

Kendinden İtmeli Parçacık Sistemlerinde Üç Farklı Ortak Yön Bulma Stratejisi: Bölüm 2 - Eş-Zamansız Model *

Andaç Töre Şamiloğlu^{1,2,3}, Veysel Gazi², A. Buğra Koku³

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara

²Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara

³Makine Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

{andacsam@baskent.edu.tr, vgazi@etu.edu.tr, kbugra@metu.edu.tr}

Özetçe

Bu çalışmada, çok-erkinli/parçacık sistemlerinde ortak yön belirlemek için kullanılan üç farklı strateji değişik koşullar altında kıyaslanmıştır. Çok-erkinli sistemlerin davranışları eş-zamansız, (i) sınırlı veya sınırsız çevreler, (ii) dönme kısıtlı veya kısıtsız özelliklerinin tüm kombinasyonlarında incelenmiştir. Bütün parçacıkların -erkinlerin- eşit ve sabit hızlarda hareket ettikleri ve yönlerini belirtilen üç stratejiden birine göre güncelledikleri varsayılmıştır. Bu stratejilerde benzetimler yapılmış ve gruplama performanslarına olan etkileri incelenmiştir.

1. Giriş

Erkinlerin kümelenme davranışları birçok çalışmada eş-zamanlı çalışacak şekilde modellenmiştir. Bunların dışında kimi çalışmalar eş-zamanlı olmayan modeller üzerine yapılmıştır [1, 2, 3, 4, 5]. Beni'nin 1996'daki çalışması eş-zamansız modellerin eş-zamanlı olan modellerdeki yapılanmaya yakınsaması üzerinedir. Bu çalışmada eş-zamansız modelin eş-zamanlı olan modeldeki sonuçlara yakınsaması için yeter şartların varlığı ispatlanmıştır. [2, 3, 4] çalışmalarında tek boyutta ve M boyutta eş-zamansız modellerin kararlılığı incelenmiştir. 2005'de Beni [5] eş-zamansız sürülerin eş-zamanlı olan sürülere göre yakınsama özelliğinin daha iyi olabileceğini göstermektedir ve sürülerin düzensiz halden bir düzene geçmelerinin onların temel bir karakteristiği olduğunu ve sürülerin parçalı eş-zamanlı durumlarındaki azalmanın yakınsak olmayan özelliklerini yakınsak hale getirdiğini göstermektedir. Erkinlerin anonim, homojen, hafızasız ve iletişim özürü oldukları durumlarda toplanma davranışları [6] da incelenmiştir. Benzer bir çalışmada [7], yazarlar, eş-zamansız, sınırlı görme kabiliyetleri olan erkinlerin pusulaları olduğu müddetçe aynı yerde toplanabildiklerini göstermiştir.

Doğada ve robot uygulamalarında otonom erkinler çoğunlukla eş-zamansız çalışırlar. Bu nedenle eş-zamansız modeller daha gerçekçi ve uygulanabilir. Bu makalede Vicsek'in modelinin [8] -gürültü eklenmemiş olarak- eş-zamansız gerçekleşmesi üzerine çalıştık ve eş-zamansız modelin erkinlerin ortak yönde hareket koordinasyonu üzerine etkilerini inceledik. Erkinlerin ortak yönde toplanması için gerekli 3 farklı yön belirleme kuralı üzerine çalıştık ve elde ettiğimiz benzetim sonuçlarını kıyasladık. Dahası, erkinlerdeki maksimum dönme kısıtlarının ve sürünün hareket ettiği arenanın sınırlı olduğu ve olmadığı durumları kıyasladık. Erkinlerdeki rasgele ilk pozisyon

ve yön özelliklerinin özel durumlar ortaya çıkarmaması için çok sayıda farklı ilk durum özellikleri olan benzetimler yaptık.

2. Üst Seviye Dinamikler

Vicsek'in modeline [8] benzer olarak kendinden itmeli n tane parçacığın oluşturduğu çok-erkinli sistemde parçacıklar aşağıdaki dinamiklere uymaktadır

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

$$y_i(t+1) = y_i(t) + v \sin(\theta_i(t+1)) \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

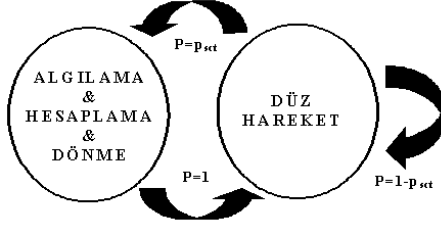
burada $x_i(t), y_i(t) \in \mathbb{R}$ erkin i 'nin, t anında kartezyen koordinatlarda pozisyonlarını ve $\theta_i(t) \in \mathbb{R}$ yönünü belirtmektedir. Erkinlerin hızlarının v , sabit ve eşit olduğu varsayılmıştır. Erkinlerin görme kapasitelerinin sınırlı olduğu varsayılmıştır. Yani her erkin aynı sabit δ uzaklığına görebilmekte ve sonuç olarak merkezleri kendi pozisyonları olan δ yarıçaplı çember içindeki diğer erkinlerin -komşularının- bilgilerine ulaşabilmektedir. Eş-zamanlı modelde erkinlerin bir sonraki yönlerini, kendi ve komşularının şimdiki yönlerine göre belirledikleri varsayılmıştır. Bu bilgileri kullanarak 3 farklı yön belirleme stratejisi uygulanacaktır.

