

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 14日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500110

研究課題名（和文） フィードバック型音場再生システムの開発研究

研究課題名（英文） Sound field reproduction system based on feedback control

研究代表者

鮫島 俊哉（SAMEJIMA TOSHIYA）

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授

研究者番号：00298192

研究成果の概要（和文）：

ある空間の音場を異なる時間・場所に再現する音場再生システムについて、現代的な制御理論に立脚したうえでそのシステム構成手法と制御器の設計手法を開発し、その制御性能の向上を図った。本研究を通して新たに三つの音場再生システムを開発し、制御システムの小規模化、既往の音場再生システムにおいて問題点の一つであった音像方向定位の前後誤りの改善、および室温変化に伴う音響伝達特性の変動に追従可能な制御方式の実現という成果を得た。

研究成果の概要（英文）：

This work has tried to improve control performance of sound field reproduction, which aims at reproducing the sound field of a space in a different moment and place. On the basis of the modern control theory, three alternative sound field reproduction systems have been developed. The sound field reproduction systems have brought about several improvements as follows: the scale of the controller is significantly reduced; front-back confusion in subjective listening experiments of source localization, which is one of the problems of conventional sound field reproduction systems, is reduced; the control performance is preserved for perturbations of the acoustic transfer functions owing to the change of room temperature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ、音場再生

## 1. 研究開始当初の背景

音場再生は、ある空間の音場(原音場, Primary field)を、異なる時間・場所(再生音場, Secondary field)において再現することを

目的としたものである。その一種として、トランスオーラルシステムと呼ばれる、バイノーラル録音された音源をスピーカを用いて聴取者の耳元に厳密に再生する手法がある。トランスオーラルシステムでは、現実的な

規模の制御システムによって十分な音場再生が可能であるものの、聴取者の耳元の限られた範囲でのみしか厳密な制御効果が得られないことや、聴取者の頭部の移動によるスピーカと耳元との音響伝達関数の変化、さらには頭部伝達関数の個人差を考慮することが困難であることが問題点として挙げられている。

スピーカの配置など制御システムの幾何的な構成を再検討することによって、上記の問題点を解決することが試みられてはいるものの、制御器を設計する際に必要となる制御理論の面からの検討はあまり行われていない。これまでに提案されてきた音場再生手法において用いられている制御手法は、スピーカと聴取者の耳元との音響伝達関数の逆フィルタという、制御理論の枠組みにおいては古典的ともいえる手法であった。もし、現代的な制御理論に立脚したうえでそのシステム構成と制御器の設計手法を新たに開発することができれば、上述のトランスオーラルシステムにおける問題点の解決に寄与することができる可能性がある。

## 2. 研究の目的

前述のような見通しのもと、本研究では **Feedback** 制御が議論の中心である現代制御理論をトランスオーラルシステムへ導入することで、その性能をさらに向上させることを試みる。まず、計算機シミュレーションによりどの程度の制御が可能であるか明らかにし、実用化へ向けたシステムの再構成と最適化を図る。それらの結果をもとに、実用化に際して必要となる制御システムの規模と性能を把握した後、実際に **DSP**(デジタル・シグナル・プロセッサ, **Digital Signal Processor**)を用いて音場再生システムを試作する。実現した音場再生システムについて、現実的な使用条件における音場再生の基本的性能を実測・評価する。最終的には音響のバーチャルリアリティシステムとして構築・常設し運用することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究は、現代制御理論に基づいた新たな音場再生システムの開発と実用化に関する研究であり、その研究内容としては大きく分けて以下の項目が挙げられる。

### (1) 制御システムを計算するための定式化

制御対象プラントとして、ダミーヘッドあるいはリアルヘッドの **HRTF**(頭部伝達関数, **Head Related Transfer Function**)をとりあげ、その適切なシステムモデル化(数学モデルとして表現すること)の方法を検討する。

後の音場再生システムのハードウェア化を考慮した場合には、なるべく低次のモデル化をすることが有利となるため、**HRTF**に適したより効率的なシステムモデル化の方法を検討する。

