

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13855

研究課題名(和文) 触錯覚とPseudo-Hapticsによる仮想現実感の制御に関する研究

研究課題名(英文) A study of controlling virtual reality using tactile illusion and pseudo-haptics

研究代表者

大岡 昌博(OHKA, Masahiro)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50233044

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：Pseudo-Hapticsやベルベットハンドイリュージョン(VHI)を活用した新しいハプティックディスプレイを開発する上で必要な科学的知見を得る。このため、種々の触覚マウスを開発するとともに、BMI技術を活用してVR時の脳の反応の調査も進めた。その結果、1)Pseudo-Hapticによる硬さの呈示では、押しつけ圧1～2Nに統制しないと正しい呈示ができないことがわかった。2)仮想物体の探索や輪郭をなぞる実験では、脳波の波が探索時や外形操作時に減少する現象が見られた。3)凹凸のパターンを呈示する触覚ディスプレイによってもVHIを活用すれば滑らかな面の表現が可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we are attempting to obtain scientific findings, which are available for new haptic devices using pseudo-haptics and velvet hand illusion (VHI). Due to this, we will develop three haptic devices to investigate brain activity invoked by virtual reality (VR) using brain machine interfaces (BMI) such as ElectroEncephaloGram(EEG), Near InfraRed Spectroscopy (NIRS), and Hemoencephalography (HEG). Our achievements are summarized as follows: 1) compressible force for the tactile pad of the manipulator typed haptic device should be controlled within the range between 1 and 2 N to obtain virtual hardness introduced by pseudo-haptics; 2) the alpha-wave amplitude decreased when searching and extract contour of virtual object through the tactile mouse for fingertips; 3) virtual smooth surface presentation is possible using VHI even if the tactile mouse presenting convex-and-concave pattern is applied as the haptic device.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：触覚 錯覚 仮想現実 脳計測 呈示装置

1. 研究開始当初の背景

バーチャルリアリティ (VR) には、ハプティックディスプレイが必要とされているが視覚ディスプレイより実現の難易度は高い。これは、触覚で生じる接触状態の再現には高度な機構が求められているからである。これに対して、従来のハプティックディスプレイは、ディスプレイと指との間の運動を許さない構造であることが多く、実際の手触りとの差が大きく違和感が強い。

一方、触覚の錯覚 (触錯覚) として、コンピュータリユージュンやベルベットハンドリユージュン (VHI) など多くのものがある。前者は、櫛の歯先に指をあて櫛の歯の根元をボールペンの先で擦ると、歯の先が飛び出して感じる錯覚であり、後者は、鋼線の網を両手で挟んで両手の間で相対運動なしで手を動かすと、なめらかな面を感じる現象である。特に後者は、存在しない面を脳で感じることを意味しており脳科学においてその解明は重要な意味をもつ。さらに、表示された仮想物体を見ながらハプティックディスプレイを操作するとき、見た目の運動や変形を遅くあるいは誇張するなどすると重く感じたり柔らかく感じたりする Pseudo-Haptics 現象が生じる (図 1)。

以上の錯覚現象を有効に活用すれば、従来の VR より品位の高い感覚呈示を可能とする技術開発が期待される。特に、VR では呈示された刺激から脳が対象を本物と思わせることを目指しているために、このような錯覚の活用は効果的である。

2. 研究の目的

本研究では、触錯覚と Pseudo-Haptics の錯覚現象を活用することによって、今までの VR とはレベルの異なる現実感を演出することと、表面状態の認識機構の解明の両方を目指している。触錯覚現象と Pseudo-Haptics の仕組みを明らかにしつつ、装置開発を進める。逆に、開発された装置を使用することによって、表面認識基盤の新事実を調べることも狙っている。以下に、本研究で取り組む三つの課題を要約する：

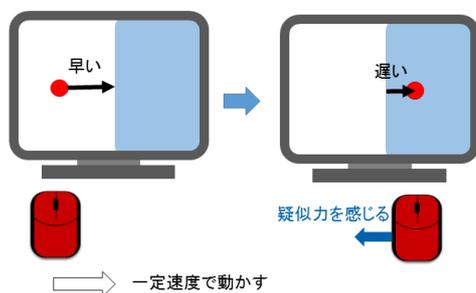


図 1 Pseudo-Haptics 現象

(1) 視覚、力覚、触覚のマルチモーダルな感

覚の呈示を実現する基礎研究用にマウス型ハプティックディスプレイを開発する。

(2) 脳波 (ElectroEncephaloGram; EEG)、近赤外線分光法 (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) および HemoEncephaloGraphy (HEG) などの Brain Machine Interface (BMI) を用いて、触錯覚現象に関連する脳の賦活状態を調査する。

