

# MOBİL ROBOTLAR İÇİN ENGELDEN SAKINDIRAN VE HEDEFE YÖNLENDİREN KATMANLI DENETİM YÖNTEMİ

Selim YANNIER<sup>1</sup>

Asif ŞABANOVIÇ<sup>2</sup>

Ahmet ONAT<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Mekatronik Mühendisliği Programı  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Sabancı Üniversitesi, Orhanlı Mevkii, 81474, Tuzla, İstanbul

<sup>1</sup>e-posta: selimy@su.sabanciuniv.edu

<sup>2,3</sup>e-posta: {asif, onat}@sabanciuniv.edu

*Anahtar sözcükler: mobil robot, çarpışmadan kaçınma, hedefe yönelme, çoklu robot sistemleri, tepkin sistemler*

## ÖZET

*Bu bildiride mobil robotlar için yeni bir denetim yöntemi tasarımı önerilmiştir. Önerilen yöntem bu tip robotlar için gereken en az sayıda denetim kuralını yaratmakta kullanılır. Bu denetimler engel algılama ve çarpışmadan kaçınma denetimi, hedef noktasına ulaşma denetimi ve iletişimdir. Her bir denetim farklı bir katman halinde tasarlanmıştır. Her katman kendi başına robota kumanda edecek yeterlidir. Bununla birlikte, katmanlar eşzamanlı olarak çalışmakta ve robotun tüm hareketlerini kendi amaçları doğrultusunda etkilemektedirler. Ayrıca robotların yapabileceği diğer işler bu denetim katmanlarındaki parametreleri değiştirerek veya yeni denetim katmanları eklenilerek sağlanabilir. Yöntemin getirdiği en büyük avantajlardan birisi ise, yaratılan robotların, hiçbir değişiklik olmadan çoklu robot sistemler için birey olarak kullanılabilmesidir. Yüksek güvenilirlik ve uygulandığı platformdan bağımsız olması sistemin diğer önemli avantajlarından.*

## 1. GİRİŞ

Günümüzde robotların kullanım alanları gittikçe artmaktadır. Özellikle endüstriyel ortamlarda, üretim, montaj, paketleme ve benzer işler için binlerce robot kullanılmaktadır. Ortam verilerinin değişmediği, işlerin sonsuz bir döngü halinde ardı ardına gerçekleştiği bu gibi ortamlarda birçok robot birbiri ile koordineli olarak çalışmaktadır. Böylece, çoklu robot sistemler, her bir robotun fiziksel limitlerinin ötesinde olan işleri kolaylıkla yapabildiği gibi her birinin yapabileceği işleri de beraber yaparak toplam işlem süresini kısaltmaktadırlar. Benzer ortak çalışma yöntemleri, gerçek dünyada da mobil robotlar ile denenmektedir.

Ortam özelliklerinin sıklıkla ve hızlıca değiştiği gerçek dünyada, mobil robotlar, karşılaştıkları engellere çarpmadan ilerleyerek istenilen noktaya ulaşabilmeli ve diğer robotlarla iletişim kurabilmelidir. Üstelik eş zamanlı olarak kendi kaynaklarını denetleyebilmeli ve mümkün olduğunca kendi keline yetebilmeli, yani otonom olmalıdırlar.

Mobil robotlar için denetim sistemlerinin geliştirilmesinde iki temel yöntem vardır. Birinci yöntem, deliberatif denetim (deliberative control), robotun çalıştığı ortam hakkında her türlü bilgiye sahip olduğunu varsayar. Robot her hareketinde etrafını algılar, fark ettiği ortamsal değişiklikleri bilgilerinde günceller, yeni bir iş planı yaratır ve uygulamaya başlar. Görüldüğü gibi denetim, seri olarak yerleştirilmiş birtakım bloklardan oluşmaktadır. Bu tip sistemlerin en büyük dezavantajı tüm bilgilerin kullanıcı tarafından önceden girilmesidir. Ayrıca denetim sürekli olarak ortamın değişmediğini varsaymakta (sadece algılayıcılarının sınırları içinde kalan alanı güncellemektedir) ve bu bilgilere göre bir optimum iş planı hazırlamaktadır. Ancak, ortamdaki köklü değişiklikler robotun hareket etmesini imkansızlaştırabilir. Hareketli engellerin tanınması ve çarpışmaların engellenmesi de oldukça zordur. Robot böyle bir engelle karşılaşıncı öncelikle engelin daha sonraki adımlarını tahmin etmeli ve hareket planlarını buna göre yapmalıdır. Açıkça görülmektedir ki bu tip bir yaklaşımda, oldukça kuvvetli işlem gücü ve tüm ortam bilgilerini tutabilecek bellek alanlarına ihtiyacı vardır. Ayrıca bloklardan herhangi birinde oluşan bir hata tüm sistemin durmasına sebep olacaktır.

