

## 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 3 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21240018

研究課題名（和文） 視聴覚併用複合現実空間の表現力向上に関する研究

研究課題名（英文） Studies on Improving Expressive Power of Audio-Visual Mixed Reality Space

研究代表者

田村 秀行 (TAMURA HIDEYUKI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：10367998

研究成果の概要(和文):視聴覚併用複合現実空間の表現力を向上させる研究開発を推進し、聴覚的には新しい 3D 音像提示方式の提案・実装を、視覚的には実時間光学的整合技術の体系化を行った。特に「音像プラネタリウム」と名付けた前者は全く独自の新方式であり、当初の計画以上の有望な研究成果を生み出した。このため、本研究を1年短縮して終了し、2012年度から基盤研究(S)としてさらに発展させることになった。

研究成果の概要(英文): We studied the improvement of expressive power of audio-visual mixed reality space. A new presentation method of 3D acoustic sound field is proposed and implemented. Also, a systematic technology of real-time photometric registration is developed. Since the former, i.e. our own unique method named “Acoustic Planetarium” showed remarkable results exceeding the initial plan, this scientific research (A) was terminated one year earlier and succeeded to a new scientific research (S) for its further progress.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2010年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2011年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2012年度	0	0	0
総計	28,600,000	8,580,000	37,180,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：複合現実感，視覚，聴覚，高臨場感 3D，光学的整合性

## 1. 研究開始当初の背景

現実世界と仮想世界を融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術は着実に進展し、安定性も実用性も増しているが、対象は「視覚的 MR」に偏し、かつ研究は両世界の「幾何学的整合性」の達成に集中していた。報告者らは、先に視覚・聴覚・触覚を併用した「三感融合型複合現実空間の構成法に関する研究」を推進したが、この研究成果を踏ま

え、対象を「視聴覚併用 MR」に絞って、更に高度かつ独自の新方式を考案し、MR空間の表現力向上を図ることになった。

## 2. 研究の目的

前基盤研究(A)で「視覚的MR」と「聴覚的MR」を同時に達成する「2x2視聴覚併用MRシステム」を世界で初めて開発した。この方式をより発展させ、3D音像定位に自由度をも

たせるために、本研究では、全く新しい独自の「音像プラネタリウム方式」による3D音像生成を試みる。この方式は多数のスピーカを球状の筐体に配置し、そこから発生する音信号を部屋の壁面に反射させて、任意位置での音像定位を実現する方式である。そのイメージ図を図1に示す。本方式の採用により、利用者は全員がヘッドホンを装着することなく、自由な位置で聴覚的MRを体験することができる。本研究では、世界で初めて本方式を実現し、それを高臨場感MRシステムの基幹技術として用いることを目指す。

「視覚的MR」に関しては、必要要件とされながらも、研究提案が少ない（現実・仮想両空間の）「光学的整合性（画質合わせ）」の達成に焦点を当て、当該技術を進展させる。また、視聴覚併用MRシステム全体としては、そのコンテンツ開発を通して、バランスが良く、豊かな表現力をもつシステム構築技術の体系化を目指す。



図1 音像プラネタリウム方式による3D音像提示のイメージ図

### 3. 研究の方法

以下の3項目に分けて研究開発を推進し、具体的に稼動するMR体験システムでその有効性の確認や仮説の検証を行った。

(1) 音像プラネタリウム方式に基づく3D音像の生成：超音波スピーカによる超指向性音源を壁面に反射させることで、壁面上に音像を構築する手法を検討し、複数の超音波スピーカを搭載した「音像プラネタリウム基本ユニット」の開発を行い、様々な方向の壁面に複数の音像を基本ユニット1台で構築する。さらに構築した音像の音質改善と距離制御もあわせて検討することで、高臨場感MRシステムの基幹技術として利用することを目指す。

(2) 光学的整合技術による視覚的MRの表現力強化：現実空間・仮想空間の合成結果を、光学的特性からも違和感なく見せる技術全般を考慮した技術を行う。従来、現実空間の照

