

高可聴閾音を利用した DTMF 通信による アーティストと観客のインタラクションの実現

清水 基[†]

平林 真実^{†‡}

Clemens Buettner[†]

赤松 正行^{‡†}

人間には聞き取りにくい高可聴域音を用いた音声通信により、パフォーマーと観客とのインタラクションを実現するシステムを作成し実演した。ステージ上のパフォーマーが音楽を演奏することで、観客の持っているスマートフォンと通信する事が可能である。本システムを用いることで、パフォーマーはステージに組み込まれた大きなスピーカーや照明以外の、フロアに居る観客が持つ不特定多数のスマートフォンを小さなスピーカーあるいは照明・VJ スクリーンとして使えるようになる。使用している音声はスマートフォン単体で認識可能で、かつ非可聴域に近い音声を使用している為、音楽パフォーマンスに利用し易いものとなっている。

System for the Interaction between an Artist and his Audience using High Frequency Sound and Dual Tone Multiple Frequency Signaling

MOTOI SHIMIZU[†]

MASAMI HIRABAYASHI^{†‡}

CLEMENS BUETTNER[†]

MASAYUKI AKAMATSU^{‡†}

In this paper, we present a system for on stage performers to manipulate the iPhones of audience members using high frequency audio transmission. The system allows performers to use an unspecified number of iPhones as tiny speakers and VJ screens. This system can be utilized for sound performances, since the frequencies used for the purpose of communication between the mobile devices, are frequencies that exceed the human hearing range, but that can still be detected by the iPhones in use.

1. はじめに

ライブハウス、クラブ等の空間における「アーティストがいるステージと観客がいるフロア」という構図は数十年変わらずにあり続けている。我々は現代のメディア環境に即した音楽体験の実現を目指し、音楽体験のための新しいシステムの開発とその実現のための音楽イベントを定期的に行いながら、音楽空間におけるインタラクションの研究を行っている。本論文では、音楽を体験する空間においてアーティストと観客とのインタラクションを行うことで、一体感、暗黙のコミュニケーションを実現するシステムを開発し実演を行った。

アーティストに対し、パフォーマンスにおいてもっとも重要である演奏行為を妨げず、複雑な操作を必要とせずに制御できるメディアとして音声ファイルを用いることで、通信手段を通常の演奏に容易に取り込むことができるようにしている。また通信手段として音声を用いることで、3G 回線等を含むネットワーク環

境を必要とせずにスマートフォン単体で利用することが可能となり、地下など通信環境の悪い場所や人体による無線 LAN 電波環境の悪化などの会場の環境に影響されにくく、不特定多数の観客に対し広く体験を提供することが出来る。

通信に用いる音声として、いわゆるモスキート音と呼ばれる高周波数音の DTMF(Dual Tone Multiple Frequency)とすることで通常の音楽鑑賞への影響を低減することを狙っている。

2. 研究背景

音楽におけるアーティストと観客とのインタラクションの試みとしては、古くは 1994 年から平沢進氏が行っている”インタラクティブ・ライブ”¹⁾での、会場内に仕掛けた独自インターフェイスを介した観客による映像への介入、積極的なウェブ展開、音楽配信が有名である。最近ではテクノミュージシャン、DJ として有名な Richie Hawtin の実験的試みを行う別名義 Plastikman が 2010 年の世界ツアーの為に AppStore よりリリースした iPhone アプリケーション ”SYNK”²⁾を用いて音のコントロールを観客に委ねる仕組み、ステージ上 LED をコントロールする仕組み、DJ 目線のカメラをライブストリーミングする仕組み、ドラム、

[†] 岐阜県立国際情報科学芸術アカデミー

International Academy of Media Arts and Sciences (IAMAS)

[‡] 情報科学芸術大学院大学

International Academy of Media Arts and Science (IAMAS)

パーカッションの演奏情報を可視化したリアルタイムビジュアルを提供する仕組み、その場に居る観客同士がコミュニケーションを取りあう為のチャットシステムを提供して話題を呼んだ。Aphex Twin³⁾は2010年にイギリス、ロンドンで行ったイベントにて、パフォーマンス中にカメラで撮影した観客の顔に、トレードマークである自身の顔をリアルタイムにマッピングして会場内スクリーンに映し出す仕掛けを行い高い評価を得た。これらの様な、音楽体験におけるアーティストと観客のコミュニケーションを促進するようなインタラクティブ性をもった仕掛けを導入する試みは近年特に活発に行われている。これらの事例とは違い本研究の特徴として、ネットワークを用いずに音声だけで通信が行える利点があり、また、アーティスト側から通信をリアルタイムに行える事が挙げられる。

