

Üç Boyutlu Uzayda Çok Yöneticili Mobil Robotlar ile Sürü Hareketi Planlaması

Zülal Tosunoğlu¹, Serkan Kurt²

^{1,2}Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü / Fen bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
¹(zulaltosunoglu@gmail.com)
²(skurt@yildiz.edu.tr)

Özet – Bu çalışmada üç boyutlu uzayda çok yöneticili bir yöntem ile mobil robotların ortak hareketi ve sürekli kalibrasyon ile optimum konum belirlenmesi sağlanmıştır. Mobil robotların bilinen bir hedef görevi tamamlaması süresince izlemesi gereken uygun yolların belirlenmesi üzerine çeşitli Sürü Zekası (SZ) algoritmaları incelenmiştir. İncelenen bu algoritmalarından yola çıkılarak Örümcek Maymun Optimizasyon (ÖMO) algoritmasının hedeflenen optimum yol belirleme metodolojisine uygun olduğu görülmüştür. Çoklu mobil robotların kullanım alanlarının genişlemesi ile belirlenen optimum yol boyunca senkronize paralel hareketi sırasında birbirine göre konum belirlemesi ve mobil robotların birbiri ile sürekli iletişimde olması hedef görevin başarılı şekilde tamamlanması açısından kritik hale gelmiştir. Bahsedilen kritik konulara çözüm geliştirmek amacıyla belirli bir hedefe sahip ve belirli bir rota içerisinde senkronize paralel hareket eden çoklu mobil robotların üç boyutlu uzayda birbirine göre konumunun matematiksel olarak modellenmesi ve bu konumdaki hata miktarının kalibre edilmesi üzerine çalışılmıştır. Matematiksel olarak modellenen üç boyutlu konumdaki hata miktarının kalibrasyonu mobil robotların GPS ve erişim noktaları gibi konumlandırıcı verileri ve sözde ters matriside (pseudo inverse matrix) kullanılarak hesaplanan konum bilgisi ile ifade edilmiştir. Mobil robotların birbiri ile sürekli halde iletişimde olması ve birbirlerini belirlenen ortam sınırları içerisinde kaybetmemeleri için alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI- Received Signal Strength Indication) bilgilerinden yararlanılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Mobil robotlar, sürü algoritması, optimizasyon, üç boyutlu uzay, sözde ters matris

Swarm Movement Planning with Multi Master Robots in 3D Space

Abstract – In this study, it is provided to determine the optimum position with the joint movement of mobile robots and continuous calibration with a multi-master method in 3D space. Various Swarm Intelligence (SI) algorithms have been examined to determine the appropriate paths that mobile robots must follow during the completion of a known target task. Based on these algorithms, it was found that the Spider Monkey Optimization (SMO) algorithm is in accordance with the targeted optimum path methodology. The position of the mobile robots in relation to each other during synchronized parallel movement along the optimum path determined and the uninterrupted communication of the mobile robots with each other have become critical for the successful completion of the target task by the expansion of the usage areas of the multiple mobile robots. In order to solve these critical issues, mathematical modeling and calibrating of the error position in three dimensional space of multiple mobile robots which have a specific target and synchronized parallel movement in a given route have been studied. Calibration of the error amount in 3-dimensional mathematically modeled position is expressed by the position data calculated according to using pseudo inverse matrix and localization sources such as GPS and access points data of mobile robots. RSSI (Received Signal Strength Indication) information was used to keep mobile robots in uninterrupted communication with each other and not to lose each other within the specified environment.

Keywords – Mobil robots, Swarm algorithm, Optimization, 3 dimensional space, Pseudo inverse matrix

I. GİRİŞ

Sürü zekası, 1993 yılında Gerardo Beni ve Jing Wang [1] tarafından önerilmiş olup robotik sistemler-yapay zeka çatısı altında merkezi bir kontrolün olmadığı ve bireysel zeka yerine kolektif zekayı gerektiren problemlere karşı ortak davranış sergileyen ve kendi içerisinde organize olabilme yeteneğine sahip doğal veya yapay sistemler için kullanılan bir yaklaşımdır. Geçtiğimiz yıllar boyunca pek çok sürü zekası tabanlı optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada Tablo-1’de verilen optimizasyon türleri incelenmiştir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), balık ve kuş sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenilerek 1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından geliştirmiştir [2]. PSO

algoritmasında hedefe ulaşmak için sürü içerisinde liderlik etmekle görevli herhangi bir lider bulunmaz. Bir kuş sürüsü yiyecek aramaya çıktığında herhangi bir lidere ihtiyaç duymadan besin kaynağına en yakın üye ile birlikte yoluna devam eder. Sürü içindeki üyelerin birbirleri ile olan iletişimi ile istenen hedefe ulaşılmış olunur. PSO algoritması bir grup parçacıklardan oluşmuş olup her bir parçacık potansiyel bir çözümü ifade etmektedir [2].

Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO), 1992 yılında Marco Dorigo tarafından öne sürülen popülasyon tabanlı sürü zekası algoritmalarından biridir. Karınca kolonisi optimizasyonu stigmergy olarak da bilinen indirekt iletişim konseptine dayanır. Bu konseptin ilkesi ortamda izler bırakıp bir sonraki hareket için koloniyi tetiklemektir. Bir karınca

hareket ederken veya bir görevi yerine getirirken arkalarında feromon denilen bir maddeyi bırakırlar. Karıncalar tarafından ortama bırakılan bu maddenin miktarı diğer karıncaların aktivitelerini değiştirir ve bu karıncalar feromon salgılayan karıncayı takip eder. Karıncalar besin kaynağına giden rotalarda belirleme yaparken yol üzerinde bulunan feromon miktarına göre karar verirler [3].