(3) 触錯覚と Pseudo-Haptics 現象を調査して、所定の錯覚量を生じさせるようにハプティックディスプレイと映像を制御する技術を確立する。

3. 研究の方法

3.1 各種ハプティックディスプレイ

マニピュレータ型

マニピュレータ型 (図 2) とは、水平リンク構造で 6 自由度の呈示をするために、マウスを模したハンドル部の呈示面の下には圧力センサが 3 つ設置している。

すなわち、マニピュレータには、ショルダー、エルボ、手首の三つの回転自由度に体操して DC モータが設置されているために、x-y の二自由度に加えて yaw 角の制御ができる。また、マウス部の触覚呈示面に加える垂直力、ピッチとロールモーメントを検出できるので、IBM 社のシンクパッドのポインティングデバイスのように、z 方向の移動量、pitch、roll の角度情報を入力することができる。PHANToM とは異なり手を浮かして動かす必要がないので、疲れない利点がある。

また、触覚呈示面には 4×12 触知ピンが設置され、触知ピンの上下動は 1mm 程度のストロークであり分解能は 8 ビットである。

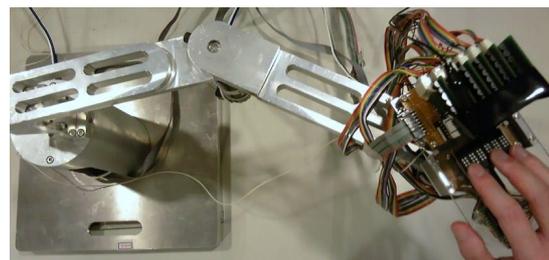


図 2 マニピュレータ型
指先呈示型触覚マウス

指先型呈示型触覚マウス (図 3) では、マニピュレータ型に比べて 2.6 倍の面積の呈示面を備えている。このため、この呈示面に人差指、中指、薬指の三本の指を楽に載せることができるので、仮想表面を自然な形式で操作できる。一方、前述のマニピュレータ型とは異なって、触陳の上下動の階調制御はできず、ピンが出るかでないかの二値の制御である。上述の触覚呈示は、点字セル (SC9, KGS 社) のパイモルフ PZT アクチュエータ・アレイを採用している。

この指先呈示型については、BMI を用いて触覚マウス操作時の脳の賦活状態の調査す

るための装置として使用することとした。また、前述のマニピュレータ型で開発した Pseudo-Haptics を搭載して小型でありながら力呈示も可能とするシステムとして活用することとした。



図3 指先呈示型触覚マウス

掌呈示型触覚マウス

上で述べたマニピュレータ型と指先呈示型触覚マウスを使用して VR の呈示実験を行った結果、現在の点字ディスプレイを VR 研究に適用するには、ハードウェアとソフトウェアの両面に課題があることがわかった。まず前者の問題として、アクチュエータ技術の限界からピン間隔を 2.4mm 以下に詰めることができないことが挙げられる。したがって、受容器の分布間隔が 1mm 弱のヒトの指先触覚特性を活かした実験を行うことはほぼ不可能である。しかしながら、掌については受容器間隔が約 5mm であるため、掌の受容器分布密度を活かした実験を行うことは可能である。指先呈示型ではできなかった VHI の呈示も可能である可能性がある。

そこで、現状のアクチュエータ技術で実現可能な掌呈示型触覚マウスを開発した。本触覚マウスは、点字ディスプレイ SC10 (KGS 社、ピン数 384 本、縦 32 本 (85mm) × 横 12 本 (30mm)) と光学マウスを固定して製作したものである (図 4)。触覚の VR 実験を可能にするために、点字ディスプレイ上のピンによる触覚情報 (表示パターン) を動的に変更してユーザーに呈示する。