高可聴閾音を利用した通信としては、ヤマハ株式会社に取り組んでいる独自の音響データ通信技術「インフォサウンド⁴⁾」を用いた試みがある。中国放送「アーン！」(広島ローカル情報バラエティ番組、毎週金曜深夜放送)内で放送音声に音響IDを混ぜ、視聴者の手元のスマートフォン(iPhone, Android)の端末に着いているマイクで音を拾い、その情報をサーバー側でURLに変換して番組内で紹介したWebサイトへの遷移導線として利用されている。その他、音声とスマートフォンを用いた通信としてNTTドコモによる音響OFDM⁵⁾が例に挙げられる。無線伝送で使用されているOFDM変調技術を音響領域に適用することにより、1秒間で約100バイトの通信を携帯端末側で受信する事が出来る。これらの試みでは携帯端末側で行っているのはデコードのみだが、不特定多数への同報通信手段として音声を利用する事の可能性を示している。これらの研究において、スマートフォン側はデコードの機能のみを持っている。本研究の特徴として、高速フーリエ変換の延長と音声ファイル再生機能のみで実装可能なので、スマートフォンだけでも送受信共に可能であり、相互通信を実現できる所にある。

3. 高可聴閾音による通信 (USC)

3.1 USC 通信の仕組み

モバイルメディアの新しい可能性と表現方法を模索する本学内のプロジェクト"モバイルメディアプロジェクト"にて、ネットワーク環境に依存せずに近距離での通信をスマートフォン(ここではiPhone)同士で行う為の仕組みを研究した。事前に定義した特定の非可聴域の音パターンを送信側のiPhoneから発音し、

受信側はDTMF (Dual Tone Multiple Frequency)を参考に音の解析を行い、任意の信号として受け取る。送信側の音が一定以上の音量で聞こえる距離範囲内であれば、受信側は台数制限無く情報を受け取る事が出来る。この手法をUSC通信と名付けた。

USC通信とは、非可聴域に近く高い周波数であり、かつiPhoneに内蔵されているマイクで認識出来る範囲の音を使用し、DTMF (Dual Tone Multiple Frequency)を参考に特定の信号として音を認識する仕組みである。外部装置無しで既存のもの以外の通信手段を取り入れるにあたって、iPhoneが電話である以上今後ハードウェアのアップデートが行われたとしてもマイクとスピーカーが内蔵されるであろうと推測出来る事から、音声を利用する事が妥当であると考えられる。

3.2 USC 通信におけるDTMFの構成

3.2.1 使用する音について

年齢・身体状況によって個人差はあるが、人間の耳に聞こえる音は約20Hz~20,000Hzである。これはアップルのウェブサイト内のiPhone, iPad, iPod touch技術仕様に記載されているスピーカーの周波数特性と同じである。iPhoneに内蔵されているマイクの特性については記載が無い。そこで一定の音量のサイン波を20Hzから徐々に周波数を上げながら流し、iPhoneに内蔵されているマイクで認識した音を高速フーリエ変換による周波数解析をして、マイクが認識出来る音の上限を調査した。実験にはiPhone 4G, iPhone 4GS, iPod touch (4th generation), iPad (Wi-Fi), iPad 2(Wi-Fi)を用いた。全てのデバイスで、およそ22,050Hz(CDで再生が可能な範囲)まで認識できる事が確認できた。

以上の結果から、人間の耳には聞こえず、iPhoneで認識出来る音が20,000Hz~22,000Hzである事が分かるが、20,000Hzよりも高い周波数の音を利用するとiPhoneからUSCの発信が出来なくなり、また差分の2000Hzの中から信号を複数定義すると各信号の周波数差が狭くなり後述の音声解析に支障が出た為、ほぼ聞こえない音である17,000Hz以上を採用する事にした。以上の理由からUSC通信では17,000Hz~20,000Hzの音を通信用に使用する事にした。

3.2.2 DTMF (Dual Tone Multiple Frequency)

実世界には様々な音が鳴っている為、iPhone側でUSC通信の音を認識しやすい様な仕組みを用意する必要がある。そこで、Dual Tone Multiple Frequencyを参考に、2つ以上の周波数が同時に鳴っている場合に信号として認識する仕組みを用意した。使用する具体的な周波数については17,000Hz~22,000Hzをほぼ等

