yanlışlığından daha büyük bir problem, ölçüm hatasından kaynaklanan açısal sapmadır. Haritalama uygulamalarında robotlar, üzerlerinde bulunan algılayıcılardan dönen mesafe ve açı sonuçlarını kullanarak haritalamayı gerçekleştirir. Bu, özellikle açısal sapma haritanın bozulmasına ve yanlış konumlanmaya neden olacaktır.

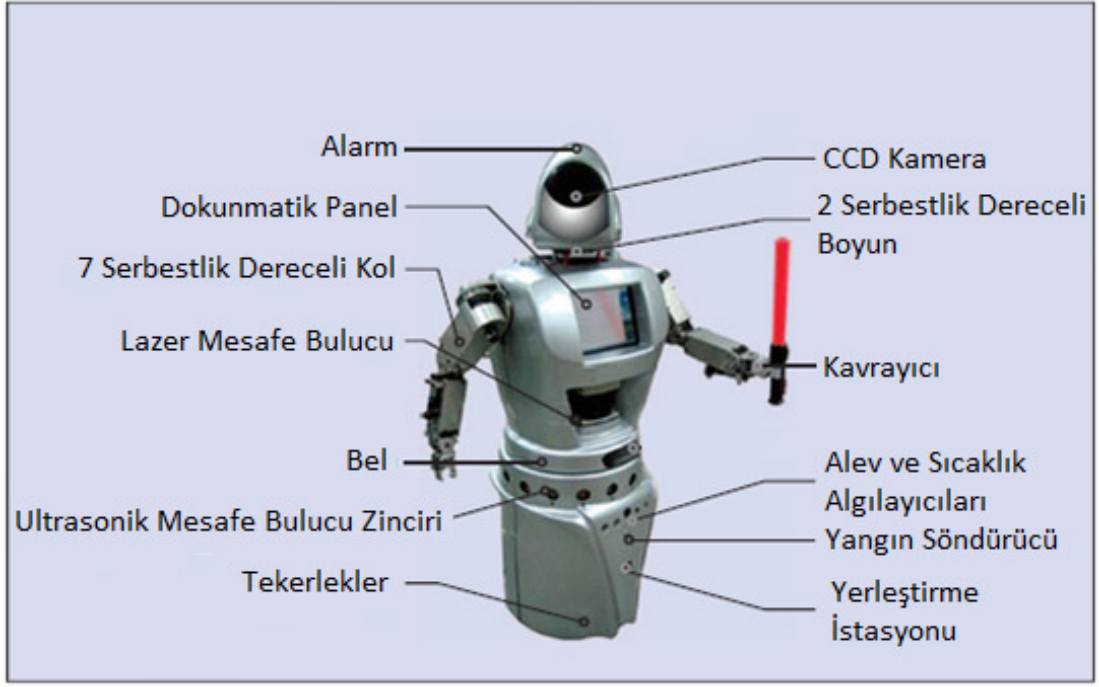
Çoklu algılayıcı füzyonunun kullanılabileceği askeri uygulamalara örnek olarak uzaktan algılama, otomatik hedef tespiti, insansız araçların yönlendirilmesi, otomatik tehdit algılama sistemleri verilebilir [9]. Robotik, tıbbi uygulamalar, makinelerin durum temelli

olarak bakımı ve mevcut üretim süreçlerinin izlenmesi ise çoklu algılayıcı füzyonunun askeri olmayan kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir [10].

Son yıllarda, çoklu algılayıcı füzyonu özellikle robotik alanında çalışan araştırmacıların ilgisini çekmiştir. “Chung-Cheng” (Şekil 3.1) ve “Security Warrior” (Şekil 3.2) adlı robotlar Tayvan’da National Chung Cheng Üniversitesi’nde geliştirilmiş olan güvenlik amaçlı gezgin robotlardır. Her iki robot da testler sırasında insanların bulunduğu dinamik ortamlarda hizmet sunmuştur [10]. Her iki robotta çoklu algılayıcı füzyonu yöntemleri uygulanmıştır. Her iki robotun üzerinde mesafe algılama ve nesne şekli çıkarımı için kullanılmak üzere bir adet lazer mesafe bulucu, bir adet sonar mesafe algılayıcı zinciri, bir adet kızılötesi mesafe bulucu ve bir adet CCD kamera bulunmaktadır. Robotlarda bu algılayıcılar dışında alev algılayıcı, sıcaklık algılayıcı ve duman algılayıcı da bulunmaktadır. Robotlar yangın söndürebilme yeteneğine de sahip olan kollu robotlardır.



Şekil 3. 1 Chung Cheng [10]



Şekil 3. 2 Security Warrior [10]

Bu robotlarda kullanılan çoklu algılayıcı füzyonu tekniği olarak Luo ve Kay tarafından geliştirilen Luo-Kay Çoklu Algılayıcı Füzyonu Kategorizasyonu kullanılmaktadır. Önerilen bu kategorizasyon tekniğinde çoklu algılayıcı füzyonu süreci düşük seviye, orta seviye ve yüksek seviye olmak üzere üç seviyeden oluşmaktadır. Bu seviyelerin görevleri aşağıda sıralanmıştır [10]:

- Düşük seviyede gelen sinyaller tahmin edilmektedir.
- Orta seviyede çıkarımı yapılan özellikler sınıflandırılmaktadır.
- Yüksek seviyede sembol ve alt kararlara göre bir karar verilmektedir.

Robotların gelecekte kullanılabileceği alanlardan birisinin de hizmet sektörü olacağı düşünülmektedir. Rutin ve sıkıcı görevlerde robotların kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu konuda çalışmalar yapılmaktadır. “Catering Service Robot” restoranlarda kullanılması düşünülen ve garson görevi üstlenecek robottur [150]. Bu robotta çoklu algılayıcı füzyonu yanında insan robot etkileşimini kolaylaştıracak teknikler de kullanılmaktadır.

Son yıllarda çoklu algılayıcı füzyonu, robotik SLAM algoritmalarında da başarılı olarak kullanılmıştır. İsviçre’de “Computer 2000” ticaret fuarı sırasında “Pygmalion” adlı gezgin robot her gün yüzlerce ziyaretçiye hizmet sunmuştur [4], [5]. Web arayüzünü kullanarak ziyaretçiler robotu kontrol edebilmişlerdir. SLAM sırasında çoklu algılayıcı füzyonu tekniği kullanan robot, fuar alanında 5 km civarında dolaşmıştır [4]. Sadece birkaç önemsiz çarpışma yaşayan robot, çoklu algılayıcı füzyonunun önemini ortaya koymuştur. Robotu geliştiren araştırmacılar, tek lazer mesafe bulucu ile CCD kamera ve lazer mesafe bulucu kullanılan konumlandırma yöntemlerini karşılaştırmışlar ve çoklu algılayıcı füzyonu tekniğinin robotik haritalama uygulamalarında genellikle belirsizliği azalttığını kanıtlamışlardır. Çoklu algılayıcı füzyonu, çoklu robot gruplarında da başarı ile uygulanmış olup bu örneklerden birisi “Robox” adlı gezgin robottur [4]. Robox 2002 İsviçre Ulusal Fuarı sırasında ziyaretçilere hizmet etmesi için geliştirilmiştir. Fuar sırasında Robox robotlar; kablosuz ağ üzerinden birbirleri ile haberleşmiş ve ışıkları söndürme, fotoğraf çekme ve diğer robotları kontrol etme gibi bazı eylemler gerçekleştirmişlerdir [4].

Çoklu algılayıcı füzyonu tekniği, farklı SLAM uygulamalarında farklı başarı oranları vermektedir. Bu konuda yapılan bir çalışmada “Mesa “ adlı servis robotu üzerinde EKF ve Graph-SLAM tekniklerinde çoklu algılayıcı füzyonu tekniğinin kullanılması sonucu elde edilen başarı oranları, karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir [65].

3.1 Çoklu Algılayıcı Füzyonunun Avantajları

Çoklu algılayıcı füzyonu birçok avantaj getirmektedir. Farklı algılayıcılardan elde edilen bilgilerin birleştirilmesi, sistemdeki genel belirsizliğin azaltılmasını ve sistemin doğruluğunun arttırılmasını sağlar. Algılayıcı arızası durumlarında, çoklu algılayıcı füzyonu sistemin güvenilirliğini korur. Bunun yanında tek bir algılayıcı ile algılanamayacak olan ortamdaki bazı nesnelerin algılanmasını sağlar. Çoklu algılayıcı füzyonunun bir diğer avantajı da paralel işlem teknikleri kullanılması durumunda, algılama hızının artırılmasıdır. Çoklu algılayıcı füzyonunun bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan en önemlisi uygulama sırasında karmaşık tasarım işlemleri gerektirmesidir. Bir diğer önemli dezavantajı kısmi tutarsızlıklar yaratmasıdır.

Getirdiği ek maliyet yükü, ilave işlem ve bellek yükü gereksinimleri yöntemin diğer dezavantajlarıdır.

3.2 Olasılıksal Veri Füzyonu

Literatürde çoklu algılayıcı füzyonu için geliştirilmiş farklı teknikler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın kullanılanları giriş-çıkış çifti tabanlı mimari [61], the Joint Directors of Laboratories (JDL) veri füzyon modeli [62] ve Luo–Kay çoklu algılayıcı füzyonu kategorizasyonu [11]'dur.

Giriş-Çıkış çifti tabanlı mimari: Bu mimaride sınıflandırma; veri, özellik ve karar olarak isimlendirilen geleneksel üç seviyeli hiyerarşiyi temel alır. Füzyon kategorisi veri giriş-veri çıkış, veri giriş-özellik çıkış, özellik giriş-özellik çıkış, özellik giriş-karar çıkış ve karar giriş-karar çıkış olmak üzere beş sınıfta tanımlanır. Füzyon kategorisinin sınıfı veri giriş-çıkış bilgi tiplerinden tespit edilir.

JDL veri füzyon modeli: JDL veri füzyon modeli [63] askeri uygulamalar için geliştirilmiş bir modeldir. Ortak bir terminoloji eksikliğinden kaynaklanan problemleri gidermek için geliştirilmeye başlanmış bir model olan JDL modeli, veri füzyonu sürecini dört seviyede gerçekleştirmektedir [62].

Luo-Kay çoklu algılayıcı füzyonu kategorizasyonu: Luo ve Kay [11] de çoklu algılayıcı entegrasyonu ve füzyonu için açık bir model ortaya koymuştur. Bu modelde füzyon işlemi alt düzeyde sinyal ve piksel seviyesinde, orta düzeyde özellik seviyesinde ve üst düzeyde sembol seviyesi olmak üzere farklı seviyelerde gerçekleştirilebilir. Kategorizasyon işlemi işlenen verinin tipine ve sistem tarafından sağlanan sonuç bilgisine göre yapılır. Önerilen mimari düşük seviyede gelen sinyallerin kestirimi, orta düzeyde çıkarımı yapılan özelliklerin sınıflandırması ve yüksek seviyede semboller ve alt kararlara göre karar verilmesinden oluşur.

- **Sinyal ve Piksel Seviyesi Füzyonu (Düşük Seviye):** Sinyal seviyesindeki algılayıcı verileri bir sistemin durum veya çıkışını simgeler. Farklı algılayıcı tiplerinin örnekleme oranı gibi özelliklerinden dolayı, farklı algılayıcılardan gelen verilerin füzyon sürecinden önce senkronizasyonu ve adaptasyonu gereklidir. En küçük kareler, ağırlıklı ortalama ve Kalman filtresi sinyal seviyesi, algılayıcı füzyonu için

kullanılan kestirim metotlarından bazılarıdır. Piksel seviyesi füzyonu farklı algılayıcılardan gelen orijinal piksel bilgilerinin birleştirilmesiyle daha kaliteli ve daha fazla özellikli birleşik bir görüntü oluşturma süreci olup uzaktan algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Piksel seviyesi füzyonda yayın olarak kullanılan teknikler şunlardır: dalgacık dönüşümü füzyon tekniği, temel bileşen analizi (PCA) tekniği ve bu iki yöntemin birlikte kullanımıdır.

- **Özellik Seviyesi Füzyonu (Orta Seviye):** Özellik seviyesinde füzyon edilen veri, sinyal ve görüntülerden çıkarımı yapılan özelliklerdir. Genellikle özellik seviyesi füzyon 3 aşamada gerçekleştirilir. Bu aşamalar şunlardır:

1. Özellik seti uyumluluğu ve normalizasyon
2. Özellik azaltımı ve birleştirme
3. Özellik eşleştirme

Özellik füzyonu uygulamak için birçok yöntem bulunmaktadır. Destek vektör makineleri (SVMs), küme analizi, k-ortalamlar kümesi, Kohonen özellik haritası ve öğrenme vektör nicemlemesi (LVQ) bu yöntemlerden bazılarıdır.

- **Sembol Seviyesi Füzyonu (Yüksek Seviye):** Bu seviyede füzyon edilen bilgi, süreç parametrelerinin sembolik gösterimidir. Genellikle yüksek seviye füzyonda ortak bir karara varabilmek için farklı algılayıcılardan gelen yerel kararların işlenmesi amaçlanmaktadır. Uzman sistemler, adaptif sinir ağları ve bulanık mantık bu aşamada kullanılan tekniklerden bazılarıdır.

Çoklu algılayıcılar bulunan sistemlerde en uygun kararların verilebilmesi için uygun veri füzyonu yöntemleri kullanılmalıdır [11]. Çoklu algılayıcı füzyonunda uygulanan algoritmaların temelinde olasılık teorileri, veri sınıflandırma metotları ve yapay zeka uygulamaları yatmaktadır. Füzyon algoritmaları; tahmin, sınıflandırma, çıkarım ve yapay zeka metotları olarak kategorilere ayrılabilir [11].

Tahmin metotları: Tahmin metotları yinelemeli ve yinelemesiz olarak ikiye ayrılır. Yinelemeli algoritmalarından en yaygın kullanılanı Kalman filtresidir. Kalman filtresi doğrusal bir modelle ifade edilebilen ve algılayıcı hatasının beyaz Gauss gürültüsü olarak modellenbildiği sistemler için istatistiki anlamda en uygun tahmini veren bir

filtredir. Yinelemesiz metotlardan bazıları ağırlıklı ortalama, en küçük kareler ve kovaryans tabanlı tahmin metotlarıdır.

Sınıflandırma metotları: Çoklu algılayıcı füzyonunda sınıflandırma birden fazla kaynaktan gelen verilerin sınıflandırılmış veri setlerine gruplandırılması sürecidir. Veri sınıflandırma için farklı birçok uygulama alanında da yaygın olarak kullanılan SVM kullanılabilir. SVM'in temel fikri hiperdüzlem adı verilen en iyilenmiş ayırt ediciler yaratarak eğitim verisini iki sınıfa ayırmaktır. SVM'deki en uygun hiperdüzlem, iki veri sınıfı arasında minimum hatalar ve maksimum marjine sahip olan sınıflandırma anlamına gelir.

Çıkarım metotları: Bayes çıkarımı ve Dempster-Shafer (D-S) yöntemi yaygın çıkarım algoritmalarından ikisidir. Bayes filtreleri yineleyen kestirim-güncelleme süreçleriyle olasılıksal tahmin metotları sağlarlar. Bayes filtrelerinin temelinde Markov varsayımları vardır. Bu varsayımlara göre mevcut durum, sadece önceki duruma ve algılayıcı ölçümleri sistemin mevcut fiziksel durumuna bağlıdır. Bayes kestirim yaklaşımında sistem durumunun olasılığı algılayıcı verileri setine dayalı soncul PDF olarak gösterilir. Bayes, yinelemeli durum tahmini için olasılıksal bir çerçeve sağlamasına rağmen soncul olasılık yoğunluk fonksiyonu analitik yöntemlerle belirlenemez. Bu nedenle Bayes filtresini uygulayan ancak olasılık dağılımını farklı şekilde gösteren algoritmalar ortaya atılmıştır. Bu algoritmalara örnek olarak Kalman Filtresi, Genişletilmiş Kalman Filtresi, Parçacık Filtreleri verilebilir.

Yapay Zeka Metotları: Yapay Sinir Ağları (ANNs) ve Bulanık Mantık teknikleri yüksek seviyeli füzyon işlemlerinde kullanılan tekniklerdir.

3.3 Çoklu Algılayıcı ile Kestirim

Kestirim algılayıcı veri füzyonundaki en önemli problemdir. Temel olarak kestirimci bir karar kuralı olup, bir gözlem dizisini giriş verisi olarak alır ve bir değişkenin durumu ya da bir parametre için değer hesaplar. Bütün veri füzyonun problemlerinde bir karar verme süreci bulunur. Bir grup algılayıcıdan belirli sayıda gözlem elde edilir ve bu gözlemlerden çıkarılan bilgi kullanılarak gerçek durumunun bir kestirimi yapılır.

Kestirim veri füzyonu probleminin tüm önemli aşamalarını içerir. Sağlanan bilginin ne olduğunun anlaşılabilmesi için algılayıcı modelleri gereklidir. Kestirimi yapılacak parametre ve durumlar ile gözlemleri ilişkilendirebilmek için ortam modelleri gereklidir. Ayrıca kestirimcinin performansının değerlendirebilmek için bir bilgi değeri kavramı gereklidir. Başarılı bir veri füzyon sisteminin anahtarı ise kestirim probleminin doğru olarak tanımlanması ve çözümlenmesidir.

Veri füzyonu genelde dört seviyede değerlendirilir. 1. ve 2. Seviyelerde, birden fazla kaynaktan gelen bilgilerin izlenmesi, tanımlanması, tahmini ve bu bilgilerin füzyonu gerçekleştirilir. 1. ve 2. Seviye nümerik bilgi ve nümerik füzyon yöntemlerinin kullanıldığı katmanlardır. 3. ve 4. Seviyelerde, bilginin elde edilmesi veya karara ait bilginin çıkarımı gerçekleştirilir. Bu seviyelerde alt seviye füzyon süreçlerinden üst seviye bilginin elde edilmesi gerçekleştirilir. Dolayısıyla karar verme aşamasında insanların yargıları ve karar/hareket formülasyonları da hesaba katılır. Dört seviyeli olarak düşünülen bu hiyerarşik yapı bazı uygulama alanları için uygun olmakla birlikte robotik SLAM uygulamalarında genelde kullanılmamaktadır. SLAM uygulamalarında genelde 1. ve 2. seviyeler kullanılır. Bunun nedeni bu seviyelerin kullanımıyla farklı algılayıcılardan ve kaynaklardan gelen bilginin füzyonu ile bir ortamda bulunan nesnelerin tanımlanması ve konumlarının tahmininin hedeflenmesidir. Bu seviyelerde algılayıcıdan gelen verilerin direkt olarak füzyonu gerçekleştirilebildiği gibi farklı noktalarda gerçekleştirilen füzyon işlemlerinden elde edilen tahminlerin dolaylı füzyonu da gerçekleştirilebilir. 1. ve 2. Seviyelerdeki füzyon yöntemleri genelde olasılıksal yöntemlerdir.

3.4 Dağıtık Veri Füzyonu Sistemleri

Dağıtık veri füzyonu sistemleri farklı yöntemler kullanabilir. En temel yöntemde, algılayıcılar elde edilen bilginin birleştirilmesini sağlayan merkezi işlem birimi ile direkt olarak iletişim kurarlar. Bu yöntemde bilgi yerel olarak işlenmez ya da çok az işlenir. Birçok kaynaktan elde edilen bilginin avantajıyla bilginin işlenmesi ve çıkarımında tam bir merkezi kontrol sağlanır.

Yerel işlem arttıkça füzyon merkezindeki işlem ve iletişim yükü azalır. Buna bağlı olarak, düşük seviye algılayıcı bilgisi üstündeki doğrudan kontrol olanağı azalır. Yerel

algılayıcıların hesaplama ve işlem kabiliyetlerinin artırılması, füzyon mimarisinin daha hiyerarşik yapıda çalışabilmesini sağlar. Böylece füzyon sürecinde genellikle katı ve esnek olmasa bile bir düzen sağlanabilir. Tam dağıtık füzyon mimarilerinde ise merkezi bir işlemci ve iletişim sistemi bulunmaz. Bu mimarilerde düğümler tam otonom olarak çalışırlar.

3.5 Karar Verme Süreçleri

Düşük seviye veri füzyonu, bilginin modellenmesi ve birleştirilmesindeki detaylarla ilgilidir. Bu bilgi elde edildikten sonra bir durum kestirimi yapmak, bir kontrol eylemi gerçekleştirmek ya da bilgi elde etmek için bir karar vermek gereklidir. Daha üst seviye karar problemleri ise detaylı karar verme süreçlerini içerir.

Karar modeli, bir fonksiyon olup sistemde anlık olarak mevcut olan tüm bilgiyi giriş verisi olarak alır. Karar modeli gerekli olan kararın alınması için gerekli olan eylemi üretir. Karar modellerinin merkezinde zarar veya fayda kararının verilmesi yatar. Zarar ve yarar fonksiyonları alternatif karar kurallarının direkt olarak karşılaştırılması yoluyla farklı eylemlerin değerlendirilmesini sağlar. Bir zarar fonksiyonu sağlandığında karar verme sürecinin modellenmesi ve farklı veri füzyon stratejilerinin değerlendirilmesi mümkündür.

3.6 Çoklu Algılayıcı Kalman Filtresi

Merkezi olarak yürütülen çoklu algılayıcı füzyonu uygulamalarında farklı algılayıcılara ait gözlemler ham formatta aynı merkezi işlem birimine gönderilir ve tek bir algılayıcı bulunan sistemlerde olduğu gibi tek bir algoritma tarafından işlenir. Merkezi uygulamalarda farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler:

- Birden fazla algılayıcı büyük ve karmaşık bir gözlem modeli kullanılarak tek bir algılayıcı gibi düşünülebilir.
- Farklı algılayıcılardan özel gözlem modelleri ile elde edilen her bir gözlem kestirim aşamasına sıralı olarak entegre edilebilir. Bu yöntemde farklı algılayıcıların her birinden elde edilen gözlemler için yeni bir tahmin ve kazanç matrisinin hesaplanması gerekmektedir. Bu yöntem oldukça yüksek hesaplama gerektirir.

- Aynı zamanda gerçekleştirilen çoklu gözlemler ortak bir durum kestirimine entegre edilebilir.

Dağıtık olarak yürütülen çoklu algılayıcı füzyonu uygulamalarında, yerel algılayıcı filtreleri durum kestirimlerini yapar ve ardından bu kestirimler işlenmiş halde merkezi bir füzyon sistemine gönderilir. Dağıtık sistemlerin birçok avantajı olmasına rağmen bu sistemlerde kullanılan algoritmalar oldukça karmaşıktır.

3.6.1 Kalman Filtresi ve Genişletilmiş Kalman Filtresi

Tez kapsamında geliştirilen uygulamalarda Kalman Filtresi tercih edilmiştir. Kalman Filtresi, yinelemeli doğrusal bir kestirimci olup zamanla değişen sürekli değerli bir durum için periyodik gözlemleri kullanarak ardışık kestirim yapmayı sağlar. Kalman Filtresi $x(t)$ parametresinin zamanla değişiminin nasıl olduğunu ve $z(t)$ gözlemlerinin $x(t)$ parametresine nasıl ilişkilendirileceğini açık olarak ifade eden bir istatistik modeli kullanır. Kalman Filtresinde kullanılan kazanç ve kabul edilen bazı varsayımlar $\hat{x}(t)$ sonuç kestiriminin ortalama karesel hatayı minimize etmesini sağlar.

Kalman Filtresinin çoklu algılayıcıya dayalı kestirim ve füzyon işlemlerinde tercih edilmesinin somut nedenleri bulunmaktadır. Öncelikle süreç ve gözlemlerin açıkça tanımlanmış olması farklı algılayıcı modellerinin tek bir algoritmaya entegrasyonunu sağlamaktadır. Bunun yanında belirsizliğin istatistiki olarak ölçülmesi, genel sistem performansı üzerinde farklı algılayıcıların niceliksel olarak rolünün değerlendirilmesini sağlamaktadır. Kalman Filtresi doğrusal yineleyen yapısıyla kolay ve etkin çözümler sağlamakta ve farklı füzyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Durum ve Algılayıcı Modelleri: Kalman filtresi algoritmasında kestirimi yapılacak durumlar durum uzay formu ile ifade edilir.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + B(t)u(t) + G(t)v(t) \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de $x(t)$ durum vektörünü, $u(t)$ kontrol girişini, $v(t)$ ise durum değişimindeki belirsizliği tanımlayan rastgele bir değişkendir. $F(t)$ nxn boyutlarındaki

durum matrisi, $B(t)$ nxs boyutlarındaki giriş matrisi, $G(t)$ ise nxq boyutlarındaki gürültü matrisidir.

Gözlem modeli de durum uzay formunda ifade edilir.

$$z(t) = H(t)x(t) + D(t)w(t) \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de $z(t)$ gözlem vektörünü, $w(t)$ ise gözlemdeki belirsizliği tanımlayan rastgele bir değişkendir. $H(t)$ mxn boyutlarındaki gözlem matrisi, $D(t)$ ise mxr boyutlarındaki gözlem gürültü matrisidir.

Bu denklemler sürekli bir sistemin durum için yapılan sürekli gözlemlerle değişimini tanımlar. Ancak Kalman Filtresi genelde ayrık zamanlı olarak uygulanır. Yukarıdaki durum uzay formundaki denklemlerin ayrık zamanda ifade edilebilmesi için öncelikle bir t ayrık zaman seti tanımlanır.

$$t = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_k, \dots\}$$

Daha sonra sürekli zamandaki denklemler ayrık zamanda yazılır.

$$z(t_k) = H(t_k)x(t_k) + D(t_k)w(t_k), \quad \forall t_k \in t \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te $z(t_k)$, $x(t_k)$ ve $w(t_k)$ ayrık zamandaki gözlem, durum ve gürültü vektörleridir. $H(t_k)$ ve $D(t_k)$ ise t_k anındaki gözlem ve gürültü modelleridir. Durum denkleminin ayrık zamandaki formunu elde edebilmek için (t_k, t_{k-1}) zaman aralığı entegre edilir.

$$x(t_k) = \Phi(t_k, t_{k-1})x(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k, \tau)B(\tau)u(\tau)d\tau + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k, \tau)G(\tau)v(\tau)d\tau \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te $\Phi(.,.)$ durum geçiş matrisi olup aşağıdaki eşitlikleri sağlar.

$$\dot{\Phi}(t_k, t_{k-1}) = F(t_k)\Phi(t_k, t_{k-1}), \quad \Phi(t_k, t_{k-1}) = 1. \quad (3.5)$$

Eğer $u(t) = u(t_k)$ ve $v(t) = v(t_k)$ (t_{k-1}, t_k) zaman aralığında yaklaşık olarak sabit kalırsa ayrık zaman modelleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$F(t_k) \triangleq \Phi(t_k, t_{k-1}) \quad (3.6)$$

$$B(t_k) \triangleq \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k, \tau) B(\tau) d\tau \quad (3.7)$$

$$G(t_k) \triangleq \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k, \tau) G(\tau) d\tau \quad (3.8)$$

Durum matrisinin ayrık zamandaki formu aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$x(t_k) = F(t_k)x(t_{k-1}) + B(t_k)u(t_k) + G(t_k)v(t_k) \quad (3.9)$$

$\Delta t(k) \triangleq t_k - t_{k-1}$ zaman aralığı durumun ardışık örnekleri arasında sabit kalır. Dolayısıyla denklemler aşağıdaki forma dönüşür:

$$x(k) = F(k)x(k-1) + B(k)u(k) + G(k)v(k) \quad (3.10)$$

$$z(k) = H(k)x(k) + D(k)w(k) \quad (3.11)$$

Kalman filtresinin çıkarımında temel varsayımlar süreç ve gözlem gürültülerini tanımlayan $v(k)$ ve $w(k)$ 'nin Gauss, zamansal ilintisiz ve sıfır ortalamalı olmasıdır.

$$E\{v(k)\} = E\{w(k)\} = 0, \quad \forall k,$$

$$E\{v(i)v^T(j)\} = \delta_{ij}Q(i), \quad E\{w(i)w^T(j)\} = \delta_{ij}R(i)$$

Diğer bir varsayımda süreç ve gözlem gürültülerinin ilintisiz olmasıdır.

$$E\{v(i)w^T(j)\} = 0, \quad \forall i, j$$

Kalman Filtresi Algoritması: Kalman Filtresi (KF) algoritması verilen bir ölçüm dizisine koşullu kestirimin ortalama karesel hatasını minimize eden kestirimler üretir. KF algoritmasında k anındaki durumun kestirimi k anına kadar olan tüm bilginin sağlandığı varsayımıyla $\hat{x}(k|k)$ ile gösterilir. Eğer sadece $k-1$ adımına kadar olan bilgi sağlanmışsa $\hat{x}(k|k-1)$ ile gösterilir ve bu gösterim bir adım önceden tahmin olarak adlandırılır. KF yinelemeli olarak iki evrede gerçekleşir.

