

ÇİZİM TABLETLERİ İÇİN FİZİKSEL MODELLEME TEMELLİ SENTEZLEYİCİ

M. Kemal Karaosmanođlu
Utku Uzmen

Abstract

A Physical Modeling Synthesizer for Graphics Tablets

In the field of music technology, as synthesizers and control interfaces have grown to be independent elements, an abstraction layer between them has come into existence. This development has enabled both of these elements to advance in a multitude of directions, but also hindered the realization of their full potential. This is especially noticeable in the realm of physical modeling synthesis. With the real-time use of such synthesis techniques becoming more accessible and widespread, designing tightly coupled synthesis algorithms and control interfaces is now also a relevant area of interest. Traditional acoustic instruments feature such tightly coupled control mechanisms and sound sources, which enhances their musical expressibility, enables virtuosity and creates a more consistent performance experience. For digital synthesizers, on the other hand, the dominant piano keyboard interface has served to limit their development outside of a few directions. In designing music software and hardware, the accumulated experience, knowledge and traditions should not play such a high role as to discourage novel approaches. Tightly coupled synthesizer and control interface designs instead promise improvements in usability and expressibility. In this work, the existing graphics tablet control interface was chosen as a starting point, and a banded waveguide algorithm was designed to model uniform slender bars. This article, which in essence is a summary of a bachelor's degree graduation project, also describes Plaka, a software synthesizer that implements the aforementioned algorithm which supports microtonal intervals. With the widespread use of tablet computers in today's world, further development of such projects is thought to be relevant for a growing number of musicians.

Keywords: synthesizers, physical modeling, user interface, tablet

Giriş

20. yüzyılın başlarında, elektronik ses üretme ve işleme yöntemlerinin yeni tını arayışlarına bir cevap oluşturacak noktaya gelmesiyle, bu sistemleri kontrol etme yaklaşımları da bir araştırma ve deney alanı olarak önem kazandı. Tasarlanan elektronik aygıtların özgünlükleri ve sundukları yeni olanaklar, kontrol mekanizmalarıyla ses üretme ve işleme yöntemlerinin birbirlerine bağlı biçimde evrilmelerini kaçınılmaz kıldı. Bu paralellik, Theremin'in kesintisiz jestlere dayalı icrasında, ondes Martenot'nun vibrato için 'metal halka' mekanizmasında ve elektronik *sackbut*'un sol el için tını biçimlendirme kontrollerinde görülebilir. Fakat dış kaynaklı elektrik sinyalleriyle kontrol edilebilen modüler sentezleyicilerin ortaya çıkmasıyla birlikte, sentezleyici ve kontrol mekanizması birbirlerinden bağımsız aygıtlara dönüştüler (Paradiso ve O'Modhrain 2003). Bu ayrılma, çok çeşitli kontrol yaklaşımlarının tasarlanmasını destekledi. 1980'lerin başında MIDI standardının yaygınlaşmasıyla, dijital temelli aygıtlar arasında da aynı bağımsızlığın önü açılmış oldu. Bu bağımsızlığın sözü edilen avantajına karşılık dezavantajı, birbirlerinin özelliklerinden ancak yüzeysel olarak haberdar olan sentezleyici - kontrol aygıtı eşleşmelerinin oluşmasıydı. Piyano klavyesini temel alan bir klavye sistemi ve diğer sentezleyici özelliklerini genellemelerle temsil eden

ikincil düğmeler, tekerlekler ve benzeri bileşenlerden oluşan arayüzler, baskın kontrol aygıtlarının temeli oldu. Sentezleme yöntemleri de, elektronik müzik çalgılarının popüler kültür içinde yaygın olarak kabul görmesine paralel bir hızla evrimlerini sürdürdü. Güncel teknolojik olanaklar, bugünün elektronik müzik bestecisine, analog sentezleme yöntemlerinden örnekleme temelli algoritmalar ve fiziksel modelleme sistemlerine kadar çok sayıda ses üretme tekniği sunmaktadır.

Sentezleyici Tasarımı

Dijital temelli teknolojilerin olgunlaşması, özellikle son on beş yılda üretilen sentezleyicilerin büyük çoğunluğunun dijital sentezleyici sınıfında olmasını mümkün kılmıştır. Bu sentezleyiciler, kendi donanımları üzerinde çalışan ve bilgisayar yazılımı olarak kullanılan sentezleyiciler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilirler. Kendi donanımları üzerinde çalışan sentezleyicilerde, sentezleme akışının yönlendirilmeye açık parametreleri için donanım üzerinde bulunan fiziksel mekanizmalara ek olarak, sözkonusu parametreler MIDI üzerinden de kontrole açılır. Yazılım formundaki sentezleyiciler de çoğunlukla bilgisayar ekranındaki grafik arayüzlerine ek olarak bütün parametrelerini MIDI üzerinden dışarıdan müdahaleye açarlar.

Elektronik müzik çalgıları ve ilgili aygıtların giderek büyüyen bir pazar payı oluşturmasının sonucu olarak, yeni kontrol aygıtları ve tasarlanan arayüz çeşitlerinin sayısı önemli bir artış göstermiştir. Bu ürünler arasında, geleneksel piyano klavyesini veya standartlaşmış düğme ve tekerlekleri temel alan arayüzlerin yanı sıra, dokunmaya duyarlı ekranlar (Lemur Overview, Tarih yok), uzaktan hareket algılayıcıları (Baum, Curry ve Winter 2007) ve biyolojik sinyal çeviricileri (Knapp ve Lusted 1990) gibi aygıtlar bulunmaktadır. Güncel kontrol aygıtlarının büyük çoğunluğu, kontrol bileşenlerinden elde ettikleri değerleri, kontrol edilen hedefe MIDI mesajları olarak gönderirler. MIDI standardının soyut kontrol mesajı tanımlamasına bağlı olarak, kontrol aygıtı nasıl bir parametre için mesaj gönderdiğini bilmeyebilir.

