

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01780

研究課題名(和文)非拘束インタラクションを実現する風力を用いた空中遭遇型力触覚提示に関する研究

研究課題名(英文)Aerial encounter-type haptic display using wind to achieve unconstrained interaction

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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、デバイスを身につける、あるいは手に持つ必要がなく、さらに作業空間の制限がない、非拘束インタラクションを実現するために(1)テクスチャの質感変調による空中触覚提示、(2)気流を利用した空中力覚提示の二つの機能について、手法を設計してシステムを実装し、計測実験や被験者実験により有効性を確認し、「風力を用いた空中遭遇型の力触覚提示法」を確立した。得られた成果は、先導的な研究として多数の文献から引用されるなど一定の成果を挙げることができたといえる。今後、視聴覚、さらには温覚や嗅覚情報の非接触提示と融合させ、高いリアリティのある空中遭遇型の力触覚提示の実現が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、物の硬さや手触りなどの触感をシステムによって作り出してヒトに感じさせるためには、グローブを身につけたり、デバイスを手に持つ必要があり、また反力を感じさせるにはデバイスを机の上などに固定する必要がありました。本研究では、デバイスの装着や把持が必要なく、また作業空間の制限がなく、ヒトに物の硬さや手触りを感じさせるための非拘束インタラクションという概念を実現するため、ドローンの風力や振動刺激を高度に応用し、デバイスが必要となときにヒトに近づいてきて反力や触感を空中で感じさせる空中遭遇型の力触覚提示技術を確立しました。

研究成果の概要(英文)：In this study, it is not necessary to wear the device or hold it in the hand, and there is no limitation of working space. To realize unconstrained interaction, in terms of (1) tactile display in the air by texture modulation of texture, and (2) aerial force display using wind force, we designed the methods, implemented the systems, confirmed the effectiveness by measurement and subjective experiments, and confirmed to establish the "aerial encounter-type force and tactile display method using wind force". Our publications were cited by numerous documents as leading research. In the future, it is expected to realize the air force and tactile display with high reality in the air by integrating with non-contact audiovisual display of the display of temperature and olfaction.

研究分野：人間情報学、生体医工学

キーワード：力触覚 空中遭遇型 UAV インタラクション 非拘束

## 1. 研究開始当初の背景

近年、VR(Virtual Reality)、AR(Augmented Reality) 技術の普及や超大型ディスプレイの利用など、ユーザが現実空間の様々な場所を動き回りつつ映像とインタラクションする環境が身近となっている。ユーザへの提示部(エンドエフェクタ)の位置や状態が変化する対象型デバイスのなかで、遭遇型と呼ばれるデバイスは、バーチャル物体の位置に提示部が先回りしてユーザに反力を提示し、バーチャル物体との非接触時には拘束感を与えない理想的なバーチャル環境を提供する。しかし、従来の遭遇型デバイスは、デバイスを床や机など空間に固定(接地)するものに限られるほか、提示部のテクスチャ表現に限りがあった[1]。一方、近年のマルチコプター等に見られるように、風力により持続的に力を出し、空中で安定かつ高精度に姿勢制御を行うことが容易となっている。通称ドローンと呼ばれる、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)を用いることで、デバイスを空間に固定せず空中(非接地)で遭遇させる新たな力触覚提示を実現できる可能性がある。また、UAVを回転させることで、従来の遭遇型では難しいとされた提示部のテクスチャ切替えが可能と考えられる。UAVのユーザインタフェースへの応用としては、UAVを用いた照明の移動やドラッグ操作等のデジタル操作の研究があるが、力触覚提示を目的としていない[2]。

## 2. 研究の目的

本課題では、「風力を用いた空中遭遇型の力触覚提示法」を確立し、デバイスを身につける、あるいは手に持つ必要がなく、さらに作業空間の制限がない、非拘束インタラクションを実現することを目的とした。空中遭遇型デバイスにおいて解決すべき課題は、空中で如何にして効果的に力を提示するか、また遭遇型の課題である提示部の多様なテクスチャ表現をどのように実現するか2点である。