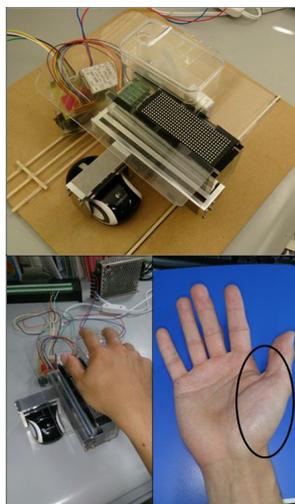


図4 掌呈示型触覚マウス

3.2 ハプティックディスプレイ操作時の脳賦活状態の調査

振動ジャイロセンサ搭載触覚マウスを用い、仮想の微小物体をスクリーンの中から探すタスクを利用して、ヒトの集中度を評価する。この評価に使用する BMI として、脳波 (Electroencephalogram; EEG)、近赤外線分光法 (Near InfraRed Spectroscopy; NIRS) および Hemoencephalography (HEG) を用いる。これらの三種類の BMI から得られた結果を比較して、集中度を評価する上で効果的な方法を探求する。

EEG

脳の神経細胞の活動によって生じる、頭部の皮膚表面に現れた電位の変化を高精度の電圧計で計測する方法である。得られた波形の内、各周波数領域によって、 α および β 波などに分類され、それぞれ深い眠り、睡眠導入時、リラックスおよび集中しているときなどに誘発されるとされている。

NIRS

生体透過性が高い近赤外線を頭部に照射して、吸収スペクトルの変化から脳血流中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化を算出する方法である。この方法では、脳の活動が活発であるほど酸素化ヘモグロビンが多くなると仮定して賦活状態を推定する。

HEG

赤色光が脱酸素化ヘモグロビンに吸収されやすいことを応用した方法で、大脳皮質から反射してくる赤色光と赤外線量を計測して、 $HEG \text{ Ratio} = (\text{赤外光電圧}) / (\text{近赤外光電圧})$ で血液中に含まれる酸素化ヘモグロビンが含まれる割合を推定する方法である。

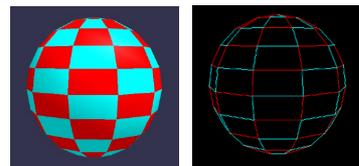


図5 仮想球とバネ・ダンパモデル

3.3 触錯覚の制御

本研究で開発した三種類のハプティックディスプレイを用いて以下の三つの触錯覚、および触覚の呈示実験を行った。

Pseudo-Haptics と触覚呈示の融合

本研究では、バネ・質点・ダンパ系 (mass-spring-damper model) を想定し、変位に伴って変形する仮想球を作成した。本モデルで使用する仮想球を図 5 に示す。本モデル化により、仮想球は比較的簡単な構造で構成されるので、処理時間を軽減することが可能である。仮想球を構成する質点は、隣接する質点とバネおよびダンパによって結合されている。仮想呈示面と質点間の接触によって質点の移動が生じた際に、質点間のバネが自然

長から変化する．そこで生じたバネの復元力およびダンパによる減衰力が質点に加わる．以上のバネ・質点・ダンパ系の運動を運動方程式で表すと、質点の加速度を含む微分方程式となる．この微分方程式にオイラー法の数値解法を適用することによって質点の位置を算出する．

走査による物体の輪郭抽出

この実験には、前述の指先呈示型触覚マウスを用いた．このマウスでは、マウスポインタの座標値が USB 経由でコンピュータに送られ、振動ジャイロセンサからサンプリング周波数 40Hz でデータを取得する．またマウスポインタは呈示面に対応した形に変えており、仮想テクスチャとマウスポインタの位置、マウスの回転角度の関係から接触判定を行い、呈示すべき圧覚分布に従い触知ピンを上下させる．これにより、操作者が触知ピン・アレイ部の上に指を接触させた状態でマウスを動かせば仮想テクスチャのエッジ部を感じ取ることが出来る．また、圧覚呈示部の直下には圧力センサが設置され、操作者が呈示面を押し込む力を評価できる．以下の仮想物体探索タスクでは、この押し圧評価機能を使用している．

被験者は、このマウスを使用して、スクリーンの中に呈示された矩形物体の輪郭探索を行う．視覚情報のみにより行う実験と触覚と視覚を両方用いて行う場合を比較して、触覚による負荷低減を BMI により評価する．VHI 感の制御