MIDI standardı, buluşturduğu aygıtlarla ilgili sadece yüzeysel tanımlamalar yapmaktadır. Bu tanımlamalar, 12 tondan oluşan yaklaşık olarak 10.5 oktavlık bir 'nota' sistemi, zamanlamayla ilgili mesajlar, program değişim mesajları, perde sündürme (*pitch wheel*) ve benzeri önceden tanımlanmış bazı parametre mesajları ve genel kontrol mesajları içerir (MIDI Manufacturers Association). İletişim için bu standardı kullanan kontrol aygıtları, kontrol bilgilerini hedef aygıtı göndermek için, genellikle MIDI'nin genel kontrol mesajlarını kullanmaktadırlar. MIDI kontrolünün kontrol aygıtları tarafına yansıyan en yaygın uygulaması, aygıt üzerinde bulunan her düğme, tekerlek ya da kaydırma çubuğu için bir kontrol mesajı numarası tanımlanmasıdır. Aynı mesaj numarası, kontrol edilecek olan hedef aygıtta da istenen parametre için tanımlanır. Tanımlanan bu sistemde, sentezleyici parametreleri ve onların kontrolünü sağlayacak bileşenler arasında önceden belirlenmiş özellikler bulunmadığı için, her iki tarafta da tasarımlar, MIDI standardının getirdiği genellemeyi benimsemek zorunda kalmaktadır. Bu genellemenin, 1970 - 1990 arasındaki analog sentezleyici ve benzeri aygıtlar dönemine ait ürünlerin tasarımında yeterli bir kullanılabilirlik sağladığı söylenebilir. Nitekim MIDI standardı da aynı dönemde, bu tür aygıtlara yönelik olarak hazırlanmıştır. Fakat genel olarak kullanılabilirlik gözönüne alındığında, bu tür bir eşleşmenin, hem sentezleyicinin hem de kontrol mekanizmasının potansiyelini ortaya koymada eksikleri olması kaçınılmazdır. Özellikle en yaygın arayüz türlerinden biri olan piyano klavyesinin, sentezleme yöntemlerinin potansiyelinin ortaya çıkmasında kısıtlayıcı bir rolü olduğu açıktır. Geleneksel akustik çalgılara bakıldığında ise, ses üretim yöntemiyle kontrol mekanizması arasındaki güçlü bağ görülür. Bu bağ, sözkonusu

çalğının anlatım dilini genişletir, icrasında ustalığı destekler ve icra deneyimini bütününde daha tutarlı kılar.

Buraya kadar sözü edilen hususlar ışığında, bu projede bir fiziksel modelleme algoritmasını temel alan bir sentezleyici oluşturma fikrinden yola çıkılmış, önce bir kontrol mekanizması seçilmiş ve bu mekanizmayla birlikte çalışmaya yönelik bir sentezleme algoritması tasarlanmıştır. Seçilen kontrol mekanizması, özellikle görsel tasarım alanında yaygın olarak kullanılan çizim tabletleridir. Piyasada kolayca bulunan bu aygıtlar düz bir yüzey ve bu yüzey üzerinde çizim yapmak için kullanılan bir kalemle oluşur ve yatay/dikey hareket bilgilerine ek olarak kaleme uygulanan basıncı da algılayabilir. Bu kontrol mekanizmasıyla eşleşmesi için sentezleyici tarafında da, sivri bir nesnenin, metal çubuk ve benzer nesnelere üzerine sürülmesiyle oluşan titreşimleri matematiksel olarak modelleyen, *kısıtlanmış bantlı dalga yönlendirici* tekniği üzerine kurulu bir algoritma kullanılmıştır. Böyle bir eşleşmeyle, sözkonusu fiziksel modelleme sentezleyicisinin basit hareketlere dayalı yalnız kontrol mekanizması ile olabildiğince etkin bir biçimde kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Arayüz Ve Sentezleme Tekniği Seçimi

Canlı icranın ön planda olduğu bir arayüz ve sentezleme sisteminin kurulmasında, öncelikle bu sistemin kullanımı için esas olan bazı noktalar belirlenmiştir. Bu noktalar, önerilen sentezleme tekniğinin eşzamanlı çalışabilir olması; tekniğin uygulandığı yazılımın uzmanlık gerektirmeyecek biçimde kolay kullanılabilirliği; arayüz mekanizmasının duyarlılık sınırları, ergonomik özellikleri, ürün olarak erişilebilirliği; sentezleme tekniği ile arayüz mekanizmasının anlamlı biçimde eşleşmesidir. Çizim tabletleri, bilgisayarlara kâğıt ve kalem kullanarak çizim yapma deneyimini katmak amacıyla ortaya çıkmış veri girişi aygıtlarıdır. Tipik bir çizim tableti, çizim yapılan plastik, düz bir yüzeyi ve bu yüzey ile kullanılmak üzere tasarlanmış bir kalemi (*stylus*) içerir. 1970'lerde endüstriyel ve bilimsel çizim işleri için üretilen, bugün kullanılan tabletlerin ataları sayılabilecek ilk tabletlerin maliyetleri oldukça yüksekti. Bu tabletler yatay ve dikey konum bilgileri dışında veri girişi sağlamıyordu ve sözkonusu teknolojinin olgunlaşmamış olması nedeniyle kullanımları zordu. Günümüzde profesyonel çizim işlerine yönelik üretilen tabletlerde ise, kalem tarafından yayılan ve sayısal veri içeren radyo dalgaları, plastik çizim yüzeyinin altında bulunan yüksek çözünürlüklü, duyarlı bir ızgara tarafından algılanır ve edinilen veriler paketler halinde bilgisayara gönderilir. Kalem ucunun bağlı olduğu yaya uygulanan basınç, kapasitans değişikliğine sebep olarak bu verinin kalem içindeki devre tarafından ölçülmesini mümkün kılar. Bazı kalemler üzerinde faredakilere benzer işlevi olan düğmeler de bulunabilir. Kalem içinde bulunan bir pil, radyo dalgalarının yayılması için gereken enerjiyi sağlar. Bu projede kapsamındaki bilgisayar kodlarını geliştirme/sınama aşamasında kullandığımız Wacom marka tabletlerde, çizim yüzeyinin altındaki ızgara dönüşümlü olarak radyo dalgası yayma ve algılama durumlarına geçmektedir. Bu dönüşüm, yaklaşık olarak saniyede 50 000 kez gerçekleşir. Kalem içindeki elektromanyetik rezonans özellikli devre, dalga yayma durumu sırasında ortaya çıkan enerjiyi kullanarak, kalem ucuna uygulanan basınç ve kalem üzerindeki düğmelerin durumu gibi bilgileri, radyo dalgaları üzerine kodlayarak çizim yüzeyinin altındaki ızgaraya geri gönderir. ızgarayı oluşturan tellere ulaşan enerji düzeylerine dayanarak kalem dikey ve yatay konumu hesaplanır (Knauer, Tarih yok). Giriş düzeyindeki tablet modellerinde ortalama olarak yatay düzlemde 5000 dpi, dikey düzlemde 3000 dpi ve basınç için 512 düzeyli çözünürlük bulunur. Profesyonel kullanıma yönelik modellerde çözünürlük değerleri yükselmekte ve basınca ek olarak kalem ile çizim yüzeyi arasındaki açığı, kalem kendi etrafında dönmesi gibi veriler de bilgisayara aktarılmaktadır.

Çizim tabletlerinde son yıllarda görülen gelişmelerden biri, ekranlarla birleşik hale gelmeleridir. 'Tablet PC' ve profesyonel çizim ekranlarında uygulanan bu birleşimde çizim yüzeyinin altındaki izgara LCD düzeneğinin altına yerleştirilmekte, ekranın cam veya plastik ön yüzeyi, çizim yüzeyi olarak kullanılmaktadır. Böylece, kullanıcı ekranda gördüğü arayüz bileşenlerini doğrudan kontrol edebilmekte, göz ve el arasındaki eşgüdüm önemli ölçüde artmaktadır. Çizim tabletleri, kâğıt ve kalem ile çizim deneyimini aktarmaya yönelik tasarımları nedeniyle, kullanılması kolay kontrol mekanizmalarıdır. Çizim tabletleriyle ilk kez karşılaşan, kalem tutma ve çizim yapma temel yetilerine sahip bir bilgisayar kullanıcısının bu mekanizmaya alışıp verimli bir biçimde kullanması, çoğu tabletle birlikte sunulan alıştırmaya yazılımlarının da yardımıyla, birkaç saat içinde gerçekleşebilmektedir.

