

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽

研究期間：2011～2012

課題番号：23650057

研究課題名（和文） Pseudo-Haptics を利用した視触力覚ディスプレイ

研究課題名（英文） Visuo-Haptic Display using Pseudo-Haptic Effects

研究代表者

廣瀬通孝 (HIROSE CHITAKA)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：40156716

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、視覚を利用して擬似触力覚を生成できるPseudo-Hapticsの効果を利用して、簡易な機構で多様な形状を触っている感覚を提示可能な視触力覚システムを実現することにある。本研究課題では、ユーザが物体に触る手の動きや姿勢を空間的に変調して視覚提示することでPseudo-Haptics効果を生起させ、物体形状に対する知覚を操作する手法を提案・実証し、本手法を用いることで物理的に複雑な機構を用いることなくインタラクティブな形状提示が可能なディスプレイを構築した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we proposed a novel visuo-haptic system that can provide users with the sensation of touching virtual objects of varying shape, using Pseudo-Haptic effects. In our method, Pseudo-Haptic effect was invoked by displacing and deforming the representation of the user's hand to fit to the virtual object, as if users were touching various virtual shapes although actually they are touching only a physically static shape. We conducted some user experiments to investigate the effect of our method, and constructed an interactive shape display system without any physical devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,501,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：メディア情報学・データペース

キーワード：Pseudo-haptics, 触力覚提示, 視覚提示, 視触力覚ディスプレイ, 錯覚現象, 感覚間相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

従来提案されている触力覚提示デバイスは、提示したい物体の触力覚そのものを物理的に再現するため、複雑でかさばる機構が必要となり、表現可能な触力覚の精度に限界がある。そうした精度と複雑さのトレードオフにより、手術シミュレータやロボットハンドの遠隔操作など限られた範囲でしか応用さ

れていない。

Pseudo-Haptics 効果は、視覚と触力覚の相互作用によるある種の錯覚現象であって、物理的な力の発生がない状況下でも触力覚を感じさせる事ができる。しかし従来のPseudo-Haptics 効果の研究は、限定的条件下における現象の確認レベルであり、汎用的な視覚による触力覚の提示手法の確立には至

っていないのが現状である。

本研究では、この Pseudo-Haptics 効果を汎用的な触力覚提示に応用し、擬似触力覚提示と物理的触力覚提示を融合した視触力覚ディスプレイを構築することで、物理的な触力覚ディスプレイ単体だけでは提示が困難であった複雑多様な物体形状の提示を簡易に実現できるのではないかと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は Pseudo-Haptics を利用した視触力覚ディスプレイの実現である。本研究では、単純な触力覚を物理的に提示する触力覚提示部と、Pseudo-Haptics 効果を誘発する視覚提示部とを組み合わせることで、従来手法では困難であった複雑多様な形状の表面をなぞる感覚を簡易な機構で提示可能な視触力覚システムの構築を目的とする(図 1)。

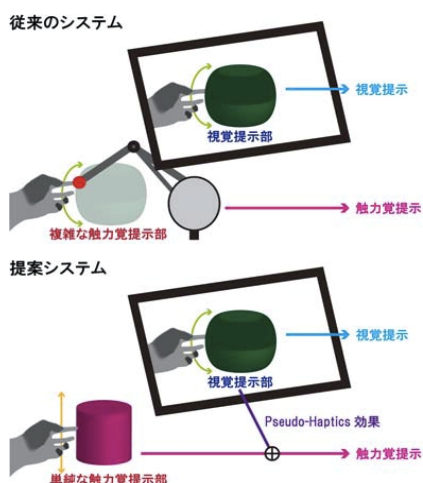


図 1 本研究のコンセプト

### (1) Pseudo-Haptics による引き込み可能範囲の評価

複雑な形状を含んだ様々な形状に対する触覚体験は、凹凸曲面、角面といった形状提示のための基本触覚要素を組み合わせる事で可能になると考えられる。

そのため本研究では、多様な形状を提示するために求められる基本触覚要素を定義し、それぞれの要素に対して Pseudo-Haptics 効果を用いた知覚操作手法を構築して被験者実験によりその効果を定量的に評価する。

