
Makale / Research Paper

Sonar Algılayıcılar ve Sezgisel Yöntemler ile Otonom Robotlarda Engelden Sakınım ve Yol Bulma

Rasim TOPUZ¹, Mehmet YILDIRIM²

¹ Kocaeli Üniversitesi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, 41380, Kocaeli, TÜRKİYE

² Kocaeli Üniversitesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, TÜRKİYE
rtopuz@yahoo.com , myildirim@kocaeli.edu.tr

Geliş/Received: 11.11.2015

Düzeltilme/Revised: -

Kabul/Accepted: 10.12.2015

Özet: Otonom robotlar günümüzde birçok alanda önemli görevler icra etmektedirler. Robot, kendisine verilen bir görevi yerine getirirken, hedefe ilerlemek için yol bulma problemini çözmeli ayrıca kendi bekasını korumak için, algılayıcıları yardımıyla çevreden elde ettiği verileri kullanarak, varsa olası bir çarpışmayı önlemek için statik veya dinamik olarak engellerden sakınma yapabilmelidir.

Bu çalışmada, sonar algılayıcılar ve sezgisel yöntemler kullanarak, robotların engelden sakınım ve yol bulma probleminin çözümüne ilişkin bir otonom robot seyir sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, laboratuvar ortamında kameradan alınan resim bilgisi, resim işleme teknikleri ile engelleri de içerecek şekilde harita haline getirilmiş, hibrit bir algoritma olarak tasarlanmış seyir sistemi içinde, genetik algoritma yardımıyla global yol bulma problemi çözümlenirken, dinamik engellerden sakınmak amacıyla da çeşitli engelden sakınma yöntemleri uygulanmıştır. Çalışmalar, öncelikle MobileSim benzetim ortamında denenmiş ve ardından Pioneer 3-dx robot üzerinde ayrıca gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Otonom robot, Engelden sakınım, Sonar

Path Finding and Obstacle Avoidance of Autonomous Robots by Using Sonar Sensors and Heuristic Methods

Abstract: Today autonomous robots are performing important tasks in different fields. While performing a task, the robot should solve the path finding problem to reach the target point, additionally to protect the survival of itself it should practice dynamic or static obstacle avoidance activity for avoiding a possible collision by using the data acquired by its sensors from the environment.

In this study, a robot navigation system was developed for path finding and obstacle avoidance of robots by using sonar sensors and heuristic methods. In this context, first the environment map was created by using the image processing techniques and the camera image of the laboratory. In the navigation system, developed as a hybrid algorithm, while the path finding problem was solved with genetic algorithm, various obstacle avoidance methods were applied to avoid from dynamic obstacles. The algorithms were first simulated on MobileSim simulation environment, additionally implemented on Pioneer 3-dx mobile robot.

Keywords: Autonomous robots, obstacle avoidance, sonar

Bu makaleye atıf yapmak için

Topuz, R., Yıldırım, M., "Sonar Algılayıcılar ve Sezgisel Yöntemler ile Otonom Robotlarda Engelden Sakınım ve Yol Bulma" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2016, 3(2); 363-371.

How to cite this article

Topuz, R., Yıldırım, M., "Path Finding and Obstacle Avoidance of Autonomous Robots By Using Sonar Sensors and Heuristic Methods" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2016, 3(2); 363-371.

1. Giriş

Otonom robotlar, birçok alanda önemli görevler icra etmektedir. Görev alanları askeri alandan bilimsel alanlara, endüstriden günlük yaşama çok geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Otonom olma özelliği, bir robotun karşısına çıkabilecek önceden bilinen ya da beklenmedik durumlar karşısında, insan yardımı olmadan kendi kendine karar verebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Mars'ta araştırmalar yapmakta olan Curiosity [1] ve kalabalık fuarlarda bağımsız olarak rehberlik yapan RoboX [2] ilk akla gelebilecek kullanımdaki otonom robot örnekleridir.

Robot, kendisine verilen bir görevi yerine getirirken, hedefe ilerlemek için yol bulma problemini çözmeli ayrıca kendi bekasını korumak ve çevreye zarar vermemek için, algılayıcıları yardımıyla çevreden elde ettiği verileri kullanarak, varsa olası bir çarpışmayı önlemek için statik veya dinamik olarak engellerden sakınma yapabilmelidir.