Tablo 1. Üyeler ve Sürü Zekası Algoritmaları

Üye	Sürü Zekası Algoritması
Parçacık	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [2]
Karıncı	Karıncı Kolonisi Optimizasyonu (KKO) [3]
Arı	Yapay Arı Kolonisi (YAK) [4]
Ateşböceği	Ateş Böceği Algoritması (ABA) [5]
Bakteri	Bakteriyel Besin Arama (BBA) [6]
Guguk Kuşu	Guguk Kuşu Arama (GKA) [7]
Kurbağa	Sıçrayan Kurbağa Optimizasyonu (SKO) [8]
Mirket	Mirket Klan Algoritması (MKA) [9]
Maymun	Örümcek Maymun Optimizasyonu (ÖMO) [10]

YAK, 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından arıların nektar toplama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir [4]. Bir yapay arı kolonisi 3 farklı gruptaki arılardan oluşmaktadır. Bunlar işçi arılar, gözcü arılar ve kaşif arılardır. Koloninin ilk yarısı işçi arılarla dolu iken diğer yarısı da gözcü arılar ile doludur. Her bir besin kaynağı için sadece bir tane işçi arı görevlidir. Diğer bir deyişle nektar kaynağı kadar işçi arı vardır. Nektar kaynağının arılar tarafından tüketilmesi durumunda kaynağı tüketen işçi arılar kaşif arılara dönüşerek yeni nektar kaynağı aramaya koyulurlar. Bu optimizasyon yöntemine göre ilk olarak işçi arılar nektar kaynağına doğru yol alır ve nektar kaynağına ulaştıklarında kaynağın miktarını hesaplar. Gözcü arılar ise işçi arılardan gelen nektar miktarı bilgisine göre olasılık değerini hesaplar. Aynı zamanda işçi arıların tüketilen nektar kaynaklarına gitmelerini önler. Kaşif arıları yeni nektar kaynakları bulmak üzere rasgele şekilde arama alanına gönderir [4].

ABA ilk olarak 2007 yıllarında Yang tarafından ateşböceklerinin yanıp sönmeye düzenleri ve davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir. Ateşböcekleri tek eşeyli olduklarından cinsiyetlerinden bağımsız olarak bir ateşböceği diğeri tarafından çekicilik kazanacaktır. Çekicilik oranı ateşböceklerinin parlaklıkları ile orantılıdır ve birbirlerinden uzaklaştıkça bu oran azalır. Dolayısıyla ateşböceklerinin eğilimi daha parlak olana doğru olacaktır. Herhangi bir ateşböceğinin diğerinden daha parlak olmadığı durumlarda rasgele hareket ederler [5].

BBA, E.Coli ve M. Xanthus bakterilerinin davranışlarından esinlenilerek 2002 yılında Passino tarafından öne sürülmüştür. Bu bakteriler birim zamandaki enerjiyi en verimli şekilde kullanarak besin arama işlevini yerine getirirler. E. coli bakterisi besin kaynağına ulaştığında ortamda bulunan diğer bakteriler için uyarıcı etkiye sahip kimyasal bir madde salgılamaktadır. Bu madde diğer E. coli bakterilerinin besini bulan bakterinin bulunduğu yere doğru hareket etmesini sağlamaktadır. Eğer besin yoğunluğu çok fazla ise bakteriler kenetlenerek grup halinde hareket edebilmektedirler. Bakteriler arama alanında daima besin yoğunluğunun daha fazla olduğu alana doğru ilerlerler. Yeterince besin kaynağına sahip bakteriler daha uzun ömre sahiptir ve iki eşit parçaya bölünür. Daha az besin bölgesindeki bakteriler de dağılır ve ölür. Besin açısından daha zengin bölgede bulunan bakteriler kimyasal feromon ile diğerlerine doğru çekilirler [6].

GKA, 2009 yılında Yang ve Deb tarafından önerilen bu algoritma guguk kuşlarının yuvalarındaki diğer ev sahibi guguk kuşları ile birlikte yumurtaları üzerinde oturma davranışından esinlenilerek ortaya konulmuştur. Her bir guguk kuşu rasgele seçilen bir yuvada belirli bir zaman süresince yumurtaları üzerinde oturur. Yüksek kaliteli yumurtaları olan en iyi yuvalar seçilerek bir sonraki nesillere taşınır. En kötü yuva, daha iyisi bulunmak üzere guguk kuşları tarafından terk edilir ve arama davranışı içerisine girerler [7].

SKO, PSO' ye ait hız parametresinin kullanılmadığı Correa ve Freitas tarafından önerilen sezgi-üstü (meta-heuristic) yöntemlerden biridir [8]. Ayrık uzayda sürekliliğin olmadığı durumlarda hareket, hız ve atalet kavramı anlamını yitirmektedir. Bu parametrelerin olmadığı durumlarda SKO devreye girer ve çekiciliği en iyi pozisyonda tutar. Hız ve atalet parametreleri yerine partiküllerin hareketinde rasgele bir bileşen olduğu varsayılır. Bu rasgele bileşen kurbağaların zıplama şekli olarak belirlenmiştir. Partikülün hızı ve konumunun güncellenmesi Correa ve Freitas önerilen yöntemle göre partikülün en iyi konumunun çekiciliği, en iyi global konumun çekiciliği veya kendi sosyal ortamındaki en iyi konumunun çekiciliği ile yönlendirilmesinin olasılıkları olarak yorumlanır [8].

