

HABERLEŞME YETENEĞİ OLMADAN SÜRÜ GEZİNİMİ VE FORMASYON GEÇİŞLERİ YAPABİLEN ÇOKLU OTONOM ROBOT SİSTEMİ

A SWARM NAVIGATION AND SWITCHABLE FORMATION SYSTEM WITHOUT COMMUNICATION FOR AUTONOMOUS MULTI-ROBOTS

Ahmet CEZAYIRLI *, Feza KERESTECİOĞLU **

ÖZET

Bu makalede, otonom hareket eden robotların haberleşme olmaksızın grup bağlantılılığını koruyarak ve oluşturdukları farklı formasyonlar arasında geçişler yaparak gezinimi ele alınmaktadır. Özdeş gruplardan oluşan robot sürülerinin dağılmadan hareket edebilmesi için uygulanan yöntemlerde genellikle robotlar arası haberleşmeden yararlanılmasına rağmen, bu çalışmada doğada rastlanan balık sürüleri, kuş sürüleri, vb. örneklerden esinlenilerek haberleşmesiz bir yöntem ortaya konulmuştur. Önerilen yöntemde robotlar kendi aralarında açık bir iletişime ihtiyaç duymadan basit yerel yönlendirme kuralları kullanarak yön bulmaktadırlar. Robot grubunun bağlantılılığının bozulmadan hareket edeceği garanti edilmekle birlikte, grubunun belirli koşullar altında herhangi bir açmaza düşmeden ilerleyebileceği de kanıtlanmıştır. Robotlar, üzerlerinde bulunan sınırlı mesafeli uzaklık ölçüm sensörleri ile yakın çevrelerindeki diğer robotları algılayabilmektedirler, ancak sürü kalabalık olduğunda robotların birbirlerinin görülmesini engellediği durumlar da hesaba katılmıştır. Ayrıca, sistemin gerçekçiliği bakımından, sensör ölçümlerinde açılabilir ve radyal ölçüm hataları kurgulanmıştır. Gezinim ortamında çeşitli engellerin bulunması, sürünün bunları aşmak için belli formasyonlar oluşturmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, uygun maliyet fonksiyonları tasarlanarak formasyon oluşumları sağlanmakta ve bu maliyet fonksiyonları arasında geçiş yapılarak formasyonlar arasında geçişler mümkün kılınmaktadır. Önerilen yöntem çeşitli senaryolar altında bilgisayar benzetimleri ile sınanmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Otonom Robotlar, Robot Sürüleri, Bağlantılı Grup, Grup Formasyonu

ABSTRACT

This article discusses the navigation of autonomously moving robots without communication while maintaining group connectivity and switching between different formations. It is well known that usually explicit or implicit communication is incorporated for the movement of the robot swarms in order to keep the group connectivity, however, in this study, a methodology is described that does not need communication by any means, as inspired by school of fish, flocks of birds, etc., encountered in nature. In the proposed methodology, each robot finds its direction using simple local steering rules without need for communication with other robots or a central mechanism. While the connectivity of the robot group is guaranteed to be preserved, it has also been proven that under certain conditions, the group can keep moving without falling into deadlock. Robots can detect the other robots in their immediate neighborhoods by limited range distance sensor equipments, but when the group is crowded, the cases where the robots may occlude some other robots are also considered. Moreover, for the realizability of the proposed system, angular and radial measurement errors in the sensor measurements have been taken into account. Any existence of various obstacles in the navigation environment requires the swarm to switch to certain formations to be able to pass through. For this reason, formations in special shapes are provided by designing appropriate cost functions and transitions between the formations are made possible by switching between these cost functions. The proposed methodology has been tested with computer simulations under various scenarios and the results are demonstrated.

Keywords: Autonomous Robots, Robot Swarm, Connected Group, Group Formation

*
ICT Bölümü,
Turkcell Teknoloji, İstanbul / Türkiye

ICT Department,
Turkcell Technology, Istanbul / Turkey

ORCID: 0000-0001-7003-6621

**
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
Kadir Has Üniversitesi, İstanbul / Türkiye

Department of Computer Engineering,
Kadir Has University, Istanbul / Turkey

ORCID: 0000-0001-9722-9458

1. GİRİŞ

Otonom davranan mobil robotların sürü halinde hareket edebilmelerini sağlayan yöntemler uzunca bir süredir araştırma konusudur. Bu çalışmada, otonom robot gruplarında grup bağlantılılığını korurken, geçiş yapılabilir formasyonlara sahip grup gezinimi (navigasyon) sağlayabilmek için bir metodoloji önerilmektedir. Çalışmaya konu olan robotların sınırlı menzilli ve sınırlı ölçüm hatalarına sahip konum sensörlerine sahip olduğu, ancak iletişim yetenekleri olmadığını varsayılmıştır. Bağlantılı gezinim ve mobil robotların grup davranışı ile ilgili çalışmalarda, birçok yazar, yöntemlerinin başarısı için bir

ön koşul olarak, hareket süresi boyunca grup bağlantılılığının korunmakta olduğunu veya grup içinde iletişim olduğunu varsaymaktadır. Çizge kuramı veya potansiyel alan tekniklerinin bu şekilde kullanıldığı yaklaşımlara örnek çalışmalar literatürde mevcuttur (Lin vd., 2004; Pereria vd., 2008; De Gennaro ve Jadbabaie, 2006; Zavlanos ve Pappas, 2007; Zavlanos vd., 2011; Jadbabaie vd., 2003).

Mobil robotların bağlantılılığını korumaya yönelik çizge kuramına dayalı yaklaşımlar, temel olarak çizgenin Laplasyen matrisinin ikinci en küçük özdeğerinin (Fiedler değeri) maksimizasyonuna dayanır (De Gennaro ve Jadbabaie, 2006; Zavlanos vd., 2011; Biggs, 1993). Bu maksimizasyon, De Gennaro ve Jadbabaie'nin (2006) önerdiği gibi dağıtık bir hesaplama yöntemiyle gerçekleştirilebilse bile, bu durum robotlar arasındaki iletişimin gerekliliğini ortadan kaldırmaz. Bununla birlikte, yalnızca birkaç çalışma, robotlar arasında bilgi alışverişine veya iletişime güvenmeden bağlantının sürdürülmesine odaklanmıştır (Ando vd., 1999; Gervasi ve Prencipe, 2004). Bu çalışmalarda algoritmik metodolojiler, robotların noktasal olduğunu ve sensörler aracılığıyla yapılan kusursuz ölçümlerle yalnızca R^2 'de çalışmak üzere tasarlandığını varsaymaktadır.