- **Tahmin:** k anındaki durum tahmini $\hat{x}(k|k-1)$ ve kovaryansı $P(k|k-1)$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\hat{x}(k|k-1) = F(k)\hat{x}(k-1|k-1) + B(k)u(k) \quad (3.12)$$

$$P(k|k-1) = F(k)P(k-1|k-1)F^T(k) + G(k)Q(k)G^T(k) \quad (3.13)$$

- **Güncelleme:** k anında $z(k)$ gözlemi yapıldıktan sonra $x(k)$ durumunun güncellenmiş kestirimi olan $\hat{x}(k|k)$ ve güncellenmiş kestirim kovaryansı olan $P(k|k)$ durum tahmini ve gözleminden aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)(z(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)) \quad (3.14)$$

$$P(k|k) = (1 - W(k)H(k))P(k|k-1)(1 - W(k)H(k))^T + W(k)R(k)W^T(k) \quad (3.15)$$

Kazanç matrisi olan $W(k)$;

$$W(k) = P(k|k-1)H(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (3.16)$$

Kalman filtresinin yinelemeli bir yapısı vardır. Filtre tahmin adımında süreç modelini, güncelleme adımında ise gözlem modelini kullanır.

Yenilik hesabında k anında nasıl bir gözlem olacağına dair olan tahmin $k-1$ anına kadar olan gözlemler kullanılarak yapılır.

$$\hat{z}(k|k-1) \triangleq E\{z(k)|Z^{k-1}\} = E\{H(k)x(k) + W(k)Z^{k-1}\} = H(k)\hat{x}(k|k-1) \quad (3.17)$$

$z(k)$ gözlemi ile tahmin edilen gözlem olan $H(k)\hat{x}(k|k-1)$ arasındaki fark yenilik olarak ifade edilir ve $v(k)$ ile gösterilir. Yenilik filtrenin kestirimleri ile gözlem dizileri arasındaki sapmaların bir ölçüsü olduğu için önemli bir unsurdur. Kestirimi yapılan durumlar ve gerçek durumların karşılaştırılması genellikle mümkün olmadığı için yenilik kestirimcinin başarısını ortaya koyan tek unsurdur. Yenilik özellikle veri eşleştirme probleminde önemli bir rol oynar.

$$v(k) = z(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1) \quad (3.18)$$

$$E\{v(k)|Z^{k-1}\} = 0$$

$$E\{v(i)v^T(j)\} = S(i)\delta_{ij}$$

Yenilik kovaryansı olan $S(k)$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$S(k) = R(k) + H(k)P(k|k-1)H(k) \quad (3.19)$$

Yenilik ve yenilik varyansı kullanılarak güncelleme denklemleri aşağıdaki forma dönüştürülebilir:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)v(k) \quad (3.20)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - W(k)S(k)W^T(k) \quad (3.21)$$

$$W(k) = P(k|k-1)H(k)S^{-1}(k) \quad (3.22)$$

Genişletilmiş Kalman Filtresi Algoritması: Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) Kalman Filtresinin bir formu olup durum/gözlem modelleri doğrusal olmayan sistemlerde kullanılmaktadır. EKF durum modelleri denklem (3.23)'e göre ifade edilir.

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), v(t), t] \quad (3.23)$$

Denklem (3.23)'te $x(t) \in \mathbb{R}^n$ durum, $u(t) \in \mathbb{R}^r$ kontrol girişi, $v(t)$ ise durum modelindeki gürültü ve belirsizlikleri tanımlayan rastgele bir vektördür.

EKF gözlem modelleri aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$z(t) = h[x(t), u(t), w(t), t] \quad (3.24)$$

Denklem (3.24)'te $z(t) \in \mathbb{R}^m$ t anındaki gözlem, $w(t)$ ölçüm modelindeki gürültü ve belirsizlikleri tanımlayan rastgele bir vektördür.

EKF $t = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_k, \dots\}$ ayrık zaman seti ile ayrık zamanda denklem (3.25) ile ifade edilir.

$$z(t_k) = h[x(t_k), u(t_k), w(t_k), t_k], \quad \forall t_k \in t \quad (3.25)$$

$z(t_k)$, $x(t_k)$ ve $w(t_k)$ t_k anındaki ayrık zaman gözlem, durum ve gürültü vektörleridir.

(t_k, t_{k-1}) aralığındaki durum vektörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x(t_k) = x(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} f[x(\tau), u(\tau), v(\tau), \tau] d\tau \quad (3.26)$$

Euler yöntemi kullanılarak integral çözülürse denklem aşağıdaki biçime dönüşür:

$$x(t_k) = x(t_{k-1}) + \Delta T_k f[x(t_{k-1}), u(t_{k-1}), v(t_{k-1}), t_{k-1}] \quad (3.27)$$

$$\Delta T_k = t_k - t_{k-1}$$

Kalman filtresinde olduğu gibi zaman aralığı sabitse ve zaman k ile indeksleniyorsa denklemler aşağıdaki biçime dönüşür:

$$x(k) = x(k-1) + \Delta T f[x(k-1), u(k-1), v(k-1), k] \quad (3.28)$$

$$z(k) = h[x(k), u(k), w(k), k] \quad (3.29)$$

KF algoritmalarının doğrusal olmayan kestirim problemlerinde kullanılabilmesi için perturbasyon metotları ile doğrusal olmayan gerçek sistem modellerinin doğrusallaştırılması gereklidir. Bu gerçekleştirilirse denklemler aşağıdaki biçime dönüşür:

$$x(k) = f(x(k-1), u(k), v(k), k) \quad (3.30)$$

$$z(k) = h(x(k), w(k)) \quad (3.31)$$

EKF'de KF varsayımları geçerlidir. $v(k)$ ve $w(k)$ gürültüleri Gauss, zamansal ilintisiz ve sıfır ortalamalıdır. EKF'de KF gibi iki aşamalı olarak çalışır.

- **Tahmin:** k anındaki durum tahmini ve kovaryansı aşağıdaki denklem (3.32) ve denklem (3.33) kullanılarak hesaplanır.

$$\hat{x}(k|k-1) = f(\hat{x}(k-1|k-1), u(k)) \quad (3.32)$$

$$P(k|k-1) = \nabla f_x(k) P(k-1|k-1) \nabla^T f_x(k) + \nabla f_v(k) Q(k) \nabla^T f_v(k) \quad (3.33)$$

- **Güncelleme:** k anında $z(k)$ gözlemi yapıldıktan sonra güncellenmiş $x(k)$ durumunun güncellenmiş kestirimi olan $\hat{x}(k|k)$ ve güncellenmiş kestirim kovaryansı $P(k|k)$ durum tahmini ve gözleminden denklem (3.34) ve denklem (3.35) kullanılarak hesaplanır.

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)[z(k) - h(\hat{x}(k|k-1))] \quad (3.34)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - W(k)S(k)W^T(k) \quad (3.35)$$

$$W(k) = P(k|k-1)\nabla^T h_x(k)S^{-1}(k) \quad (3.36)$$

$$S(k) = \nabla h_x(k)P(k|k-1)\nabla^T h_x(k) + \nabla h_w(k)R(k)\nabla^T h_w(k) \quad (3.37)$$

3.6.1.1 Kalman Filtresinde Gözlemlerin Etkileri

Kalman filtresi uygulanan sistemlerde gözlem süreci her zaman senkron değildir. Bunun temel nedeni; özellikle çoklu algılayıcı kullanılan sistemlerde farklı birçok algılayıcılardan veri gelmesi, bu algılayıcıların her birinin gözlemlerin elde edilmesi ve aktarımı süreçleriyle ilgili farklı örnekleme zamanı ve gecikmeleri olmasıdır [136]. Genellikle verinin zamanlaması ile ilgili üç temel problem vardır:

- **Asenkron veri:** Bilginin rastgele zaman aralıklarında ulaşması durumudur.
- **Gecikmeli veri:** Bilginin hem rastgele zaman aralıklarında hem de gecikmeli olarak ve kestirim gerçekleştirildikten sonra ulaşması durumudur.
- **Sırasız veri:** Bilginin rastgele, gecikmeli ve sırasız olarak ulaşması durumudur.

Ayrık zamanlı durum ve gözlem modelleri kullanıldığında, Kalman filtresinde asenkron gözlem verileri önemli bir sorun yaratmamaktadır [136]. Gecikmeli gözlem verileri olması durumunda kullanılacak yöntemlerden birisi, mevcut tahmini yok kabul ederek önceki gecikmeli gözlem zamanındaki kestirimin kullanımıyla yeni bir tahminin hesaplanmasıdır. Bu tahmin yeni gözlemle birlikte yeni bir kestirim üretmek için kullanılır. Sırasız veri problemleri tek algılayıcı kullanılan sistemlerde çok seyrek görülen bir problem olmakla birlikte çoklu algılayıcı kullanılan sistemlerde sıklıkla görülür. Çoklu algılayıcı kullanılan sistemlerde algılayıcıların özelliklerinden kaynaklanan sırasız veri problemini önlemek için, gözlemlere zaman etiketi koyma ve tampon bellek kullanma gibi teknikler uygulanabilir. Sırasız veri problemi yaşanan sistemlerde kullanılabilecek tekniklere örnek olarak ters kovaryans filtresi verilebilir.

3.6.2 Gözlem Modelleri

Doğrusal ayrık zamanlı formda gerçek durum modeli aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x(k) = F(k)x(k-1) + G(k)u(k) + v(k) \quad (3.38)$$

Denklem (3.38)'de $F(k)$ durum geçiş matrisini, $G(k)$ kontrol girişi modelini, $u(k)$ kontrol girişi vektörünü, $v(k)$ ise belirsizliğin modelini ve sürecini tanımlayan rastgele bir vektördür. Sıfır ortalamalı ve zamansal ilintisiz olarak kabul edilir.

$$E\{v(k)\} = 0$$

$$E\{v(i)v^T(j)\} = \delta_{ij}Q(i)$$

Çoklu algılayıcı füzyonu durumunda bütün algılayıcılar aynı durumu gözlemleyeceği için model bütün algılayıcılar için ortaktır.

Durum gözlemleri senkron bir biçimde doğrusal gözlem modellerine göre farklı algılayıcılar tarafından gerçekleştirildiği için gözlem modelleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$z_s(k) = H_s(k)x(k) + w_s(k), \quad s=1,2,\dots,S. \quad (3.39)$$

Denklem (3.39)'da $z_s(k)$ k anında s numaralı algılayıcı tarafından gerçekleştirilen $x(k)$ durumuna ait gözlemleri gösterir. $H_s(k)$ gözlem modelini, $w_s(k)$ eklemeli gürültüyü gösterir. $w_s(k)$ gözlem gürültü modelinin sıfır ortalamalı, zamansal ilintisiz ve algılayıcılar arasında ilintisiz olduğu kabul edilir. Süreç ve ölçüm gürültülerinin de ilintisiz olduğu kabul edilir.

$$E\{w_s(k)\} = 0, \quad s=1,2,\dots,S.$$

$$E\{w_p(i)w_q(j)\} = \delta_{ij}\delta_{pq}R_p(i)$$

$$E\{v(i)w_s^T(j)\} = 0$$

3.6.3 Grup Algılayıcı Metodu

Çoklu algılayıcı füzyonu ile kestirim için kullanılabilecek yöntemlerden biri, bütün gözlem modellerini ve gözlemleri tek bir grup algılayıcıda birleştirmek ve aynı algoritmayı kullanmaktır.

$$z(k) \triangleq [z_1^T(k), z_2^T(k), \dots, z_S^T(k)]^T$$

Birleşik gözlem modeli:

$$H(k) \triangleq [H_1^T(k), H_2^T(k), \dots, H_S^T(k)]^T$$

$$w(k) \triangleq [w_1^T(k), w_2^T(k), \dots, w_S^T(k)]^T$$

$$z(k) = H(k)x(k) + w(k) \quad (3.40)$$

Grup algılayıcı yönteminde durum kestirimleri standart Kalman filtresi algoritması ile hesaplanır. Bu yöntemdeki tahmin aşaması tek bir algılayıcı durumu ile birebir aynı adımlarla gerçekleştirilir. Güncelleme adımında birden fazla algılayıcıdan gelen ölçüm bilgilerinin işleme katılması gerektiği için bu aşama algılayıcı sayısına bağlıdır. Durum vektörünün boyutu n ve S adet algılayıcının her birinin gözlem vektörü m_s boyutlu ise gözlem modelinin boyutu $m_s \times n$ kabul edildiğinde grup gözlem modeli $m \times n$ boyutlu olacaktır. Buna ilave olacak grup gözlem vektörünün boyutu denklem (3.41) kullanılarak hesaplanacaktır.

$$m = \sum_{s=1}^S m_s \quad (3.41)$$

Grup algılayıcı yeniliği m boyutlu ve grup algılayıcı kovaryans matrisi $m \times m$ boyutlu olacaktır. Grup algılayıcı yönteminde algılayıcı sayısı arttıkça yenilik vektörü ve yenilik kovaryans vektörünün boyutu da büyüyecektir. Bunun sonucu olarak $W(k)$ grup algılayıcı kazanç matrisinin hesaplama karmaşıklığı da artacaktır. Dolayısıyla bu yöntem sınırlı sayıda algılayıcı bulunması durumunda pratik bir çözüm olarak kabul edilebilir.

3.6.4 Sıralı Algılayıcı Metodu

Çoklu algılayıcı ile kestirim için kullanılabilecek yöntemlerden birisi olan sıralı algılayıcı metodunda her bir algılayıcının gözlemi bağımsız olarak kabul edilerek durum kestirimine sıralı güncelleme yapılır [136]. Aynı şekilde her bir gözlem için tahmin ve kazanç matrisleri hesaplanır. Sıralı algılayıcı metodunda yenilik ve yenilik kovaryans matrisinin boyutu tek bir algılayıcı kullanılan durumla aynıdır. Sadece her bir algılayıcıdan gelen gözlem için yeni bir kazanç matrisi hesaplanır. Yöntem her bir algılayıcının her bir adımda eş zamanlı olarak yeni bir gözlem yaptığını kabul eder.

İlk p algılayıcısı tarafından k anında gerçekleştirilen gözlemler seti:

$$\mathbb{Z}_p(k) \triangleq \{z_1(k), z_2(k), \dots, z_p(k)\}$$

P . algılayıcı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen gözlemler seti:

$$\mathbb{Z}_p^k \triangleq \{z_p(1), z_p(2), \dots, z_p(k)\}$$

İlk p algılayıcısı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen tüm gözlemlerin seti:

$$\mathbb{Z}_p^k \triangleq \{Z_1^k, Z_2^k, \dots, Z_p^k\}, \quad p \leq S$$

İlk p algılayıcısı tarafından i anına kadar yapılan gözlemler ile ilk q algılayıcısı tarafından j anına kadar yapılan gözlemler:

$$\mathbb{Z}_{p,q}^{i,j} = \{\mathbb{Z}_p^i \cup \mathbb{Z}_q^j\} = \{Z_1^i, Z_2^i, \dots, Z_p^i, Z_{p+1}^j, \dots, Z_q^j\}, \quad p < q, i \geq j$$

Tüm algılayıcılar tarafından $k-1$ anına kadar gerçekleştirilen tüm gözlemler ile ilk p algılayıcısı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen gözlemler seti:

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}_{p,S}^{k,k-1} &= \{\mathbb{Z}_p^k \cup \mathbb{Z}_S^{k-1}\} \\ &= \{Z_1^k, Z_2^k, \dots, Z_p^k, Z_{p+1}^{k-1}, \dots, Z_S^{k-1}\} \\ &= \{\mathbb{Z}_p(k) \cup \mathbb{Z}_S^{k-1}\}, \quad p < S \end{aligned}$$

$k-1$ anına kadar tüm algılayıcılardan gelen tüm gözlemlere ve ilk p algılayıcısı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen gözlemlere göre her bir adımdaki kestirim:

$$\hat{x}(k|k, p) = E\{x(k) | \mathbb{Z}_{p,S}^{k,k-1}\}$$

k anındaki herhangi bir gözlem yapılmadan önceki durum tahmini:

$$\hat{x}(k|k, 0) = \hat{x}(k|k-1) = E\{x(k) | \mathbb{Z}_S^{k-1}\}$$

k anındaki tüm algılayıcılardan gelen gözlemler doğrultusundaki durum tahmini:

$$\hat{x}(k|k, S) = \hat{x}(k|k) = E\{x(k) | \mathbb{Z}_S^k\}$$

Her bir adımdaki ilk gözlem hesaba katıldığında, sıralı algılayıcı ile kestirimin tahmin aşaması tek algılayıcı durumuna benzer. Durum tahmini:

$$\hat{x}(k|k, 0) = \hat{x}(k|k-1) \tag{3.42}$$

$$= F(k)\hat{x}(k-1|k-1) + G(k)u(k) \tag{3.43}$$

$$= F(k)\hat{x}(k-1|k-1, S) + G(k)u(k) \tag{3.44}$$

Kovaryansı:

$$P(k|k, 0) = P(k|k-1) \tag{3.45}$$

$$= F(k)P(k-1|k-1)F^T(k) + Q(k) \quad (3.46)$$

$$= F(k)P(k-1|k-1, S)F^T(k) + Q(k) \quad (3.47)$$

İlk algılayıcının k anındaki kestirimi $z_1(k)$ gözlemi hesaba katılarak bulunur.

$$\hat{x}(k|k, 1) = \hat{x}(k|k, 0) + W_1(k)[z_1(k) - H_1(k)\hat{x}(k|k, 0)] \quad (3.48)$$

Kovaryansı:

$$P(k|k, 1) = P(k|k, 0) - W_1(k)S_1(k)W_1^T(k) \quad (3.49)$$

$$W_1(k) = P(k|k, 0)H_1^T(k)S_1^{-1}(k) \quad (3.50)$$

$$S_1(k) = H_1(k)P(k|k, 0)H_1^T(k) + R_1(k) \quad (3.51)$$

Genel bir varsayımla k anındaki durum kestirimi bütün algılayıcılar tarafından $k-1$ anına kadar ve ilk p algılayıcısı tarafından k anına kadar gerçekleştirilen gözlemlere dayalı olarak denklem (3.52) kullanılarak hesaplanır.

$$\hat{x}(k|k, p) = \hat{x}(k|k, p-1) + W_p(k)[z_p(k) - H_p(k)\hat{x}(k|k, p-1)] \quad (3.52)$$

Kovaryansı:

$$P(k|k, p) = P(k|k, p-1) - W_p(k)S_p(k)W_p^T(k) \quad (3.53)$$

$$W_p(k) = P(k|k, p-1)H_p^T(k)S_p^{-1}(k) \quad (3.54)$$

$$S_p(k) = H_p(k)P(k|k, p-1)H_p^T(k) + R_p(k) \quad (3.55)$$

Her bir adımdaki durum güncellemesi aşağıdaki denklem ile gerçekleştirilebilir.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|k) &= [\prod_{s=1}^S (1 - W_s(k)H_s(k))] \hat{x}(k|k-1) \\ &+ \sum_{i=1}^S [\prod_{j=i+1}^S (1 - W_j(k)H_j(k))] W_i(k) z_i(k) \end{aligned} \quad (3.56)$$

Grup algılayıcı yönteminde olduğu gibi bu yöntem de algılayıcı sayısı az olduğunda etkili olmaktadır. Her bir zaman adımında her bir algılayıcıdan gelen her bir gözlem için yeni bir kazanç matrisinin hesaplanması gerektiği için hesaplama yükü algılayıcı sayısı arttığında artacaktır. Bu artış doğrusal olmasına rağmen algılayıcı sayısı fazla olduğunda problem teşkil eder.

3.6.5 Ters Kovaryans Formu

Ters Kovaryans Formu algılayıcı sayısının çok fazla olması durumunda kullanılması uygun olan yöntemlerden birisidir. Ters kovaryans formu birçok algılayıcıdan gelen gözlemlerin direkt entegrasyonu ile birleşik kestirim elde edilmesini sağlar.

Bu yöntemde algılayıcı sayısından bağımsız olarak tersi alınacak en büyük matrisin büyüklüğü durum vektörü kadardır. Yöntemin güncelleme algoritmasının karmaşıklığı algılayıcı sayısı ile birlikte doğrusal olarak artar. Ayrıca güncelleme aşaması tek bir adımda gerçekleştirilir. Ters kovaryans kestiriminin avantajı algılayıcı sayısının fazla olması durumunda ortaya çıkar. Bu nedenle yöntem sadece çok fazla algılayıcı kullanılan endüstriyel kontrol sistemleri için uygun bir çözümdür.

3.6.6 İzden İze Füzyon

İzden İze Füzyon yöntemi, algılayıcı bölgelerinden gelen kestirimlerin birleştirilmesini sağlayan algoritmalar içerir. Bu yöntemde yerel algılayıcı bölgeleri, yerel birer Kalman filtresi kullanarak yerel iz kestirimlerini gerçekleştirirler. Daha sonra kestirimler bir füzyon merkezine iletilir. Füzyon merkezi, yerel iz kestirimlerinden genel iz kestirimini gerçekleştirir (Şekil 3.3) [157], [158]. Yöntemin diğer füzyon yöntemlerine göre avantajları olmasına rağmen yöntem sisteme ekstra karmaşıklık getirir.

Yöntem denklem (3.57)'de gösterilen standart durum modelinden hareketle geliştirilir.

$$x(k) = F(k)x(k-1) + G(k)u(k) + v(k) \quad (3.57)$$

Durumun farklı algılayıcı modelleri kullanan birçok algılayıcı tarafından gözlemlendiği kabul edilir.

$$z_i(k) = H_i(k)x(k) + w_i(k), \quad i = 1, 2, \quad (3.58)$$

$$E\{w_i(k)w_j(k)\} = \delta_{ij}R_i(k) \quad (3.59)$$

Yerel izler yerel gözlemlere göre Kalman filtresi kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\hat{x}_i(k|k) = \hat{x}_i(k|k-1) + W_i(k)[z_i(k) - H_i(k)\hat{x}_i(k|k-1)] \quad (3.60)$$

$$P_i(k|k) = P_i(k|k-1) - W_i(k)S_i(k)W_i^T(k) \quad (3.61)$$

$$W_i(k) = P_i(k|k-1)H_i^T(k)S_i^{-1}(k) \quad (3.62)$$

$$S_i(k) = [H_i(k)P_i(k|k-1)H_i^T(k) + R_i(k)] \quad (3.63)$$

Yerel durum kestirimleri denklem (3.64) ve denklem (3.65) kullanılarak gerçekleştirilir.

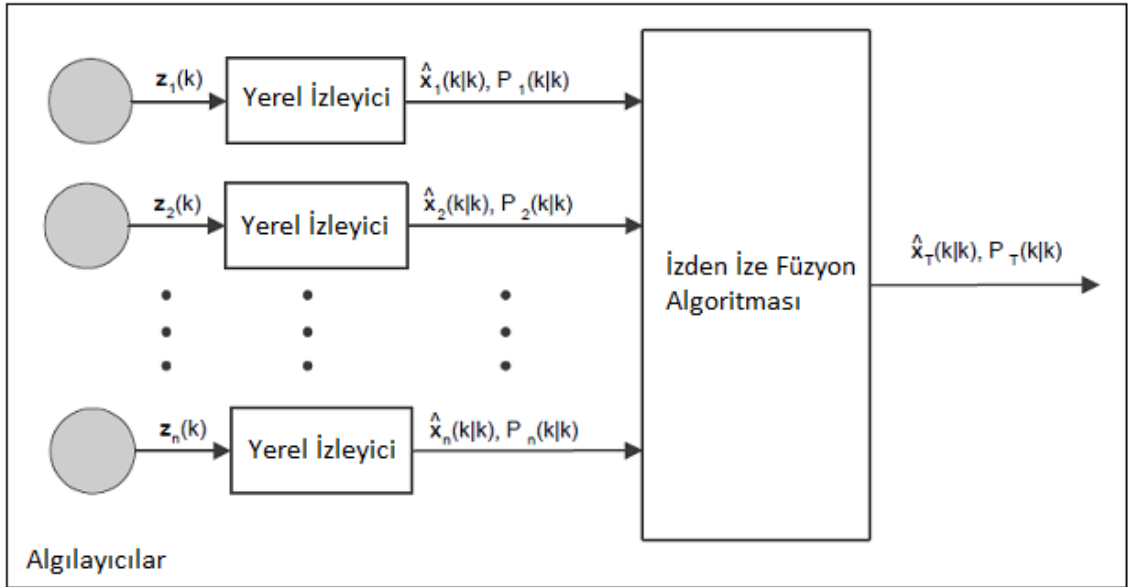
$$\hat{x}_i(k|k-1) = F(k)\hat{x}_i(k-1|k-1) + B(k)u(k) \quad (3.64)$$

$$P_i(k|k-1) = F(k)P_i(k-1|k-1)F^T(k) + G(k)Q(k)G^T(k) \quad (3.65)$$

İz füzyonu denklem (3.66) ve denklem (3.67) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\hat{x}_T(k|k) = P_T(k|k) \sum_{i=1}^N P_i^{-1}(k|k) \hat{x}_i(k|k) \quad (3.66)$$

$$P_T(k|k) = \left[\sum_{i=1}^N P_i^{-1}(k|k) \right]^{-1} \quad (3.67)$$



Şekil 3. 3 İzden ize füzyon

3.7 Çoklu Algılayıcı Parçacık Filtresi

Farklı algılayıcılarda farklı ölçüm modları olduğunda örneklere ağırlık atanabilmesi için her bir ölçüm moduna karşılık gelen olasılık yoğunluk fonksiyonlarının göz önüne

alınması gerekir. Ölçüm modu q tarafından k indeksindeki pozisyonda i örneğinin ağırlığının $w_k^{i,q}$ olduğu kabul edildiğinde her bir konum indeksi için Q ağırlıkları ilgili olasılık dağılımları kullanılarak hesaplanır. Eğer ölçüm süreçlerinin birbirinden bağımsız olduğu kabul edilirse $q = 1, 2, \dots, Q$ ölçüm modlarından kaynaklanan birleşik olasılık her bir ölçüm modununun olasılıklarının bileşkesidir.

$$p(z_k | x_k^i) = p(z_k^1 | x_k^i) \cdot p(z_k^2 | x_k^i) \cdot \dots \cdot p(z_k^Q | x_k^i) \quad (3.68)$$

Bir durumun soncul olasılık yoğunluk fonksiyonunun değerlendirilmesi için ilk olarak öncül olasılık yoğunluk fonksiyonundan her bir pozisyon indeksindeki belirli sayıda örnek örneklenir. İkinci adımda ağırlıklar atanır. Gerçek ölçümler ile hesaplanan ölçümler ağırlık atama bloğunun girişleridir. Eğer bir örnek için hesaplanan ile gerçek ölçüm arasındaki fark küçükse örneğin ağırlığı yüksektir. Ölçüm modeli, durumun ölçümler ile ilişkilendirilmesini sağlar. Üçüncü adımda küçük ağırlıklara sahip parçacıklar yok edilerek büyük ağırlığa sahip parçacıklara öncelik verilir. Tüm noktalardaki soncul olasılık yoğunluk fonksiyonlarının kestirimi gerçekleştirilir. Dördüncü adımda ise bilinmeyen durum için tek nokta kestirimleri hesaplanır. Daha sonra bütün noktalardaki kestirilmiş soncul olasılık yoğunluk fonksiyonları başlangıç değerleri olarak kabul edilerek yinelemeli olarak güncellenir. Takip eden yinelemelerde her bir konumun komşuluğundaki durumlar önceki yinelemelerde değerlendirilmiş soncul olasılık yoğunluk fonksiyonlarından tek nokta kestirimleridir. Hata değeri önceden belirlenmiş olan değerin altına inene kadar algoritma devam eder.