制御システムへの入力となる目標音響信号(原音場の音響信号)と、聴取者の耳元に実際に再生された音響信号(再生音場の音響信号)との誤差を0とすることを具体的な制御の目的として、いくつかの制御理論によって制御器を設計するための理論定式化を行う。

### (2) 計算機シミュレーションによる定式化の妥当性の検討と設計パラメータのチューニング

制御手法の妥当性を確認し、制御性能の評価を行って、**HRTF**のシステムモデル化の方法やそのパラメータ値の選択、制御器を設計する際の評価関数の設定の最適化を含めた制御システムとしての再構成を試みる。

### (3) 音場再生システムのプロトタイプの実験

**DSP**を用いて、音場再生システムを実際に試作する。

### (4) 音場再生システムの物理的な制御性能の実測

試作した音場再生システムについて、実験的にその物理的な制御性能を明らかにする。具体的には、無響室内において音場再生システムを運用し、クロストークキャンセルの性能、および音響伝達関数の等化器としての性能を測定し、所望の制御効果が得られているかを確認し、必要であれば制御システムの再構成を試みる。

### (5) 音場再生システムによる再生音の主観評価実験

聴感的特性を含めた音場再生システムの性能評価実験を行う。具体的には、無響室にて音場再生システムを運用し、音場定位に関する主観評価実験を行い、さらには再生音の音質に関する主観評価実験も行う。

## 4. 研究成果

### (1) 特異値分解法による **HRTF** のシステムモデル化手法の開発

計測・制御の分野において、線形システムの実測データを状態空間モデルとしてモデル化する手法として、特異値分解法と呼ばれている手法が開発されている。その特異値分解法を **HRTF** のモデル化に導入し、数値実験によってその数値特性を調べ、小規模かつ高精度な **HRTF** のモデル化を行うためのパラメータ値を求めた。これにより、既往のモデル化手

法である極・零モデルや共通極・零モデルに対して、より効率的なモデル化を行うことが可能となった。この成果は、音場再生システムの小規模化や、より高精度な音場再生を行うことに貢献するものである。

(2) HRTF の共通 AR 係数を用いた等化 FIR フィルタと IIR フィルタを併用した音場再生システムの開発

開ループ制御システムによって音場再生システムを実現する手法として、既往の FIR フィルタのみを使用したものではなく、HRTF の共通 AR 係数を用いた等化 FIR フィルタと IIR フィルタを併用した音場再生システムを提案した。図 1 に、提案する音場再生システムの構成図を示す。HRTF の共通 AR 係数は、共通極・零モデルのそれとした。IIR フィルタの係数は、非線形最適化手法によって求めた。

数値実験により、既往の FIR フィルタのみを使用した音場再生システムに比べて、特に目標信号のディレイが小さい場合により高精度な音場再生効果が得られることが分かった。画像信号の再生も含んだバーチャルリアリティシステムを構成する際に、再生画像信号と再生音響信号の同期が必要となるが、この成果はそのような状況においてシステムの小規模化に貢献するものである。

(3) HRTF の非最小位相零点の予測式の構築

HRTF のシステムモデル化の手法として開発した、特異値分解法を用いた手法によって、HRTF の零点の分析を行った。その分析を通して、非最小位相零点の生じる周波数の予測式を新たに作成した。音源方向による HRTF の変化は、非最小位相零点の変化によって特徴づけられる。そのため、音場再生システムによって音像を制御する際に、作成した予測式に基づいて非最小位相零点を変化させれば、

HRTF の実測値などを使用せずとも、任意の連続した方向へ音像を定位させることが可能となる。この成果は、本研究で構築を目指している音響のバーチャルリアリティシステムにおいて、その運用における応用例を広げることにも貢献するものである。

(4) クロストークキャンセルの効果または音響伝達関数の等化の効果を強調可能な音場再生システムの開発

音場再生システムの制御器の設計手法に関して、新たに制御誤差の時間波形を制御することが可能な逆フィルタ設計手法を提案した。音場再生システムを構築する際に、音響伝達系の逆フィルタを設計することが必要となるが、既往の最小二乗法に基づく手法では、制御誤差の時間波形を制御することができず、プリエコーのような歪みが生じる場合があり、聴感上問題となる。そこで、制御誤差の時間波形のサンプル値毎に異なる重みを乗じてから、最小二乗法で逆フィルタを設計することを試みた。その結果、重みを調整することにより制御誤差の時間波形を制御可能であることが分かった。

