

Parçacık Sürü Optimizasyon Tabanlı Mobil Robotlarda Global Yol Planlama

Zeynep B. GARİP^{1*} , Durmuş KARAYEL² , Murat Erhan ÇİMEN³ 

¹ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

² Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

³ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

ÖZ

Mobil robotların verimli çalışmasında en kısa ve düşük maliyetli yol planlanması çok önemlidir. Bu çalışmada bilinen statik bir çevrede mobil robot navigasyonu için parçacık sürü optimizasyon algoritma tabanlı yol planlama önerilmiştir. Önerilen yöntemde başlangıç noktasından hedef nokta arasında engellere çarpmaksızın mobil robot tarafından oluşturulan yol optimize edilmektedir. Bunun görselleştirilmesi için bir arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada önerilen algoritmanın etkinliği simülasyon sonuçları ile gösterilmektedir. Buna ek olarak simülasyon çalışmasında elde edilen yol deneysel ortamda mobil robot tarafından doğrulanmaktadır. Önerilen PSO algoritmasının performansını karşılaştırmak amacıyla literatürde bulunan algoritmalar kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Parçacık sürü optimizasyonu, yol planlama, mobil robotlar, navigasyon.

Global Path Planning in Particle Swarm Optimization Based Mobile Robots

ABSTRACT

Planning the shortest and lowest cost path is very important for the efficient operation of mobile robots. In this study, particle swarm optimization algorithm-based path planning is proposed for mobile robot navigation in a known static environment. In the proposed method, the path between the starting point and the target point is optimized by the mobile robot without hitting obstacles. An interface has been designed to visualize this. The efficiency of the proposed algorithm in the study is shown with the simulation results. In addition, the path obtained in the simulation study is confirmed by the mobile robot in an experimental environment. Algorithms found in the literature were used to compare the performance of the proposed PSO algorithm.

Keywords: Particle swarm optimization, path planning, mobile robots, navigation.

* Corresponding Author's email: zbatik@subu.edu.tr

1 Giriş

Son on yılda gezegen araştırması, gözetim ve mayın tespiti gibi uygulama alanlarında mobil robot yol planlama giderek artan bir araştırma alanı olmaya başlamıştır. Buna ek olarak yol planlamada otonom-insansız sistemlerin öneminin artmasından dolayı yoğun bir şekilde incelenmektedir. Yol planlamanın amacı yol uzunluğu ve yolun düzeltilmesi gibi önceden tanımlanan performans kriterlerini optimize ederek başlangıç konumundan hedef konuma doğru en uygun ve engelsiz yolu belirlemektir. Bununla birlikte, deterministik olmayan, karmaşık, kompleks, birden fazla lokal minimum değeri bulunabilen polinom zamanlı zor (NP-zor) problemlerin doğası nedeniyle, yol planlamanın etkin bir şekilde çözülmesi zor bir süreçtir.

Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) algoritması, sürekli doğrusal olmayan optimizasyon, kısıtlı ve kısıtlı olmayan, türevlenemez çok modlu fonksiyonlar için geliştirilmiş bir evrimsel hesaplama tekniğidir. PSO, basitlik ve yüksek yakınsama hızından dolayı, yol planlama problemini çözmek amacıyla yaygın ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. PSO kümeleme ve sınıflandırma, güvenlik ve askeri, modelleme, biyomedikal, tümleşik optimizasyon, iletişim ağları, kontrol, sensor ağları, sinyal işleme ve robotik gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır [1]. PSO uygulama alanlarına ek olarak biyolojik ve tıbbi alanlar, elektrik, elektronik ve elektromanyetik alanlar, bilgisayar istihbarat uygulamaları, kombinatoryal problem çözüme, görüntü-sinyal işleme ve robotiklere kadar geniş bir uygulama alanı vardır [2].