3.8 Durum Senaryoları

Bu bölümde üç farklı algılayıcı kombinasyonunda çoklu algılayıcı füzyonunun gerçekleştirilmesi incelenmektedir.

3.8.1 2D Lazer Tarayıcı ve Tek Mercekli Kamera

2D lazer tarayıcıdan elde edilen ölçümlerle tek mercekli kameradan elde edilen görüntülerin birleştirilmesi için EKF tabanlı bir füzyon yöntemi kullanılmıştır. EKF tabanlı bir yöntem seçilmesinin nedeni farklı algılayıcılardan elde edilen ölçümlerin kolaylıkla birleştirilmesine izin vermesidir. Çoklu algılayıcı füzyonu süreçleri algılayıcı

gruplarından elde edilen verilerin kullanımını ve tüm algılayıcıların tahmin, gözlem ve kestirimlerinin yürütülmesini gerektirir.

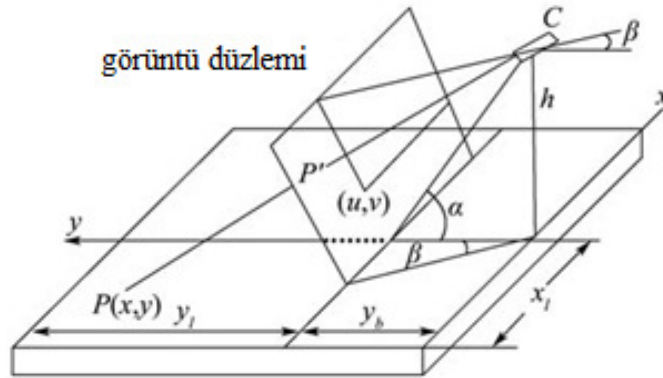
Yöntemin geliştirilmesinde bazı varsayımlar kabul edilmiştir. Lazer tarayıcının L , tek mercekli kameranın C ile temsil edildiği kabul edilmektedir. Buna ilave olarak LM_LRF_k 'nın lazer tarayıcı ölçümlerinin kullanılmasıyla elde edilen ana yerel harita olduğu, LM_CAM_k 'nın ise kamera görüntüleri ile elde edilen yardımcı yerel harita olduğu kabul edilmektedir. Hough dönüşümü ile ham kamera görüntülerinden özellik çıkarımı yapılmaktadır [153].

Benzetim çalışmalarında kullanılacak olan Pioneer 3-DX ile saha çalışmalarında kullanılacak olan Corobot'un görüntü sistemi tek merceklidir. Şekil 3.4 robotlarda bulunan kamera sisteminin modelini göstermektedir. Şekil 3.4'te gösterilen tek mercekli kamera modelinde C kamerayı, $P'(u,v)$ görüntü koordinat çerçevesindeki bir noktanın koordinatını, $P(x,y)$ robot koordinat çerçevesindeki koordinatını, h kameradan yere olan mesafeyi, y_b kameranın dikey görsel açısından yere doğru olan yansımanın minimum uzaklığını, $y_l + y_b$ aynı yansımanın maksimum uzaklığını, x_l kameranın yatay görsel açısından yere doğru olan yansımanın minimum uzaklığını, α ve β kameranın dikey görsel açısı ile y eksenindeki açıları, θ kameranın yatay görsel açı yansıması ile y eksenindeki açıyı göstermektedir. Elde edilen görüntülerdeki noktalar robot koordinat çerçevesine dönüştürülmektedir. Robot koordinat çerçevesindeki görüntü verileri seti elde edildikten sonra Hough dönüşümü uygulanarak çizgiler çıkarılmaktadır.

EKF tabanlı çoklu algılayıcı füzyonu algoritması LM_LRF_k 'daki yer işaretçileri setini işleyerek LM_CAM_k 'da artık bilgiyi aramaktadır. Bu noktada artık bilgi her iki algılayıcıdan elde edilen ölçümlerde bulunan tekrarlı bilgi anlamındadır. LM_LRF_k 'da bulunan her bir yer işaretçisi için en yakın komşu (NN) yaklaşımı ve Mahalanobis mesafesi kullanılarak LM_CAM_k 'nın uygun özellikleri araştırılmaktadır. Yarı en uygun kestirim kullanılarak çoklu algılayıcı füzyonu tabanlı yerel harita olan LM_F_k elde edilmektedir (Şekil 3.5).

LM_LRF_k 'yı oluşturmak için öncelikle lazer tarayıcıdan gelen 2D veriler bir bölümleme algoritması ile işlenmektedir. Bölümler, iki takip eden bölümün kesiştiği noktalarda bulunan köşeler, dışbükey engeller ya da kapı çerçeveleri olabilen yarı düzlemler gibi farklı belirsiz geometrik özellikler elde edilir ve bu tespit edilen özelliklerden yer işaretçileri şekillendirilir.

Tek mercekli görüntüden sadece kısmi artık bilgi elde edilebilir. Bunun nedeni tek mercekli kameranın yönlü bilgi sağlaması ancak derinlik bilgisi vermemesidir. Lazerle elde edilen köşelerin konumları ve yarı düzlemlerin konumları gibi artık bilgiler kamera görüntülerinin işlenmesiyle elde edilir. Böylece hem tespit işleminin güvenilirliği artar hem de özelliklerin kestirimindeki belirsizlik azalır. Kapı çerçeveleri ve köşeler gibi dikey kenarlar görüntülerden çıkartılır. Lazer tarayıcıdan elde edilen ölçümler ile kamera görüntülerinin birleştirilebilmesi için bireysel uyumlulukların doğrulanması gerekir.



Şekil 3. 4 Tek mercekli kamera modeli

Bireysel uyumlulukların doğrulanmasından sonra, yarı düzlemlerin ve köşelerin kestirilen konumları arasındaki korelasyonlardan dolayı birleşik uyumluluk için diğer bir doğrulama gerçekleştirilir. Kameraların açısal çözünürlükleri genellikle lazer tarayıcılardan daha yüksek olduğu için çoklu algılayıcı füzyonu geometrik özelliklerin kestirilmiş konumlarının doğruluğunu iyileştirir [30].

Çoklu algılayıcı füzyonu süreci: Lazer tarayıcı ölçümlerinden çıkarılan özellikler seti z_L , kamera görüntülerinden çıkarılan özellikler seti z_C ile gösterildiğinde (z_L^i, z_C^j) eşleşen bir çift ise (3.69) sağlanmalıdır [145].

$$f(z_L^i, z_C^j) = 0 \quad (3.69)$$

f fonksiyonu aşağıdaki denklemler kullanılarak doğrusallaştırılır.

$$f(z_L^i, z_C^j) = h_{ij} + H_{ij}(z_L^i - \hat{z}_L^i) + J_{ij}(z_C^j - \hat{z}_C^j) \quad (3.70)$$

$$h_{ij} = f(\hat{z}_L^i, \hat{z}_C^j) \quad (3.71)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial f}{\partial z_L^i} | (\hat{z}_L^i, \hat{z}_C^j) \quad (3.72)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial f}{\partial z_C^j} | (\hat{z}_L^i, \hat{z}_C^j) \quad (3.73)$$

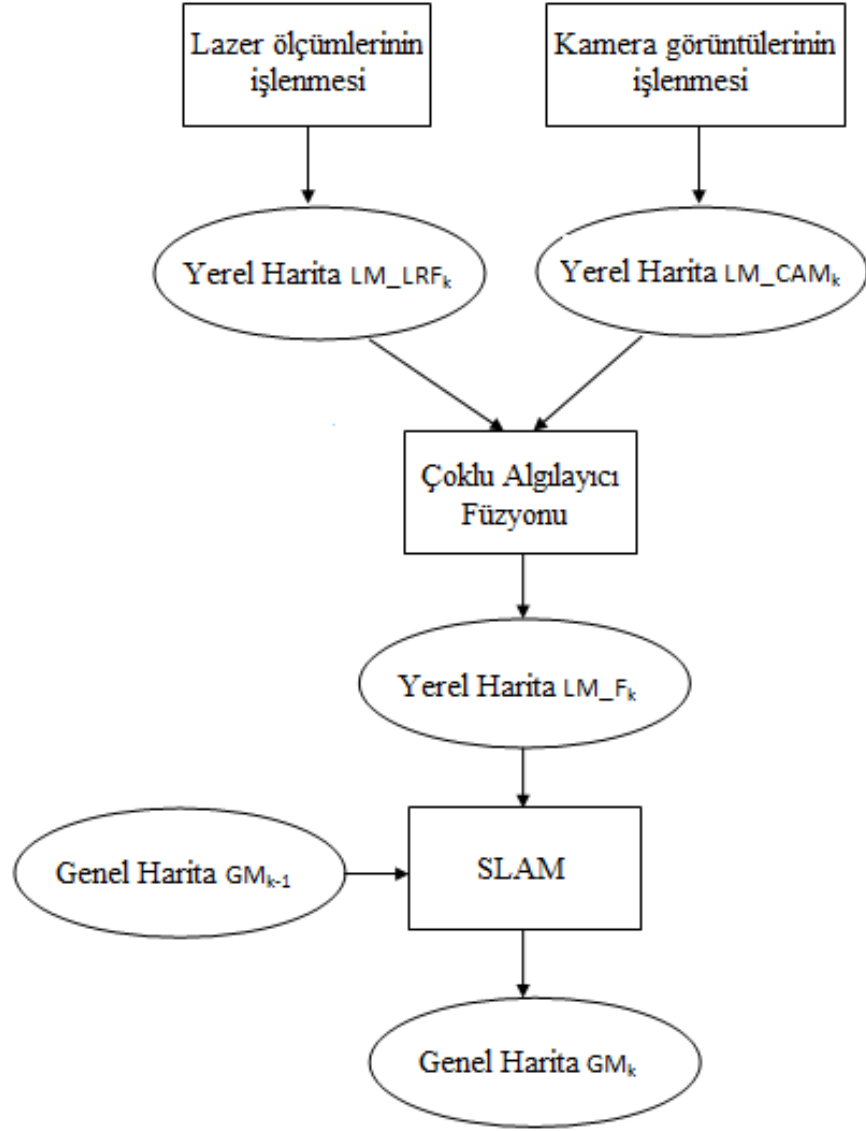
$$C_{ij} = H_{ij} C_L^i H_{ij}^T + J_{ij} C_C^j J_{ij}^T \quad (3.74)$$

C_L^i z_L^i 'nin kovaryans matrisi, C_C^j ise z_C^j 'nin kovaryans matrisi ise Mahalanobis mesafesinin karesi D^2 'ye dayalı olan X^2 testi kullanılarak uyumluluk çıkarılır [145]. Son olarak EKF ile veri füzyonu uygulanır.

$$W = C_L^i H_{ij}^T (H_{ij} C_L^i H_{ij}^T + J_{ij} C_C^j J_{ij}^T)^{-1} \quad (3.75)$$

$$\hat{z}_{LC}^i = \hat{z}_L^i + W(-h_{ij}) \quad (3.76)$$

$$C_{LC}^i = (I - WH_{ij}) C_L^i \quad (3.77)$$



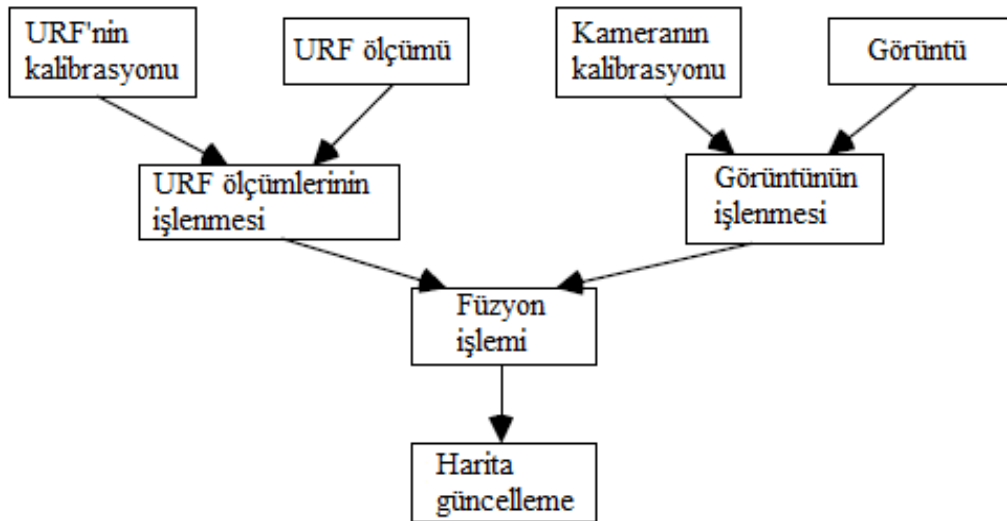
Şekil 3. 5 2D Lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera ile gerçekleştirilen füzyon

3.8.2 Ses Üstü Mesafe Ölçer ve Tek Mercekli Kamera

Ses üstü mesafe ölçer verileri ile kamera görüntülerinin birleştirilmesi üzerine literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ses üstü mesafe ölçerler, doğruluk ve hassasiyet anlamında lazer tarayıcılara göre daha zayıftır. Fiyatlarının da makul düzeylere inmesi dolayısıyla hobi olarak robotik uygulamaları ile ilgilenenler arasında yaygın olmamasına rağmen bilimsel araştırmalarda ve gerçek uygulamalarda lazer tarayıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Stepan vd. [48] de ortam modeli olarak doluluk ızgaralarını kullanan bir algılayıcı füzyonu yöntemi geliştirmişlerdir. Ancak bu

yöntem ses üstü mesafe ölçer ve kamera verilerinin birleştirilmesinde deneysel çalışmalarda başarılı sonuçlar vermesine karşın tez kapsamındaki çalışmalarda metrik harita modelleri kullanıldığı için tercih edilmemiştir.

2D lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera verilerinin füzyonunda kullanılan yöntemle benzer bir füzyon yöntemi tercih edilmiştir. Ses üstü mesafe ölçer tarafından tespit edilen geometrik unsurların doğrulanmasında kamera görüntülerinden faydalanılmaktadır. Ham URF verisi ve kamera görüntülerinden özellik çıkarımı için Hough dönüşümü kullanılmaktadır. Hough dönüşümü iki boyutlu noktalar setine uyan çizgilerin bulunmasını sağlayan kararlı ve etkin bir yöntemdir. Kartezyen düzleminden Hough uzayına dönüşümü gerçekleştirebilmek için Kartezyen düzlemindeki her bir nokta Hough uzayındaki takip eden bir eğri ile eşleştirilir. Hough uzayındaki bir nokta da Kartezyen düzlemindeki bir çizgiye karşılık gelir. Hough dönüşümü bir anlamda gerçek ölçümlerle uyumlu olan belirli özelliklerin varlığını doğrulamayı sağlar. Füzyon işlemi özellik seviyesinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.6 füzyon işlemini göstermektedir.



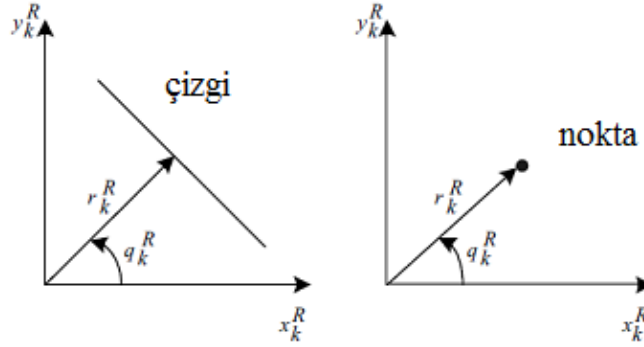
Şekil 3. 6 Ses üstü mesafe ölçer ve tek mercekli kamera ile gerçekleştirilen füzyon

Hough dönüşümü ve çoklu algılayıcı füzyonu süreci: Ses üstü mesafe ölçerden elde edilen veriler $D = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, p\}$ ile gösterilerek (3.78) tanımlanır. Eğer (3.78)

eşitliği sağlanmazsa $h_i^D(\theta, \rho) = 0$ olarak kabul edilir. (3.78) numaralı denklem kullanılarak (3.79) elde edilir. URF'den elde edilen D veri setinin Hough dönüşümü $HT_c^D(\theta, \rho)$ fonksiyonu ile, $HT_c^D(\theta, \rho)$ fonksiyonunun ayırık gösterimi ise $HT^D(\theta, \rho)$ ile gösterilmektedir. $HT^D(\theta, \rho)$, (θ, ρ) düzleminin ayırık ızgaralarının yaratılması ile elde edilir.

$$h_i^D(\theta, \rho) = 1 \quad \text{eğer} \quad \rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (3.78)$$

$$HT_c^D(\theta, \rho) = \sum_{i=1}^p h_i^D(\theta, \rho) \quad (3.79)$$



Şekil 3. 7 Hough dönüşümü ile özellik çıkarımı

Özellik çıkarımı için Hough dönüşümü kullanılarak çizgiler çıkarılır ve robotun merkezinde bulunan R robot koordinat çerçevesinde temsil edilir. Bu dönüşüm işleminde θ_s^R çizginin yönünü belirlerken, ρ_s^R ise çizginin orijine uzaklığını belirler. Noktalar için ise Kartezyen temsili yerine aynı robot koordinat çerçevesine olan göreceli kutupsal temsil tercih edilir. Bu yaklaşımda bir nokta (θ_s^R, ρ_s^R) vektörü ile temsil edilir. Bu temsilde ρ_s^R orijinden noktaya olan uzaklık iken θ_s^R ise x eksenini arasındaki açıdır. Bu durumda URF ölçümlerinden elde edilen çizgiler ve noktalar $z_s = (\theta_s^R, \rho_s^R)$ ile temsil edilir.

Tek mercekli kamera modelinde (Şekil 3.4) modeldeki geometrik ilişkiler kullanılarak (3.80), (3.81) ve (3.82) elde edilir.

$$\alpha = \arctan^{-1}\left[\frac{h}{y_b}\right] \quad (3.80)$$

$$\beta = \arctan^{-1}\left[\frac{h}{y_b + y_l}\right] \quad (3.81)$$

$$\theta = \arctan^{-1}\left[\frac{x_l}{y_b + y_l}\right] \quad (3.82)$$

S_x ve S_y 'nin elde edilen görüntünün satır ve sütun numaraları olduğu kabul edilerek (3.80), (3.81) ve (3.82) kullanılarak robot koordinat çerçevesinde (x, y) hesaplanır.

$$y = h \times \tan[(90 - \alpha) + [\frac{v}{S_y}](\alpha - \beta)] \quad (3.83)$$

$$x = y \times \tan[\frac{u}{S_x} \times \theta] \quad (3.84)$$

(3.83) ve (3.84) kullanılarak robot koordinat çerçevesinde $M = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, q\}$ görüntü verisi seti elde edilir. Daha sonra Hough dönüşümü ile Hough uzayında $z_m = (\theta_m^R, \rho_m^R)$ ile gösterilen çizgiler çıkarılır.

Ses üstü mesafe ölçerden verilerinden çıkarılan özellikler seti $z_u = \{z_u^1, z_u^2, \dots, z_u^p\}$, kameradan elde edilen görüntüden çıkarılan özellikler seti $z_m = \{z_m^1, z_m^2, \dots, z_m^p\}$ ile gösterilmektedir. Eğer (z_u^i, z_m^j) ortamdaki aynı nesneye karşılık gelen eşleşen bir çift ise (3.85) eşitliği sağlanmalıdır.

$$f(z_u^i, z_m^j) = 0 \quad (3.85)$$

f fonksiyonu aşağıdaki denklemler kullanılarak doğrusallaştırılır.

$$f(z_u^i, z_m^j) = h_{ij} + H_{ij}(z_u^i - \hat{z}_u^i) + J_{ij}(z_m^j - \hat{z}_m^j) \quad (3.86)$$

$$h_{ij} = f(\hat{z}_u^i, \hat{z}_m^j) \quad (3.87)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial f}{\partial z_u^i} | (\hat{z}_u^i, \hat{z}_m^j) \quad (3.88)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial f}{\partial z_m^j} | (\hat{z}_u^i, \hat{z}_m^j) \quad (3.89)$$

$$C_{ij} = H_{ij} C_u^i H_{ij}^T + J_{ij} C_m^j J_{ij}^T \quad (3.90)$$

C_u^i z_u^i 'nin kovaryans matrisi, C_m^j ise z_m^j 'nin kovaryans matrisi ise Mahalanobis mesafesinin karesi D^2 'ye dayalı olan X^2 testi kullanılarak uyumluluk çıkarılır [145]. Son olarak EKF ile veri füzyonu uygulanır.

$$W = C_u^i H_{ij}^T (H_{ij} C_u^i H_{ij}^T + J_{ij} C_m^j J_{ij}^T)^{-1} \quad (3.91)$$

$$\hat{z}_{um}^i = \hat{z}_u^i + W(-h_{ij}) \quad (3.92)$$

$$C_{um}^i = (I - WH_{ij}) C_u^i \quad (3.93)$$

BENZETİM VE SAHA ÇALIŞMALARI

4.1 Keşif Stratejileri ve SLAM Tekniklerine İlişkin Benzetim Çalışmaları

Keşif stratejileri ve SLAM tekniklerinin performanslarının incelenebilmesi için üç farklı platform üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu platformlar MATLAB, Player / Stage ve tez kapsamında geliştirilmiş olan *Cooperative Exploration Strategies* uygulamalarıdır. MATLAB üzerinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında farklı SLAM teknikleri işlem yükleri ve bellek gereksinimleri açısından değerlendirilmiştir. Player / Stage üzerinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında çoklu robot sistemlerinin keşif stratejilerindeki avantajları ortaya konmuştur. Farklı robotik keşif stratejilerinin performanslarını ve iletişim modellerinin keşif stratejilerindeki etkilerini ortaya koymak için Java dili ile *Cooperative Exploration Strategies* adlı bir uygulama geliştirilmiştir. Bu uygulama ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında üç farklı çoklu robot stratejisi, üç farklı iletişim modeli ile test edilmiştir.

4.1.1 MATLAB ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

MATLAB ile gerçekleştirilen çalışmalarda farklı SLAM teknikleri işlem yükü ve bellek gereksinimleri açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçüm gürültüsü ve hareket gürültüsünün haritalamada başarısındaki etkileri incelenmiştir.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirebilmek için Tim Bailey tarafından [39] geliştirilmiş olan EKF ve UKF benzetim ortamlarının kodları kullanılarak benzetim araçları

geliştirilmiştir. Orijinal benzetim araçlarında bulunmayan işlem süresi ve bellek yükü hesaplama özellikleri uygulamalara eklenmiştir.

Benzetim çalışmalarında EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM algoritmaları SLAM sürecindeki başarıları ve işlem sürelerine göre karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan dizüstü bilgisayarlara ait özellikler Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Farklı özelliklere sahip bilgisayarlar kullanılmasıdaki amaç mikroişlemci gücünün SLAM algoritmalarının işlem sürelerine olan etkilerini göstermektir. 1 ve 2 numaralı sistemlerde Windows 7 Home Basic işletim sistemi çalışmakta iken 3 numaralı sistemde ise Windows 7 Starter işletim sistemi çalışmaktadır.

Çizelge 4. 1 Benzetim çalışmalarında kullanılan sistemlerin özellikleri

Sistem	Mikroişlemci	Ana Bellek	Sabit Disk	Grafik Kartı
1	Intel Core I5 460M	3 GB	500 GB	ATI HD5650 - 1 GB
2	Intel Core2 Duo	2 GB	160 GB	ATI HD2600 -256MB
3	Intel Atom N455	2 GB	250 GB	Intel GMA 3150-Paylaşımlı

Çizelge 4.2 benzetim çalışmalarında kullanılan üç sistemin mikroişlemci güçlerini ve bağımsız organizasyonlar tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmalı değerlendirme testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Mikroişlemci karşılaştırmalı değerlendirme testlerinde puanların yüksek olması yüksek performans anlamına gelmektedir. Bu çizelgenin kullanılmasının amacı MATLAB üzerinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları ile mikroişlemci performansları arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır.

