

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26282164

研究課題名(和文) 運動錯覚とラバーハンドイリュージョンの統合効果の解明と制御に関する研究

研究課題名(英文) A Study to Elucidate Control Method of Illusionary Hand Movement Based on Fusion Effects of Kinesthetic and Rubber-Hand Illusions

研究代表者

大岡 昌博 (Ohka, Masahiro)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：50233044

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：リハビリシステムの実現のために、運動錯覚(Kinesthetic Illusion; KI)とラバーハンドイリュージョン(Rubber Hand Illusion; RHI)の統合効果を明らかにする。KIとは、皮膚の上から腱を振動刺激することで四肢の動きを感じる錯覚現象のことである。RHIとは、映像を被験者の腕に重ねる視覚刺激を与えて腕の運動感覚を誘発させる錯覚現象である。本研究では、KIとRHIの同時呈示の効果を明らかにするために、KIとRHIの同時誘発を可能とする実験装置を開発した。また、その装置を用いて一連の心理物理実験を実施して、その結果RHIによりKIが強化される効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a new rehabilitation system, we elucidate mechanism and controllability of fusion effect of kinesthetic illusion (KI) and rubber-hand illusion (RHI). The former KI is an illusion of limb movement caused by vibration stimulus applied for muscle spindles; the latter RHI is an illusion of limb movement caused by visual stimulus of hand movement movie overlapped on human subject's hand. In this study, we developed a new equipment generation both of KI and RHI to elucidate the fusion effect. Furthermore, we performed a series of psychophysical experiments to observe that the effect of KI was reinforced by RHI.

研究分野：ロボット・メカトロニクス, ヒューマンインタフェース

キーワード：仮想現実感 運動錯覚 ラバーハンドイリュージョン 統合効果 感覚の制御

1. 研究開始当初の背景

脳血管疾患の総患者数は118万人(2014年)であり、この内、約6割に後遺症が残る。それらの患者の麻痺した体の機能回復のため、特に在宅でのリハビリテーションの需要が増加している。このような背景から、単純、小型、安価という3つの条件を備えたリハビリテーションシステムに関心が集まっている。これらの3つの条件を満たすシステムの実現のために、本研究では体に負担のかからない錯覚現象に着目した。

数多くの錯覚現象の中から、運動錯覚現象 (Kinesthetic Illusion; KI) とラバーハンドイリュージョン (Rubber Hand Illusion; RHI) を選定する。前者の KI とは、皮膚の上から腱を振動刺激することで、実際には動いていないにも関わらず、動いているように感じる錯覚現象のことである。後者の RHI とは、映像や模型などを被験者の腕に重ねることで視覚刺激を与えて誘発させる錯覚現象のことである。

本研究では、手首の曲がる映像を視覚刺激とし RHI を誘発させると同時に、KI を生じさせると KI を増強するという予測に基づいている。より KI が強化されれば、リハビリテーションに適用した場合により顕著な効果が期待される。

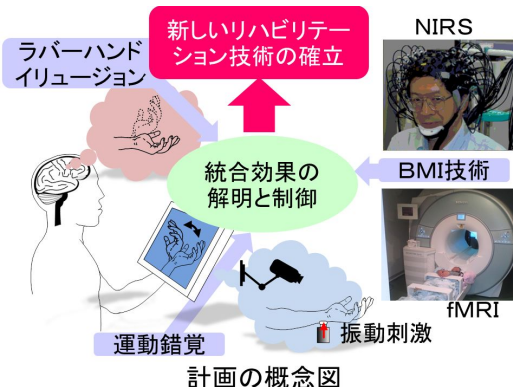


図1 KI・RHI 同時誘発によるリハビリテーションの計画の概念図

KI と RHI の 2 つの錯覚現象をリハビリテーションシステムに利用する上で、物理的な刺激条件と錯覚の心理的強度の関係の解明が不可欠であるが、現状ではそのための実験的知見の蓄積が不十分である。本研究では、これら 2 種類の錯覚を利用したリハビリテーションシステムの開発を目的として、意図した錯覚現象を工学的に設計・実現できるように錯覚現象の制御を目指し、心理物理学実験によって刺激条件と錯覚の心理的強度の関係を明らかにする (図 1)。