Kerestecioğlu ve Cezayirli (2012), Cezayirli ve Kerestecioğlu (2013a, 2013b) tarafından yapılan çalışmalarda önerilen bir yaklaşımda, yalnızca sınırlı menzilli konum sensörlerini kullanan dinamik topolojiye sahip bir robot grubunun garantili bağlantılığa sahip gezinimi sağlanmıştır. Bu çalışmalarda sensörler ölçüm hatalarına maruz kalmaktadır ve robotlar gruptaki diğer robotları görünmesini kısmen veya tamamen perdeleyerek algılanmalarını engelleyebilirler. Ayrıca, gezinim uzayında alanında herhangi bir kısıtlama olmadığı sürece ortaya çıkan sürü geziniminde herhangi bir açmaz (kilitlenme) olmayacağı da kanıtlanmıştır (Cezayirli ve Kerestecioğlu, 2013). Bununla birlikte, grup bağlantılılığı asıl amaç olduğundan, bu çalışmalarda grubun bağlantılılık seviyesi, perdelenme olmadıkça hiç bir zaman azalmaz. Bu, grubun top şeklinde bir oluşumuna yol açar ve dar bir koridordan geçmek gibi bazı görevlerde zorluk yaratır. Bu nedenle, çok robotlu bir gezinim sisteminde grup oluşumunu dinamik olarak değiştirmek kaçınılmazdır.

Grup oluşturma, merkezi bir mekanizma ve iletişim kanalları ile elde edilebilse de, her robotun kendi hareketine özerk olarak karar verdiği, otonom oluşum çok daha zorlayıcıdır (Desai vd., 2001; Cifuentes vd., 2012). Formasyonun merkezi olmayan kontrolü için mevcut yaklaşımlar üç kategoride analiz edilebilir: Davranış temelli yaklaşım (Krishnanand ve Ghose, 2005), lider-takipçi modelleri (Desai vd., 2001) ve sanal yapı teknikleri (Cifuentes vd., 2012). Bu makalede sunulan çalışmada, temelde sanal potansiyel alanlar olan maliyet fonksiyonları kullanılmaktadır. İncelenen robot grubunda bir lider bulunmasına rağmen, liderin tek işlevi yalnızca yörüngede ilerlemek ve grubun geri kalanının onu takip etmesini sağlamaktır. Liderin oluşumda belirli bir rolü yoktur. Homojen olmayan robot grupları için haberleşmesiz grup bağlantılılığını sağlayan benzer çalışmalar Maeda vd. (2017) ve Yoshimoto vd. (2018) tarafından yapılmıştır.

Gruptaki robotların nitelikleri takip eden bölümde açıklanmıştır. Üçüncü bölümde Yerel Yönlendirme Stratejisi ve hareket kısıtlamaları belirtilmiştir. Maliyet fonksiyonları, anahtarlama (geçiş) mekanizması ve bir kilitlenme teoremini kullanan oluşumlar dördüncü bölümde verilmiştir. Önerilen metodoloji, beşinci bölümde bilgisayar simülasyonları ile test edilmiştir. Son olarak, altıncı bölümde çalışma hakkında sonuç değerlendirmeleri sunulmaktadır.

2. PROBLEM TANIMI

Çalışmada ele alınan robot grubu, çok yönlü ve sınırlı menzilli göreceli konum sensörleriyle donatılmış özdeş robotlardan oluşur. Sensörler, aralıkları içindeki mesafelerin ve bağlı açılarının sürekli ölçümlerini sağlar. Ölçümler, sırasıyla pozitif skaler $\Delta\theta$ ve Δr ile sınırlı olmak üzere hem açılabilir hem de radyal hatalar taşıyabilir.

Diğer robotları algılamak, göreceli konum sensörleri aracılığıyla robotların komşuluk alanı içindeki konumu hakkında bilgi almak anlamına gelir. Robotlar arasındaki böyle bir karşılıklı görünürlüğü "bağlantı" olarak tanımlıyoruz. Ancak, böyle bir bağlantı, robotlar arasında herhangi bir açık iletişim veya bilgi alışverişi gerektirmemektedir. Diğer robotları

algılamak belirli bir robotu tanıma anlamına gelmemektedir. Başka bir deyişle, robotların kimlikleri veya etiketleri yoktur.

Algılama mahallelerine dayalı bağlantıları olan bir grup otonom mobil robotu \mathcal{G} ve bireysel robotları $R_i, i = 1, \dots, N$ olarak gösterelim. Bu gösterimde robotların gösterildiği alt-ındisler rasgele olarak tanımlanabilir, robotlara ilişkin bir kimlik anlamı taşımamaktadır ve yalnızca analizi kolaylaştırmak için kullanılmıştır. R_1, \dots, R_N ile belirtilen robotlar yönsüz bir çizgenin (grafın) düğümleri, bu robotlar arasındaki bağlantılar ise bu çizgenin hatları olarak ele alındığında, böyle bir çizgede herhangi bir robottan diğer tüm robotlara bağlantılar aracılığıyla ulaşan bir yol bulunabiliyorsa bu çizge bağlantılı çizgedir (Biggs, 1993). Bu nedenle, \mathcal{G} 'ye karşılık gelen çizgenin bağlantılı olması halinde \mathcal{G} grubunun da bağlantılı olduğunu söyleyebiliriz. Bunun tersi bir durum olarak, aralarında bağlantı olmayan en az bir çift robotu olan bir grubun bağlantılı olmadığı anlaşılır.

Robotların konum algılama menzillerinin sınırlı olduğunu ve gruptaki toplam robot sayısının fazla olabileceğini varsaydığımız için, bir robot gruptaki diğer tüm robotları algılayamayabilir. R_i tarafından belli bir anda algılanan tüm robotların kümesine \mathcal{S}_i alt grubu diyelim. Dolayısıyla, \mathcal{G} 'nin böyle N tane alt grubu vardır ve eğer \mathcal{G} bağlantılıysa, \mathcal{S}_i ($i = 1, \dots, N$) alt kümeleri boş olmayan kümelerdir.