Literatürdeki birçok çalışmada erkinler komşularının bilgilerine (pozisyon ve/veya yön bilgileri) kusursuz şekilde ulaşabilmekte ve eş-zamanlı olarak hareket etmektedirler. Ancak, gerçek sürülerde bu oluşması zor bir olaydır. Bu eş-zamanlı dinamikleri uygulayabilmek için bütün erkinlerin ortak olarak kullandıkları global bir saate ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle her erkinin kendi saatini kullandığı ve bağımsız olarak hareketlerini gerçekleştirdiği eş-zamansız modeller daha gerçekçidir. Dahası, komşuların bilgilerini toplamakta iletişimden ya da algılamadan kaynaklanan bazı gecikmeler yaşanabilir. Bu gecikmeleri eklemek daha gerçekçi modeller elde etmemizi sağlar. Böyle gerçekçi modelleri kurgulamak için [9] çalışmamızdakine benzer yüksek-seviye bir model oluşturacağız.

Eş-zamansız yüksek-seviye kontrol için dögüsel takip üzerine çalıştığımız [10] makalemizdeki yöntemle benzer bir yöntem kullanacağız. O çalışmamızda yüksek seviye kontrol için sonlu-durum makinesi kullanmıştık. Yapı 3 temel davranışı içermekteydi: *bekleme*, *algılama* ve *hesaplama*, ve *hareket*. Bu çalışmamızdaki modelimizde erkinler sabit hızlarla en son güncelledikleri yönde sürekli hareket etmekte ve sonlu-durum makinesi yön dinamikleri için çalışmaya devam etmektedir. Bu nedenle sonlu-durum makinesinde kullanacağımız durumlar: *algılama* - *hesaplama* - *dönme* ve *düz hareket* olarak belirlenebilir (Şekil 1).

algılama - *hesaplama* - *dönme* durumunda i 'nci erkin komşu erkinlerin yönlerini almakta (ölçerek ya da başka bir

* 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.



Şekil 1: Sonlu Durum Makinesi

şekilde) ve kendi yeni yönünü hesaplayarak o yöne dönmektedir. *düz hareket* durumunda ise erkin yönünü değiştirmemekte ve en son güncellenen yönde hareketine devam etmektedir. Bu davranışlar, sonlu-durum makinesi tarafından sonsuz bir döngüde kontrol edilmektedir. *algılama - hesaplama - dönme* durumundan çıkan erkin doğrudan *düz hareket* durumuna geçmektedir (1 - tam olasılıkla). Ancak *düz hareket* durumunu bitiren erkin hem *algılama - hesaplama - dönme* durumuna hem de tekrar *düz hareket* durumuna geçebilir. Bu iki olaydan birinin gerçekleşmesi birleşit olasılık hesabına bağlı olarak modellenmiştir. Örneğin, *düz hareket* durumundan *algılama - hesaplama - dönme* durumuna geçme olasılığı p_{sct} ise tekrar *düz hareket* durumuna dönme olasılığı $1 - p_{sct}$ 'dir.

Erkinlerin hesaplanan yöne belli açısız hızlarla dönmelerini garantileyen düşük-seviye kontrollerinin var olduğu kabul edilmiştir. Biz bu çalışmamızda düşük-seviye kontrolleriyle ilgilenmiyoruz. Bu nedenle gösterilen analizler değişik düşük seviye dinamiklere sahip birçok sisteme ve kendi içinde değişik dinamiklere sahip erkinlerden oluşan sistemlere uygulanabilirlerdir. Ek olarak bu çalışmada erkinlerin çarpışma olayları dikkate alınmadı. Bu nedenle geriye kalan davranış sırası şöyledir: hesaplanan yöne dön; belirlenen süre boyunca yön güncellemesi yapma; sonra tekrar komşuların yönlerini algıla ve döneceğin yönü hesapla.

algılama - hesaplama - dönme durumunda i 'nci erkin komşularının yönlerini algılıyor ve yeni yönünü belirliyor olacaktır. Ancak bu sırada komşu erkinler kendi *algılama - hesaplama - dönme* durumunda olabilirler ve bu yüzden i 'nci erkinin algıladığı yönler yanlış/eski olabilir. Aslında, algılama işleminin kendisi gecikmeler içerebilir. Bu nedenle erkinlerin modellenmesinde mutlaka bu gecikmeler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu gecikmeleri modelleyebilmek için $\tau_j^i(t)$ zaman değişkenini kullanacağız. Bu değişken $0 \leq \tau_j^i(t) \leq t$ eşitsizliğini sağlamaktadır. Yani başlangıçtan $-t = 0$ - şimdiki zamana kadar herhangi bir zaman anını ifade eden bu değişken gecikmeleri ifade etmek için kullanılacak. Örneğin, $\theta_j(\tau_j^i(t))$, t anında i 'nci erkinin, j 'nci erkin hakkında sahip olduğu yön bilgisidir. Eğer $\tau_j^i(t) = t$ ise i 'nci erkin, j 'nci erkinin güncel yön bilgisine sahiptir. Eğer, $\tau_j^i(t) < t$ ise i 'nci erkin, j 'nci erkinin $t - \tau_j^i(t)$ kadar zaman öncesindeki yön bilgisine sahiptir. Her bir erkin Şekil 1'deki sonlu-durum makinesine göre çalışarak diğer erkinlerden bağımsız olarak kendi yerel saatine göre hareket ettiği için her bir erkin için T^i , $i = 1, 2, \dots, n$ şeklinde bir zaman kümesi tanımlayacağız. Bu zaman kümesindeki anlarda erkinler yönlerini güncellemekte, geriye kalan tüm zamanlarda son kullandıkları yönlerde hareketlerine devam edeceklerdir. Dikkat edilirse eş-zamanlı modellerde her zaman ($t > 0$) bütün erkinler için ($i = 1, 2, \dots, n$) $\tau_j^i(t) = t$ ve $T^i = \{0, 1, 2, \dots\}$ 'dir. Bir başka deyişle eş-zamanlı mod-

elde bütün erkinler komşularının kusursuz ve doğru zamanlı yön bilgisine sahiptir ve yön güncellemelerini düzenli olarak diğer bütün erkinlerle aynı anda yapmaktadır. Bu model üzerine çalışmaya [12]'dan ulaşabilirsiniz.