2. 研究の目的

本研究で計画されている KI と RHI を同時に活用したリハビリテーションシステムを実現するためには、視覚刺激と振動刺激を同時に発生させて被験者に呈示するシステムの製作、錯覚を効果的に生じる刺激条件の確立、錯覚の生成メカニズムを明確にするなどの課題がある。特に、最後の課題のために、脳内情報処理の仕組みの解明が求められ、そのためには心理物理実験やブレイン・マシン・インタフェース (BMI) 技術を駆使して錯覚に対する脳の賦活状態と主観的な心理状態の三者の関係を明らかにしていく必要がある。本研究の目的を以下にまとめる。

- ・前年度までに開発した KI 生成のための振動刺激発生装置に、新しく手運動の動画を液晶ディスプレイに撮影する装置を組み合わせ、上述の視覚刺激と振動刺激を同時に発生させるシステムの設計製作する。
- ・心理物理実験により、KI を生じる条件、例えば、振動数、振幅、接触子の形状・大きさ、刺激を加える場所などについて明確にする。また、KI と RHI を同時に誘発させた時の効果についても調査する。
- ・機能的核磁気共鳴イメージング (fMRI) と近赤外線分光法 (NIRS) を活用して脳の賦活状態を調べることによって、外部刺激の条件と錯覚の強さの関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) KI と RHI 同時呈示システムの開発

KI 誘発部と左手 KI 再現部

KI 誘発部の写真を図 2 に示す。KI を誘発させるための刺激部位として、撓側手根屈筋 (Flexor Carpi Radialis muscle; FCR) の腱を選定した。これは、手関節の浅層に存在し、皮膚上から容易に観察可能であるため、運動錯覚を誘発するとき、FCR の腱を発見・刺激しやすいという利点があるからである。



図2 KI 誘発部の写真

左手 KI 再現部では、右手手関節において誘発される運動錯覚を左手で再現が行われる (図 3)。左手部の運動錯覚量計測部は、手関節可動部にロータリ・エンコーダ (Maxon motor HED-5540) をとりつけ、屈曲および伸展運動の関節角度を測定できる。ロータリ・エンコーダの値はマイクロコンピュータで

角度に変換され、D/A 変換器を介して計測フロントエンド(A&D company WCAmimi)に入力される。なお、計測フロントエンドでは、マルチファンクションジェネレータで生成した信号や、各センサから得られた値を、リアルタイム解析または csv ファイル形式で保存することができる。これにより、振動刺激生成と左手手関節における錯覚肢再現で得られた値を解析することを可能としている。



図3 左手 KI 再現部

以上述べたように、まず FCR に加振器から振動刺激を与えて、それによって誘発された錯覚肢を左手手関節で再現することで、錯覚の軌跡を取得する。各錯覚特性を調べるために、信号発生器で生成される信号、および時間同期のとれた各種センサからの信号や左手で再現された錯覚肢のデータを取得する必要がある。そのため、それらの信号をリアルタイムで計測できるフロントエンドで一括して受けている。

RHI のための画像出力部

本実験の実験装置へと改良するために、前述の KI 刺激誘発部・左手 KI 再現部に映像装置を増設することにした。図4に示すように、右腕の前腕部分より先の部分を上から覆うように 13.3 インチモバイル液晶モニタ (GeChic On-Lap1302) を設置し、振動刺激を与えると同時に手首が伸展している映像を流すようにした。



図4 RHI のための画像出力

視覚刺激とするための映像は被験者から見た目線で、モニタの下にある被験者自身の腕と位置や遠近感などを一致させることで、違和感が少なくなるよう心掛けて撮影・編集を行った。映像はパソコンからモニタへ出力されており、映像の再生や停止などの操作は全てパソコンから行えるようになっている。

また、モニタは3関節モニタアーム (SANWA DIRECT 100-NPC004) を用いることで、水平方向にも垂直方向にも自由な位置で固定できるため、被験者ごとに自身の腕との違和感が少ない位置でモニタを設置できる。また、モニタアームは卓上型運動錯覚誘発・評価装置の加振機ベースではなく、加振機のないアームレストベースから固定しているので加振機の振動によるモニタの共振はない。



