



**T. C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTONOM KEŞİF AMAÇLI ROBOT SİSTEMLERİ İÇİN GERİ
DÖNÜŞ ROTASI HESAPLAMA ALGORİTMASI
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Necmettin ALPKIRAY

(201592181126)

Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yunis TORUN

SİVAS

MAYIS 2019

Necmettin ALPKIRAY'ın hazırladığı ve “OTONOM KEŞİF AMAÇLI ROBOT SİSTEMLERİ İÇİN GERİ DÖNÜŞ ROTASI HESAPLAMA ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı **Dr.Öğr. Üyesi Yunis TORUN**

Cumhuriyet Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi **Doç.Dr. Ahmet Gürkan YÜKSEK**

Cumhuriyet Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi **Doç.Dr. Alkan ALKAYA**

Mersin Üniversitesi

.....

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İsmail ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

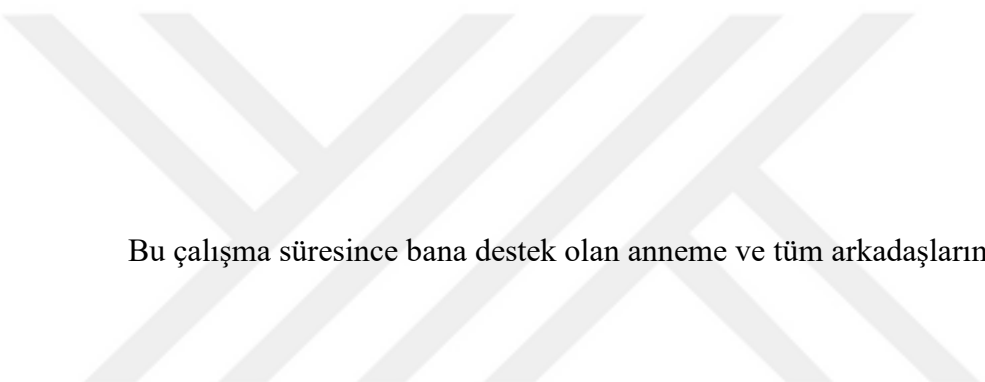




Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Necmettin ALPKIRAY, 2019



Bu çalışma süresince bana destek olan anneme ve tüm arkadaşlarıma...

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

26.05.2019

Necmettin ALPKIRAY

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yunis TORUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

OTONOM KEŞİF AMAÇLI ROBOT SİSTEMLERİ İÇİN GERİ DÖNÜŞ ROTASI HESAPLAMA ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Necmettin ALPKIRAY

Yüksek Lisans Tezi

Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Yunis TORUN

2019, 43+xii sayfa

Otonom mobil robotlar için rota planlama algoritmaları, robot teknolojisindeki son gelişmeler sayesinde oldukça ilgi çekici bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Rota planlama algoritmaları, otonom mobil robotların, verilen görev kapsamında gitmesi gereken hedef noktasına engellerden kaçınarak başarılı bir şekilde ulaşabilmesini sağlamaktadır. Rota planlama algoritmaları klasik ve sezgisel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Her iki kategorideki algoritmaların da avantaj ve dezavantajları olduğundan, daha verimli bir rota bulunması için literatürde birden fazla algoritmanın birlikte kullanıldığı yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada Probabilistic Roadmap (PRM) algoritması ve Artificial Bee Colony (ABC) algoritmalarının kullanıldığı yeni bir hibrit rota planlama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın optimizasyon evresinde kullanılan maliyet fonksiyonu sayesinde rota planlamasının kısa, güvenli ve keskin dönüşlerin olmadığı yumuşak geçişli olması sağlanmıştır. Geliştirilen algoritma Matlab Robotic System Toolbox kullanılarak simülasyon ortamında çalıştırılmış, algoritmanın farklı senaryolarda nasıl davranacağını gözlemlemek için 30 farklı harita üzerinde rota planlama işlemi yapılmıştır. Geliştirilen algoritma klasik PRM algoritması ile kıyaslanmış, maliyet fonksiyonu göz önüne alındığında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Rota planlama, Yapay Arı Kolonisi algoritması, Probabilistic Roadmap algoritması

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF HYBRID PATH PLANNING ALGORITHM FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOT SYSTEMS

Necmettin ALPKIRAY

Master of Science Thesis

Department of Energy Science and Technology Engineering

Supervisor: Dr. Yunis TORUN

2019, 43+xii pages

Path planning for autonomous exploration robot systems is a promising topic due to latest development on robot systems. Path planning algorithms enable mobile robots to successfully reach the target point while avoiding obstacles. Path planning algorithms divided into two categories which classical and heuristic algorithms. Algorithms in both categories have advantages and disadvantages, therefore hybrid algorithms have been developing to eliminate disadvantages of each algorithm. In this study, a new hybrid path planning algorithm developed by using Probabilistic Roadmap (PRM) algorithm and Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. Developed algorithm have a cost function, which provide a short, safe and smooth path. The algorithm simulated on Matlab Robotic System Toolbox and performed on 30 different maps to observe how the algorithm would behave in different scenarios. The new algorithm compared with classical PRM and successful results achieved based on cost function.

Key Words: Path Planning, Artificial Bee Colony algorithm, Probabilistic Roadmap algorithm

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. Literatür Özeti	3
2. OTONOM KEŞİF	9
2.1. Sınır Tabanlı Keşif	9
3. ROTA PLANLAMA	11
3.1. Klasik Rota Planlama Yöntemleri.....	11
3.1.1. Probabistic roadmap algoritması.....	11
3.1.2. Bezier kenar yumuşatma yaklaşımı	13
3.2. Sezgisel Rota Planlama Yöntemleri	13
3.2.1. Artificial bee colony algoritması.....	14
3.3. PRM ABC Hibrit Rota Planlama Algoritması	15
4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	20
4.1. Otonom Keşif Algoritması Simülasyon Ortamı.....	21
4.2. Rota planlama Simülasyon Ortamı.....	24
5. SONUÇ	32
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1 Deneysel çalışmada kullanılan haritalar.	21
Şekil 4.2 Simülasyon ortamı a) keşif ortamı b) lidar verilerinden oluşturulan harita c) hesaplanan sınır çizgileri.	22
Şekil 4.3 Keşif sürecinin ilerleyişi.	23
Şekil 4.4 Haritanın oluşturulması.	23
Şekil 4.5 Sınır çizgisi tespitleri.	23
Şekil 4.6 Keşif Sürecinde Rota planlama.	24
Şekil 4.7 ABC ile rota optimizasyonu a) güvenlik ve yumuşaklık kriteri ile b) sadece rota uzunluğu kriteri ile.	25
Şekil 4.8 PRM ve PRM-ABC algoritmalarının kıyaslanması.	26
Şekil 4.9 PRM güvenlik kriteri için haritanın şişirilmesi a) normal b) şişirilmiş.	27
Şekil 4.10 PRM algoritmasında şişirilmiş harita etkisinin görülmesi.	28
Şekil 4.11 PRM algoritması ve Bezier algoritması.	29
Şekil 5.1 Rota uzunluğunun kıyaslanması.	32
Şekil 5.2 Engellere minimum mesafenin kıyaslanması.	33
Şekil 5.3 PRM-ABC algoritması ve Bezier algoritması.	34
Şekil 5.4 Rota yumuşaklığı verilerinin kıyaslanması.	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 Harita özellikleri.....	20
Çizelge 4.2 PRM ve PRM-ABC Rota Değerlerinin Kıyaslanması.....	28
Çizelge 4.3 30 harita için rota verileri tablosu.....	30



1. GİRİŞ

İnsansız hava/yer araçları düşük maliyet, güçlü uygulama alanı, farklı boyutlarda uygulanabilirlik ve yüksek manevra yetenekleri gibi avantajlarından dolayı son zamanlarda sivil ve askeri amaçlı birçok alanda kullanılmaktadır. İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) 2014 yılında 11 milyar dolarlık bir pazar oluşturduğu göz önüne alındığında bu rakamın 2024 yılında 91 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Eaton vd., 2016). İnsansız araçların kullanımının hızlı bir şekilde artışı birçok yeni uygulama alanı oluşturmakla birlikte, insansız araçların yeteneklerinin artırılması anlamında birçok geliştirme faaliyetinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Ülkemizde askeri amaçlı olarak birçok firma tarafından geliştirilmiş insansız yer araçları bulunmaktadır. İnsansız yer araçlarının temel kullanım amacı, insanların bulunmasının riskli olduğu veya insanların girişinin mümkün olmadığı alanlarda keşif yapmak ve bilgi toplamak olarak gösterilebilir.

Keşif görevi esnasında veya keşfedilen haritada, robotun belli bir noktaya hareket etmesi için rota planlama algoritmaları kullanılmaktadır. Otonom robot sistemleri için rota planlama işlemi kilit rol oynamaktadır (Mac vd., 2016). Rota planlama algoritmaları klasik ve sezgisel olarak iki farklı kategoriye ayrılabilir. Rota planlama algoritmaları temel olarak hedef noktasına en kısa yoldan ulaşmayı amaçlamaktadırlar (Souissi vd., 2013). Bunun yanında rota güvenliği ve enerji verimliliği için optimize edilen algoritmalar da geliştirilmiştir (Hidalgo-Paniagua vd., 2016; Z. Zhu vd., 2015). Klasik yöntemler genellikle düşük çözünürlüklü, basit rota oluşturup bilinen veya bilinmeyen ortamlarda hızlı ve etkili bir şekilde çalışabilirler. Sezgisel yöntemler ise yüksek çözünürlüklü, daha optimize rotalar oluşturmaktadırlar (Mac vd., 2016). Bu nedenle her iki yöntemin dezavantajlarının elimine edildiği hibrit algoritmalar geliştirilmektedir.

Engellerin bulunduğu karmaşık ve bilinmeyen ortamlarda engellere çarpmadan otonom hareket etmek, insansız araçların temel problemlerinden biridir (Matveev vd. 2016). Bunun için insansız araçların engellerden kaçınmasını sağlayacak otomatik konum tayin sistemleri barındırması gerekmektedir. Bu konuda yayımlanmış birçok çalışma olmasına rağmen gerçek ortamda yüksek başarı oranı sağlanması için halen geliştirilmesi gereken birçok konu bulunmaktadır. Otonom keşif robotlarının keşif görevi temel olarak iki aşamalı olarak çözülmektedir.

Birinci aşama robotun bulunduğu ortamdaki konumunu belirlemesidir. İnsansız araçların dış ortamda yüksek doğrulukla konum tespitini gerçekleştirmesi için GNSS/GPS (Global Navigation Satellite System/Global Positioning System) temelli birçok başarılı çalışma ortaya konmuştur (Juiler ve Uhlmann, 1997; Merwe vd., 2004; Shen vd., 2014). Bununla birlikte GPS sinyalinin konum bilgisini üretmediği durumlarda, robotun görüntü işleme yardımıyla konum bilgisi oluşturduğu çalışmalar da bulunmaktadır (Chowdhary vd, 2013; Bachrach vd, 2011). Bunun yanında küresel konumlama hizmetlerinin verimli bir şekilde kullanılmadığı iç mekanlarda robotun üzerinde bulunan sensörler yardımı ile robotun konumunu ve ortamın haritasını çıkardığı Anlık Konumlama ve Haritalama (SLAM) algoritmaları bulunmaktadır (Corke, 2011). Literatürde GPS sinyalinin olmadığı durumlarda sınırlı algılama ve bilgisayar ile işlem gücüne bağlı olarak, çeşitli sensörler yardımıyla konum tespiti gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise robotun görevini gerçekleştirmesi için hareket etmesi gereken noktayı tespit etmesi ve belirlenen noktaya engellere çarpmadan ulaşabilmesidir. Bu noktada keşif işlemi için en çok kullanılan yöntem olan Sınır Tabanlı Keşif (Frontier Based Exploration) algoritması ile keşfedilen ve bilinmeyen bölgeler arasında kalan sınır bölgesine robotun hareketi sağlanarak keşif işlemi gerçekleşmektedir (Holz vd., 2010). Sınır Tabanlı Keşif (STK) algoritması iteratif bir algoritma olduğundan ulaşılan her bir sınır noktasından sonra sınır noktaları güncellenmekte ve güncel sınır noktalarından seçilen bir sonraki sınır noktasına gidilmektedir. STK algoritması tarafından belirlenen hedef noktasına robotun hareketi için çalışma ortamının büyüklüğüne bağlı olarak rota planlama işlemine gereksinim duyulmaktadır.

Rota planlama algoritmaları A noktasından B noktasına engellere çarpmadan en kısa yoldan ulaşmayı hedeflemektedir (Klančar vd., 2017b). Klasik yöntemler ve sezgisel yöntemler olmak üzere ikiye ayrılan rota hesaplama algoritmaları, farklı ortamlarda farklı sonuçlar vermektedir (Mac vd., 2016). En önemli klasik yöntemlere Hücre Ayrıştırma algoritması, Potansiyel Alan algoritması, Probabilistic Roadmap (PRM) ve Rapidly-Exploring Random Tree (RRT) gibi örnekleme tabanlı algoritmalar, Alt Hedef Ağı algoritması gösterilebilir. Sezgisel yöntemlere Sinir Ağları, Bulanık Mantık, Karınca Koloni Algoritması, Genetik Algoritma gibi doğa temelli algoritmalar gösterilebilir. Klasik yöntemler genellikle düşük çözünürlüklü bir rota

oluşturmaktadırlar. Sezgisel yöntemler yüksek çözünürlüklü rotalar oluşturmakla birlikte daha optimize edilmiş rotalar oluşturmaktadır (Holz vd., 2010).

1.1. Amaç ve Kapsam

Günümüzde otonom mobil robotlar arama kurtarma, askeri, ticari, uzay çalışmaları başta olmak üzere çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Gelişen teknolojik imkanlar dahilinde mobil robotların yetenekleri ve yapabilecekleri görev çeşitleri her geçen gün artmaktadır. Mobil araçlara otonom yeteneği kazandırılması için gerekli olan önemli hususlardan biri de rota planlama probleminin en verimli şekilde hesaplanması olarak gösterilebilir. Bu tez çalışması kapsamında simülasyon ortamında geliştirilen mobil robot, küresel koordinat sistemlerinin verimli bir şekilde çalışmadığı iç ortamlarda Anlık Konumlama ve Haritalama (SLAM) algoritması sayesinde bulunduğu ortamı, üzerinde bulunan lidar sensörü sayesinde algılayarak, bulunduğu ortam haritasını çıkarıp konum bilgisi üretmektedir. Elde edilen veriler ışığında bulunduğu ortamın bilinmeyen tüm kısımlarını STK algoritmasını kullanarak keşfetmekte, keşfedilecek alan kalmadığı durumda başlangıç noktasına geri dönmektedir. Keşif işlemi esnasında görev iptali yapıldığı zaman geliştirilen hibrit rota planlama algoritmasını kullanarak en kısa, en yumuşak ve en güvenli rota oluşturularak başlangıç noktasına geri dönmektedir.