Literatürde PSO algoritması tabanlı robotik alanı ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, robotik manipülatörler ve kolların kontrolü, hareket planlama ve kontrol, robotun çalışması, toplu robotik arama, denetimsiz robotik öğrenme, yol planlama, engelden kaçınma, sürü robotu, insansız araç navigasyonu, futbol oynama, robot görme, nakliye robotları, koku kaynağı lokalizasyonu, çevre haritalama, robotların ses kontrolü gibi konuları içermektedir. Deepak ve arkadaşları çalışmalarında mobil robot navigasyon problemlerini çözmek amacıyla PSO tabanlı bir sistem geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma sayesinde bilinmeyen ortamlarda engellerden kaçınma ve en uygun yolları bulma ihtimali artmıştır. Algoritma tarafından üretilen yörüngeler, her yinelemede global en iyi konuma(gbest) dayanmaktadır. Sürü arasındaki minimum uygunluğa sahip olan parçacık, en iyi global konum olarak düşünülmektedir. Bundan dolayı robot en iyi konuma doğru hareket eder ve hedef konuma varana kadar bu süreç iterasyonda devam etmektedir. Modellenen uygunluk fonksiyonunun kontrol parametrelerini ayarlamak için çok sayıda deney yapılmıştır. Yaptıkları bu çalışmada simülasyon sonuçları ile geliştirilen algoritmanın etkinliğini doğrulamışlardır [3]. Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada belirsiz konumlarda bulunan tehlikeli kaynakların olduğu yerlerde robot yol planlama problemini çözmek için çok amaçlı PSO geliştirilmiştir. Uygun yol belirlemede performans kriteri olarak yol uzunluğu ve risk derece parametrelerini seçmişlerdir. Risk derecelerini değerlendirmek amacıyla bulanık üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bu algorithmada yolların uygunluğunu geliştirmek için rastgele örnekleme ve tek biçimli mutasyon işlemi uygulanarak yeni bir güncelleme yöntemi önerilmiştir. Son olarak, önerilen algoritmanın verimliliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamak için dört test problemi seçilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Belirsiz tehlike kaynaklarının bulunduğu bir ortamda önerilen algoritmanın, yol planlama problemini çözmek için uygulanabilir bir alternatif olduğu belirtilmiştir [4]. Tang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada “Etkin bölge” adı verilen daraltılmış bir alanda mobil robotların global yol planlaması amacıyla özelleştirilmiş bir PSO algoritması önerilmiştir. Parametrelerin etkisini (nüfus boyutu, parçacık boyutu ve maksimum iterasyon sayısı) incelemek için simülasyonda hem basit hem de karmaşık çalışma ortamlarında yol planlama algoritması çalıştırmışlardır. Simülasyon analizlerine göre algoritma daha hızlı arama yaparak arama kalitesini artırmıştır. Dolayısıyla algoritmanın etkinliği artmıştır [5]. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada futbol robotunun engellerin belirli bir hızda olduğu varsayılan bir dinamik ortamda global yol yaklaşımı çözmek için PSO’ya dayalı bir yol algoritması tasarlanmıştır. Önerilen algoritma basit, etkili kodlama şeması ve hatasız uygunluk fonksiyonu ile ön plana çıkmaktadır. Bu özellikler kullanılarak yerel optimal çözümden kaçınarak global optimal çözüm kabiliyetine dayanan az maliyetli düz bir yol oluşturmuşlardır. Futbol robotu için bu yaklaşımın uygunluğu simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir [6]. Saska ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada futbol robotları için kübik eğriler dizisi kullanılarak yol planlamada özgün bir yaklaşım sunulmuştur. Bu eğrileri optimize etmek için PSO kullanılmıştır. Elde edilen düzgün yol robot tarafından kolaylıkla takip edilmiştir. Geliştirilen yöntem

diğer optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırıldığında, PSO tekniği yerel optimum noktasına takılmamıştır [7]. Nasrollahy ve arkadaşlarının çalışmasında dinamik ortamda engellere çarpmaksızın başlangıç ve hedef noktalar arasındaki yol planlaması PSO kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PSO'nun kullanım amacı yerel optimum noktalarından kaçınmak toplam süreyi en aza indirmektir. Önerilen algoritmanın doğruluğunu kanıtlamak için simülasyon ve deneysel çalışmalar yapılmıştır [8]. Solea ve ark. tarafından yapılan çalışmada mobil robotun ortamda bulunan sabit ve hareketli engellere çarpmaksızın uygun yolu bulmak için PSO algoritması kullanılmıştır. Mobil robot lazer tarayıcı modülü ile sabit ve hareketli çevreyle ilgili doğru bilgiye ulaşmıştır. Önerilen PSO algoritması kullanılarak hem global hem de yerel yol planlaması gerçekleştirilmiştir. Hesaplama verimliliği, simülasyon ortamında ve gerçek deney ortamında yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Simülasyon ortamında üretilen global yol gerçek deney ortamında yerel yol planlamayla örtüştüğünden dolayı doğruluğu kanıtlanmıştır [9].

Bu çalışmada statik bir çevrede çoklu mobil robotların navigasyon problemini çözmek için PSO algoritma tabanlı bir yaklaşımı geliştirilmiştir. Ayrıca PSO yaklaşımının statik çevrede deney düzeneğine uygulanabilmesi için bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen arayüzde düzenekten otonom-insansız robotun görüntüsü alınabilmektedir. Bu arayüzde PSO parametreleri ve yol uzunluğunun yöntemi seçilebilmektedir. Bu yaklaşımın amacı PSO'nun verimliliğini yol planlamada kullanarak belirlenen maliyet gibi en önemli performans kriterlerini geliştirmektir.