Merkezinde R_i olan ve \mathcal{S}_i 'deki robotları içeren küresel bölgenin yarıçapını d_{max} ile gösterelim. Başka bir deyişle, d_{max} , her robot için maksimum algılama mesafesidir. d_{max} değeri, robotların grubun en uzak üyesini bile algılayabilmesi için yeterince büyükse, \mathcal{G} 'nin bağlantılı olduğu sonucu hemen ortaya çıkar. Bununla birlikte, kısa algılama mesafelerine sahip ve nispeten geniş bir alana yayılmış çok sayıda bireyden oluşan robot grupları için kolayca sonuç çıkarılmayan ve daha ilginç durumlarla karşı karşıyayız.

Algılamanın her zaman karşılıklı olduğunu varsayıyoruz, yani bir robot R_i , başka bir robot R_j 'yi algılırsa, o zaman R_j de R_i 'nin konum bilgisine sahiptir. Her türlü ultrasonik, lazer veya görüntü tabanlı sensörler kullanılarak yapılabilecek konum ölçümü uygulamasında bazı robotların diğerlerini diğerlerinin arasında kalarak ölçümü engellemesi ve onları görünmez kılması kaçınılmazdır. Böyle bir durumda, perdelenmiş robotlar, R_1 gibi bir robot tarafından algılanmaz (dolayısıyla \mathcal{S}_i 'de değildir), ancak R_1 'e olan mesafeleri d_{max} 'tan daha azdır. Sonuç olarak, ne zaman bir perdelenme meydana gelse, o andaki lokal hareketin hesaplanmasında oklüzyona uğrayan robotların pozisyonları dikkate alınmaz. Konum algılamanın karşılıklılığı oklüzyonlar altında da geçerlidir.

Bu algılama sınırlamalarına sahip olarak ve bir dizi robotun başlangıçta bağlantılı bir grup oluşturduğunu varsayarak, bu çalışmadaki amacımız, haberleşmesiz grubun bağlantılarını korurken grubun gezinimine olanak tanıyan, formasyon geçişi yapabilen, ve merkezi olmayan bir yönlendirme metodolojisi geliştirmektir. Öyle ki, bu özellikler bazı fiziksel bariyerlerin aşılmasında da kullanılabilir.

Grubun bağlantılı kalacağı garanti altına alındıktan sonra, robotlardan beklenen görevin, hedefin veya seyir yörüngesinin tüm grup üyeleri tarafından bilinmesine gerek yoktur. Aslında sadece bir robotun bu bilgiye sahip olması yeterlidir (Gervasi ve Prencipe, 2004). Bu robota grubun lideri diyoruz ve R_N ile gösteriyoruz. Lider robot, diğer robotlarla aynı fiziksel özelliklere ve yeteneklere sahiptir. Tek fark, grubun izleyeceği yörüngenin R_N 'ye verilmesinden kaynaklanmaktadır. Aslında grubun liderliği gizlidir. Robotların hiçbiri lideri özel bir grup üyesi olarak tanımamaktadır. Başka bir deyişle, R_N robotu R_j tarafından algılanırsa, yani $R_N \in \mathcal{S}_j$, R_j onu sadece komşularından biri olarak görebilir ve R_N 'nin liderliği R_j 'nin yerel yönlendirme stratejisini etkilemez. Makalenin sonraki bölümlerinde, bir lider, R_N ve $N - 1$ adet takipçisi, R_1, \dots, R_{N-1} 'den oluşan N elemanlı robot grubunu ele alınmaktadır.

3.YEREL YÖNLENDİRME STRATEJİSİ

Amacımız, basit otonom robotlar için uygulanabilir olan, ancak bunlardan oluşan büyük bir robot grubunun bağlantılılığını koruyarak hareket edebileceği bir metodoloji geliştirmektir. Robotların komşuları hakkındaki konum bilgilerini her Δt saniyede bir

güncellediklerini varsayıyoruz. Ayrıca, mesafedeki ölçüm hatalarını hesaba katmak için d_m ile göstereceğimiz pozitif bir skaler tanımlayalım:

$$d_m \stackrel{\text{def}}{=} d_{max} - \Delta r$$

Burada Δr mesafe ölçüm hatasının sınırır ve $d_{max} > \Delta r > 0$ geçerlidir. R_i robotunun t zamanındaki konumunu $X_i(t)$ ($i = 1, \dots, N$) ile gösterelim. Gruptaki tüm robotlar otonom olarak yönlendirildiği için her robot için yerel hareket kuralları oluşturacağız. Lider R_N , önceden tanımlanmış bir yörünge boyunca hareket ederken, her takipçi robot R_j , ($j = 1, \dots, N$), kendisi için bir yerel hedef konumu belirler. Bu hareket, en uygun şekilde R_j 'nin konumunu orijin olarak kabul eden bir koordinat sistemi cinsinden tanımlanabilir. $x(t)$, konum vektörünün yerel koordinatlarda gösterimi olsun. x 'teki üst simgeleri, koordinat eksenlerini bir robotla ilişkilendirmek için, alt simgeleri ise hangi robotun konumu olduğunu göstermek için kullanacağız. Örneğin, x_k^j , R_j 'nin koordinat sisteminde R_k 'nin konum vektörünü temsil eder. \mathcal{S}_i 'deki robotlar için, ($i = 1, \dots, N$), M \mathcal{S}_i 'deki robot sayısı olmak üzere,

$$\|x_k^i(t)\| = \|X_k(t) - X_i(t)\| \leq d_m, \quad k = 1, \dots, M$$

yazabiliriz. Şimdi, kendi alt grubundaki diğer robotların konumlarını kullanarak her robot tarafından kullanılacak bir yönlendirme stratejisi geliştireceğiz.

Yukarıda verilen gösterime göre, $x_i^i(t + \Delta t)$ R_i 'nin t zamanında kendi koordinat sisteminde ($t + \Delta t$) anında ulaşmayı hedeflediği konumdur. Herhangi bir $x_i^i(t + \Delta t)$ için \mathcal{S}_i 'nin birbirine karşı iki alt kümesini şu şekilde tanımlarız:

$$\mathcal{S}_{ip} = \{R_p \in \mathcal{S}_i \mid [x_i^i(t + \Delta t)]^T x_p^i(t) \leq 0\}$$

$$\mathcal{S}_{iq} = \{R_q \in \mathcal{S}_i \mid [x_i^i(t + \Delta t)]^T x_q^i(t) \leq 0\}$$

R_i 'nin $x_i^i(t + \Delta t)$ 'ye yer değiştirmesi R_i 'yi bir robota yaklaştıracaksa, bu robot \mathcal{S}_{iq} 'da görünecektir. Aksi takdirde \mathcal{S}_{ip} 'nin bir elemanı olacaktır. \mathcal{S}_{ip} ve \mathcal{S}_{iq} kullanarak grup bağlantılılığı üzerine aşağıdaki teoremi ifade edebiliriz.