また、物体との接触方法についても、指一本で触る、二本指で掴むといった様々な触り方が考えられるために、それぞれに対し Pseudo-Haptics 効果によって、物理的に提示される触力覚刺激に対し、知覚をどの程度変化させる事ができるかを定量化する。

### (2) インタラクティブな視触力覚ディスプレイ手法の確立

(1)にて検証した手法を統合し、Pseudo-Haptics の効果によって触っている物体の形

状に対する感覚をインタラクティブに変化させることができる手法を構築する。

### (3) 最終的なシステム構築と評価・最適化

(2)の設計に基づいて実装し、ディスプレイを構築する。また、実装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) Pseudo-Haptics による形状知覚操作手法の構築と評価

#### ①実験システム構築

本研究では、物理的触力覚提示部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ことで、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、形状知覚を操作できるのではないかと考えた。

まず単純な触れ方として物体の側面をなぞっている状況における視覚の空間変調の効果を調査し、そのような状況下において提案手法により形状知覚が操作可能なことを確認した。そして、この実験結果をもとに、視覚情報の空間変調による Pseudo-Haptics 効果を用いた形状知覚操作可能性について検証するための実験システムを構築した。

実装した実験システムは、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、被験者からは触っている物体と自身の手は直接見えないようになっている(図 2)。被験者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。

先の実験において、実際に物体をなぞっている自分の手の位置と映像で提示される手の位置のずれが大きいため違和感を覚えたとの意見が多く得られたのを受け、実装では、物理的触力覚提示部である物体を、被験者の視点からの位置関係をずらすことなくモニタを通して見て触れるよう、両者の位置を重ね合わせた。具体的には、モニタの裏側にアクリルミラーを配し、ユーザの視点とウェブカメラの位置関係が共役になるようにそれらの位置、角度を設定することにより、ディスプレイには光学的にほぼ整合性のとれた映像が映し出されるようにした。

なお、先の実験は物体側面を二次元的になぞる状況での検証だったため、三次元形状に対する視覚の空間変調の効果を検証する必要がある。そのため、モニタには 3D ディスプレイを採用し、提示映像においても両眼視差を実現するため、2つのウェブカメラを

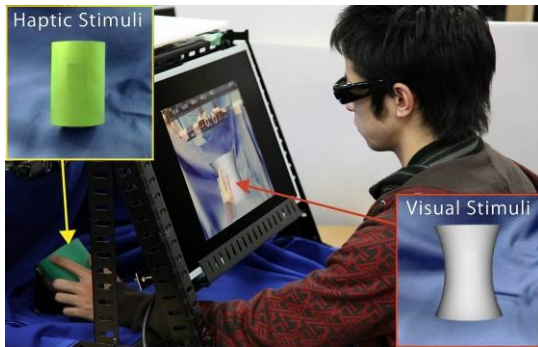


図2 ビデオシースルー型実験システム

65mm 間隔あけて配置した。その上で、本システムを実験に用いる際には、設定した位置に頭部があうように被験者を座らせた。

### ②複雑多様な形状を提示するための基本形状要素の定義

先に挙げた基礎実験により、二次元的な触り方に関して、曲面のような連続面をなぞる場合については、空間変調の効果によって曲率などの特性を変化して知覚させることが可能なこと、空間変調で連続面をなぞっている際の知覚を変化させるだけでは複数の面が組み合わさった不連続に変化する形状を知覚させることは困難なこと、連続面上に突起等を配置して微小な触覚刺激を提示し、物体をなぞっている際の触覚を断絶させることで、不連続に変化する形状を知覚させることも可能になることが示唆された。

これらの知見から、連続的な領域の凹凸感をはじめとする形状知覚を操作する(局所的提示)とともに、システムで提示する簡易な触覚刺激の配置位置、角度に対する知覚が連続領域の間の不連続な箇所と一致するように操作する(空間的提示)ことで表面が滑らかにつながっておらず不連続面を持つような複雑形状をも提示可能になると考えた。

