

Received: 30.06.2023
Accepted: 17.11.2023

Sürü Robotiğinde Yol Planlanmasının Hızla Keşfedilen Rastgele Ağaç- Saf Takip İş Birliği Tabanlı Algoritma ile İncelenmesi

Müsemma ALTINDAŞ^{1*}, Levent GÖKREM²

^{1,2}Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat, Türkiye

Özet

Bu çalışmada sürü robotiğinde yol planlama davranışı için RRT (Hızla Keşfedilen Rastgele Ağaç Algoritması)-Pure Pursuit iş birliği tabanlı algoritma geliştirilmiştir. Sürü robotlarının belirlenen arenalarda başlangıç konumdan hedef konuma ulaşabilmeleri için yol planlama yaklaşımı önerilmiştir. Ayrıca geliştirilen bu algoritma yol planlama sürecinde sürü robotlarının engelden kaçınmasını sağlamayı amaçlamıştır. Bu çalışmada yol planlama yaklaşımı, esnek ve ölçeklenebilir davranış gösteren sürü robotları üzerinde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Geliştirilen algoritma ile her bir sürü robotu, üç farklı arenalarda hedef konuma ulaşmak için takip edilecek yola olan ileriye bakma mesafesine bağlı olarak organize bir şekilde sürü davranışı sergilenmektedir. RRT-Saf Takip tabanlı iş birliğine dayalı algorithmada arenalarda önceden belirlenmiş başlangıç ve hedef konum arasında engelsiz bir yol oluşturulur. Oluşturulan yolun, Pure Pursuit (Saf Takip) algoritması ile takip edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen algorithmada 3 farklı arenada l_d değeri 0.5 ile robot sayıları 3,5 ve 7 incelenmiştir. Robot sayıları artış gösterdikçe simülasyon tamamlanma süreleri artmaktadır. Yani arena içerisindeki robot sayısı ile simülasyon tamamlanma süresi doğru orantılıdır. Ve arenalar içerisindeki engellere ve hedef konuma olan uzaklığa göre de robotların katettikleri mesafeler değişiklik göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yol Planlama, Engelden Kaçma, Sürü Robotiği, Mobil Robotlar, Yol Takip Etme

Investigation of Path Planning in Swarm Robotics with Rapidly Exploring Random Tree-Pure Pursuit Collaboration-Based Algorithm

Müsemma ALTINDAŞ^{1*}, Levent GÖKREM²

^{1,2}Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, Mechatronics Engineering Department, 60250, Tokat, Turkey

Abstract

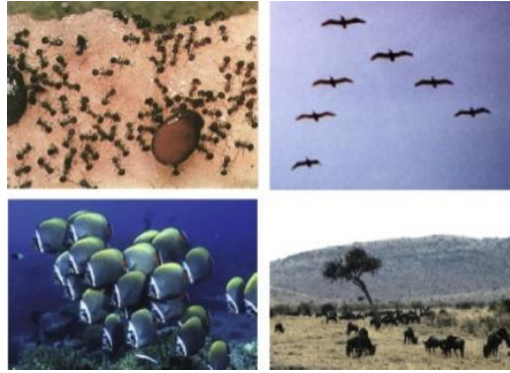
In this study, an RRT-Pure Pursuit collaboration-based algorithm was developed for path planning behavior in swarm robotics. A path planning approach has been proposed so that the swarm robots can reach the target location from the starting location in the determined arenas. In addition, this developed algorithm aims to ensure that the swarm robots avoid obstacles in the path planning process. In this study, the applicability of the path planning approach on flexible and scalable swarm robotics has been demonstrated. With the developed algorithm, each swarm robot exhibits swarm behavior in three different arenas in an organized manner depending on the distance to look forward to the path to be followed to reach the target location. In the RRT-Pure Pursuit-based collaborative algorithm, an unobstructed path is created in arenas between a predetermined start and target location. It is aimed to follow the path created with the Pure Pursuit algorithm. In the developed algorithm, l_d value of 0.5 and

robot numbers 3,5 and 7 were examined in 3 different arenas. As the number of robots increases, the simulation completion times increase. In other words, the number of robots in the arena and the simulation completion time are directly proportional. And according to the obstacles in the arenas and the distance to the target location, the distances traveled by the robots vary.

Keywords: Path Planning, Obstacle Avoidance, Swarm Robotics, Mobile Robots, Path Tracking

1. Giriş

Robotlar hayatımızın her alanında yer almaktadır. Savunma sanayi, üretim, sağlık sektörlerinde ve arama kurtarma çalışmalarında yaygın olarak rastlanmaktadır. Ancak robotların fiziksel koşulları robotları karmaşık ve kullanılmaz hale getirmektedir. Karmaşık alanlarda kullanılmak üzere daha kullanışlı ve küçük sürü (swarm) robot sistemleri ortaya çıkmıştır. Sürü robot sistemleri, belirlenen hedefi karmaşık ve yetenekli robotların görevlendirilmesinin yerine basit özelliklere sahip birçok robotların görevlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, böcekler, kuşlar ve arılar gibi canlıların sürü davranışlarından ilham almaktadır [1].



Şekil 1. Doğada bulunan canlı sürüler [6]

Sürü robotlarının uygulama alanları son yıllarda oldukça önem arz etmektedir. Bu sürü davranışını, sergileyebilmeleri için her robotun çevresini algılayabilen ve kendi kendini organize edebilen basit bir özelliklere sahip olması gerekir [2,3]. Sürü robotları verilen görevleri yaparken herhangi bir merkezi olmadan sadece yerel bir etkileşim ile kollektif karar vermektedirler [4].

Sürü robotik araştırmalarındaki değinilen problemler iki sınıfa ayrılmaktadır. İlk olarak toplanma, konumlanma, kendi kendine organize edebilme ve kapsam alanı gibi modellere dayanmaktadır. Diğer problem ise çevredeki varlıklara dayanmaktadır, örnek olarak hedef aramak, [5] yiyecek aramak ve arama- kurtarma çalışmaları uygulama kapsamaları mevcuttur [6].

