Vol.2015-MUS-106 No.3
Vol.2015-EC-35 No.3
2015/3/2

振動モータアレイを使った音楽の物理的臨場感提示システムの提案

柳　翔太[1]　吉田 直人[1]　米澤 朋子[1]

概要：本研究では音楽における音の発生源とそれがつくる物理刺激による臨場感を構築するため，振動モータアレイを胸部に着用させた音楽の物理的臨場感提示システムを提案する．周波数に合わせた振動を，身体の前後から体験させることによって音楽への臨場感や没入感の増加を実現するためのシステムである．これにより，音楽の特定の成分を振動情報として得ることが可能になり，音楽や映画などの臨場感を増幅することが可能になることが期待される．

1. はじめに

１９８０年代からのポータブル音楽プレイヤ等の普及により，録音音楽をより気軽にそして身近に楽しめるようになった．このような音楽プレイヤは，イヤホンやヘッドフォンなどをつけて楽しむものや，ラジカセのような小型スピーカから音を出すものであり，コンサートやライブまたは映画館などの，大音響での臨場感や重低音は再現し難い．これを再現する為には大型スピーカ，ウーハなどの大規模な装置を用意し大音量で動作させることが可能な状況が必要である．

人間は外界からの情報を知覚するために，五感や平衡感覚，空間感覚など複数の感覚の情報を組み合わせて処理しており，聴覚だけで実際の大音量などの体感を含む音響体験を再現することは困難である．聴覚以外で音を感じられる最も重要な感覚は振動の触覚であると考えた．

それを利用したボディソニックという製品 [*1] が存在する．音楽の聴取の感覚を拡大するために，椅子型などの後部からのみ振動を与えるものが多く，音の発生源が前にあるような音楽体験をもたらすことはできない．またこれらの機材はスペースも必要で，なおかつコストがかかる．

そこで本稿では，前後から動作する振動モータアレイを使った音楽の物理的臨場感システムを提案する．音楽の特定の周波数帯域の音量を振動に変換し，体験者の身体に音の聴取と連動して周波数に合わせた振動を与えることで，ユーザは音情報を振動としても感じることができる．また，振動を前後左右から与えることで音の定位を振動においても生み出すことが可能になる．

それに加え，振動開始時間差を強調的に与えることにより，通常人間が感じることのない「音の物理的な通過感」という新しい感覚の体験を与えることができると考えられる．また，特定の周波数帯域と左右のチャネルごとに振動モータの種類と挙動を変えることにより細かい振動表現が可能になっている．

これにより，音楽の聴取や映画の視聴などにおける臨場感を増加させることができると考えられる．ホームシアタの通常音量・通常モニタでの視聴でも，映画館の迫力を超えて臨場感を体感させたり，ポータブルプレイヤでもライブの迫力を感じさせることも期待される．また小型のモータを装着したウェアラブルな装置を用いることにより，身体の体勢がある程度変わっても振動を感じられると考えられる．

2. 関連研究

音を触覚として提示する手段として様々な事例が存在する．佐々木ら [1] は視覚障害者, 盲ろう者のために振動子による楽譜提示方式を開発した．振動子の強さで音程を，振動の長さで時間長を表し楽曲を提示する物である．猪狩ら [2] は振動刺激を利用した楽音伝達の基礎検討を行った．振動刺激だけでも十分リズム知覚は可能であることを確かめた．

阪梨 [3] は楽曲と知覚上の非同時性に着目し, 振動信号の時間軸波形において急峻ピークを示す箇所の制御が，非同時性が及ぼす，知覚上好ましくない影響の抑制に効果的であることを示した．一方向からの振動と楽曲の非同時性な