明に則して、仮想物体に陰影を実時間付与する手法がいくつか開発されて来たが、本研究では、仮想物体のぼかし等のレンズ効果、実物体から仮想物体への影付け、仮想照明による実物体への照明再賦与(Relighting)を実時間実行することにも挑戦する。

(3) 視聴覚併用MRコンテンツの制作：(1)の新技術「音像プラネタリウム」装置を導入した視聴覚MR体験が可能な環境を、X-Media Galaxy（クロスメディア・ギャラクシーと読む）と呼ぶことにした（図2）。この体験環境での具体的なMRコンテンツを開発・搭載することにより、実体験時に諸問題を発見し、より演出効果の高い表現法を考える。

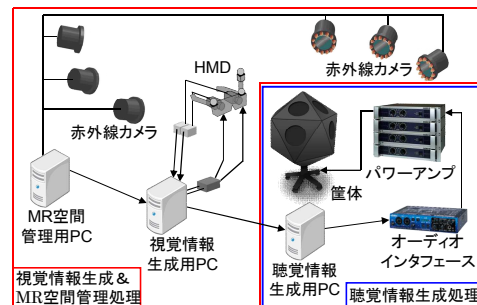


図2 X-Media Galaxyのシステム構成

### 4. 研究成果

前項で挙げた研究テーマに関して、それぞれ得られた研究成果の概要を、以下にテーマ毎に述べる。

#### (1) 音像プラネタリウム方式に基づく3D音像の生成

[2009年度]

- ・ 図3に示す壁面反射型音像提示方式を提案し、超音波スピーカを用いて壁面上に音像の構築を試みた。主観評価の結果、反射壁面上に構築した音像を被験者が定位できることを確認した。

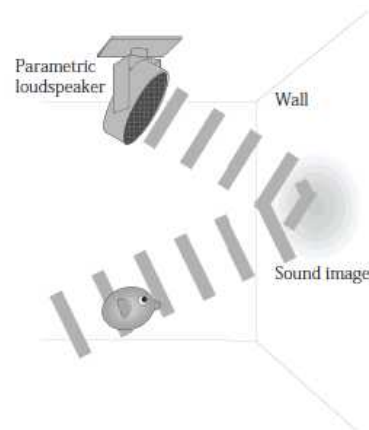
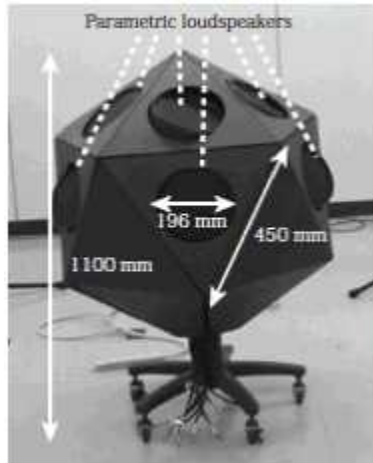
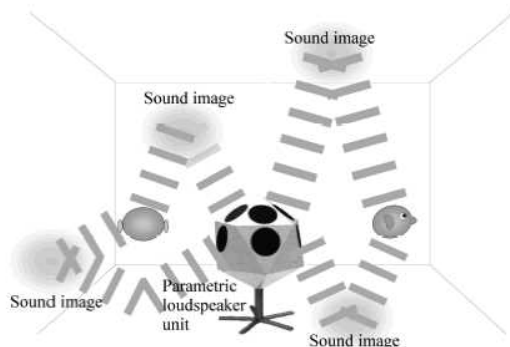


図3 壁面反射型音像提示方式のイメージ図

- 壁面反射型音像提示方式を発展的に拡張し、**図4**に示す10本の超音波スピーカを搭載した音像プラネタリウム基本ユニットを開発した。主観・客観評価実験の結果、1筐体に搭載される複数の超音波スピーカを用いて様々な方向の壁面に音像を構築できる音像プラネタリウム方式の確立(**図5**参照)に成功した。



**図4** 開発した音像プラネタリウム基本ユニット



**図5** 音像プラネタリウム方式のイメージ図

[2010年度]