Ses Uygulamalarında Kullanım ve Başka Aygıtlarla Karşılaştırma

Son on beş yıl içinde bilgisayarların ses üretiminde yaygın biçimde kullanılmasıyla birlikte, bilgisayarlarla kullanılabilecek amaca uygun arayüz arayışları da önem kazanmıştır. Çizim tabletlerinin satış fiyatlarının düşmesi, programlama açısından yazılımlara görece kolay eklenilebilmeleri ve çoğu MIDI temelli kontrol aygıtından daha iyi çözünürlükte veri sağlayabilmeleri, sınırlı da olsa ses uygulamalarında da kullanıma girmelerini sağlamıştır. Çizim tabletlerinin ses uygulamalarındaki en yaygın kullanımı, tablet verilerinin MIDI kontrol mesajlarına dönüştürülerek sentezleme yazılımlarına gönderilmesini sağlayan aracı yazılımlarla birlikte görülmektedir (Fournel, Tarih yok), (Carstens, Tarih yok). Bu yazılımlarda, tabletin dikey ve yatay konumu, basınç düzeyi, kalem eğimi gibi bilgilerin her biri birer kontrol mesajına atanır, sözkonusu veri değerleri 0 - 127 arasında değerlere ölçeklenir ve alıcı tarafa gönderilir. Fakat tabletlerin ses uygulamalarındaki potansiyelinin ortaya çıkarılmasında MIDI çerçevesinin dışına çıkılması, sağladıkları duyarlık ve çözünürlüğün kullanılabilirliği açısından önemlidir.

Varolan çalgıları modelleme, yeni çalgı veya sentezleme fikirleri önerme, yeni icra pratikleri ve mekanizmaları araştırma gibi alanları konu alan daha önce yapılmış birçok projede, projenin amacına yönelik bir kontrol mekanizmasının tasarlanması ve bu mekanizmanın hayata geçirilmesi, merkezî önem taşımaktadır. Bu projelere örnek olarak, Tibet çanaklarını modelleyen ve modelin 'doğal' biçimde icrasını mümkün kılacak bir aygıt öneren HyperPuja projesi (Seraphin ve Young 2004), elektronik sitar tasarımı projesi olan ESitar (Kapur, et al., 2004) ve Japon vurmali çalgı geleneğine yeni bir arayüz öneren AoBachi (Young ve Fujinaga, 2004) verilebilir. Sözkonusu projelerin ortak yanı, ses üretimi için bir teknikten yola çıkılarak, bu tekniğe uygun kontrol aygıtı tasarlanmasıdır. Bu yaklaşımın olumlu sonucu, seçilen teknik için ileri derecede eşleşmeye uygun bir kontrol mekanizması kullanılmasının uygulanabilirliğidir. Öte yandan araştırma projelerine özgü kontrol aygıtlarının seri üretim yapılmaması nedeniyle proje dışında çok sınırlı kullanım bulması, olumsuz sonuçlardan biridir. Bunun dışında, donanım tasarımının projelerin maddi gereksinimlerini arttırması da sözkonusudur.

Seri üretilen ve kolayca bulunabilen bir ürün kategorisindeki çizim tabletlerinin bir ses uygulamasında arayüz olarak kullanılması önerisiyle, benzer projeler için sayılan olumsuz sonuçlardan kaçınılması; bu projede tasarlanan yazılımın, proje ve akademik ortamlar dışında da kullanımının mümkün olması amaçlanmıştır.

İncelenen Akustik Çalgılar

Çizim tableti için bir sentezleme tekniğinin oluşturulmasında hem fiziksel özellikleri hem de kullanımları açısından vibrafon, armonika ve Tibet çanağı gibi bazı akustik çalgılar incelenmiştir. Projenin yan ürünü Plaka yazılımının, özelliklerini en gerçekçi yansıttığını düşündüğümüz çalgı olan Tibet çanakları, metal alaşımlarından veya camdan yapılan, yarım küreden silindire kadar değişebilen biçimlerde üretilen çalgılardır (Şekil 1). Çanak vurmali çalgı olarak kullanıldığında çan sesine benzer bir tını üretmektedir. Tınının en önemli özelliği, frekansları birbirine yakın olan titreşim modlarının yarattığı vurulardır. Tını niteliği büyük ölçüde çanağın şekline, üretildiği maddelere ve boyutlarına bağlıdır (Young ve Essl, 2003). En yaygın kullanım yöntemi, çanağın kenarına tahta bir tokmağın sürülmesidir. *Puja* adı verilen bu tokmağın, icracı tarafından çanağın çevresi boyunca çeşitli hızlarla ve kuvvetlerle sürülmesi, sönümlenmesi uzun zaman alan çınlamalı bir ses yaratır (Young ve Essl, 2003).



Şekil 1. Tibet çanağı ve tokmağı (*puja*) (Tuner, Dickerson ve Dickerson tarih yok)

Sentezleme Tekniği Olarak Fiziksel Modelleme

Fiziksel modelleme, sentezlemeyi oluşturan aşamaların fiziksel olaylar üzerine kurulu olduğu algoritmaların kullanıldığı bir yöntemdir. Böyle bir algoritmanın oluşması için, öncelikle bir çalgının veya daha basit bir nesnenin titreşim mekanizmaları matematiksel olarak tanımlanır. Elde edilen modelde, hedeflenen uygulamanın sınırlarına göre çeşitli indirgemeler yapılabilir. Bunun sonucunda, parametreleri modellenen nesnenin ya da titreşim mekanizmasının fiziksel özelliklerine karşı gelen bir algoritma elde edilir. Bu algoritma, modellenen çalgıyı gerçekçi biçimde canlandıracak parametrelerle çalıştırılabileceği gibi, çalgının fiziksel sınırlarının ötesine geçen parametrelerle çalıştırılarak 'imkânsız' durumları da canlandırabilir.

Fiziksel modellemenin temelindeki kavramlar 18. yüzyıla kadar gitmektedir (Smith, 1992). Fakat tasarlanan algoritmalar, genellikle işlem hacmi yüksek uygulamalar ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden fiziksel modelleme tekniklerinin özellikle eşzamanlı kullanımı, ancak yakın geçmişte mikroçiplerin ve diğer ilgili donanımların yeterli hızlara ve kapasitelere erişmeleriyle mümkün

olmuştur. Bunun yanısıra, fiziksel modelleme uygulamalarının sunduğu kontrol edilebilirliğin arayüzler tarafından yeterince temsil edilmemesi de, bu uygulamaların başarısını olumsuz yönde etkilemiştir (Carrillo, 2006), (Scavone, 1996). Fiziksel modelleme algoritmalarının en önemli özelliklerinden biri, ses oluşma sürecini somut parametreler yoluyla, modellenen sistemin doğasına uygun biçimde yönlendirmeyi sağlamalarıdır. Modelin kullanımında gerçekçilik amaçlanıyorsa, bu olanaktan yararlanmak bir zorunluluk halini alır. Buna bağlı olarak, fiziksel modelleme uygulamalarının icrasında, modelle iyi eşleşebilecek bir kontrol aygıtının kullanılması büyük önem taşır.