Eş-zamansız sürü modellerinin daha gerçekçi olduğuna inanıyoruz. Gerçek robot uygulamalarında ya da hayvan sürülerinde erkinlerin eş-zamanlı hareket etmedikleri ve bazı gecikmelerin gerçekleştiği durumlar daha sık rastlanan durumlardır. Bu makalede Bertsekas'ın [11] daha önce kullandığı eş-zamanlı ve eş-zamansız modeller arasındaki ilişkilerden faydalanılacak ve [10]'te de sunulan aşağıdaki varsayım kullanılacaktır.

Varsayım 1: Öyle bir B pozitif tam sayısı vardır ki

(a) Her i ve her $t \geq 0$ değeri için $\{t, t + 1, \dots, t + B - 1\}$ kümesinin elemanlarından birisi T^i kümesine aittir

(b) $t - B < \tau_j^i(t) \leq t$ eşitsizliği $\forall i, t \geq 0, t \in T^i$ için sağlanır.

Bu varsayım temel olarak şunları ifade eder: (i) bütün erkinler en fazla B tane zaman basamağı içinde yönlerini güncellerler; (ii) erkinlerin komşularının yön bilgilerindeki gecikme en fazla B tane zaman basamağı içinde gerçekleşir. Bu varsayım bir anlamda eş-zamanlı olmama durumunu sınırlamaktadır. Bu varsayım paralel ve dağınık hesaplama yöntemleri üzerine yapılan ([11]) çalışmadan esinlenerek oluşturulmuştur. Paralel ve dağınık hesaplama literatüründe bu varsayımın (Varsayım 1) kullanılması sistemin parçalı eş-zamansız sistem olduğunu gösterir.

Diyelim ki

$$N_i(t) = \{j : |j \neq i, (x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2 \leq \delta^2\}$$

i 'nci erkinin, t anındaki komşularının kümesi olsun ve $|N_i(t)|$ bu kümenin eleman sayısını ifade ediyor olsun.

Algılama ve hesaplama gecikmeleri de içeren eş-zamansız sistem için bu komşular kümesi aşağıdaki gibi olur

$$N_i(t) = \{j : |j \neq i, (x_i(t) - x_j(\tau_j^i(t)))^2 + (y_i(t) - y_j(\tau_j^i(t)))^2 \leq \delta^2\} \quad (3)$$

Burada $\tau_j^i(t)$ erkin i 'nin en son yaptığı *algılama - hesaplama - dönme* durumunda j 'nci erkinin yön bilgisini algıladığı andır. Dikkat ederseniz i 'nci erkinin en son yön bilgisi topladığı andaki gecikmeler yüzünden bazı komşu erkinler komşulukları terk edebilir ya da bazı erkinler komşuluk içine girebilir. Aşağıda 3 farklı yön belirleme stratejisi anlatılacaktır.

3. Yön Belirleme Stratejileri

3.1. Strateji 1 (Ortalama)

Bu yöntem komşu erkinlerin yönlerinin ortalamasını alma üzerine kuruludur. Erkin i 'nin $t + 1$ 'deki yönü aşağıdaki eşitlikle bulunabilir

$$\theta_i(t + 1) = \frac{1}{1 + |N_i(t)|} \left(\theta_i(t) + \sum_{j \in N_i(t)} \theta_j(\tau_j^i(t)) \right), \quad t \in T^i, \quad (4a)$$

$$\theta_i(t + 1) = \theta_i(t), \quad t \notin T^i, \quad (4b)$$

Erkin i 'nin t anında erkin j 'nin yön bilgisi olarak $\theta_j(t)$ yerine $\theta_j(\tau_j^i(t))$ 'yi aldığımız varsayılıyor. Eğer i 'nci erkin j 'nci erkinin yön bilgisine henüz ulaşamamışsa $\tau_j^i(t) = 0$ olarak, eğer şimdiki yön bilgisine sahipse $\tau_j^i(t) = t$ olarak belirlenecektir. ($t - \tau_j^i(t)$) farkı algılama, hesaplama ya da iletişim olayları sırasında gerçekleşen gecikme miktarıdır.

Bu stratejinin en önemli eksiği ([12]'de de belirtildiği gibi) bazı özel durumlarda mantıklı olmayan sonuçlar verebilmesidir.

3.2. Strateji 2 (Göreceli Yönler)

Bu yöntemde erkinler komşularının ve kendi yönlerinin aralarındaki açı farkını yani göreceli yönleri kullanmaktadır. Aşağıdaki eşitlik bu yön farkını bir sonraki basamakta yönlerini belirlemek için nasıl kullandıklarını göstermektedir.

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \frac{\Theta}{1 + |\mathbb{N}_i(t)|} \quad t \in T^i \quad (5a)$$

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t), \quad t \notin T^i, \quad (5b)$$

Burada Θ i 'nci erkinin komşularıyla arasındaki yön farklarının toplamını ifade etmektedir. Bir erkinin komşusuyla arasındaki açı farkı 4 farklı şekilde oluşabilir. Bu nedenle açı farklarının hesabı bu 4 farklı durum için ayrı eşitliklerle yapılmaktadır. Bu 4 farklı durumun şekille anlatımına ve çözümü için kullanılan koda Bölüm 1'den [12] ulaşılabilir.