本課題では、風力を用いた空中遭遇型の力触覚提示として、触覚・力覚を提示する以下のデバイスを設計・開発し、個々に評価を行うこととした。

### (1) テクスチャの質感変調による空中触覚提示(tactile)

テクスチャ切替えと振動特性変調により、空中で多様な触覚を提示する。

### (2) 気流を利用した空中力覚提示(force)

浮遊用気流と非剛体シートの力学作用を定式化し、筆記や簡易物体操作に力覚を空中で提示する。

## 3. 研究の方法

### (1) 質感変調による空中遭遇型触覚提示法

実現方法の一つとして、UAVにあらかじめ異なる粗さ/滑らかさをもつ複数のテクスチャを物理的に切り替える方法が考えられる。一方、ユーザに提示すべきテクスチャをUAVの回転によって切り替える場合、ユーザが提示部に接触しているときには切り替えることが難しく、また状況によってUAVの回転を高速に行わなければいけないといった制約が生じる。

そこで、本研究では、UAVに装着したテクスチャに意図的に振動を加えることによって、粗さ/滑らかさを変化させる方法を検討した。具体的には、本来の素材のもつ粗さがドローンなどのUAV(Unmanned Aerial Vehicle)上でいかに知覚されるか、またその素材の粗さを改変・拡張できるかについて検討した。まず、UAVに粗さの異なる複数の紙やすり(図1)を取り付け、被験者に触らせ、粗さの判別の正確さを調査した(実験1A)。また、固定条件での触覚提示の実験(図2)や、振動アクチュエータでテクスチャ(紙やすり)に振動を重畳した場合(図3, 図4)における粗さ知覚への影響を調査した。これらの現象を利用し、本研究ではUAVでの粗さ/滑らかさ提示時に振動を付与する実験を行なった(実験1B)。

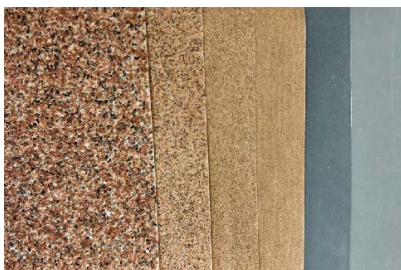


図1：触覚提示に用いた紙やすり

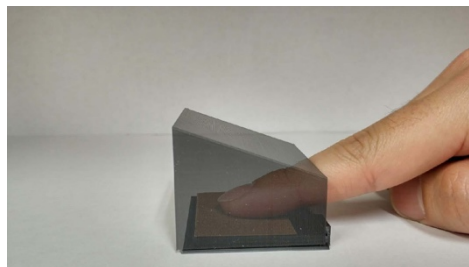


図2：固定条件での触覚提示の様子

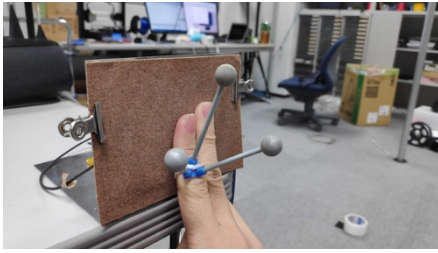


図 3 : 振動重畳の実験の様子

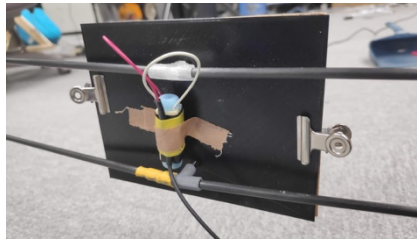


図 4 : 振動子が装着された様子

### (2) 気流を利用した空中力覚提示法

UAV 搭載カメラを用いて LSD-SLAM やその他センサ信号を複合的に用いて自己位置推定を行う、空中遭遇型力覚提示システムを構築した (図 5, 図 6)。これは、UAV やユーザの位置計測に外部カメラを用いた場合に作業空間に制限が生じるという問題を解決するものである。これによって、本研究課題が提案する、外部計測装置に寄らない本来の非拘束の空中力触覚提示を初めて実現した。そのうえで、目標位置への誘導に関する実験を行った。また、水平方向の 1 自由度の力覚提示を実現するために非剛体シートを用いた方法を開発した。非剛体シートは鉛直上下方向の気流による風圧を水平方向の力へと変換する作用をもつ。力覚センサを先端に装着したリニアアクチュエータによって提示部を押し込んだ場合の提示力を計測する実験を行った (図 7)。