Robotlarda yol bulma ve engelden sakınma üzerine literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Yol bulma odaklı çeşitli yöntemler geliştirilirken, engelden sakınma odaklı olarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Yol bulma ve engelden sakınma algoritmalarını birlikte kullanan hibrit çalışmalar da son zamanlarda üzerinde çalışılan konulardır.

2. Yol Bulma

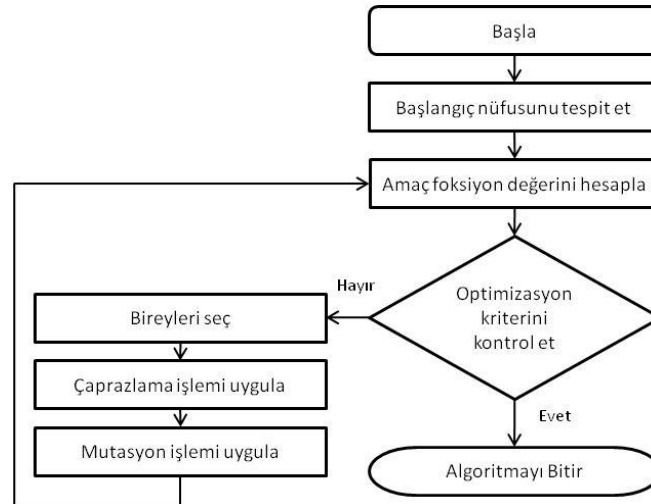
Robotlarda yol bulma problemi, iki nokta arasında en kısa ve en az maliyetle gidilebilen yolun belirlenmesi olarak açıklanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda, Dijkstra [3], A* (A-yıldız) [4], D* (D-yıldız) [5], potansiyel alan metodu [6] ve genetik algoritma [7] gibi çeşitli algoritma ve yöntemler geliştirilmiştir. Bu algoritmalar genellikle graf teorisi ve yapay zeka tabanlı algoritmalarlardır. Ayrıca karşılaştırıldıklarında her bir metodun kendine özgü avantajları olduğu gibi, dezavantajlarının da bulunduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, probleme yönelik en uygun algoritmanın seçilmesi oldukça önemlidir.

Yol bulma algoritmaları farklı açılardan çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Kesinlik durumlarına göre sezgisel ve tam algoritmalar olarak ayrılabilir. Sezgisel algoritmaların amacı, kısa zamanda kaliteli bir sonuç elde etmek için arama yapmaktır. Bununla birlikte, tam algoritmaların amacı, eğer mevcut ise optimum sonucu bulmak veya mümkün bir kesin sonuç olmadığını ispatlamaktır. Tam algoritmaların genellikle hesaplama maliyetleri yüksek olabilmekte, diğer tarafta, sezgisel algoritmalar da zor problemler için iyi yolu bulmakta yetersiz kalabilmektedirler [8].

Yol bulma problemi, en kısa yolun ya da en az maliyetli yolun bulunması olarak düşünüldüğünde bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir. Son yıllarda, sezgisel bir algoritma olan genetik algoritma (GA) kullanılarak en kısa yol problemine ilişkin çözüm aramaları yapılmaktadır [9-12].