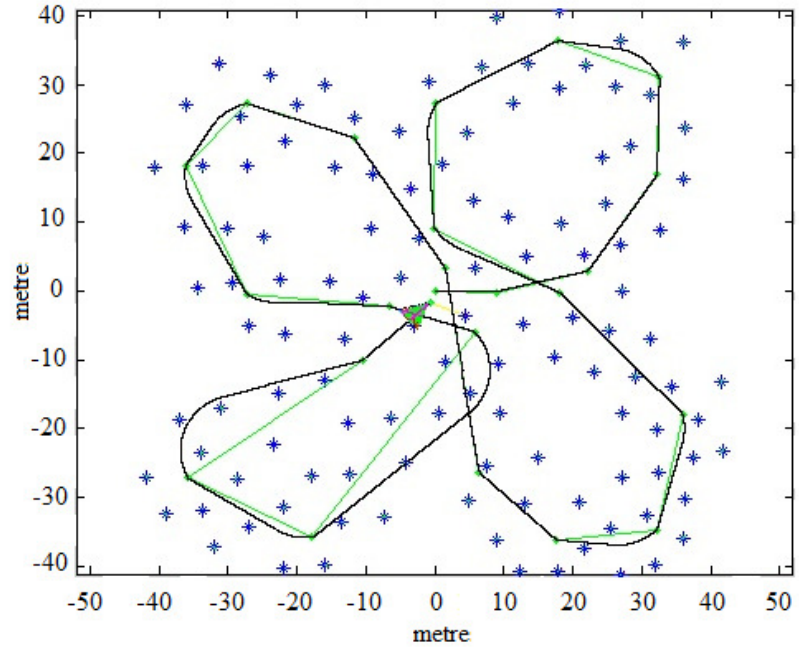
Benzetim ortamlarında iki adet noktalar seti kullanılmaktadır. Birinci noktalar seti yer işaretçilerinin konumlarını göstermektedir. İkinci noktalar seti ise robot güzergâhlarını göstermektedir. Bu benzetim ortamı EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM algoritmalarının benzetimini yapmak için kullanılmaktadır. Benzetim çalışmalarında robotların hızları 30 cm/sn’dir. Gözlemler arasındaki zaman aralığı 0.2 sn’dir. Ölçüm gürültüsü 0.1 m/sn ve

1''dir. Robotun hareketini belirleyen kontrol sinyalleri her 0.025 sn'de bir tekrar alınmaktadır. Değerlendirme stratejisi olarak kullanılan birinci haritanın dahili ortam benzetimi, ikinci haritanın ise harici ortam benzetimi yaptığı varsayımı kabul edilmiştir. Bu nedenle dahili ve harici ortamlarda kullanılan lazer mesafe bulucuların kabiliyetleri göz önüne alınarak dahili ortam benzetimi yapılan haritada gözlem mesafesi 8 m, harici ortam benzetimi yapılan haritada ise gözlem mesafesi 30 m olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de bulunan yeşil çizgiler, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te bulunan mavi çizgiler ile Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da bulunan siyah çizgiler robotun takip etmesi gereken yolları gösterir. Ayrıca, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te bulunan çemberler CEKF'nin yerel alanını gösterir.

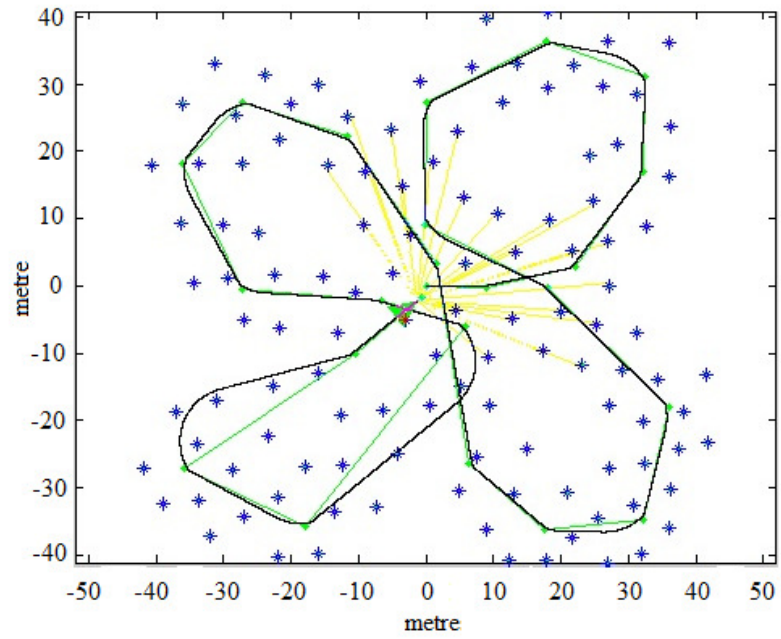
EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM algoritmaları her üç sistemde de iki farklı haritada uygulanmıştır. Her bir senaryo 5 kere uygulanmış ve toplamda 90 adet benzetim gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetimlerin ortalama sonuçları Çizelge 4.3'te listelenmektedir. Bu benzetimlere ilave olarak dahili ortam benzetimi için kullanılan harita ile 30 m maksimum gözlem mesafesi varsayımıyla üç farklı benzetim daha gerçekleştirilmiştir. Kullanılan algoritmaların karmaşıklık düzeyleri ile benzetim çalışmaları gerçekleştirilen sistemlerin mikroişlemcilerinin güçleri göz önüne alındığında Çizelge 4.3'te listelenen sonuçların tutarlı olduğu söylenebilir. CEKF'nin hesaplama karmaşıklığı EKF ve UKF'ye göre daha düşüktür. Elde edilen sonuçlar bu bilgiyi doğrulamaktadır. UKF'nin hesaplama karmaşıklığı CEKF ve EKF'ye göre daha yüksektir. Her üç sistemde elde edilen sonuçlar bu bilgiyi doğrulamaktadır.

Çizelge 4. 2 Mikroişlemci frekansları ve performans karşılaştırmaları [109]

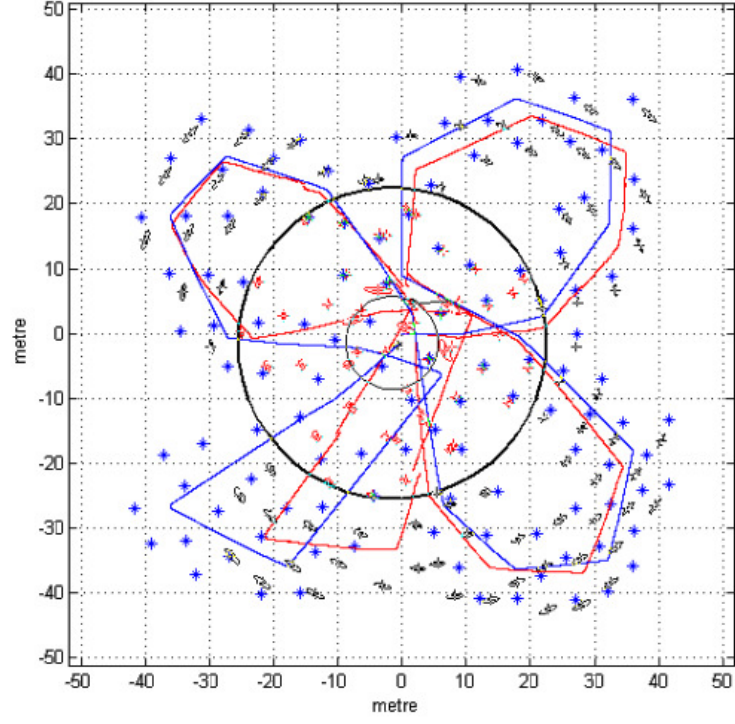
Mikroişlemci	Mikroişlemci Frekansı (MHz)	Test 1 - 3DMark06 CPU	Test 2 - Cinebench R10 Single	Test 3 - Cinebench R10 Multi
Intel Core i5 460M	2530-2800	2923	3096	7022
Intel Core2 Duo T5450	1660	1381	1504	2827
Intel Atom N455	1660	477	547	856



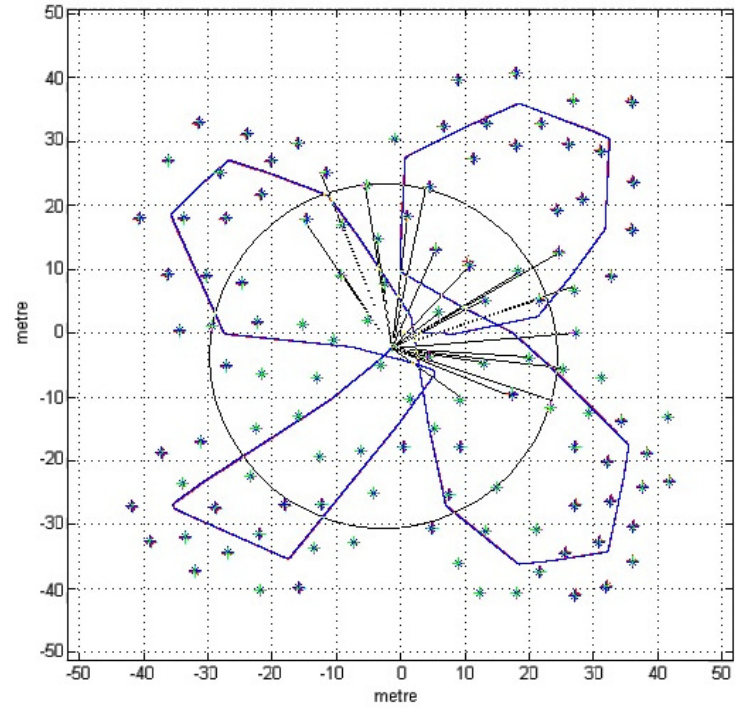
Şekil 4. 1 EKF tabanlı SLAM (1. Benzetim). Benzetim çalışmasında EKF tabanlı SLAM uygulanmaktadır. Maksimum gözlem mesafesi 8 m, robotun hızı ise 30 cm/sn'dir.



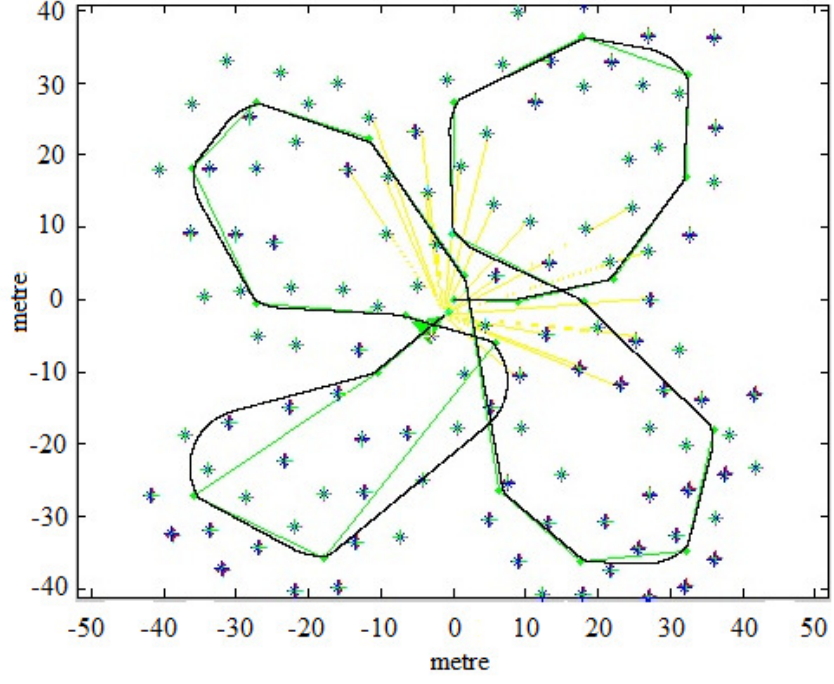
Şekil 4. 2 EKF tabanlı SLAM (2. Benzetim). Benzetim çalışmasında EKF tabanlı SLAM uygulanmaktadır. Maksimum gözlem mesafesi 30 m, robotun hızı ise 30 cm/sn'dir.



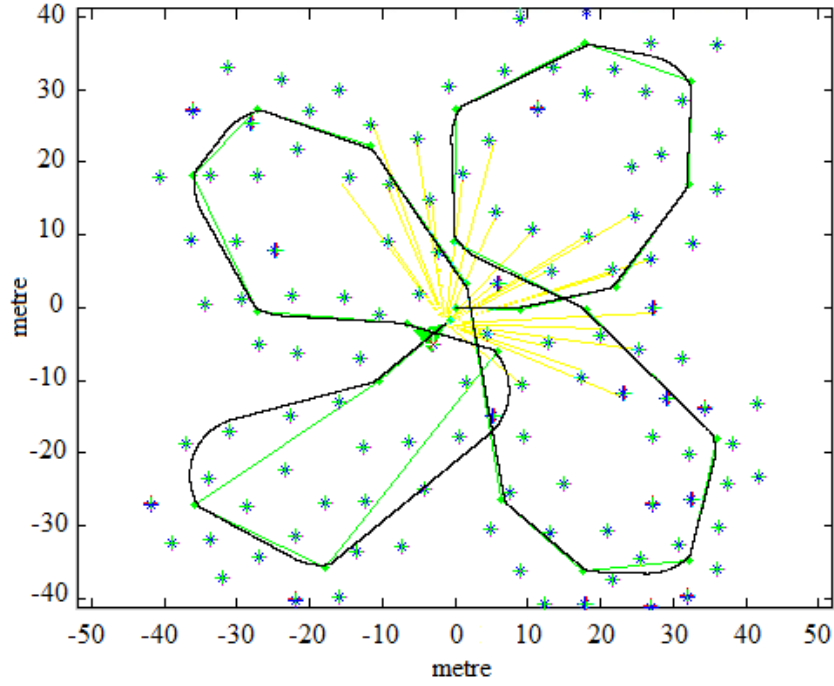
Şekil 4. 3 CEKF tabanlı SLAM (1. Benzetim). Benzetim çalışmasında CEKF tabanlı SLAM uygulanmaktadır. Maksimum gözlem mesafesi 8 m, robotun hızı ise 30 cm/sn'dir.



Şekil 4. 4 CEKF tabanlı SLAM (2. Benzetim). Benzetim çalışmasında CEKF tabanlı SLAM uygulanmaktadır. Maksimum gözlem mesafesi 30 m, robotun hızı ise 30 cm/sn'dir.



Şekil 4. 5 UKF tabanlı SLAM (1. Benzetim). Benzetim çalışmasında UKF tabanlı SLAM uygulanmaktadır. Maksimum gözlem mesafesi 8 m, robotun hızı ise 30 cm/sn'dir.



Şekil 4. 6 UKF tabanlı SLAM (2. Benzetim). Benzetim çalışmasında UKF tabanlı SLAM uygulanmaktadır. Maksimum gözlem mesafesi 30 m, robotun hızı ise 30 cm/sn'dir.

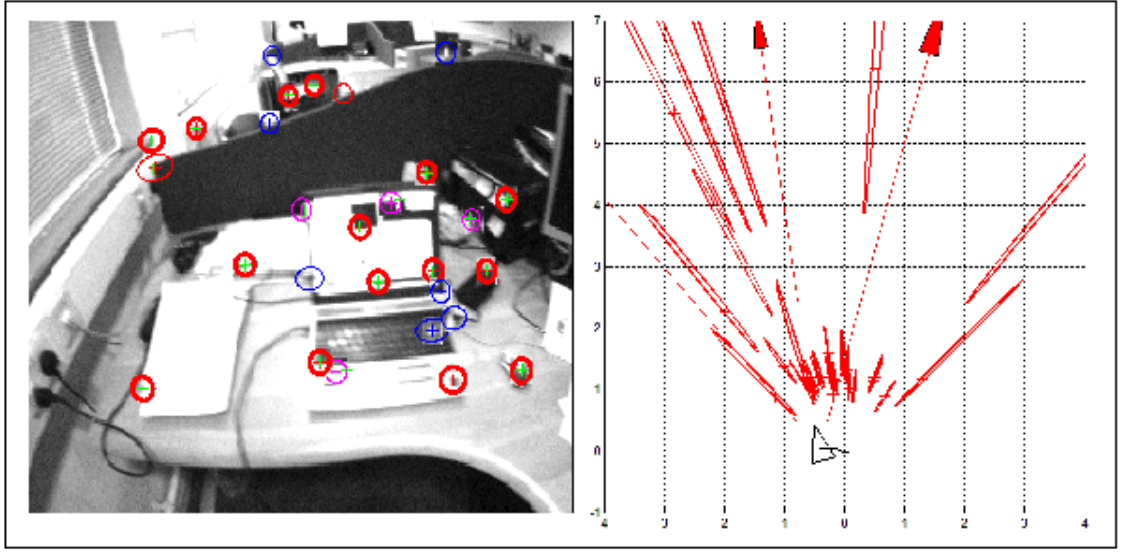
Çizelge 4.2’de gösterilen performans karşılaştırmalarının sonuçları göz önüne alındığında mikroişlemci gücündeki artışın işlem süresine tam olarak yansımadağı görülebilir. Örneğin Intel Atom N455 mikroişlemci 3DMark06 testinde 477 puana sahiptir. EKF tabanlı SLAM algoritması bu sistemde 1255 saniye sürmektedir. Intel Core I5 mikroişlemci ise bu testte 2923 puana sahiptir. Bu sistemde EKF tabanlı SLAM algoritması 538 saniye sürmektedir. Benzetim çalışmaları sırasında sistemlerin bellek kullanımları %100 olmadığı ve düşük grafik performansı bu benzetimlerde yeterli olduğu için mikroişlemci güçlerinin etkin olarak kullanılamadığı sonucuna varılabilir. Bu durum MATLAB’i de içeren birçok yazılım geliştirme ortamları için anlaşılabilir bir sonuçtur. Bağımsız organizasyonlar mikroişlemci performanslarını karşılıklı olarak kıyaslayabilmek için mikroişlemcilerin işlemci güçlerinin %100’ünü kullanmayı amaçlamaktadır. Ancak bu yazılım geliştirme platformlarının amacı değildir.

Çizelge 4. 3 EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM işlem süreleri

Sistem	EKF - Harita 1 (sn)	CEKF - Harita 1 (sn)	UKF - Harita 1 (sn)	EKF - Harita 2 (sn)	CEKF - Harita 2 (sn)	UKF - Harita 2 (sn)
1	538	132	1060	976	365	1721
2	872	218	1593	1310	496	2784
3	1255	334	3523	1945	945	5812

Benzetim çalışmalarında EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM yaklaşımları yaklaşık olarak aynı sonuçları vermiştir. Dahili ortam için kullanılan haritada maksimum gözlem mesafesi olarak kabul edildiğinde her üç SLAM yaklaşımı da yaklaşık olarak aynı sonuçları vermiştir. Dahili ortam benzetimlerinde gözlem mesafesi olarak 8 m kullanıldığında EKF ve UKF tabanlı SLAM benzetimlerinin sonuçları hemen hemen aynı olmasına rağmen CEKF tabanlı SLAM benzetiminde elde edilen harita biraz dönmüştür. Burada bazı kayıp gözlemlerin CEKF tabanlı SLAM kestiriminin başarısını düşürdüğü kanısına varılabilir.

Son benzetim çalışması ise her üç sistemin görsel SLAM performanslarını karşılaştırmak için gerçekleştirilmiştir. EKF Mono SLAM uygulaması bir tek mercekli kameradan elde edilen görüntü dizisini ve kamera kalibrasyonunu giriş verisi olarak alarak kestirilen kamera hareketlerini ve dikkat çekici nokta özelliklerinden oluşan seyrek bir haritayı çıkış olarak verir [151]. Algoritma 178 adım koşturulmuştur. Şekil 4.7 EKF Mono SLAM uygulamasını ve Çizelge 4.4 ise 178 adımın işlem süresini göstermektedir.



Şekil 4. 7 EKF Mono SLAM uygulaması

Çizelge 4. 4 EKF Mono SLAM işlem süreleri

Sistem No	İşlem Süresi (sn)
1	225
2	368
3	701

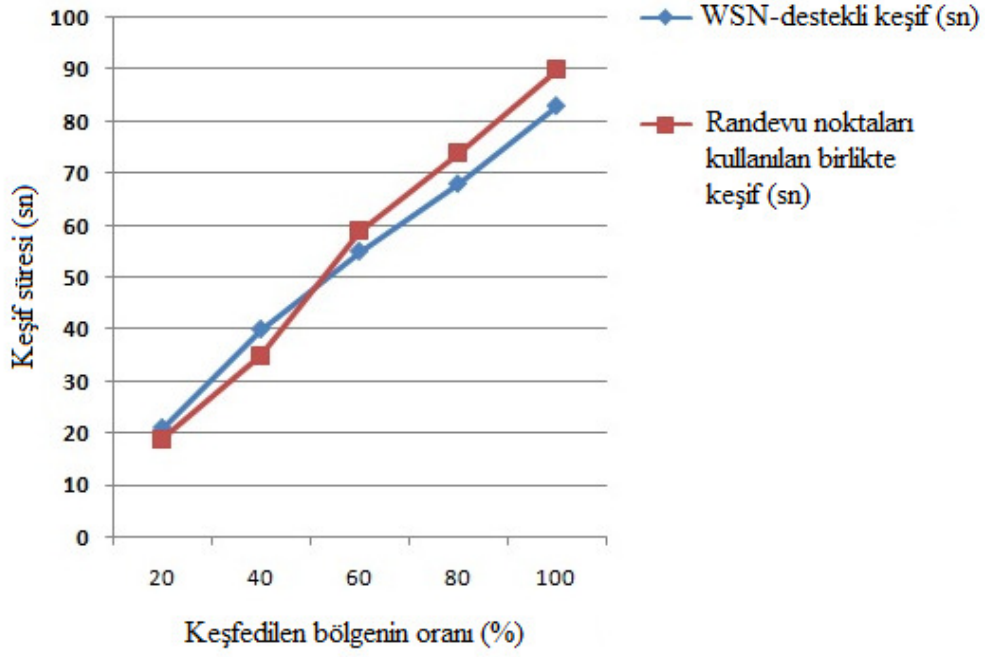
EKF, CEKF ve UKF tabanlı SLAM yaklaşımları ile EKF Mono SLAM uygulamasının sonuçları göz önüne alındığında SLAM uygulamalarının işlem zamanı gereksinimlerinin mikroişlemcilerin işlem güçlerine bağlı olduğu görülebilir. Elde edilen sonuçlar mikroişlemci test sonuçları ile de uyumludur. Mikroişlemci işlem gücündeki artışın

işlem zamanını azalttığı görülebilir. Harici ortam olarak kullanılan haritada dahili ortam için kullanılan haritadan daha fazla yer işaretçisi olmasına ve ikinci harita daha karmaşık olmasına rağmen EKF ve UKF tabanlı SLAM algoritmalarının aksine CEKF tabanlı SLAM yaklaşımın işlem zamanı fazla artmamıştır. Buradan CEKF'nin birçok doğal ve yapay yer işaretçisi bulunduran harici SLAM uygulamaları için daha uygun olduğu sonucuna varılabilir.

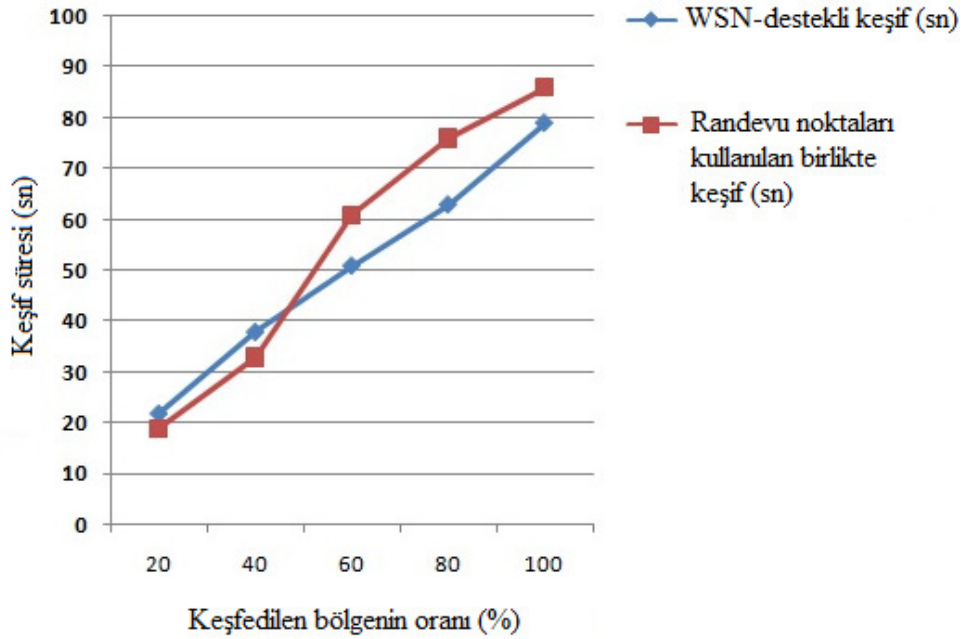
4.1.2 Player / Stage ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Player / Stage [152] platformunda gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında çoklu robotların keşif ve haritalama uygulamalarındaki avantajları ile robotik keşif uygulamalarında kablosuz algılayıcı ağlarının avantajlarının gösterilmesi amaçlanmaktadır. Player / Stage projesi gelişmiş bir robotik benzetim ve arabirim platformudur. Player / Stage Player sunucusu ile fiziksel robotların ya da Stage benzetim ortamındaki benzetilmiş robotların kontrolü gerçekleştirilebilmektedir.

Player / Stage platformundaki benzetim çalışmalarında ilk olarak kablosuz algılayıcı ağları kullanılan çoklu robot keşif stratejisi ile randevu noktaları kullanılan çoklu keşif stratejisinin performansları karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılacak ortam basit ve engeller bulunmayan bir ortam olduğu için basit statik iletişim modeli tercih edilmiştir. Her iki stratejide robotlar keşif işlemine aynı noktadan başlamaktadır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 benzetim çalışmalarının sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4. 8 İki robotla gerçekleştirilen keşif işlemi [155]



Şekil 4. 9 Üç robotla gerçekleştirilen keşif işlemi [155]

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, kablosuz algılayıcı ağlarının keşif stratejilerinde kullanılmasının robotların iletişim performansındaki kısıtlamalara bağlı

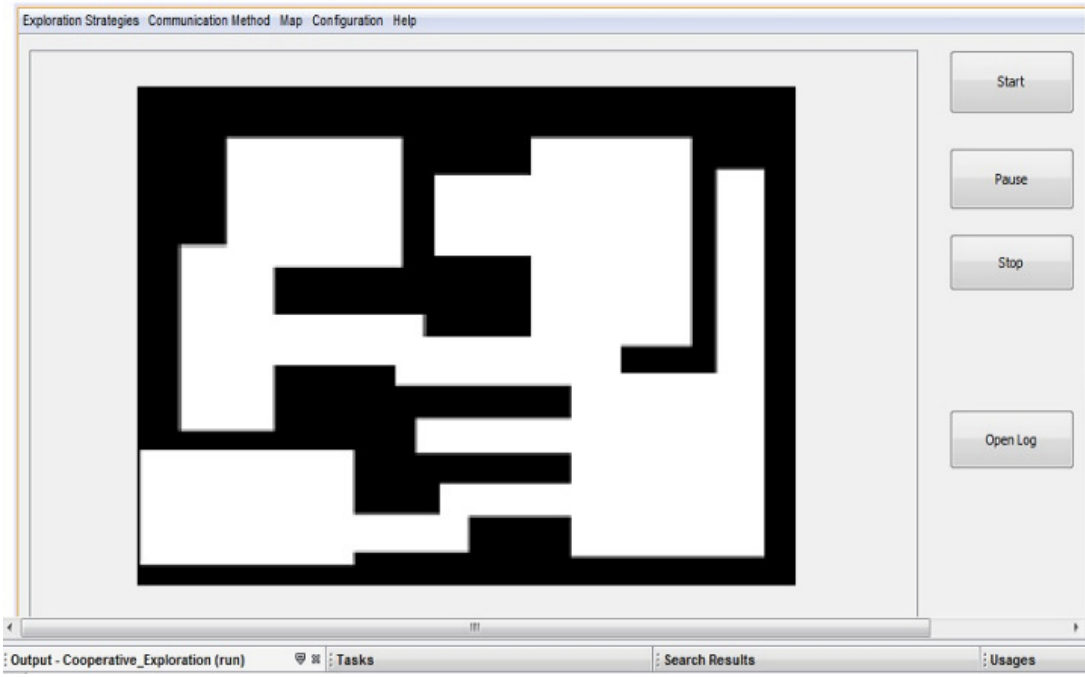
performans kayıplarının önüne geçilmesini sağladığını göstermiştir. Elde edilen diğer bir sonuç ise robot sayısındaki artışın keşif işlemi için harcanan süreyi kısalttığıdır.