[1] 関西大学
Kansai University, 2–1–1 Rezenji-cho, Takatsuki-shi, 569–1095, Japan

[*1] http://www.bodysonic.cc

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

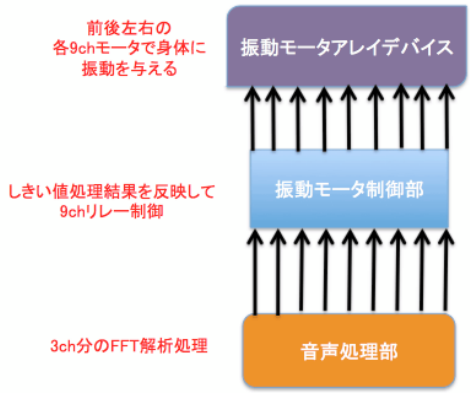


図 1 システム構成図

ので，前後間の振動の遅延で非同時性が発生する本研究では趣旨が異なる．

古屋ら [4] は振動ではなく空気噴流による触覚からの音楽情報伝達を試みている．三浦ら [5] は振動デバイスを用いたリズム学習支援システムを開発した．各々の学習者に対し自分のパートのリズムを触覚を介して伝えることで，唱歌，演奏できるようにするものである．音楽学習におけるリズム提示やリズム研究のための有用なツールになり得ることを示した．

また，振動が音楽の臨場感などに与える影響について，井出口ら [6][7][8][9] は音楽聴取時に振動付与することにより，音楽のどのような印象を強調するかなどを検討し，「迫力が出た，乗りがよくなった，臨場感が出た，快くなった」などの印象変化が振動付与の有効性の要因となることを示した．永野ら [10] は音源を懐に抱きつつ音源からの極近傍音と振動触覚を体の前面で得るという新たな体感音楽聴取方法について検討した．しかし，これらの振動提示は拳や耳などの一方向からの振動に限られている．空間感覚を考慮に入れるならば振動は多方向から来ると考えられる．この問題を解決するため，本研究では複数の特性を持つ振動モータを身体の異なる場所に配置している．また楽曲と振動の遅延差に関する研究は存在するが，本研究では前後間で振動時間差を生じさせた．

3. 提案システム

3.1 システム構成

システムの構成を図 1 に示す．本システムは音声処理部，振動モータ制御部，振動モータアレイデバイスで構成されている． 音声処理部で音声解析処理を行った結果を振動モータ制御部に送り，振動モータ制御部が振動モータアレイデバイスを制御する．そして振動モータアレイデバイスが音楽にあわせた振動を体験者に与える．

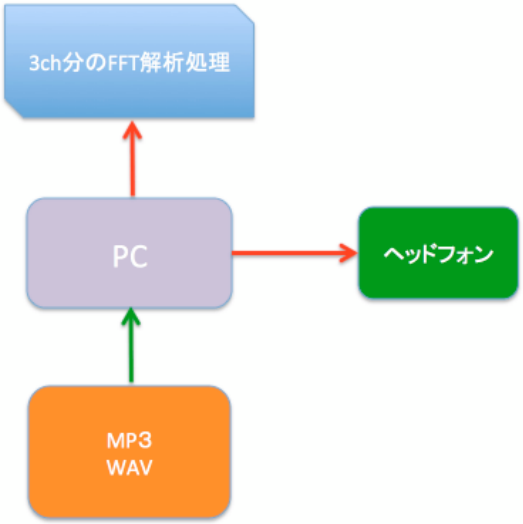


図 2 音声処理部構成

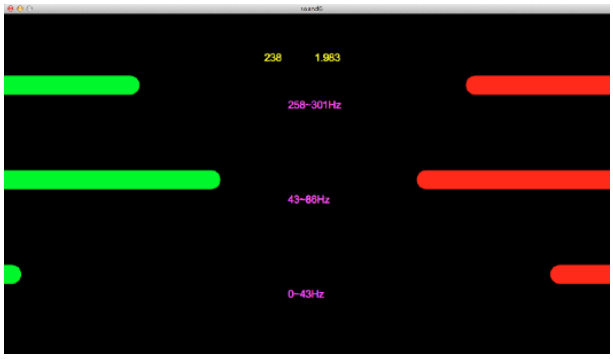


図 3 アナライザの表示

3.2 音声処理部

本システムでは PC（CPU:intelCorei7, Memory:8.0GB）上で Processing 言語 *2 を用いて音声処理プログラムを実行する．音声の再生にはヘッドフォン（PHILIPS SHL3000）を用いる．