Bir diğer denetim metodu Brooks tarafından 1985 yılında ortaya atılmıştır. Bu yaklaşımda robotun denetim sistemi, birbirine paralel, değişik katmanlardan oluşmuştur ve robotun önceden ortam ile ilgili herhangi bir bilgiye sahip olması gerekli değildir. Katmanlar önem ve öncelik sırasına göre üst üste dizilmiştir ve tek başlarına robota kumanda edebilecek konumdadırlar. Her bir katman kendi çalışmasını yürütür ve sadece gerekli gördükçe bir çıktı üretir. Bu çıktı Brooks'un kendi uygulamalarında motor dönüş yönü şeklinde idi. Bir çok katmanın aynı anda çıktı üretmesi oldukça yüksek bir ihtimaldir. Bu gibi durumlarda sadece en üst katmanın çıktısı çalıştırılır. Bu tip denetim sistemleri tepkin sistemler (reactive system) olarak adlandırılmaktadır.

Bu denetim yönteminin getirdiği birçok avantaj vardır. Platformdan bağımsız olarak çalışabilme, düşük bilgi-işlem güç gereksinimi, kolay programlanabilirlik bunların en başında gelenlerdir. Ancak, katmanlardan gelen bilgilerin değerlendirilip optimum için seçilmesi veya robotun her amacına hizmet edecek bir orta nokta bulunması oldukça zordur. Bu zorluk ise sistemin en temel dezavantajıdır.

Brooks'un sistemi oldukça popüler hale gelmiş ve üzerinde birçok önemli bilim adamı çalışmalar yapmıştır. Her bir katmanın yapacağı işler tek tek sorgulanmış, geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır. Öğrenme algoritmaları, yapay sinir ağları, bulanık mantık algoritmaları denenmiştir. Bununla birlikte her bir katmanın çıktısını, tüm robotun hareketlerine nasıl yansıtılacağı sorgulanmıştır. Hareket seçimi veya davranış seçimi olarak adlandırılan bu alanda da önemli çalışmalar olmuştur.

Bir kısım bilim adamı ise her iki metodu, deliberatif ve tepkin denetim sistemlerini, birleştirmeyi denemiştir.

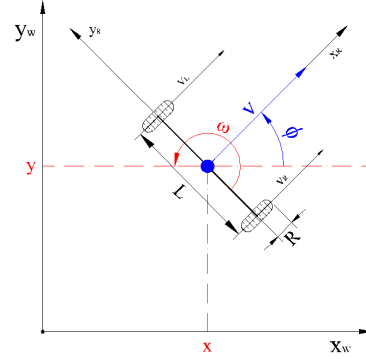
Bu bildiride mobil robotlar için bir yeni bir tepkin denetim yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşım dört katmandan oluşmaktadır. Birinci katman robotun gövdesi, motor, motor sürücüler ve alt seviye motor denetim ünitesini kapsar. İkinci katman engelleri denetleyen ve çarpışmayı engelleyen katmandır. Üçüncü katman robotu istenilen konuma sürükler. Dördüncü katman ise iletişim olarak seçilmiştir. Diğer kullanıcı katmanları ise üç ve dördüncü katmalar arasına yerleştirilmelidir. Bildirinin devamında robot kısaca tanıtılmış, sistem hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca benzetim sonuçları da sunulmuştur.

