

**ÇOKLU ROBOT SİSTEMLERİNDE ROBOTLAR ARASI  
HABERLEŞME VE İŞBİRLİĞİ KULLANILARAK ARAMA  
VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI**

**ÖMER ÇAYIRPUNAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2009**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

---

Doç. Dr. Erdoğan DOĞDU

Anabilim Dalı Başkanı

Ömer ÇAYIRPUNAR tarafından hazırlanan ÇOKLU ROBOT SİSTEMLERİNDE ROBOTLAR ARASI HABERLEŞME VE İŞBİRLİĞİ KULLANILARAK ARAMA VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Yrd. Doç. Dr. Bülent TAVLI  
Tez Danışmanı

---

Doç. Dr. Veysel GAZI  
Tez İkinci Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Veysel GAZI

Üye : Yrd. Doç. Dr. A. Murat ÖZBAYOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tansel ÖZYER

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

ÖMER ÇAYIRPUNAR

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Bilgisayar Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Yrd. Doç. Dr. Bülent TAVLI, Doç. Dr. Veysel GAZİ  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Eylül 2009

**Ömer ÇAYIRPUNAR**

**ÇOKLU ROBOT SİSTEMLERİNDE ROBOTLAR ARASI HABERLEŞME  
VE İŞBİRLİĞİ KULLANILARAK ARAMA VERİMLİLİĞİNİN  
ARTIRILMASI**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında çoklu robot sistemleri ile gerçek zamanlı olarak yapılan bir arama görevinde robotlar arası haberleşmenin sistem başarısına olan etkisi benzetimler ve robot uygulamaları yapılarak incelenmiştir. Yapılan ilk çalışmada engellerin bulunmadığı doğrusal bir alan üzerinde robotların iletişim kurabildiği ve kuramadığı iki farklı arama davranışı üzerinde durulmuş ve iletişimin arama başarısına olan etkisi ölçülmüştür. Devam eden çalışmalarda ise daha fazla sayıda robot kullanılarak üzerinde duvarlar ve engeller bulunan daha gerçekçi bir alan içerisinde arama davranışı gerçekleştirilmiş ve arama sırasında her bir robotun yaptığı arama ile ilgili harita bilgisini hafızasında tutması ve gerektiğinde bu bilgiyi iletişim mesafesinde bulunan diğer robotlarla paylaşması sağlanmıştır. Yapılan benzetim ve deneylerde çok robotlu işbirlikli bir arama senaryosunda robotlar arasındaki iletişim mesafesinin robotlar arasındaki işbirliğine ve dolayısıyla da arama başarımlarına olan etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada ise robotların sadece yaymış oldukları RF işaret şiddetleri kullanılarak ve başka herhangi bir konumlandırma yöntemi olmaksızın arama yapılacak ortama dağılmaları amaçlanmıştır. Burada dağılma davranışı doğada bakteriler gibi tek hücreli canlıların besin arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş bir yöntem olan bakteri beslenme eniyileme yöntemi kullanılarak robotların kendilerini istenilen şekilde konumlandırmaları ile sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürü Sistemler, Çok Robotlu Arama Görevi, Robotlar Arası İşbirliği, Haberleşme, İletişim Yarıçapı, RF İşaret Şiddeti Kullanılarak Konumlanma

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Computer Engineering  
**Supervisor** : Assistant Professor Bülent TAVLI, Associate Professor  
Veysel GAZI  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – September 2009

**Ömer ÇAYIRPUNAR**

**IMPROVING THE PERFORMANCE OF COOPERATIVE SEARCH BY  
USING COMMUNICATION AND COORDINATION IN MULTI ROBOT  
SYSTEMS**

**ABSTRACT**

In this thesis the effects of communication on cooperative robotic search task is studied through both simulations and robotic experiments. Firstly, the benefits of networked communication are investigated by evaluating the results of communicative and non-communicative search by multi robot teams in a directional area without any obstacles. In the continuing studies the robotic search experiments are repeated with more robots and in a more realistic area containing walls and obstacles. During the search each robot is also allowed to keep an occupancy grid based map of the environment containing the information about the cells it has visited and to exchange this information with the other robots within its communication range. The effect of the size of communication range on the performance of the system defined as the time of completion the cooperative search task was investigated through both simulations and experiments. In the later part a robotic dispersion task which is a preliminary work for a robotic search is studied. During the dispersion of the robots any other positioning technique rather than the received radio signal strengths broadcasted from the other robots is not used. The dispersion of the robots is provided by using bacterial foraging algorithm which is an optimization method inspired from the foraging behaviors of mono-cellular microorganisms.

**Keywords:** Swarm Systems, Multi Robot Cooperative Search, Communication, Transmission Range, Positioning by Using Received Signal Strength Information

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocalarım Doç. Dr. Veysel GAZİ ve Yrd. Doç. Dr. Bülent TAVLI'ya ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği ve Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Her türlü zorluğa birlikte göğüs gerdiğim Sürü Sistemler Araştırma Laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarım olan Salih Burak AKAT, Murat İlter KÖKSAL, Mirbek TURDUEV, Yunus ATAŞ, Engin KARATAŞ, Abdel-Razzak MERHEB, Andaç Töre ŞAMILOĞLU, Esmâ GÜL ve Sabahat DURAN'a

Her zaman arkamda olan, beni sürekli destekleyen ve bugünlere gelmemde en büyük emeğe sahip olan değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 104E170 ve 106E122 sayılı projeler kapsamında ve Avrupa Komisyonu tarafından 045269 sözleşme numaralı 6. Çerçeve Programı özel amaçlı araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| ÖZET   | v    |
| ABSTRACT   | vi   |
| TEŞEKKÜR   | vii  |
| İÇİNDEKİLER  | viii |
| 1. GİRİŞ   | 1    |
| 1.1. Çok Erkinli Robot Sistemleri  | 1    |
| 1.2. Arama Kurtarma Çalışmalarında Sürü Robotların Kullanılması  | 2    |
| 1.3. Sürü Robotlarda İletişim  | 3    |
| 1.4. İletişimin Etkileri   | 5    |
| 1.5. Haberleşme İçeriği  | 6    |
| 1.6. İletişim Mesafesi   | 8    |
| 1.7. Tezin İçeriği   | 10   |
| 2. ARAMA VE KURTARMA OPERASYONLARINDA DİNAMİK ROBOT AĞLARI KULLANIMI   | 12   |
| 2.1. Giriş   | 12   |
| 2.2. Robot Platformu   | 13   |
| 2.3. Haberleşme Donanımı Özellikleri   | 15   |
| 2.4. Deney Ortamı  | 17   |
| 2.5. Arama Stratejileri  | 18   |
| 2.5.1. Bireysel Arama Stratejisi   | 19   |
| 2.5.2. İşbirlikli Arama Stratejisi   | 21   |
| 2.6. Uygulama Sonuçları  | 23   |
| 3. İLETİŞİM MESAFESİNDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN ROBOTLAR ARASI İŞBİRLİKLİ ARAMA PERFORMANSINA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ | 25   |
| 3.1. Giriş   | 25   |
| 3.2. Deney Ortamı  | 26   |
| 3.3. Problem Tanımı  | 30   |
| 3.4. Arama Stratejileri  | 34   |
| 3.4.1. Sarmal Arama  | 34   |



|   |    |
|---|----|
| 3.4.2. Bilgilendirilmiş Rastgele Arama  | 36 |
| 3.5. Benzetim ve Uygulamalar  | 37 |
| 3.6. Denev Sonuçları  | 44 |
| 4. RF İŞARET ŐİDDETEĐ VE BAKTERİ ENİYLEME YÖNTEMİ<br>KULLANILARAK ROBOT DAĞILMASININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ | 46 |
| 4.1. Giriş  | 46 |
| 4.2. Denev Ortamı ve Robotlar   | 47 |
| 4.3. İŞaret Őlüm Teknikleri  | 48 |
| 4.4. Dağılma Yöntemi  | 54 |
| 4.5. Denevler   | 58 |
| 4.6. Uygulama Sonuçları   | 60 |
| 5. SONUÇ  | 63 |
| 5.1. Yorumlar   | 63 |
| 5.2. Gelecek alıŐmalar   | 66 |
| EKLER   | 67 |
| A. ÇOKLU ROBOT UYGULAMALARI İÇİN BİR DENEY DÜZENEĞİ   | 67 |
| A.1. Giriş  | 67 |
| A.2. Denev Düzeneği   | 68 |
| A.2.1. Robotlar   | 68 |
| A.2.2. Kamera   | 69 |
| A.2.3. Bilgisayar Yazılımı  | 70 |
| A.2.4. Arena  | 70 |
| A.3. Kullanılan Görüntü İŞleme Yöntem ve Metotları  | 71 |
| A.3.1. Robot Konumlarının Bulunması   | 71 |
| A.3.2. Robotların Yönelimlerinin Bulunması  | 73 |
| A.3.3. Robotların Kimliklerinin Tespit Edilmesi   | 73 |
| A.4. Robot Hızlarının İletilmesi ve Robot Kontrolü  | 74 |
| A.4.1. Robot Kontrolü   | 75 |
| A.4.2. İletişim Protokolü   | 76 |
| A.5. Sonuçlar   | 77 |
| KAYNAKLAR   | 78 |
| ÖZGEÇMİŞ  | 81 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| <b>Çizelge</b>  | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1. Akrep gezer robotların donanım özellikleri                 | 14           |
| Çizelge 2.2. Kablosuz veri iletişimi sırasında kullanılan paket formatı | 16           |
| Çizelge A.1. Bluetooth haberleşme protokolü yapısı                      | 76           |
| Çizelge A.2. Haberleşme protokolü komutları                             | 76           |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil  | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 1.1. İletişim mesafesinin sisteme etkisi (Şekil [17] den alınmıştır.).   | 10    |
| Şekil 2.1. Deneyleerde kullanılan Akrep gezer robotlar.  | 13    |
| Şekil 2.2. Kullanılan robot platformunun şematik gösterimi.  | 14    |
| Şekil 2.3. Hareketsiz durumdaki robotların veri iletişimindeki paket boyutuna bağlı olarak maksimum iletişim uzaklığının değişimi. | 17    |
| Şekil 2.4. Hareket halindeki robotlarda veri iletişimindeki paket boyutuna bağlı olarak maksimum iletişim uzaklığının değişimi.    | 17    |
| Şekil 2.5. Robotlar arası işbirlikli aramanın şematik gösterimi.   | 18    |
| Şekil 2.6. Bireysel arama stratejisinin akış çizelgesi.  | 19    |
| Şekil 2.7. Bireysel arama stratejisi kullanılarak alınan sonuçlar.   | 20    |
| Şekil 2.8. İşbirlikli arama stratejisi akış çizelgesi.   | 20    |
| Şekil 2.9. İşbirlikli arama stratejisindeki dinleme ve yönlendirme modu akış çizelgesi.  | 22    |
| Şekil 2.10. İşbirlikli arama stratejisi kullanılarak alınan sonuçlar.  | 22    |
| Şekil 2.11. İşbirlikli arama stratejisinin çalışırken çekilmiş bir görüntüsü.  | 23    |
| Şekil 3.1. Arena, robotlar, tepe kamerası ve masaüstü bilgisayardan oluşan deney düzeneği  | 27    |
| Şekil 3.2. 6 robot için verilmiş etiket kodlama sistemi.   | 27    |
| Şekil 3.3. e-Puck minyatür robot.  | 28    |
| Şekil 3.4. Deneyleerde kullanılan işbirlikli arama yöntemi.  | 32    |
| Şekil 3.5. Arama yapılacak ortama uygun olarak çizilmiş arama haritası.  | 33    |
| Şekil 3.6. 1 numaralı robot için uygulanmış uzaklık dönüşümü sonucunda oluşan uzaklık değerleri.                                   | 35    |
| Şekil 3.7. 1 numaralı robot için sarmal arama yöntemi tarafından oluşturulmuş tam kapsayan arama gezingesi.                        | 35    |
| Şekil 3.8. 1 numaralı robot için bilgilendirilmiş rastgele arama yöntemi tarafından oluşturulmuş arama gezingesi.                  | 36    |
| Şekil 3.9. Rastgele bilgilendirilmiş arama benzetim sonuçları.   | 40    |
| Şekil 3.10. Sarmal arama benzetim sonuçları.   | 41    |
| Şekil 3.11. Rastgele bilgilendirilmiş arama robot deney sonuçları.   | 42    |
| Şekil 3.12. Sarmal arama robot deney sonuçları.  | 43    |
| Şekil 4.1. Khepera III mini gezer robot.   | 47    |
| Şekil 4.2. İşaret yayılım modeli ve deneysel ölçüm sonuçları.  | 49    |
| Şekil 4.3. Açısız işaret ölçümü için kullanılan yöntem.  | 50    |
| Şekil 4.4. 1 metre mesafedeki işaret seviyesinde açığa bağlı olarak gerçekleşen değişim.   | 51    |
| Şekil 4.5. 10 metre mesafe içerisinde uzaklığa bağlı işaret seviyesi değişimi.   | 52    |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4.6. Kullanılan işaret ölçüm teknikleri.  | 53 |
| Şekil 4.7. E.coli bakterisinde gözlemlenen besin arama davranışı (Şekil [28]'ten alınmıştır).   | 54 |
| Şekil 4.8. Besin arama algoritması.   | 55 |
| Şekil 4.9. Farklı işaret ölçüm metotları ile ölçülen sinyal şiddeti sonuçları.  | 57 |
| Şekil 4.10. Dağılma deneyleri sonucundaki robotlar arası ortalama iç uzaklıklar.  | 61 |
| Şekil 4.11. İç uzaklıklardaki standart sapmalar.  | 61 |
| Şekil 4.12. Toplam deney süreleri.  | 62 |
| Şekil 4.13. Dağılma sonrası robot konumları.  | 62 |
| Şekil A.1. Arena, robotlar, tepe kamerası ve masaüstü bilgisayardan oluşan deney düzeneği.  | 69 |
| Şekil A.2. Robotların görüntü işlemeyle konum, yönelim ve kimlik bilgilerinin çıkarılmasını sağlayan renkli kodlama sisteminin örnek bir görüntüsü.(Boyutlar mm cinsindedir). | 71 |
| Şekil A.3. Üç robotun üstten alınmış bir görüntüsü. Çizilmiş çemberler robotların birbirlerine yaklaşabilmelerine izin verilecek maksimum mesafeyi belirtmektedir.            | 72 |
| Şekil A.4. Robotların konum ve yönelimlerinin bulunmasını için kullanılan renkli noktalar.  | 73 |
| Şekil A.5. 6 robot için oluşturulan kimlik kodlama sistemi.   | 74 |
| Şekil A.6. Diferansiyel sürüş tekniğine sahip bir robotun hızları arasındaki ilişkiler.   | 75 |

## KISALTMALAR

| <b>Kısaltma</b> | <b>Açıklama</b>   |
|-----------------|---|
| <b>CCD</b>      | Charge Coupled Device – Yükten Bağlı Ayrıştırıcı  |
| <b>EEPROM</b>   | Electrically Erasable Programmable Read Only Memory – Elektriksel Olarak Yazılıp Silinebilir Bellek |
| <b>GPS</b>      | Global Positioning System – Küresel Konumlandırma Sistemi   |
| <b>HSV</b>      | Hue, Saturation, Value – Renk özü, Doymunluk, Değer   |
| <b>IR</b>       | Infra Red – Kıızılötesi   |
| <b>RAM</b>      | Random Access Memory – Rastgele Erişilebilir Bellek   |
| <b>RF</b>       | Radyo Frekans   |
| <b>USB</b>      | Universal Serial Bus – Evrensel Seri Veri Yolu  |
| <b>Wi-Fi</b>    | Wireless Fidelity – Kablosuz Bağlantı   |

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

#### 1.1. Çok Erkinli Robot Sistemleri

Doğada sürü halinde yaşayan canlıların ilginç özellikleri bilim dünyasını uzun yıllardır etkilemektedir. Görece basit canlıların birleşerek oluşturdukları canlı sürülerinin çok gelişmiş davranışlar sergileyebilmeleri ortak bir sürü zekâsının varoluşunun [1] ve bu zekâ ile çok karmaşık işlerin yapılabileceğinin bir göstergesidir. Doğadaki karınca kolonileri buna gösterilebilecek en önemli örneklerden birisidir. Sürü halinde yaşayan canlıların davranışlarının modellenerek günlük hayatta kullanılabilmesi birçok alanda çok verimli sonuçlar ortaya çıkarabilir. Bu sebeple sürü davranışlarının anlaşılması, modellenmesi ve yapay olarak taklit edilebilmesi için yıllardır yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bilim insanlarının oldukça ilgisini çeken bu potansiyel çok erkinli<sup>1</sup> robot sistemleri adlı araştırma alanını ortaya çıkarmış ve son yıllarda bu alana olan ilgi nedeniyle önemli ve popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Kontrol kuramı, elektronik, elektromekanik sistemler ve iletişim/ağ teknolojilerindeki son gelişmeler işbirliği halinde çalışan büyük robot gruplarının (sürü robotlar) [2] geliştirilip uygulanabilmelerini mümkün kılmıştır. Göreceli olarak basit robotların toplu halde kullanılması, tek ve gelişmiş bir robotun kullanımına göre çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlara örnek olarak hatalara karşı gürbüzlük (bir ya da daha fazla robot kaybedilse bile grubun hala istenilen görevi yerine getirebilmesi), esneklik (grubun kendisini değişen görev şartlarına göre tekrar adapte edebilmesi), ölçeklenebilirlik (amaca göre farklı sayıda robotun görevlendirilebilmesi) ve maliyet (basit tasarıma sahip robotların karmaşık bir robota göre çok daha ucuza imal edilebilmesi) verilebilir.

---

<sup>1</sup> ing: agent

Çok robotlu sistemlerin koordinasyon ve kontrolü üzerine son yıllarda yoğun kuramsal çalışmalar yapılırken, deneysel ve pratik çalışmalar nispeten daha az yoğunlukta kalmıştır. Kuramsal çalışmalarda çoğu zaman belirli varsayımlar üzerinden sonuçlar elde edilmektedir. Fakat uygulama (gerçekleme) deneysel çalışmalarında çoğu zaman araştırmacılar laboratuvarlarında var olan robotların özellikleri ile sınırlı kalmak durumundadır ve çoğu zaman bu özellikler kavramsal çalışmalardaki “ideal” koşullardan farklıdır. Bu açıdan deneysel uygulamalı çalışmalar teorik çalışmalardan farklı zorluklar içermektedir. Bu nedenlerle pratik robot uygulamalarındaki çalışmalara daha fazla önem verilmeli ve teori ile pratik arasındaki boşluklar doldurulmalıdır.

## **1.2. Arama Kurtarma Çalışmalarında Sürü Robotların Kullanılması**

Felaket sonrası arama kurtarma çalışmaları hayat kurtarıcı çalışmalar olduğu için oldukça fazla önem taşımaktadır. Arama kurtarma çalışmalarındaki en önemli zorluklardan birisi arama kurtarmanın yapılacağı ortamın insan çalışmasına uygun olmaması ya da o ortamda çalışmanın çok riskli olması olarak gösterilebilir. Yıkılmak üzere olan bir bina, gaz sızıntısı olan bir ortam, yangın çıkmış bir yerleşim yeri ya da yıkılmış olan bir binanın enkazı kurtarma takımlarındaki insanların hayatlarını tehdit edebilecek unsurlardan birkaçıdır [2]. Robotların zor ve insan sağlığı ve hayatı için tehlikeli olabilecek bu ve benzeri şartlar altında çalışabilme becerilerine sahip olması ve dar alanlarda çalışabilmeleri [3] insana olan bazı üstünlükleri arasında gösterilebilir. Bu sebeple yakın gelecekte arama kurtarma çalışmalarında robotların ağırlıklı olarak kullanılması söz konusu olabilir.

Arama ve kurtarma operasyonları, deprem ve terörist saldırıları gibi felaket durumlarında büyük öneme sahiptir. Bu tip bir yardım operasyonunun ilk adımları afet bölgesinin incelenmesi ve hayatta kalanların tespit edilmesidir. Geleneksel olarak bu görev özel olarak eğitilmiş arama-kurtarma ekipleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Ancak son zamanlarda bu görevin çoklu robot takımları ile gerçekleştirilebilmesi için yoğun çalışmalar yapılmaktadır ve yapılan bu çalışmalar kurtarma robotiği olarak

adlandırılan yeni bir araştırma dalının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu dalın önemli gereksinimlerinde birisi ise robotlar arası verimli bir iletişim ve haberleşmenin (doğrudan veya dolaylı) bulunmasıdır. Ayrılmış bir haberleşme ağının kullanılması doğrudan bir iletişim metodu olup robotlar arasında bilgi paylaşımının gerekli olduğu birçok uygulamada kullanılabilir. Özellikle eğer uygun bir arama algoritması ile iletişim ağı verimli bir şekilde birleştirilebilirse etkili bir aramaya ulaşılabilir.

### **1.3. Sürü Robotlarda İletişim**

Çoklu robot sistemlerinde gerçekleşen iletişim, anlamlı bilginin bir robottan diğerine (ya da operatöre) taşınması şeklinde tanımlanabilir. Bu tanım çok farklı iletişim yöntemlerini içerebilir. Örnek olarak ortamda yapılan değişiklikler ve bu değişikliklerin diğer bir robot tarafından algılanması dolaylı yoldan da olsa bir haberleşme biçimidir (bir robotun yere bir iz bırakması ve diğer robotların onu takip etmesi gibi). Bu nedenle robotlar arası iletişimin tanımı biraz daha daraltılarak, kasıtlı yollardan anlamlı bilginin robot erkinler arasında paylaşılması [4] şekline getirilmesi daha doğru bir tanımlama olabilir.

Robotlar arası iletişim çoklu robot sisteminin performansını birçok yönden artırabilir [5]. Örnek vermek gerekirse, robotların ortaklaşa çalışmasını gerektiren, ağır bir yükün birlikte taşınması gibi bir görevde iletişime olan ihtiyaç oldukça fazladır. Çünkü robotlar arasında haberleşme olmazsa robotlar yükü dengeli bir şekilde taşıyamaz ve bu da büyük ihtimalle taşınan nesnenin düşürülerek zarar görmesiyle sonuçlanabilir. Benzer şekilde haberleşme ile robot erkinler arasında önemli verilerin taşınması sağlanabilir. Örnek olarak birbirinden farklı algılayıcı donanımına sahip robotların oluşturduğu bir robot topluluğunda herhangi bir algılayıcıya sahip olmayan bir robot o algılayıcının bulunduğu bir robotla iletişim kurarak algılayıcıdan gelen veriyi kullanabilir ve bu sayede algılayıcı eksikliği hissedilmez. Yine robotlar arası iletişim kullanılarak bir görev paylaşımı yapılabilir ve yapılması istenilen



görevin robotların ortak çalışmasıyla daha verimli ve daha hızlı bir şekilde yerine getirilmesi sağlanabilir.

Yüksek sayıda robotun birlikte işbirliği içerisinde çalıştığı bir sistemde merkezsiz bir kontrolün ya da bütünsel bir bilginin (her erkinin diğer bütün erkinler hakkında bilgi sahibi olması) kullanılması, hem tasarlanması hem de gerçekleştirilmesi oldukça zor olabilen bir kontrol yöntemidir. Düşük sayıda robot kullanıldığında merkezsiz bir kontrol uygulanabilir fakat robot sayısı artırıldığında merkezsiz bir kontrolün uygulanması oldukça zorlaşmaktadır. Bu sebeplerle son yıllarda çoklu robot sistemlerinde merkezcil olmayan kontrol yöntemleri tercih edilmeye başlanmıştır. Bu yöntemlerde robotlar arası iletişim ve ağ yapısı önemli bir yere sahiptir. Başka bir deyişle pratik, verimli çoklu robot uygulamaları yapılabilmesi için verimli kontrol teknikleri dışında ölçeklenebilir, verimli ve gürbüz bir haberleşmenin yanı sıra gerekli ağ protokol ve teknolojilerinin de geliştirilmesi de önemli bir gereksinimdir.

İletişim donanımına sahip işbirliği halindeki bir grup robot doğası gereği kablosuz bir tasarsız ağ<sup>2</sup> oluşturur. Nispeten basit erkinlerden oluşan bu şekildeki bir sürü robot sisteminde robotların iletişim kapasiteleri (güç, iletişim mesafesi, işlem gücü) de sınırlı olacağından, birbirine uzak mesafede bulunan iki robot iletişim kurmak istediklerinde aradaki robotlar üzerinden bir iletişim köprüsü kurularak haberleşme gerçekleştirilebilir. Bu nedenle sürü robot sistemlerinde kullanılmak üzere verimli iletişim ve haberleşme yapılarının oluşturulması ve verimli iletişim protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde bu konularda yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur [6].

Farklı iletişim kanalları kullanarak haberleşen güvenlik ve gözlemlenme amaçlı olarak geliştirilmiş dağıtık bir robot grubunun performansının ölçüldüğü bir çalışmada [7] sistem performansının kullanılan farklı iletişim kanalı sayısı, kanal kapasitesi ve o

---

<sup>2</sup> İng: ad-hoc network

iletişim kanalını paylaşan robot sayısına bağlı olarak değişimi ölçülmüştür. Diğer bir çalışmada ise [8] sisteme basit seviyede de olsa bir iletişimin eklenmesi ile görev tamamlanma sürelerinde oluşan değişimler incelenmiştir. Çok robotlu dağılma ve alana yayılma probleminin incelendiği başka bir çalışmada ise [9] robotlara iletişim kurma becerileri eklendiğinde daha iyi dağılma çözümlerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Farklı bir çalışmada ise [10] ortaklaşa yapılan görevlerde doğrudan kablosuz iletişim kanalları kullanıldığında robotların grup davranışının daha verimli bir hale geldiği ortaya çıkarılmıştır.

#### **1.4. İletişimin Etkileri**

Sürü robotlarda işbirliğine dayalı kooperatif davranışların sergilenebilmesi için gerekli olan temel öğelerden birisi robotlar arası iletişimdir. Bu iletişim doğrudan özel olarak tahsis edilmiş kablosuz iletişim kanalları üzerinden olabileceği gibi çevrede değişiklikler yapılması ya da çevresel değişikliklerin gözlemlenmesi gibi şekillerde de gerçekleştirilebilir. Çevresel değişiklikler ile yapılabilen iletişim dolaylı iletişim<sup>3</sup> olarak adlandırılır. Örnek olarak herhangi bir robotun çalıştığı ortamda yaptığı değişiklikler aynı ortamdaki diğer bir robotun davranışını etkiliyorsa bu dolaylı bir iletişime örnek olarak verilebilir. Farklı olarak doğrudan iletişimde robotlar direkt olarak birbirleriyle özel iletişim kanalları üzerinde haberleşirler.

Sürü robotlar arasındaki iletişimin sisteme olan etkileri şu başlıklar altında özetlenebilir:

- Eylemlerin eş zamanlı hale getirilmesi:

Belirli görevler robotların eş zamanlı olarak çalışması ve koordinasyonunu gerektirmektedir. Bazı görevlerde ise belirli davranışların sırayla ve sürekli olarak tekrar edilmesi gerekliliği bulanabilir. Bu durumlarda robotlar arasında kurulan iletişim altyapısı kullanılarak gerekli senkronizasyon sağlanabilir.