この成果を応用し、音場再生システムにおけるクロストークキャンセルの効果を評価する制御誤差の時間波形と、音響伝達関数の等化の効果を評価する制御誤差の時間波形に異なる重みを乗ずることにより、どちらか一方の制御効果をより強調するような制御が可能である音場再生システムを構築した。図 2 に、構築した音場再生システムの構成図を示す。目標信号  $d_0=0$  とした場合、重み関数  $W_1$  を大きくすれば音響伝達関数の等化の効果が強調され、 $W_2$  を大きくすればクロストークキャンセルの効果が強調される。既往の研究より、クロストークキャンセルの効果は音像の方位角の制御精度に相関があり、音響伝達関数の等化の効果は音像の仰角の制御精度

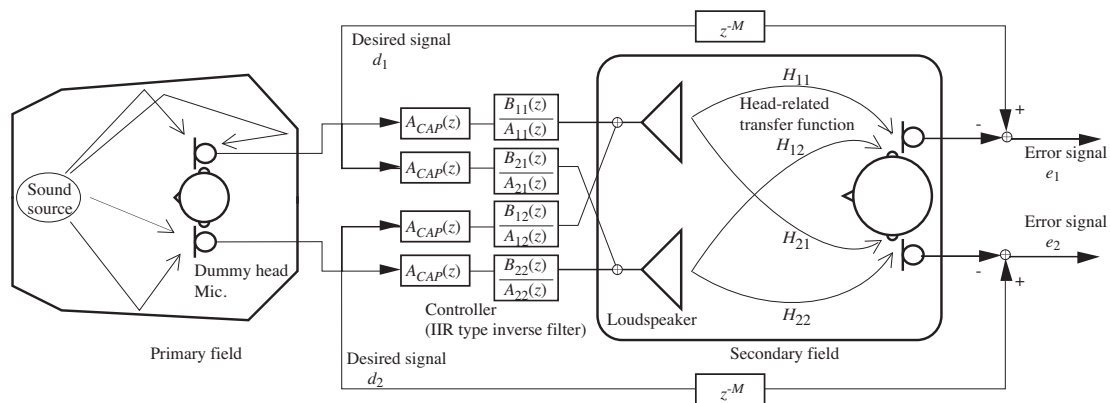


図 1 HRTF の共通 AR 係数を用いた等化 FIR フィルタと IIR フィルタを併用した音場再生システム

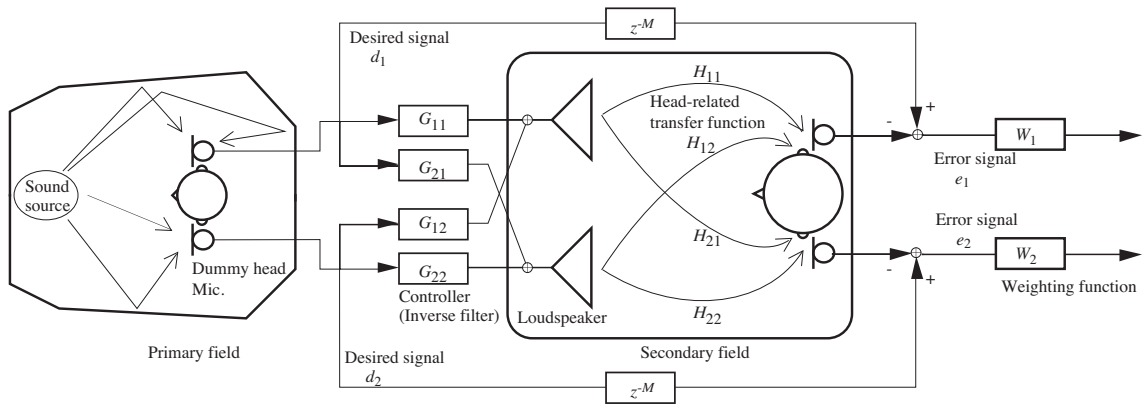