## 2. ROBOT'UN GENEL YAPISI VE ALT SEVİYE HAREKET DENETİMİ

Bu bildiride mobil robotlar için denetim sistemi tartışılmaktadır. Öncelikle robotun genel yapısının tanıtılmasında fayda görülmüştür. Tüm çalışmalarda kullanılan robot, tekerlek seti (wheel set) olarak da adlandırılan, diferansiyel tahrikli (differential drive) tiptedir. Buna göre robotumuz yuvarlak bir gövde ve merkezden geçen bir hattın her iki yönüne yerleştirilmiş iki tekerlekten oluşmaktadır. Robotumuzun iki adet denetim değişkeni vardır: sağ ve sol tekerleri süren motorların açısal hızları, sırasıyla  $\omega_R = v_R/R$  ve  $\omega_L = v_L/R$  (Bakınız Şekil 1). Burada  $\omega_R$  sağ,  $\omega_L$  sol motorun açısal hızını,  $v_R$  ve  $v_L$  ise aynı motorlara bağlı tekerlerin doğrusal hızlarını gösterir.  $R$  ise tekerlerin yarıçapıdır.

Ayrıca Şekil 1'de açıkça görüldüğü üzere robotumuzun üç adet durum değişkeni vardır; robotun  $x$  konumu,  $y$  konumu ve gidiş yönü,  $\phi$ . Denetlenecek durum değişkeni sayısının, denetleyen

değişken sayısından fazla olduğu bu gibi sistemler holonom olmayan (nonholonomic) olarak sınıflandırılır.



**Şekil 1:** Çalışmalarda kullanılan robot yapısı, bir gövdenin her iki yanına yerleştirilen iki tekerlekten oluşmaktadır. Her bir teker ayrı bir motor tarafından hareketlendirilir.

Bu tip bir robotun dinamik ve kinematik modeli kolayca hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cdot \cos \phi = \left(\frac{R}{2} \cdot (\omega_R + \omega_L)\right) \cdot \cos \phi \\ \dot{y} &= v \cdot \sin \phi = \left(\frac{R}{2} \cdot (\omega_R + \omega_L)\right) \cdot \sin \phi \\ \dot{\phi} &= \omega = \frac{R}{L} \cdot (\omega_R - \omega_L)\end{aligned}\quad (1)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $x$  ve  $y$  robotun iki boyutlu uzaydaki konumunu,  $\phi$  bakış açısını,  $\omega$  bakış açısındaki değişimi (başka bir deyişle robotun kendi etrafında dönüş hızını),  $v$  ise robotun doğrusal hızını belirtir. Robotun doğrusal hızı ve kendi etrafında dönüş hızı, tekerlek hızları cinsinden, hesaplanarak yazılır ise denklemlerin ikinci kısımları elde edilir. Sistemin denetim değişkenlerini

$$\begin{aligned}u_1 &= \omega_R + \omega_L \\ u_2 &= \omega_R - \omega_L\end{aligned}\quad (2)$$

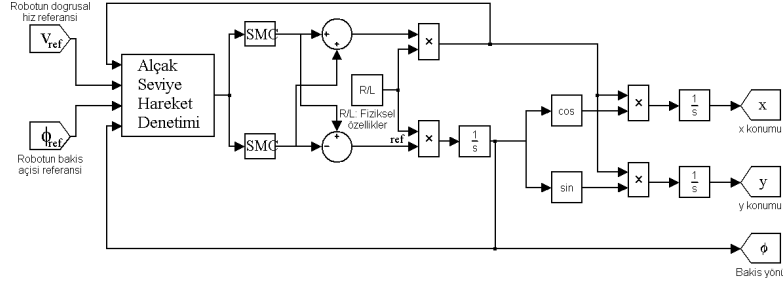
olarak seçersek,

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{R}{2} \cdot u_1 \cdot \cos \phi \\ \dot{y} &= \frac{R}{2} \cdot u_1 \cdot \sin \phi \\ \dot{\phi} &= \frac{R}{L} \cdot u_2\end{aligned}\quad (3)$$

İlk iki durum değişkeni birleştirilebilir,

$$\begin{aligned}\dot{r} &= \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \frac{R}{2} \cdot u_1 \\ \dot{\phi} &= \frac{R}{L} \cdot u_2\end{aligned}\quad (4)$$

Sonuç olarak, robotumuzun modelini



Şekil 2: Robotun genel yapısı ve alçak seviye denetim.