音楽ファイルにはサンプリングレートが一般的な 44100Hz のファイルを用いる．バッファサイズを 1024 とし，約 43Hz ごとの周波数帯域に分類する．本システムでは超低音域（0–43Hz），低音域（43–86Hz），中音域（258–301Hz）の 3 つの周波数帯域を用いる．FFT 解析を行い，それぞれの周波数帯域の音量値を取得する．FFT 解析は左音声，右音声，左右の音声を混ぜた音声の 3 つの解析を行う．これで得られた 9 つの音量値が事前に決定したしきい値を上回ったかどうかで，振動制御部にモータの ON・OFF 信号を送る．しきい値は各音域ごとに曲中の最大音量の半分の値を設定した．同時に音声はヘッドフォンに出力される（図 2）．

またアナライザ（図 3）に音量値を視覚表現することによって音量値を直感的にわかりやすく提示する．今回用いたアナライザではそれぞれの周波数帯域の音量値によって

*2 https://processing.org

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

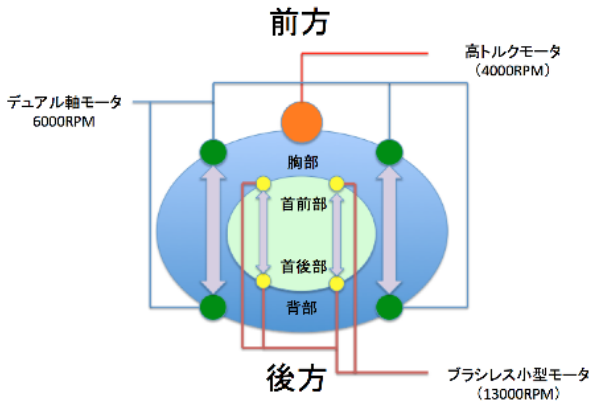


図 4 振動モータアレイデバイス（全てにライン接続，前方後方）

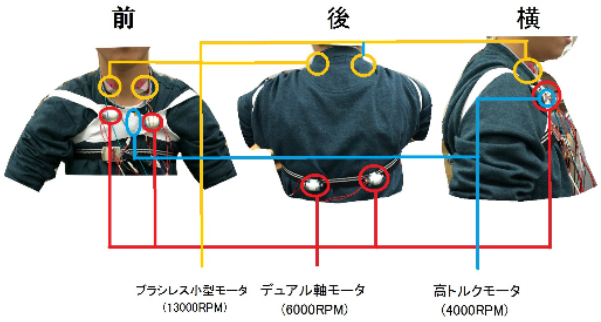


図 5 装着図

左音声と右音声に設定されたそれぞれの周波数帯域の線の長さが変わるように設定されている．

3.3 振動モータアレイデバイス

ゴムバンド, ベルト, テープにそれぞれモータを取り付けた物である（図 4, 図 5）．胸部にはゴムバンドで胸部の第 3–4 肋骨付近に密着するように 3 つのモータを配置しており，胸部中央には超低音帯域（0–43Hz）に反応する高トルクモータ (4000RPM)，胸部左右には低音域（43–86Hz）に反応するデュアル軸モータ (6000RPM) を搭載している．背部には脇の直下を通したベルトで密着するように低音域（43–86Hz）に反応するデュアル軸モータ (6000RPM) を背骨を中心として背部左右に搭載している．また首前部には鎖骨付近に，首後部には背骨付近に中音域（258–301Hz）に反応する小型ブラシレスモータ（13000RPM）を用いる．

合計 9 チャネルのそれぞれのモータはマイコンがプログラムから送られた動作処理に基づいてリレーモジュールを動作させることによりそれぞれの周波数帯域の音量値に応じた動きをする．中心の高トルクモータには左右混合音声の解析した結果の処理，左部モータには左音声の解析した結果の処理, 右部モータには右音声の解析した結果の処理がそれぞれ反映される．前述した時間差制御がされている場合，基本的には前に搭載されているモータが動作開始後，指定した秒数後に後ろに搭載されているモータが動作する．