---

<sup>3</sup> İng: stigmergy

- **Bilgi paylaşımı:**

Farklı sürü üyeleri buldukları konum ve geçmiş deneyimleri sebebiyle farklı çevresel bilgilere edinmiş olabilirler. Diğer bir deyişle her robot çevre hakkında farklı yorum ve çıkarsamalarda bulunabilir. Ayrıca, eğer robotlar aynı türden sensörlerle donatılmamışlarsa herhangi bir robotun kendi sensör verisini aynı sensörün üzerinde bulunmadığı diğer bir robotla paylaşması gerekebilir. Bu durumlarda bilgilerin iletişim kullanılarak robotlar arasında paylaşılması sistem performansını olumlu yönden etkileyebilir.

- **Anlaşmaya varma ve görev paylaşımı:**

Bir amacın yerine getirilebilmesi için robotlar arasında hangi görevi hangi robotun yapacağı konusunda kararlar alınmalıdır. Bu sayede işlerin tekrarı engellenebilir ve daha verimli, daha üretken bir topluluk oluşturulabilir.

Werner and Dyer [11] tarafından iletişimin sentetik erkinler üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada sosyal etkileşimlerin sonucunda erkinler arasında zamanla çeşitli iletişim ve anlaşma biçimlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. MacLennan [12] tarafından yapılan bir çalışmada ise iletişimin basit erkinlerden oluşan topluluklarda bile ortaya çıkıp zamanla gelişebildiği gösterilmiştir. Bu çalışmada ortaya çıkan bir diğer unsur ise iletişimin ortaya çıktığı topluluğun iletişimin baskılandığı topluluktan % 84 oranında daha iyi geliştiğidir. Diğer bir benzetim tabanlı çalışmada [13] ise kural tabanlı çok erkinli bir sistem üzerinde iletişim, işbirliği ve çıkarsama yapma arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bu ilişkilerin nasıl yüksek seviyeli davranışlara dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bütün bu çalışmalarda düşük miktardaki bir iletişimin bile sisteme olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

## **1.5. Haberleşme İçeriği**

Robotlar arasında gönderilecek olan mesajların içeriğinin belirlenmesini amaçlayan bir çalışmada [14] iki robotun ortaklaşa çalışmasının gerektiği bir nesne taşıma görevi temel alınmıştır. Bu çalışmada robotlar lider ve takipçi olarak nitelendirilmiş

ve takipçinin görevi liderin hareketlerini taklit ederek taşıma görevini gerçekleştirmek olarak belirlenmiştir. Robotlar arası iletişim zamanla kendi performansını artıracak şekilde gelişebilen sadece iki kelimelik bir cümle ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde takipçi robotun lider robottan gelen mesajlara göre kendini eğitmesi ve taşıma işleminin gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Ek olarak Arkin [15] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada çeşitli görevlerde iletişimin doğrudan kanallar üzerinden gerçekleştirilmesinin zaruri bir gereklilik olmadığı, dolaylı yollar kullanılarak yapılan bir iletişimin de yine sistem performansında olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. İşbirlikli beslenme davranışının<sup>4</sup> incelendiği bu çalışmada iletişimin varlığı robotlar tarafından paylaşılan ortak çaba ile ve yapılan işteki iyileşme ile açıklanmıştır. Burada doğrudan haberleşme yöntemleri ile yapılan iletişim mekanizmaları ile erkinlerin işe ihtiyaç olunan ortak bir noktaya hızlıca toplanmaları sağlanabildiği gibi doğrudan bir haberleşme olmadan, erkinlerin birbirlerinin davranışlarından etkilenmeleri gibi dolaylı yollarla da birbirleriye iletişim kurabildikleri gösterilmiştir. Bu sonuç belirli görevler için her zaman doğrudan bir haberleşmenin gerekli olmadığı sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Örnek olarak bir beslenme görevinin yerine getirildiği bir çalışmada erkinler bağımsız olarak besin kaynaklarını tespit edebilmektedirler. Bir besin kaynağı bulunduğu ise erkinler bir araya gelerek tek bir erkinin taşıyamayacağı besini hedef noktaya taşımaktadırlar. Burada taşıma hızının besine yakınsayan robot sayısının artmasıyla doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca işbirliğinin erkinlerin topluca besin kaynağına doğru yönelmeleri sonucunda ortaya çıkan bir etkileşim sebebiyle ortaya çıktığı görülmüştür.

---

<sup>4</sup> İng: cooperative foraging

Yapılan çoklu analizler sonucunda iletişim içeriği konusunda şu çıkarımlara varılmıştır [15]:

- Özellikle beslenme ve tüketme gibi görevlerde iletişim dolaylı yoldan olsa bile performansı önemli ölçüde artırabilmektedir. Örnek bir gezinme ve beslenme<sup>5</sup> davranışında robotlar gezdikleri bölgelere o bölgenin önceden gezildiğini belirten çeşitli işaretler<sup>6</sup> bırakmaktadırlar. Diğer robotlar tarafından gözlemlenebilen bu işaretler dolaylı bir iletişim olarak tanımlanabilir çünkü herhangi bir kasıtlı haberleşme eylemi değildirler.
- Dolaylı iletişimin yeterli olduğu türden davranışlarda doğrudan bir iletişime gereksinim yoktur ve doğrudan iletişim bu tür davranışlarda dolaylı iletişime çok az miktarda katkı sağlamaktadır çünkü burada aslında erkinlerin davranışları zengin birer iletişim metodu yerine geçebilmektedir.

## 1.6. İletişim Mesafesi

İletişim mesafesinin olabileceği en yüksek değerde seçilmesi mantıklı bir seçim olarak görünmesine rağmen, durum her zaman bu şekilde sonuçlanmayabilir [16]. İşbirlikli bir beslenme davranışının özdeş robotlar kullanılarak simüle edildiği bir çalışmada [17] sosyal performansın robotun iletişim yarıçapının artırılmasıyla ters orantılı olarak önemli ölçüde azalabildiği gösterilmiştir. Buradaki ödünleşim<sup>7</sup> bir erkinin çok zayıf bir çağrı mesajı yayımlandığında diğer erkinlerin bunu duyamaması, eğer çok güçlü bir çağrı mesajı yayımlandığında ise bütün koloninin bir anda bir araya toplanması ve bu nedenle etkili bir keşif yapılmasının engellenmesi olmuştur. Bu sebeple en uzun mesafeli iletişimin her zaman en iyi performansı vermeyeceği sonucu çıkarılabilir.

---

<sup>5</sup> İng: grazing

<sup>6</sup> İng: trail

<sup>7</sup> İng: trade off

Çoklu robot sistemlerinde robotlar arasındaki iletişim bölgesel ve bütünsel bir iletişim olabilir. Bütünsel iletişimde her robot diğer bütün robotlar ile istediği anda haberleşebilir. Fakat bölgesel haberleşmede robotlar sadece iletişim kurabilecekleri alan içerisine giren komşu robotlar ile iletişim kurabilir. Daha önceden yapılmış olan bazı çalışmalarda [18] çoklu robot sistemlerinde bölgesel ve bütünsel haberleşmenin sistem performansına olan etkileri haberleşme süreleri ve olasılıksal modeller kullanılarak ölçülmüştür.

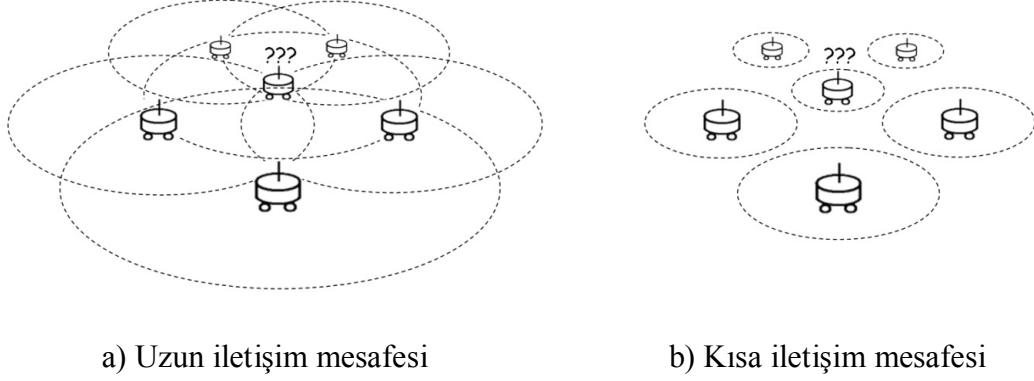
Çoklu robot sistemleri için en uygun iletişim mesafesinin belirlenmesini amaçlayan bir çalışmada [19] en verimli iletişim mesafesi robotlar arasındaki haberleşme gecikmesinin minimize edilmesi ile hesaplanmıştır. Burada robotların rastgele hareket ettikleri varsayılmaktadır ve alıcı olan erkinin karşılayabileceğinden daha fazla bilgi aktarımı gerçekleştiğinde bütün haberleşmenin tamamen bloke olacağı öngörülmüştür. Bu çalışmada en uygun iletişim mesafesinin  $X_{optimal}$  hesaplanmasında kullanılan denklem,

$$X_{opt} = \sqrt{\frac{c \sqrt{c!} - \sqrt{c!}}{p^c - p}} \quad (1.1)$$

Şeklinde verilmiştir. Burada  $c$  veri alma kapasitesi (bir robotun veri kaybı olmadan aynı anda alabileceği maksimum veri miktarı) ve  $p$  ise her bir robot için veri gönderme olasılığı olarak belirlenmiştir.

Bütünsel bir iletişim kısıtlı bir alanda düşük sayıda robot kullanıldığında verimli olabilir. Fakat robot sayısı arttırıldığında ya da arama alanı genişletildiğinde bütünsel bir iletişim sistemin sınırlı iletişim kapasitesi ve artan iletişim yoğunluğu nedeniyle mümkün olmayabilir. Bu nedenle benzer çoklu robot sistemlerinde bölgesel bir iletişimin kullanılması daha verimli sonuçlar verebilir. Her bir robotun iletişim mesafesini istediği gibi artırıp azaltabildiği bir çoklu robot sistemi düşünüldüğünde (Şekil 1.1.(a)) eğer robotların iletişim mesafeleri çok geniş tutulursa artan

haberleşme trafiği nedeniyle iletişim performansı düşer ve bir yerden sonra artık iletişim mümkün olmayabilir. Diğer durumda iletişim mesafeleri çok kısa tutulduğunda ise (Şekil 1.1.(b)) robotlar yeterli iletişim kuramayacakları için haberleşme verimi çok düşebilir. Ek olarak haberleşme mesafesindeki değişim bir robot için çok önemli olan güç tüketimini de etkileyecektir. Örnek olarak yüksek tutulan bir haberleşme mesafesi elektronik donanımın çektiği gücü artırarak pilin daha çabuk tükenmesine neden olabilir. Bu nedenlerle robotlar arasında verimli bir iletişimin gerçekleştirilmesi için kullanılacak doğru haberleşme mesafesinin belirlenmesi ve uygun haberleşme yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.



Şekil 1.1. İletişim mesafesinin sisteme etkisi (Şekil [17] den alınmıştır.).

## 1.7. Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasında özet olarak çoklu robot sistemleri ile gerçek zamanlı olarak yapılan bir arama görevinde robotlar arası haberleşmenin sistem başarısına olan etkisi incelenmiştir. Benzetimler ve gerçek robotlar kullanılarak yapılan deneylerde arama başarımları ölçülmüş ve elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla haberleşmenin robotlar arası işbirliğine olan etkisi araştırılmıştır.

Yapılan ilk çalışmada arama kurtarma operasyonlarında robotların kullanımı için geliştirilmiş ağ tabanlı dinamik bir arama stratejisi ortaya konulmuştur. Bu sayede arama yapan bütün robotlar arasında sürekli aktif bir haberleşme ağı oluşturulması ve önemli bilgilerin robotlar arasında her zaman paylaşılabilmesi sağlanmıştır. Bu

stratejinin iletişim ağı içermeyen robotların birbirlerinden bağımsız olarak arama yaptığı bireysel bir arama davranışına olan üstünlükleri stratejilerin aranan nesnelere bulma başarıları (aranan nesneyi bulma süreleri) ölçülerek ortaya çıkarılmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada ise daha fazla sayıda robot kullanılarak çok robotlu bir arama görevi gerçekleştirilmiştir. Burada robotlar arası haberleşmenin yapılabildiği ve yapılamadığı durumlar dışında ek olarak robotlar arasında farklı mesafelerde kurulan iletişimin de arama başarısına olan etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada robotlar arasındaki farklı iletişim mesafeleri bir tepe kamerasından alınan görüntüler ile robotların konumlarının hesaplanması ve robotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak iletişimin filtrelenmesi şeklinde sanal olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir robotun yaptığı arama ile ilgili harita bilgisini hafızasında tutması ve gerektiğinde bu bilgiyi iletişim mesafesinde bulunan diğer robotlar ile paylaşması sağlanmıştır. Bu sayede yapılan iletişim robotlar arasındaki işbirliğine ve dolayısıyla de arama performansına olan katkısı araştırılmıştır.

Yapılan son çalışmada ise herhangi bir arama öncesi ön çalışma olarak robotların sadece yaymış oldukları RF işaret şiddetleri kullanılarak ve başka herhangi bir konumlandırma yöntemi olmaksızın arama yapılacak ortama dağılımları amaçlanmıştır. Burada dağılıma davranışı doğada bakteriler gibi tek hücreli canlıların besin arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş bir yöntem olan bakteri beslenme eniyileme yöntemi kullanılarak robotların kendilerini istenilen şekilde konumlandırmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem uyarlanarak aranan nesnenin besin kaynağı yerine ortamdaki RF işaret kaynakları olması sağlanmış ve dağılıma algoritması da sadece robotların birbirlerinden almış oldukları RF işaret seviyeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca radyo işaretlerinin ölçülmesi ve ortamdaki gürültü ve işaret seviyesi ölçüm hatalarının en aza indirilmesi için çok yönlü ve çok konumlu işaret ortalamaları gibi iyileştirmeler geliştirilerek dağılıma verimliliğinin artırılması sağlanmıştır.



## BÖLÜM 2

### 2. ARAMA VE KURTARMA OPERASYONLARINDA DİNAMİK ROBOT AĞLARI KULLANIMI

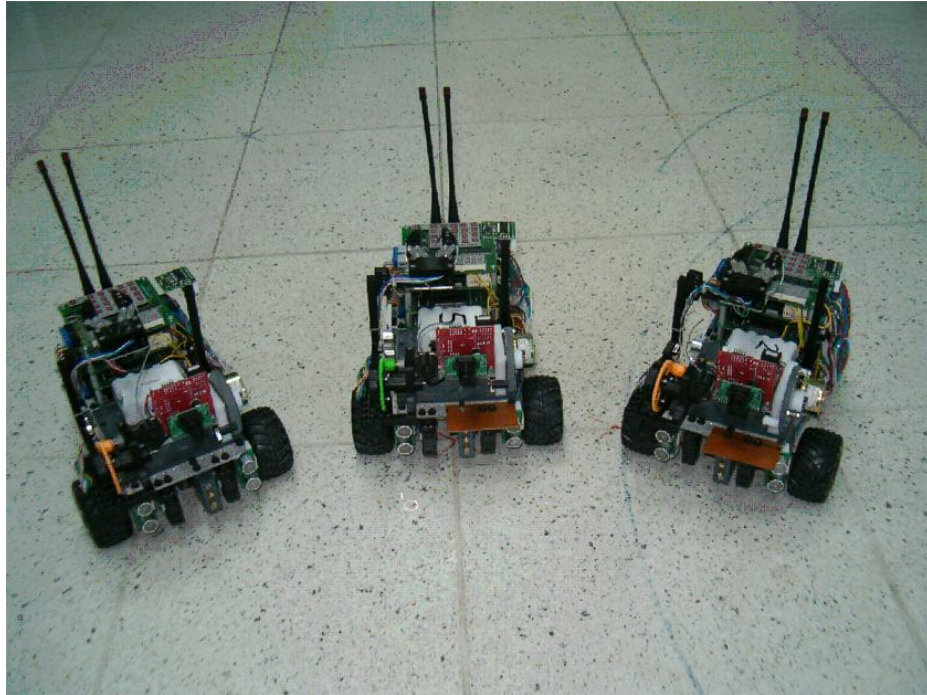
#### 2.1. Giriş

Otonom robotların (erkinlerin) arama kurtarma operasyonlarında kullanılması son yıllarda üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı yeni bir araştırma konusudur. Aynı zamanda birden fazla sayıda robotun bir sürü halinde ortaklaşa çalışmasını hedef alan sürü robotları ile ilgili çalışmalar da hız kazanmıştır. Benzer sürü davranışlarının gözlemlenebilmesi için sürü erkinleri arasında bir iletişim ağının kurulması gerekmektedir. Bu iletişim sayesinde önemli veriler erkinlerin tamamına yayılmakta ve veri kaybının önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır. Robotlar arasında sürekli bir iletişim ağı olması ve verimli bir arama stratejisi izlenmesi ile robotların arama çalışmalarında kullanılması oldukça yararlı sonuçlar verebilir ve daha geniş alanların daha etkin biçimde taranması sağlanabilir. Bu bölümde yapılan çalışmada robotlar arası dinamik (devingen) bir tasarsız ağ kurma ve koruma yöntemi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yöntemle robotların arama davranışını gerçekleştirirken birbirleri ile sürekli bir iletişim halinde olmaları sağlanmıştır. Deneysel olarak yöntemin verimliliği robot uygulamaları yapılarak sınanmıştır.

Yapılan bu çalışmada üzerine odaklanılan nokta robotlar ile gerçek zamanlı olarak yapılan bir arama çalışmasının nasıl daha verimli bir hale getirilebileceği üzerinedir. Çalışmada iki farklı arama stratejisi üzerinde durulmuş ve bu iki stratejinin deneysel karşılaştırılması yapılmıştır. İlk strateji aralarında iletişim ağı olmayan robotların bireysel bir arama tarama yapması üzerinedir. Bu stratejide robotlar birbirlerinin varlığından habersiz olarak arama tarama davranışını yürütmektedir. İkinci stratejide ise bütün robotlar dinamik bir ağ ile birbirlerine bağlı olarak [20] arama davranışını gerçekleştirmektedir. Stratejilerin farklı uzaklıklardaki aranan nesneyi bulma başarıları ve toplam arama süreleri ölçülmüştür.

## 2.2. Robot Platformu

Deneyleerde kullanılan robot platformu Şekil 2.1.'de gösterilen Akrep gezer robotlardır. Çizelge 2.1. de donanım özellikleri verilmiş olan bu robotlar diferansiyel sürüş sistemine sahiptir ve robotların üzerine uzaklık tespiti için farklı açılarda bakan 10 adet uzaklık algılayıcısı bulunmaktadır. Bu algılayıcılardan 6'sı ses ötesi 4'ü de kızılötesi uzaklık algılayıcısıdır. Ses ötesi algılayıcıların ölçüm mesafesi 1.5 m, kızılötesi algılayıcıların ise 70 cm ile sınırlandırılmıştır. Robotlarda kablosuz veri aktarımı için çift yönlü bir iletişim donanımı bulunmaktadır. Ayrıca robotun ön kısmında görüntü işleyebilen ve renk takibi yapabilen bir kamera modülü bulunmaktadır. Yine robotun ön tarafında küçük nesnelere tutabilen ve gerektiğinde toplayabilen iki eksenli bir tutucu kol mevcuttur.



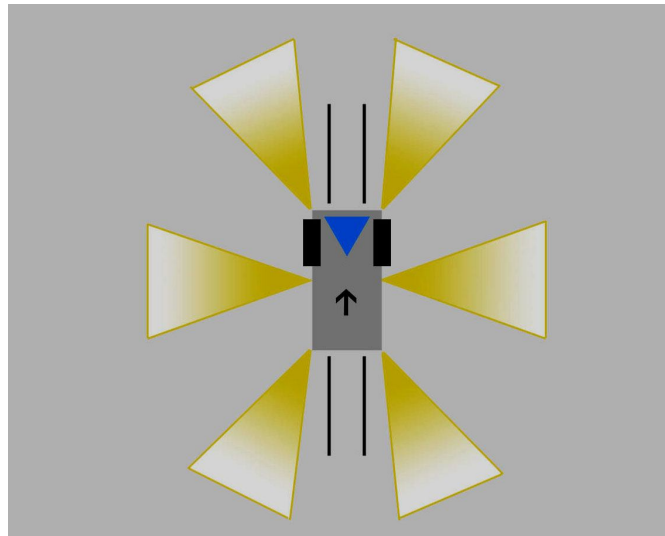
Şekil 2.1. Deneyleerde kullanılan Akrep gezer robotlar.

Şekil 2.2. deneyde kullanılan robot platformunun şematik çizimini göstermektedir. Şekildeki okun yönü robotun ön tarafını göstermektedir. Ön ve arkada bulunan siyah renkli çubuklar kızılötesi uzaklık algılayıcılarını ve ölçeklenmiş ölçüm mesafelerini, yanlara ve köşelere yerleştirilmiş üçgenler ses ötesi uzaklık algılayıcılarını ve

ölçeklenmiş ölçüm mesafelerini, ön taraftaki küçük üçgen kamera birimini ve görüş açısını son olarak siyah renkli kutucuklar da robota itki veren tekerlekleri temsil etmektedir.

Çizelge 2.1. Akrep gezer robotların donanım özellikleri

|                        |  |
|------------------------|--|
| İşlemci                | 20 MHz Zilog Z80 mikrodenetleyici  |
| Program Alanı          | 32KB RAM, 32 KB EEPROM   |
| Çevre Birim Arayüzü    | PIC16F877 tabanlı algılayıcı ve iletişim kontrolcüsü   |
| Uzaklık Algılayıcıları | 6 sesötesi (Devantech SRF04) uzaklık algılayıcısı ve 4 kızılötesi (SHARP GP2D02) uzaklık algılayıcısı  |
| Haberleşme Modülü      | LINX 433 MHz çift yönlü veri iletişim kartı  |
| Görüş sistemi          | Öne ve arkaya doğru bakış açısı değiştirilebilen platform üzerine monte edilmiş robotik kamera modülü (CMUCAM2) ve canlı yayın kamera modülü |
| Hareket Sistemi        | Step motorlar ile diferansiyel sürüş   |
| Tutucu                 | 2 eksenli tutucu, toplayıcı  |
| Yönelim Belirleme      | Daventech Elektronik pusula Modülü   |



Şekil 2.2. Kullanılan robot platformunun şematik gösterimi.

Deneyleerde arama tarama davranışının doğrusal bir düzende yapılması tercih edilmiştir. Fakat robotlarda ileri yönde uzun mesafeli hareketlerde doğrultudan sapma gözlemlenmiştir. Bu sapmanın teker çaplarındaki çok küçük farklardan, zemindeki pürüzlerden ve elektrik motorlarındaki eşitsizliklerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bu doğrultu sapmasını giderebilmek için robotların diferansiyel sürüş sistemleri geri beslemeye sahip olmadığından robotlar üzerinde bulunan elektronik pusuladan yararlanılması düşünülmüştür. Ayrıca ses ötesi uzaklık algılayıcılar ile nesnelere çarpma ve hareket sırasında çevre ile olan mesafeyi koruma sağlanmıştır.

Robotlarda Zilog Z80 tabanlı bir ana işlem kartı bulunmaktadır. Bu işlemci kartında 32 KB RAM bellek ve kalıcı robot programları için 32 KB EEPROM bellek mevcuttur. İşlemci hızı 20 MHz olarak belirlenmiştir. Ayrıca robotlarda PIC 16F877 tabanlı bir algılayıcı ve iletişim kontrol kartı bulunmaktadır. Bu kart arka planda algılayıcı ölçümlerini ve seri iletişimi yapmakta ve sonuçları ana işlemciye iletmektedir. Bu sebeple robot programlanırken bu işlemci kodu üzerinde değişiklik yapılmamakta, sadece Z80 işlemcisi programlanmaktadır. Yazılım geliştirme platformu olarak ücretsiz olarak dağıtımı yapılan C dili tabanlı SDCC (Small Device C Compiler) derleyicisi kullanılmıştır.

### **2.3. Haberleşme Donanımı Özellikleri**

Robotlarda çift yönlü veri iletişimi için LINX Technologies firmasına ait LR serisi, 433 MHz frekansında çalışan kablosuz alıcı, verici birimler kullanılmaktadır. Bu birimlerin veri sayfalarına kaynakça bölümündeki web adreslerinden ulaşılabilir [21], [22]. Veri aktarım hızı saniyede 4800 bit olarak belirlenmiştir. Veriler bir paket yapısıyla gönderilmektedir. Paket yapısı Çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Her bir paket zamanlama öncülleri, anahtar veriler, gönderici ve alıcı adresi, veri boyutu, veri dizisi ve kontrol kodundan oluşmaktadır. Paketlerdeki kontrol kodu veri doğruluğunun belirlenebilmesi için ikili veri toplamları ile elde edilen bir sayısal

değerdir. Paket yapısında ayrıca ana istasyon ve robotlar için farklı adresler tanımlanmış ve bu sayede gönderilen bilgilerin sadece gönderildiği adres tarafından alınması sağlanmıştır. Veri iletişimde Minimum paket boyutu 10 bayt, maksimum paket boyutu ise donanımsal olarak 27 bayt ile sınırlandırılmıştır. Bu durumda gönderilebilecek maksimum anlamlı bilgi boyutu 18 Bayt olmaktadır.

Çizelge 2.2. Kablosuz veri iletişimi sırasında kullanılan paket formatı:

|                                |   |   |                 |                  |                       |      |                 |
|--------------------------------|---|---|-----------------|------------------|-----------------------|------|-----------------|
| Zamanlama<br>Öncülü<br>(3x55h) | Z | # | Alıcı<br>Adresi | Verici<br>Adresi | Veri<br>Boyutu<br>(n) | Veri | Kontrol<br>Kodu |
|--------------------------------|---|---|-----------------|------------------|-----------------------|------|-----------------|

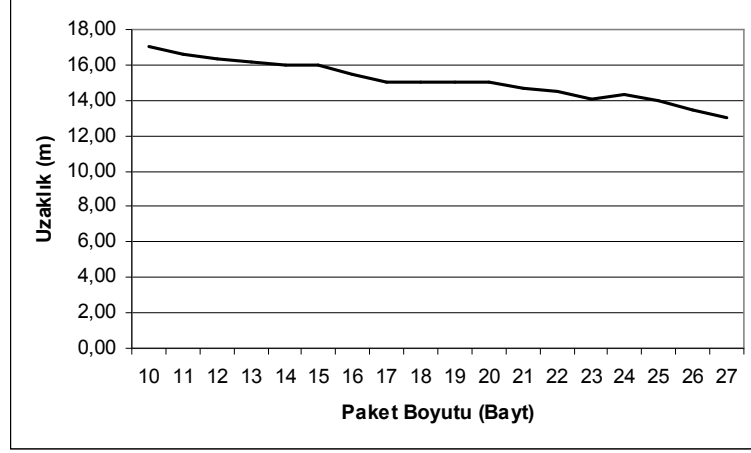
$Veri=d_1, d_2, \dots, d_n$  ( $n < 18$ )

$Kontrol\ Kodu = -(Verici\ Adresi + Alıcı\ Adresi + n + d_1 + d_2 + \dots + d_n)$

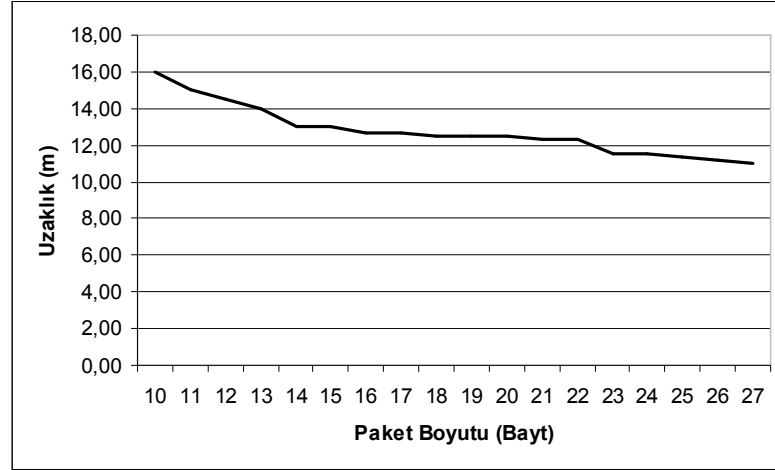
Not: Kontrol kodu sadece 1 Bayt büyüklüğündedir. Toplamalardaki elde göz ardı edilmiştir.