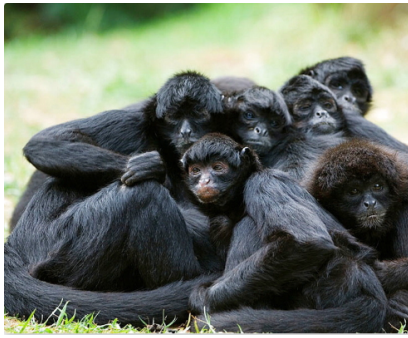
Yeni bir sürü zekası algoritması olarak öne sürülen MKA, mirket hayvanlarının koloni içindeki davranışlarından esinlenilerek 2018 yılında öne sürülmüştür [9]. Kolonilerinde 5'ten 30'a kadar mirketle yaşayan bu hayvanlar nöbetçi, besin avcısı ve bebek bakıcısı görevleri ile sınıflandırılmıştır. Koloni içerisinde en az bir adet mirket, kolonilerini dışarıdan gelebilecek tehlikelere karşı korumak için nöbetçi olarak görevlendirilir. Nöbetçi mirket veya mirketler tehlikeli bir durumla karşılaştığında havlama davranışında bulunarak kolonideki diğer mirketleri uyarır. Bu uyarı sinyalini alan mirketler yuvalarına koşar. Nöbetçi mirketler tehlike geçene kadar diğer mirketlerin yuvadan çıkmasını engellemek için havlamaya devam ederler. Koloni içerisindeki genç üyeler tehlike anında bebek bakıcısı görevini üstlenen mirket tarafından güvenli bölgeye yerleştirilir. Mirketler besin arama davranışı sırasında birbirleri ile görsel ve işitsel temasını sürdürürler. Bu algoritmada koloninin en iyileri nöbetçi olarak seçilirken geri kalanı besin avcısı ve bebek bakıcısı olarak 2 farklı gruba ayrılır. Besin avcısı grubundaki en kötü performanslı sahip mirket bebek bakıcı grubuna aktarılır. Bebek bakıcısı grubundaki en kötü performanslı sahip birey ise gruptan çıkarılır ve yerine başka bir mirket dahil edilir. Besin avcısı grubundaki en iyi birey ise nöbetçi görevini üstlenen mirket ile değiştirilir. Her mirket kolonisi hem dişi ve hem de erkek lidere sahiptir [9].

ÖMO, 2014 yılında örümcek maymunların avlanma davranışından esinlenilerek önerilen diğer sürü zekası tabanlı algoritmalarından biridir. Örümcek maymunlar bölünme-birleşme sosyal yapısında kategorize edilirler. Bu sosyal yapıya göre örümcek maymunlar besin kıtlığı veya besine ulaşılabilirlik açısından büyük gruplardan küçük gruplara ayrılırlar. Bu optimizasyon yönteminde grubu yönetmek ve besin kaynağı bulmakla görevli dişi bir lider bulunmaktadır. Dişi lider yeterli besin kaynağı bulamadığı durumlarda grubu alt gruplara böler ve bu alt grupların liderleri yine dişi üyelerden oluşmaktadır. Alt gruplar besin arama davranışına devam ederken bulunan besin kaynaklarından haberdar olmak ve belirli çevresel sınırlar içinde kalmak amacıyla birbirleri ile iletişim halinde olurlar [10].

Bu çalışmada önerilen sürü hareketi planlamasında ÖMO yönteminden esinlenilerek Bölüm 2’de ÖMO sürü zekası yöntemi detaylı şekilde açıklanmıştır. Bölüm 3’te çoklu robotların konum belirleme yöntemlerinden bazılarını yer verilmiştir. Bölüm 4’te ise bu çalışmanın konusu olan belirli bir hedefe sahip ve belirli bir rota içerisinde senkronize paralel hareket eden çoklu mobil robotların üç boyutlu uzayda birbirine göre konumunun matematiksel olarak modellenmesi ve bu konumdaki hata miktarının kalibre edilmesi üzerine çalışılmıştır. Bölüm 5’te çalışmamız ana hatları ile özetlenmiştir.

II. ÖMO ALGORİTMASI

Örümcek maymunların avlanma davranışı araştırmacılara bölünme-birleşme (fission-fusion) sosyal yapısına dayalı yeni bir stokastik optimizasyon tekniğinin gelişmesinde ilham olmuştur [10].

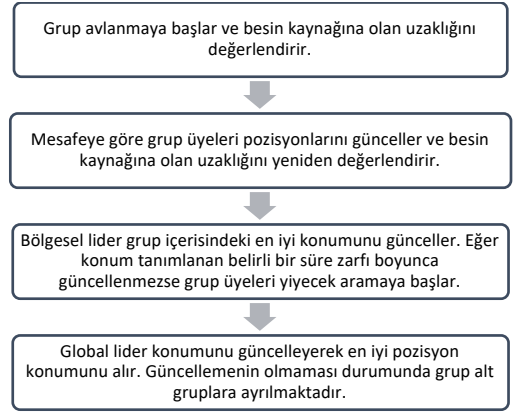


Şekil 1 Örümcek Maymun Sürüsü [11]