4.1.3 Geliştirilen Uygulama ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Robotik keşif stratejilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla “Cooperative Exploration Strategies” adlı bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulama Java diliyle NetBeans IDE 6.9.1 platformunda geliştirilmiştir. NetBeans IDE ücretsiz, açık kaynak kodlu birleştirilmiş geliştirme platformudur. Uygulama MRESim [44] adlı uygulamanın kaynak kodları kullanılarak Java dilinde geliştirilmiştir. MRESim’den farklı olarak geliştirilen uygulama piyasa prensiplerine dayalı keşif stratejisinin de benzetimini yapabilmektedir. Uygulama statik çember, görüş açısı ve yayılma modeli iletişim modellerini desteklemektedir. Uygulamanın ekran görüntüsü Şekil 4.10’da verilmektedir. Geliştirilen uygulamanın önemli özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Hareket gürültüsü ve ölçüm gürültüsü SLAM sürecine dahil edilebilmektedir.
- İstenilen ortamlarda benzetim yapılabilir.
- Robot sayısı, özellikleri, algılayıcı ölçüm mesafesi ayarlanabilmektedir.
- Farklı iletişim yöntemleri ve farklı keşif stratejilerinin benzetimi yapılabilir.
- Sıralı kayıt yapısında, işlem adımları kayıt altına alınmakta ve böylece göreceli performans analizi yapılabilir.

Uygulamada keşif işlemi gerçekleştirilecek ortamlar iki boyutlu PNG formatındaki görüntü dosyaları ile temsil edilmektedir. Ortam doluluk ızgaraları temelli haritalar ile gösterilmekte olup her bir hücre boş ya da dolu (engel) durumunda olabilmektedir. Gerçek dünyanın uygulama içinde temsilini gerçekleştirebilmek için bir parametreler dizisi kullanılmaktadır. Parametreler dizisi varsayımsal olsa bile, farklı keşif stratejilerinin performanslarının değerlendirilebilmesi açısından faydalıdır. Ortamı temsil eden görüntü dosyalarında bulunan beyaz bölgeler, ortamda keşfedilecek olan bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 4. 10 Cooperative Exploration Strategies uygulaması

Uygulama bir senaryo ile çalıştırıldığında, robotlar keşif işleminin her bir adımında bir sonraki adımda nereye doğru gideceklerinin kararını verir. Daha sonra robotlara mesafe verisi (algılayıcı ölçümü) sağlanır ve birbirlerinin iletişim mesafesinde bulunan robotlar arasında mesaj alışverişi gerçekleşir. Bütün veriler kayıt altına alınarak uygulamanın kullanıcı arayüzü güncellenir.

Benzetimi gerçekleştirilen robotun her bir adımındaki yeni konumunda, robota sağlanan algılayıcı verileri, lazer mesafe bulucu verileri şeklinde olup 180 derece görüş açısında 1 derecelik çözünürlükteki 181 ölçüm değeridir. Robot bu sağlanan verileri kullanarak ortamdaki engelleri tespit eder. Birbirine yakın ve algılayıcı ölçüm mesafesi sınırının altında bulunan noktalar engel olarak kabul edilir. Robot elde ettiği verileri doluluk ızgaraları tabanlı olan bir haritada saklar. Robotlar birbirlerinin iletişim mesafesinde bulunurken yerel haritalarını paylaşır. Keşif işlemindeki bütün robotlar gezeinge planlaması sırasında A* algoritmasını kullanır.

Keşif stratejilerinde gereken işlem zamanı ile mikroişlemci gücü arasındaki ilişkiyi gösterebilmek için farklı özelliklerde üç adet dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Çizelge 4.2 benzetim çalışmasında kullanılan sistemlerin özelliklerini, Çizelge 4.3 ise bu sistemlerin karşılaştırmalı performans testlerini listelemektedir. 1 ve 2 numaralı sistemlerde

Windows 7 Home Basic işletim sistemi, 3 numaralı sistemde ise Windows 7 Starter işletim sistemi çalışmaktadır. Mikroişlemci karşılaştırmalı değerlendirme testlerinde puanların yüksek olması yüksek performans anlamına gelmektedir. Bu çizelgenin kullanılmasının amacı gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları ile mikroişlemci performansları arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır.

Benzetim çalışmalarında Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42]), Rol Temelli Yaklaşım (Hoog vd. [44]) ve Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşım (Zlot vd. [43]) stratejileri statik çember, görüş açısı ve yayılma modeli iletişim yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışmalarında belirtilen üç farklı keşif stratejisi keşif performanslarına ve işlem zamanı gereksinimlerine göre karşılaştırılmıştır. Bütün stratejiler aynı ortamda aynı parametreler kullanılarak uygulanmıştır. Şekil 4.11 keşif işlemi gerçekleştirilecek olan ortamı göstermektedir. Ortam 800x600 piksel boyutlarında PNG formatında bir görüntüdür. Benzetim çalışmalarına ilişkin parametreler aşağıda sıralanmıştır:

- Toplam robot sayısı: 4, keşif işleminden sorumlu robot sayısı: 2,
- Ölçüm mesafesi: 30 m,
- İletişim mesafesi: 100 m.



Şekil 4. 11 Keşif işlemi uygulanacak ortam

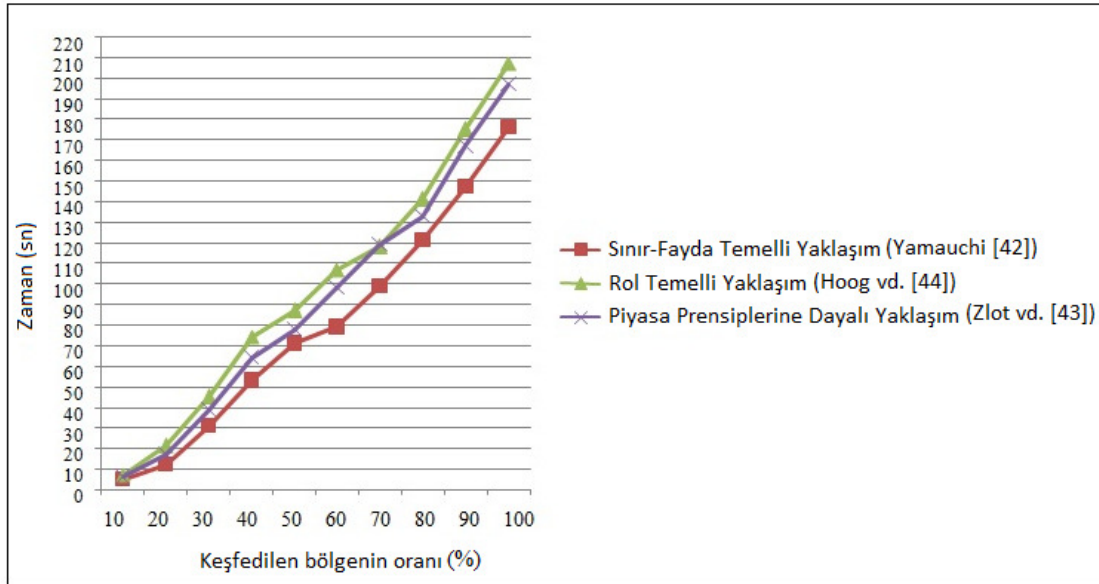
Benzetim çalışmalarının sonuçları Çizelge 4.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 5 Benzetimi yapılan keşif stratejilerinin işlem süreleri

Strateji ve İletişim Modeli	Sistem 1 (sn)	Sistem 2 (sn)	Sistem 3 (sn)
Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42]) – İletişim Modeli: Statik Çember	195	382	891
Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42]) – İletişim Modeli: Görüş Açısı	189	377	849
Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42]) – İletişim Modeli: Yayılma Modeli	176	355	778
Rol Temelli Yaklaşım (Hoog vd. [44]) – İletişim Modeli: Statik Çember	251	483	1163
Rol Temelli Yaklaşım (Hoog vd. [44]) – İletişim Modeli: Görüş Açısı	306	552	1271
Rol Temelli Yaklaşım (Hoog vd. [44]) – İletişim Modeli: Yayılma Modeli	207	391	959
Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşım (Zlot vd. [43]) – İletişim Modeli: Statik Çember	234	421	1024
Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşım (Zlot vd. [43]) – İletişim Modeli: Görüş Açısı	229	407	981
Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşım (Zlot vd. [43]) – İletişim Modeli: Yayılma Modeli	197	386	903

Şekil 4.12 benzetim çalışmasındaki stratejilerin iletişim modeli olarak yayılma modeli kullanılması durumundaki performanslarını göstermektedir. Benzetim çalışmasındaki sistemlerden 1 numaralı sistemin en hızlı, 3 numaralı sistemin ise en yavaş olduğu göz önüne alındığında; Sınır-fayda temelli keşif stratejisinden elde edilen sonuçlarla sistem performanslarının uyumlu olduğu görülmektedir. Diğer stratejilerde de hem yayılma modeli hem de diğer iletişim modelleri kullanılması durumunda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, Çizelge 4.2’de listelenen bağımsız performans testlerinin sonuçları göz önüne alındığında merkezi işlem gücündeki artışın harcanan işlem süresindeki azalmaya tam olarak yansımadağı görülebilir. Örneğin 1 numaralı sistemin 3DMark06 CPU test sonucu 2923 puan, 2 numaralı sistemin ise 3DMark06 CPU test sonucu 1381 puandır. Sınır-fayda temelli yaklaşım stratejisinde 1 numaralı sistemin toplam işlem süresi 195 saniye, 2 numaralı sistemin ise 382 saniyedir. Benzetim çalışmaları sırasında bellek kullanımları %100 olmadığı ve düşük grafik performansı benzetim çalışmaları için yeterli olduğundan mikroişlemci güçlerinin tam olarak kullanılmadığı sonucuna

varılabilir. Bunun nedeni yazılım geliştirme platformlarının birinci önceliğinin mikroişlemci gücünün verimli kullanımı olmamasıdır.



Şekil 4. 12 Keşif oranlarının karşılaştırılması

Keşif stratejilerini işlem zamanları açısından karşılaştırmayı amaçlayan bu benzetim çalışmasının sonuçlarına göre, en hızlı robotik keşif stratejisinin Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42]), en yavaşının ise Rol Temelli Yaklaşım (Hoog vd. [44]) olduğu sonucuna varılabilir. Benzer sonuçlar Hoog vd. tarafından [44] te elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında, Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşım (Zlot vd. [43]) stratejisinde, keşif stratejisinde katedilen mesafenin minimumda tutulması amaçlandığı için bu strateji sınır-fayda temelli yaklaşımdan daha çok işlem zamanı gerektirmiştir. Zaman temelli maliyetlendirme yapılırsa bu strateji daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Sınır-fayda temelli yaklaşım en hızlı robotik keşif stratejisi olarak gözüксе bile bu yöntemde robotlar arasındaki koordinasyon sınırlı olup robot sayısındaki artış performansa tam olarak yansımamaktadır. Ayrıca bu stratejide iletişim azlığından dolayı aynı bölgeler farklı robotlar tarafından tekrar keşfedilebilmektedir [43].

4.1.4 Elde Edilen Sonuçlar Hakkında Değerlendirmeler

Gerçekleştirilen birinci benzetim çalışmasında, SLAM teknikleri için gereken işlemci zamanı ile sistem performansı arasında bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, farklı SLAM tekniklerinin performansları incelendiğinde CEKF tekniğinin dış ortam uygulamaları için daha uygun olduğu görülmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak incelendiğinde, mikroişlemci gücü ve bellek gibi sistem performansına direkt etki eden unsurların SLAM teknikleri için gereken işlem süresini tam olarak etkilemediği görülmektedir. Mikroişlemci performansındaki artış SLAM işlem süresinde aynı ölçüde kısaltmaya yok açmamaktadır. Buradan sistem performanslarının tam olarak kullanılamadığı ve boşta olan mikroişlemci gücünün ve sistem belleğinin farklı süreçlere ayrılabilceği ya da dolaylı olarak SLAM performansının arttırılması için kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Çoklu algılayıcı füzyonu tekniklerinin dezavantajı olan işlem yükü ve bellek gereksinimindeki artışın birçok platform için sorun teşkil etmeyeceği ve performans artışı sağlayacağı ortaya çıkmaktadır.

Gerçekleştirilen ikinci benzetim çalışmasında, robotik keşif stratejilerinin ortak gereksinimi olan randevu noktalarında buluşma zorunluluğunun nasıl ortadan kaldırılabilceği üzerine bir yaklaşım ortaya konmuştur. Kablosuz algılayıcı ağlarının iletişim ortamı olarak kullanılması durumunda, robot takımları arasında sürekli iletişim sağlanmasının mümkün olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, robot sayısındaki artışın keşif süresini kısalttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında sürekli iletişimin mümkün olduğu bu tür senaryolarda, çoklu algılayıcı füzyonunun dağıtık olarak gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu da çoklu algılayıcı füzyonu tekniklerinin çoklu robot keşif stratejileri ve keşif stratejilerinin bir parçası olan çoklu robot SLAM tekniklerinde kullanılmasının mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen üçüncü benzetim çalışmasında, üç farklı çoklu robot keşif stratejisi arasında farklı iletişim modelleri kullanılarak karşılaştırmalı performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42])'ın en hızlı çoklu robot keşif stratejisi olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar robot sayısındaki artışın keşif süresini kısalttığını da göstermektedir. Çoklu robot keşif stratejilerinin temelinde her bir robotun kendi hedef bölgesini keşfetmesi

ve yerel SLAM sürecini gerçekleştirilmesi yattığı için, çoklu algılayıcı füzyonu teknikleri çoklu robot sistemleri kullanılan uygulamalarda etkin bir biçimde kullanılabilir.

4.2 Çoklu Algılayıcı Füzyonunun Kullanımına İlişkin Benzetim Çalışmaları

Çoklu algılayıcı füzyonunun SLAM uygulamalarındaki etkilerini incelemek için USARSim üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. USARSim farklı robot ve algılayıcı türlerini desteklediği için tercih edilmiştir.

4.2.1 USARSim ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

USARSim [13] üzerinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, çoklu algılayıcı füzyonu tekniklerinin robotik haritalama uygulamalarındaki avantajlarının gösterilmesi amaçlanmıştır. USARSim ile iletişim MATLAB üzerinden gerçekleştirilmiştir. USARSim “Unreal Tournament” adlı oyunun yapısı üstüne kurulu olan bir benzetim platformudur. USARSim ticari ve deneysel robot modelleri, algılayıcı modelleri ve ortam modelleri içerir. Bunlar yanında harici kontrol desteği sağlayan sürücüler içerir. USARSim platformunda robotlar Player/Stage, MOAST, Pyro gibi farklı robot kontrol ve benzetim yazılımlarıyla kontrol edilebilmektedir. Gerçek saha çalışmalarında kullanılması planlanan “Corobot” USARsim tarafından desteklenmemektedir.

Benzetim çalışmasında DM-USAR_red adlı ortamda bir adet Pioneer P2-DX robot kontrol edilmiş ve SLAM işleminin gerçekleştirmek için yönetilmiştir. Şekil 4.13 Pioneer P2-DX modeli robotun gelişmiş bir versiyonu olan Pioneer P3-DX modeli robotu göstermektedir. Benzetim ortamındaki robot ile aynı ortamda iki benzetim çalışması gerçekleştirilerek robotun soncul değer belirsizlikleri incelenmiştir.

USARSim platformunda algılayıcı özelliklerinin gerçek modellerle aynı olmasına dikkat edilmiştir. Pioneer P2-DX robot üzerinde bulunan Sick LMS 200 lazer tarayıcı 180° tarama açısı, 1-0.25° arası açısal çözünürlük, 13-53 ms arası cevap süresi, 10 mm çözünürlük ve +/- 15 mm sistematik hata özelliklerine sahiptir ve benzetim ortamında bu değerler dikkate alınmıştır [14], [17]. Robot üzerinde bulunan PTZ kamera 26x optik ve 12x dijital yakınlaştırma özellikli, otomatik odaklanabilen renkli kameradır [18].

MATLAB üzerinde geliştirilen kontrol uygulaması üzerinden USARSim platformu ile bağlantı kurulmuştur. EKF tabanlı SLAM uygulaması MATLAB üzerinde yazılmıştır. USARSim platformundan elde edilen algılayıcı ölçümleri SLAM algoritmasına giriş olarak verilmiştir. Ayrıca USARSim platformundan elde edilen robot pozisyonu ve açısı da hata değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

İlk benzetim çalışmasında ortam algılaması için lazer tarayıcı, ikinci benzetim çalışmasında ise robot üzerinde bulunan kameradan elde edilen görüntüler ile lazer tarayıcı kullanılarak çoklu algılayıcı füzyonu gerçekleştirilmiştir. Her iki benzetim 20 kez yürütülmüştür. Çoklu algılayıcı füzyonu yönteminde lazer mesafe bulucu ve kamera kullanılacağı için eşleştirme aşamasında her iki algılayıcının özellikleri göz önüne alınmıştır. Lazer tarayıcı ile edilen ölçümler genellikle çok başarılı sonuçlar verdiği için önce lazer mesafe bulucudan gelen gözlemler daha sonra kameradan gelen görüntülerden kenar tespit yöntemiyle elde edilen dikey çizgiler işleme alınmıştır. Görüntülerden kenar tespiti Canny, Sobel, Prewitt gibi farklı operatörlerle yapılabilmektedir. Bu çalışmada Prewitt operatörü tercih edilmiştir. Yatay çizgilerin eşleştirilmesi en küçük gözlem belirsizliği dikkate alınarak yapılmıştır. Bu yaklaşım özellikle küçük ve gerçek olmayan veya belirsiz bölümlerdeki eşleştirme başarısını artırmıştır. Tahmin ve gözlem adımlarındaki dikey çizgilerin eşleştirilmesinde filtrenin başarısını arttırmak için yegânelik prensibi kullanılmıştır. Dikey çizgilerin eşleştirilmesinde başarılı sonuçlar veren Mahalanobis mesafesi kullanılmıştır [160]. Lazer tarayıcıdan gelen veriler taranılan açılardan gelen mesafe bilgileri olup ölçüm sıklığı çok yüksek tutulmazsa işlem yükü düşüktür. Kamera verileri olan JPEG formatındaki resim dosyalarının işlenmesi zaman almaktadır. SLAM algoritmalarında kamera kullanılması durumunda işlem yükünün düşük tutulması için, hem gerçek saha çalışmalarında hem de benzetim platformlarında robotlar maksimum hızlar yerine düşük hızlarda ilerletilmektedir.

Konumsal sapma değerlerinin ortalamaları ile açısal sapmaların ortalaması Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir. USARSim platformundan elde edilen gerçek robot pozisyonu ile kestirilen pozisyonlar arasındaki fark hesaplanarak grafikler elde edilmiştir. Grafiklerdeki mavi renkli çizgiler lazer tarayıcı kullanılması durumunda elde edilen hata sınırlarının ortalamalarını, kırmızı renkli çizgiler ise çoklu algılayıcı füzyonu

kullanılması durumunda elde edilen hata sınırlarını göstermektedir. Çizelge 4.6 genel hata sınırlarının ortalamalarını listelemektedir. Şekil 4.14’de gösterilen benzetim ortamı karmaşık olmamasına rağmen USARSim platformundaki robotun MATLAB üzerinden kontrolü dolayısıyla benzetim 400 saniye civarında sürmüştür. Grafiklerde ise sadece ilk 80 saniye gösterilmiştir.

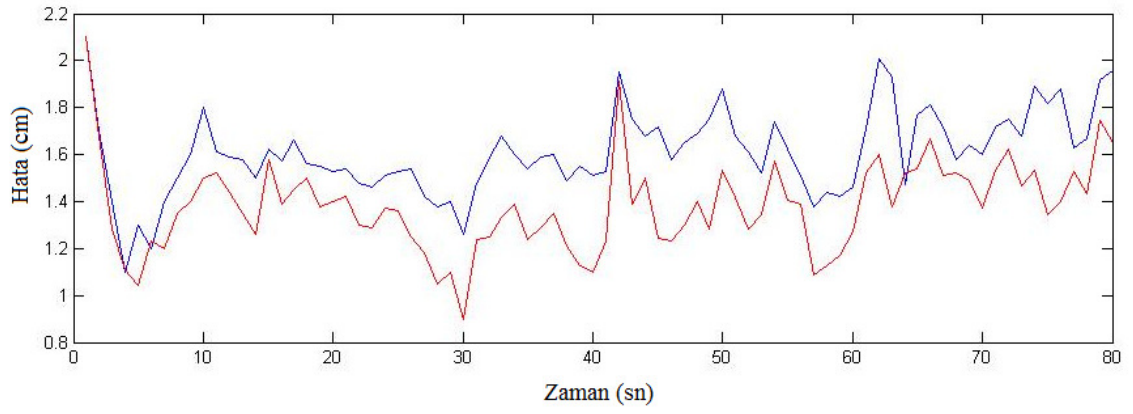


Şekil 4. 13 Pioneer P3-DX robot

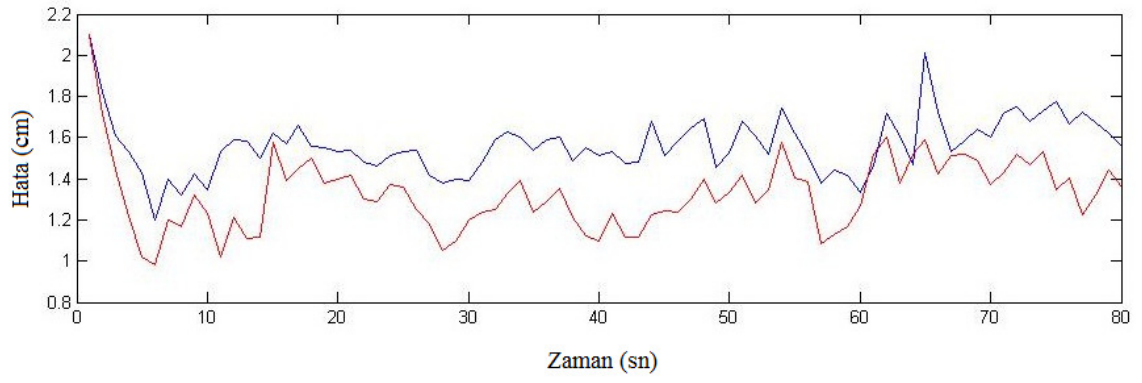


Şekil 4. 14 DM-USAR_red ortamı

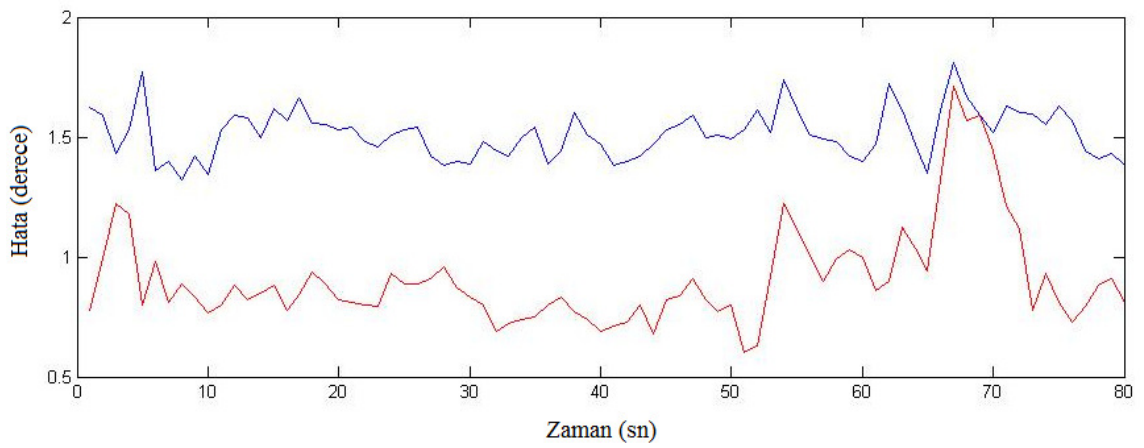
Elde edilen sonuçlar çoklu algılayıcı füzyonu kullanılan SLAM işleminde tek bir lazer tarayıcı ile gerçekleştirilen SLAM işlemine göre daha başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Benzetim çalışmasındaki hata sınırlarının literatürdeki benzer çalışmalara göre daha yüksek olmasının nedenlerinden biri benzetim ortamının algılayıcı kalibrasyonuna izin vermemesidir.



Şekil 4. 15 Ortalama hata sınırları (x (cm))



Şekil 4. 16 Ortalama hata sınırları (y (cm))



Şekil 4. 17 Ortalama hata sınırları (açı (°))

Çizelge 4. 6 Genel hata sınırları (USARSim benzetiminde elde edilen)

Hata sınırlarının ortalama değeri	Lazer tarayıcı kullanılarak konumlandırma	Çoklu algılayıcı füzyonu ile konumlandırma
X	1.528 cm	1.277 cm
Y	1.572 cm	1.134 cm
Açı	1.61°	0.97°

4.2.2 Elde Edilen Sonuçlar Hakkında Değerlendirmeler

Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar sıralı algılayıcı füzyonu tekniğine dayanan çoklu algılayıcı füzyonunun SLAM sürecinde konumlandırma hatalarını azalttığını göstermektedir. Sıralı algılayıcı füzyonu uygulanmasının nedeni lazer ve kamera görüntülerinin işlenmesi için gereken zaman arasındaki farktır. Kamera görüntülerinin işlenmesi için gereken işlem yükü ve bellek gereksinimi lazer ölçümlerine göre daha fazladır. Benzetim çalışmasındaki robotun konumlandırma hatalarındaki azalma SLAM sürecinin başarısının arttığının işaretidir. Bunun nedeni konumlandırmadaki ufak bir hata SLAM sürecinde gitgide daha büyük bir konumlandırma hatasına yol açacaktır.

Literatürdeki çalışmalar, SLAM süreçlerinde açısal hatanın yatay ve dikey eksenlerdeki hatalara göre daha büyük etkisi olduğunu göstermektedir. Benzetim çalışmaları çoklu algılayıcı füzyonunun açısal hatayı oldukça azalttığını ortaya koymuştur.

4.3 Saha Çalışmaları ve Elde Edilen Sonuçlar

Saha çalışmalarında kullanılan Corobot otonom gezgin robot (Şekil 4.18) üzerinde stereo kamera bulunmadığı için, çoklu algılayıcı füzyonu süreçleri bu algılayıcı türüne uygulanamamıştır. 2D lazer tarayıcı, ses üstü mesafe ölçer ve tek mercekli kamera kullanılarak tek bir algılayıcı ile SLAM ve çoklu algılayıcı ile SLAM süreçleri uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen saha çalışmalarında iki adet Corobot kullanılmıştır. Sürtünme ve kayma gibi olumsuz faktörleri minimuma indirmek için çalışmalar öncesinde laboratuvar zemini temizlenmiştir. Robotlara ait teknik bilgiler Çizelge 4.7’de listelenmektedir.