Çizim tabletlerinin mekanik özellikleri için temel model

Bir fiziksel modelleme çalışması olarak bu projede her ne kadar nesnel ölçümlere ve kanıtlanmış kuramlara dayanılsa da, tasarlanan modelde ve bu modelin uygulanmasında bazı genellemeler, indirgemeler ve amaçlanan kullanıma yönelik yalınlaştırmalar yapılmıştır. Tablet kontrol mekanizmasının titreşim mekanizmasına dönüştürülmesi en yalın biçimde ele alınmış, kalemin sivri uçlu bir nesne olarak, genel olarak düz, fakat küçük ölçekte düzensiz pürüzlerin bulunduğu yüzeyleri olan bir nesne üzerinde sürtünmeyle enine (*transverse*) dalgalardan oluşan titreşimler yarattığı bir temel model benimsenmiştir. Tablet çizim yüzeyinin tek bir parçadan oluşmasına karşın, birden fazla temel frekansta titreşim oluşmasını olanaklı kılmak için, çizim yüzeyinin birden fazla parçaya bölünebilir olması, birden fazla nesneyi temsil etmesi düşünülmüştür. Bu durumda fiziksel modelin yapıtaşı, bir çubuk olarak görülebilir. Çubukların her birinin titreşim durumu ötekilerden bağımsızdır. Çubukların uç durumları ve sönümlenme biçimi gibi bazı özelliklere bağlı olarak değişen titreşim modları ve genelleştirilmiş rezonans dereceleri bulunmaktadır. Sivri uçlu nesne ile bir çubuğa uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve uygulama bölgesi, titreşimin özelliklerini etkilemektedir.

Temel model için algoritma seçimi

Fiziksel modelleme algoritmalarının çoğu, dalga denkleminin modellenen çalgıya uygulanmış bir halinin çözümü üzerine kuruludur (Smith, 1992). Enstrümanın fiziksel yapısını temsil eden sanal bir 'ızgara'yı oluşturan bütün noktalar için çözüldüğü algoritmalar, işlem hacminin çok yüksek olduğu algoritmalar. Bir başka yaklaşımda, dalga denklemi, herhangi bir ses taşıyıcı ortam için enine dalgaları belirleyecek biçimde genelleştirilerek çözülür ve bu dalgaların ortam boyunca yayılması modellenir. *Dalga yönlendiricisi* adı verilen bu algoritma türünün işlem hacmi bazı fiziksel modelleme algoritmalarına göre oldukça düşüktür ve yayla çalınan çubuk, armonika ve çan benzeri çalgıların modellenmesinde kullanılmaya uygundur (Reyes, 2006). Dalga yönlendiricisi, bir dalganın yayıldığı herhangi bir ortam olabilir. Dalga kaynağı, bir telin çekilmesi, bir tel ile yay arasında sürtünme, bir ucu kapalı bir boruda hava basıncının değişmesi gibi çeşitli mekanizmaların modelleri tarafından sağlanabilir. Dalganın yayılımı, ortam yoğunluğu değişmediği sürece aynı kalır. Yayılma hatları, gecikme (*delay*) hatları ile temsil edilebilir. Ortam değişikliğinin yarattığı hareket dağılımları ve yansımaları bağlı oluşan dalga hızı ve frekanslarındaki farklar, çeşitli filtreler ile modellenilebilir. Söz konusu bileşenlerin çoğunun sonuç üzerinde değişikliğe yol açmadan sıralarının değiştirilebilir olması, bu bileşenlerin çeşitli noktalarda toplanarak sayılarının azaltılmasına ve işlem gereksiniminin küçültülmesine olanak sağlar. Güncel teknolojik olanaklarla bu algoritmalar canlı icralar için eşzamanlı olarak kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Kuram Ve Algoritma

Projemizde tasarlanan sentezleyicide, sürtünme ilkelerinden yola çıkan, modellenen nesnenin titreşim modlarına uygun frekanslarda dalgalar oluşturan ve çalışması boyunca sürekli olarak kullanıcı tarafından yönlendirilebilen bir süreç kullanılmıştır. Bu süreç, temelinde kuşak geçirimli (*bandpass*) filtreler ve gecikme (*delay*) hatları bulunan bir *kısıtlanmış bantlı dalga yönlendirici* algoritması ile modellenmiştir. Çizim tableti için seçilen temel modeldeki düz yüzey ile sivri uçlu nesne arasındaki sürtünme, yapışma-kayma (*stick-slip*) olarak tanımlanabilir (Akay 2002). Bu tür sürtünme, iki yüzeyin dönüşümlü olarak birbirlerine yapışma ve kayma durumlarına geçmeleriyle oluşur. Bu sürecin şematik yapısı Şekil 2'dedir.



Şekil 2. Sembolik yapışma-kayma sürtünme mekanizması

Burada **G** bir itici kuvvet mekanizmasını, **Y** bir yayı ve **K** nesnesi de yatay olarak itilen bir kütle temsil etmektedir. Yapışma aşamasında statik sürtünme katsayısı, kinetik sürtünme katsayısından daha büyüktür (**Y** üzerinde biriken kuvvet **K**'yi hareket ettirmek için yeterli değildir). Yüzeyle statik sürtünmeye karşı gelebilecek bir kuvvet uygulandığında sürtünmenin kayma durumuna geçmesi, sürtünme hızında ani yükselmeye yol açar. Kısa süreli de olsa, uzun süreli de olsa, kayma durumu düzensizlik yaratan bir durumdur (Akay, 2002). Anlık kaymalar, kapı menteşelerindeki gıcırımlarda görüldüğü gibi düzensiz aralıklarla ya da kemanın *spiccato* çalındığı durumlardaki gibi tekrarlı olarak ortaya çıkabilirler. Uzun süreli, aralıksız kayma ise, çok çeşitli türlerde ve frekans spektrumlarında titreşimlere yol açabilir. Herhangi bir sürtünme sisteminde oluşan titreşimler, sürtünme arayüzündeki kuvvetlerin dalgalanmasına bağlı olarak gelişir. Bu kuvvetler de, sözkonusu arayüzün özelliklerine ve dışarıdan uygulanan kuvvetlere bağlıdır. Birbirine sürtülen iki nesnenin yaratacağı titreşimlerin türü, sürtünme arayüzündeki kuvvetlerin büyüklüklerine bağlıdır. Düşük kuvvetler uygulandığında, titreşimler yerel sürtünme bölgesinde ve her sürtünme bileşeninin öztitreşim frekansında oluşur. Pürüzlü yüzeyler arasında oluşan sürtünmelerdeki düşük kuvvetli kayma hareketleri, pürüzlerin birbirleriyle temas haline gelmesi sonucu küçük düzensizlikler yaratır. Bu düzensizlikler de bileşenlerin öztitreşim frekanslarında titreşimler oluşturur. Pürüzlü yüzeye sahip bir çubuğa, uzunluğu boyunca başka bir pürüzlü nesneyle sürtünme uygulandığında, pürüzler üzerinde ve etrafında oluşan kuvvetler, hem normal hem de teğet yönlü bileşenler içerdiği için, boyuna (*longitudinal*) ve enine dalgalar oluşur. (Essl ve Cook, 2000)'de metal vurmali çalgılardan alınan çubuklara kontrbas yayı sürtülmesi sonucu oluşan titreşimlerle ilgili bazı bulgular açıklanmıştır. Bunlara göre, titreşimin tepe noktasındaki enerji düzeyi, yay sürtünme hızıyla doğrusal orantılı olarak artmaktadır. Bu artış gözönüne alındığında, enerji yayılımı sürtünme kuvvetinden bağımsız görünmektedir. Titreşimlerin spektral merkezinin, sürtünme hızı ve kuvvetiyle bir bağlantısı olduğu gözlenmemiştir. Yaylı çalgıların tellerinde görülen aksine, kuvvetin artması sonucu merkezin yukarı kayması da görülmemiştir. Temel frekans ölçümleri, hız ve kuvvet değişimlerinin sonucunda belirgin bir eğilim göstermeyen küçük çaplı dalgalanmalar yaratmıştır. Titreşim başlama süresi de, sürtünme kuvvetinin artmasıyla orantılı olarak azalmaktadır; sürtünme hızının ise herhangi bir etkisi gözlenmemiştir.