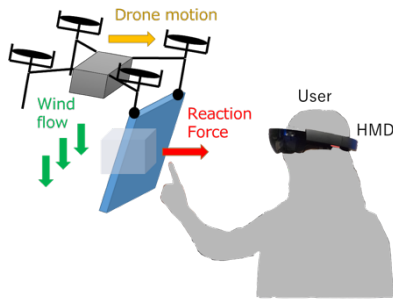


図 5 : 柔軟シートによる水平方向への力覚提示

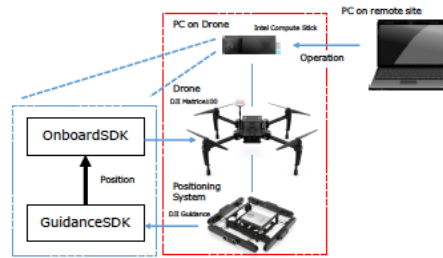


図 6 : システム構成

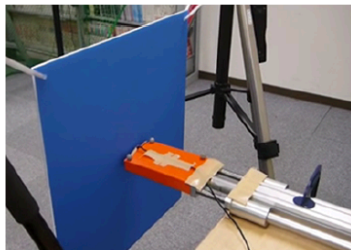


図 7 : 力覚センサを装着したリニアアクチュエータにより水平方向の提示力を計測する様子

次に、鉛直上下方向の 1 自由度の空中遭遇型力覚提示システムを開発し (図 8)、その評価を行った。具体的には、上下方向の 1 自由度の力提示の可能性を明らかにするため、AR Drone2 (Parrot 社) と呼ばれる商用 UAV を用いて提示力の範囲や正確性を調査するとともに (実験 2A)、物体を押したときの反力の提示、および物体を持ち上げたときの重さ提示を行なうことが可能かについて検証を行った (実験 2B)。



図 8 : 鉛直上下方向の 1 自由度の力覚提示に使用したデバイス



#### 4. 研究成果

##### (1) 質感変調による空中遭遇型触覚提示法に関する実験結果

以下に実験で得られた結果を示す。

**実験1A**の結果を図9に示す。紙やすりを固定面上に固定した条件 (FIX) とドローンに取り付けた条件 (DRN) において粗さ／滑らかさの知覚のずれのバラツキが同程度であり、ドローン装着時にも同程度の正確さで粗さ／滑らかさ知覚が可能であることが示唆された。

**実験1B**の結果を図10に示す。振動を重ねた際の粗さ感覚の違いを一对比較法で評価した結果を示す。粗さ知覚の大きさは、軸上の右にいけばいくほど大きいことを表す。結果から、統計的に有意に振動数が高い場合により粗く感じる事が確認された。したがって、振動重畳により質感を改変できることが示唆された。実験結果から、UAV 本体の振動による影響は小さく、また振動アクチュエータを用いることで粗さ感覚の改変が可能であることから、提示するテクスチャを物理的に置き換えることなく、振動の付与によって瞬時に粗さ感覚を変化させることが可能であることが示唆された。一方、粗さ感覚の感じ方は、振動重畳により粗く感じるユーザと逆に滑らかに感じるユーザの2パターンに大別されることが判明し、その機序については引き続き調査を行なう必要があるということが分かった。

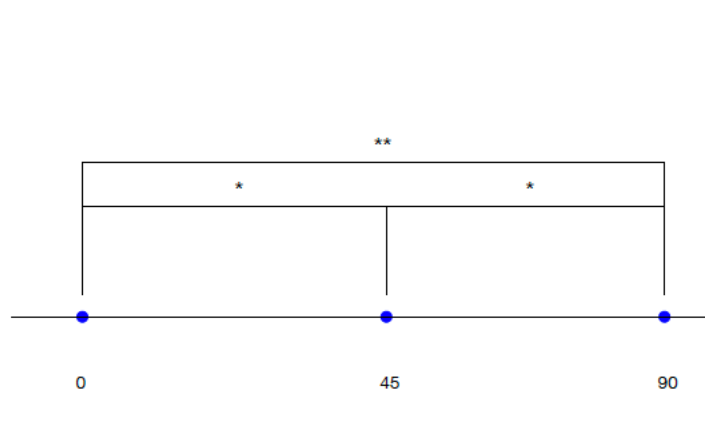
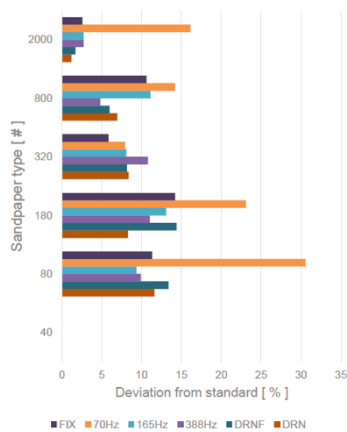