Çizelge 4. 7 Corobot otonom gezgin robotların teknik özellikleri [12]

Boyutlar	33x31x26 cm
Maksimum Hız	46 cm /sn
Pil Dayanma Süresi	2.5 saat (ortalama)
Kol Uzunluğu/Serbestlik Derecesi	36 cm / 4
İşlemci	Intel ATOM N330
Bellek	4 GB
Disk Alanı	160 GB SSD
İşletim Sistemi	Windows 7 ve Linux
Programlama Desteği	Robot Operating System (ROS)
Kamera	2MP Renkli
Lazer Mesafe Bulucu	Hokuyo URG-04LX [29], [162]
Ses Üstü Mesafe Bulucu	Maxbotix XL-MaxSonar-EZ1 [163]
Tampon Sensörleri	Ön ve Arka
Motor Kontrolcüsü	PhidgetMotorControl HC [164]

Saha çalışmalarına ilişkin parametreler aşağıda sıralanmıştır:

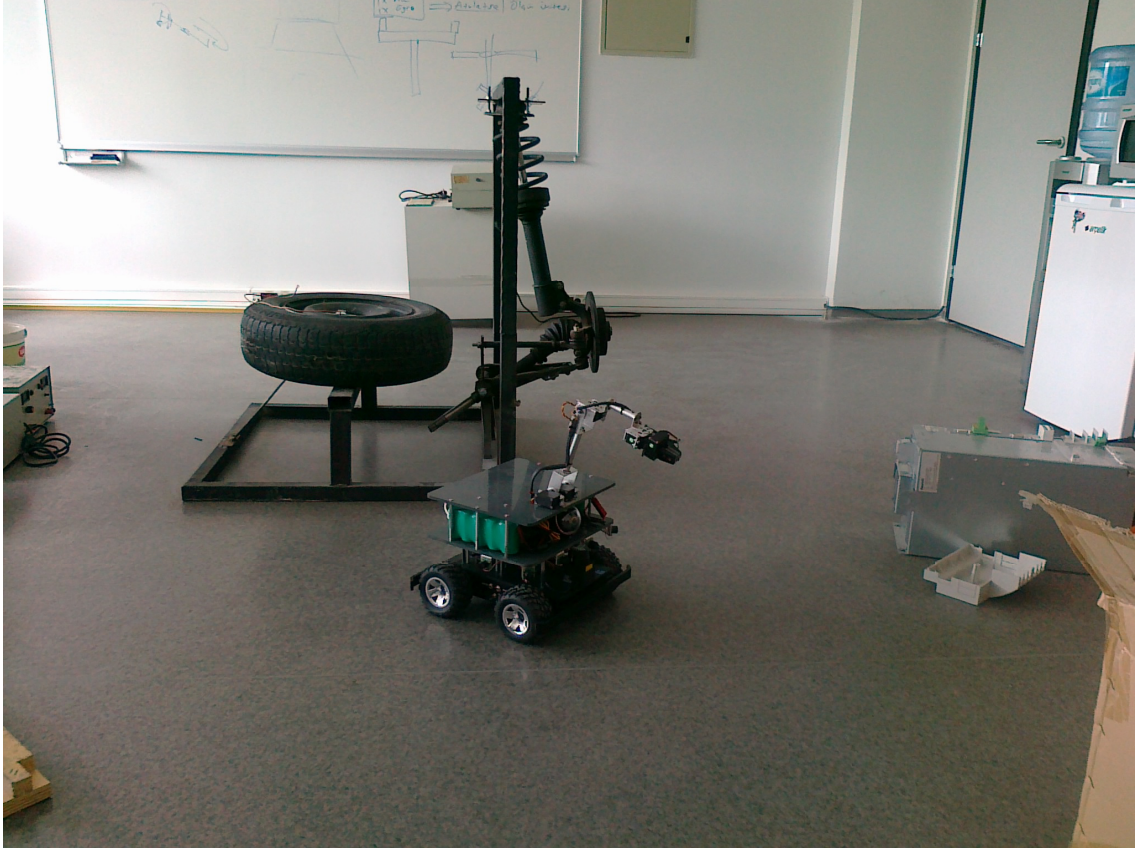
- Çalışma alanı: 42 m²,
- Robotun çalışma süresi: 10 dk,
- Robot hızı: 10 cm/sn,
- Ölçüm sıklığı: Lazer mesafe bulucu için 0.2 sn, ses üstü mesafe bulucu için 0.2 sn, tek mercekli kamera için 2 sn,
- Lazer mesafe bulucu ölçüm mesafesi: 60-4095 mm (240°'lik tarama bölgesi, 0.36° açısal çözünürlük),
- Lazer mesafe bulucunun doğruluğu: 60-1000 mm arasında ±10 mm, 1000-4095 mm arasında ölçümün %1'i kadar sapma,
- Ses üstü mesafe bulucu ölçüm mesafesi: 0-765 cm (1 cm çözünürlük),

- Ses üstü mesafe bulucunun doğruluğu: Yapılan deneysel çalışmalarda ortalama olarak 2 cm sapma gerçekleştiği görülmüştür.

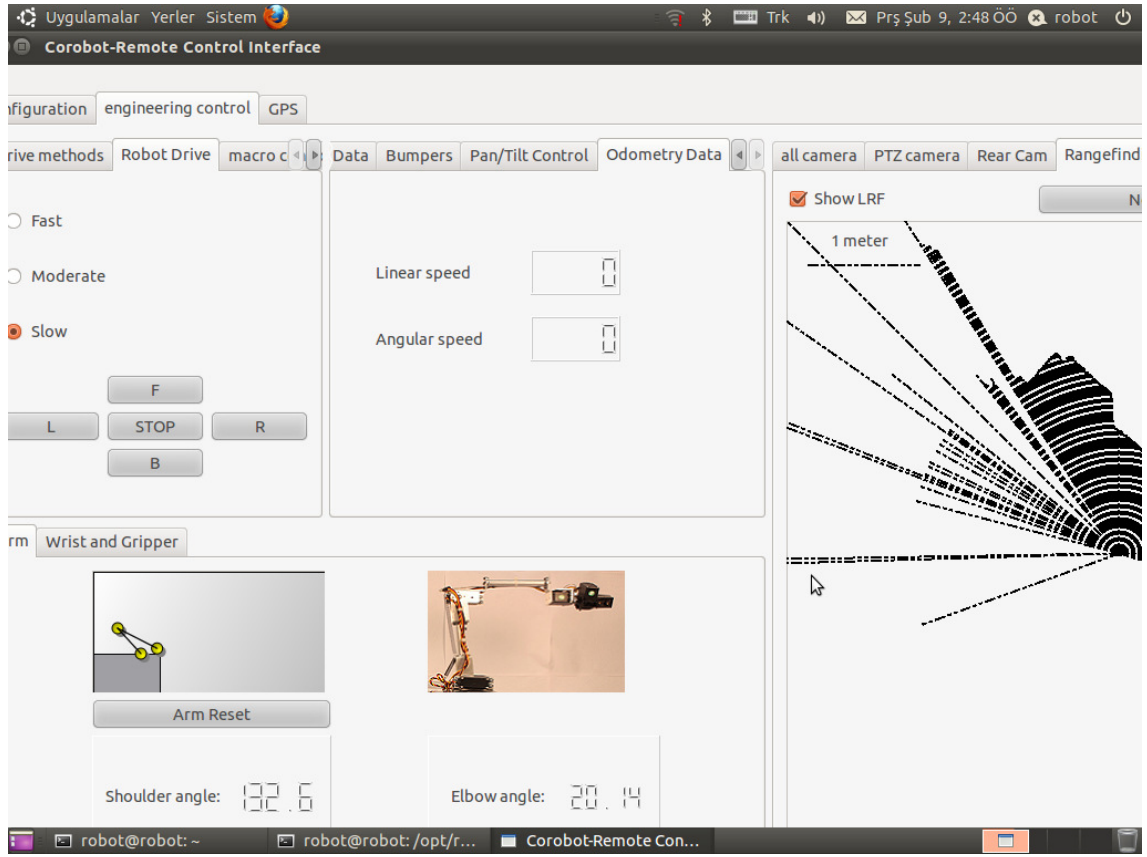
Her iki robot üzerinde Windows 7 ve Ubuntu işletim sistemleri çalışmaktadır. Windows 7 üzerinde yazılım geliştirilmesi için C API'leri kullanılmaktadır. Ubuntu işletim sistemi üzerine Robot İşletim Sistemi (ROS) kurulmuştur. ROS aygıt sürücüleri, donanım soyutlama katmanları, mesaj iletim fonksiyonları, paket yönetim kabiliyetleri, kütüphaneler ve araçlar sağlayarak robotik uygulamalarının geliştirilmesini kolaylaştırdığı gibi standartlaştırılmasına da yardımcı olur [47]. 2D lazer tarayıcı ile gerçekleştirilen EKF tabanlı SLAM uygulamasına ait ekran görüntüsü Şekil 4.22'de verilmektedir.



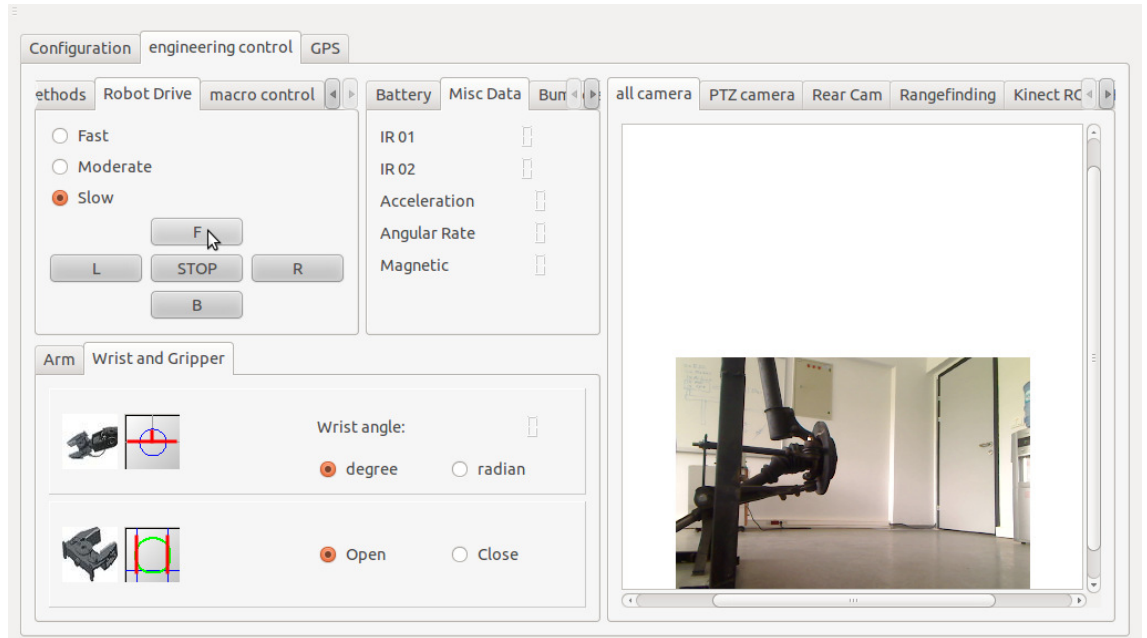
Şekil 4. 18 Corobot otonom gezgin robot platformu



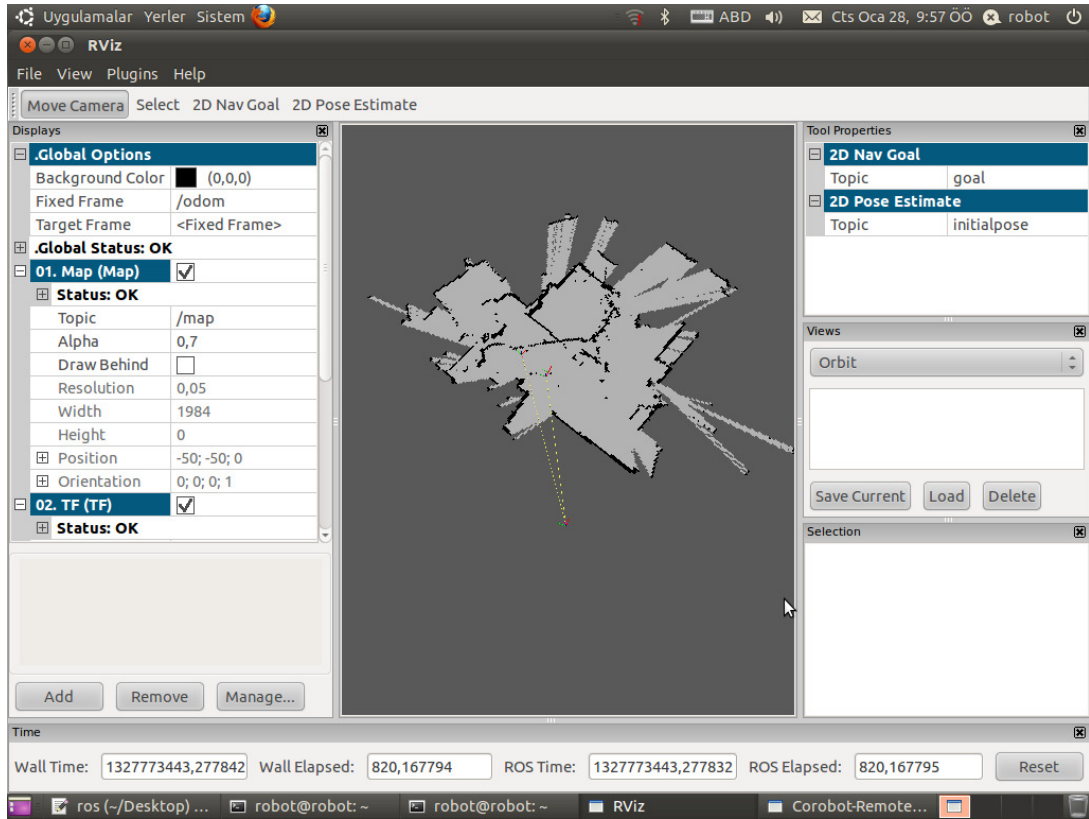
Şekil 4. 19 Laboratuvar ortamında SLAM sürecinin gerçekleştirilmesi



Şekil 4. 20 Robotun SLAM sürecine başlarken elde ettiği LRF verileri



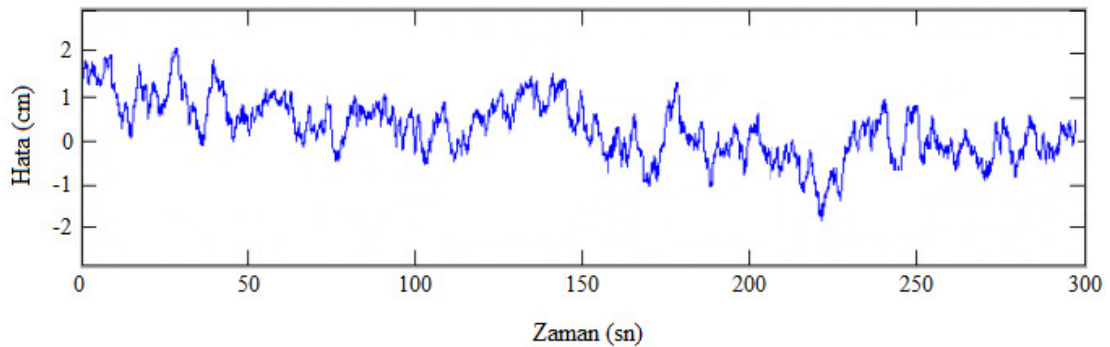
Şekil 4. 21 Robotun SLAM sürecinde elde ettiği bir kamera görüntüsü



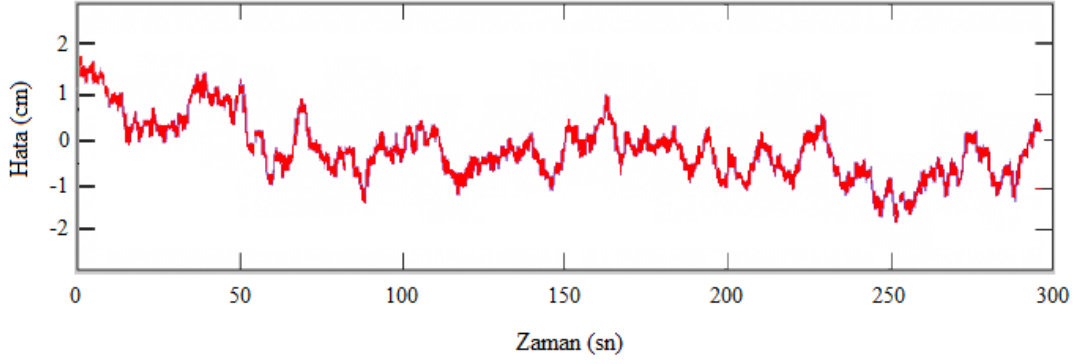
Şekil 4. 22 2D lazer tarayıcı ile SLAM

4.3.1 Çoklu Algılayıcı Füzyonu ve 2D LRF Performans Karşılaştırması

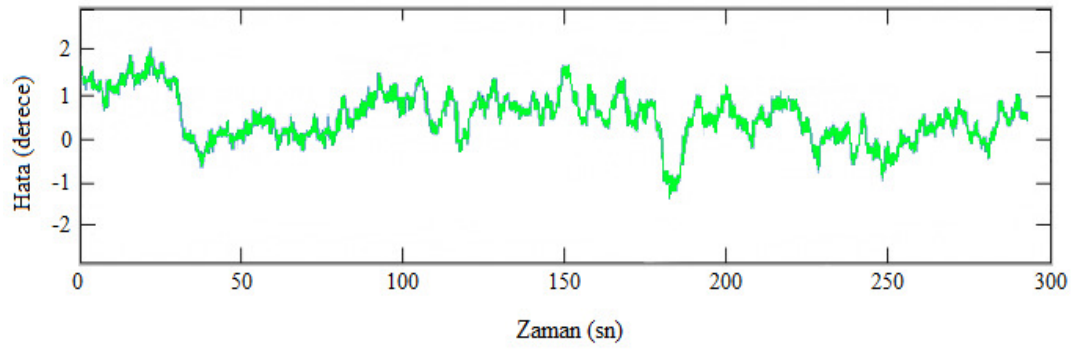
Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen 1. saha çalışmasında, otonom gezgin robot (Şekil 4.18) üzerinde 2D lazer tarayıcı ile EKF tabanlı SLAM algoritması uygulanmıştır. Robotun koordinat eksenindeki sapmaları ve duruş açısı sapmalarının hata sınırları Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 23 2D lazer tarayıcı hata sınırları (x (cm))

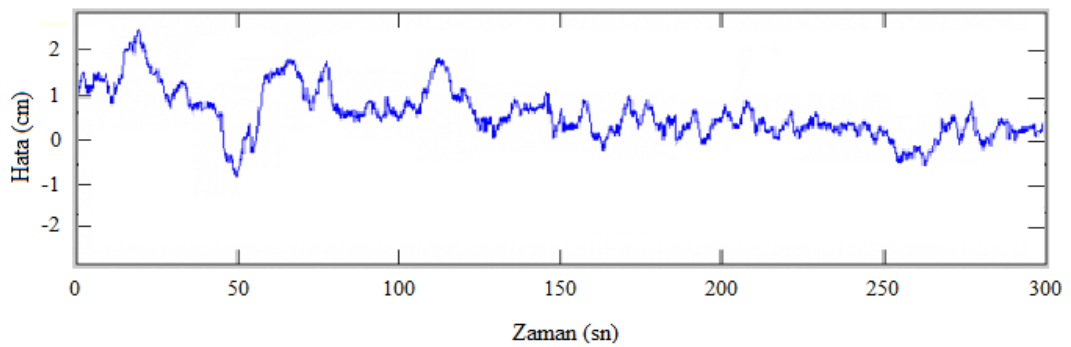


Şekil 4. 24 2D lazer tarayıcı hata sınırları (y (cm))

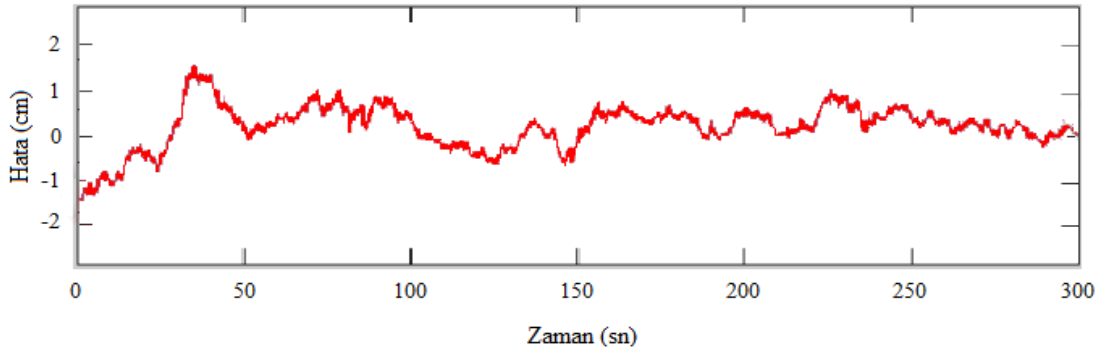


Şekil 4. 25 2D lazer tarayıcı hata sınırları (açı (°))

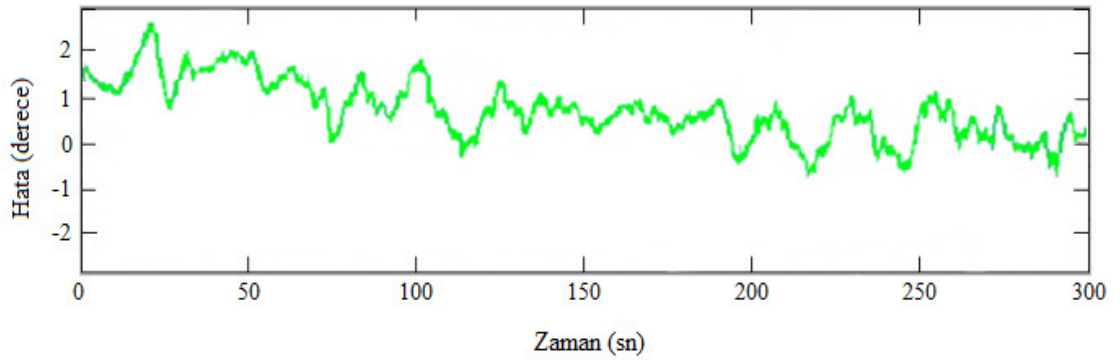
Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen 2. saha çalışmasında, otonom gezgin robot (Şekil 4.18) üzerinde 2D lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera ile çoklu algılayıcı füzyonu gerçekleştirilen EKF tabanlı SLAM algoritması uygulanmıştır. Robotun koordinat eksenindeki sapmaları ve duruş açısı sapmalarının hata sınırları Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 26 Çoklu algılayıcı füzyonu – 2D lazer tarayıcı hata sınırları (x (cm))

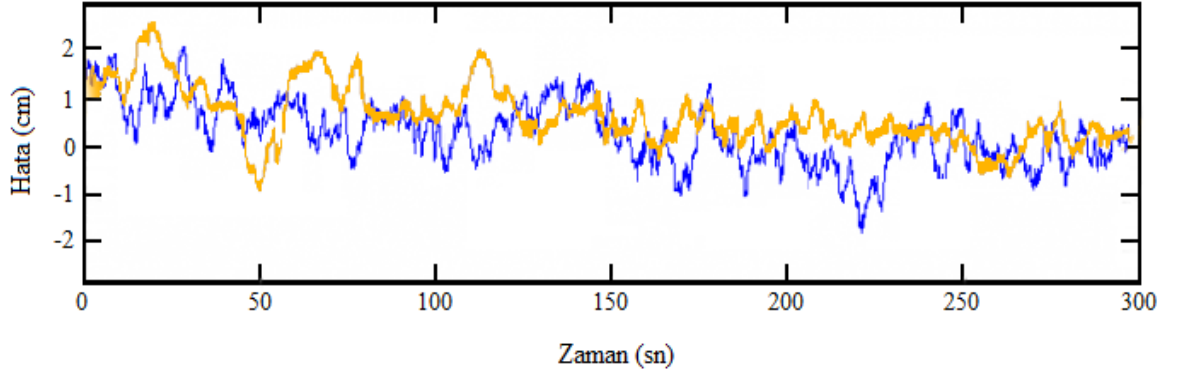


Şekil 4. 27 Çoklu algılayıcı füzyonu – 2D lazer tarayıcı hata sınırları (y (cm))

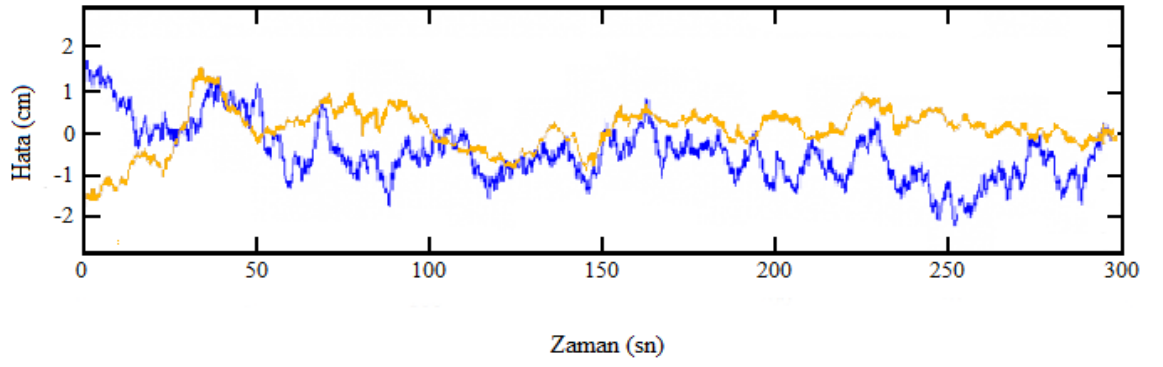


Şekil 4. 28 Çoklu algılayıcı füzyonu – 2D lazer tarayıcı hata sınırları (açı (°))

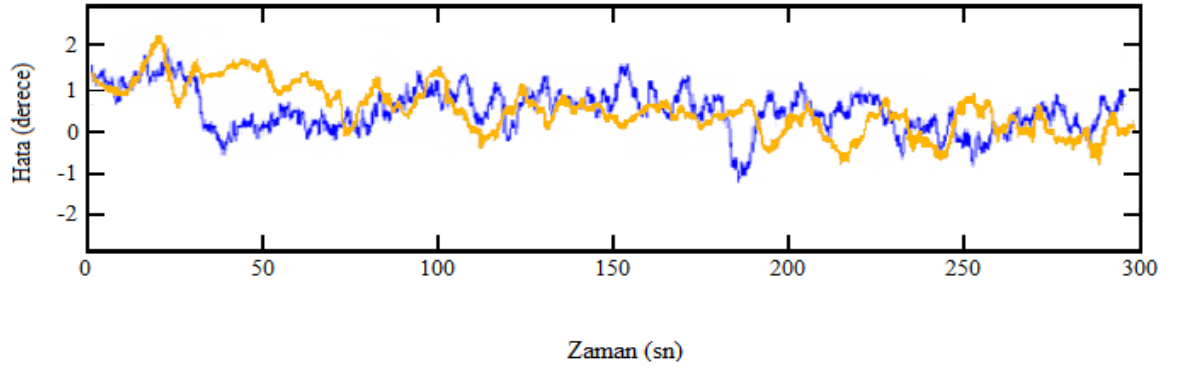
Çoklu algılayıcı füzyonunun SLAM algoritmasındaki avantajlarını göstermek için elde edilen sonuçlar Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Mavi çizgiler 2D lazer tarayıcı kullanılması durumunda oluşan sapmaları, turuncu çizgiler ise çoklu algılayıcı füzyonu gerçekleştirilmesi durumunda oluşan sapmaları göstermektedir. Elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 4.8’de listelenmektedir.



