

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25240032

研究課題名(和文)スーパーハプティクスの基礎的研究

研究課題名(英文)Basic Study on Super Haptics

研究代表者

篠田 裕之(Shinoda, Hiroyuki)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40226147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーハプティクスとは、従来の触覚インタフェースが必須要件としていた「デバイスと人間との機械的接触」を排除することにより、触覚を通じた人間支援の可能性を大幅に拡大する概念である。具体的にはまずその要素技術として、超音波を用いて触覚を非接触で刺激する技術および人間の筋肉が発生している力を遠隔計測する技術を確立した。それらの要素技術に基づいて、空中映像のボタンを、触覚を伴って操作できる空中触覚タッチパネル、離れたワークスペースにいる二者間で、お互いの高忠実な3次元映像に触れあうことができる視触覚クローン、触覚刺激によって手の動作誘導を行うシステムなど、従来にないインタフェースを具体化した。

研究成果の概要(英文)：Super haptics is haptic human support free from the problems and constraints ascribed to the mechanical contact between the human and haptic stimulators. First in this study, the elementary technology to stimulate a human skin using airborne ultrasound was established. We also developed a sensing technology for remotely measuring the generated force of a human hand. Based on those technologies, we realized novel interface systems: Aerial touch panel in which we can operate floating images with haptic feedback, Haptic-optical clone system that realizes symmetric mutual teleexistence in which we can remotely touch each other through realistic 3D images, and a motion navigation system where a hand is navigated by noncontact ultrasound stimulation.

研究分野：ハプティクス、バーチャルリアリティ、計測工学

キーワード：ハプティクス マルチモーダルインタフェース 超音波 バーチャルリアリティ 触覚

1. 研究開始当初の背景

触覚は対象との機械的接触によって惹起される感覚である。そのため従来の触覚刺激技術は、人間と固体デバイスとの機械的接触を必要とするものであった。このことが触覚を介した人間支援における強い制約となり、その応用分野を著しく狭めてきたといえる。従来の触覚提示デバイスは「設置型」と「携帯型」に大別される。設置型の場合、特定の場所に設置された触覚提示装置にわざわざ触りに来てもらう必要があり、それ以外の時間、何か目的をもって活動している人間をサポートすることができない。携帯型はそれよりは制約が弱い、あらかじめ刺激部位を特定する必要があり、皮膚の自由な箇所を自由なタイミングで刺激するのが難しい。必要な時に必ずそれを手にしている保証がないことも応用の際には問題となる。この問題に対して我々は超音波の非線形効果を用いて非接触で触覚を惹起する手法を2008年に提案している。しかし本研究の開始以前は、限定された状況のもと、超音波の作用によって触覚が感じられることを確認したのみであり、それによってインタフェースとしてどのような活用が可能となるかは示されていなかった。

2. 研究の目的

「スーパーハプティックス」とは、このような触覚特有の強い制約を受けない触覚刺激法を前提とし、人々の行動を触覚刺激のために制約することなく支援する技術を表す言葉である。触覚刺激のための制約を取り除くことにより、触覚の活用分野を大幅に拡大することを目指した。特に本研究では、非接触で力学的作用を伝達する手段として超音波を利用することを前提とし、(1) 遠隔(非接触)ハプティックアクチュエーション、(2) 遠隔(非接触)ハプティックセンシング、の要素技術開発と、それらを用いた(3) 人間支援システムの具体的な姿を示すことを目的とした。

(1) 遠隔ハプティックアクチュエーション

まず研究の前半において、超音波による非接触触覚刺激により、人間の触覚を刺激する環境を実現する。そのワークスペースにおいて、身体の自由な部位を任意のタイミングで刺激する基礎技術を確立する。

なお、皮膚を直接加圧するだけでなく、超音波の放射圧によって、人間を取り囲む様々な物体をアクチュエートし、人間とインタラクションさせることができる。光や超音波の放射圧によってマイクロな物体を操作する技術はすでに研究されているが、空中超音波の放射圧によって軽量物体を空中で自由にハンドリングする技術はまだほとんど研究されていない。本研究では人間の皮膚を直接放射圧刺激する技術とともに、人間を取り巻く任意の軽量物体を振動・運動させ、人間とイ

