

Webots Gerçekçi Benzetim Yazılımı ile Sürü Robot Uygulamaları *

Şadi Çağatay Öztürk¹, Andaç Töre Şamiloğlu^{1,2}, Veysel Gazi¹

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara

²Makine Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara

{scolinks@gmail.com, andacsam@baskent.edu.tr, vgazi@etu.edu.tr}

Özetçe

Bu çalışmada sürü robot çalışmalarında sıkça karşılaştığımız döngüsel takip, dizilim oluşturma, dizilimi sabit tutarak alan tarama problemleri için geliştirilen algoritmalar Webots robot benzetim yazılımıyla test edilmiş, karşılaşılan problemler ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

1. Giriş

Birden fazla özerk hareket eden birimden veya kısaca erkinden oluşan sistemler (sürü sistemler) alanı son yıllarda yoğun ilgi görmeye başlayan oldukça yeni bir alandır. Reynolds'un [1] basit yerel etkileşim kuralları tabanlı davranış modeli kullanarak uçan kuş sürüsünün benzetimini yaptığı ilk çalışmasından bu yana bu alan birçok gelişmeye şahit olmuştur. Sürü davranışının modellenmesi ve toplanması, seyrüseferi ve koordinasyon ve kontrolü için çeşitli yaklaşımlar ve yöntemler ele alınmıştır. Bu alanlardaki ilk çalışmalar merkezi yöntemler [2, 3, 4] ve lider tabanlı yöntemler [5] üzerine yoğunlaşmış olmasına rağmen, çalışmaların çoğu merkezi olmayan dağıntık yöntemler üzerine olmuştur (bu yöntemlerin işlem karmaşıklığı daha az ve hatalara gürbüzlüğü daha yüksektir). Dağıntık denetim için davranışsal [6], yapay potansiyel fonksiyonları [7, 8, 9, 10], sanal erkinler ve sanal yapılar [11, 12], doğrusal olmayan yöntemler [13, 14, 15] yaklaşımlardan bazıları olarak sayılabilir. Bunların yanı sıra oyun kuramı ve optimal denetim yöntemini kullanan açık çevrim yöntemler [16] ve erkinlerin dağıntık alanı kaplamı problemlerini inceleyen çalışmalar da mevcuttur [17]. Bazı çalışmalar da uyarılama, öğrenme ve evrim yöntemlerini kullanarak sistemin performansını arttırmaya yönelik olmuştur [18, 19, 20]. Üzerinde çok çalışılmış diğer bazı problemler de dağıntık uzlaşma [21, 22, 23] ve döngüsel takip [24, 25, 26] problemleri olmuştur. Ayrıca eş-zamanlı olmayan modeller üzerine de bazı incelemeler yapılmıştır [27, 28, 29, 30]. Yukarıdaki çalışmaların bazıları bütünsel (global) bilgi kullanırken bazıları da sadece yerel etkileşimlere ve kurallara dayanmaktadır.

Sürü sistemlerin en önemli özellikleri arasında erkinlerin birbirileri ile doğrudan veya dolaylı etkileşimlerinden ortaya çıkan kendi-kendine örgütlenme ve sürü zekâsı sayılabilir. Bu tür sistemlerin birçok avantajı ve yararları olmasının yanı sıra teknolojinin gelişmesi ile günümüzde gerçekleştirilebilir hale gelmiş olmaları bu alandaki çalışmalara hız kazandırmıştır. Doğadan ilhamını alan sürü sistemlerin en önemli avantajları arasında gürbüzlük, esneklik, ölçeklenebilirlik ve ucuz maliyet gösterilebilir [31]. Bu alandaki çalışmaları özetleyen bazı makaleler [32, 33, 35, 34] ve son yıllarda bu alanda yayınlanmış özel amaçlı araştırma projeleri kapsamında desteklenmiştir.

* Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 104E170 sayılı proje kapsamında ve Avrupa Komisyonu tarafından 045269 sözleşme numaralı 6. Çerçeve Programı özel amaçlı araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

Sürü sistemler alanında yapılan yoğun çalışmalara rağmen hala önemli bir eksiklik geliştirilen yöntemleri uygulama ve gerçekleştirme çalışmalarının azlığıdır. Uygulama çalışmaları kuramsal çalışmalardan birçok farklılık gösterir. Bunlardan en önemlileri kuramsal çalışmaların genelde belirli varsayımlar ile yapılması ve çoğu zaman bu varsayımların ve "idea" koşulların uygulamalarda var olmamasıdır. Uygulamalarda sistem (ve araştırmacılar) laboratuvarlarında var olan erkinlerin (robotların) kapasiteleri/özellikleri ile sınırlıdır ve bunlar genelde ideal şartlardan çok uzaktır. Örneğin birçok çalışmada erkinlerin komşularının (hatta kendi) konumlarını hatasız bildiği varsayılırken gerçek algılayıcılarla belirli bir hata payı ile sadece göreceli mesafeler ölçülmesi mümkündür. Bu tür örnekler çoğaltılabilir. Bunun gibi kuramsal varsayımlara uymayan sistemlerde çalışmasını beklediğiniz yöntemler uygulamalarda/gerçeklemede zorluklarla karşılaşılıyor olabilir. Bu sebeplerden dolayı kuramsal çalışmalara paralel olarak uygulama çalışmalarına da önem verilmesi son derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada biz fizik tabanlı gerçekçi bir benzetim yazılımı olan Webots robot benzetim yazılımını kullanarak üç problemin gerçekleştirilmesini/uygulanmasını ele alacağız. Bu problemler (i) döngüsel takip, (ii) dizilim (oluşum) oluşturma ve (iii) dizilimi koruyarak alanı tarama/süpürme. İlerleyen bölümlerde bu problemleri açıkladıktan sonra kamera görüntülerindeki bazı özelliklerden bahsedip, benzetim sonuçlarını tartışacağız.