Şekil 4. 29 Karşılaştırmalı hata sınırları (x (cm))



Şekil 4. 30 Karşılaştırmalı hata sınırları (y (cm))



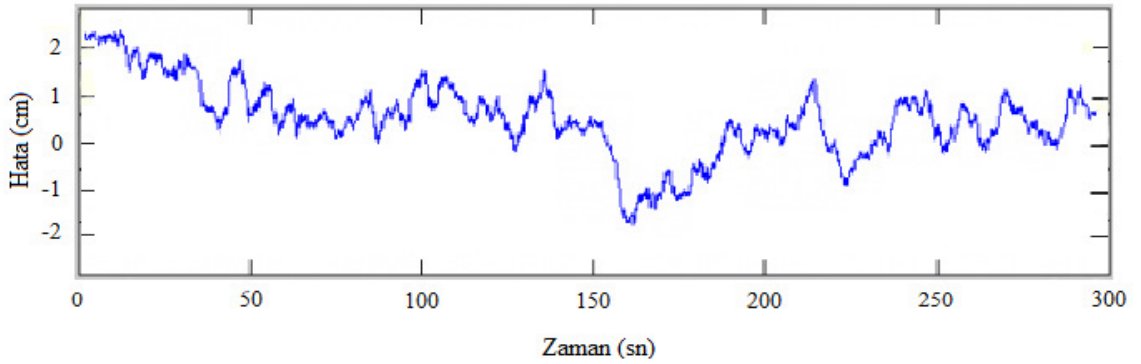
Şekil 4. 31 Karşılaştırmalı hata sınırları (açı (°))

Çizelge 4. 8 2D LRF ve çoklu algılayıcı füzyonunun başarısının karşılaştırılması

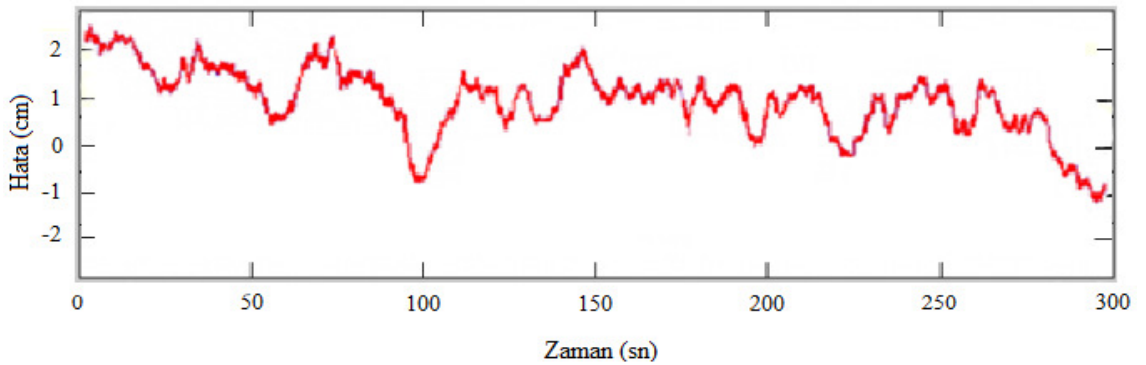
Hata sınırlarının ortalama değeri	Lazer tarayıcı kullanılarak konumlandırma	Çoklu algılayıcı füzyonu ile konumlandırma
X	1.64 cm	1.39 cm
Y	1.59 cm	1.26 cm
Açı	1.21°	0.99°

4.3.2 Çoklu Algılayıcı Füzyonu ve URF Performans Karşılaştırması

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen 3. saha çalışmasında, otonom gezgin robot (Şekil 4.18) üzerinde ses üstü mesafe ölçer ile EKF tabanlı SLAM algoritması uygulanmıştır. Robotun koordinat eksenindeki sapmalarının hata sınırları Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te gösterilmiştir.

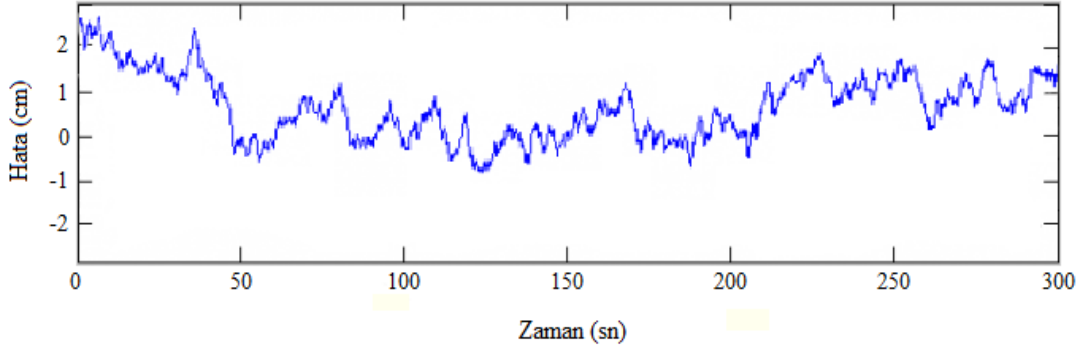


Şekil 4. 32 Ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (x (cm))

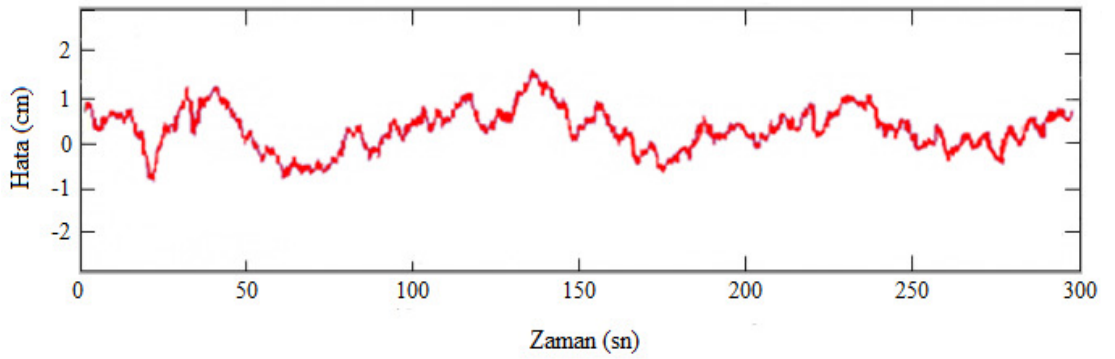


Şekil 4. 33 Ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (y (cm))

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen 4. saha çalışmasında otonom gezgin robot (Şekil 4.18) üzerinde ses üstü mesafe ölçer ve tek mercekli kamera ile çoklu algılayıcı füzyonu gerçekleştirilen EKF tabanlı SLAM algoritması uygulanmıştır. Robotun koordinat eksenindeki sapmaları ve duruş açısı sapmalarının hata sınırları Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’te gösterilmiştir.

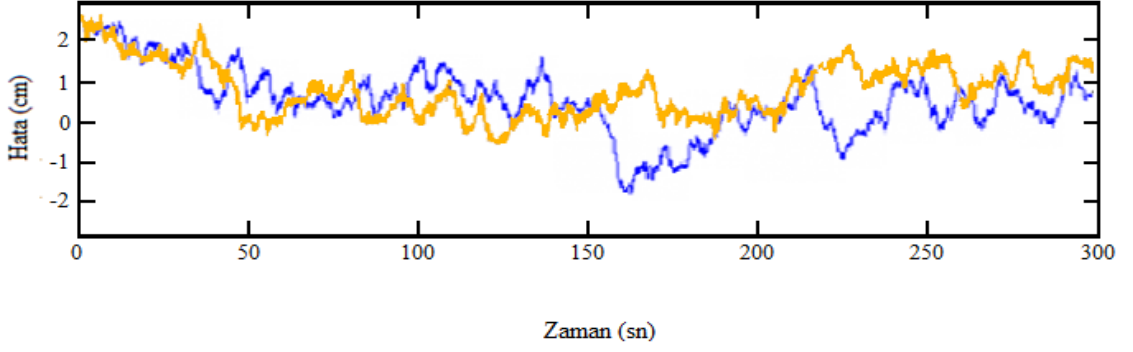


Şekil 4. 34 Çoklu algılayıcı füzyonu – ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (x (cm))

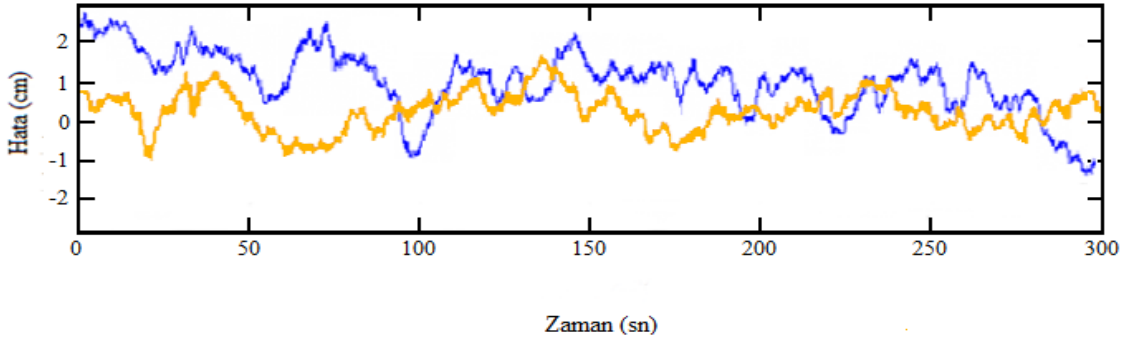


Şekil 4. 35 Çoklu algılayıcı füzyonu – ses üstü mesafe ölçer hata sınırları (y (cm))

Çoklu algılayıcı füzyonunun SLAM algoritmasındaki avantajlarını göstermek için elde edilen sonuçlar Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Mavi çizgiler ses üstü mesafe ölçer kullanılması durumunda oluşan sapmaları, turuncu çizgiler ise çoklu algılayıcı füzyonu gerçekleştirilmesi durumunda oluşan sapmaları göstermektedir. Elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 4.9’da listelenmektedir.



Şekil 4. 36 Karşılaştırmalı hata sınırları (x (cm))



Şekil 4. 37 Karşılaştırmalı hata sınırları (y (cm))

Çizelge 4. 9 URF ve çoklu algılayıcı füzyonunun başarısının karşılaştırılması

Hata sınırlarının ortalama değeri	URF kullanılarak konumlandırma	Çoklu algılayıcı füzyonu ile konumlandırma
X	3.29 cm	2.83 cm
Y	2.94 cm	2.37 cm

4.4 Elde Edilen Sonuçlar Hakkındaki Değerlendirmeler

Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında hem farklı keşif stratejileri ve SLAM algoritmaları performans ve hesaplama zamanı gereksinimleri açısından karşılaştırılmış hem de çoklu algılayıcı füzyonunun SLAM algoritmalarına katkıları ortaya konmuştur.

Benzetim çalışmalarının sonuçları ışığında yapılabilecek değerlendirmeler aşağıda sıralanmaktadır:

- Robotların donanımsal güçleri uygulama geliştirme platformlarının özelliklerinden dolayı robotik keşif stratejilerinde ve SLAM uygulamalarında tam olarak kullanılamamaktadır.
- Çoklu robot keşif stratejilerinde ve haritalama uygulamalarında robot sayısındaki artış, keşif ve haritalama süresini kısaltmaktadır.
- Literatürdeki bulunan ve üzerinde yoğun olarak çalışılan robotik keşif stratejileri arasında performans olarak en iyi olanının Sınır-fayda temelli yaklaşım olduğu görülmektedir.
- Çoklu algılayıcı füzyonunun robotik keşif stratejilerinin ve haritalama uygulamalarının performansını ve başarısını arttırdığı ortaya çıkmaktadır.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen saha çalışmalarında benzetim çalışmalarına paralel sonuçlar elde edilmiştir. Gerçekleştirilen dört farklı saha çalışmasında da tahmin edilen robot güzergâhları ile gerçek robot güzergâhları arasındaki fark ayırt edilemeyecek kadar küçüktür. 2D lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera kullanılan saha çalışmasında, belirsizlik bölgeleri oldukça küçük olup ortalama olarak konum için 90 cm² ve açı için 3°'dir. Saha çalışmalarının zemini önceden hazırlanmış ve herhangi bir bozucu etkinin olmadığı bir ortamda gerçekleştirilmiş olduğu göz önüne alınmalıdır. 2D lazer tarayıcı ile SLAM, ses üstü mesafe ölçer ile SLAM, 2D lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera kullanarak çoklu algılayıcı füzyonu tabanlı SLAM, ses üstü mesafe ölçer ve tek mercekli kamera kullanarak çoklu algılayıcı füzyonu tabanlı SLAM gerçekleştirilmiştir. Dört çalışmada da EKF tabanlı SLAM uygulanmıştır.

Saha çalışmalarında, özellikle 2D lazer tarayıcı ve tek mercekli kamera kombinasyonu ile gerçekleştirilen çoklu algılayıcı füzyonu tabanlı SLAM işleminde, oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ses üstü mesafe ölçer ve tek mercekli kamera kombinasyonu ile gerçekleştirilen çoklu algılayıcı füzyonu tabanlı SLAM işlemi de ses üstü mesafe ölçer kullanarak gerçekleştirilen SLAM işleminden daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Gerek benzetim gerekse saha çalışmalarından elde edilen sonuçlar, robotik keşif ve haritalama uygulamaları dışında insansız kara araçları ve insansız hava araçlarında da çoklu algılayıcı füzyonunun kullanımının avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir.

Özellikle insansız keşif, devriye, gözetim, akıllı otoyol sistemleri, insansız araçlarla teslimat gibi uygulamalarda, araçların yöngüdüm ve konumlandırma sistemlerinde çoklu algılayıcı füzyonunun avantajlar getireceğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Gerçekleştirilen Çalışmaların Literatüre Katkıları

Tez çalışması kapsamında öncelikle robotik keşif stratejileri ve SLAM algoritmaları incelenmiştir. Farklı keşif stratejileri performanslarına ve işlem yükü gereksinimlerine göre değerlendirilmiştir. Burada amaçlanan birinci nokta, robot sayısının keşif süresi üzerine olan etkilerini incelemektir. İkinci nokta ise keşif stratejisi ile sistem gereksinimleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları Sınır-Fayda Temelli Yaklaşımın (Yamauchi [42]) diğer keşif stratejilerine göre daha hızlı olduğunu göstermiştir. İncelenen üç stratejiden (Sınır-Fayda Temelli Yaklaşım (Yamauchi [42]) , Rol Temelli Yaklaşım (Hoog vd. [44]) ve Piyasa Prensiplerine Dayalı Yaklaşım (Zlot vd. [43])) elde edilen sonuçlar sistem performansı arttıkça keşif süresinin kısaldığını göstermektedir. Ancak elde edilen sonuçlar sistem performansının keşif süresini tek etkileyen faktör olmadığını göstermektedir. Elde edilen diğer bir sonuç ise robot sayısındaki artışın incelen her üç stratejide de keşif süresini kısalttığını göstermektedir.

Robotik keşif stratejilerinin ortak noktaları olan randevu noktalarında bilgi paylaşımı gereksinimi ve bu gereksinimin nasıl ortadan kaldırılabilceği konusu da tez çalışmasında incelenmiştir. Kablosuz algılayıcı ağlarının keşif ve haritalama algoritmalarında yardımcı iletişim ortamı olarak kullanılması öngörülmüştür. Kablosuz algılayıcı ağlarının keşif stratejilerinde kullanılması, randevu noktalarında bir araya gelme zorunluluğunu ortadan kaldırmakta ve keşif süresini kısaltmaktadır [154], [155].

Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları yöntemin başarısını ortaya koymaktadır. Bu yöntemde robotlar arasındaki iletişimin sürekli olması sağlanmaktadır. Aynı kesintisiz iletişim çok sayıda robot kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Ancak otonom robotların maliyetleri ile kablosuz algılayıcı düğümlerinin maliyetleri karşılaştırıldığında önerilen yöntemin çok avantajlı olduğu görülebilir.

SLAM algoritmaları üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, SLAM algoritmaları performans ve işlem yükü gereksinimlerine göre karşılaştırılmıştır. Ölçüm gürültüsü ve hareket gürültüsünün SLAM algoritmalarına olan etkileri ortaya konmuştur. Sistem performansındaki artışın SLAM algoritmasının yürütülmesi için harcanan süreyi kısalttığını ortaya koymaktadır. Ancak elde edilen sonuçlar sistem performansındaki artışın algoritmanın yürütülmesi için harcanan süreye tam olarak yansımadığını göstermektedir. Gerçekleştirilen SLAM benzetim çalışmaları CEKF tekniğinin işlem yükünün daha düşük olduğunu ve bu tekniğin daha kısa işlem süresi gerektirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla CEKF'ye dayalı SLAM algoritmaları çok sayıda yer işaretçisi bulunduran dış ortam uygulamaları için, EKF ve UKF'ye dayalı SLAM algoritmalarına göre daha avantajlıdır.

Tez çalışmasında üzerinde durulan önemli bir konu da çoklu algılayıcı füzyonu yöntemlerinin SLAM algoritmalarında kullanılmasıdır. Farklı algılayıcılardan elde edilen ölçümlerin birleştirilmesi esasına dayanan çoklu algılayıcı füzyonu birçok avantaj sağlamaktadır. Saha çalışmalarında kullanılan robotların özelliklerine paralel olarak, lazer tarayıcı – tek mercekli kamera ve ses üstü mesafe ölçer – tek mercekli kamera algılayıcı çiftlerinde çoklu algılayıcı füzyonu yöntemlerinin kullanılması incelenmiştir. Her iki algılayıcı çiftinde de sıralı algılayıcı füzyonu gözlem modelleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarından ve otonom gezgin robotlarla gerçekleştirilen saha çalışmalarından elde edilen sonuçlar çoklu algılayıcı füzyonunun robotların kestirim başarılarını arttırdığını göstermektedir.

5.2 Gelecekteki Çalışmalar için Açık Araştırma Konuları

Gelecekteki çalışmalar için açık araştırma konularından birincisi, farklı türdeki robotlardan gelen algılayıcı ölçümlerinin füzyonunun gerçekleştirilmesidir. Örneğin insansız bir hava aracının kamerasından elde edilen görüntü karada hareket eden bir

robot tarafından kullanılabilir. Dağıtık algılayıcı füzyonu olarak nitelendirilebilecek bu yöntemdeki zorluk, farklı yerel koordinat eksenlerinde çalışan robotların ölçümlerinin nasıl birleştirileceğidir. Bu problemin çözüm yöntemlerinden birisi merkezi bir kontrolcünün robotik keşif stratejilerinde ve SLAM algoritmalarında denetim görevini üstlenmesidir.

Araştırmaya açık konulardan bir diğeri ise; çoklu robot keşif stratejilerinde robotlar arasındaki iletişimin tamamen kablosuz algılayıcı ağları üstünden yürütülmesidir. Böylece olası afetlerde ortam incelemesi ve eş zamanlı keşif operasyonları birlikte yürütülebilir. Kablosuz algılayıcı ağlarında yaşanan paket kayıpları ve gecikmeler Kust vd. tarafından [16] da açıklanan yaklaşım kullanılarak önlenabilir.

Tez çalışmasında incelenen çoklu robot keşif stratejilerinden birisi olan Rol Temelli yaklaşımda (Hoog vd. [44]) Pei vd. [15] te açıkladıkları yaklaşım ile bant genişliği kısıtlamalarının olduğu aktarıcı düğümlerin konumlandırılması modellenenbilir. Bu yaklaşımda robotların aktarıcı ya da keşif görevinde olması kararı dinamik olarak verilir. Burada amaçlanan aktarıcı düğümlerin sayısını minimumda tutmaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Dissanayake, G., Newman, P., Clark, S., Durrant-Whyte, H. F. ve Csorba, M., (2001). "A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17(3):229-241.
- [2] Fenwick, J. W., Newman, P. M. ve Leonard, J. J., (2002). "Cooperative concurrent mapping and localization", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 11-15 May 2002, Washington, 2:1810-1817.
- [3] Williams, S. B., (2001). Efficient Solutions to Autonomous Mapping and Navigation Problems, Ph.D. Dissertation, University of Sydney, Sydney.
- [4] Tomatis, N., (2001). Hybrid, Metric-Topological, Mobile Robot Navigation, Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne.
- [5] Arras, K. O., (2001). Feature-Based Robot Navigation in Known and Unknown Environments, Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne.
- [6] Ruckert, E. A., (2009). Simultaneous localisation and mapping for mobile robots with recent sensor technologies, M.S. Thesis, Graz University of Technology, Graz.
- [7] Hall, D. L. ve Llinas, J., (1997). "An Introduction to Multisensor Data Fusion", Proceedings of the IEEE, 85(1): 6-23.
- [8] Luo, R., Yih, C. ve Su, K. L., (2002). "Multisensor Fusion and Integration: Approaches, Applications, and Future Research Directions", IEEE Sensors Journal, 2(2):107-119.
- [9] Luo, R., Chou, Y. C. ve Chen, O., (2007). "Multisensor Fusion and Integration: Algorithms, Applications, and Future Research Directions", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1986-1991.
- [10] Luo, R. ve Yih, C., (2010). "Multisensor Fusion and Integration Aspects of Mechatronics", IEEE Industrial Electronics Magazine, 4(2): 20-27.
- [11] Luo, R. C. ve Kay, M. G., (1990). "A Tutorial on Multisensor Integration and Fusion", Proceedings of the IECON'90, 16th Annual Conference of IEEE, 1: 707-722.

- [12] Coroware, Corobot – programmable mobile robot platform, <http://robotics.coroware.com/drupal6/corobot>, 27 Temmuz 2011.
- [13] USARSim, USARSim | Download USARSim software for free at SourceForge.net, <http://sourceforge.net/projects/usarsim/>, 27 Temmuz 2011.
- [14] Adept Mobile Robots, Adept Mobile Robots Pioneer 3-DX (P3DX) differential drive robot for research and education, <http://www.mobilerobots.com/researchrobots/researchrobots/pioneerp3dx.aspx>, 27 Temmuz 2011.
- [15] Pei, Y., Mutka, M. W. ve Xi, N., (2010). "Coordinated Multi-Robot Real-Time Exploration With Connectivity and Bandwidth Awareness", Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 5460-5465.
- [16] Kust, B., Richter, C., Hu, W., Afanasyev, M., Jurdak, R., Brunig, M., Abbott, D., Huynh, C. ve Ostry, D., (2011). "Radio diversity for reliable communication in WSNs", Proceedings of the 2011 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 270-281.
- [17] SICK AG, Indoor laser measurement technology, http://www.sick.com/group/EN/home/products/product_portfolio/laser_measurement_systems/Pages/indoor_laser_measurement_technology.aspx, 27 Temmuz 2011.
- [18] Adept Mobile Robots, MobileRobots pan-tilt-zoom camera and vision accessories for research systems, <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/Accessories/CameraSystems.aspx>, 27 Temmuz 2011.
- [19] Kummerle, R., Steder, B., Dornhege, C., Ruhnke, M., Grisetti, G., Stachniss, C. ve Kleiner, A., M., (2009). "On measuring the accuracy of SLAM algorithms", Autonomous Robots, 27: 387–407.
- [20] Asadi, E. ve Bozorg, M., (2009). "A Decentralized Architecture for Simultaneous Localization and Mapping", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 14(1): 64-71.
- [21] Chen, H., Sun, D., Yang, J. ve Chen, J., (2010). "Localization for Multirobot Formations in Indoor Environment", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 15 (4):561-574.
- [22] Williams, S. B., Dissanayake, G. ve Durrant-Whyte, H., (2002). "Towards multi-vehicle simultaneous localisation and mapping", Proceedings of the IEEE Int. Conf. Robotics Automation (ICRA), 11-15 May 2002, Washington, 2743-2748.
- [23] Thrun, S., Liu, Y., Koller, D., Ng, A. Y., Ghahramani, Z. ve Durrant-Whyte, H., (2004). "Simultaneous Localization and Mapping with Sparse Extended Information Filters", The International Journal of Robotics Research, 23(7-8): 693-716.
- [24] Stachniss, C., (2009). Robotic Mapping and Exploration, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

- [25] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. ve Wegbreit, B., (2003). "FastSLAM 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges", Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'03), 2003, Acapulco, Mexico, 1151-1156.
- [26] Thrun, S., Burgard, W. ve Fox, D., (2005). Probabilistic Robotics, MIT Press, USA.
- [27] Neira, J., Tardos, J. D. ve Castellanos, J. A., (2003). "Linear time vehicle relocation in SLAM", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 14-19 Sept. 2003, Taipei, Taiwan, 427-433.
- [28] Paz, L. M., Tardos, J. D. ve Neira, J., (2008). "Divide and Conquer: EKF SLAM in $O(n)$ ", IEEE Transactions on Robotics, 24(5): 1107-1120.
- [29] Okubo, Y., Ye, C. ve Borenstein, J., (2009). "Characterization of the Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder for Mobile Robot Obstacle Negotiation", Proceedings the SPIE, 14 - 17 April 2009, Orlando, FL United States, 7332.
- [30] Silveira, G., Malis, E. ve Rives, P., (2008). "An Efficient Direct Approach to Visual SLAM", IEEE Transactions on Robotics, 4(5): 969-979.
- [31] Thrun, S., (2002). "Robotic mapping: A survey", in Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium. Editors G. Lakemeyer and B. Nebel, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA.
- [32] Guivant, J. ve Nebot, E., (2002). "Improving computational and memory requirements of simultaneous localization and map building algorithms", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02), 11-15 May 2002, Washington, 3: 2731-2736.
- [33] Nieto, J., Guivant, J., Nebot, E. ve Thrun, S., (2003). "Real time data association for FastSLAM", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), 14-19 Sept. 2003, Taipei, Taiwan, 1: 412-418.
- [34] Thrun, S., (2002), "Particle Filters in Robotics", Proceedings of the 18th Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence, (UAI'02), 1-4 August 2002, Alberta, Canada, 511-518.
- [35] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. ve Wegbreit, B., (2002). "FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem", Proceedings of the 18th Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence, (UAI'02), 1-4 August 2002, Alberta, Canada, 593-598.
- [36] Guivant, J. E. ve Nebot, E. M., (2001). "Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17 (3): 242-257.
- [37] Tardos, J. D., Neira, J., Newman, P. M. ve Leonard, J. J., (2002). "Robust Mapping and Localization in Indoor Environments using Sonar Data," International Journal of Robotics Research, 21(4): 311-330.