Bölünme-birleşme sosyal yapısının özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- I. Belirtilen sosyal yapıya sahip hayvanlar 40-50 bireyden oluşan gruplarda yaşamakla beraber bu yapıya sahip sürüler grup üyeleri arasındaki avlanma rekabetini azaltmak ve besin aramak için grubu alt gruplara böler.
- II. Grubu yöneten dişi lider (global lider) aynı zamanda besin kaynağı aramakla da yükümlüdür. Yiyecek bulamadığı durumlarda grubu 3-8 bireyden oluşan küçük alt gruplara böler.
- III. Oluşan bu küçük alt gruplar yine dişi bir lider (bölgesel lider) tarafından yönetilmektedir. Küçük alt gruplardaki liderler avlanma için belirlenen rotaların hangisinin daha uygun olduğuna karar vermekle görevlidir.
- IV. Alt grupların üyeleri belirli arama sınırları içerisinde kalmak ve besin kaynağının ulaşılabilirliğine bağlı olarak kendi içlerinde ve birbirleri ile sürekli iletişimde kalırlar.

Geliştirilen bu strateji göre bu sosyal yapıya sahip hayvanların avlanma davranışı 4 aşamada açıklanmaktadır:



Şekil 2 Örümcek Maymun Sürüsü Avlanma Davranışı

Bu dört aşama istenilen sonuç elde edilene kadar birbirini tekrar eder.

Bu optimizasyon yönteminde iki adet kontrol parametresi vardır. Bunlardan biri global lider limiti diğeri ise bölgesel lider limit olarak adlandırılır. Bölgesel lider limiti alt grubun besin arama davranışının kesintiye uğramaması için kullanılır. Eğer bölgesel lider tanımlanan süre içerisinde konumunu güncellemezse alt grup besin arama davranışına farklı yönlerde devam eder. Buradaki tanımlanan süre bölgesel lider limiti kontrol parametresi olarak adlandırılır. Global lider limiti de aynı amaçla global lider için kullanılır. Global lider tanımlanan süre içerisinde konumunu güncellemezse grubu alt gruplara böler. Örümcek Maymun Optimizasyonu yönteminde sürünün kendine ait organizasyon yeteneğine sahip olması ve iş bölümünde bulunabilmeleri nedeniyle sürü zekası algoritmalarından biri olma özelliği kazanmaktadır [10].

Bu çalışmada bahsedilen çok yöneticili mobil robotların sürü hareketi planlanırken şu varsayımlardan yararlanılmıştır. Amacımız hareket boyunca optimum yolun belirlenmesi olduğu için sürünün minimum 4 adet mobil robottan oluşması gerekmektedir. Robotlar sürüdeki görevine göre ikişer adet yönetici (kaşif) ve takipçi robot olarak ayrılmaktadır. Belirlenen robot sayısı ve hiyerarşisi dışında bir adet yönetici (kaşif) robotun olması durumunda takipçi robotlar optimum yolu takip etmektense yönetici (kaşif) robot nereye giderse oraya yönlenecektir. Bu yüzden popülasyonda en az iki yönetici (kaşif) robotun bulunması gerekmektedir. Benzer şekilde üç şeritli bir otoyolda en hızlı giden şeridi bulmak için üç farklı arabanın her bir şeridi ayrı ayrı deneyimlemesi gerekiyorsa, yönetici (kaşif) robotların da optimumum yolu bulmak için alternatif yollar adedinde olması gerekmektedir. Üç şeritli bir yolu tek veya iki adet yönetici (kaşif) robotun deneyimlemesi optimumum yolun bulunması açısından yetersizdir. Dört adet yönetici robotun kullanılması da bu perspektifte gereksiz olacaktır. İki adet takipçi robotun kullanılma nedenine değinecek olursak, iki robottan biri konumunu kaybederse çevresindeki robotlara yayın (broadcast) yaparak konum bilgisi ister. Bu durumda konumunu kaybeden robot her bir robotla haberleşerek üç robotun konum bilgisini yani RSSI bilgisini alır.

Bu çalışmada planlanan mobil robotların sürü hareketi ile ÖMO algoritması arasındaki ilişki Tablo-2’de verilmiştir:

Tablo 2. ÖMO algoritması ve Çoklu Robot Sürü Hareketinin İlişkilendirilmesi

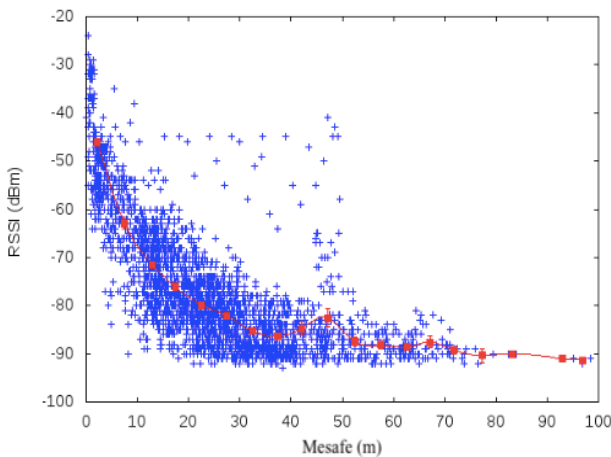
Esinlenen Davranışlar	Mobil Robotların Davranışı
Besin aramak için küçük alt gruplara bölünme	Mobil robotların sınırları belirli olan ortam içerisinde hedeflenen göreve ulaşabilmesi için gruplara ayrılarak farklı rotaları deneyimlemesi
Her alt grubun bir tane dışı liderinin bulunması	Ayrılan her robot grubuna ait bir tane yönetici (kaşif) robotun bulunması ve diğer takipçi robotların yönetici (kaşif) robotu izlemesi
Oluşan bu küçük alt gruplar yine dışı bir lider (bölgesel lider) tarafından yönetilmektedir. Küçük alt gruplardaki liderler avlanma için belirlenen rotaların hangisinin daha uygun olduğuna karar vermekle görevlidir.	İzlenen rotaların kıyaslanarak hedefe ulaşmada en kısa ve hızlı olanının seçilmesi,
Alt grupların üyeleri belirli arama sınırları içerisinde kalmak ve besin kaynağının ulaşılabilirliğine bağlı olarak kendi içlerinde ve birbirleri ile sürekli iletişimde kalırlar.	Mobil robot gruplarının konum bilgisi ve data aktarımı için birbirleri ile sürekli iletişimde kalması

