

Fizik Tabanlı Ses Sentezi Uygulamaları Üzerine Bir İnceleme

Elif Ekşi¹, Fatma Nur Akı², Rıfat Yazıcı²

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye

Geliş Tarihi: 19.08.2020

***Sorumlu Yazar e mail:** elifeksi95@gmail.com

Kabul Tarihi: 21.09.2020

Atıf/Citation: Ekşi, E., Akı, F.N., Yazıcı R. "Fizik Tabanlı Ses Sentezi Uygulamaları Üzerine Bir İnceleme", Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2020, 3/2: 289-308.

Derleme Makalele/Review Articles

Özet

Bu çalışmada 1993-2020 yılları arasında yayınlanmış, fizik tabanlı ses simülasyonu konusunda yapılmış araştırmaları içeren yirmi dokuz adet makale taranmıştır. Özellikle birbirleri ile interaktif etkileşimde bulunan ve ses üreten cisimlerin simülasyonlarını içeren makaleler tercih edilmiştir. Makalelerde kullanılan fiziksel modeller ve çalışmaların kısa özeti bir tablo ile karşılaştırılmalı olarak burada verilmiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde fizik tabanlı ses simülasyonu modellerinden Modal Sentezleme yönteminin on dört makalede ve Geometrik Model yönteminin yedi makalede ağırlıklı olarak kullanılan fiziksel model olduğu görülmüştür. Ayrıca araştırmacılar bu yöntemler ile birlikte Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar metodunu da kullanmaktadır. Çalışmanın fiziksel tabanlı ses sentezi alanında yayın taraması yapan araştırmacılar için ilgili kaynaklara erişimde yardımcı olacağı ve ilgili literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fizik tabanlı ses simülasyonu, modal sentezleme yöntemi, geometrik model.

A Review on The Physics-Based Sound Synthesis Applications

Abstract

In this study, twenty-nine articles which were published between 1993 and 2020 and which included the researches on the physics-based sound simulation were scanned.

The articles which included the simulations of the sound producing objects interacting with themselves were preferred especially. Here, the physical models used in the articles and a brief summary of the studies are given in a table comparatively. When these studies were examined, it was seen that the Modal Synthesis method, one of the physics-based sound simulation models, was preferred in 14 articles and the Geometric Model method in seven articles mainly. In addition, researchers also use the Finite Element and the Finite Difference methods together with these models. It is thought that the study will be helpful for accessing related source materials by the researchers who search for publications in the field of the physics-based sound synthesis and that it will contribute to the relevant literature.

Keywords: Physics-based sound simulation, modal model, geometric model.

1. Giriş

Bilgisayarların hesaplama güçlerinin artması ile cisimlerin interaktif görüntü ve ses simülasyonlarının üretimi günümüzde daha verimli hale gelmiştir. Simülasyonların fiziksel modele dönüştürülmesi, elde edilecek görüntü ve sesin daha gerçekçi olmasını sağlamaktadır. Ancak, grafik simülasyonlarına kıyasla, gerçekçi seslerin fiziksel modellere dayalı olarak simüle edilmesi son derece yüksek hesaplama maliyeti gerektirmesi nedeniyle hala araştırılmakta olan güncel bir konudur. Bu çalışmada ses simülasyonu yapılmış çalışmalar taranarak, hangi modellerin tercih edildiği özetlenmiştir (Tablo 1).

Fiziksel tabanlı ses sentezi yöntemleri, çarpışma gibi fiziksel etkileşimler esnasında oluşan sesi, cisimlerin malzeme cinsine ve geometrisine dayanan bazı faktörlere bağlı olarak ton ve tınların değişikliğini otomatik olarak üretebilmektedir. Ancak, fiziksel tabanlı ses sentezi iki hesaplama gereksinimine sahiptir: 1) Fizik motoru. Bir fizik motoru, tam olarak çarpışan cisimlerin geometrisine dayanan ses üretimi için ses sistemini bilgilendirir. Örneğin Havok Engine (<http://www.havok.com>) gibi birçok yeni ticari fizik motoru bu ihtiyacı karşılayabilmektedir. 2) Daha büyük hesaplama kaynakları. Fiziksel tabanlı sesler, kaydedilen seslerden çok daha fazla hesaplama kaynağı kullanır. Bu

nedenle, hiçbir zaman kaba kuvvet (brute-force) ile oluşturulmuş bir ses simülasyonu gerçek zamanlı performansa ulaşamamaktadır.

Tablo 1’de 1993-2020 yılları arasında yayınlanmış fiziksel modellere dayalı ses sentezi çalışmalarından seçilen 29 araştırma kısaca özetlenerek verilmiştir. İkinci bölümde bu yayınlarda kullanılmış olan en popüler yöntemlerin teorisi kısaca açıklanmıştır.

