

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03474

研究課題名（和文）身体変化をゼロに保ちつつ知覚・情動を変容させるゼロハプティクス技術基盤の構築

研究課題名（英文）Construction of a zero-haptics technology foundation that transforms perception and emotion while keeping physical changes at zero.

研究代表者

黒田 嘉宏（Kuroda, Yoshihiro）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：30402837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、身体変化を時間的にゼロに保ちつつ感覚・知覚・生理的応答を変容させる新たなハプティクス（ゼロハプティクス）技術基盤を確立した。具体的には、素早い冷刺激と緩やかな温刺激の切り替えを繰り返すことで、実質的な皮膚の温度変化を伴わずに、冷感を与えることができる温冷覚のゼロハプティクス技術を実現した。実験の結果、皮膚温度を継続的に低下させる場合と同程度の冷感の強さを実現可能であることが示された。また、非対称振動を応用し、身体動作を誘導できる新たな福祉システムのプロトタイプを開発し、白杖の振り幅を誘導する際の誤差を低減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題が取り組んだ問いは「身体的な変化を伴わない皮膚感覚提示法をどのように設計するか？」である。上記の問いは、「ハプティクス技術が身体の物理状態を変化させることで感覚を作り出している」という生体の感覚系の根本に根ざした問いであり、今後の感覚提示をはじめ人間拡張技術のあり方を議論するうえで有意義である。ゼロハプティクス技術は身体変化を生じさせないことから、即時的でありながら安定的かつ継続的な温度感覚提示を実現する。また開発した福祉システムは非接地での誘導を可能とし利便性が高い。今後、さらに安定性や継続性を高める研究を推進することによって、基盤技術を社会に広く展開可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we established a new haptics (zero-haptics) technology platform that transforms sensory, perceptual, and physiological responses while keeping body changes at zero in time. Specifically, we have realized a zero-haptics technology for hot/cold sensation that can provide a cold sensation without substantial skin temperature change by repeatedly switching between quick cold stimulation and gentle warm stimulation. Experimental results showed that it is possible to achieve the same level of cold sensation intensity as a continuous decrease in skin temperature. We also developed a prototype of a new welfare system that can guide body movements by applying asymmetric vibration, and showed that it can reduce errors in guiding the swing of a white cane.

研究分野：人間情報学

キーワード：非対称刺激 非接触冷覚提示 牽引力錯覚 運動誘導 ゼロハプティクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年、直接デバイスに触れることなく(非接触)、あるいはデバイスを環境に固定することなく(非接地)、感覚提示が可能なディスプレイの研究が進んでいる。従来、ハプティクス技術が身体の物理状態を変化させることで感覚を作り出しているのに対し、振動刺激では、実際の変位はゼロにも関わらず、加速度を非対称とする振動刺激によって一方に引っ張られた感覚が生じることが知られている。一方、温度感覚は、環境の空気から得られる主要な要素であり、また自律神経に作用し情動に影響を及ぼす原始的な感覚であることから、情動の誘導への応用が期待される。しかし、非対称な温冷刺激は、接触型では空間的に温/冷刺激を分布する形で提案されているが、非接触型では空間分布を高精度に行うことが難しく実現されていない。

### 2. 研究の目的

本課題の目的は、身体変化を時間的にゼロに保ちつつ感覚・知覚・生理的応答を変容させる新たなハプティクス(ゼロハプティクス)技術基盤を確立し、それを応用し、運動、心理、医療の分野において安全かつ継続的な感覚提示や身体・情動の誘導を目指す。

### 3. 研究の方法

基盤技術として非対称温冷機能および非対称振動機能の技術開発を行い、さらに応用として椅子型温冷刺激提示装置の試作と視覚障害者に対して適切な白杖の操作方法を誘導する訓練支援システムのプロトタイプを開発した。また、冷刺激の生成メカニズムの解明および高度化のため、ボルテックスチューブの内部流れの可視化観察および PIV 計測を行った。