図5 KI 誘発部と左手 KI 再現部の全体図

実験システム

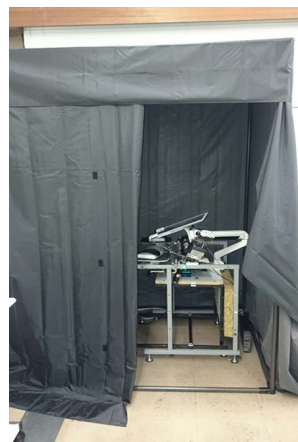


図6 暗幕の中に設置された KI・RHI 誘発装置

実験装置は、実験参加者がリラックスした姿勢で振動刺激を受けられるように基本姿勢を定めている。そのため、左右の腕部を机上に置いた座位姿勢を基本姿勢に採用された(図5)。右手部では、手関節へ振動刺激を与えるため、前腕部を固定するようにアームレスト部をデザインし、アームレスト先端に取り付けたグリップ部を握ることで、前腕の各関節をリラックスした状態で固定できる。このようにして、右手手関節の主動筋群に対して、振動刺激を加えることを可能にしている。左手 KI 再現部は、右手手関節で誘発される KI を再現するために、アームレスト部先端のグリップ部を握った状態で、左手手関節での屈曲・伸展両方向に 90° の範囲で可動となるようにしてある。

KI・RHI 同時誘発システムでは、視覚入力
の遮断はできない。しかしながら、正しい
KI の誘発を評価するために RHI とは関係な
視覚入力を可能な限り遮断したいと考えた。
そこで装置全体を暗幕で覆って、RHI とは無
関係の視覚入力を遮断した(図 6)。

(2) 心理物理実験法による錯覚量の評価 一対比較法

k 個の試料を比較するとき、総当たり戦の
ように k 個から 2 個ずつ取り出して対にして
比較し、全体で kC_2 個の結果を総合して、最
最終的に k 個全体の試料を評価する方法を一対
比較法という。本研究では、単に両社の優劣
のみをつける方法ではなく、差の程度を評点
で示す方法としてシェッフェの一対比較法
を採用する。シェッフェの一対比較法では、
いくつかの変法がある。本研究では、被験者
一人に対してすべての対を割り当てること
により、少数の被験者でも実験が可能である
とともに順序効果を考慮した手法であるこ
とから浦の変法を採用することとした。

実験条件

振動刺激の呈示は、手首から 20 mm 離れた
位置にある FCR の腱に 10 mm の接触子を
0.3 N の力で押し当てた状態で垂直方向に振
動を与えることとした。すべて振動刺激の周
波数は 50 Hz、加速度は 70 m/s^2 で固定し、各
試行において振動刺激条件での違いは無い
ようにした。

映像を撮影する際に必要な運動錯覚の動
的特性は先行研究から刺激腱: FCR、周波数:
50 Hz、加速度: 70 m/s^2 の場合の測定結果を
用いることとした。すなわち、先行研究では
潜時の平均値は 3.5 秒、また最大角度の平均
値は 15 度であった。これらの結果に基づき、
潜時はすべての映像パターンにおいて 3.5
秒とすることとした。

映像パターン間で変化するパラメータの
一つである最大角度については、

- (a) 15 度の場合と
- (b) 伸展方向に最大限に曲げた(約 85°) 場
合の 2 パターンとした。

もう一つのパラメータである角速度につ
いては、

- (ア) 手首が動き始めて 15 秒後で最大角度に
達する速度 ((a) 1 deg/s, (b) 約 5.7 deg/s)
の場合と

- (イ) 振動刺激終了時(手首が動き始めて 26.5
秒後)で最大角度に達する速度 ((a) 約 0.57
deg/s, (b) 約 3.2 deg/s) の 2 パターンとした。

すなわち、手首が動く映像は合計 4 パター
ンあることになる。4 パターンすべて 30 秒で
伸展方向への動きはなくなる。以上の 4 パ
ターンに加えて、手首が動かないパターン(最
大角度 0 deg、角速度 0 deg/s)を加えた合
計 5 パターンが実験に用いる映像パターンと
なる。以後、映像パターンは(A) 0 度、(B)
(a)-(ア)、(C) (a)-(イ)、(D) (b)-(ア)、(b)
(2)-(イ) と記す。

