



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kalabalık benzetimlerinde küçük gruplar için GPU tabanlı çarpışmasız doğrusal gezinge oluşturulması

GPU-based collision-free linear trajectory generation for small groups in crowd simulations

Yazar(lar) (Author(s)): Öner BARUT¹

ORCID¹: 0000-0003-3442-1586

To cite to this article: Barut Ö., “Kalabalık benzetimlerinde küçük gruplar için GPU tabanlı çarpışmasız doğrusal gezinge oluşturulması”, *Journal of Polytechnic*, 27(1): 407-417, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Barut Ö., “Kalabalık benzetimlerinde küçük gruplar için GPU tabanlı çarpışmasız doğrusal gezinge oluşturulması”, *Politeknik Dergisi*, 27(1): 407-417, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1409006

Kalabalık Benzetimlerinde Küçük Gruplar için GPU Tabanlı Çarpışmasız Doğrusal Gezinge Oluşturulması

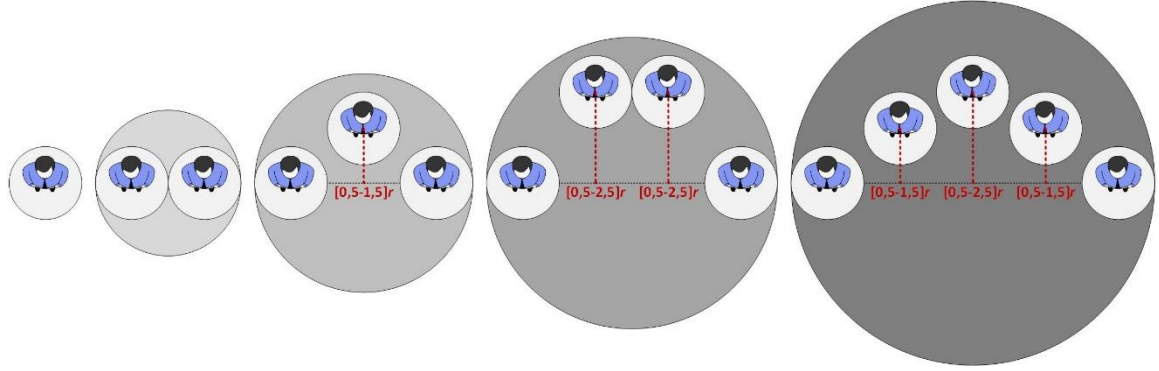
GPU-Based Collision-Free Linear Trajectory Generation for Small Groups in Crowd Simulations

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bireylerin 1-5 kişilik küçük gruplar halinde hareket ettiği daha doğal kalabalıklar oluşturulmaktadır. / More natural crowds are formed where individuals move in small groups of 1-5 people.
- ❖ Her grup için tek bir doğrusal çarpışmasız gezinge oluşturulup grup üyelerince ortak kullanılmaktadır. / A single linear collision-free trajectory is created for each group and is shared by group members.
- ❖ Grup üyeleri grup büyüklüğüne göre gerçek hayattakine benzer formasyonlarda hareket etmektedir. / Group members move in formations similar to real life, depending on the group size.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bireylerin; 1-5 kişilik küçük gruplar halinde belirli formasyonlara göre hareket etmeleri sağlanmıştır. / Individuals are enabled to move in small groups of 1-5 people according to certain formations.



Şekil. Grup büyüklüğüne göre grup içi formasyonların belirlenmesi / **Figure.** Determination of intra-group formations according to group size

Amaç (Aim)

Küçük gruplar halinde minimum yönlendirme maliyetiyle hareket eden bireylerin kalabalık benzetimlerini oluşturmaktır. / It is to create crowd simulations of individuals moving in small groups with minimum steering cost.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Her grup için tek bir doğrusal çarpışmasız gezinge oluşturulup grup üyeleri tarafından ortak kullanılmıştır. / A single linear collision-free trajectory has been created for each group and shared by group members.

Özgünlük (Originality)

Belirli formasyonlara sahip küçük gruplar halinde minimum yönlendirme maliyetiyle hareket eden bireyler için gerçek zamanlı kalabalık benzetimi yöntemi geliştirilmiştir. / A real-time crowd simulation method has been developed for individuals moving in small groups with specific formations with minimum steering cost.

Bulgular (Findings)

Mevcut yöntemden daha kısa sürede oluşturulan bireyler, benzer minimum yönlendirme maliyetine sahiptir. / Individuals created in less time than the current method having a similar minimum steering cost.

Sonuç (Conclusion)

Küçük gruplar halinde, belirli formasyonlarda ve minimum yönlendirme maliyetiyle hareket eden bireylerden oluşan kalabalık benzetimleri oluşturmak mümkündür. / It is possible to create crowd simulations consisting of individuals moving in small groups, in specific formations, and with minimal steering cost.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kalabalık Benzetimlerinde Küçük Gruplar için GPU Tabanlı Çarpışmasız Doğrusal Gezinge Oluşturulması

Araştırma Makalesi / Research Article

Öner BARUT^{1*}

¹Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 23.12.2023 ; Kabul/Accepted : 04.01.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 31.01.2024)

ÖZ

Bilgisayar ortamında sanal kalabalıklar oluşturmak ve bunların davranışlarını taklit etmek için kullanılan kalabalık benzetimleri, sanal bir sahnenin arka planında bir kalabalık ambiyansı oluşturmak için de kullanılabilir. Arka planda bir kalabalık ambiyansı oluşturmak için de olsa bireylerin tek başlarına hareket etmeleri yerine gruplar halinde bulunması bu ambiyansı destekleyecek önemli bir unsurdur. Bu çalışmada, görülme sıklıkları gerçek insan kalabalıklarından derlenen 1-5 kişilik küçük gruplar halinde, gruptaki birey sayısına göre gerçek hayattakine benzer bir formasyonda yürüyerek birlikte hareket eden gerçek zamanlı sanal insan kalabalıklarının yönlendirmesiz bir benzetim modeli önerilmektedir. Bu yeni yöntemde her bir birey için ayrı ayrı çarpışmasız ve doğrusal gezinmeler oluşturmak yerine her bir grup için ortak bir gezinge oluşturularak grup içerisindeki tüm bireylerin belirlenen formasyonda buna göre hareket etmeleri sağlanmaktadır. Önerilen yöntem, farklı birey sayılarına sahip gruplar oluşturmayı, her büyüklükteki grup sayısının kalabalık içinde görülme sıklığına göre ayarlanmasını ve grup içindeki bireylerin formasyonlarının grup büyüklüğüne göre belirlenebilmesini sağlayacak yeniliklere sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kalabalık benzetimi, küçük gruplar, yönlendirmesiz, doğrusal çarpışmasız gezinge, ambiyans kalabalığı.

GPU-Based Collision-Free Linear Trajectory Generation for Small Groups in Crowd Simulations

ABSTRACT

Crowd simulations, which are used to create virtual crowds in the computer environment and imitate their behavior, can also be used to create a crowd ambience in the background of a virtual scene. Even if it is to create a crowd ambience in the background, the presence of individuals in groups rather than acting alone is an important element that will support this ambience. In this study, a steering-free simulation model of real-time virtual human crowds that move together in small groups of 1-5 people, whose frequency of occurrence is compiled from real human crowds, in a formation according to the number of individuals in the group similar to real life, is proposed. In this new method, instead of creating separate collision-free and linear trajectories for each individual, a common trajectory is created for each group and all individuals in the group are ensured to move accordingly in the determined formation. The proposed method has innovations that enable creating groups with different numbers of individuals, adjusting the number of groups of each size according to the frequency of occurrence in the crowd, and determining the formation of individuals within the group according to the group size.

Keywords: Crowd simulation, small groups, steering-free, linear collision-free trajectory, ambient crowd.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalabalık benzetimi (simülasyonu), çok sayıda bireyin hareketlerinin sanal ortamda taklit edilmesi olarak tanımlanmaktadır [1]. Kalabalık benzetimine konu olan bireyler yalnızca insanlar ile sınırlı olmayıp hayvanlar, araçlar, robotlar gibi çok farklı varlıkları da temsil edebilirler. Kuş veya balık gibi hayvan sürüleri, trafikte yol alan motorlu veya motorsuz taşıtlar, programlandıkları amaç doğrultusunda karada, suda veya havada hareket eden robotlar da kalabalık benzetimi ile bilgisayar ortamında modellenebilmektedir [1,2].

Bilim veya araştırma yönünden ele alındığında kalabalık benzetimi gerçek dünyada tekrarlanması pahalı veya tehlikeli olan senaryoları sanal ortamda çok daha uygun

maliyetle ve gerçek dünya için tehlike oluşturmayacak şekilde defalarca kez sergilemek için kullanılmaktadır. Örneğin; taktiksel savaş gibi askeri benzetimler, kavşak yönetimi gibi trafik benzetimleri veya terör saldırısı, yangın ya da doğal afetlerde hayati önem arz eden tahliye benzetimleri gerçek bireylerle tekrarlanması tehlike arz etmenin yanı sıra zaman ve maliyet açısından da pahalı olan senaryolardır. Bu ve benzeri birçok senaryonun bilgisayar ortamında sanal bir biçimde oluşturularak defalarca tekrar edilmek suretiyle veri elde edilmesi ve sonrasında bu verilerin analizine dayalı sonuçların gerçek hayata uyarlanması zaman ve maliyet açısından hem çok daha ucuz hem de çok daha güvenli olmaktadır. Bu doğrultuda kalabalık benzetimleri; şehirlerin ve yolların planlanması amacıyla kentsel planlama uygulamalarında, acil durumlarda en hızlı şekilde tahliye edilebilecek şekilde tasarlanmalarını sağlamak üzere büyük yapıların veya taşıtların tasarımında, askeri operasyonlardaki taktiklerin geliştirilmesi ve sınanması için askeri

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : onerbarut@gazi.edu.tr

benzetimlerde, insanlar veya hayvanlardan oluşan gruplar içerisindeki sosyal etkileşimi modelleme amacıyla sosyoloji alanında ve buna benzer daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Oyun, animasyon, video gibi içeriklerin konu edildiği eğlence, eğitim, reklam gibi diğer yönlerden ele alındığında ise kalabalık benzetimi bilgisayar oyunlarında farklı türlerde varlıkların sanal kalabalıklarını oluşturmak, animasyon veya canlı çekim kısa video ve filmlerdeki kalabalık sahnelerini görsel efektlerle sanal olarak oluşturmak gibi amaçlara hizmet etmektedir [1-3].

Kalabalık benzetimleri, kullanım alanı ve amacına bağlı olmakla birlikte yalnızca bireylerin fiziksel hareketlerini belirleyen hesaplamalar yapmakla kalmayıp aynı zamanda kalabalığın ve içinde bulunduğu benzetim çevresinin bilgisayar ortamında görselleştirilmesi işlemlerini de gerçekleştirmektedir [2]. Bireylerin ve dolayısıyla genel anlamda kalabalığın davranışını belirleyen fiziksel hesaplamalar; bireylerin hareketlerini belirleme, bu hareketler esnasında gerçekleşebilecek olası çarpışmaları tespit ederek bunlardan kaçınmalarını sağlama, bireylerin hareket rotalarını belirleyecek yolları belirleme ve bu yolları izleyecek şekilde koordine bir biçimde hareket etmeleri sağlayacak işlemleri içermektedir. Diğer taraftan bireylerin ve benzetim ortamının görselleştirilmesini sağlayan hesaplamalar; bireylerin eklem hareketi animasyonları, 3 boyutlu modelleri ve bunların doku kaplamaları için en uygun çeşitliliği ve kaliteyi belirleyerek grafik işlem birimi (graphics processing unit - GPU) aracılığıyla görüntü oluşturulmasını sağlayacak işlemleri içermektedir. Benzetimlerin bu iki temel iş sürecini gerçekleştirmek üzere geçmişten günümüze çok sayıda araştırma yapılmış olup bunlara ilişkin detaylı ve güncel bilgiler farklı literatür taraması ve kitaplarda yayınlanmıştır [1-5]. Tüm bu çalışmalarda her iki süreç için de ortak bir biçimde olabildiğince fazla sayıda bireyden oluşan kalabalıkların en az işlem maliyetiyle gerçeğe en yakın şekilde benzetiminin sağlanması temel hedefi oluşturmaktadır.

Bilgisayar donanımlarının sürekli artan hesaplama gücü ve yeni geliştirilen benzetim tekniklerinin birleşimi ile her geçen gün hem görsel hem de davranışsal açıdan daha gerçekçi ve daha fazla sayıda birey içeren kalabalıklar oluşturmak mümkün olmaktadır. Ancak kalabalık benzetimlerinin kalite düzeyini ve dolayısıyla maliyetini etkileyen önemli faktörlerden biri de kullanıcıların ilgisi ve etkileşimleridir. Örneğin; kullanıcı girdilerinden etkilenmeyen veya ilgili sahnenin arka planında yer alarak yalnızca bir kalabalık ambiyansı oluşturmak istenen kalabalık senaryolarında kullanıcının odağı doğrudan kalabalığın üzerinde olmayacaktır. Bundan yararlanarak kalabalığın görsel [6-8] veya davranışsal [8-13] kalitesini kullanıcı tarafından fark edilmeyecek seviyede azaltarak maliyetin düşürülmesi ve böylelikle aynı sahnede daha fazla bireyin kullanılması mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada, Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yaklaşım geliştirilerek, gerçek insan kalabalıklarının ampirik gözlemlerinden elde edilen

bulguların [14-18] desteklediği şekilde 1 (tek başına) ile 5 kişiden oluşan küçük gruplar halinde yürüme hareketi gerçekleştiren sanal insan kalabalıkları için benzetim oluşturan bir yöntem sunulmaktadır. Geliştirilen bu yeni yöntemde, her bir birey için ayrı ayrı çarpışmasız ve doğrusal geze (trajectory) belirlemek yerine değişken sayıda bireyden oluşan küçük gruplar için tek seferde ortak bir çarpışmasız ve doğrusal geze belirlenmekte ve grubu oluşturan bireylerin gerçek insan gruplarına benzer bir formasyona (diziliş) göre bu geze için takip edecek şekilde yürüme hareketi sağlanmaktadır. Geliştirilen bu yeni çalışmanın var olan benzerlerine göre başlıca katkıları şunlardır:

- Bireylerin değişken sayıda birey içerebilen küçük gruplar halinde hareket etmelerini olanaklı hale getirmektedir.
- Her bireyin yalnız başına hareket ettiği kalabalıklara kıyasla bireylerin küçük gruplar halinde birlikte hareket ettiği daha doğal bir kalabalık oluşturmaktadır.
- Her grup için tek bir doğrusal ve çarpışmasız geze oluşturulup grupta yer alan tüm bireylerin bunu ortak kullanmalarını sağlayarak her bir birey için ayrı ayrı doğrusal ve çarpışmasız geze oluşturma maliyetini azaltmaktadır.
- Grup içerisindeki bireylerin grup büyüklüğüne göre gerçek hayattakine benzer formasyonlara göre dizilerek hareket etmelerine olanak sağlamaktadır.
- Grup içi birey sayılarının alt ve üst sınırlarının yanı sıra farklı büyüklükteki grupların kalabalık içerisindeki sıklıklarının belirtilerek buna göre kalabalıklar oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

2. bölümde ilgili literatürün kısa bir özeti sunulurken 3. bölümde önerilen yaklaşıma ilişkin detaylı açıklamalar yer almaktadır. 4. bölümde önerilen metod ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bunların sonuçları paylaşılmaktadır. 5. bölümde genel sonuçlar tartışılarak gelecekteki olası araştırma yönleri adreslenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE SUMMARY)

Kalabalık benzetiminde gezinim (navigation), bireylerin kendine has bir başlangıç noktasından yine kendine has bir hedef noktasına, başka bireylere veya engellere çarpmadan ulaşmak üzere gerçekleştirdiği yönlendirme (steering) hareketlerinin bütünüdür [19]. Reynold'un öncü çalışmasında [20] ortaya koyduğu ilk kalabalık benzetim sisteminden beri geçen onlarca yılda kalabalık benzetimlerinde kalabalığı oluşturan bireylerin gezinim ve yönlendirme davranışları birçok araştırmanın konusu olmuştur [1-3]. Bu çalışmalarda kalabalığı mikro ve makro düzeyde ele alan iki temel yaklaşımın şekillendiği görülmektedir [1,3]. Mikro düzeyli yaklaşımda her bir birey ayrı bir varlık olarak ele alınarak çevresindeki diğer bireylere ve engellere göre hareket etmesi sağlanmaktadır. Kural tabanlı modeller [20,21], sosyal kuvvetler tabanlı modeller [22,23], hız vektörü tabanlı modeller [24,25], görme tabanlı modeller [26,27] gibi

farklı alt sınıflara ayrılan bu yaklaşımda kendi yerel koşullarına göre detaylı bireysel yönlendirme kararları alabilen bireyler oluşturmak mümkündür. Makro düzeyli yaklaşımda ise kalabalık bireylere karşılık gelen küçük parçacıklardan oluşan birleşik ve sürekli bir bütün olarak ele alınarak hareket ettirilir. Süreklilik modeli [28,29], toplam dinamikler modeli [30], potansiyel alan modelleri [31,32] gibi alt sınıfları bulunan bu yaklaşımda bireyler arası etkileşimden ziyade kalabalığın geneli için alınan kararlar ön plandadır.

