

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540077

研究課題名(和文)手形状変形フィードバックを用いた感覚間相互作用の誘発による形状提示システムの研究

研究課題名(英文) Perception-based Shape Display using Visual Feedback with Hand Posture Modification

## 研究代表者

廣瀬 通孝 (Hirose, Michitaka)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：40156716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、物体と手との接触点が複数ある状況でのPseudo-Haptics生起手法を確立し、多様な触り方に対応可能な視触力覚ディスプレイを実現することである。物体を触る手の動きを視覚的に変調し形状知覚を操作する従来手法には、接触点が複数ある場合、変調後の接触点間の空間的整合性が崩れ知覚操作効果が減少する問題があった。本研究では、画像変形技術を応用し手姿勢を操作することで、複数点接触においても整合性のとれた視覚刺激を合成可能なリアルタイム映像処理法を構築した。本手法により物体を複数指で把持する際の形状・硬さ知覚を操作できることを確かめ、携帯端末での触覚提示やモデリングシステムに援用した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed a visuo-haptic system that can provide users with the sensation of touching various virtual shapes, by realizing the Pseudo-Haptics that can adapt to a touching with multi-fingers. The previous way, which modifies the movement of virtual hand to alter a shape perception, evokes a spatial inconsistency when it's used for a touching with multi-fingers. To solve this problem, our research constructs a real-time video processing method that can compose visual stimuli with spatial consistency in that situation, by modifying a hand image's posture naturally with an image deformation algorithm. Through user experiments, we revealed that this method can modify the perception of shape and stiffness when users handle an object with multi fingers. Furthermore, we applied these findings to a modeling system and a haptic display on the mobile device, and confirmed these effect through exhibitions.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：触力覚提示 Pseudo-haptics 深部感覚 手形状変形 バーチャルリアリティ 形状提示 感覚間相互作用

1. 研究開始当初の背景

触力覚を物理的に再現する触力覚提示デバイスとは異なるアプローチとして、ユーザの運動中の身体部位または身体運動を投影したポイントの映像に時間的・空間的变化を加えることで、実際にかかる力を変化させることなくテクスチャ等の皮膚感覚、力や物体硬さ等の深部感覚を擬似的に生成可能な錯覚現象 Pseudo-Haptics が注目を集めている。

申請者らはこの現象を汎用的な触力覚提示に応用し、一本指で物体を触る手の動きを取得し、物体と指の接触点位置がバーチャルな物体表面をなぞっているように時間的・空間的に変調して見せることで、実際に触っている物体形状とは異なる形状を知覚させる視触力覚システムを実現してきた[1]。一方、深部感覚に関する Pseudo-Haptics は、技術的限界により、従来研究では物体と身体またはポイントとの接触点が1点しかない場合にしか効果が確認されていない。多点での接触における視触覚間相互作用生起手法が確立できれば、バーチャル物体とのより多様な触体験が生成できると考えた。

2. 研究の目的



図 1 手形状変形による多様な接触方法への対応

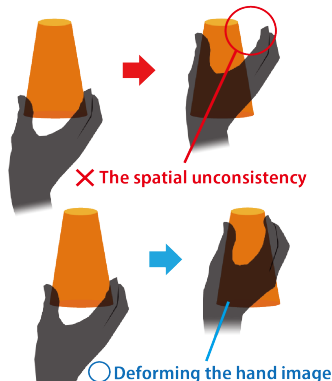


図 2 リアルタイムな手映像変形による空間的不整合の解消

本研究の目的は、物体と手との接触点が複数ある場合にも Pseudo-Haptics によって深部感覚を擬似提示可能な手法を確立し、多様な触り方に対応可能な視触力覚ディスプレイを実現することである(図1)。

従来の視触覚間相互作用生起手法では、接触点が複数ある場合、変調後の接触点間の空間的整合性が崩れ、フィードバックする映像が不自然になってしまうため、知覚操作効

果が減少してしまうという問題を抱えていた。そこで本研究では、Computer Graphics の技術である Image Deformation アルゴリズムを応用して手形状を変形することで、接触点が複数ある場合も空間的整合性のとれた視覚フィードバックを合成可能なリアルタイム映像処理手法を構築する。本研究の達成目標は以下の三点とする。