Şekil 2.3. ve 2.4.'teki grafikler robotlar üzerinde yapılan iletişim testleri sonucunda elde edilmiştir. Bu testlerde istasyona farklı uzaklıklardaki robotlar ile veri iletişimi yapılmış ve bu verilerde ortaya çıkan hata miktarlarına göre de grafikler çizilmiştir. Şekil 2.3.'te hareketsiz durumda bulunan bir robottaki iletişim biriminin farklı paket boyutlarındaki maksimum veri aktarım mesafesi verilmiştir. Şekil 2.4.'te ise hareketli durumda bulunan bir robottaki iletişim biriminin farklı paket boyutlarındaki maksimum veri aktarım mesafesi verilmiştir. Burada artan paket boyutuyla birlikte verinin gönderilebildiği maksimum mesafede bir düşüş göze çarpmaktadır. Paket boyutundaki artış nedeniyle ortaya çıkan bu iletim mesafesi düşüşü, iletim süresinin artması ve dolayısıyla iletimde hata olma olasılığının da artması ile açıklanabilir. Ayrıca hareketli durumdaki robot ile sabit durumda veri iletişimi yapılan robotun iletişim mesafeleri karşılaştırıldığında hareketli durumdaki iletim mesafesinin biraz daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Hareketli durumdaki iletim mesafesindeki bu

düşüş robot hareket halindeyken robot üzerindeki motorlardan kaynaklanan elektromanyetik gürültünün veri iletişimde hatalara neden olması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 2.3. Hareketsiz durumdaki robotların veri iletişimindeki paket boyutuna bağlı olarak maksimum iletişim uzaklığının değişimi.



Şekil 2.4. Hareket halindeki robotlarda veri iletişimindeki paket boyutuna bağlı olarak maksimum iletişim uzaklığının değişimi.

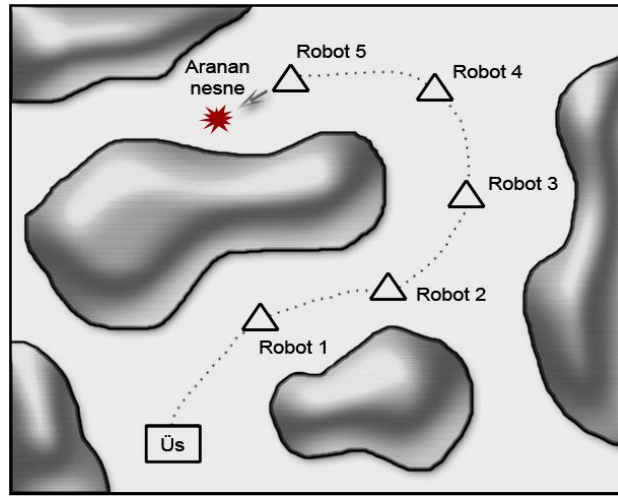
#### 2.4. Deney Ortamı

Deneyler 50 metre uzunluğundaki etrafında sınıflar ve pencereler olan bir koridor ortamında gerçekleştirilmiştir (bakınız Şekil 2.11). Bilgisayar ve iletişim istasyonu

başlama noktasında yer almıştır. Aranılan nesne de başlama noktasına farklı uzaklıklarda yerleştirilerek robotların arama tarama davranışları test edilmiştir. Aranılan nesnenin bulunmasında robotlardaki kamera birimleri kullanılmaktadır bu nedenle ortam aydınlatılması yeterli seviyede olmalıdır. Tam aydınlatılmamış ortamlarda aranılan nesnenin bulunması mümkün olmamaktadır. Arama tarama davranışı başlangıç noktasındaki bilgisayar yazılımı ile başlatılmaktadır ve arama taramanın aldığı süre de yine aynı yazılım ile ölçülmektedir. Arama taramanın sonuçlanabilmesi için başlangıç noktasındaki istasyon ve bilgisayar yazılımının robotlardan gelen bir bulundu sinyali alması gerekmektedir.

## 2.5. Arama Stratejileri

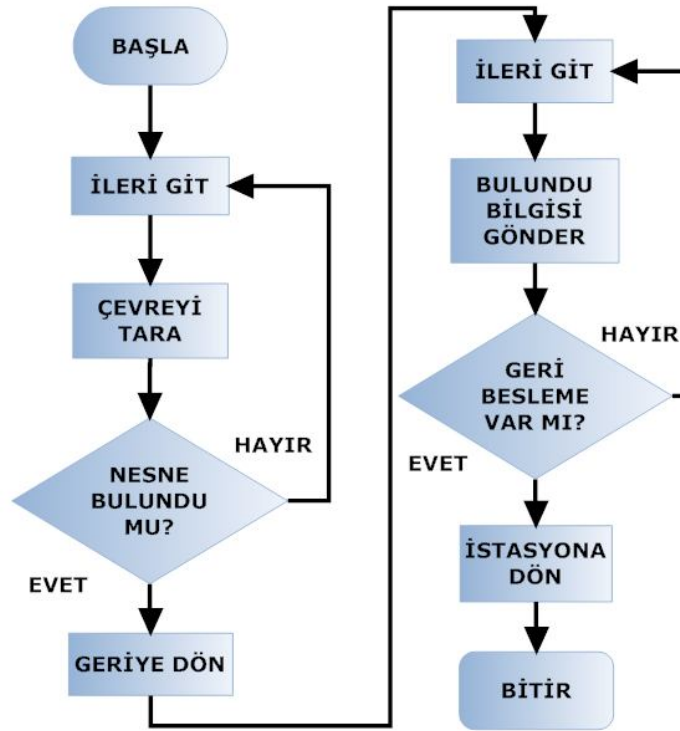
Arama stratejilerinde özel bir nesnenin (bu deneyde turuncu renkli bir kutu) robotlarca aranması ve bulunduğu arama ortamı dışındaki kullanıcı istasyonuna bulundu bilgisinin iletilmesi hedeflenmiştir. Aranılan nesne felakete maruz kalmış kurtarılmayı bekleyen bir canlıyı temsil etmektedir ve bu nesnenin yeri tam olarak bilinmemektedir (Şekil 2.5.). Aranılan nesne robotlar tarafından bulunulduğunda ise istasyondaki kullanıcılara bilgisayar yazılımı tarafından haber verilmektedir. Yapılan çalışmada bireysel ve işbirlikli olmak üzere iki farklı arama stratejisi aranılan nesneyi bulma ve istasyona haber verme sürelerine göre karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2.5. Robotlar arası işbirlikli aramanın şematik gösterimi.

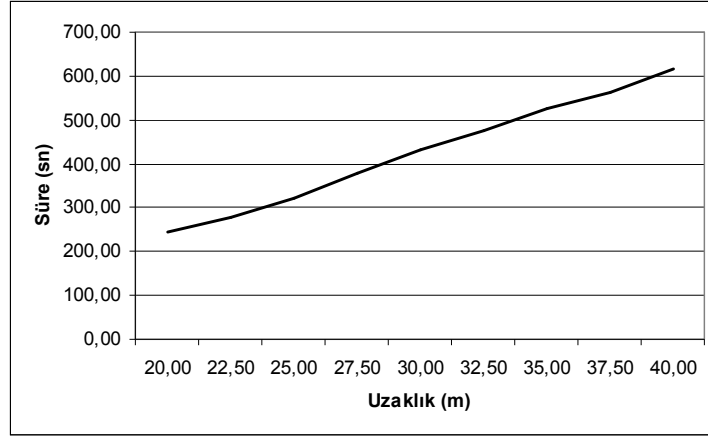
### 2.5.1. Bireysel Arama Stratejisi

İlk stratejide her bir robot arama tarama davranışını bireysel olarak, diğer robotlardan bağımsız bir şekilde gerçekleştirmektedir. Aranılan nesne bir robot tarafından tespit edildiğinde ise o robot istasyona veri gönderebilmek için geri dönmektedir. Bunun sebebi aranılan nesnenin bulunduğu konum ile istasyon arasındaki mesafe robotun haberleşme biriminin kapsama alanından fazla olmasıdır. Bireysel arama stratejisinin akış çizelgesi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu stratejide robotlar arama davranışını iki aşamalı olarak gerçekleştirmektedir. İlk aşamada robot bir miktar ileri yönde hareket etmekte, ikinci aşamada ise çevresini üzerindeki kamera yardımıyla taramaktadır. Bu davranış aranılan nesne bulunana kadar ya da bir engelle karşılaşılan kadar devam etmektedir. Aranılan nesne bulunduğu anda ise robot arama davranışına son verdikten sonra istasyona bulundu bilgisini gönderebilmek için geri dönmekte ve başarılı bir veri iletene kadar istasyona yaklaşmaktadır. Bireysel arama stratejisiyle yapılan deneylerden alınan sonuçlar Şekil 2.7.'de verilmiştir.

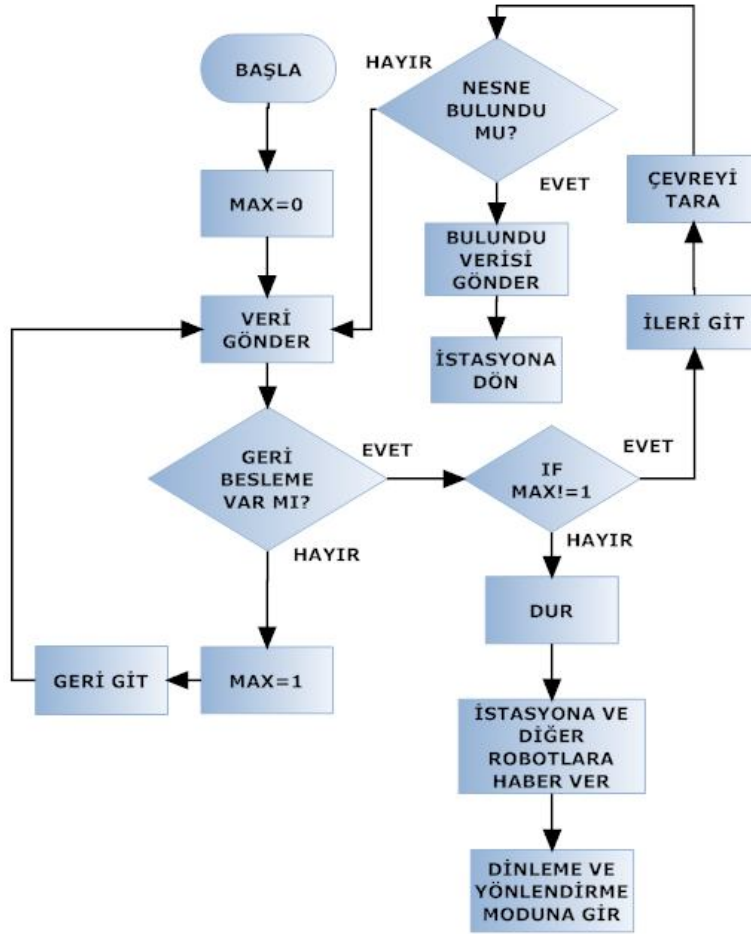


Şekil 2.6. Bireysel arama stratejisinin akış çizelgesi.





Şekil 2.7. Bireysel arama stratejisi kullanılarak alınan sonuçlar.

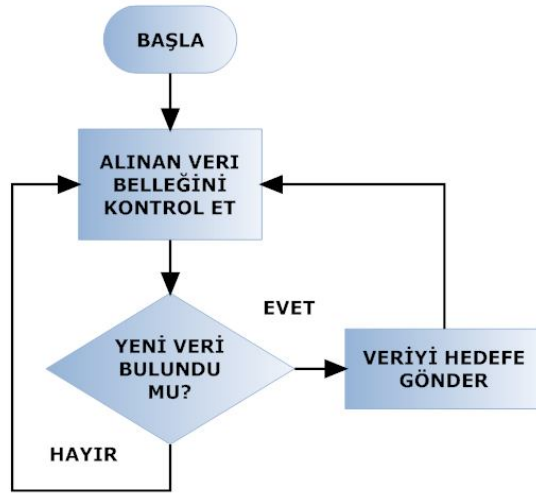


Şekil 2.8. İşbirlikli arama stratejisi akış çizelgesi.

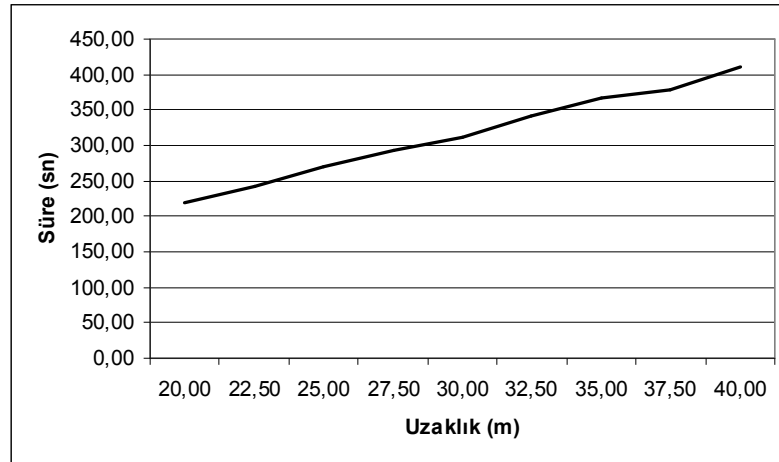
### 2.5.2. İşbirlikli Arama Stratejisi

İşbirlikli arama stratejisinde arama davranışı yapılırken istasyon ve robotların arasında sürekli aktif bir iletişim ağı olması hedeflenmiştir. Bu sayede aranan nesne bulunduğu robotun istasyona haber vermek için geri dönmesine gerek kalmamakta ve robotların bilgiyi birbirilerine aktarmaları aracılığı ile bulundu bilgisi anında istasyona ve istasyondaki kullanıcıya bildirilebilmektedir. Bu stratejide arama davranışı iletişim ağının sürekli kontrol edilmesi ile birlikte yapılmaktadır (Şekil 2.8.). Bu ise arama davranışı sırasında belirli aralıklarla istasyona veri gönderilmesi ve karşılığında bir cevap alınması şeklinde yapılmaktadır.

İletişim ağının koptuğu bir durumda robot arama davranışına ara vermekte ve iletişim tekrar sağlanana kadar istasyona yaklaşmaktadır. İletişim tekrar sağlandığında ise robotun o anda bulunduğu nokta istasyona olan maksimum iletişim mesafesi olarak kabul edilerek robot gelen verileri dinleyip gideceği adrese yönlendirme şeklinde çalışmasına devam etmektedir. Dinleme ve yönlendirme olarak adlandırılan ve Şekil 2.9.'de akış şeması verilen bu görevlendirmede robot artık arama yapmamakta ve bulunduğu noktada sabit bir şekilde bekleyerek arama yapan diğer robotlar ile ana istasyon arasında ikinci bir köprü istasyon görevi üstlenmektedir. (Bakınız Şekil 2.11.) Bu görev değişimi (veya paylaşımı) merkez istasyon ve arama yapan diğer robotlara bildirilmektedir. Artık arama davranışı geriye kalan iki robot tarafından sürdürülmekte ve iletişimler köprü robot üzerinden sağlanmaktadır. Eğer ikinci bir robot köprü ile maksimum iletişim mesafesine ulaşırsa yine aynı şekilde görev değiştirerek ikinci bir istasyon diğer bir deyişle ikinci bir iletişim köprüsü haline gelmektedir. Geriye kalan son robot arama davranışına ikinci köprü ile maksimum iletişim mesafesine ulaşana kadar devam etmektedir. Bu şekilde aranan nesne ile istasyon arasında sürekli aktif bir iletişim ağı kurulması sağlanmış olur. Bu sayede aranan nesne ile ilgili bilgiler istasyona bu bilgi ağı üzerinden anında iletilebilmektedir (Şekil 2.5.). İkinci strateji ile alınan sonuçlar Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Bu strateji denenirken üç robot kullanılmıştır fakat bu sayı arama kurtarma çalışmasının büyüklüğüne göre artırılabilir ve daha iyi sonuçlar alınabilir.



Şekil 2.9. İşbirlikli arama stratejisindeki dinleme ve yönlendirme modu akış çizelgesi.



Şekil 2.10. İşbirlikli arama stratejisi kullanılarak alınan sonuçlar.

İkinci stratejide oluşturulan iletişim ağının en büyük avantajı istasyona bildiri süresinin ilk stratejiye göre oldukça kısılmasıdır. Bu sayede aranan nesneye en kısa zamanda ulaşılmış olur. Şekil 2.11.'de ikinci stratejinin arama tarama çalışması sırasında çekilmiş bir görüntüsü verilmiştir. Şekilden ana istasyon ile en sonda bulunan robot arasında nasıl bir iletişim ağının kurulmuş olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 2.11. İşbirlikli arama stratejisinin çalışırken çekilmiş bir görüntüsü.

## 2.6. Uygulama Sonuçları

Bu bölümde arama kurtarma operasyonlarında robotların kullanımı için geliştirilmiş ağ tabanlı dinamik bir arama stratejisi ortaya konulmuştur. Bu stratejide arama tarama davranışı bir iletişim ağı ile birleştirilerek sonuca hızlı erişim sağlanmıştır. Bu stratejinin iletişim ağı içermeyen bireysel bir arama davranışına olan üstünlükleri yapılan denemelerde elde edilen sonuçlara yansımıştır. İletişim ağına sahip arama davranışı bireysel arama davranışına göre uzaklıkla artan ve %40 seviyelerine kadar ulaşabilen bir arama zamanı kısalmasına neden olmuştur.

Yapılan deneyler sırasında ortamdaki elektrikli cihazlar tarafından oluşturulan elektromanyetik gürültünün kablosuz iletişim performansı üzerine olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir. Örnek olarak her kata belirli aralıklarda yerleştirilmiş kablosuz internet erişim noktaları bu gürültü kaynaklarından birisidir. Bu

elektromanyetik gürültü robotlar arasındaki kablosuz iletişim ağına bazen hataların oluşmasına bazen de iletişimin tamamen kopmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak ölçülen maksimum iletişim mesafeleri gerçekte (gürültüsüz) olduğundan daha az olarak ölçülmektedir. Aynı nedenlerden dolayı robotlar tarafından yürütülen arama davranışı da tahmin edilenden daha uzun sürmektedir. Daha düşük bir elektromanyetik gürültü altında sonuçların daha verimli olacağı düşünülebilir. Benzer biçimde robotlar üzerinde daha gelişmiş iletişim donanımlarının kullanılması da iletişim ağını gürbüzleştirerek deney sonuçlarını olumlu yönde etkileyebilir.

## BÖLÜM 3

### 3. İLETİŞİM MESAFESİNDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN ROBOTLAR ARASI İŞBİRLİKLİ ARAMA PERFORMANSINA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

#### 3.1. Giriş

İletişim çoklu robot sistemlerinde önemli bir role sahiptir. Sisteme iletişimin eklenmesi robotlar arasındaki işbirliğini kolaylaştırabilir ve sistemin performansını önemli ölçüde arttırabilir. Bu çalışmada robotlar arası iletişimin yararları deneysel olarak yapılan iki arama algoritmasının sonuçları karşılaştırılarak sorgulanmıştır. Deneylede sarmal arama<sup>8</sup> ve bilgilendirilmiş rastgele arama<sup>9</sup> olarak belirlenen iki arama algoritması kullanılmıştır. Deneyleler benzetim ve gerçek robotlar üzerinde uygulanarak tekrarlanmış ve arama performansları ölçülmüştür. Robotlarla yapılan deneyleler engeller ve duvarlar içeren bir deney düzeneği üzerinde e-Puck [23] mini gezer robotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada iletişim mesafesi bir tepe kamerası kullanılarak ve robotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak iletişimin filtrelenmesi şeklinde simüle edilmiştir. Ayrıca robotlar yaptıkları gezinmeye bağlı olarak çevre ile ilgili edindikleri bilgileri içeren yerel bir harita tutmakta ve kendi iletişim mesafesindeki diğer robotlar ile bu haritayı paylaşabilmektedir. Bu sayede yapılan iletişimim robotlar arasındaki işbirliğine ve arama performansına olan katkısı araştırılmıştır.

Bu bölümde yapılan çalışmada özetle çoklu robotların birbirleriyle iletişim kurarak yaptıkları işbirlikli bir arama çalışması temel alınmıştır. Öncelikli olarak Matlab üzerinde çeşitli benzetimler yapılmış ve daha sonra aynı benzetimler laboratuvar ortamında kurulmuş bir deney platformunda gerçek robotlar kullanılarak

---

<sup>8</sup> İng: spiral search

<sup>9</sup> İng: informed random search

tekrarlanmıştır. Oluşturulan deney platformunda benzetimlerde kullanılan arenanın bir benzeri oluşturulmuş ve robotlar arasında gerçekleşen iletişim bir tavan kamerası ile robotların birbirlerine olan iç mesafeleri hesaplanarak ve bu mesafeler kullanılarak farklı iletişim yarıçapları oluşturulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir robotun yaptığı arama ile ilgili harita bilgisini hafızasında tutması ve gerektiğinde bu bilgiyi iletişim mesafesinde bulunan diğer robotlarla paylaşması sağlanmıştır. Bu çalışmada özetle, çok robotlu işbirlikli bir arama senaryosunda robotlar arasındaki iletişim mesafesinin arama performansına olan etkisi sarmal arama ve bilgilendirilmiş rastgele arama olarak belirlenmiş iki arama algoritması kullanılarak deneysel olarak ölçülmüştür. Arama başarımları ise yapılan aramaların almış olduğu toplam süreler ölçülerek hesaplanmıştır.

### **3.2. Deney Ortamı**

Deneylein benzetim kısımları Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde gerçek deney platformuna benzer bir ortam yapay olarak tasarlanmış ve deneyleerde kullanılan robotların gerçekçi modelleri kullanılmıştır. Bu sayede benzetimlerin olabildiğince gerçeğe yakın olmaları sağlanılmıştır.

Robot deneyleeri TOBB ETÜ Sürü Sistemleri Araştırma Laboratuvarında geliştirmiş olduğumuz ve Şekil 3.1.'de görüntüsü verilmiş olan bir deney platformunda gerçekleştirilmiştir (daha detaylı bilgi Ek.1 de bulunabilir). Geliştirdiğimiz deney düzeneği 120x180 cm boyutlarındaki bir arena, bu arenanın tamamını görebilecek yüksekliğe yerleştirilmiş bir USB web kamera, altı adet e-Puck minyatür robot ve görüntü işleme, pozisyon geri beslemesi ve kod geliştirme için Matlab (Mathworks Inc., Natick, MA, USA) yazılımının yüklü olduğu bir masaüstü bilgisayardan oluşmaktadır. Burada robotların pozisyon ve yönelim açıları robotların üzerine yerleştirilmiş, üç turuncu renkli nokta ile robotların kimlikleri ise merkezdeki siyah renkli noktalardan oluşan ikili bir kodlama sistemi ile belirlenmektedir. Şekil 3.2.'te 6 robot için yapılmış olan kodlama sisteminin örnek bir görüntüsü verilmiştir. Düzenek hakkında daha detaylı bilgi [24]'te bulunabilir. (Ayrıca Bakınız Ek 1.)



Şekil 3.1. Arena, robotlar, tepe kamerası ve masaüstü bilgisayardan oluşan deney düzeneği

Deney düzeneğinde fazla sayıda robotun aynı anda kullanılabilmesi için robotlar fazla büyük boyutta olmamalıdır. Ayrıca kablosuz veri iletişimi için robotların bluetooth, Wi-Fi, ya da zigbee benzeri bir iletişim altyapısına sahip olmaları gerekmektedir. Bunun yanında robotlar üzerinde kızılötesi (IR) ya da ultrasonik uzaklık sensörü gibi algılayıcılar bulunması daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyabilmektedir.



Şekil 3.2. 6 robot için verilmiş etiket kodlama sistemi.



Bu çalışmada sahip olduğu özellikler ve küçük boyutları nedeniyle EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) Üniversitesi tarafından geliştirilmiş olan e-Puck [23] minyatür robotları kullanıldı (Şekil 3.3.). Bu robotlar sadece 7.0 cm çapında ve üzerinde dsPIC30F6014 [25] işlemcisi bulunduran robotlardır. İki tekerlekli bir diferansiyel sürüş ile hareket edebilen bu robotlar üzerinde ayrıca 8 adet IR uzaklık sensörü, bluetooth iletişim donanımı, kamera, 3 adet mikrofon, ivmeölçer ve bir hoparlör bulunmaktadır. Deney sırasında robotlar bilgisayar tarafından bluetooth aracılığıyla sağlanan kontrol komutlarına göre tekerlek hızlarını ayarlayacak şekilde programlanmışlardır.



Şekil 3.3. e-Puck minyatür robot.

Bir kablosuz haberleşme cihazının iletişim mesafesinin değiştirilebilir olması için cihazın RF çıkış gücünün de değiştirilebilir olması gerekmektedir. Bu şekilde cihazın çıkış gücü istenildiği gibi ayarlanarak istenilen haberleşme mesafesi elde edilebilir. Deneylede kullanılan e-Puck minyatür robotlardaki bluetooth iletişim modülleri sabit çıkış gücüne sahip oldukları için iletişim mesafelerini değiştirebilmek mümkün olmamaktadır. Deneyle yapıldığı sırada elimizde bu özellikte bir haberleşme donanımı bulunmadığı için bu özellik farklı yollardan modellendi.

Gerçekçi bir RF kablosuz iletişimin yapay olarak modellenmesi kapsamlı bir çalışma gerektirir çünkü radyo sinyallerinde saçılma, çok yollu kırılma, zayıflama, distorsiyon ve ortam gürültüsü gibi etkenlerin ortamdan ortama değişmesinden

dolayı, dalga yayılımını modellemek çok zorlaşmaktadır. Örneğin eğer ortamda çok fazla engel varsa sinyal gücü çok azalarak iletişimin mümkün olmadığı bir seviyeye düşebilir.