Tablo 1. 1993-2020 yılları arasında taranmış makaleler

Makalenin Adı	Yayınlandığı Yıl / Yazarlar	Yayınlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim veya Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
1)Towards High-Quality Sound Synthesis of the Guitar and String Instruments (Gitar ve yaylı Çalgıların yüksek kaliteli ses sentezine doğru)	1993/ Karjalainen, M., Välimäki, V., & Jänösy, Z.	In Proceedings of the International Computer Music Conference (pp. 56-56).	1D Gitar ve diğer yaylı çalgılarda yüksek kalitede ses sentezleme	Digital waveguide (sayısal dalga kılavuzlu model)	Gitarın ve diğer yaylı çalgıların model tabanlı ses sentezini ses kalitesi açısından daha gerçekçi hale getirmek için yeni ilkelerin sunulması	Akustik gitarı taklit eden daha doğal sentetik seslerin gerçek zamanlı olarak üretilmesi.
2)Physically Based Sound Modelling (Fiziksel Tabanlı Ses Modelleme)	1998/ De Poli, G., & Rocchesso, D.	Physically based sound modelling. Organised Sound, 3(1), 61-76.	3D Fiziksel Tabanlı Ses Modelleme	Finite Difference method (Sonlu farklar metodu)	Ses tanımı, yalnızca insan işitmesinin özelliklerine değil, sesli nesnelerinin fiziğine dayandığı sürece, fizik tabanlı grafik modellerle entegrasyonun mümkün hale gelmesi.	Multimedya ortamlarında görüntüler ve sesler arasında sıkı bir bağlantı kurmaya çalışmak için yeni çabaların atılacağı umuduyla hem sentez hem de işleme aşamalarında ses ve görüntü modelleri arasında meydana gelen bazı ilişkilerin belirlenmesi
3)Foleyautomatic: Physically-based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation (İnteraktif simülasyonlar ve animasyonlar için Fizik temelli ses efektleri)	2001/ Van Den Doel, K., Kry, P. G., & Pai, D. K.	Proceeding /interactive techniques (pp. 537-544). / Proceeding	3D Yuvarlanan Cisimlerin çıkardığı sesler	Modal Rezonans Model	Metal bir tavada, etrafında zıplayabilen, yuvarlanabilen ve kayabilen bir çakıl taşının ayrıntılı hareketli simülasyonunun gerçek-zamanda oluşturulması	Simülasyonda fiziğe dayanan ses sentezi algoritmaları kullanılarak, temaslar ile dinamik bir simülasyondan elde edilen fiziksel parametreler yönlendirilen yüksek kaliteli gerçekçi temas seslerini otomatik olarak üretmek için bir yöntem koleksiyonu açıklanmıştır. Model parametreleri tanımlandıktan sonra, sesler otomatik olarak oluşturulmaktadır. Bu durum etkileşimli simülasyon kullanıcılarına, nesnelere dokunurken, onları kaydırırken veya yuvarlarken gerçek hayattaki işitsel geri bildirim deneyimini sağlar.
4)Scanning Physical Interaction Behavior of 3D Objects (3 Boyutlu cisimlerin fiziksel interaksyonların taranması)	2001/ Pai, D. K., Doel, K. V. D., James, D. L., Lang, J., Lloyd, J. E., Richmond, J. L., & Yau, S. H.	Proceeding / 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 87-96). / Proceeding	Gerçek cisimlerin taranmış görüntüleri ile 3D cisimlerin üretilmesi	Geometrik Model Modal Rezonans Model	Gerçek cisimlerin yüzey dokuları ve temas seslerinin taranması ile simülasyon modellerinin gerçek veriye benzeştirilerek oluşturulması	Deformasyon (bir cismin şekil değiştirmesi, şekil bozukluğu, orijinal şeklinden başkalaşmaya uğraması), temas için yüzey dokusu ve temas sesleri de dahil olmak üzere çeşitli önemli etkileşim davranışlarının etkili bir şekilde nasıl taranabileceğini gösterilmiştir.

Makalenin Adı	Yayımlandığı Yıl / Yazarlar	Yayımlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim veya Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
5) Synthesizing Sounds from Physically Based Motion (Fiziksel Tabanlı Hareketten Sesleri Sentezleme)	2001 / O'Brien, J. F., Cook, P. R., & Essl, G.	In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 529-536). / Proceeding	3D katı cisimlerin bir yüzeye çarparak sıçrarken ve yuvarlanırken çıkardığı sesler	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi) Sesin yayılımı için: Akustik Dalga Modeli	Katı nesnelerin hareketiyle üretilen ve ortama yayılan seslerin bilgisayar simülasyonu ile modellenmesi	Başarılı bir şekilde fizik tabanlı gerçeklik ses üretilmiştir.
6)Physically-based real-time modeling of contact sounds (Temas seslerinin gerçek zamanda fizik tabanlı modellenmesi)	2002/ Rath, M., Rocchesso, D., & Avanzini, F.	Physically based real-time modeling of contact sounds. In Proc. Int. Computer Music Conf.). / Proceeding	3D Seslerin gerçek zamanlı modellenmesi	Modal Rezonans Model	Düşük maliyetli platformlarda gerçek zamanlı olarak çalışan modellerin sezgisel pratik kullanılabilirliği.	Modelden üretilen sesin kalitesi hem resmi olmayan değerlendirmeler hem de genel olarak resmi dinleme testleri ile değerlendirilip, etki sesleri gerçekçi olarak algılanmaktadır. Etki yeri üzerindeki kontrol inandırıcı sonuçlar vermektedir.
7)Sound Production and Modeling (Ses Üretme ve Modelleme)	2002/ Cook, P. R.	Sound production and modeling. IEEE Computer Graphics and applications, 22(4), 23-27.	1D Bir boyutlu cisimlerin (tel, ip vb.) ürettiği sesin modellenmesi	Modal Synthesis Model (Modal Sentezleme)	Sesi fiziksel bir olgu olarak tanımlama, sesin insanlar tarafından algılanmasını sağlama.	3B ses, sanal ve artırılmış gerçeklikte ses üretilmiştir.
8)Physically Informed Signal Processing Methods for Piano Sound Synthesis: A Research Overview (Piyano Ses Sentezi için Fiziksel Bilgili Sinyal İşleme Yöntemleri: Araştırmaya Genel Bakış)	2003/ Bank, B., Avanzini, F., Borin, G., De Poli, G., Fontana, F., & Rocchesso, D.	EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2003(10), 464536.	1D Ses kartı modeli için filtre tabanlı bir yaklaşımın sunulması	Akustik Dalga Modeli	Piyanonun fizik tabanlı sentezindeki son gelişmeleri gözden geçirmek	Bu makale, piyano için fiziksel bir model geliştirme için ana aşamalarını gözden geçirmiş, hesaplamalı yöntemleri ele almış ve sadece piyano sentezi ile ilgili değil, aynı zamanda geniş bir ses sınıfı nesne modellerinde ortaya çıkan sorunları tartışmıştır.
9)Physically-Based Models For Liquid Sounds (Sıvı Cisimlerin Ürettiği Sesler İçin Fiziksel Tabanlı Modeller)	2005/ Doel, K. V. D.	Physically based models for liquid sounds. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 2(4), 534-546.	3D Fiziksel tabanlı sıvı cisim için ses sentezi	Modal Sentezleme	Su tarafından yayılan seslerin gerçek zamanlı sentezi için fiziksel tabanlı bir modelin oluşturulması.	Gerçek zamanlı parametrik kontrol altında çok çeşitli sıvı ses efektleri oluşturmak için bir baloncuk popülasyonunu harekete geçirmek için istatistiksel modeller kullanan gerçek zamanlı bir sıvı ses sentezleyici oluşturulması.