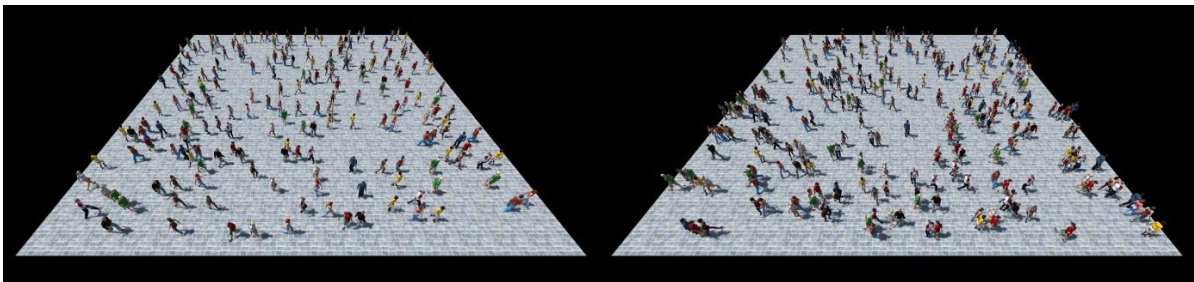
Gezinim ve yönlendirme için bu iki yaklaşıma dayalı yöntemlerin genelinde kalabalığın büyüklüğü arttıkça bireylerin davranış hesaplamaları için gereken toplam maliyet de artarak birey sayısı üzerinde üst sınır oluşturmaya devam etmektedir. Özellikle kalabalığın birincil odak unsuru olmadığı, yalnızca sahnenin arka planında bir kalabalık ambiyansı oluşturulmak istenen uygulamalarda, davranışsal kaliteyi belirleyen detay seviyesi (level of detail - LOD) teknikleri [8-10] ile sahneyi görüntüleyen kameranın odaklandığı sınırlı görüş alanının dışındaki uzak bireylerin gezinim ve yönlendirme davranışlarını basitleştirilerek maliyetlerinin azaltılması ve nihayetinde kazanılan işlem gücünün benzetimdeki birey sayısını artırmak için kullanılması mümkündür. Ancak kameranın odak alanında bulunan bireyler için halen en kaliteli davranışları oluşturma üzere en maliyetli hesaplamaların yapılması gerekmektedir.

Barut ve arkadaşları, arka planda kullanılacak ambiyans kalabalıkları için yönlendirme davranışları içermeyen gerçek zamanlı bir benzetim yaklaşımı geliştirmişlerdir [11-13]. Bu yaklaşımın altında yatan temel fikir, kalabalığı oluşturan bireylerin sürekli yerel çevrelerini kontrol ederek gezinim ve yönlendirme kararları almak üzere maliyetli hesaplamalar yapmak yerine, benzetim başında kendilerine özel olarak tahsis edilen ve başlangıç noktalarından bitiş noktalarına kadar herhangi bir çarpışmaya neden olmayacağı garanti edilen gezinimler üzerinde belirtilen sabit hızlarla hareket ettirilmeleridir. Böylelikle benzetim boyunca her bir bireyin kendisine tahsis edilen hız vektörünü (doğrultu ve hareket hızı) kullanarak yalnızca benzetimin ardışık zaman dilimlerinde hangi pozisyona ilerlemiş olacağını hesaplaması yeterli olmaktadır. Her bir bireye özgü çarpışmasız ve doğrusal bir gezinge tahsis edildiği için bireyin hedefine doğru gezinge planı yapma ya da hareket ederken olası yerel çarpışmaları tespit etme ve

bunlardan kaçınma işlemleri için hiçbir hesaplama yapmasına gerek bulunmamaktadır. Bu fikri uygulamaya geçirmek üzere ilk olarak tamamen merkezi işlem birimi (central processing unit - CPU) üzerinde çalışan bir yöntem [11] geliştiren Barut ve arkadaşları, daha sonra grafik işlem biriminin (graphics processing unit - GPU) yüksek paralel yapılı görüntü oluşturma iş hattından faydalanarak çarpışmasız gezinimlerin gerçek zamanda daha verimli bir şekilde oluşturulmasını sağlamışlardır [12]. GPU tabanlı bu yöntemi daha da ileri taşıyan Barut ve arkadaşları, bireylerin tek parçadan oluşan doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge yerine, daha küçük doğrusal ve çarpışmasız gezinge parçalarının uç uca eklenmesiyle oluşturdukları birleşik gezinimler üzerinde hareket ettirmelerini sağlayarak daha yoğun kalabalık benzetimleri oluşturmayı başarmışlardır [13].

Literatürdeki bu yönlendirmesiz kalabalık benzetimi yöntemlerinin üçünde de bireyler diğer bireylerden bağımsız bir gezingeye sahip olduğu için her biri kendi başına hareket etmekte ve kalabalığı oluşturan diğer bireylerle ortak bir grup etkileşimi göstermemektedir. Ancak gerçek insan kalabalıkları incelendiğinde insanların 2-5 arası bireylerden oluşan küçük gruplar haline hareket ettiği görülmüştür [14-18]. James, 1950 yılında yayalar, alışveriş yapan bireyler, oyun bahçesi, kumsal gibi halka açık alanlardaki bireyler gibi gerçek insan kalabalıklarını gözlemleyerek tüm bu bireylerin %55'ten fazlasının 2 ila 6 kişilik gruplar oluşturduğunu belirlemiştir [14]. Aveni, 1974 yılında bir kavşaktan geçen insanlar ile yapılan röportajlardan elde ettiği verilere göre bu kişilerin çoğunluğunun (%74) bir veya daha fazla kişiden oluşan bir gruba dahil olduğu tespit etmiştir [15]. Singh ve arkadaşları [16], alışveriş yapan, kampüste gezen ve seyahat eden insan kalabalıklarını gözlemleyerek bunların çoğunluğunun 2 veya daha fazla kişilik gruplardan oluştuğunu belirlemiştir. Moussaïd ve arkadaşları [17], düşük ve yüksek yoğunluklu insan kalabalıklarının video kayıtlarını inceleyerek bireylerin sırayla %55 ve %70 oranla bir gruba ait olduklarını gözlemlemiştir. Weina ve arkadaşları [18], dar koridorlardaki insan kalabalıklarının yüksek bir konumdan çekilen video görüntülerini analiz ederek insanların %50'den fazlasının 2 veya daha fazla kişiden oluşan bir gruba dahil olduklarını tespit etmişlerdir.

Bu bilgilerden yola çıkarak bu çalışmada gerçek zamanlı ambiyans kalabalıkları oluşturmak için bireylerin, 1-5 kişilik küçük gruplar halinde ve gruptaki birey sayısına



Şekil 1. Tek başlarına (sol) ve gruplar halinde (sağ) bulunan bireyler (Individuals alone (left) and in groups (right))

göre gerçek hayattakine benzer bir formasyona göre, birlikte hareket ettiği (Şekil 1) yeni bir yönlendirmesiz benzetim modeli önerilmektedir. Bu yeni yöntemde her bir birey için ayrı ayrı çarpışmasız ve doğrusal gezinmeler oluşturmak yerine her bir grup için ortak bir gezinme oluşturularak grup içerisindeki tüm bireylerin buna göre hareket etmeleri sağlanmıştır. Önerilen yöntem, farklı birey sayılarına sahip gruplar oluşturmayı, her büyüklükteki grup sayısının kalabalık içinde görülme sıklığına göre ayarlanmasını ve grup içindeki bireylerin formasyonlarının grup büyüklüğüne göre gerçek hatakinine benzer biçimde belirlenebilmesini sağlayacak yeniliklere sahiptir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada önerilen, küçük gruplar halinde hareket eden insan kalabalıklarının gerçek zamanlı benzetim yöntemi üç alt başlık altında incelenecektir.

3.1. Grup Büyüklükleri ve Sıklıklarının Belirlenmesi (Determining Group Sizes and Frequencies)

Literatür özetinde detayları verilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere insan kalabalıkları genellikle tek başına hareket eden bireyler ile 2-5 arası bireyden oluşan küçük gruplardan oluşmaktadır [15-18]. Gruplar içerecek kalabalıklar oluşturmanın ilk adımı da bu grupların minimum ve maksimum birey sayıları ile her bir grubun kalabalık içerisinde bulunma sıklığına karar verilmesidir. İncelenen çalışmalar dikkate alındığında kalabalıklardaki bireylerin yarısına yakınının hiçbir gruba ait olmayarak tek başına olan bireylerden oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada grupların minimum birey sayısı 1 olarak alınarak tek başına hareket eden her birey bir kişilik bir grup olarak kabul edilmektedir. Diğer taraftan literatür ile paralel şekilde grupların maksimum 5 bireyden oluşabilmesi sağlanacaktır. Burada belirtilen

minimum ve maksimum birey sayısı değerleri literatüre bağlı kalınarak bu çalışma için bu şekilde seçilmiş olup farklı ihtiyaçlara göre özelleştirilmeleri mümkündür.

1 ila 5 kişiden oluşacak gruplarının kalabalık içerisinde hangi sıklıkta bulunacağı da yine literatürdeki çalışmalardan elde edilecek bilgiler baz alınarak belirlenebilir. Çizelge 1’de incelenen literatür çalışmalarında 1-5 kişilik grupların hangi sıklıkla bulduklarına dair derlenen veriler paylaşılmaktadır. Bu çizelgede yer alan bazı değerler ilgili çalışmalarda açıkça belirtilen değerleri aynen yansıtmaktayken bazıları farklı metriklerden dönüştürülerek veya görsel grafiklerden yorumlanarak yaklaşık olarak hesaplanmıştır. İlgili çalışmalarda kullanılan asıl veriler erişilebilir olmadığı için bunları kullanarak gerçek değerler hesaplamak mümkün olmamış olup derlenen bu bilgiler asıl veriler kullanılarak hesaplanabilecek gerçek değerlerden çok az da olsa farklılık gösterebilir. Ancak buradaki sonuçlar tüm kalabalıklar için genel doğrular olmayıp fikir sağlamak amacıyla kullanılacağı için bu durum herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Çizelge 1’deki bilgiler incelendiğinde farklı zaman ve mekanlarda kaydedilmiş kalabalık verilerinin farklı grup sıklıklarına sahip oldukları görülmektedir. Oldukça olağan olan bu durum gruplarla ilgili genel geçer bir sıklık bilgisi elde etmeyi mümkün kılmamakla birlikte bu çizelge benzetimi oluşturulması hedeflenen kalabalık türüne en yakın kalabalık verisi baz alınarak grup sıklıklarını oluşturmak üzere bir rehber olarak kullanılabilir. Diğer taraftan çizelgedeki kalabalıkların genelinde grupların birey sayıları arttıkça ortak bir biçimde görülme sıklıklarının da azaldığı gözlemlenmektedir. Bu çizelgedeki verilerden bağımsız bir biçimde istenen grup sıklığı değerleriyle başlanarak hedeflenen kalabalık özelliklerine ulaşılmasını sağlamak üzere bu değerlerin ince ayarlanarak değiştirilmesi de mümkündür. Bu çalışmada 1 ila 5 kişilik grupların

Çizelge 1. Literatürdeki çalışmalardan derlenen grup sıklıkları (Group frequencies compiled from studies in the literature)

Çalışma	Veri Kaynağı	Gruptaki Birey Sayısı				
		1	2	3	4	5+
[14]	Yayalar, oyun bahçeleri, alışveriş mağazaları, halka açık alanlar	65,54	25,47	6,94	1,54	0,51
[15]	Yoğun kavşak	26,0	39,96	13,32	11,84	8,88
[16]	Tren istasyonu	64,82	27,25	4,91	1,84	1,18
	Alışveriş merkezi	52,53	38,21	7,43	1,19	0,55
	Üniversite kampüsü	72,95	18,58	6,88	1,03	0,55
	Cadde	56,46	36,62	5,09	1,53	0,31
[17]	Seyrek yaya yolu	65,0	27,0	5,0	2,0	1,0
	Yoğun yaya yolu	48,0	43,0	7,0	1,5	0,5
[18]	Öğrenci birliği binası 1	67,0	27,0	4,0	1,0	1,0
	Öğrenci birliği binası 2	60,0	25,0	12,0	2,0	1,0
Ortalama	Her sütundaki değerlerin ortalaması	57,83	30,81	7,26	2,55	1,55

sıklıkları belirlenirken her bir grup için Çizelge 1’de yer alan değerlerin sütun ortalaması hesaplanarak literatürde ele alınan kalabalıkların genel bir ortalamasını yansıtmak üzere kullanılmaktadır.

3.2. Gruplar Halinde Bireylerin Oluşturması (Creation of Individuals as Groups)

Benzetim boyunca bireylerin oluşturulması için önceki bölümde açıklanan grup büyüklükleri ve sıklıkları kullanılmaktadır. Bu çalışmada tek başına olan bireyler de bir kişilik gruplar olarak kabul edildiği için bu süreç grup oluşturma süreci de denilebilir. Buna göre her grup oluşturma sürecinde öncelikle hangi büyüklükte bir grup oluşturulacağına karar verilmesi gerekir. Bu amaçla benzetim boyunca anlık olarak her büyüklükteki gruptan kaç adet bulunduğu bilgisi kaydedilmekte ve kullanılmaktadır. Hiçbir bireyden oluşmayan boş bir benzetim alanı ile başlanacağı varsayıldığında her büyüklükteki grubun başlangıçtaki sayıları sıfır olacaktır. Benzetim süresince yeni bir grup oluşturulduğunda ilgili büyüklükteki grubun sayısı bir artırılarak, bir gruptaki tüm bireyler benzetim alanının dışına çıkarak yok olduğunda ise ilgili büyüklükteki grubun sayısı bir azaltılarak güncellenmektedir.

Yeni bir grup oluşturma sürecinde tüm grupların anlık grup sıklıkları (f_i) hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada en az birey (s_{min}) içerenden en çok birey (s_{max}) içerene kadar tüm grupların anlık grup sayıları (c_i) toplanarak anlık toplam grup sayısı (c_T) hesaplanmaktadır (Eşitlik 1). Daha sonra her büyüklükteki grup için anlık grup sayıları, anlık toplam grup sayısına bölünmektedir (Eşitlik 2).

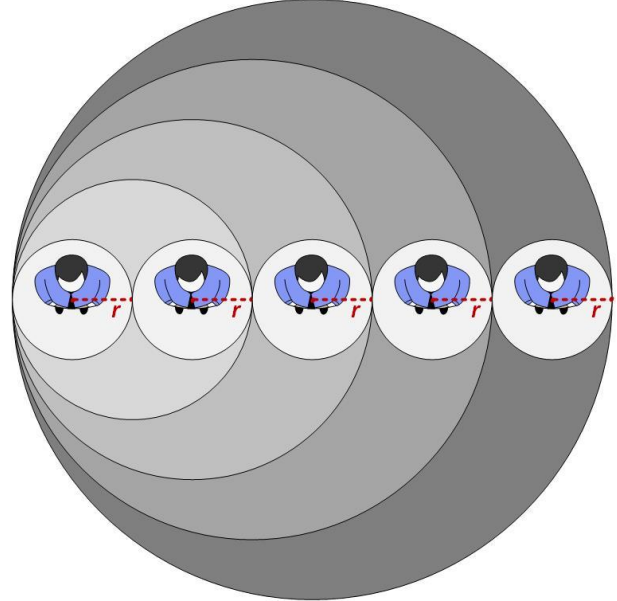
$$c_T = \sum_{k=s_{min}}^{s_{max}} c_k \quad (1)$$

$$f_i = \frac{c_i}{c_T} \quad (2)$$

Hesaplanan anlık grup sıklıkları en küçük gruptan başlanarak en büyük gruba doğru benzetim için seçilen grup sıklıkları ile karşılaştırılarak benzetimde öncelikli olarak hangi büyüklükte grubun oluşturulması gerektiğine karar verilmektedir. Bu karşılaştırmalarda; bir grubun anlık sıklığı, benzetimde o grup için sıklık değerine eşit ya da daha büyükse, o grup için gerekli sıklık gereksinimi anlık olarak karşılanıyor olacaktır. Bu durumda o büyüklükte yeni bir grup oluşturmak yerine sırayla daha büyük gruplar için aynı karşılaştırmalar yapılarak istenen sıklık değerlerini karşılamak üzere hangi büyüklükte bir gruba ihtiyaç varsa o büyüklükte bir grup oluşturulması kararı alınmaktadır. Eğer anlık olarak tüm gruplar için benzetimde seçilen sıklık değerleri karşılanıyorsa en küçük gruptan yeni bir tane daha oluşturulması kararı alınmaktadır. Böylelikle benzetim boyunca en küçük gruptan en büyük gruba doğru sıklık dengesinin sağlanmaya ve korunmaya çalışıldığı bir strateji izlenmektedir. Burada tanımlanan bu strateji önceki bölümde vurgulanan grup büyüklüğü ve grup sıklığı arasındaki ters orantıya paralel olarak öncelikle en sık görülen en küçük grupların oluşturulması şeklinde kurgulanmıştır. Daha önce de ifade edildiği üzere benzetimlerde ihtiyaca göre farklı grup büyüklükleri ile

farklı grup sıklıkları kullanmanın yanı sıra burada anlatılan grup oluşturma stratejisinde de değişiklikler yapılması mümkündür.

Yeni oluşturulacak grup büyüklüğüne karar verildikten sonra bu grubun oluşturulması amacıyla grupta yer alacak bireylerin her biri için benzetim alanındaki başlangıç noktaları, bitiş noktaları ve hareket hızlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yöntemden esinlenilerek farklı büyüklüklerde gruplar oluşturmayı sağlayacak yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yeni yöntemin en önemli farkı her birey için ayrı ayrı başlangıç ve bitiş noktaları seçerek bunlar arasında doğrusal ve çarpışmasız gezinmeler belirlemeye çalışmak yerine yalnızca gruplar için bu işlemleri gerçekleştirmek ve grupta yer alan bireylerin her biri için bu bilgileri ortak olarak kullanmaktır. Gruplar için, doğrusal ve çarpışmasız gezinme parçalarının uç uca eklenmesi yöntemi [13] yerine, tek parçadan oluşan doğrusal ve çarpışmasız bir gezinme yönteminin [12] uygulanmasının temel nedeni ise; grubun hareketini belirleyecek gezinme parçaları arasında geçiş yaparken grubun merkez noktası etrafında dönerek doğrultu değiştirmek durumunda kalacak olan gruplarda bulunan bireylerin, kendi merkez noktaları etrafında dönerek doğrultu değiştirmek yerine formasyon merkezi etrafında aniden dönerek/kayarak gerçek dışı görünecek olmasıdır.



Şekil 2. Grupları temsil eden diskler (Disks representing groups)

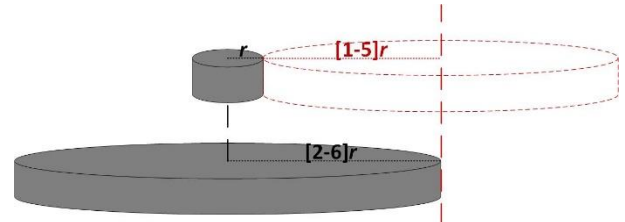
Gruplar halinde hareket eden bireyler oluşturabilmek için öncelikle yöntemin bireyleri temsil etme biçiminin değiştirilmesi gerekmektedir. Var olan yöntemde 2 boyutlu benzetim düzleminde yer alan her birey aynı sabit yarıçapa (r) sahip bir disk ile ifade edilmektedir. Geliştirilen yöntemde gruplar için de benzer bir mantık kullanılmaktadır. Ancak bu yeni yöntemde grupları temsil eden disklerin grupta yer alan ve birlikte hareket eden tüm bireyleri içerisine alacak kadar geniş olması

gerekmektedir. Bu nedenle grupları temsil eden disklerin yarıçapları grupta yer alan birey sayısı ile doğru orantılı olarak ayarlanmaktadır (Şekil 2). Buradaki temel mantık gruptaki tüm bireylerin yan yana dizilerek yürüyebilecekleri kadar geniş bir disk oluşturmaktır. Her ne kadar grupları oluşturan bireyler her zaman yan yana sıralı bir biçimde yürümek zorunda olmasa da bu şekilde yan yana yürümelerine olanak sağlayacak bir yarıçap belirlemek daha sonra bireylerin grup içerisinde istenen formasyonda dizilerek hareket etmeleri için yeterli alan oluşturmaktadır.

Grup sıklıklarına göre hangi büyüklükte bir grup oluşturulacağına karar verildikten sonra bu büyüklükte bir grup için öncelikle benzetim alanında bir başlangıç noktasının belirlenmesi gerekmektedir. Kalabalık benzetimlerinde bireylerin ya da bunların gruplarının benzetim alanının ortasında birdenbire ortaya çıkması veya yok olması çok normal karşılanmayacağı için başlangıç ve bitiş noktaları genellikle benzetim alanını çevreleyen kenarlar üzerinde olacak şekilde ayarlanmaktadır. Böylelikle bireyler çoğu zaman kameranın görüntü alanının dışında kalan noktalarda oluşturularak benzetimin olağan akışı dahilinde hareket ederek kameranın görüş alanına girip çıkabilmektedirler. Buradan hareketle yeni oluşturulacak gruplar için başlangıç noktaları olarak, benzetim alanının kenarlarından bir tanesi rastgele bir şekilde belirlenerek bu kenar üzerinde seçilecek rastgele bir noktanın kullanılması uygun olacaktır. Bu yöntemle rastgele bir başlangıç noktası belirlendikten sonra benzetim alanı üzerinde yeni oluşturulacak grubu temsil eden diskin bu noktayı merkez kabul ederek kaplayacağı alan içerisinde başka hiçbir bireyin bulunmuyor olması gerekmektedir. Bunu test etmek üzere basitçe benzetimde bu noktaya yakın bulunan bireylerden herhangi birinin anlık konumunun bu noktaya, yeni oluşturulacak grubun yarıçapı ile kendi yarıçapının toplamından daha yakın olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eğer yeni grubun disk alanını ihlal eden herhangi bir birey yoksa grup oluşturma sürecine devam edilir. Aksi burumda başka bir rastgele başlangıç noktası seçilerek aynı kontroller tekrarlanmaktadır.

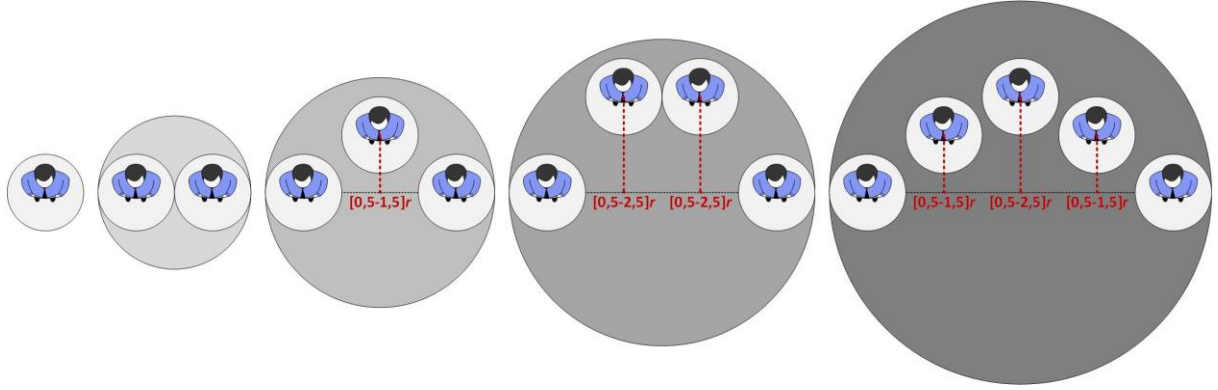
Kontrollerden geçen bir başlangıç noktası belirlendikten sonra Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yöntemde olduğu gibi bu noktadan benzetim alanının karşı kenarına doğru tüm kenarı görececek şekilde bakan bir kamera oluşturmaktadır. Daha sonra kameranın görüş piramidinin (view frustum) yüksekliği ve eğimi başlangıç noktasından karşı kenara ulaşmak için gereken minimum ve maksimum seyahat süreleri temel alınarak aynı şekilde hesaplanmaktadır. Ekran dışı görüntü oluşturma (offscreen rendering) üzere GPU üzerinde harici bir çerçeve arabelleği nesnesi (framebuffer object - FBO) oluşturularak görüntü piksel verisinin buraya yazılması sağlanmaktadır. Önerilen yöntemin yenilikçi bölümleri ön planda tutularak anlatımı sadeleştirmek adına burada özü açıklanan kamera ve FBO oluşturma sürecinin detayları için var olan benzer çalışmaya [12] başvurulabilir.

Kamera ve FBO ayarlama işlemlerinden sonra o anda benzetimde bulunan tüm bireylerin uzay-zamansal görüntüsü oluşturulmaktadır. Mevcut yöntemde yeni eklenecek bireyi uzay-zamanda r yarıçaplı silindirik bir tüp yerine yalnızca düz bir çizgi olarak ifade edebilmek üzere benzetimde yer alan bireylerin yarıçapları (r), yeni bireyin yarıçapı (r) da eklenerek iki katına ($2r$) çıkarılmaktadır. Sunulan yeni yöntemde r yarıçaplı bireyler yerine içerdiği birey sayısına göre farklı yarıçap değerlerine sahip gruplar oluşturulacaktır. Bu nedenle benzetimdeki bireylerin yarıçaplarına (r), yeni oluşturulacak grubun yarıçap değeri ($[1-5]r$) eklenerek mevcut bireyler, uzay-zamanda $[2-6]r$ arasında yarıçapa sahip silindirik tüpler olarak ifade edilecektir. Böylelikle önerilen yöntemde de yeni oluşturulacak grubu uzay-zamanda yalnızca düz bir çizgi olarak ifade edebilmek mümkün olmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Benzetimdeki mevcut bireylerin ölçeklendirilmesi (Scaling of existing individuals in the simulation)

Benzetimde yer alan bütün bireylere karşılık gelen silindirik tüplerin yarıçapının yeni oluşturulacak grup büyüklüğüne göre ölçeklendirilmesinden sonra bu tüplerin her biri ait olduğu bireyin bulunduğu konumdan bu bireyin bitiş pozisyonuna doğru, ilgili bireyin hızı ile ters orantılı eğime sahip olacak şekilde yatırılmaktadır. Sonrasında ise benzetimdeki tüm bireylerin siyah renkli tüplerini içeren uzay-zamanın, daha önce ayarlanan beyaz arka plana sahip kameraya göre ekran dışı görüntüsü oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu görüntü, Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yöntemde benzer şekilde ardışık iki GPU tabanlı paralel işlemden geçirilmek suretiyle kamera konumundan karşı kenara kadar uzanarak yeni oluşturulacak grup için uygun bir bitiş pozisyonu ve hıza karşılık gelecek beyaz pikseller taranmaktadır. Bu amaçla beyaz piksellerin her birini kontrol etmek yerine yalnızca bitişik beyaz piksel kümelerinden birinin merkezi kullanılmaktadır. Bu doğrultuda en az veya en fazla sayıda beyaz piksel içeren, en kısa veya en uzun sürede karşı kenara ulaşmayı sağlayan beyaz piksellerden biri seçilebileceği gibi başka bir seçim yaklaşımı kullanılması ya da tamamen rastgele seçim yapılması da mümkün olmakla birlikte mevcut yöntemde [12] yapılan testlerde en fazla birey sayısına ulaşmayı sağlayan en büyük beyaz piksel kümesinin merkezini kullanmak yerinde olacaktır. Oluşturulan görüntüde hiçbir beyaz piksel bulunamaması durumunda ise tüm siyah pikseller benzetimde mevcut olan bireyler ile çarpışmalara neden olacağı için ilgili grup için yeni bir başlangıç pozisyonu seçilerek tüm bu işlemlerin tekrarlanması gerekmektedir.



Şekil 4. Grup büyüklüğüne göre grup içi formasyonların belirlenmesi (Determination of intra-group formations according to group size)

Yeni oluşturulacak grup için başarılı bir biçimde başlangıç pozisyonu, bitiş pozisyonu ve hareket hızı belirlendikten sonra bu bilgilerin grubu oluşturacak bireyler tarafından ortak olarak paylaşılması gerekmektedir. Gruptaki tüm bireyler grup halinde kalabilmek için aynı yöne doğru ve aynı hızla ilerlemek durumundadır. Dolayısıyla grup için belirlenen hareket yönü ve hareket hızı bilgisi (hız vektörü) gruptaki tüm bireyler için aynı olacaktır. Diğer taraftan gruptaki tüm bireylerin grup için belirlenen aynı başlangıç ve bitiş pozisyonlarını kullanmaları mümkün olmayabilir. Özellikle birden fazla bireyden oluşan gruplarda tüm bireylerin benzetim alanında aynı başlangıç konumunda benzetime katılıp, aynı yön ve hızda hareket etmeleri sonucu aynı bitiş konumunda benzetimden ayrılması, benzetim boyunca bu bireylere karşılık gelen modellerin içe içe geçmesi gibi istenmeyen bir sonuç doğuracaktır. Bu nedenle grup içerisinde yer alan bireylerin grup halinde aynı hız vektörü ile hareket edebilecekleri bir formasyona sahip olmaları gerekmektedir.

Moussaïd ve arkadaşları [17], düşük ve yüksek yoğunluklu insan kalabalıklarının video kayıtlarını incelediklerinde; düşük yoğunluklu kalabalıklarda grup üyelerinin hareket yönüne dik bir çizgi oluşturacak şekilde yan yana yürüme eğiliminde olduklarını, kalabalık yoğunluğu arttıkça bireylerin doğrusal formasyonlarının eğilerek V veya U şeklinde bir diziliş desenine dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra grup için formasyonun grup büyüklüğüne bağlı olarak değiştiğini; 2 kişilik gruplardaki bireylerin yan yana yürüme eğilimi gösterdiklerini, 3 kişilik gruplarda gruptaki bireylerin birbirlerinin görerek iletişim ve etkileşimlerini artırmak üzere ortadaki bireyin biraz daha geriden gelerek V şekilli formasyonu oluştururken, 4 kişilik gruplarda ortadaki iki bireyin daha geriden gelerek U şekilli formasyonu oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

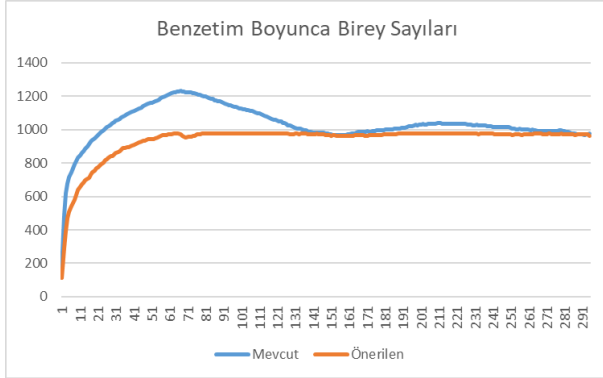
Grup bilgileri belirlendikten sonra grupta yer alacak bireyler için formasyon oluşturulurken literatürde yer alan bu bilgiler dikkate alınmıştır. Buna göre; grup için belirlenen başlangıç pozisyonu grubun merkezi ile çakışık olacak şekilde ve gruptaki tüm bireylerin hareket yönü ortak bir biçimde grup için belirlenen hız vektörü doğrultusu ile paralel olacak şekilde gruptaki her bir

birey için grubun merkez noktasına göre başlangıç pozisyonları belirlenmektedir. 1 kişilik gruplarda bireyin doğrudan grup için belirlenen başlangıç pozisyonunda olması sağlanmaktadır. 2 kişilik gruplarda bireylerin, grup merkezi tam ortalarında kalarak yan yana yürüyecek şekilde hareket doğrultusuna dik bir çizgi formasyonuna göre başlangıç pozisyonları almaları sağlanmaktadır. 3, 4 ve 5 kişilik gruplarda da benzer biçimde önce bireylerin yan yana yürüyecek şekilde hareket doğrultusuna dik bir çizgi formasyonuna göre başlangıç pozisyonları almaları sağlanmaktadır. Ancak sonrasında Moussaïd ve arkadaşlarının [17] ifade ettiği bulgular doğrultusunda grubun ortasında kalan bireylerin başlangıç pozisyonları grubun hareket doğrultusuna göre bir miktar geriye doğru çekilerek V veya U şeklinde bir diziliş formasyonu oluşturulmaktadır. 3 kişilik gruplarda yalnızca ortadaki (ikinci) birey $[0,5-1,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilirken, 4 kişilik gruplarda ortada kalan iki (ikinci ve üçüncü) birey de $[1,5-2,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilmektedir. 5 kişilik gruplarda ise en ortadaki (üçüncü) birey $[1,5-2,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilirken onu hemen yanındaki (ikinci ve dördüncü) bireyler $[0,5-1,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilmektedir (Şekil 4). Grup için belirlenen başlangıç pozisyonuna göre gruptaki bireylerin başlangıç pozisyonlarını ve dolayısıyla hareket formasyonlarını belirleyen bu yaklaşım aynı mantıkla grup için belirlenen bitiş pozisyonunu kullanarak gruptaki bireylerin bitiş pozisyonlarının hesaplanmasında da kullanılmaktadır.

Benzetim boyunca grup sıklık bilgilerine göre oluşturulmasına karar verilen gruplar için gerekli sayıda birey, burada anlatılan biçimde oluşturularak benzetime dahil edilmektedir. Benzetime dahil olan her birey bu aşamadan sonra bir daha grup bilgilerine ihtiyaç duymaksızın benzetimin her adımında bağımsız bir biçimde kendi anlık pozisyonunu, kendi hız vektörünü kullanarak basit ve hızlı bir biçimde güncellemektedir. Benzetim ilerledikçe kendi bitiş pozisyonlarına ulaşan bireyler ise benzetimden çıkarılarak güncellenen grup sıklıkları doğrultusunda yeni grupların (bireylerin) benzetime dahil olması sağlanmaktadır.

4. DENEYLER VE BULGULAR (EXPERIMENTS AND FINDINGS)

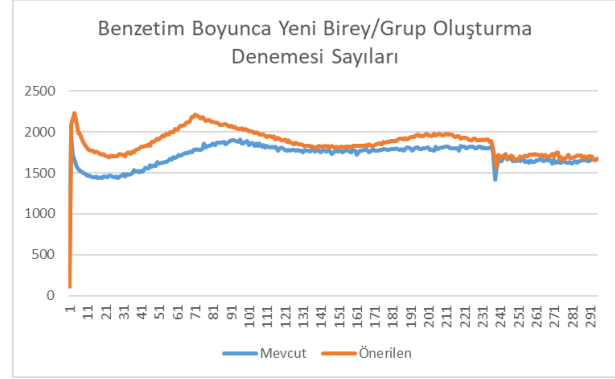
Bu çalışmada geliştirilen yeni yöntemin değerlendirilmesi için literatürde mevcut benzer yöntem [12] ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu amaçla bu iki yöntemi kullanan benzetimler oluşturulup çalıştırılarak yöntemlerin her birinin; benzetim boyunca ulaşabildikleri maksimum ve ortalama birey sayıları ile gerçekleştirdikleri yeni birey/grup oluşturma denemesi sayıları, bir birey veya grup bir oluşturmak işlemi için ortalama zaman maliyeti, bir bireyi oluşturmak için ortalama zaman maliyeti ve bir bireyi hareket ettirmek için ortalama zaman maliyeti metrikleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Her iki benzetim yöntemi de C++ ve OpenGL kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm testler Intel i7 4720HQ 2.6 GHz CPU, 16 GB bellek ve Nvidia GTX960M GPU içeren bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm testlerde birey yarıçapı (r) 0,5m olarak, bireylerin yürüme hızı aralıkları [1,0-2,0]m/s olarak, benzetim alanının büyüklüğü 128m x 128m olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemde de benzer olan GPU tabanlı doğrusal ve çarpışmasız gezinge belirleme işlemlerinde kullanılan FBO bellek alanlarının ölçeklendirme katsayısı 1,0 olarak seçilmiştir. Tüm testler, benzetim alanı başlangıçta hiçbir birey içermeyecek şekilde başlayacaktır. 5 dakika olarak ayarlanan test süresi boyunca bu alan olabildiğince fazla sayıda bireyle doldurulmaya çalışılacaktır. Bu doğrultuda her iki yöntemde de benzetimin her bir adımında birey oluşturmak için 25ms ayrılmıştır.



Şekil 5. Benzetim boyunca ölçülen birey sayıları (Number of individuals measured throughout the simulation)

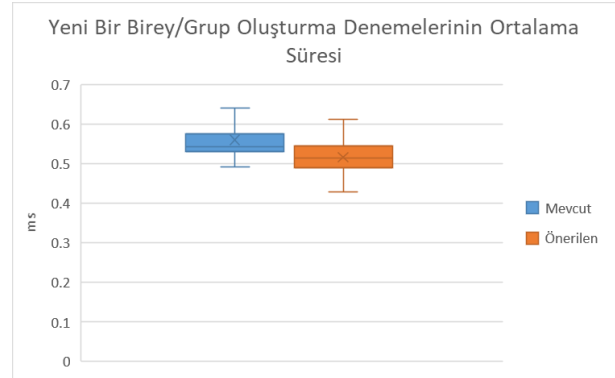
Yapılan testler sonucunda her iki yöntemin benzetim boyunca sahip oldukları birey sayıları Şekil 5'te gösterilmektedir. Burada görülebileceği üzere mevcut yöntem [12] benzetimin başlarında daha fazla sayıda bireyi daha çabuk bir biçimde oluşturarak önerilen yöntemden daha önce maksimum birey sayısına ulaşabilmektedir. Benzetimdeki bireyleri daha ince silindirik tüpler olarak ifade eden mevcut yöntem bu sayede, uzay-zamanda gruplar oluşturmak üzere daha kalın silindirik tüplere ihtiyaç duyan yeni yöntemden daha fazla olası çözüm bulabilme şansına sahip olmaktadır. Bunun sonucu olarak mevcut yöntem benzetim boyunca ortalama 1034 ve maksimum 1231

birey sayısına ulaşabilirken önerilen yöntem ortalama 937 (%-9,4) ve maksimum 978 (%-20,6) bireye ulaşabilmektedir. Bununla birlikte özellikle benzetimlerin istikrarlı birey sayısı doygunluğuna ulaştıkları bölüm olan ikinci yarısında her iki yöntemin de birbirine oldukça yakın birey sayılarına (kalabalık yoğunluklarına) sahip benzetimler sürdürdükleri dikkat çekmektedir. Buradan hareketle yeni geliştirilen grup bazlı yöntemin mevcut yöntemle yakın yoğunluklarda ve grup halinde hareket eden bireylerden oluşan kalabalık benzetimleri sağlayabildiği söylenebilmektedir.



Şekil 6. Benzetim boyunca yeni birey/grup oluşturma denemesi sayıları (Number of attempts to create new individuals/groups measured throughout the simulation)

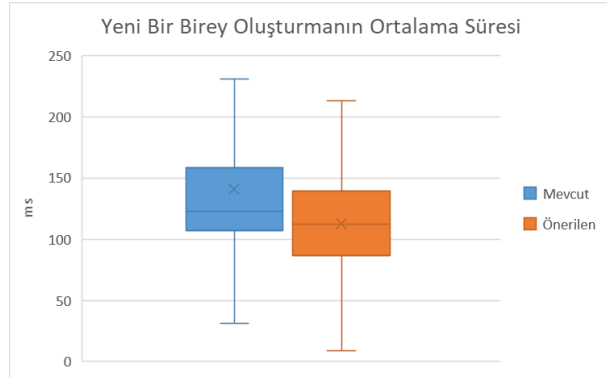
Karşılaştırılan yöntemlerin benzetim boyunca her saniyede gerçekleştirdikleri yeni birey/grup oluşturma denemelerinin sayıları Şekil 6'da gösterilmektedir. Buna göre önerilen yöntem her bir saniye GPU kullanarak ortalama 1867 grup oluşturma denemesi yapabilirken mevcut yöntem ise her saniye GPU üzerinde ortalama 1711 birey oluşturma denemesi yapabilmektedir. Oransal olarak incelendiğinde ise yeni yöntemin mevcut yöntemle kıyasla ortalama olarak %9,1, maksimum olarak ise %14,6 oranlarında daha fazla oluşturma denemesi yapabildiği tespit edilmiştir. Bu durumun temel nedeni ise yöntemlerin her deneme için harcadıkları sürelerin farklı olmasıdır.



Şekil 7. Yeni bir birey/grup oluşturma denemelerinin ortalama süresi (Average time of attempts to create a new individual/group)

Geliştirilen grup bazlı yöntemin GPU kullanarak bir grup oluşturma denemesi yapması için gereken ortalama süre 0,52ms iken mevcut birey bazlı yöntemin GPU kullanarak tek bir birey oluşturmak üzere deneme yapması için gereken ortalama süre 0,56ms olarak ölçülmüştür (Şekil 7). Her iki yöntemin GPU tabanlı benzer oluşturma yaklaşımları kullanıyor olmasına karşın önerilen yöntemin oluşturma denemesi yapmak üzere mevcut yönteme göre ortalama %7,8 daha az süre harcadığı görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak önerilen yöntemin benzetim boyunca mevcut yönteme görece daha düşük birey sayılarına ulaşabilmesi nedeniyle bu bireylerin uzay-zamansal görüntülerinin oluşturulması için daha az süre harcamak zorunda kaldığı düşünülmektedir.

Diğer taraftan her iki yöntemde de gerçekleştirilen her bir GPU bazlı oluşturma denemesinin doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge hesaplayarak başarılı olma garantisi bulunmamakta olup bu denemelerin az bir bölümü yeni bir birey veya grup oluşturulabilmesine olanak sağlayabilmektedir. Bu nedenle benzetim boyunca her iki yöntemde; benzetim adımı içerisinde gerçekleştirilen başarılı veya başarısız tüm oluşturma denemeleri için geçen toplam süre, ilgili benzetim adımı sonucunda oluşturulan birey sayısına bölünerek benzetim genelinde bu değerlerin ortalamalarının hesaplanmasıyla, test edilen yöntemlerin bir bireyi başarılı bir biçimde oluşturarak benzetime dahil edebilmesi için gereken ortalama süreler elde edilmiştir (Şekil 8).

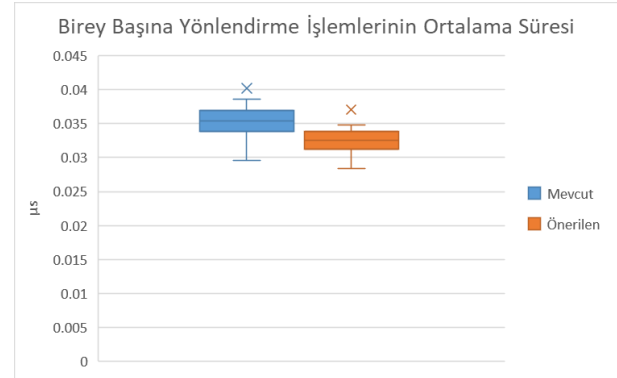


Şekil 8. Yeni bir birey oluşturma ortalama süresi (Average time to create a new individual)

Burada vurgulanması gereken önemli bir husus, önerilen grup bazlı yöntemde, grup oluşturma denemeleri için geçen sürelerin grup içerisinde oluşturulan toplam birey sayılarına bölünerek geliştirilen yeni yöntem için de birey başına ortalama oluşturma sürelerinin hesaplanmış olduğudur. Böylelikle sözü edilen bu sürelerin her iki yöntem için de birey başına hesaplanması ve karşılaştırılması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mevcut yöntem tek birey için doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge hesaplayarak bu bireyi benzetime dahil edebilmek üzere ortalama 140,79ms süre harcamaktadır. Yeni geliştirilen grup bazlı yöntem ise grup halinde hareket edebilen her bir bireyi oluşturmak için ortalama 112,44ms süreye ihtiyaç duymaktadır. Araştırmanın

başında oluşturulan hipoteze paralel olarak önerilen yöntem, grup içerisindeki her bir birey için ayrı ayrı GPU bazlı gezinge hesaplaması yapmak yerine, grup için ortak bir gezinge hesaplayıp tüm grup üyelerinin aynı hesaplamaları kullanmasını sağladığı için mevcut yönteme kıyasla %20,1 oranında daha düşük ortalama birey oluşturma süresi ile benzetim gerçekleştirebilmektedir.

Son olarak yöntemlerin benzetim boyunca bir bireyin yönlendirme işlemleri için ihtiyaç duydukları ortalama süreler incelenmiştir. Şekil 9'da verilen sonuçlara göre önerilen yöntem bir bireyi kendisine tahsis edilen doğrusal ve çarpışmasız gezinge üzerinde ilerletebilmek için ortalama 0,037µs süreye ihtiyaç duyarken mevcut yöntem ise aynı amaçla bir birey için ortalama 0,040µs süre harcamaktadır. Her iki yöntem de benzetim boyunca bireylerin, olası çarpışmalardan kaçınarak hedeflerine doğru gezinimlerini sağlamak üzere maliyetli hesaplamalar yapmak yerine, benzetime dahil olurken kendilerine tahsis edilen ve çarpışmasız olduğu garanti edilen hız vektörleri uyarınca benzetimin her adımında basit ve hızlı bir biçimde sadece pozisyonlarını güncellemektedir. Bu nedenle bireylerin yönlendirme işlemleri için harcadıkları süre mikro saniyeler düzeyinde düşük kalabilmektedir. Buradaki sonuçlara göre yeni geliştirilen yöntem, bireylerin her birinin yönlendirme işlemleri için oransal olarak %7,8 daha az zaman kullanmakla birlikte mikro saniyeler seviyesinde sürelerden söz edildiğinde bu farkın benzetime etkisi de sınırlı düzeyde olacaktır.



Şekil 9. Birey başına gerçekleştirilen yönlendirme işlemlerinin ortalama süresi (Average time of steering operations performed per individual)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 1-5 kişilik küçük gruplar halinde yürüyerek hareket eden sanal insan kalabalıklarının gerçek zamanlı benzetimi için geliştirilen yeni bir yönlendirmesiz benzetim modeli sunulmuştur. Geliştirilen bu yeni yöntemde, kalabalık içerisindeki sıklıkları gerçek insan kalabalıklarının gözlemlenmesiyle derlenen ve 1 ile 5 arasında bireyden oluşabilen her bir grup için, GPU yardımıyla benzetim alanı üzere bir başlangıç noktası, bir bitiş noktası ve bir yürüme hızının birleşiminden oluşan doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge belirlenmektedir. Buna göre grupların kendileri için

belirlenen gezinenin belirttiği başlangıç pozisyonundan başlayıp, yine bu gezinenin belirttiği hız vektörü (başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru olan doğrultu ve yürüme hızı) uyarınca doğrusal biçimde yürüyerek hareket etmeleri durumunda bitiş noktasına kadar başka hiçbir birey veya engel ile çarpışmayacakları garanti edilmektedir. Grup içerisindeki bireylerin grup büyüklüğüne göre gerçek hayattakine benzer formasyonlara göre yan yana doğrusal, V veya U desenlerinde dizilimi sağlanarak grup için belirlenen hız vektörünü ortaklaşa kullanan bu bireyin birbirine paralel doğrultularda bitiş noktalarına doğru ilerlemeleri sağlanmaktadır. Böylelikle kendi türetilmiş çarpışmasız gezinesine sahip olan her bir bireyin çarpışma tespiti ve çarpışmadan kaçınma gibi maliyetli yönlendirme hesaplamalarına gerek kalmadan benzetim alanı üzerinde küçük gruplar olarak gezinimi mümkün olmaktadır.

Yapılan deneylerde, önerilen yeni grup bazlı yöntemin, literatürde bulunan birey bazlı benzer yöntem [12] kıyasla; bir bireyi oluşturmak (birey için başlangıç noktası ile doğrusal ve çarpışmasız gezine belirlemek) üzere ortalama yaklaşık %20,1 daha kısa süre gerektirdiği, buna bağlı olarak oluşturma denemelerinin maliyetinin azaldığı (ortalama %-7,8) ve birim zamanda yapılabilen oluşturma denemesi sayısının (ortalama %9,1) arttığı, birey başına yönlendirme işlemleri için gereken sürenin benzer biçimde mikro saniyeler düzeyinde kaldığı ve benzetimdeki ortalama birey sayılarının istikrarlı doygunluk noktasına ulaşıldıktan sonra %-9,4 gibi bir farkla da olsa benzer yoğunluklara sahip bireyler oluşturmayı sağladığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında önerilen yöntemin, grupta yer alabilecek minimum ve maksimum birey sayıları, grup büyüklüklerine göre grupların kalabalıkta bulunma sıklıkları ve grup büyüklüklerine göre grubu oluşturan bireylerin grup içi diziliş formasyonlarının ihtiyaca göre özelleştirilerek sahnelerin arka planında küçük gruplar halinde yürüyen insan kalabalıkları ambiyansı oluşturmak üzere kullanılması mümkündür.

Gelecekteki çalışmalarda, önerilen yöntemin grup ve onları oluşturan bireyler için daha hızlı bir biçimde çarpışmasız gezine üretmesini ve böylelikle kalabalığı oluşturma maliyeti azaltılırken kalabalık yoğunluğunu artırmayı sağlayacak yöntemler üzerinde araştırma yapılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Öner BARUT: Çalışmanın tüm süreçlerini yürütmüş ve tüm işlemlerini gerçekleştirmiştir. / Conducted all the processes of the study and performed all the operations.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yang, S., Li, T., Gong, X., Peng, B., & Hu, J., "A review on crowd simulation and modeling", *Graphical Models*, 111: 101081, (2020)
- [2] Musse, S. R., Cassol, V. J., & Thalmann, D., "A history of crowd simulation: the past, evolution, and new perspectives", *The Visual Computer*, 37: 3077-3092, (2021)
- [3] Van Toll, W., & Pettré, J., "Algorithms for microscopic crowd simulation: Advancements in the 2010s", *Computer Graphics Forum*, 40: 731-754, (2021)
- [4] Pelechano, N., Allbeck, J. M., Kapadia, M., & Badler, N. I. "Simulating heterogeneous crowds with interactive behaviors", *A K Peters/CRC Press*, 9781315370071, New York, (2016)
- [5] Beacco, A., Pelechano, N., & Andújar, C., "A survey of real-time crowd rendering", *Computer Graphics Forum*, 35: 32-50, (2016)
- [6] Dobbyn, S., Hamill, J., O'Connor, K., & O'Sullivan, C., "Geopostors: a real-time geometry/impostor crowd rendering system", *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, Washington, 95-102, (2005)
- [7] Ahn, J., Oh, S., & Wohn, K., "Optimized motion simplification for crowd animation", *Computer Animation and Virtual Worlds*, 17: 155-165, (2006)
- [8] Toledo, L., De Gyves, O., & Rudomin, I., "Hierarchical level of detail for varied animated crowds", *The Visual Computer*, 30: 949-961, (2014)
- [9] Kulpa, R., Olivierxs, A. H., Ondřej, J., & Pettré, J., "Imperceptible relaxation of collision avoidance constraints in virtual crowds", *ACM Transactions on Graphics*, 30: 1-10, (2011)
- [10] Paris, S., Gerdelan, A., & O'Sullivan, C., "Ca-lod: Collision avoidance level of detail for scalable, controllable crowds", *2nd International Workshop on Motion in Games*, Zeist, 13-28, (2009)
- [11] Barut, Ö., Hacıömeroğlu, M., & Özcan, C., "Illusive crowd", *International Conference on Computer Animation and Social Agents*, Houston, 1-4, (2014)
- [12] Barut, O., & Hacıomeroglu, M., "Real-time collision-free linear trajectory generation on GPU for crowd simulations", *The Visual Computer*, 31: 843-852, (2015)
- [13] Barut, O., Hacıomeroglu, M., & Sezer, E. A., "Combining GPU-generated linear trajectory segments to create collision-free paths for real-time ambient crowds", *Graphical Models*, 99: 31-45, (2018)
- [14] James, J., "The distribution of free-forming small group size", *American Sociological Review*, 18: 569-570, (1953)
- [15] Aveni, A. F., "The not-so-lonely crowd: Friendship groups in collective behavior", *Sociometry*, 40: 96-99, (1977)
- [16] Singh, H., Arter, R., Dodd, L., Langston, P., Lester, E., & Drury, J., "Modelling subgroup behaviour in crowd dynamics DEM simulation", *Applied Mathematical Modelling*, 33: 4408-4423, (2009)

- [17] Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., & Theraulaz, G., "The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd Dynamics", *PLOS One*, 5: 1-7, (2010)
- [18] Ge, W., Collins, R. T., & Ruback, R. B., "Vision-based analysis of small groups in pedestrian crowds", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34: 1003-1016, (2012)
- [19] Kapadia, M., & Badler, N. I., "Navigation and steering for autonomous virtual humans", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4, 263-272, (2013)
- [20] Reynolds, C. W., "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model", *Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Anaheim, 25-34, (1987)
- [21] Reynolds, C. W., "Steering behaviors for autonomous characters", *Game Developers Conference*, California, 763-782, (1999)
- [22] Helbing, D., & Molnar, P., "Social force model for pedestrian Dynamics", *Physical review E*, 51: 4282-4286, (1995)
- [23] Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T., "Simulating dynamical features of escape panic", *Nature*, 407, 487-490, (2000)
- [24] Van den Berg, J., Lin, M., & Manocha, D., "Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, 1928-1935, (2008)
- [25] Van Den Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., & Manocha, D., "Reciprocal n-body collision avoidance", *International Symposium of Robotics Research*, Lucerne, 3-19, (2011)
- [26] Ondřej, J., Pettré, J., Olivier, A. H., & Donikian, S., "A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation", *ACM SIGGRAPH*, Los Angeles, 1-9, (2010)
- [27] Dutra, T. B., Marques, R., Cavalcante-Neto, J. B., Vidal, C. A., & Pettré, J., "Gradient-based steering for vision-based crowd simulation algorithms", *Computer Graphics Forum*, 36: 337-348, (2017)
- [28] Hughes, R. L., "A continuum theory for the flow of pedestrians", *Transportation Research Part B: Methodological*, 36: 507-535, (2002)
- [29] Treuille, A., Cooper, S., & Popović, Z., "Continuum crowds", *ACM Transactions on Graphics*, 25: 1160-1168, (2006)
- [30] Narain, R., Golas, A., Curtis, S., & Lin, M. C., "Aggregate dynamics for dense crowd simulation", *ACM SIGGRAPH Asia*, Yokohama, 1-8, (2009)
- [31] Cheney, S., "Flow tiles", *Symposium on Computer Animation*, Grenoble, 233-242, (2004)
- [32] Patil, S., Van Den Berg, J., Curtis, S., Lin, M. C., & Manocha, D., "Directing crowd simulations using navigation fields", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17: 244-254, (2010)

Kalabalık Benzetimlerinde Küçük Gruplar için GPU Tabanlı Çarpışmasız Doğrusal Gezinge Oluşturulması

Araştırma Makalesi / Research Article

Öner BARUT^{1*}

¹Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 23.12.2023 ; Kabul/Accepted : 04.01.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 31.01.2024)

ÖZ

Bilgisayar ortamında sanal kalabalıklar oluşturmak ve bunların davranışlarını taklit etmek için kullanılan kalabalık benzetimleri, sanal bir sahnenin arka planında bir kalabalık ambiyansı oluşturmak için de kullanılabilir. Arka planda bir kalabalık ambiyansı oluşturmak için de olsa bireylerin tek başlarına hareket etmeleri yerine gruplar halinde bulunması bu ambiyansı destekleyecek önemli bir unsurdur. Bu çalışmada, görülme sıklıkları gerçek insan kalabalıklarından derlenen 1-5 kişilik küçük gruplar halinde, gruptaki birey sayısına göre gerçek hayattakine benzer bir formasyonda yürüyerek birlikte hareket eden gerçek zamanlı sanal insan kalabalıklarının yönlendirmesiz bir benzetim modeli önerilmektedir. Bu yeni yöntemde her bir birey için ayrı ayrı çarpışmasız ve doğrusal gezinmeler oluşturmak yerine her bir grup için ortak bir gezinge oluşturularak grup içerisindeki tüm bireylerin belirlenen formasyonda buna göre hareket etmeleri sağlanmaktadır. Önerilen yöntem, farklı birey sayılarına sahip gruplar oluşturmayı, her büyüklükteki grup sayısının kalabalık içinde görülme sıklığına göre ayarlanmasını ve grup içindeki bireylerin formasyonlarının grup büyüklüğüne göre belirlenebilmesini sağlayacak yeniliklere sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kalabalık benzetimi, küçük gruplar, yönlendirmesiz, doğrusal çarpışmasız gezinge, ambiyans kalabalığı.

GPU-Based Collision-Free Linear Trajectory Generation for Small Groups in Crowd Simulations

ABSTRACT

Crowd simulations, which are used to create virtual crowds in the computer environment and imitate their behavior, can also be used to create a crowd ambience in the background of a virtual scene. Even if it is to create a crowd ambience in the background, the presence of individuals in groups rather than acting alone is an important element that will support this ambience. In this study, a steering-free simulation model of real-time virtual human crowds that move together in small groups of 1-5 people, whose frequency of occurrence is compiled from real human crowds, in a formation according to the number of individuals in the group similar to real life, is proposed. In this new method, instead of creating separate collision-free and linear trajectories for each individual, a common trajectory is created for each group and all individuals in the group are ensured to move accordingly in the determined formation. The proposed method has innovations that enable creating groups with different numbers of individuals, adjusting the number of groups of each size according to the frequency of occurrence in the crowd, and determining the formation of individuals within the group according to the group size.

Keywords: Crowd simulation, small groups, steering-free, linear collision-free trajectory, ambient crowd.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalabalık benzetimi (simülasyonu), çok sayıda bireyin hareketlerinin sanal ortamda taklit edilmesi olarak tanımlanmaktadır [1]. Kalabalık benzetimine konu olan bireyler yalnızca insanlar ile sınırlı olmayıp hayvanlar, araçlar, robotlar gibi çok farklı varlıkları da temsil edebilirler. Kuş veya balık gibi hayvan sürüleri, trafikte yol alan motorlu veya motorsuz taşıtlar, programlandıkları amaç doğrultusunda karada, suda veya havada hareket eden robotlar da kalabalık benzetimi ile bilgisayar ortamında modellenebilmektedir [1,2].

Bilim veya araştırma yönünden ele alındığında kalabalık benzetimi gerçek dünyada tekrarlanması pahalı veya tehlikeli olan senaryoları sanal ortamda çok daha uygun maliyetle ve gerçek dünya için tehlike oluşturmayacak

şekilde defalarca kez sergilemek için kullanılmaktadır. Örneğin; taktiksel savaş gibi askeri benzetimler, kavşak yönetimi gibi trafik benzetimleri veya terör saldırısı, yangın ya da doğal afetlerde hayati önem arz eden tahliye benzetimleri gerçek bireylerle tekrarlanması tehlike arz etmenin yanı sıra zaman ve maliyet açısından da pahalı olan senaryolardır. Bu ve benzeri birçok senaryonun bilgisayar ortamında sanal bir biçimde oluşturularak defalarca tekrar edilmek suretiyle veri elde edilmesi ve sonrasında bu verilerin analizine dayalı sonuçların gerçek hayata uyarlanması zaman ve maliyet açısından hem çok daha ucuz hem de çok daha güvenli olmaktadır. Bu doğrultuda kalabalık benzetimleri; şehirlerin ve yolların planlanması amacıyla kentsel planlama uygulamalarında, acil durumlarda en hızlı şekilde tahliye edilebilecek şekilde tasarlanmalarını sağlamak üzere büyük yapıların veya taşıtların tasarımında, askeri operasyonlardaki taktiklerin geliştirilmesi ve sınanması için askeri benzetimlerde, insanlar veya hayvanlardan oluşan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : onerbarut@gazi.edu.tr

gruplar içerisindeki sosyal etkileşimi modelleme amacıyla sosyoloji alanında ve buna benzer daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Oyun, animasyon, video gibi içeriklerin konu edildiği eğlence, eğitim, reklam gibi diğer yönlerden ele alındığında ise kalabalık benzetimi bilgisayar oyunlarında farklı türlerde varlıkların sanal kalabalıklarını oluşturmak, animasyon veya canlı çekim kısa video ve filmlerdeki kalabalık sahnelerini görsel efektlerle sanal olarak oluşturmak gibi amaçlara hizmet etmektedir [1-3].

Kalabalık benzetimleri, kullanım alanı ve amacına bağlı olmakla birlikte yalnızca bireylerin fiziksel hareketlerini belirleyen hesaplamalar yapmakla kalmayıp aynı zamanda kalabalığın ve içinde bulunduğu benzetim çevresinin bilgisayar ortamında görselleştirilmesi işlemlerini de gerçekleştirmektedir [2]. Bireylerin ve dolayısıyla genel anlamda kalabalığın davranışını belirleyen fiziksel hesaplamalar; bireylerin hareketlerini belirleme, bu hareketler esnasında gerçekleşebilecek olası çarpışmaları tespit ederek bunlardan kaçınmalarını sağlama, bireylerin hareket rotalarını belirleyecek yolları belirleme ve bu yolları izleyecek şekilde koordine bir biçimde hareket etmeleri sağlayacak işlemleri içermektedir. Diğer taraftan bireylerin ve benzetim ortamının görselleştirilmesini sağlayan hesaplamalar; bireylerin eklem hareketi animasyonları, 3 boyutlu modelleri ve bunların doku kaplamaları için en uygun çeşitliliği ve kaliteyi belirleyerek grafik işlem birimi (graphics processing unit - GPU) aracılığıyla görüntü oluşturulmasını sağlayacak işlemleri içermektedir. Benzetimlerin bu iki temel iş sürecini gerçekleştirmek üzere geçmişten günümüze çok sayıda araştırma yapılmış olup bunlara ilişkin detaylı ve güncel bilgiler farklı literatür taraması ve kitaplarda yayınlanmıştır [1-5]. Tüm bu çalışmalarda her iki süreç için de ortak bir biçimde olabildiğince fazla sayıda bireyden oluşan kalabalıkların en az işlem maliyetiyle gerçeğe en yakın şekilde benzetiminin sağlanması temel hedefi oluşturmaktadır.

Bilgisayar donanımlarının sürekli artan hesaplama gücü ve yeni geliştirilen benzetim tekniklerinin birleşimi ile her geçen gün hem görsel hem de davranışsal açıdan daha gerçekçi ve daha fazla sayıda birey içeren kalabalıklar oluşturmak mümkün olmaktadır. Ancak kalabalık benzetimlerinin kalite düzeyini ve dolayısıyla maliyetini etkileyen önemli faktörlerden biri de kullanıcıların ilgisi ve etkileşimleridir. Örneğin; kullanıcı girdilerinden etkilenmeyen veya ilgili sahnenin arka planında yer alarak yalnızca bir kalabalık ambiyansı oluşturmak istenen kalabalık senaryolarında kullanıcının odağı doğrudan kalabalığın üzerinde olmayacaktır. Bundan yararlanarak kalabalığın görsel [6-8] veya davranışsal [8-13] kalitesini kullanıcı tarafından fark edilmeyecek seviyede azaltarak maliyetin düşürülmesi ve böylelikle aynı sahnede daha fazla bireyin kullanılması mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada, Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yaklaşım geliştirilerek, gerçek insan kalabalıklarının ampirik gözlemlerinden elde edilen bulguların [14-18] desteklediği şekilde 1 (tek başına) ila

5 kişiden oluşan küçük gruplar halinde yürüme hareketi gerçekleştiren sanal insan kalabalıkları için benzetim oluşturan bir yöntem sunulmaktadır. Geliştirilen bu yeni yöntemde, her bir birey için ayrı ayrı çarpışmasız ve doğrusal gezeğe (trajectory) belirlemek yerine değişken sayıda bireyden oluşan küçük gruplar için tek seferde ortak bir çarpışmasız ve doğrusal gezeğe belirlenmekte ve grubu oluşturan bireylerin gerçek insan gruplarına benzer bir formasyona (diziliş) göre bu gezeğe takip edecek şekilde yürümeleri sağlanmaktadır. Geliştirilen bu yeni çalışmanın var olan benzerlerine göre başlıca katkıları şunlardır:

- Bireylerin değişken sayıda birey içerebilen küçük gruplar halinde hareket etmelerini olanaklı hale getirmektedir.
- Her bireyin yalnız başına hareket ettiği kalabalıklara kıyasla bireylerin küçük gruplar haline birlikte hareket ettiği daha doğal bir kalabalık oluşturmaktadır.
- Her grup için tek bir doğrusal ve çarpışmasız gezeğe oluşturulup grupta yer alan tüm bireylerin bunu ortak kullanmalarını sağlayarak her bir birey için ayrı ayrı doğrusal ve çarpışmasız gezeğe oluşturma maliyetini azaltmaktadır.
- Grup içerisindeki bireylerin grup büyüklüğüne göre gerçek hayattakine benzer formasyonlara göre dizilerek hareket etmelerine olanak sağlamaktadır.
- Grup içi birey sayılarının alt ve üst sınırlarının yanı sıra farklı büyüklükteki grupların kalabalık içerisindeki sıklıklarının belirtilerek buna göre kalabalıklar oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

2. bölümde ilgili literatürün kısa bir özeti sunulurken 3. bölümde önerilen yaklaşıma ilişkin detaylı açıklamalar yer almaktadır. 4. bölümde önerilen metot ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bunları sonuçları paylaşılırken 5. bölümde genel sonuçlar tartışılarak gelecekteki olası araştırma yönleri adreslenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE SUMMARY)

Kalabalık benzetiminde gezinim (navigation), bireylerin kendine has bir başlangıç noktasından yine kendine has bir hedef noktaya, başka bireylere veya engellere çarpmadan ulaşmak üzere gerçekleştirdiği yönlendirme (steering) hareketlerinin bütünüdür [19]. Reynold'un öncü çalışmasında [20] ortaya koyduğu ilk kalabalık benzetim sisteminden beri geçen onlarca yılda kalabalık benzetimlerinde kalabalığı oluşturan bireylerin gezinim ve yönlendirme davranışları birçok araştırmanın konusu olmuştur [1-3]. Bu çalışmalarda kalabalığı mikro ve makro düzeyde ele alan iki temel yaklaşımın şekillendiği görülmektedir [1,3]. Mikro düzeyli yaklaşımda her bir birey ayrı bir varlık olarak ele alınarak çevresindeki diğer bireylere ve engellere göre hareket etmesi sağlanmaktadır. Kural tabanlı modeller [20,21], sosyal kuvvetler tabanlı modeller [22,23], hız vektörü tabanlı modeller [24,25], görme tabanlı modeller [26,27] gibi farklı alt sınıflara ayrılan bu yaklaşımda kendi yerel

koşullarına göre detaylı bireysel yönlendirme kararları alabilen bireyler oluşturmak mümkündür. Makro düzeyli yaklaşımda ise kalabalık bireylere karşılık gelen küçük parçacıklardan oluşan birleşik ve sürekli bir bütün olarak ele alınarak hareket ettirilir. Süreklilik modeli [28,29], toplam dinamikler modeli [30], potansiyel alan modelleri [31,32] gibi alt sınıfları bulunan bu yaklaşımda bireyler arası etkileşimden ziyade kalabalığın geneli için alınan kararlar ön plandadır.

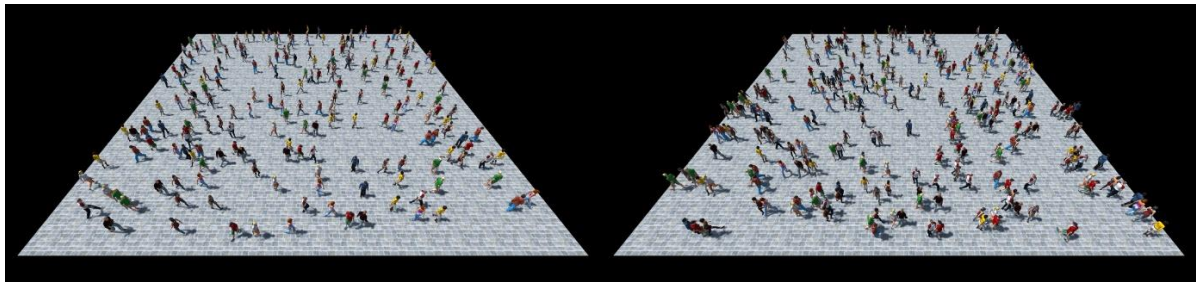
Gezirim ve yönlendirme için bu iki yaklaşıma dayalı yöntemlerin genelinde kalabalığın büyüklüğü arttıkça bireylerin davranış hesaplamaları için gereken toplam maliyet de artarak birey sayısı üzerinde üst sınır oluşturmaya devam etmektedir. Özellikle kalabalığın birincil odak unsuru olmadığı, yalnızca sahnenin arka planında bir kalabalık ambiyansı oluşturulmak istenen uygulamalarda, davranışsal kaliteyi belirleyen detay seviyesi (level of detail - LOD) teknikleri [8-10] ile sahneyi görüntüleyen kameranın odaklandığı sınırlı görüş alanının dışındaki uzak bireylerin gezirim ve yönlendirme davranışlarını basitleştirilerek maliyetlerinin azaltılması ve nihayetinde kazanılan işlem gücünün benzetimdeki birey sayısını artırmak için kullanılması mümkündür. Ancak kameranın odak alanında bulunan bireyler için halen en kaliteli davranışları oluşturma üzere en maliyetli hesaplamaların yapılması gerekmektedir.

Barut ve arkadaşları, arka planda kullanılacak ambiyans kalabalıkları için yönlendirme davranışları içermeyen gerçek zamanlı bir benzetim yaklaşımı geliştirmişlerdir [11-13]. Bu yaklaşımın altında yatan temel fikir, kalabalığı oluşturan bireylerin sürekli yerel çevrelerini kontrol ederek gezirim ve yönlendirme kararları almak üzere maliyetli hesaplamalar yapmak yerine, benzetim başında kendilerine özel olarak tahsis edilen ve başlangıç noktalarından bitiş noktalarına kadar herhangi bir çarpışmaya neden olmayacağı garanti edilen gezimler üzerinde belirtilen sabit hızlarla hareket etmeleridir. Böylelikle benzetim boyunca her bir bireyin kendisine tahsis edilen hız vektörünü (doğrultu ve hareket hızı) kullanarak yalnızca benzetimin ardışık zaman dilimlerinde hangi pozisyona ilerlemiş olacağını hesaplaması yeterli olmaktadır. Her bir bireye özgü çarpışmasız ve doğrusal bir gezinge tahsis edildiği için bireyin hedefine doğru gezinge planı yapma ya da hareket ederken olası yerel çarpışmaları tespit etme ve bunlardan kaçınma işlemleri için hiçbir hesaplama

yapmasına gerek bulunmamaktadır. Bu fikri uygulamaya geçirmek üzere ilk olarak tamamen merkezi işlem birimi (central processing unit - CPU) üzerinde çalışan bir yöntem [11] geliştiren Barut ve arkadaşları, daha sonra grafik işlem biriminin (graphics processing unit - GPU) yüksek paralel yapılı görüntü oluşturma iş hattından faydalanarak çarpışmasız gezimlerin gerçek zamanda daha verimli bir şekilde oluşturulmasını sağlamışlardır [12]. GPU tabanlı bu yöntemi daha da ileri taşıyan Barut ve arkadaşları, bireylerin tek parçadan oluşan doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge yerine, daha küçük doğrusal ve çarpışmasız gezinge parçalarının uç uca eklenmesiyle oluşturdukları birleşik gezimler üzerinde hareket etmelerini sağlayarak daha yoğun kalabalık benzetimleri oluşturmayı başarmışlardır [13].

Literatürdeki bu yönlendirmesiz kalabalık benzetimi yöntemlerinin üçünde de bireyler diğer bireylerden bağımsız bir gezingeye sahip olduğu için her biri kendi başına hareket etmekte ve kalabalığı oluşturan diğer bireylerle ortak bir grup etkileşimi göstermemektedir. Ancak gerçek insan kalabalıkları incelendiğinde insanların 2-5 arası bireylerden oluşan küçük gruplar haline hareket ettiği görülmüştür [14-18]. James, 1950 yılında yayalar, alışveriş yapan bireyler, oyun bahçesi, kumsal gibi halka açık alanlardaki bireyler gibi gerçek insan kalabalıklarını gözlemleyerek tüm bu bireylerin %55'ten fazlasının 2 ila 6 kişilik gruplar oluşturduğunu belirlemiştir [14]. Aveni, 1974 yılında bir kavşaktan geçen insanlar ile yapılan röportajlardan elde ettiği verilere göre bu kişilerin çoğunluğunun (%74) bir veya daha fazla kişiden oluşan bir gruba dahil olduğu tespit etmiştir [15]. Singh ve arkadaşları [16], alışveriş yapan, kampüste gezen ve seyahat eden insan kalabalıklarını gözlemleyerek bunların çoğunluğunun 2 veya daha fazla kişilik gruplardan oluştuğunu belirlemiştir. Moussaïd ve arkadaşları [17], düşük ve yüksek yoğunluklu insan kalabalıklarının video kayıtlarını inceleyerek bireylerin sırayla %55 ve %70 oranla bir gruba ait olduklarını gözlemlemiştir. Weina ve arkadaşları [18], dar koridorlardaki insan kalabalıklarının yüksek bir konumdan çekilen video görüntülerini analiz ederek insanların %50'den fazlasının 2 veya daha fazla kişiden oluşan bir gruba dahil olduklarını tespit etmişlerdir.

Bu bilgilerden yola çıkarak bu çalışmada gerçek zamanlı ambiyans kalabalıkları oluşturmak için bireylerin, 1-5 kişilik küçük gruplar halinde ve gruptaki birey sayısına göre gerçek hayattakine benzer bir formasyona göre,



Şekil 1. Tek başlarına (sol) ve gruplar halinde (sağ) bulunan bireyler (Individuals alone (left) and in groups (right))

birlikte hareket ettiği (Şekil 1) yeni bir yönlendirmesiz benzetim modeli önerilmektedir. Bu yeni yöntemde her bir birey için ayrı ayrı çarpışmasız ve doğrusal gezinmeler oluşturmak yerine her bir grup için ortak bir gezinme oluşturularak grup içerisindeki tüm bireylerin buna göre hareket etmeleri sağlanmıştır. Önerilen yöntem, farklı birey sayılarına sahip gruplar oluşturmayı, her büyüklükteki grup sayısının kalabalık içinde görülme sıklığına göre ayarlanmasını ve grup içindeki bireylerin formasyonlarının grup büyüklüğüne göre gerçek hatakinen benzer biçimde belirlenebilmesini sağlayacak yeniliklere sahiptir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada önerilen, küçük gruplar halinde hareket eden insan kalabalıklarının gerçek zamanlı benzetim yöntemi üç alt başlık altında incelenecektir.

3.1. Grup Büyüklükleri ve Sıklıklarının Belirlenmesi (Determining Group Sizes and Frequencies)

Literatür özetinde detayları verilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere insan kalabalıkları genellikle tek başına hareket eden bireyler ile 2-5 arası bireyden oluşan küçük gruplardan oluşmaktadır [15-18]. Gruplar içerecek kalabalıklar oluşturmanın ilk adımı da bu grupların minimum ve maksimum birey sayıları ile her bir grubun kalabalık içerisinde bulunma sıklığına karar verilmesidir. İncelenen çalışmalar dikkate alındığında kalabalıklardaki bireylerin yarısına yakınının hiçbir gruba ait olmayarak tek başına olan bireylerden oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada grupların minimum birey sayısı 1 olarak alınarak tek başına hareket eden her birey bir kişilik bir grup olarak kabul edilmektedir. Diğer taraftan literatür ile paralel şekilde grupların maksimum 5 bireyden oluşabilmesi sağlanacaktır. Burada belirtilen minimum ve maksimum birey sayısı değerleri literatüre

bağlı kalmak üzere bu çalışma için bu şekilde seçilmiş olup farklı ihtiyaçlara göre özelleştirilmeleri mümkündür.

1 ila 5 kişiden oluşacak gruplarının kalabalık içerisinde hangi sıklıkta bulunacağı da yine literatürdeki çalışmalardan elde edilecek bilgiler baz alınarak belirlenebilir. Çizelge 1’de incelenen literatür çalışmalarında 1-5 kişilik grupların hangi sıklıkla bulduklarına dair derlenen veriler paylaşılmaktadır. Bu çizelgede yer alan bazı değerler ilgili çalışmalarda açıkça belirtilen değerleri aynen yansıtmaktayken bazıları farklı metriklerden dönüştürülerek veya görsel grafiklerden yorumlanarak yaklaşık olarak hesaplanmıştır. İlgili çalışmalarda kullanılan asıl veriler erişilebilir olmadığı için bunları kullanarak gerçek değerler hesaplamak mümkün olmamış olup derlenen bu bilgiler asıl veriler kullanılarak hesaplanabilecek gerçek değerlerden çok az da olsa farklılık gösterebilir. Ancak buradaki sonuçlar tüm kalabalıklar için genel doğrular olmayıp fikir sağlamak amacıyla kullanılacağı için bu durum herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Çizelge 1’deki bilgiler incelendiğinde farklı zaman ve mekanlarda kaydedilmiş kalabalık verilerinin farklı grup sıklıklarına sahip oldukları görülmektedir. Oldukça olağan olan bu durum gruplarla ilgili genel geçer bir sıklık bilgisi elde etmeyi mümkün kılmamakla birlikte bu çizelge benzetimi oluşturulması hedeflenen kalabalık türüne en yakın kalabalık verisi baz alınarak grup sıklıklarını oluşturmak üzere bir rehber olarak kullanılabilir. Diğer taraftan çizelgedeki kalabalıkların genelinde grupların birey sayıları arttıkça ortak bir biçimde görülme sıklıklarının da azaldığı gözlemlenmektedir. Bu çizelgedeki verilerden bağımsız bir biçimde istenen grup sıklığı değerleriyle başlanarak hedeflenen kalabalık özelliklerine ulaşılmasını sağlamak üzere bu değerlerin ince ayarlanarak değiştirilmesi de mümkündür. Bu çalışmada 1 ila 5 kişilik grupların sıklıkları belirlenirken her bir grup için Çizelge 1’de yer

Çizelge 1. Literatürdeki çalışmalardan derlenen grup sıklıkları (Group frequencies compiled from studies in the literature)

Çalışma	Veri Kaynağı	Gruptaki Birey Sayısı				
		1	2	3	4	5+
[14]	Yayalar, oyun bahçeleri, alışveriş mağazaları, halka açık alanlar	65,54	25,47	6,94	1,54	0,51
[15]	Yoğun kavşak	26,0	39,96	13,32	11,84	8,88
[16]	Tren istasyonu	64,82	27,25	4,91	1,84	1,18
	Alışveriş merkezi	52,53	38,21	7,43	1,19	0,55
	Üniversite kampüsü	72,95	18,58	6,88	1,03	0,55
	Cadde	56,46	36,62	5,09	1,53	0,31
[17]	Seyrek yaya yolu	65,0	27,0	5,0	2,0	1,0
	Yoğun yaya yolu	48,0	43,0	7,0	1,5	0,5
[18]	Öğrenci birliği binası 1	67,0	27,0	4,0	1,0	1,0
	Öğrenci birliği binası 2	60,0	25,0	12,0	2,0	1,0
Ortalama	Her sütundaki değerlerin ortalaması	57,83	30,81	7,26	2,55	1,55

alan değerlerin sütun ortalaması hesaplanarak literatürde ele alınan kalabalıkların genel bir ortalamasını yansıtmak üzere kullanılmaktadır.

3.2. Gruplar Halinde Bireylerin Oluşturması (Creation of Individuals as Groups)

Benzetim boyunca bireylerin oluşturulması için önceki bölümde açıklanan grup büyüklükleri ve sıklıkları kullanılmaktadır. Bu çalışmada tek başına olan bireyler de bir kişilik gruplar olarak kabul edildiği için bu süreç grup oluşturma süreci de denilebilir. Buna göre her grup oluşturma sürecinde öncelikle hangi büyüklükte bir grup oluşturulacağına karar verilmesi gerekir. Bu amaçla benzetim boyunca anlık olarak her büyüklükteki gruptan kaç adet bulunduğu bilgisi kaydedilmekte ve kullanılmaktadır. Hiçbir bireyden oluşmayan boş bir benzetim alanı ile başlanacağı varsayıldığında her büyüklükteki grubun başlangıçtaki sayısı sıfır olacaktır. Benzetim süresince yeni bir grup oluşturulduğunda ilgili büyüklükteki grubun sayısı bir artırılarak, bir gruptaki tüm bireyler benzetim alanının dışına çıkarak yok olduğunda ise ilgili büyüklükteki grubun sayısı bir azaltılarak güncellenmektedir.

Yeni bir grup oluşturma sürecinde tüm grupların anlık grup sıklıkları (f_i) hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada en az birey (s_{min}) içerenden en çok birey (s_{max}) içerene kadar tüm grupların anlık grup sayıları (c_i) toplanarak anlık toplam grup sayısı (c_T) hesaplanmaktadır (Eşitlik 1). Daha sonra her büyüklükteki grup için anlık grup sayıları, anlık toplam grup sayısına bölünmektedir (Eşitlik 2).

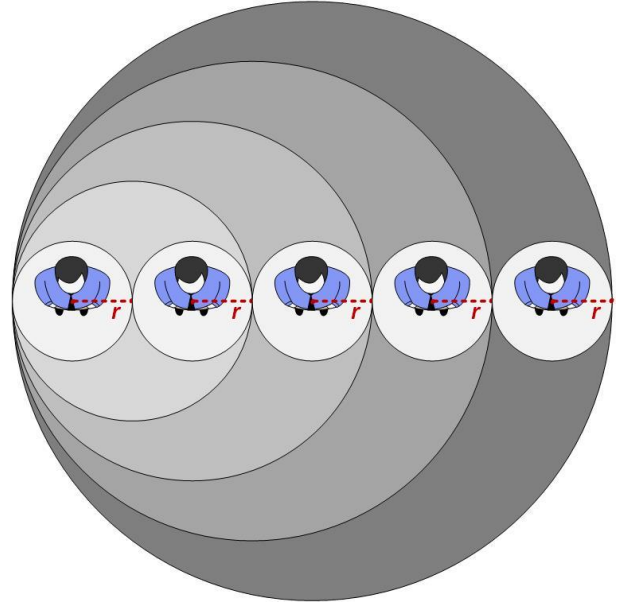
$$c_T = \sum_{k=s_{min}}^{s_{max}} c_k \quad (1)$$

$$f_i = \frac{c_i}{c_T} \quad (2)$$

Hesaplanan anlık grup sıklıkları en küçük gruptan başlanarak en büyük gruba doğru benzetim için seçilen grup sıklıkları ile karşılaştırılarak benzetimde öncelikli olarak hangi büyüklükte grubun oluşturulması gerektiğine karar verilmektedir. Bu karşılaştırmalarda; bir grubun anlık sıklığı, benzetimde o grup için sıklık değerine eşit ya da daha büyükse, o grup için gerekli sıklık gereksinimi anlık olarak karşılanıyor olacaktır. Bu durumda o büyüklükte yeni bir grup oluşturmak yerine sırayla daha büyük gruplar için aynı karşılaştırmalar yapılarak istenen sıklık değerlerini karşılamak üzere hangi büyüklükte bir gruba ihtiyaç varsa o büyüklükte bir grup oluşturulması kararı alınmaktadır. Eğer anlık olarak tüm gruplar için benzetimde seçilen sıklık değerleri karşılanıyorsa en küçük gruptan yeni bir tane daha oluşturulması kararı alınmaktadır. Böylelikle benzetim boyunca en küçük gruptan en büyük gruba doğru sıklık dengesinin sağlanmaya ve korunmaya çalışıldığı bir strateji izlenmektedir. Burada tanımlanan bu strateji önceki bölümde vurgulanan grup büyüklüğü ve grup sıklığı arasındaki ters orantıya paralel olarak öncelikle en sık görülen en küçük grupların oluşturulması şekilde kurgulanmıştır. Daha önce de ifade edildiği üzere benzetimlerde ihtiyaca göre farklı grup büyüklükleri ile farklı grup sıklıkları kullanmanın yanı sıra burada

anlatılan grup oluşturma stratejisinde de değişiklikler yapılması mümkündür.

Yeni oluşturulacak grup büyüklüğüne karar verildikten sonra bu grubun oluşturulması amacıyla grupta yer alacak bireylerin her biri için benzetim alanındaki başlangıç noktaları, bitiş noktaları ve hareket hızlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yöntemden esinlenilerek farklı büyüklüklerde gruplar oluşturmayı sağlayacak yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yeni yöntemin en önemli farkı her birey için ayrı ayrı başlangıç ve bitiş noktaları seçerek bunlar arasında doğrusal ve çarpışmasız gezinmeler belirlemeye çalışmak yerine yalnızca gruplar için bu işlemleri gerçekleştirmek ve grupta yer alan bireylerin her biri için bu bilgileri ortak olarak kullanmaktır. Gruplar için, doğrusal ve çarpışmasız gezinme parçalarının uç uca eklenmesi yöntemi [13] yerine, tek parçadan oluşan doğrusal ve çarpışmasız bir gezinme yönteminin [12] uygulanmasının temel nedeni ise; grubun hareketini belirleyecek gezinme parçaları arasında geçiş yaparken grubun merkez noktası etrafında dönerek doğrultu değiştirmek durumunda kalacak olan gruplarda bulunan bireylerin, kendi merkez noktaları etrafında dönerek doğrultu değiştirmek yerine formasyon merkezi etrafında aniden dönerek/kayarak gerçek dışı görünecek olmasıdır.



Şekil 2. Grupları temsil eden diskler (Disks representing groups)

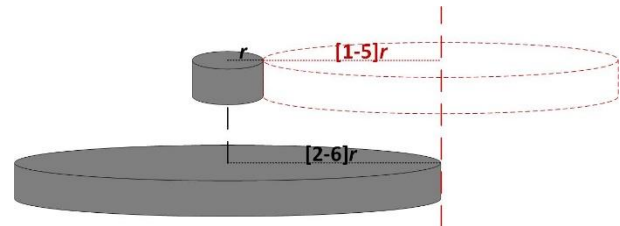
Gruplar halinde hareket eden bireyler oluşturabilmek için öncelikle yöntemin bireyleri temsil etme biçiminin değiştirilmesi gerekmektedir. Var olan yöntemde 2 boyutlu benzetim düzleminde yer alan her birey aynı sabit yarıçapa (r) sahip bir disk ile ifade edilmektedir. Geliştirilen yöntemde gruplar için de benzer bir mantık kullanılmaktadır. Ancak bu yeni yöntemde grupları temsil eden disklerin grupta yer alan ve birlikte hareket eden tüm bireyleri içerisine alacak kadar geniş olması gerekmektedir. Bu nedenle grupları temsil eden disklerin

yarıçapları grupta yer alan birey sayısı ile doğru orantılı olarak ayarlanmaktadır (Şekil 2). Buradaki temel mantık gruptaki tüm bireylerin yan yana dizilerek yürüyebilecekleri kadar geniş bir disk oluşturmaktır. Her ne kadar grupları oluşturan bireyler her zaman yan yana sıralı bir biçimde yürümek zorunda olmasa da bu şekilde yan yana yürümelerine olanak sağlayacak bir yarıçap belirlemek daha sonra bireylerin grup içerisinde istenen formasyonda dizilerek hareket etmeleri için yeterli alan oluşturmaktadır.

Grup sıklıklarına göre hangi büyüklükte bir grup oluşturulacağına karar verildikten sonra bu büyüklükte bir grup için öncelikle benzetim alanında bir başlangıç noktasının belirlenmesi gerekmektedir. Kalabalık benzetimlerinde bireylerin ya da bunların gruplarının benzetim alanının ortasında birdenbire ortaya çıkması veya yok olması çok normal karşılanmayacağı için başlangıç ve bitiş noktaları genellikle benzetim alanını çevreleyen kenarlar üzerinde olacak şekilde ayarlanmaktadır. Böylelikle bireyler çoğu zaman kameranın görüntü alanının dışında kalan noktalarda oluşturularak benzetimin olağan akışı dahilinde hareket ederek kameranın görüş alanına girip çıkabilmektedirler. Buradan hareketle yeni oluşturulacak gruplar için başlangıç noktaları olarak, benzetim alanının kenarlarından bir tanesi rastgele bir şekilde belirlenerek bu kenar üzerinde seçilecek rastgele bir noktanın kullanılması uygun olacaktır. Bu yöntemle rastgele bir başlangıç noktası belirlendikten sonra benzetim alanı üzerinde yeni oluşturulacak grubu temsil eden diskin bu noktayı merkez kabul ederek kaplayacağı alan içerisinde başka hiçbir bireyin bulunmuyor olması gerekmektedir. Bunu test etmek üzere basitçe benzetimde bu noktaya yakın bulunan bireylerden herhangi birinin anlık konumunun bu noktaya, yeni oluşturulacak grubun yarıçapı ile kendi yarıçapının toplamından daha yakın olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eğer yeni grubun disk alanını ihlal eden herhangi bir birey yoksa grup oluşturma sürecine devam edilir. Aksi burumda başka bir rastgele başlangıç noktası seçilerek aynı kontroller tekrarlanmaktadır.

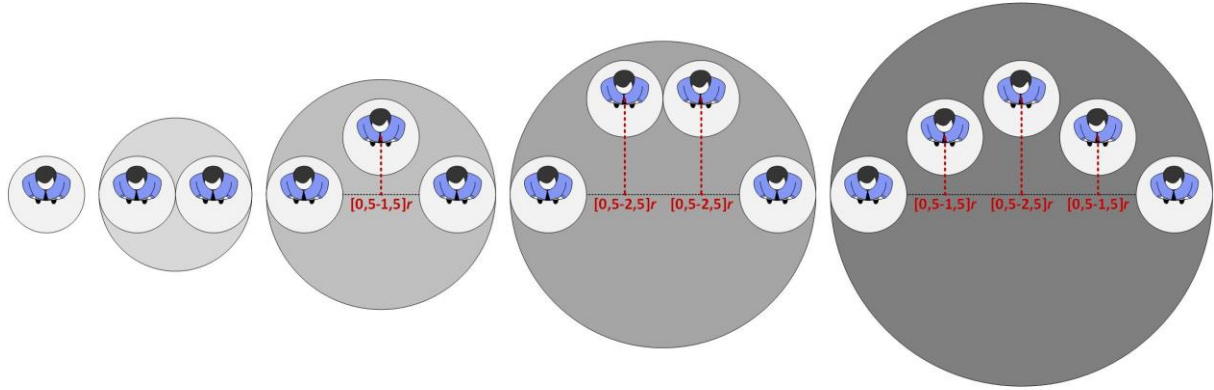
Kontrollerden geçen bir başlangıç noktası belirlendikten sonra Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yöntemde olduğu gibi bu noktadan benzetim alanının karşı kenarına doğru tüm kenarı görececek şekilde bakan bir kamera oluşturmaktadır. Daha sonra kameranın görüş piramidinin (view frustum) yüksekliği ve eğimi başlangıç noktasından karşı kenara ulaşmak için gereken minimum ve maksimum seyahat süreleri temel alınarak aynı şekilde hesaplanmaktadır. Ekran dışı görüntü oluşturma (offscreen rendering) üzere GPU üzerinde harici bir çerçeve arabelleği nesnesi (framebuffer object - FBO) oluşturularak görüntü piksel verisinin buraya yazılması sağlanmaktadır. Önerilen yöntemin yenilikçi bölümleri ön planda tutularak anlatımı sadeleştirmek adına burada özü açıklanan kamera ve FBO oluşturma sürecinin detayları için var olan benzer çalışmaya [12] başvurulabilir.

Kamera ve FBO ayarlama işlemlerinden sonra o anda benzetimde bulunan tüm bireylerin uzay-zamansal görüntüsü oluşturulmaktadır. Mevcut yöntemde yeni eklenecek bireyi uzay-zamanda r yarıçaplı silindirik bir tüp yerine yalnızca düz bir çizgi olarak ifade edebilmek üzere benzetimde yer alan bireylerin yarıçapları (r), yeni bireyin yarıçapı (r) da eklenerek iki katına ($2r$) çıkarılmaktadır. Sunulan yeni yöntemde r yarıçaplı bireyler yerine içerdiği birey sayısına göre farklı yarıçap değerlerine sahip gruplar oluşturulacaktır. Bu nedenle benzetimdeki bireylerin yarıçaplarına (r), yeni oluşturulacak grubun yarıçap değeri ($[1-5]r$) eklenerek mevcut bireyler, uzay-zamanda $[2-6]r$ arasında yarıçapa sahip silindirik tüpler olarak ifade edilecektir. Böylelikle önerilen yöntemde de yeni oluşturulacak grubu uzay-zamanda yalnızca düz bir çizgi olarak ifade edebilmek mümkün olmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Benzetimdeki mevcut bireylerin ölçeklendirilmesi (Scaling of existing individuals in the simulation)

Benzetimde yer alan bütün bireylere karşılık gelen silindirik tüplerin yarıçapının yeni oluşturulacak grup büyüklüğüne göre ölçeklendirilmesinden sonra bu tüplerin her biri ait olduğu bireyin bulunduğu konumdan bu bireyin bitiş pozisyonuna doğru, ilgili bireyin hızı ile ters orantılı eğime sahip olacak şekilde yatırılmaktadır. Sonrasında ise benzetimdeki tüm bireylerin siyah renkli tüplerini içeren uzay-zamanın, daha önce ayarlanan beyaz arka plana sahip kameraya göre ekran dışı görüntüsü oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu görüntü, Barut ve arkadaşları [12] tarafından önerilen yöntemde benzer şekilde ardışık iki GPU tabanlı paralel işlemden geçirilmek suretiyle kamera konumundan karşı kenara kadar uzanarak yeni oluşturulacak grup için uygun bir bitiş pozisyonu ve hıza karşılık gelecek beyaz pikseller taranmaktadır. Bu amaçla beyaz piksellerin her birini kontrol etmek yerine yalnızca bitişik beyaz piksel kümelerinden birinin merkezi kullanılmaktadır. Bu doğrultuda en az veya en fazla sayıda beyaz piksel içeren, en kısa veya en uzun sürede karşı kenara ulaşmayı sağlayan beyaz piksellerden biri seçilebileceği gibi başka bir seçim yaklaşımı kullanılması ya da tamamen rastgele seçim yapılması da mümkün olmakla birlikte mevcut yöntemde [12] yapılan testlerde en fazla birey sayısına ulaşmayı sağlayan en büyük beyaz piksel kümesinin merkezini kullanmak yerinde olacaktır. Oluşturulan görüntüde hiçbir beyaz piksel bulunamaması durumunda ise tüm siyah pikseller benzetimde mevcut olan bireyler ile çarpışmalara neden olacağı için ilgili grup için yeni bir başlangıç pozisyonu seçilerek tüm bu işlemlerin tekrarlanması gerekmektedir.



Şekil 4. Grup büyüklüğüne göre grup içi formasyonların belirlenmesi (Determination of intra-group formations according to group size)

Yeni oluşturulacak grup için başarılı bir biçimde başlangıç pozisyonu, bitiş pozisyonu ve hareket hızı belirlendikten sonra bu bilgilerin grubu oluşturacak bireyler tarafından ortak olarak paylaşılması gerekmektedir. Gruptaki tüm bireyler grup halinde kalabilmek için aynı yöne doğru ve aynı hızla ilerlemek durumundadır. Dolayısıyla grup için belirlenen hareket yönü ve hareket hızı bilgisi (hız vektörü) gruptaki tüm bireyler için aynı olacaktır. Diğer taraftan gruptaki tüm bireylerin grup için belirlenen aynı başlangıç ve bitiş pozisyonlarını kullanmaları mümkün olmayabilir. Özellikle birden fazla bireyden oluşan gruplarda tüm bireylerin benzetim alanında aynı başlangıç konumunda benzetime katılıp, aynı yön ve hızda hareket etmeleri sonucu aynı bitiş konumunda benzetimden ayrılması, benzetim boyunca bu bireylere karşılık gelen modellerin içe içe geçmesi gibi istenmeyen bir sonuç doğuracaktır. Bu nedenle grup içerisinde yer alan bireylerin grup halinde aynı hız vektörü ile hareket edebilecekleri bir formasyona sahip olmaları gerekmektedir.

Moussaïd ve arkadaşları [17], düşük ve yüksek yoğunluklu insan kalabalıklarının video kayıtlarını incelediklerinde; düşük yoğunluklu kalabalıklarda grup üyelerinin hareket yönüne dik bir çizgi oluşturacak şekilde yan yana yürüme eğiliminde olduklarını, kalabalık yoğunluğu arttıkça bireylerin doğrusal formasyonlarının eğilerek V veya U şeklinde bir diziliş desenine dönüştüğü gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra grup için formasyonun grup büyüklüğüne bağlı olarak değiştiğini; 2 kişilik gruplardaki bireylerin yan yana yürüme eğilimi gösterdiklerini, 3 kişilik gruplarda gruptaki bireylerin birbirlerinin görerek iletişim ve etkileşimlerini artırmak üzere ortadaki bireyin biraz daha geriden gelerek V şekilli formasyonu oluştururken, 4 kişilik gruplarda ortadaki iki bireyin daha geriden gelerek U şekilli formasyonu oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

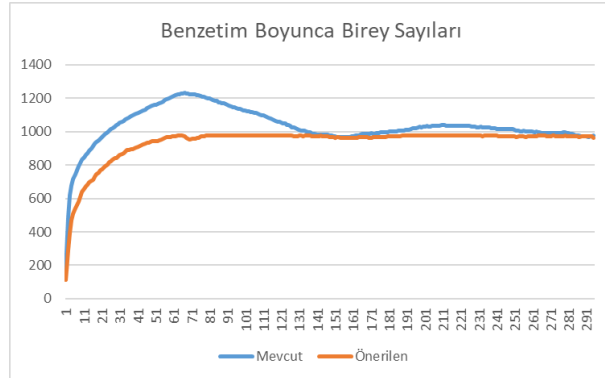
Grup bilgileri belirlendikten sonra grupta yer alacak bireyler için formasyon oluşturulurken literatürde yer alan bu bilgiler dikkate alınmıştır. Buna göre; grup için belirlenen başlangıç pozisyonu grubun merkezi ile çakışık olacak şekilde ve gruptaki tüm bireylerin hareket yönü ortak bir biçimde grup için belirlenen hız vektörü doğrultusu ile paralel olacak şekilde gruptaki her bir

birey için grubun merkez noktasına göre başlangıç pozisyonları belirlenmektedir. 1 kişilik gruplarda bireyin doğrudan grup için belirlenen başlangıç pozisyonunda olması sağlanmaktadır. 2 kişilik gruplarda bireylerin, grup merkezi tam ortalarında kalarak yan yana yürüyecek şekilde hareket doğrultusuna dik bir çizgi formasyonuna göre başlangıç pozisyonları almaları sağlanmaktadır. 3, 4 ve 5 kişilik gruplarda da benzer biçimde önce bireylerin yan yana yürüyecek şekilde hareket doğrultusuna dik bir çizgi formasyonuna göre başlangıç pozisyonları almaları sağlanmaktadır. Ancak sonrasında Moussaïd ve arkadaşlarının [17] ifade ettiği bulgular doğrultusunda grubun ortasında kalan bireylerin başlangıç pozisyonları grubun hareket doğrultusuna göre bir miktar geriye doğru çekilerek V veya U şeklinde bir diziliş formasyonu oluşturulmaktadır. 3 kişilik gruplarda yalnızca ortadaki (ikinci) birey $[0,5-1,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilirken, 4 kişilik gruplarda ortada kalan iki (ikinci ve üçüncü) birey de $[1,5-2,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilmektedir. 5 kişilik gruplarda ise en ortadaki (üçüncü) birey $[1,5-2,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilirken onu hemen yanındaki (ikinci ve dördüncü) bireyler $[0,5-1,5]r$ aralığında rastgele seçilecek bir değer kadar geri çekilmektedir (Şekil 4). Grup için belirlenen başlangıç pozisyonuna göre gruptaki bireylerin başlangıç pozisyonlarını ve dolayısıyla hareket formasyonlarını belirleyen bu yaklaşım aynı mantıkla grup için belirlenen bitiş pozisyonunu kullanarak gruptaki bireylerin bitiş pozisyonlarının hesaplanmasında da kullanılmaktadır.

Benzetim boyunca grup sıklık bilgilerine göre oluşturulmasına karar verilen gruplar için gerekli sayıda birey, burada anlatılan biçimde oluşturularak benzetime dahil edilmektedir. Benzetime dahil olan her birey bu aşamadan sonra bir grup bilgilerine ihtiyaç duymaksızın benzetimin her adımında bağımsız bir biçimde kendi anlık pozisyonunu, kendi hız vektörünü kullanarak basit ve hızlı bir biçimde güncellemektedir. Benzetim ilerledikçe kendi bitiş pozisyonlarına ulaşan bireyler ise benzetimden çıkarılarak güncellenen grup sıklıkları doğrultusunda yeni grupların (bireylerin) benzetime dahil olması sağlanmaktadır.

4. DENEYLER VE BULGULAR (EXPERIMENTS AND FINDINGS)

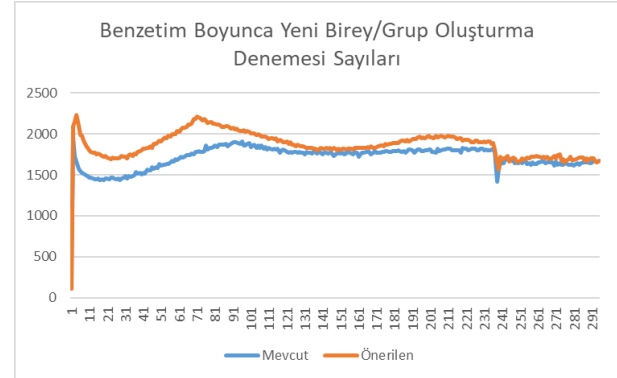
Bu çalışmada geliştirilen yeni yönteminin değerlendirilmesi için literatürde mevcut benzer yöntem [12] ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu amaçla bu iki yöntemi kullanan benzetimler oluşturulup çalıştırılarak yöntemlerin her birinin; benzetim boyunca ulaşabildikleri maksimum ve ortalama birey sayıları ile gerçekleştirdikleri yeni birey/grup oluşturma denemesi sayıları, bir birey veya grup bir oluşturmak işlemi için ortalama zaman maliyeti, bir bireyi oluşturmak için ortalama zaman maliyeti ve bir bireyi hareket ettirmek için ortalama zaman maliyeti metrikleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Her iki benzetim yöntemi de C++ ve OpenGL kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm testler Intel i7 4720HQ 2.6 GHz CPU, 16 GB bellek ve Nvidia GTX960M GPU içeren bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm testlerde birey yarıçapı (r) 0,5m olarak, bireylerin yürüme hızı aralıkları [1,0-2,0]m/s olarak, benzetim alanının büyüklüğü 128m x 128m olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemde de benzer olan GPU tabanlı doğrusal ve çarpışmasız gezinga belirleme işlemlerinde kullanılan FBO bellek alanlarının ölçeklendirme katsayısı 1,0 olarak seçilmiştir. Tüm testler, benzetim alanı başlangıçta hiçbir birey içermeyecek şekilde başlayacaktır. 5 dakika olarak ayarlanan test süresi boyunca bu alan olabildiğince fazla sayıda bireyle doldurulmaya çalışılacaktır. Bu doğrultuda her iki yöntemde de benzetimin her bir adımında birey oluşturmak için 25ms ayrılmıştır.



Şekil 5. Benzetim boyunca ölçülen birey sayıları (Number of individuals measured throughout the simulation)

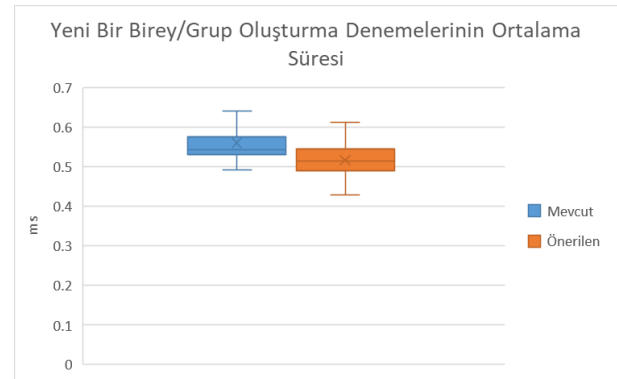
Yapılan testler sonucunda her iki yöntemin benzetim boyunca sahip oldukları birey sayıları Şekil 5'te gösterilmektedir. Burada görülebileceği üzere mevcut yöntem [12] benzetimin başlarında daha fazla sayıda bireyi daha çabuk bir biçimde oluşturarak önerilen yöntemden daha önce maksimum birey sayısına ulaşabilmektedir. Benzetimdeki bireyleri daha ince silindirik tüpler olarak ifade eden mevcut yöntem bu sayede, uzay-zamanda gruplar oluşturmak üzere daha kalın silindirik tüplere ihtiyaç duyan yeni yöntemden daha fazla olası çözüm bulabilme şansına sahip olmaktadır. Bunun sonucu olarak mevcut yöntem benzetim boyunca ortalama 1034 ve maksimum 1231

birey sayısına ulaşabilirken önerilen yöntem ortalama 937 (%-9,4) ve maksimum 978 (%-20,6) bireye ulaşabilmektedir. Bununla birlikte özellikle benzetimlerin istikrarlı birey sayısı doygunluğuna ulaştıkları bölüm olan ikinci yarısında her iki yöntemin de birbirine oldukça yakın birey sayılarına (kalabalık yoğunluklarına) sahip benzetimler sürdürdükleri dikkat çekmektedir. Buradan hareketle yeni geliştirilen grup bazlı yöntemin mevcut yöntemle yakın yoğunluklarda ve grup halinde hareket eden bireylerden oluşan kalabalık benzetimleri sağlayabildiği söylenebilmektedir.



Şekil 6. Benzetim boyunca yeni birey/grup oluşturma denemesi sayıları (Number of attempts to create new individuals/groups measured throughout the simulation)

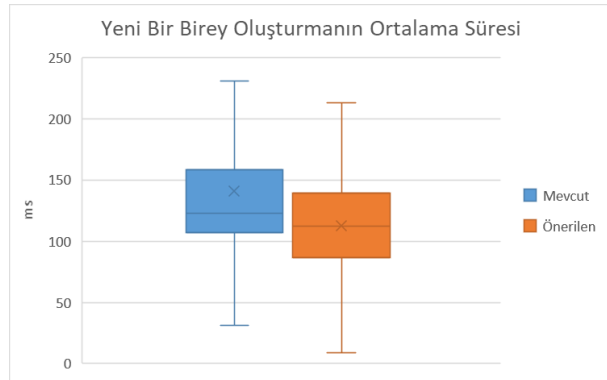
Karşılaştırılan yöntemlerin benzetim boyunca her saniyede gerçekleştirdikleri yeni birey/grup oluşturma denemelerinin sayıları Şekil 6'da gösterilmektedir. Buna göre önerilen yöntem her bir saniye GPU kullanarak ortalama 1867 grup oluşturma denemesi yapabilirken mevcut yöntem ise her saniye GPU üzerinde ortalama 1711 birey oluşturma denemesi yapabilmektedir. Oransal olarak incelendiğinde ise yeni yöntemin mevcut yöntemle kıyasla ortalama olarak %9,1, maksimum olarak ise %14,6 oranlarında daha fazla oluşturma denemesi yapabildiği tespit edilmiştir. Bu durumun temel nedeni ise yöntemlerin her deneme için harcadıkları sürelerin farklı olmasıdır.



Şekil 7. Yeni bir birey/grup oluşturma denemelerinin ortalama süresi (Average time of attempts to create a new individual/group)

Geliştirilen grup bazlı yöntemin GPU kullanarak bir grup oluşturma denemesi yapması için gereken ortalama süre 0,52ms iken mevcut birey bazlı yöntemin GPU kullanarak tek bir birey oluşturmak üzere deneme yapması için gereken ortalama süre 0,56ms olarak ölçülmüştür (Şekil 7). Her iki yöntemin GPU tabanlı benzer oluşturma yaklaşımları kullanıyor olmasına karşın önerilen yöntemin oluşturma denemesi yapmak üzere mevcut yönteme göre ortalama % -7,8 daha az süre harcadığı görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak önerilen yöntemin benzetim boyunca mevcut yönteme görece daha düşük birey sayılarına ulaşabilmesi nedeniyle bu bireylerin uzay-zamansal görüntülerinin oluşturulması için daha az süre harcamak zorunda kaldığı düşünülmektedir.

Diğer taraftan her iki yöntemde de gerçekleştirilen her bir GPU bazlı oluşturma denemesinin doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge hesaplayarak başarılı olma garantisi bulunmamakta olup bu denemelerin az bir bölümü yeni bir birey veya grup oluşturulabilmesine olanak sağlayabilmektedir. Bu nedenle benzetim boyunca her iki yöntemde; benzetim adımı içerisinde gerçekleştirilen başarılı veya başarısız tüm oluşturma denemeleri için geçen toplam süre, ilgili benzetim adımı sonucunda oluşturulan birey sayısına bölünerek benzetim genelinde bu değerlerin ortalamalarının hesaplanmasıyla, test edilen yöntemlerin bir bireyi başarılı bir biçimde oluşturarak benzetime dahil edebilmesi için gereken ortalama süreler elde edilmiştir (Şekil 8).

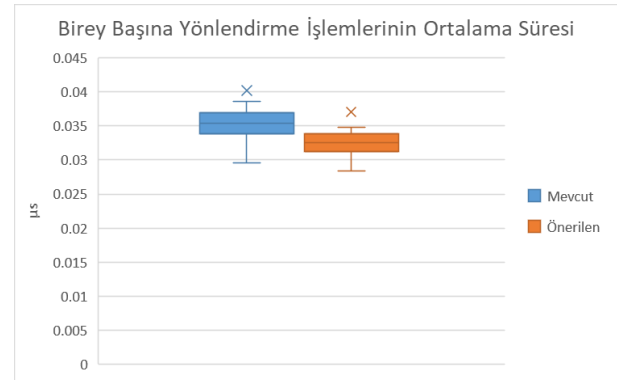


Şekil 8. Yeni bir birey oluşturmanın ortalama süresi (Average time to create a new individual)

Burada vurgulanması gereken önemli bir husus, önerilen grup bazlı yöntemde, grup oluşturma denemeleri için geçen sürelerin grup içerisinde oluşturulan toplam birey sayılarına bölünerek geliştirilen yeni yöntem için de birey başına ortalama oluşturma sürelerinin hesaplanmış olduğudur. Böylelikle sözü edilen bu sürelerin her iki yöntem için de birey başına hesaplanması ve karşılaştırılması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mevcut yöntem tek birey için doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge hesaplayarak bu bireyi benzetime dahil edebilmek üzere ortalama 140,79ms süre harcamaktadır. Yeni geliştirilen grup bazlı yöntem ise grup halinde hareket edebilen her bir bireyi oluşturmak için ortalama 112,44ms süreye ihtiyaç duymaktadır. Araştırmanın

başında oluşturulan hipoteze paralel olarak önerilen yöntem, grup içerisindeki her bir birey için ayrı ayrı GPU bazlı gezinge hesaplaması yapmak yerine, grup için ortak bir gezinge hesaplayıp tüm grup üyelerinin aynı hesaplamaları kullanmasını sağladığı için mevcut yönteme kıyasla % -20,1 oranında daha düşük ortalama birey oluşturma süresi ile benzetim gerçekleştirebilmektedir.

Son olarak yöntemlerin benzetim boyunca bir bireyin yönlendirme işlemleri için ihtiyaç duydukları ortalama süreler incelenmiştir. Şekil 9'da verilen sonuçlara göre önerilen yöntem bir bireyi kendisine tahsis edilen doğrusal ve çarpışmasız gezinge üzerinde ilerletebilmek için ortalama 0,037µs süreye ihtiyaç duyarken mevcut yöntem ise aynı amaçla bir birey için ortalama 0,040µs süre harcamaktadır. Her iki yöntem de benzetim boyunca bireylerin, olası çarpışmalardan kaçınarak hedeflerine doğru gezinimlerini sağlamak üzere maliyetli hesaplamalar yapmak yerine, benzetime dahil olurken kendilerine tahsis edilen ve çarpışmasız olduğu garanti edilen hız vektörleri uyarınca benzetimin her adımında basit ve hızlı bir biçimde sadece pozisyonlarını güncellemektedir. Bu nedenle bireylerin yönlendirme işlemleri için harcadıkları süre mikro saniyeler düzeyinde düşük kalabilmektedir. Buradaki sonuçlara göre yeni geliştirilen yöntem, bireylerin her birinin yönlendirme işlemleri için oransal olarak % -7,8 daha az zaman kullanmakla birlikte mikro saniyeler seviyesinde sürelerden söz edildiğinde bu farkın benzetime etkisi de sınırlı düzeyde olacaktır.



Şekil 9. Birey başına gerçekleştirilen yönlendirme işlemlerinin ortalama süresi (Average time of steering operations performed per individual)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 1-5 kişilik küçük gruplar halinde yürüyerek hareket eden sanal insan kalabalıklarının gerçek zamanlı benzetimi için geliştirilen yeni bir yönlendirmesiz benzetim modeli sunulmuştur. Geliştirilen bu yeni yöntemde, kalabalık içerisindeki sıklıkları gerçek insan kalabalıklarının gözlemlenmesiyle derlenen ve 1 ile 5 arasında bireyden oluşabilen her bir grup için, GPU yardımıyla benzetim alanı üzere bir başlangıç noktası, bir bitiş noktası ve bir yürüme hızının birleşiminden oluşan doğrusal ve çarpışmasız bir gezinge belirlenmektedir. Buna göre grupların kendileri için

belirlenen gezinenin belirttiği başlangıç pozisyonundan başlayıp, yine bu gezinenin belirttiği hız vektörü (başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru olan doğrultu ve yürüme hızı) uyarınca doğrusal biçimde yürüyerek hareket etmeleri durumunda bitiş noktasına kadar başka hiçbir birey veya engel ile çarpışmayacakları garanti edilmektedir. Grup içerisindeki bireylerin grup büyüklüğüne göre gerçek hayattakine benzer formasyonlara göre yan yana doğrusal, V veya U desenlerinde dizilimi sağlanarak grup için belirlenen hız vektörünü ortaklaşa kullanan bu bireyin birbirine paralel doğrultularda bitiş noktalarına doğru ilerlemeleri sağlanmaktadır. Böylelikle kendi türetilmiş çarpışmasız gezinesine sahip olan her bir bireyin çarpışma tespiti ve çarpışmadan kaçınma gibi maliyetli yönlendirme hesaplamalarına gerek kalmadan benzetim alanı üzerinde küçük gruplar olarak gezinimi mümkün olmaktadır.

Yapılan deneylerde, önerilen yeni grup bazlı yöntemin, literatürde bulunan birey bazlı benzer yöntem [12] kıyasla; bir bireyi oluşturmak (birey için başlangıç noktası ile doğrusal ve çarpışmasız gezine belirlemek) üzere ortalama yaklaşık %20,1 daha kısa süre gerektirdiği, buna bağlı olarak oluşturma denemelerinin maliyetinin azaldığı (ortalama %-7,8) ve birim zamanda yapılabilen oluşturma denemesi sayısının (ortalama %9,1) arttığı, birey başına yönlendirme işlemleri için gereken sürenin benzer biçimde mikro saniyeler düzeyinde kaldığı ve benzetimdeki ortalama birey sayılarının istikrarlı doygunluk noktasına ulaşıldıktan sonra %-9,4 gibi bir farkla da olsa benzer yoğunluklara sahip bireyler oluşturmayı sağladığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında önerilen yöntemin, grupta yer alabilecek minimum ve maksimum birey sayıları, grup büyüklüklerine göre grupların kalabalıkta bulunma sıklıkları ve grup büyüklüklerine göre grubu oluşturan bireylerin grup içi diziliş formasyonlarının ihtiyaca göre özelleştirilerek sahnelerin arka planında küçük gruplar halinde yürüyen insan kalabalıkları ambiyansı oluşturmak üzere kullanılması mümkündür.

Gelecekteki çalışmalarda, önerilen yöntemin grup ve onları oluşturan bireyler için daha hızlı bir biçimde çarpışmasız gezine üretmesini ve böylelikle kalabalığı oluşturma maliyeti azaltılırken kalabalık yoğunluğunu artırmayı sağlayacak yöntemler üzerinde araştırma yapılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Öner BARUT: Çalışmanın tüm süreçlerini yürütmüş ve tüm işlemlerini gerçekleştirmiştir. / Conducted all the processes of the study and performed all the operations.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yang, S., Li, T., Gong, X., Peng, B., & Hu, J., "A review on crowd simulation and modeling", *Graphical Models*, 111: 101081, (2020)
- [2] Musse, S. R., Cassol, V. J., & Thalmann, D., "A history of crowd simulation: the past, evolution, and new perspectives", *The Visual Computer*, 37: 3077-3092, (2021)
- [3] Van Toll, W., & Pettré, J., "Algorithms for microscopic crowd simulation: Advancements in the 2010s", *Computer Graphics Forum*, 40: 731-754, (2021)
- [4] Pelechano, N., Allbeck, J. M., Kapadia, M., & Badler, N. I. "Simulating heterogeneous crowds with interactive behaviors", *A K Peters/CRC Press*, 9781315370071, New York, (2016)
- [5] Beacco, A., Pelechano, N., & Andújar, C., "A survey of real-time crowd rendering", *Computer Graphics Forum*, 35: 32-50, (2016)
- [6] Dobbyn, S., Hamill, J., O'Connor, K., & O'Sullivan, C., "Geopostors: a real-time geometry/impostor crowd rendering system", *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, Washington, 95-102, (2005)
- [7] Ahn, J., Oh, S., & Wohn, K., "Optimized motion simplification for crowd animation", *Computer Animation and Virtual Worlds*, 17: 155-165, (2006)
- [8] Toledo, L., De Gyves, O., & Rudomin, I., "Hierarchical level of detail for varied animated crowds", *The Visual Computer*, 30: 949-961, (2014)
- [9] Kulpa, R., Olivierxs, A. H., Ondřej, J., & Pettré, J., "Imperceptible relaxation of collision avoidance constraints in virtual crowds", *ACM Transactions on Graphics*, 30: 1-10, (2011)
- [10] Paris, S., Gerdelan, A., & O'Sullivan, C., "Ca-lod: Collision avoidance level of detail for scalable, controllable crowds", *2nd International Workshop on Motion in Games*, Zeist, 13-28, (2009)
- [11] Barut, Ö., Hacıömeroğlu, M., & Özcan, C., "Illusive crowd", *International Conference on Computer Animation and Social Agents*, Houston, 1-4, (2014)
- [12] Barut, O., & Hacıomeroglu, M., "Real-time collision-free linear trajectory generation on GPU for crowd simulations", *The Visual Computer*, 31: 843-852, (2015)
- [13] Barut, O., Hacıomeroglu, M., & Sezer, E. A., "Combining GPU-generated linear trajectory segments to create collision-free paths for real-time ambient crowds", *Graphical Models*, 99: 31-45, (2018)
- [14] James, J., "The distribution of free-forming small group size", *American Sociological Review*, 18: 569-570, (1953)
- [15] Aveni, A. F., "The not-so-lonely crowd: Friendship groups in collective behavior", *Sociometry*, 40: 96-99, (1977)
- [16] Singh, H., Arter, R., Dodd, L., Langston, P., Lester, E., & Drury, J., "Modelling subgroup behaviour in crowd dynamics DEM simulation", *Applied Mathematical Modelling*, 33: 4408-4423, (2009)

- [17] Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., & Theraulaz, G., "The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd Dynamics", *PLOS One*, 5: 1-7, (2010)
- [18] Ge, W., Collins, R. T., & Ruback, R. B., "Vision-based analysis of small groups in pedestrian crowds", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34: 1003-1016, (2012)
- [19] Kapadia, M., & Badler, N. I., "Navigation and steering for autonomous virtual humans", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4, 263-272, (2013)
- [20] Reynolds, C. W., "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model", *Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Anaheim, 25-34, (1987)
- [21] Reynolds, C. W., "Steering behaviors for autonomous characters", *Game Developers Conference*, California, 763-782, (1999)
- [22] Helbing, D., & Molnar, P., "Social force model for pedestrian Dynamics", *Physical review E*, 51: 4282-4286, (1995)
- [23] Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T., "Simulating dynamical features of escape panic", *Nature*, 407, 487-490, (2000)
- [24] Van den Berg, J., Lin, M., & Manocha, D., "Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, 1928-1935, (2008)
- [25] Van Den Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., & Manocha, D., "Reciprocal n-body collision avoidance", *International Symposium of Robotics Research*, Lucerne, 3-19, (2011)
- [26] Ondřej, J., Pettré, J., Olivier, A. H., & Donikian, S., "A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation", *ACM SIGGRAPH*, Los Angeles, 1-9, (2010)
- [27] Dutra, T. B., Marques, R., Cavalcante-Neto, J. B., Vidal, C. A., & Pettré, J., "Gradient-based steering for vision-based crowd simulation algorithms", *Computer Graphics Forum*, 36: 337-348, (2017)
- [28] Hughes, R. L., "A continuum theory for the flow of pedestrians", *Transportation Research Part B: Methodological*, 36: 507-535, (2002)
- [29] Treuille, A., Cooper, S., & Popović, Z., "Continuum crowds", *ACM Transactions on Graphics*, 25: 1160-1168, (2006)
- [30] Narain, R., Golas, A., Curtis, S., & Lin, M. C., "Aggregate dynamics for dense crowd simulation", *ACM SIGGRAPH Asia*, Yokohama, 1-8, (2009)
- [31] Cheney, S., "Flow tiles", *Symposium on Computer Animation*, Grenoble, 233-242, (2004)
- [32] Patil, S., Van Den Berg, J., Curtis, S., Lin, M. C., & Manocha, D., "Directing crowd simulations using navigation fields", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17: 244-254, (2010)