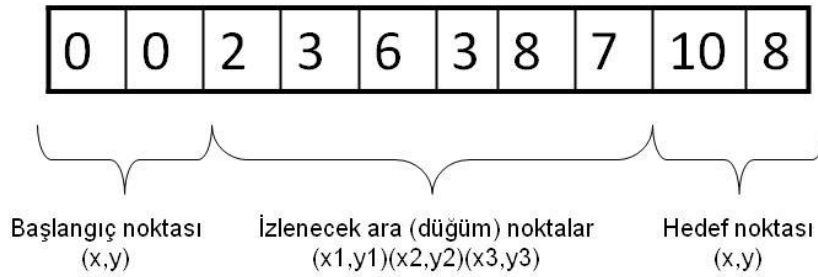
Genetik algoritmalar, temel ilkeleri John Holland [7] tarafından ortaya atılmış, genetik bilimine dayanan bir optimizasyon tekniğidir. Genetik alanındaki çaprazlama, mutasyon, doğal seçim gibi biyolojik süreçlerden esinlenerek geliştirilmiş, bu süreçleri matematiksel olarak modelleyerek, fonksiyonları optimize eden bir algoritmadır. İteratif olarak çalışmakta ve rastlantısal olarak arama yapmaktadır. GA, doğadaki "güçlü olan birey hayatta kalır [13]" prensibine bağlı kalarak, popülasyondaki iyi bireylere yaşama şansı vermekte ve popülasyonu oluşturan bireylerin, yani aday çözümlerin, kuşaktan kuşağa iyileşmesini sağlamaktadır. Bu özelliğiyle GA, tamamen rastgele bir arama değil, geçmiş kuşaklardaki genetik verilere dayalı olarak bir arama gerçekleştirilmektedir.

GA'nın çalışma prensibi kısaca Şekil 1'deki akış diyagramı ile özetlenebilir.



Şekil 1. Genetik algoritma akış diyagramı

GA'da çözüm uzayındaki olası tüm çözümler bir dizi olarak kodlanır. Bu kodlanmış diziler GA'nın kromozomlarını veya diğer ismiyle bireylerini ifade eder. Kromozomu oluşturan genler, çözümü oluşturan parametrelerdir. Çalışmada, 10x8'lik bir grid alan üzerinde, tam sayı ile kodlanmış kromozomlar kullanan genetik algoritma ile en kısa yol problemi çözülmektedir. Şekil 2'de, çalışmada kullanılan kromozom yapısı görülmektedir.



Şekil 2. Genetik algoritmada kullanılan kromozom yapısı

Çalışmada amaç fonksiyonu engellere çarpmadan başlangıç ile hedef arasındaki en kısa yolu bulmak olarak tanımlanmıştır. Eş.1 ve Eş.2 çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu göstermektedir.

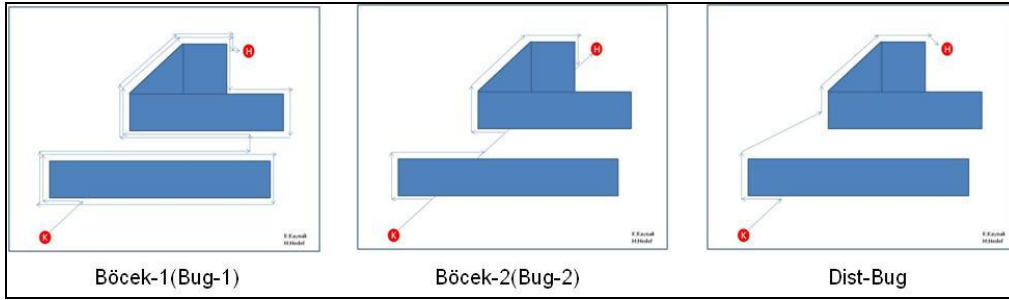
$$f = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) & , \text{engel yoksa} \\ \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) + \sum_{j=1}^m \text{ceza} & , \text{engel varsa} \end{cases} \quad (1)$$

$$d(p_i, p_{i+1}) = \sqrt{(x_{(i+1)} - x_i)^2 + (y_{(i+1)} - y_i)^2} \quad (2)$$

Burada; f amaç fonksiyonu, p kromozomdaki genleri, n kromozomdaki gen sayısını, d iki nokta arasındaki mesafeyi, m iki nokta arasındaki engel sayısını ifade etmektedir. İki nokta arasında herhangi bir engel var ise, amaç fonksiyona ceza puanı eklenmektedir. En iyi birey amaç fonksiyon değeri en küçük olan birey olarak tanımlandığı için, engel üzerinden geçen birey cezalandırılarak seçilme olasılığı azaltılmaktadır.