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + B \cdot u \quad (5)$$

şeklinde yazmış olduk.

Alçak seviye hareket denetimi robotun bakış açısını ve hızını girilen referans değerlerine getirmekle yükümlüdür. Bu amaç için öncelikle referans bakış açısını ve gidiş hızını alır, bunları derler (detayları bölüm 5’de verilmiştir) ve kayan kipli denetim ile motor hızlarına çevirir. Bu işlem için kayan kipler aşağıdaki gibi seçilir.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_v \\ \sigma_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_v \\ e_\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

Bu denklemlerde  $e_v$  ve  $e_\phi$ , sıra ile gerçek hız ve yön ile istenilen referans hız ve yön arasındaki farktır. Lyapunov kararlılık analizine göre ilerleyerek, ve ayrıık zamanda çalıştığımızı da düşünerek, sistem denetim değişkenlerini

$$u(k \cdot dt) = u((k-1) \cdot dt) + \frac{1}{dt \cdot B} \cdot [dt \cdot D \cdot e(k \cdot dt) + e(k \cdot dt) - e((k-1) \cdot dt)] \quad (7)$$

olarak buluruz. Bu denklemde  $k \cdot dt$  o anki zamanı,  $(k-1) \cdot dt$  ise bir önceki denetim zamanını belirtmektedir. Buna göre motor hızları da elde edilebilir,

$$\begin{aligned} \omega_R^{ref} &= \frac{(u_1 + u_2)}{2} \\ \omega_L^{ref} &= \frac{(u_2 - u_1)}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

ve bu motor hızları servo motor sürücülere iletilip, motorlar üzerinde işlenir. Algılayıcılardan gelen tekerlek hızları kullanılarak robotun o anki gerçek pozisyonu  $(x, y)$  ve konumu  $\phi$  hesaplanır. Sitemin genel şekli Şekil 2’de verildiği gibidir.

### 3. ENGELLERİN ALGILANMASI VE ÇARPIŞMADAN KAÇINMA

Hareketli bir robotta en çok istenilen ve en önemli özellik şüphesiz engellerin algılanması ve olası çarpışmalardan kaçınmasıdır. Bizim denetim

sistemimizde bu görev olduğu gibi tek bir katmana yüklenmiştir.

Bu katman, robotun algılayıcılarından gelen bilgileri toplar, ve potansiyel alan metoduna göre robotun gitmesi gereken yeni yön ve hızı hesaplayarak alçak seviye hareket denetimine iletilir.

Potansiyel alan metodunda, her bir engelin robot üzerinde itici bir kuvvet uyguladığı varsayılır. Bu kuvvetlerin yönü engelin yüzeyinden robotun dairesel merkezine doğru, kuvveti ise robot engel mesafesinin tersinin karesi ile orantılı olarak kabul edilmiştir. Böylece robot, bir engele yaklaştıkça o engelin uyguladığı kuvvet artacak ve gitgide daha etkili olacaktır.

Engellerin robot üzerinde uyguladığı varsayılan kuvvetler teker teker hesaplanıp, toplamları alındıktan sonra yine kayan kipli bir denetim robotun gidiş yönündeki kuvvet bileşenini en aza (veya dışarıdan girilen herhangi bir referans değerine) indirgeyecek şekilde yeni bir gidiş yönü hesaplar. Ayrıca robotun gidiş hızı da, aynı yöndeki kuvvet bileşeninin büyüklüğüyle orantılı olarak azaltılmalıdır. Böylece robot bir engele doğru yaklaşırken yavaşlayacak ve aynı zamanda yönünü de o engele paralel olacak şekilde değişecektir. Öncelikle tüm engeller tarafından robotumuza uygulanan kuvveti  $\vec{F}_{eng}(f_{eng}, \theta_{eng})$  olarak kabul edelim ( $f_{eng} \geq 0$  ve  $0 \leq \theta_{eng} \leq 2\pi$  olsun). Bu kuvveti robotun hareket yönünde ve ona dik yönde iki bileşene ayırabiliriz,

$$\begin{aligned} F_r &= f_{eng} \cdot \cos \theta & \theta &= \phi - \theta_{eng} \\ F_\phi &= f_{eng} \cdot \sin \theta & -\pi &\leq \theta \leq \pi \end{aligned} \quad (9)$$