2. Problem Tanımları

Bu bölümde bu çalışmada ele alacağımız problemleri kısaca tanımlayacağız ve gerçek robotlar kullanarak uygulama/gerçekleştirme zorluklarından bahsedeceğiz.

2.1. Döngüsel Takip

Döngüsel takip problemi üzerine ilk çalışanlardan birisi Fransız bilim insanı Bouguer'dir [40]. Daha sonraları (1877) Lucas bir eşkenar üçgenin köşelerine yerleştirilen üç köpeğin herbirinin diğerini takip ettiği durumda izleyecekleri yolların nasıl olduğunu ve nerde buluşacaklarını sormuştur. Brocard, izlenen yolların logaritmik spiraller olduğunu ve üçgenin neresinde buluşacaklarını (*Brocard point*) göstermiştir [40]. Daha sonraları bu konu üzerine daha ayrıntılı çalışmalar [41, 42, 43, 44]'de yapılmıştır. Bu çalışmalarda erkinlerin buluşmalarının aynı anda aynı yerde olacağı ispatlanmıştır. Ancak bu çalışmalarda erkinlerin eş-zamanlı oldukları varsayılmıştır. Erkinlerin, eş-zamansız çalıştıkları durumda buluşmanın yine de gerçekleşeceğini ancak eş-zamanlı duruma göre farklı bir yerde olabileceğini gösteren bir çalışma ise [26]'dur.

Döngüsel takip probleminde n tane erkinin birbirini takip ettiğini düşünelim. Eğer, erkinleri 1'den n 'e kadar numaralandırırsak, i 'nci erkin ($i \in Z$ ve $1 \leq i \leq n$) $i + 1$ 'inci

erkini ve n 'ci erkin l 'inci erkinin takip etmelidir. Bu çalışmada bütün erkinlerin/robotların aynı sabit v hızıyla hareket ettiklerini varsaydık. Bu durumda erkin dinamikleri

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v \Delta t \cos(\theta_i(t)) \quad (1a)$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + v \Delta t \sin(\theta_i(t)) \quad (1b)$$

şeklinde oluşur. Burada $z_i(t) = [x_i(t) \ y_i(t)]^T$, i 'nci erkinin t anındaki pozisyonu, Δt zaman adımı büyüklüğüdür. i 'nci robotun t anında global koordinatlara göre yönü θ_i aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\theta_i(t) = \text{atan2}[y_{i+1}(t) - y_i(t), x_{i+1}(t) - x_i(t)] \quad (2)$$

Robotlar takip ettikleri robota yönelecekleri için her zaman adımında $\theta_i(t)$ güncellenmelidir. Bu global koordinatlar ulaşılabilir olduğunda eşitlik (2)'deki gibi yapılabilir. Eğer robotların yerel çözümler üretmesi gerekiyorsa bizim benzetimlerde yaptığımız gibi kamera bilgisini kullanarak takip edilen robot her zaman tam gittikleri doğrultu üstünde olacak şekilde yön güncellemesi yapılabilir.

Dikkat ederseniz bu modelde robotların eşzamanlı olarak çalıştıkları ve her an tam olarak takip ettikleri robota doğru yönelmiş oldukları varsayılmıştır. Elbette pratik uygulamalarda ve gerçekçi benzetimlerde bu varsayımların geçerliliği kalmayacaktır.

2.2. Dizilim Oluşturma

Dizilim (oluşum) oluşturma denetimi problemi erkinlerin genel koordinasyon probleminin bir alt problemidir (ve literatürde yoğun olarak incelenmiştir). Bu tür hareketin çeşitli uygulamaları ve yararları mevcuttur. Örneğin bir grup robotun ortaklaşa bir nesneyi taşıması için ya da en azından bu görevi başlatabilmeleri için aralarındaki mesafeleri belirli uzaklıklara getirmeleri gerekebilir, bir grup uydunun daha fazla verim almak veya bir bölgeyi daha verimli gözlem altında tutabilmek için belirli geometrik şekil oluşturmaları gerekebilir veya bir grup uçağın yakıt tasarrufu yapabilmek için (tıpkı kuş sürülerinde olduğu gibi) belirli geometrik şekil oluşturarak uçmaları gerekebilir. Dizilim denetimi sağlamak için (yukarıda da bahsedildiği gibi) çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bunların arasında davranış tabanlı yöntemler [6], Lyapunov kuramı ve fonksiyonları tabanlı ve/ya çizge kuramını kullanan yöntemler [5], doğrusal olmayan sistemler kuramından yararlanan yöntemler [13] ve yapay potansiyel fonksiyonları tabanlı yöntemler [8, 9, 10] mevcuttur. Bu çalışmaların tamamı ideal bilgi kullanmaktadır. Bir başka deyişle erkinler diğer erkinlerin konumlarını kusursuz bilmektedir. Bu çalışmada biz robotların üzerindeki kamera görüntüsünü kullanarak dizilim oluşturmaya uygulamalı inceleyeceğiz. Kameralardan alınan görüntü ile bir erkinin diğer erkinlerin konumlarını belirli bir hata payı ile bilmektedir. Ayrıca erkinin yönelme açısına bağlı olarak diğer erkinin hiç görmeme durumu vardır. Son olarak burada kullanılan robotlar hız-kısıtlamaları olan (non-holonomic) robotlardır. Literatürdeki kuramsal çalışmaların çoğu tam-denetimli nokta erkinler üzerinedir (her ne kadar hız-kısıtlamalı robotlar üzerine de bazı çalışmalar olsa da).