Mobil robotlar, çoklu robot sisteminde koordineli bir şekilde iş birliği içerisinde çalışmaktadırlar. Sürü robotların uygulama alanlarında en önemli görevlerinden biri yol planlama ve engellerden kaçınmaktır [7]. Bir mobil robot için yol planlama başlangıç konumundan hedef konuma engelleri aşarak gideceği yolun belirlenmesidir. Mobil robotların yol planlama algoritmaları, robotu engelsiz en kısa ve en hızlı biçimde başlangıç konumundan hedef konumuna varmasına sağlamaktadır. Robotun izleyeceği yol haritası ne kadar karmaşık ise, robotun engelsiz yolu bulması ve hedefe ulaşmasını

zorlaştıracak olup ve sonuç olarak maliyetli olacaktır [7]. Bu engeli aşmak için, daha verimli yol planlama algoritması oluşturmak gerekmektedir. Robotlara kesin ve maliyetsiz bir yol planladığımızda, daha verimli ve daha kısa sürede hiçbir engelle çarpmadan hedef konuma ulaşacaktır [8]. Dolayısıyla, bu çalışmada çoklu mobil robotlarda engelden kaçınarak yol planlama algoritmaları incelenmektedir. Yol planlamada iki temel problem mevcuttur. Birincisi başlangıç ve hedef noktaları arasındaki uygun yolun oluşturulmasıdır. Yolun planlandığı arenada herhangi bir engel var ise çarpışmasız bir şekilde robotun hedefe ulaşması da diğer bir problemidir. Bu problemlerini çözüme ulaştırmak için bu problemlere dikkat edilmesi gerekir. Mobil robotların yol planlaması ve engelden kaçınması oldukça karmaşık ve zor bir problemidir.

Literatürde mobil robot için yapılan araştırmalarda; konumlandırma, çevredeki nesnelere algılama, gezinme, engellere çarpmadan kaçınma hedefe ulaşma ve yol planlama konularının üzerinde durulduğu görülmektedir. Mobil robot çalışma konularını çevrenin belirlenmesi, yol planlama ve konumlandırma olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu çalışmanın amacı, mobil robotların yol planlama ve engelden kaçınma problemlerine ilişkin çözümler üretmektir.

Mobil robotlar çevre koşullarını algılayıp bu koşullara uygun şekilde hareket etmesini ve engelden kaçınmasını sağlamalıdır. Bu problemi çözüm sağlamak için pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar 1969 yılında Stanford üniversitesi “Shakey” isimli hareket planlama yapabilen mobil bir robot sistemi ile başlamıştır [9]. 1979 yılında Lozano ve Wesley mobil robotlara güvenli bir yol planlamak için çarpışmadan kaçınma algoritmasına öncülük etmiştir [10]. Günümüze kadar birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalar Sezgisel (heuristic) algoritmalar ve klasik (conventional) şeklinde 2 grupta incelenebilir. Sezgisel algoritmalar genetik algoritmalar, ACO (Karınca Kolonisi Optimizasyonu), PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) vb. algoritmalar örnek olarak verilebilir. Klasik algoritmalar ise Potansiyel alanlar (Potential Fields), PRM (Probabilistic Roadmap), RRT (Rapidly Exploring Random Tree) ve böcek (bug) algoritmaları örnek verilebilir. Klasik algoritmaların avantajı kesin olarak hesaplamasıdır ancak yavaş hesaplamaktadır.

Sürü robotikte robotların bir noktadan bir başka noktaya varması ile ilgili problem yol planlaması olarak tanımlanır. Mobil robotlar kapalı bir ortamda gezinerek atanan bir görevi yerine getirirler. Bir robottan ortamın haritasını oluşturması, haritadaki yerini kesin olarak belirlemesi ve engellere çarpmadan belirlenen hedefe varması istenmektedir. Yol planlama aşamasındaki uygun koşullar, robot hızı, engellerden ve robot çarpışmalarından kaçınma, robot kinematiği ve dinamiğine uygun yörünge planlaması gibi kriterleri içermektedir [11].

Yijing Li, 2021'nin yaptığı çalışmasında, hareketli engellere ve ortama RRT tabanlı bir yol planlama algoritması sunmaktadır. Bu çalışmada hedef bilgisi veya hareketli engel bilgisi önceden belirlenmemiştir. Gerçek zamanlı algoritma, engellerden kaçınma yaklaşımına ve holonomik olmayan engellere dayalı olarak yeni yol noktaları belirler. Yalnızca tüm yolun yeniden planlanması ve hareket eden engellerin hesaplanmasını azaltmaktadır ve aynı zamanda orijinal yoldan planlanmış yola nispeten kısa bir kayma sağlar. Bu yol planlama stratejisini kullanarak robot, karmaşık hareketli bir ortamda daha az hesaplama maliyetiyle hedefe kendi kendine gidebilir [12].

Yol planlama ve takip sürecinde Pure Pursuit algoritmasının problemlerini ele almak için Huang Tian, 2020 ve arkadaşları tarafından bir çalışma yapılmıştır. Yol planlama hatası problemini hedefleyerek, ileri bakma mesafesini hesaplamak için robotun hızı ve yol bilgisi kullanılır. PID denetleyicisi ile birleştirilmiş Pure Pursuit yöntemi tarafından hesaplanan hedef yönlendirme açısı optimize eder ve

yol planlamayı uygulamak için sabit açı çıkışı verilmektedir. Bu çalışma sonucunda yol hatasını azalmıştır ve kararlı kontrol açısı verilmektedir [13].