Bu çalışmada robotlar arası iletişim disk haberleşme modeline göre gerçekleştirilmiştir. Bu modelde her bir robot sadece çevresindeki sabit yarıçaplı dairesel bir alan içerisindeki diğer robotlarla iletişim kurabilmektedir. Her ne kadar kablosuz iletişim değişen çevre şartlarından oldukça etkilendiği için sadece bir mesafe olarak temsil edilmesi pek doğru olmasa da, bu çalışmadaki asıl amaç çok robotlu işbirlikli bir arama davranışında iletişim mesafesinin arama performansına etkisini ölçmek olduğu için robotlar arası iletişimde bu modelin kullanılması uygun görülmüştür. Ayrıca disk iletişim modeli tasarlanması ve analiz edilmesi kolay olduğu için literatürde de yaygınca kullanılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı çalışmalarda disk iletişim modeli tercih edilmiştir.

Robot hareketleri bilgisayar tarafından Bluetooth arayüzü üzerinden sağlanan komutlara göre gerçekleşmektedir. Ana bilgisayarda çalışan kontrol algoritması tarafından her bir robotun ziyaret edeceği bir sonraki hücre belirlenir ve robot ile bu hücre arasında yapay bir potansiyel fonksiyon oluşturulur. Daha sonra bu potansiyele göre robot kontrolcüsü robotlar için bir sonraki hız ve yönelim bilgilerini üretir ve üretilen bu hız ve yönelim bilgileri robotların sağ ve sol motorlarının hızlarına çevrilerek ve her robota Bluetooth haberleşmesi ile iletilir. Bu şekilde arama bölgesindeki bütün hücrelerin robot tarafından sırasıyla ziyaret edilmesi sağlanır. Diğer bir seçenek ise robotların kendi üzerlerindeki kontrolcülerini kullanarak gidecekleri hücrelere kendileri karar vermesi olabilir. Fakat bu yöntemin kullanılması kavramsal olarak pek bir fark yaratmayacağı için burada tercih edilmemiştir. Ayrıca robotların bilgisayar tarafından yönetilen yüksek seviyeli kontrolü dışında robotlarda daha alt seviyede çalışan ve robotların çevredeki engellerden kaçması için geliştirilmiş ikinci bir kontrolcü bulunmaktadır. Robot hareketleri bu iki kontrolcü tarafından üretilen kontrol çıktılarının ağırlıklandırılmış bir toplamı ile belirlenmektedir. Fakat bu ağırlıklandırmada robotların engellere

çarpmadan ortamda arama yapabilmeleri için engellerden kaçma kontrolü daha öncelikli olarak çalıştırılmıştır.

Robotların konum ve yönelimlerinin elde edilmesi için yüksek kalitede bir tepe kamerası kullanılmıştır. USB ara yüzü ile bilgisayara bağlanan kameradan 640x480 çözünürlükte ve saniyede 30 karelik bir görüntü alınmaktadır. Görüntü işleme kısmı ile de saniyede 5-6 karelik bir güncelleştirme hızı ile robotların konum ve yönelim bilgileri elde edilmektedir.

Önceden de belirtildiği gibi her bir robotun konum ve yönü tepe kamerasından alınan görüntüler işlenerek elde edilmektedir. Özet olarak, bu bilgiler robot kontrolcüsüne (ana kontrolcü) iletilmekte ve bu kontrolcü her bir robot için bir sonraki hız ve yönelim bilgilerini üretmektedir. Daha sonrada bu kontrol çıktıları robotlara Bluetooth iletişim ile iletilerek robot hareketleri gerçekleştirilmektedir. Bu sistemdeki ana gecikme görüntü işleme kısımlarından kaynaklanmaktadır. Bu gecikmeyi azaltabilmek için kamera ve görüntü işleme kullanmak yerine robotların iç konumlandırma sistemleri olan teker sayıcılar<sup>10</sup> da kullanılabilirdi. Fakat bu durumda da teker sayıcıların zamanla artarak büyüyen konum hatalarına neden olabilmeleri yüzünden sistemin çalışması olumsuz yönde etkilenebileceği için bu yöntem tercih edilmemiştir.

### **3.3. Problem Tanımı**

Deneylerde kullanılmak üzere oluşturulmuş deney senaryosu temel olarak içerisinde duvarlar ve çeşitli engeller içeren bir ortam üzerinde saklı olan bir nesnenin robotlar tarafından bulunması şeklindedir. Bu senaryoda robotlar alan üzerinde farklı noktalardan arama yapmaya başlarlar ve kullanılan arama yöntemine göre ortamda gezinerek arama davranışını gerçekleştirirler. Arama sırasında iki robot birbirleriyle karşılaştıklarında ise (birbirlerinin iletişim mesafesine girdiklerinde) gerçekleştirmiş

---

<sup>10</sup> İng: encoder

oldukları aramaya ait bilgileri birbirleriyle paylaşırlar. Bu arama yöntemi Şekil 3.4.'te daha açıklayıcı bir şekilde gösterilmiştir. Şekil 3.4.(a)'da 1 numaralı robot kullandığı arama yöntemine göre ortamda arama yapmaktadır. Bu şekilde robotun üzerine çizilmiş olan bilgi balonunda robotun o ana kadar ziyaret etmiş olduğu hücrelerin tutulduğu arama haritası gösterilmektedir. Şekil 3.4.(b)'de ise farklı bir noktadan aramaya ikinci bir robot daha katılmıştır. Şekilde iki robot arasına çizilmiş olan oklar bu iki robot arasındaki bilgi alışverişini temsil etmektedir. Bu bilgi alışverişiyle robotların hafızalarında tutmuş oldukları arama haritaları paylaşılmıştır. Robotlara çizilen yeni bilgi balonlarında ise bilgi paylaşımı ile oluşmuş yeni arama haritaları gösterilmiştir. Son olarak Şekil 3.4.(c)'de arama çalışmasına üçüncü bir robot daha dâhil olmuştur ve üçüncü robot ikinci robotun iletişim mesafesine girdiğinde aralarında yeni bir bilgi aktarımı gerçekleşmiştir. Bu şekilde bütün robotlar arasında bir iletişim gerçekleşmiş ve bütün robotların arama bilgilerini paylaşmaları sağlanmıştır. Bu sayede devam eden arama davranışında robotların birbirlerinin önceden arama yapmış oldukları hücreleri tekrar tekrar aramamaları sağlanarak daha verimli bir arama davranışı gerçekleştirmeleri amaçlanmıştır.

Şekil 3.5.'de gerçek arama ortamına uygun olarak çizilmiş arama haritası gösterilmektedir. Harita aramayı kolaylaştırmak için 12x18 sanal hücreye bölünmüştür ve hücrelerdeki "1" ler engelleri, "0" lar da boş alanları temsil etmektedir. Burada arama davranışı sadece harita üzerinde engellerin olmadığı boş alanlarda gerçekleşmektedir. Harita üzerinde  $R1-R6$  ile işaretlenmiş hücreler 6 adet robot için belirlenmiş rastgele başlangıç noktalarını ve  $T$  ise robotların bulmaları gereken nesnenin bulunduğu hücreyi temsil etmektedir.

Robotlar arasında gerçekleşen haberleşme sırasında paylaşılacak olan bilgi robotların önceden ziyaret etmiş oldukları hücrelerin bilgisinin tutulduğu bir arama haritasıdır. Her bir robot bağımsız olarak bu gezi haritasını hafızasında tutmakta ve yapmış olduğu aramayla birlikte sürekli güncelleştirmektedir. Robotların yapmış oldukları arama davranışı ise bu haritada tutulan önceden aranmış hücreler dışındaki hücrelerin



Robotlar hafızalarında tutmuş oldukları arama haritalarını sadece iletişim mesafeleri içerisine giren robotlar ile paylaşabilirler. Bu iletişim mesafesi robotlar için belirlenmiş maksimum iletişim kurabilme mesafesidir ve bir robotun bu mesafeden daha uzakta bulunan bir robotla iletişim kurabilmesi mümkün değildir. Bu çalışmada robotlar arasındaki farklı haberleşme mesafeleri aradaki iletişimin filtrelenmesi ile elde edilmektedir. Bu filtreleme ise tavan kamerasından alınan görüntülerin işlenerek konumları tespit edilen robotlar arasındaki mesafelerin hesaplanmasıyla ve sadece birbirlerine izin verilen haberleşme mesafesinden daha yakın olan robotların iletişim kurabilmelerine izin verilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım sayesinde robotların iletişim kurma mesafelerinin istenilen her aralıkta sanal olarak seçilebilmesine olanak sağlanmıştır.

|   |   |    |    |   |   |   |   |   |    |   |   |    |   |   |    |   |   |
|---|---|----|----|---|---|---|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0  | 0 | 0 | R4 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1  | 1  | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | R2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | R1 | 0 | 0 | 1  | 1 | 1 | 1  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | T | 0 | 0 | 0  | 1 | 1 | 1  | 0 | 0 | R6 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 1  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 1 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 1  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | R3 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | R5 | 1  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 |

Şekil 3.5. Arama yapılacak ortama uygun olarak çizilmiş arama haritası.

Deneyler robotların birbirleriyle olan iletişim kurma mesafeleri sıfır iletişimle bütünsel bir iletişim arasında farklı aralıklarda ve istenilen değerlerde seçilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Deney yapılan alanda iki robot arasındaki uzaklık en fazla 200 cm kadar olabileceği için bu değer ve üstündeki değerlerdeki bir iletişim mesafesi bütünsel bir iletişim olarak tanımlanabilir ve bu durumda bütün robotlar birbirleriyle istedikleri an iletişim kurabilirler. Bu sebeple deneyler sırasında robotlar için izin verilen iletişim kurma mesafeleri 0-200 cm arasında olacak şekilde belirlenmiştir.

### **3.4. Arama Stratejileri**

Deneyleerde iki farklı arama stratejisi kullanılmıştır. Bunlardan ilki uzaklık dönüşümünü kullanarak ilk önce en yakın çevredeki hücrelerin dolaşılmasını amaçlayan sarmal arama, diğeri ise önceki aramaların bilgisini hafızasında tutan bir bilgilendirilmiş rastgele aramadır.

#### **3.4.1. Sarmal Arama**

Spiral ya da sarmal arama [26] öncelikle en yakın komşuluktaki hücrelerin aranmasını amaçlayan bir tam arama algoritmasıdır. Bu arama yönteminde robot tüm arama alanını sistematik ve verimli bir şekilde tarayarak arama davranışını gerçekleştirir. Bu sebeple sarmal aramada aranacak bölgenin haritasının arama yapılmadan önce bilinmesi gerekmektedir. Sarmal aramada robot aramaya başladığı noktadan itibaren çevredeki alanda sürekli genişleyerek yayılan bir gezinge izleyerek tam bir arama davranışı gerçekleştirir. Aynı zamanda robot arama sırasında ziyaret etmiş olduğu bütün hücreleri bir arama haritası üzerinde sürekli güncelleyerek depolar.

Sarmal aramanın çalışması şu şekilde gerçekleşir. Öncelikle arama bölgesinde bütün hücrelerin başlangıç noktasına göre olan uzaklıları uzaklık dönüşümü yöntemi kullanarak hesaplanır. şekil 3.6.'da 1 numaralı robot için uygulanmış uzaklık dönüşümü sonucu gösterilmiştir. Burada hücrelere yazılmış olan değerler, o hücrelerin başlangıç konumuna olan mesafelerini belirtmektedir. Daha sonra sarmal arama başlangıç noktasından itibaren öncelikli olarak çevresindeki en düşük uzaklık değerine sahip olan hücreleri seçecek şekilde arama gezinesini oluşturmaya başlar. Komşu hücrelerde minimum uzaklık değerinde hücre kalmadığında ise çevredeki uzaklık değeri en yakın olan hücre seçilir. şekil 3.7.'de 1 numaralı robot için sarmal arama tarafından oluşturulmuş tam kapsayan bir arama gezinesi gösterilmiştir.

Şekil 3.7.'deki tam kapsayan arama gezinesi yakından incelendiğinde çok fazla dönüşler bulunduğu göze çarpabilir. Bu dönüşler sarmal arama tarafından üretilen ve başlama noktasından itibaren sürekli genişleyen bir arama gezinesinin sonucunda oluşmaktadır ve dönüşlerin fazla olması robot hareketlerini daha da yavaşlatarak aramanın normalden daha uzun bir zaman almasına neden olabilir. Ortamda engeller çok fazla olduğunda ise bu dönüşler daha da fazlalaşarak robotun takip edebilmesini zorlaştırabilir ve dolayısıyla da arama performansını düşürebilir.

|    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 9  | 8  | 7  | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 4  | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3  | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2  | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | R1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2  | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3  | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4  | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 8  | 8 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5  | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 9  | 9  | 9 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6  | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8  |
| 10 | 10 | 10 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7  | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8  |

Şekil 3.6. 1 numaralı robot için uygulanmış uzaklık dönüşümü sonucunda oluşan uzaklık değerleri.

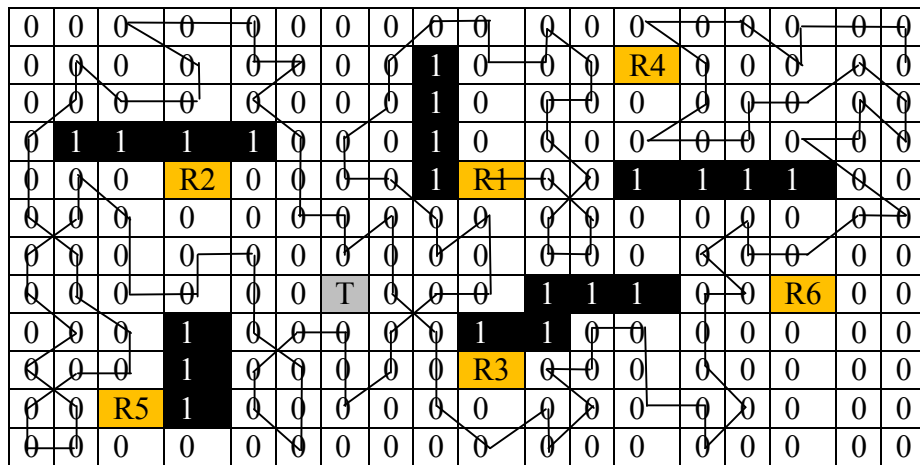
|    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 9  | 8  | 7  | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 4  | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3  | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2  | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | R1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2  | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3  | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 9  | 8  | 7  | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4  | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 8  | 8  | 8 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5  | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8  |
| 9  | 9  | 9  | 9 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6  | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8  |
| 10 | 10 | 10 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7  | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8  |

Şekil 3.7. 1 numaralı robot için sarmal arama yöntemi tarafından oluşturulmuş tam kapsayan arama gezinesi.



### 3.4.2. Bilgilendirilmiş Rastgele Arama

Kullanılan ikinci arama yöntemi robotların arama yapılacak hücreleri rastgele olarak seçtiği bir rastgele arama yöntemidir. Bu yöntemde ek olarak robotların hafızalarında arama yapılan önceki hücrelerin bir listesi tutulmaktadır. Bu sebeple bu arama yöntemine bilgilendirilmiş rastgele arama isminin verilmiştir. Robot hafızasında tuttuğu bu arama listesini kullanarak yakın komşuluğunda bulunan 8 olası hücreden daha önceden ziyaret edilmemiş olanlar arasından rastgele bir seçim yapar ve ziyaret edilecek bütün hücreleri bu şekilde sırasıyla belirler. Eğer etraftaki bütün hücrelerin daha önceden ziyaret edilmiş hücreler olduğu bir durumla karşılaşıldığında ise arama yöntemi her seferinde bir adım geriye giderek arama yapılmamış boş bir hücre bulana kadar arama davranışına devam eder. Şekil 3.8.'de 1 numaralı robot için bilgilendirilmiş rastgele arama yöntemi tarafından üretilmiş olan arama gezinesi gösterilmiştir. Bu gezincede aramanın rastgele oluşundan dolayı sarmal aramada olduğundan çok daha fazla dönüş oluşmuştur. Bu sebeple robotun bu yolu takip edebilmesi daha uzun bir zaman alabilir. Ek olarak, rastgele arama doğası gereği tam kapsayan bir arama algoritması değildir ve bu sebeple bütün hücrelerin ziyaret edilmesini ve dolayısıyla da aranan nesnenin her zaman bulunmasını garanti etmez. Fakat burada kullanılan yöntem bilgilendirilmiş olması sebebiyle önceden ziyaret edilmiş hücrelerin tekrar ziyaret edilmesini engellediği için yeterli bir süre boyunca yapılan bütün aramalar tam kapsayan olabilir.



Şekil 3.8. 1 numaralı robot için bilgilendirilmiş rastgele arama yöntemi tarafından oluşturulmuş arama gezinesi.

### 3.5. Benzetim ve Uygulamalar

Bütün deneylerde ana görev ortama saklanmış olan bir objenin robotlar tarafından bulunmasıdır. Burada yapılan deney başarımları görevin tamamlanma süresi (görevin başlamasından aranan nesnenin bulunmasına kadar geçen süre) ile ölçülmüştür.

Deneylerde robotlar sadece birbirlerinin iletişim kurma mesafelerine girdiklerinde birbirleriyle iletişim kurabilirler ve bu karşılaşmalarda birbirleriyle yapmış oldukları aramaya ait tutmuş oldukları bilgileri paylaşırlar. Bilgi paylaşımıyla elde etmiş oldukları yeni arama haritalarını kullanarak ve aramada takip edecekleri gezinmeleri güncelleyerek arama davranışına kaldıkları yerden devam ederler. Ayrıca kurulan bu haberleşme sisteminin çalışma şekline dolaylı ara robotlar üzerinden atlamalı bir iletişim kurulabilmesi de mümkün olmaktadır. Bu sayede herhangi bir robot, ara robotlar üzerinden gerçekleşen bir bilgi aktarımıyla normal iletişim kurabilme mesafesinden daha uzakta bulunan robotlarla da haberleşebilmektedir. Bu sebeple en iyi performans için uzun mesafeli bir iletişime her zaman gereksinim olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. Başka bir deyişle bütünsel olmayan bir iletişim kullanılmasıyla da oldukça verimli sonuçlar alınabildiği görülmüştür.

Yapılan deneylerin sonuçları Şekil 3.9., Şekil 3.10., Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de verilmiştir. Şekil 3.9. ve Şekil 3.10. yapılan benzetim deneylerinin sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar 1000 ayrı benzetim koşuturulması sonucunda toplanan değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Burada yapılan her bir benzetim koşusunda robotlar rastgele konumlardan aramaya başlatılmakta ve sadece ortamdaki engeller ile saklı olan nesnenin konumları sabit tutulmaktadır. Benzer biçimde Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de kurulan deney düzeneği üzerinde gerçek robotlar kullanılarak yapılan deneylerden alınan sonuçlar gösterilmiştir. Robot deneyleri 6 adet deney sonucunun ortalaması alınarak elde edilmiştir. Daha fazla deney yapılamamasının nedeni robot deneylerinin çok zaman alması ve iletişim yazılım-donanımıyla ilgili zaman zaman oluşan aksaklıklardır.

Bütün deneylerde robotların birbirleriyle iletişim kurabilecekleri mesafeler sıfır iletişimle bütünsel iletişim arasında farklı mesafelerde olacak şekilde seçilmiştir. Oluşturulan deney düzeneğinde iki robot arasında oluşabilecek maksimum uzaklık 200 cm olabileceği için bu mesafe ve üzerindeki değerlerdeki bir iletişim mesafesi bütünsel iletişim olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle deneylerde 0-200 cm arasında seçilen farklı iletişim kurma mesafeleri için yapılan aramaların performansı ölçülmüştür. Buna ek olarak farklı robot sayılarıyla yapılan arama davranışlarının da performansı ölçülerek robot sayısının arama performansına olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan benzetimlerde 1-6 robot arasındaki bütün robot sayıları için sistemin arama performansı ölçülmüştür. Robot deneylerinde ise önceden anlatılan nedenler yüzünden sadece 1,3 ve 6 robotlu arama davranışları tekrar edilmiştir. Şekil 3.9., Şekil 3.10., Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de verilen sonuçlarda deney sürelerine bakıldığında arama performansında robot sayısı ile orantılı bir artış görülmektedir. Burada daha fazla sayıda robotun eş zamanlı olarak arama yapması birim zamanda ziyaret edilen hücre sayısını doğrudan artırdığı için arama süreleri çok daha kısalmaktadır. Aynı sonuçlara bakıldığında benzer şekilde haberleşme mesafesindeki artış ile de arama performansında bir iyileşme olduğu gözlemlenebilir. Fakat buradaki artış robot sayısındaki artışla olandan daha az bir etki göstermektedir. Tek bir robotun bile sisteme eklenmesi maksimum iletişim kullanıldığı durumda oluşan iyileşmeden daha fazla bir performans artışı sağlamaktadır. Yinede sabit robot sayısı ele alındığında iletişimin arama performansına olan etkisi göz ardı edilmemelidir. Haberleşme ile sağlanan iyileşme deneylerde ortalama olarak %20 ile %30 arasında bir performans artışı sağlamıştır. Fakat bu iyileşme sadece 40-50cm lik bir iletişim mesafesiyle bile gerçekleşebilmektedir ve bu durumda daha uzun mesafede bir iletişime gerek kalmamaktadır. Buradan, sonuç olarak bütünsel bir iletişime gerek duyulmadan düşük mesafeli kısmi bir robotlar arası iletişim kullanılarak bile verimli, tatminkâr performans artışları elde edilebileceği çıkarımı yapılabilir.

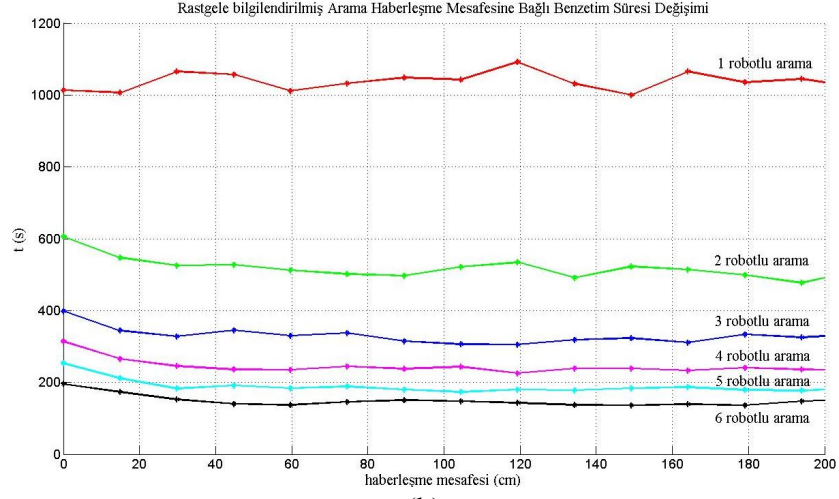
Bu çalışmanın yapılmasındaki asıl amaç iki ayrı arama yönteminin karşılaştırılmasından daha çok robotlar arasındaki iletişimin robotlar arasındaki işbirliğine ve oluşturulan senaryodaki arama görevinin performansına olan etkisinin

araştırılması olmuştur. Yine de robotların başlangıç konumlarına ve aranan nesnenin bulunduğu yere göre bir yöntem diğerinden daha iyi bir başarıyı sergilemiş olabilir. Yinede eğer deneylerde kullanılan iki arama yöntemi karşılaştırılmak istenirse sarmal arama yöntemi tam kapsayan bir arama yöntemi olduğu için arama alanında bulunan bütün hücreleri ziyaret etmeyi garantilediği için bu yöntemde aranan nesnenin bulunma olasılığı her zaman yüzde yüzdür. Fakat bilgilendirilmiş rastgele aramada farklı olarak, yöntemin rastgele olan doğasından dolayı sınırlı bir zaman içerisinde aranan nesnenin bulunması her zaman garanti edilememektedir. Yapılan deneylerde çok uzun deney sürelerine izin verilmediğinden dolayı bilgilendirilmiş rastgele aramanın aranan nesneyi bulma yüzdesi sarmal aramaya göre bir miktar düşük çıkmıştır. Yine de rastgele bilgilendirilmiş aramanın aranan nesneyi bulma olasılığı oldukça yüksektir (yapılan benzetimlerde %94 robot deneylerinde ise %96).

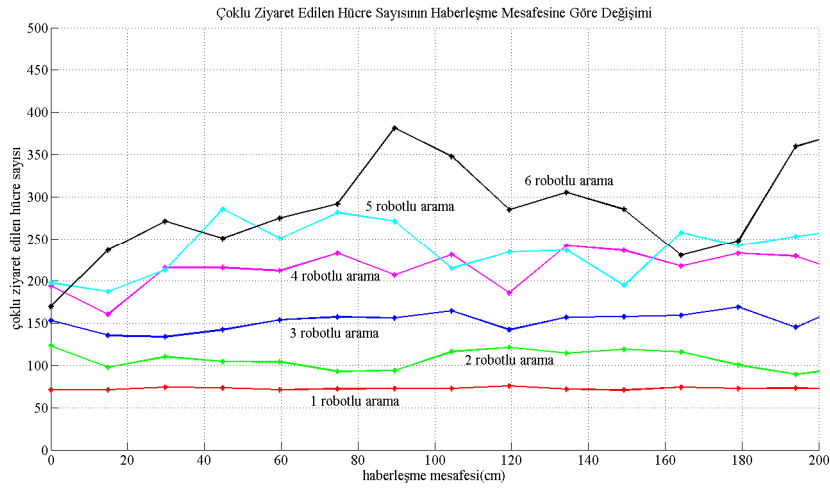
Şekil 3.9., Şekil 3.10., Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de verilen deney sonuçları detaylı bir şekilde incelendiğinde benzetimler ve robotlarla yapılan deneyler arasındaki benzerlikler göze çarpmaktadır. Örnek olarak deneylerin tamamında işbirliği halindeki robotların sayısı arttırıldığında arama görevi daha verimli bir hal alarak daha kısa sürede gerçekleşmektedir. İki ayrı arama yönteminde de bu iyileşme belirgin bir şekilde görülebilir.

Şekil 3.10.(b) ve 3.12.(b) de sarmal aramaya ait çoklu ziyaret edilmiş hücre sayıları verilmiştir. Değerler incelendiğinde artan iletişim mesafesiyle birlikte çoklu ziyaret edilen hücre sayısının sifıra doğru yakınsadığı görülmektedir. Fakat rastgele bilgilendirilmiş aramada ortaya çıkan çoklu ziyaret edilen hücre sayılarında (Şekil 3.9.(b) ve 3.11.(b)) farklı olarak, her zaman sarmal aramadan daha fazla sayıda çoklu ziyaret edilmiş hücre bulunmaktadır. Bu ise rastgele bilgilendirilmiş aramada eğer bulunan hücre çevresinde hiç ziyaret edilmemiş hücre bulunmuyorsa, bu durumda kullanılan yöntem daha önce ziyaret edilmiş hücreler arasından sonraki hedefi seçmek zorunda kalacağı için zorunlu olarak çoklu ziyaret edilmiş hücre sayısında bir artış gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Bu sebeple rastgele bilgilendirilmiş aramada çoklu ziyaret edilmiş hücre sayısı çoğu zaman sıfırdan büyük bir değerde olmaktadır.