### 4. 研究成果

非対称温冷機能については、冷気流による皮膚温度変化モデルを構築し、非対称に温冷刺激を与えることで冷覚のみを連続的に知覚させる非接触連続冷覚提示技術を開発した。提案モデルにより、流量と対象物体までの距離に応じた皮膚温度変化を表現可能とした。実験の結果、図1に示すように、 $0.16^{\circ}\text{C}$ の誤差で皮膚温度変化を推定できることが確認され、提案手法の有効性が示された[1]。

また、図2に示すように、素早い冷刺激と緩やかな温刺激の切り替えを繰り返すことで、実質的な皮膚の温度変化を伴わずに、冷感を与えることができる温冷覚のゼロハプティクス技術を開発した。実験の結果、図3に示すように、皮膚温度を継続的に低下させる場合と同程度の冷感の強さを実現可能であることが示された。その際に必要な冷刺激の素早さは、継続的に低下させる場合の1.5倍であった[2]。

次に、壁面衝突噴流の流動挙動の計測可能性について検討し、液中に液相噴流を噴出した時の噴流流動挙動と周囲流体の相互関係について調査した。特に、噴流側の液体には蛍光染料を添加し、両液相にトレーサ粒子を添加して可視化計測を実施した。実験の結果、周囲流体との相互作用によるせん断応力により液膜内速度分布が影響を受け、速度境界層の発達過程が気液体系と異なることを示し、跳水半径が理論よりも小さくなることを明らかにした。

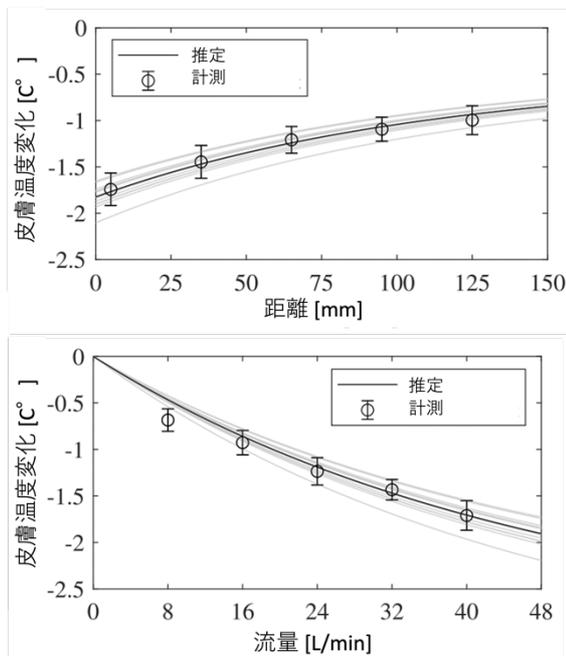


図1：冷気流による皮膚温度変化モデル (上図) 距離, (下図) 流量との関係

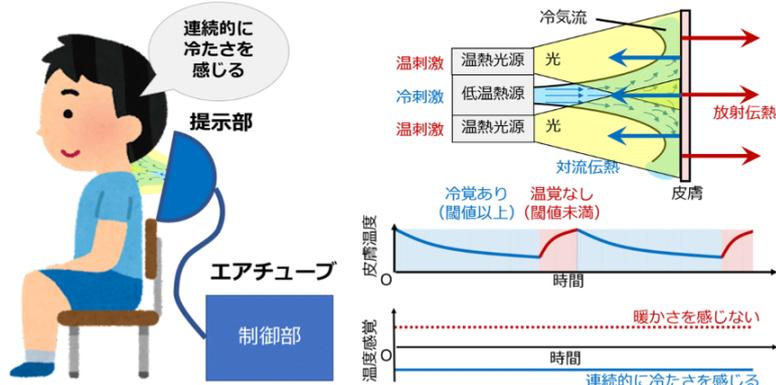


図2：概念図：非対称な温冷刺激による連続的な冷覚提示

また、熱工学的な観点でボルテックスチューブについて、冷風と温風にエネルギーが分離する際の要所となる部分に注目しエネルギーバランスについて検討した。実験では流入圧縮空気、冷風、温風の圧力、温度、流量を計測し、流入するエンタルピー、運動エネルギー、内部損失を計算した。さらに諸量からボルテックスチューブの熱的特性を考察した。その結果、冷風割合に応じて冷風、温風のエンタルピー、運動エネルギー、および内部損失のバランスが変化することがわかった。