ンタラクションさせる技術を確立する。

(2) 遠隔ハプティックセンシング

物体をアクチュエートし、その応答を計測することにより、非接触で触覚情報をセンシングすることができる。超音波の放射圧によって対象の硬さ(表面コンプライアンス)を計測する技術についてはすでに当研究グループが着手しており、静止物体については、皮膚表面程度の硬さをもつ表面硬さ分布を遠隔計測できることを実証している。本研究ではこれを行動する人間の皮膚表面の硬さ分布計測にまで発展させる。これによって動作中の人間の力が遠隔から測定可能となる。

(3) スーパーハプティックス システム

従来の触覚技術は、わざわざ特定のものに触れようとしたり、触覚を受け取るための準備をしたりしている状況でしか活用することができず、その潜在的な可能性を活かすことができていない。スーパーハプティックスでは、その非接触性を活かして能動・受動触覚に働きかけ、人間の感覚・行動を支援する情報環境を実現する。

3. 研究の方法

(1) 遠隔ハプティックアクチュエーション

本研究の開始前にすでに 18×14 素子を配列したフェーズドアレイユニットは試作されていた。それらは隣のユニットにシリアル接続され、同期動作するためのハードウェアをすでに備えている。しかし本研究の開始前はそれによって単一焦点が形成されることが確認されていたに過ぎず、多様な触感の生成法、多焦点や3次元空間分布を形成する方法、副産物として発生する音響流の抑制法、異なる角度に配置された音響放射面の統合方法などは全く手がついていなかった。そこで本研究ではこれらの問題に取り組み、複数ユニットを同時駆動することによる触像生成アルゴリズムの開発を行う。

多様な触感生成のためには、超音波の振幅変調の階調を十分高めた上で、振幅波形と触感との関係を明らかにする必要がある。また触覚と同時に提示される視覚的情報との相互作用も考慮される必要がある。

次に目標とする3次元的な音響エネルギー密度分布を生成するための超音波素子の駆動位相・振幅を、逆問題解法によって求めるアルゴリズムを開発する。

音響流の抑制のためには、一方向からの音波だけでなく、その反射波や、対向する放射面からの音波を干渉させ、定在波を形成することが有効であると考えられる。本研究では、対向駆動を前提とした定在波音場の生成と効果の検証を行う。

(2) 遠隔ハプティックセンシング

人間の筋肉が発生する力の状態を遠隔計測するシステムを試作し、検証実験を行う。

本研究期間前に、超音波で表面を励振し、その際の変位をレーザー変位計で計測することで表面硬さを計測する予備研究を行っている。これを用い、皮膚表面のコンプライアンス変化を計測することで筋肉の緊張度の変化を計測するシステムを確立する。

(3) スーパーハプティクス システム

前記要素技術を活用し、人間の知覚、心理に関する基礎研究と人間支援技術の開発を行う。具体的なテーマを以下に示す。

① 触覚コミュニケーション

触覚の遠隔コミュニケーションとしては、2者がペアとなるグリップの片方ずつを握って力を伝達し合う、などの研究はすでに行われている。本研究ではこれを非接触触覚刺激によって行う。直接相手の3D映像に触れるだけでなく、3D映像で映し出された相手を見ながら風船状の軽量物体の触感をお互いを感じるなど、様々なインタラクションを考えることができる。視聴覚刺激に加えてこのような非拘束での触覚インタラクションが付加されることにより、相手の存在がどのように感じられるようになるか、実験的に明らかにしながら次世代のコミュニケーションを提案する。

② 触覚VR

2009年に「Touchable Holography」で示したコンセプト、すなわち空中映像に触れたときの触感を再現する技術についてはその後リアリティの向上に関する進展が見られていない。その主な原因は、これまでのデバイスの提示力が非常に弱く、触覚閾値からのマージンが小さいために多様な刺激波形を試みることができなかつたためである。本研究では超音波アレイの大口径化による強力化によって多様な振動波形の提示が可能となるため、触覚リアリティの向上に取り組む。また空中超音波刺激の問題点の一つとして気流の発生を伴う問題があるが、これを抑制しながらリアルな接触感を非接触再現する技術を確立する。この技術を応用し、空中でのボタン操作や3次元物体の提示などを実現する。