Şimdi de her bir kuvvet bileşenindeki değişimi denetim değişkeni olarak kullanabiliriz,

$$\begin{aligned} \dot{F}_r &= u_r \\ \dot{F}_\phi &= u_\phi \end{aligned} \quad (10)$$

Görüldüğü gibi yine birinci derecen bir sistem elde edilmiştir. Bu sistem de aynı alçak seviyeli hareket denetiminde olduğu gibi işlenip, Lyapunov kararlılık

analizinden geçirilerek kayan kipli denetim ile robotun izlemesi gereken yolu belirler.

Çarpışmadan kaçınma katmanı, diğer denetim sistemlerinde olduğunun aksine, direk olarak gidilmesi gereken yönü ve hızı değil, bu iki değerdeki değişimi alçak seviye denetim sistemine iletir. Böylelikle alçak seviye denetim sistemi değişik katmanlardan gelen bu bilgileri uygun şekilde birleştirip yeni hız ve yön referansını kendi yaratacaktır.

#### 4. HEDEFE YÖNLENDİREME

Mobil robotlar yapılmasında en önemli gereksinim elbette ki yer değiştirme zorunluluğudur. Buna göre robotlar buldukları noktadan istenilen noktaya gidebilmelidirler.

Önerilen yapıda bu görev bir üst katmana verilmiştir. Bu katman sürekli olarak robotun o anki pozisyon ve konumunu gözler. İletişim veya diğer bir katman yolu ile bildirilmiş olan hedef noktaya ulaşmak için, çarpışmadan kaçınma katmanında olduğu gibi, bu katmanda da hayali bir kuvvet tanımlanmıştır. Buna göre robot sürekli olarak hedef noktaya doğru çekilmektedir. Sistem aynı çarpışmadan kaçınma katmanındaki gibi modellenerek denetlenmiştir, sadece referans değerleri farklıdır.

#### 5. KATMANLARDAN GELEN BİLGİNİN DERLENMESİ

Daha önce de belirtildiği gibi, diğer tüm sistemlerin aksine, katmanlar robotun yeni hız ve bakış açısını değil, o anki hız ve bakış açısının ne kadar sapması gerektiğini hesaplar ve alçak seviye hareket denetimine iletir.

Daha önceden belirlenen katsayılar ışığında, alçak seviye hareket denetimi bu bilgileri birleştirir ve kendi referansını yaratır. Matematiksel olarak formüllersek,

$$q_i^{ref} = q_i + (a_i \cdot dq_i^{eng} + b_i \cdot dq_i^{hedef}) \quad i=1,2 \quad (11)$$

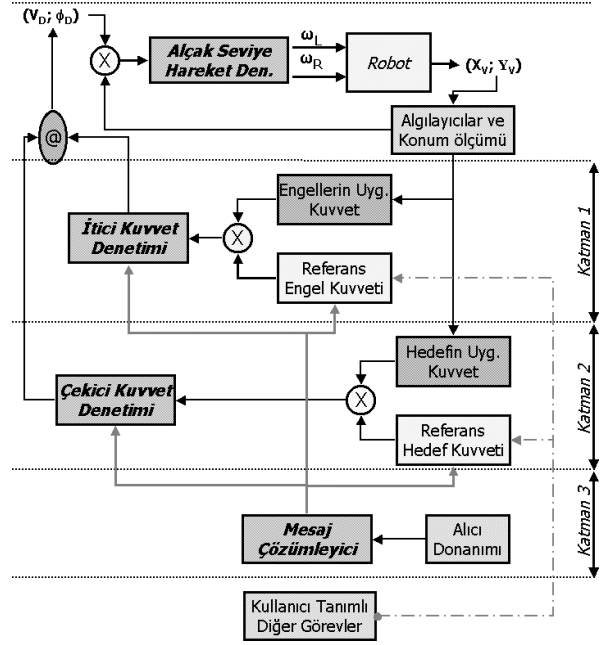
Yukarıdaki denklemde  $q_1$  ve  $q_2$  robotun denetim değişkenleri olan doğrusal hızı ve bakış açısını belirtmektedir.  $dq_i^{eng}$  robotun denetim değişkenlerinin engellerden dolayı ne kadar değişmesi gerektiğini,  $dq_i^{hedef}$  ise aynı değerlerin hedef noktaya ulaşmak için ne kadar değişmesi gerektiğini belirtir.  $a_i$  ve  $b_i$  ise, sırası ile bu değişimlerin ne kadarının referans değerleri olan  $q_i^{ref}$ 'e yansıtacağını belirler (bakınız Şekil 3'de "@" bloğu).