さらにボルテックスチューブの内部流れの可視化観察および PIV 計測を行った。その結果、ボルテックスチューブの冷気生成能力を向上させる知見が得られた。

非対称振動機能開発については、ゼロハプティクス技術を用いて、身体動作を誘導できることを検証した。具体的には、振動刺激に基づく牽引力錯覚を利用して白杖の振り幅を誘導する実験が実施された(晴眼者 10 名、視覚障害者 2 名)。牽引力錯覚を利用して振り幅を誘導する前と後で目標幅との誤差を比較した結果、有意に誤差が低下することが確認された[3]。つまり、牽引力錯覚を利用することで、特定の運動を誘導できることが明らかになった。また、牽引力錯覚の加齢への影響を調べた(N=40)[4]。その結果、高齢男性では、錯覚が若年群と同程度に生じたが高齢女性のみ錯覚が起きづらかった。加齢によって振動の閾値が上昇することが知られているが、牽引力錯覚と振動の閾値の間には相関関係はなく、閾値が上昇しても錯覚が十分に生じる高齢者もいれば、錯覚が起きづらかった高齢女性の閾値は、若年群と同程度だった。また、医学的見地から末梢神経感度の定量化に向けて椅子型温冷刺激装置の改良を医師と進めた。最後に、ゼロハプティクス技術の展開として、時間的な連続性に加えて空間的な連続性を向上させる冷気流の提示法を開発し、冷風出口を複数並べた際に冷覚の一体感を実現する出口間距離を明らかにした。以上のように、基盤技術である非対称温冷機能および非対称振動機能の高度化および医療・福祉分野の応用機能の開発を行い、ゼロハプティクス技術の確立と展開を行った。

## 同程度の感覚強度を実現

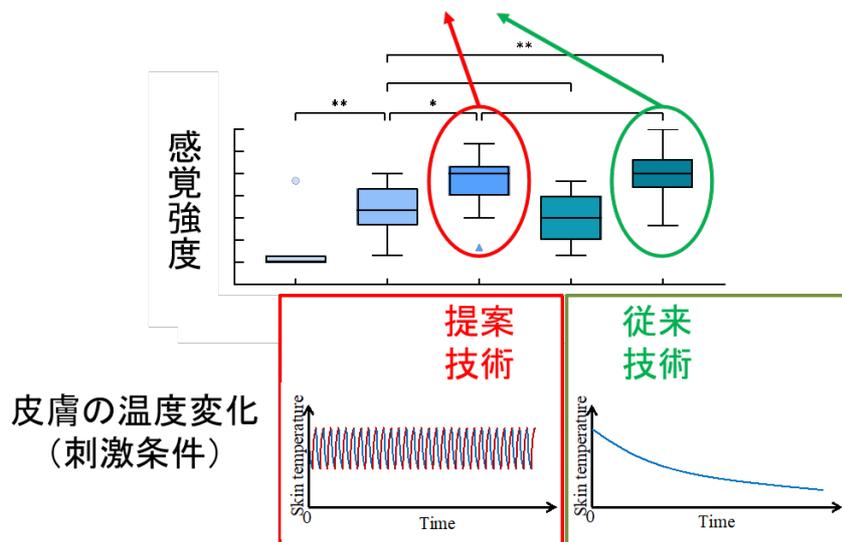


図3：従来の皮膚温度を継続的に低下させる技術と同等の強さの冷覚を感じさせることが示された。

[1] Jiayi Xu, Shunsuke Yoshimoto, Naoto Ienaga, Yoshihiro Kuroda; Intensity-Adjustable Non-contact Cold Sensation Presentation Based on the Vortex Effect, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 15, No. 3, pp. 592-602, 2022. doi: 10.1109/TOH.2022.3187759

[2] Jiayi Xu, Shoichi Hasegawa, Kiyoshi Kiyokawa, Naoto Ienaga, Yoshihiro Kuroda; Integration of Independent Heat Transfer Mechanisms for Non-Contact Cold Sensation Presentation With Low Residual Heat, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 16, No. 4, pp. 770-784, 2023. doi: 10.1109/toh.2023.3324754