Bu tezde geliştirilen rota planlama algoritması sivil ve askeri birçok farklı alanda kullanılan otonom mobil robotlarda uygulanabilir. Sivil alanda, insan hayatı için tehlike arz edebilecek ortamlarda veya insanlar tarafından girilemeyecek kadar dar enkaz veya tünellerde arama kurtarma çalışmalarını hızlandıracak keşif görevi için kullanılabilir. Askeri alanda terör olaylarına müdahale görevlerinde özellikle uzaktan kontrollü mobil araçların jammer gibi sistemlerle engellendiği durumlarda ortamın keşif edilmesi için kullanılabilir. Askeri alanda kullanılan Aselsan tarafından geliştirilen KAPLAN insansız kara aracı, örnek olarak gösterilebilir (“Tübitak Kaplan”, 2013).

1.2. Literatür Özeti

Bir robotun herhangi bir dış komut ihtiyacı olmadan kendi iç dinamikleri ile karar verip otonom olarak hareket etmesi, yaygın kullanım alanı ve son zamanlardaki teknolojik gelişmelerin yarattığı yeni olanaklar ile gelecek vadeden bir çalışma alanı

olarak karşımıza çıkmaktadır (Klančar vd., 2017a). Mobil robotlara otonom yeteneği kazandırmak için dört temel unsura ihtiyaç vardır (Mac vd., 2016). Bunlar sırasıyla; algılama, konumlandırma ve haritalama, rota planlama ve robot kontrolü olarak tanımlanmaktadır (Mac vd., 2016).

Mobil robotlar bulunduğu ortamı algılamak, konum tahmini ve haritalama, hareket verilerini algılamak gibi farklı bilgiler için sensörlere ihtiyaç duyarlar. Mobil robotlar bulunduğu ortam hakkında ve kendi dinamik modelleri hakkında kesin bilgilere sahip değildirler. Bu belirsizlikleri azaltmak için genellikle birden fazla sensörün birlikte kullanıldığı çevre ve robot durumlarının tahmini için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Özellikle konum bilgisi için, bina içi kullanımlarda, tek bir sensör ile konum tahmini yapılabilecek bir çözüm bulunmamaktadır. Robot sistemlerinde kullanılan sensörler iç dinamiklerle ilgili ve dış dinamiklerle ilgili olmak üzere iki kısımda sınıflandırılabilir (Klančar vd., 2017c). Robotun pozisyon ve yön bilgisi, tekerlek dönüş ve açısal hız bilgisi, batarya seviye bilgisi, sıcaklık, motor akım bilgisi gibi veriler iç dinamikler ile ilgili veriler olarak gösterilebilir. Robotun engellere uzaklığı, çevre ile ilgili fotoğraf, video, ses verisi, pusula, küresel konumlama bilgisi gibi veriler dış dinamikler ile ilgili veriler arasında gösterilebilir. Robotun çevre algılaması için lazer mesafe sensörü (Achtelik vd., 2009; Shen vd., 2014), tek kamera (Blösch vd., 2010), stereo kamera (Fraundorfer vd., 2012), RGB-D sensör (Bachrach vd., 2012), ultrasonik sensörler (Chong vd., 2015) gibi çeşitli sensörler kullanılmaktadır. Robotun ivme, yön verileri için IMU (Inertial Measurement Unit) sensörü kullanılmaktadır (van der Merwe vd., 2012).

GPS, GLONAS, GALİLEO gibi küresel konumlama sistemleri Dünya yörüngesinde bulunan uydu sistemlerinden alınan sinyaller vasıtası ile konum verisi üretmektedir. Kapalı hava koşulları sağlıklı sinyal bilgisi almayı zorlaştırmakta, bina içinde veya kapalı herhangi bir mekanda sinyal bilgisi alınamamaktadır. Bu nedenle küresel konumlama sistemi ile konum bilgisi üretmenin mümkün olmadığı durumlarda birden fazla sensör ile konum tahmini yapılabilmektedir. Sadece bir sensör ile konum tahmini yapılan çalışmalar olmasına rağmen, konum bilgisinde çok fazla sapma olmasından dolayı verimli değildirler (Thrun, 2002). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde otonom araçların konum verisi elde etmesi için Anlık Konumlandırma ve Haritalama (SLAM) adı verilen algoritmaların kullanıldığı görülmektedir. SLAM algoritmaları,

kapalı mekan, açık mekan, uydu sistemleri, madencilik, uzay keşfi, arama kurtarma, askeri gibi bir çok alanda kullanılmaktadır (Ahmad ve Namerikawa, 2011). SLAM algoritmalarının 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak uygulanabilmesi geniş bir alanda kullanılmalarını sağlamıştır. Konum tahmini problemini çözmek için son zamanlarda Kalman Filtresi (KF), Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF), Koksuz Kalman Filtresi (UKF), Parçacık Filtresi (PF) gibi birçok metot kullanılmıştır. Bailey, Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanarak SLAM uygulamasında yön sapmasını minimize etmeye çalışmıştır (Bailey vd., 2006). Hu, Kinect RGB-D sensörünü kullanarak 3 boyutlu SLAM uygulaması gerçekleştirmiş, başarılı sonuçlar almıştır (Hu vd., 2012). Hess, IMU ve lidar sensörlerini kullanarak iki boyutlu SLAM uygulaması gerçekleştirmiş, sensör füzyonu için Google Cartographer adı verilen uygulamayı kullanmıştır (Hess vd., 2016).

Otonom keşif işlemi için, SLAM algoritması ile oluşturulan harita ve konum bilgileri kullanılarak robotun keşfedilmemiş bölgelere hareketi sağlanmalıdır. Keşif algoritmaları genellikle reaktif ve açgözlü (greedy) algoritmalarından oluşmaktadır (Holz vd., 2010). Mobil bir Robot ile keşifteki görev, herhangi bir ortamda haritalanmış bölge ile haritalanmamış bölgenin arasındaki sınır noktasında yeni bir ölçüm yaparak haritalanmış bölgenin alanını genişletmektir. Bu konuda en çok kullanılan Sınır Tabanlı Keşif (STK) algoritması ile elde bulunan veriler ışığında keşfedilmiş bölge ile keşfedilmemiş bölge arasındaki çizgide, mümkün olabilecek en iyi noktaya giderek, en kısa zamanda ve en kısa yoldan tüm bölgeyi keşfetmek amaçlanmıştır (Yamauchi, 2004). STK algoritması iteratif bir algoritmadır. Keşfedilen her sınır noktasından sonra yeni sınır noktaları belirlenir ve bu süreç keşfedilmemiş sınır noktası kalmayınca kadar devam eder. Bu aşamada bir sonraki gidilecek sınır noktasının seçimi ile ilgili optimizasyonlar yapılmıştır. Bir sonraki gidilecek sınır noktası için en yakın sınır noktasını veya rastgele bir sınır noktasını seçen çalışmalar mevcuttur (Holz vd., 2010). Bu konuda ortamın şekli ve karmaşıklığına bağlı olarak her iki yöntemin de birbirine üstünlük kurabildiği gözlemlenebilmektedir. Zhou, 3 boyutlu haritalama için kullanılacak 3D-FBET adını verdiği STK algoritması geliştirmiştir (C. Zhu vd., 2016). Sang, bina içinde insansız mobil hava robotu kullanımı için, engellerden kaçınabileceği bir güvenli koridor oluşturan yeni bir STK metodu geliştirmiştir (Sang vd., 2013). Yamauchi, çoklu mobil robot sistemleri için STK algoritmasını işbirliği halinde keşif gerçekleştirmek üzere düzenlemiştir

(Yamauchi, 2004). STK algoritmalarının önemli bir kısmı sınır çizgilerinin veya sınır noktalarının tespit edilmesidir. Bu konuda temel yaklaşım, görüntü işleme metotlarından kenar algılama ve bölge çıkarma metotlarının kullanılarak keşfedilmiş ile keşfedilmemiş bölge arasında bir sınır çizgisi veya sınır noktası hesaplamaktır. Sınır noktalarının daha hızlı tespit edilmesi için Dalga Sınır Algılama (WFD) ve Hızlı Sınır Algılama (FFD) adı verilen yaklaşımlar geliştirilmiştir (M. (Bar-Ilan U. G. Keidar ve Kaminka, 2012; M. Keidar ve Kaminka, 2014).

Keşif işlemi sırasında görev iptali olması veya görev sonunda mobil robotun başlangıç noktasında geri dönebilmesi için rota planlama algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Hücre Ayrıştırma yöntemi ile rota planlamasında, robotun bulunduğu ortamdaki boş alan hücreler diye adlandırılan küçük bölgelere bölünerek, bu bölgeler üzerinden rota planlaması yapılmaktadır (Lingelbach, 2004). Potansiyel Alan yönteminde engeller ve hedef için itici ve çekici kuvvetler atanmış ve böylece robotun engellerden uzaklaşırken hedef noktasına varması sağlanmıştır (Hwang vd., 1992). PRM, RRT gibi örneklem tabanlı metotlar karmaşık ortamlarda ve hesaplama süresinin kısa olmasının önemli olduğu uygulamalarda sıkça kullanılmaktadırlar. PRM ve RRT algoritmalarında her ne kadar rastgele oluşturulmuş noktaların birleştirilmesi ile rota hesaplanması oluşturulsa da rota hesaplanmasına temel teşkil eden bağlantı grafiklerinin oluşturulması noktasında birbirlerinden ayrılmaktadırlar (Karaman ve Frazzoli, 2011). PRM algoritması iki boyutlu ve üç boyutlu uzayda başarılı bir şekilde uygulanmıştır (F. Yan vd., 2013). RRT algoritması hesaplama verimliliği ve görece hızlı bir şekilde verimli bir rota bulması nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Karaman vd., 2011). RRT algoritması artan bir şekilde rastgele noktalar ve noktaların birleşmesinden çizgiler oluşturarak ağaç benzeri bir yapı kurmakta, bu şekilde hedef noktasına bir rota oluşturmaktadır. RRT algoritmasının hesaplama verimliliği ve hızlı sonuç oluşturması nedeniyle gerçek zamanlı dinamik engellerden kaçınmak için kullanılmıştır (Naderi, 2015).

Klasik algoritmalar genellikle kesin bir rota oluştururlar ancak bu rota en uygun rota olmayabilir. Bazı algoritmalar, örneğin Potansiyel Alan algoritması lokal minimum noktasına takılarak rota oluşturamayabilir (Hwang vd., 1992). Klasik yöntemlerin bu dezavantajlarından kurtulmak için sezgisel algoritmalar kullanılmaya başlanmıştır. Yapay sinir ağları, öğrenme yeteneği, paralel işleme gibi avantajlarından dolayı bir

çok çalışmada rota planlama işlemi için kullanılmıştır (Janglová, 2004). Doğa temelli algoritmalarından Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması, Karınca Koloni algoritması en çok kullanılan algoritmalar (Chen vd., 2013; Elshamli vd., 2004; Yuan-Qing Qin vd., 2005). Alajlan, GA algoritması ile rota planlaması yapmış, A* algoritması ile kıyaslandığında, A* algoritmasının rota bulduğu neredeyse tüm senaryolarda GA algoritmasının da başarılı bir şekilde rota hesapladığını göstermiştir (Alajlan vd., 2013). Yun, GA algoritmasını kullanarak dinamik engellerin bulunduğu ortam için yeni bir yaklaşım geliştirmiş, Amigobot adı verilen robot üzerinde deneysel çalışmalarını gerçekleştirerek, elde edilen sonuçlardan algoritmanın esnek ve güçlü olduğunu belirtmiştir (Yun vd., 2011). Zhang, rota uzunluğunun yanında rota güvenliği kriterini de göz önüne alarak PSO algoritmasını kullanmış ve verimli sonuçlar elde etmiştir (Zhang vd., 2014).

Literatürde birden fazla algoritmanın birlikte kullanıldığı hibrit çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ant Colony Algorithm (ACO)-Potential Field Method (PFM) (Bajgan vd., 2006), PSO-RRT (Chung vd., 2014), PRM-GA (Santiago vd., 2018), RRT-Evolutionary Algorithm (EA) (Martin vd., 2007), PSO-PRM (Masehian ve Sedighizadeh, 2010), vb. gibi bir çok hibrit çalışma yapılmıştır. Hibrit algoritmalar rota güvenliği, rota yumuşaklığı, rota uzunluğu kriterlerinin hepsi ya da birkaçının optimizasyonu üzerinde durmaktadır. Santiago, PRM algoritması ve GA algoritmalarını kullanarak her iki algoritmanın rota yumuşaklığı ve rota uzunluğu açısından avantaj ve dezavantajlarını göstermiştir (Santiago vd., 2018). Bu çalışma hibrit algoritmaların önemini görmek açısından basit bir örnek olarak incelenebilir. Mohanta, PRM algoritması ile Fuzzy algoritmasını kullanarak PRM tarafından bulunan rotanın düğüm noktalarında yumuşatılmasını sağlamış ve bu sayede rotanın ortalama %5 oranında kısaldığı, robotun rotayı tamamlama süresinin daha iyi olduğunu göstermiştir (Mohanta ve Keshari, 2019). Jaradat, Potantial Field (PF) algoritması ile Fuzzy algoritmasını kullanarak, PF algoritmasının lokal minimum hatasını elimine etmiş ayrıca daha yumuşak bir rota oluşturulmasını sağlamıştır (Jaradat vd., 2012). Huang, GA algoritma ile PSO algoritmalarını kullanarak hibrit bir algoritma geliştirmiş, kübik B-spline algoritması ile GA-PSO tarafından bulunan rotanın yumuşatılmasını sağlamıştır (Huang ve Tsai, 2011). Kala, A* algoritması, Fuzzy Interference System algoritması ve GA algoritmalarını kullanarak, güvenlik kriteri açısından rotanın engellere uzaklığını

optimize etmekte, rota uzunluğu ve yumuşaklığı da optimize edilmektedir (Kala vd., 2010). Qin, Dijkstra algoritması ile rota planlama işlemi gerçekleştirmiş, PSO algoritması ile optimizasyon işlemi yaparak, lokal minimuma duişmeden rotanın bulunmasını sağlamıştır (Yuan-Qing Qin vd., 2005). Lim, alışmasında (PFM) ile Distance Transform (DT) metodunu kullanarak DT algoritması ile bulunan global rotanın PFM ile lokal optimizasyonunu sağlayarak hareketli engellerin bulunduğu ortama uygun rotanın oluşturulmasını sağlamıştır (Lim Chee Wang vd., 2003). Masehian PRM ve PSO algoritmalarını kullanarak geliştirdiği yeni yaklaşım ile PRM algoritmasının arama fazında Dijkstra algoritmasının kullanıldığı klasik metod ile kıyaslandığında daha kısa, daha yumuşak geçişli bir rota hesaplamış ve hesaplama suresinin daha kısa olduğunu ifade etmiştir (Masehian ve Sedighizadeh, 2010). Contreras, ABC algoritması ile Evolution Programming algoritmalarını kullanarak yeni bir hibrit yaklaşım geliştirmiş, klasik PRM algoritması ile kıyaslandığında, geniş alana sahip ve engel sayısının az olduğu ortamlarda PRM algoritmasından daha başarılı sonuçlar verdiği belirtmiştir (Contreras-Cruz vd., 2015).