前述のように VHI とは、2 本の鋼線による平行線が掌を前後すると、掌にベルベット生地のような柔らかい感覚が誘発されるというものである．VHI の研究については誘発される条件やその機構に関しては多くの事が明らかになっている．すなわち、圧力を受けた状態で掌を線状態が通過するとき生じる．圧力が印加されていない状態では生じない．また、ストロークと線間距離をそれぞれ r と D とするとき、VHI の強さは r/D が 1 よりやや大きい条件で最大となる．

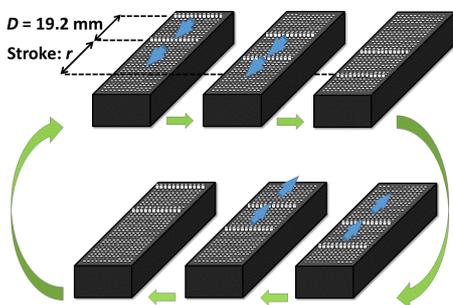


図 6 触覚ディスプレイによる VHI 呈示法

掌呈示型触覚マウスを操作するとき、触覚ディスプレイに掌を置いた状態で操作するために掌には必然的に圧力が生じる．触知ピンのパターンとして二本線を発生させて、そ

れを運動させれば、VHI が生じる可能性がある．掌呈示型触覚マウスで VHI が呈示できれば、触覚ディスプレイは様々な凹凸パターンを呈示できるために、二本鋼線に比べて様々な VR の演出が期待できる．

そこで本研究では、掌呈示型触覚マウスを用いて VHI を呈示するために図 6 のように二本線を呈示して、往復運動させる．二本線の間隔とストロークを変化させて、どの条件下で最も掌の VHI 強度を向上させることができるのか調査する．そのため、心理物理実験の Thurstone の一対比較法を用いて VHI 強度を評価する．

4. 研究成果

4.1 Pseudo-Haptics と触覚呈示の融合効果

本実験では、触知ピンの最大ストローク s [mm] と、指先で加えた力に対する VR 上に投影された触覚ディスプレイの移動距離を表す比例定数 c [mm/N] をそれぞれ変化させて、作成した仮想球(図 5)に対する硬さ感覚への影響を調査した．このため、表 1 に示すように最大ストローク s と比例定数 c の大きさが異なる 9 種類の仮想球を準備した．

表 1 仮想試料とパラメータの関係

試料名	最大ストローク s [mm]	疑似力覚の定数 c [mm/N]
a ₁	1	1
a ₂	1	4
a ₃	1	7
a ₄	0.5	1
a ₅	0.5	4
a ₆	0.5	7
a ₇	0	1
a ₈	0	4
a ₉	0	7

表 2 5 件法と評点の関係

評価結果	評点
a _i が a _j に比べて非常に硬いと知覚したとき	2
a _i が a _j に比べて硬いと知覚したとき	1
a _i と a _j が同じ硬さと知覚したとき	0
a _i が a _j に比べて柔らかいと知覚したとき	-1
a _i が a _j に比べて非常に柔らかいと知覚したとき	-2

心理物理実験法として Scheffé の一対比較法(浦の変法)⁽¹³⁾を採用して各被験者に対して以下の手順で実験を行った．

手順 1 9 種類の仮想球の中から一対(a_i, a_j) がランダムに選ばれる．

手順 2 被験者は試料 a_i と試料 a_j に対して硬さを調査する．

手順 3 被験者は手順 2 の結果を表 2 に示す 5 件法に従って -2 ~ +2 の 5 段階で評価する．

手順 4 被験者は、比較順序を考慮したすべ

での組み合わせに対して手順 1-3 を行う。
実験結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 被験者全員は、比例定数 c が大きいほど柔らかく感じる。
- 2) 押しつけ圧が 1 N 以下では、ピンストロークが大きいほど硬く感じる。
- 3) 1~2 N では、触知ピンの最大スロークが大きくなるにつれて、柔らかく感じる。

以上の結果は、操作者が仮想物体の表面に軽く触れたときは、視覚的な物体形状の変化が小さいため、触覚刺激である触知ピン最大スロークが硬さ感覚に大きく影響して得られたと考えられる。また、仮想物体が変形するくらい強めに押し込んだときは、表面に軽く触れたときに比べて視覚的な物体形状の変化が大きいため、Pseudo-Haptics 触覚効果を表示する比例定数が硬さ感覚に大きく影響したと考えられる。このように、触覚ディスプレイと Pseudo-Haptics の融合によって硬さ感覚の呈示が可能である。