分に分ける為に半音の更に半分の周波数毎に7つの音を、以下の式を用いて計算した。

$$f = 17,000 * (\sqrt[24]{2})^n \quad (1)$$

各音の周波数はおよそ 500Hz ずつ差がある為、今回は 17,000Hz から 500Hz 刻みに音信号の周波数を採用した。行、列それぞれの周波数の音を同時に受け取った時に該当するインデックス番号を受信したものとする。

表1 使用した周波数と受信インデックス

	19,000Hz	19,500Hz	20,000Hz
17,000Hz	1	2	3
17,500Hz	4	5	6
18,000Hz	7	8	9
18,500Hz	10	11	12

可聴域の音で同様の仕組みを作る事は出来るが、演奏の幅が限定されてしまう恐れがある。高可聴域音を利用する利点は、アーティストの自由な演奏・パフォーマンスを阻害しない事である。

4. USC 通信の表現への応用

4.1 近距離通信手法としての USC の利用

モバイルメディアプロジェクトでは、スマートフォン同士による近距離通信を用いた作品として、4 つの作品を制作している。

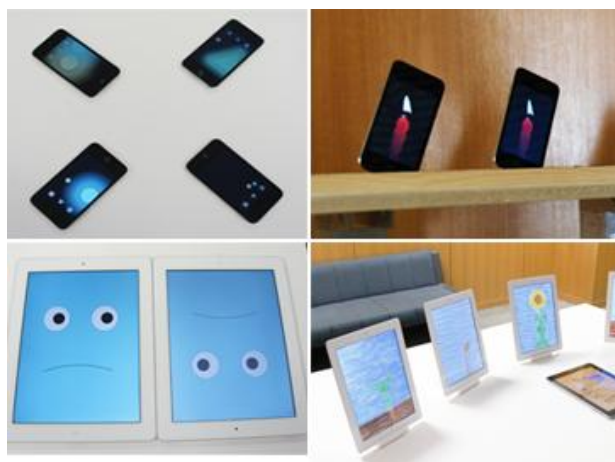


図1 上段左から Sonic Session, !amp,
下段左から Tony, Sun Flower

不特定多数の iPhone 同士で音楽セッションを行う”Sonic Session”は、事前に用意してある楽器の音を iPhone が発音する時、同時に USC 信号の音を発する。その USC 信号を受け取った周囲の iPhone がまた楽器の音と USC 信号を発音する。このフィードバックが

繰り返され、iPhone 同士の音楽セッションが無限に続く。

iPhone 同士でキャンドルサービスを行う “!amp”は、火がついてるキャンドルを他のデバイスに近づけると、他人のキャンドルに火を灯す事が出来る。

デバイス内のペットの様なキャラクター“Tony”は、隣り合わせた iPad 同士で USC 信号のやりとりをし、他人のデバイスへ Tony を手渡す事が出来る。

“Sun Flower”は、他人が持っている画面内のひまわりに USC 信号を送る事で水やり、種植などを行うことが出来る。また、種を落としたひまわりが周囲の iPad へ USC 信号を送る事でひまわりが増えて行く。ひまわりの生活環が周囲のデバイスと共に続いてゆく様を観察できる。

いずれの作品も、近距離にいるデバイス同士ならではのインタラクションを行っている。ユーザーにデバイスのネットワーク設定等の煩わしい事を求める必要が無く、アプリケーションを起動するだけで誰でもすぐにインタラクションに参加できる利点を USC によって実現している。

4.2 同報通信としての USC の利用

アーティストは、ステージ組み込みのスピーカーから出る自分達の演奏・音を鳴らしながら、同時に表 1 に従った周波数の音を再生する。ライブハウス・クラブの様に常時大きい音が鳴っている空間にて、観客が持っている iPhone で表 1 の受信インデックスを正しく受信出来れば、それをきっかけとしたインデックスに応じたインタラクションが可能になる。

ここで起こるインタラクションには様々な使い道が考えられるが、今回はライブハウス・クラブ等の空間での利用を目的としている為、USC 信号を受け取った iPhone で音・映像を再生する仕組みを制作した。これが可能になれば、アーティストは自分達のパフォーマンス・演奏と同期する、ステージと観客との境界線を越えた場所にある不特定数のスピーカーと映像出力口を手に入れる事が出来る。この事から、USC 通信を用いたインタラクションがアーティストと観客の間で起こるコミュニケーションの発展を促すきっかけとなる事が期待出来ると考えた。