2 Materyal ve Yöntem

Parçacık Sürü Optimizasyonu kuş, balık ve havyan sürülerinin çevrelerine adapte olma, zengin yiyecek kaynağı bulabilme ve avcılardan kaçabilme yeteneklerinden esinlenilerek Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiş bir algoritmadır [10].

Sürü içerisindeki her birey, parçacık olarak adlandırılmakta ve her parçacığın sürü içerisinde onun(p) ve hız(v) bilgileri bulunmaktadır. Bu konum ve hız bilgileri, parçacığın iterasyon içindeki en iyi pozisyonuna (p_{best}), sürü içerisindeki en iyi pozisyonuna (g_{best}) ve o andaki hız bilgisine göre her iterasyon da güncellenmektedir. İterasyonda pozisyon ve hız bilgisi aşağıdaki denklemlerdeki (Denklem 1-2) gibi güncellenir [11].

$$v_{t+1} = vw_t + c_1r_1(p_{best} - p_t) + c_2r_2(g_{best} - p_t) \quad (1)$$

$$p_{t+1} = p_t + v_{t+1} \quad (2)$$

PSO algoritması yol planlama uygulanırken ilk olarak kullanılacak parametreler belirlenir. İkinci olarak popülasyon değerleri rastgele belirlendikten sonra bu değerlere karşılık gelen amaç fonksiyon değeri hesaplanır. Başlangıç çözümündeki her bireye ait çözüm aynı zamanda o parçacığın yerel en iyi değeridir. Amaç fonksiyon değeri, en iyi olan parçacık global en iyi olarak atanır ve bu parçacık değerleri global komşular olarak saklanır. Aynı şekilde başlangıçtaki her bir parçacığın amaç fonksiyon değerleri yerel en iyiler olarak saklanıp parçacık değerleri de yerel komşular olarak saklanır. Genellikle başlangıç çözümünde başlangıç hızları rastgele belirlenmektedir. Başlangıç çözümünden sonra PSO algoritması tam anlamıyla başlar. Başlangıç çözümünde elde edilen hız değerlerinden yararlanarak yeni pozisyonlar belirlenir. Yeni bulunan pozisyonlar için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır ve hızlar güncellenir. Daha sonra her parçacık için o iterasyona kadar bulunan en iyi amaç fonksiyonu değerini veren çözüm yerel en iyi olarak atanır. Tüm parçacıklar için yerel en iyiler bulunarak yerel en iyi komşular kümesi oluşturulur. Her iterasyonda bulunan global en iyiler karşılaştırılarak en iyi amaç fonksiyonuna sahip parçacığın çözümü global en iyi olarak atanır. Bu işlem bir durdurma kriterine kadar devam eder.

3 Mobil Robotlar için PSO Algoritma Tabanlı Yol Planlama

Bu çalışmada mobil robotların yol planlamasında karşılaşılan problemlerin çözümüne katkı sağlamak için PSO tabanlı bir yaklaşımın geliştirilmesidir. Geliştirilen algoritma ile statik farklı ortamlarda engellerden kaçınma ve hedefe ulaşmak için optimal yollar elde edilmiştir. Optimal yolları elde etmek için uygunluk fonksiyonu tanımlanmıştır. Mobil robot hedef noktasına varana kadar parçacıkların en iyi konumlarını (g_{best}) kullanarak hareket etmektedir.

3.1 PSO tabanlı uygunluk fonksiyonunun oluşturulması

PSO algoritmasında tanımlanan uygunluk fonksiyonu, mobil robotun yol planlamasında en kısa yolu bulmak amacıyla uygulanmaktadır. Yol planlama problemlerinde amaç, engellere çarpmadan başlangıç ve hedef arasındaki en uygun yolu bulmaktır. Amaç fonksiyonu en kısa yolu planlamak için seçilen parçacıklar arasındaki uzaklıkların toplamı olarak bulunmaktadır. Uygunluk ölçüsü olarak en kısa yol parametresi seçilmiştir.

$$f = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}), & \text{engel yoksa} \\ \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) + hata, & \text{engel varsa} \end{cases} \quad (3)$$

$$hata = \sum_j \sum_i^n engel_{ji} \cdot yol_{ij} \quad (4)$$

Yol planlama da her parçacığın uygunluk değerinin hesaplanması için Denklem 3 ve 4’de verilen amaç fonksiyonuna göre belirlenmesi gerekmektedir. Bu algoritmadaki uygunluk fonksiyonunda f uygunluk fonksiyonunu, p parçacık ve n ise popülasyon uzunluğudur.