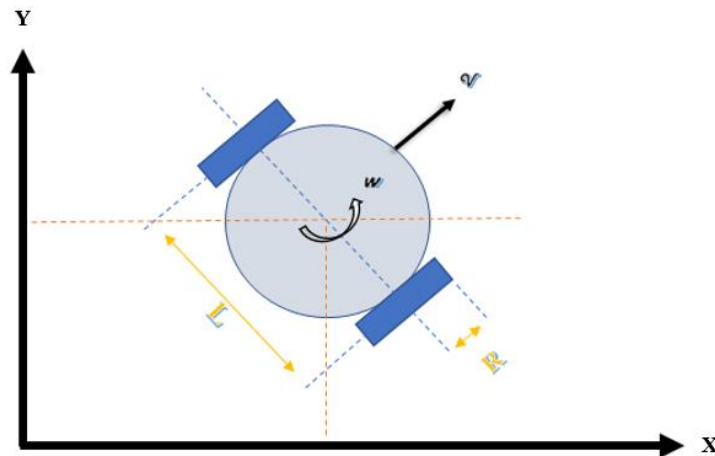
Gao Zhang, 2020 ve arkadaşları tarafından geliştirilen bir RRT algoritması önerilmiştir. Geliştirilen algoritma, temel RRT algoritmasının optimal olmayan yol, yerel minimuma düşme kolaylığı ve karmaşık ortamlarda başarı oranı artırmak için kullanılmıştır. Bu yöntem, rastgele ağacı içeriden dışarıya doğru büyümeye zorlamak için komşuluk genişletme yöntemini kullanır, bu da RRT* algoritmasında son derece zaman alan yeniden kablolama sürecini ve en uygun yolu sağlamayı önler. Rastgele ağacın büyümesini yönlendirmek için sezgisel metot kullanılır, bu da rastgele ağacın kapsamını azaltır ve planlama verimliliğini artırır. Ve bu geliştirilen algoritma farklı haritalarda uygulanarak gözlemlenmiştir [18].

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde, sürü robotlarının iş birliğine içerisinde yol planlama ve engelden kaçınma algoritmaları incelenmektedir. Yol planlama ve engelden kaçınma problemi için RRT (Hızla Keşfedilen Rastgele Ağaç Algoritması) yol takibi için Pure Pursuit algoritmaları kullanılmıştır. İş birliğine dayalı yol planlama ve engellerden kaçınma problemi için her bir sürü robotunun davranışını belirleyen bir yaklaşım önerilmektedir. İlk olarak önerilen algoritma ve metotların uygulanabileceği mobil robot kinematiği açıklanmaktadır.

2.1.Robot Kinematik Modeli

Bu çalışmada mobil robot modellerinden holonomik olmayan, iki tekerlekli diferansiyel tahrikli mobil robot referans alınmıştır. Şekil 2’de mobil robotun kinematik modeli gösterilmektedir. Şekil 2 de gösterildiği gibi $\frac{L}{2}$ yarıçapında dairesel bir yapıya sahiptir. Robot merkezinde $\frac{L}{2}$ uzağına yerleştirilmiş R yarıçapında paralel olarak gerçekleştirilmiş iki tekerleğe sahiptir. L ifadesi sürü robotunun iki tekerlek arası mesafesidir. ω ise açısal hızı ifade etmektedir.



Şekil 2. İki tekerlekli diferansiyel tahrikli mobil robot modeli

Sürü robotu eşitlik 1’de koordinatları temsil eder ve eşitlik 2 de ise α ifadesi kullanılarak robot kinematik model gösterilmiştir.

$$\alpha = [x, y, \theta]^K \quad (1)$$

$$\dot{\alpha} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (2)$$

Şekil 2 de görüldüğü gibi v , robotun doğrusal hızı ω ise açısal hızı olarak tanımlanmaktadır. Sürü robotu kinematik modelinde görüldüğü gibi iki tekerleğin açısal ve doğrusal hızları arasında bir ilişki bulunmaktadır. Tekerlekler için açısal ve doğrusal hızlar sağ (ω_R)- sol (ω_L) tekerlek olarak ayrılır. Sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde görülmektedir.

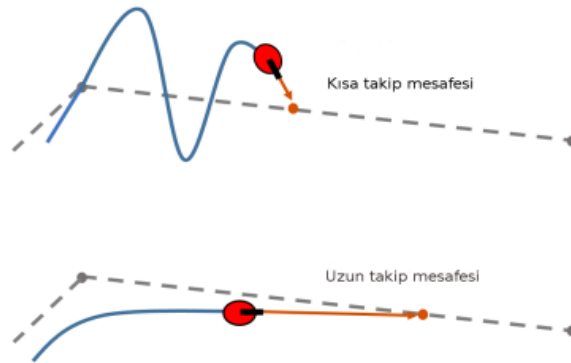
$$v = \frac{R(\omega_L + \omega_R)}{2} \quad \omega = \frac{R(\omega_L - \omega_R)}{L} \quad (3)$$

Sürü robotları ω_R ve ω_L açısal hızlarına bağlı olarak robotun yönünü belirlemektedir.

$$\omega_R = \frac{v + (\frac{L}{2})\omega}{R} \quad \omega_L = \frac{v - (\frac{L}{2})\omega}{R} \quad (4)$$

2.2.Pure Pursuit Algoritması

Pure Pursuit bir yol takip algoritmasıdır. Pure Pursuit mantığı ve kullanımı basittir. Uzakta belirlenen bir noktaya odaklanarak o noktaya hareket eden ve yörüngeyi takip eden bir algoritmadır [19] Robotu hareket ettiren açısal hız hesaplanarak robotu mevcut konumdan ileriye bakma mesafesine ulaştırır. Doğrusal hızın sabit olduğu varsayılır, bu nedenle robotun doğrusal hızı değişebilir. Algoritma daha sonra robotun mevcut konumuna bağlı olarak yoldaki ileri bakma noktasını hedef noktasına kadar hareket ettirir. Kısaca bu algoritma robotun belirlenen bir yolu takip etmesidir yani robotun sürekli olarak ileriye bakma mesafesini izlemesidir [14].



Şekil 1. Pure Pursuit ile yol takibi [14]

2.3.Hızla Keşfedilen Rastgele Ağaç Algoritması (RRT)

Bir mobil robotun yol planlaması için kullanılan algoritmalarından biri de Hızla Keşfedilen Rastgele Ağaç (RRT) algoritmasıdır. Belirli haritada rastgele örnekler kullanılarak haritadaki boşlukları verimli bir şekilde aramak için RRT algoritması, Steven M. LaValle ve James J. Kuffner Jr. tarafından geliştirilmiştir [15,17]. RRT, belirli bir durum uzayından rastgele alınan örneklerden artımlı olarak bir arama ağacı oluşturan ağaç tabanlı bir hareket planlayıcıdır. Ağaç sonunda arama alanını kapsar ve başlangıç konumundan hedef konuma bir yol oluşturur [15]. RRT başlangıç konumundan hedef konumuna ulaşana kadar rastgele noktalar seçerek düğümler oluşturulur ve hedef konuma belli bir mesafede yaklaşıncaya dek bu işlemi tekrarlayan bir algoritmadır. RRT diğer hareket planlayıcı algoritmalarından farklı olarak düğüm seçiminde, daha önceden işleme alınmış düğümü işleme katmamaktadır. Yakındaki bir düğümü hesaba katmaktansa harita üzerinde rastgele bir düğüm seçilmekte ve bu düğümüne yakın, daha önce bulunmuş farklı bir düğümünden hareket edilmektedir. Ağacın genişlemesi, başlangıçtan bitiş konumuna kadar tek yönlüdür [16].