- (1) 接触点が複数ある条件下での Pseudo-Haptics 効果生起手法の確立  
多点での接触に関して、指の開きや姿勢をリアルタイムに適切に変形させることで、空間的に整合性のとれた視覚提示を生成し、Pseudo-Haptics を生起させるアルゴリズムを開発する。これまでの Pseudo-Haptics 生起手法のような、ポイントや手指の動きをただ単にずらす、という方法ではなく(図2上)、カメラから取得した手映像をリアルタイムに変形させることで、空間的整合性が保たれた視覚フィードバックを実現する。
- (2) 提案手法による深部感覚知覚操作可能域の評価

構築したアルゴリズムを用いて物体に対する形状・硬さといった深部感覚についての操作が可能か、可能な場合の効果の範囲や発生条件について検証・評価する。

- (3) 最終的なシステムの構築と評価  
(2)の設計に基づいてディスプレイを構築する。また、構築した視触力覚ディスプレイの触力覚表現能力を被験者実験を通じて評価する。最終的に、展示会等で多人数にシステムを体験させてフィードバックを得、本システムが形状提示ディスプレイとして十分な知覚操作能力を有するか検証する。

3. 研究の方法

- (1) 接触点が複数ある条件下での Pseudo-Haptics 効果生起手法の確立  
本研究では、実際に複数指で物体に触れているユーザの手の動きや姿勢を映像として取得し、それを空間的に変調して視覚提示する手法を構築する。これにより、映像として提示している形状をなぞっているかのような視覚刺激を生成し、Pseudo-Haptics の効果を生起させ、形状知覚を操作出来るのではないかと考えた。

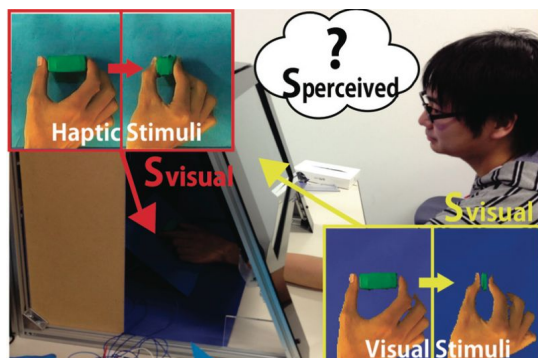


図 3 ビデオシーヌー実験システム

手法の構築にあたっては、実際に触っている形状とは異なる形状を触っている映像を提示でき、ユーザからは触っている物体と自身の手は直接見えないようなシステムを構築した。ユーザは、モニタの裏に配置されている物理的触力覚提示部を触りつつ、その様子をモニタを通して見る(図3)。

多点接触における形状知覚操作のための視覚フィードバック生起手法の構築

複数の接触点間の空間的整合性がとれるよう、Image-based Deformation を利用することで接触点位置だけでなく手形状を自然に変形する手法を実現した。変形にあたっては、制御点の位置の変化を元に画像全体を歪める画像変形アルゴリズムである、Schaeferらの rigid MLS method を用いた rigid MLS method では、変形結果を得るために、3つ以上の制御点(節点)の変形前と変形後の位置を与える必要がある。本手法では、物体を掴む指と物体との接触点2箇所と、手領域の重心を制御点として利用することとした。

カメラ画像より HSV 色情報から手領域を抜き出し、領域の輪郭情報とその凸包との重なりから指先位置を同定する。バーチャル物体の形状に合うように指先位置を視覚的に操作するための空間歪みの作成に関しては、指一本でのなぞり動作における Pseudo-Haptics 生起手法と同様のものを用い、変形前の接触点座標  $F_1, F_2$  に対し、図4に示すように  $F'_1, F'_2$  に接触点を操作する。この  $F_1, F_2$  と手領域の重心  $O$  を変形前の制御点位置、 $F'_1, F'_2, O$  をそれぞれ  $F_1, F_2, O$  に対応した変形後の制御点位置として用い、rigid MLS method で手画像を変形する。