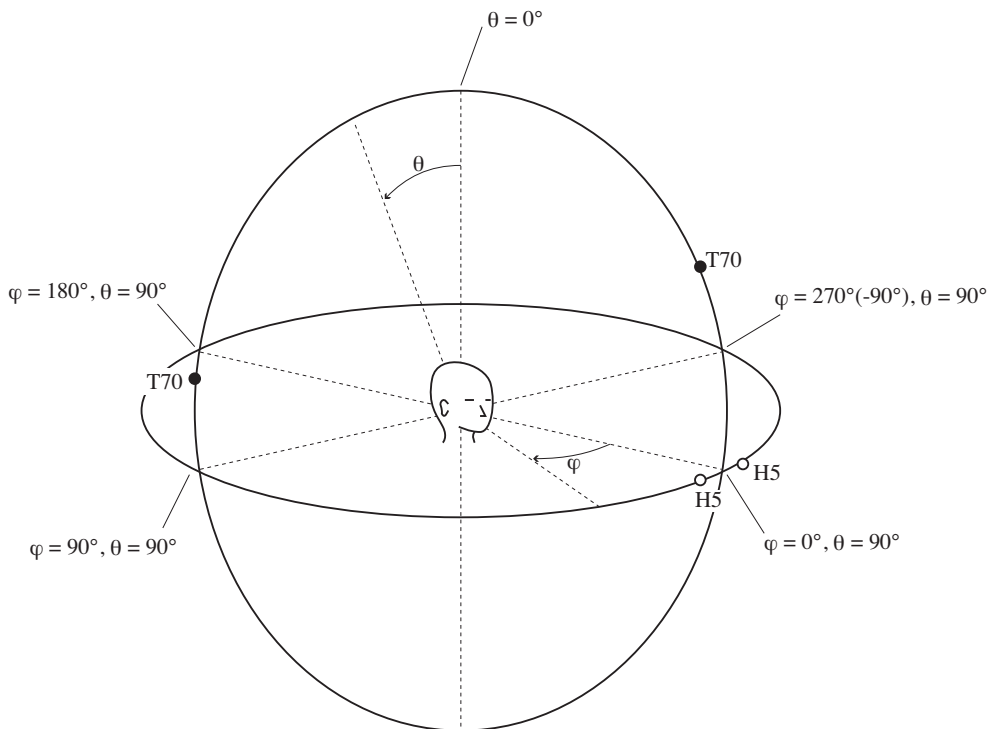
図2 クロストークキャンセルの効果または音響伝達関数の等化の効果強調可能な音場再生システム

に相関があることが分かっているため、音像の方位角と仰角のどちらを精度良く再現したいかによって、制御器を使い分けることが可能である。

構築した制御器の設計手法を用いて、図3に示すようなスピーカ配置(H5とT70の2通り)における音場再生システムをDSPを用いて実現した。その音場再生システムを使って、音像方向定位についての主観評価実験を行った。図4はその実験結果について、グラフの横軸で音像の目標方向を、縦軸で被験者の

回答方向を表し、円の直径を回答頻度に比例させて表したものである。音響伝達関数の等化の効果強調するような重み付けをして設計した制御器を用いた場合(下段)には、既往のトランスオーラルシステムにおいて問題点の一つであった、音像の前後誤りが改善される傾向が見られる。