- 音像プラネタリウム方式を用いた3D音場の音質改善を試みた。超音波スピーカは、一般的なスピーカと比較して低音域のエネルギーが小さいという問題があるため、低音域を再生する専用のサブウーファを超音波スピーカと併用することで3D音場の音質改善を検討した。その結果、帯域制限したサブウーファを併用することで、音像定位感を保持しつつ音質を改善できることが明らかとなった。
- 超音波スピーカの音質改善に向けて新しい変調方式の検討も行った。その結果、側波帯に重みを付けることで低音域の音質を保持したまま高い直進性を実現可能な変

調方式を提案し、有効性を確認することができた。

[2011年度]

- 前年度の研究成果を実装し、音像プラネタリウム基本ユニットにサブウーファを搭載することで、さらなる高臨場感3D音場を実現した。
- 音像の距離制御に関して、超音波スピーカに加え動導型スピーカを併用することで、音像距離の制御を試みた。その結果、両スピーカを併用することで、音像の距離をある程度制御できることがわかった。
- 今後、音像プラネタリウム拡張ユニットに加え、床面に動電型間接スピーカをサラウンド設置することで、室内全体における高臨場感3D音場の実現に挑戦する。

## (2) 光学的整合技術による視覚的MRの表現力強化

研究テーマは「光学的整合技術」であるが、従来の「幾何学的整合技術」も活用して、2010年度に、X-Media Galaxyの構築に着手した。(1)と連携するテーマとして、i) 超音波スピーカから発せられる音を視認するための可視化技術の開発、ii) 音像プラネタリウム筐体をMR空間中で隠す「隠消現実感(Diminished Reality; DR)」の実現、iii) 視覚刺激の追加による音像知覚への影響、等に関する研究を行った。特にiii)では、仮想音の高速移動によって生じるドップラー効果を実現したが、体験者と対象世界の相対的大きさがかなり違う場合(ガリバー状態)、知覚心理上極めて興味深い実験結果が観察された。

2011年度以降は、上記X-Media Galaxyにおける光学的特性を考慮して、仮想物体の陰影づけ、ぼかし等のレンズ効果、実物体から仮想物体への影付け等を実時間で実行可能なアルゴリズムの選定を行い、順次実装した。この中からは、MR体験時に実物体の反射特性を変更できる新手法、フリーフォーム光源による照明再賦与(Relighting)に関する新手法、ステレオリグを用いたHDR動画の生成法等が生まれた。

## (3) 視聴覚併用MRコンテンツの制作

(1)(2)の研究結果を実装、評価するためのコンテンツの第1弾として、X-Media Galaxy内でオーケストラの指揮を体験できるコンテンツを制作した。指揮者の指揮棒の動きに実時間で呼応して、CGで描かれた特定の楽器が動き、それに対応する楽音が3D音場内で強調されて聞こえるシステム(**図6**)である。2010年9月に、本研究のプレスリリー

スを行い、新聞、テレビ等にて、本研究を広く広報した。

第2弾として、2011年度には X-Media Galaxy において体験者の周りに配置された「複数の仮想物体」が「音を発しながら移動する」様子を視覚・聴覚の両面で体験し、かつ体験者がそれに対話的操作で制御できるコンテンツ事例を制作し、技術評価を行った。



図6 指揮体験 MR システム

#### 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)

[雑誌論文] (計5件、すべて査読あり)

- ① Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, D. Ikefuji, M. Morise and T. Nishiura: Three-dimensional acoustic sound field reproduction based on hybrid combination of multiple parametric loudspeakers and electrodynamic subwoofer, *Applied Acoustics*, Vol. 73, Issue 12, pp. 1282 - 1288 (2012.12), DOI : 10.1016/j.apacoust.2012.03.009
- ② 生藤大典, 森勢将雅, 西浦敬信: 重み付き両側波帯変調方式によるパラメトリックスピーカの音質改善, 信学論(D), Vol. 95-D, No. 3, pp. 588 - 596 (2012.5) NAID : 110009418767
- ③ 村井嘉彦, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 視聴覚複合現実空間におけるガリバー・ドップラー効果に関する考察, VR 学論, Vol. 16, No. 2, pp. 117 - 126 (2011.6) www.rm.is.ritsumei.ac.jp/pdf/1d3-4.pdf
- ④ 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: 隠消現実感の技術的枠組と諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～, 同上, Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250 (2011.6) NAID : 110008712397
- ⑤ 森勢将雅, 湊佳彦, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 視覚・聴覚を併用した複合現実感システムのための頭部伝達関数の個人化, 電学論 C, Vol. 130, No. 8, pp. 1466 - 1467 (2010.8)

DOI:10.1541/ieej.iss.130.1466

[学会発表] (計41件)

- (1) H. Tsujii, M. Nakayama, M. Morise, and T. Nishiura: The Realistic-reverberation sensation in 3-D acoustic sound field reproduction with parametric loudspeakers and indirect non-parametric loudspeakers, Proc. Acoustics 2012, Paper No: 4aSP22, Hong Kong, China (2012.5.17)
- (2) A. Takahashi, S. Mori, F. Shibata, A. Kimura, and H. Tamura: Definition and implementation of Half-DR: Semi-Transparent representation of visually diminished objects existing in real world, Proc. the 5th Korea-Japan Workshop on Mixed Reality, Seoul, Korea (2012.4.14)
- (3) 鈴木翔伍, 杉山孝之, 宮井貴史, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 全天周型視聴覚複合現実体験空間とその基幹ソフトウェア, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2011-261, pp.135 - 140, 神戸大学, 兵庫 (2012.3.30)
- (4) 杉山孝之, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 音像プラネタリウム方式を用いた視聴覚併用 MR システム X-Media Galaxy (1) ～基幹システムの設計と体験事例の実装～, 2012年電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-16-8, p. 257, 岡山大学, 岡山 (2012.3.23)
- (5) 宮井貴史, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 音像プラネタリウム方式を用いた視聴覚併用 MR システム X-Media Galaxy (2) ～全天周型 MR 体験空間の実現～, 同上, A-16-9, p. 258 (2012.3.23)
- (6) 桑原大樹, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 音の物理的属性と伝播方向の可視化ツールの提案, 同上, A-16-11, p.260 (2012.3.23)
- (7) 生藤大典, 森勢将雅, 西浦敬信: スペクトル包絡の相関に基づくパラメトリックスピーカの復調評価指標の検討, 日本音響学会 2012年春季研究発表会, pp. 785 - 786, 神奈川大学, 神奈川 (2012.3.15)
- (8) 杉林裕太郎, 栗元総太, 森勢将雅, 西浦敬信: パラメトリックスピーカとサブウーファを併用した3次元音場再生の高臨場化の検討-ハイパスフィルタを用いたサブウーファの音像定位感制御-, 同上, pp. 783 - 784 (2012.3.15)
- (9) 辻井秀弥, 森勢将雅, 西浦敬信: 間接サラウンドスピーカを用いた残響時間制御に基づく残響臨場感向上の検討, 同上, pp. 781 - 782 (2012.3.15)
- (10) K. Kikuchi, T. Wada, R. Ichikari, A. Kimura,