Sürtünme süreci için çok sayıda matematiksel tanımlama ve model bulunmaktadır (Serafin 2004). Bu projede, düzensiz pürüzlü yüzeye sahip çubuklar ile sivri uçlu bir nesne arasındaki sürtünme, beyaz gürültü (*white noise*) çıkış noktalı olarak ve sözü edilen metal çubuk ve kontrbas yayından elde edilen bulguları esas alarak modellenmiştir.

Öztitreşim Modları

Bir nesnenin mekanik titreşim halinde bulunması için iki koşul, nesnenin gerginlik veya yay benzeri bir özelliği olması ve titreşim hareketinin denge durumunun ötesine geçmesini sağlayacak mukavemet özelliğinin bulunmasıdır. Enerji açısından bakıldığında, bir nesnenin potansiyel ve kinetik enerji saklayabilme ve enerji kaybedebilme mekanizmalarına sahip olması gereklidir (Fletcher ve Rossing 1998). Öztitreşim modları, bir titreşim sistemini oluşturan bütün bileşenlerin aynı sinüzoidal hareket içinde bulunduğu durumlardır. İnce çubuk gibi bir nesne için bu modlar, nesnenin yapım malzemeleri, boyutları ve şekli gibi özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar.

Gergin tellerde görülen enine titreşimlerin benzeri, çubuklarda da görülebilir. Ancak tellerde görülenin aksine, gerginlik olmaksızın, çubuğun normal haline dönmesini sağlayan kuvvetler, çubuğun kendi elastik kuvvetleri tarafından sağlanır (Fletcher ve Rossing 1998). Uzunluğuna nazaran ince bir çubuğun enine titreşim modları, 1 boyutlu Euler-Bernoulli modeliyle hesaplanabilir (Essl ve Cook 1999). Buna göre, bir nesne içinde enine dalgaların hızları, frekanslarına bağlı olarak değişmektedir. Nesne içinde oluşan genel titreşimin şekli de bu hız farkları sayesinde ortaya çıkmaktadır. Modelde dört sınır koşulu bulunmaktadır. Bunlar çubuğun uç durumlarına göre belirlenmektedir: uçlardan her biri serbest, biri sabitlenmiş veya ikisi de menteşe destekli olabilir. Örneğin iki ucu serbest bir çubuğun öztitreşim modlarının frekansları,

$$f_n = \frac{\pi K}{8L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} [3.011^2, 5^2, 7^2, \dots, (2n + 1)^2]$$

formülüyle hesaplanır (Fletcher ve Rossing 1998). n hesaplanan titreşim modunun sıra sayısını, K dönme yarıçapını (*radius of gyration*), L çubuk uzunluğunu göstermektedir. Denklem köşeli parantezler içindeki bölümü, mod frekanslarının temel frekansa olan oranlarını belirler. Bu oranların ilk 10 tanesi ve Tablo 1'de listelenmiştir. Öteki iki kurgu için hesaplanmış değerler de aynı tablodadır. Oranların armonik (temel frekansın tamsayı katları) olmadığına dikkat edilmelidir.

Tablo 1. Çeşitli çubuk kurguları için titreşim modlarının frekans oranları

Titre im Modu	Temel Frekans Oranı (: 1)		
	ki ucu serbest çubuk için	Bir ucu sabitlenmiş çubuk için	ki ucu menteşe destekli çubuk için
1	1	1	1
2	2.757	6.263	4
3	5.404	17.536	9
4	8.933	34.371	16
5	13.345	56.817	25
6	18.638	84.874	36
7	24.814	118.544	49
8	31.873	157.824	64
9	39.813	202.717	81
10	48.636	253.220	100

Dalga Yönlendirici Temelli Algoritma

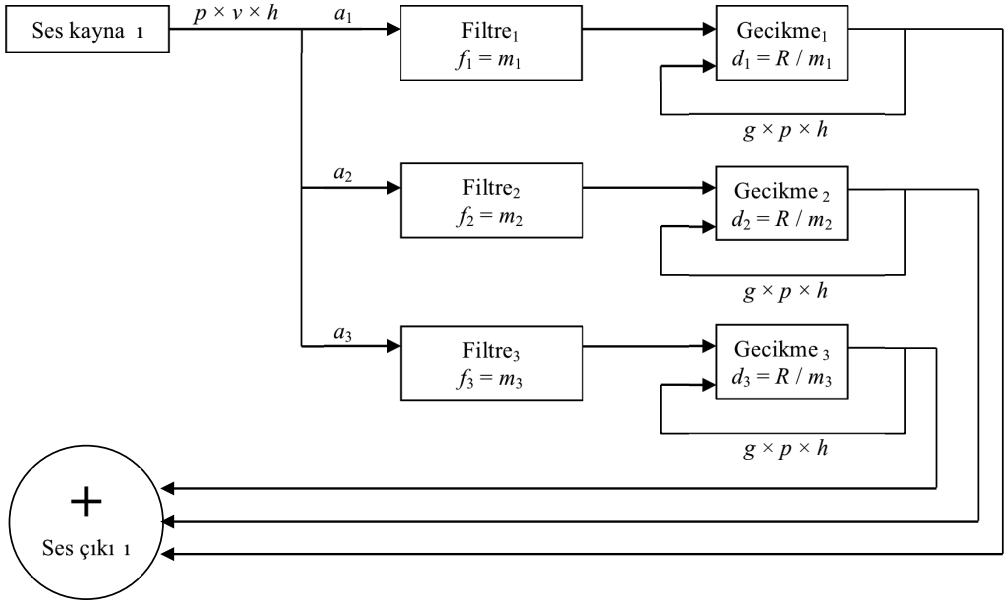
Bu algoritmalar, kayıp oranı düşük olan dalga yayılım ortamlarında hareket eden dalgaları (*traveling wave*), ortam geometrisini hesaba katarak düşük işlem gereksinimiyle modellemek için kullanılan, temelinde gecikme hatları, çeşitli filtreler ve modellenen nesneye veya çalgıya göre gereken başka bileşenlerin bulunduğu sentezleme algoritmalarıdır. En basit dalga yönlendirici algoritması çift yönlü bir gecikme hattından oluşur (Smith 1992). Fiziksel nesnelere hareket eden dalgaların doğrudan ölçümü mümkün olmadığı için, basınç ve hız gibi fiziksel değişkenlerin hesaplanması, dalga bileşenlerinin toplamının ölçülmesiyle yapılır.