2. OTONOM KEŞİF

Bilinmeyen ortamlarda çalışan otonom robotlar için keşif ve haritalama temel ön gerekliliklerdir. Keşif, bilinmeyen bir ortamda gezinirken harita oluşturma olarak tanımlanabilir, oluşturulan harita daha sonraki gezinme için kullanılır. İyi bir keşif stratejisinin, haritanın tamamını veya tamamına yakın kısmını makul bir sürede oluşturması beklenir. Keşif işlemindeki en önemli soru şudur; çevre ile ilgili elde edilen verilere göre, mümkün olduğunca en çok yeni bilgiyi almak için nereye gitmelisiniz? Bu konuda yapılan çalışmalardan literatürde en etkili ve ayrıca basit bir algoritma olan STK algoritmasının yüksek başarı gösterdiği görülmektedir (Holz vd., 2010).

2.1. Sınır Tabanlı Keşif

STK algoritmasında mobil robot, keşfedilen ve keşfedilmeyen sınır noktalarına hareket ederek harita oluşturacak, her ulaştığı sınır noktasında haritasına yeni bölgeler ekleyecek bu sayede haritalandırılmış bölge artacak, bilinen ile bilinmeyen bölge arasındaki alanı daha ileri itecektir. Bu durum, ortamda keşfedilmemiş alan kalana kadar devam edecektir. Robot bir sonraki sınır noktasına hareket ederken yolun kapsadığı alanı da haritalandırarak hafızasına kaydedecektir. STK algoritması için mükemmel sensörler ve mükemmel motor kontrolü olduğunu varsayarsak, her sınır noktasından elde edilen bilginin geometrik olarak azaldığı Zenon Paradoksları gibi bir durumun teorik olarak çıkması mümkündür ancak pek olası değildir. Bu durumda bile harita sınırlı bir zaman aralığı sonunda hemen hemen tamamlanmış olacaktır (Yamauchi, 1997).

STK algoritmasında sınır noktalarının tespiti algoritmanın en önemli adımudur. Sınır noktalarının tespit edilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Keidar, Wavefront Frontier Detector (WFD) ve Fast Frontier Detector (FFD) adı verilen iki farklı yöntem geliştirmiştir (M. Keidar ve Kaminka, 2014). FFD metodu ile sınır noktaları keşfedilen tüm harita için değil sadece son sınır noktasında elde edilen verilerden çıkarılmaktadır. WFD metodu ile yine tüm harita için değil sadece son adımda keşfedilen alan sınırları kullanılarak sınır noktaları keşfedilmektedir. Zhu, ulaşılan bir sınır noktasından sonra haritayı güncellemekte, tüm harita üzerinden değil sadece bir önceki haritaya göre değişen bölgeler üzerinden sınır noktası tespiti yapmıştır (C. Zhu vd., 2016).

Sınır noktalarının tespitinden sonra, robotun hangi sınır noktasına gideceğine karar vermesi gerekmektedir. Literatürde en yakın sınır noktasının seçildiği çalışmada, robotun daha çok sınır noktasına gitmek zorunda kaldığı ancak en kısa sürede keşif işleminin gerçekleştiği belirtilmektedir (Stachniss ve Burgard, 2003). Holz, çalışmasında en yakın sınır noktası metodu ile sınır noktalarının rastgele seçildiği metot ile kıyaslanmasını gerçekleştirmiş en yakın sınır noktası metodunun daha başarılı olduğunu belirtmiştir (Holz vd., 2010). Bu çalışmada en yakın sınır noktası metodu kullanılmış olup başarılı bir şekilde tüm haritanın keşfedilmesi sağlanmıştır.



3. ROTA PLANLAMA

Otonom mobil robot sistemleri için rota planlama işlemi büyük önem arz etmektedir (Mac vd., 2016). Başlangıç noktasından bitiş noktasına en kısa, en güvenli ve yumuşak rotanın en kısa sürede bulunması rota planlama algoritmalarının ana hedefidir (Stentz, 1994). Rota planlama yöntemleri klasik yöntemler ve sezgisel yöntemler olmak üzere ikiye ayrılırlar (Mac vd., 2016). Bilinen en yaygın klasik yöntemler Probabilistic Roadmap (PRM) ve Rapidly-Exploring Random Tree (RRT) algoritmalarıdır. Sezgisel yaklaşımlara Sinir Ağları (neural network), Bulanık Mantık (fuzzy logic), doğa temelli algoritmalar (nature inspired algorithms) örnek olarak gösterilebilir. Klasik yöntemler basit ve genellikle yüksek belirsizlik ile karşılaştıklarında başarısız olurlar (Mac vd., 2016). Klasik yöntemler genellikle düşük çözünürlüklü, basit rota oluşturup bilinen veya bilinmeyen ortamlarda hızlı ve etkili bir şekilde çalışabilirler. Sezgisel yöntemler ise yüksek çözünürlüklü, daha optimize rotalar oluştururlar. Sezgisel yöntemler hedefin uzakta olduğu, karmaşık ortamlarda verimli bir şekilde çalışamazlar (Mac vd., 2016). Bu nedenle literatürde her iki yöntemin zayıflıklarını elimine etmek için iki yöntemin birlikte kullanıldığı hibrit metotlar geliştirilmiştir.

3.1. Klasik Rota Planlama Yöntemleri

Klasik yöntemler; Hücre Ayrıştırma (Cell Decomposition), Potansiyel Alan Metodu (Potential Field Method), Alt Hedef ağı (Subgoal Network), Örneklem-Tabanlı metotlar (Sampling-Based methods) yöntemlerinden oluşmaktadır. Rota planlama başarımları yüksektir ancak düşük çözünürlüklü rota oluştururlar. En yaygın kullanılan klasik yöntemler Potansiyel Alan algoritması ve örneklem tabanlı algoritmalar PRM ve RRT algoritmalarıdır. Bu çalışmada statik engellerin olduğu ortamlarda yüksek başarımlar sağlayan PRM algoritması kullanılmıştır.

3.1.1. Probabilistic roadmap algoritması

Örneklem Tabanlı (Sampling-Based) rota planlama algoritmalarından biri olan Probabilistic Roadmap algoritması Kavraki tarafından 1994 yılında geliştirilmiştir (Latombe vd., 1994). PRM algoritması en çok kullanılan klasik algoritmalarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Geraerts ve Overmars, 2004). PRM algoritması ile ön hazırlık ve sorgu olmak üzere iki aşamada rota planlama işlemi yapılmaktadır (L. E. Kavraki vd., 1998). Hazırlık aşamasında bir haritada engellerin olmadığı açık

(collision-free) alanda düğüm ve bu düğümler arasında oluşturulan kenarlardan/çizgilerden (edge) oluşan bir grafik oluşturulmaktadır. Bu aşamada düğüm sayısı ve maksimum kenar uzunluğu parametrelerinin değişimi algoritma başarımını etkileyen unsurlardır. Sorgu aşamasında oluşturulan grafik kullanılarak en kısa yolu bulmak için bir lokal hesaplama işlemi kullanılmaktadır (L. E. Kavraki vd., 1998). Bu aşamada Dijkstra algoritması, D* algoritması gibi lokal planlayıcı algoritmalar kullanılmaktadır (Klančar vd., 2017b). Klasik PRM algoritması birçok farklı açıdan geliştirmelere tabi olmuştur. Örneğin Lazy PRM adı verilen metot ile hazırlık aşamasında oluşturulan grafikte yer alan çizgilerin engellere çarpma sorgulama sayısını azaltarak hesaplama süresini azaltmıştır (Bohlin ve Kavraki, 2000). PRM algoritmasının zayıf taraflarından biri olan; kapı, pencere gibi dar geçiş noktalarının olduğu haritalardaki başarısızlığını elimine etmek için yapılmış çalışmalar bulunmaktadır (Boor vd., 2003; Hsu vd., 1998; L. Kavraki ve Latombe, 2002). Bu çalışmalarda dar alanlardaki düğüm sayısının farklı metotlarla artırılması gerçekleştirilmiştir.

PRM algoritmasının akış şeması aşağıda verilmiştir (Geraerts ve Overmars, 2004).

```

while rota bulunana kadar
    c ← a boş alan yapılandırması  $C_{free}$ 
    V ← V ∪ {c}
     $N_c$  ← V'den elde edilen boş alandaki düğümler
    for  $c' \in N_c$  olmak üzere; c'den artan uzaklıkta sırayla
        if  $c'$  ve c bağlantılı değil
            if lokal planlayıcı  $c'$  ve c arasında bir yol buldu
                 $c'$  ve c arasında bir kenar oluştur.
    end

```

Algoritma C_{free} boş alanında rastgele düğümler oluşturmakta, daha sonra bu düğümler arasında daha önce tanımlanan maksimum mesafeden uzun olmamak üzere kenar çizgileri oluşturmaktadır. Bu işlemi yaparken oluşturulan düz kenar çizgilerinin engeller ile çakışıp çakışmadığı kontrol edilmektedir. Başlangıç ve bitiş noktaları da

bu grafiğe düğüm olarak eklenmektedir. Grafik oluşturulduktan sonra Dijkstra veya D* algoritması gibi lokal planlayıcı algoritmalar ile başlangıç ve bitiş noktalarını birleştirecek şekilde düğüm ve kenarlardan oluşan en kısa rota hesaplanmaktadır. PRM algoritması örneklem tabanlı bir algoritma olduğu için, rastgelelik faktöründen dolayı, oluşturulan rotada bir kalite problemi ortaya koymaktadır (F. Y. Yan vd., 2013). Oluşturulan rotaların, özellikle yüksek boyutlu haritalarda, rota uzunlukları, güvenlikleri ve yumuşaklığı açısından önemli kalite sorunları vardır. Bu noktada kalite problemlerini gidermek için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Rota birleştirme (Raveh vd., 2011), gibi farklı metotlar olmasına rağmen en iyi sonuç alınan ve en yaygın kullanılan metotlar klasik ve sezgisel algoritmaların birlikte kullanıldığı hibrit metotlardır (Bajgan vd., 2006; Châari vd., 2012; Chung vd., 2014; Martin vd., 2007; Masehian ve Sedighzadeh, 2010; Santiago vd., 2018).

3.1.2. Bezier kenar yumuşatma yaklaşımı

Farklı algoritmalar tarafından hesaplanan rotaların yumuşatılması için cubic splines, polynomials, bezier eğrisi gibi farklı teknikler kullanılmıştır (Zhou vd., 2011). Rotanın yumuşatılması enerji verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bezier eğrisi geometrik özelliklerinden dolayı grafik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bezier eğrisi serbest eğrileri ve yüzeyleri mükemmel bir şekilde tanımlayabilir. Bu nedenle eğri uydurma işlemi için mükemmel bir araçtır ve noktaları birleştiren bir dizi segment olarak çizilebilir. Literatürde Voronoi Algoritması (Ho ve Liu, 2009), GA (Elhoseny vd., 2018), RRT (Yang ve Sukkarieh, 2010), A* (Liu ve Sun, 2011), PSO (Arana-Daniel vd., 2014) algoritmalarının Bezier Algoritması ile yumuşatıldığı uygulamalar mevcuttur. Bu çalışmada kübik Bezier algoritması kullanılmış ve Bezier Algoritmasının rotalar üzerindeki etkisini görmek için Wetzler tarafından yazılan Matlab kodu kullanılarak rotaların yumuşatılması gerçekleştirilmiştir (Wetzler, 2009).

3.2. Sezgisel Rota Planlama Yöntemleri

Sezgisel yöntemler; sinir ağları (neural network), bulanık mantık (fuzzy logic), doğa-temelli algoritmalar (nature-inspired algorithms) ve hibrit algoritmalar (hybrid algorithms) yöntemlerinden oluşmaktadır. Literatürde rota planlama işlemi için yaygın olarak GA, ACO, PSO algoritmaları kullanılmaktadır. Bu çalışmada çok değişkenli problemlerin optimizasyonunda yüksek başarımlı sağlayan ABC algoritması

kullanılmıştır. ABC algoritması görece yeni bir algoritma olduğundan rota planlama algoritmaların fazla kullanılmamıştır.

3.2.1. Artificial bee colony algoritması

Doğa temelli optimizasyon algoritmalarından biri olan Artificial Bee Colony (ABC) algoritması Karaboğa tarafından 2006 yılında literatüre kazandırılmıştır (Karaboga ve Basturk, 2007a). ABC algoritması arıların nektar bulma davranışlarını simüle ederek global optimumu bulmaya çalışır. Bunun için işçi arı, gözcü arı ve kaşif arı olmak üzere üç farklı arı davranışı taklit edilerek hesaplama yapılır. Örnek problemde rastgele dağılmış yiyecek kaynaklarından en kaliteli nektar bulunan ve en yakın ya da enerji verimliliği açısından en uygun kaynağın seçilmesi hedef olarak belirlenmiştir. Arı kolonisi sayısı yiyecek kaynağı sayısının iki katıdır. Koloninin yarısı işçi arı diğer yarısı da gözcü arıdır. Eğer bir işçi arı yiyecek pozisyonunu belli bir tekrar sonunda iyileştiremiyor ise kaşif arıya dönüşmektedir. Kaşif arılar mevcut yiyecek kaynaklarından ayrı olarak rastgele dağılarak yeni yiyecek kaynakları bulurlar. İşçi arılar yiyecek kaynağından nektar getirirlerken gözcü arılar getirilen nektarın miktarı ve kalitesini gözlemleyerek işçi arıları kaliteli kaynaklara yönlendirirler. ABC algoritmasında hem pozitif hem negatif geri besleme sağlandığından ayrıca rasgelelik faktörü de barındırdığından dolayı güçlü bir optimizasyon aracı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çok değişkenli fonksiyonların optimizasyonunda Genetic Algorithm (GA), PSO, Differential Evolution algorithm (DE) and Particle Swarm Inspired Evolutionary Algorithm (PS-EA) gibi diğer doğa temelli algoritmalarından bazı durumlarda daha iyi sonuç verdiği kanıtlanmıştır (Karaboga ve Basturk, 2007a).

ABC algoritmasının temel adımları aşağıda belirtilmiştir (Karaboga ve Basturk, 2007b).

