

# 空間指向性を含む繰り返し音楽の制御と演奏効果の検証

石野 力<sup>1,a)</sup> 伊納 洋祐<sup>1</sup> 米澤 朋子<sup>2</sup>

**概要:** 本研究では指向性を持たせた音を最適化し、発音するシステムを提案してきた。演奏者のジェスチャによる指示に合わせ、2自由度の角度制御により、パラメトリックスピーカの向きを変更することでループ音楽の各音の発音方向が付与されるシステムである。演奏者と聴取者の両者が一体化し共に楽しむ音楽環境を目指した。本稿では演奏指示の簡潔化による演奏者側の評価と、空間性を持つ音に対する観客の興味の評価について述べる。

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

従来、音楽の要素としてはメロディー、ハーモニー、リズムの3要素が挙げられてきた。音楽を鑑賞するに当たっては曲としての美しさも必要ながら、聴取者への聴かせ方という点では、音の位置である定位も重要である。例えばオーケストラや合唱では、その音がどこから発されているのか、どう聴かせるか、どう音を重ねるかが演奏者・聴取者共に音楽に携わる上で重要となっている。

音の定位はあらゆる音楽に関わっているが、生の演奏を聴くときに特に重視されてきた。これまでの音楽鑑賞環境においては2チャンネルのステレオ形式による鑑賞形態が一般的であったためである。しかし、近年では技術の発達により、5.1ch サラウンドをはじめとするマルチスピーカ形式の鑑賞環境が広まりつつある。それらの環境に対応した音楽は特に要素として音の定位が重要となっている。音の定位はあらゆる演奏を聴く時にかかわる要素であるものの、事前のセッティングなしの即興演奏に関しては定位設定は難しい。即興演奏ではその場の雰囲気や盛り上がりに対して適宜パフォーマンスを随時変更する必要があるため、不慣れた演奏者は自身の演奏に手いっぱいリアルタイムに音の定位を決定することが困難である。そこで我々は誰もが即興演奏と音の配置を行うシステムを制作してきた [1] は誰もが即興演奏と音の配置を行うシステムを制作してきた。

本稿では、演奏に合わせて指で方向指示を行うことでスピーカの向きを直感的に変更することを可能とした。スピーカはパラメトリックスピーカを用い、スポットライトのように音の放射を行い、音の広がり制限され、望んだ場所へ音を放射することが可能とした。

即興演奏部分は2小節を8分割した音価を1単位とした8ステップのループ音楽を演奏する。演奏は8\*8のボタン式キーボードを押下することで行う。

このシステムを使用することで、音の配置を伴う即興演奏を誰もが体験できることを目標とした。動作イメージを図1に示す。

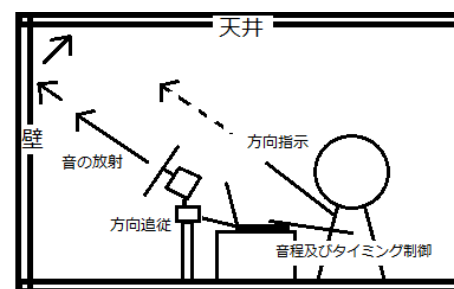


図1 動作イメージ

### 1.2 用語の定義

本稿にて使用する用語を以下に定義する。

#### 音の配置

本稿ではシーケンサ上にステップごとの音高及び発音方向を指定することを指す。

#### ループシーケンサ

一定周期で演奏情報の初期位置に戻り、再び演奏を再開するシーケンサ。本システムでは8ステップ(段階)のシーケンサを採用した。1ステップ目から順に演奏し、8

<sup>1</sup> 関西大学大学院 総合情報学研究科  
Kansai University Graduate School of Informatics, 2-1-1  
Ryozenji-cho, Takatsuki-shi, Osaka, 569-1095, Japan

<sup>2</sup> 関西大学 総合情報学部  
Kansai University Faculty of Informatics, 2-1-1 Ryozenji-  
cho, Takatsuki-shi, Osaka, 569-1095, Japan

a) k957371@kansai-u.ac.jp

ステップ目を演奏し終わった後、再び1ステップ目から再生を開始する。

### 反射音を用いた音源生成

パラメトリックスピーカから放射された音が壁や天井などの構造物にぶつかった結果、その構造物を振動させてスピーカとして音を聞かせることを指す。

## 2. 関連研究

パラメトリックスピーカを利用した音像配置としては矢田ら [2] による空中音源配置がある。圧電型トランスデューサーをアレー上に配置して空中音源を実現している。また、長尾ら [3] はパラメトリックスピーカを利用した音像提示としてミュージアムでの展示物鑑賞支援システムを制作している。パラメトリックスピーカの特性を生かして特定の人に対しての音像提示を行っている。本稿で提案するシステムもオーディオスポットライトのように特定の人ないしは対象に対して音を提示している。