4.2 BMI によるハプティックデバイス操作時の集中力の評価

本研究では、錯覚現象の神経基盤を明らかにするための第一歩として、心理物理実験の信頼性を向上させるために被験者の心理物理実験における集中度を評価する手法の開発を目指す。そのために、心理物理実験中の被験者の脳波と脳血流を測定し、脳機能変化の分析を行う。

本研究では被験者への拘束が緩く、脳波の周波数解析と前頭葉血流量の変化計測を同時に行えるバイタルモニター Procomp (Thought Technology, Ltd.) および、専用の計測ソフト (BioGraph Infiniti) を用いた。バイタルモニター Procomp 本体は、脳波と脳血流のデータは毎秒 256 個サンプリングできる。

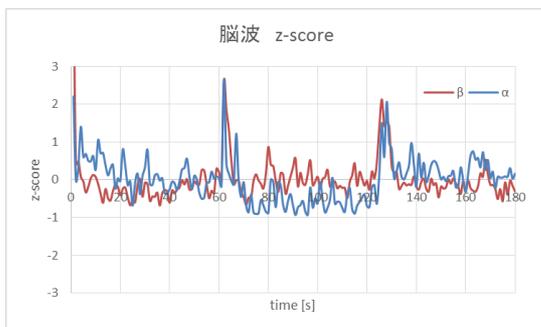


図 7 輪郭追従時の脳波データ

脳波測定用の専用センサは、1つのカップ型の電極と2つのイヤークリップ型の電極から構成されている。3つの電極はそれぞれ青色のケーブルが陽性の信号電極、黄色のケーブルが陰性のリファレンス、残りがグラウンドとなっていて、カップ型の信号電極は左額 Fp1(10-20 法による)に配置し、イヤークリップ型のリファレンスは左耳 A1 に配置し、反対の耳 A2 にグラウンドを配置して2点の

電位差を測定する。

5人の被験者の結果を重ね合わせて議論できる。そこで、5人のデータを z-score で正規化してすべての実験結果の平均値を求めた。NIRS と HEG の結果からは脳血流の変化については、作業中(60~120 秒間)と作業終了後に微小な NIRS の近赤外光電圧の増加と HEG rate の減少が見られるものの全体を通してほとんど変化が見られなかった。仮想物体探索実験でも述べたように、設定した認識作業が計算問題の実行とは異なり脳それほど使わなくとも実行可能なものであるためと考えられる。

一方、脳波の特徴的な変化については、作業中の波の減少が見られる(図7)。このことは波区分における心理状態はリラックスしている時に相当することから探索作業中にストレス・緊張を感じていると考えられる。また作業開始直後と作業終了後に波と波の一時的な急増が見られた。これは作業開始直後と作業終了直後という時間帯とその後の増加が見られないことから、輪郭追従動作開始と動作終了時の急停止による筋電の影響を受けたノイズだと考えられる。

4.3 ハプティックデバイスによる VHI の制御

まず、(a)二本鋼線、(b)金網、(c)ベルベット生地、(d)触覚マウスを用いて VHI 感の強さをマグニチュード推定法により評価した。1試行で4種類の試料を順に呈示して被験者はその試料が示す表面の滑らかさ・柔らかさの程度を評価する。1回の試行で最初に呈示されたものの強さを1として、残りの試料を評価する。被験者は、程度が10倍と判定したならば10、半分に低下したならば0.5のように判定値を口頭で評価結果を述べる。順序を考慮することになるので、 $4 \times 3 \times 2 \times 1 = 24$ 通りの組み合わせがあるので、一人の被験者につき24試行実施する。一つの試料に付24回判定を行うので、10人全体で240回判定することになる。

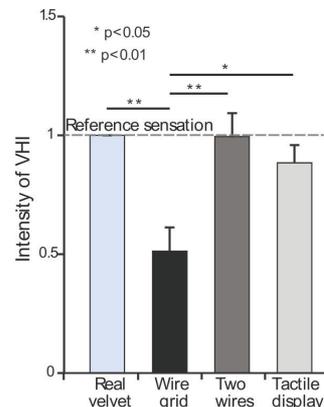


図 8 マグニチュード推定の結果

各試行で得られた結果から、本物のベルベット生地の評価値を1として正規化して全体の平均値を求めた結果を図8に示す。図8からわかるように、二本鋼線の VHI 感の本物の