Başlangıç değerlerini ata, $x_{i,j}$

while durdurma kriteri sağlanıncaya kadar

$v_{i,j} = x_{i,j} + \theta_{i,j}(x_{i,j} - x_{k,j})$ eşitliğini kullanarak $x_{i,j}$ için yeni çözüm üret

$x_{i,j}$ ve $v_{i,j}$ arasında açgözlü seleksiyon işlemi uygulayarak daha iyi olanı seç

$x_{i,j}$ çözümünü gelişmemişse çözüm gelişmeme sayacını $failure_i$ bir arttır

$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i}$ fonksiyonunu kullanarak seçim için kullanılacak olasılık

değerlerini hesapla

if gelişmeme sayacı $failure_i > limit$

$x_{i,j} = min_j + rand(0,1) * (max_j - min_j);$ eşitliğini

kullanarak rastgele yeni çözüm üret

end

en iyi çözümü hatırla

end

$x_{i,j}$ değerleri nektarın bulunduğu konumları temsil etmektedir. $x_{i,j} = l_j + rand(0,1) * (u_j - l_j)$ denklemi kullanılarak başlangıç değerleri rastgele oluşturulabilir. l_j ve u_j değerleri sırasıyla alt ve üst sınır değerlerini temsil etmektedirler. İşçi arı fazında her işçi arı için $v_{i,j} = x_{i,j} + \theta_{i,j}(x_{i,j} - x_{k,j})$ denklemi kullanılarak $x_{i,j}$ konumu yerine yeni bir nektar konumu bulunur. Burada k değeri rastgele bir yiyecek kaynağını göstermektedir ($k \neq i$). $\theta_{i,j}$ değeri $[-1,1]$ aralığında rastgele seçilmiş bir rasyonel sayıdır. İşçi arı yeni hesaplanan $v_{i,j}$ konumundaki nektar oranı $x_{i,j}$ konumundan daha iyi ise $x_{i,j}$ konumu yerine $v_{i,j}$ konumunu seçerek çalışmaya devam eder. Gözcü arılar P_i olasılık değerini hesaplayarak nektar kaynaklarının kalitesi ve miktarı hakkında bilgi verir. Bir yiyecek kaynağı belli bir tekrar sonunda ($limit$) iyileştirme sağlayamamış ise kaşif arı bu kaynağın yerine $x_{i,j} = min_j + rand(0,1) * (max_j - min_j)$ denklemini kullanarak rastgele yeni bir kaynak bulmaktadır.

3.3. PRM ABC Hibrit Rota Planlama Algoritması

Probabilistic Roadmap algoritması temel olarak rastgele atılan düğümleri kullanarak en kısa rotayı bulmaya çalışmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere PRM ile bulunan rotanın kalite açısından problemleri bulunmaktadır. Düğüm sayısı ve bağlantı mesafesi PRM tarafından oluşturulan rotanın kalitesini etkilemekte ancak en optimum sonucun bulunması sağlanamamaktadır. PRM tarafından bulunan rotanın, rota uzunluğu, güvenliği ve yumuşaklığı açısından optimize edilmesi gerekmektedir. Bunun için

sezgisel metotların klasik metotlar ile birlikte kullanıldığı birçok çalışma vardır. Doğa temelli algoritmalarından Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA) metotlarının PRM algoritması ile birlikte kullanıldığı çalışmalarda başarılı sonuçlar alınmıştır. ABC algoritması ile Evolutionary Programming (EP) algoritması ve Rapidly Random Tree (RRT) algoritması ile birlikte kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmada ABC algoritmasının optimizasyon alanındaki başarısı ile PRM algoritmasının rota planlama alanındaki başarımlarını birleştirerek hibrit bir metot oluşturulmuştur. ABC optimizasyonu PRM tarafından oluşturulan 1 nolu denklem ile tanımlanan rota üzerinde çalışmaktadır.

$$P_{x,y} = \sum_{i=2}^{n-1} N_i \{i = 1,2 \dots n\} \quad [1]$$

$i = 1,2 \dots n$ değerleri rotanın ilk ve son düğümleri yani başlangıç ve bitiş noktaları olduğundan optimizasyonda değerlendirilmemektedir. Rota planlama algoritması için yeniden düzenlenmiş ABC algoritmasının akış şeması aşağıda verilmiştir.

repeat maksimum iterasyon sayısına kadar

haritada boş alana yeni yiyecek kaynakları ekle $F_{x,y} = \sum_{k=1}^{SN} f_{x,y} \{k = 1,2,3 \dots SN\}$

for $i = 2: (n - 1)$

$N_{i,j} = N_i + \theta_i(N_i - F_{k,j})$ denklemini kullanarak düğüm noktalarını optimize et.

$obj. func(N_i) = w_l * P_l + w_s * P_s + w_{sm} * P_{sm}$ maliyet fonksiyonu hesapla

if $obj. func(N_{i,j})$ değeri $obj. func(N_i)$ 'den daha iyi ise

$N_i = N_{i,j}$ düğüm noktasını yeni nokta olarak belirle

else

$failure_i = failure_i + 1$ gelişmeme sayacını bir arttır

end

end

$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i}$ denklemini ile düğümlerinin olasılık değerlerini hesapla

if $failure > limit$ gelişmeme sayacı limitten büyük ise

yiyecek kaynağını sil, yeni rastgele bir kaynak oluştur.

end

en iyi çözümü hafızaya kaydet

end

ABC algoritması ile haritanın boş alanlarına SN kadar rastgele nokta atanmaktadır. Daha sonra $P_{x,y}$ rotasının her bir düğüm noktasını $F_{x,y}$ noktalarından rastgele seçilen bir değer ile 2 nolu denklemini kullanarak yeni bir nokta hesaplanmaktadır.

$$N_{i,j} = N_i + \theta_i(N_i - F_{k,j}) \quad [2]$$

Bu yeni noktayı eski düğüm noktası yerine koyarak maliyet fonksiyonunu tekrar hesaplamakta, bu iki noktanın maliyet fonksiyonlarını kullanarak en iyi olan çözümü seçmektedir. Maliyet fonksiyonu 3 nolu denklem ile hesaplanmakta, rota uzunluğu (P_l), rota güvenliği (P_s) ve rota yumuşaklığı (P_{sm}) değerlerinden oluşmaktadır.

$$obj. func(N_i) = w_l * P_l + w_s * P_s + w_{sm} * P_{sm} \quad [3]$$

w_l, w_s, w_{sm} değerleri maliyet fonksiyonundaki rota uzunluğu, rota güvenliği ve rota yumuşaklığı derecesini ayarlamak için kullanılmaktadır. P_l değeri 4 nolu denklemde belirtilen değerlerden oluşan rotanın düğüm noktaları (N_i) arasındaki mesafenin hesaplanması ile bulunmaktadır.

$$P_{x,y} = \sum_{i=1}^n N_i \{i = 1,2 \dots n\} \quad [4]$$

P_s değeri rotanın engellere olan uzaklığı hesaplanarak rota boyunca engellere olan uzaklığın en kısa mesafesi alınarak 5 nolu denklemde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. SF değeri robotun engellere olan uzaklığının güvenli olacağı güvenlik mesafesi değerini göstermektedir. MD değeri rotanın engellere olan uzaklığının en kısa olduğu mesafeyi göstermektedir.

$$P_s = \frac{SF^2}{MD^2} \quad [5]$$

P_{sm} değeri rotanın her bir kenarı ile komşu kenar arasındaki dış açı değerlerini kullanarak, ortalama açı değerinin hesaplanması ile oluşturulmaktadır.

$$P_{sm} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} angle(k) \quad [6]$$

2 nolu denklem ile hesaplanan yeni düğüm noktasının ($N_{i,j}$) maliyet fonksiyonu N_i noktasının maliyet fonksiyonundan daha iyi ise N_i düğüm noktası yerine yeni düğüm noktası atanmaktadır. Eğer yeni düğüm noktasının maliyet fonksiyonu eski düğüm noktasının maliyet fonksiyonundan daha iyi değilse 7 nolu denklemde gösterildiği gibi gelişmeme sayacı bir arttırılmakta, maliyet fonksiyonu daha iyi ise gelişmeme sayacı sıfırlanmaktadır.

$$failure_i = failure_i + 1 \quad [7]$$

Son olarak 8 nolu denklem ile rotanın düğüm olasılık değerleri hesaplanmaktadır.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad [8]$$

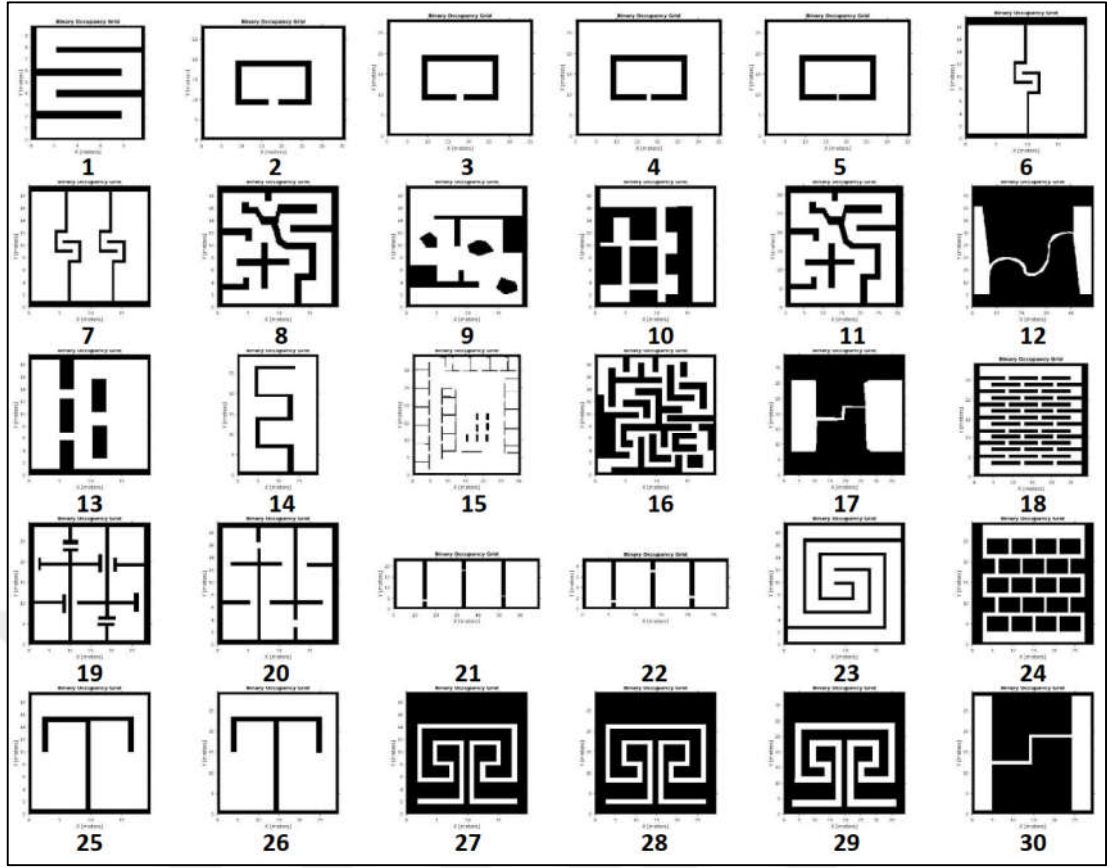
Olasılık değerleri bir sonraki iterasyonda hangi düğümün daha öncelikli olarak değiştirilmesi gerektiğini tayin etmek için kullanılmaktadır. ABC algoritmasının işçi arı adımı 2 nolu denklem ile mevcut düğüm noktalarından yeni rastgele düğüm noktaları oluşturulmaktadır. İşçi arı adımı ABC algoritmasının ana omurgasını oluşturmaktadır. Oluşturulan düğüm noktasının maliyet fonksiyonu mevcut düğüm noktasının maliyet fonksiyonundan daha iyi ise mevcut düğüm noktası yerine yeni oluşturulan düğüm noktası kullanılmaktadır. ABC algoritmasının optimizasyon sürecini hızlandıran diğer bir önemli özelliği ise olasılık değerleri baz alınarak gelişme gösteren düğüm noktalarına daha çok işçi arı görevlendirilmesi ve herhangi bir gelişme gösteremeyen çözümlerin kaldırılarak, gözcü arılar ile yeni çözümlerin rastgele oluşturulması olarak gösterilebilir.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Geliştirilen algoritma Matlab yazılımı aracılığı ile benzetimi gerçekleştirilmiştir. Yazılan kodlar Intel i7 8550U işlemci, 8 GB ram barındıran Ubuntu 16.04 işletim sistemi kurulu dizüstü bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır. Algoritmanın simülasyonunda Matlab Robotic System Toolbox ve Robotic Operating System (ROS) yazılımı kullanılmıştır. ROS yazılımı sayesinde gerçek zamanlı robotlar veya Gazebo gibi 3 boyutlu simülatörler üzerinde test edilebilmektedir. Rota planlama çalışmaları için 30 farklı harita kullanılmıştır (Bkz. Şekil 4.1). Kullanılan haritalar Çek Teknik Üniversitesi, Siberetik Bölümü, Akıllı ve Mobil Robotik Grubu tarafından yapılan bir çalışmadan alınmıştır (Faigl ve Vonásek, 2009). Harita özellikleri ve boyutları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışma ile her bir haritada her bir algoritma 10 defa çalıştırılmış olup, elde edilen değerler sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1 Harita özellikleri.