空間に音像を提示する手法としては、パラメトリックスピーカを使用する以外にもさまざまな方法がある。風間ら [4] や久木元 [5] による通常のスピーカを複数使用するトランスオーラル再生方式の仮想音源再生。窓枠型にスピーカアレイを構築した時岡 [6] らの手法も存在している。これらは複数のスピーカを用いることで空間に音を配置するシステムである。

また、パラメトリックスピーカを利用した音像移動型提示装置として伊藤ら [7] による“X-Media Galaxy”がある。音定位を物体の移動に合わせて変化させることで、移動音像を実現している。伊藤らはこれを音像プラネタリウム形式と呼称している。同様に森勢ら [8] による音像プラネタリウムもある。3次元音場再生方式を用い、移動音像を実現している。両者とも複数のパラメトリックスピーカを利用した移動音像の実現方式である。パラメトリックスピーカではなく通常のスピーカを球状に配置した研究としては牧ら [9] や林ら [10] による球形スピーカがある。通常のスピーカを用いることでリアルな音源再生を狙いとしたシステムである。これらはいずれも複数スピーカを用いている。これらのシステムはスピーカを動かさず、全体に配置することによってあらゆる方向のカバーを試みている。

## 3. システム

### 3.1 システム概要

ループ音楽の演奏及び音の配置を行うシステムを実装した。指の方向へパラメトリックスピーカが自動的に追従し、音の放射を行う。テンポに合わせて方向を指示することで様々な場所から音が鳴っているように聞かせることを可能とした。

図 2 にシステム概要図を示す。

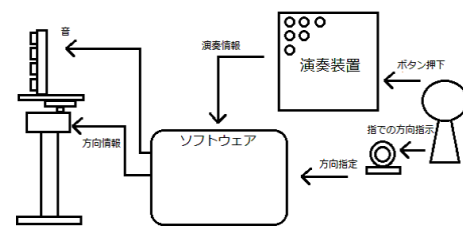


図 2 システム概要

### 3.2 ハードウェア

全体構成を図 3 に示す。本システムはスピーカ及び駆動装置（以下「スピーカ」）、8\*8 キーボード（以下「演奏装置」）、動作取得デバイス、演奏及び駆動制御ソフトウェア（以下「ソフトウェア」）によって構成される。スピーカ及び演奏装置はそれぞれ独立したマイコンによって制御されており、PC とシリアル通信を行うことでデータを送受信する。

操作者は演奏装置及びソフトウェアを使用し、ループ音楽の演奏及びスピーカの制御を行う。動作取得デバイスはキネクトであり、腕全体のトラッキングによりスピーカの向きを変更する。現在は左用、右用計 2 基でのインタラクションを行うことが可能である

スピーカ及び演奏装置はそれぞれ Arduino のシリアル通信機能を用いて接続している。サーボモータ 4 基への出力は Arduino1 の PWM を利用している。また、サーボモータ駆動のために AC アダプタからの給電を行っている。スピーカは PC のオーディオジャックから流される音声信号を鳴らしている。

演奏装置は 8\*8 のキーボードマトリクス状ステップシーケンサである。これは Arduino2 によって制御されており、ボタンの押下により、ソフトウェア側にどのボタンが押されたかをシリアル通信で送信する仕組みである。デジタルポートを多く使うため、Arduino Mega によって実装した。