信号は音声であるため、従来から音楽に用いられているアンプやスピーカーといった機材で増幅することにより、一斉同報通信の手段としても利用できる。ライブ演奏や DJ プレイにおいても、コンピュータの利用は一般的になっており、音声データとして扱えることで容易に演奏の中に組み入れることができる。

5. Cryptone

同報通信として USC 通信を利用して、Cryptone という作品を実現した。本作品は、京都で行われるイベント「NxPC.Live Vol.10⁶⁾」に向けて、iPhone アプリ「NxPC」の一部として、AppStore で公開され無料で配布された。

5.1 Cryptone 概要

Cryptone は、ライブ音楽イベントにおいて、アーティストであるパフォーマーが演奏の中で観客の持つ iPhone 内の映像を演奏に合わせて実時間で制御することで、一種の観客とのコミュニケーション、音の映像の一体感といった音楽体験における臨場感を向上させる作品である。

イベントの基本情報である日時、会場アクセス、アーティスト情報、タイムテーブルなどを得ることができる iPhone アプリ「NxPC⁷⁾」の図 1 内から起動する。なお、NxPC アプリには、「iSpr4y」(iPhoneVJ⁸⁾の最新バージョン)も搭載されている。

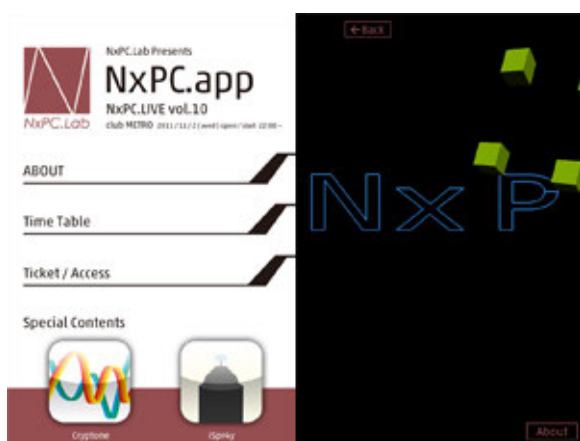


図2 左: NxPC アプリ起動画面 右: Cryptone

Cryptone を起動すると図 2 右のような画面となり、簡単な使い方が表示される。起動後は、アーティストが再生する USC 音によって表示される内容が変化する。



図3 USC 音によってリアルタイムに変化する画面の一部

表示する内容は、DTMF 音の数に合わせ 12 種類用意した (図 3)。アーティスト名が加速度に反応して

変化するもの、マイク入力された音声のパワースペクトラムをパーティクルで描画するもの、同じくラインで描画するもの、サイン派をデザインしたもの、及びこれらを組み合わせたものである。DTMF を検出する過程で FFT を行うため、結果として得られる周波数分布であるパワースペクトラムを用いることで、音楽に合わせたダイナミックな映像の変化を表現に取り入れた。

5.2 Cryptone システム

Cryptone のシステム構成は図 3 の様になる。

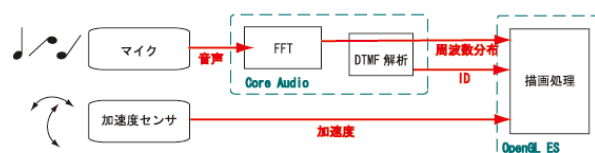


図4 Cryptone のシステム構成

マイクから入力された音声は、FFT により周波数分析を行い、DTMF の該当する音声との比較を行い、DTMF の ID を決定する。決定された ID により、OpenGL ES により描画される映像の選択を行う。FFT の結果および iPhone の加速度情報に描画する映像が変化する。

実装は、Objective-C により行い、Core Audio による FFT⁹⁾および USC の実装、OpenGL ES 2.0 による描画系の実装を行った。なお、対応 OS は iOS5.0 以上とした。

DTMF 音声は、3.2 章の表 1 に基づき、Max/MSP により生成したものを用意した。

6. 実験および実演

本作品は、音楽イベント内において体験されるものであるため、定期的なイベントの中で事前実験を行い、さらに本番として京都クラブメトロにおけるイベントにおいて実演を行った。

6.1 事前実験

2011 年 10 月 29 日に岐阜県大垣市の駅前にある IAMAS OS というスペースにて実施したイベント「NxPC.Live Vol.9 "HALLOWEEN PARTY"」において事前実験を行った。