#### 6. İLETİŞİM

Elbette ki geliştirilen robotların, çoklu sistemlerin bir parçası olabilmeleri için, iletişim şarttır. Robotların sürekli olarak iletişimde olmaları ve gerçekleştirmeleri

gereken üst seviye veya alt seviye görevleri iletişim yolu ile alabilmeleri gereklidir.

Prensip olarak, denetim sistemimizde, üst katmanların alt katmanlara müdahale etme hakkı vardır. Ancak tersi doğru değildir. İletişim katmanı ise tüm katmanların referansları ve parametrelerini değiştirebilecek konumda olmalıdır. Bu nedenle iletişim en üst seviye katman olarak belirlenmiştir. İletişimin de eklenmesi ile sistem son şeklini alır (Şekil 3).



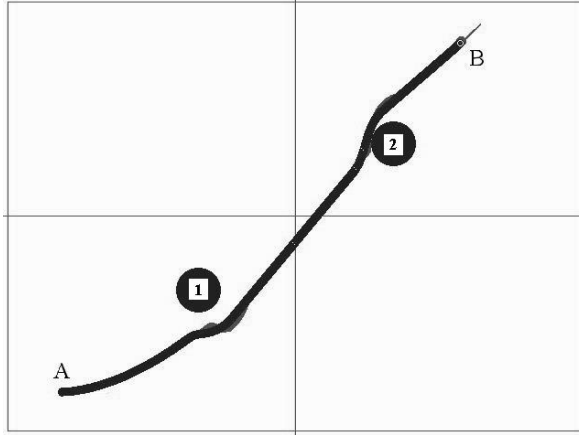
Şekil 3: Robot denetim sistemi.

#### 7. BENZEŞİM SONUÇLAR

Önerilen yeni denetim sistemi benzetim ile test edilmiştir. Bazı örnek sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

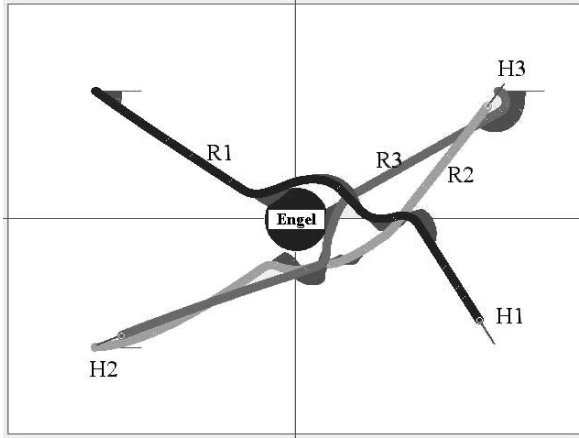
İlk olarak koordinat sistemine iki adet engel yerleştirildi (Şekil 4, 1 ve 2 olarak numaralandırılmış olan daireler). Kodlama kolaylığından dolayı yuvarlak cisimler kullanıldı. Robot ilk konumundan (A noktası) hedef noktaya (B noktası) gitmesi emredildi.