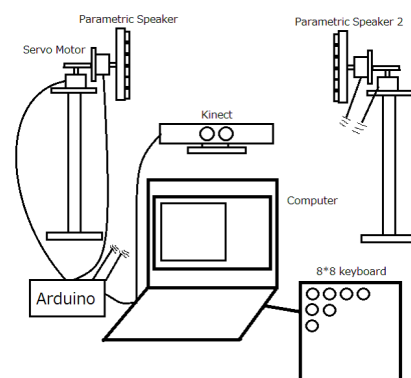


図 3 システム全体図

#### 3.2.1 パラメトリックスピーカ

パラメトリックスピーカは発信面に 50 個の発信子を持

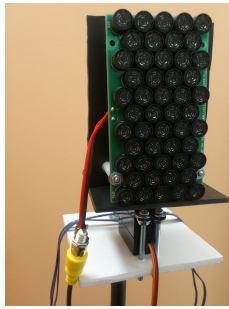


図 4 スピーカ及び駆動装置

つ. 設置方法によって約 10 度もしくは約 20 度の指向特性を持つ. 本システムでは約 20 度の指向特性を持つ縦置きで使用している. 後述のサーボモータにより, 適切な場所へ音を放射する.

### 3.2.2 駆動装置

図 4 にスピーカ及び駆動装置を示す. 駆動装置はサーボモータを用いた. スタンドの台座に取り付けられており, スピーカの向きを決定するのに使用される. 0 度から 180 度の可動範囲を持ち, 1 度刻みで制御が可能である. 初期数値は 90 度である. PC とシリアル通信で繋がっており, 後述するソフトウェアによって制御される.

### 3.2.3 演奏装置

図 5 に演奏装置を示す. 演奏装置は 8\*8 のキーボードマトリクスによって実装した. 8 列 8 行にそれぞれタクトスイッチを同間隔に配置してマトリクスを作り, Arduino Mega による一定タイミングごとの走査時にボタンが押下されているかをシリアル通信でソフトウェアに送っている. 8 ステップのシーケンサとして利用しており, 各ステップごとに音の選択肢は 8 つある.

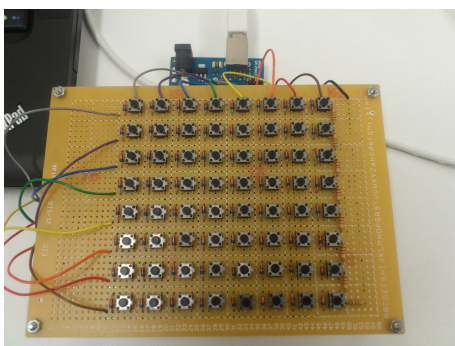


図 5 演奏装置

### 3.2.4 動作取得デバイス

スピーカの向きを直感的に制御するため, 奏者の動作を取得するデバイスである. 本システムではマイクロソフト社から発売されている Kinect for Windows を使用してい

る. Kinect の腕のボーンをトラッキングしており, 得られた値をソフトウェアの方向指示部に送信する.

### 3.3 ソフトウェア

システム全体を制御するための Processing で実装したソフトウェアについて述べる. ソフトウェアは方向指示部と演奏担当部によって構成される. 機能は以下のとおりである.

- ウェブカメラからの画像取得・表示・角度計算
- 方向指示の録画
- 演奏装置からの情報取得・視覚的反映
- 演奏の開始・停止
- 演奏速度の変更

マウスによる操作を想定している. 図 6 にソフトウェアを示す.

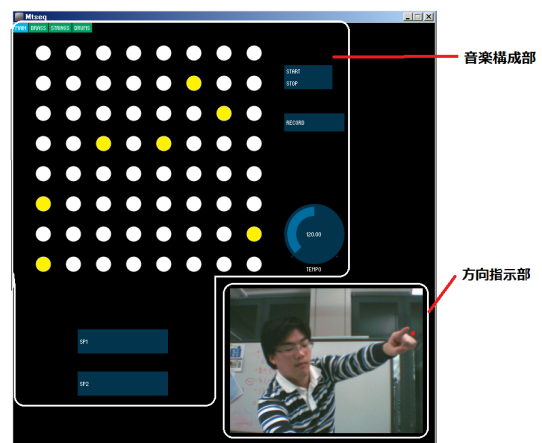


図 6 演奏及び駆動制御ソフトウェア

### 3.4 方向指示部

スピーカの向き変更を担当する. キネクトからの数値データを元に座標を求め, 角度指定を行う. 腕全体をボーンとしてトラッキングしている.  $xy$  座標を取得し, ソフトウェア内で方向指定用の座標配列に格納する. 曲に合わせてサーボモータ制御用の PWM 信号を Arduino を通じて発している.