多点接触における硬さ知覚操作のための視覚フィードバック生起手法の構築

体験者がバーチャル物体の形状を動的に変形させた際にも Pseudo-Haptics の効果が適切に表れるような、視覚フィードバック生成手法を構築した。具体的には、物理的刺激を提示する為に実際にユーザに触らせる物体表面に圧力センサをはりつけ、それから得られる圧力値や物体の変形に応じて空間的歪みをリアルタイムに生成し、画面上の指先位置を適切に変調する手法を構築した。指先位置の変調にあたっては にて構築した手法により、手映像の姿勢操作が違和感なくおこなわれるようにした。

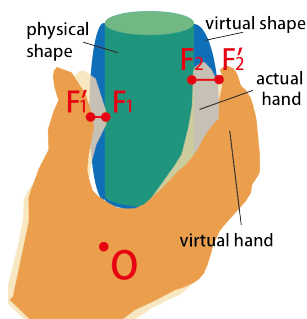


図4 多指に対応した手形状変形

(2) (1)にて構築した手法による、深部感覚知覚操作可能域の評価

多点接触における形状知覚操作効果検証

(1) 構築したシステムの形状知覚操作能力を検証するため実験をおこなう。物体に対して指一本で触る、つまり視覚提示する手映像の位置操作だけをおこなう場合と、物体を複数指でつまむ手形状変形フィードバックを用いた場合とで、形状知覚操作の効果がどの程度異なるか比較をおこなう。

多点接触における硬さ知覚操作効果検証

(1) にて構築したシステムにより MR/AR 空間内における空間的不整合の解消することで、視触覚間相互作用の効果が向上し、システムの弾性・硬さ知覚操作能力が高まるかを被験者実験により検証する。

(3) 最終的なシステムの構築と評価

以上で得られた知見を統合し、自身の手を用いて物体表面を凹ませて形状操作ができるシステムを構築する。実際に体験者が触る物体の周囲に圧力センサシートを貼り付け、押下圧力に応じてバーチャル物体を変形させ、それに伴って手映像の動き、姿勢を操作するための空間的歪みを生成することで、変形後の物体にあうように手映像の動きを変化させることのできる手法を実現する。

また、(1)(2)で得られた知見をモバイルデバイスにおける触体験生成に援用し、背面にタッチパネルがついたモバイルデバイスにおいて、デバイス上のモニタに表示されたバーチャル物体を両手の指を用いて引き伸ばし、硬さの違いを体感できる手法を構築する。

最終的に、展示会等で多人数にシステムを体験させてフィードバックを得、本システムが形状提示ディスプレイとして十分な知覚操作能力を有するか検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 接触点が複数ある条件下での Pseudo-Haptics 効果生起手法の確立

多点接触における形状知覚操作のための視覚フィードバック生起手法の構築

3.に記した手法により 図5に示すように、実際には変形しない静的な円筒形をなぞっているにもかかわらず、あたかも様々な形状の物体をなぞっているかのように手の姿勢が変化する視覚フィードバックを生成できることを確かめた。

多点接触における硬さ知覚操作のための視覚フィードバック生起手法の構築

3.に記した手法により 図6に示すように、二指で物体をつまんだ際に指先にかかる圧力とそれに伴って生じる物体の変形量をもとに、バーチャル物体の変形量と手映像の姿勢を操作することで、実際には同じ弾性の物体を同じ力をかけて掴んでいるにもかかわらず、様々な硬さのバーチャル物体を掴んでいるかのような視覚フィードバックを生成できることを確かめた。