③ その他

非装着での触覚刺激はその他にも様々な応用が可能である。危険な物体に近付いた際の注意の喚起や、手・腕動作の誘導の他、秘匿情報の伝達などにも活用できると考えられる。例えばある人の皮膚上に複数の文字ボタンを映像プロジェクタで投影し、その映像上のボタンを超音波で押してやれば、(その人だけはどの文字が押されたのかが分かるので)他人の目の前でシステムから個人に対して秘匿情報を伝達することができる。このように、非接触触覚を用いた新しい触覚刺激の活用方法を研究する。

4. 研究成果

以上の研究計画のもと、本研究期間中に以下のような研究成果を得た。研究計画時に想定していた成果が得られただけでなく、完全双方向の視触覚クローンなど、当初は想定していなかった顕著な成果が得られた。また、映像と非接触触覚刺激が同期したときの驚きや効果は、本研究開始以前に予想していたものより著しく大きいものであった。これらの一連の研究成果の中で特に重要なものを以下にまとめる。

(1) 遠隔ハプティックアクチュエーション

研究分担者の星、および落合らが行った超音波による物体浮遊およびアクチュエーションのYouTubeビデオ(Three-Dimensional Mid-Air Acoustic Manipulation)は、2013年12月に公開されると短期間に300万回以上再生され、大きなインパクトを与えた。

また、超音波による多様な触感の生成、視覚情報との相互作用、定在音場による3次元触像の生成、音響流の抑制についての研究成果は以下(3)以降に含まれている。

(2) 遠隔ハプティックセンシング

研究計画の通り、超音波の放射圧を用いて表面の硬さ分布を非接触で計測する装置を実現し、非接触で筋肉の緊張度の変化を計測できることを実証した。これらの成果は研究論文として発表されただけでなく、2014年5月にNHK技研公開において実演展示された。

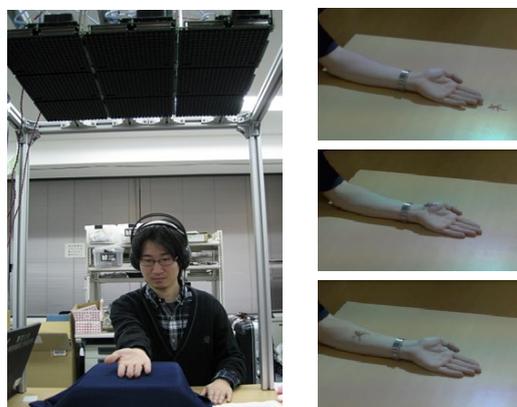


図1 触覚プロジェクタ

(3) 触覚プロジェクタ

プロジェクタによって投影された映像に触覚刺激を重畳するシステムを実証した。映像に応じて触感を変化させ、虫や小動物が手の上を移動する感覚を再現した。また波を立てながら水面を這うトカゲを再現するデモ展示、触覚による注意喚起、さらには秘匿情報提示(プロジェクタで投影された複数のキーのうちの一つを触覚で指示することによる情報伝達)の実証実験も行われた。

この研究においては、複数のフェーズドアレイユニット(図1のシステムではフェーズドアレイユニットが3×3配置されている)

を連携動作させることで提示可能な力の上限を引き上げ、超音波の振幅変調の階調を高めた。その上で、投影された映像に適合する触覚刺激波形を探索した。

触覚プロジェクタのデモは、超音波触覚提示の効果を広く一般の人々に実感させた最初デモであったと考えられる。この研究成果は、ハプティクス国際会議としては最も権威のある IEEE World Haptics Conference 2013 において Best Paper Award の Finalist に選出 (当該会議において 3 件選出) されるとともに Best Student Paper Award (1 件選出) を受賞した。