音放射最適化アルゴリズムを搭載している. スピーカ数の増加により, 1 つのスピーカが担当せねばならない範囲が狭まった. 腕が示したポイントを  $x,y$  座標指定に変換した後, 現在のスピーカの方向とそれぞれ比較し, どちらのスピーカが動いた方がスピーカの動きが最少で済むのかを計算するアルゴリズムである. これにより, テンポが速い曲になってもスピーカが身体動作に追従することが可能となった.

### 3.5 音楽構成部

3.2.3 の演奏装置と連動して演奏を行っている. 本シス

テムでは8ステップのループ音楽を構成する。各ステップごとに音高は8種存在している。本システムでは最下段をC3からC4までの白鍵部分をそれぞれ割り当てている。発音タイミングが来たときにそのボタンの押下済み情報があれば発音する仕組みになっている。同ステップ内での別音同時発音も可能である。複数音源演奏にも対応しており、複数のスピーカを導入したことにより、複数ティンバーを扱うことが可能となった。金管、弦、打楽器の3音源を追加した。いずれのスピーカから音を出力するかはシーケンサ画面下のボタンで選択が可能となっている。

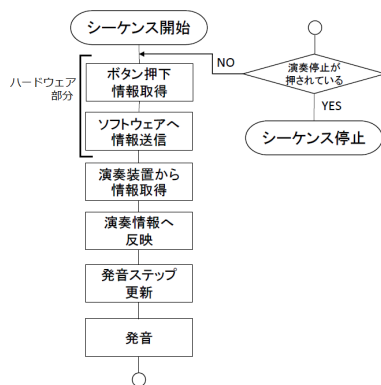


図7 演奏部分フローチャート

### 3.6 システム利用例

本システムは演奏に合わせて2基のスピーカの向きが変化する。スピーカの向きを指定するにはキネクトの前で方向を指示することが必要である。演奏中に好きな方向を指さすことで最も目標座標に近い座標を有するスピーカが駆動する。また、動作の録画も可能でソフトウェアにどのタイミングで向きを変更すればよいのかを記憶させることができる。常に演奏され続けているため、サーボモータが座標間を移動している間にも音が途切れず、各ステップ間の方向変化中に予期せぬ音の配置を楽しむことができる。

## 4. 演奏効果の検証

### 4.1 実験目的

スピーカの自由度により、聴取者の感情にどのように影響を与えるかを調査する。評価を行い、ユーザの解釈を評価した。

### 4.2 実験の設定

#### 仮説

- (1) スピーカが動かないならば、音は一部の聴取者にしか聞こえず、音が放射されている聴取者以外インタラク션을楽しむことができない。

- (2) 縦のみに動くならば、音は一部の聴取者にしか聞こえず、音が放射されている聴取者以外は楽しむことができない。
- (3) 横のみに動くならば、音を全員が聞くことができ、聴取者全体が楽しむことができる。
- (4) 縦及び横に動くならば、音を全員が聞くことができ、聴取者全体が楽しむことができる。この場合が最も楽しいと感じる。

### 被験者

19～31歳 学生及び社会人 男女：30名

### 実験手順

- 6人1組で、1人が演奏者、残りの5人に聴取者の役割を持たせた。
- 1人が各条件を必ず2回演奏する。
- 演奏した/聴いたパフォーマンスから感じた印象についてSD法評価項目、MOSのアンケートを演奏者/聴取者の立場からそれぞれ回答する。

### 評価項目

被験者には2つの評価を行わせた。印象評価には25項目の形容詞対を用いた。形容詞対には音楽印象や芸術への印象を調査している論文[11]を参考にした。項目は表1に記載する。また被験者は以下の評価項目に5段階で主観評価を行った(1:あてはまらない 2:あまりあてはまらない 3:どちらでもない 4:まああてはまる 5:あてはまる)。質問1~4は演奏者向けの質問であり、5,6は聴取者向けの質問である。

#### 演奏者向け質問

- (1) 演奏が容易であった
- (2) 演奏を楽しむことができた
- (3) 相手と音を通じたやりとりをしていると感じた
- (4) 聴取者に向けて音を飛ばしているという実感があった