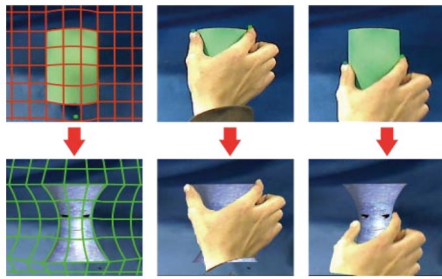


図 5 手形状変形フィードバック  
captured image

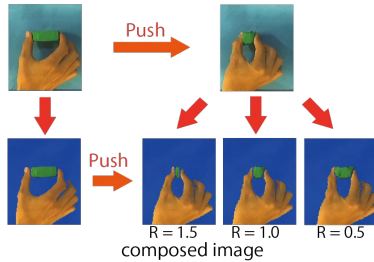


図 6 動的触要素への対応

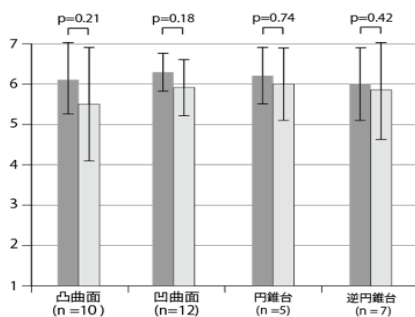


図 7 物理提示形状でなく、視覚提示形状を知覚した割合 (1-7 の 7 段階評価)

(2) (1)にて構築した手法による、深部感覚知覚操作可能域の評価

多点接触における形状知覚操作効果検証

3. (1)に述べたように、本手法の形状知覚操作効果を、既存の指一本でのなぞり動作に対する Pseudo-Haptics 生起手法との比較をおこなうことにより検証した。被験者が実際に触る形状は円筒形状 (高さ 120mm, 底面直径 60mm) とし、視覚的にモニタにて提示する形状として凹曲面・凸曲面・円錐台・逆円錐台の 4 つを用意した。凹曲面、凸曲面タイプの視覚提示形状側面の曲率は R140mm, 円錐台、逆円錐台タイプの側面の傾きは 10° とした。

被験者は本システムを初めて体験する 34 名であり、被験者には事前にシステムの目的が形状知覚操作であることは伝えず、実験終了後に伝えることとした。試行中、被験者は先に挙げた視覚提示形状の中から一つを選択し、モニタを見ながらモニタ裏に配置されている物理的提示形状を指一本でなぞる、もしくは複数指で挟むことで知覚した形状を回答させた。表示する手の動きの空間変調のみを行い指一本で物体に触らせる条件 (図 7 黒) と、手の姿勢をバーチャル物体に合わせて操作し複数指で物体をつかませる条件 (図 7 白) とで、形状知覚操作の効果がどのように異なるか検討した結果、後者の条件において

も前者と同様の効果が得られることが示された。

多点接触における硬さ知覚操作効果検証

構築したシステムにより MR/AR 空間内における空間的不整合の解消することで、視覚間相互作用の効果が向上し、システムの弾性・硬さ知覚操作能力が高まるかを被験者実験により検証した。その結果、空間的不整合を解消することで、つかんでいる物体に対する硬さ知覚操作の効果を高めることが明らかになり、物体の変形量を視覚的に ±22% 操作した場合、動的触知覚を、当初目標である 70% 以上の割合で操作できることが明らかになった (図 8)。

図 8 において Ex は歪みマップを用いて手形状変形フィードバックを生起させた条件、Ex は手映像を表示しない条件、Ex は、手映像は表示するが形状変形をかけないために空間的不整合が生じる条件となっている。さらに、実際に弾性力の異なる物体と触り比べて物理的等価点を求める実験においても、実際には同じ硬さの物体をつかんでも、姿勢を操作した手映像も重畳した場合、単に変形量を操作したバーチャル物体を提示した場合に比べ最大 1.6 倍硬い/柔らかい物体を掴んでいると知覚させられることが確認された。

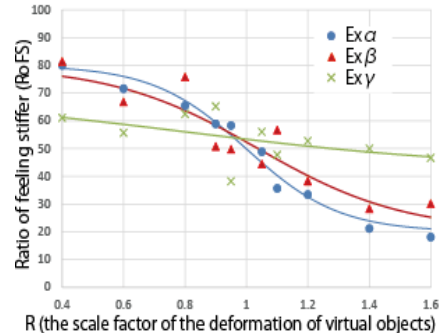


図 8 視覚的な物体変形量を操作した方を硬いと知覚した割合

(3) 最終的なシステムの構築と評価

以上の検証から得られた知見を統合することで、3. (3)に述べた手法により、自身の手を用いて物体表面を凹ませることでインタラクティブに形状操作ができるシステムを構築した。まず、実物体表面上の所定的位置を押した際に圧力センサシートから取得される情報により、バーチャル物体の存在する三次元空間と圧力センサシートの位置の対応関係をキャリブレーション (図 9)。