図9：粗さ／滑らかさ知覚のずれ

図10：実験結果：周波数が高いほど粗く感じる

##### (2) 気流を利用した空中力覚提示法に関する実験結果

以下に実験で得られた結果を示す。

**実験2A**の結果を図11に示す。プロペラの出力と提示力の関係を表しており、2次曲線で概ね表せることが分かった。また、これらの関係を用いることによって提示したい力を制御することが可能である。図12は指定した上方向の提示力と計測された力の関係を示している。その結果、0.4N から 1.4N の範囲で力提示が可能であり、その誤差は絶対値で平均 2.72%程度、相対値では最も大きい場合で 13.04%であった。また、水平方向の力提示について、柔軟シートを押し込んだ場合に浮遊用気流を用いた場合は 0.12N であることが研究代表者らの実験で分かっており、浮遊方向と同じ鉛直上下方向への力提示は、水平方向の約 10 倍程度の力を提示できることが分かった。

**実験2B**の結果を図13, 図14に示す。空中遭遇型力覚提示の応用として、硬さ提示および重さ提示を行った様子を示す。

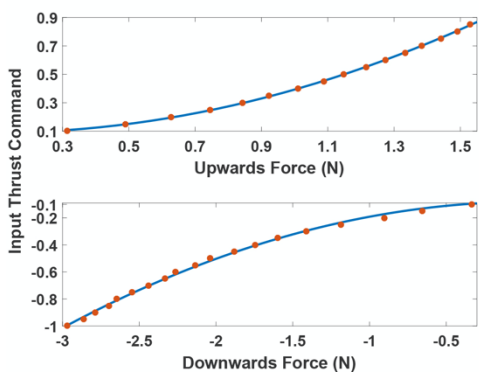


図11：物体の異なる硬さの提示を行なう様子

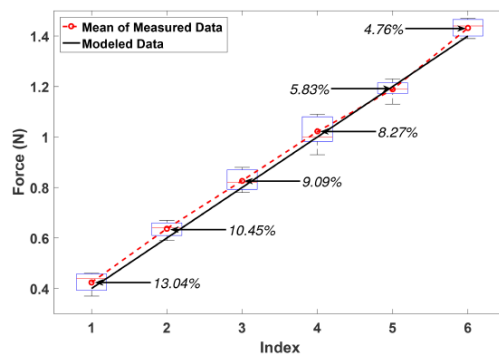


図12：提示力の範囲と正確さ

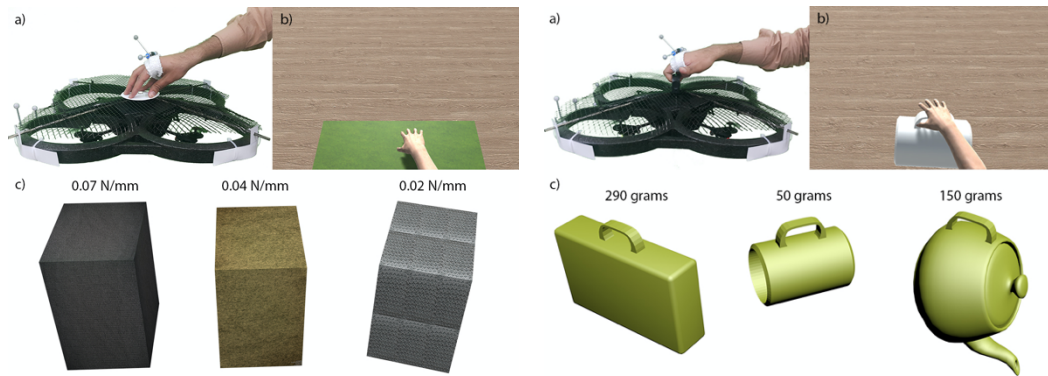


図 13：物体の異なる硬さの提示を行なう様子 図 14：物体の異なる重さの提示を行なう様子

### (3) 研究成果のまとめ

本課題の研究目的に記載した遭遇型で特に求められる二つの機能について、手法を設計してシステムを実装し、計測実験や被験者実験により、その有効性を検証した。

テクスチャの質感変調による空中触覚提示については、UAV に装着することによるテクスチャの粗さ／滑らかさの変化を調査し、UAV 本体の振動による影響は小さく、また振動アクチュエータを用いることで粗さ感覚の改変が可能であることから、提示するテクスチャを物理的に置き換えることなく、振動の付与によって瞬時に粗さ感覚を変化させることが可能であることが示唆された。次に、気流を利用した空中力覚提示については、これまで研究代表者らが検討してきた非剛体シートを用いた提示法において UAV 搭載カメラを用いて LSD-SLAM やその他センサ信号を複合的に用いて自己位置推定を行うシステムを構築することで、外部センサを用いない完全に独立な空中遭遇型のインタラクションシステムを実現した。また、その力の提示方向についてこれまでの水平方向に加えて垂直方向への提示について基礎的な計測実験から、応用を想定した試用実験を行ない、提案手法の有効性を確認した。

以上より、空中遭遇型における主要な機能である触覚提示と力覚提示の基盤技術を開発し、その有効性を示した。得られた成果の一部は、当該分野において最も権威のある国際会議 ACM User Interface Software and Technology Symposium, IEEE Haptic Symposium, IEEE World Haptics Conference, やその他の国内外の学術会議で成果を報告しており、先導的な空中遭遇型力触覚提示に関する研究として多数の文献から引用されるなど一定の成果を挙げることができたといえる。今後、視覚や聴覚、さらには温覚や嗅覚情報の非接触提示と融合させ、高いリアリティのある空中遭遇型の力触覚提示の実現が期待される。

#### <引用文献>

- [1] Y. Yokokohji, et al., Designing an Encountered-type Haptic Display for Multiple Fingertip Contacts Based on the Observation of Human Grasping Behaviors. *Int. J. Rob. Res.* 24(9), pp. 717-729, 2005.
- [2] A. Gomes, et al., BitDrones: Towards Using 3D Nanocopter Displays as Interactive Self-Levitating Programmable Matter. *ACM CHI2016*, 2016.