局所的提示に関しては、可能な限り小さな物理的変形から多様な形状を触っている感覚を提示することが求められるが、本研究では物理的提示部として変形しない単純形状物体を提示することで、静的な形状から多様な形状を触っている感覚を提示可能か明らかにする。物理的提示形状として円筒形状、視覚提示形状として樽型、糸巻型といった一軸回転体を選択し、実際は円筒形状を触っている手の動きをあたかも視覚提示形状を触っているかのように変換して提示する(図3)。

また、基本形状の物体上での配置位置、角度に対する知覚を操作する空間的提示に関しては、板の上に複数の角形状が平行、等間隔に配置された物体を物理的提示として用意し、視覚刺激として物体上の角形状の位置や角度を様々に変化させた映像を提示する。実際に被験者の指が角形状を通過するタイ

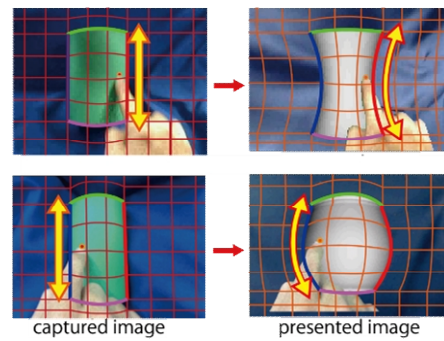


図3 手の動きの空間変調による三次元曲面形状知覚の操作

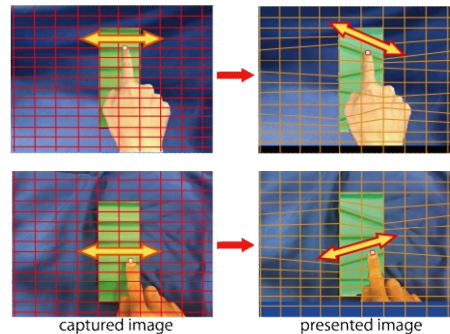


図4 対応する角面の配置にあうように手映像の動きを変調

ミングと、提示映像内で視覚提示形状上の角形状を指が通過するタイミングを揃えるように視覚提示する手映像の動きを変調する(図4)。

### ③多様な触り方に対応する手法の検討

前述した手の動きを変調して視覚提示する手法を用いることで、指一本でなぞるような物体との接触点が一点のみの接触方法においては整合性のとれた視覚刺激を生成することができるが、二本指でつまむ等接触点が複数になった際には指映像が物体から離れる等の空間的不整合が生じてしまうという問題がある。

そこで本研究では、母指と示指で物体をつかむことによる形状知覚に着目し、Image Deformation アルゴリズムである RigidMLS を応用して手形状を変形することで、取得した手の姿勢を自然な形に変調し、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した。本手法により実際には単一の大きさの物体を把持しているにもかかわらず、図5のように様々な大きさの物体を把持しているかのような視覚フィードバック映像を生成することが可能になる。

以上の手法を①で設計したシステムに組み込んで被験者実験を行い、被験者に形状変形しない物体を②については指一本、③については複数指で触らせつつ、モニタに表示する物体形状や手の動き、形を変化させて Pseudo-Haptics の効果を生起させることで、

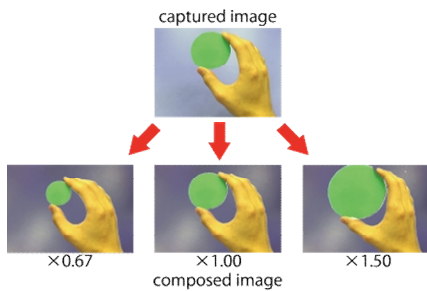


図5 視覚提示形状に合わせ手映像を変形

様々な形状の物体をなぞる体験が可能か検証を行う。

(2) インタラクティブな視触力覚ディスプレイ手法の確立

(1)にて構築した手法を統合し, Pseudo-Haptics の効果によって触っている物体の形状に対する感覚をインタラクティブに変化させるシステムを作成する. 具体的には, ユーザが触りたい形状をタッチパネルに描くことで, Pseudo-Haptics の効果を生起させるための空間歪みを自動的に生成するようなシステムを構築する.