3.2 Önerilen PSO algoritma tabanlı mobil robotlarda global yol planlama

PSO algoritması ile engelli bir statik ortamda mobil robot yol planlama probleminde, parçacıkların en iyi konum bulma özelliği kullanılarak en uygun yol bulunmuştur. En iyi konum yani global konum(g_{best}) seçilerek sürü içerisindeki minimum uygunluğa sahip olan parçacık belirlenmiştir. Yol planlamanın gerçekleştirilebilmesi amacıyla mobil robotun ve engellerin konumları belirlendikten sonra PSO algoritması uygulanmaya başlanmıştır. Uygulamada her yinelemede parçacıkların en minimum olan global konum(g_{best}) değeri seçilmiştir. Mobil robot hedefe ulaşmaya kadar seçilen global en iyi konum değerlerine göre hareket etmektedir. Algoritma probleme uyarlanırken başlangıç olarak parçacık hızları 0 olarak belirlenmiştir. Ardından parçacıklara başlangıç değeri olarak, belirlenen kısıtlar arasındaki konumlarda rastgele reel sayılar verilmiştir. Döngü içinde hızlar hesaplanıp, ardından bu hızlar ile parçacıklar hareket ettirilmekte ve bulunan parçacıkların yeni konumlarının uygunluk değerleri belirlenmektedir. İyi olanların yerleri değiştirilerek p_{best} ve g_{best} değerleri belirlenmektedir. Her bir parçacık için hız değerleri hesaplanarak döngü tekrar başa gelmekte ve işlemler tekrar edilmektedir. Döngü istenen durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. Mobil robotlar için önerilen PSO tabanlı yol planlamanın akış diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.

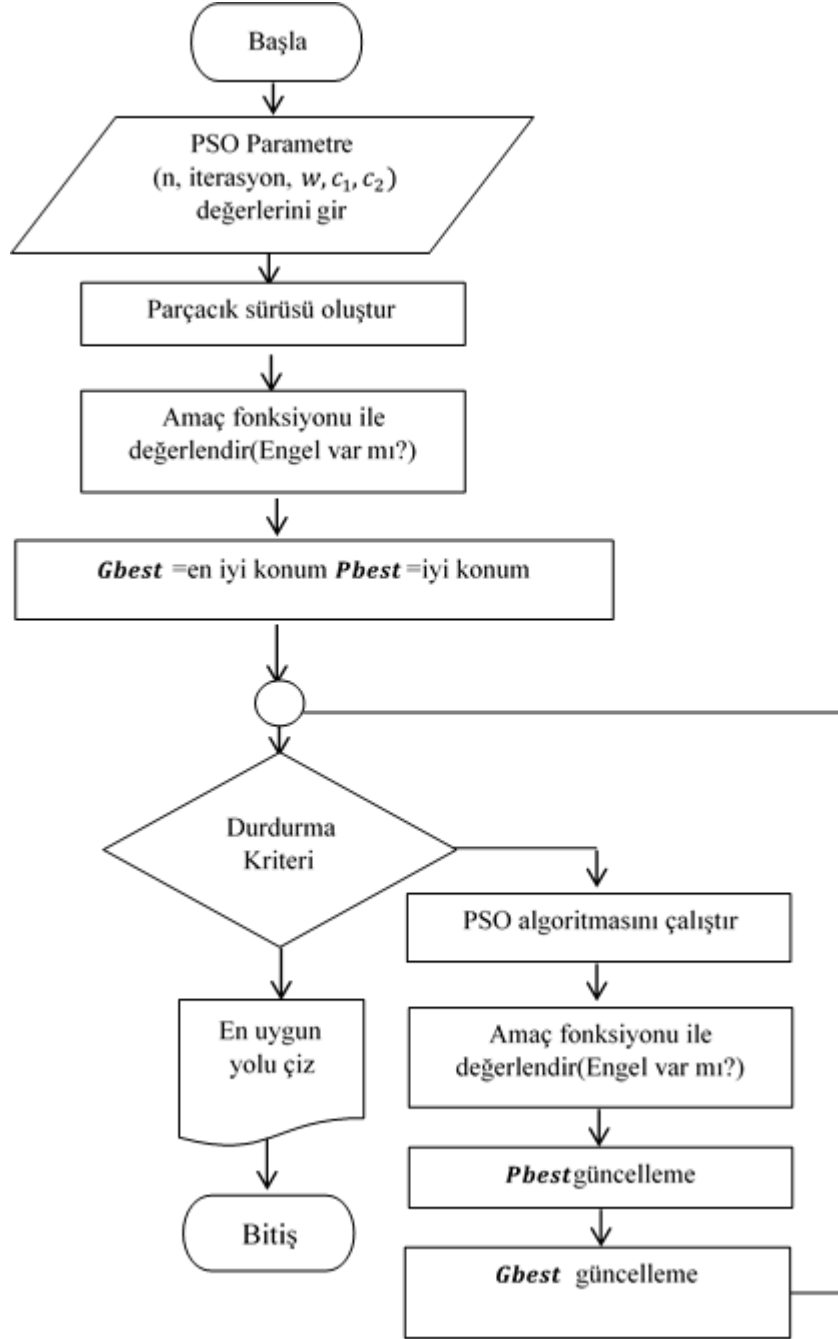
4 Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar

Önerilen PSO tabanlı yol planlayıcının etkinliği simülasyon ve deneysel ortamda test edilerek belirlenmiştir. Bu çalışmada iki farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci çalışmada statik bir ortamda bir mobil robotun hem simülasyon hem de deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir. İkinci çalışmada ise önerilen yöntem literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

PSO algoritmasında parçacıkların hız değerine 0 değeri atanmaktadır. Ardından parçacıklara başlangıç değeri olarak, belirlenen kısıtlar(gerçek çevre ortamının boyutları) arasındaki değerlerden rastgele reel sayılar verilmektedir. Algoritmada bulunan parçacıkların hızları hesaplandıktan sonra, bu hızlara bağlı olarak parçacıklar hareket ettirilmekte ve yeni konumların uygunluk değerleri hesaplanmaktadır. İyi olan parçacıkların içerisinde en iyi konuma sahip olan (g_{best}) parçacıklar mobil robotun gideceği konumları belirlemektedir. Yol planlamada kullanılan PSO algoritmasının parametreleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1: PSO algoritmasının parametreleri

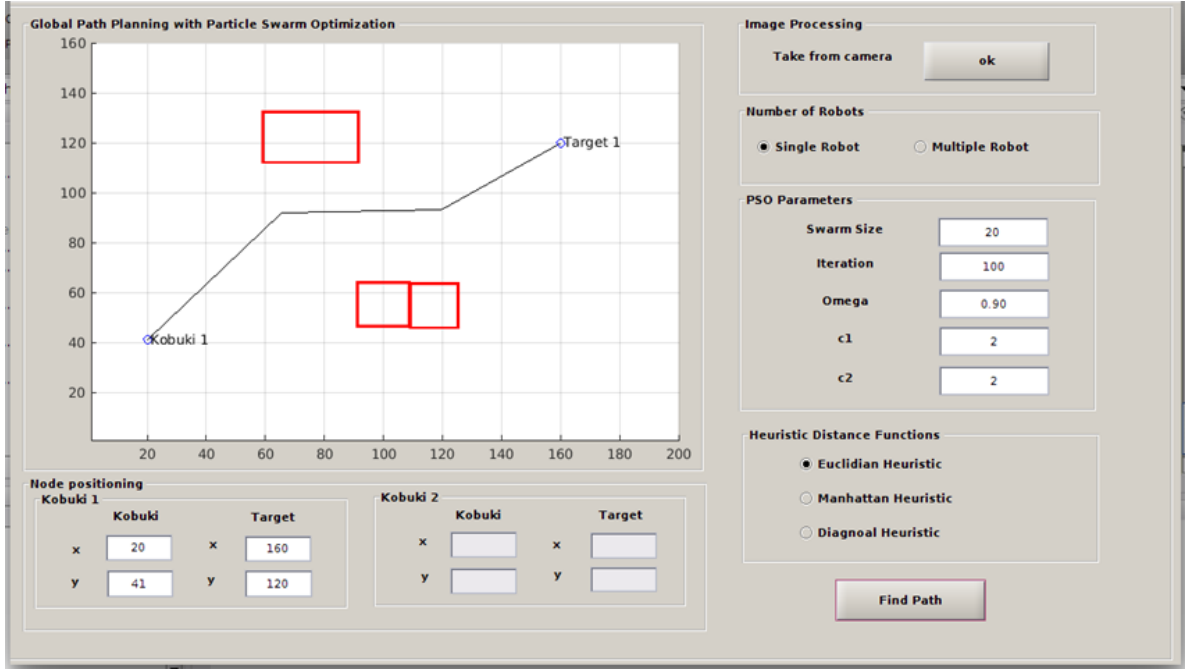
Parametreler	Popülasyon Boyutu	İterasyon	C1	C2	Omega
PSO	20	100	2	2	0.9