Makalenin Adı	Yayımlandığı Yıl / Yazarlar	Yayımlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim veya Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
10)Physically-based Sound Synthesis on GPUs Grafik İşlemcilerde (GPU) Fizik Tabanlı Ses Sentezi	2005/ Zhang, Q., Ye, L., & Pan, Z.	Physically-based sound synthesis on GPUs. In International Conference on Entertainment Computing (pp. 328-333). Springer, Berlin, Heidelberg.	2D Modal sentez için GPU tabanlı bir uygulamanın önerilmesi.	(Modal Sentezleme)	GPU'lar üzerinde modal sentezin uygulanması, gerçek zamanlı olarak sentezlenebilecek mod sayısının önemli ölçüde geliştirilmesi.	GPU ile sistem belleği arasındaki veri aktarım bant genişliğinin sürekli olarak artmasından dolayı, GPU tabanlı uygulamanın CPU tabanlıya göre daha fazla performans artışı vermesi beklenmektedir.
11)Interactive Sound Synthesis for Large Scale Environments (Büyük Ölçekli Ortamlar için Etkileşimli Ses Sentezi)	2006/ Raghuvanshi, N., & Lin, M. C.	Interactive sound synthesis for large scale environments. In Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games (pp. 101-108).	3D Kati cisimlerin bir yüzeye çarparak çıkarak ve yuvarlanırken çıktığı sesler	Modal Sentezleme Kütle -Yay Sistemleri (Spring-mass Systems)	Kati-cisim dinamik simülasyonlarından gerçekçi fiziksel tabanlı sesler üretmek	Yüzlerce etkileşimli nesnenin oluşan büyük ölçekli bir olayı gerçek zamanlı olarak oluşturmak için algılanan ses kalitesinde çok az kayıpla çeşitli hızlandırma tekniklerine sahip fiziksel tabanlı bir ses sentezi algoritmasının oluşturulması.
12)Precomputed Acoustic Transfer: Output-sensitive, accurate sound generation for geometrically complex vibration sources (Önceden Hesaplanmış Akustik Aktarım: Geometrik olarak karmaşık titreşim kaynakları için çıkışa duyarlı, doğru ses üretimi)	2006/ Barbic, D. L. J., & Pai, D. K.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 25(3), 987-995.	3D Geometrik olarak karmaşık titreşimli nesnelere ses radyasyonu sentezlemek için hızlı bir yöntemin tanımlanması	Akustik Dalga Modeli	Fiziksel tabanlı animasyonda gerçek zamanlı ses sentezini mümkün kılan eşdeğer kaynak yaklaşımları oluşturmak için bir algoritmanın sunulması	Kati cisimlerden gelen gerçekçi ses radyasyonunun gerçek zamanlı sentezi için yeni bir algoritma oluşturulması
13)Physically Based Sound Synthesis for Large-Scale Virtual Environments (Büyük Ölçekli Sanal Ortamlar için Fiziksel Tabanlı Ses Sentezi)	2007/ Raghuvanshi, N., & Lin, M. C.	IEEE Computer Graphics and Applications, 27(1), 14-18.	3D Büyük ölçekli sanal ortamlar için gerçekçi, fiziksel tabanlı ses sentezini sağlamak	Modal Sentezleme Kütle -Yay Modeli (Spring-mass model)	Ses simülasyonunu hızlandırmak için çeşitli tekniklerin tanımlanması ve büyük ölçekli sanal ortamlar için gerçekçi, fizik tabanlı ses sentezini sağlamak	Günümüzün sanal ortamlarının çok sayıda sesli nesneleri içeren sahneler için fizik tabanlı sesleri destekleyebileceğini açıkça göstermektedir
14) Block-Based Physical Modeling for Digital Sound Synthesis (Dijital Ses Sentezi için Blok Tabanlı Fiziksel Modelleme)	2007/ Rabenstein, R., Petrausch, S., Sarti, A., De Sanctis, G., Erkut, C., & Karjalainen, M.	IEEE Signal Processing Magazine, 24(2), 42-54.	2D Blok tabanlı fiziksel modelleme	Sonlu farklar metodu	Kullanıcıyı blok uyumluluğu sorunları ile zorlamadan karmaşık ses sentezi sistemlerinin oluşturulmasına izin veren yazılım ortamlarının sunulması	Gerçek zamanlı operasyon, etkileşimli insan kontrolü ve düşük gecikmeli parametre varyasyonları için otomatik olarak oluşturulan sentez algoritmalarının oluşturulması

Makalenin Adı	Yayınlandığı Yıl / Yazarlar	Yayınlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim ve Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
15)Synthesis of Hand Clapping Sounds (El Çarpma Seslerinin Sentezi)	2007/ Peltola, L., Erkut, C., Cook, P. R., & Valimaki, V.	IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 15(3), 1021-1029.	3D El çarpma seslerinin sentezi	Physically Informed Stochastic Event Modeling (PhISEM) Stokastik Olay Modelleme	El çarpma seslerinin üretimi	El çarpma seslerini sentezlemek için iki fizik tabanlı analiz, sentez ve kontrol sisteminin sunulması.
16)Discrete Elastic Rods (Ayrık Elastik Çubuklar)	2008/ Bergou, M., Wardetzky, M., Robinson, S., Audoly, B., & Grinspun, E.	In ACM SIGGRAPH 2008 papers (pp. 1-12).	3D Hem verimli hem de iyi enerji davranışına sahip yöntemleri uygulamak için alternatif yöntemlerin araştırılması	Geometrik Model	Çubukları sert cisimlere bağlamak ve aynı zamanda çubukların uzamasını sağlamak için çeşitli projeksiyon yönteminin açıklanması.	Elastik çubukların simülasyonu için yüksek dereceli yöntemler sağlanmaktadır.
17)Harmonic Shells: A Practical Nonlinear Sound Model for Near-Rigid Thin Shells (Harmonik Kabuklar: Katı İnce Kabuklar için Pratik Doğrusal Olmayan Ses Modeli)	2009/ Chadwick, J. N., An, S. S., & James, D. L.	ACM Trans. Graph., 28(5), 119.	3D İnce kabuklar için olası çarpma sesleri üretmek	Modal Sentezleme	İnce kabukların titreşimleri nedeniyle olası gerçek seslerin üretilmesi	Doğrusal modal ses modelleriyle karşılaştırıldığında, nesnelere daha özgün "çarpışma" ve "gürleme" sesleri üretir.
18)Harmonic Fluids (Harmonik Sıvılar)	2009/ Zheng, C., & James, D. L.	Harmonic fluids. ACM Transactions on Graphics (TOG), 28(3), 1-12.	3D Harmonik sıvı olguları için fizik tabanlı ses oluşturma	Geometrik Model	3D sıvı animasyonlarından senkronize harmonik kabarcık tabanlı seslerin otomatik yöntemsel sentezi için pratik bir metodun önerilmesi.	Dört farklı su sesi için sonuçlar: düşen su damlaları, bir musluktan dökülen su, düşen sert bir nesnenin sıçrattığı su.