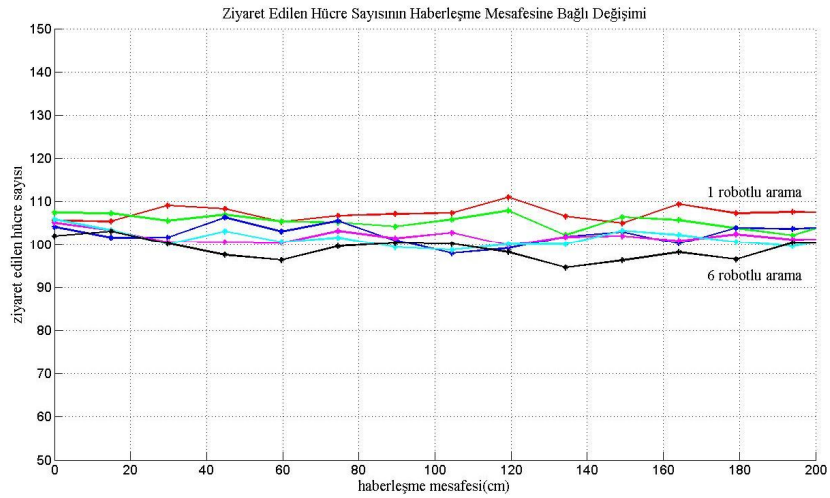
(a)



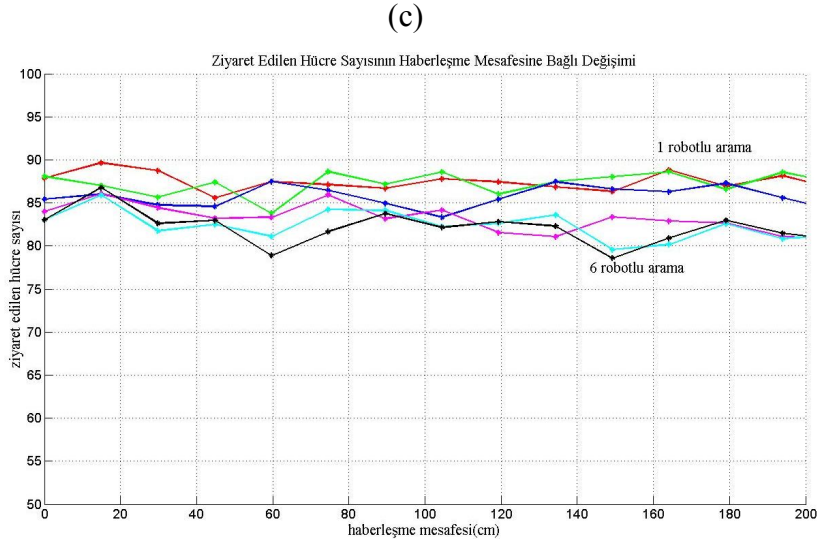
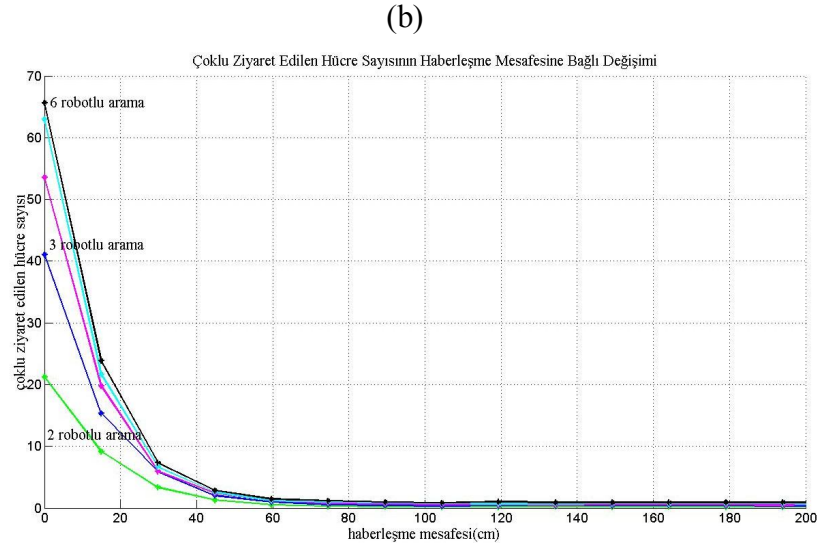
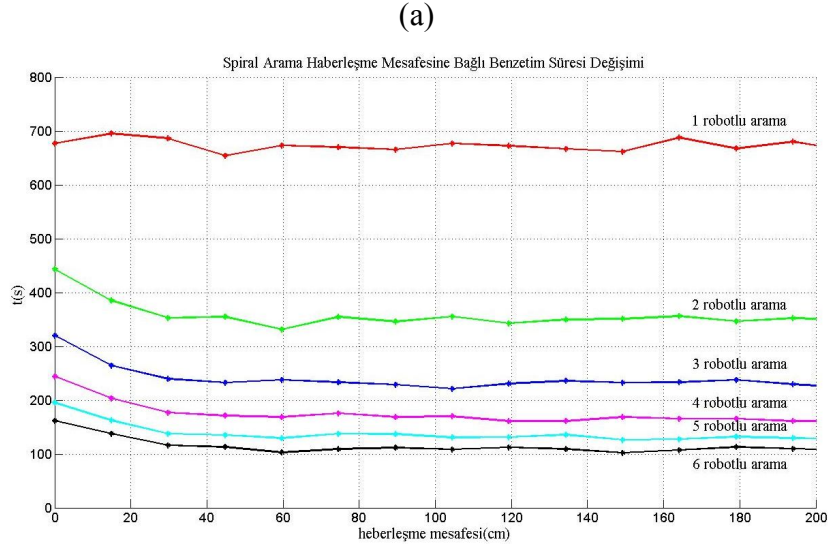
(b)



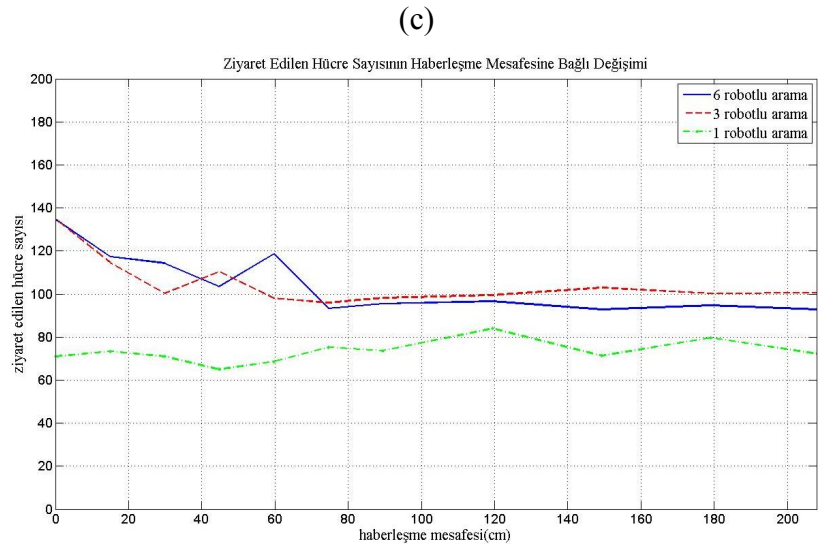
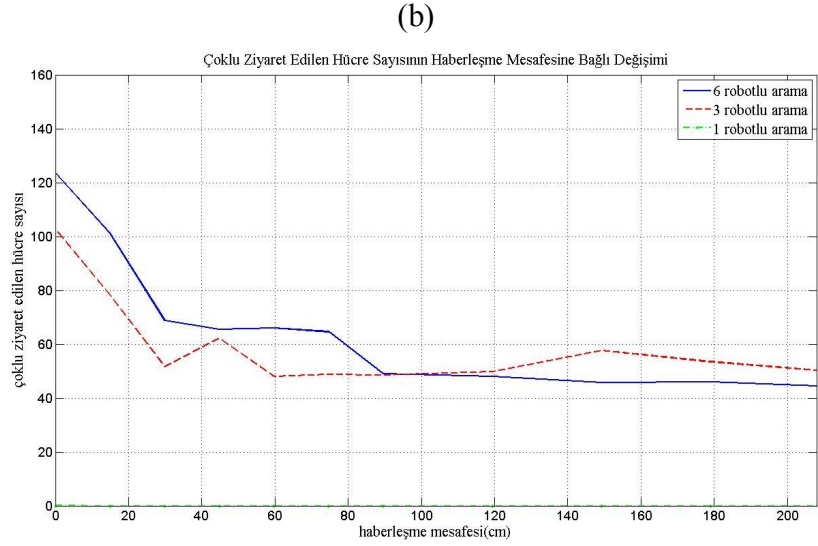
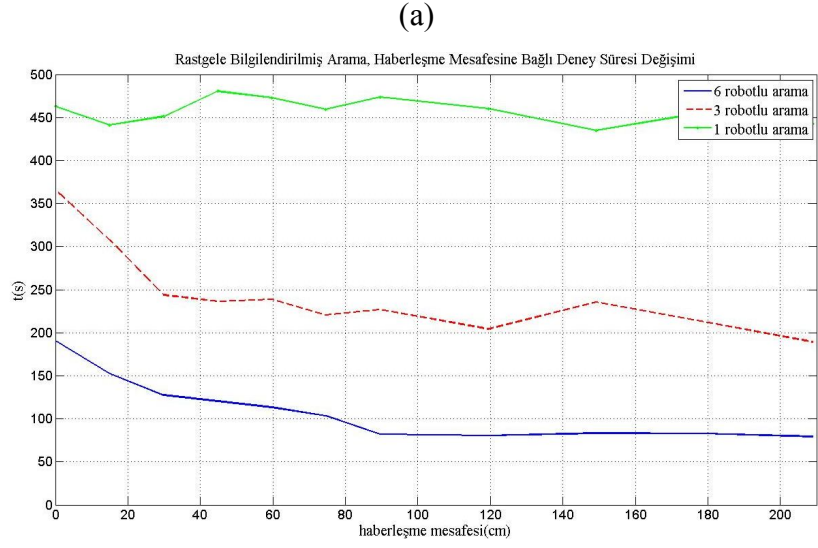
(c)



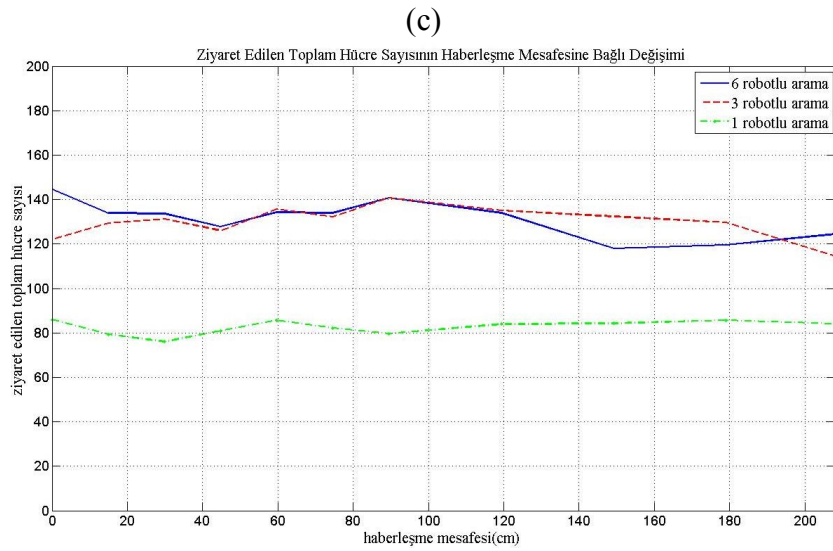
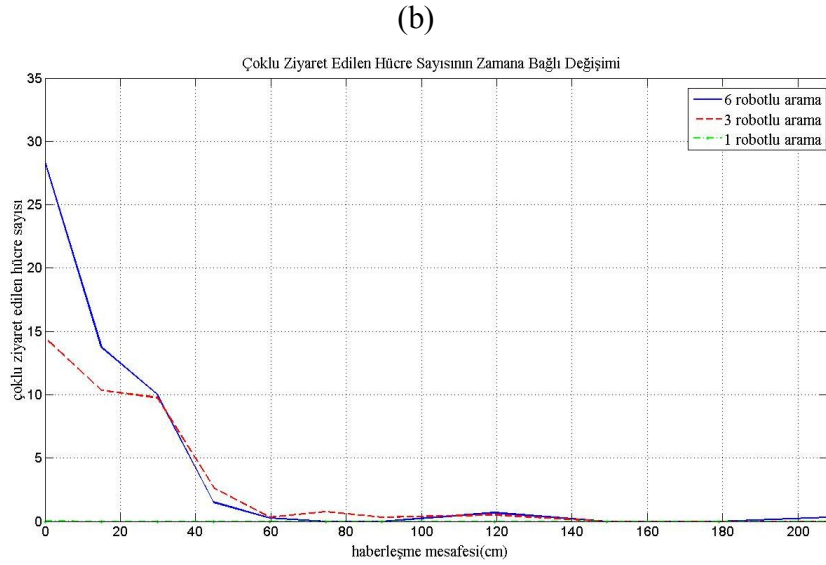
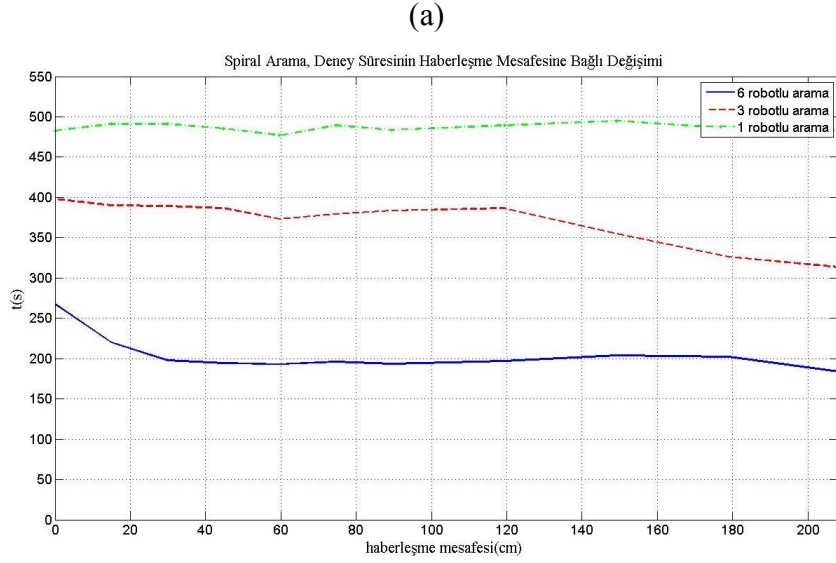
Şekil 3.9. Rastgele bilgilendirilmiş arama benzetim sonuçları.



Şekil 3.10. Sarmal arama benzetim sonuçları.



Şekil 3.11. Rastgele bilgilendirilmiş arama robot deney sonuçları.



Şekil 3.12. Sarmal arama robot deney sonuçları.



Buna ek olarak iki yöntemde ziyaret edilen toplam hücre sayılarına bakıldığında (Şekil 3.9.(c), 3.10.(c), Şekil 3.11.(c), 3.12.(c)) sarmal aramanın daha verimli olduğu çıkarımı yapılabilir çünkü sarmal aramada aranan nesne bulunana kadar toplam ziyaret edilen hücre sayısı daha az olmaktadır. Sarmal aramada ziyaret edilen hücre sayısı yaklaşık olarak 85 hücre olurken rastgele bilgilendirilmiş aramada bu değer yaklaşık 102 hücre olmaktadır. Buradan sarmal aramanın rastgele bilgilendirilmiş aramaya göre aranan nesneyi ortalama 17 hücre daha önceden bulduğu sonucu çıkartılabilir. Şekil 3.9.(a) ve 3.10.(a)'daki benzetim sonuçlarında verilen deney sürelerine bakıldığında bu iyileşme daha belirgin bir şekilde görülebilir. Bu sonuçlarda sarmal arama rastgele bilgilendirilmiş aramadan azda olsa daha iyi bir performans göstermiştir. Fakat gerçek robotlarla yapılan deneylerden alınan sonuçlarda (Şekil 3.11.(a) ve 3.12.(a)) bunun tam tersine rastgele bilgilendirilmiş arama sarmal aramadan daha iyi bir başarı sergilemiştir. Bu farklılığın nedeni robot deneylerinde daha az sayıda deney yapılarak bu sonuçların elde edilmesi olabilir. Bu sebeple benzetim sonuçları çok saha fazla sayıda deney yapılarak toplandığı için daha güvenilir durumdadır.

### **3.6. Deney Sonuçları**

Bu çalışmada çoklu robotlarda ortaklaşa yapılan işbirlikli bir arama davranışı incelenmiştir. Arama sırasında robotların birbirleriyle olan işbirliği aralarında yaptıkları haberleşme ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar hem benzetimler hem de gerçek robotlar üzerinde tekrar edilerek sonuçlar toplanmıştır. Arama deneyleri sarmal arama ve bilgilendirilmiş rastgele arama olmak üzere iki ayrı arama yöntemi kullanılarak yapılmış ve arama performansları farklı sayıda robot ve farklı iletişim mesafeleri kullanıldığı durumlar için ölçülmüştür. Deneylerden alınan sonuçlar incelendiğinde ise artan robot sayısı ile arama performansı arasında doğrusal bir orantı olduğu görülmüştür. Benzer şekilde sonuçlar artan iletişim kurma mesafesi ile arama performansı arasında da belirli bir noktaya kadar bir iyileşme olduğunu, bu noktadan sonra ise performansın fazla değişmediğini göstermiştir. Yapılan deneylerde robotlar sadece düşük bir iletişim mesafesi ile iletişim kurduklarında bile oluşan bilgi paylaşımı ve işbirliği ile arama performansında bir iyileşme

oluşmaktadır. Ayrıca sadece 40-50 cm lik bir iletişim mesafesi kullanıldığında iletişimle olan maksimum iyileşmenin sağlandığı ve daha uzun mesafeli bir iletişime gerek olmadığı ortaya çıkmıştır. Bu sayede oluşturulan bu deney düzeneği ve burada yapılan arama görevinde sistem performansında önemli bir düşüş olmadan bütünsel bir iletişim yerine daha kısa mesafeli bölgesel bir iletişim ve dolayısıyla daha az güç harcanarak robotun daha uzun bir süre boyunca çalışabilmesi sağlanabilir.

Bu çalışmada unutulmaması gereken önemli bir nokta da en iyi başarıyı sağlayan haberleşme mesafesinin ortam boyutu ve arama davranışında kullanılan robot sayısına bağlı olarak oldukça değişebilmesidir. Benzer biçimde kullanılan arama algoritmasının da arama performansını etkileyen önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır.

## BÖLÜM 4

### 4. RF İŞARET ŞİDDETİ VE BAKTERİ ENİYİLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK ROBOT DAĞILMASININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

#### 4.1. Giriş

Aynı zamanda birden fazla robotun ortaklaşa çalışarak bir ortamda arama yapmalarını amaçlayan bir arama kurtarma çalışmasında robotların arama öncesinde ortama düzgün bir şekilde dağılmaları önemli bir gereksinimdir. Robotların birbirlerine olan uzaklıklarını bilmeleri ve bu sayede konumlarını hesaplayarak ortama düzgün bir şekilde dağılmaları sağlanabilir. Bu uzaklık ve konum değerlerinin hesaplanması için küresel konumlama sistemi (GPS) [27] ya da kör konumlandırma<sup>11</sup> kullanılabilir. Fakat gerek kör konumlandırmanın zamanla artarak büyüyen konum hatalarına neden olması ve gerekse düzgün çalışma koşullarına ihtiyaç duyması, benzer şekilde küresel konumlandırma da sadece açık ortamlarda ve uyduları görerek çalışabilmesi, bu teknolojilerin arama kurtarma operasyonlarında kullanımını kısıtlı hale getirmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada bu yöntemlerden farklı olarak robotların sadece yaymış oldukları RF işaretleri kullanarak arama yapılacak ortama dağılmaları amaçlandı. Dağılma davranışı doğada bakteriler gibi tek hücreli canlıların besin arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş bir yöntem olan bakteri beslenme eniyileme yöntemi<sup>12</sup> [28] kullanılarak robotların ortamdaki işaret kaynaklarını aramaları ve bu şekilde kendilerini istenilen şekilde konumlandırmaları ile sağlanmaya çalışıldı.

Bu uygulama sürü robotlarda belirli bir ortama dağılma amaçlı deneysel bir

---

<sup>11</sup> ing: odometry

<sup>12</sup> ing: bacterial foraging optimization

çalışmadır. Uygulamalarda Khepera III mini mobil robotlar kullanılmıştır ve ölçülen RF işaret seviyeleri dışında herhangi bir konum geribildirim yapılmamıştır. Ayrıca radyo işaretlerinin ölçülmesi ve ortamdaki gürültü ve işaret seviyesi ölçüm hatalarının en aza indirilmesi için çok yönlü ve çok konumlu işaret ortalamaları gibi iyileştirmeler geliştirildi ve bu iyileştirmeler farklı dağılıma deneyleri gerçekleştirilerek test edildi. Son olarak deneylerden alınan sonuçlar karşılaştırılarak istenen amaçlara ne ölçüde ulaşıldığı açıklandı.

#### 4.2. Deney Ortamı ve Robotlar

Deneylede kullanılan robotlar K-team firmasının üretmiş olduğu Khepera III isimli mini gezer robotlardır (Şekil 4.1.). Diferansiyel sürüşe sahip bu robotların üzerlerinde çeşitli uzaklık algılayıcıları ve iletişim için Compact Flash yuvasına takılı bir Wi-Fi IEEE 802.11b kartı bulunmaktadır. Robotların denetimi Intel XScale [29] tabanlı ve yeterli işlem gücü sağlayan bir gömülü sistem platformu ile sağlanmaktadır. Bu sistem üzerinde yerleşik olarak Linux işletim sistemi çalışmakta ve kontrol yazılımları Linux ortamında geliştirilmektedir. Kablosuz donanıma olan erişim ve işaret seviyesi ölçümleri için Linux için yazılmış olan pxa2xx\_cs sürücülerini kullanılmıştır ve deneyler sekiz adet Khepera III robotu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Khepera III mini gezer robot.

Dağılma deneyleri yapılmadan önce robotların yaydıkları RF işaretlerinin karakteristiğini çıkarmak için çeşitli deneyler yapıldı. Bu deneylerden alınan sonuçlara göre arama için uygun olabilecek alan boyutları belirlendi. Son olarak 15m x 10 m boyutlarında üzerinde engel bulunmayan ve zemini robotların hareketlerine engel olmayacak düzgünlükte bir alanda deneyler gerçekleştirildi ve gerekli veriler toplandı.

### 4.3. İşaret Ölçüm Teknikleri

Robotların düzgün bir dağılma oluşturabilmeleri için birbirlerine olan uzaklık değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bu uzaklıklar doğrudan hesaplanmak yerine robotlar arasında ölçülen işaret seviyelerinin kullanılması ile elde edilmiştir. Buna ek olarak diğer herhangi bir metriksel ölçüm kullanılmamıştır.

Elektromanyetik dalgaların bir özelliği işaret kaynağından alınan işaret gücünün artan uzaklıkla büyük ölçekte doğru orantılı ve logaritmik olarak azalmasıdır [30]. Çok yönlü yayılma ve yansımalarından dolayı işaret gücü tekdüze (monotonik) azalmadan yer yer sapsmalar gösterebilmesine rağmen yine de bu gerçekten yola çıkarak işaretin geldiği uzaklığın bir hata payı ile hesaplanması mümkün olabilir. Fakat bu hesaplama normal ortam şartlarında çok iyi sonuçlar vermez çünkü ortamda bulunan çeşitli gürültü kaynaklarının yaydıkları radyo dalgaları ve ortamda oluşan çeşitli kırılma ve yansımalar ölçümleri olumsuz yönde etkileyerek hatalı sonuçlar alınmasına sebep olmaktadır. Ayrıca belirli bir mesafeden sonra işaret seviyesindeki değişim artık ölçülemeyecek ölçüde azaldığı için uzaklık ölçümünü pratik olarak imkânsız kılabilir.

Kuramsal olarak işaret yayılımı denklem 4.1.'de verilen modele uymaktadır [31]. Bu modelde  $A$  ve  $n$  parametreleri ortama bağlı deneysel parametrelerdir.  $A$  değeri robota 1 metre mesafedeyken ölçülen işaret şiddeti ve  $n$  ise o ortamdaki işaretin yayılım sabiti olmaktadır. Şekil 4.2'de bu model kullanılarak ortaya çıkan uzaklığa bağlı işaret seviyesi değişimi grafiği verilmiştir. Aynı grafikte karşılaştırmak amacıyla

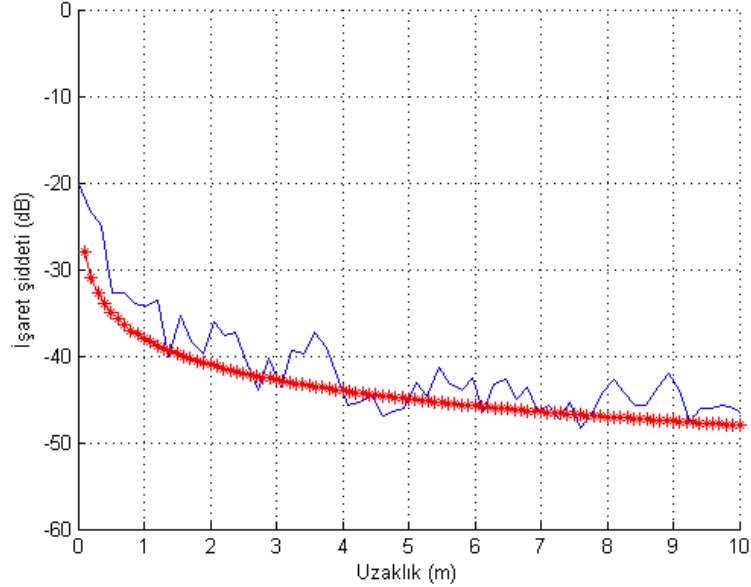
deneysel olarak ölçülen uzaklığa bağlı işaret şiddeti değişimi grafiği de çizilmiştir. Burada deneysel ölçümlerdeki çok yönlü yayılma, yansımalar ve ortamdaki gürültünün etkisi açıkça görülebilmektedir.

$$\text{Sinyal Şiddeti} = -(10n \log_{10} d + A) \quad (4.1.)$$

$n$ : İşaret yayılım sabiti.

$d$ : Göndericinin uzaklığı.

$A$ : 1 metre mesafede ölçülen işaret değeri

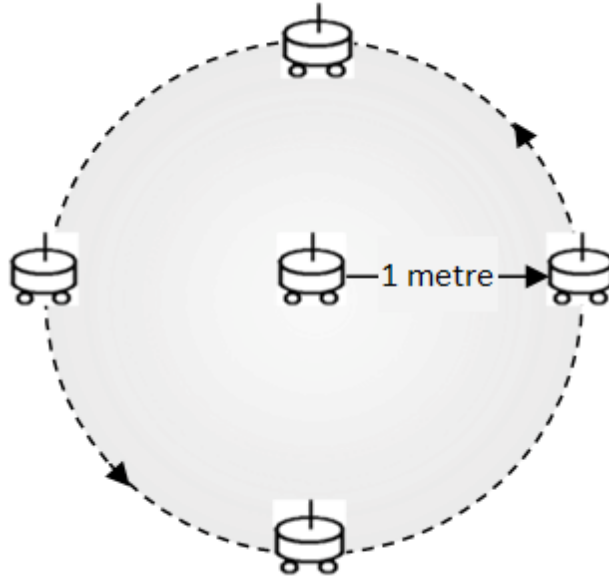


Şekil 4.2. İşaret yayılım modeli ve deneysel ölçüm sonuçları.