- (5) ゲインスケジューリング制御理論を用いた制御対象の変動に応じて制御則を自己調整することが可能な音場再生シ



H5 :  $\varphi = \pm 5^\circ, \theta = 90^\circ$  ステレオダイポール方式

T70 :  $\varphi = \pm 90^\circ, \theta = 70^\circ$  飯田らの提案する方式

図3 実現した音場再生システムのスピーカ配置

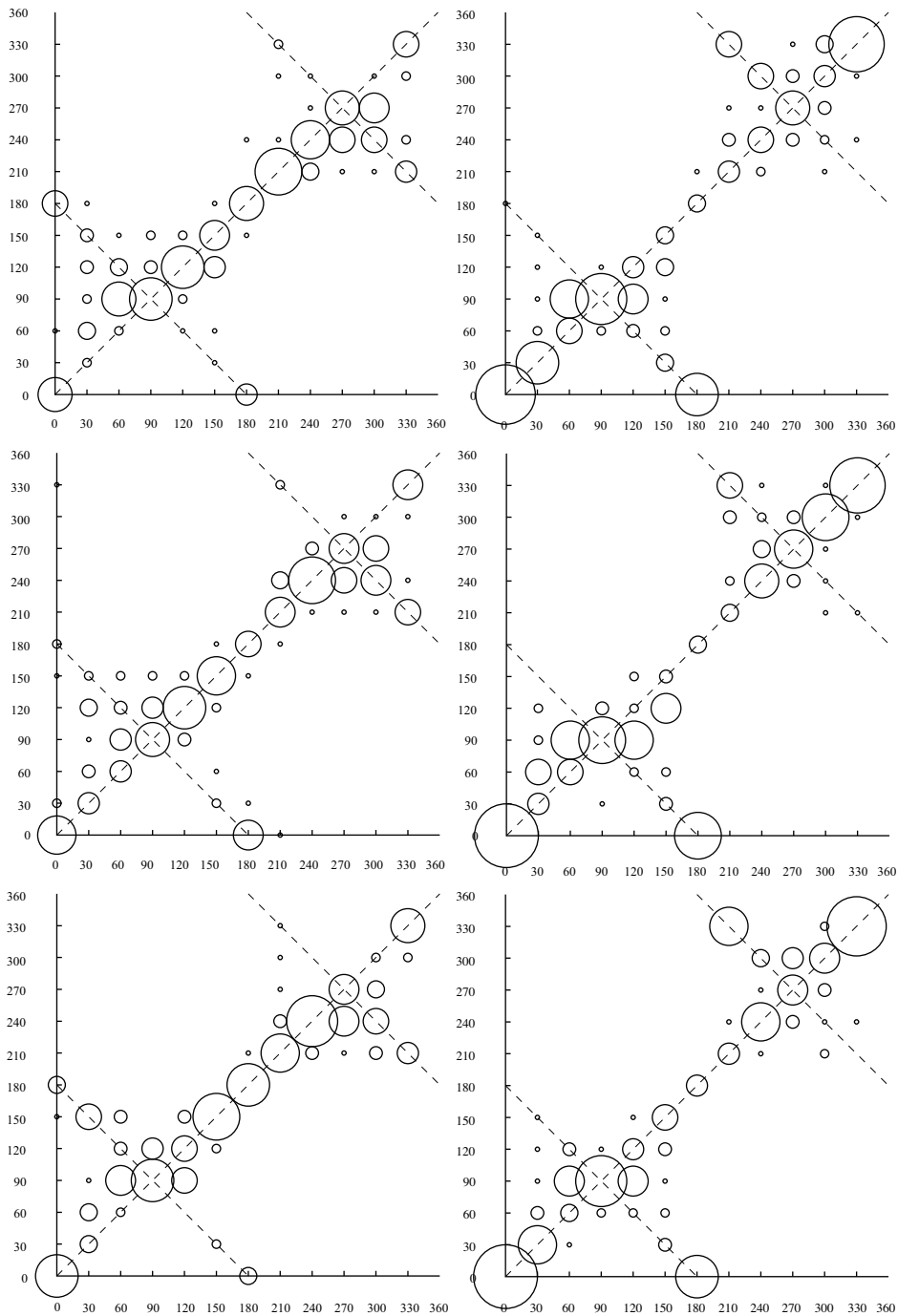


図4 音像方向定位についての主観評価実験結果

(左列：T70，右列：H5，上段：既往のトランスオーラスシステム，中段：クロストークキャンセルの効果を強調した場合，下段：音響伝達関数の等化の効果を強調した場合)

#### システムの開発

音場再生システムの制御器の新たな設計手法として、ゲインスケジューリング制御(GS制御)理論を用いた、制御対象の変動に応じて制御則を自己調整することが可能な手法を構築した。音場再生システムを構築する際に、制御対象となるHRTFを時不変なもの

として取り扱って、その制御器を設計することが一般的であったが、実際にはHRTFは温度や湿度などに依存して時々刻々と変動する。特に温度変化はHRTFのピーク・ディップの周波数の変動につながるため、音響伝達関数の等化を制御目的の一つとする音場再生システムにおいては、その制御性能が劣化