- F. Shibata, and H. Tamura: Relighting with free-form polarized reflectometry in mixed reality space, Proc. IEEE Virtual Reality 2012, pp. 133 - 134, Orange County, USA (2012.3.7)
- (11) D. Ikefuji, M. Morise, and T. Nishiura: An evaluation of demodulation in distance for parametric loudspeaker based on sub-band spectral envelope, Proc. NCSP2012, pp. 245 - 248, Honolulu, USA (2012.3.5)
- (12) Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, M. Morise, and T. Nishiura: Steering of localization sensation on sound image with hybrid combination of parametric loudspeakers and subwoofer, *ibid.*, pp. 321-324 (2012.3.5)
- (13) 吉田麻子, 和田大輝, 菊池佳保理, 一刈良介, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 複合現実空間における実物体の反射特性変更, 電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会, MVE2011-42, pp. 57 - 62, 稚内総合文化センター, 北海道 (2011.10.14)
- (14) 伊藤仁一, 森勢将雅, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 超音波スピーカによる移動音源の実現と視覚補助による定位性能の向上(2)―音像の移動範囲の拡張―, 第16回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 12D-5, pp. 151 - 154, 公立はこだて未来大学, 北海道 (2011.9.20)
- (15) 杉林裕太郎, 栗元総太, 森勢将雅, 西浦敬信: 超音波スピーカとサブウーファを併用した3次元音場再生の高臨場化の検討 ~音圧レベル制御に基づく品質向上~, 日本音響学会 2011年秋季研究発表会, pp. 845 - 846, 島根大学, 島根 (2011.9.20)
- (16) 栗元総太, 杉林裕太郎, 森勢将雅, 西浦敬信, "超音波スピーカを利用した3次元音場提示手法における音像距離知覚の検討, 同上, pp. 847 - 848 (2011.9.20)
- (17) 生藤大典, 森勢将雅, 西浦敬信: Weighted Double SideBand 変調方式による超音波スピーカの高調波歪み低減の検討, 同上, pp. 755 - 756 (2011.9.20)
- (18) 辻井秀弥, 栗元総太, 杉林裕太郎, 森勢将雅, 西浦敬信, "間接サラウンドスピーカを用いた残響臨場感制御の検討, 同上, pp. 850 - 851 (2011.9.20)
- (19) Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, M. Morise, and T. Nishiura: A study on greater sense of presence of 3-D sound fields based on hybrid combination of subwoofer and parametric loudspeakers, Proc. Internoise 2011, PaperID:Tue-P-27, Osaka International Convention Center, Osaka (2011.9.6)
- (20) S. Kurimoto, Y. Sugibayashi, M. Morise, and T. Nishiura: The realization of stereo effects with parametric loudspeaker and multiple reflectors, *ibid.*, PaperID: Mon-P-11 (2011.9.5)
- (21) D. Ikefuji, M. Morise, and T. Nishiura: A study of sound quality improvement of the parametric loudspeaker based on weighted Double Side Band modulation, *ibid.* Paper ID: Mon-P-12 (2011.9.5)
- (22) Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, M. Morise, and T. Nishiura: Design of system to reproduce 3-D sound field with multiple parametric loudspeakers, *ibid.*, PaperID: Mon4-6 (2011.9.5)
- (23) H. Tujii, M. Morise, and T. Nishiura: The steering for audio spot field with parametric loudspeaker array, Electro. Proc. HAID 2011, Ritsumeikan Univ., Shiga (2011.8.25)
- (24) T. Yoshimochi, T. Sugiyama, T. Miyai, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura: X-Media Galaxy: An advanced mixed reality system featuring Acoustic Planetarium, CD-ROM Proc. 4th Korea-Japan Workshop on Mixed Reality, Hotel Hankyu Expopark, Osaka (2011.4.16)
- (25) 伊藤仁一, 森勢将雅, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 超音波スピーカによる移動音源の実現と視覚補助による定位性能の向上, 2011年電子情報通信学会総合大会講演論文集, 東京都市大学, 東京 A-16-7, p. 239 (2011.3.14)
- (26) 栗元総太, 杉林裕太郎, 森勢将雅, 西浦敬信: 単一超音波スピーカを用いたステレオ効果の検討と評価, 日本音響学会 2011年春季研究発表会, pp. 903 - 904, 早稲田大学, 東京 (2011.3.11)
- (27) 杉林裕太郎, 栗元総太, 森勢将雅, 西浦敬信: 超音波スピーカを利用した三次元音場の高臨場化の検討, 同上, pp. 907 - 908 (2011.3.11)
- (28) 菊池佳保理, B. Lamond, A. Ghosh, P. Peers, P. Debevec, 一刈良介, 田村秀行: フリーフォーム光源とイメージベースド・ライティングによる物体の反射特性の推定, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2010-181, pp. 273 - 278, 立命館大学, 滋賀 (2011.1.21)
- (29) 杉林裕太郎, 栗元総太, 森勢将雅, 西浦敬信, 柴田史久, 田村秀行: 壁面反射型オーディオスポットを用いた高臨場感 3D音場提示手法の検討, 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 204 - 207, 金沢工業大学, 石川 (2010.9.15)
- (30) 栗元総太, 杉林裕太郎, 森勢将雅, 西浦敬信, 柴田史久, 田村秀行: 超音波スピーカを利用したオーディオスポット構築に