[3] Takeshi Tanabe, Kiyohiko Nunokawa, Kouki Doi and Shuichi Ino; Training System for White Cane Technique Using Illusory Pulling Cues Induced by Asymmetric Vibrations, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 30, pp. 305-313, 2022, doi: 10.1109/TNSRE.2022.3148770

[4] 田辺健, 山本哲, 山田亨, 石井大典, 河野豊; 加齢の影響に基づく牽引力錯覚の機序の一考察, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, vol. 29, no. HAP01, pp. 3-6, 2024.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Jiayi Xu, Shunsuke Yoshimoto, Naoto Ienaga, Yoshihiro Kuroda	4. 巻 15
2. 論文標題 Intensity-Adjustable Non-contact Cold Sensation Presentation Based on the Vortex Effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 592-602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2022.3187759	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 Kengo Kato, Daisuke Kon, Teruo Ito, Shigeji Ichikawa, Katsuhiko Ueda, Yoshihiro Kuroda	4. 巻 20
2. 論文標題 Radiography Education with VR Using Head Mounted Display: Proficiency Evaluation by Rubric Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 BMC Medical Education	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s12909-022-03645-8	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 Yusuke Yamazaki, Hironori Mitake, Shoichi Hasegawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Implementation of Tension-based Compact Necklace-type Haptic Device Achieving Widespread Transmission of Low-frequency Vibrations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 535-546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2022.3176673	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 Takeshi Tanabe, Yasuhiro Fujimoto, Kiyohiko Nunokawa, Kouki Doi, and Shuichi Ino	4. 巻 11
2. 論文標題 White Cane-Type Holdable Device using Illusory Pulling Cues for Orientation & Mobility Training	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 28706-28714
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3259965	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 Takeshi Tanabe, Kiyohiko Nunokawa, Kouki Doi, and Shuichi Ino	4. 巻 30
2. 論文標題 Training System for White Cane Technique using Illusory Pulling Cues Induced by Asymmetric Vibrations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering	6. 最初と最後の頁 203-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNSRE.2022.3148770	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 Photchara Ratsamee, Yusuke Orita, Yoshihiro Kuroda, and Haruo Takemura	4. 巻 11
2. 論文標題 FlowHaptics: Mid-Air Haptic Representation of Liquid Flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 Article 8447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11188447	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 田中 駿一, 鍵山 善之, 中村 倫大, 上木 耕一郎, 諸井 明德, 黒田 嘉宏, 伊藤 安海, 野田 善之, 吉元 俊輔, 大城 理	4. 巻 87
2. 論文標題 ハプティックデバイスを用いた歯科口腔外科下顎枝矢状分割術ドリル用手術トレーニングシミュレータにおける操作支援開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p. 21-00219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00219	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yusuke Yamazaki, Shoichi Hasegawa
2. 発表標題 Providing 3D Guidance and Improving the Music-Listening Experience in Virtual Reality Shooting Games Using Musical Vibrotactile Feedback
3. 学会等名 IEEE VR 2023, the 30th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jiayi Xu, Shogo Tamaki, Koyo Makino, Shunsuke Yoshimoto, Shoichi Hasegawa, Naoto Ienaga, and Yoshihiro Kuroda
2. 発表標題 HeatMagic: Intensity-adjustable Thermal Feedback System Based on the Vortex Effect and Thermal Radiation for Non-contact Thermal Interaction
3. 学会等名 Asia Haptics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Riho Taniguchi, Yanlin Luo, Yanlin Luo, Shoichi Hasegawa