Dalga yönlendirici algoritmalarını verimli kılan özelliklerinden bazıları, çoğu durumda algoritmayı oluşturan bileşenlerin sırasını değiştirmenin sonuç üzerinde değişiklik yaratmaması (*commutativity*) ve bileşenlerin türlerine göre gruplanarak genel etkilerini yaratacakları tekil noktalarda toplanabilir olmalarıdır (Smith 1992). Temel dalga yönlendirici algoritması, çubuk gibi 1 boyutlu titreşim nesnesi olarak sınıflandırılacak nesnelere basit bir modelinin oluşturulması için yeterlidir (Brancheriau, Baillères ve Sales 2005). Çubuklar için enine dalgaların modellenmesinde her frekanstaki dalganın hızının ayrı hesaplanması zorunluluğu, tek bir çubuk modeli için çok büyük sayıda gecikme hattı ve öteki bileşenlerden oluşan dalga yönlendirici zinciri gerektirmekte, işlem gereksinimi büyümektedir.

Söz konusu modelin tipik kullanımında önemli olan spektral verinin öztitreşim modlarının frekanslarında olması, dalga yönlendirici zincirlerinin yalnızca bu frekanslara yönelik kurulduğu modellerin tasarlanmasını mümkün kılar. Bu zincirlerin kurulması, zincire kuşak geçirimli filtrelerin eklenmesiyle yapılmaktadır. Filtrelerin merkez frekansları, mod frekanslarına ayarlanır. Bu da her bir filtreden geçen merkez dışı frekansın yayılım hızının, merkez frekansın yayılım hızına eşit olduğu indirgemesinin yapıldığı anlamına gelir. Bu indirgeme sayesinde, algoritmanın işlem gereksinimi canlı kullanıma uygun hale getirilmektedir (Reyes 2006).

Bu projede tasarlanan modelin akış şeması, algoritmayı yönlendiren parametrelerle birlikte Şekil 3'te görülebilir. Şemada p , sürtünme kuvvetini (kalem basıncını); v , sürtünme hızını (kalem hareketinin hızını); h , sürtünmenin dikey konumuna bağlı olarak uç durumlarının yarattığı sönümlenmeyi; a_n , titreşim modu n için kullanılan genlik oranını; f_n , titreşim modu n için kullanılan filtrenin merkez frekansını; m_n , titreşim modu n 'nin frekansını; d_n , titreşim modu n için kullanılan gecikme hattının uzunluğunu; R , sistemin örnekleme hızını (*sample rate*); g , gecikme hatları için kullanılan geri besleme (*feedback*) katsayısını temsil etmektedir. (Parametre katsayılarının hesaplanması ve birbirleriyle olan ilişkileri basitleştirilerek gösterilmiştir.)

Şemadaki ses kaynağı olan beyaz gürültü üretici fonksiyondan alınan sinyalin genliği; sürtünme kuvveti, sürtünme hızı ve uç durumlarının yarattığı sönümlenme oranlarına göre ölçeklenir. Sinyalin genliğinin 0'ı aşabilmesi için, hem sürtünme kuvvetinin hem de sürtünme hızının 0'dan büyük olması gerekmektedir. Uç durumlarının yarattığı sönümlenmenin etkisi sınırlandırılmıştır; sinyalin genliğini 0'a yaklaştırabilir fakat eşitleyemez. Bundan sonraki aşamalarda, sinyal her titreşim modu için ayrı bir yol izleyerek işlem görür. Öncelikle genel spektral karakteri yaratmak için, titreşim modunun genlik katsayısıyla çarpılır.



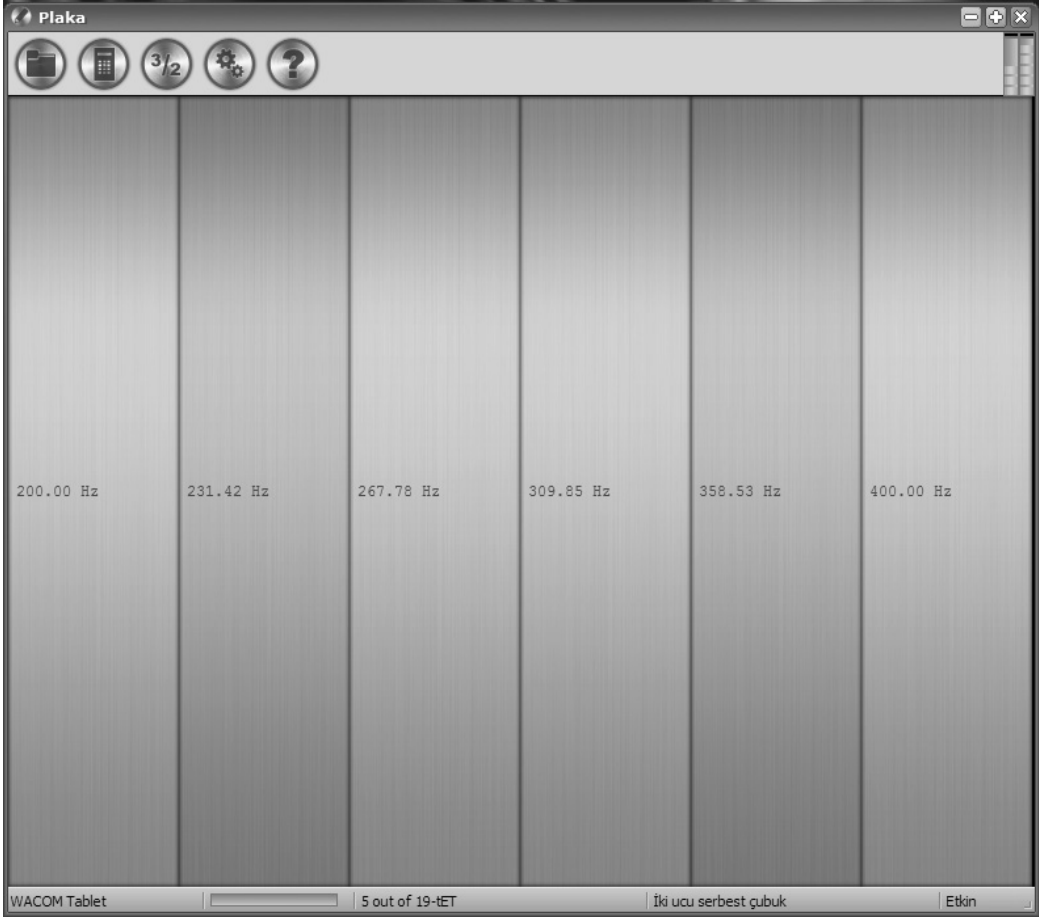
Şekil 3. Tasarlanan kısıtlanmış frekans bantlı dalga yönlendirici modelinin akış şeması