視覚提示映像を合成する際には, (1)②, ③で構築したアルゴリズムを組み合わせ, 物体を触る手の動きの空間変調だけでなくその姿勢をも自然な形で変調し, なぞり, 掴み動作両方に対応可能なシステムを構築する.

(3) 最終的なシステム構築と評価・最適化

(2)の設計に基づいて実装し, ディスプレイを構築する. また, 実装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. その際, (1)②の実験同様, 触覚刺激として円筒形, 視覚刺激として凹凸曲面, 円錐台を用意し, 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掴ませる条件とで, 形状知覚操作の効果がどのように異なるのか検討する.

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) Pseudo-Haptics による引き込み可能範囲の評価

①局所的提示に対する知覚操作

連続的な領域の凹凸感をはじめとする三次元曲面形状に対する知覚操作可能性を検討するため, 前章の(1)②で述べたように, 視覚刺激として円筒形状を, 物理的刺激として円錐台等の一軸回転体を提示し, 被験者が触っていると知覚した形状がどのように変

化するかを検証した. 被験者が知覚した形状を得る方法に関しては, 実験中被験者が知覚した形状を絵に描かせ, その側面の曲率, 傾斜度を測定し, その値を視覚提示形状と比較することで Pseudo-Haptics の効果が生起された割合を算出した. 実験の結果として図6に Pseudo-Haptics の効果が生起され, 被験者が視覚提示形状を触っていると知覚した割合を示す. 図に示すように, 視覚提示する形状により若干の差は見られるものの, 7~8割の確率で視覚提示した形状を触っているとの回答が得られた.

また, 三次元曲面形状提示においても, 図6のような不連続面をもつ形状に対しては円筒形上に小突起を付けた物体を物理的な触覚刺激として用いることで, 形状知覚を操作可能であることが示された. この結果より, 角面を持つような不連続な三次元曲面形状に関しても, 小突起のような小さな触覚刺激を付加することで, 容易に形状提示できるということが示唆された.

視覚	1	2	3	4	5	6
触覚	95.0	75.0	80.0	90.0	60.0	
						80.0

図6 Pseudo-Haptics 効果が生起され, 形状知覚が変化した割合(%)

②空間的提示に対する知覚操作

実際には板上に平行, 等間隔に配置されている角形状に触れる際の位置や角度に関する知覚を, 本手法によってどの程度操作することが可能か検証を行った. 被験者が知覚した形状を得る方法に関しては, 角形状の配置位置や角度が自由に操作可能な回答用のデバイスを用意し, モニタ裏にある物体とこのデバイスとを触り比べ, 被験者が触っていると感じた形状をデバイスによって再現させることで, 物理的等価点を得る手法を採用した. その結果, 位置に関しては実際に触っている角間距離と映像内の角間距離の比

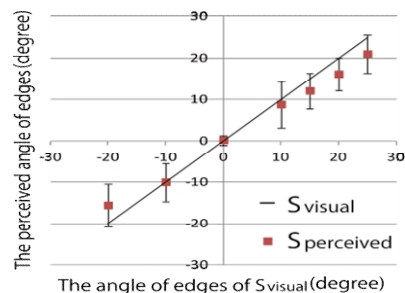


図7 物理的提示形状として平行(0度)な角面を提示した際の視覚提示角度(Svisual)と知覚角度(Sperceived)の関係

が0.7~1.3, 角度に関しては実際に触っている角と映像内の角の角度差が±30度 に収まっている場合, 視覚提示した形状を強く知覚することが示された(図7).

以上の実験により, 指一本で物体をなぞる場合に関して, 本手法を用いることで, Pseudo-Haptics の効果が上手く作用し, 形状提示に有用であることが示された.