III. KONUM BELİRLEME TEKNİKLERİ

Bu bölümde bazı konum belirleme teknikleri hakkında bilgi verilmiştir.

A. Alınan Sinyalin Gücü Göstergesi (RSSI)

Kapalı mekan uygulamalarında geniş çapta kullanılan en basit yaklaşımlardan biridir. Genellikle desibel-miliwatt cinsinden alıcı kanaldan alınan sinyalin gücünü ifade eder. RSSI, alıcı ve verici arasındaki mesafeyi tahmin ederken yüksek RSSI değeri alıcı ve verici arasındaki mesafenin kısa olduğunu ifade eder [11]-[13].



Şekil- 3 RSSI ve mesafe arasındaki ilişki

RSSI alınan sinyalin gücünü belirten bir gösterge olup, göstergenin ilişkili ölçüm değeri çip üreticisi firma tarafından belirlenir. Atheros 0 – 60 değerini kullanırken, Cisco 0 – 100 aralığını kullanmaktadır. Genel olarak tüm üreticiler 0 'a en

yakın olan değer her zaman daha iyi sinyal olduğunu göstermektedir [14].

Bu çalışmada RSSI bilgisi mobil robotların ortam içerisinde birbirlerini kaybetmemeleri ve sürekli olarak iletişimde kalmalarını sağlamak için kullanılmıştır. Mobil robotlar iletişimin kesintisiz olarak sağlandığı belirli bir mesafenin dışına çıktıklarında sahip oldukları RSSI bilgisi ile birbirlerini belli sınırlar içerisinde kalmak için uyarırlar.

B. Parmak İzi Analizi

Bu tekniğe dayalı konum belirleme yönteminde analizi sağlayacak veriler için ortam veya çevresel koşullara ait özelliklerin araştırılması gerekmektedir. Başlangıçta çevrimdışı iken RSSI ölçümleri toplanır. İkinci aşamada ise gerçek eş zamanlı olarak çevrimiçi ölçümler alınır ve her iki ölçüm değerleri kıyaslanır. Çeşitli algoritmalar (olasılıksal) metotlar, yapay sinir ağları, en yakın komşu metodu ve destek vektör makineleri vb.) yardımıyla sinyalin ait olduğu konum tahmin edilir. Daha sonra sinyalin gerçekte ait olduğu konum ve tahmin edilen konumun birbirleriyle kıyaslanarak kullanılan algoritmanın doğruluğu belirlenir [15].

C. GPS (Global Positioning System)

1960'lı yıllardan beri kullanılan ve Amerikan Ordusu tarafından geliştirilen GPS sistemi günümüzde halen işlevini tam olarak yerine getirmekle birlikte optimum konum belirleme sistemi için belirlenen kriterleri (küresel kapsama alanı, sürekli ve tüm hava koşullarında çalışma, hızlı değişen platformlara hizmet verebilme yeteneği ve yüksek doğruluk) karşılamaktadır. Bu sistem uygun ekipmanlarla birlikte kullanıcılara üç boyutlu (3B) konum ve hız bilgisi sağlamaktadır. GPS sistemi en çok navigasyon uygulamalarında kullanılmakla birlikte sağladığı frekans ve zaman doğruluğu nedeniyle telekomünikasyon uygulamalarında da kullanılmaktadır [16].

IV. ÜÇ BOYUTLU UZAYDA KONUMUNUN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ VE HATA KALİBRASYONU

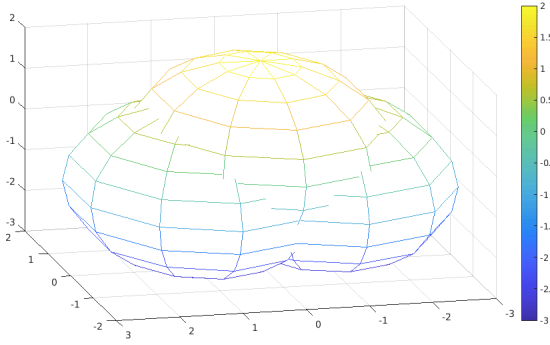
Bu bölümde ilk alt başlıkta 3 Boyutlu (3B) uzayda koordinat sistemi ile konumun belirlenmesi konusuna değinilmiştir. İkinci alt başlıkta ise belirlenen konumun içerdiği veya içerebileceği hata miktarının kalibrasyonu üzerinde çalışılmıştır.