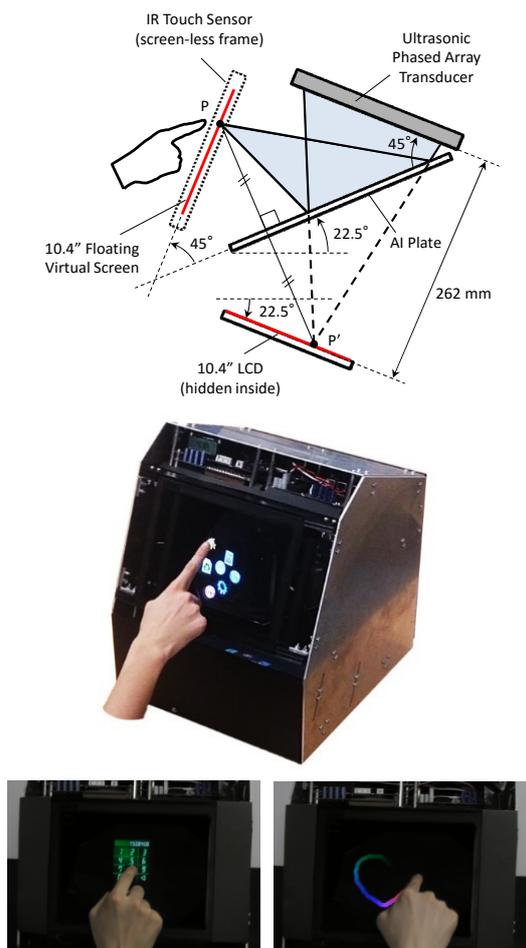


図2 空中触覚タッチパネルの構造図 (上)、全体写真 (中)、操作の様子 (下)

(4) 空中触覚タッチパネル (Haptomime)

最近、積極的に触覚フィードバック機能を付加したタッチパネルがさかんに研究開発されているが、ごく普通のタッチパネルであってもすでに触覚フィードバックは行われ、操作のための重要な役割を果たしている。そのフィードバックとは、指がタッチパネルの表面に触れたことを操作者の指が知覚することであり、操作者はこの知覚によって操作画面の奥行を確認している。そしてクリック動作の完了やドラッグ動作の継続を認識

しているのである。

タッチパネルで行っているような操作を、ジェスチャを用いて空中で行うインタフェースが研究されているが、手に何も持たず、触覚の全くないまま空中操作しようとすると思いのほか難しいことがわかる。例えば 3 次元映像表示によって空中にタッチパネル映像を浮遊させ、指の位置を計測して反応するシステムを実現することはすでに可能であるが、触覚がないと指がアイコンに触れた瞬間を触覚で特定することができない。そのため、タッチ操作の完了を確認するためには映像の変化を目で見続けるか、音に変換して確認するしかなく、普通のタッチパネルよりいくらか使い勝手の悪いものになってしまう。

それに対し、空中で触覚フィードバックを与えることができれば、空中タッチパネルに普通のタッチパネルと同等のユーザビリティを付与できる。そうなれば、普通のタッチパネルよりコストが余計にかかったとしても役に立つ場面は多い。例えば空中映像を操作するのであれば、汚れた手で触っても装置を汚すことはないし、汚れを残すことによる病気の感染も防ぐことができる。手術室で手が汚れている医師が、自分の手で情報を入力しながら手術を進めることができるようになる。

本研究で開発した「空中触覚タッチパネル (Haptomime)」では、赤外線センサによって指先の位置をセンシングし、指が空中に浮遊するボタンに触れた瞬間に指先に集束する進行超音波を照射することで触感を再現している。超音波の振動周波数は 40kHz に固定されているが、その振幅を様々な波形で変化させることによって触感を変化させることができる。またアイコンをドラッグする場合には、ドラッグ中に継続的な振動刺激を与える。それによってドラッグ中であることを、触覚を通してユーザに伝えることができる。

空中映像と触覚を同期して提示したシステムとしては、申請者らにより「Touchable holography」として SIGGRAPH 2009 に実演展示した例があるが、このときには空中映像、触感提示ともにクオリティが低かったため、実用的な効果までは実感できるものではなかった。

本研究に対しては、ACM UIST 2014 において People's Choice Best Demo Award (2014/10/8) が授与され、経済産業省 Innovative Technologies 2014 において、Industry 特別賞 および SIGGRAPH 特別賞の 2 賞が授与された。(2014/10/23)