実験手順

映像パターンの手首の動きに関するパラ
メータは伸展最大角度と伸展角速度の 2 つと
し、この 2 つパラメータがそれぞれ変化する
場合の合計 4 パターンと全く手首が動かない
映像パターンを加えて合計 5 つの映像パター
ンを用意した。

実験中、映像パターンはランダムに 2 つ選
択される。腱に振動刺激を加えると同時に映
像を流し、続いて腱に振動刺激を加えると同
時に別の映像を流す一連の流れを 1 セットと
する。順序を考慮したすべての組み合わせは
合計 20 セットとなり、被験者一人あたり 20
セットすべての計測を 1 回の実験で行った。

1 セットの内訳は、振動刺激と RHI 誘発さ
せるための映像を 30 秒呈示後、30 秒の休憩
をとり、振動刺激と別のパターンの映像を 30
秒提示した後、30 秒の休憩をとるという流れ
になっている。また、5 セット計測するごと
に 300 秒の休憩を取った。

被験者には、各セット終了後に毎回錯覚の
鮮明さについて評価していただいた。その際
の評価は「前者の方が強い・前者の方がやや
強い・変わらなかった・後者の方がやや強い
・後者の方が強い」の 5 段階で評価してい
たいただいた。

(3) 脳の賦活状態の計測法

KI 誘発時における脳賦活状態の計測に先
立ち、当研究室ですでに研究が進められてお
り、経験値の高い錯覚現象に活用して BMI の
利用技術の蓄積を図った。本研究期間中に実
施した BMI による脳の賦活状態の計測実験と
しては、ポケット NIRS と全頭型の NIRS であ
る。後者については、取得されるデータ量が
多く、当研究室では現在解析技術の確立を進
めている最中なのでこの報告書では前者の
結果について報告する。

使用した錯覚現象とは、二本の鋼線を両手
で挟んでこするとベルベット生地のような
柔らかくすべすべした感触が生じるベルベ
ット・ハンド・イリュージョン(Velvet Hand
illusion; VHI) である。

VHI 発生時とベルベット生地を触ってい
るときの FP1 と FP2 の位置(前頭前野の左右
半球)の酸素化ヘモグロビンの濃度をポケッ
ト NIRS により計測した。被験者間の比較を
行うために、計測された値は z 得点に換算さ
れて評価する。

4. 研究成果

(1) 運動錯覚とラバーハンドイリュージョ ンの融合効果

シェッフェの一対比較法の浦の変法の分
散分析の方法に基づき、映像パターンの違い
による錯覚の鮮明さの有意差を求める。映像
パターン i の主効果を α_i 、ヤードスティック
を Y とすると、 $|\alpha_i - \alpha_j| > Y$ となるととき有意差
が存在する。7 名の被験者の実験から求めた
主効果とヤードスティックの値を図 7 に示す。

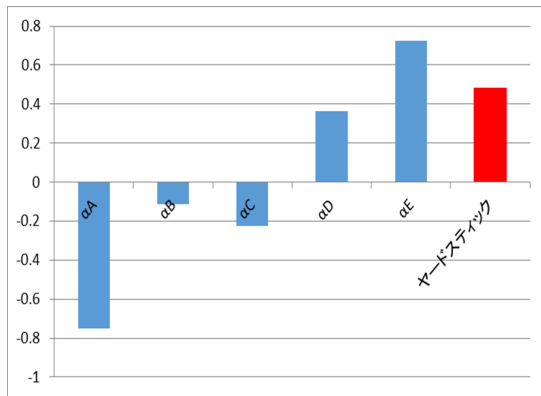


図7 KIとRHIの複合効果の検討

この実験結果から、有意差があった映像パターンの組は、A-B, A-C, A-D, A-E, B-E, C-D, C-E の7つである。錯覚強度の強い順に並べると、 $E > D > B > C > A$ となる。まず、映像の最大伸展角度の違いが錯覚の鮮明さに与える影響を考えると、有意差があったのは0度と85°、15°と85°の間に有意差が生じている。実際に振動刺激を腱に与えることで感じている角度よりも大きく曲がっている映像を見る方が錯覚は鮮明に生じることがわかった。このように、今回の実験では少なくとも視覚刺激によってKIの錯覚強度に干渉可能であるということは明らかになった。