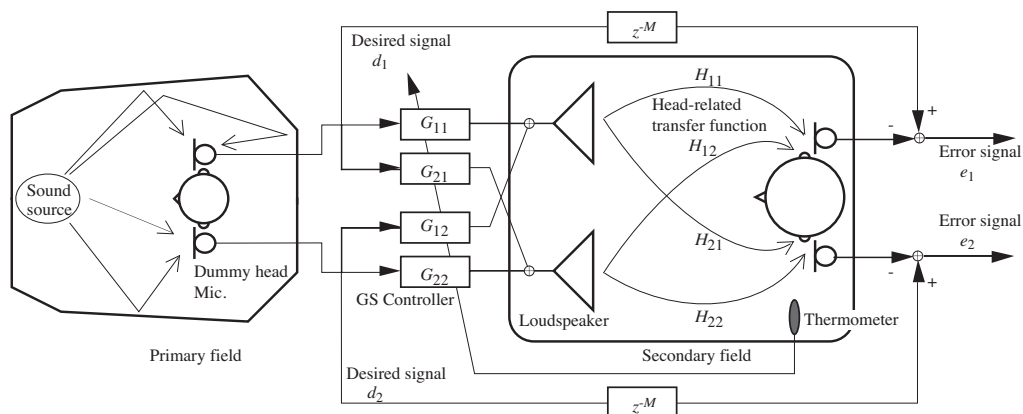


図 5 GS 制御理論を用いた制御対象の変動に応じて制御則を自己調整することが可能な音場再生システム

する可能性がある。

そこで、制御対象が観測可能なパラメータに依存するようなモデル化が可能な場合に有効な制御手法である、GS 制御理論の音場再生システムへの導入を試みた。図 5 に、制御対象の変動の一例として室温が変動する場合を想定した場合の、音場再生システムの構成図を示している。GS 制御理論では、観測可能なパラメータの関数として制御器が実現されるため、適応アルゴリズムによる制御器の更新・収束計算などせずとも、制御対象の変動に追従した制御効果が得られるという利点がある。

室温が変化する場合を想定した音場再生システムの計算機シミュレーションを行った結果、GS 制御理論を用いた音場再生システムでは、室温変化に伴う音響伝達特性の変動が生じている場合でも、制御性能の劣化が生じないことが確認できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- (1) 野田佑樹, 鮫島俊哉,  
ゲインスケジューリング制御の枠組みに基づくモデルマッチング問題による逆フィルタ設計,  
日本音響学会 2013 年春季研究発表会,  
2013 年 3 月 13 日~2013 年 3 月 15 日,  
東京工科大学(東京都)
- (2) 野田佑樹, 鮫島俊哉,  
ゲインスケジューリング制御を用いたアクティブ音響エネルギー制御,  
日本音響学会 2012 年秋季研究発表会,  
2012 年 9 月 19 日~2012 年 9 月 21 日,  
信州大学(長野県)

- (3) 野田佑樹, 坂井晴香, 鮫島俊哉,  
最小二乗法による逆フィルタ設計における誤差波形の制御,  
日本音響学会 2012 年春季研究発表会,  
2012 年 3 月 13 日~2013 年 3 月 15 日,  
神奈川大学(神奈川県)
- (4) 野田佑樹, 鮫島俊哉,  
頭部伝達関数の非最小位相零点の予測式,  
日本音響学会 2011 年秋季研究発表会,  
2011 年 9 月 20 日~2011 年 9 月 22 日,  
島根大学(島根県)
- (5) 竹下真, 鮫島俊哉,  
共通 AR 係数を用いた等化フィルタと IIR フィルタを組み合わせたトランスオーラルシステム,  
日本音響学会 2011 年春季研究発表会,  
2011 年 3 月 9 日~2011 年 3 月 11 日,  
早稲田大学(東京都)

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
鮫島 俊哉 (SAMEJIMA TOSHIYA)  
九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授  
研究者番号：00298192
- (2) 研究分担者 ( )  
研究者番号：
- (3) 連携研究者 ( )  
研究者番号：