

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03283

研究課題名(和文) 擬似身体移動感の定量的評価法の開発とそれを用いた多様な移動感の生成手法の確立

研究課題名(英文) Development of quantitative evaluation method of pseudo-sensation of body movement and generation method of various sensations of movement

研究代表者

雨宮 智浩 (Amemiya, Tomohiro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：70396175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、感覚間相互作用により身体感覚を変調させ、実際の身体運動で生じる感覚情報との利得調整を行うことで、身体の物理的な空間移動や筋への運動指令を全く用いることなく、錯覚的に擬似的な身体移動体験を創出する手法の確立と適用限界の検証、そしてそのための客観的指標の提案と有効性の検証を実施した。足底への振動刺激提示によって生じる身体移動体験の効果の大きさを、身体近傍空間内の感覚間相互作用による反応時間の縮減といった客観的指標で求め、モーションプラットフォームを用いて上下動揺および回旋によって生じる擬似的歩行感とVR酔いの評価値を比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまで主観的評価にとどまっていた疑似歩行感覚を、客観的指標である反応時間で評価できる可能性を示したものである。臨場感の高いVRシステムを構築する際に、臨場感やリアリティが高まれば、主観的な評価では天井効果や個人差の影響によって明確な評価を困難になってしまうため、本研究の成果のように客観的な指標でも評価することができれば、さまざまな側面から最適な感覚刺激を設計する手がかりとなりうる。また、モーションプラットフォームを用いて受動的な状況で擬似的な身体感覚を生成する研究成果は、運動機能障害を有するユーザにも多様な移動感を生成する可能性を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we established a method to create an experience of illusory body movement without using any physical movement of the body or motor commands to muscles. The method can modulate bodily sensations through sensory interaction and adjusts gains with sensory information generated by actual body movement. We also proposed an objective index for the magnitude of the effect of the pseudo-movement generated by the presentation of vibration stimuli to the soles using objective indices such as the reduction of reaction time due to interactions between senses in the peripersonal space near the body. We compared the pseudo-walking sensation produced by vertical swaying and turning with a motion platform and the rating of VR sickness.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：歩行感覚 触覚 身体感覚 身体近傍空間 錯覚 多感覚統合 前庭感覚

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

VR 空間内での歩行は教育、訓練、エンタテインメントなど様々な用途において欠かせない。移動範囲に制限のある実空間で、VR 空間内における良質な歩行感覚を生成することは技術的な課題である。現実に忠実な歩行感の生成には実際の歩行運動を利用する形が最適であり、歩行による移動を相殺する機構(たとえば[1, 2])が広く研究されてきた。また、人間の知覚特性を利用して歩行方向や歩行速度を気づかれないように操作して一定の領域にとどめる手法(Redirection)[3, 4, 5, 6]も提案されてきた。しかしながら、このような技術では利用者が実際に歩行することを前提としており、空間的あるいは身体的な制約により歩行が困難な利用者に対して適用できない問題があった。

また、実際に歩行させずに歩行のような感覚を生成する方法が提案されてきたが、その感覚の強さを定量化する手法はなかった。主観的な報告だけでなく、客観的な指標でも評価することができれば、さまざまな側面から最適な感覚刺激を設計する手がかりとなりうるため、より質の高い VR システムの開発につながると期待されてきた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、感覚間相互作用により身体感覚を変調させ、実際の身体運動で生じる感覚情報との利得調整を行うことで、身体の物理的な空間移動や筋への運動指令を全く用いることなく、錯覚的に擬似的な身体移動体験を創出する手法の確立と適用限界の検証、そしてそのための客観的指標の提案と有効性の検証である。具体的には、以下の3つを具体的な課題としている。

- (課題 1) 錯覚的に擬似的な身体移動体験を創出する手法の確立と適用限界の検証
- (課題 2) その効果を測定できる客観的指標の有効性の検証
- (課題 3) その客観的指標に基づいた多感覚提示ディスプレイの工学的設計指針の確立

### 3. 研究の方法

本研究では上記の課題について、以下の方法によってそれぞれ研究を実施した。

#### (課題 1)

- (1) 足底への振動提示による歩行感覚の生成方法
- (2) 揺動装置を用いた上下揺および旋回の刺激による歩行感覚の生成方法の確立を目指した。

(1)については足底への刺激にはボイスコイルスピーカ振動子(Acouve Lab 製 Vp416)を用いた。ボイスコイル振動子をスリッパの中底の踵部分に固定し、実験参加者の両足の足底(踵)に振動刺激が提示された。足底への振動刺激は実際に歩行したときの足音を反響のある廊下で録音し、カットオフ周波数 120 Hz のローパスフィルタをかけて作成した振動刺激波形を用いた。さらに対照条件として、作成した歩行音振動を左右の足へ非同期に歩行音振動を提示したのものや、歩行音振動を振幅一定の 60 Hz の正弦波の振動に置き換えた音(純音)の振動波形による効果を比較した。