### ③複数指での掴み動作における形状知覚操作

前章の(1)③にて構築したアルゴリズムを用いて, 多指で挟んでいる物体の大きさに対する知覚を操作可能か検討し, 変形許容量を明らかにした.

被験者には, 実際には形状変形しない大きさが同一の円盤を掴ませつつ, 視覚刺激として様々に大きさが変化した円盤を提示し, 本アルゴリズムを利用して取得した手領域を変形して視覚提示物体を握っているかのような画像を生成した.

実験の結果, 実物体の直径( $D_{\text{physical}}$ )に対し, 視覚提示する物体の大きさ( $D_{\text{visual}}$ )が60%~135%に収まる範囲であれば, 掴んでいる物体の大きさに対する知覚を操作できることが明らかになった(図8).

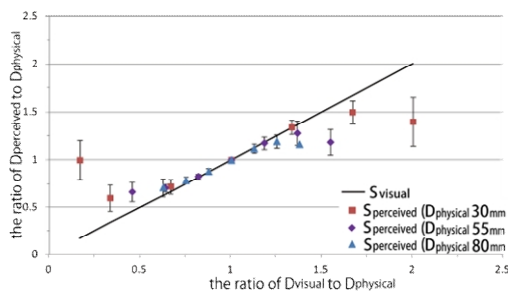


図8 実物体の直径として30, 55, 80mmを提示した際の視覚提示形状と知覚形状の直径比

### (2)インタラクティブな形状提示ディスプレイの構築・評価

上記の実験にて明らかにした, 構築したリアルタイム手形状変形フィードバックや手映像の動きの空間変調が, 形状知覚操作に有用であるという知見を生かし, インタラクティブ形状提示ディスプレイのプロトタイプとして”MagicPot”を構築した.

このシステムでは, ユーザは物理的に静的な物体に触っているにもかかわらず, あたかも様々な形状の物体に触っているかのような体験が可能である. ユーザは各自が触りたい形状の輪郭をモニタ上に描く事で, 一軸回転体CGを作成する(図9). システムは描かれた輪郭線をもとに, あたかもCG形状を触っているかのように手画像を変形・移動するための空間変調量を計算し, その空間歪みをフィードバック映像に適応させることで, ユー

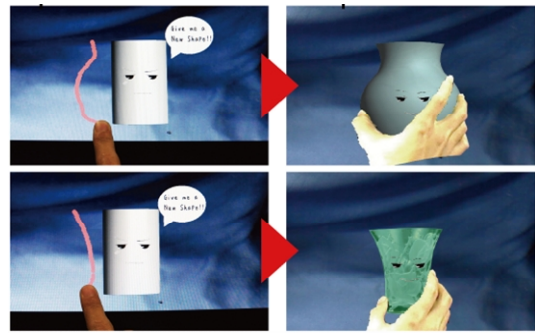


図9 ユーザの描いた形状を触る体験が可能

ザに対し, 彼らが描いた輪郭線に合わせて触っている物体形状がインタラクティブに変化しているかのような印象を与えることができる. 本システムをSIGGRAPHやCEATECにて展示し, のべ3000人以上に体験させた.

また, 本システムにおける形状知覚操作の引き込み可能範囲や, 視覚フィードバックにより受ける違和感を, 被験者実験を行い評価した. 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10中黒)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掴ませる条件(図10中白)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. その結果, 視覚提示する形状によっては視覚フィードバックにより受ける違和感が複数指で触る条件のほうが強いという結果が得られたものの, それ以外の要素については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.