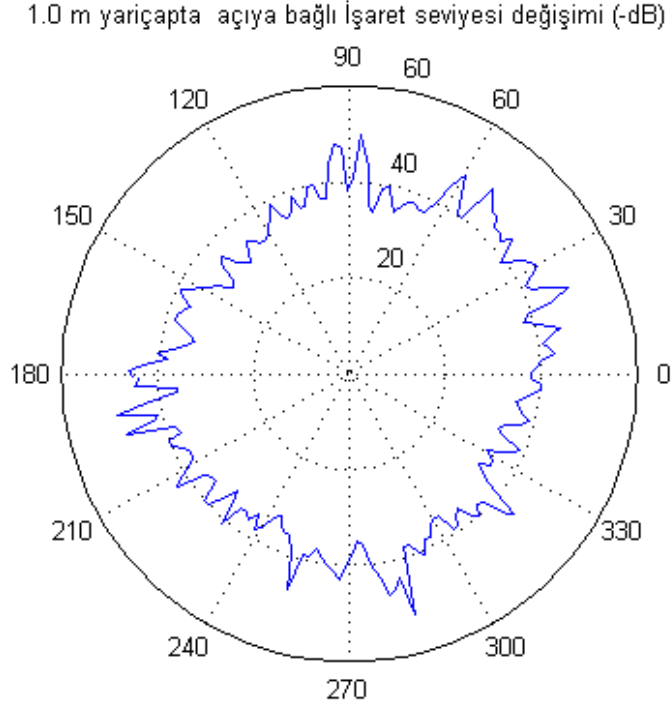
Ayrıca farklı donanımlar ve alıcı-verici anten tasarımları kullanıldığında ölçüm sonuçları fazlaca değişebilir. Bu sebeple farklı bir donanım kullanıldığında veya anlatılan yöntemin farklı bir ortamda kullanılmasından önce yöntemin yeniden uyarlanması gerekebilir. Örnek olarak kullanılan antenler tüm yönlü<sup>13</sup> yani her yönde radyo dalgalarını eşit ölçüde alıp gönderebilen bir tasarımda değilse işaret ölçümleri değişen alış açılara göre farklılıklar gösterebilir. Kullandığımız robotlarda bulunan

<sup>13</sup> ing: omnidirectional

Wi-Fi modüller kendi içlerinde gömülü antenlere sahip olduklarından tüm yönlü eşit bir alışı sahip değillerdi. Bunu ölçmek için bir robotun yaymış olduğu işaretin farklı açı değerlerinde ne kadar değişim gösterdiği araştırıldı. Yapılan deneyde 1.0 m yarıçaplı bir çemberin merkezine yerleştirilmiş olan bir robotun yaymış olduğu işaret çember üzerinde hareket eden diğer bir robot tarafından 0-360° aralığında ölçüldü (Şekil 4.3.). Şekil 4.4.'teki ölçüm sonuçlarına bakıldığında ise uzaklık aynı olduğu halde farklı açılardan alınan işaret gücündeki değişim net bir şekilde görülebilmektedir. Bu ölçümlerde ortalama alınan işaret değeri -38,89 dB ve standart sapması ise 4.18 dB olmuştur. Bu sonuçlara bakılarak robotlarda kullanılan antenlerin tüm yönlü bir tasarıma sahip olmadıklarını söylenebilir. Robotlar üzerinde ek bir anten girişi olmadığı için bu antenleri kullanmak zorunda kalınmasına rağmen yine de geliştirdiğimiz algoritmalarla başarılı sayılabilecek sonuçlar elde edildi.



Şekil 4.3. Açısal işaret ölçümü için kullanılan yöntem.



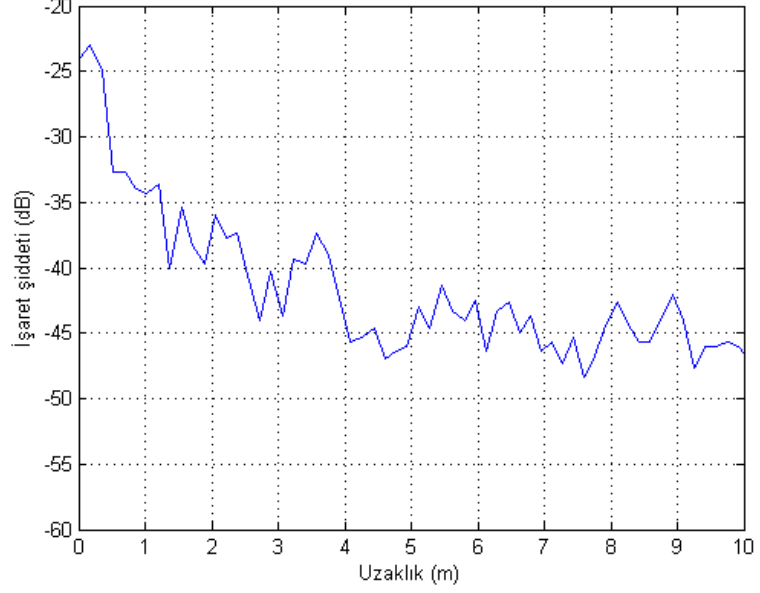
Şekil 4.4. 1 metre mesafedeki işaret seviyesinde açıya bağlı olarak gerçekleşen değişim.

Dağılma deneylerine başlamadan önce yukarıdakilere ek olarak iki robot arasındaki işaret seviyesinin uzaklıkla olan değişimi ölçüldü. Yapılan ilk testlerde 15 cm aralıklarla 10 m boyunca her seferinde 5 kez yapılan işaret seviyesi ölçümlerinin ortalaması alınmış ve çıkan değerlerin artan uzaklıkla nasıl bir değişim içinde olduklarına bakılmıştır (Şekil 4.5.). 5 adet ölçümün kullanılmasının nedeni o anda anlık olarak oluşabilecek gürültülerin bir miktar bastırılmasıdır. Aslında daha fazla sayıda örnekleme yapılabilirdi fakat yapılan ön ölçümler kısa sürelerde alınan işaret seviyesinde belirgin değişikliklerin olmadığını gösterdiği için fazla sayıda örnekleme ihtiyacı olmadığı görüşüne varıldı. Örnekleme sayısının fazla arttırılmamasının bir diğer nedeni de robotlarda kablosuz donanımdan işaret seviyesi okunmasının yaklaşık 750 ms kadar bir zaman alması ve fazla sayıda örneklemenin deneyleri oldukça yavaşlatabilecek olmasıdır.

Şekil 4.5.'te görülen deney sonuçlarına bakıldığında artan uzaklıkla birlikte işaret seviyesinde bir düşüş görülmekle birlikte ortamdaki işaret gürültüsünün oluşturduğu



etki de belirgin bir şekilde fark edilmektedir. 10 m lik mesafedeki toplam değişim -24 dB ile -48 dB arasında gerçekleşmiş ve  $\pm 5$  dB lik anlık değişimler görülmüşür.

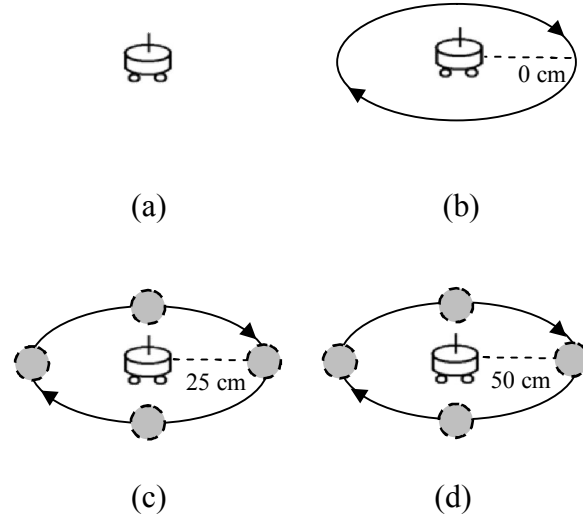


Şekil 4.5. 10 metre mesafe içerisinde uzaklığa bağlı işaret seviyesi değişimi.

Toplam dinamik işaret alış aralığının yaklaşık %20 sine karşılık gelen bu gürültü oranının uzaklık ölçümlerinde ortalama 2.0 metrelik konum hataları oluşturabildiği görüldü. Dağılma deneyinin yapılacağı alanın yaklaşık 10mx10m ölçülerinde olduğu düşünöldüğünde bu değerde oluşabilecek ölçüm hataları düzgün bir dağılmayı imkânsız hale getirebilirdi. Yapılan ilk dağılma deneylerinde alınan sonuçların da bunu doğrulaması üzerine farklı alternatif ölçüm yöntemleri üzerinde çeşitli çalışmalar gerçekleştirildi. İşaret seviyesindeki anlık hataları en aza indirmek için yöneldiğimiz ilk yöntem robotun farklı aç değerlerinde ölçümler yapması ve bu ölçümlerin ortalamasının alınması şeklinde oldu.

Bu sayede robotlardaki tüm yönlü olmayan antenlerin etkisinin yok edilmesi amaçlandı. 10 metrelik mesafede uzaklık artırılarak yapılan ölçümlerden alınan sonuçların önceki yöntemle göre bazı iyileştirmeler getirdiği gözlemlendi. Ayrıca sadece farklı aç değerleriyle sınırlı kalınmayıp farklı konum ve farklı aç değerleri ile de ölçümler yapılarak ve bu ölçümlerin ortalamaları kullanılarak yapılan deneylerde sonuçların daha da iyileştiği tespit edildi.

Dağılma deneyleri sabit noktadan yapılan ölçümlerin, farklı açılarda yapılan ölçümlerin ve farklı açı ve uzaklıklar değerlerinde yapılan ölçümlerin kullanıldığı dört farklı ölçüm tekniği kullanılarak tekrar edilmiştir. Bu teknikler Şekil 4.6.'da gösterilmektedir. İlk teknikte (Şekil 4.6.(a)) robot sabit konum ve açıda işaret ölçümü yapmaktadır. Şekil 4.6.(b)'de görülen ikinci teknikte robot bulunduğu konumu değiştirmeden sadece açısını değiştirerek  $90^\circ$  aralıklarla işaret ölçümü yapmaktadır. Üçüncü teknikte ise (Şekil 4.6.(c)) robot bu sefer açığa ek olarak konumunu da değiştirmektedir. Bu ise robotun 25 cm yarıçaplı bir çember üzerinde  $90^\circ$  açı farkıyla dört farklı noktadan işaret örnekleme yapması ile sağlanmıştır. Şekil 4.6.(d)'de verilen son teknikte ise bu sefer farklı olarak 50 cm yarıçaplı bir çember üzerinde farklı açılarda işaret ölçümü yapılmaktadır.

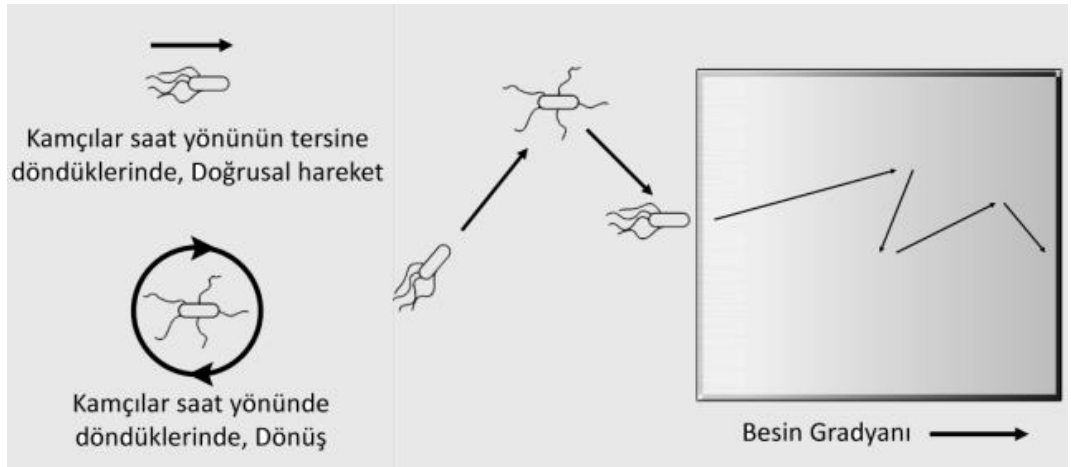


Şekil 4.6. Kullanılan işaret ölçüm teknikleri.

İşaret ölçümlerinde yapılan iyileştirmeler sonucunda sabit bir noktadan yapılan ölçümlerle farklı açılarda ve farklı konumlarda yapılan ölçümler arasında önemli farklar ortaya çıkmıştır. Ortamdaki gürültü ve tüm yönlü olmayan anten tasarımının sebep olduğu olumsuz etkiler sabit noktalı ölçümlerde oldukça belirginken, farklı açılardan alınan ölçümlerin ortalaması alındığında bu negatif etkilerin azaldığı, farklı konum ve açı kombinasyonları kullanıldığında ise sonuçların oldukça düzeldiği ve gürültünün iyice azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.9.).

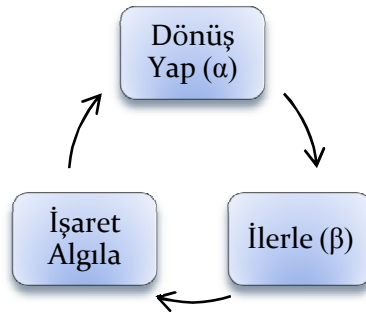
#### 4.4. Dağılıma Yöntemi

Doğadaki canlılar incelendiğinde beslenmeleri sırasında izledikleri stratejinin birim zamanda besinlerden alınan enerjinin azami hale getirilmesi ve harcanan enerjininse en aza indirilmesi şeklinde olduğu görülmektedir [32]. Bu şekilde en kısa zamanda en fazla enerjinin kazanılması amaçlanmıştır. Beslenme stratejileri davranışsal olarak incelendiğinde ise [33] çoğu davranışın birbirine benzer daha küçük alt davranışların birleşiminden oluştuğu görülebilir. Örnek olarak yırtıcı hayvanlar önce yiyeceğin yerini arar. Yiyeceği bulduktan sonra bulduğu yiyeceği gerekiyorsa takip eder ve uygun bir anda yiyeceği yakalar ve sindirir. Tek hücreli canlıların beslenmeleri incelendiğinde ise benzer biçimde fakat daha basit bir davranış biçimi görülmektedir. Tek hücreli canlı kemotaksi [34] adı verilen ve bazı özel kimyasal maddelere yönelme ya da tam tersine onlardan uzaklaşma şeklinde olabilen bir davranış ile ortamda besin maddesi arar. Bu davranış bakterilerin besin kaynaklarını (örnek: glukoz) bulmakta ve ortamdaki zehirli maddelerden (örnek: phenol) kaçmakta kullandıkları temel davranış biçimidir. Bakteri besin kaynağı yoğunluğunun en yüksek olduğu noktaya doğru kemotaksi davranışı ile hareket eder. Pozitif kemotaksi canlının kaynağa doğru hareket etmesi negatif kemotaksi ise canlının kaynaktan uzaklaşması şeklinde gerçekleşir.



Şekil 4.7. E.coli bakterisinde gözlemlenen besin arama davranışı (Şekil [28]'ten alınmıştır).

E.coli (Escherichia coli) isimli bakterinin besin ararken yapmış olduğu kemotaksi davranışı [34] incelenerek “bacterial foraging” [28] isimli bir eniyileme algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntem E.coli bakterisinin besin arama sırasındaki hareketlerini bir modellemesi olarak düşünülebilir. E.coli bakterisinin besin arama davranışı ardı ardına sürekli tekrar eden dönüş ve doğrusal hareketlerin birleşiminden oluşan bir arama davranışıdır (Şekil 4.7. ). Bakteri kamçılarını saat yönünde çevirdiğinde dönüş hareketi, tersi yönde çevirdiğinde ise ileri yönde yüzüş hareketi gerçekleştirir. Bakteri ortamdaki besin yoğunluğuna göre bu hareketlerin sıklığını ve büyüklüğünü değiştirerek besin kaynağına doğru yakınsayan bir gezinge izler. Bakteri besin yoğunluğundaki değişimleri yaptığı her hareket sonrasında ortamdaki besin yoğunluğunu ölçerek ve bu ölçümleri bir önceki ölçümlerle karşılaştırarak arama davranışını şekillendirmektedir. Normalde bakteri besin aramaya sürekli tekrar eden rastgele açıldaki bir dönüş ve rastgele mesafeli bir yüzüş hareketi ile başlar. Bakteri besin yoğunluğunda bir artış algıladığında yapmış olduğu dönüşleri azaltıp doğrusal hareketleri artırarak yoğunluk artışını takip etmeye çalışmaktadır. Besin yoğunluğu düştüğünde ise bakteri tekrar rastgele dönüşler yaparak farklı yönleri aramaya devam eder.



Şekil 4.8. Besin arama algoritması.

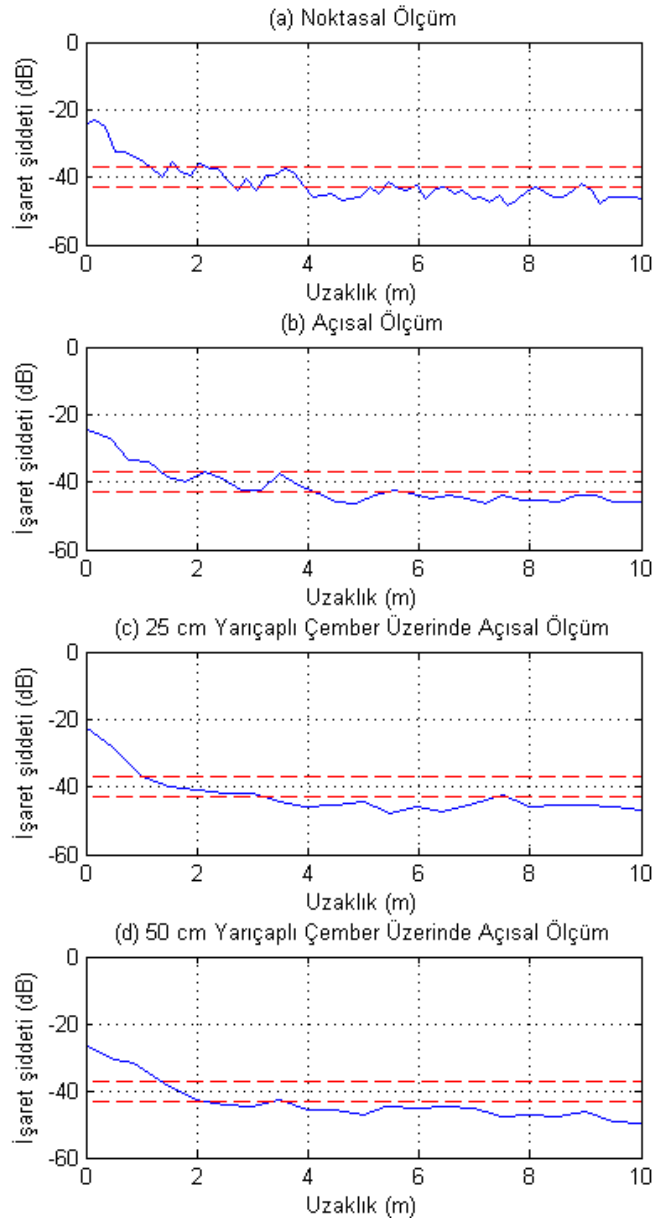
Yapılan bu çalışmada E.coli bakterisinin kemotaksi davranışı ortamdaki besin kaynaklarının aranması yerine robotların ortamdaki radyo dalgası kaynaklarını araması şeklinde olan bir RF kemotaksi davranışı haline getirildi. Radyo dalgasının yoğunluğu robotlarda bulunan Wi-Fi kablosuz iletişim donanımları vasıtasıyla ölçülerek robotların işaret kaynaklarına yakınsaması sağlanmaya çalışıldı. Fakat buradaki yakınsama davranışı robotların düzgün bir dağılma gerçekleştirebilmeleri

için işaret kaynağının maksimum olduğu merkeze değil de önceden belirlenmiş bir işaret şiddeti aralığına yakınsaması şeklinde gerçekleştirildi. Eğer bu şekilde bir işaret aralığı verilmemiş olsaydı bütün robotlar aynı merkezde toplanmaya çalışacak ve bir dağılma gerçekleşmeyecekti.

Robotlar üzerinde gerçekleştirilen RF kemotaksi davranışının akış çizelgesi Şekil 4.8.'de verilmiştir. Kullanılan bu kemotaksi davranışı kısaca herhangi bir robotun diğer bir robotun yaymış olduğu işareti her seferinde ölçerek ve bu ölçümü önceki ölçümlerle karşılaştırarak ortamda gezinmesi şeklinde gerçekleşir. Gezinme davranışı işaret seviyesindeki iyileşmelere göre miktarları değişen, E.coli bakterisinin yapmış olduğuna benzer dönüş ve doğrusal hareketlerin bir birleşiminden oluşmaktadır. Robot her seferinde aramış olduğu işaretin şiddetini kablosuz iletişim donanımını kullanarak ölçer ve bu değeri önceki ölçümle karşılaştırır. İşaret seviyesi yükseldikçe robot daha fazla doğrusal hareket yapmaya başlar, işaret seviyesi düştüğünde ise doğrusal hareketler kısalıp dönüş açıları büyüyerek robotun farklı yönleri araması sağlanmış olur. Robotun en fazla dönebileceği açı miktarı  $\alpha$  değeri ile belirlenmiştir. Bu değer işaret seviyesinde iyileşme olduğu zaman ikiye bölünür ve robot daha dar açılarla dönüşler yapmaya başlar. İşaret seviyesi kötüleştiğinde ise  $\alpha$  değeri tekrar iki katına çıkarak robotun farklı yönlerde daha fazla arama yapması sağlanır. Benzer şekilde  $\beta$  değeri ile robotun en fazla gidebileceği doğrusal uzaklık belirlenmektedir. Bu değer  $\alpha$  değerinde olduğu gibi yapılan işaret ölçümlerindeki düzelmeye doğru orantılı olarak değişmektedir. İşaret seviyesinde bir iyileşme oldukça robotun kat ettiği doğrusal mesafe uzar. Bu sayede robot işaret kaynağına sürekli yaklaşan bir hareket gerçekleştirmiş olur.

Uzaklığa bağlı işaret değişimlerini ölçtüğümüz deneylerde robotların dağılma sırasında birbirleriyle olan uzaklıklarını işaret seviyesi cinsinden ifade ettiğimizde 37-43 -dB aralığını seçmeyi uygun bulduk. Bu işaret seviyelerinin noktasal ölçümlerde karşılık geldiği uzaklık aralığı yaklaşık olarak 1.2-4 m arasında bir uzaklığa (Şekil 4.9.(a)), aynı konumda, 90 derece açı farkıyla dört farklı yönden

yapılan ölçümlerde (0 , 90 , 180 ve 270 açıda) 1.5-4 m aralığında (Şekil 4.9.(b)), 25 cm yarıçaplı bir çember üzerinde 90 derecelik açı farkıyla dört farklı noktadan yapılan ölçümlerde 1-3.2 m aralığında (Şekil 4.9.(c)), benzer şekilde 50 cm yarıçaplı bir çember üzerinde 90 derecelik açı farkıyla dört farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak yapılan ölçümlerde 1.2-2.1 m aralığında (Şekil 4.9.(d)) bir mesafeye karşılık gelmektedir. Verilen işaret seviyeleri için bu tekniklerle ölçülen mesafe aralıkları sırasıyla 2.8, 2.5, 2.2 ve 0.8 m olmaktadır ve en az değişkenlik 50 cm çember üzerinde yapılan ölçümlerde görülmektedir.



Şekil 4.9. Farklı işaret ölçüm metotları ile ölçülen sinyal şiddeti sonuçları.

#### 4.5. Deneyler

Bu bölümde robotların ortama nasıl dağılacakları anlatılacaktır. Öncelikle öncü bir robot dağılma alanı üzerinde merkeze yakın bir noktaya uzaktan denetimli olarak konumlandırılır ve konumlandırma bittikten sonra üzerindeki kablosuz iletişim donanımı ile özel bir işaret yaymaya başlar. İşareti algılayan ikinci robot aktif hale geçer ve ilk robotun yaymış olduğu işareti ölçerek işaret aralığı bizim belirlediğimiz aralık olan 37-43 –dB aralığında bir değere ulaşınca dek otonom olarak RF kemotaksi davranışı ile hareket eder. İkinci robot istenilen aralıktaki bir işaret seviyesine ulaştığında ise bulunduğu noktada ilk robot gibi sabit bir şekilde kalarak kendi işaretini yaymaya başlar. Üçüncü robot önceki robottan farklı olarak kemotaksi davranışı ile tek bir kaynak yerine bu sefer iki ayrı işaret kaynağına yakınsama davranışı gerçekleştirir. Bu yakınsama iki ayrı kaynaktan yayılan işaret seviyelerinin de istenilen işaret aralığı olan 37-43 –dB arasına ulaşınca kadar robotun bakteri beslenme davranışından esinlenen RF kemotaksi yöntemi ile ortamda gezinerek arama yapması şeklinde gerçekleşir. Üçüncü robot da iki işaret kaynağına istenilen işaret aralıklarında bir nokta bulduktan sonra kendi işaretini yaymaya başlar. Devamında benzer şekilde sırasıyla dördüncü robot 2 ile 3 numaralı robotlara, beşinci robot 3 ile 4 numaralı robotlara, altıncı robot 4 ile 5 numaralı robotlara, yedinci robot 5 ile 6 ve sekizinci robotsa 6 ile 7 numaralı robotlara eşit RF mesafesi kadar yakınsamaya çalışır. Dağılma son robotun da istenilen işaret seviyelerine ulaşmasına kadar bu şekilde devam eder. Bu davranışın sonucunda robotların aralarında oluşan üçgenler aracılığı ile ızgara benzeri bir dağılım oluşturmaları beklenmektedir. Yapılan bir dağılma deneyi sonrası robotların son konumları Şekil 4.13.'te gösterilmiştir.

Her bir deney tamamlandıktan ve robotlar istenilen konumlara ulaştıktan sonra robotların birbirlerine olan iç uzaklıkları hesaplanmış ve bu uzaklıkların ortalamaları alınmıştır. Dağılma başarısının hesaplandığı bu metrik farklı dağılma deneyleri için hesaplanarak dağılma verimliliklerinin karşılaştırılması için kullanılmıştır. Buna ek olarak deneylerin dağılma süreleri de kaydedilmiştir.

Yapılan ilk dağılma deneyinde robotlar sabit noktalı ve sabit açıda işaret ölçümleri yapıp bu ölçümlerin ortalaması kullanılarak RF kemotaksi yöntemi gerçekleştirmektedir. Bu dağılma sonucunda robotların birbirlerine olan ortalama iç uzaklıkları 3.92 m olarak hesaplanmıştır ve deney 488 saniye sürmüştür. Bu dağılmadaki standart sapma 2.53 m olmuştur.