#### 聴取者向け質問

- (1) 相手と音を通じたやり取りをしていると感じた
- (2) 演奏者から音を飛ばされているという実感があった

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 印象評価による実験結果

SD法による印象評価を因子分析した。固有値を求めた結果、因子1(固有値4.2856)までを分析することとした。

表1に形容詞対及びバリマックス回転後の因子負荷量を示す。今回は因子負荷量0.5以上もしくは-0.5以下について着目し、それらに下線を引いた。

因子1については「変化にとんだ—単調な」、「動的な—静的な」、「活発な—不活発な」、「参加感のある—参加感のない」、「覚醒的な—覚醒的ではない」、「ワクワクする—退屈する」で因子負荷量が高かった。このことから因子1は



表 1 形容詞対及び因子負荷量, 得点係数

形容詞対	因子 1	標準得点係数
おもしろい—つまらない	0.4899	0.1067
親しみやすい—親しみにくい	0.1958	0.3371
快な—不快な	0.2633	0.0688
ワクワクする—退屈する	<u>0.5352</u>	0.1241
魅力的な—魅力のない	0.2916	0.0527
明るい—暗い	0.2585	0.0458
さわやかな—うっとおしい	0.2227	0.0388
予想通りな—意外な	0.3612	0.0687
美しい—醜い	0.171	0.0291
刺激的な—刺激的でない	0.1785	0.0305
にぎやかな—さみしい	0.4266	0.0863
派手な—地味な	0.4236	0.0854
活発な—不活発な	<u>0.6281</u>	0.1717
きちんとした—だらしない	0.2408	0.0423
動的な—静的な	<u>0.6372</u>	0.1776
安定した—不安定な	0.0497	0.0082
まとまった—バラバラな	0.267	0.0476
変化にとんだ—単調な	<u>0.6506</u>	0.1867
落ち着いた—落ち着きのない	-0.0731	-0.0121
なめらかな—とげとげしい	0.0443	0.0073
覚醒的な—覚醒的ではない	<u>0.5468</u>	0.1291
嬉しい—悲しい	0.2923	0.0529
協調的な—非協調的な	-0.0554	-0.0092
参加感のある—参加感のない	<u>0.5926</u>	0.1512
にぎやかな—孤独な	0.23	0.0402

盛り上がり具合を表すものだと解釈し、「ライブ性」因子と名付けた。分散分析の結果を表 2 に示す。

#### 4.3.2 主観評価による実験結果

全ての評価項目について SD 法で 5 段階評価を行った。得られた評価結果に対して分散分析を行った。分散分析を行った結果は表 3 及び 4 に示す。各質問について分析から得られた結果は以下のとおりである。

1 つ目の質問は演奏を容易に行うことができるかどうかを計るためのものである。ステップシーケンサと身体動作の双方が必要であった。縦方向、横方向、いずれも有意差はみられなかった。

2 つ目の質問は演奏が楽しかったかどうかのを知るための質問である。分析の結果「縦」、「横」間に有意差が見られた。

3 つ目の質問は演奏者聴取者ともに同項目を尋ねた。立場(演奏者・聴取者)の要因が加わっている。この質問では音を通じた情動的やり取りが可能かどうかを調べるためのものである。音楽を通じた人対人のコミュニケーションである。本質問項目においては「縦」要因がやりとりをしているとの有意差が見られた。

4 つ目の質問も演奏者・聴取者間に共通した質問である。音を飛ばしているという実感があるかどうか、音を飛ばされているという実感があるかどうかを尋ねた。この質問項目では全要因に有意差が見られた。演奏者でも聴取者で

も、縦方向横方向関係なく音を飛ばしている実感を感じてもらえたと考える。

## 5. 考察

### 5.1 因子分析結果から

今回の実験ではライブ性という因子が存在することが判明した。「変化にとんだ—単調な」、「動的な—静的な」、「活発な—不活発な」等の形容詞対から因子負荷量が高かった。マイナス方向に因子負荷量が高かった形容詞対は存在しておらず、さらにこれらの形容詞対は活発なイメージのあるある形容詞対が多く含まれている。音楽の楽しみはコミュニケーションにあり、ライブ性が因子として挙げられるなら本システムは音楽のコミュニケーションの楽しみや実感を高めたともいえる。

### 5.2 主観評価分析から

縦方向への音放射に関して、質問 2,3,4 から有意差が得られた。予測か?可能な横方向の演奏よりも、と?のように音か?放射されるのかか?分かりにくい縦方向の演奏か?被験者に新鮮な感覚を与え、演奏を楽しむことができたと推測する。横方向は縦に比へ?各質問においてほとんど有意差は得られなかった。しかし、縦要因と共に 4 問目の質問において有意差を得ることか?て?きた。4 問目については第 3 要因で?ある「立場(演奏者・聴取者)」においても有意差か?得られた。このことから本システムを使用することて?音を飛ばは?すこと か?十分に行うことか?可能で?あると考える。