3. Engelden Sakınma

Engelden sakınım veya çarpışma önleme, otonom robotun güzergahı üzerindeki öngörülebilir veya görülemeyen engellerden sakınma amacıyla yapılan bir faaliyetler dizisidir. Bu amaçla, çeşitli engelden sakınma algoritmaları geliştirilmiştir. Böcek algoritmaları bu konuda ilk örnekler olmalarının yanı sıra, en çok kullanılan algoritmalar olma özelliğini de taşımaktadırlar [14]. Böcek algoritmalarının; Böcek-1, Böcek-2 ve Dist-bug olarak üç ana türü bulunmaktadır [15]. Ortak özellikleri, bir engelle karşılaşılması durumunda robotun, engel etrafında dolaşmasını sağlamalarıdır. Şekil 3’de böcek algoritmalarında robotun hareketi görülmektedir.



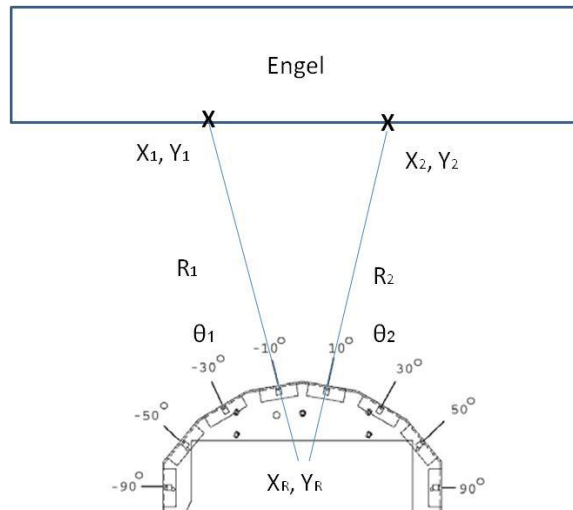
Şekil 3. Böcek algoritmalarında robot hareketi

Bu çalışmada, engelden sakınma amacıyla Dist-bug algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmada, robot bir engel ile karşılaştığında engelin etrafında ilerlemeye devam etmekte, bu esnada hedefe olan mesafeyi ve önündeki açık alanı kullanarak, hedefe en yakın noktada engelden ayrılmaktadır.

Engelden sakınma algoritmalarındaki en önemli girdi, engelden alınan sonar sinyalleridir. Çalışmada kullanılan Pioneer 3-dx robotun önünde bulunan 8 adet sonar yardımı ile, robot önündeki engeller tespit edilerek engelden sakınma algoritmaları test edilmiştir.

Engel ile karşılaşıldığında, çevresinden en basit şekilde dolaşılması amacıyla öncelikle engelin eğimi hesaplanmış ve bu eğime göre robot yönü ayarlanarak, engele paralel bir şekilde engel etrafından dolaşım sağlanmıştır.

Engelin eğiminin hesaplanması için ilk olarak, Şekil 4’de görülen robotun, engelden almış olduğu sonar sinyalleri aracılığı ile robot üzerindeki x_1, y_1 ve x_2, y_2 koordinatları hesaplanır. X_R, Y_R ; robotumuzun bulunduğu mevki ve yönü, R_1, θ sonar mesafeleri ve açıları olarak belirtilirse, X_1 ve Y_1 koordinatları Eş.3 ile hesaplanabilir.



Şekil 4. Engel ile karşılaşan robotun durumu

$$X_1 = X_R + \cos((\theta_1 - \theta_R) * \pi / 180) * R_1$$

$$Y_1 = Y_R + \sin((\theta_1 - \theta_R) * \pi / 180) * R_1$$

(3)

İkinci adımda ise, engele ait X_1, Y_1 ve X_2, Y_2 noktalarını kullanarak engelin eğimi Eş.4 ile hesaplanabilir.

$$S_0 = \text{ATAN}((Y_1 - Y_2) / (X_1 - X_2)) * \pi / 180$$

(4)

Son adım olarak, engelin eğimi tespit edildiğinde, verilen eşik değerine ulaşıldığı anda, robotun yönü eğime paralel olarak ayarlanmakta ve engelin etrafında etkin bir dolaşım sağlanabilmektedir. Burada unutulmaması gereken önemli husus, engel etrafında dolaşırken, düzenli olarak, yine engelin eğimi hesaplanmaya ve rota düzeltilmesi yapılmaya devam edilmesidir. Ancak bu şekilde farklı geometrik formlardaki engellerin de etrafından dolaşım sağlanabilmektedir.

Geliştirilen ilk algoritmalarda, eğim hesaplanmadan engelin etrafında dolaşım yöntemi ele alınmıştır. Ancak bu durumda, robot engel ile belirlenen mesafeye geldiğinde rotasını sola çevirmekte ve sürekli olarak bir sonraki düğüm noktası veya hedefe gitmek için tekrar rota düzenlemesi yapmakta ve işlemlerin tekrarı yardımı ile engelin etrafında dolaşabilmektedir.

Engelin etrafından, engelin yüzey eğiminin tespit edilerek dolaşımının sağlanması algoritmalarda önemli ölçüde kazanç sağlamış, gereksiz rota düzeltilmesi ihtiyacını ortadan kaldırmıştır.

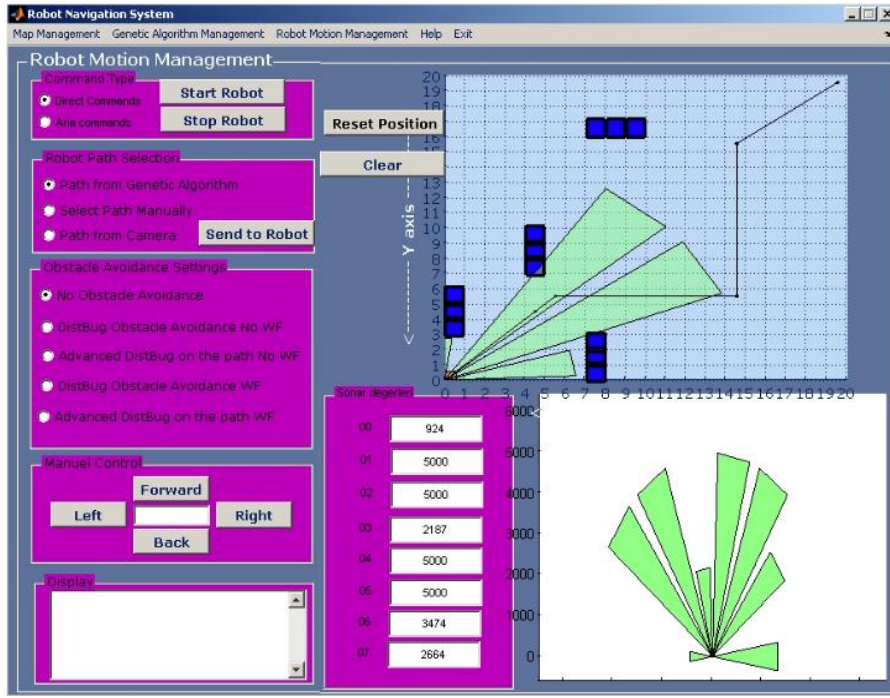
4. Robot Seyir Sistemi

Geliştirilmiş algoritmanın test edilmesi amacıyla, Şekil 5'te gösterilen bir robot seyir sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemde özetle; iç mekan tavanına yerleştirilmiş bir kamera aracılığı ile ortamın resmi alınarak, ortamdaki engeller tespit edilmiş, genetik algoritma ile engelli bir ortamda hedefe ulaşmak için engele çarpmayan en kısa yol planlanarak, rota üzerindeki ara düğüm noktaları tespit edilmiştir. Sonraki aşamada, bu düğüm noktaları robota iletilmiş ve robotun dinamik engellerin bulunduğu bir ortamda sonar algılayıcılar yardımı ile engelden sakınma yaparak hedefe ilerlemesi sağlanmıştır. Son aşamada, engelden sakınma ve hedefe ilerleme amacıyla robota iletilen rota ve sürat bilgileri robotun motor ve tekerlerine iletilmiştir.



Şekil 5. Tasarlanan robot seyir sistemi yapısı

Konuyla ilgili ayrıca, Şekil-6'de ekran görüntüsü verilen bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Bu arayüz aracılığı ile ortam bilgileri ve yol bulma algoritması parametreleri değiştirilebilmekte, robottan gelen sonar bilgileri kullanıcıya sergilenebilmekte ve seçilen engelden sakınma yöntemine göre robotun en uygun şekilde hedefe ilerlemesi sağlanmakta, bu esnada robot hareketleri yazılım üzerinden de izlenebilmektedir. Yazılım, MATLAB ortamında, ARIA kütüphanelerinin etkin kullanımı ile geliştirilmiştir.



Şekil 6. Geliştirilmiş arayüze ait ekran görüntüsü

Arayüz üç ana ekrandan oluşmaktadır. Bunlar; harita yönetimi (map management), genetik algoritma yönetimi (Genetic algorithm management) ve robot hareket yönetimidir (robot motion management).

Harita yönetim ekranı aracılığı ile tavandaki kamera yardımı ile otomatik olarak ortamdaki engel bilgilerine göre harita oluşturulabilmektedir. Kullanıcı ayrıca manuel ayarlamayı seçerek, harita üzerinde engelleri yerleştirebilmekte, robotun ve hedefin konumunu ayarlayabilmektedir.

Genetik algoritma yönetimi ekranı aracılığı ile oluşturulmuş haritadaki robotun, engellerin ve hedefin konumu bilgileri kullanılarak genetik algoritma ile yol bulma problemi çözülebilmektedir. Bu ekranda genetik algoritma ile ilgili kullanıcının farklı parametreleri kullanarak, algoritmanın işleyişini de deneyebilmesi sağlanmıştır.

Robot hareket yönetimi ekranı yardımı ile, ister benzetim ortamında isterse gerçek robota bağlanarak robot manuel olarak kumanda edilebilmektedir. Ayrıca robota elle veya genetik algoritma yardımı ile hazırlanmış yol bilgisi ve düğüm noktaları da iletelebilmekte, robotun bağımsız olarak hedef noktaya düğümler aracılığı ile gitmesi sağlanmaktadır.

Robot kendisine verilmiş yol bilgisi üzerinden hedefe ilerlerken, engelden sakınma algoritması kullanıp kullanmayacağı belirtilmektedir. İstenen engelden sakınma algoritması seçilmek suretiyle, robotun hedefe ilerlerken karşılaştığı engellere çarpmadan, emniyetli bir şekilde yoluna devam etmesi sağlanmaktadır.

Ekranın sağ tarafında robota gönderilen harita bilgisi ile engel ve hedeflerin konumları gösterilmektedir. Haritanın altında robotun sonar algılayıcılarından tespit edilen, sonar verileri rakamsal ve görsel olarak kullanıcıya sergilenmektedir.

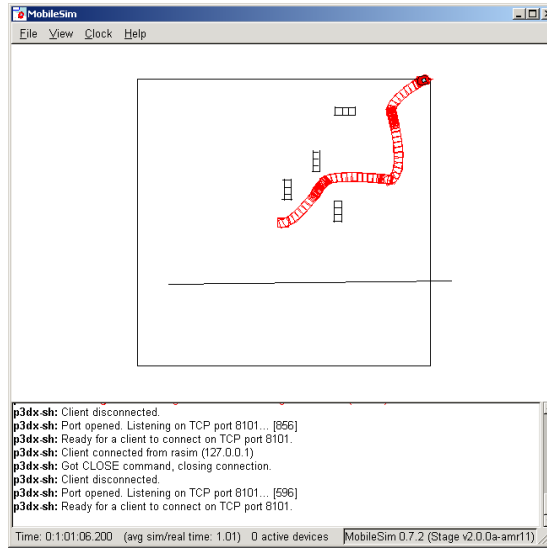
Robota yol bilgisi ve engelden sakınma bilgileri verildikten robot bağımsız bir şekilde ilerlemekte, bu esnada konum bilgisi arayüz içindeki harita üzerinde de izlenebilmektedir. Robotun harita üzerindeki ilerleyişi esnasında, robotun sonar verileri de görsel olarak kullanıcıya sergilenmektedir.

5. Benzetim ve Gerçekleme

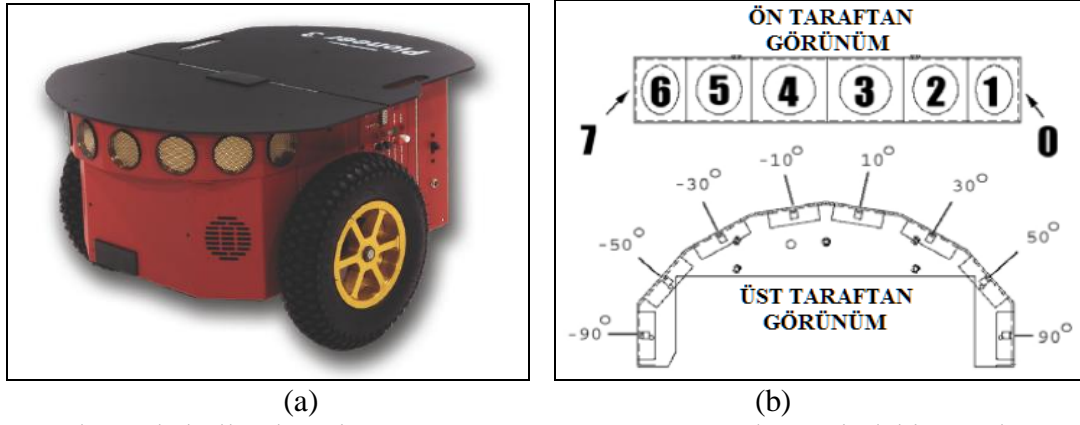
Geliştirilmiş olan robot seyir sistemi ve geliştirilen algoritmalar ilk etapta MobileSim benzetim ortamında test edilmiştir. MobileSim, açık kaynak kodlu player/stage projesi temel alınarak, Active Media şirketi tarafından geliştirilmiş olan bir benzetim yazılımıdır [16]. Player/Stage gibi açık kaynak kodludur. Robot kontrol programı Aria ile haberleşebilmektedir. Bu benzetim ortamı kullanılarak da çalışmalar robot olmadan yapılabilen, kullanılan algoritma ve programlar değişiklik yapılmaksızın, gerçek robot üzerinde uygulanabilmektedir.

Benzetim ortamında, gerçeğe en yakın şekilde ortam oluşturmak amacıyla MapperBasic uygulaması ile hazırlanmış ortam haritaları kullanılmıştır. Bu sayede benzetim ortamında, sonar değerlerinin alınabileceği engeller tanımlanabilmiş bunlar üzerinden yol bulma ve engelden sakınma algoritmaları test edilmiştir. Şekil 7’de MapperBasic yardımı ile hazırlanmış bir harita kullanan MobileSim benzetim ortamında ilerlemiş robotun hareket izleri görülmektedir.

Benzetim ortamında yapılan çalışmalar, ayrıca laboratuvar ortamında Pioneer 3-dx mobil robotu üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 8 (a)). Pioneer 3-dx [17] akademik çalışmalar için son derece popüler bir araştırma geliştirme gezgin robotudur. Pioneer 3-dx gezgin robot, ActiveMedia firması tarafından üretilmektedir ve üzerinde iki adet diferansiyel ve bir adet mobilya tekerlek bulunmaktadır. Özellikle engelden sakınma aşamalarında robot üzerinde bulunan 8 adet sonardan (Şekil 8 (b)) aktif olarak yararlanılmıştır. Sonar algılayıcıların birer tanesi yanlarda, kalan 6 tanesi ise 20 şer derecelik açılar ile yerleştirilmiş bulunmaktadır. Bu sayede çevrenin 180 derecelik kontrolüne imkan sağlanabilmektedir. Sonar değerleri robottan mm olarak rapor edilmektedir. Bu kapsamda maksimum 5 metreye kadar engeller görülebilirken, 17 mm den daha yakın nesnelere görülemezdir.