Dizilim denetiminde temel amaç erkinlere otomatik olarak bir geometrik şekil (dizilim, oluşum) oluşturmak. Bir başka deyişle her robotun diğer robotlardan belirli bir istenilen uzaklığa/konuma gelmesi gerekiyor (istenilen uzaklıkların birbirleri ile çelişmemesi şartı ile). Sürüde N sayıda erkin olduğunu, i 'nci erkinin konumunu p_i , $i = 1, \dots, N$, ile gösterildiğini ve istenilen geometrik şekildeki i 'nci ve

j 'ci erkinler arası istenilen mesafenin d_{ij} ile gösterildiğini varsayalım. Bu durumda dizilim denetimi problemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir: Erkinlerin denetim girdilerini öyle seç ki her i ve j için

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|p_i - p_j\| = d_{ij} \quad (3)$$

sağlansın. Bu durumda her i robotu için diğer her j robotu ile kendisi arasındaki doğrultuda diğer j robotundan istenilen d_{ij} kadar uzaktaki nokta gitmek istediği hedef noktası oluşturmaktadır. Bu durumda N erkinli bir sürüde her robot için $N - 1$ adet hedef noktası vardır. Örneğin üç robotun herhangi başlangıç konumlarından kenar uzunlukları d olan bir eşkenar üçgen oluşturmaları istendiğini varsayalım. Bu durumda her erkin için her adımda iki sabit olmayan hedef noktası vardır ve bu hedef noktaları söz konusu robotun konumu ile diğer robotların konumlarını birleştiren doğrular üzerinde diğer robotlardan d mesafesinde olan noktalar. Bu şekilde her robot iki hedef noktasına yönelik vektörlerin bileşimi yönde hareket ederek sonunda geometrik şekli oluşturabilirler (yapay potansiyel fonksiyonu yöntemi).

Sürü sistem uygulamalarındaki bir başka sorun ise her robota aynı veya farklı yazılımların yüklenmesidir. Bu uygulamada her robotun üzerinde aynı yazılım bulunmaktadır ve bir önceki uygulamada olduğu gibi her robotu özelleştirecek bir renk etiketi atanmamıştır. Günümüzde büyük bir önem teşkil etmese bile çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere (mesela denizlerin temizlenmesi, mayınların temizlenmesi ve benzeri) seri robot sürüsü üretimine geçildiğinde her robota aynı yazılımın yüklenebilmesi büyük ölçüde üretim maliyetlerini düşürecektir. Görüntü işlenerek nesnelere kameradan alınan karelerden seçilmektedir. Bu şekilde seçilen nesnelere genişliği ve koordinatları hesaplanmaktadır. Her robot 2 adet nesne aramaktadır. Nesnelere biri bulunmadığı takdirde her iki nesnenin de eşit olduğu kabul edilmekte ve hesaplamalar o yönde yapılmaktadır.

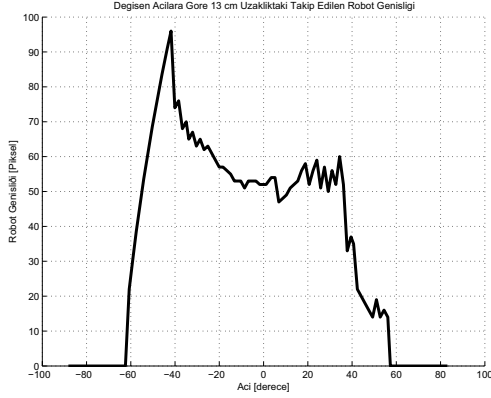
2.3. Dizilimi Koruma ve Tarama/Süpürme

Bir dizilimi oluşturma yanısıra hareket halinde iken o dizilimi koruma da çok önemlidir. Örneğin yukarıda bahsedilen robotların ortaklaşa bir nesneyi taşıması uygulamasını ele alalım. Eğer hareket halinde iken robotlar dizilimi koruyamazlarsa nesneyi düşürebilir ve zarar verebilirler. Benzer şekilde dizilim oluşturmuş hareket halindeki uçaklar (örneğin Türk Yıldızları - Türk Hava Kuvvetleri Akrobasi Takımı) o dizilimi koruyamazlarsa vahim sonuçlara sebep olabilirler. Dizilimi koruma problemini bu çalışmada biz tarama/süpürme problemi ile birlikte ortaklaşa ele aldık. Süpürme hareketi de bir alanda arama/tarama yapma (örneğin güvenlik için gözlem amacı ile veya bir nesne/şüpheli arama veya orman yangını var mı aramak için), zirai ilaçlamalar, süpürme/paspaslama gibi çeşitli askeri ve sivil uygulamaları olan bir problemdir. Bu çalışmada biz üç robotun bir önceki bölümde oluşturulan dizilimi koruyarak bir alanı uygun bir şekilde (boş alanlar kalmayacak ve birden fazla üzerinden geçilen alan olmayacak şekilde) süpürmesi uygulamasını ele aldık.