Bu yöntemin (eşitlik (5a)) ilk yöntem (Eşitlik (4a)) göre kıyaslaması ve simetrik durumlarda oluşabilecek hatalara Bölüm 1'den [12] ulaşılabilir.

3.3. Strateji 3 (Vektörel Toplama)

Bu yöntem erkinlerin yönlerini gösteren birim vektörlerin toplamı üzerine kuruludur. Eğer r_i i 'nci erkinin yönünü gösteren birim vektör olarak adlandırılırsa, aşağıdaki ifadeyle erkinlerin bir sonraki basamaktaki yönlerini belirleyebiliriz.

$$\theta_i(t+1) = \text{açı} \left(r_i(t) + \sum_{j \in \mathbb{N}_i(\tau_j(t))} r_j(\tau_j^i(t)) \right), \quad t \in T^i \quad (6a)$$

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t), \quad t \notin T^i, \quad (6b)$$

Burada $\text{açı}(v)$, v vektörünün açısını veren fonksiyondur. Uygulama sırasında Px ve Py 'nin eşitlik (6a) ile hesaplanan vektörün sırasıyla x ve y yönlerindeki parçaları olduğunu varsayarsak yeni açığı $\text{atan2}(Py, Px)$ fonksiyonuyla hesaplayabiliriz.

Bu kuralda da önceki iki kuralda olduğu gibi bazı simetrik durumların ortaya çıkması halinde karasızlık yaşanacaktır. Ancak, yine de ilk kurala göre daha mantıklı yönler belirleyebilmektedir. Uygulama sırasında oluşması düşük bir olasılığa sahip olsa bile simetrik durumlar için erkinler kendilerine rasgele bir yön belirleyebilecek şekilde programlanabilir.

4. Kısıtlı Dönme Açıları

Yukarıda anlatıldığı üzere erkinler yeni yönlerini kendi ve komşularının açılarını kullanarak hesaplamaktadır. Erkinlerin hesaplanan yönlere anlık dönüşler yapabilmeleri pratikte zor uygulanan bir olaydır. Bu nedenle bu bölümde erkinlerin fiziksel ya da mekanik kısıtlar yüzünden dönme açılarının sınırlı olduğu bir model geliştirilecek. Aşağıdaki eşitlikte bu kısıtlar kullanılarak erkin dinamiği tekrar oluşturulmuştur.

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \min(\text{abs}(\phi_i(t)), \alpha) \times \text{sign}(\phi_i(t)), \quad t \in T^i, \quad (7a)$$

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t), \quad t \notin T^i \quad (7b)$$

Burada α bir erkinin her bir zaman basamağında dönebileceği maksimum açıdır. $\phi_i(t)$ ise erkinin dönmesi istenen (önceki bolumdeki 3 stratejiden birini kullanarak hesaplanan) açıdır.

Eşitlik (7a)'e göre i 'nci erkin en fazla α kadar $\phi_i(t)$ yönünde (saat ya da saatin tersi yönde) dönebilir.

Dönme açısı kısıdını kullanmak için gerekli olan $\phi_i(t)$ açısını hesaplamak için daha önce belirttiğimiz 3 stratejinin yön belirleme kurallarını aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz.

Strateji 1 için

$$\phi_i(t) = \frac{1}{1 + |\mathbb{N}_i(t)|} \left(\theta_i(t) + \sum_{j \in \mathbb{N}_i(t)} \theta_j(\tau_j^i(t)) \right) - \theta_i(t), \quad t \in T^i \quad (8)$$

Strateji 2 için

$$\phi_i(t) = \frac{\Theta}{1 + |\mathbb{N}_i(t)|} \quad t \in T^i \quad (9)$$

(Burada Θ Bölüm 1 [12]'de verilen pseudo kod ile hesaplanacaktır.)

Strateji 3 için

$$\phi_i(t) = \text{angle} \left(r_i(t) + \sum_{j \in \mathbb{N}_i(\tau_j(t))} r_j(\tau_j^i(t)) \right) - \theta_i(t), \quad t \in T^i \quad (10)$$

şekindedir.

5. Benzetim Sonuçları ve Tartışmalar

Bu bölümde yukarıda oluşturduğumuz modellerin benzetimleri yapılarak sonuçları kıyaslanmaktadır. Burda elde edilen sonuçlar eş-zamanlı modeldeki sonuçlarla [12] kıyaslanarak sistemlerin eş-zamanlı ve eş-zamansız oldukları durumlarda nasıl performans farklılıkları gösterdikleri anlaşılacaktır.