- [38] Julier, S., (2001). "A Sparse Weight Kalman Filter Approach to Simultaneous Localisation and Map Building", Proceedings the IEEE/RJS Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, October 29-November 2 2001, Hawaii, USA, 1: 1251-1256.
- [39] Bailey, T., (2003). "Constrained Initialization for Bearing-Only SLAM" Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), 14-19 Sept. 2003, Taipei, Taiwan, 2: 1966:1971.
- [40] Durrant-Whyte, H. ve Bailey, T., (2006). "Simultaneous localization and mapping: Part I", IEEE Robotics and Automation Magazine, 13(2): 99-110.
- [41] Durrant-Whyte, H. ve Bailey, T., (2006). "Simultaneous localization and mapping: Part II", IEEE Robotics and Automation Magazine, 13(3): 108-117.
- [42] Yamauchi, B., (1998). "Frontier-Based Exploration Using Multiple Robots", Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents, 1998, Minnesota, United States, 47-53.
- [43] Zlot, R., Stentz, A., Dias, M. B. ve Thayer, S., (2002). "Multi-robot exploration controlled by a market economy", Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02), 11-15 May 2002, Washington, 3016–3023.
- [44] Hoog, J. D., Cameron, S. ve Visser, A., (2009). "Role-Based Autonomous Multi-Robot Exploration," Proceedings of the International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (COGNITIVE), 15-20 November 2009, Athens/Glyfada, Greece, 482-487.
- [45] Fox, D., Ko, J., Konolige, K., Limketkai, B., Schulz, D. ve Stewart, B., (2006). "Distributed multirobot exploration and mapping", Proceedings of the IEEE, July 2006, 94(7): 1325–1339.
- [46] Burgard, W., Moors, M., Stachniss, C. ve Schneider, F., (2005). "Coordinated multi-robot exploration", IEEE Transactions on Robotics, 21(3): 376 – 378.
- [47] Documentation – ROS Wiki. <http://www.ros.org/wiki/>, 6 Mayıs 2011.
- [48] Stepan, P., Kulich, M. ve Preucil, L., (2005). "Robust Data Fusion With Occupancy Grid", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 35(1):106-115.
- [49] Castellanos, J.A., Cantin, R. M., Tardos, J.D. ve Neira, J., (2007). "Robocentric map joining: Improving the consistency of EKF-SLAM", Robotics and Autonomous Systems, 55: 21-29.
- [50] Rodriguez-Losada, D., Matia, F. ve Jimenez, A., (2004). "Local maps fusion for real time multirobot indoor simultaneous localization and mapping", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04), 26 April-1 May 2004, New Orleans, LA, USA, 2: 1308-1313.

- [51] Guivant, J. E., Masson, F. R. ve Nebot, E. M., (2002). "Simultaneous localization and map building using natural features and absolute information", *Robotics and Autonomous Systems*, 40(2-3): 79-90.
- [52] Smith, R. C., Self, M. ve and Cheeseman, P., (1990). Estimating uncertain spatial relationships in robotics, In I.J. Cox and G.T. Wilfong, editors, *Autonomous Robot Vehicles*, Springer-Verlag, 167–193.
- [53] Smith, R. C. ve Cheeseman, P., (1985). On the representation and estimation of spatial uncertainty. Technical Report TR 4760 & 7239, SRI.
- [54] Elfes, A., (1987). "Sonar-based real-world mapping and navigation", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(3):249–265.
- [55] Elfes, A., (1989). Occupancy Grids: A Probabilistic Framework for Robot Perception and Navigation. PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University.
- [56] Moravec, H. P., (1988). "Sensor fusion in certainty grids for mobile robots", *AI Magazine*, 9(2):61–74.
- [57] Chatila, R. ve Laumond, J.-P., (1985). "Position referencing and consistent world modeling for mobile robots", *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [58] Kuipers, B. ve Byun, Y.-T., (1991). "A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations", *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 8:47–63.
- [59] Mataric, M. J., (1990). A distributed model for mobile robot environment-learning and navigation, Master's thesis, MIT, Cambridge, MA.
- [60] Dempster, A. P., Laird, A. N. ve Rubin, D. B., (1977). "Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 39(1):1–38.
- [61] Dasarathy, B. V., (1997). "Sensor fusion potential exploitation—Innovative architectures and illustrative applications", *Proceedings of the IEEE*, 85(1): 24–38.
- [62] Hall, D. L., (1992). *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. Boston, MA, Artech House.
- [63] U.S. Department of Defense, (1991). "Data fusion subpanel of the joint directors of laboratories", Technical Panel for C3, Data fusion Lexicon, F. E. White, Code 4202, Naval Ocean System Center, San Diego, CA.
- [64] Berger, J. O., (1985). *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. Springer Verlag.
- [65] Luo, R. ve Lai, C., (2011). "Enriched Indoor Map Construction Based on Multi-Sensor Fusion Approach for Intelligent Service Robot", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.

- [66] Rekleitis, I., Dudek, G. ve Milios, E., (1997). "Multi-robot exploration of an unknown environment, efficiently reducing the odometry error", Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Nagoya, Japan, 1340-1345.
- [67] Rekleitis, I., Dudek, G. ve Milios, E. E., (2001). "Multi-robot collaboration for robust exploration", Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 31:7-40.
- [68] Arkin, R. C. ve Diaz, J., (2002). "Line-of-sight constrained exploration for reactive multiagent robotic teams", Proceedings of the 7th International Workshop on Advanced Motion Control, 455-461.
- [69] Sgorbissa, A. ve Arkin, R. C., (2003). "Local navigation strategies for a team of robots", Robotica, 21(5):461-473.
- [70] Nguyen, H. G., Pezeshkian, N., Gupta, A. ve Farrington N., (2004). "Maintaining communication link for a robot operating in a hazardous environment", Proceedings of the International Conference on Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments, 28-31.
- [71] Howard, A., Parker, L. E. ve Sukhatme, G. S., (2006). "Experiments with large heterogeneous mobile robot team: Exploration, mapping, deployment and detection", International Journal of Robotics Research, 25(5):431-447.
- [72] Stump, E., Jadbabaie, A. ve Kumar, V., (2008). "Connectivity management in mobile robot teams", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1525-1530.
- [73] Tekdas, O., Plonski, P., Karnad, N. ve Isler, V., (2010). "Maintaining connectivity in environments with obstacles", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- [74] Simmons, R. G., Apfelbaum, D., Burgard, W., Fox, D., Moors, M., Thrun, S. ve Younes, H. L. S., (2000). "Coordination for multi-robot exploration and mapping", Proceedings of the 17th National Conference on Artificial Intelligence and 12th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence, 852-858.
- [75] Burgard, W., Moors, M., Fox, D., Simmons, R. ve Thrun, S., (2000). "Collaborative multi-robot exploration", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1: 476-481.
- [76] Meier, D., Stachniss, C. ve Burgard, W., (2005). "Coordinating multiple robots during exploration under communication with limited bandwidth", European Conference on Mobile Robots, Ancona, Italy, 26-31.
- [77] Fox, D., Ko, J., Konolige, K., Limketkai, B., Schulz, D. ve Stewart, B., (2006). "Distributed multirobot exploration and mapping", Proceedings of the IEEE, 94(7):1325-1339.
- [78] Rooker, M. N. ve Birk, A., (2006). "Communicative exploration with robot packs", Proceedings of the RoboCup 2005: Robot Soccer World Cup IX, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 4020:267-278.

- [79] Visser, A. ve Slamet, B. A., (2008). "Balancing the Information Gain Against the Movement Cost for Multi-robot Frontier Exploration", European Robotics Symposium, Springer Tracts in Advanced Robotics, 43-52.
- [80] Visser, A. ve Slamet, B. A., (2008). "Including communication success in the estimation of information gain for multi-robot exploration", Proceedings of the International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops (WiOPT), 680-687.
- [81] Stachniss, C., Mozos, O. M. ve Burgard, W., (2008). "Efficient exploration of unknown indoor environments using a team of mobile robots", Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 52:205-227.
- [82] Wurm, K. M., Stachniss, C. ve Burgard, W., (2008). "Coordinated multi-robot exploration using a segmentation of the environment", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 1160-1165.
- [83] Rooker, M. N. ve Birk, A., (2007). "Multi-robot exploration under the constraints of wireless networking", Control Engineering Practice, 15(4):435-445.
- [84] Dias, M. B. ve Stentz, A., (2000). "A free market architecture for distributed control of a multirobot system", Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, 115-122.
- [85] Gerkey, B. P. ve Mataric, M. J., (2002). "Sold!: Auction methods for multi-robot coordination", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 18(5):758-768.
- [86] Sheng, W., Yang, Q., Ci, S. ve Xi, N., (2004). "Multi-robot area exploration with limited-range communications", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2:1414-1419.
- [87] Sheng, W., Yang, Q., Tan, J. ve Xi, N., (2006). "Distributed multi-robot coordination in area exploration", Journal of Robotics and Autonomous Systems, 54(12):945-955.
- [88] Basu, P. ve Redi, J., (2004). "Movement control algorithms for realization of fault-tolerant ad hoc robot Networks", IEEE Network, 18(4):36-44.
- [89] Vazquez, J. ve Malcolm C., (2004). "Distributed multirobot exploration maintaining a mobile network", Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Systems, 3:113-118.
- [90] Yao, Z. ve Gupta, K., (2009). "Backbone-based connectivity control for mobile Networks", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2420-2426.
- [91] Franchi, A., Freda, L., Oriolo, G. ve Vendittelli, M., (2009). "The sensor based random graph method for cooperative robot exploration", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 14(2):163-175.

- [92] Julia, M., Reinoso, O., Gil, A., Ballesta, M. ve Paya, L., (2010). "A hybrid solution to the multi-robot integrated exploration problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23:473-486.
- [93] Mukhija, P., Sawhney, R. ve Krishna, K. M., (2010). "Multi robotic exploration with communication requirement to a fixed base station", *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, 1515-1516.
- [94] Kleiner, A., Prediger, J. ve Nebel, B., (2006). "RFID technology-based exploration and SLAM for search and rescue", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4054-4059.
- [95] Lu, F. ve Milios, E., (1997). "Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 18:249-275.
- [96] Ziparo, V. A., Kleiner, A., Nebel, B. ve Nardi, D., (2007). "RFID-based exploration for large robot teams", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 4606-4613.
- [97] Ferranti, E., Trigoni, N. ve Levene, M., (2007). "Brick & mortar: an on-line multi-agent exploration algorithm", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 761-767.
- [98] Koenig, S., Szymanski, B. ve Liu, Y., (2001). "Efficient and inefficient ant coverage methods", *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 31:41-76.
- [99] Agmon, N., Hazon, N. ve Kaminka, G. A., (2006). "Constructing spanning trees for efficient multi-robot coverage", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1698-1703.
- [100] Poduri, S. ve Sukhatme, G. S., (2004). "Constrained coverage for mobile sensor networks", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- [101] Esposito, J. M. ve Dunbar, T. W., (2006). "Maintaining wireless connectivity constraints for swarms in the presence of obstacles", *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 946-951.
- [102] Schwager, M., Slotine, J.-J. ve Rus, D., (2007). "Decentralized, adaptive control for coverage with networked robots", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- [103] Pimentel, B. S. ve Campos M. F. M., (2002). "Multi-robot exploration with limited-range communication", *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automatica*.
- [104] Newman, P., Bosse, M. ve Leonard, J., (2003). "Autonomous feature-based exploration", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1: 1234-1240.

- [105] Baxter, J. L., Burke, E. K., Garibaldi, J. M. ve Norman, M., (2007). "Multirobot search and rescue: A potential field based approach", *Autonomous Robots and Agents Series: Studies in Computational Intelligence*, 76:9-16.
- [106] Mosteo, A. R., Montano, L. ve Lagoudakis, M. G., (2008). "Multi-robot routing under limited communication range", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1531-1536.
- [107] Bruggemann, B., Tiderko, A. ve Stilkerieg, M., (2009). "Adaptive signal strength prediction based on radio propagation models for improving multirobot navigation strategies", *Proceedings of the 2nd International Conference on Robot Communication and Coordination (ROBOCOMM)*, 1-6.
- [108] Rybski, P. E., Papanikolopoulos, N. P., Stoeter, S. A., Krantz, D. G., Yesin, K. B., Gini, M., Voyles, R., Hougen, D. F., Nelson, B. ve Erickson, M. D., (2000). "Enlisting rangers and scouts for reconnaissance and surveillance", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 7(4):14-24.
- [109] Mobile Processors – Benchmark List – Notebookcheck.net. <http://www.notebookcheck.net/Mobile-Processors-Benchmarklist.2436.0.html>, 2 Mart 2011.
- [110] Barnes, M., Everett, H. R. ve Rudakevych, P., (2005). "Throwbot: Design considerations for a man-portable throwable robot", *Proceedings of the SPIE - Unmanned Ground Vehicle Technology VII*, 5804:511-520.
- [111] Howard, A., Parker, L. E. ve Sukhatme, G. S., (2006). "Experiments with large heterogeneous mobile robot team: Exploration, mapping, deployment and detection", *International Journal of Robotics Research*, 25(5):431-447.
- [112] Liz Hull, Drone makes first UK 'arrest' as police catch car thief hiding under bushes, <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1250177/Police-make-arrest-using-unmanned-drone.html>, 1 Haziran 2011.
- [113] Stone, H. W. ve Edmonds, G., (1992). "Hazbot: a hazardous materials emergency response mobile robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1:67-73.
- [114] Tojo, Y., Debenest, P., Fukushima, E. F. ve Hirose, S., (2004). "Robotic system for humanitarian demining", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2:2025-2030.
- [115] Bengel, M., Pfeiffer, K., Graf, B., Bubeck, A. ve Verl, A., (2009). "Mobile robots for offshore inspection and manipulation", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3317-3322.
- [116] Nawaz, S., Hussain, M., Watson, S., Trigoni, N. ve Green, P. N., (2009). "An underwater robotic network for monitoring nuclear waste storage pools", *Proceedings of the 1st International ICST Conference on Sensor Systems and Software (SCUBE)*.

- [117] Jon Herskovitz, Japan a robot power everywhere except at nuclear plant. Reuters, <http://www.reuters.com/article/2011/03/17/us-quake-japan-robots-idUSTRE72G2LD20110317>, 2 Nisan 2011.
- [118] Matsuno, F. ve Tadokoro, S., (2004). "Rescue robots and systems in Japan", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.
- [119] Davids, A., (2002). "Urban search and rescue robots: from tragedy to technology", IEEE Intelligent Systems, 17(2):81-83.
- [120] Casper, J. ve Murphy, R., (2003). "Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 33:367-385.
- [121] Hauert, S., Leven, S., Zufferey, J.-C. ve Floreano, D., (2010). "Communication-based Swarming for Flying Robots", Proceedings of the Workshop on Network Science and Systems Issues in Multi-Robot Autonomy, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- [122] Mars Exploration Rover Mission: The Mission, <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/>, 25 Ekim 2011.
- [123] Dunbabin, M., Vasilescu, I., Corke, P. ve Rus, D., (2009). "Experiments with cooperative control of underwater robots", The International Journal of Robotics Research, 28:815-833.
- [124] Suzanne Goldenberg, Deepwater Horizon oil spill: Underwater robots trying to seal well, <http://www.guardian.co.uk/environment/2010/apr/26/deepwater-horizon-spill-underwater-robots>, 2 Nisan 2010.
- [125] Thrun, S., Hahnel, D., Ferguson, D., Montemerlo, M., Triebel, R., Burgard, W., Baker, C., Omohundro, Z., Thayer, S. ve Whittaker, W., (2003). "A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3: 4270-4275.
- [126] Morris, A., Silver, D., Ferguson, D. ve Thayer, S., (2005). "Towards topological exploration of abandoned mines", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2117-2123.
- [127] Thrun, S., Thayer, S., Whittaker, W., Baker, C., Burgard, W., Ferguson, D., Hhnel, D., Montemerlo, M., Morris, A., Omohundro, Z., Reverte, C. ve Whittaker, W., (2004). "Autonomous exploration and mapping of abandoned mines", IEEE Robotics & Automation Magazine, 11:79-91.
- [128] Speranzon, A., (2006). Coordination, Consensus and Communication in Multi-Robot Control Systems, Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology.
- [129] Bahl, P. ve Padmanabhan, V. N., (2000). "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system", Proceedings of the INFOCOM 2000, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000, 775-784.

- [130] Dai, F. ve Wu, J., (2004). "Performance analysis of broadcast protocols in ad hoc networks based on self-pruning", IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems, 15(11):1027-1040.
- [131] Khabbazzian, M. ve Bhargava, V. K., (2009). "Efficient broadcasting in mobile ad hoc networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, 8(2):231-245.
- [132] Huang, G. P., Mourikis, A. I. ve Roumeliotis, S. I., (2009). "On the complexity and consistency of UKF-based SLAM", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4401 – 4408.
- [133] Rekleitis, I. M., (2004). "A particle filter tutorial for mobile robot localization", Tech. Rep. TR-CIM-04-02, McGill University, Canada.
- [134] Diosi, A. ve Kleeman, L., (2005). "Laser Scan Matching in Polar Coordinates with Application to SLAM", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), 2-6 Aug. 2005, Alberta, Canada, 3317 – 3322.
- [135] Mallios, A., Ridao, P., Hernandez, E., Ribas, D., Maurelli, F. ve Petillot, Y., (2009). "Pose-based SLAM with probabilistic scan matching algorithm using a mechanical scanned imaging sonar", Proceedings of the OCEANS 2009 – EUROPE, 11-14 May 2009, Bremen, Germany, 1-6.
- [136] Durrant-Whyte, H., (2002). "Introduction to Sensor Data Fusion", <http://www.acfr.usyd.edu.au/teaching/graduate/Fusion/index.html>, 15 Temmuz 2011.
- [137] Eliazar, A.I. ve Parr, R., (2004). "DP-SLAM 2.0", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04), April 26-May 1 2004, 2:1314-1320.
- [138] Milford, M.J. , Wyeth, G.F. ve Prasser, D., (2004). "RatSLAM: a hippocampal model for simultaneous localization and mapping", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04), 1: 403-408.
- [139] Grisetti, G., Kummerle, R., Stachniss, C. ve Burgard, W., (2010). "A Tutorial on Graph-Based SLAM", IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2(4): 31-43.
- [140] OpenSLAM, <http://openslam.org/gridslam.html>, 3 Ocak 2012.
- [141] OpenSLAM, <http://openslam.org/gmapping.html>, 3 Ocak 2012.
- [142] Leonard, J. J., Bosse, M., Newman, P. ve Teller, S., (2004). "Slam in large-scale cyclic environments using the atlas framework", International Journal of Robotics Research, 23:1113-1139.
- [143] Huang, S., Wang, Z. ve Dissanayake, G., (2008). "Sparse Local Submap Joining Filter for Building Large-Scale Maps", IEEE Transactions on Robotics, 24(5):1121-1130.

- [144] Williams, S. B., Dissanayake, G. ve Durrant-Whyte, H., (2002). "An efficient approach to the simultaneous localisation and mapping problem", IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1:406–411.
- [145] Castellanos, J. A., Neira, J., Strauss, O. ve Tardos, J.D., (1996). "Detecting high level features for mobile robot localization", Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 611-618.
- [146] Newman, P. M. ve Leonard, J. J., (2003). "Consistent, convergent, and constant time SLAM", International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 1143-1150.
- [147] Estrada, C., Neira, J. ve Tardos, J. D., (2005). "Hierarchical SLAM: real-time accurate mapping of large environments", IEEE Transactions on Robotics, 21(4):588-596.
- [148] Davison, A. J., Reid, I. D., Molton, N. D. ve Stasse, O., (2007). "MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29(6): 1052-1067.
- [149] Davison, A.J. ve Murray, D.W., (2002). "Simultaneous localization and map-building using active vision", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24(7):865-880.
- [150] Chen, C., Gao, Q., Song, Z., Liping, O. ve Wu, X., (2010). "Catering Service Robot", Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, 6-9 July 2010, Jinan, China, 599-604.
- [151] Civera, J., Grasa, O. G., Davison, A. J. ve Montiel, J. M. M., (2010). "1-Point RANSAC for EKF Filtering. Application to Real-Time Structure from Motion and Visual Odometry", Journal of Field Robotics, 27(5):609-631.
- [152] Player Project. <http://playerstage.sourceforge.net/>, 5 Mayıs 2011.
- [153] Du, S., Tu, C., Van Wyk B. J. ve Chen Z., (2001). "Collinear Segment Detection Using HT Neighborhoods", IEEE Transactions on Image Processing, 20(12):3612-3620.
- [154] Tuna G., Gulez K., ve Gungor V. C., (2011). "Communication Related Design Considerations of WSN-aided Multi-Robot SLAM," Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2011), Istanbul, Turkey, 13-15 April 2011, 493-498.
- [155] Tuna G., Gulez K., Gungor V. C., ve Mumcu T. V., (2011). "Exploration Strategy Related Design Considerations of WSN-Aided Mobile Robot Exploration Teams," Lecture Notes in Artificial Intelligence, 6839: 533–540.
- [156] Besl, P. J. ve McKay, N. D., (1992). "A method for registration of 3-d shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2):239-256.
- [157] Bar-Shalom, Y., (1981). "On the track to track correlation problem", IEEE Transactions on Automatic Control, 25(8):802-807.

- [158] Blackman, S. ve Popoli, R., (1999). Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artec House.
- [159] Tuna G., Gulez K., "Aided Navigation Techniques for Indoor and Outdoor Unmanned Vehicles", Proceedings of the 5th IEEE IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS 2012), Istanbul, Turkey, 7-10 May, 2012, 1-4,
- [160] Tuna G., Gulez K., Mumcu T.V., "Multi-Sensor Fusion Strategy for SLAM-aided Foreign Object Detection," Proceedings of the 2nd International Conference on Informatics (ICI 2011), Canakkale, Turkey, 27-29 April 2011, 33-38.
- [161] Hoog, J. D., (2011). Role-Based Multi-Robot Exploration, Ph.D. Thesis, University of Oxford.
- [162] Scanning range finder URG-04LX | HOKUYO AUTOMATIC CO. LTD..
http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx.html, 4 Mart 2011.
- [163] MB1210 XL-MaxSonar-EZ1 High Performance Ultrasonic Sensors.
<http://www.maxbotix.com/products/MB1210.htm>, 4 Mart 2011.
- [164] Phidgets Inc. -1064_1 – PhidgetMotorControl HC.
http://www.phidgets.com/products.php?product_id=1064_1, 7 Eylül 2011.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gürkan TUNA
Doğum Tarihi ve Yeri : Meriç, 25.01.1975
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : gurkan.tuna@std.yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Bilgisayar Müh.	Trakya Üniversitesi	2009
Lisans	Bilgisayar Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	1998
Lise	Matematik	Edirne Lisesi	1992

YAYINLARI

Makale

1. Tuna G., Gungor V. C., Gulez, K., "An autonomous wireless sensor network deployment system using mobile robots for human existence detection in case of disasters," *Ad Hoc Networks (Elsevier)* DOI:10.1016/j.adhoc.2012.06.006, (2012).
2. Tuna G., Gulez K., Gungor V. C., and Mumcu T. V., "Exploration Strategy Related Design Considerations of WSN-Aided Mobile Robot Exploration Teams," *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 6839, pp. 533–540, (2011).

3. Mumcu T. V., Aliskan I., Gulez K., and Tuna G., "Histogram Based Object Classification by Multi-Class Support Vector Machine," Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6838, pp. 218-225, (2011).
4. Erturk H., Tuna G., Mumcu T. V., Gulez K., "A Performance Analysis of Omnidirectional Vision Based Simultaneous Localization and Mapping," Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7389, pp. 407–414, (2012).
5. Tuna G., Altun Y., Mumcu T. V., Gulez K., "WSN Aided Indoor Localization for Unmanned Vehicles," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 7390, pp. 531-538, (2012).
6. Tuna G., Mumcu, T. V., Gulez K., Gungor V. C., Erturk H., "Unmanned Aerial Vehicle-Aided Wireless Sensor Network Deployment System for Post-Disaster Monitoring", Communications in Computer and Information Science, Vol. 304, pp. 298-305, (2012).

Bildiri

1. Tuna G., Gulez K., Gungor V. C., "Communication Related Design Considerations of WSN-aided Multi-Robot SLAM," Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2011), pp. 493-498, Istanbul, Turkey, 13-15 April, 2011.
2. Tuna G., Gulez K., Mumcu T.V., "Multi-Sensor Fusion Strategy for SLAM-aided Foreign Object Detection," Proceedings of the 2nd International Conference on Informatics (ICI 2011), pp. 33-38, Canakkale, Turkey, 27-29 April, 2011.
3. Tuna G., Gungor V. C., Gulez K., "Unmanned Vehicle-Aided Automated Meter Reading," Proceedings of the 6th International Conference on Broadband Communications & Biomedical Applications (IB2COM 2011), pp. 289-293, Melbourne, Australia, 21-24 November, 2011.
4. Tuna G., Gulez K., Gungor V. C., "The Effects of EMI on Navigation and Guidance of Unmanned Vehicles", 1. Ulusal EMC Konferansı, S8P1, Doğuş Ü., İstanbul, 14-16 Eylül 2011, Özel Oturum (EMC/EMI Control for Electrical and Unmanned Vehicles).
5. Aliskan I., Mumcu T. V., Tuna G., Gulez K., Adam A. A., "A New Passive Filter for Reduction of EMI Effects on Induction Motor Drive Systems of Electrical Vehicles", 1. Ulusal EMC Konferansı, S8P3, Doğuş Ü., İstanbul, 14-16 Eylül 2011, Özel Oturum (EMC/EMI Control for Electrical and Unmanned Vehicles).

6. Tuna G., Gungor V. C., Gulez K., "GPS AIDED EXTENDED KALMAN FILTER BASED LOCALIZATION FOR UNMANNED VEHICLES", 20. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, pp. 1-4, Fethiye, Turkey, 18-20 April, 2012.
7. Tuna G., Gulez K., "Aided Navigation Techniques for Indoor and Outdoor Unmanned Vehicles", Proceedings of the 5th IEEE IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS 2012), pp. 1-4, Istanbul, Turkey, 7-10 May, 2012.
8. Tuna G., Gulez K., Gungor V. C., Mumcu T. V., "Mobile Robot Aided Self-Deploying Wireless Sensor Networks for Radiation Leak Detection", Proceedings of the 5th IEEE IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS 2012), pp. 1-5, Istanbul, Turkey, 7-10 May, 2012.
9. Tuna G., Tasdemir C., Gulez K., Mumcu, T. V., Gungor V. C., "Autonomous Intruder Detection System Using Wireless Networked Mobile Robots", in Proc. of the 7th IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC'12), Cappadocia, Turkey, 1-4 July, 2012.

Proje

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Ortak Disiplinler Arası Araştırma Projesi, Proje No: 2010-04-02-ODAP01, Başlama Tarihi: 15.06.2010, Bitiş Tarihi: 15.06.2012, Proje Adı: Farklı türden otonom robotlar kullanarak çoklu algılayıcı füzyonu ile yabancı cisim tespiti.