Teorem 1: $t = 0$ anında bağlantılı olan ve N adet otonom mobilden oluşan \mathcal{G} grubunu ele alalım. Robotların hareketleri, $i = 1, \dots, N$ olmak üzere,

$$\|x_i^i(t + \Delta t)\| \leq \frac{1}{2} \left(d_m - \max_{x_p^i(t) \in \mathcal{S}_{ip}} \|x_p^i(t)\| \right) \quad (1)$$

ve

$$\|x_i^i(t + \Delta t)\|^2 \leq \min_{x_q^i(t) \in \mathcal{S}_{iq}} \{ [x_i^i(t + \Delta t)]^T x_q^i(t) \} \quad (2)$$

ile belirlenen kısıtlara uygun olarak gerçekleştirilirse, $\forall t > 0$ için grup bağlantılılığı korunur.

\mathcal{S}_i 'deki bir robot başka bir robot tarafından perdelenirse, \mathcal{S}_i 'deki robot sayısının azalabileceği unutulmamalıdır. Bununla birlikte, perdeleyen bizzat robotun kendisinin varlığı, R_i ve perdelenen robot arasındaki bağlantının kanıtı olduğundan, bu durum genel grup bağlantılılığını bozmaz. Ayrıca, maksimum yönlendirme mesafeleri üzerinde her örnekleme periyodu Δt için (1) ve (2)'de verilen kısıtlamalar, grup bütünlüğüne uygun olmayacak derecede büyük hızlardan kaçınma avantajını da sağlamaktadır.

(1) ve (2)'deki kısıtlamalar karşılandığı sürece, belirli bir gezinim yörüngesini takip ederek, filo kontrolü veya diğer misyon görevleri, potansiyel fonksiyon yaklaşımları kullanılarak veya maliyet fonksiyonlarının minimizasyonu ile gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, Teorem 1'e göre, aşağıdaki Yerel Yönlendirme Stratejisi, takipçi robotlardan ve bir liderden oluşan robot grubunun gezinimi boyunca bağlantılılığını garantiler.

Yerel Yönlendirme Stratejisi: Eşitsizlik (1) ve (2)'deki kısıtlamalar geçerli kalmak üzere,

- R_i , ($i = 1, \dots, N - 1$), ile gösterilen takipçi robotlar, \mathcal{S}_i 'deki robotların pozisyonlarından oluşturulan bir maliyet fonksiyonu $J(x_i^i(t + \Delta t))$ 'yi minimize eden bir $x_i^i(t + \Delta t)$ hedef konumuna doğru hareket ederler.
- R_N ile gösterilen lider robot, kendisine verilmiş olan gezinim rotasını izler.

Bu noktada, bu kısıtlamaların hiçbir robotun hareket edemediği bir duruma yol açıp açmayacağı sorusu akla gelebilir. Böyle bir durum açmaz veya kilitlenme (deadlock) olarak adlandırılır ve önerilen yöntemin gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılabilirliği için bundan kaçınılması çok önemlidir. (1) ve (2) kısıtlamaları göz önüne alındığında, $\|x_i^i(t + \Delta t)\| = 0$, $i = 1, \dots, N$, olduğunda bir kilitlenme meydana gelir (Cezayirli ve Kerestecioğlu, 2013a).

Şu şekilde bir $z_j^i(t)$ tanımlayalım:

$$z_j^i(t) = x_i^i(t + \Delta t) - x_j^j(t) \quad (3)$$

Aşağıda sunulan teorem, grubun herhangi bir kilitlenme riski olmaksızın yörüngesi boyunca hareket etmesini sağlayan maliyet fonksiyonlarını karakterize eder.

Teorem 2: \mathcal{G} , \mathbb{R}^n 'de serbestçe gezinen ve Yerel Yönlendirme Stratejisi'ne göre hareket eden sonlu sayıda robottan oluşan, başlangıçta bağlantılı bir grup olsun. $J(x_i^i(t + \Delta t)) = \tilde{J}(\|z_j^i(t)\|)$ 'nin, $R_j \in \mathcal{S}_i$ 'leri veren tüm j 'ler için $\|z_j^i(t)\| = d_m$ değerini alan ve $z_j^i(t)$ 'nin artan bir fonksiyonu olduğunu varsayalım. O zaman, herhangi bir $R_a \in \mathcal{G}$ robotu için, x_k^a 'lar \mathcal{S}_a içindeki robotların konum vektörleri olmak üzere,

$$\max_k \|x_k^a(t)\| < d_m, \quad t \rightarrow \infty \quad (4)$$

geçerlidir.

Teorem 2, grubun garantili gezinimi için önemli bir temel sunar. Yani, gruptaki robotlardan biri lider ise ve izlenecek bir yörünge verilirse, lider yörüngesi nasıl şekillenirse şekillendirilsin grup ile bağlantısını koparmadan yörüngesinde ilerleme özgürlüğüne sahip olacaktır. Bu, şu eşitsizlik sayesinde görülebilir:

$$d_m - \lim_{t \rightarrow \infty} \max_k \|x_k^N(t)\| > 0$$

Bu katı eşitsizlik, liderin her örnekleme zamanı için hareket edebileceği serbest bir mesafe sağlar ve grubun geri kalanı da lideri takip edeceği için tüm grubun bağlantılı hareketi garanti altına alınmış olur.

Teorem 2 ile ilgili bir diğer önemli nokta ise grubun serbestçe gezinebildiği varsayımdır. Diğer bir deyişle, gezinim güzergahında herhangi bir engel olmadığı varsayılmıştır ve robotların hareketi sadece (1) ve (2)'deki kısıtlarla sınırlandırılır. Gezinim alanının \mathbb{R}^n 'nin bir alt kümesi olduğu kilitlenme örnekleri Cezayirli ve Kerestecioğlu (2013a) tarafından verilmiştir.