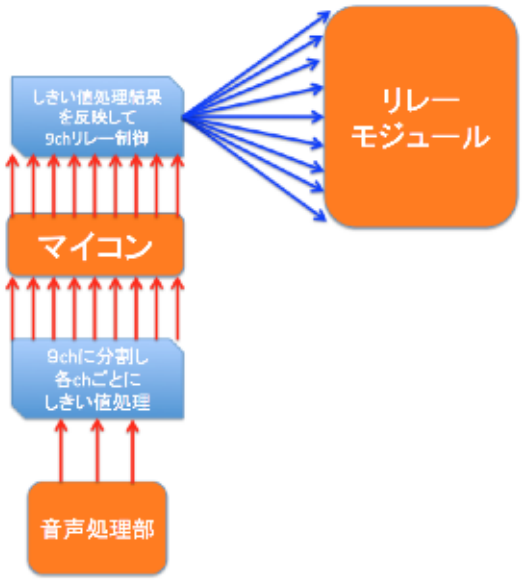


図 6 振動モータ制御部構成

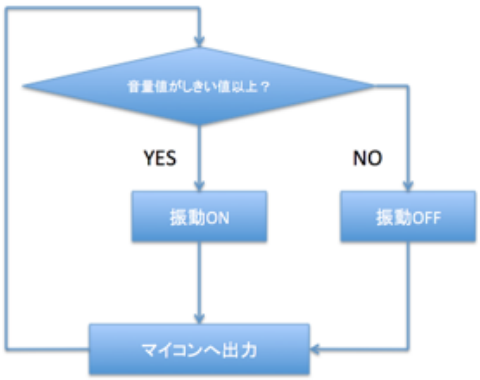


図 7 各 3ch の閾値処理

3.4 振動モータ制御部

本システムでは振動制御部の為にマイコン（Arduino UNO），リレーモジュールを用いる．リレーモジュールは 9 個のリレーにより最大 9 個の出力を個別に制御できる．振動制御部の構成を図 6 に示す．本システムでは音の信号から生成された振動モータ制御情報を，左右のモータ制御にそのまま適用する手法と，前部後部のモータ間で時間差を付ける手法の 2 つの制御方法を準備した．

3.5 振動差振動制御

3.5.1 時間差なし制御

音分析でそれぞれの周波数帯域の音量値を習得し，その音量値の値がしきい値を超えたかどうかの判定を行い，超えた場合にはモータを振動させる信号，超えなかった場合には振動させない信号をマイコンに送信する（図 7）．マイコンはその処理に基づいて胸部に 3 チャネル，背部に 2 チャネル，首部前後に 4 チャネルの合計 9 チャネルのリ