2.4.Sürü Robotları için RRT- Pure Pursuit Tabanlı İş Birliğine Dayalı Engelden Kaçınma ve Yol Planlama

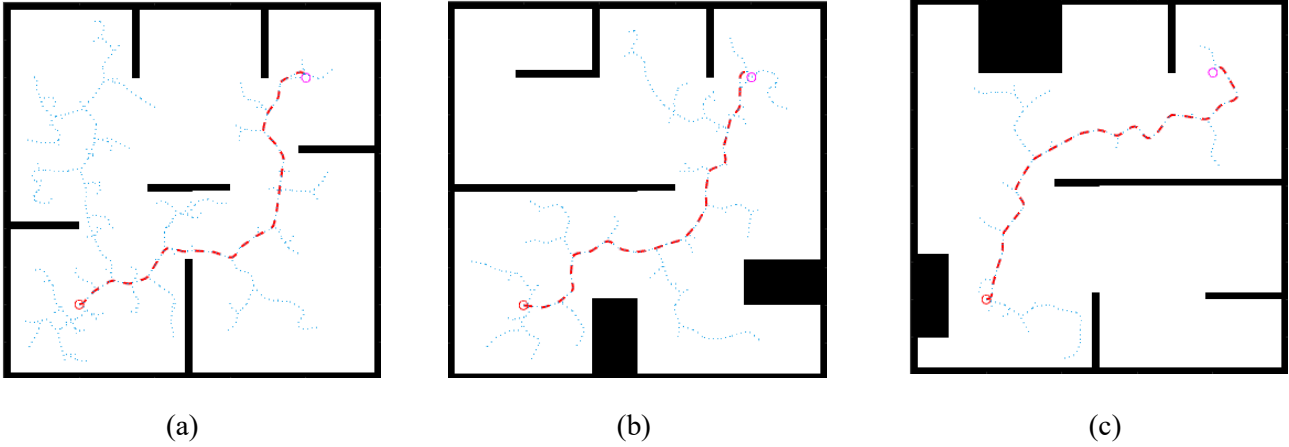
Geliştirilen sürü robotları için RRT- Pure Pursuit tabanlı iş birliğine dayalı engelden kaçınma ve yol planlama algoritması için tablo 1'deki gibi simülasyon ortamında sistematik deneyler uygulanmıştır. Sistematik deneyler arena boyutu ve farklı arenalarda, robot algılama yarıçapı, l_d değerine, robot sayısına bağlı olarak belirlenmiştir. Uygulanan deneylerindeki sürü robotlarının, değişen arenalar (engeller) ile ölçeklenebilir bir şekilde farklı robot sayılarında yol planlama ve engelden kaçınma davranışları uygulayarak başlangıç konumunda hedefe konuma en kısa yol oluşturarak simülasyonunun tamamlanması amaçlanmıştır. RRT algoritması ile farklı arenalarda başlangıç konum ile hedef konum arasında yol planlanmaktadır. Planlanan yolu takip edebilmek için Pure-Pursuit algoritması kullanılmıştır. Sürü robotlarının ölçeklenebilirliği ve esnekliği başlangıç konum ile hedef konum arasında engelsiz yol ve oluşturulan yolun izlenebilirliğini farklı arenalar ve farklı robot sayıları ile gözlemlenecektir.

Tablo 1'de RRT- Pure Pursuit tabanlı iş birliğine dayalı engelden kaçınma ve yol planlama simülasyon kurulumu için,

| | |
|------------------------|-----------|
| Arena boyutu | {50x50} |
| l_d Değeri | {0.5} |
| Robot sayısı | {3, 5, 7} |
| Bağlantı Mesafesi | 2.5 |
| Minimum Dönüş Yarıçapı | 0.75 |

Tablo 1. RRT simülasyon özellikleri

Tablo 1'de belirlenen robot sayıları {3, 5, 7}, Pure Pursuit yöntemi için l_d değeri 0.5 ve arena boyutları aynıdır fakat 50x50 boyutlarında farklı arenalarda bağlı bağlantı mesafesi 2.5 birim ve minimum dönüş yarıçapı olarak 0.75 birim için engelsiz yollar planlanmıştır. Planlanan bu yollar için 36 sistematik deney uygulanmıştır.



Şekil 2. 50x50 boyutlarındaki arenalarda RRT algoritma ile planlanan yollar (a) arena (1), (b) arena (2) ve (c) arena (3)

RRT algoritması rastgele bir düğüme odaklanır ve bu düğümü, kendisine en yakın bulunan düğüm ile birleştirir. Böylece her iki düğüm arasında bir yol oluşur. Oluşturulan bu yolun bir engelle çarpışmadığı kontrol edilir. Kontrol doğrultusunda herhangi bir engel ile temas olmazsa yol ve düğüm ağaca eklenir. Eğer engel ile teması var ise oluşturulan yolda hareketin mümkün olmadığına karar verilir ve yeni bir düğüm ve seçilen düğüme en yakın düğüm seçilerek aynı hesaplamalar tekrar yapılmaktadır.

Bu işlem için algoritmada 30000 iterasyon sayısı ile bu yineleme yol bulunana kadar devam etmektedir.

Simülasyon deneylerinde robotlar, RRT algoritması ile oluşturulan yolda şekil 4’te gösterilen 50x50 boyutlu 3 farklı arenalarda belirli başlangıç aralığında rastgele olarak dağıtılmaktadır. Rastgele dağıtılan robotlar birbirleriyle üst üste binmeyecek şekilde aynı konumlarda yerleşmeleri için, rastgele dağılım tekrarlanır. Bu sayede sürü robotları aynı noktalarda ve konumlarda olmayacak şekilde rastgele olarak dağıtılacaktır. Şekil 4’te görüldüğü gibi simülasyon deney ortamı dört tarafı ve içerisi engellerle sınırlandırılmış kare yapıdadır. Kare ortamın duvarları engel olarak belirtilmiştir.