次に、視覚刺激を加えた場合、通常の運動錯覚から錯覚の鮮明さがどのくらい補強されているのかを定量的に調査した。被験者の中から比較的KIを強く感じない者を選定して、刺激を与えている最中の被験者の手首の角度を左手KI再現部の出力を記録した。この実験結果から、最大角度で比較すると視覚刺激なしの場合で13.0°、視覚刺激ありの場合で18.1°となり、視覚刺激によって運動錯覚の錯覚強度が補強されている。一方、KIを比較的強く感じる被験者の実験結果では、最大角度で比較すると視覚刺激なしの場合で59.0°、視覚刺激ありの場合で89.7°と大幅に補強されている。視覚刺激ありとなしの場合の角度の比を求めると、前者と後者ではそれぞれ約1.4と1.5となり、視覚刺激の重畳により増加する最大角度の割合は同程度となる。以上の実験結果から、視覚刺激によって運動錯覚の錯覚強度を補強できるということを示すことができた。

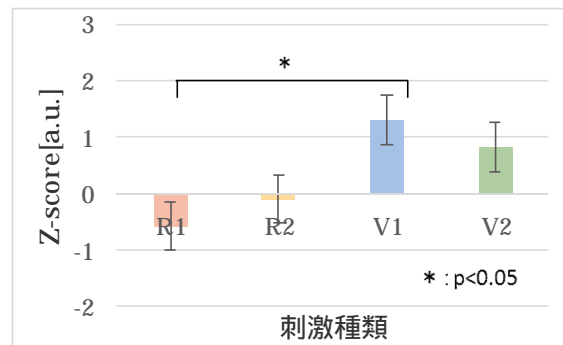
以上のように、RHIによりKIの強さを補強できることがわかった。今後は、運動錯覚を感じにくい人々の錯覚の鮮明さを補強できるような視覚刺激の条件を調査していく必要がある。

(2) 錯覚発生時の脳賦活状態と錯覚量の関係

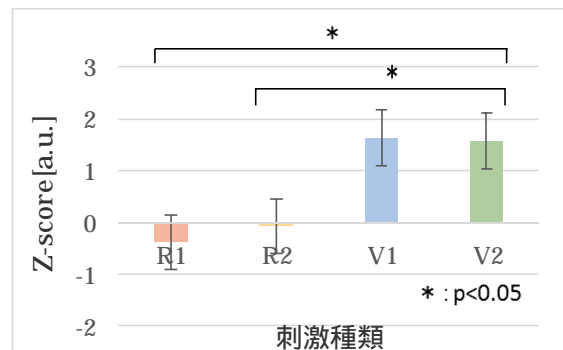
被験者には本物のベルベット生地とVHIの刺激である2本鋼線をアクリル製のフレームに固定した試料を被験者に触ってもらった。それぞれの試料に対して幅広(60mm)と幅狭(30mm)の2条件を用意した。したがって試料は次の4つである。

- R1: ベルベット生地 60mm
- R2: ベルベット生地 30mm
- V1: 鋼線間隔 60mm の VHI 試料
- V2: 鋼線間隔 60mm の VHI 試料

各試料は、呈示時にマジックテープで自動xステージに固定され、往復運動しているときに被験者は両手で挟んで触る。20代の健康な男子10名により実験を実施した。データ整理をする際に、最初の休憩状態をベースラインに取り、刺激呈示状態の20[s]のz-scoreの平均を求めた。



(a)左脳賦活状態



(b)右脳賦活状態

図8 VHI発生時の脳賦活状態

全被験者の平均を求めた結果を図8(a)と(b)に示す。これらの図においてz-scoreの値が大きいほど脳が活性化していることを表す。図中にはSPSS(IBM社)を用いて実施した検定結果も示されている。図8からわかるように、右脳の方がやや反応が顕著である。また、右脳と左脳についてR1とV1の間に顕著な差があることがわかる。とくに右脳については、弱い刺激のV2とR2の間にも顕著な差がある。このように本物に比べて、VHI発生時に前頭前野が活性化するという結果が得られた。