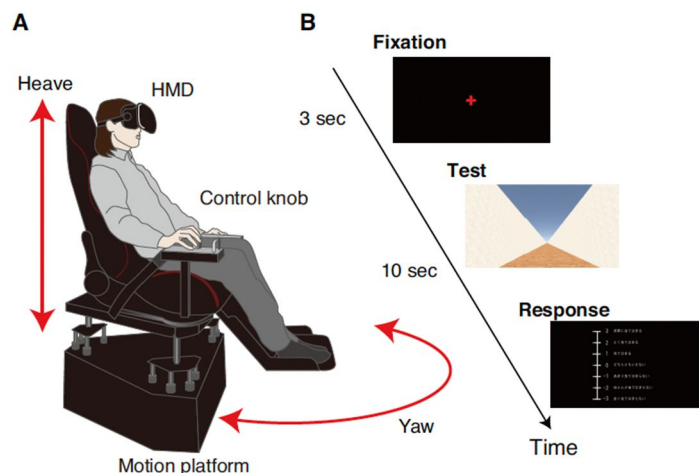
(2)については、上下に動く3本のリニアアクチュエータと、Yaw 回転用のリニアアクチュエータの4本で構成されたSIMVRを用いた。

#### (課題 2)

身体に接近するような移動音を聞きながら身体表面上の触覚刺激を検出する課題では、音像と身体との距離が短いときほど反応時間が短くなることが知られているが、歩行時には静止時よりもその距離が長くなっても反応時間は短いままであることから、歩行運動によって身体近傍空間が拡張したことが示唆されている[7]。本研究で生じる疑似歩行感に対しても同様の身体近傍空間内の感覚間相互作用による反応時間の縮減といった客観的指標が適応可能かを調査した。

#### (課題 3)

複数の感覚器に連動した刺激が提示可能な五感シアターを作成し、体験展示を通じて評価を行った。五感シアターは、映像、音響、気流、香り、振動などの多感覚の刺激で環境の情報の再現が高められると同時に、過去の身体運動感覚の表現に重点を置くことにより、過去体験を行った



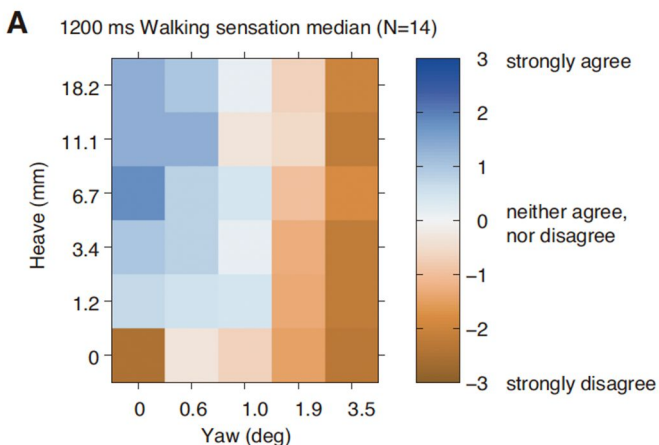
人（先行体験者）の身体感覚を再現しようとする方式で実現された。

#### 4. 研究成果

##### (課題 1)

着座状態で歩行感覚を生み出すような振動刺激を足底へ与えたとき、歩行感が生成することを確認した。足底へ与える振動刺激の種類が足音以外を用いたときの効果の違いが確認された。非同期歩行音振動と歩行音振動は同一の足音の波形で構成されているが、条件間で左右の足への刺激のタイミングや提示周期が異なっていた。こうした足底振動刺激のタイミングの非同期性は著しく歩行感覚の生起を妨げることが明らかになった。一方で、歩行音振動条件と純音振動条件では左右の足への刺激のタイミングや提示周期は条件間で等しかった。それにもかかわらず、歩行感覚の主観評価では歩行音振動と純音振動の条件間に歩行感覚の有意な差があった。