次に、シートから取得された圧力値に応じて、バーチャル物体の形状を変形させるシステムを構築した。圧力値が最も高い位置を中心として、物体表面の法線方向に sin 波分押し込まれるような物体変形を実装した。その際、変形した際の物体表面の曲率半径が、これまでの実験結果により明らかにされた知覚操作可能域である  $R_{\text{threshold}} = 70\text{cm}$  を下回らないよう、ある程度押し込まれると押し込まれる深さだけでなく、物体表面が変形する範

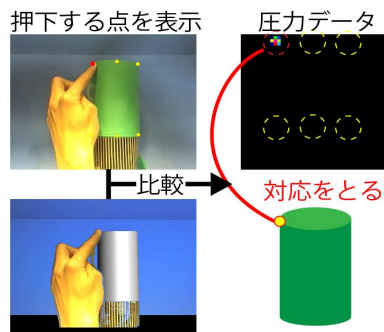


図 9 圧力センサによる物体への押下圧力測定

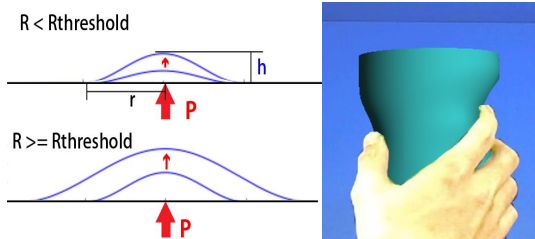


図 10 押下点付近の変形量操作（左）と掴み動作における変形結果（右）

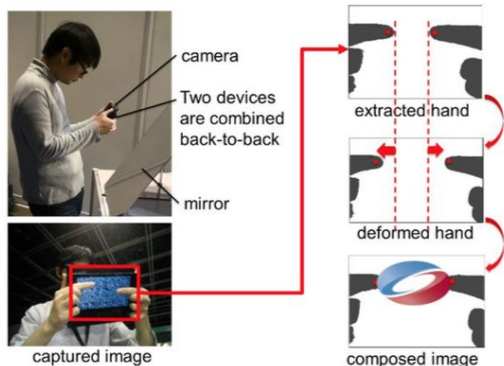


図 11 背面タッチディスプレイと本手法の組み合わせによるモバイルデバイスにおける硬さ提示

囲を拡大させる処理を実装した。

上記の計算から求めた、バーチャル物体表面の頂点座標の移動量を用い、手映像の動きを操作するための空間歪み量を算出する。これにより、バーチャル物体の変形に合うように、重畳される指の動きを変化させることができる。加えて、押下圧力分布をラベリングして複数個の押下点を検出することで、複数指での物体形状操作をおこなえるようなシステムを実装した。これにより、例えば図 10 に示すように物体をつかんだ際、それに応じてバーチャル物体が潰れるような変形をおこなうことができる。

加えて、本研究により得られた知見をモバイルデバイスにおける触体験生成に援用し、背面にタッチパネルがついたモバイルデバイスにおいて、デバイス上のモニタに表示されたバーチャル物体を、両手の指を用いて引き伸ばし、硬さの違いを体感できるシステムを構築した（図 11）。

本システムでは、端末後方に設置した鏡によって反射した画像を端末背面のカメラにて取得する。背面のモニタには、端末の位置姿勢を示すためのマーカを表示しておき、取

得した画像中からそれを認識させ、そこから HSV 色抽出により手領域を認識させる。最後に背面でのタッチ点と、位置速度の変化から計算した指先のポイント位置に合わせて、手画像の動き、姿勢を変調し、表示した。

以上の処理により、背面からモニタに表示されたバーチャル物体を両手の指により変形させる際、その硬さに応じて手指の動く量を操作することで、硬さ知覚を操作する。実際よりも手指による引き伸ばし量を大きく提示すれば柔らかい物体を、小さく提示すれば硬い物体を触っている感覚を提示できる。