ベルベット生地の滑らかさ・柔らかさと同程度であることがわかる。

次に、この結果に SPSS version 16.0. A one-way ANOVA で検定をかけたところ、図 8 に示す関係に有意な差が認められた。二本鋼線と触覚マウスの間には有意な差は確認されていない。

上述の実験結果から触覚マウスによっても二本鋼線と同程度の VHI が呈示できることが明らかになったので、次の段階として、その可制御性が問題となる。そこで、マグニチュード推定より大きさの評価がより精密にできる Thurstone の一対比較法を採用する。

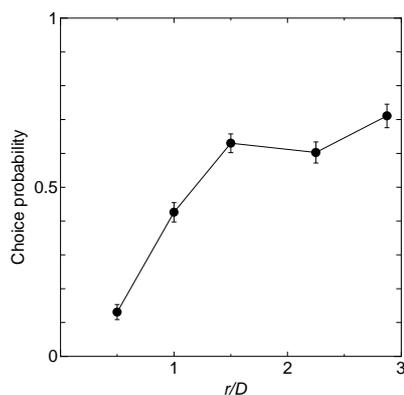


図 9 $r/D = 0 \sim 2.9$ における掌型触覚マウスが呈示する VHI の強さ

実験の結果を図 9 に示す。選択確率(VHI 感の強さ)は、 $r/D = 0 \sim 1.5$ の範囲でほぼ線形に増加している。

触覚マウスは、ピンの凹凸パターンで種々の表面状態を表現するものである。それをもって VHI のようななめらかさの呈示はその対極をなすものである。それが可能であることを示した点で触覚マウスが表現できる VR の種類を飛躍的に示した点で意味がある。研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 二本鋼線、金網、ベルベット生地、掌呈示型触覚マウスの 4 つの試料を呈示して VHI の程度を評価した結果、掌呈示型触覚マウスにより、二本鋼線並みの VHI が呈示できることを明らかにした。
- 2) 掌呈示型触覚マウスにおいて、線間距離を種々変更して Thurstone の一対比較法で評価した結果 $r/D = 1.6 \sim 6.7$ の範囲では $r/D = 1.6$ において最大の VHI を示すことを明らかにした。
- 3) 線の移動距離 r を変更して Thurstone の一対比較法で評価した結果 $r/D = 0 \sim 1.5$ の範囲で直線的に VHI が増加し、1.5 以上でほぼ一定値をとることがわかった。

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 2 件)

Rajaei Nader, Hironaga Nomura, Shojiro

Matsushita, Hiraku Komura, Masahiro Ohka, and Tetsu Miyaoka, Tactile Mouse Generating Velvet Hand Illusion to the Human Hand, International Journal of Advanced Robotic Systems, 13, 2016, pp. 1-10, 査読有。

Mohammad Azzeim Bin Mat Jusoh, Masahiro Ohka, and Tetsu Miyaoka, Comparison of Tactile Discriminations to Verify the Undetectable Region of SUS Foil Thickness, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC), 8-7, 2016, pp. 83-86, 査読有。

〔学会発表〕(計 2 件)

加藤崇平・大岡昌博, 脳波と脳血流による触覚の心理物理実験中の集中度の評価, 日本機械学会年次大会, 2015 年 9 月 16 日, 北海道大学。

Rajaei Nader, Hironaga Nomura, Shojiro Matsushita, Hiraku Komura, Masahiro Ohka, and Tetsu Miyaoka, Using Psychophysical Experiment to Investigate Velvet Hand Illusion (VHI) Characteristics for New Tactile Display, 2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, Dec. 19th, 2016, Hosei University.

〔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〕

<http://www.ohka.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~ohka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大岡 昌博 (OHKA, Masahiro)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 50233044

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

宮岡 徹 (MIYAOKA, Tetsu)

静岡理工科大学・総合情報学部・教授
研究者番号: 00111815

北田 亮 (KITADA, Ryo)

生理学研究所・大脳皮質機能研究系・助教
研究者番号: 50526027

齋藤洋典 (SAITO, Hirofumi)

名古屋大学・情報科学研究科

研究者番号: 40178504