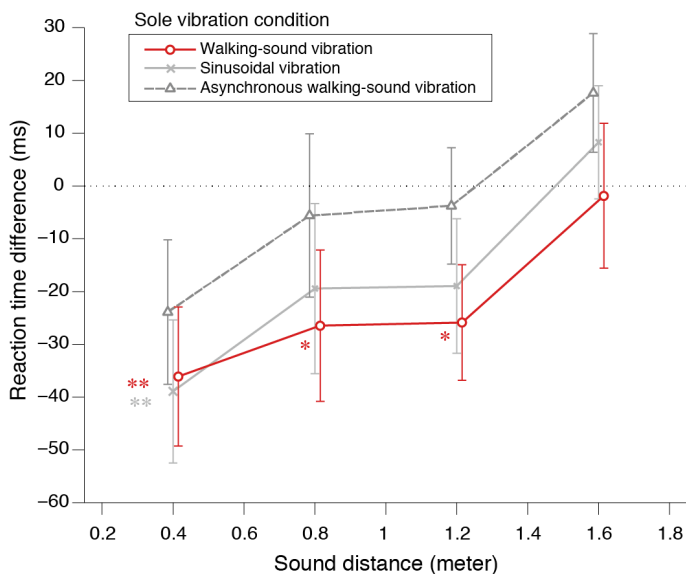
また、着座型身体揺動装置を用いて、歩行感を生み出すための最適な鉛直方向と回転方向の身体揺動の振幅を主観評定値の比較から求めた。その結果、着座時の疑似歩行感の生成には実際の歩行の 1/4 以下の鉛直方向振幅の身体揺動が効果的であることが明らかになった。この実際の歩行時との振幅差は、着座した受動的な状態では運動指令の遠心性コピーが予測器に送られないため、実際の感覚フィードバック情報が大きく見積もられることに起因すると推測される。



##### (課題 2)

着座状態で歩行感覚を生み出すような振動刺激を足底へ与えたとき、身体近傍における触覚の検出反応時間の減少が確認された。このことから受動的な状態で生じる歩行感覚によって身体前方に身体近傍空間が拡張することが示された。また、身体近傍空間の拡張の効果は、刺激によって生じる歩行感覚の主観評定によって影響をうける可能性が示唆された。

一方で、先行研究ではトレッドミル上を実際に歩行させた条件の反応時間は接近音のない条件と比較して接近音の距離が身体から 1.66 m であっても有意に小さいことが報告されている [7]。一方、本研究では 1.6 m では有意な差は認められなかった。このことから、受動的な状態で得られる歩行感覚は実際の歩行動作によって生じる身体近傍空間の拡張効果よりは小さいと考えられる。この身体近傍空間の拡張量の差は運動指令や前庭感覚入力などの存在に起因すると考えられる。



(課題3)

陸上競技短距離走(100 m)を走行している競技者の感覚を追体験できるシステムであるご監視アターを開発した。走行感を生成するために、前庭感覚、下肢固有感覚、皮膚感覚、気流に着目し、前庭感覚ディスプレイ、下肢運動・皮膚感覚刺激装置、気流香気提示システムによってそれぞれ実現した。