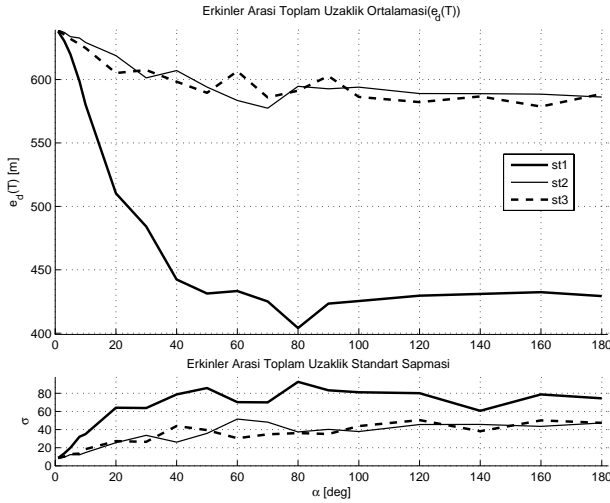
Benzetimlerde $n = 50$ tane erkin kullanılmıştır. Başlangıçta bütün erkinler 100×100 'lık bir alanda rasgele konumlandırılmıştır. Bütün erkinlerin hızları eşit ve 1 birim/basamak'de sabittir. Simülasyonlar sınırsız arenalar için $T = 500$ basamak sayısı boyunca, sınırlı arenalar için $T = 1000$ basamak sayısı kadar sürdürülmüştür. Erkinler yön güncellemelerini B 'ye bağımlı bir istatistiksel fonksiyonla yapmaktadırlar. Erkinlerin güncelleme olasılığı $t \in (t - B, t]$ aralığı boyunca düzgün dağıtılmıştır. Böylece $1/(B - \Omega + 1)$ bir erkinin güncelleme yapma olasılığıdır. Burada Ω o erkinin son yön güncellemesinden bu yana geçen güncelleme yapmadığı basamak sayısını verir. Örneğin, bir erkin bir önceki basamakta güncelleme yaptıysa şimdiki basamakta güncelleme yapma olasılığı $1/B$ 'dir. Eğer erkin $3 < B$ basamak boyunca güncelleme yapmamışsa şimdiki güncelleme yapma olasılığı $1/(B - 2)$ 'dir. Aynı şekilde eğer erkin B basamak boyunca güncelleme yapmadıysa şimdi güncelleme yapma olasılığı 1'dir veya başka deyişle kesindir. Erkinin her güncelleme yapmadığı basamakta Ω 1 arttırılmakta ve güncelleme yapıldığı zaman 0'a eşitlenmektedir. Erkinlerin ilk pozisyonları ve yönleri rastgele belirlenmiş ve bütün stratejiler için aynı ilk durumlar kullanılmıştır. Benzetim sonuçları incelenirken 20 tane farklı rasgele belirlenmiş ilk durum için yapılan benzetim sonuçlarının ortalamaları ve standart sapmaları kullanılmıştır.

Sistemlerin performanslarını ölçmek için bölüm 1'de kullanılan kriterlerin aynıları kullanılmıştır. Bu kriterlere [12] ulaşılabilir. α 'nın ve sınırlı ve sınırsız arenaların performans üzerine etkilerini anlayabilmek için aşağıdaki benzetim sonuçlarını kullanacağız.

5.1. α 'nın etkisi (sınırsız arena)

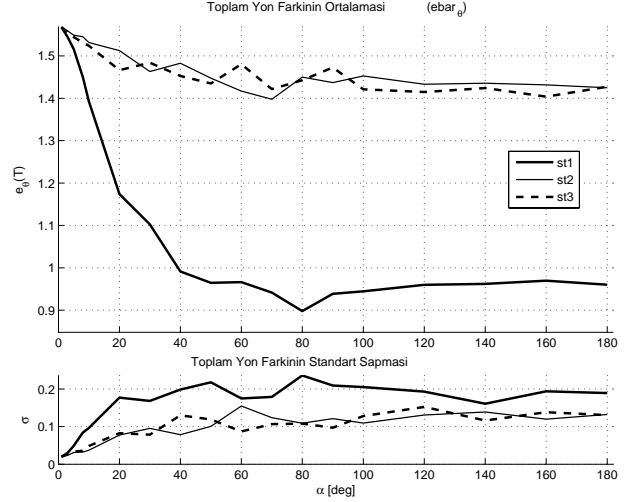
Burada erkinlerdeki dönme açısı kısıtlarının (α) ve eş-zamansız durumunun ve 3 farklı yön belirleme stratejisinin ortak yön belirleme üzerine etkilerini inceleyeceğiz. Bu benzetimler sırasında komşuluk yarıçapı $\delta = 20$ birim alınmıştır. Dikkat ederseniz buradaki ve sonraki bütün benzetimlerde $B = 10$ eş-zamansız olmayı ifade etmektedir.

Bu bölümde eş-zamansız durumda 3 stratejinin benzetim sonuçları sunulmuştur. Şekil 2 ve 3'te $e_d(t)$ ve $e_\theta(t)$ nin benzetim sonunda ($t = T = 500$) aldığı değerlerin α 'ya göre değişimi görülmektedir. Eş-zamanlı olan modelin sonuçlarına benzer olarak (Bölüm 1) α değeri arttıkça $e_d(T)$ ve $e_\theta(T)$ değerleri azalmaktadır. Eş-zamanlı durumdakiyle kıyaslısak eş-zamansız durumdaki performansların daha kötü olduğunu söyleyebiliriz. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü algılama ve hesaplama işlemleri sırasında gerçekleşen gecikmeler doğru yön bilgisinin eksikliğine yol açar ki bu erkinlerin ortak yön bulmada performanslarını kötü yönde etkiler. Şekil 4'de 3 strateji için eş-zamansız erkinlerin grup oluşturma performansları sunulmaktadır. Görüldüğü gibi dönme açısı kısıtlarındaki azalma bütün stratejilerin daha iyi performans sergilemelerine yol açmaktadır. Fakat eş-zamanlı durumdakiyle kıyasladığımızda yine eş-zamansız durumdaki sonuçların daha kötü (daha yüksek grup sayısı) olduğunu görüyoruz. Eş-zamanlı durumdaki gibi Şekil 2, 3 ve 4'da 1. stratejinin daha iyi sonuçlar çıkardığını görebiliyoruz. Yine, 2. ve 3. stratejideki sonuçlar birbirine yakındır. (Bu makaledeki bütün simülasyon sonuçları grafiklerinde strateji 1 için kalın düz çizgi, strateji 2 için düz çizgi ve strateji 3 için tireli çizgi kullanılmıştır.)