A. 3B Koordinat Sistemi

3B uzayda herhangi bir noktaya ait konumun belirlenebilmesi için üç farklı noktaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu üç noktanın keşiştiği nokta konumu belirlenmek istenen noktanın pozisyonunu belirtir. Örnek olarak Şekil 5'te üç küre 3B uzayda çakıştırılmıştır. MATLAB kodları Şekil-4'te verildiği gibidir.

```
>> [x, y, z]=sphere(10);
>> mesh(2*x, 2*y, 2*z)
>> hold on
>> mesh(2*x, 2*y-1, 2*z-1)
>> mesh(2*x, 2*y+1, 2*z-1)
```

Şekil- 4 Çakıştırılan üç küreye ait MATLAB kodu



Şekil-5 MATLAB yardımıyla üç kürenin çakıştırılması

Küre Denklemi:

Merkezi $C(h, k, l)$ ve yarıçapı r olan kürenin denklemi;

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 + (z - l)^2 = r^2 \quad (1)$$

Üç Boyutlu Uzayda İki Nokta Arasındaki Mesafe

$P_1(x_1, y_1, z_1)$ ve $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 3B uzayda tanımlı iki nokta olsun. Bu iki nokta arasındaki mesafe denklem-8'de verilmiştir:

$$|P_1P_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (2)$$

B. Kalibrasyon

Bu kısımda robot bilinen konum ve GPS verisinden öğrendiği gerçek konum arasındaki hata miktarını kalibre edilmesi matematiksel olarak modellenmiştir. Bir mobil robotun sadece konumunu bilmesi yeterli değildir. Gövde pozisyonunda bilinmelidir ki yön tayini yapılabilir. Lineer bir tahmin için 2 farklı noktanın zamana göre analizi yeterlidir.

Gerçek Konum: Robotun matematiksel olarak hatalardan arındırılmış konumu.

Bilinen Konum: Robotun matematiksel olarak hatalar ile toplam konumu.

Terimlerin gösterimi

Robotun gerçek konumu: G

Robotun bilinen konumu: B

Durum etiketi: D

Yönetici (Kaşif) robot: Y

Takipçi robot: T

Robot etiketi: $i=1, \dots, n$.

Hata: ϵ

${}^D_G X_i(t)$ = i. robotun popülasyon içerisinde sahip olduğu role göre t anındaki X eksenine göre gerçek konumu,

${}^D_G Y_i(t)$ = i. robotun popülasyon içerisinde sahip olduğu role göre t anındaki Y eksenine göre reel konumu,

${}^D_G Z_i(t)$ = i. robotun popülasyon içerisinde sahip olduğu role göre t anındaki Z eksenine göre reel konumu,

${}^D_B X_i(t)$ = i. robotun popülasyon içerisinde sahip olduğu role göre t anındaki X eksenine göre bilinen konumu,

${}^D_B Y_i(t)$ = i. robotun popülasyon içerisinde sahip olduğu role göre t anındaki Y eksenine göre bilinen konumu,

${}^D_B Z_i(t)$ = i. robotun popülasyon içerisinde sahip olduğu role göre t anındaki Z eksenine göre bilinen konumu,

$\epsilon_{X_i}(t)$ = i. robotun t anındaki X eksenine göre hatası

$\epsilon_{Y_i}(t)$ = i. robotun t anındaki Y eksenine göre hatası

$\epsilon_{Z_i}(t)$ = i. robotun t anındaki Z eksenine göre hatası

$${}^D_G X_i(t) = {}^D_B X_i(t) - \epsilon_{X_i}(t) \quad (3)$$

$${}^D_G Y_i(t) = {}^D_B Y_i(t) - \epsilon_{Y_i}(t) \quad (4)$$

$${}^D_G Z_i(t) = {}^D_B Z_i(t) - \epsilon_{Z_i}(t) \quad (5)$$

3B Gerçek Pozisyon:

$${}^D_G P_i(t) = ({}^D_G X_i(t), {}^D_G Y_i(t), {}^D_G Z_i(t)) \text{ veya}$$

$${}^D_G P_i(t) = {}^D_G (X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)) \quad (6)$$

3B Bilinen Pozisyon:

$${}^D_B P_i(t) = ({}^D_B X_i(t), {}^D_B Y_i(t), {}^D_B Z_i(t)) \text{ veya}$$

$${}^D_B P_i(t) = {}^D_B (X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)) \quad (7)$$

Verilen bu matematiksel ifadelerle göre iki robot arasındaki bilinen mesafe denklem-8'deki gibi ifade edilir; robotlardan biri a diğeri ise b olsun;

$${}^D_B |P_a(t)P_b(t)| = \sqrt{{}^D_B ((X_a(t) - X_b(t))^2 + (Y_a(t) - Y_b(t))^2 + (Z_a(t) - Z_b(t))^2)} \quad (8)$$

Aynı şekilde iki robot arasındaki gerçek mesafe ise denklem-9 ile ifade edilmiştir;

$${}^D_G |P_a(t)P_b(t)| = \sqrt{{}^D_G ((X_a(t) - X_b(t))^2 + (Y_a(t) - Y_b(t))^2 + (Z_a(t) - Z_b(t))^2)} \quad (9)$$

İki robot arasındaki bilinen ve gerçek mesafe arasındaki toplam hatalar ϵ_T olarak gösterilmiştir.

$$\epsilon_T = \sqrt{\epsilon_{X_i}(t)^2 + \epsilon_{Y_i}(t)^2 + \epsilon_{Z_i}(t)^2} \quad (10)$$