Sıra No	Harita Adı	Boyut (m x m)	Sıra No	Harita Adı	Boyut (m x m)
01	back_and_forth	10.0 x 10.0	16	maze	20.0 x 20.0
02	bugtrap1	36.4 x 28.8	17	narrow_corridor	40.0 x 40.0
03	bugtrap2	36.4 x 28.8	18	plankpile	30.0 x 30.0
04	bugtrap3	36.4 x 28.8	19	rooms	30.0 x 30.0
05	bugtrap4	36.4 x 28.8	20	rooms_easy	20.0 x 20.0
06	clasp_center	20.0 x 20.0	21	slits	70.5 x 24.2
07	clasps	20.0 x 20.0	22	slits_easy	28.3 x 9.7
08	complex	20.0 x 20.0	23	square_spiral	20.0 x 20.0
09	complex2	20.0 x 20.0	24	staggered_brick_wall	30.0 x 30.0
10	complex3	20.0 x 20.0	25	T	20.0 x 20.0
11	complex_big	32.0 x 32.0	26	T_30	30.0 x 30.0
12	corridor_wavy	50.0 x 50.0	27	tunnel	20.0 x 20.0
13	gaps	20.0 x 20.0	28	tunnel_30	30.0 x 30.0
14	hidden_U	20.0 x 30.0	29	tunnel_big	40.0 x 40.0
15	jari_huge	31.2 x 35.1	30	tunnel_dogleg	30.0 x 30.0



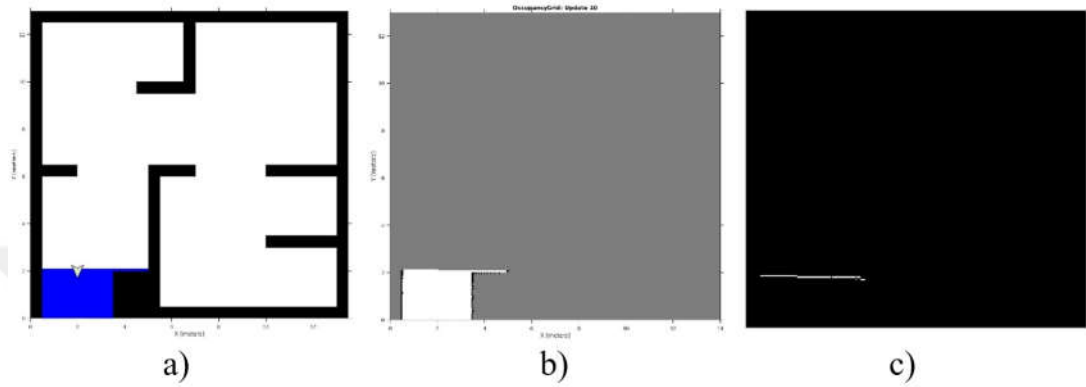
Şekil 4.1 Deneysel çalışmada kullanılan haritalar.

Kullanılan haritaların çok farklı ebatlarda ve farklı zorluk seviyelerinde olması, bize geliştirilen algoritmanın başarımını daha detaylı görebilmemizi sağlamıştır. Bu haritalar Matlab ortamında occupancy grid biçimine çevrilerek kullanılmıştır. back_and_forth adlı harita için occupancy grid harita özellikleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Daha detaylı çözüm için harita çözünürlüğü 20 olarak seçilmiştir.

4.1. Otonom Keşif Algoritması Simülasyon Ortamı

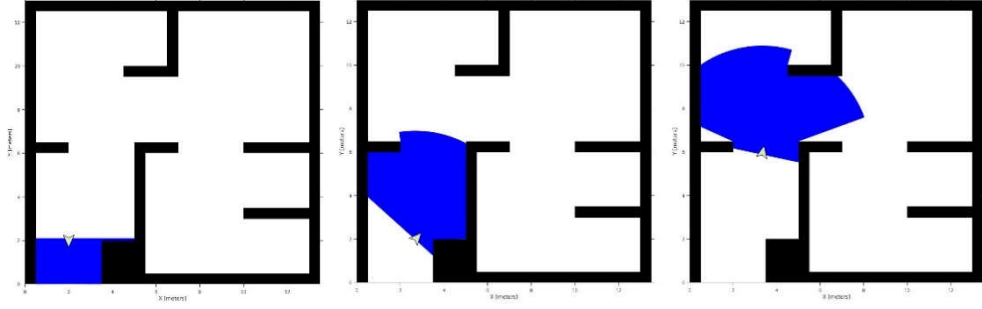
Keşfedilmemiş, bilinmeyen bir ortamın haritasının çıkarılması için Matlab ortamında robot simülatörü kullanılmıştır. İki tekerlekli diferansiyel sürücülü bir robot simüle edilmiştir. Robot üzerinde bulunan lidar sensöründen verileri almak ve komut verilerini iletmek için ROS desteği kullanılmıştır. Bu sayede aynı algoritma ile gerçek bir robot ile ROS üzerinden haberleştirilerek de komutlarda herhangi bir değişiklik yapılmadan algoritma çalıştırılabilecektir. Şekil 4.2’de oluşturulan simülasyon ortamı görülmektedir. Harita verileri doluluk ızgara haritaları biçiminde düzenlenmiştir. Şekil

4.2. a)'da Keşfedilecek harita görülmektedir. Robot üzerindeki lidar sensörü robotun ön kısmına 180° tarama gerçekleştirmektedir. Şekil 4.2 b)'de başlangıç anında robot hareket etmeden önceki lidar taraması sonucu alınan veriler ile oluşturulan haritayı göstermektedir. Şekil 4.2 c)'de ise harita verisi kullanılarak, görüntü işleme ile keşfedilen alan ile keşfedilmemiş alan arasındaki sınır çizgisi oluşturulmuştur.

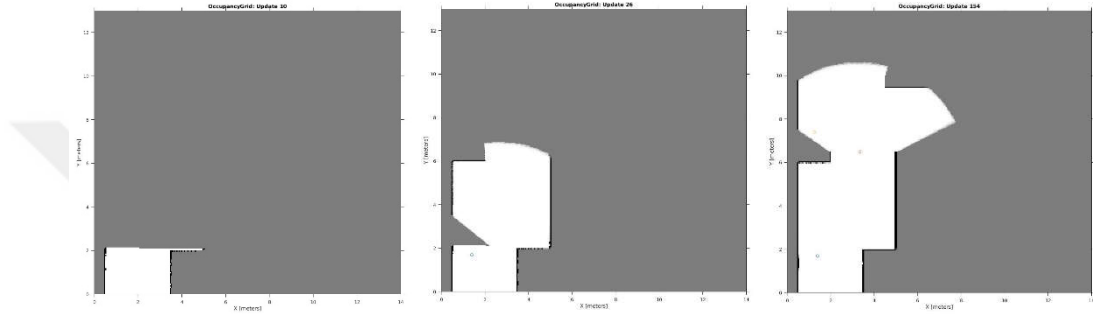


Şekil 4.2 Simülasyon ortamı a) keşif ortamı b) lidar verilerinden oluşturulan harita c) hesaplanan sınır çizgileri.

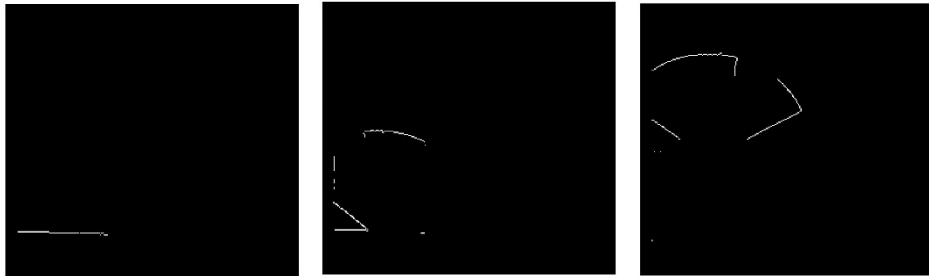
STK algoritması harita verisi üzerinde sınır çizgilerini çıkarıp, robotun bir sonraki adımda daha çok veri elde edebileceği en uygun sınır noktasına hareket etmesini amaçlamaktadır. Bu çalışmada robotun en yakın sınır noktasına hareket ettiği yöntem seçilmiştir. Keşif sürecinin ilerleyişi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'te doluluk ızgara haritaları metodu kullanılarak haritalar oluşturulmuştur. Doluluk ızgara haritaları metodu lidar sensöründen alınan veriler kullanılarak harita matrisi üzerinde tanımlanan hücrelerin dolu, boş ya da belirsiz olması durumuna göre bir değer atar. Çizelge 4.2'de belirtilen harita özelliklerine göre alt ve üst sınır değerlerine bağlı olarak bir hücrenin dolu ya da boş olup olmadığı belirlenir.



Şekil 4.3 Keşif sürecinin ilerleyişi.



Şekil 4.4 Haritanın oluşturulması.



Şekil 4.5 Sınır çizgisi tespitleri.

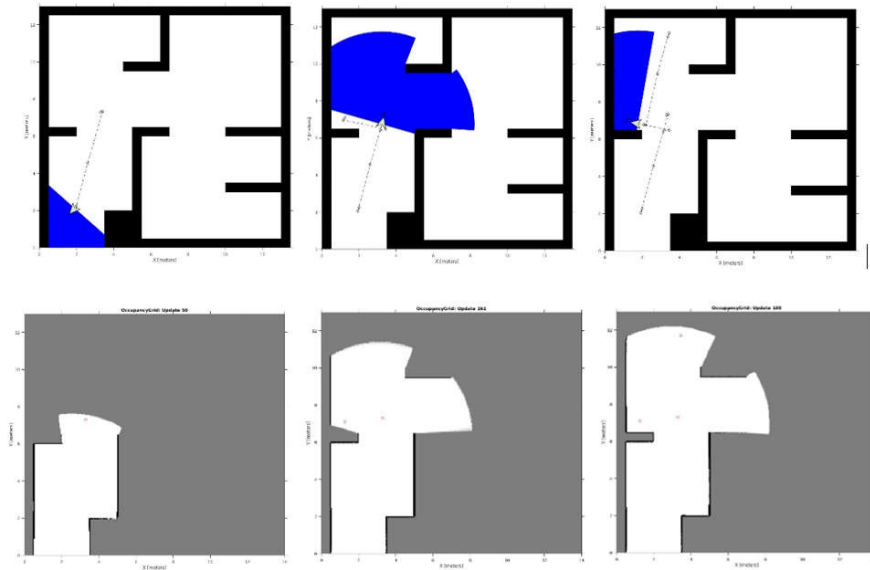
Sınır çizgilerinin tespit edilmesi için öncelikle doluluk ızgara verileri ile tanımlanan Şekil 4.4'te oluşturulan harita, siyah beyaz ikili sayı sistemi değerlerine dönüştürülmektedir. Daha sonra Matlab komutlarından *"bwboundaries"* komutu kullanılarak sınır hücreleri tespit edilmiştir. Bu işlem sonucundan Şekil 4.5'te görülen sınır çizgileri elde edilmiştir. Daha sonra bölge çıkarma problemini çözmek için *"bwconncomp"* komutu kullanılarak yan yana olan sınır hücreleri gruplandırılmıştır. Gruplandırılan hücrelerin merkez noktasının tespit edilmesi için *"regionprops"*

komutu kullanılarak robot için hedef noktaları tespit edilmiştir. Bu çalışmadan robotun bir sonraki adımda gideceği hedef noktası en yakın nokta olarak seçilmiştir. Bu hedef noktasına robotun engellere çarpmadan hareketi için lokal PRM algoritması kullanılmıştır. Robot hedef noktasına vardığında keşfedilen yeni harita ile ulaşılan hedef noktası artık keşfedilmiş olduğu için keşfedilecek hedef noktaları arasından çıkarılmaktadır.

Tüm bu işlemler otonom keşif algoritmasının her bir adımı için tek tek uygulanmıştır. Keşfedilecek hedef noktası kalmayınca kadar bu süreç devam etmekte olup, keşfedilecek alan kalmayınca robotun başlangıç noktasına dönüşü için Bölüm 3.3'te geliştirilen rota planlama metodu kullanılarak geri dönüş rotası oluşturulmaktadır.

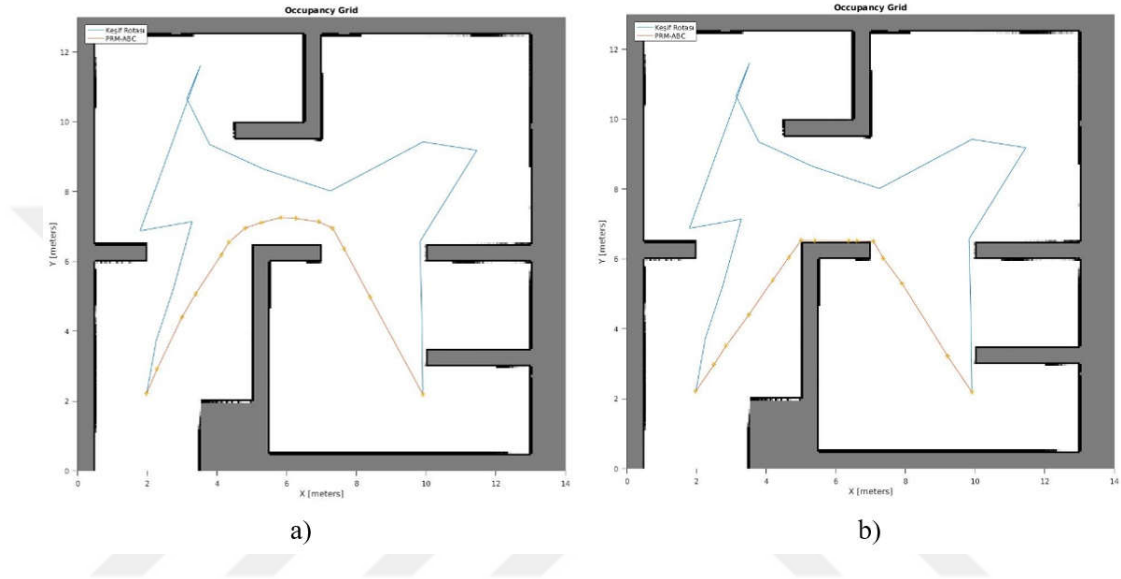
4.2. Rota planlama Simülasyon Ortamı

Keşif görevi esnasında robotun sınır noktalarına hareketi için lokal rota planlama metodu olarak PRM algoritması kullanılmıştır. PRM algoritması hızlı ve etkili rota hesapladığı için keşif görevi adımları arasında gecikmelere sebebiyet vermeden robotun yoluna devam etmesini sağlamıştır. Şekil 4.6'da STK algoritması tarafından belirlenen sınır noktalarına PRM algoritması tarafından oluşturulan rota görülmektedir. Her iterasyonda PRM algoritması robotun mevcut konumundan keşfedilecek bir sonraki sınır noktasına rota oluşturmaktadır.



Şekil 4.6 Keşif Sürecinde Rota planlama.

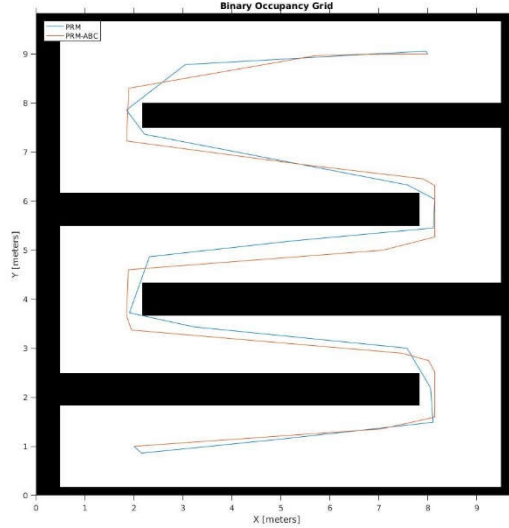
Keşif görevi süresince rota planlama işlemi robotun yakın mesafelere hareketini gerektirdiği için rota optimizasyonu olmazsa olmaz bir seçenek değildir. Ancak keşif görevi esnasında başlangıç noktasına geri dönüş istendiği zaman robotun alacağı yol ve harita engelleri ile karmaşıklığı göz önüne alındığında kesinlikle optimizasyon yapılması gerekmektedir. ABC algoritmasının optimizasyon başarısını görmek için Şekil 4.6’da gösterilen keşif sürecinde oluşturulan rotanın optimizasyonu üzerinde kısa bir deneme yapılmıştır.



Şekil 4.7 ABC ile rota optimizasyonu a) güvenlik ve yumuşaklık kriteri ile b) sadece rota uzunluğu kriteri ile

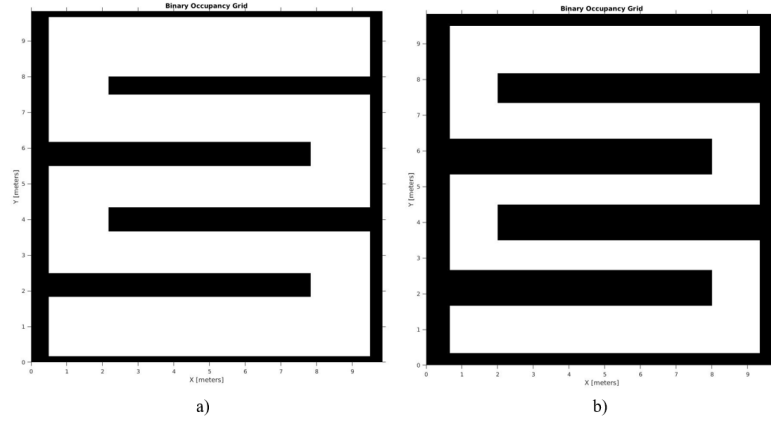
ABC optimizasyonuna robotun güvenlik ve enerji tüketimlerinde de optimizasyon sağlamak için maliyet fonksiyonuna güvenlik ve rota yumuşaklığı kriterleri eklenmiştir. Şekil 4.7’de a) şeklinde maliyet fonksiyonunda rota uzunluğu, rota güvenliği ve rota yumuşaklığı kriterleri ile yapılan optimizasyon görülmekte, b) şeklinde ise maliyet fonksiyonunda sadece rota uzunluğu kriteri ile yapılan optimizasyon görülmektedir. Mavi çizgi keşif sürecinde PRM algoritması tarafından oluşturulan rotayı, turuncu çizgi ise ABC algoritması tarafından optimize edilen rotayı göstermektedir. Şekilden de görülebildiği gibi geliştirilen rota optimizasyon yaklaşımı modüler olup, gerekli kriterlerin maliyet fonksiyonuna eklenmesi veya çıkarılması kolaylığı bu metoda büyük bir esneklik kazandırmaktadır.

PRM-ABC iş birliği ile bilinen bir ortamda rota uzunluğu, rota güvenliği ve rota yumuşaklığı göz önüne alınarak optimize edilmiş global rota planlaması gerçekleştirilmiştir. Örnek bir haritada PRM ve PRM-ABC algoritmaları tarafından bulunan rotaların kıyaslanması Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



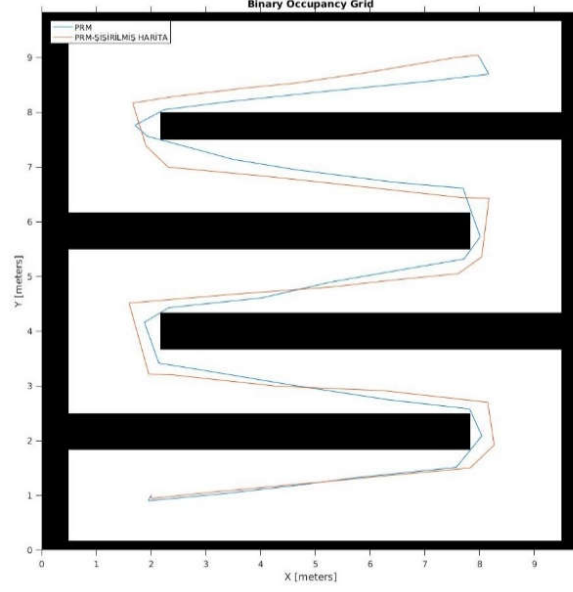
Şekil 4.8 PRM ve PRM-ABC algoritmalarının kıyaslanması.

PRM algoritması herhangi bir güvenlik faktörü optimizasyonuna sahip olmadığı için engellerin köşe noktalarına çok yakın geçtiği görülmektedir. Bu durum nedeniyle, robotun çapı göz önüne alındığında, robotun engellere çarpmadan rotayı tamamlanması mümkün görünmemektedir. Bu durumu egale etmek için haritadaki engellerin şişirildikten sonra PRM algoritmasının çalıştırıldığı uygulamalar mevcuttur. Şekil 4.9’da robot çapının 0.1 metre olduğu varsayılarak haritadaki tüm engellerin haritanın boş alanına doğru 0.1 metre şişirilmesi sonucu elde edilen şişirilmiş harita görülmektedir.



Şekil 4.9 PRM güvenlik kriteri için haritanın şişirilmesi a) normal b) şişirilmiş.

Güvenlik kriteri göz önüne alınarak bulunacak rota şişirilmiş harita kullanılarak bulunmaktadır. Bu metodun bir sıkıntısı ise robotun hedefe ulaşması için çok dar bir alandan geçmesi gerekiyorsa örneğin 0.1 metre çapında bir robotun 0.2 metre aralıklı bir koridordan geçmesi gerekiyorsa, harita 0.1 metre şişirildiği için rotanın bulunması mümkün olmamaktadır. PRM-ABC algoritmasında ise 0.1 metre çapındaki bir robot dar bir koridor için, bulunan rotanın engellere uzaklığı 0.1 metrenin altında olması durumunda maliyet fonksiyonu değeri çok yüksek çıkacaktır ancak rota yine de oluşturulacaktır. Bu durum güvenlik kriterinin maliyet fonksiyonunda kullanılmasının avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 4.10'da normal harita ve şişirilmiş harita için PRM algoritması tarafından bulunan rotalar kıyaslanmıştır. Şekilden görülebileceği üzere şişirilmiş harita kullanılarak oluşturulan rotada, normal harita kullanılarak oluşturulan rotada görülen engellere yakın geçişler görülmemektedir.



Şekil 4.10 PRM algoritmasında şişirilmiş harita etkisinin görülmesi.

PRM-ABC algoritması rota güvenliği sağlamanın yanında rota güvenliğinin rotanın bulunmasının önüne geçmesini engellemektedir. Bulunan rota güvenilir olmasa bile bir rota bulunmakta ve bu rotanın güvenilir olmadığı maliyet fonksiyonu değeri ile görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda haritanın şişirilmediği uygulamalarda PRM algoritması tarafından bulunan rotanın uzunluğunun daha kısa olduğu birçok örnek görülmüştür. Bu durum PRM-ABC algoritmasının engellerden güvenlik mesafesi kadar uzak geçmesinden kaynaklanmaktadır. PRM ve PRM-ABC algoritmaları tarafından bulunan rotalar “*back_and_forth*” adlı harita üzerinde Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen rota değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

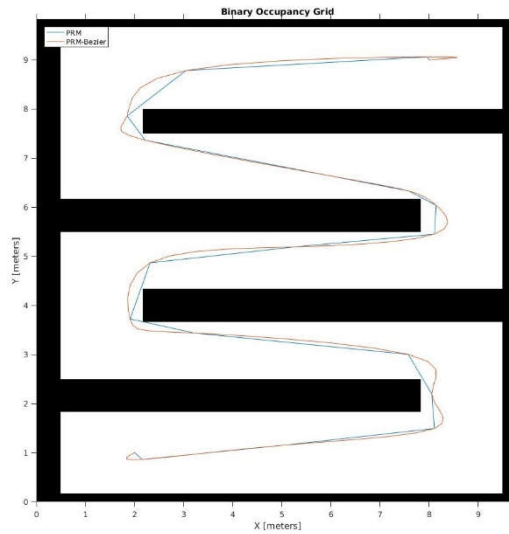
Çizelge 4.2 PRM ve PRM-ABC Rota Değerlerinin Kıyaslanması.

	Rota Uzunluğu (m)	Engellere Min Uzaklık (m)	Min Ortalama Açı (°)	Hesaplama Süresi (sn)	Maliyet Fonksiyonu Değeri
PRM	34.4084	0.0047	42.48	1.9	981.3
PRM-ABC	35.6973	0.2505	36.74	14.8	72.6

PRM algoritmasında güvenlik kriteri olmadığı ve haritanın şişirilmesi metodu kullanılmadığı için rota uzunluğu PRM-ABC algoritmasına göre daha kısa olarak elde

edilmiştir. PRM engellere çok yakın, 0.0047 gibi bir değer ile neredeyse engellere teğet geçmektedir. PRM-ABC algoritmasının ABC optimizasyonu adımı her bir işçi, kaşif, gözcü arı döngüsü 500 defa tekrarlandığı için hesaplama süresi PRM algoritmasına göre daha yüksek çıkmaktadır. Rota yumuşaklığını ölçmek için kullanılan her bir rota çizgisi arasında kalan dış açı ortalaması PRM-ABC algoritması için daha düşük çıkmaktadır. Maliyet fonksiyonu değeri PRM algoritması için oluşturulan rota engellere çok yakın geçtiği için oldukça yüksek çıkmaktadır.

Bezier algoritmasının rotanın yumuşatılması üzerindeki etkisini görmek için bulunan rotalar bezier algoritması ile yumuşatılarak kısmen başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.11’de PRM tarafından bulunan rotanın Bezier algoritması tarafından yumuşatılması görülmektedir. Yumuşatılan rotanın engellere çarpılmaması için elde edilen düğüm noktalarından geçecek şekilde parçalara ayrılmış şekilde uygulanması sağlanmıştır. Bu durum köşe noktaları gibi rotanın engellere yakın geçtiği noktalarda bezier algoritmasının köşelerde engellerle karşılaşmasını engellemiş, dolaylı olarak rotanın engellerden bir miktar uzaklaşmasını sağlamıştır. Ancak düğüm noktalarının rota boyunca homojen dağılmamış olması, düğüm noktaları arasındaki mesafelerin çok farklı olması gibi etmenler, bezier algoritmasının mükemmel yumuşaklıkta rotalar oluşturmasını önünde bir engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekilde de görülebildiği üzere bazı düğüm noktaları arasında gereksiz dönüşler olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 PRM algoritması ve Bezier algoritması.

Yukarıda bahsedilen PRM, PRM-ABC algoritmalarının bulunduğu rotalar için Şekil 4.1’de gösterilen 30 adet harita için Matlab ortamında simülasyon gerçekleştirilmiş, her bir haritada her algoritma 10 defa çalıştırılarak ortalama değerleri Çizelge 4.3’te gösterilmiştir. Kullanılan haritaların karmaşıklığı ve harita boyutları her haritada farklı olduğundan bulunan değerler her harita için farklı değerlendirmeye tabi tutulmalıdır.

Çizelge 4.3 30 harita için rota verileri tablosu.

Harita No:	Rota Uzunluğu (m)		Engellere Minimum uzaklık (m)		Ortalama Açı (°)		Maliyet Fonksiyonu	
	PRM	PRM-ABC	PRM	PRM-ABC	PRM	PRM-ABC	PRM	PRM-ABC
01	34,3	35,6	0,0047	0,2605	42,5	36,7	981,3	72,6
02	35,2	33,0	0,0930	0,3963	40,1	31,1	77,6	64,2
03	35,6	33,2	0,0809	0,3845	42,5	30,8	81,2	64,1
04	36,4	33,5	0,1252	0,3977	42,0	30,5	79,7	64,2
05	36,1	33,5	0,0627	0,2498	41,4	30,4	82,5	64,3
06	29,1	28,0	0,0199	0,2759	45,7	36,0	125,2	64,3
07	36,1	36,1	0,0122	0,1733	46,2	39,3	216,5	76,1
08	55,5	54,9	0,0100	0,1927	41,2	34,8	297,0	90,3
09	33,8	33,3	0,0467	0,3129	38,2	31,1	81,1	64,6
10	36,6	36,5	0,0114	0,2518	40,9	32,8	232,1	69,6
11	91,7	89,3	0,0172	0,2269	39,5	31,0	198,8	120,8
12	78,9	79,9	0,0044	0,1126	33,8	25,3	1141,0	106,8
13	18,8	18,5	0,0089	0,3224	33,4	23,7	303,2	42,4
14	56,7	56,1	0,0609	0,4091	31,9	20,3	93,9	76,5
15	37,4	34,3	0,0536	0,2720	36,3	21,9	80,7	56,5
16	41,5	40,9	0,0118	0,1615	45,8	34,0	232,0	75,6
17	37,6	36,5	0,0314	0,1860	39,9	26,5	97,8	63,6
18	93,7	92,2	0,0075	0,1367	59,4	51,8	510,5	145,0
19	97,8	96,9	0,0180	0,2231	39,0	30,0	198,8	127,3
20	52,2	50,7	0,0174	0,1369	42,7	31,1	161,1	82,8
21	73,9	72,8	0,0385	0,2020	36,0	25,4	123,4	98,7
22	30,7	29,5	0,0165	0,1741	39,7	27,3	144,0	57,4
23	62,9	62,3	0,0096	0,2497	43,5	31,3	322,0	93,9
24	40,7	40,2	0,0125	0,2043	51,8	38,5	221,3	79,2
25	42,5	41,7	0,0253	0,3209	43,3	28,9	117,0	70,8
26	66,5	65,3	0,0154	0,3607	38,2	25,4	189,3	90,9
27	89,3	92,5	0,0017	0,1636	44,3	36,6	6703,0	129,9
28	136,3	139,0	0,0092	0,1875	36,6	30,6	409,5	170,2
29	171,7	172,1	0,0127	0,2185	32,4	28,7	327,7	201,2
30	47,3	47,1	0,0289	0,2937	31,2	26,3	102,5	73,6

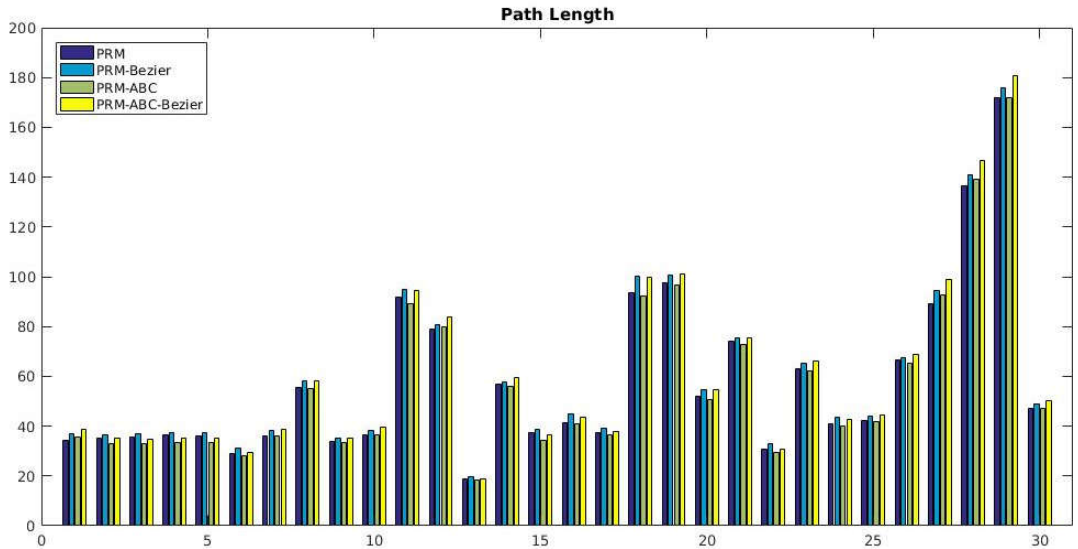
Yapılan deneysel çalışmalar ile STK algoritması ile keşif işlemi, PRM ve PRM-ABC algoritmaları ile rota planlama algoritmalarının çalışma metotları ve sonuçları gözlenmiştir. STK algoritmasının sınır noktalarının tespiti için görüntü işleme

alanında kısıtlı da olsa çalışma imkânı olmuş genel yaklaşımı konusunda bilgi sahibi olunmuştur. Rota planlama algoritmalarından klasik ve sezgisel algoritmalar ile çalışılmış, rota optimizasyonu, rota güvenliği konularında çalışılmış, geliştirilen hibrit PRM-ABC algoritmasının rota planlama başarısı gözlenmiştir.



5. SONUÇ

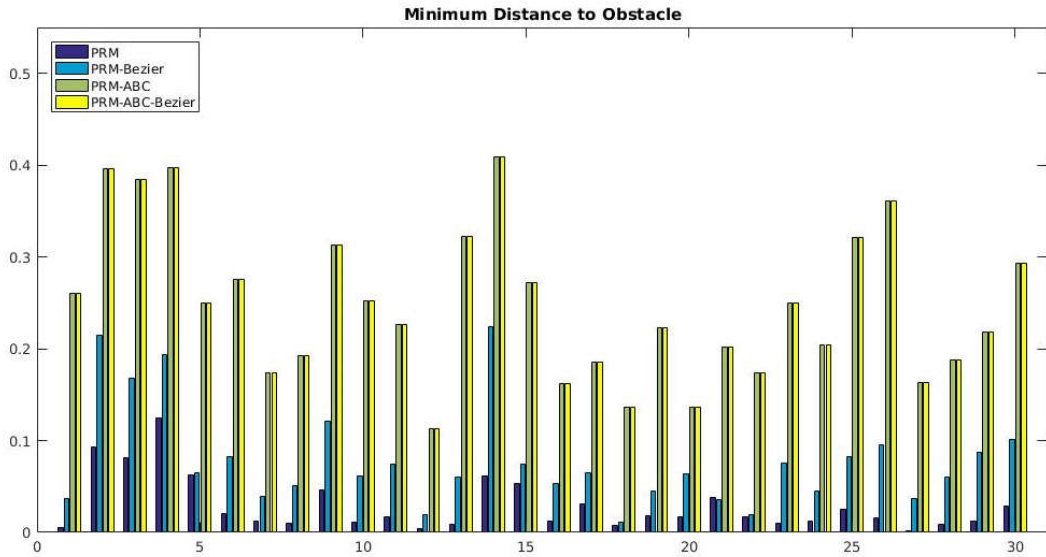
Otonom keşif süreci ve rota planlama süreçlerinde karşılaşılan problemler ve bunları elimine etmek için geliştirilen PRM-ABC adı verilen rota planlama metodu geliştirilmesi ile literatüre yeni bir melez rota planlama metodu kazandırılmıştır. PRM-ABC algoritması ile rota uzunluğu, rota güvenliği ve rota yumuşaklığı kriterleri göz önüne alınarak optimize edilmiş bir rota bulunmaktadır. Çizelge 4.3'te rota uzunluğu değerleri kıyaslanmış, PRM-ABC algoritmasının PRM algoritmasına ortalama %0,9 kadar daha kısa rota oluşturduğu elde edilen verilerden çıkarılmıştır. PRM algoritması 5 haritada daha kısa rota oluşturmuş olup, diğer haritalarda da PRM-ABC algoritması rota uzunluğunda çok fazla optimizasyon yapamasa bile, belirli bir miktar iyileştirme sağladığı görülmektedir. Bu durum daha önce belirtildiği gibi PRM algoritmasında güvenlik kriteri göz önüne alınmadan rota planlaması yapılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi haritanın şişirilmesi metodu ile PRM algoritması çalıştırıldığı zaman daha uzun rota oluşturmaktadır. Şekil 5.1'de PRM, PRM-ABC algoritmaları ve her iki algoritmaya Bezier algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen rota uzunluğu verileri kıyaslanmıştır.



Şekil 5.1 Rota uzunluğunun kıyaslanması.

Yukarıda da belirtildiği gibi PRM-ABC algoritmasının rota uzunluğu üzerinde çok fazla etkisi olmamakla birlikte ortalama %0,9 değerinde daha kısa rota oluşturduğu görülmektedir. Bezier algoritması rota uzunluğu üzerinde bir miktar olumsuz etki oluşturmaktadır. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi bezier algoritması rotanın yumuşatılması için oluşturduğu polinom şekline dolayı rotayı bir miktar uzatmaktadır. Bezier algoritmasının rota uzunluğunu ortalama %4,3 oranında uzattığı hesaplanmıştır.

Rota planlama probleminin bir diğer önemli gereksinimi, rotanın güvenliği açısından robotun engellere çarpmadan seyahatini tamamlaması için engellere belli bir mesafeden daha yakın geçmemesi gerekmektedir. Bu çalışmada robotun çapının 0.1 metre olduğu baz alınarak PRM-ABC algoritmasında optimizasyon yapılmıştır. Şekil 5.2’de PRM, PRM-ABC ve her iki algoritmaya bezier algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen rota verileri kıyaslanmıştır.

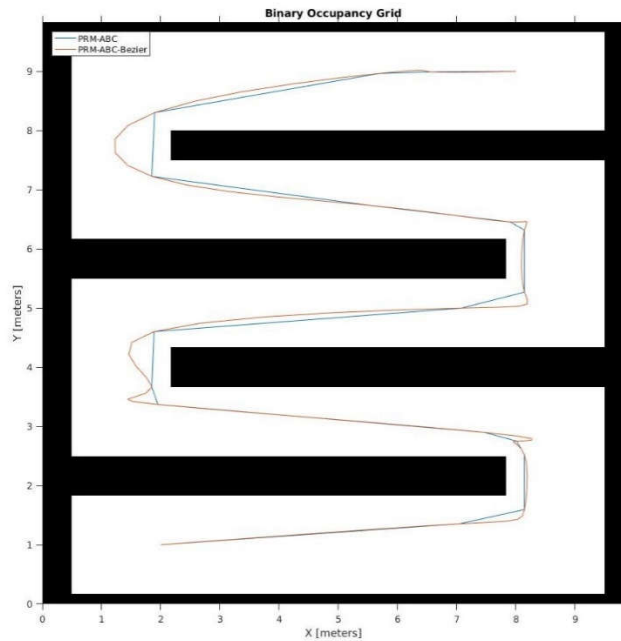


Şekil 5.2 Engellere minimum mesafenin kıyaslanması.

Rota güvenliği açısından robotun engellere robot çapından daha yakın mesafeden geçmesi durumunda robotun engellere çarpması kaçınılmaz olacaktır. PRM algoritmasında Şekil 4.9’da gösterilen haritanın şişirilmesi metodu uygulanmadan rota planlaması yapıldığında engellere çok yakın rota oluşturduğu görülmektedir. PRM-

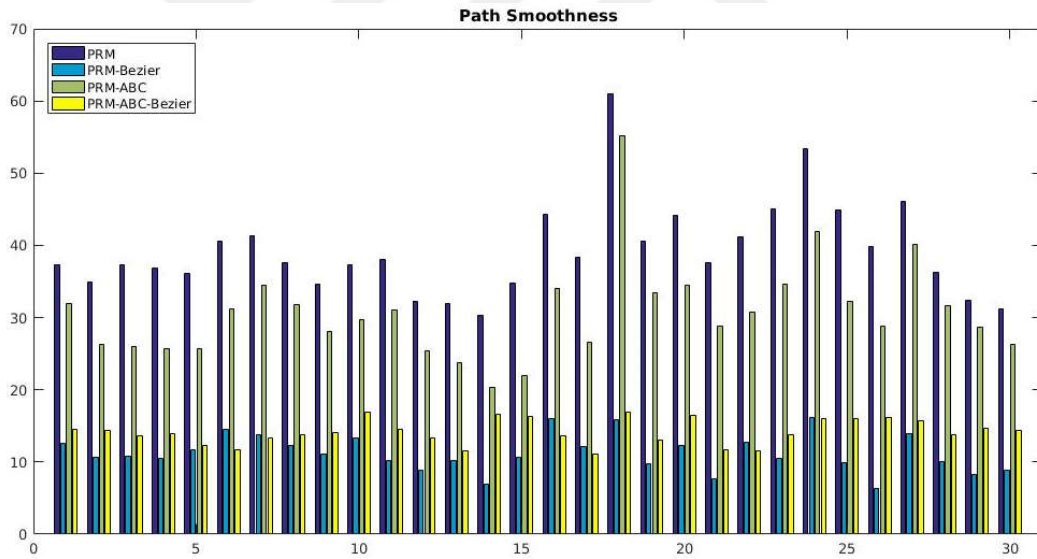
ABC algoritmasının PRM algoritmasına göre rota güvenliği kriterinde yüksek oranda iyileştirme yaptığı görülmektedir. PRM algoritmasına bezier ile rota yumuşatılması yapıldığında düğüm noktaları engellere çok yakın olmadığında Şekil 4.11’de görüldüğü gibi rotanın engellerden özellikle köşe noktalarından bir miktar uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi engellere olan minimum mesafenin PRM-Bezier için ciddi oranda iyileştirildiği görülmektedir. Ancak bu durum kesin bir çözüm olarak görülememiştir. Nitekim 4 haritada %2’nin altında iyileştirme yapıldığı görülmektedir. Genel ortalamaya bakıldığı zaman Bezier algoritması engellere minimum mesafe kriterinde PRM algoritmasında yüksek oranda iyileştirme sağlamıştır.

Bezier algoritmasının PRM-ABC algoritmasında engellere olan minimum mesafede herhangi bir iyileştirme sağlayamadığı görülmektedir. Bunun sebebi Şekil 5.3’te görüldüğü gibi PRM-ABC algoritması ile rota optimizasyonu yapılırken düğüm noktalarının en iyi çözümü için haritada köşe noktalarına yakın yerde konumlanmasına sebebiyet vermesidir. Bunun sonucunda Şekil 4.11’de PRM algoritmasında görüldüğü gibi engellere olan minimum mesafe noktası, rota çizgileri üzerinde değil de düğüm noktalarında olmaktadır. Bezier algoritması düğüm noktalarını değiştirmedeği için engellere olan minimum mesafe değeri de değişmemektedir.



Şekil 5.3 PRM-ABC algoritması ve Bezier algoritması.

Rota planlamasında, robot tarafından alınacak rotanın daha az keskin dönüşlere sahip olması robotun dönüşlerde yavaşlaması ve sonra tekrar hızlanması sonucu harcaacağı enerji tüketiminde dolaylı olarak da rota boyunca robotun seyahat süresini iyileştirmesi açısından gereklidir. PRM algoritmasında haritaya rastgele düğüm noktaları yerleştirilmesi sonucu bir rota elde edildiğinden dolayı rotada keskin dönüşlere sahip olmaktadır. PRM-ABC algoritması ile yapılan optimizasyonda maliyet fonksiyonuna rotanın daha az keskin dönüşlere sahip olması için rota yumuşaklığı kriteri eklenmiştir. Rota yumuşaklığı kriteri için her düğüm noktasında iki rota çizgisi arasında kalan dış açı değerlerinin ortalaması kullanılmıştır. Ayrıca yapılan optimizasyonun rota yumuşaklığı kriterinde literatürde kabul görmüş Bezier algoritması ile kıyaslanması için hem PRM hem de PRM-ABC algoritmalarına Bezier algoritması uygulanarak sonuçlar gözlenmiştir. Şekil 5.4'te bu değerler kıyaslanmıştır.



Şekil 5.4 Rota yumuşaklığı verilerinin kıyaslanması.

Rotanın yumuşatılması PRM-ABC algoritmasında maliyet fonksiyonuna eklenen ortalama açı değişkeni sayesinde PRM algoritmasına göre daha başarılı sonuçlar alınmaktadır. PRM-ABC algoritması PRM algoritmasına göre rota yumuşaklığı kriterinde %30,44 oranında daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bezier algoritması her iki algoritmaya uygulanması sonucunda oldukça yüksek başarı elde etmiştir.

Rota uzunluğu, rota güvenliği ve rota yumuşaklığı kriterlerinin tümü göz önüne alınarak hesaplanan maliyet fonksiyonuna göre, PRM-ABC algoritması PRM algoritmasına göre %424 daha başarılı sonuç vermiştir. Maliyet fonksiyonunda bu kadar yüksek optimizasyon olmasının sebebi ise 4 nolu denklemde gösterilen rota güvenliği kriterinin logaritmik olmasından kaynaklanmaktadır. Bezier algoritması ile yapılan rotanın yumuşatılması işlemi sonucu PRM algoritmasının maliyet fonksiyonunda %72 oranında, PRM-ABC algoritmasında %53,9 oranında daha başarılı değerler elde edilmiştir.

Bu veriler ışığında ABC algoritması ile PRM algoritmasının birlikte kullanıldığı PRM-ABC algoritmasının rota uzunluğu, rota güvenliği ve rota yumuşaklığı kriterleri göz önüne alındığında oldukça başarılı performans gösterdiği görülmektedir. Ancak ABC algoritmasının hesaplama süresinin yüksek olduğu göz önüne alındığında geliştirilmeye açık olduğu görülmektedir. Bunu iyileştirmek için ABC algoritmasının iterasyon sayısının durdurma kriterinin optimize edilmesi veya gerçek zamanlı uygulamalarda robotun hareketi esnasında optimizasyon işleminin devam etmesi gibi geliştirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Achtelik, M., Bachrach, A., He, R., Prentice, S., Roy, N.** (2009). "Stereo vision and laser odometry for autonomous helicopters in GPS-denied indoor environments". *Unmanned Systems Technology XI*, 7332, 733219.
- Ahmad, H., Namerikawa, T.** (2011). "Robotic Mapping and Localization Considering Unknown Noise Statistics". *Journal of System Design and Dynamics*, 5(1), 70–82.
- Alajlan, M., Koubâa, A., Châari, I., Bennaceur, H., Ammar, A.** (2013). "Global path planning for mobile robots in large-scale grid environments using genetic algorithms". İçinde *2013 International Conference on Individual and Collective Behaviors in Robotics - Proceedings of ICBR 2013* (ss. 1–8).
- Arana-Daniel, N., Gallegos, A. A., López-Franco, C., Alanis, A. Y.** (2014). "Smooth global and local path planning for mobile robot using particle swarm optimization, radial basis functions, splines and Bézier curves". *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014*, 175–182.
- Bachrach, A., Prentice, S., He, R., Henry, P., Huang, A. S., Krainin, M., ... Roy, N.** (2012). "Estimation, planning, and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera in GPS-denied environments". *International Journal of Robotics Research*, 31(11), 1320–1343.
- Bailey, T., Nieto, J., Guivant, J., Stevens, M., Nebot, E.** (2006). "Consistency of the EKF-SLAM algorithm". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (1), 3562–3568.
- Bajgan, H. R., Nehzati, T., Ismail, N.** (2006). "A Hybrid Ant Colony Optimization for Dynamic AGVs Routing", 78–88.
- Blösch, M., Weiss, S., Scaramuzza, D., Siegwart, R.** (2010). "Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments". *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 21–28.
- Bohlin, R., Kavraki, L. E.** (2000). "Path planning using Lazy PRM". *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Boor, V., Overmars, M. H., van der Stappen, A. F.** (2003). "The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners" (ss. 1018–1023).
- Châari, I., Koubâa, A., Bennaceur, H., Trigui, S., Al-Shalfan, K.** (2012). "smartPATH: A hybrid ACO-GA algorithm for robot path planning". *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2012*, (1), 10–15.
- Chen, X., Kong, Y., Fang, X., Wu, Q.** (2013). "A fast two-stage ACO algorithm for robotic path planning". *Neural Computing and Applications*, 22(2), 313–319.
- Chong, T. J., Tang, X. J., Leng, C. H., Yogeswaran, M., Ng, O. E., Chong, Y. Z.** (2015). "Sensor Technologies and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)". *Procedia Computer Science*, 76(Iris), 174–179.
- Chung, H. Y., Ye, Y. A., Jiang, J. F.** (2014). "Using ALC-PSO algorithm with particle growing method path planning in dynamic environments". *CACS 2014 -*

2014 International Automatic Control Conference, Conference Digest, (Cacs), 103–108.

- Contreras-Cruz, M. A., Ayala-Ramirez, V., Hernandez-Belmonte, U. H.** (2015). "Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming". *Applied Soft Computing Journal*, 30, 319–328.
- Corke, P.** (2011). "*Robotics, Vision and Control*" (C. 73).
- Eaton, C., Chong, E., Maciejewski, A.** (2016). "Multiple-Scenario Unmanned Aerial System Control: A Systems Engineering Approach and Review of Existing Control Methods". *Aerospace*, 3(1), 1.
- Elhoseny, M., Tharwat, A., Hassanien, A. E.** (2018). "Bezier Curve Based Path Planning in a Dynamic Field using Modified Genetic Algorithm". *Journal of Computational Science*, 25, 339–350.
- Elshamli, A., Abdullah, H. A., Areibi, S.** (2004). "Genetic algorithm for dynamic path planning", (January), 677–680.
- Faigl, J., Vonásek, V.** (2009). "<http://imr.ciirc.cvut.cz/planning/maps.xml>". Tarihiinde 10 Mayıs 2019, adresinden erişildi <http://imr.ciirc.cvut.cz/planning/maps.xml>
- Fraundorfer, F., Heng, L., Honegger, D., Lee, G. H., Meier, L., Tanskanen, P., Pollefeys, M.** (2012). "Vision-based autonomous mapping and exploration using a quadrotor MAV". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4557–4564.
- Geraerts, R., Overmars, M. H.** (2004). "A comparative study of probabilistic roadmap planners". *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 7 *STAR*, 43–57.
- Hess, W., Kohler, D., Rapp, H., Andor, D.** (2016). "Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM". *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016-June*, 1271–1278.
- Hidalgo-Paniagua, A., Vega-Rodríguez, M. A., Ferruz, J.** (2016). "Applying the MOVNS (multi-objective variable neighborhood search) algorithm to solve the path planning problem in mobile robotics". *Expert Systems with Applications*, 58, 20–35.
- Ho, Y. J., Liu, J. S.** (2009). "Collision-free curvature-bounded smooth path planning using composite bezier curve based on voronoi diagram". *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA*, 463–468.
- Holz, D., Behnke, S., Basilico, N., Amigoni, F.** (2010). "Evaluating the Efficiency of Frontier-based Exploration Strategies". *ISR/Robotik*, (2), 8.
- Hsu, D., Kavraki, L. E., Latombe, J.-C., Motwani, R., Sorkin, S.** (1998). "On finding narrow passages with probabilistic roadmap planners". *Robotics: The Algorithmic Perspective: 1998 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 141–154.
- Hu, G., Huang, S., Zhao, L., Alempijevic, A., Dissanayake, G.** (2012). "A robust RGB-D SLAM algorithm". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1714–1719.

- Huang, H.-C., Tsai, C.-C.** (2011). "Global path planning for autonomous robot navigation using hybrid metaheuristic GA-PSO algorithm". SICE Annual Conference 2011, 1338–1343. Tarihinde adresinden erişildi http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6060543
- Hwang, Y. K., Ahuja, N., Member, S.** (1992). "A Potential Field Approach to Path Planning", 8(1), 23–32.
- Janglová, D.** (2004). "Neural Networks in Mobile Robot Motion". International Journal of Advanced Robotic Systems, 1(1), 2.
- Jaradat, M. A. K., Garibeh, M. H., Feilat, E. A.** (2012). "Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field". Soft Computing, 16(1), 153–164.
- Kala, R., Shukla, A., Tiwari, R.** (2010). "Fusion of probabilistic A* algorithm and fuzzy inference system for robotic path planning". Artificial Intelligence Review, 33(3–4), 307–327.
- Karaboga, D., Basturk, B.** (2007a). "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm". Journal of Global Optimization, 39(3), 459–471.
- Karaboga, D., Basturk, B.** (2007b). "Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems". Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, 789–798.
- Karaman, S., Frazzoli, E.** (2011). "Sampling-based algorithms for optimal motion planning". İçinde *International Journal of Robotics Research* (C. 30, ss. 846–894).
- Karaman, S., Walter, M. R., Perez, A., Frazzoli, E., Teller, S.** (2011). "Anytime Motion Planning using the RRT*". İçinde *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 1478–1483). IEEE.
- Kavraki, L. E., Kolountzakis, M. N., Latombe, J. C.** (1998). "Analysis of probabilistic roadmaps for path planning". IEEE Transactions on Robotics and Automation, 14(1), 166–171.
- Kavraki, L., Latombe, J.-C.** (2002). "Randomized preprocessing of configuration for fast path planning", 2138–2145.
- Keidar, M. Bar-Ilan U. G., Kaminka, G. A.** (2012). "Robot Exploration with Fast Frontier Detection: Theory and Experiments". International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 113–120.
- Keidar, M., Kaminka, G. A.** (2014). "Efficient frontier detection for robot exploration". International Journal of Robotics Research, 33(2), 215–236.
- Klančar, G., Zdešar, A., Blažič, S., Škrjanc, I.** (2017a). "Introduction to Mobile Robotics". *Wheeled Mobile Robotics*.
- Klančar, G., Zdešar, A., Blažič, S., Škrjanc, I.** (2017b). "Path Planning". *Wheeled Mobile Robotics*.
- Klančar, G., Zdešar, A., Blažič, S., Škrjanc, I.** (2017c). "Sensors Used in Mobile Systems". *Wheeled Mobile Robotics*.

- Latombe, J., Svestka, P., Overmars, M., Kavraki, L.** (1994). "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces". in Ieee International Conference on Robotics and Automation.
- Lim Chee Wang, Lim Ser Yong, Ang, M. H.** (2003). "Hybrid of global path planning and local navigation implemented on a mobile robot in indoor environment", (February 2002), 821–826.
- Lingelbach, F.** (2004). "Path planning using probabilistic cell decomposition", 467-472 Vol.1.
- Liu, S., Sun, D.** (2011). "Optimal motion planning of a mobile robot with minimum energy consumption". IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, 43–48.
- Mac, T. T., Copot, C., Tran, D. T., De Keyser, R.** (2016). "Heuristic approaches in robot path planning: A survey". Robotics and Autonomous Systems, 86, 13–28.
- Martin, S. R., Wright, S. E., Sheppard, J. W.** (2007). "Offline and online evolutionary bi-directional RRT algorithms for efficient re-planning in dynamic environments". Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, IEEE CASE 2007, 1131–1136.
- Masehian, E., Sedighizadeh, D.** (2010). "Multi-objective PSO- and NPSO-based algorithms for robot path planning". Advances in Electrical and Computer Engineering, 10(4), 69–76.
- Mohanta, J. C., Keshari, A.** (2019). "A knowledge based fuzzy-probabilistic roadmap method for mobile robot navigation". Applied Soft Computing Journal, 79, 391–409.
- Naderi, K.** (2015). "RT-RRT *: A Real-Time Path Planning Algorithm Based On RRT *", 113–118.
- Raveh, B., Enosh, A., Halperin, D.** (2011). "A Little More , a Lot Better : Improving Path". Quality, 1–16.
- Sang, Y., Cai, Z., Wang, Y.** (2013). "An exploration strategy based on Frontier and safe corridor for indoor flight vehicle". Proceedings - 2013 Chinese Automation Congress, CAC 2013, 244–249.
- Santiago, R. M. C., De Ocampo, A. L., Ubando, A. T., Bandala, A. A., Dadios, E. P.** (2018). "Path planning for mobile robots using genetic algorithm and probabilistic roadmap". HNICEM 2017 - 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, 2018-Janua, 1–5.
- Shen, S., Mulgaonkar, Y., Michael, N., Kumar, V.** (2014). "Multi-sensor fusion for robust autonomous flight in indoor and outdoor environments with a rotorcraft MAV". Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4974–4981.
- Souissi, O., Benatitallah, R., Duvivier, D., Artiba, A., Belanger, N., Feyzeau, P.** (2013). "Path Planning : A 2013 Survey". International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, 2013(October), 1–8. Tarihinde adresinden erişildi <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6761521/>

- Stachniss, C., Burgard, W.** (2003). "Exploring unknown environments with mobile robots using coverage maps". İçinde *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence* (ss. 1127–1132).
- Stentz, A.** (1994). "Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments (1412 cites)". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (May), 1–15.
- Thrun, S.** (2002). "Robotic mapping: A survey". *Exploring artificial intelligence in the new millennium*, (February), 31.
- Tübitak Kaplan.** (2013). Tarihinde adresinden erişildi https://www.aselsan.com.tr/tr-tr/cozumlerimiz/UrunDokumanlari/KAPLAN-BOMBA-ıMHA-ROBOTU/_Kaplan_BIR_Brosur_Tr.pdf
- van der Merwe, R., Wan, E., Julier, S.** (2012). "Sigma-Point Kalman Filters for Nonlinear Estimation and Sensor-Fusion: Applications to Integrated Navigation", (August 2004).
- Wetzler, A.** (2009). "Bezier Algorithm Matlab Codes". Tarihinde 20 Mayıs 2019, adresinden erişildi <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26090-connecting-a-set-of-points-with-smoothly-connected-cubic-bezier-segments>
- Yamauchi, B.** (1997). "A frontier-based exploration for autonomous exploration". *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Monterey, CA.
- Yamauchi, B.** (2004). "Frontier-based exploration using multiple robots", 47–53.
- Yan, F., Liu, Y., Xiao, J.** (2013). "Path Planning in Complex 3D Environments Using a Probabilistic Roadmap Method", *10*(December), 525–533.
- Yan, F. Y., Wu, F., Peng, F., Zhu, Z. J.** (2013). "A Survey on Randomized Sampling-Based Path Optimization Methods". *Advanced Materials Research*, 853, 652–660.
- Yang, K., Sukkarieh, S.** (2010). "An analytical continuous-curvature path-smoothing algorithm". *IEEE Transactions on Robotics*, 26(3), 561–568.
- Yuan-Qing Qin, De-Bao Sun, Ning Li, Yi-Gang Cen.** (2005). "Path planning for mobile robot using the particle swarm optimization with mutation operator", *00*(August), 2473–2478.
- Yun, S. C., Parasuraman, S., Ganapathy, V.** (2011). "Dynamic path planning algorithm in mobile robot navigation". İçinde *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, ISIEA 2011* (ss. 364–369).
- Zhang, B., Liu, W., Mao, Z., Liu, J., Shen, L.** (2014). "Cooperative and Geometric Learning Algorithm (CGLA) for path planning of UAVs with limited information". *Automatica*, 50(3), 809–820.
- Zhou, F., Song, B., Tian, G.** (2011). "Bézier curve based smooth path planning for mobile robot". *Journal of Information and Computational Science*, 8(12), 2441–2450.
- Zhu, C., Ding, R., Lin, M., Wu, Y.** (2016). "A 3D frontier-based exploration tool for

MAVs". Proceedings - International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI, 2016-Janua, 348–352.

Zhu, Z., Xiao, J., Li, J. Q., Wang, F., Zhang, Q. (2015). "Global path planning of wheeled robots using multi-objective memetic algorithms". *Integrated Computer-Aided Engineering*, 22(4), 387–404.



ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Necmettin ALPKIRAY
Doğum Yeri ve Tarihi	Kahta, 18.01.1990
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	TCDD Taşımacılık A.Ş. Sivas Araç Bakım Servis Müdürlüğü 58030 Merkez/Sivas
E-posta Adresi	necmettinalpkiray@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Kahta Lisesi, 2006
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği 2014
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Enerji Bilimi ve Teknolojisi 2019

İş Tecrübesi

T.C. Devlet Demiryolları	Mühendis, 2014-2017
TCDD Taşımacılık A.Ş.	Mühendis, 2017-Halen

Kongreler ve Bildiriler

Uluslararası Alpkiray, N., Torun, Y., Kaynar, O. 2019. "Probabilistic Roadmap and Artificial Bee Colony Algorithm Cooperation For Path Planning". 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, IDAP 2018.

Alpkiray, N., Torun, Y., Ergul Z. 2019. "Rapidly-Exploring Random Tree And Artificial Bee Colony Algorithm For Autonomous Robots Optimum Path Planning". Proceeding of International Conference on Innovative Engineering Applications, ICIEA 2018