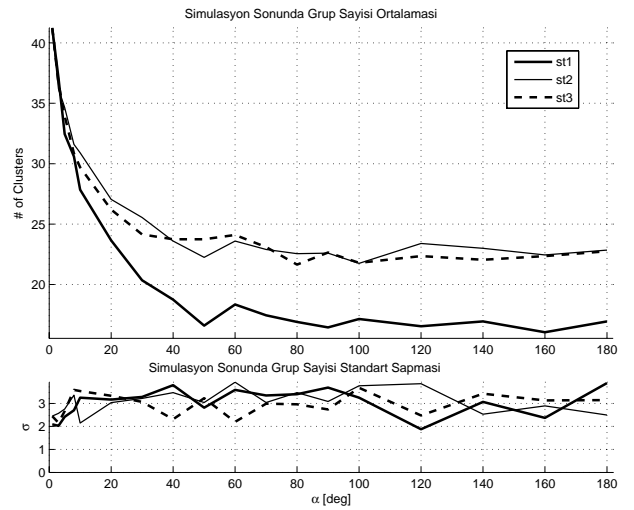


Şekil 2: Sınırsız arenada $e_d(T)$ sonuçları .

Yönlerdeki zamana göre değişimlerin ifade edildiği $\dot{e}_\theta(t)$ kriteri 5, 6 ve 7'inci şekillerde sırasıyla 1., 2. ve 3. stratejiler için eş-zamansız durumda çizdirilmiştir. Eş-zamanlı durumdakine benzer şekilde $\alpha = 1^\circ$ olduğu durumda yön değişimleri toplamı $\alpha = 180^\circ$ olduğu durumdakinden daha azdır. Bütün şekillerde $\dot{e}_\theta(t)$ 'nin sıfıra yakınsaması için geçen süre eş-zamanlı modeldeki sürelerden daha fazladır. Bu durumda da gruplar zaman geçtikçe birbirlerinden uzaklaşmakta ve karşılaşılarak ortak yön belirleme olasılıkları düşmektedir. Bu nedenle yön değişimlerinin toplamındaki dalgalanmalar giderek azalmaktadır. Eş-zamanlı durumdakine benzer şekilde burada da değişik zaman aralıklarında dalgalanmalar olmuştur. Bunların sebebi ya



Şekil 3: Sınırsız arenada $e_\theta(T)$ sonuçları.



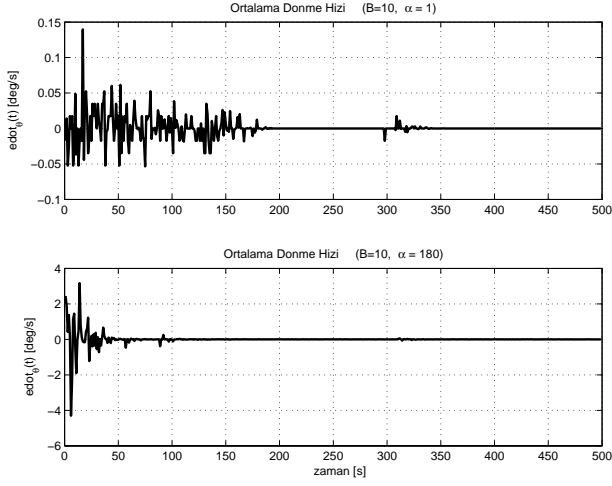
Şekil 4: Sınırsız arenada $t = T$ anında grup sayısı sonuçları.

karşılaşan gruplardır ya da eş-zamansız durumdaki erkinlerin gecikmeler yüzünden yanlış yön hesabından kaynaklanmaktadır.

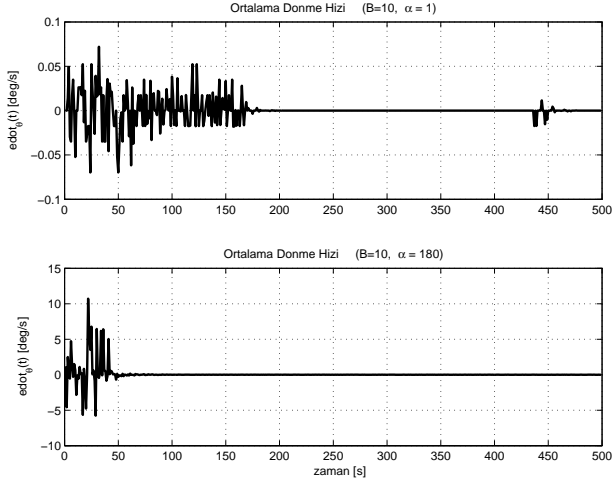
5.2. α 'nın etkisi (sınırlı arena)

Sınırsız arena için kullandığımız bütün parametre değerleri ve ilk durumlar buradaki benzetimler için aynen kullanılmıştır. Tek fark buradaki benzetimlerde arenanın sınırlı olmasıdır. Erkinler 100×100 lık bir kare alanda hareket etmektedirler. Sınırla karşılaşan erkin tıpkı ışık ışınlarının aynadan yansımaları gibi sınırdan yansıyan yeni yönde hareketine devam etmektedir.