事前実験では、アーティストによる通常の DJ プレイの中に USC に利用する DTMF 音を取り入れることで、USC が利用する音声がどの程度音楽パフォーマ

ンスに影響を与えるか、大音量の中で正確に USC による通信が可能であるかの実験を行った。DJ パフォーマンスには、DJ 用音楽ソフトである Traktor を使用した。

実験の過程で、一部の音声ミキサー（DJ ミキサー）では、USC で利用している周波数域がうまく扱えないことが判明した。実験では代替のミキサーを利用することで実験を続けることができたが、イベントの際には事前に確認することが不可欠であることがわかった。音楽パフォーマンス内で USC 音を再生した場合、今回設定した DTMF の周波数ではいくつか明らかに鳴っているのが分かる音が存在した。これらの音はいわゆるモスキート音と呼ばれる若年層にしか聞こえない音の範囲を超えて、ほとんどの人に聞こえるものとなっていた。ただし、音楽の合わせることや、また USC 音自体は小音量でも通信が可能だったため、本来の音楽の中で打ち消されるように働き、音楽の鑑賞においてはそれほど違和感を感じることなく USC 通信を行うことができた。

この事前実験により、イベント会場の機材には依存することはあるが、音楽パフォーマンスに USC を取り入れることは十分に可能であることが確認できた。

6.2 クラブメトロでの実験

2011 年 11 月 2 日に京都クラブメトロにてイベント「NxPC.Live Vol.10」を実施した。このイベントの中でイベントの共同開催者であり、出演アーティストである softpad¹⁰⁾にご協力を頂き、USC を取り入れた演奏を行って頂いた。

softpad の演奏中の Cryptone は音の変化に合わせて手元の iPhone の映像が変化する様子や、手元の映像が激しく切り替わることで音楽の盛り上がりに対応する場面など、アーティストのパフォーマンス中にアーティスト自身が映像を制御することで、音楽と映像の一体的な体験を感じることができたのではないかとと思う。残念ながら、今回の NxPC アプリは iOS5.0 以上対応としたために想定したよりは多くの人に人に体験してもらうことができなかったが、体験者からは好意的な感想をもらうことができた。音楽と映像の同期を手元の iPhone の中でみるという体験は、これまでに VJ による映像とは異なり、個々の観客に対し直接反応することが新しい感覚に繋がっていると思われる。

このイベントにおいては、音楽の分野としてエレクトロニカあるいは音響系と呼ばれるような電子音を中心としたものが多かったため、周波数帯域が広く且つ高音域も多量に含まれるホワイトノイズに近い音もあ

った。その為通常の DJ による演奏よりも USC の誤反応を引き起こしやすく、softpad の演奏以外にも USC を利用していないアーティストの曲に対しても、Cryptone が反応する場面があった。

softpad の演奏においても多くの誤作動があったと思われるが、演奏の中で USC 音が意識されることもなかったことから、観客にとっても誤動作を判別することは困難であり、誤作動も含めて演奏の中で映像が変化していくという体験になったと思われる。会場内のどこにいても USC 音に反応していたため、会場の音響条件により誤動作は起きえるとはいえ、同報通信として音楽イベントにおいて利用できることは確認できた。

7. 考察

前述したように対応 OS の問題や softpad との連携で体験できるということが会場内で十分に告知ができなかったこともあり体験者が 5 名程度しか居なかった為、ライブの音楽体験としての優位性を示すには至らなかったが、Cryptone において用いたシステムが音楽イベントに新しい表現をもたらすことは確認できた。

実験、実演における会場の観察および体験者から得られた意見をまとめると、本システムの利点として以下の 3 点が考えられる。

7.1 音楽演奏中の観客とのインタラクション

これまで音楽の演奏の中に観客とのインタラクションを取り入れることは非常に難しかった。演奏において手足の操作や聴覚・視覚は、音楽やパフォーマンスのために占有されており、観客とのインタラクションに必要な操作を割り当てることが難しく、アーティストにかなりの負担となり、ごく一部のアーティストにしか実現できなかった。USC では、演奏の中で音楽に与える影響を最小限に抑えながら、音楽を演奏するのと同等の操作で映像の制御が行えるため、観客の反応に応じて音と同時に映像として観客に応えるという柔軟なパフォーマンスが可能になる。