(5) 3次元触覚ホログラム

定常的な音響エネルギーの空間分布によって 3次元触覚像を生成する方式を確立した。

例えば周囲を取り囲む超音波源（反射板を含む）によって音響エネルギーが空間中の点Pの周辺に集中している状況を考える。このような状況でPの周辺にある指が受ける圧力は、指がPに近づくにつれ（音響エネルギー密度の増大に伴って）増大していくため、指の位置に応じた意図的なフィードバック制御を行わなくても柔らかいバネに触れているかのような感覚が生じる。さらに音響エネルギーを時間的に変化させてやれば、より多彩な触感が再現される。また、複数の点に音響エネルギーが集中するよう、超音波アレイの各素子の位相を計算して駆動すれば、自由形状の3次元触覚像を再現することができる。これを触覚ホログラムと呼ぶ。各方向から均等に波動が到来している状況では、音響流の発生もわずかであり、時間的に変化しない定常的な音響場を生じている場合には、可聴音が発生することもない。また、全方向からの音波を干渉させることでエネルギー集中する領域を最小化することができ、空間分解能を高める上でも有利である。

本研究は、IEEE World Haptics Conference 2015 において、最優秀デモ (Best Demo Award Winner, 2015/6/25) に選出された。

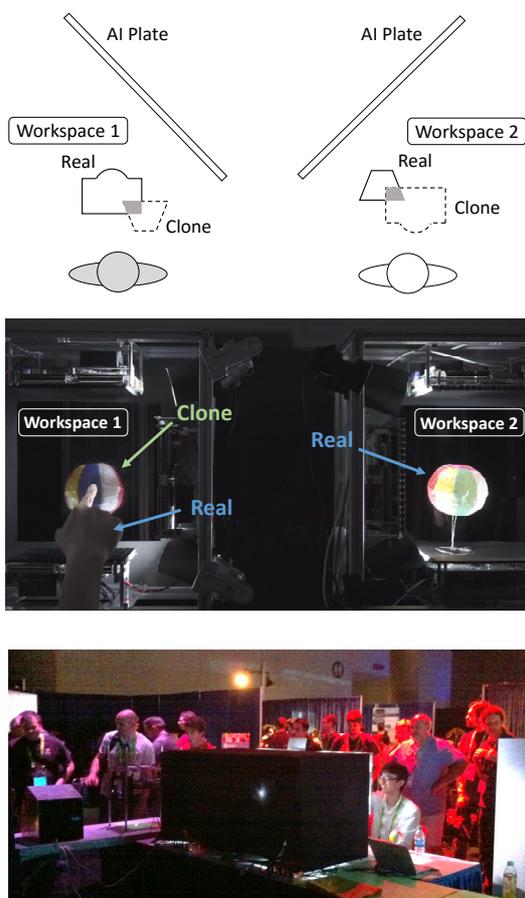


図3 視触覚クローンのシステムを説明する上面図(上)、正面からの写真(中)とSIGGRAPH 2015でのデモ風景(下)

(6) 視触覚クローン (Haptoclone)

2つの対となるワークスペースの映像は全て他方にコピーされ（これをクローンと呼ぶ）、それぞれのワークスペースの前に立つと、お互いが直接向き合っている状況が再現される。それぞれのワークスペースの実物（人間の手も含む）の3次元形状はリアルタイムで計測されており、実物とクローンが重なると、その重なり領域に（ワークスペースを取り囲む超音波素子アレイを用いて）音響エネルギーを集中し、接触点において両方の実物が力を受ける。人間同士であれば、お互いの3次元映像に直接触れ合うことができ、軽い物体がクローンに触ればそれらは力の相互作用を行うことになる。

本実験システムの裸眼3立体映像の再現は、2枚のマイクロミラーアレイ（アスカネット社 AI プレート）を用いて光学的に行われているため、2つのワークスペースの位置関係には強い制約があるのが現状であるが、これまで実現が難しかった完全対称な（触覚を含む）相互レイグジスタンスが実現されている。

一方のワークスペース1にいる人が、あたかも他方のワークスペース2にいるかのように感じる「レイグジスタンス」の典型的な実現方法は、ワークスペース2にスレーブロボットが配置され、そのロボットの感覚をワークスペース1にいる人間の感覚に提示する、というものであった。このレイグジスタンスは一方向であり、ワークスペース2にいる人は、自分の環境に入りこんできたロボットとインタラクションすることになる。Haptocloneでは、二つのワークスペースは対称であり、それぞれのワークスペース内で相手の光学的なクローンに自由に触ることができる。