2. 発表標題 Handy Self-propelled Force Feedback Device
3. 学会等名 Asia Haptics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiayi Xu, 長谷川晶一, 清川清, 家永直人, 黒田嘉宏
2. 発表標題 皮膚温度変化をゼロに保ちつつ感覚を生じさせる非接触冷覚提示
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牧野 皓陽, Jiayi Xu, 家永 直人, 金子暁子, 黒田 嘉宏
2. 発表標題 冷気流群による一体感のある冷空間VRシステムの開発
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒田 嘉宏
2. 発表標題 非拘束インタフェースと生体物理シミュレーションによる生体インタラクションに関する研究
3. 学会等名 日本実験力学会 法医工学分科会・第3回研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹下 航平, 黒田 嘉宏, 金子 暁子
2. 発表標題 ボルテックスチューブのエネルギー分離特性
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 29 期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎 勇祐, 長谷川 晶一
2. 発表標題 首両側面への音楽振動提示による音楽鑑賞体験の向上を伴うナビゲーション手法の提案
3. 学会等名 第27回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野 瑞生, 三武 裕玄, 佐藤 裕仁, 杉森 健, 長谷川 晶一
2. 発表標題 対話的なキャラクターエージェントのための動作データの到達目標列への自動変換
3. 学会等名 第27回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺 健, 布川 清彦, 土井 幸輝, 井野 秀一
2. 発表標題 白杖の訓練のための牽引力錯覚を利用した無線駆動型デバイスの試作
3. 学会等名 HCGシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉木 聖悟, Jiayi Xu, 家永 直人, 黒田 嘉宏
2. 発表標題 独立温湿度刺激による乾燥湿潤VRシステムの開発
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunichi Tanaka, Yoshiyuki Kagiya, Norihiro Nakamura, Koichiro Ueki, Akinori Moroi, Yoshihiro Kuroda, Yasumi Ito, Yoshiyuki Noda, Shunsuke Yoshimoto, and Osamu Oshiro
2. 発表標題 Comparison of Haptic Feedback for OMS Drilling Training Simulator Using Haptic Device in Sagittal Split Ramus Osteotomy
3. 学会等名 IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xu Jiayi, 長谷川晶一, 黒田嘉宏
2. 発表標題 不連続的な温度変化による非接触冷覚の連続性に関する評価
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田嘉宏
2. 発表標題 withコロナ時代におけるハプティクス技術の新展開 ~触れずに触る非拘束ハプティクスと新たな医療・ヘルスケアの可能性~
3. 学会等名 第123回日本医学物理学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山村 聡太, 吉田 啓之, 堀口 直樹, 金子 暁子
2. 発表標題 浅水プール中に落下する液体ジェットの侵入挙動(10)液膜の拡がり挙動の実験的評価
3. 学会等名 日本原子力学会2021年度秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Ohara, Shoichi Hasegawa
2. 発表標題 DualEMS: Two-Channel Arbitrary Waveform Electrical Muscle Stimulation Device to Design Interference Stimulation
3. 学会等名 Augmented Humans International Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiayi Xu, 清川清, 長谷川晶一, 家永直人, 黒田嘉宏
2. 発表標題 非接触温冷刺激による即時的な温度フィードバック体験
3. 学会等名 第189回ヒューマンインタフェース学会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉木聖悟, Jiayi Xu, 家永直人, 黒田嘉宏
2. 発表標題 温湿度の独立制御による蒸し暑さ提示デバイスの開発
3. 学会等名 第189回ヒューマンインタフェース学会研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 温冷覚呈示装置、二点弁別閾測定方法、呈示部間距離算出方法、及びプログラム	発明者 牧野 皓陽, キョ カイ, 金子 暁子, 黒田 嘉宏	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-142263	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 冷覚呈示装置及びプログラム	発明者 キョ カイ, 黒田 嘉宏	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/021922	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 冷覚呈示装置及びプログラム	発明者 黒田 嘉宏, キョ カイ	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-091472	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>ライフエンジニアリング研究室  <a href="https://www.lelab.jp/">https://www.lelab.jp/</a></p>
--

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	長谷川 晶一  (Hasegawa Shoichi)  (10323833)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授    (12608)	
研究分担者	金子 暁子  (Kaneko Akiko)  (40396940)	筑波大学・システム情報系・准教授    (12102)	
研究分担者	田辺 健  (Tanabe Takeshi)  (60847557)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員    (82626)	
研究分担者	井野 秀一  (Ino Shuichi)  (70250511)	大阪大学・大学院工学研究科・教授    (14401)	
研究分担者	羽田 康司  (Hada Yasushi)  (80317700)	筑波大学・医学医療系・教授    (12102)	

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