İkinci deneyde bu sefer robotlar işaret ölçümü yaparken sabit konumda 90 derece açı farkıyla 4 farklı açı değerinde yapılan toplam 20 adet ölçümün ortalamasını kullanmaktadır. Bu ölçümler kullanılarak yapılan dağılma deneyi 691 saniye sürmüştür ve dağılma sonucunda robotlar arası ortalama iç uzaklık 3.67 m olarak ölçülmüştür. Standart sapma ise 2.75 metredir.

Üçüncü deneyde ise ikinci deneyden farklı olarak robotlar hem farklı açılarda hem de farklı konumlarda işaret ölçümü yapmaktadır. Robotlar dağılma sırasında 25 cm yarıçaplı bir çember üzerinde 90 derecelik açı farkıyla dört farklı noktadan yapılan toplam 20 adet ölçümün ortalamasını kullanmaktadır. Bu teknikle yapılan dağılmada robotlar arası ortalama iç uzaklık 2.92 m olarak ölçülmüştür. İç uzaklıklardaki standart sapma 1.68 metredir ve dağılma 543 saniyede gerçekleşmiştir.

Yapılan son deneyde ise üçüncü deneyde kullanılan teknik bu sefer farklı olarak 25 cm yerine 50 cm yarıçaplı bir çember üzerinde dört farklı açı değerinde ölçümler alınarak yapılmıştır. Bu dağılma deneyi sonucunda robotlar arası ortalama iç uzaklık 3,00 m olarak ölçülmüştür ve standart sapma 2.50 m olarak gerçekleşmiştir. Bu deney önceki deneylerden oldukça uzun bir süre; yaklaşık olarak 2833 saniye sürmüştür. Bu sonuçlar Şekil 4.10., 4.11. ve 4.12.'de gösterilmektedir. Yapılan bu deney sonrası oluşan dağılmadaki son robot konumları Şekil 4.13.'te gösterilmektedir. Şekilde çizilen oklar robotların sırasıyla hangi robotları referans olarak konumlandıklarını belirtmektedir.

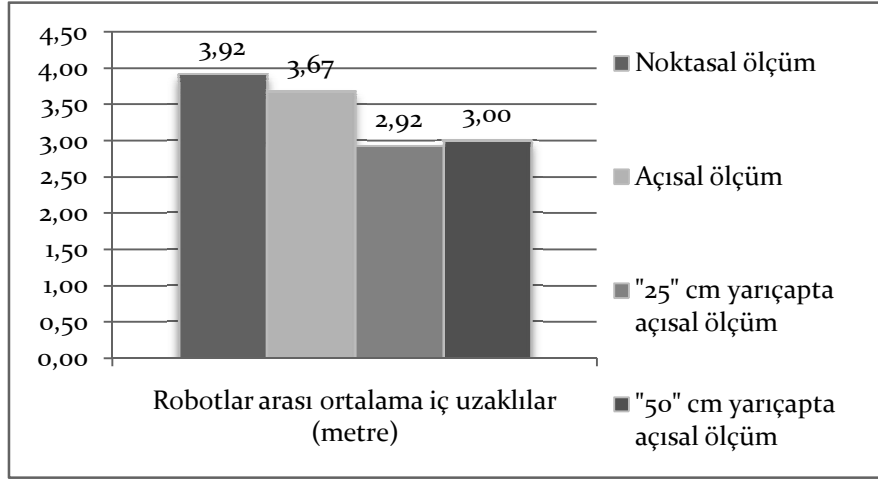


#### 4.6. Uygulama Sonuçları

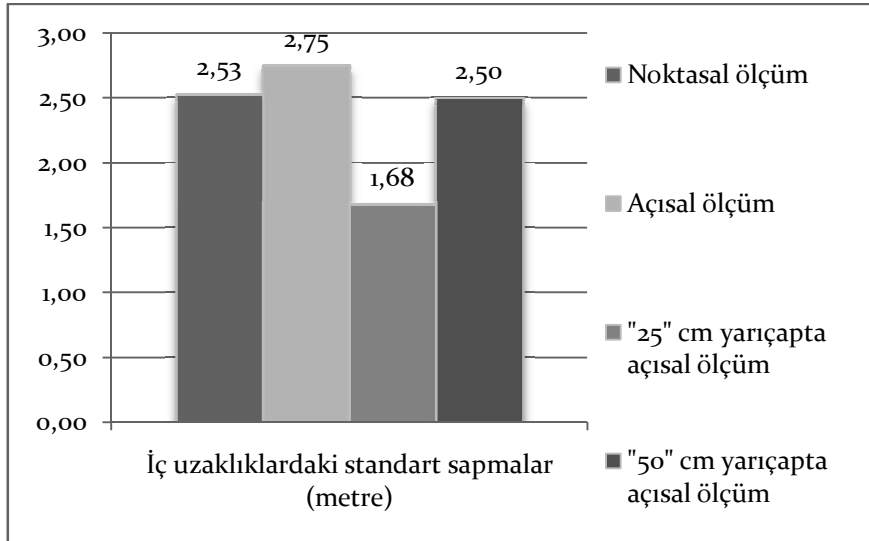
Yapılan dört farklı dağılma deneyi sonucunda işaret ölçümlerinde yapılan iyileştirmelerin dağılma sonuçlarına da olumlu olarak yansdığı görülmüştür. Farklı açı ve konumlarda yapılan işaret ölçümlerinin kullanıldığı deneylerin sabit açılı ve sabit konumlu işaret ölçümlerinin kullanıldığı deneylerden daha düzgün, daha toplu sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır (Şekil 4.10.). Fakat 25 cm ve 50 cm yarıçaplı örneklemelerle yapılan ölçüm sonuçlarının kullanıldığı deneylerde dağılma sonrasında robotlar arası iç mesafelerde belirgin bir fark görülmemesine rağmen 25 cm'lik örneklemenin kullanıldığı deneyde dağılma sonrası iç uzaklıklardaki standart sapma değerine oranla %50 oranında daha düşük çıkmıştır. Bu nedenle 25 cm örneklemenin daha düzgün bir dağılma gerçekleştirdiği söylenebilir. Buradaki durum belirli bir örnekleme mesafesinden sonra işaret seviyesindeki gürültü etkisinin fazla olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Bu sebeple örnekleme alanının çok fazla büyütülmesinin dağılma verimliliğini her zaman olumlu yönde etkilemeyeceği çıkarımı yapılabilir.

Toplam deney süreleri Şekil 4.12.'de verilmiştir. Bu süreler karşılaştırıldığında 50 cm yarıçaplı örneklemenin kullanıldığı deney diğer deneylere göre çok daha uzun bir zaman almıştır. Bunun açıklaması robotların 50 cm lik alanda ölçüm yapmalarının daha fazla zaman alması ve ölçüm sonuçlarında 37-43 –dB lik alanın diğer ölçüm tekniklerine göre daha kısa bir mesafe aralığına karşılık gelmesi ve robotların bu sebeple ortamda daha fazla arama yapmaları şeklinde açıklanabilir.

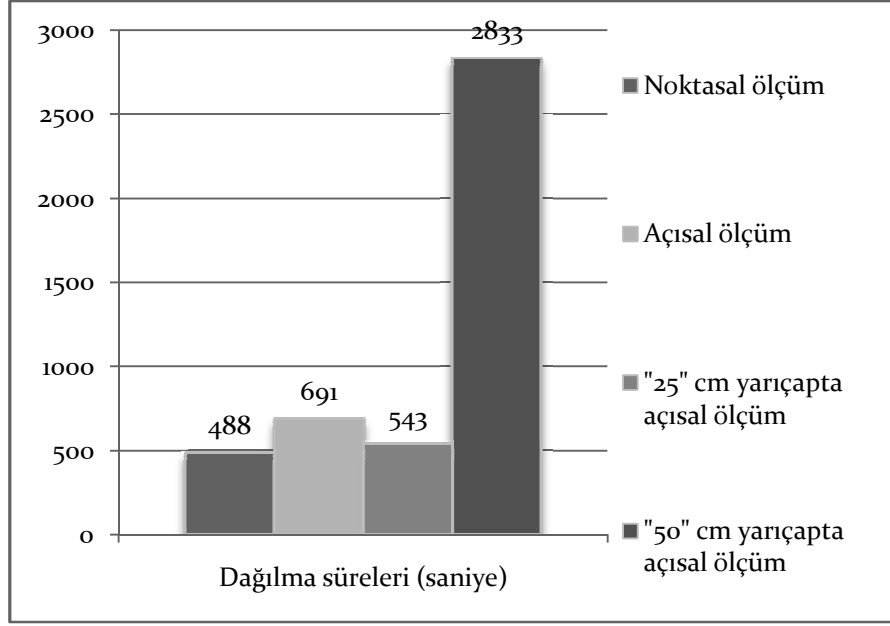
Buradan çıkarılabilecek sonuç belirli bir mesafeden daha geniş bir alanda işaret toplamının her zaman olumlu sonuçlar vermemesi olarak özetlenebilir. Örnek olarak yapılan bu deneylerde ele alınan dört durum arasında en iyi örnekleme alanının 25 cm yarıçaplı bir daire olduğu tespit edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda daha fazla mesafe aralığında deneyler tekrarlanarak en ideal işaret toplama mesafesi ortaya çıkarılabilir.



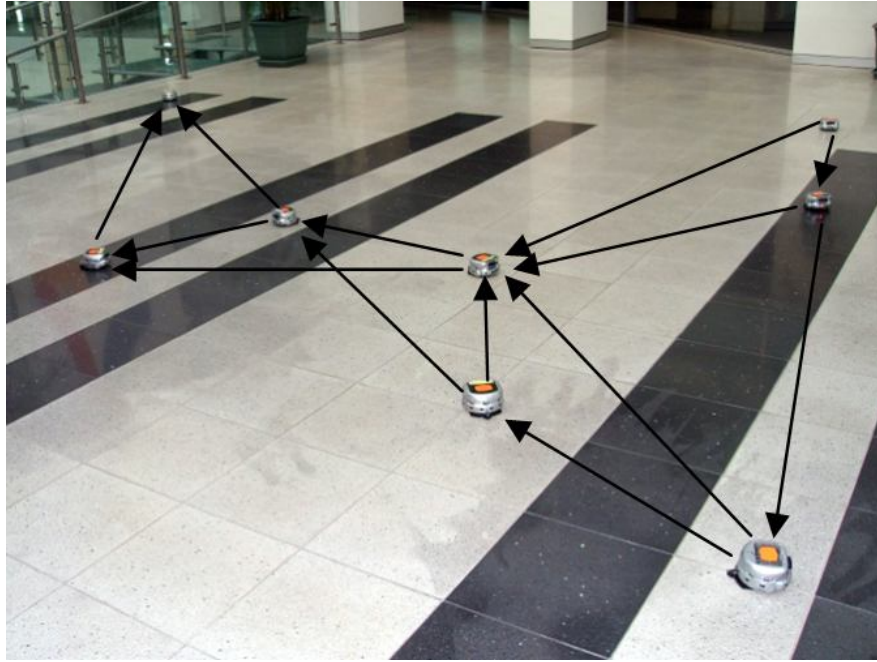
Şekil 4.10. Dağılma deneyleri sonucundaki robotlar arası ortalama iç uzaklıklar.



Şekil 4.11. İç uzaklıklardaki standart sapmalar.



Şekil 4.12. Toplam deney süreleri.



Şekil 4.13. Dağılma sonrası robot konumları.

## BÖLÜM 5

### 5. SONUÇ

#### 5.1. Yorumlar

Bu tez çalışmasında çoklu robot sistemleri ile gerçek zamanlı olarak yapılan bir arama görevinde robotlar arası haberleşmenin sistem başarısına olan etkisi incelenmiştir. Burada robot erkinler arasında yapılan haberleşme ile robotlar arasında bir işbirliği sağlanarak arama veriminin artırılması hedeflenmiştir. Benzetimler ve gerçek robotlar kullanılarak yapılan deneylerde arama başarımları ölçülmüş ve elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla haberleşmenin robotlar arası işbirliğine olan etkileri incelenmiştir.

Yapılan ilk çalışmada arama kurtarma operasyonlarında robotların kullanımı için geliştirilmiş ağ tabanlı dinamik bir arama stratejisi ortaya konulmuştur. Bu stratejide arama tarama davranışı bir iletişim ağı ile birleştirilerek sonuca hızlı erişim sağlanmıştır. Bu sayede arama yapan bütün robotlar arasında sürekli aktif bir haberleşme ağı oluşturulması ve önemli bilgilerin robotlar arasında her zaman paylaşılabilmesi sağlanmıştır. Bu stratejinin iletişim ağı içermeyen robotların birbirlerinden bağımsız olarak arama yaptığı bireysel bir arama davranışına olan üstünlükleri engellerin bulunmadığı doğrusal bir alan üzerinde yapılan arama deneyleriyle stratejilerin farklı uzaklıklarda bulunan aranan nesnelere bulma başarımları (aranan nesneyi bulma süreleri) ölçülerek ortaya çıkarılmıştır.

Devam eden çalışmalarda ise daha fazla sayıda robot kullanılarak üzerinde duvarlar ve engeller bulunan karmaşık bir alan içerisinde çok robotlu bir arama görevi gerçekleştirilmiştir. Burada robotlar arası haberleşmenin yapılabildiği ve yapılamadığı durumlar dışında ek olarak robotlar arasında farklı mesafelerde kurulan iletişimin arama başarısına olan etkisi de ölçülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada robotlar arasındaki farklı iletişim mesafeleri bir tepe kamerasından alınan görüntüler

ile robotların konumlarının hesaplanması ve robotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak iletişimin filtrelenmesi şeklinde sanal olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir robotun yaptığı arama ile ilgili harita bilgisini hafızasında tutması ve gerektiğinde bu bilgiyi iletişim mesafesinde bulunan diğer robotlar ile paylaşması sağlanmıştır. Bu sayede yapılan iletişim robotlar arasındaki işbirliğine ve dolayısıyla de arama performansına olan katkısı araştırılmıştır. Ayrıca arama deneyleri sarmal arama ve bilgilendirilmiş rastgele arama olmak üzere iki ayrı arama yöntemi kullanılarak yapılmış ve arama performansları farklı sayıda robot ve farklı iletişim mesafeleri kullanıldığı durumlar için ölçülmüştür. Arama başarımları ise yapılan aramaların almış olduğu toplam süreler ölçülerek hesaplanmıştır.

Deneylelerden alınan sonuçlar incelendiğinde ise artan robot sayısı ile arama performansı arasında doğrusal bir orantı olduğu görülmüştür. Benzer şekilde sonuçlar artan iletişim kurma mesafesi ile arama performansı arasında da belirli bir noktaya kadar bir iyileşme olduğunu, bu noktadan sonra ise performansın fazla değişmediğini göstermiştir. Yapılan deneylerde robotlar sadece düşük bir iletişim mesafesi ile iletişim kurduklarında bile oluşan bilgi paylaşımı ve işbirliği ile arama performansında bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Özetle, iletişim mesafesinin bütün robotları kapsayacak kadar geniş bütünsel bir iletişim olmasına gerek duyulmadığı ve daha düşük mesafede bir iletişim ile de aynı arama başarısının elde edilebileceği söylenebilir. Bu sayede oluşturulan bu deney düzeneği ve burada yapılan arama görevinde sistem performansında önemli bir düşüş olmadan daha kısa mesafeli bir iletişim ve dolayısıyla daha az güç harcanarak robotun daha uzun bir süre boyunca çalışabilmesi sağlanabilir. Bu çalışmada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da en iyi başarıyı sağlayan minimum haberleşme mesafesinin ortam boyutu ve arama davranışında kullanılan robot sayısına bağlı olarak oldukça değişebilesidir. Benzer biçimde kullanılan arama algoritmasının da arama performansını etkileyen önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır.

Yapılan diğer bir çalışmada ise robotların sadece yaymış oldukları RF işaret şiddetleri kullanılarak ve başka herhangi bir konumlandırma yöntemi olmaksızın

arama yapılacak ortama dağılmaları amaçlanmıştır. Burada dağılma davranışı doğada bakteriler gibi tek hücreli canlıların besin arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş bir yöntem olan bakteri beslenme eniyileme yöntemi kullanılarak robotların kendilerini istenilen şekilde konumlandırmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem uyarlanarak aranan nesnenin besin kaynağı yerine ortamdaki RF işaret kaynakları olması sağlanmış ve dağılma algoritması da sadece robotların birbirlerinden almış oldukları RF işaret seviyeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca radyo işaretlerinin ölçülmesi ve ortamdaki gürültü ve işaret seviyesi ölçüm hatalarının en aza indirilmesi için çok yönlü ve çok konumlu işaret ortalamaları gibi iyileştirmeler geliştirilerek dağılma verimliliğinin artırılması sağlanmıştır.

Yapılan farklı dağılma deneyleri sonucunda işaret ölçümlerinde yapılan iyileştirmelerin dağılma sonuçlarına olumlu olarak yansıdığı görülmüştür. Bu sayede işaret örnekleme yapılan alan genişletilerek ölçülen işaret değerlerindeki gürültü etkisinin önemli ölçüde azalması sağlanmıştır. Ayrıca farklı açı ve konumlarda yapılan işaret ölçümlerinin kullanıldığı dağılma deneylerinin sabit açılı ve sabit konumlu işaret ölçümlerinin kullanıldığı deneylerden daha düzgün, daha toplu sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Burada tespit edilen diğer bir durum ise işaret örnekleme yapılan alanın sürekli genişletilmesinin sinyal üzerinde her zaman olumlu etki yapmadığı yönündedir. Buradaki durum belirli bir örnekleme mesafesinden sonra işaret seviyesindeki gürültü etkisinin fazla olmadığı ve bu nedenle belirli bir mesafeden daha geniş bir alanda işaret toplamanın her zaman avantajlı olmadığı şeklinde yorumlanmıştır. Örnek olarak yapılan bu deneylerde ele alınan dört durum arasında en iyi örnekleme alanının 25 cm yarıçaplı bir daire olduğu tespit edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda daha fazla mesafe aralığında deneyler tekrarlanarak en ideal işaret toplama mesafesi ortaya çıkarılabilir.

## 5.2. Gelecek Çalışmalar

Gelecekteki çalışmalarda yapılan göreve en uygun ve sistem performansında önemli bir düşüş oluşturmada robotlar arası iletişim mesafesinin en verimli olacak şekilde seçilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılması düşünülmektedir. Ek olarak robotların homojen iletişim kurabilme mesafelerine sahip olmadığı durumlardaki sistem performansı da araştırılabilir. Bu sayede gerçek çalışma koşullarındaki benzer şekilde ortam şartlarından etkilenen daha gerçekçi bir robotlar arası haberleşme oluşturulabilir.

Ayrıca deneyler yapıldığı sırada haberleşme mesafesi değiştirilebilen bir iletişim donanımı mevcut olmadığı için bu özellik sanal olarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Eğer bu şekilde bir donanım kullanılarak deneyler tekrar edilebilirse daha gerçekçi deney sonuçların alınması mümkün olabilir.

Ayrıca gelecekte daha gelişmiş robotlar ile gerçek bir arama senaryosunda robotların arama yapmaları sağlanarak geliştirilen tekniklerin başarısı ölçülebilir ve belki gerçek bir arama kurtarma operasyonunda çoklu robot sistemleri kullanılarak arama yapılması ve bu sayede hayatların kurtulması mümkün olabilir.

## **EKLER**

### **A. ÇOKLU ROBOT UYGULAMALARI İÇİN BİR DENEY DÜZENEĞİ**

#### **A.1. Giriş**

Bu bölümde yapılan çalışmanın amacı sürü robot sistemleri üzerine yürütülen çalışmalarda kullanılacak bir deney düzeneğinin geliştirilmesidir. Bu deney düzeneği, çevrili bir arena içerisindeki mobil robotlar, bir tepe kamerası ve alınan görüntülerin işlenmesi ve robotlara gerekli global konum ve yönelimlerin geribeslenmesi için gerekli olan bir bilgisayardan oluşmaktadır. Bu düzenek Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Andaç T. Şamiloğlu ile yapılan ortak bir çalışmayla TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Sürü Sistemler Araştırma Laboratuvarı bünyesinde geliştirilmiştir.

Bu çalışmada sürü robotları üzerinde yapılmış olan teorik çalışmaların daha gerçekçi olarak gerçek robotlar üzerine aktarılması hedeflendi. Şu ana kadarki birçok çalışma benzetim tabanlı olarak gerçekleştirilmiş ve başarımları da yine benzetimler aracılığıyla ölçülmüş durumdaydı. Gerçek robotlar ile yapılacak olan çalışmaların bu çalışmalara daha farklı bakışlar getireceğini düşünmekte olduğumuz için bu amaçla bir deney platformu geliştirmeyi hedefledik. Sonuç olarak robotik ve kontrol sistemleri çalışmalarında lisans, yüksek lisans ve doktora düzeyinde kullanılacak bir deney platformu ortaya çıkarmış bulunuyoruz.

Birçok sürü robot çalışmasında robotların global konumları ve yönelimleri ihtiyaç duyulan önemli parametrelerdir. Ayrıca bu bilgilerin daha sonraki analiz çalışmalarında kullanılabilmesi için bir şekilde kaydedilmesi gerekmektedir. Bu bilgileri edinmenin bir diğer yolu odometri yani mesafe sayacı kullanmaktır. Fakat bu metot robotun küçük bir ölçüm hatası yapması, tekerlerin kayması gibi aksaklıklar



karşısında toplanarak artan hatalar ortaya çıkarabileceği için fazla güvenilir bir yöntem değildir. Aslında odometri açık çevrim bir yöntemdir ve hataların miktarı konusunda herhangi bir geribesleme olmadığı için tek başına bir çözüm olmaktan uzaktır. Bu sebeplerle bu çalışmada tepe kamerasından alınan görüntüleri kullanarak robotların pozisyon ve yönelimlerini belirleyen bir çeşit dış gözlem tekniği kullanıldı. Ayrıca eş zamanlı olarak birden fazla robotla çalışılması gerektiği için robotları birbirinden ayırt etmek ve robotların konum ve yönelimlerini ayrı ayrı ölçmek için bir tanımlama tekniği geliştirildi.

Bu çalışmada geliştirilen deney düzeneği 120x180 cm boyutlarındaki bir arena, bu arenanın tamamını görebilecek yüksekliğe yerleştirilmiş bir USB web kamera, altı adet e-Puck minyatür robot ve görüntü işleme, pozisyon geribeslemesi ve kod geliştirme için Matlab yazılımının yüklü olduğu bir masaüstü bilgisayardan oluşmaktadır. Burada robotların pozisyon ve yönelim açıları robotların üzerine yerleştirilmiş üç renkli nokta ile robotların kimlikleri ise siyah renkli noktalardan oluşan ikili bir kodlama sistemi ile belirlenmektedir.

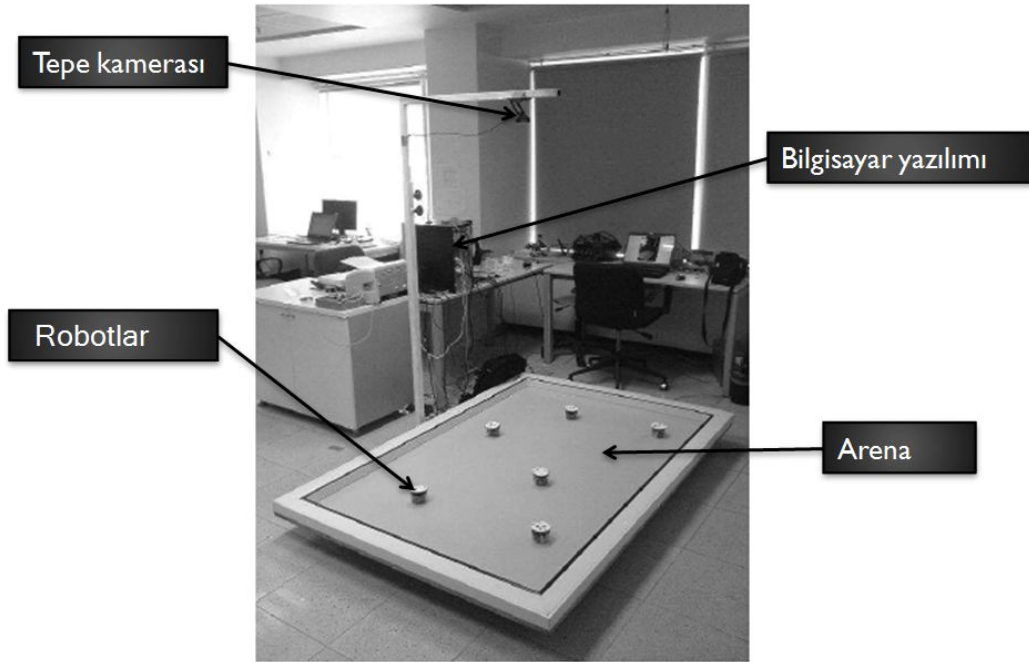
## **A.2. Deney Düzeneği**

Bu çalışmada geliştirilen deney düzeneği bir arena, bir USB tepe kamerası, altı adet e-Puck minyatür robot ve yüksek performanslı bir masaüstü bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil A.1.).

### **A.2.1. Robotlar**

Deney düzeneğinde fazla sayıda robotun aynı anda kullanılabilmesi için robotlar fazla büyük olmamalıdır. Ayrıca kablosuz veri iletişimi için robotların bluetooth, Wi-Fi, ya da zigbee benzeri bir iletişim altyapısına sahip olmaları gerekmektedir. Ek olarak robotlar üzerinde kızılötesi (IR) yada ultrasonik uzaklık sensörü gibi algılayıcılar bulunması daha gerçekçi deneyler ortaya koyabilmektedir. Bu nedenlerle bu çalışmada sahip olduğu özellikler nedeniyle EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) Üniversitesinin geliştirmiş olduğu e-Puck [23]

minyatür robotlarının kullanılması uygun görüldü. Bu robotlar sadece 7.0 cm çapında ve üzerinde dsPIC30F6014 [25] işlemcisi bulunduran robotlardır. İki tekerlekli bir diferansiyel sürüşle hareket edebilen bu robotlar üzerinde ayrıca 8 adet IR uzaklık sensörü Bluetooth iletişim modülü, kamera, 3 adet mikrofon, ivmeölçer ve bir hoparlör bulunmaktadır. Deney sırasında robotlar bilgisayar tarafından Bluetooth aracılığıyla sağlanan kontrol komutlarına göre tekerlek hızlarını ayarlayacak şekilde programlanmışlardır. Diğer bir alternatif ise karar verme ve kontrol mekanizmasını robot içine entegre ederek robotlara düzener tarafından sadece konum ve yönelim bilgilerini iletmektir.



Şekil A.1. Arena, robotlar, tepe kamerası ve masaüstü bilgisayardan oluşan deney düzeneği.