Şekilde de açıkça görüldüğü üzere robot oldukça doğal ve yumuşak dönüşlerle hedef noktaya doğru ilerlemektedir. İlk olarak karşılaştığı 1 numaralı engelin etrafından güvenli bir mesafede dönmüş ve yönünü tekrar hedef noktaya göre düzeltmiştir. 2 numaralı engel ile karşılaştığında ise robotun engele yaklaşma hızı daha yüksek idi. Bu sebeple daha yakın bir mesafede etrafından dolaştığı gözlenmektedir. Sonuç olarak robotumuz hiçbir engele takılmadan belirlediğimiz hedef noktaya gitmiş ve orada durmuştur.



**Şekil 4:** Benzetim sonuçları. İlk önce bir tek robot belli bir noktaya yönlendirildi engellere çarpmadığı ve doğal bir şekilde ilerlediği görüldü.

Önerdiğimiz denetim sisteminin çoklu robot sistemlerde de kolaylıkla kullanılabileceğini belirtmiştik.



**Şekil 5:** Çoklu robotlar ile gerçekleştirme. Her bir robotun kendisine verilen hedef noktasına doğru gittiği ve diğer robotlarla çarpışmadığı gözlenmiştir.

Şekil 5'te birçok robotun aynı ortamda bulunduğu ve her birinin gitmek istedikleri doğrultuların çakıştığı bir senaryo hazırlanmıştır. Buna göre 1 numaralı robot (R1), 1 numaralı hedefe (H1), 2 numaralı robot (R2), 2 numaralı hedefe (H2) ve 3 numaralı robot da (R3), 3 numaralı hedefe (H3) yönlendirilmiştir. Robotların karşılaştıkları ancak çarpışmadıkları ve amaçlanan hedef noktalara başarı ile ulaştıkları görülmüştür.

## 8. SONUÇ VE İLERİKİ HEDEFLER

Tasarlanan denetim sisteminin değişik şartlar ve ortamlarda başarı ile çalıştığı gözlemlendi. Bununla birlikte çeşitli senaryolarla iletişim de test edildi, başarı ile çalıştığı görüldü.

Bundan sonraki hedefler robotların benzetim ile değil, gerçek platformlar üzerinde denenmesidir. Ayrıca kutu bulma, taşıma, itikleme gibi değişik amaçlarında yeni katmanlar olarak sisteme eklenmesi ve test edilmesi de öncelikli hedefler arasındadır.

## KAYNAKLAR

- [1] R. A. Brooks, "A Robot that Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network," Massachusetts Institute of Technology Artificial Intelligence Laboratory A.I. Memo 1091, Feb. 1989.
- [2] J. K. Y. Borenstein, "The Vector Field Histogram-Fast obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Trans. on Robotics & Automation, vol. 7, pp. 278-287, 1991.
- [3] J. S. Nielsen, G., "Learning Mobile Robot Navigation: a Behavior-Based Approach," presented at IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 1994. Humans, Information and Technology., 1994.
- [4] F. S. Tsuzuki, K., "A Novel Configuration of Ultrasonic Sensors for Mobile Robots," presented at Proc. on the IEEE/RSJ/GI International Conf. on Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94., 1994.
- [5] T. I. Mochiada, A.; Aoki, T.; Uchikawa, Y., "Behavior Arbitration for Autonomous Mobile Robots Using Emotion Mechanisms," presented at IEEE/RSJ Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', 1995.
- [6] C. M. W. L. L. Liu, "Mobile Robot Motion by Integration of Low-Level Behavior Control and High-Level Global Planning," presented at IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 1996.
- [7] R. C. Tse Min Chen; Luo, "Integrated Multi-Behavior Mobile Robot Navigation Using Decentralized Control," presented at IEEE/RSJ Proc. on Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1998.
- [8] M. V. Bowling, M., "Motion Control in Dynamic Multi-Robot Environments," presented at IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1999. CIRA '99. Proceedings. 1999.
- [9] R. A. Brooks, Cambrian Intelligence : The Early History of the New AI, 1 ed: MIT Press, 1999.
- [10] C. C. Kai-Tai Song; Chang, "Reactive Navigation in Dynamic Environment Using a Multisensor Predictor," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B, vol. 29, pp. 870-880, 1999.