Bunu kuşak geçirimli filtre izler. Bu filtre, 4. dereceden (-24 dB/oktav) birer alçak geçiren (*low pass*) ve yüksek geçiren (*high pass*) filtrenin arka arkaya kullanılmasıyla elde edilir. Bu iki filtrenin merkez frekansları, kuşak geçirimli filtrenin merkez frekansı olan titreşim modu frekansına eşittir. Bu sayede istenen mod frekansına ek olarak düşük miktarda merkez dışı frekanslar da bir sonraki aşamaya gönderilir. Filtreden sonra bir gecikme hattı bulunmaktadır. Bu hattın uzunluğu, sistemin çalıştığı örnekleme hızının titreşim modu frekansına bölümüne eşittir. Bu da sözkonusu enine dalganın, titreşim nesnesi içinde durağan dalga (*stationary wave*) oluşturmasına karşı gelmektedir. Gecikme hattı çıkışının bir kopyası ses çıkışına gönderilirken, bir kopyası da hattın girişine geri gönderilir. Geri dönen sinyalin genliği, genel geri besleme katsayısına, sürtünme kuvvetine ve uç durumlarının yarattığı sönümlenme oranlarına bağlı olarak azaltılır. Sürtünme kuvvetinin bu noktada kullanılması, bir yandan ses kaynağından elde edilen sinyalin genliğini artırırken, bir yandan da sistem içinde dönmekte olan sinyalin sönümlenmesini hızlandırdığı anlamına gelir. Sürtünme hızının 0 olduğu durumlarda sürtünme kuvvetinin 0'dan büyük olması, sistemin genelinde yeni sinyal oluşmazken sönümlenmenin hızlanmasına yol açar. Geri beslemenin etkisi, sinyaldeki merkez dışı frekansların giderek azalması ve merkez frekansın daha belirgin hale gelmesi olarak görülür. Son olarak, gecikme hatlarından çıkan sinyallerin hepsi toplanarak ses çıkışına gönderilir.

Bu sürecin geneline bakıldığında, frekans spektrumu zengin, düzensiz bir durumdaki sinyalin, frekans spektrumu sadeleşerek öztitreşim modlarının frekanslarına toplanmış, daha düzenli bir durumdaki sinyale dönüştüğü görülebilir.

Uygulama

Açıklanan kavramların uygulaması olarak, Plaka adlı bir sentezleme yazılımı geliştirilmiştir. Plaka'da modellenen çubukların temel frekanslarının belirlenmesi için Scala (de Coul) yazılımının dizi formatı kullanılmıştır. Bu format, mikrotonal tınılama (*tuning*) ve temperaman bilgilerinin kişiler ve uygulamalar arasında aktarılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yazılımla dağıtılan arşivde 3500'den fazla dizi bulunmaktadır. Scala dizi dosyaları, Plaka'da modellenen çubukların tınılama bilgilerinin kaynakları olarak düşünülebilir. Plaka, ASIO¹ destekli bir ses donanımı ve çizim tableti gerektirir. Fare ile de kısıtlı olarak kullanılabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Plaka yazılımının arayüzündeki temsili çubuklar

Plaka'nın temel işleyişi, bir dizinin diskten okunmasıyla başlar. Ses üretmek için, tabletin kalemiyle metal çubukları 'çizmek' gerekir. Kalemlerle basış şiddeti ve çubuk üzerindeki hareket hızı, çıkan sesi etkiler. Kalemlerle çubuğa bir süre basılı tutma ve aniden çekme sürekli titreşim elde

1- Ses sürücüsü bu standardı desteklemiyorsa <http://www.asio4all.com/> denenebilir.

etmeye, hareket ettirmeden aynı konumda kalma da titreşimleri azaltmaya yol açar. Sentezleme parametrelerini ya da dizi değerlerini değiştirmek mümkündür. 'Başlangıç frekansı', seçili dizideki ilk tonun (1/1) temel frekansıdır. Nesne türü, çubukların titreşim modlarını belirler. Tekdüze ince çubuk seçilirse mod frekansları algoritmik olarak hesaplanır. Kurulum sırasında '.vmod' uzantılı birkaç titreşim mod dosya örneği diske kopyalanır (Tablo 2). Kullanıcı kendi .vmod dosyalarını da oluşturabilir. Frekans ve genlik verileri bu dosyalardan yüklenir.

Tablo 2. Çeşitli .vmod dosyalarındaki titreşim modlarının frekans oranları

Titre im Modu	T e m e l F r e k a n s a O r a n ı (: 1)			
	Armonika	Tibet çana ı	Akortlu çubuk	Teneke kutu
1	1	0.996	1	1
2	2.32	1.004	4.020	1.159
3	4.25	2.979	10.718	1.286
4	6.63	2.993	18.070	2
5	9.38	5.705		2.318
6		8.998		3.500
7		9.016		3.897
8		12.833		4.648
9		12.807		
10		17.281		
11		21.976		

Plaka yazılımı şu adresten ücretsiz olarak indirilebilir: <http://epeen.info/plaka/>

Sonuçlar

Çalışmamızda, kullanılan fiziksel modelleme temelli sentezleme algoritmasının uygun bir kontrol mekanizmasıyla eşleştirilmesi suretiyle, algoritmanın canlı icrada kullanılabilirliği büyük ölçüde sağlanmıştır. Mekanizma sayesinde, çubuk modelinin bütün olanakları kullanılarak, modelden basit ve tutarlı biçimde, tını paleti kapsamında çeşitli tepkilerin alınması mümkün olmuştur. Buna bağlı olarak, fiziksel modelleme temelli bir sentezleme tekniğinin tasarlanmasında, varolan bir arayüz aygıtından yola çıkmanın diğer yaklaşımlara makul bir alternatif oluşturduğu söylenebilir. Bu tür bir tasarımla, hem kontrol mekanizmasının hem de sentezleme tekniğinin bütün olanaklarından yararlanılmıştır. Bu sırada özel bir işleyişin kullanılmasının rolü önemlidir. Kontrol mekanizmasının sağladığı duyarlık, çubuk modelinin etkin bir biçimde çalınmasında merkezî bir konuma sahiptir. Çizim tabletinin özgün iletişim yöntemi ve buna göre tasarlanmış bir yazılımla, tabletin özelliklerinden tam anlamıyla yararlanmak mümkün olmuştur. Buna rağmen, çizim tabletinin, böyle bir uygulamada yetersiz kalan yanları da olmuştur. Basınç ve hareket çözünürlüğü çoğu MIDI kontrol aygıtından daha duyarlı olsa da, değerlerdeki değişiklik adımları büyük bulunmuş, yumuşatma algoritmalarının kullanılması gerekmiştir. (Benzer yumuşatma algoritmalarının MIDI kontrol aygıtları için de kullanılması kaçınılmazdır.) Çizim tabletinin en önemli yetersizliği, kontrol mekanizmasının doğasına bağlanabilir. Bu kontrol mekanizması ve tasarlanan yazılım arayüzü ile sadece bir çubuk modelinin titreştirilmesi mümkündür. (Birden fazla çubuğun titreşimi birbirinden bağımsız olarak tamamen sönümlenene kadar devam edebilir.) Bu eksikliğin giderilmesi, aynı anda birden fazla kalem kullanabilen tabletler ve benzer kontrol aygıtlarıyla ve yazılımın bu aygıtlarla