Şekil 7. MobileSim benzetim yazılımında robotun hareket izleri



Şekil 8.a) Çalışmada kullanılan Pioneer 3-dx robot; b) Pioneer 3-dx üzerindeki sonarların yerleşimi

6. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, sonar algılayıcılar ve sezgisel yöntemler kullanarak, robotların engelden sakınım ve yol bulma probleminin çözümüne ilişkin bir otonom robot seyir sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, hibrit bir algoritma oluşturulmuş, genetik algoritma yardımıyla global yol bulma problemi çözülürken, dinamik engellerden sakınmak amacıyla da çeşitli engelden sakınma yöntemleri uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında öncelikle engelden sakınma olmadan sadece yol bulma algoritması ile sistem test edilmiştir. İlk okunan harita bilgilerinden sonra, eğer ortamda engellerin konumu değişmemiş ise, bu yöntemin başarılı olduğu gözlenmiştir. Ancak dinamik engellerin olduğu bir ortamda, ilk harita sonrasında ortaya çıkan yeni engeller durumunda sadece yol bulma algoritmasının yeterli olmadığı görülmüştür.

Engelden sakınma ile ilgili olarak duvar takip yapmadan dist-bug algoritmasının uygulanması sonucunda, yeni ortaya çıkan engeller durumunda planlandığı gibi robotun çarpışma önleyici hareket yapması sağlanmış, ancak duvar takibi yapılmadığı için, robotun fazladan manevralar yaptığı görülmüştür.

Duvar takip özelliği ile dist-bug algoritmasının sistemde devreye alınması sonucunda, dinamik engellerde başarı ile çarpışma önleyici hareketler gözlenmiş ayrıca, duvar eğimi hesaplanarak yapılan duvar takibi sayesinde, gereksiz manevralar yapılmadan engelden sakınma icra edildiği görülmüştür.

Çalışmalar, öncelikle MobileSim benzetim ortamında denenmiş ve ardından Pioneer 3-dx robot üzerinde ayrıca gerçekleştirilmiştir. Otonom seyir sistemi için bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Robot seyir sisteminin hedeflendiği şekilde, çıkartılan harita yardımı ile yol bulma ve engelden sakınma aşamalarını başarı ile icra ettiği görülmüştür. Geliştirilen arayüz sayesinde farklı algoritmalar test edilebilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Bajracharya, M., Maimone, M. W., Helmick, D., "Autonomy for Mars rovers: Past, present, and future", Computer, 41(12) (2008), 44-50.
- [2] Philippsen, R., Siegwart, R., "Smooth and efficient obstacle avoidance for a tour guide robot", (2003) (No. LSA-CONF-2003-018).

- [3] Dijkstra, E. W., "A note on two problems in connexion with graphs", *Numerische mathematik*, 1(1) (1959), 269-271.
- [4] Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B., "A formal basis for the heuristic determination of minimum costpaths", *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 4(2) (1968), 100-107.
- [5] Stentz, A., "Optimal and efficient path planning for partially-known environments", *Inproceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1994) pp. 3310-3317.
- [6] Rimon, E., Koditschek, D. E., "Exact robot navigation using artificial potential functions", *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 8(5) (1992), 501-518.
- [7] Holland J. H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan (1975)
- [8] Elshamli, A., Abdullah, H., Areibi, S., "Genetic algorithm for dynamic path planning", In 2004 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2 (2004), pp. 677-680.
- [9] Hu, Y., Yang, S. X., "A knowledge based genetic algorithm for path planning of a mobile robot", In proceedings 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'04, Vol.5 (2004), pp. 4350-4355.
- [10] Tuncer, A., Yıldırım, M., "Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm", *Computers and Electrical Engineering*, 38(6) (2012), 1564-1572.
- [11] Gao, M., Xu, J., Tian, J., Wu, H., "Path planning for mobile robot based on chaos genetic algorithm", *Fourth International Conference on Natural Computation, ICNC'08, Vol.4* (2008), pp.409-413.
- [12] Wai, R. J., Liu, C. M., Lin, Y. W., "Design of switching path-planning control for obstacle avoidance of mobile robot", *Journal of the Franklin Institute*, 348(4) (2011), 718-737.
- [13] Golberg, D. E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", AddisonWesley, (1989).
- [14] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., and Scaramuzza, D., (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*, MIT Press.
- [15] Yufka, A., Parlaktuna, O., "Performance comparison of bug algorithms for mobile robots", In *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA'09)* (2009), pp. 416-421.
- [16] <http://www.mobilerobots.com/software/mobilesim.aspx> (ziyaret tarihi: 1 Nisan 2015).
- [17] <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/Pioneer3DX.aspx> (ziyaret tarihi: 10 Temmuz 2015)