## 6. おわりに

本稿では、演奏に合わせて指で方向指示を行うことでスピーカの向きを直感的に変更することを可能としたシステムを提案する。パラメトリックスピーカを用い、スポットライトのように音の放射を行い、音の広がり制限されて望んだ場所へ音を放射することを可能とした。

即興演奏部分は 2 小節を 8 分割した音価を 1 単位とした 8 ステップのループ音楽として演奏する。演奏は 8\*8 のボタン式キーボードを押下することで行う。

このシステムを使用することで、音の配置を伴う即興演奏を誰もが体験できることを確認した。ライブ性と言う因子から本システムを使用することでの盛り上がりについても確認することができた。

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。

表 2 被験者が受けた印象についての分散分析

Table 2 Analysis of variance result

ff	縦 (A)		横 (B)		単純主効果
	F(29)	p	F(29)	p	
ライブ性	869.438	< 0.01*	32.24	< 0.01*	A(b1,b2),B(a1)

表 3 被験者の主観評価についての分散分析

Table 3 Analysis of variance result

	縦 (A)		横 (B)		単純主効果
	F(29)	p	F(29)	p	
演奏が容易であった	1.648	0.2094	1.552	0.2228	—
演奏を楽しむことができた	19.445	< 0.01*	1.596	0.2165	—

表 4 被験者の主観評価についての分散分析

Table 4 Analysis of variance result

	縦 (A)		横 (B)		立場 (C)		単純主効果
	F(29)	p	F(29)	p	F(29)	p	
やりとりを感じた	32.472	< 0.01*	4.17	0.0503	1.136	0.2953	—
音の通信	62.936	< 0.01*	14.233	< 0.01*	5.125	< 0.01*	—

参考文献

33(3), 253-260, 1985-09-30

- [1] 石野 力, 中 祐介, 吉田 侑矢, 松井 雄佑, 米澤 朋子, "空間指向性を含む音楽構成の検討", 情報処理学会研究報告. [音楽情報科学] 2014-MUS-104(18), 1-6, 2014-08-18
- [2] 矢田 淳也, 北川 和則, 米沢 義道, 伊東 一典, 橋本 昌巳, "パラメトリックアレイビームによる空中音源," 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 94(202), 25-30, 1994-08-26
- [3] 長尾 俊, 苗村 健, "超指向性スピーカ群を用いた鑑賞支援システムの基礎検討," 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 112(25), 29-34, 2012-05-07
- [4] 風間 亮介, 穂刈 治英, 島田 正治, "マルチチャンネルスピーカによる仰角・俯角における仮想音源再生の検討," 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 110(239), 49-54, 2010-10-14
- [5] 久木元 伸如, Ewe Chin Huat, 竹田 仰, "プロジェクション型没入ディスプレイにおける 3 次元音場生成のための実用的検討," 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 99(259), 29-36, 1999-08-26
- [6] 時岡 綾, 安藤 彰男, "仮想スピーカアレイによる窓枠型スピーカアレイの制御," 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 111(306), 1-6, 2011-11-11
- [7] 伊藤 仁一, 中山 雅人, 西浦 敬信 [他], 木村 朝子, 柴田 史久, 田村 秀行, "X-Media Galaxy における移動音像実現のための音像補間" 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 18(3), 405-414, 2013-09-30
- [8] 森勢将雅, 杉林裕太郎, 栗元総太, 西浦敬信, "音像プラネタリウム: 超音波スピーカを利用した 3 次元音場再生方式," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp.687-693, 2011.
- [9] 牧 勝弘, 木村 敏幸, 勝本 道哲, "26 チャンネル球形スピーカによる楽器の実演奏音の再生," 日本音響学会誌 67(10), 447-458, 2011-10-01
- [10] 林 貴哉, 宮部 滋樹, 山田 武志 [他], 牧野 昭二, "球状スピーカアレイを用いた放射特性制御のシミュレーション," 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 112(76), 19-24, 2012-06-01
- [11] 井上 正明, 小林 利宣, "日本における SD 法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観", 教育心理学研究