Makalenin Adı	Yayımlandığı Yıl / Yazarlar	Yayımlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim ve Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
19)Animating Fire with Sound (Ses ile yangın animasyonu)	2011/ Chadwick, J. N., & James, D. L.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 30(4), 1-8.	3D Fizik tabanlı ateş simülasyonları ile senkronize edilen olası seslerin sentezlenmesi için bir yöntemin sunulması.	Geometrik Model	Fizik tabanlı ateş simülasyonları ile senkronize edilmiş olası seslerin sentezlenmesi	Düşük hızlarda zaman kademeli simülasyonlardan sesler üretir, daha sonra spektral bant genişliği genişletme veya doku sentezi tekniklerini kullanarak bir işlem sonrası olarak yüksek frekanslı içeriğin sunulması.
20)Precomputed Acceleration Noise for Improved Rigid-Body Sound (Kıta Cisim Sesi için Önceden Hesaplanmış Hızlanma Gürültüsü)	2012/ Chadwick, J. N., Zheng, C., & James, D. L.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 31(4), 1-9.	3D Bir nesne çarpışmalar veya diğer temas olayları nedeniyle bir kıta cisim hızlanma yaşadığında bu üretilen hızlanma sesini sentezlemek	Geometrik Model	Çarpışan ve diğer temas olayları sonucunda çıkan sesi sentezleme	Kıta cisim hızlanma sesini sentezlemek için bir modelin sunulması. Hızlanma sesinin eklenmesi, çeşitli kıta cisim örnekleri için ses kalitesini önemli ölçüde artırır.
21)Motion-driven Concatenative Synthesis of Cloth Sounds (Kumaş Seslerinin Hareket odaklı birleştirici sentezi)	2012/ An, S. S., James, D. L., & Marschner, S.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 31(4), 1-10.	3D Kumaş animasyonları için olası ses sentezi	Geometrik Model	Grafik hızlarında çarpışan fizik tabanlı kumaş animasyonları için olası sesleri otomatik olarak sentezlemek için pratik bir veri odaklı yöntemin sunulması.	3D kumaş animasyonlarında seslerin otomatik birleştirme sentezi için veriyeye dayalı bir yöntemin sunulması. İki özel ses üreten olguda, sürtünmeye ve buruşmaya odaklanılır ve bunların çeşitli animasyonlu kumaş senaryoları için yeterli olduğu gösterildi.
22)Large Scale Physical Modeling Sound Synthesis (Büyük Ölçekli Fiziksel Modelleme Ses Sentezi)	2013/ Bilbao, S., Hamilton, B., Torin, A., Webb, C., Graham, P., Gray, A., ... & Perry, J.	In Proceedings of the Stockholm music acoustic conference (SMAC2013), Stockholm (pp. 593-600).	3D Fiziksel modellere dayalı ses sentezi	Finite Difference Time Domain Method	FDTD ve Sonlu hacim zaman alanı yöntemleri gibi büyük ölçekli zaman adım yöntemleri, ince Plaka ve kabuk titreşimine dayanan vurmali çalgılar ve ayrıca 3D akustik alanlara gömmeleri de dahil olmak üzere müzik akustiğine ilgi duyan çeşitli sistemler için araştırılmaktadır.	FDTD (Finite Difference Time Domain Method) yöntemlerinin ses sentezinde, özellikle büyük, gerçek dünyadaki fiziksel modellere ve nihayetinde 3D'ye uygulanması.

Makalenin Adı	Yayımlandığı Yıl / Yazarlar	Yayımlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim ve Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
23)Example-Guided Physically Based Modal Sound Synthesis (Örnek Kılavuzlu Fiziksel Tabanlı Modal Ses Sentezi)	2013/ Ren, Z., Yeh, H., & Lin, M. C.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(1), 1-16.	3D Gerçek dünya kayıtlarından örnek bir ses klipi kullanarak yeni bir veri odaklı, fiziksel tabanlı ses sentezi algoritmasının sunulması.	Modal Sentezleme	Kaydedilen ses malzemelerinin doğal kalitesini yakalayan malzeme parametrelerini tahmin etmek önceden kaydedilmiş ses kliplerini kullanan yeni bir yöntemin sunulması	Gerçek dünya kayıtlarından örnek bir ses klipi kullanarak yeni bir veri odaklı, fiziksel tabanlı ses sentezi algoritması sunulması.
24)Inverse-Foley Animation: Synchronizing rigid-body motions to sound (Ters Foley Animasyonu: Katı cisim hareketlerini sese senkronize etme)	2014/ Langlois, T. R., & James, D. L.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 33(4), 1-11.	3D Önceden kaydedilmiş seslerle senkronize edilen katı cisim hareketlerini veya diğer zamansal giriş sinyallerini sentezlemek için yeni bir teknik olan Ters-Foley Animasyonunu tanıtılması	Geometrik Model	Katı cisim animasyonlarını optimize etmek için bir teknik olan Ters-Foley Animasyonu sunularak temas olaylarının giriş ses olaylarıyla senkronize edilmesi.	Ters-Foley Animasyonu, düzinelere nesne ve yüzlerce temas sesi dizisi için senkronize hareketleri sentezlemek için başarıyla kullanılmıştır.
25)SynCoPation: Interactive Synthesis-Coupled Sound Propagation (SynCoPation: Et-kileşimli Sentez-Çiftli Ses Yayılımı)	2016/ Rungta, A., Sc-hissler, C., Mehra, R., Malloy, C., Lin, M., & Manocha, D.	IEEE transactions on visualization and computer graphics, 22(4), 1346-1355.	3D Sanal ortamlarda otomatik olarak gerçekçi işitsel içerik oluşturmak için ses sentezini ses yayılımı ile birleştirmek için yeni bir tekniğin sunulması.	Modal Sentezleme	Modal ses sentezi, ses radyasyonu ve ses yayılımını birleştirerek bilgisayar oyunları ve sanal gerçeklik için gerçekçi ses efektleri üretebilen ilk birleştirilmiş ses sentezi-yayılma algoritmasının sunulması	Algısal Hankel yaklaşımı kullanarak dürtü yanıtlarını hesaplamak için hızlı bir ışın izleme tekniği ile bu kaynak temelini kullanarak ses yayılımı gerçekleştirilmiştir.
26)Animating Elastic Rods with Sound (Elastik Çubukların Sesle Hareketlendirilmesi)	2017/ Schweickart, E., James, D. L., & Marschner, S.	ACM Transactions on Graphics (TOG), 36(4), 1-10.	3D Merdivenlerden aşağı kayan bir yayın görsel-ışitsel simülasyonu	Modal Sentezleme	Deforme olabilen elastik çubuklar için eşzamanlı animasyon ve ses üretimi için fiziksel tabanlı yöntemlerin sunulması.	İnce yapılar için aynı anda ses ve fiziksel tabanlı animasyon üretilmiştir. Model mevcut 3D simülasyon ortamlarına kolayca sığar ve oldukça deforme olabilen cisimler için bile olası ses üretebilir.