3. Webots Benzetim Programında Kamera Özellikleri

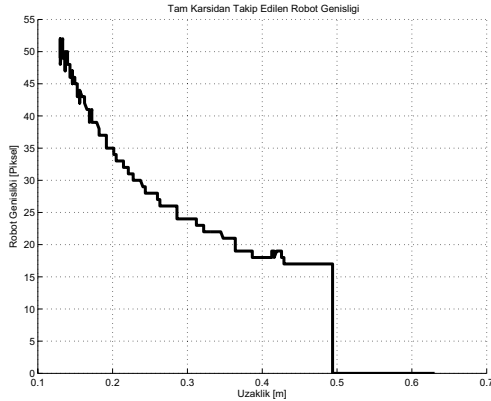
Bu çalışmada robotlar takip ettikleri robotların görüntü bilgilerini kullanılmaktadır. Bu bölümde Khepera-3 robotlarında kullandığımız 120° 'lik açıyı görebilen kameralardan aldığımız görüntü bilgilerini inceleyeceğiz. Şekil 1'de 13cm mesafe-

den takip edilen bir robotun piksel genişliğinin bakış açısına göre nasıl değiştiği görülmektedir. Burada okunan değerlerin 0°'ye (tam karşıdan bakış) göre simetrik olması beklenirken şekilden de anlaşılacağı üzere işlenen resmin sağında ve solunda takip edilen robotun genişliği önemli derecede farklı değerler almaktadır. Bu uygulama sırasında -özellikle eşkenar üçgen oluşumunda- takip eden robotlar için farklı parametre değerleri kullanmayı zorunlu kılmaktadır.



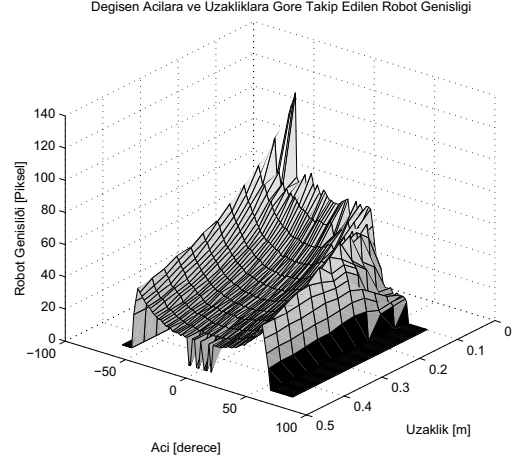
Şekil 1: Kamera görüntülerinde 13 cm sabit uzaklıktan takip edilen robotun piksel genişliğinin bakış açısına göre değişimi.

Şekil 2'de tam karşıdan takip edilen robotun genişliğinin piksel değerlerinin uzaklığa göre değişimi görülmektedir. Takip edilen robotun genişliği 13cm uzaklıkta 50 piksel civarındayken uzaklık arttıkça lineer olmayan bir şekilde azalarak 0.5m civarında görüntüden kaybolmaktadır. Bu da takip edilen robotun uzaklığının 0.5 metreden sonra sağlıklı olarak elde edilemeyeceğini gösterir.



Şekil 2: Kamera görüntülerinde tam karşıdan takip edilen robotun piksel genişliğinin uzaklığa göre değişimi.

Robotların takip ettikleri robotun görüntüsünü değişik açılarda ve değişik uzaklıklarda ne derece algıladıklarını görmek için Şekil 3'e bakabiliriz. Bu şekilde, görüntüdeki robotun genişliğinin (piksel cinsinden) takip eden robotun uzaklığına ve bakış açısına göre nasıl değiştiği çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi yakın mesafelerde (0.3 metreden az) görüntü verilerindeki simetri bozulmaktadır.



Şekil 3: Kamera görüntülerinde takip edilen robotun piksel genişliğinin robotlar arası uzaklık ve bakış açısına göre değişimi.

4. Benzetim Sonuçları

Döngüsel takip problemi için e-puck mini robot modelini, dizilim oluşturma ve alan tarama için ise Khepera 3 mini robot modelini kullanacağız. Bu robotların modelleri benzetim yazılımında hazır bulunmaktadır. Ayrıca Webots'ta geliştirilen programlar daha sonra gerçek robotlar üzerine doğrudan aktarılabilirler. Her üç problem için de sadece kamera görüntüsü bilgisi kullanılacaktır.

4.1. Döngüsel Takip Benzetimi

Yapmış olduğumuz döngüsel takip uygulamasında E-Puck mini robotları kullanılmaktadır. E-Puck robotların üzerinde bulunan kamera yaklaşık olarak 30 derecelik bir alanı görebilmektedir. Kameradan alınan resim 52x29 boyutundadır. 6 adet robot kullanılmıştır. Robotların tanınabilmesi ve karışıklıkların oluşmaması ve fazladan görüntü işleme problemleri ile uğraşmaması için her robota bir renk etiketi atanmıştır. Bu şekilde kameradan alınan verilerden robotlar kolaylıkla seçilebilmektedir. Robotun pozisyonu olarak rengini kullanarak seçtiğimiz piksellerin resim üzerindeki yerlerini kullanacağız. Döngüsel takip algoritması aşağıdaki şekildedir:

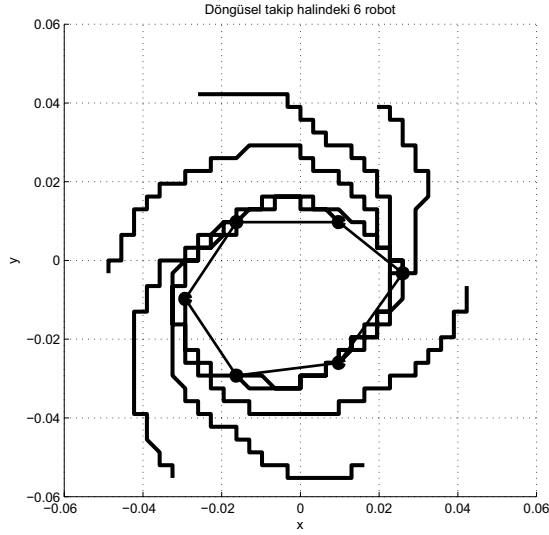
EĞER robotun pozisyonunun yatay koordinatı 30 dan küçükse
Sağa Dön

EĞER robotun pozisyonunun yatay koordinatı 45 dan büyükse
Sola Dön

EĞER robotun pozisyonunun yatay koordinatı 30 ile 45 arasında ise
Düz Git

Dikkat ederseniz resim üzerinde takip edilen robotun yatay pozisyonu kullanılarak dönülecek yere karar verilmekte, robotun pozisyonu resimde tam ortaya denk getirilmek istenmektedir. Fakat resmin ortası için dar bir aralık (30-45 aralığı) kullanılmaktadır. Böylece takip edilen robot, takip eden robotun yaklaşık tam karşısına alınmakta ve oylece harekete devam edilmektedir. Bu algoritmanın yüklendiği 6 robotla elde edilen döngüsel takip benzetimi sırasında robotların izledikleri yollar Şekil 4'de verilmiştir.

Döngüsel takip için bölüm 2.1'de verilen modelde global bir koordinat sistemine göre pozisyonlar ve açılar kullanılmıştı ancak gerçek modellerde ve gerçekçi benzetim modellerinde bu



Şekil 4: Döngüsel takip halindeki 6 robotun izledikleri yol.

tür global verilere ulaşmak zordur. Bu bölümdeki çalışmada da global veriler yerine robotların kendi yerel bilgileri -kamera bilgileri- kullanılmıştır. Bu nedenle eşitlikler (1a), (1b) ve (2) doğrudan kullanılsa bile robotların yerel bilgilerini kullanarak uyguladıkları algoritmalar dolaylı olarak aynı sonuçlara ulaştırmaktadır.

4.2. Dizilim Oluşturma Benzetimi

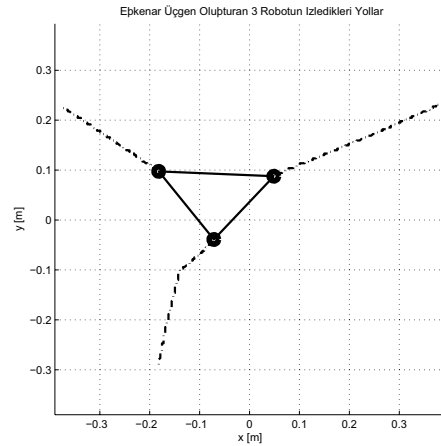
Khepera 3 mini robotlarının üzerinde bulunan kameranın çözünürlüğü 320x240 boyutundadır. Bu robotlar ile çok geniş bir alan üzerinde çalışıldığından robotların geniş bir bakış açısına ihtiyaçları vardır. Bunun için özellikleri Bölüm 3'te anlatılan geniş açılı bir kamera modeli kullanılmıştır. Bu model kullanıldığından görüntünün kenarlarında görüntü büyük ölçüde bozulmaktadır. Normal bir kamerada izlendiğinde 1 piksellik bir harekete karşılık gelen hareket, bu uygulamada kullandığımız geniş açılı kamera modelinde 10 piksele karşılık gelebilmektedir. Geniş açılı kamera yerine dar açılı bir kamera kullanılması alınan verinin kalitesini yükseltmekle beraber çalışma sırasında durup etrafı tarama gibi davranışların uygulanmasına ve dolayısıyla duraksamalara neden olmaktadır. Geniş açılı kamera kullanılarak gerçek, duraksamalı ve taramasız bir toplanma davranışı elde edilebilmiştir.

Toplamda 3 adet robot kullanıldığından eşkenar üçgen oluşturmak istenmiştir. Toplanma davranışının algoritması aşağıdaki şekildedir:

- EĞER birinci ve ikinci nesnenin genişliği 30-40 ise
Dur
- EĞER birinci ve ikinci nesnenin genişliği 40 dan büyük ise
Geri Gel
- EĞER birinci nesnenin genişliği 31 den küçük ve ikinci nesnenin genişliği 30 dan büyük ise
Sola Dön
- EĞER birinci nesnenin genişliği 30 dan büyük ve ikinci nesnenin genişliği 31 den küçük ise
Sağa Dön
- EĞER ortalama konum 155 den küçük ise
Olduğun Yerde Sağa Dön
- EĞER ortalama konum 165 den büyük ise

Olduğun Yerde Sola Dön DEĞİLSE Düz Git

Bu algoritmada kameradan alınan resim verisinin genişliğine göre uzaklık tayin ediliyor ve işbu uzaklığa göre robotun ileri veya geri gidip gitmemesi gerektiği kararlaştırılıyor. Ayrıca resim verisindeki robot pozisyonuna göre sağa veya sola dönüş davranışı uygulanıyor. Şekil 5'de bu algoritmayla çalışan robotların eşkenar üçgen oluşturduklarını görmekteyiz.



Şekil 5: Eşkenar üçgen oluşturan 3 robotun izledikleri yollar.

4.3. Dizilimi Koruma ve Tarama Benzetimi

Dizilim oluşturma uygulamasında olduğu gibi bu uygulamada da her robot aynı renktedir ve geniş açılı bir kamera kullanılmaktadır.

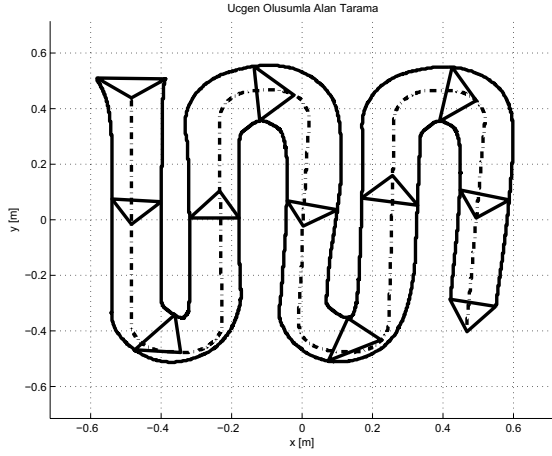
Robotlardan teki liderdir ve taranacak alanın kenarlarına gelip gelmediğini robot üzerinde bulunan ultrasonik sensörlerini kullanarak anlamaktadır. Alanın kenarlarına geldiğinde ise robot yönünü değiştirmektedir. Diğer iki robot ise şekli bozmadan lider robotu takip etmektedir. Bu şekilde düzgün bir tarama işlemi gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır.

Bu uygulamada karşılaşılan sorunlardan birisi kameradan alınan resimlerdeki optik bozulmalar ve hatalardır. (Bölüm 3'e bakınız.) Resmin uçlarında bulunan ve gerçekte robota yakın olan bir cisim görüntü bozulduğundan küçük görünmekte iken resmin uçlarının birkaç piksel içinde bulunan ve aynı boyutta görünen bir cisim gerçekte çok daha uzakta veya çok daha küçük olabilmektedir. Bu nedenle robotlar karar verirken belirli bir hata payı göz önünde bulundurularak esneklik kazandırılmıştır.

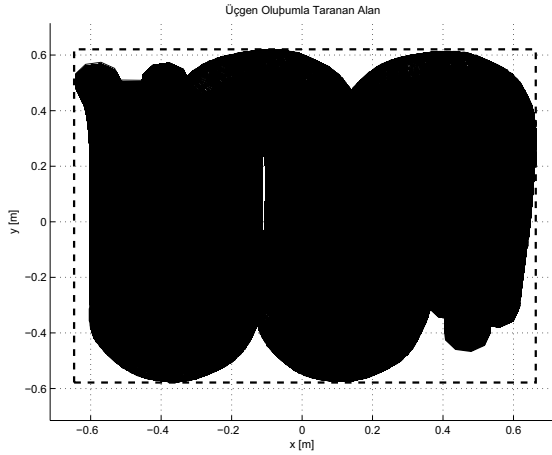
Uygulamada karşılaşılan bir başka sorun ise her robotun aynı mesafeyi kat etmemesidir. Dönüşler yapılırken dıştan dönen robot 4 kat daha fazla mesafe kat ederken içte bulunan robot lider robota göre daha az mesafe kat etmektedir. Dönüş anlarında kat edilen mesafelerin farkından ve görüntüdeki bozulmaların etkisini en aza indirmek için kazandırdığımız esneklikten dolayı dönüşlerde üçgen şekli küçük bozulmalarla karşılaşmaktadır (Bakınız Şekil 6).

Bu uygulamanın sonuçları Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Robotların benzetim boyunca izledikleri yollar Şekil 6'da çizdirilmiştir. Eğer robotların herbiri 65mm'lik yarıçapta çevrelerini tarayabiliyor olsalar (bilgi toplayabilse ya da süpürseler) benzetim sonunda taranan toplan alan Şekil 7'deki gibi olmaktadır. Robotlar arasındaki uzaklıkların toplamının benzetim boyunca

değişiminin gösterildiği grafik Şekil 8’de verilmiştir. Görüldüğü gibi toplam uzaklık dönme anlarında çok artmakta ve eşkenar üçgen yapısının bozulduğunu göstermektedir.



Şekil 6: Eşkenar üçgen oluşturarak alan tarayan 3 robotun izledikleri yollar. Bazı anlarda oluşturdukları üçgenler yollar üzerine çizilmiştir. Tire ve noktalı çizgi lider robotun izlediği yoldur.

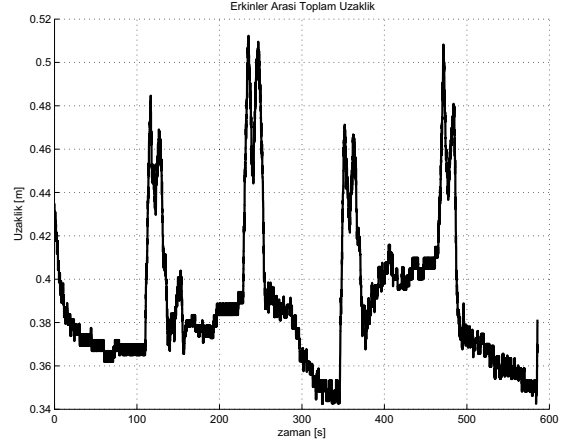


Şekil 7: Eşkenar üçgen oluşturarak alan tarayan 3 robotun 65mm’lik yarıçaplı komşulukları hakkında bilgi topladıkları varsayırsa sonuçta toplam taradıkları alan.

Dönmelerde oluşan hataların düzeltilebilmesi için kameradan alınan verinin daha etkin işlenmesi gerekmektedir. Öncelikle kameranın optik özelliklerinden dolayı ortaya çıkan görüntüdeki bozulmaların göz önüne alınması gerekmektedir. Ayrıca resim verilerinin anlık kareler kullanılarak değil de ardışık karelerin kullanılarak elde edilmesi ve böylece değişimin hesaplanması kontrolün daha gürbüz olmasını sağlayacaktır. Tüm bunlar yapıldıktan sonra çok vitesli bir sürüş sistemi kullanılarak uzaklıklar sabit tutulabilecektir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada Webots hareketli robot benzetim yazılımıyla sürü robot çalışmalarında sıkça karşılaştığımız bazı problemlerin benzetimleri üzerine çalışıldı. Döngüsel takip, dizilim oluşturma



Şekil 8: Eşkenar üçgen oluşturarak alan tarayan 3 robotun aralarındaki toplam uzaklığın benzetim süresince değişimi.

ve dizilimi bozmadan alan tarama problemleri açıklandıktan sonra Webots yazılımı kullanılarak bu problemlerin çözüldüğü algoritmalar ve benzetim sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmaya ek olarak burada kullanılan algoritmaların gerçek robotlara uygulanması, daha karmaşık problemler (daha çok robot kullanılan ve/ya diğer algılayıcıların kullanıldığı) için algoritmalar geliştirilmesi ileride yapılması planlanan çalışmalardır.

6. Kaynakça

- [1] C. W. Reynolds, "Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model," *Computer Graph.*, Cilt 21, Sayı 4, sayfa 25-34, 1987.
- [2] J. C. Latombe, "Robot Motion Planning," Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3] Y.-H. Liu, S. Kuroda, T. Naniwa, H. Noborio, ve S. Arimoto, "A practical algorithm for planning collision-free coordinated motion of multiple mobile robots," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cilt 3, sayfa 1427 - 1432, 14-19 Mayıs, 1989.
- [4] J. Barraquand, B. Langlois, ve J. C. Latombe, "Numerical potential field techniques for robot path planning," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Cilt 22, Sayı 2, sayfa 224-241, 1992.
- [5] J. P. Desai, J. Ostrowski, ve V. Kumar, "Modeling and Control of Formations of Nonholonomic Mobile Robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Cilt 17, Sayı 6, sayfa 905-908, Aralık 2001.
- [6] T. Balch ve R. C. Arkin, "Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Cilt 14, Sayı 6, sayfa 926-939, Aralık 1998.
- [7] V. Gazi ve K. M. Passino, "Stability Analysis of Swarms," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Cilt 48, Sayı 4, sayfa 692-697, Nisan 2003.
- [8] V. Gazi ve K. M. Passino, "Stability Analysis of Social Foraging Swarms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, Cilt 34, Sayı 1, sayfa 539-557, Şubat 2004.
- [9] V. Gazi ve K. M. Passino, "A Class of Attraction/Repulsion Functions for Stable Swarm Aggregations," *International*