Yerel yönlendirme stratejisinin uygulanmasında çeşitli maliyet fonksiyonları kullanılabilir. Teorem 2'deki gereksinimi karşılayan maliyet fonksiyonlarının örnekleri şunlar olabilir:

$$J(x_i^i(t + \Delta t)) = \max_k \|z_k^i(t)\| \quad (5)$$

veya

$$J(x_i^i(t + \Delta t)) = \sum_{k=1}^M (\|z_k^i(t)\| - d_0)^2. \quad (6)$$

Denklem (5)'teki maliyet fonksiyonu, i 'inci robotun algıladığı en uzak robota olan mesafeyi azaltmaya çalışmasını sağlar. Öte yandan, (6), robotları kendi alt gruplarındaki

robotlarla olan mesafelerini istenen belli bir d_0 ($d_0 < d_m$) mesafesine mümkün olduğunca yakın tutmaya zorlamak için kullanılabilir.

Dağıtılmış bir algoritma sağlamak için hem (5) hem de (6)'nın yerel koordinatlar cinsinden tanımlandığına dikkat çekmek isteriz. Bunlar $z_k^i(t)$ 'nin konveks fonksiyonları olsalar da, bağlantılılık açısından bu bir gereklilik değildir. Maliyet fonksiyonunun seçimi, görev gereksinimlerine bağlıdır. Sabit ve zamana göre değişen maliyet fonksiyonları düşünülebilir. Tüm komşuların konum bilgileri fonksiyona dahil edilebileceği gibi, sadece bazı komşuların (örneğin en yakın iki komşu robotun) konum bilgileri de dahil edilebilir. Ayrıca, grubun üyeleri, gerekli bir grup formasyonu elde etmek için farklı maliyet fonksiyonlarını minimize etmek isteyebilirler. Başka bir deyişle, maliyet fonksiyonunun uygun şekilde seçilmesi, sadece bağlantılı grup gezinimini değil, aynı zamanda istenen bir grup formasyonunun oluşmasını da kolaylaştırabilir. Aşağıdaki bölümde, gezinim sırasında grubun alternatif oluşumlar arasında geçiş yapmasını sağlamak için bu tür fikirleri kullanılacaktır

4. GRUP FORMASYONU VE FORMASYON GEÇİŞLERİ

Denklem (5) veya (6)'da verilen maliyet fonksiyonları ile uygulandığında, Yerel Yönlendirme Stratejisi, gezinim sırasında grup bağlantısını güçlendirmeye ve dolayısıyla korumaya çalışır. Grup, kompaktlığı d_0 değerine bağlı olan amorf bir şekil kazanır. Açıkçası, grubun bazı engellerin etrafından dolaşması veya nispeten dar bir koridordan geçmesi gerekiyorsa bu uygun değildir. Bu gibi durumlarda formasyonun belirli bir formasyonla değiştirilmesi zorluğu giderir. Formasyondaki geçişler, sisteme alternatif maliyet fonksiyonları dahil edilerek ve gerektiğinde bunlar arasında geçiş yapılarak yönetilebilir.

Grup, duvarlar veya engeller tarafından daraltılmış bir ortamda gezinirken bir çizgi oluşumu en uygun olabilir. Etrafta engeller varken grubun serbestçe gezindiği varsayılmasa da, yörünge boyunca bir çizgi oluşumunda hareket eden bir grup için bir kilitlenmenin mümkün olmadığını görmek zor değildir.

e_l , istenen çizgi oluşumu yönündeki birim vektör olsun. Uygun bir maliyet fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$J_f(x_i^i(t + \Delta t)) = \frac{1}{2} \left[x_i^i(t + \Delta t) - (x_a^i(t) - d_1 e_l) \right]^T \times \left[x_i^i(t + \Delta t) - (x_a^i(t) - d_1 e_l) \right] \quad (7)$$

ki burada

$$a = \arg \min_{k | R_k \in \mathcal{S}_i, [x_k^i(t)]^T e_l \geq 0} \|x_k^i(t)\|$$

ve d_1 ise çizgi formasyonu için robotlar arasındaki istenen mesafeyi belirtmektedir. Denklem (7)'deki maliyet fonksiyonu, R_i 'nin yerel hedefi ile formasyona uyması için ulaşması gereken nokta arasındaki farkın ikinci dereceden bir ifadesidir. Çizgi formasyonu için, bu nokta R_a 'ya d_1 mesafesinde ve R_i 'den R_a 'ya olan yön e_l ile aynı hizada olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Denklem (3)'te verilen tanım kullanılarak, (7) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$J_f(x_i^i(t + \Delta t)) = \frac{1}{2} [z_a^i(t) + d_1 e_l]^T [z_a^i(t) + d_1 e_l] = \frac{1}{2} \|z_a^i(t) + d_1 e_l\|^2 \quad (8)$$

Buradaki $z_a^i(t)$ terimi, R_i 'nin yerel hedefi ile konum vektörü e_l üzerinde pozitif izdüşümü olan en yakın robot arasındaki uzaklıktır (Şekil 1). Robotlar J_f 'yi minimize ettiği sürece bir çizgi formasyonuna yakınsarlar ve bu formasyonu korurlar. Daha ayrıntılı formasyonlar elde etmek için, her bir robot tarafından e_l için farklı seçenekler kullanılabilir. Örneğin, 90° açılı V-formasyonu oluşturmak için, $[e_{l1}]^T [e_{l2}] = 0$ olacak şekilde gruptaki robotların yarısı e_{l1} , diğer yarısı da e_{l2} uygulayabilir.