Makalenin Adı	Yayımlandığı Yıl / Yazarlar	Yayımlandığı yer / Makale türü	Modellenen Fiziksel Cisim ve Olay	Kullanılan Yöntem veya (fiziksel model)	Amacı	Sonucu
27) Model-based digital pianos: from physics to sound synthesis (Model tabanlı dijital piyanolar: fizikten ses sentezine)	2018/ Bank, B., & Chabassier, J.	IEEE Signal Processing Magazine, 36(1), 103-114.	3D Enstrümanın fiziksel tanımına dayanarak mevcut piyano modellerinin ana özelliklerini gözden geçirilmesi	Modal Sentezleme	Hesaplamalı olarak ağır, fiziksel olarak doğru yaklaşımlardan başlayarak fizik tabanlı piyano sentezine genel bir bakış sunmak ve daha sonra gerçek zamanlı sentezde mümkün olan en iyi ses kalitesini hedeflemek	Enstrümanın fiziksel tanımına dayanarak mevcut piyano modellerinin ana özelliklerini gözden geçirilmiştir. Bu modeller, enstrümanın işleyişini anlamaya izin verirken, üretilen sesler hayal kırıklığı yaratıyor çünkü birçok özellik eksik, aynı zamanda bazı olgular henüz doğru bir şekilde modellenmemiştir.
28) Model-Based Digital Pianos From physics to sound synthesis (Model tabanlı dijital piyanolar Fizikten ses sentezine)	2019/ B. Bank and J. Chabassier	Model-Based Digital Pianos: From Physics to Sound Synthesis," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 36, no. 1, pp. 103-114.	3D Enstrümanın fiziksel tanımına dayanarak mevcut piyano modellerinin ana özelliklerini gözden geçirilmesi	Modal Sentezleme	Gerçek zamanlı sentez için mümkün olan en iyi ses kalitesini üretmek üzere tasarlanan yaklaşımların tartışıldığı, hesapsal olarak ağır, fiziksel olarak doğru bir yaklaşımla başlayan fizik tabanlı bir piyano sentezine genel bir bakışın sunulması.	Hesaplamalı gücün artmasıyla birlikte, bu mevcut modellerin gelişmeye devam etmesi ve piyano sentezi için fiziksel modelleme kullanan diğer ticari ürünler (benzer fiziksel işlevlere sahip diğer telli çalgılar) için kullanılabilir hale getirmek.
29) Physical Modeling, Algorithms, and Sound Synthesis: The NESS Project (Fiziksel Modelleme, Algoritmalar ve Ses Sentezi: NESS Projesi)	2020/ Bilbao, S., Desvages, C., Ducceschi, M., Hamilton, B., Harrison-Harsley, R., Torin, A., & Webb, C.	Physical Modeling, Algorithms, and Sound Synthesis: The NESS Project. Computer Music Journal, 43(2-3), 15-30.	3D Yeni nesil ses sentezinin sonuçları sunulması.	Modal Sentezleme	Yeni nesil ses sentezi, yaylı-telli çalgılar, fiziksel modelleme için büyük ölçekli ortamlar da dahil olmak üzere çeşitli ses üretim sistemleri için algoritmanın sunulması.	Zaman alanındaki sayısal simülasyon için genel teknikler, fiziksel modelleme sentezi için karmaşık müzik aletlerinin simülasyonuna genel bir yaklaşımın sunulması.

2. Tablo 1’de özetlenen araştırmalarda kullanılan Fizik Tabanlı Ses Sentezi Modelleri

Fizik tabanlı ses sentezinde kullanılan başlıca matematiksel modeller genellikle sonlu elemanlar metodu veya sonlu farklar metodu ile birlikte kullanılan modal sentezleme yöntemi, kütle-yay modeli, geometrik model, stokastik modeller, dalga kılavuzu modelleri olarak sıralanabilir. Bu çalışmada taranan yayınlarda en sık kullanılan metodların teorisi özetlenmiştir. Şekil 2.1.’de görüldüğü gibi tüm modeller öncelikle gerçek sistemin ya da cismin ses elde edildiği durumunu en doğru şekilde açıklayan fiziksel modelin ve parametrelerinin belirlenmesi ile başlar. Daha sonra bu fiziksel modeli bilgisayar üzerinde çalıştıracak uygun algoritmaların geliştirilmesi ve teorik sonuçlara göre simülasyonun optimize edilmesi ve güncellenmesi gerekmektedir.

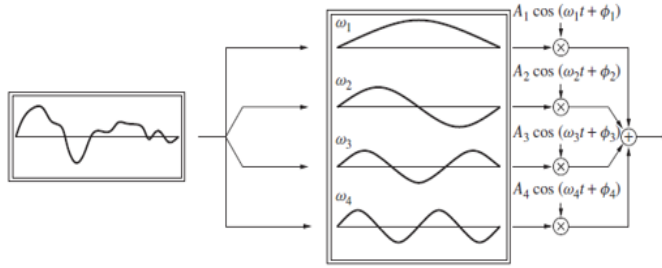


Şekil 2.1. Gerçek bir sistem ya da cismin fiziğe dayalı ses simülasyonu oluşturulurken genel olarak izlenen adımlar.