(3) まとめと今後の課題

本研究では、リハビリテーションにKIを利用することを最終目標に、RHIによるKIの強化の可能性について調査した。このため、KIとRHIを同時に誘発するための実験装置を

新しく開発した。また、それを用いて一連の心理物理実験を実施して、その結果融合効果を確認した。一方、錯覚発生時の脳の賦活状態については、全頭型 NIRS の利用技術を蓄積している段階で実施には至らず、前頭前野の観察に留まっている。今後本研究をさらに発展する中で、KI 発生時の脳賦活状態を計測して RHI による KI の強化のメカニズムを解明していく所存である。

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)

本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡 徹, 大岡昌博, 卓上型運動錯覚誘発・評価装置の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 820, 1-12, 2014(査読有)

本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡 徹, 大岡昌博, 振動刺激条件の相違が運動錯覚の誘発と知覚量に及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp.457-466, 2014(査読有)

[学会発表](計 13 件)

加藤祐規, 本多正計, 宮岡徹, 大岡昌博, 刺激腱の違いが誘発される運動錯覚の鮮明さに与える影響, 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2014

赤堀晃一, 本多正計, 宮岡徹, 大岡昌博, 手関節進展運動錯覚の運動特性に与える振動条件の影響, 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文, 2014

M. Honda, H. Karakawa, K. Akahori, T. Miyaoka, and M. Ohka, Estimation of Vibration Stimulus Threshold for Inducing Kinesthetic Illusion, MHS2014, pp. 21-22, 2014

K. Akahori, M. Honda, T. Miyaoka, and M. Ohka, Maximum Angle Induced by Kinesthetic Illusion under Different Accelerations of Sinusoidal Vibrostimulation, ICM2015, 2015

Y. Kato, M. Honda, T. Miyaoka, and M. Ohka, Determination of the Wrist Tendon Most Conductive to a Vivid Kinesthetic Illusion, ICM2015, 2015

N. Rajaei, H. Nomura, S. Matsushita, M. Ohka, and T. Miyaoka, A Pin-Matrix Type Tactile Mouse for Virtual Smooth Surface Like-Velvet in the Human's Hand, MIPE2015, 2015

R. Nader, H. Nomura, S. Matsushita, H. Komura, M. Ohka, and T. Miyaoka, A Tactile Mouse Capable of Generating Velvet-like Sensation to the Human Palm, IEEE IRIS2015, 2015

加藤祐規, 本多正計, 宮岡徹, 大岡昌博, 手関節の 3 つの腱に生じる運動錯覚の鮮明さの相違, 第 20 回日本バーチャルリア

リティ学会大会論文集, pp. 12-13, 2015
赤堀晃一, 本多正計, 宮岡徹, 大岡昌博, 振動刺激による運動錯覚における右手手関節の進展速度の制御, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 14-15, 2015

吉田俊平・大岡昌博, ラバーハンドイリュージョンの視覚刺激パターンの変更による運動錯覚の鮮明さの相違, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 11B-03, 2016

中村俊貴, Nader Rajaei, 宮岡徹, 大岡昌博, 二本のワイヤーの位相差運動によるベルベット・ハンド・イリュージョンの強度制御, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 12A-03, 2016

大岡昌博, 松下翔二郎, 齋藤洋典, ポケット NIRS によるベルベット・ハンド・イリュージョン発生時の脳賦活状態の計測, 日本機械学会 2016 年度年次大会, J1210103, 2016

三井雄介, 小村啓, 松下翔二郎, 大岡昌博, ポケット NIRS による VHI 発生時の脳賦活状態の計測, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D1-06, 2017

[図書](計 1 件)

大岡昌博, 小村啓, 17. 第 2 章第 4 節 触覚の錯覚, 狙いどおりの触覚・触感をつくる技術, サイエンス&テクノロジー, pp. 48-62, ISBN978-4-86428-162-1 C3058, 2017

[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)

静岡理科大学・総合情報学部・教授
研究者番号: 00111815

北田 亮 (KITADA, Ryo) (当時)

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・教授
研究者番号: 40178504