### A.2.2. Kamera

Tepe kamerası doğrudan bilgisayara bağlı durumdadır. Arena ve robot boyutları düşünüldüğünde 640x480 çözünürlüğündeki bir görüntünün kullanılması uygun görülmüştür. Görüntü işleme hızı ana gecikme nedeni olduğu için ve saniyede 4-5 kareyi aşmadığı için yüksek yakalama hızındaki bir kameraya ihtiyaç

duyulmamıştır. Piyasada bulunabilen 15-30 fps hızında bir kamera yeterli olmaktadır. Fakat görüntü kalitesi sistem performansını çok fazla etkilediği için kaliteli bir lense sahip, düşük ışık koşullarında bile net görüntü verebilen CCD (Charge Coupled Device) algılayıcıya sahip Logitech QuickCam Pro9000 [35] adlı web kamera bu çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir.

### **A.2.3. Bilgisayar Yazılımı**

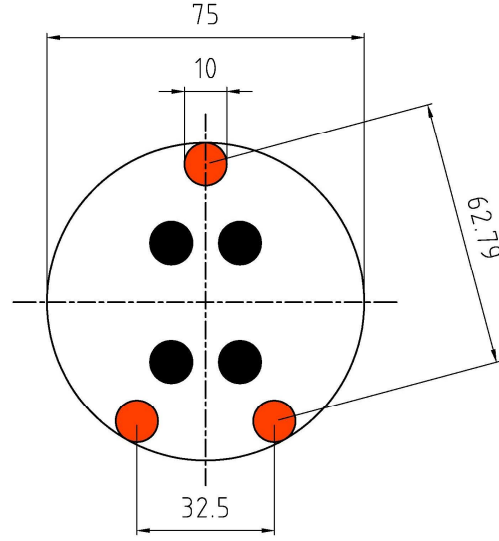
Görüntü işleme, robot davranış algoritmaları, robot kontrolü ve iletişim Matlab yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Matlab yazılımının tercih edilmesinin bir diğer nedeni ise içerisinde bulunan görüntüye erişim ve görüntü işleme kütüphaneleridir. Arena üzerinden alınan görüntüler işlenerek robotların global koordinatları ve yönelim açıları bulunmaktadır. Daha sonra bu bilgiler davranış kontrol algoritmaları tarafından kullanılmakta ve kontrol çıktıları olarak açısız ve lineer hız bilgileri üretilmektedir. Son olarak bu bilgiler robotlara Bluetooth iletişim altyapısı ile iletilmektedir. Bu sistemdeki ana gecikme görüntü işleme sırasında oluşmaktadır. Bu sebeple yüksek performanslı bir bilgisayar kullanılması tavsiye edilmektedir. (Çalışmalarda 2.4 GHz hıza sahip çift çekirdekli ve 2 GB bellekli bir bilgisayar kullanılmıştır.) Önceden de belirtildiği gibi diğer bir alternatif olarak karar verme ve kontrol mekanizması robotlara aktarılabilir ve sadece dışarıdan robotlara konum ve yönelim bilgileri sağlanarak sistem modellenir. Bu şekilde daha gerçekçi ve dağıtık uygulamalar gerçekleştirilebilir.

### **A.2.4. Arena**

Arena robotların içerisinde rahatlıkla hareket edebilecekleri 120x180 cm boyutlarında çevresi çevrili bir alandır. Arena boyutu uyumlu olabilmesi için kamera görüntü oranı olan 4:3 oranına yakın bir oranda seçilmiştir. Arena renginin robotların kolaylıkla ayırt edilebilmesi için kirli beyaz olması kararlaştırılmıştır.

### A.3. Kullanılan Görüntü İşleme Yöntem ve Metotları

Çoklu robot uygulamalarında robotların global ya da göreceli konumlarının tespit edilmesi önemli bir gereksinimdir. Ek olarak aynı zamanda birden fazla robot kullanıldığı durumlarda robotların tanınması ve birbirlerinden ayırt edilmesi gerekmektedir. Geliştirilen bu deney düzeneğinde tepe kameraları kullanılarak robotların konum, yönelim ve kimlik bilgileri eş zamanlı olarak aynı anda ortaya çıkarılmaktadır. Şekil A.2.'de robotların algılanmasını sağlayan kodlama sisteminin örnek bir görüntüsü verilmiştir. Bu şekiller her bir robotun üzerine yerleştirilen 75 mm çapındaki dairesel şapkalarla çizilmiştir. Burada robotların pozisyon ve yönelim açıları kenarlardaki turuncu renkli noktalar ile robotların kimlikleri ise merkezdeki siyah renkli noktalardan oluşan ikili bir kodlama sistemi ile belirlenmektedir.



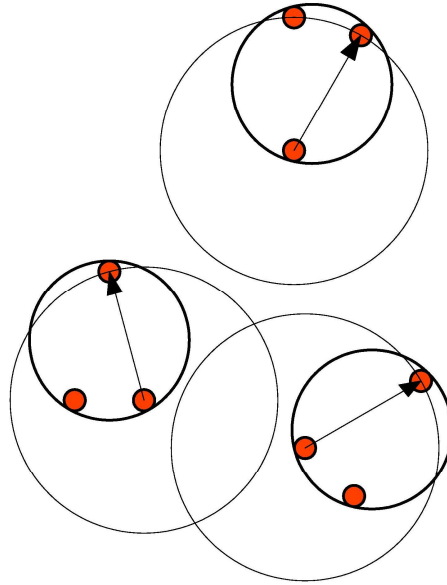
Şekil A.2. Robotların görüntü işlemeyle konum, yönelim ve kimlik bilgilerinin çıkarılmasını sağlayan renkli kodlama sisteminin örnek bir görüntüsü.(Boyutlar mm cinsindedir).

#### A.3.1. Robot Konumlarının Bulunması

Robot konumlarının bulunabilmesi için ilk olarak görüntüdeki turuncu renkli noktalar algılanmaktadır. Bunun için görüntü bulunulması istenilen renk aralığındaki bir filtreden geçirilmektedir. Bu sayede sadece algılanması istenilen noktalar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda renkli nesnelere ayırt etmekte ve istenilen

renklerin bulunmasında daha başarılı sonuçlar verdiği için HSV (Renk özü, Doygunluk, Değer) renk uzayının kullanılması uygun görülmüştür.

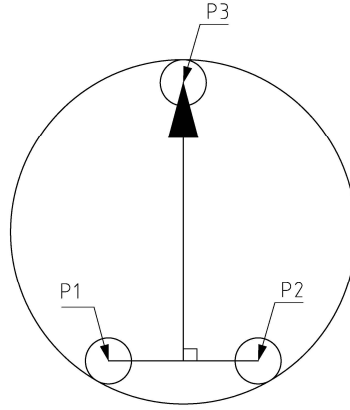
Turuncu renkli noktalar bulunduktan sonra bulunan bu noktalar birleştirilerek etiketlenmekte ve etiketlenen bu nesnelerin merkezleri bulunmaktadır. Bir sonraki aşamada ise bulunan bu merkez noktaların hangi üçünün aynı robota ait olduğunun bulunması gerekmektedir. Basit bir çözüm olarak birbirine en yakın üç noktanın aynı robota ait olduğu varsayımı temel alınmıştır. Bu yöntem oldukça hızlı sonuç vermesine rağmen bir dezavantaj olarak robotlar birbirine çok yaklaştıklarında noktalar birleşerek aslında olmayan robotların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple robotların birbirlerine yaklaşabilecekleri maksimum bir mesafe değeri belirlenmiştir. Şekil A.3.'te üç robotun üstten alınmış bir görüntüsü ve bu sınır mesafeler gösterilmiştir. Son olarak her robota ait bulunan bu üç noktanın ağırlık merkezi robotun konumu olarak geçerlilik kazanmaktadır.



Şekil A.3. Üç robotun üstten alınmış bir görüntüsü. Çizilmiş çemberler robotların birbirlerine yaklaşabilmelerine izin verilecek maksimum mesafeyi belirtmektedir.

### A.3.2. Robotların Yönelimlerinin Bulunması

Kenarlarda bulunan turuncu renkli noktalar ikizkenar bir üçgen oluşturmaktadır. Eşit uzunluktaki kenarların birleştiği nokta  $P_3$  ve geriye kalan iki nokta  $P_1$  ve  $P_2$  olarak işaretlenirse (bakınız Şekil A.4.) bu noktalardan  $P_1$  ve  $P_2$ 'nin orta noktalarını  $P_3$  ile birleştiren vektör robotun yönünü göstermektedir.



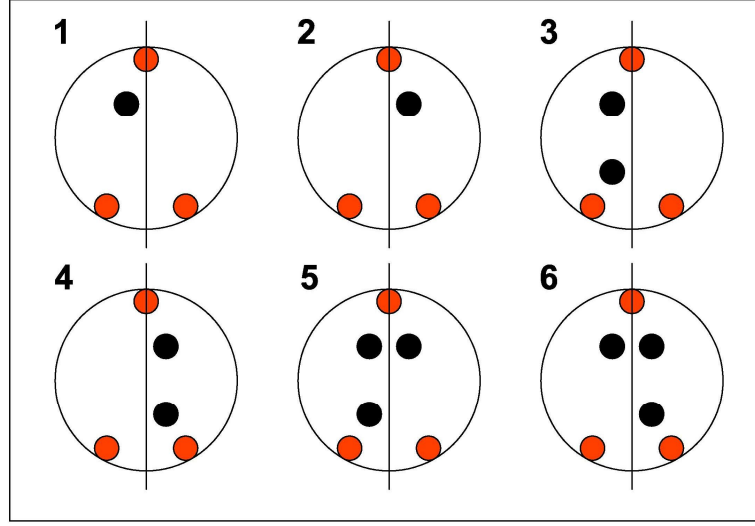
Şekil A.4. Robotların konum ve yönelimlerinin bulunmasını için kullanılan renkli noktalar.

### A.3.3. Robotların Kimliklerinin Tespit Edilmesi

Robotların kimliklerini ortaya çıkarabilmek için siyah noktalardan oluşan ikili bir kodlama sistemi kullanıldı. İkili kodlama için robot üzerine koyulacak olan bu siyah noktaların robotun sağında ve solundaki bölgelerde kaç adet buldukları bize robotun kimliğini göstermektedir. Şekil A.5.'te 6 robot için oluşturulmuş siyah nokta yerleşimleri gösterilmektedir.

Robotun sağ ya da sol tarafında en fazla iki nokta bulunabilmektedir. Kimliğin bulunması için hangi tarafta kaç adet siyah nokta bulunduğunun kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Aslında tek başına sadece kaç adet siyah nokta bulunduğunun bilinmesi kimlik tespiti için yeterli olabilecek gibi görülmektedir fakat bu durumda robot sayısı adedince nokta kullanmak gerekeceğinden, robot sayısı arttıkça ya da robot boyutları küçüldükçe çeşitli problemlerin ortaya çıkması

muhtemeldir. Be nedenle eğer noktalar buldukları yere göre ayrılırsa daha az sayıda nokta kullanarak daha fazla robot temsil edilebilir. Bu çalışmada kullanılan teknikle 6 robot için her kenarda sadece 2 nokta ( $3 \times 3 = 9$  ayrı kombinasyon mümkün) kullanılması yeterli olmaktadır. Örnekleri artırmak gerekirse her kenarda 3 nokta kullanarak 16 ( $4^2 = 16$ ), 4 nokta kullanarak ise 25 ( $5^2 = 25$ ) farklı robot tanımlanabilir. Görüntü işleme sırasında siyah noktaların bulunması bölüm 6.3.1 de anlatılan tekniğe çok benzer bir şekilde yapılmaktadır. Tek fark seçilen renk aralığının turuncu değil de siyah olmasıdır.



Şekil A.5. 6 robot için oluşturulan kimlik kodlama sistemi.

#### A.4. Robot Hızlarının İletilmesi ve Robot Kontrolü

Her bir robotun konum ve yönü tepe kamerasından alınan görüntüler işlenerek elde edilmektedir. Bu bilgiler sürü robot kontrolcüsüne (ana kontrolcü) iletilmekte ve bu kontrolcü robotlar için bir sonraki hız ve yön bilgilerini üretmektedir. Sürü robot kontrolcüsü hesapladığı hız ve yön bilgisini robotların sağ ve sol motorlarının hızlarına çevirdikten sonra bu hız bilgileri her bir robota iletilmektedir. Bu bilgilerin iletimi için Bluetooth haberleşmesi kullanılmaktadır. Her bir robot için merkez bilgisayarda bir seri port açılmakta ve motor hız bilgileri bu port aracılığıyla iletilmektedir. Bu yöntemdeki en önemli dezavantaj bluetooth ara yüzünün eş zamanlı olarak en fazla 7 köle (slave) desteklemesidir [36]. Bu nedenle üretilen

deney düzeneği en fazla 7 robotla çalışabilecek bir düzendir. Daha fazla robot sayısıyla yapılacak olan uygulamalar için başka kablosuz haberleşme yöntemleri (Zigbee veya Wi-Fi) kullanılması gerekmektedir.

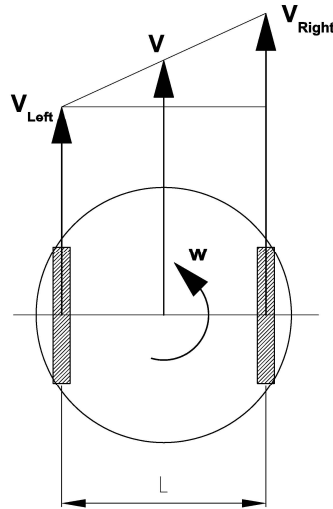
#### A.4.1. Robot Kontrolü

Düzenekte kullanılan robotlar sağ ve sol tekerlekleri iki adım motor (stepper motor) kullanılarak farklı hızlarda sürebilen diferansiyel sürüş sistemine sahip robotlardır. Bu nedenle robot kontrolü için ana kontrolcü her bir robotun sağ ve sol motor hızlarını robotlara bildirmelidir. Bunun için ana kontrolcüde hesaplanan robot öteleme hızı ve dönme hızı, sağ ve sol motorların hızlarına çevrilmelidir. Bunun için aşağıdaki eşitlik (A.1) kullanılmıştır.

$$V = \frac{V_{right} + V_{Left}}{2} = \frac{r}{2} (\omega_R + \omega_L) \quad (A.1a)$$

$$\omega = \frac{V_{right} - V_{Left}}{L} = \frac{r}{L} (\omega_R - \omega_L) \quad (A.1b)$$

Burada  $V$  ve  $\omega$  sırasıyla robotun öteleme ve dönme hızlarıdır.  $V_{left}$  ve  $V_{right}$  ise robota gönderilecek olan sol ve sağ motor hızları ve  $L$  ise sağ ve sol tekerlekler arasındaki uzaklıktır. Bu değişkenler arasındaki ilişki Şekil A.6.'da daha rahat görülmektedir.



Şekil A.6. Diferansiyel sürüş tekniğine sahip bir robotun hızları arasındaki ilişkiler.



#### A.4.2. İletişim Protokolü

Robotların bilgisayarla olan haberleşmeleri Bluetooth üzerinden robotlarla bilgisayar arasında açılan bir RS232 seri port üzerinden gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen bir protokol kullanılarak robotlara gerekli komutlar bu seri port aracılığıyla gönderilmekte ve bu şekilde robot kontrolü sağlanmaktadır. Kullanılan protokolün veri yapısı Çizelge A.1. de verilmiştir. Bu yapıda ilk önce robota çalıştırılması istenen komut, daha sonra eğer gerekiyorsa istenen sayısal girdiler ve son olarak ta sonlandırıcı '#' karakteri gönderilmektedir. Robot komutu başarılı bir şekilde aldıktan sonra eğer istenen bir çıktı varsa bilgisayara gönderir yoksa da komut içeriğine uygun görevi gerçekleştirmeye başlar. Robot kontrolü için tanımlanmış çeşitli komutlar ve açıklamaları Çizelge A.2. de verilmiştir. Örnek olarak robotun ileri yönde 100 birim hızda hareket edebilmesi için sol tekerine 100 ve sağ tekerine 100 hız değeri verilmesini sağlayan komut "M 100 100#" olmaktadır.

Çizelge A.1. Bluetooth haberleşme protokolü yapısı.

| <i>Komut</i> | <i>İstenen Girdiler</i> | <i>'#'</i> |
|--------------|-------------------------|------------|
|--------------|-------------------------|------------|

Çizelge A.2. Haberleşme protokolü komutları

| <i>Komut</i> | <i>Açıklama</i>  | <i>Girdi</i>          | <i>Çıktı</i> |
|--------------|--|-----------------------|--------------|
| <i>M</i>     | Sol ve Sağ tekerlek hızlarını ayarlar.                                     | $V_{Left}, V_{Right}$ | -            |
| <i>S</i>     | Motorları durdurur.  | -                     | -            |
| <i>R</i>     | Robotu yeniden başlatır.   | -                     | -            |
| <i>O</i>     | Kızılötesi algılayıcıları kullanarak nesnelere kaçma modunu aktifleştirir. | -                     | -            |
| <i>C</i>     | Kızılötesi algılayıcıları ortam ışığına göre kalibre eder.                 | -                     | -            |
| <i>G</i>     | Bilgisayardan robota başlangıç referans konumu atar.                       | $x, y$                | -            |
| <i>D</i>     | Robottan iç konum verisini alır.   | -                     | $x, y$       |

## A.5. Sonuçlar

Bu b6l6mde s6r6 robot uygulamaları için geliştirilen bir deneysel d6zenek. D6zenekte g6receli olarak k66k ve basit robotlar olan e-Puck modeli robotlar kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda daha karmaşık yeteneklere sahip olan Khepera III [37] model robotların kullanılması d6ř6n6lmektedir. Robotların sınırlı oldukları arena y6ksek 6z6n6rl6kl6 bir USB ara y6z6 kullanan kamera tarafından izlenmektedir. Kameradan alınan g6r6nt6ler Matlab programında yazılan kodlarla işlenmekte ve elde edilen robot konum ve y6nelim bilgileri herhangi bir s6r6 robot uygulamasında kullanılabilir. D6zeneğin s6r6 robotlarla bir d6ng6sel takip problemi 6zerine yapılan uygulaması [38] çalışmasında bulunabilir. Robot konum ve y6nelim bilgilerinin s6r6 robot uygulamasına geri beslemesi son yapılan iyileştirmelerle 5 Hz'e kadar çıkarılmıştır. Çok hızlı olmayan k66k robot uygulamalarında bu d6ng6 frekansı yeterli olmaktadır. Ancak daha hızlı robot uygulamaları için daha iyi bir kamera (hareketli nesnelere g6r6nt6y6 bozmadan resmedebilecek) ve daha g6l6 (Matlab programlarını daha hızlı çalıştırabilecek) bir bilgisayar kullanımı gerekmektedir.

Bu deney d6zeneğinin lisans ve lisans6st6 programlardaki 6ğrencilerin s6r6 robot uygulamalarında çok faydalı olacağına inanıyoruz. Bu tez çalışmasının bir kısmında da bu tez çalışmasında faydalanılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Bonabeau, E., Dorigo, M., ve Theraulaz, G., *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, *Oxford University Press*, New York, 1999.
- [2] Dollarhide, R. ve Agah, A., Simulation and control of distributed robot search teams, *Computers and Electrical Engineering*, 29(5), 625–642, 2003.
- [3] Murphy, R. R., Human-robot interaction in rescue robotics, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Applications and Reviews*, 34(2), 138-153, 2004.
- [4] Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., ve Kahng, A. B., *Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions*, *Autonomous Robots*, 4(1), 7-27, 1997.
- [5] Balch, T., ve Arkin, R., Communication in reactive multi-agent robotic systems, *Autonomous Robots* 1(1), 1-15, 1994.
- [6] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramniam, Y., ve Cayirci, E., A Survey on Sensor Networks, *IEEE Communications Magazine*, 40(8), 102–114, 2002.
- [7] Rybski, P. E., Stoeter, S. A., Gini, M., Hougen, D. F., ve Papanikolopoulos, N. P., Performance of a distributed robotics system using shared communications channels, *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 18, 713-727, 2002.
- [8] Rybski, P. E., Larson, A., Veeraghavan, H., LaPoint, M., ve Gini, M., Communication strategies in Multi-Robot Search and Retrieval: Experiences with MinDART, *Proceedings of DARS'04, the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, 301–310, 2004.
- [9] Rekleitis, I., Lee-Shue, V., New, A. P., ve Choset, H., Limited communication, multi-robot team based coverage, *Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Automation*, 4, 3462-3468, 2004.
- [10] Trianni, V., Labella, T. H., ve Dorigo, M., Evolution of direct communication for a swarm-bot performing hole avoidance, *LNCS*, 3172, 130-141, 2004.
- [11] Werner, G., ve Dyer, M., *Evolution of Communication in Artificial Organisms*, Technical Report UCIA-AI-90-06, AI Laboratory, California Üniversitesi, Los Angeles, 1990.
- [12] MacLennan, B., *Synthetic Ethology: An Approach to the Study of Communication in Artificial Life II*, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley, Reading, MA. 1991.
- [13] Franklin, R. F., ve Harmon, L. A., *Elements of Cooperative Behavior*. Internal Research and Development Final Report 655404-1-F, Environmental Research Institute of Michigan (BRIM), Ann Arbor, MI. 1987.
- [14] Yanco, H., ve Stein, L., *An Adaptive Communication Protocol for Cooperating Mobile Robots, From Animals to Animats: Proceedings of the Second International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*, 478-485, Cambridge, MA, 1993.
- [15] Arkin, R. C., Cooperation without Communication: Multi-agent Schema Based Robot Navigation, *Journal of Robotic Systems*, 9(3), 351-364, 1992.
- [16] Agah, A., ve Bekey, G., In a Team of Robots The Loudest Is Not Necessarily the Best, *Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 3800-3805, Vancouver, 1995.

- [17] Arkin, R. C., Behavior-Based Robotics, *The MIT Pres*, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- [18] Yoshida, E., Yamamoto, M., Arai, T., Ota, J., ve Kurabayshi, D., Evaluating the Efficiency of Local and Global Communication in Distributed Mobile Robotic Systems, Proceedings of IROS, 1661-1666, 1996.
- [19] Yoshida, E., Yamamoto, M., Arai, T., Ota, J., ve Kurabayshi, D., A design method of local communication area in multiple mobile robot system, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2567-2572, 1995.
- [20] Murthy, C. S. R., ve Manoj, B. S., Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols, *Prentice Hall*, PTR Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2004.
- [21] "LINX Technologies, LR SERIES TRANSMITTER MODULE DATA GUIDE" erişim adresi: [http://www.linxtechnologies.com/Documents/TXM-xxx-LR\\_Data\\_Guide.pdf](http://www.linxtechnologies.com/Documents/TXM-xxx-LR_Data_Guide.pdf), erişim tarihi: 20 Ağustos 2009.
- [22] "LINX Technolgies, LR SERIES RECEIVER MODULE DATA GUIDE", erişim adresi: [http://www.linxtechnologies.com/Documents/RXM-xxx-LR\\_Data\\_Guide.pdf](http://www.linxtechnologies.com/Documents/RXM-xxx-LR_Data_Guide.pdf), erişim tarihi: 20 Ağustos 2009.
- [23] E-puck mini mobile robot from EPFL", erişim adresi: <http://www.cyberbotics.com/products/robots/e-puck.pdf>, erişim tarihi: 17 Temmuz 2009.
- [24] Samiloglu, A. T., Cayırpınar, O., Gazi, V., ve Koku A. B., An Experimental Set-up For Multi-Robot Applications, International Workshop on Standards and Common Platforms for Robotics (SCPR2008), 2008.
- [25] "Microchip, pic microcontroller", erişim adresi: <http://www.microchip.com>, erişim tarihi: 7 Ağustos 2009.
- [26] Zelinsky, A., Jarvis, R. A., Byrne, J. C. ve Yuta, S., Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot, Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics, 533–538, 1993.
- [27] P., Enge, ve P., Misra, Special issue on GPS: The Global Positioning System, Proceedings of the IEEE, 3-15, 1999.
- [28] Passino, K. M., Biomimicry of Bacterial Foraging, IEEE Control Systems Magazine, 22, 52–67, 2002.
- [29] "The Intel XScale® microarchitecture Technical Summary" erişim adresi: <http://download.intel.com/design/intelxscale/XScaleDatasheet4.pdf> erişim tarihi: 20 Temmuz 2009.
- [30] Tse, D., ve Viswanath, P., Fundamentals of Wireless Communication, *Cambridge University Press*, Cambridge, 2005.
- [31] Ocana, M., Bergasa, L. M., Sotelo, M. A., Nuevo, J., ve Flores, R., Indoor Robot Localization System Using WiFi Signal Measure and Minimizing Calibration Effort, Proc. of the IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics, 1545 – 1550, 2005.
- [32] Stephens, D. ve Krebs, J., Foraging Theory, *Princeton University Press*, Princeton, New Jersey, 1986.
- [33] O'Brien, W., Browman, H., ve Evans, B., Search Strategies of Foraging Animals, Amer. Scientist, 78, 152-160, 1990.

- [34] Adler, J., ve Tso, W., Decision-Making in Bacteria: Chemotactic Response of Escherichia Coli to Conflicting Stimuli, Science, 184(4143), 1292–1294, 1974.
- [35] Logitech Europe S.A., European headquarters moulin du choc ch - 1122 romanel-sur-morges.
- [36] Bluetooth, “The bluetooth core specification,” erişim adresi: <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Building/Specifications/>, erişim tarihi: 16 Mayıs 2009.
- [37] K-TEAM Corporation, Y-parc-rue galile 9 yverdon-lesbains 1400 switzerland.
- [38] Şamiloğlu, A. T., Gazi, V., ve Koku, A. B., Asynchronous cyclic pursuit, In Proc. of 9'th Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB06), Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI) 4095, 667–678S, Berlin Heidelberg, Eylül 2006.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇAYIRPUNAR, Ömer  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 27.11.1983, İdil  
Medeni hali : Bekâr  
Telefon : 0 (312) 292 42 91  
Faks : 0 (312) 292 42 80  
e-mail : ocayirpunar@etu.edu.tr

### Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi                    | Mezuniyet tarihi |
|--------|----------------------------------|------------------|
| Lisans | ODTÜ/Bilgisayar ve Öğr. Tek. Eğ. | 2006             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                                    | Görev         |
|-----------|--|---------------|
| 2006-2009 | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi | Ar. Görevlisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- Cayirpunar, O., Tavli, B., ve Gazi, V., Dynamic Robot Networks for Search and Rescue Operations, In Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment, Benicassim, Spain, Ocak 2008.

- Samiloglu, A., Cayirpunar, O., Gazi, V., ve Koku, A., An Experimental set-up for Multi-robot Applications, International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN 2008), 2008.
- Samiloglu, A., Çayirpunar, O., Gazi, V., ve Koku, A., Çoklu Robot Uygulamaları İçin Bir Deney Düzenegi, Türkiye Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Kasım 2008.
- Atas, Y., Cayirpunar, O., Akat, S. B., Gazi, V., ve Alboul, L, Laser Based Cooperative Multi-Robot Map Building for Indoor Environments. In Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment, Brussels, Belgium, Ocak 2009.
- Cayirpunar, O., Gazi, V., Tavli, B., Cervera, E., Witkowski, U., ve Penders, J., Experimental Study on the Effects of Communication Range on Cooperative Robotic Search in Complex Environments. ROBOCOMM 2009, Odense, Denmark, Nisan 2009.
- Çayirpunar, O., Gazi V., ve Tavli, B., RF İşaret Şiddeti ve Bakteri Eniyileme Yöntemi Kullanılarak Robot Dağılması Üzerine Deneysel Çalışma, Türkiye Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Ekim 2009.