2.1. Modal Sentezleme Yöntemi

Fiziksel modelleme ile ses sentezinde kullanılan uzun geçmişine sahip farklı bir yaklaşım, bir frekans alanına (domain) veya kütlesi farklı alanlara dağılmış nesnelerin titreşiminin modal (kip) tanımına dayanır. Modal sentez, titreşimli bir nesnenin karmaşık dinamik davranışını bir dizi mod (uzamsal biçimleri eldeki problemin öz-fonksiyonlarına ve sınır şartlarına bağlı parçalar) grubunun katkıları ile inceler. Bu tür modların her biri, tek bir karmaşık frekansta salınır. Gerçek değerli problemler için, bu karmaşık frekanslar karmaşık eşlenik çiftlerde ortaya çıkar ve “mod” bu öz-fonksiyonların ve frekansların çifti olarak kabul edilebilir. Sinüzoidlerin insan sesi algısındaki özel önemini göz önünde bulundurarak, böyle bir ayrışma, özellikle ses sentezi anlamında yararlı fikirlere yol açabilir.

Modal sentez, ilaveli sentez olarak, bir kaynağın eklenecek bir çok bileşen ile tanımlanmasını içerir. Modal sentezleme modelinde, mod frekanslarının vektöründen, bozulma oranları vektöründen ve nesne yüzeyinin farklı konumlarında her bir mod için tanımlanmış kazanç matrisinden oluşur. Osilatörlerin frekansları ve sönümleri, nesnenin geometrisi ve malzeme özellikleri tarafından yönetilirken, modların bağlantı kazançları, mod şekilleri tarafından belirlenir ve nesnenin temas yerine bağlıdır. Analiz edilen nesne isteğe bağlı bir şekle sahip olabileceğinden, modal analiz yapmak için genellikle sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılır, bu da genel olarak tatmin edici sonuçlar verir (Limpens,2009).



Özdeğer problemi: mod fonksiyonlarını

belirleme mod frekansları $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$

Şekil 2.2. Modal sentez: Doğrusal, dağınık zamana bağlı bir sorunun davranışı, her biri belirli titreşim frekansına sahip çeşitli modlara ayrılabilir. Ses çıkışı, uyarma ve çıkış parametrelerine bağlı olarak bu tür frekansların yeniden birleştirilmesiyle elde edilebilir.

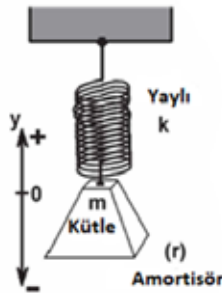
Bu tür modların her biri, tek bir frekansta salınır. Modal sentez, MOSAIC ve Modalys ses sentezi yazılım paketlerinin temelini oluşturur ve CORDIS ile birlikte fiziksel modelleme ilkelerini kullanan ilk kapsamlı sistemlerden biriydi. Daha yakın zamanlarda, başta Rabenstein ve Trautmann olmak üzere çeşitli araştırmacılar, noktadan noktaya transfer fonksiyonlarını türetmek için modal teknikleri kullanan fonksiyonel dönüşüm yöntemi (FTM) adı verilen ilgili bir yöntem geliştirdiler. Temel modal sentez stratejisi Şekil 2.2’de gösterildiği gibidir. Dört farklı frekanstaki temel sinüs işareti birleşerek solda görülen işareti oluşturmaktadır.

Modal sentez genellikle “frekans alan” yöntemi olarak adlandırılrsa da bu işleminin doğru bir tanımı değildir. Geçici Fourier dönüşümleri kullanılmaz ve çıkış dalga formu doğrudan zaman alanında üretilir. Esasen, her bir mod skaler ikinci dereceden sıradan diferansiyel denklem ile tanımlanır ve sayısal bir çözüm elde etmek için çeşitli zaman entegrasyon teknikleri kullanılabilir. Kısacası, modal sentezi bir frekans etki alanı yöntemi olarak değil, köşegenleştirilen doğrusal bir problem için sayısal bir yöntem olarak düşünmek daha iyidir (Bilbao,2009).

2.2. Kütle-Yay Sistemi

Sonlu elemanlara benzer şekilde, kütle etkileşimi, hücresel veya parçacık sistemleri olarak da adlandırılan kütle-yay sistem, bir nesneyi küçük parçacıklara ayırarak onların kütle-yay çiftlerinden kurulmasını amaçlar. Kütle yay sistemleri tartışmasız tüm deforme olabilen modellerin en basit ve en sezgisel sistemidir. Sadece kütsüz bir yay ağı ile birbirine bağlanan nokta kütlelerinden oluşur ve her parçacığın hareketi daha sonra Newton'un ikinci yasası tarafından yönetilir. Bu nedenle, kütle-yay sistemleri sadece birleşik adi diferansiyel denklemler (ODE'ler) sisteminin çözümünü gerektirir.

Ayrık fiziksel modeller kullanılarak nesnelere yüzey titreşimlerinin gerçek zamanda modellenmesi, Florens ve Cadoz [Florens 1991] tarafından 3D şekilleri modellemek için kullanılan sönümlü bir kütle yay sistemi ile tanıtılmıştır. CORDIS-ANIMA sistemi daha sonra fiziksel tabanlı ses sentezi için geliştirilmiştir. Bir kütle-yay modeli, bir nesnenin geometrisine ve birkaç malzeme parametresine dayanarak yüzey deformasyonuna yaklaşmak üzere inşa edilmiştir. Önceki yaklaşımlarda kullanılan FEM (Finite Element Model) modellerinden daha kaba yaklaşım yapmalarına rağmen, kütle-yay sistemlerinin ses üreten yüzeylerin mikro titreşimlerini uygun bir şekilde modellediği görülmektedir (Limpens,2009).



Şekil 2.3 Kütle-yay sistemi

Şekil 2.3’de yaya bağlı bir kütleden oluşan mekanik bir sistem gösterilmektedir. Kütle m ile gösterilmiştir. İdeal bir yay, onu dinlenme konumundan çıkarmak için gerekli kuvvet ile karakterize edilir: Birim mesafe başına bu kuvvet k ile gösterilir. Kütlenin yer değiştirmesi, yukarı doğru yer değiştirme için pozitif ve aşağı doğru yer değiştirme için negatif değer alan bir y değişkeni ile gösterilir.

Yayın sıkışması ve gerilmesi ısı kaybına ve kütle-yay üzerinde hava direnci gibi kayıplara yol açar. Toplam kayıplar r ile gösterilir.

$$F=ma$$

$$-ky - mg - rv = ma \quad (2.1)$$

$-ky$ terimi F kuvveti altında hareket eden yay kuvvetini temsil eder. Kütle aşağı çekilirse, $-ky$ kuvveti pozitifdir, çünkü y negatiftir. $-mg$ terimi kütleyle etkiyen yerçekimidir. $-rv$ terimi ise, v hızıyla orantılı olarak hareket eden sistemin kayıp kuvvetlerini yansıtır. Hız ve ivme için matematiksel ifadeler denklem 2.2’de verilmiştir (Cook, 2002).

$$v = dy/dt \quad a = \frac{dv}{dt} = d^2y/dt^2 \quad (2.2)$$

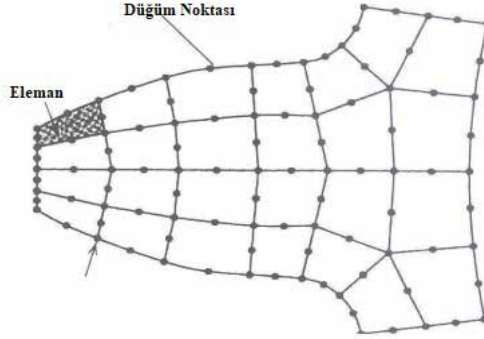
Özellikle 1-D cisimlerin (gitar teli, insan saçı vb) görsel modellemesinde kullanılan kütle-yay sistemi, 1-D cisimlerin çıkaracağı seslerin de sentezini modellemede tercih edilmektedir.

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir. Bu yöntem, “parçadan bütüne gitme” genel prensibine dayanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme götürmeyi amaçlar. Bu yöntemde çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen çok sayıda, basit, küçük ve birbirine bağlı alt bölgelere

ayrılmaktadır. Kısacası burada oldukça büyük olan bir model daha kolay çözülebilir diye çok sayıda düğüm noktalarıyla birbirlerine bağlanmış küçük parçalara ayrılmaktadır (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Sonlu elemanlarla tanımlanmış bir yüzey üzerinde Düğüm Noktası ve Yüzey-Elementi

Şekil 2.4. bir yüzeyin modellenmesi için kullanılmakla birlikte, yüzey titreşimi ile oluşan sesin de modellenmesinde kullanılabilir. Özellikle birbirleri ile çarpışan cisimlerin yüzeysel titreşimler sebebi ile çıkaracağı seslerin modellenmesi için uygun bir yöntemdir.

2.4. Geometrik Yöntem

Geometrik model bazen üç boyutlu (3D) bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli olarak adlandırılır ve fiziksel sistemleri tasarlamak için gerekli olan kritik bir gösterimdir. Geometrik model, SysML (Sistem Modelleme Dili) modelinin bir parçası değildir, ancak iki model, sistemin her iki temsilinin de birbiriyle tutarlı olmasını sağlamak için entegre edilebilir. Geometrik model, sistemin ve bileşenlerinin başka bir görünümüdür. Belirli bir bileşenin mekânsal boyutunu belirleyen geometrik ilişkileri açıklar. CAD modeli, malzeme özellikleri gibi birçok ek özellik de içerebilir.

SysML ‘deki sistem modeli ve CAD modeli, bir sistemin kavramsal tasarım aşamasından başlayıp geliştirme yaşam döngüsü boyunca devam ederek eş zamanlı olarak geliştirilmelidir. Sistem modeli işlevselliği, arabirimi, performansı ve kalite özelliklerini belirleyen bileşenin soyut bir temsilini sağlarken, CAD modeli bileşenin geometrik temsilini sağlar. Sistem modeli, gereksinimlerle bileşen ilişkileri kullanılabilir, daha genel bileşenleri tanımlayabilir ve bileşenlerin ortamını belirtebilir. Sistem modeli, geometrik modelin gerçekleştirebileceği özellik bilgileri sağlar. Geometrik model ise, kritik boyutlandırma ve toleranslar, diğer fiziksel özellikler ve mekanik ara bağlantı da dahil olmak üzere sistem modeline temel bilgiler sağlar (Friedenthal,2015).

Sonuçlar

Bu çalışmada 1993-2020 yılları arasında yayınlanmış, fizik tabanlı ses sentezi simülasyon örneklerini içeren çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir.

Son yıllarda, fiziksel etkileşimlerin görsel gerçekçiliğini mümkün kılan hesaplama tekniklerinin gelişmesi, algısal yaklaşımların ve hesaplama gücünün artırılması ile bilgisayar grafikleri alanında interaktif uygulamalarda gelişim görülmeye devam etmektedir. Benzer şekilde interaktif ses sentezi çalışmaları da güncel araştırma konuları arasındadır.

Bilgisayarların teknik özellikleri de geliştikçe daha karmaşık olayları fiziksel modeller ile simüle edebilmek, daha az hesaplama maliyetli çözümler üretmek mümkün olmaya başlamıştır.

Özellikle interaktif cisimlerin ürettiği seslerin, cisimlerin görüntüleri ile birlikte fizik tabanlı modellenmesi için farklı yaklaşımların bir arada kullanılması gerekmektedir.

Fizik tabanlı modellerin ortak özelliği; gerçek hayatta sesin oluşumuna sebep olacak etkileşimlerin, insan kulağının algılayabildiği frekansta ses işaretlerini üretecek fiziksel kurallara uygun bu modelin, yazılım ile birlikte bir bilgisayar donanımına tatbik edilebilmeye uygun olmasıdır.

Cisimlerin geometrik şekillerine, birbirleri ile interaktif etkileşimlerinin türüne, maddesel yapılarına (katı, sıvı), görsel simülasyonla birlikte sesin üretilmesine, kısaca simüle edilmek istenen fiziksel olaya göre kullanımı uygun olan bir çok fizik tabanlı model geliştirilmiştir. Yöntemlerin bir arada kullanıldığı karma modeller hesaplama güçlüklerinin giderilmesi ve yazılım desteği ile uyumun sağlanmasına katkı sağlamaktadır.