## 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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 G. Kato, Y. Kuroda, K. Kiyokawa, H. Takemura	4. 巻 24
2. 論文標題 Force Rendering and Its Evaluation of a Friction-based Walking Sensation Display for a Seated User	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 1506-1514
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 黒田嘉宏, 加藤拓実, 吉元俊輔, 大城理	4. 巻 20
2. 論文標題 PupilShutter: 瞳孔収縮による注釈提示システム	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会論文誌	6. 最初と最後の頁 221-227
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 S. Yoshimoto, S. Hinatsu, Y. Kuroda, O. Oshiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Hemodynamic Sensing of 3-D Fingertip Force by Using Nonpulsatile and Pulsatile Signals in the Proximal Part	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems	6. 最初と最後の頁 1155 - 1164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 S. Yoshimoto, Y. Kuroda, O. Oshiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Estimation of Object Elasticity by Capturing Fingernail Images during Haptic Palpation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 204 - 211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 G. Kato, Y. Kuroda, K. Kiyokawa, H. Takemura	4. 巻 24(4)
2. 論文標題 Force Rendering and its Evaluation of a Friction-Based Walking Sensation Display for a Seated User	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 1506-1514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2018.2793641	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 G. Kato, Y. Kuroda, I. Nisky, K. Kiyokawa, H. Takemura	4. 巻 10(3)
2. 論文標題 Design and Psychophysical Evaluation of the HapSticks: A Novel Non-grounded Mechanism for Presenting Tool-mediated Vertical Forces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 338-349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2016.2636824	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 該当する