<参考文献>

- [1] H. Iwata, H. Yano, and F. Nakaizumi. Gait Master: a versatile locomotion interface for uneven virtual terrain. In Proc. IEEE Virtual Reality Conference, pp. 131-137, 2001.
- [2] H. Iwata, H. Yano, H. Fukushima, and H. Noma: Circularfloor. IEEE Computer Graphics and Applications, 25(1), pp. 64-67, 2005.
- [3] S. Razaque, Z. Kohn, and M. C. Whitton. Redirected Walking. In Proc. Eurographics 2001. Eurographics Association, 2001.
- [4] E. A. Suma, G. Bruder, F. Steinicke, D. M. Krum, and M. Bolas. A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments. In Proc. IEEE Virtual Reality Workshops, pp. 43-46, 2012.
- [5] T. C. Peck, H. Fuchs, and M. C. Whitton: The design and evaluation of a large-scale real-walking locomotion interface. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 18(7), pp. 1053-1067, 2012.
- [6] 松本, 鳴海, 伴, 谷川, 廣瀬: 視触覚間相互作用を用いた曲率操作型リダイレクテッドウォーキング. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 23(3), pp. 129-138, 2018.
- [7] J.-P. Noel, P. Grivaz, P. Marmaroli, H. Lissek, O. Blanke, and A. Serino: Full body action remapping of peripersonal space: the case of walking. Neuropsychologia, 70, pp. 375-84, 2015.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei	4. 巻 13
2. 論文標題 Pseudo-sensation of walking generated by passive whole-body motions in heave and yaw directions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 80-86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2020.2965937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 雨宮智浩, 北崎充晃, 池井寧	4. 巻 24
2. 論文標題 上下揺と旋回の受動的身体運動による疑似歩行感覚の生成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 371-376
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.24.4_371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tomohiro Amemiya, Yasushi Ikei, Michiteru Kitazaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Remapping Peripersonal Space by Using Foot-Sole Vibrations Without Any Body Movement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Psychological Science	6. 最初と最後の頁 1522-1532
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/0956797619869337	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Michiteru Kitazaki, Takeo Hamada, Katsuya Yoshiho, Ryota Kondo, Tomohiro Amemiya, Koichi Hirota, Yasushi Ikei	4. 巻 10
2. 論文標題 Virtual walking sensation by prerecorded oscillating optic flow and synchronous foot vibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/2041669519882448	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 池井寧, 広田光一, 阿部浩二, 雨宮智浩, 佐藤誠, 北崎充晃	4. 巻 24
2. 論文標題 身体的追体験の概念の提案と一部機能の試験実装	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 153-164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.24.2_153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Tomohiro Amemiya
2. 発表標題 VR applications using pseudo-attraction force by asymmetric oscillation
3. 学会等名 Proceedings of HCI 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gaku Sueta, Naoyuki Saka, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Makoto Sato, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Virtual turning walking by passive arm swing
3. 学会等名 Proceedings of HCI 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Amemiya
2. 発表標題 Resizing of the peripersonal space for the seated for different step frequencies of vibrations at the soles
3. 学会等名 Proceedings of 1st IEEE Workshop on Seated Virtual Reality at IEEE VR 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Vibol Yem, Reon Nashiki, Tsubasa Morita, Fumiya Miyashita, Tomohiro Amemiya, Yasushi Ikei
2 . 発表標題 TwinCam Go: Proposal of Vehicle-Ride Sensation Sharing with Stereoscopic 3D Visual Perception and Vibro-Vestibular Feedback for Immersive Remote Collaboration
3 . 学会等名 Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Minori Unno, Kouichi Shimizu, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2 . 発表標題 Generation of Turning Walking Sensation by a Vestibular Display
3 . 学会等名 Proceedings of the 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI 2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kentaro Yamaoka, Ren Koide, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2 . 発表標題 Rendering of Walking Sensation for a Sitting User by Lower Limb Motion Display
3 . 学会等名 Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE 2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Reon Nashiki, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya, Yasushi Ikei
2 . 発表標題 Footstep Sound for Suppression of VR Sickness and Promotion of Sense of Agency
3 . 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Gaku Sueta, Naoyuki Saka, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Makoto Sato, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Generation of Walking Sensation by Upper Limb Motion
3. 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yujin Suzuki, Vibol Yem, Koichi Hirota, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Airflow Presentation Method for Turning Motion Feedback in VR Environment
3. 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Morita, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Vehicle-Ride Sensation Sharing for Immersive Remote Collaboration with Vestibular Haptic Chair to reduce VR Sickness
3. 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumiya Miyashita, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Keiko Kasamatsu, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Visual Presentation For Sports Skill Learning in VR
3. 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Ryunosuke Yagi, Toi Fujie, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2. 発表標題 VR Sickness Reduction in Stereoscopic Video Streaming System 'TwinCam' for a Remote Experience
3. 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Yuasa, Hideki Tamura, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei
2. 発表標題 System for Body Motion Capture While Moving in Large Area
3. 学会等名 Proceedings of ICAT-EGVE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Shimizu, Vibol Yem, Kentaro Yamaoka, Gaku Sueta, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Rendering of Virtual Walking Sensation by a Vestibular Display
3. 学会等名 Proceedings of HCI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Resizing of the peripersonal space by vibrations at the soles or forearms
3. 学会等名 Proceedings of IEEE World Haptics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Ikei, Vibol Yem, Kento Tashiro, Toi Fujie, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki
2. 発表標題 Live Stereoscopic 3D Image with Constant Capture Direction of 360 Cameras for High-Quality Visual Telepresence
3. 学会等名 Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaneko Hirofumi, Amemiya Tomohiro, Yem Vibol, Ikei Yasushi, Hirota Koichi, Kitazaki Michiteru
2. 発表標題 Leg-jack: generation of the sensation of walking by electrical and kinesthetic stimuli to the lower limbs
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimizu Koichi, Sato Makoto, Hirota Koichi, Kitazaki Michiteru, Sueta Gaku, Yamaoka Kentaro, Sawamura Kazuki, Suzuki Yujin, Yoshida Keisuke, Yem Vibol, Ikei Yasushi, Amemiya Tomohiro, Sato Makoto, Hirota Koichi, Michiteru Kitazaki
2. 発表標題 FiveStar VR: shareable travel experience through multisensory stimulation to the whole body
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amemiya Tomohiro
2. 発表標題 Haptic Interface Technologies Using Perceptual Illusions
3. 学会等名 20th International Conference on Human-Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kurosawa Masato、Ikei Yasushi、Suzuki Yujin、Amemiya Tomohiro、Hirota Koichi、Kitazaki Michiteru
2. 発表標題 Airflow for Body Motion Virtual Reality
3. 学会等名 20th International Conference on Human-Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimizu Koichi、Ikei Yasushi、Amemiya Tomohiro、Hirota Koichi、Kitazaki Michiteru
2. 発表標題 Vestibular Display for Walking Sensation in a Virtual Space
3. 学会等名 20th International Conference on Human-Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 情報提示システム、およびプログラム	発明者 雨宮智浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-027311	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	池井 寧  (Ikei Yasushi)  (00202870)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任教授   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------