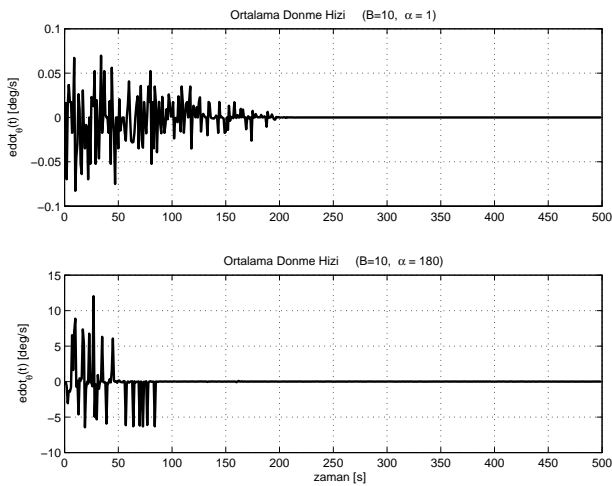
Şekil 8, 9 ve 10'de önceki benzetimlerin sınırlı arena ve eş-zamansız durumdaki sonuçlarını görmekteyiz. Yine dönme kısıtları azaldıkça performanslar artmaktadır. Eş-zamanlı ve eş-zamansız sonuçları kıyaslısak eş-zamanlı olmama durumunun yine sistemi kötü yönde etkilediği görürüz. 2. ve 3. stratejiler yine birbirlerine yakın sonuçlar verirken 1. strateji diğerlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Sınırsız arena sonuçlarıyla karşılaştırsak, buradaki -sınırlı arena- sonuçlarının daha iyi olduğu açıktır.



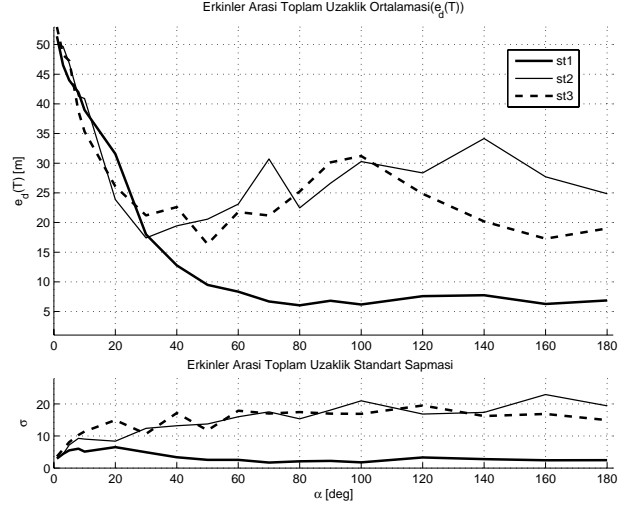
Şekil 5: Strateji 1, sınırsız arena.



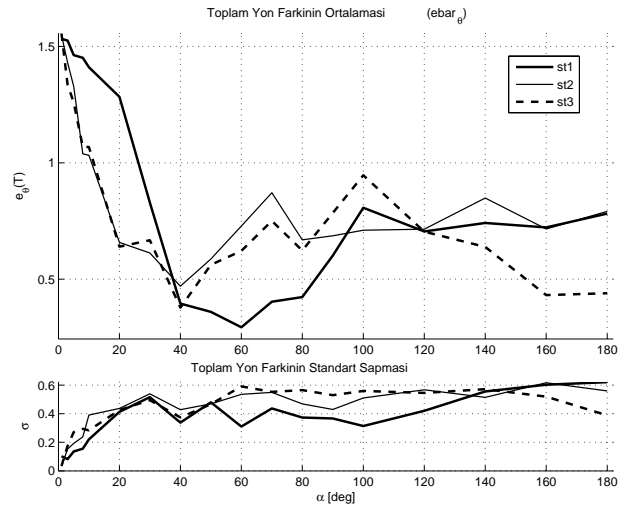
Şekil 6: Strateji 2, sınırsız arena.



Şekil 7: Strateji 3, sınırsız arena.



Şekil 8: Sınırlı arenada $e_d(T)$ sonuçları .

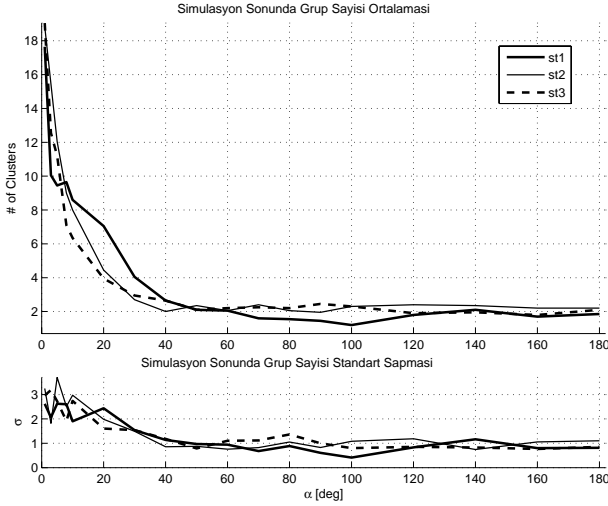
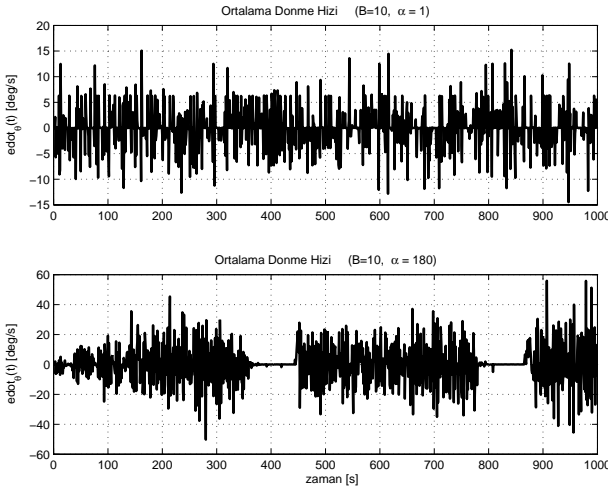


Şekil 9: Sınırlı arenada $e_\theta(T)$ sonuçları.

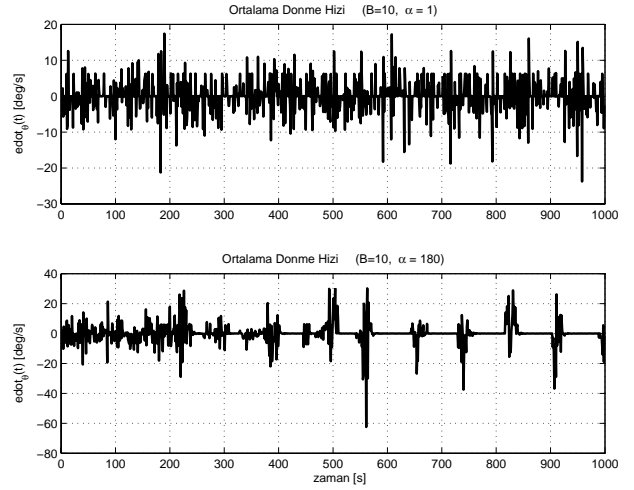
$\dot{e}_\theta(t)$ 'nin çizdirildiği şekiller stratejilere göre 11, 12 ve 13'dür. Şekillerden görüldüğü gibi $\alpha = 1^\circ$ için erkinlerin ortak bir yönde tam olarak karar kılamadıkları görülmektedir. $\alpha = 180^\circ$ olduğu durumda $\alpha = 1^\circ$ olan duruma göre sonuçlar daha iyidir ama yine de eş-zamanlı benzerlerine göre daha kötü sonuçlar elde edilmiştir.

6. Kaynakça

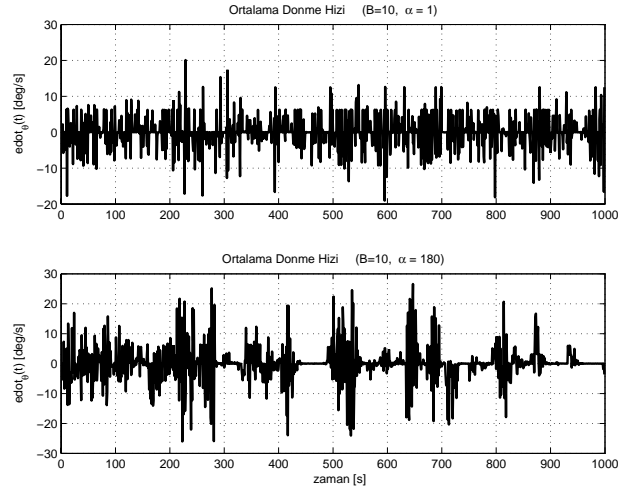
- [1] Beni, G. ve Liang, P. *Pattern Reconfiguration in Swarms—Convergence of a Distributed Asynchronous and Bounded Iterative Algorithm*, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Cilt 12, Sayı 3, sayfa 485-490, Haz. 1996
- [2] Liu, Y. ve Passino, K. M. ve Polycarpou, M. M. *Stability Analysis of One-Dimensional Asynchronous Swarms*, IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 48, Sayı 10, sayfa 1848-1854, Ekim 2003
- [3] Liu, Y. ve Passino, K. M. ve Polycarpou, M. M. *Stability Analysis of M-Dimensional Asynchronous Swarms with a*


 Şekil 10: Sınırlı arenada $t = T$ anında grup sayısı sonuçları.


Şekil 11: Strateji 1, sınırlı arena.



Şekil 12: Strateji 2, sınırlı arena.



Şekil 13: Strateji 3, sınırlı arena.

Fixed Communication Topology, IEEE Trans. on Automatic Control, Cilt 48, Sayı 1, sayfa 76-95, Ocak 2003

- [4] Gazi, V. and Passino, K. M. *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
- [5] Beni, G., *Order by Disordered Action in Swarms*, Proc. SAB 2004 International Workshop on Swarm Robotics, Springer Verlag, Editor: "Erol Sahin and William M. Spears", Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3342), sayfa 153-171, Temmuz 2004
- [6] Gordon, N. and Wagner, I. A. and Bruckstein, A. M. *Gathering Multiple Robotic A(gents) with Limited Sensing Capabilities*, Lecture Notes in Computer Science, Cilt 3172, sayfa 142-153, Ocak 2004
- [7] Flocchini, P. ve Prencipe, G. ve Santoro, N. ve Widmayer, P. *Gathering of Asynchronous Oblivious Robots with Limited Visibility*, Lecture Notes in Computer Science, Cilt 2010, sayfa 247-258, Ocak 2001

- [8] Vicsek, T. and Czirok, A. and Ben-Jacob, E. and Cohen, I. and Shochet, O., *Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles*, Physical Review Letters, Cilt 75, Sayı 6, sf. 1226-1229, Ağustos 1995
- [9] Şamiloğlu, A. T. ve Gazi, V. ve Koku, A. B., *Effects of Asynchronism and Neighborhood Size on Clustering in Self-Propelled Particle Systems*, A. Levi and et al. (Edt.), IS-CIS06, LNCS 4263, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, sf. 665-676, Kasım 2006
- [10] Şamiloğlu, A. T. ve Gazi, V. ve Koku, A. B., *Asynchronous Cyclic Pursuit*, S. Nolfi et al. (Edt.), SAB06, LNAI 4095, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, sf. 667-678, Eylül 2006
- [11] Bertsekas, D. P. and Tsitsiklis, J. N., *Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods*, Athena Scientific, 1997, Belmont, MA
- [12] Şamiloğlu, A. T. ve Gazi, V. ve Koku, A. B., *Kendinden İtmeli Parçacık Sistemlerinde Üç Farklı Ortak Yön Bulma Stratejisi - Bölüm 1: Eş-Zamanlı Model*, TOK07, yayına kabul edildi.