**Şekil 1:** Geliştirilen PSO tabanlı Global Yol Planlamanın Akış Diyagramı

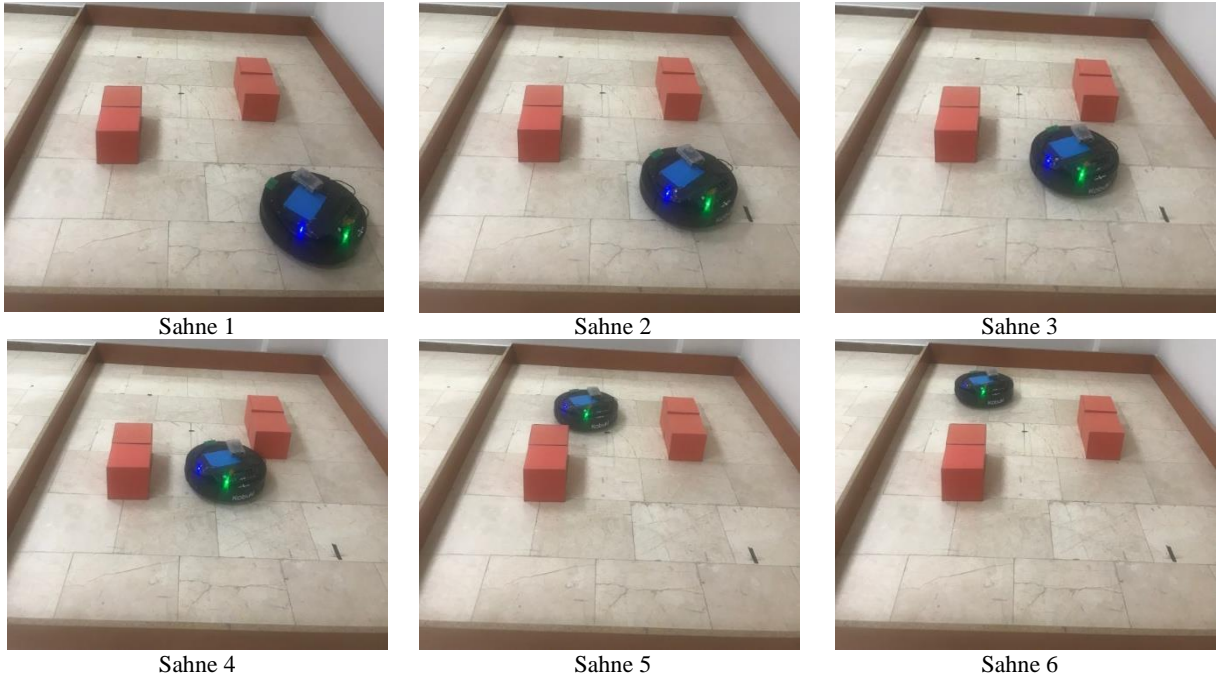
4.1 Statik ortamda yol planlama

İlk çalışmada engeller içeren statik ortamda algoritmanın etkinliğini göstermek amacıyla yol planlama tasarlanmış olan Şekil 2'deki arayüz kullanılarak hem simülasyon ortamında hem de Şekil 4'de verilen deneysel ortamda gerçekleştirildi. PSO tabanlı yol planlayıcının simülasyon ve deneysel çalışmalardan

elde edilen minimum, maksimum, ortalama yol uzunluk değerleri ve standart sapma, hata oranları verilmektedir.



Şekil 2: Statik engelli bir ortamda mobil robot için PSO tabanlı global yol planlama