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

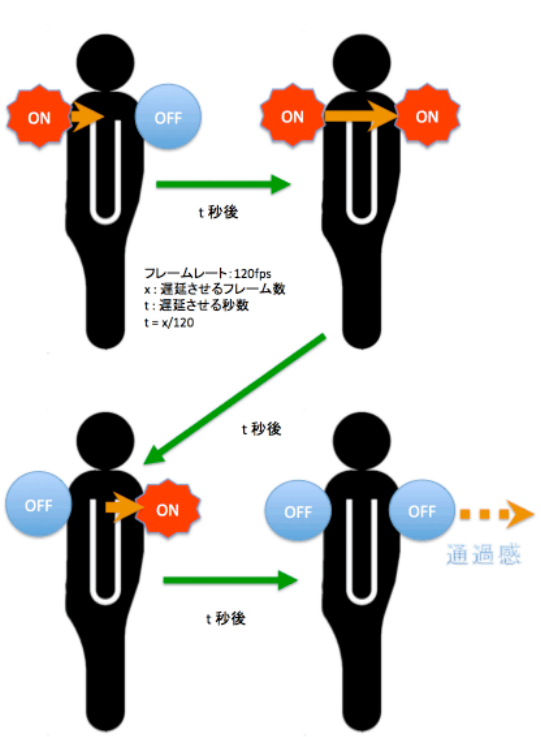


図 8 時間差制御

レーモジュールを制御して 9 チャネルの振動モータを音楽に合わせて動作させる．また全てのモータは周波数帯域，左右ごとにそれぞれの挙動をする．

3.5.2 時間差あり制御（音の通過感発生）

前後のモータの動作の振動開始時間に差を持たせることによって音が前から後ろへと通過する感覚をを再現する為の物である．本システムはフレームレートを 300fps に設定している．遅延させる秒数を 0–100ms としてフレーム数を設定することにより，前の振動モータが振動開始した後，0–100ms 後に後部の振動モータが振動を開始する．これにより音の通過感が再現される（図 8）．振動開始処理を前後で入れ替えることにより，後ろから前への音の通過感再現も可能である．

時間差制御の場合には周波数帯域毎のモータの ON・OFF 制御に加え，前後左右の遅延処理を個別にモータに反映する．

4. 振動の時間差による音の通過感の予備的調査

4.1 実験の設定

振動の時間差による音の通過感に関して提案システムを使用し，アンケートによる予備的調査を行った．今回の調査では前から後ろへの音の通過感を調べる物とする．

仮説:

被験者: 被験者は 21–24 歳の健常男性 3 名，女性 2 名の合計 5 名で行った．

条件: 遅延差 0–100ms 間を 10ms 区切りに設定した合計 11 個のパターンを，順序交差を考慮し被験者に提示する．実験手法: 被験者に振動モータアレイデバイスとヘッドフォンを装着してもらう．ヘッドフォンからは一定間隔でバスドラム 1 5回分の打撃音が流れる．振動モータアレイデバイスの前部モータは音楽と同期して振動し，後部モータは前部モータに遅れて振動する．後部モータは 0–100ms 間で 10ms 区切りに設定し，それぞれの遅延差のパターンを評価した．

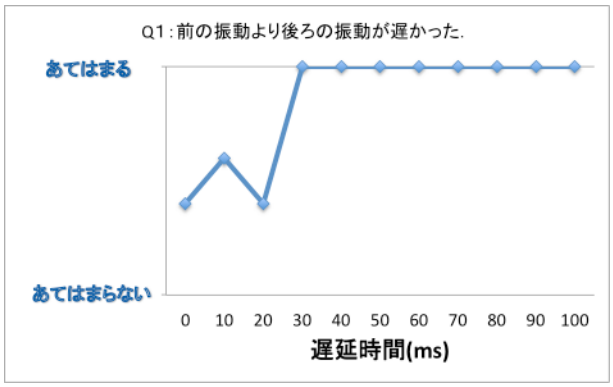


図 9 Q1 の結果

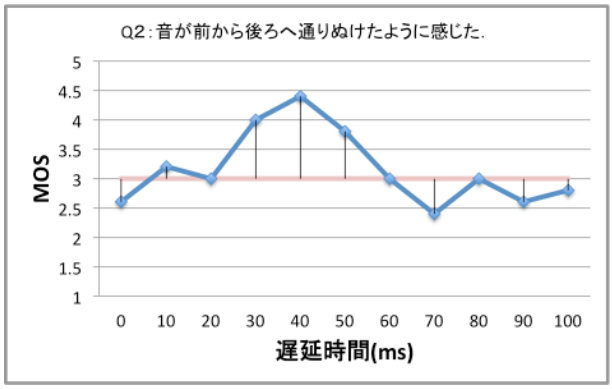


図 10 Q2 の結果

評価項目: 評価項目は次の通りである．

Q 1：前の振動より後ろの振動が遅かった．
Q 2：音が前から後ろへ通りぬけたように感じた．
Q 3：身体の前側の振動は音よりも遅かった．
Q 4：身体の後側の振動は音よりも遅かった．