2.5. Deneyel Kurulum ve Problem Tanımı

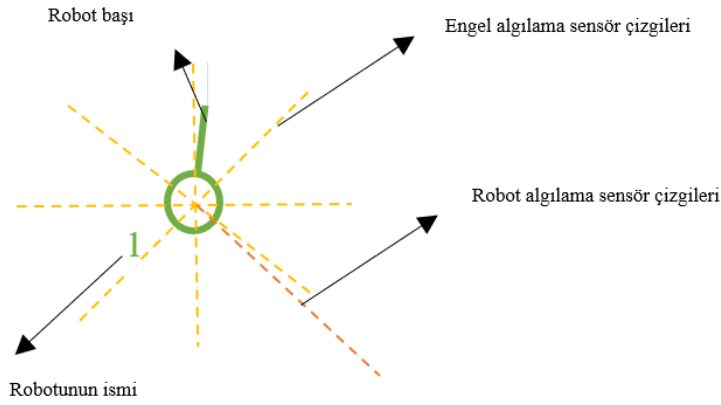
Bu bölümde, önerilen Pure Pursuit- RRT iş birliğine dayalı engelden kaçınma ve yol planlama, Pure Pursuit- PRM iş birliğine dayalı engelden kaçınma ve yol planlama algoritmaları için sistematik deneyler ve sonuçlar yer almaktadır. Geliştirilen algoritmalarının esneklik, ölçeklenebilirlik açısından kontrol edebilmek için farklı arenalarda farklı robot sayıları ile simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Yol planlama ve engelden kaçınma probleminin performansını ölçmek için simülasyon süresi kullanılmıştır. Simülasyon süresi, deneylerin başlangıç konumundan hedef konuma ulaştığı ana kadar geçen simülasyon adım sayısıdır. Sistematik deneyler neticesinde elde edilen sonuçlarda, sürü robotlarının ölçeklenebilirliği ve esnekliği başlangıç ve hedef konum arasında engelsiz yol oluşturma ve Pure Pursuit ile yol izleme davranışı açısından incelenmektedir.

Geliştirilen metotlar MATLAB, “Mobile Robotics Simulation Toolbox” ortamında simüle edilmiştir. “Mobile Robotic Simulation Toolbox” sürü robotu uygulamaları ve çoklu robot sistemlerinin geliştirilmesi için kullanılabilen bir araç kutusudur.

| Özellikleri | Ölçüm Aralıkları |
|-------------------------|--------------------|
| Robot Modeli | Differential Drive |
| Robot Algılama açısı | 360° |
| Robot Algılama uzaklığı | 10 birim |
| Engel Algılama uzaklığı | 10 birim |
| Engel Algılama açısı | 360° |

Tablo 2. Sürü robotu özellikleri

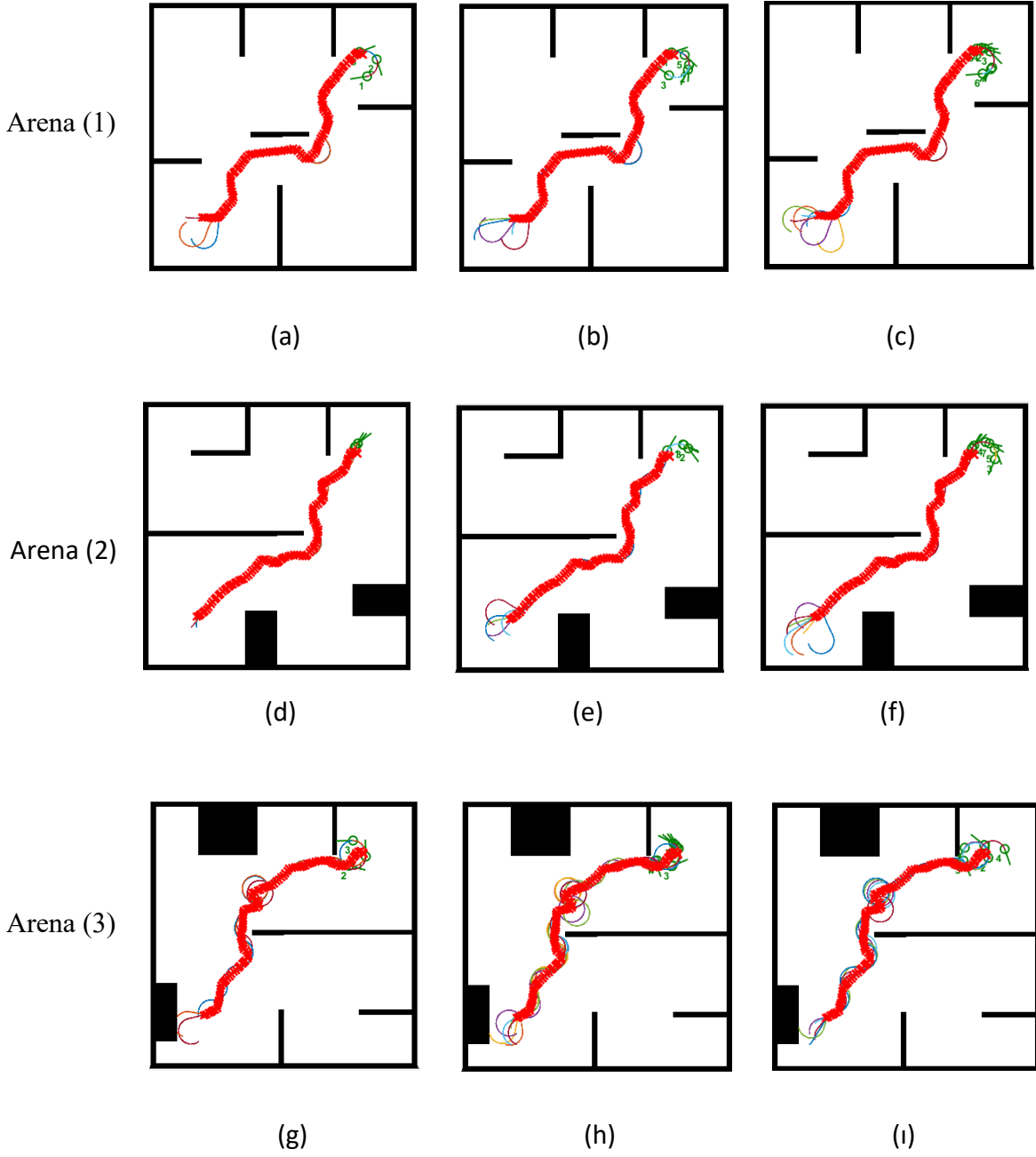
Tablo 3'te gösterilen sürü robot özelliklerine göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Her bir sürü robotu algılama aralığındaki engel ve robotu algılayabilir ve veri alışverişi yapabilirler. Simülasyon ortamında kullanılan sürü robot modeli şekil 6'da gösterilmiştir. Sürü robotlarının kinematik modeli holonomik olmayan 2 tekerlekli ve robot yarıçapı 0.8 birim olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Sürü robot modeli

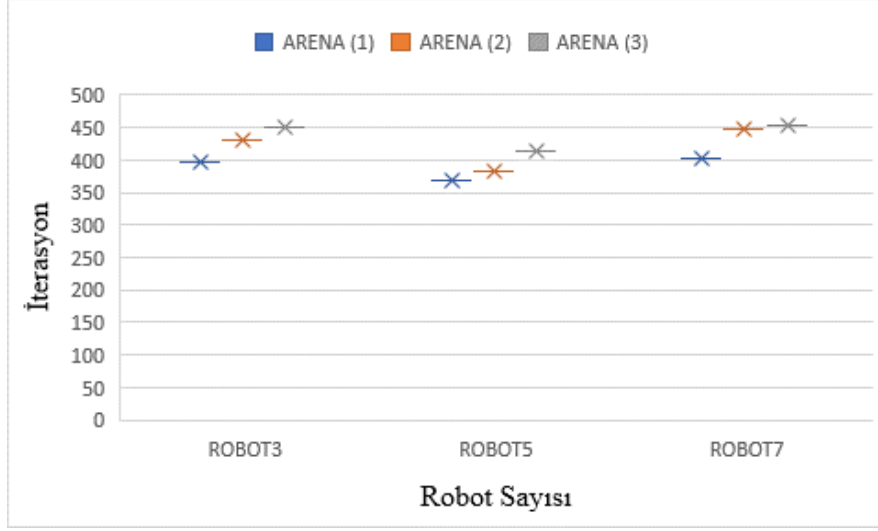
3. Bulgular ve Tartışmalar

Bu bölümde önerilen yol planlama ve engellerden kaçınma algoritması farklı arenalarda, farklı robot sayılarında ve $0.5 l_d$ değerine göre simülasyon deney sonuçları incelenmiştir. Sırasıyla arena (1), arena (2) ve arena (3) için gerçekleşen sonuçlar gösterilecektir. İleriye bakma mesafesi (l_d) ile oluşturulan sonuçlar incelenecektir. Kutu grafikleri ile ise simülasyon deneylerindeki yineleme sayıları karşılaştırılarak gösterilecektir. Kutu grafiklerinde orta düz çizgi ile belirtilen değer yineleme sayılarının ortanca değeridir.



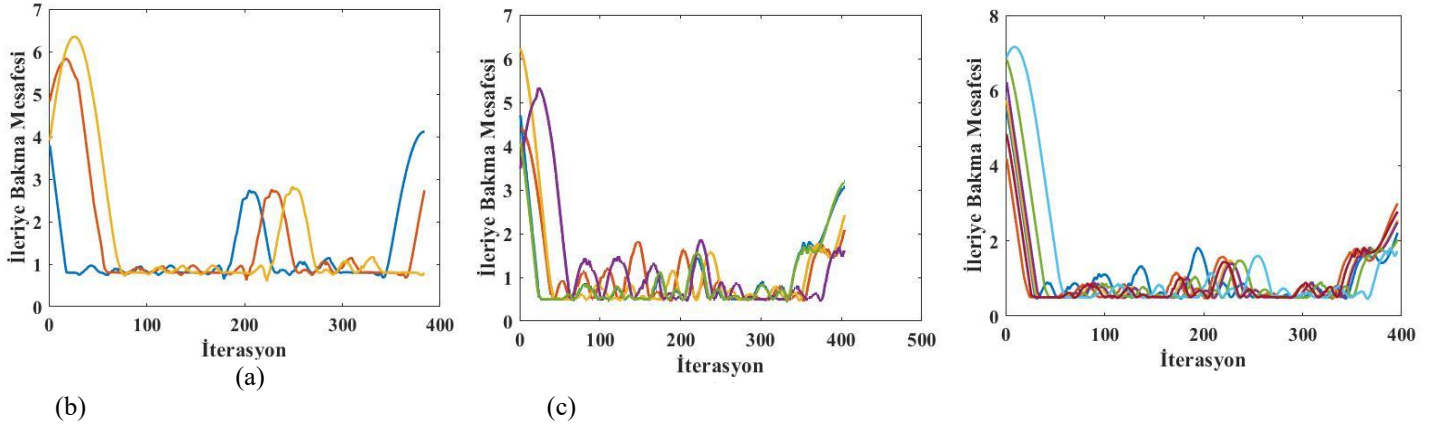
Şekil 7. Pure Pursuit- RRT algoritması için ve l_d 0.5 değeri arenalar üzerinde simülasyon deney sonuçları

Şekil 8 'de geliştirilen Pure Pursuit – RRT algoritması için ileriye bakma mesafesi (l_d) 0.5 değerli sistematik deney sonuçlarının kutu grafiği yer almaktadır. En düşük ortanca değer 368 iterasyon adımında arena (1) 5 robot için, en yüksek ortanca değer ise 414 iterasyon adımında arena (3)'de 5 robot için gerçekleşmiştir.

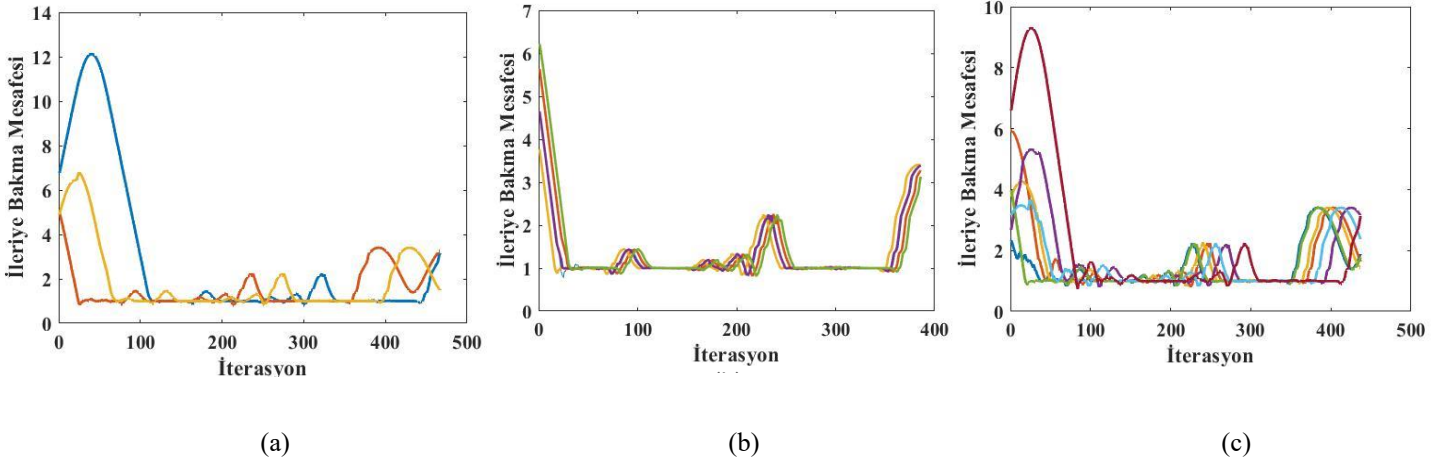


Şekil 8. 0.5 birim değer için RRT algoritması için uygulanan sistematik test sonuçları

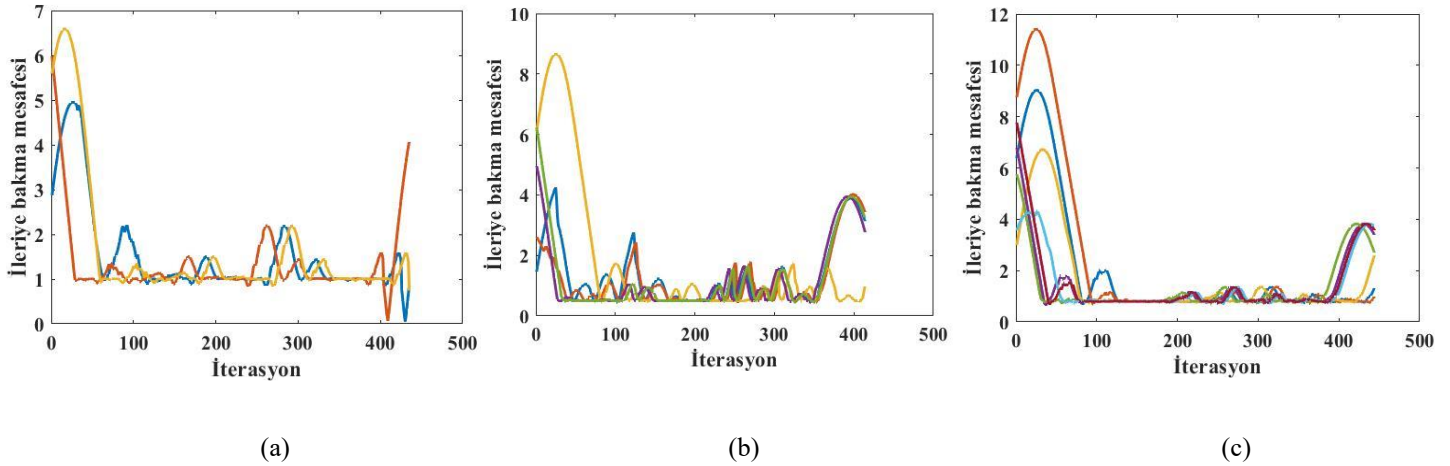
Arena (1, 2, 3)'de gerçekleştirilen simülasyon deneylerinin hedef konuma ulaştığı sonuçlar şekil 7'de gösterilmiştir. Sırasıyla 3,5 ve 7 sürü robotu ile gerçekleştirilen başlangıç konumdan başlayarak planlanan ve engelsiz yol boyunca giderek hedef konuma varmaktadır. İleriye bakma mesafeleri ve simülasyon tamamlanma süreleri (yineleme sayısı) ile oluşturulan grafikler gösterilecektir.



Şekil 9. Arena (1) RRT algoritması için 0.5 ileriye bakma mesafesi için (a) 3 sürü robotu, (b) 5 sürü robotu ve (c) 7 sürü robotu ile yapılan simülasyon sonuçları



Şekil 10. Arena (2) RRT algoritması için 0.5 ileriye bakma mesafesi için (a) 3 sürü robotu, (b) 5 sürü robotu ve (c) 7 sürü robotu ile yapılan simülasyon sonuçları



Şekil 11. Arena (3) RRT algoritması için 0.5 ileriye bakma mesafesi için (a) 3 sürü robotu, (b) 5 sürü robotu ve (c) 7 sürü robotu ile yapılan simülasyon sonuçları

RRT algoritması ile belirlenen arena üzerinde başlangıç konum ile hedef konum arasında engelsiz bir yol planlanması ve geliştirilen algoritma ile sürü robotlarının bu planlanmış yolu takip etmeleri amaçlanmıştır. Bu nedenle engelsiz yol sürü robotları harekete başlamadan planlandığı için sürü robotlarının arena içerisinde hedef konumu bulmalarında kolaylık sağlanmıştır.