Şekil 3: PSO tabanlı yol planlayıcının gerçek ortamda uygulanması

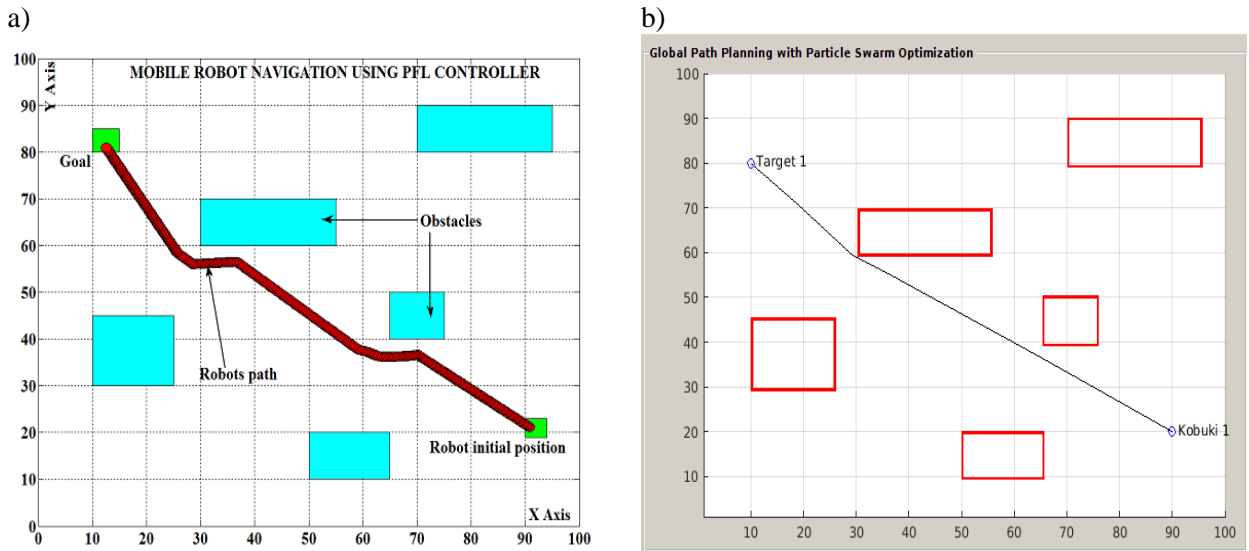
Tablo 2: PSO tabanlı yol planlayıcı tabanlı simülasyon ve deneysel çalışmadaki yol uzunluk değerlerinin karşılaştırılması

Performans Kriteri	Simülasyondan elde edilen yol uzunluğu(cm)	Deneysel çalışmadan elde edilen yol uzunluğu(cm)	% Hata
Ortalama	173.44	145.32	16.08
Minimum	169.65	145.39	14.30
Maksimum	196.45	152.65	22.29
Standart Sapma	8.09	2.77	

Tablo 2'e göre tekli mobil robot için PSO tabanlı yol planlayıcı kullanılarak oluşturulan simülasyon ve deneysel çalışmadaki yol uzunluk değerlerinin karşılaştırma sonucuna göre ortalama hata yaklaşık olarak %16 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritma, ortalama, minimum ve maksimum uygunluk değerleriyle en iyi yolu sağladığını göstermektedir.

4.2 Diğer Yol Planlama Algoritmalarıyla Karşılaştırılma ve Performans Analizi

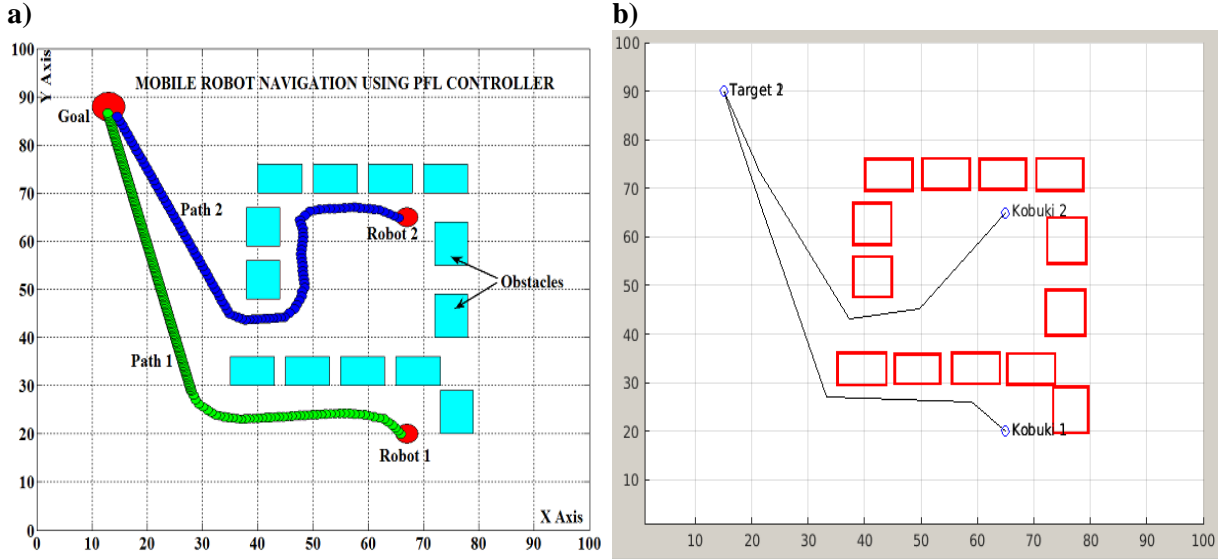
Optimum yol uzunluk parametre değerlerini karşılaştırmak amacıyla geliştirilen PSO tabanlı yol planlayıcısı ile diğer yol planlama algoritmaların performans analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki algoritma için de benzer ortamlarda tekli ve çoklu mobil robotlar yol planlaması için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Tekli ve çoklu mobil robotların global yol planlamada tarafımızdan geliştirilen PSO ve Patle ve ark. tarafından [12] geliştirilen PFL tabanlı yol planlayıcılardan elde edilen yol uzunluk değerleri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 4: a) Tek robot için PFL tabanlı mobil robot navigasyonu [12], b) Geliştirilen PSO tabanlı global yol planlama