7.2 映像体験の個別化

音楽イベントにおける映像表現としては、会場内の照明やデコレーション、VJ による映像制御などが一般的であり、音楽に演奏に合わせて照明担当者が照明を制御し、VJ が映像を制御するという形式となっていた。観客は照明や会場デコレーションが作る空間、プロジェクターにより投影された映像を観客が眺めるように体験するものであった。Cryptone では、観客個々の持つスマートフォンが直接反応し、手元で映像

変化をみることができるという映像の個別がなされることでこれまでとは違った映像体験をもたらしている。多数の観客が Cryptone を使うことで、全体として会場の照明として空間を作ることでもある。

7.3 音楽パフォーマンスへの映像制御の取り込み

映像の制御を音楽の演奏の中で行うことができる利点としては、7.1 の観客とのインタラクションの他に、映像を音楽演奏の中で制御することでアーティストは音楽のみならず映像を自らのパフォーマンスの中で効果的に使うことができるようになるという点が挙げられる。映像のスイッチングを音のサンプル再生のように扱うことができるため、音楽用アプリケーションのみで音楽と映像の同期したパフォーマンスを実現できるようになる。

当初、一番期待していた 7.1 のアーティストと観客のインタラクションについては、利用者数が少なかったことから十分な結果を得ることはできなかったが、7.2 については体験者の意見・感想によるものであること、7.3 については softpad の演奏において最終的に当日渡した AIFF 形式の USC 音をすぐに演奏の中に取り入れ会場内で十分に楽しめる効果的な表現をもたらしたことから十分に可能性を示すことができたと考えている。

問題点としては、以下の 2 点が挙げられる。

- ・USC を近距離通信ではなくイベント会場全体に伝える様な同報通信に利用するためには、より誤動作の少ない周波数による DTMF の再設計が必要であること

- ・映像の個別化体験へ導くための演出、この演奏の時にこのアプリケーションを使うと体験できるということが会場内で分かるようにする仕組みが必要

このようなスマートフォンを用いた映像体験は、イベントの開催中常に観客がアプリケーションを起動したままという状況は考えにくい。特定の体験を行える時間帯を設定し、観客に明示的なアナウンスを行うことなく会場の様子から、そのことが理解できるように演出的な仕組みが必要である。

8. まとめ

高可聴閾音と iPhone を用いたアーティストと観客間のインタラクションに新しい音楽体験の可能性を確認出来た。USC で通信出来る情報量は多くは無いが、iPhone アプリケーション側で位置情報、時刻等他要素を組み合わせれば如何様にでも信号の種類を増やす

事が出来る。またシンプルな音声ファイルを利用して、為使い勝手良く、アーティスト側への USC の導入が素早く行える事が大きな利点である。今後は USC の誤動作を軽減する為のノイズ対策や、観客側における音や映像以外の表現手段を研究していきたい。

また本論文では、クラブ空間におけるアーティストと観客間でのインタラクションを狙いに実験を行ったが、一般的なスピーカーから送信が可能な USC は様々なものに組み込む事が用意である。クラブ空間の様に大きな音が鳴り続けている場所である程度の効果を発揮出来る USC は、公共スペースのデジタルサイネージ等にも流用できる可能性を感じた。

謝辞 USC 通信の考案と開発に関わった IAMAS モバイルメディアプロジェクトのメンバーにお礼を申し上げます。また NxPC.Live の運営、Cryptone の開発、実験、記録、に協力を頂いた白鳥啓氏をはじめとする NxPC.Lab のメンバーの皆様に、心より感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 平沢進:
<http://noroom.susumuhirasawa.com/modules/artist/content0001.html>
- 2) Plastikman: iPhone Application SYNK, AppStore, 2010
- 3) Aphex Twin Face Mapping at London Electronic Festival:
<http://www.youtube.com/watch?v=rGosqmf-740>
- 4) ヤマハ株式会社: 音を使った新しい情報発信 INFOSOUND
<http://research.yamaha.com/network/infosound/>
- 5) 松岡 保静, 中島 悠輔, 吉村 健: 可聴帯域における音波情報伝送技術: 音響 OFDM(アレー音響信号処理/一般), 2006
- 6) NxPC.Lab: NxPC.LIVE Vol.10
<http://nxpclab.info/vol10/>
- 7) NxPC.Lab: iPhone Application "NxPC", AppStore, 2011
- 8) 白井 大地, 白鳥 啓, 岡村 綾子, 平林 真実: iPhone VJ, インタラクション 2011, インタラクティブ発表, 2011
- 9) 永野 哲久: iPhone Core Audio プログラミング, SoftBank Creative, 2009
- 10) softpad:
<http://www.softpad.org/>