Şekil 9, 10 ve 11’de grafikler göz önüne alındığında hedef konuma varmak için 3 sürü robot ile simülasyon deney sonuçlarına göre 7 sürü robotu ile yapılan simülasyon deney tamamlanma süresi daha fazladır. En kısa simülasyon tamamlanma süresi ise 3 sürü robotu gerçekleşen deneyde görülmüştür. Bu sonucun sebebi sürü robotlarının sayısının artmasıdır.

| Pure Pursuit- RRT İş birliğine Dayalı Algoritma için Kat edilen Mesafe | |
|--|-------|
| ARENA (1) | 62 cm |
| ARENA (2) | 54 cm |
| ARENA (3) | 57 cm |

Tablo 3. Pure Pursuit – RRT algoritma için sürü robotlarının kat ettikleri ortalama mesafe

Tablo 4’te geliştirilen sürü robotları için Pure Pursuit- RRT iş birliğine dayalı algoritmada her bir arena için 36 sistematik deney sonuçlarında sürü robotlarında her robotunun başlangıç konumdan hedef konuma ulaşmak için kat ettikleri yolun ortalama değeri gösterilmektedir. Tabloya göre arena (1)’de en uzun mesafe, en kısa mesafe ise arena (2)’de görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada sürü robotlarının yol planlama ve engelden kaçınma davranışı için RRT-Pure Pursuit iş birliği tabanlı algoritma ile sistematik deneyler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada yol planlama ve engelden kaçınma davranışındaki performansları incelenmiştir. Her bir sürü robotu, yol takibi sırasında ayrı ayrı algıladıkları komşu robotların davranışlarına göre hareket eder. Önerilen yol izleme yaklaşımını ölçülebilirlik ve esneklik açısından değerlendirmek için, 3 farklı arenada farklı sayıda robotlarla bağlı olarak sistematik deneyler yapılmıştır. Geliştirilen algoritmada, her bir sürü robotu, 3 farklı arenalarda izlenecek yola bakış mesafesine bağlı olarak organize bir şekilde sürü davranışı sergilemektedir. Sistematik deneylerden elde edilen sonuçlar, sürü robotlarının hedefe ulaşmak için esnek ve ölçülebilir bir şekilde yol takip ettiğini göstermektedir.

Farklı arenalarda sürü robotlarının hedef konuma ulaşmak için kat ettikleri en kısa mesafe arena (2), en uzun mesafesi ise arena (1)’de gerçekleştirilmiştir. RRT algoritması belirli bir durum uzayından rastgele alınan örneklerden artımlı olarak bir arama ağacı oluşturan ağaç tabanlı bir hareket planlayıcıdır. Bu hareket planlayıcısı ile başlangıç ve hedef konum arasında engelsiz bir yol oluşturulur. Arenalar üzerinde engellere bağlı olarak oluşturulan arama ağacı ile en kısa mesafe ve en uzun mesafe karşılaştırılması yapılmıştır. Simülasyon tamamlanma süresi karşılaştırıldığında ise en düşük ortalama değer 368 iterasyon adımında arena (1) 5 robot için, en yüksek ortalama değer ise 414 iterasyon adımında arena (3)’de 5 robot için gerçekleştirilmiştir. Sürü robotlarındaki artış arenalarda uygulanan sistematik deneylerden de görüldüğü gibi deneyin tamamlanma süresinde artışa neden olmuştur. Bunun sebebi RRT algoritması ile belirlenen arena üzerinde başlangıç konum ile hedef konum arasında engelsiz bir yol planlanması ve geliştirilen algoritma ile sürü robotlarının bu planlanmış yolu takip etmeleri amaçlanmıştır. Bu nedenle engelsiz yol sürü robotları harekete başlamadan planlandığı için sürü robotlarının arena içerisinde hedef konumu bulmalarında kolaylık sağlanmıştır.

5. Kaynakça

- [1] Mısır O, Gökrem L, (2020). Sürü Robotları için Esnek ve Ölçeklenebilir Toplanma Davranışı Metodu. *European Journal of Science and Technology*, 100-109.
- [2] Mısır O, Gökrem L, (2021). Flocking-Based Self-Organized Aggregation Behavior Method for Swarm Robotics. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 45(4), 1427-1444.
- [3] Mısır O, Gökrem L, Serhat Can M, (2020). Fuzzy-based self organizing aggregation method for swarm robots. *Biosystems*, 196, 104187.
- [4] Mısır O, Gökrem L, (2021). Dynamic interactive self organizing aggregation method in swarm robots. *Biosystems*, 207, 104451.
- [5] Stormont D P, (2005). Autonomous rescue robot swarms for first responders. *CIHSPS 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety*, 2005., 151-157.
- [6] Tan Y, Zheng Z, (2013). Research Advance in Swarm Robotics. *Defence Technology*. 9(1), 18-39.
- [7] Mısır O, (2023). Dynamic local path planning method based on neutrosophic set theory for a mobile robot. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(3), 1-13.
- [8] Hosseini S. (2016). Path Tracking Methodologies For Mobile Robots. *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [9] Yaşar E. (2020). Sürü Robotların Hareket Planlamada Kullanılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 20, Article 20.
- [10] Lozano-Pérez T, Wesley MA, (1979). An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. *Communications of the ACM*. 22(10), 560-570.
- [11] Panerati J, Gianoli L, Pincioli C, Shabah A, Nicolescu G, Beltrame G, (2018). From Swarms to Stars: Task Coverage in Robot Swarms with Connectivity Constraints. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 7674-7681.
- [12] Li Y, (2021). An RRT-Based Path Planning Strategy in a Dynamic Environment. *2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. 1-5.
- [13] Huang Y, Tian Z, Jiang Q, Xu J, (2020). Path Tracking Based on Improved Pure Pursuit Model and PID. *2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology ICCASIT*, 359-364.
- [14] Coulter, R. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. *Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania*, Jan 1990.
- [15] Anonymous (2023). Rapidly-exploring random tree. (Erişim tarihi: Aralık 03, 2023). https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rapidly_exploring_random_tree&oldid=1188136463
- [16] Z, (2018). Mobil robotların yol planması için metasezgisel hibrit algoritmalar geliştirilmesi ve uygulanması. *DoctoralThesis Sakarya Üniversitesi*. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/74245>
- [17] Nemeč D, Janota A, Hrubaš M, Gregor M, Pirnik R, (2017). Mutual acoustic identification in the swarm of e-puck robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 14, 172988141771079.
- [18] Zhang W, Yi C, Gao S, Zhang Z, He X, (2020). Improve RRT Algorithm for Path Planning in Complex Environments. *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*.3777-3782.

- [19] Mısır O, Çelik M, Gökrem L, (2022). Waypoint-Based Path Tracking Approach For Self-Organized Swarm Robots. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 14, 799-815.