例えば図3の中央の写真のような状況では、左の手（本物）が紙風船のクローンに触れた際、右のワークスペースの実物の紙風船が力を受けて運動し、その映像が左のワークスペースにコピーされている。つまり左の手が触れた紙風船のクローンには、実物の紙風船のダイナミクスもコピーされていることになる。

実物同士のインタラクションと本システムの違いは、物体同士が突き抜けてしまう場合もあり得ること、また発生力が計測されている訳ではなく、現時点ではコンピュータが生成した適当な相互作用力が与えられている点である。また超音波による力は、原則として物体表面に対して垂直な力に限られる。しかし再現される接触点の座標は正確であり、時間的な分解能も、センシング仕様の向上によって容易に高めることができる。

このシステムを用いると、インタラクションの際の発生力を再現性よく自由に調整し、触覚フィードバックの効果などを客観的に確かめることができる。裸眼の立体像としては非常に高いクオリティが実現されており、

3次元UI設計の際の基礎データを収集するためのテストベンチとしても活用できると考えられる。

以上の成果によって、超音波を用いたスーパーハプティクスの効果を実証することができた。今後さらに新しい応用を示していくとともに、この技術をサイエンスの一分野としても発展させていきたい。

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 20 件)

- ① Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue, H. Shinoda: HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, Proc. of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1980-1990, 2016. (査読有) doi>10.1145/2858036.2858481
- ② S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda: Active Touch Perception Produced by Airborne Ultrasonic Haptic Hologram, Proc. 2015 IEEE World Haptics Conference, pp.362-367, 2015. (査読有) DOI:10.1109/WHC.2015.7177739
- ③ S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda: Producing Airborne Ultrasonic 3D Tactile Image by Time Reversal Field Rendering, Proc. SICE Annual Conference 2014, pp.1360-1365, 2014. (査読有) DOI:10.1109/SICE.2014.6935269
- ④ S. Inoue and H. Shinoda: A Pinchable Aerial Virtual Sphere by Acoustic Ultrasound Stationary Wave, Proc. IEEE Haptics Symposium 2014, pp. 89-92, USA, 2014. (査読有) DOI:10.1109/HAPTICS.2014.6775437
- ⑤ Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, S. Inoue, and H. Shinoda: HaptoMime: Mid-Air Haptic Interactions with a Floating Virtual Screen, Proc. 27th ACM User Interface Software and Technology Symposium (UIST2014), pp. 663-667, 2014. (査読有) doi>10.1145/2642918.2647407
- ⑥ K. Hasegawa and H. Shinoda: Aerial Display of Vibrotactile Sensation with High Spatial-Temporal Resolution Using Large-Aperture Airborne Ultrasound Phased Array, Proc. IEEE World Haptics Conference 2013, pp. 31-36, 2013. (査読有)

DOI:10.1109/WHC.2013.6548380

[学会発表] (計 32 件)

- ① H. Shinoda: HaptoClone as a Test Bench of Weak Force Haptic Interaction, SIGGRAPH Asia 2015, WS Haptic Media and Contents Design, Article No. 3, Nov. 2, Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 2015/11/2. (招待講演)
- ② H. Shinoda: Non-Contact Haptics for Human Augmentation, IEEE World Haptics Conference 2015 Workshop, [W5] Haptics in Human Ability Augmentation (Organizers: H. Shinoda & A. Israr), Chicago, USA, 2015/6/22.

[図書] (計 2 件)

- ① T. Hoshi and H. Shinoda: Pervasive Haptics (分担執筆) Chapter 8, Airborne Ultrasound Tactile Display, Springer, pp. 121-138, 2016.
- ② 篠田裕之: 感覚デバイス開発 (分担執筆) 第1編 第6章 触圧覚デバイスの要求・制約事項, NTS, pp. 245-254, 2014.

[その他]

ホームページ等

http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/?page_id=447

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠田 裕之 (SHINODA, Hiroyuki)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 40226147

(2) 研究分担者

牧野 泰才 (MAKINO, Yasutoshi)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師
研究者番号: 00518714

星 貴之 (HOSHI, Takayuki)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 00518714

門内 靖明 (MONNAI, Yasuaki)
慶應義塾大学・理工学部・助教
研究者番号: 90726770

(3) 研究協力者

長谷川 圭介 (HASEGAWA, Keisuke)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任助教
研究者番号: 20733108