Not: Bu yayın İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans öğrencisi Elif Ekşi'nin tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Karjalainen, M., Välimäki, V., & Jánosy, Z. (1993, September). Towards high-quality sound synthesis of the guitar and string instruments. In Proceedings of the International Computer Music Conference (pp. 56-56).
- [2] De Poli, G., & Rocchesso, D. (1998). Physically based sound modelling. *Organised Sound*, 3(1), 61-76.
- [3] Van Den Doel, K., Kry, P. G., & Pai, D. K., (2001),” FOLEYAUTOMATIC: Physically-based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 537-544).
- [4] Pai, D. K., Doel, K. V. D., James, D. L., Lang, J., Lloyd, J. E., Richmond, J. L., & Yau, S. H., (2001),” Scanning Physical Interaction Behavior of 3D Objects”, In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 87-96).
- [5] O'Brien, J. F., Cook, P. R., & Essl, G., (2001),” Synthesizing Sounds from Physically Based Motion”, Synthesizing sounds from physically based motion. In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 529-536).
- [6] Rath, M., Rocchesso, D., & Avanzini, F., (2002),” Physically-based real-time modeling of contact sounds”, In Proc. Int. Computer Music Conf.).
- [7] Cook, P. R., (2002),” Sound Production and Modeling”, Sound production and modeling. *IEEE Computer Graphics and applications*, 22(4), 23-27.

- [8] Bank, B., Avanzini, F., Borin, G., De Poli, G., Fontana, F., & Rocchesso, D., (2003), "Physically Informed Signal Processing Methods for Piano Sound Synthesis: A Research Overview", Physically informed signal processing methods for piano sound synthesis: a research overview. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2003(10), 464536.
- [9] Doel, K. V. D. (2005). Physically based models for liquid sounds. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2(4), 534-546.
- [10] Zhang, Q., Ye, L., & Pan, Z., (2005), "Physically-based Sound Synthesis on GPUs", In *International Conference on Entertainment Computing* (pp. 328-333). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [11] Raghuvanshi, N., & Lin, M. C., (2006), "Interactive Sound Synthesis for Large Scale Environments", In *Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games* (pp. 101-108).
- [12] Barbic, D. L. J. J., & Pai, D. K., (2006), "Precomputed Acoustic Transfer: Output-sensitive, accurate sound generation for geometrically complex vibration sources", *Precomputed Acoustic Transfer: Output-sensitive, accurate sound generation for geometrically complex vibration sources*.
- [13] Raghuvanshi, N., & Lin, M. C., (2007), "Physically Based Sound Synthesis for Large-Scale Virtual Environments", *IEEE Computer Graphics and Applications*, 27(1), 14-18.
- [14] Rabenstein, R., Petrausch, S., Sarti, A., De Sanctis, G., Erkut, C., & Karjalainen, M. (2007). Blocked-based physical modeling for digital sound synthesis. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(2), 42-54.
- [15] Peltola, L., Erkut, C., Cook, P. R., & Valimaki, V., (2007), "Synthesis of Hand Clapping Sounds", *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 15(3), 1021-1029.
- [16] Bergou, M., Wardetzky, M., Robinson, S., Audoly, B., & Grinspun, E., (2008), "Discrete Elastic Rods", In *ACM SIGGRAPH 2008 papers* (pp. 1-12).
- [17] Chadwick, J. N., An, S. S., & James, D. L., (2009), "Harmonic Shells: A Practical Nonlinear Sound Model for Near-Rigid Thin Shells", *ACM Trans. Graph.*, 28(5), 119.
- [18] Zheng, C., & James, D. L., (2009), "Harmonic Fluids", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(3), 1-12.
- [19] Chadwick, J. N., & James, D. L., (2011), "Animating Fire with Sound", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 30(4), 1-8.
- [20] Chadwick, J. N., Zheng, C., & James, D. L., (2012), "Precomputed Acceleration Noise for Improved Rigid-Body Sound", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(4), 1-9.

- [21] An, S. S., James, D. L., & Marschner, S., (2012), "Motion-driven Concatenative Synthesis of Cloth Sounds" *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(4), 1-10.
- [22] Bilbao, S., Hamilton, B., Torin, A., Webb, C., Graham, P., Gray, A., ... & Perry, J., (2013), "Large Scale Physical Modeling Sound Synthesis", In *Proceedings of the Stockholm music acoustic conference (SMAC2013)*, Stockholm (pp. 593-600).
- [23] Ren, Z., Yeh, H., & Lin, M. C., (2013), "Example-Guided Physically Based Modal Sound Synthesis", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(1), 1-16.
- [24] Langlois, T. R., & James, D. L., (2014), "Inverse-Foley Animation: Synchronizing rigid-body motions to sound", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(4), 1-11.
- [25] Rungta, A., Schissler, C., Mehra, R., Malloy, C., Lin, M., & Manocha, D., (2016), "SynCoPation: Interactive Synthesis-Coupled Sound Propagation", *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 22(4), 1346-1355.
- [26] Schweickart, E., James, D. L., & Marschner, S., (2017), "Animating Elastic Rods with Sound", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 36(4), 1-10.
- [27] Bank, B., & Chabassier, J., (2018), "Model-based digital pianos: from physics to sound synthesis", *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(1), 103-114.
- [28] B. Bank and J. Chabassier, (2019), "Model-Based Digital Pianos From physics to sound synthesis", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 1, pp. 103-114.
- [29] Bilbao, S., Desvages, C., Ducceschi, M., Hamilton, B., Harrison-Harsley, R., Torin, A., & Webb, C., (2020), "Physical Modeling, Algorithms, and Sound Synthesis: The NESS Project", *The NESS Project. Computer Music Journal*, 43(2-3), 15-30.
- [30] Bilbao, S., (2009), *Numerical Sound Synthesis*, Singapur, John Wiley & Sons.
- [31] Cook P., (2002), *Real Sound Synthesis for Interactive Applications*, New York, Routledge.
- [32] [https://\(www.serdarkorkut.com\)](https://(www.serdarkorkut.com)). [09,05,2017, sonlu-elemanlar-metodu]
- [33] Friedenthal, S., Moore, A., Steiner, R., (2015), *A Practical Guide to SysML The Systems Modeling Language*, United States of America, Morgan Kaufmann.