Tablo 3: Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Senaryo 1	Geliştirilen PSO kullanılarak elde edilen simülasyon yol uzunluğu("cm")	PFL kullanılarak elde edilen simülasyon yol uzunluğu("cm") [12]	% Performans Farkı
	100.58	150.30	33.08

**Şekil 5:** a) Çoklu robot için PFL tabanlı mobil robot navigasyonu [12], b) Çoklu mobil robot için geliştirilen PSO tabanlı global yol planlama**Tablo 4:** Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Senaryo 1	Tarafımızdan geliştirilen PSO kullanılarak elde edilen simülasyon yol uzunluğu("cm")	PFL kullanılarak elde edilen simülasyon yol uzunluğu [12]	% Performans Farkı
Robot 1	99.86	162.00	38.30
Robot 2	89.62	122.80	27.01

Şekil 4 ve 5'te geliştirilen PSO tabanlı ve Patle tarafından geliştirilen Olası Bulanık mantık(PFL) tabanlı mobil robot yol planlayıcılardan simülasyon ortamındaki analizler gösterilmektedir. Verilere göre önerilen PSO algoritmasının tekli mobil robot yol planlamasında %33.08, çoklu robot yol planlamasında ise Kobuki robot 1 için %38.03 diğer Kobuki robot 2 için ise %27.01 yol uzunluğunun daha kısa olduğu saptanmıştır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada statik bir çevrede yol planlamada parçacık sürü optimizasyon algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemin daha rahat kullanılabilmesi için kullanıcı dostu bir arayüz tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına dayanarak, önerilen algoritmanın en kısa mesafe açısından diğer optimizasyon tekniklerine göre daha iyi performans gösterdiği açıktır. Ayrıca literatürde halihazırda mevcut olan yol planlama yöntemleriyle karşılaştırıldığında da daha iyi sonuçlar vermektedir. Gelecek çalışmalarda ise Ortamın haritası mobil robot üzerine yerleştirilecek LIDAR veya 360° görüntü alabilen kinect kamera gibi bazı

eklemeler yapılarak sistem geliştirilebilir. Böylece, robot kısıtlı bir laboratuvar ortamında değil de istenen herhangi bir ortamda da çalıştırılabilir.

References

- [1] R. Poli, “Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization”, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008.
- [2] A. Chatterjee, K. Pulasinghe, K. Watanabe, K. Izumi, “A particle-swarm-optimized fuzzy-neural network for voice controlled robot systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(6):1478–1489, 2005.
- [3] B. Deepak, D.R. Parhi, “PSO based path planner of an autonomous mobile robot”, *Cent. Eur. J. Comp. Sci.* 2(2):152-168, 2012.
- [4] Y. Zhang, D. Gong, J. Zhang, “Robot path planning in uncertain environment using multi-objective particle swarm optimization”. *Neuro computing* 103: 172–185, 2013.
- [5] Y. Tang, Q. Li, L. Wang, C. Zhang, Y. Yin, “An improved pso for path planning of mobile robots and its parameters discussion”, *Intelligent Control and Information Processing*, Dalian, China, 2010.
- [6] L. Wang, Y. Liu, H. Deng, Y. Xu, “Obstacle-avoidance path planning for soccer robots using particle swarm optimization”, *Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, 2006.
- [7] M. Saska, M. Macas, L. Preucil, L. Lhotska, Robot path planning using particle swarm optimization of ferguson splines. *Emerging Technologies and Factory Automation*, 2006.
- [8] A. Z. Nasrollahy, H. H. S. Javadi, “Using particle swarm optimization for robot path planning in dynamic environments with moving obstacles and target”. *Sim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*. 2009.
- [9] R. Solea, D. Cernega, “Online path planner for mobile robots using particle swarm optimization”, *ICSTCC*, Sinaia, Romania, 2016.
- [10] J. Kennedy, R.C. Eberhart, “Particle Swam Optimization”, *IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942-1948, 1995.
- [11] Z. Gao, X. Zeng, J. Wang, J. Liu, “FPGA implementation of adaptive IIR filters with particle swarm optimization algorithm”, *Communication Systems*, 2008.
- [12] B.K. Patle, D.R. Parhi, “On firefly algorithm: optimization and application in mobile robot navigation”, *World Journal of Engineering*, 14(1): 65–76, 2017.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).