Q 1 のみ回答が 2 段階評価（1．あてはまる，2．あてはまらない）で，それ以外の質問は 5 段階評価（1．あてはまらない，2．どちらかといえばあてはまる，3．どちらともいえない，4 どちらかといえばあてはまる，5．あてはまる．）である．

4.2 実験結果

【Q 1：前の振動より後ろの振動が遅かった．】の結果を図 9 に示す．30ms を境に評価がすべてあてはまるになっていることが伺える．【Q 2：音が前から後ろへ通りぬけたように感じた．】の結果を図 10 に示す．30ms 50ms で評価が高いことが確認できる．【Q 3：身体の前側の振動は

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

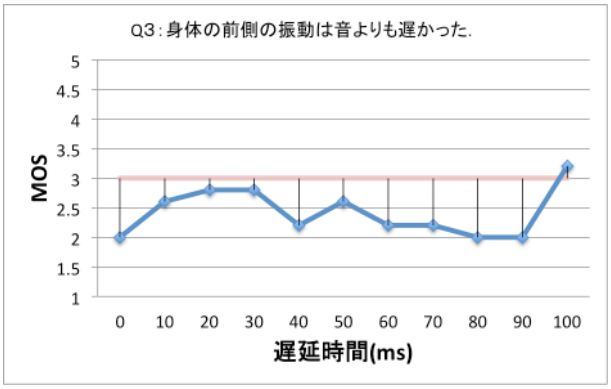


図 11 Q3 の結果

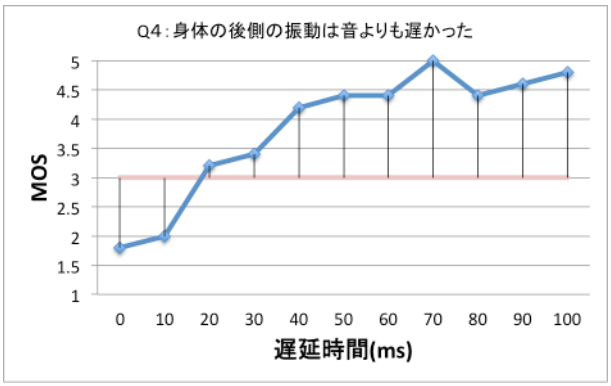


図 12 Q4 の結果

音よりも遅かった.】の結果を図 11 に示す．100ms を除く全ての遅延時間で評価にあまり変化が見られない．【Q 4：身体の後側の振動は音よりも遅かった.】の結果を図 12 に示す．遅延時間が増加するにつれ，評価が高くなっていることが確認できる．

5. 考察

Q1 の結果より，0–25ms までは前後の振動時間差を感じず，25ms 付近から前部振動と後部振動の振動開始時間の差を感じることが確認できる．

Q2 の結果より，特定の遅延時間帯で，音の物理的な通過感に対する高い評価が確認できる．通過感を感じ始めるのは遅延時間が 25ms の時からであり，遅延時間が 40ms の時が一番通過感を感じやすいと考えられる．また遅延時間が 55ms を超えると通過感を感じにくくなっていることから振動開始の時間差を感じることが必ずしも通過感体験にはつながらないということが考えられる．また，音に対する前部振動は Q3 の結果より音と同期して感じられたことが確認できる．100ms の時に評価に変化があったのは，遅延時間が長いため，遅延した振動を次のバスドラムの打撃音と錯覚した可能性があると考えられる

音に対する後部振動の遅延は Q4 の結果より，20–30ms で感じ始め 40ms から顕著に感じられることが確認できる．Q1 と Q4 より，音と振動の間に遅延差を感じる事と，振動と振動の間に遅延差を感じる事が，どちらも遅延時間が 25ms 付近の時であるので，音と振動の遅延差と振動と振動の遅延差の感じ方は近いものであると確認できた．