- Journal of Control, Cilt 77, Sayı 18, sayfa 1567-1579, Aralık 2004.
- [10] V. Gazi, "Swarm Aggregations Using Artificial Potentials and Sliding Mode Control," IEEE Transactions on Robotics, Cilt 21, Sayı 6, sayfa 1208-1214, Aralık 2005.
- [11] R. Bachmayer ve N. E. Leonard, "Vehicle Networks for Gradient Descent in a Sampled Environment," IEEE Conference on Decision and Control, sayfa 112-117, Las Vegas, Nevada, Aralık 2002.
- [12] P. Ogren, E. Fiorelli, ve N. E. Leonard, "Formations with a Mission: Stable Coordination of Vehicle Group Maneuvers," Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, Ağustos 2002.
- [13] V. Gazi, "Formation Control of a Multi-Agent System Using Nonlinear Servomechanism," International Journal of Control, Cilt 78, Sayı 8, sayfa 554-565, 20 Mayıs 2005.
- [14] H. G. Taner, A. Jadbabaie, ve G. J. Pappas, "Stable Flocking of Mobile Agents, Part I: Fixed Topology," IEEE Conference on Decision and Control, sayfa 2010-2015, Maui, Hawaii, Aralık 2003.
- [15] H. G. Taner, A. Jadbabaie, ve G. J. Pappas, "Stable Flocking of Mobile Agents, Part II: Dynamic Topology," IEEE Conference on Decision and Control, sayfa 2016-2021, Maui, Hawaii, Aralık 2003.
- [16] J. P. Wangermann ve R. F. Stengel, "Optimization and coordination of multiagent systems using principled negotiation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Cilt 22, Sayı 1, sayfa 43-50, 1999.
- [17] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, ve F. Bullo, "Coverage control for mobile sensing networks," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Cilt 20, Sayı 2, sayfa 243-255, 2004.
- [18] S. Patnaik, A. Konar, ve A. K. Mandal, "Improving the multi-agent coordination through learning," IETE Journal of Research, Cilt 51, Sayı 5, sayfa 395-406, Ekim-Kasım 2005.
- [19] E. Uchibe, M. Nakamura, ve M. Asada, "Cooperative behavior acquisition in a multiple mobile robot environment by co-evolution," LNAI 1604, sayfa 273-285, 1999
- [20] M. Asada, E. Uchibe, K. Hosoda, "Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development," AI, Cilt 110, Sayı 2, sayfa 275-292, Haziran 1999.
- [21] L. Moreau, "Stability of Multiagent Systems With Time-Dependent Communication Links," IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 50, Sayı 2, sayfa 169-182, Şubat 2005.
- [22] W. Ren ve R. W. Beard, "Consensus Seeking in Multiagent Systems Under Dynamically Changing Interaction Topologies," IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 50, Sayı 5, sayfa 655-661, Mayıs 2005.
- [23] V. Gazi, "Stability of an Asynchronous Swarm with Time-Dependent Communication Links," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics: Part B, yayına gönderildi.
- [24] J. A. Marshall, M. E. Broucke, B. A. Francis, "Formations of vehicles in cyclic pursuit," IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 49, Sayı 11, sf 1963-1974, 2004.
- [25] J. A. Marshall, M. E. Broucke, B. A. Francis, "Pursuit formations of unicycles," Automatica, Cilt 42, Sayı 1, sf. 3-12, 2006.
- [26] A. T. Şamiloğlu, V. Gazi, ve A. B. Koku, "Asynchronous Cyclic Pursuit," S. Nolfi et al. (edt.), SAB06, LNAI 4095, sf. 667-678, 2006.
- [27] Y. Liu ve K. M. Passino ve M. M. Polycarpou, "Stability Analysis of One-Dimensional Asynchronous Swarms," IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 48, Sayı 10, sayfa 1848-1854, Ekim 2003.
- [28] Y. Liu ve K. M. Passino ve M. M. Polycarpou, "Stability Analysis of M-Dimensional Asynchronous Swarms with a Fixed Communication Topology," IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 48, Sayı 1, sayfa 76-95, Ocak 2003.
- [29] V. Gazi ve K. M. Passino, "Stability of a One-Dimensional Discrete-Time Asynchronous Swarm," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Part B, Cilt 35, Sayı 4, sayfa 834-841, Ağustos 2005.
- [30] A. T. Şamiloğlu, V. Gazi, ve A. B. Koku, "Effects of Asynchronism and Neighborhood Size on Clustering in Self-Propelled Particle Systems," ISCIS06, LNCS 4263, sf. 665-676, 2006.
- [31] E. Sahin, "Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application," in "Swarm Robotics: State-of-the-art Survey", E. Sahin ve W. Spears (edt.), LNCS 3342, sf. 10-20, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [32] M. Mataric, Issues and approaches in the design of collective autonomous agents, Robotics and Autonomous Systems, Cilt 16, sayfa 321-331, Aralık 1995.
- [33] V. Gazi ve B. Fidan, "Control and Coordination of Multi-Agent Dynamic Systems: Models and Approaches," E. Şahin, W. M. Spears, and A. F. T. Winfield (edt.), Proceedings of the Second Swarm Robotics Workshop, LNCS 4433, sf. 71-102, 2007.
- [34] A. T. Şamiloğlu, V. Gazi, ve A. B. Koku, "Sürü Robotikliği ve Çok-Erkinli Sistemlerdeki Koordinasyon Problemleri," Türk Otomatik Kontrol Konferansı (TOK06), sf. 419-427, Ankara, Kasım 2006.
- [35] L. Bayındır ve E. Şahin, "A review of Studies on Swarm Robotics," Elektrik Dergisi, Cilt 217, Temmuz 2007.
- [36] Special Issue on Swarm Robotics, M. Dorigo ve E. Şahin (edt.), Autonomous Robots, Cilt 17(2-3), Kasım 2004.
- [37] "Swarm Robotics, A State of the Art Survey," E. Şahin ve W. M. Spears (edt.), LNCS 3342, Springer-Verlag, 2005.
- [38] Proceedings of the Second Swarm Robotics Workshop, E. Şahin, W. M. Spears, and A. F. T. Winfield (edt.), LNCS 4433, 2007.
- [39] Special Issue on Swarm Robotics, V. Gazi (edt.), Elektrik Dergisi, Cilt 217, Temmuz 2007.
- [40] Bernhart, A.: Polygons of Pursuit. Scripta Mathematica (1959)
- [41] Klamkin, M.S., Newman, D.J.: Cyclic pursuit or "the three bugs problem". The American Mathematical Monthly **78**(6) (1971) 631-639
- [42] Behroozi, F., Gagnon, R.: Cyclic pursuit in a plane. Journal of Mathematical Physics **20**(11) (1979) 2212-2216
- [43] Richardson, T.J.: Non-mutual captures in cyclic pursuit. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence **31** (2001) 127-146
- [44] Bruckstein, A.M., Cohen, N., Efrat, A.: Ants, crickets and frogs in cyclic pursuit. Center Intell. Syst., Technion-Israel Inst. Technol. (1991)