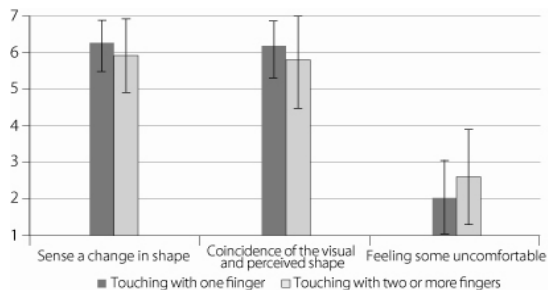


図10 本手法により知覚形状が変化した(左), 視覚形状を知覚した(中), 違和感を覚えた(右)割合(1~7の7段階評価)

### 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2件)

① 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 手の動きの空間変調による形状知覚操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol. 17, No. 4, 2012, pp. 457-468

② 鳴海拓志, 伴祐樹, 藤井達也, 櫻井翔, 井村純, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援, 査読有, Vol. 17, No. 4, 2012,

pp. 333-342

[学会発表] (計 15 件)

① Yuki Ban, Takuji Narumi, Tatsuya Fujii, Sho Sakurai, Jun Imura, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Augmented Endurance: Controlling Fatigue while Handling Objects by Affecting Weight Perception using Augmented Reality, CHI2013, 2013年4月27日-5月2日, Paris, France

② Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Modifying an Identified Position of Edged Shape Using Pseudo-Haptic Effect, The 18th ACM symposium on virtual reality software and technology (VRST2012), 2012年12月10日-12日, Toronto, Canada

③ Yuki Ban Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Modifying an Identified Size of Objects Handled with Two Fingers Using Pseudo-Haptic Effects, Joint Virtual Reality Conference of ICAT-EGBE-EuroVR 2012, 2012年10月17日-19日, Madrid, Spain

④ 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による Pseudo-haptics 効果を用いた形状知覚操作, 日本バーチャルリアリティ学会第17回大会, 2012年9月12日-14日, 慶應義塾大学(神奈川県)

⑤ 鳴海拓志, 錯覚を利用した五感インターフェース, 第五回錯覚ワークショップ(招待講演), 2012年9月18日, 明治大学(東京)

⑥ Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Magic Pot: Interactive Metamorphosis of the Perceived Shape, SHIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, 2012年8月5日-9日, L.A. Convention Center, America

⑦ Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Modifying an Identified Angle of Edged Shapes Using Pseudo-Haptic Effects, EuroHaptics 2012, 2012年6月12日-15日, Tampere, Finland

⑧ 鳴海拓志, 五感ディスプレイと感覚間相互作用, 超臨場感ディスプレイフォーラム(招待講演), 2012年11月6日, 工学院大学(東京)

⑨ 鳴海拓志, 錯覚を利用したリアリティの拡張, VRと超臨場感研究会(招待講演), 2012年12月28日, 秋葉原UDX(東京)

⑩ 鳴海拓志, 錯覚応用インタフェースと五感情報通信, 電気情報通信学会 コミュニケーションクオリティ(CQ)研究会(招待講演), 2013年3月11日-12日

⑪ Yuki Ban Takashi Kajinami, Takuji

Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Modifying an Identified Curved Surface Shape Using Pseudo-Haptic Effect, The 2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS2012), 2012年3月4日-7日, Vancouver, Canada

⑫ Yuki Ban Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Basic study on the visual-haptic system to give a sense of shape using pseudo-haptic effects, 12th International Multisensory Research Forum(IMRF), 2012年10月17日-20日, Fukuoka, Japan

⑬ Yuki Ban Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, Meta-ryoshka: haptic illusion on perceiving shape, SIGGRAPH 2011 Posters, 2011年8月7日-11日, Vancouver, Canada

⑭ 伴祐樹, 梶波崇, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 視触覚融合を利用した凹凸の配置に関する知覚操作, 日本バーチャルリアリティ学会第16回大会, 2011年9月20日-22日, 公立ほこだて未来大学(北海道)

⑮ 伴祐樹, 梶波崇, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, Pseudo-Hapticsを利用した三次元曲面の形状知覚操作に関する基礎的検討, マルチメディア・仮想環境基礎研究会(MVE2011-27), 2011年6月29日, 東京大学(東京)

[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]

Magic Pot

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

## 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

西村 邦裕 (NISHIMURA KUNIHIRO)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・連携  
研究員

研究者番号: 70451797

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

### (4) 研究協力者

伴祐樹 (BAN YUKI) 東京大学大学院生