- おける反射の制御, 同上, pp. 208 - 209 (2010.9.15)
- (31) 村井嘉彦, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 視聴覚複合現実空間におけるガリバー・ドップラー現象に関する考察, 同上, pp. 258 - 261 (2010.9.15)
- (32) 吉持達也, 森勢将雅, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (6) -実時間反射音生成に基づく音場再生の実現-, 同上, pp. 262 - 265 (2010.9.15)
- (33) M. Morise, D. Ikefuji, H. Tsujii, K. Hirokawa, and T. Nishiura: A design of reflective audio spot with reflective objects, Proc. ICA2010, Paper ID: 755, Sydney, Australia (2010.8.25)
- (34) Y. Sugibayashi, M. Morise, and T. Nishiura: The steering for distance perception with reflective audio spot, ibid, Paper ID: 759 (2010.8.25)
- (35) S. Kurimoto, M. Morise, and T. Nishiura: The suppression for undesired reflection towards audio spot, PaperID: 958 (2010.8.25)
- (36) 廣川孝太郎, 森勢将雅, 西浦敬信: 壁面反射型オーディオスポット用反射物体の試作と特性評価, 日本音響学会 2010 年春季研究発表会, pp. 675 - 676, 電気通信大学, 東京 (2010.3.8)
- (37) 吉野将治, 村井嘉彦, 森勢将雅, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (5) -ヘッドホンとスピーカの併用による音提示法の拡張-, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2009-200, pp. 305 - 310, 京都大学, 京都 (2010.1.22)
- (38) K. Inoue, T. Wada, K. Kitamura, S. Nishino, R. Ichikari, R. Tenmoku, T. Ohshima, and H. Tamura: Kaidan: Japanese horror experience in interactive mixed reality space, SIG-GRAPH Asia 2009, Emerging Technologies, p. 75, Pacifico Yokohama, Kanagawa, (2009.12.17-19)
- (39) R. Ichikari, R. Hatano, T. Ohshima, F. Shibata and H. Tamura: Designing cinematic lighting by relighting in MR-based pre-visualization, ibid., Posters (2009.12.17)
- (40) 廣川孝太郎, 森勢将雅, 西浦敬信: 壁面反射型オーディオスポット用反射物体の検討, 日本音響学会 2009 年秋季研究発表会, pp. 745 - 746, 日本大学工学部, 福島 (2009.9.17)
- (41) K. Hirokawa, M. Morise and T. Nishiura: The fundamental design of reflective audio spot utilizing ultrasound loudspeaker, Proc.

WESPAC2009, Paper ID: 126, Beijing, China (2009.9.22)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 音響システム及びその仮想音源の設定方法

発明者: 西浦敬信, 森勢将雅, 廣川孝太郎, 杉林裕太郎, 田村秀行, 柴田史久

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2010-075788 号

出願年月日: 平成22年3月29日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田村 秀行 (TAMURA HIDEYUKI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 10367998

### (2) 研究分担者

西浦 敬信 (NISHIURA TAKANOBU)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号: 70343275

木村 朝子 (KIMURA ASAKO)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号: 20324832

(2009 年度は連携研究者)

### (3) 連携研究者

大島 登志一 (OHSHIMA TOSHIKAZU)

立命館大学・映像学部・教授

研究者番号: 40434708

柴田 史久 (SHIBATA FUMIHISA)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号: 80314425

(2009 年度は研究分担者)