çalışacak hale getirilmesiyle sağlanabilir. Buna ek olarak, el ile göz arasındaki koordinasyonun doğası gereği oluşan geçiş zorluğu, 'tablet PC'lerin kullanımı ile önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca, yazılım ara yüzündeki temsilî çubukların tasarlanandan farklı düzenlerde arayüze yerleştirilmesi ve aynı anda birden fazla kalemle çalışan tabletlerin kullanımı bu konuda kolaylık sağlayabilir. Çizim tabletiyle birlikte kullanılan kalemin de, bu projedeki uygulama türünde sorun yaratma olasılığı bulunmaktadır. Görece daha hafif kuvvetlerle kullanılmak üzere tasarlanan tablet kalemlerinin bu tür ses uygulamalarında kullanılması, kullanım sürelerinin kısılmasına yol açabilir. (Aynı olasılık çizim yüzeyi için de geçerlidir.)

Yine de ses uygulamalarında çizim tableti, kullanılması kolay bir mekanizmadır. Çizim tableti ve Plaka yazılımı birlikte bir çalgı olarak ele alınırsa, çalmayı öğrenmenin oldukça kolay olduğu ve çok çabuk sonuç verdiği görülebilir. Bu yanılla, Plaka ve benzer yazılımların pedagojik uygulamalar ve müzik terapisi gibi alanlarda da kullanılabileceği düşünülmektedir.

Referanslar

- Akay, Adnan. 2002. "Acoustics of friction". *The Journal of the Acoustical Society of America* 111. Acoustical Society of America: 1525–1548.
- Baum, Robert Thomas, James Edward Curry ve Jeffrey Ian Winter. 2007. "Sensed condition responsive wireless remote control device using inter-message duration to indicate sensor reading". Google Patents.
- Brancheriau, Loïc, Henri Baillères ve Christian Sales. 2006. "Acoustic resonance of xylophone bars: experimental and analytic approaches of frequency shift phenomenon during the tuning operation of xylophone bars". *Wood science and technology* 40. Springer: 94–106.
- Carrillo, Alfonso Antonio Pérez. 2006. "Gesture based synthesis of bowed string instruments". Citeseer.
- Carstens, J. (Tarih yok). "Products - Tablet 2 MIDI". Erişim: Nisan 2015, Livelab.dk: <http://www.livelab.dk/tablet2midi.php>
- de Coul, Manuel Op (Tarih yok). Scala Home Page. Erişim: Mayıs 2015, from Huygens-Fokker Foundation, centre for microtonal music: <http://www.huygens-fokker.org/scala/>
- Essl, Georg ve Perry R Cook. 1999. "Banded waveguides: Towards physical modeling of bowed bar percussion instruments". *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, 321–324.
- Essl, Georg ve Perry R Cook. 2000. "Measurements and efficient simulations of bowed bars". *The Journal of the Acoustical Society of America* 108. Acoustical Society of America: 379–388.
- Fletcher, Neville H ve Thomas D Rossing. 1998. "Materials for musical instruments". *The Physics of Musical Instruments*, 711–734. Springer.
- Fournel, N. (Tarih yok). Wmidi. Erişim: Nisan 2008, Nicolasfournel.com: <http://www.nicolasfournel.com/wmidi.htm>
- Kapur, Ajay, A Lazier, Philip Davidson ve RS Wilson. 2004. "The electronic sitar controller". *New Interfaces for Musical Expression*: 7–12.
- Knapp, R Benjamin ve Hugh S Lusted. 1990. "A bioelectric controller for computer music applications". *Computer music journal*. JSTOR: 42–47.
- Knauer, C. (Tarih yok). "How the Wacom cordless, batteryless pen works". Erişim: Nisan 2015, Wacom Europe GmbH: http://www.wacom-europe.com/_bib_user/downloads/tech_i3_en.pdf

- Lemur Overview. (Tarih yok). (JazzMutant) Erişim: Mayıs 2015, from JazzMutant: http://www.jazzmutant.com/lemur_overview.php
- MIDI Manufacturers Association. (Tarih yok). MIDI Message Table 1. Erişim: Nisan 2015, MIDI Manufacturers Association Web Site: <http://www.midi.org/techspecs/midimessages.php>
- Paradiso, Joseph A ve Sile O'modhrain. 2003. "Current Trends in Electronic Music Interfaces. Guest Editors' Introduction". *Journal of New Music Research* 32. Taylor & Francis: 345–349.
- Reyes, Juan. 2006. "Working with Banded Waveguides and Friction in Musical Contexts". *Proceedings of the International Workshop on Computer Music and Audio Technology*. Taipei.
- Scavone, Gary P. 1996. "Modeling and control of performance expression in digital waveguide models of woodwind instruments". *Proceedings of the International Computer Music Conference*. Hong Kong.
- Serafin, Stefania. 2004. *The sound of friction: real-time models, playability and musical applications*. Stanford University Müzik Bölümü Doktora Tezi..
- Serafin, Stefania, ve Diana Young. 2004. "Toward a generalized friction controller: from the bowed string to unusual musical instruments". *Proceedings of the 2004 conference on New interfaces for musical expression*, 108–111. National University of Singapore.
- Smith, Julius O. 1992. "Physical modeling using digital waveguides". *Computer music journal*. JSTOR: 74–91.
- Tuner, D., Dickerson, R., & Dickerson, J. (Tarih yok). "Tibetan Bowls". Erişim: Mayıs 9, 2008, Reiki Sounds: <http://homepage.ntlworld.com/reiki.sounds/TIBETAN%20BOWLS%20&%20TUNING%20FORKS.htm>
- Young, Diana ve Georg Essl. 2003. "Hyperpuja: A tibetan singing bowl controller". *Proceedings of the 2003 conference on New interfaces for musical expression*, 9–14. National University of Singapore.
- Young, Diana ve Ichiro Fujinaga. 2004. "Aobachi: A new interface for japanese drumming". *Proceedings of the 2004 conference on New interfaces for musical expression*, 23–26. National University of Singapore.