1. 著者名 Y. Kuroda, K. Seki, K. Kiyokawa, H. Takemura	4. 巻 12(3)
2. 論文標題 Non-grounded Haptic Display by Controlling Wind Direction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 404-411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22391	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 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Ryo Meguro, Photchara Ratsamee, Tomohiro Mashita, Yuki Uranishi, Haruo Takemura
2. 発表標題 FrictionHaptics : Encountered-type Haptic Device for Tangential Friction Emulation
3. 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryuya Omori , Yoshihiro Kuroda, Yoshimoto Yoshimoto, Osamu Oshiro
2. 発表標題 A Wearable Skin Stretch Device for Lower Limbs: Investigation of Curvature Effect on Slip
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiayi Xu, Yoshihiro Kuroda, Yoshimoto Yoshimoto, Osamu Oshiro
2. 発表標題 Non-contact Cold Thermal Display by Controlling Low-temperature Air Flow Generated with Vortex Tube
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斎藤 悠太, 磯山 直也, Photchara Ratsamee, 酒田 信親, 黒田 嘉宏, 清川 清
2. 発表標題 ドローンを用いた空中遭遇型ハプティックインタフェースにおける粗さ感覚提示時の振動による影響
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 第59回 複合現実感研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 目黒 僚, Photchara Ratsamee, 間下 以大, 浦西 友樹, 竹村 治雄
2. 発表標題 FrictionHaptics: 摩擦力提示のためのハプティックデバイス
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 第59回 複合現実感研究会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Mao Sakaguchi, Yoshihiro Kuroda, Yoshimoto Yoshimoto, Hiroki Ishizuka, Osamu Oshiro
2. 発表標題 andheld Haptic Interface with Pneumatic Endeffector for Elastic Contact
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiayi Xu, Yoshihiro Kuroda, Yoshimoto Yoshimoto, Osamu Oshiro
2. 発表標題 Creating an immersive experience in a cooling world with a Non-Contact Cold Thermal Display using vortex tube
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryuya Omori , Yoshihiro Kuroda, Yoshimoto Yoshimoto, Osamu Oshiro
2. 発表標題 Hapleg: Wearable Skin Stretch Device for Navigation of Lower Limbs Movement
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田嘉宏, 加藤弘樹, 谷川千尋, 吉元俊輔, 大城 理, 高田健治
2. 発表標題 動作計測による顔の粘弾性シミュレーション
3. 学会等名 日本医用画像工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiayi Xu, 黒田嘉宏, 吉元俊輔, 大城 理
2. 発表標題 冷気の流速制御による非接触型冷覚提示
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森隆哉, 黒田嘉宏, 吉元俊輔, 大城 理
2. 発表標題 せん断力を用いた下肢誘導装置における提示部の検討
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 P. Ratsamee, K. Yamaguchi, K. Kiyokawa, H. Takemura, S. Jeon, Y. Kuroda
2. 発表標題 UHD: Unconstrained Haptic Display Using a Self-Localized Quadrotor
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Abdullah, M. Kim, W. Hassan, Y. Kuroda, S. Jeon
2. 発表標題 Drone Based Kinesthetic Haptic Interface for Virtual Reality Applications
3. 学会等名 AsiaHaptics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 斎藤悠太, Photchara Ratsamee, 黒田嘉宏, 酒田信親, 清川清
2. 発表標題 ドローンを用いた空中遭遇型ハプティックインタフェースにおける複数触覚の提示
3. 学会等名 第23 回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hokoyama, Y. Kuroda, K. Kiyokawa, H. Takemura
2. 発表標題 Mugginess sensation: Exploring its Principle and Prototype Design
3. 学会等名 Proceedings of IEEE World haptics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Abdullah, M. Kim, W. Hassan, Y. Kuroda, S. Jeon
2. 発表標題 HapticDrone: An Encountered-Type Kinesthetic Haptic Interface with Controllable Force Feedback: Example of Stiffness and Weight Rendering
3. 学会等名 Proceedings of IEEE Haptic Symposium 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yoshimoto, Y. Kuroda, O. Oshiro
2. 発表標題 EmBIT: Electromechanical Boundary Impedance Tomography for Soft Tactile Sensor
3. 学会等名 Proceedings of IEEE Haptic Symposium 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Abdullah, M. Kim, W. Hassan, Y. Kuroda, S. Jeon
2. 発表標題 An Encountered-Type Kinesthetic Haptic Interface with Controllable Force Feedback: Initial Example for 1D Haptic Feedback
3. 学会等名 ACM UIST 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 黒田嘉宏, 吉元俊輔	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 552
3. 書名 VR/A R 技術の開発動向と最新応用事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Life Engineering Laboratory <a href="http://www.LELAB.jp">http://www.LELAB.jp</a>
--

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	清川 清  (Kiyokawa Kiyoshi)  (60358869)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授   (14603)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	ラサミー ポチャラ (Ratsamee Photchara) (50772448)	大阪大学・サイバーメディアセンター・助教  (14401)	
研究 分担者	吉元 俊輔 (Yoshimoto Shunsuke) (00646755)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・講師  (12601)	
研究 分担者	大城 理 (Oshiro Osamu) (90252832)	大阪大学・基礎工学研究科・教授  (14401)	