本システムを SIGGRAPH ASIA や CEATEC にて展示し、のべ 1000 人を超える人々に体験させた。フィードバックを収集した結果、本研究提案する手形状変形フィードバック手法が物体の硬さ知覚操作に有用であることを確認した。

## 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 4 件)

1. 對間祐毅, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, Pseudo-haptics を用いた MR 空間内での力作業支援, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19 No.4, 2014,
2. 国分新, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 背面タッチパネルを用いた擬似力覚によるモバイル端末での触覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19 No.4, 2014,
3. 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 手形状変形フィードバックを用いた把持動作における硬さ知覚操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19 No.4, 2014,
4. Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Modifying Perceived Size of a Handled Object through Hand Image Deformation, Presense: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.22 No.3 pp.255-270, Summer 2013

〔学会発表〕(計 18 件)

[国際学会]

1. Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Air Haptics: Displaying feeling of contact with AR object using visuo-haptic interaction, ACM SIGGRAPH 2015 Talk, Aug. 2015.
2. Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, MagicPot360: Free Viewpoint shape Display Modifying the Perception of shape, IEEE Virtual Reality 2015, Mar. 2015.

3. Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Displaying Shapes with Various Types of Surfaces using Visuo-Haptic Interaction, The 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST), Nov. 2014
  4. Yuki Taima, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Controlling Fatigue while Lifting Objects using Pseudo-haptics in a Mixed Reality Space, Haptics Symposium 2014, Feb. 2014
  5. Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Controlling Perceived Stiffness of Pinched Objects Using Visual Feedback of Hand Deformation, Haptics Symposium 2014, Feb. 2014
  6. Arata Kokubun, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Representing Normal and Shearing Forces on the Mobile Device with Visuo-haptic Interaction and a Rear Touch Interface, Haptics Symposium 2014, Feb. 2014
  7. Arata Kokubun, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, ARAtouch: Visuo-haptic Interaction with Mobile Rear Touch Interface, ACM SIGGRAPH ASIA 2013 Emerging Technologies, Dec. 2013
  8. Arata Kokubun, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Visuo-haptic interaction with mobile rear touch interface, SIGGRAPH2013 Posters, 38:1, Jul. 2013
  9. Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Pot the magic pot: interactive modification of the perceived angular shape, SIGGRAPH2013 Posters, 37:1, Jul. 2013
- [国内学会]
10. 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 自己接触感を利用したバーチャル物体把持感の提示, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会, 2015
  11. 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 押下圧力計測に基づく視触力覚相互作用の評価, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会, 2015
  12. 宇治土公雄介, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, タッチパネル上での反復動作における Pseudo-haptics, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会, 2015
  13. 国分新, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 背面タッチパネルを用いた手の画像の変調提示による擬似力覚の生成, 日

- 本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会, 2014
14. 對間祐毅, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, Pseudo-haptics による全天周映像鑑賞時の行動誘発, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会, 2014
  15. 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 視覚間相互作用を利用した不連続面を含む三次元曲面に対する形状知覚操作, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会, 2014
  16. 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 視覚間相互作用を用いた自由視点形状提示システム, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会, 2013
  17. 對間祐毅, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 拡張現実感を利用した物体の明度操作による重量知覚および作業疲労の操作手法の基礎検討, マルチメディア・仮想環境基礎研究会, IEICE-MVE2013, 2013
  18. 国分新, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 見かけの移動量の操作による持ち上げ時重量知覚の操作, マルチメディア・仮想環境基礎研究会, IEICE-MVE2013, 2013

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

Magic Pot

<http://www.drunk-boarder.com/works/magicpot/>

研究室プロジェクトページ

<http://www.cyber.t.u-tokyo.ac.jp/ja/projects/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 通孝 (HIROSE MICHITAKA)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号: 40156716

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

谷川 智洋 (TANIKAWA TOMOHIRO)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号: 80418657

鳴海 拓志 (NARUMI TAKUJI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号: 70614353