$\tilde{J}_f(\|z_a^i(t)\|) = J_f(x_i^i(t + \Delta t))$ tanımını yaparak, şunu elde ederiz:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \tilde{J}_f}{\partial \|z_a^i\|} \right|_{\|z_a^i(t)\|=d_m} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial \|z_a^i\|} \left\| \|z_a^i(t)\| e_z(t) + d_1 e_l \right\|^2 \right]_{\|z_a^i(t)\|=d_m} \\ &= \left[\|z_a^i(t)\| + d_1 e_l^T e_z(t) \right]_{\|z_a^i(t)\|=d_m} \\ &= d_m + d_1 e_l^T e_z(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \tilde{J}_f}{\partial \|z_a^i\|} \right|_{\|z_a^i(t)\|=d_m} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial \|z_a^i\|} \left\| \|z_a^i(t)\| e_z(t) + d_1 e_l \right\|^2 \right]_{\|z_a^i(t)\|=d_m} \\ &= \left[\|z_a^i(t)\| + d_1 e_l^T e_z(t) \right]_{\|z_a^i(t)\|=d_m} \\ &= d_m + d_1 e_l^T e_z(t). \end{aligned} \quad (9)$$

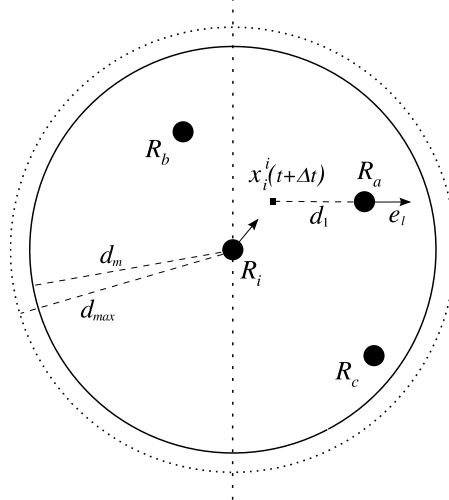
Burada, $e_z(t) = z_a^i / \|z_a^i\|$ olarak, yani $\|z_a^i(t)\|$ yönündeki birim vektör olarak kullanılmıştır. $d_m > d_1 > 0$ ve $|e_l^T e_z(t)| \leq 1$ olduğu için (9)'dan şunu yazabiliriz:

$$\left. \frac{\partial \tilde{J}_f}{\partial \|z_a^i\|} \right|_{\|z_a^i(t)\|=d_m} > 0.$$

Bu, J_f 'nin R_a robotuna göre Teorem 2'deki koşulu sağladığı anlamına gelir. \mathcal{S}_i 'deki tüm robotlar için ilgili koşulu yerine getirmek amacıyla, (8)'deki maliyet fonksiyonu $\beta > 0$ bir ağırlık katsayısı olmak üzere şu şekilde geliştirilebilir:

$$\begin{aligned} J_1(x_i^i(t + \Delta t)) &= J_f(x_i^i(t + \Delta t)) + \beta \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq a}}^M (\|z_k^i(t)\| - d_1)^2 \\ &= \frac{1}{2} \|z_a^i(t) + d_1 e_l\|^2 + \beta \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq a}}^M (\|z_k^i(t)\| - d_1)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Grup bir çizgi formasyonuna yakınsadığında, her bir \mathcal{S}_i alt grubu, robotların birbirini perdelmeleri nedeniyle en fazla iki robottan oluşur. Bu durum, (10)'daki maliyet fonksiyonunun minimizasyonunu büyük ölçüde basitleştirmektedir.



Şekil 1. R_i robotunun kendi alt-grubu içindeki yerel hedefi. Bu örnekte R_a , R_i 'ye en yakın robottur ve konum vektörü e_l üzerinde pozitif projeksiyona sahiptir.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Minimizasyon hesabını basitleştirmek için, Kerestecioğlu ve Cezayirli (2012), ve Cezayirli ve Kerestecioğlu (2013a) tarafından açıklanan gradyan tabanlı bir yaklaşık optimal çözüm kullanılmaktadır. Şöyle ki:

$$x_i^i(t + \Delta t) = x_i^i(t) - \gamma \left. \frac{\partial J(x_i^i(t + \Delta t))}{\partial x_i^i(t + \Delta t)} \right|_{x_i^i(t + \Delta t) = x_i^i(t)} \quad (11)$$

Bu denklemde $\gamma > 0$ pozitif bir kazanç katsayısı, x_i^l ise R_i 'nin kendi yerel koordinatlarındaki konum vektörüdür.

Denklem (11)'in uygulanması, (6) veya (10)'daki sistemi çözmekten çok daha basittir. Gerçek çözüm yerine bir sonraki hareketin yönünü verir ve bu yöndeki hareket ancak (1) ve (2)'deki eşitsizlikleri sağlıyorsa gerçekleşir. Bu nedenle, hesaplamaları basitleştirdikten sonra, önceki bölümlerin teorik sonuçlarını bu bölümde bilgisayar simülasyonları ile göstermekteyiz.

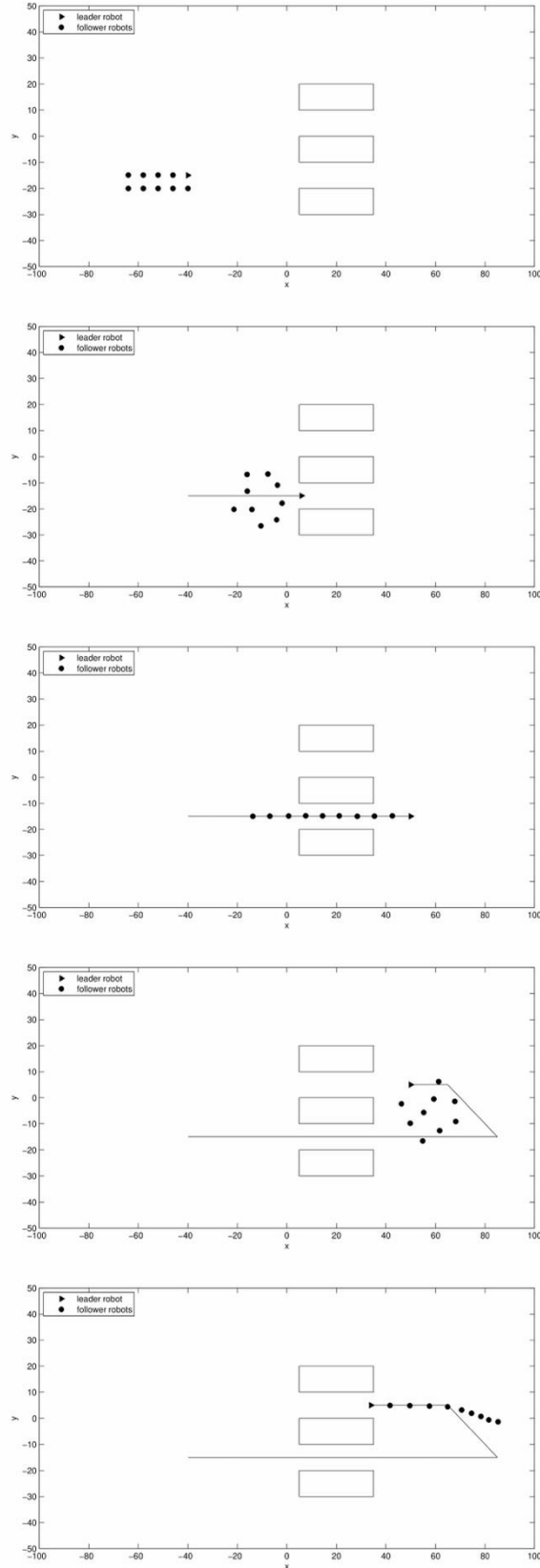
Çok yönlü hareket kabiliyetine sahip disk şeklindeki robotlardan oluşan bir robot grubunun \mathbb{R}^2 'de gezindiği varsayılmaktadır. Benzetimler şu değerler ile gerçekleştirilmiştir: Konum sensörlerinin maksimum algılama mesafesi (d_{max}) 30 birim, ölçüm hatalarının limitleri açı için $\Delta\theta = 12^\circ$ ve uzaklık ölçümü için $\Delta r = 0.03d_{max}$, ve robotların çapları 1.5 birim. Gruptaki her robot için, bu çap değeri ve yerel koordinatlardaki konum bilgisi, o robotun o yerel koordinatların orijinindeki robota göre neden olduğu oklüzyon konisini belirlemek için kullanıldı. Kısmen perdelenmiş herhangi bir robot, tamamen perdelenmiş gibi düşünülerek algılama listesinden çıkarıldı. Uygulanan senaryoya göre, lidere bir gezinim yörüngesi verilir ve lider gezinime başlarken grubun geri kalanı, Şekil 2'de verilen sözde kod ile uygulanan Yerel Yönlendirme Stratejisi uyarınca lideri takip eder. Maliyet fonksiyonunun değiştirileceği konumların robotlara önceden yüklenmiş olduğu varsayılmıştır.

```
okuy sensör verisi;  
  
eğer lider ise,  
  oku verilen yörünge;  
  ata yön := yörüngeden okunan değer;  
  hareket_büyüklüğü := ön-tanımlı maksimum değer (fiziksel sınır);  
değilse  
  eğer J geçişi için belirli zaman/konum ise,  
    ata J := Jk;  
  eğer sonu  
  
  hesapla J;  
  ata yön := -grad J;  
  hareket_büyüklüğü := grad J'den hesaplanan değer;  
  eğer sonu  
  
sınıflandır algılanan robotları yöne göre p ve q olarak;  
  
uygula hareket kısıtları;  
  hareket_büyüklüğü := Teorem 1'deki eşitsizlikleri sağlayan maksimum değer;  
  
eğer hareket_büyüklüğü > ön-tanımlı üst limit ise,  
  ata hareket_büyüklüğü := ön-tanımlı üst sınır;  
eğer sonu
```

Şekil 2. Benzetim çalışmalarında kullanılan algoritmanın sözde kodu

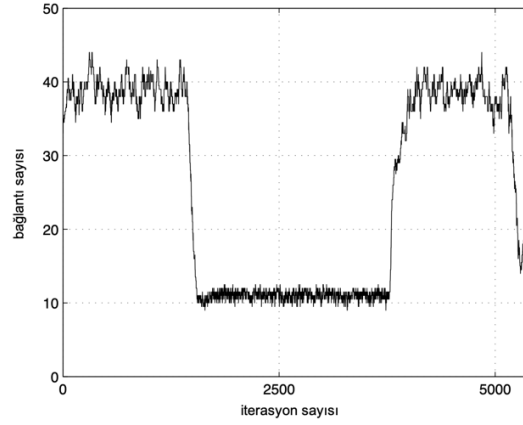
İlk benzetimde, Şekil 3'ün üst kısmında verilen başlangıç konumlarındaki 10 robottan oluşan bir grup gezinimi başlatıldı. Simülasyonun anlık görüntüleri, liderin yörüngesinin düz çizgilerle gösterildiği Şekil 3'te görülebilir. Denklem (6)'da verilen maliyet fonksiyonu ile simülasyon başlar başlamaz, Yerel Yönlendirme Stratejisi robotları amorf bir şekil oluşturmaya zorladı. Dolayısıyla, maliyet fonksiyonundaki geçişlere kadar herhangi bir formasyon izlenmemiştir. İlk geçiş, liderin yörüngesinin dar bir koridoru gösterdiği yerde gerçekleşti.

Grup daha sonra yatay bir çizgi oluşumu için (10)'da verilen maliyet fonksiyonuna geçti. Koridordan başarıyla geçiş yaptıktan sonra, bağlantılılığı artırmak için ilk maliyet fonksiyonuna geri dönüldü. Dönüş yolunda grup başka bir koridorla karşı karşıya kaldı ve böylece maliyet fonksiyonunda bir başka geçiş gerçekleşti. Şekil 3'ün son kısmı, çizgi formasyonunun tamamlanmasından önce alınan bir anlık görüntüdür.



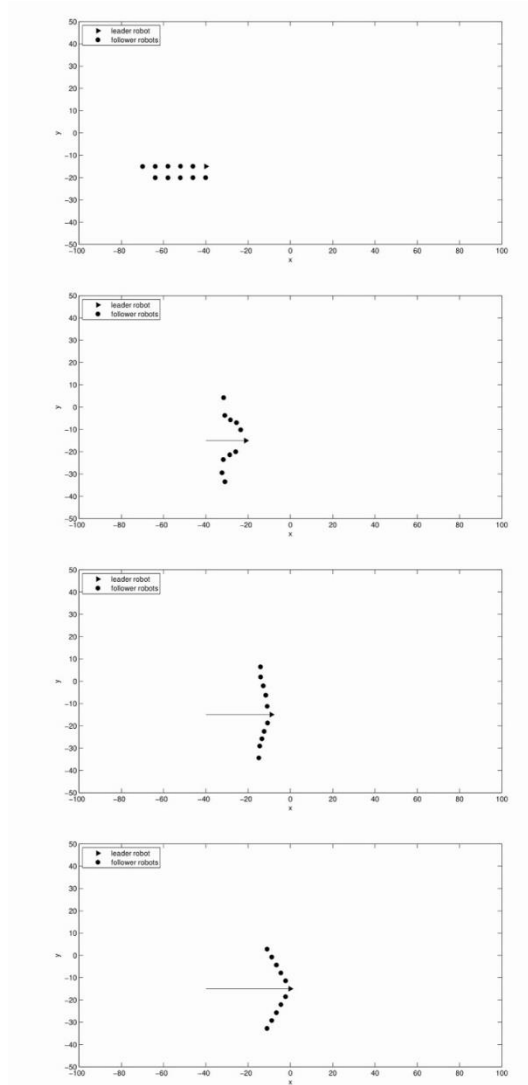
Şekil 3. 10 robotlu bir grubun, koridor geçişi öncesinde çizgi formasyonuna girmesi

Şekil 4, gruptaki toplam bağlantı sayısının tüm gezinim boyunca aldığı değerleri gösterir. Çizgi formasyonuna geçildikten sonra bağlantılılığın önemli ölçüde düştüğü kolayca ayırt edilebilir. Ancak bu durumda bile, toplam anlık bağlantı sayısı hiçbir zaman 10 robotlu bir grup için minimum sayı olan 9'un altına düşmez. Bu, grubun bağlantılılık açısından en kötü senaryoda bile sağlıklı kaldığı anlamına gelir. İkinci simülasyon, bir V-formasyonunu göstermek için 11 robotla gerçekleştirildi.



Şekil 4. 10 robotlu grubun tüm gezinim boyunca taşıdığı toplam bağlantı sayısı. Bağlantılardaki sert düşüş, koridor geçişi öncesi çizgisel formasyona geçiş nedeniyle oluşmuştur.

Robotların ilk konumları Şekil 5'in üst kısmında görülmektedir. Gezinimin başlamasından kısa bir süre sonra, 120^o V-formasyonuna geçmek için maliyet fonksiyonunda bir değişim sağlandı. Bu, iki farklı dizilim vektörü uygulanarak elde edilmiştir.



Şekil 5. 11 robot tarafından oluşturulan V-formasyonu

6. SONUÇ

Bu çalışma, iletişim yeteneği bulunmayan basit robotların grup bağlantılığını koruyarak gezinimi ile ilgili önceki çalışmalarımızın Türkçe dilinde bir özeti niteliğindedir. Grup, bağlantılılığı koruma hedefiyle gezinirken, grubun ortaya çıkan amorf şekli, gezinim alanı engeller içerdiğinde zorluklara neden olur (Cezayirli ve Kerestecioğlu (2013a, 2013b)). Bu

makalede, çeşitli maliyet fonksiyonları arasında geçiş yaparak grup formasyonlarını sağlamak için bir metodoloji gösterilmiştir. Önerdiğimiz metodolojide, grup bağlantılılığı kontrol edilir ve bu nedenle gerektiğinde azaltılabilir, ancak bağlantı sayısındaki herhangi bir azalmadan sonra bile grup hala bağlantılı kalır. Gezinim alanında çeşitli engeller olduğunu varsaymamıza rağmen, grup engellerin yerel hedefleri asla kısıtlamayacak kadar uzak olduğu varsayımıyla herhangi bir kilitlenme riski olmadan hareket edebilmektedir.

Şimdilik formasyonlar arasındaki geçiş mekanizması, robotlar hiçbir iletişim kabiliyetine sahip olmadığı için önceden yüklenen bilgilere bağlıdır. Bu, her robotun çevresini analiz etmesi ve gelecekteki çalışmalarda maliyet fonksiyonunu bağımsız olarak değiştirmeye karar vermesi durumunda dinamik bir şekilde yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Ando, H., Oasa, Y., Suzuki, I., & Yamashita, M. (1999). Distributed memoryless point convergence algorithm for mobile robots with limited visibility. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 15, 818–828.
- Biggs, N. (1993). *Algebraic Graph Theory*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Cezayirli, A., & Kerestecioğlu, F. (2013a). Navigation of non-communicating autonomous mobile robots with guaranteed connectivity. *Robotica*, 31(5), 767-776. doi:10.1017/S0263574713000027
- Cezayirli, A., & Kerestecioğlu, F. (2013b). A non-communicating multi-robot system with switchable formations. 9th Asian Control Conference (ASCC), Istanbul, Turkey
- Cifuentes, S., Gion-Sierra, J. M., & Jimenez, J. (2012). Robot navigation based on discrimination of artificial fields: application to robot formations. *Advanced Robotics*, 26, 627–652.
- Desai, J. P., Ostrowski, J. P., & Kumar, V. (2001). Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 905–908.
- De Gennaro, M. C., & Jadbabaie, A. (2006). Decentralized control of connectivity for multi-agent systems. 45th Conference on Decision and Control, St. Diego, CA, USA.
- Gervasi, V., & Prencipe, G. (2004). Coordination without communication: the case of the flocking problem. *Discrete Applied Mathematics*, 144, 324–344.
- Jadbabaie, A., Lin, J., & Morse, A. S. (2003). Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48, 988–1001.
- Kerestecioğlu, F., & Cezayirli, A. (2012). Connected navigation of non-communicating mobile agents. UKACC International Conference on Control, Cardiff, UK.
- Krishnanand, K. N., & Ghose, D. (2005). Formations of minimalist mobile robots using local-templates and spatially distributed interactions. *Robotics and Autonomous Systems*, 53, 194–213.
- Lin, Z., Broucke, M., & Francis, B. (2004). Local control strategies for groups of mobile autonomous agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49, 622–629.
- Maeda, R., Endo, T., & Matsuno, F. (2017). Decentralized Navigation for Heterogeneous Swarm Robots With Limited Field of View. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2), 904–911.
- Pereira, G. A. S., Kumar, V., & Campos, M. F. M. (2008). Closed loop motion planning of cooperating mobile robots using graph connectivity. *Robotics and Autonomous Systems*, 56, 373–384.
- Yoshimoto, M., Endo, T., Maeda, R., & Matsuno, F. (2018). Decentralized navigation method for a robotic swarm with nonhomogeneous abilities. *Autonomous Robots*, 42(8), 1583–1599.
- Zavlanos, M. M., & Pappas, G. J., (2007). Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 23, 812–816.
- Zavlanos, M. M., Egerstedt, M. B., & Pappas, G. J. (2011). Graph-theoretic connectivity control of mobile robot networks, *Proceedings of the IEEE*, 99, 1525–1540.