C. Sözde Ters Matris

Bir A matrisinin sütunları lineer olarak bağımsız ise $A^T.A$ sonucu oluşan matris tersinir matristir. Bu bilgi doğrultusunda aşağıdaki verilen sözde ters matrisi formülü (denklem-11) oluşturulmuştur.

$$A^+ = (A^T.A)^{-1}.A^T \quad (11)$$

Denklem-12'de verilen A^+ , A matrisinin soldan tersidir. Bu durumda;

$$A^+.A = E \quad (12)$$

Eğer A matrisinin satırları lineer olarak bağımsız ise sözde ters matrisi formülü denklem-13'deki gibi oluşturulmuştur.

$$A^+ = A^T.(A.A^T)^{-1} \quad (13)$$

Denklem-14'de verilen A^+ , A matrisinin sağdan tersidir. Bu durumda;
 $A \cdot A^+ = E$ (14)

Eğer A matrisinin hem satırları hem de sütunları lineer olarak bağımsız ise A matrisi tersinirdir ve sözde ters matrisi matrisin tersine eşittir [17], [18]. Sözde ters matris konusu bu bölümde örnek bir soru çözümü ile açıklanmıştır.

Örnek: 3B uzayda tabloda verilen üç noktanın konumları ve bir hedefe olan uzaklıkları aşağıda verilmiştir. Hedef noktanın D(11,12,8) olduğu bilinmektedir;

Nokta	Hedefe Olan Mesafe
A(2,16,3)	$\sqrt{122}$
B(18,8,12)	$\sqrt{101}$
C(15,1,10)	$\sqrt{141}$

Verilen bu üç noktanın küre denklemlerini yazalım;

$$|P_A P_D| = \sqrt{(x-2)^2 + (y-16)^2 + (z-3)^2} = \sqrt{122} \quad (15)$$

$$|P_B P_D| = \sqrt{(x-18)^2 + (y-8)^2 + (z-12)^2} = \sqrt{101} \quad (16)$$

$$|P_C P_D| = \sqrt{(x-15)^2 + (y-1)^2 + (z-10)^2} = \sqrt{141} \quad (17)$$

Denklem (15)'i düzenleyelim;

$$x^2 - 4x + 4 + y^2 - 32y + 256 + z^2 - 6z + 9 = 122$$

$$x^2 - 4x + y^2 - 32y + z^2 - 6z = -147 \quad (18)$$

Denklem (16)'yı düzenleyelim;

$$x^2 - 36x + 324 + y^2 - 36y + 324 + z^2 - 24z + 144 = 101$$

$$x^2 - 36x + y^2 - 36y + z^2 - 24z = -691 \quad (19)$$

Denklem (17)'i düzenleyelim;

$$x^2 - 30x + 225 + y^2 - 2y + 1 + z^2 - 20z + 100 = 141$$

$$x^2 - 30x + y^2 - 2y + z^2 - 20z = -185 \quad (20)$$

Matris oluşturabilmek için x^2, y^2, z^2 li ifadelerden kurtulmamız gerekmektedir.

(18), (19) ve (20) numaralı denklemleri alt alta yazalım;

$$x^2 - 4x + y^2 - 32y + z^2 - 6z = -147 \quad (18)$$

$$x^2 - 36x + y^2 - 36y + z^2 - 24z = -691 \quad (19)$$

$$x^2 - 30x + y^2 - 2y + z^2 - 20z = -185 \quad (20)$$

(19) no'lu denklemi -1 katsayısı ile çarpıp (18) no'lu denklemle toplayalım;

$$x^2 - 4x + y^2 - 32y + z^2 - 6z = -147$$

$$-1 \times (x^2 - 36x + y^2 - 36y + z^2 - 24z = -691)$$

+

$$32x + 4y + 18z = 544 \quad (21)$$

(20) no'lu denklemi -1 katsayısı ile çarpıp (18) no'lu denklemle toplayalım;

$$x^2 - 4x + y^2 - 32y + z^2 - 6z = -147$$

$$-1 \times (x^2 - 30x + y^2 - 2y + z^2 - 20z = -185)$$

+

$$26x - 30y + 14z = 38 \quad (22)$$

(19) no'lu denklemi -1 katsayısı ile çarpıp (20) no'lu denklemle toplayalım;

$$-x^2 - 30x + y^2 - 2y + z^2 - 20z = -185$$

$$-1 \times (x^2 - 36x + y^2 - 36y + z^2 - 24z = -691)$$

+

$$6x + 34y + 4z = 506 \quad (23)$$

Elde ettiğimiz denklemlerden matrisi oluşturalım;

$$32x + 4y + 18z = 544 \quad (21)$$

$$26x - 30y + 14z = 38 \quad (22)$$

$$6x + 34y + 4z = 506 \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} 32 & 4 & 18 \\ 26 & -30 & 14 \\ 6 & 34 & 4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 544 \\ 38 \\ 506 \end{bmatrix} \text{ veya } J \times K = L \quad (24)$$

Başlangıçta hedef noktasının (11, 12, 8) olduğu verilmişti. Doğrulamak için K matrisini MATLAB yardımıyla bulalım;

$$K = \text{inv}(J) \times L \quad (25)$$

```
>> J=[32, 4, 18; 26, -30, 14; 6, 34, 4]
J =
    32     4    18
    26   -30    14
     6    34     4
>> inv(J)
Warning: Matrix is singular to working precision.
ans =
    Inf    Inf    Inf
    Inf    Inf    Inf
    Inf    Inf    Inf
fx >> |
```

MATLAB'de yapılan işlemler sonucu J matrisinin determinantı 0 olduğundan tersi sonsuz çıkmaktadır. Bu yüzden sözde ters matris kullanılarak J matrisinin tersinin alınması sağlanmıştır.

$$K = \text{pinv}(J) \times L \quad (26)$$

```

>> K=pinv(J)*L
K =
    11.6875
    12.0231
     6.7727

```

İşlem sonucu bulmamız gereken değerler (11, 12, 8) olarak başlangıçta verilmiştir. Buradan hareketle hata paylarını değerlendirelim;

$$\Delta x = 0,6875 \rightarrow \text{sapmadeğeri}(\delta) = \%6,25$$

$$\Delta y = 0,0231 \rightarrow \text{sapmadeğeri}(\delta) = \%0,2$$

$$\Delta z = 1,1273 \rightarrow \text{sapmadeğeri}(\delta) = \%15,34$$

Matematiksel olarak yapılan işlemler sonucunda hedef noktanın eksnelere göre farklı sapmalarla sonuçlandığı gözlenmiştir.

V. BULGULAR

ÖMO algoritmasındaki çok liderli hiyerarşik yapı mobil robotların sürü hareketine uyarlanarak daha etkili bir arama yöntemi elde edilmiştir.

Sözde ters matris yöntemi ile gerçek konum ve bilinen konum arasındaki sapmalar tespit edilmiştir. Verilen örnek soruya göre %6,25 x eksenindeki sapma değeri iken y ve z eksenlerindeki sapmalar sırası ile %0,2 ve %15,34 değerindedir.

VI. TARTIŞMA

ÖMO algoritması hariç diğer sürü zekası algortimalarında her sürününün kendisine ait bir adet lider bireyi bulunmaktadır. Bu durumda tek liderin bütün arama alanını deneyimleyip sürüsünü yönetmesi çok liderli hiyerarşik yapıya sahip olan ÖMO algoritmasına kıyasla verimsiz kalacağı ön görülmektedir.

VII. SONUÇLAR

Bu çalışmada Örümcek Maymun Optimizasyonu'ndan esinlenilerek üç boyutlu uzayda çok yöneticili mobil robotların sürü hareketi planlanmıştır. Determinantın sıfır çıkması durumuna karşın sözde ters matris kullanılarak hedef tespiti yapılabilmektedir. Üretilen matematiksel modeller ile robotların gerçek konumu ve bilinen konum arasındaki sapma kalibre edilmiştir. Mobil robotların hareket planlaması ve herbir robotun erişim noktası gibi de davranması gerekliliği belirtilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Beni, G., Wang, J., 1993. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics Springer, Berlin Heidelberg.
- [2] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle Swarm Optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 4, 1942-1948.
- [3] Macro D. Ant colony system: a Cooperative learning approach to the travelling salesman problem. IEEE transaction on evolutionary computation 1997;1(1):53e66.
- [4] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department; 2005. Technical report-tr06.

- [5] Yang XS. Nature-inspired metaheuristic algorithm. Luniver press; 2008.
- [6] Passino KM. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. IEEE Control Syst 2002;22(3):52e67.
- [7] Yang XS, Deb S. Cuckoo search via Levy flights. In: Nature and biologically inspired computing, NaBIC 2009, IEEE world congress; 2009. p. 210e4.
- [8] Martínez-García FJ, Moreno-Perez JA. Jumping Frogs Optimization: a new swarm method for discrete optimization. Technical Report DEIOC 3/2008. Spain: Universidad de La Laguna; 2008.
- [9] Ahmed T, Sadiq Al-Obaidi, Hasanen S, Abdullah, and Zied O. Ahmed; "Meerkat Clan Algorithm: a New Swarm Intelligence Algorithm"; Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science; 2018.
- [10] Bansal, J. C., Sharma, H., Jadon, S. S. & Clerc, M. (2014). Spider Monkey Optimization algorithm for numerical optimization. Memetic Computing, 6(1), pp. 31–47. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12293-013-0128-0>
- [11] Z. Yang, Z. Zhou, and Y. Liu, "From RSSI to CSI: Indoor localization via channel response," ACM Computing Surveys (CSUR), vol. 46, no. 2, p. 25, 2013.
- [12] P. Castro, P. Chiu, T. Kremenek, and R. Muntz, "A probabilistic room location service for wireless networked environments," in International Conference on Ubiquitous Computing, pp. 18–34, Springer, 2001.
- [13] A. Haeberlen, E. Flannery, A. M. Ladd, A. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "Practical robust localization over large-scale 802.11 wireless networks," in Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, pp. 70–84, ACM, 2004.
- [14] Zafari F, Gkelias A, Leung KK, 2019, A survey of indoor localization systems and technologies, Communications Surveys and Tutorials, ISSN: 1553-877X
- [15] M. L. Rodrigues, L. F. Vieira, and M. Campos, "FingerprintingBased Radio Localization in Indoor Environments Using Multiple Wireless Technologies," in IEEE 22nd Symp. Pers
- [16] Understanding GPS : Principles and Applications by Elliott D. Kaplan, Artech House Publishers., 1996.
- [17] Jodár, L.; Law, A. G.; Rezazadeh, A.; Watson, J. H.; and Wu, G. "Computations for the Moore-Penrose and Other Generalized Inverses." Congress. Numer. 80, 57-64, 1991.
- [18] Rao, C. R. and Mitra, S. K. Generalized Inverse of Matrices and Its Applications. New York: Wiley, 1971.