本システムを用いて，音楽と身体への低–中音域の音の振動を併用して体験させることにより，音の迫力を増幅させるだけでなく，新しい感覚である，音の物理的な通過感を体験させることによって，音楽などの臨場感の増幅に繋がることを考える．これにより，音源位置の把握がより明確にできるので，実際のコンサートホールやライブ会場に近い臨場感を再現し，また，映画などの物体移動の音響感覚を体験できるようになると考えられる．加えて，時間遅延による音の物理的な通過感を再現することにより，新しい感覚で音楽を楽しむ手法を見いだした．

今回のアンケート調査では，音の物理的な通過感を感じるかどうかの調査であるので，音の物理的な通過感が果たして，全ての音楽などのコンテンツに好意的な効果を与えるかはこの調査結果からでは述べることは不可能である．今後，振動による音の物理的臨場感提示と新しい感覚としての音の物理的な通過感が体験者によい効果をもたらすかどうかを検証する必要があると考えられる．

6. おわりに

本稿では音楽の臨場感増加の為の新しい手法として，前後から振動を与えることにより，音源位置を明確にさせ定位感を与え，さらに新しい感覚として振動時間差を与えることによって音の通過感を体験者に感じさせる手法を提案した．

音の物理的な通過感に関しては，音が身体を通過する際には音のエネルギーは減衰していると考えられるので，音のエネルギー減衰も考慮に入れたシステムを構築しなければならないと考えられ今後の課題となる．

本稿では音楽の臨場感増幅に重きをおいていたが，映像と組み合わせることにより，映像表現の臨場感増加も期待できると考えられる．

謝辞 本研究は一部科研費 24300047 および科研費 25700021 の助成を受け実施したものである．

参考文献

[1] 佐々木信之，大墳聡，石井一嘉，原川哲美: 視覚障害者，盲ろう者のための少数点振動子による音楽表現の研究，筑波技術大学テクノレポート 21(1), 134-135, 2013-12 ，筑波技術大学学術・社会貢献推進委員会
[2] 猪狩理，鎌田一雄:触覚刺激を利用した楽音伝達の基礎検討．電子情報通信学会総合大会講演論文集 1996 年 基礎・境界, 372, 1996-03-11, 一般社団法人電子情報通信学会
[3] 阪梨英樹:音楽聴取時の全身振動と聴覚情報のマルチモーダル知覚, 電子情報通信学会技術研究報告. A, 応用音響 112(76), 1-6, 2012-06-01, 一般社団法人電子情報通信学会
[4] 古屋友和, 柳澤祐貴, 伊藤一典:空気噴流刺激による音色の心理的印象の惹起方法に関する基礎的検討, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J94-D(1), 77-85, 2011-01-01, 一般社団法人電子情報通信学会

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

[5] 三浦宗介, 杉本政則:T-RHYTHM:振動デバイスを用いたリズム学習支援システム, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J89-D(6), 1260-1268, 2006-06-01, 一般社団法人電子情報通信学会
[6] 井出口健, 熊田信義, 永野秀和:, 印象強調を目的とした音楽聴取時の振動付与方法の検討, 感性工学研究論文集 3(1), 53-62, 2003, 日本感性工学会
[7] 難波 朋和, 坂本達彦, 井出口健, 古賀広昭:振動触覚を利用した音楽演出法に関する検討, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 1999 年. 基礎・境界, 354, 1999-03-08, 一般社団法人電子情報通信学会
[8] 井出口健, 難波 朋和, 古賀広昭:音楽聴取時に振動触覚を付与することにより音楽の印象を強調する方法に関する検討, 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界 J83-A(7), 924-927, 2000-07-25, 一般社団法人電子情報通信学会
[9] 熊田信義, 永野秀和, 井出口健:音楽聴取時の感性増幅を意図した振動触覚付与方法の一検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2001 年. 基礎・境界ソサイエティ大会講演論文集, 198, 2001-08-29, 一般社団法人電子情報通信学会
[10] 永野秀和, 井出口健, 畑地洋彦:アコースティックギターを用いた音楽の体感聴取方法の検討, 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界 J87-A(11), 1460-1465, 2004-11-01, 一般社団法人電子情報通信学会

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan