

令和元年6月24日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K20100

研究課題名(和文)運動錯覚による革新的リハビリテーション

研究課題名(英文) Innovative rehabilitation through kinesthetic illusion

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) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：革新的なリハビリテーション機器を開発することを目的として、運動錯覚装置のウェアラブル化と複数の腱に対して振動刺激を与えた時の錯覚惹起について調査した。1)小型ボイスコイルモータと手首サポータを組み合わせた装置とその制御方法を確立した。2)本ウェアラブル運動錯覚装置の性能を評価したところ、従来の大型の卓上運動錯覚誘発装置と同程度の性能があることを確認した。3)屈曲方向の運動錯覚誘発に最適な部位の特定したところ、尺側手根伸筋腱と筋肉の接合部が適切であることがわかった。4)パワーアシストと運動錯覚を同時に与える実験を行ったところ、離散的な角度変化により生じられる運動錯覚が増加することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果の学術的意義は、屈曲方向の運動錯覚を生じるために最適な筋腱と刺激位置を特定したことと、パワーアシストを組み合わせた場合に離散的な角度変化を与えた方がより大きい運動錯覚が生じることを示した点である。社会的な意義としては、新しいリハビリテーションの確立に向けてウェアラブルな運動錯覚誘発装置を開発し、その制御方式も確立してことが挙げられる。前述の学術的知見は、このウェアラブル運動錯覚誘発装置を運用する際に有効活用される。すなわち複数の筋腱を刺激して上肢の錯覚運動を制御したり、作業療法と運動錯覚を組み合わせた時に離散的な角度変化を与えた方がより効果的であることを示したりするときに活用される。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a new rehabilitation equipment, we investigated a wearable kinesthetic illusion device and illusion inducing behavior for stimulating multiple tendons to obtain the following achievements. 1) The wearable kinesthetic illusion device was composed of a miniature voice coil motor and a wrist supporter, and we developed a new control method for the device. 2) If we evaluated the wearable kinesthetic device, we elucidated that it had same inducing capability as the conventional desktop type. 3) When we determined the optimal stimulation spot of the extensor carpi ulnaris muscle inducing flexion directional illusion, the best spot was the connecting point of muscle and tendon. 4) When power assist and vibration stimulus were simultaneously applied to the wrist, discrete variation in wrist angle increased the kinesthetic illusion.

研究分野：ロボティクス, VR

キーワード：リハビリテーション 運動錯覚 多自由度 ウェアラブル 小型振動発生器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

卒中など脳疾患系の病気に罹患すると、機能を失った脳の特定箇所の回復は困難であるために、脳内に神経伝達の回路を形成することを目的としたリハビリテーションに期待が集まっている。しかし、そのための施術者育成には時間がかかるため、患者数に比して施術者の数はいまだに十分ではない。このため、自宅や職場などでリハビリテーションを実施したい、あるいは医療機関に通いつつ個人で自主トレーニングをしたいと考えている患者の要望に応える状況にない。しかし、今後高齢化がさらに加速化し罹患者が増大すると予想されるため、個人的なリハビリテーションを可能とする器具に対する要望が益々高まると予想される。

そこで本研究では、以下で述べるように、運動錯覚を用いた新しいリハビリテーション法を開発することを最終目的としている。まず運動錯覚とは、深部感覚や皮膚感覚の受容器を人体外部からの物理刺激（例えば振動等）によって興奮させることによって、当人の四肢が動いていないにもかかわらず動いているように感じてしまう錯覚である。これまで、一つの関節が一方方向に動く感覚を生じさせる条件については、多くの部分が明らかにされてきた。特にこれまでの我々の研究では、振動刺激を統制して被験者に与えることによって、最大加速度、振動数、押しつけ力の最適値を見出した点で世界に先駆ける大きな成果を得ることが出来た。本研究ではそれを発展して先進的なリハビリテーションを開発すると同時に、運動錯覚によって運動野の機能が変化する様子の観察を通じて障害が緩和する脳のメカニズムを明らかにしたい。

### 2. 研究の目的

本研究では、革新的なリハビリテーションに向けて運動錯覚現象の活用をさらに進めるために、複数の関節の行きと戻りの動き、すなわち屈曲、伸展、外転、内転などの関節の動きの運動錯覚を自由に操るための方法論を確立する。開発するシステムは、リハビリテーションの現場テストを可能とするために、可能な限り小型化されたものとする。本装置の効果を検証するために近赤外線分光法（NIRS）により大脳の運動野の賦活を観察する。目的を以下にまとめる。

- (1) 複数の筋や腱への刺激を可能とするために、小型のボイスコイルモータを用いたシステムを構成する。医療現場に持ち込んで評価できるようにポータブルなシステムを開発する。
- (2) 所定の筋や腱へ振動子を貼付して、肘の屈曲・伸展、手首の外転・内転の運動錯覚を生じようにする。また、運動錯覚の数理モデルを構築して、運動錯覚の制御を可能とする。
- (3) 計画した運動錯覚が実現されたことを実証するために、NIRS を用いて運動野・運動前野の賦活状態を調査する。その結果、リハビリテーションに対する本装置の有効性を確認する。
- (4) 実際のリハビリテーションを想定して、外部から麻痺手に力を加えて強制的に伸展させた状態で腱に振動刺激を与えた場合の運動錯覚について調査する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 小型運動錯覚呈示装置の開発

リハビリ運動を生じさせるためには、複数の筋腱に刺激を与えて上肢に 3D の錯覚を生じさせることが求められる。そのためには、現状の振動モータより小型のモータを開発してそれを複数装着したウェアラブルな錯覚呈示装置を開発する必要がある。本研究では、超小型ボイスコイルモータを改造して振動刺激生成装置を開発して、市販のサポータにその振動刺激生成装置を装着した小型運動錯覚呈示装置を開発した。

超小型ボイスコイルモータの慣性力は小さいので従来のボイスコイルモータと同じ人体の反発力に押し返されて当初予定していた加速度が得られないことがわかった。このため、接触子に加速度センサを装着して、所定の加速度が得られるようにモータに印加する電圧を制御するシステムを開発した。

#### 3.2 屈曲方向の錯覚の検討

これまで手首屈筋腱に対する検討を行ってきたために生じさせた運動錯覚は伸展方向のみであった。そこで、手首の屈曲方向の運動錯覚を生起させるために、手首伸筋腱に振動刺激を与える実験を行った。これまで、手首伸筋腱に印加する振動刺激の条件と運動錯覚の錯覚量の大きさの関係性について詳細な調査報告が少ない。そこで、手首屈曲方向の錯覚について、運動錯覚量が最大になる振動刺激条件を調査した。

#### 3.3 NIRS による脳賦活状態の計測

運動錯覚生起時の脳の賦活状態を研究する前段階として、fMRI の結果がすでにあり比較検討できることから、Velvet Hand Illusion (VHI) が誘発するときの脳の賦活状態を Near-infrared Spectroscopy (NIRS) の適用により調査する。これにより、NIRS の利用技術を確認するとともに、本物のベルベット生地を触るときと VHI ディスプレイを触るときで脳の賦活状態にどのような違いが現れるか調査する。VHI の賦活は、運動錯覚で賦活が生じると予測される運動野とは異なる場所で生じるものの、脳賦活データの取り扱いは共通している。

#### 3.4 パワーアシスト時の運動錯覚

刺激腱を手首の屈曲筋腱として選定し、モータにより手首を強制的に伸展させ、伸展角度条件と錯覚量の関係を明らかにすることを目的とする。実験では、従来の卓上型運動錯覚誘発システムに DC モータを追加して強制的に右手首の伸展を可能となるようにした。すなわち、右手には振動モータで生成した振動を刺激筋腱に印加すると同時に、右手ハンドレスト部の下に

設置した DC サーボモータにより手首を強制的に進展させる刺激を与える。このとき、モータが誤作動をしたときに備えリミットスイッチとメカニカルストッパーから構成される安全装置を製作して設置した。左手部は錯覚量の評価方法に使用され、誘発された錯覚肢を左手手関節で再現する。そのときの再現角度は、左手ハンドレスト部下に設置した DC モータのエンコーダにより記録して、角度の時間変化から錯覚の向き、錯覚肢の最大角度、速度、錯覚が生起されるまでにかかる時間として定義される潜時を解析し錯覚量を評価した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 小型運動錯覚呈示装置の開発

開発した手首装着型運動錯覚発生装置を図 1 に示す。図 1 に示すように、市販のサポータに超小型ボイスコイルモータを設置したものである。マジックテープにより手首の所定の箇所に装着できる。超小型ボイスコイルモータをアクチュエータとして採用する場合には、力制御によって皮膚を押し込む力を増加する方法を考案した。すなわち、振動体の皮膚に直接接触する部分に小型のロードセルを設置して、計測される力振幅の大きさに比例してボイスコイルモータの印加電圧を増加するような制御系を構成した。

- (A)力制御された小型ボイスコイルモータ
- (B)力制御されていない大型のボイスコイルモータ
- (C)(B)のボイスコイルモータの振動体に 10g の付加質量を追加した場合

といった三つの条件で実験を行った結果を図 2 に示す。ここで、惹起される KI の強度は、振動刺激を加えていない左手で表現した。すなわち、左手が伸展する角度が大きいほど惹起される錯覚強度が高いことを示している。図 2 からわかるように、条件(A), (B)および(C)の結果は重なり合っており、小型ボイスコイルモータを用いても力制御を実施すれば大型のボイスコイルモータと同程度の KI が惹起されていることがわかる。

実験結果から、今後 KI 惹起のための刺激装置を設計するためのアクチュエーションの条件は、加速度ではなく発生力が所定の値以上の値をとることが重要であることがわかった。力の値が満足すれば、小型のボイスコイルモータでも十分な KI が惹起されるという実験事実は、リハビリテーションシステムの小型化が可能であることを示している。



図 1 ウェアラブル運動錯覚発生装置

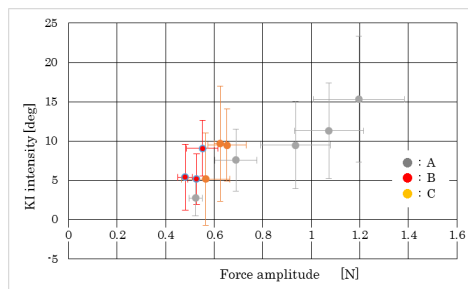


図 2 本装置と従来の発生装置の性能比較



図 3 伸筋腱用振動刺激印加装置

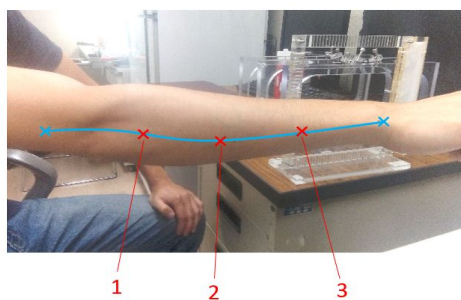


図 4 振動刺激を加えた伸筋腱

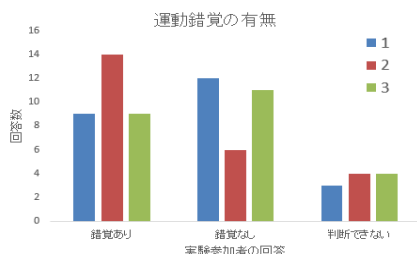


図 5 屈曲方向の運動錯覚の生起回数



図 6 VHI 実験に使用した資料 (左:ベルベット生地 (R), 中:二本鋼線 (V), 右:コントロールとして用いた一本線 (C))

#### 4.2 屈曲方向の運動錯覚の検討

予備実験で、前述のウェアラブル運動錯覚装置で屈曲方向の運動錯覚の生起を試みたが、運動錯覚の生起が困難であった。このため、実績のある卓上型の運動錯覚誘発システム（図 3）を利用して最適な刺激位置を探索する実験を行った。図 3 に示すように、手首固定部へ腕を置いた実験参加者の右手手関節の腱へ皮膚上から振動刺激を与える。このとき、手首関節が屈曲方向へ曲がる錯覚を誘発させる。

23 歳から 25 歳の健常な男性 8 名が実験に参加した。参加者には予め実験内容の説明を十分に行い、同意を得た上で実験に協力してもらった。実験の内容は、事前に名古屋大学の倫理委員会で検討・承認されている。

まず、右手部の加振器の先端には、圧力センサが取り付けられており、腱への押し込み力を計測する。振動刺激の生成には、小型加振器 (EMIC Corp. 511-A) を用いる。ファンクションジェネレータ (Function Generator mf WF1973) から電気信号を生成して、加振器先端部を通じて実験参加者に加える振動へ変換する。実験では、1 試行を振動刺激 15 [s] 提示した後、60 [s] の休憩を設けた。振動刺激の条件は、屈曲腱上の刺激位置を変化させて、それに伴う錯覚の変化を調査した。実験参加者には錯覚誘発に集中してもらうように、アイマスクを装着し、外部からの刺激をできるだけ取り除いた。

振動刺激部位は、手首から腕まで伸びる尺側手根伸筋腱 (Extensor Carpi Ulnaris muscle; ECU) 上の 3 点とした。具体的な場所としては、図 4 における赤い×印の場所とした。これらの点は筋腱上における、「筋肉の上」、「筋肉と腱の接合部分」、「腱の上」を想定してマーキングした。

それぞれの点に対して、10 [mm] の接触子を 0.3 [N] の力で押し当てた状態で提示し、右手首屈曲方向の錯覚を誘発した。振動刺激の提示順序は、刺激位置を前述の 3 か所からランダムに選び、運動錯覚の有無を各 3 条件について調査した。

実験参加者から刺激提示後に、運動錯覚の有無について「錯覚を感じる」、「錯覚を感じない」、「錯覚があるか判断できない」の 3 段階で回答してもらった。実験データの精度を向上するために、1 人につき同様の実験を 3 回行った。実験参加者 8 人に対して、回答から得られた結果を図 5 に示す。

前述の図 4 における刺激位置 1, 2, 3 に対して、実験参加者の回答数を調査した。この結果、刺激位置 2 における「錯覚を感じる」と回答した数が最も多くなり、試行回数 24 回中、14 回となった。刺激位置 2 は、筋腱上における筋肉と腱の接合部分である。したがって、運動錯覚を最も誘発できる可能性がある部分はこの筋肉と腱の接合部分であることが推測される。

#### 4.3 NIRS による脳賦活状態の計測

実験では、刺激呈示ディスプレイを電動 X ステージで往復運動させることで被験者に刺激を与える。このときの脳賦活を計測装置 PocketNIRS により計測する。PocketNIRS には 2 チャンネルあり、測定領域は両側前頭前野である。刺激種類は、R: 本物のベルベット生地 (幅 60[mm])、V: VHI ディスプレイ (幅 60[mm])、C: コントロール (ワイヤー 1 本) である (図 6)。VHI が生起しない装置としてワイヤー 1 本の装置を作り、これを比較対象とした点が前報より改善した点である。被験者は、一つの刺激に対して、休憩、安静、刺激呈示の 3 状態を決められた時間・順序で実施する。賦活状態は、NIRS データから z-score を算出することで求める。z-score は、刺激呈示時の賦活状態を相対的な数値で表すことができ、単位は無次元 [a.u.] である。被験者は 20 代の男性 10 名 (右利き) である。実験結果を図 7 に示す。

図 7 に示す結果からわかるように、賦活状態は  $R < C < V$  となり、右脳の R と V の間にのみ有意差がある。また、ベルベット生地よりも VHI を触る方が、前頭前野の賦活が約 2 倍大きい。前頭前野におけるこの結果は別途実施された fMRI による実験結果と一致するため、今後の研究では NIRS が使用可能であるといえる。運動錯覚では、全頭前野の観察だけでなく広範囲の前頭葉を観察する必要があるために、全頭型 NIRS の使用を進める必要がある。

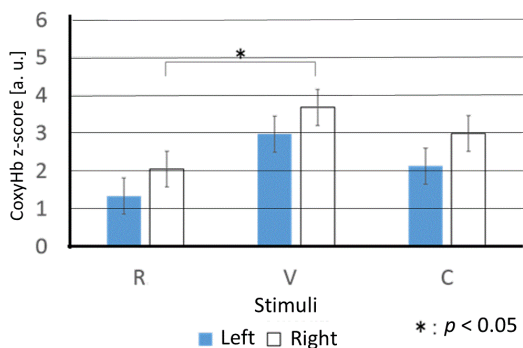


図 7 VHI 生起時の脳賦活状態

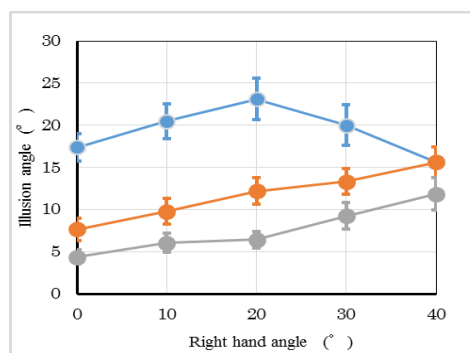


図 8 伸展角度離散変化実験

#### 4.4 パワーアシスト時の運動錯覚

実験では、右手首の橈側手根屈筋腱 (Flexor Carpi Radialis Muscle; FCR) に加える強制伸展角度を離散的に変化させる場合と連続的に伸展運動させた場合の 2 種の実験を行った。離散的に変化させた実験の条件は周波数 50, 70, 90Hz, 右手伸展角度 0°, 10°, 20°, 30°, 40° の計 15 条件とした。連続的に変化させた実験の条件は、周波数 50, 70, 90Hz, 右手伸展角速度 2°/sec, 4°/sec, 8°/sec の計 9 条件とした。実験は 20 代男性 5 人に対し 5 回ずつ行った。

左手再現で得られた最大伸展角度と強制的に段階的に与えた伸展角度の関係を図 8 に示す。図中の錯覚量は、実験参加者 5 名の平均値であり、エラーバーには標準誤差を用いている。右手伸展角度 0° 以外の条件では、実験開始時に右手に強制的に加えた伸展角度と同じ角度だけ左手を曲げてもらい、その角度を基準(0°)として計測を行っている。この図 8 の結果を見ると、いずれの条件においても強制的に加えた伸展角度に加えて運動錯覚が生じていることがわかる。特に、50Hz の条件で強制伸展角度 20° のとき、運動錯覚が最も顕著に生起していることがわかる。これは、この 20° の条件の時の FCR に作用する張力条件により計算される固有振動数と強制振動として印加された 50Hz の振動が合致したことが原因と考えられる。このほか、この実験により、右手の伸展角度が大きくなればなるほど最大伸展角度が大きくなり、潜時が短くなり、伸展速度が速くなっていることを確認した。

次に、連続的に強制伸展角度を変化させた場合の結果を図 9 に示す。なお、実験参加者に実験後アンケートをとったところ、右手角速度 8°/sec では動きが速く、左手の再現が上手くできない、また錯覚が出る前に右手が 40° まで動いてしまったという意見があった。そのため、8°/sec のデータは信頼性、再現性が低いと考えられる。したがって、以下の議論では 8°/sec のデータを排除して考えることにする。

実験結果から、右手首の伸展角度が 0°/sec から 2°/sec に増加すると、どの周波数の条件でも錯覚角度が増加する。さらに、右手首の伸展角度が 2°/sec から 4°/sec になると、これについても三種類の周波数条件いずれでも錯覚角度が急激に減少する。以上の結果から、筋紡錘 Group Ia の発火が最大になる伸展角度条件は、2°/sec 付近にあると考えられる。

最後に、伸展角度を離散的に変化させた実験と連続的に行った二種類の実験により得られた最大伸展角度をまとめて表 1 に示す。表 1 を見るとどの周波数においても離散的な角度変化を与えたほうが最大伸展角度は大きくなっている。しかし、連続変化の実験では、潜時、伸展速度の解析は行っていないため、最大伸展角度の大小から離散あるいは連続のどちらが強い運動錯覚を生起させるのか結論付けることはできない。しかし、右手首を強制的に曲げない状況(伸展角速度 0°/sec の条件)での錯覚量は、50Hz, 70Hz, 90Hz に対してそれぞれ 17.4°, 7.7°, 4.4° であることから、離散連続に限らず強制的に進展させた方が強い運動錯覚を生じさせることが可能であることがわかった。

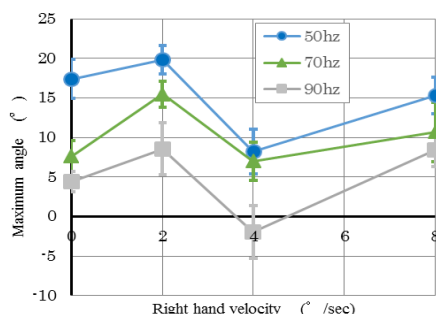


表 1 パワーアシスト実験のまとめ

Frequency	Discrete	Continuous
50 Hz	23.5 °	20 °
70 Hz	16.7 °	14.2 °
90 Hz	13.2 °	9 °

図 9 伸展角度連続変化実験

研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 今後運動錯覚をリハビリテーションに利用することを目指して、超小型ボイスコイルモータを改造して手首サポータに設置してウェアラブルの運動錯覚生起装置を開発した。超小型ボイスコイルモータは、慣性力が小さいために加振対象から押し返されるため、加速度が検出する加速度が所定の値になるようにフィードバック系を構成した。
- 2) 本ウェアラブル運動錯覚装置の性能を心理物理実験により評価したところ、従来の卓上運動錯覚生起装置と同程度の運動錯覚を生起させる能力があることが判明した。
- 3) 屈曲伸展の両方向の運動錯覚を生起させることが可能となるように、屈曲方向の運動錯覚について調査した。尺側手根伸筋腱上の 3 点について振動刺激を印加したところ、筋と腱の接合部に振動刺激を印加した場合が最も数多く運動錯覚が生じた。
- 4) 運動錯覚時の脳の賦活状態を評価する前段階として、fMRI の結果もある VHI 発生時の脳賦活状態を NIRS により評価した。その結果、VHI 生起時には右半球の賦活が有意に顕著になることがわかった。
- 5) パワーアシストにより、離散的な角度変化および連続的な角度変化を強制的に加える実験を行った。その結果離散的な角度変化を与えた方が大きい最大伸展角度が得られた。また、離散・連続に関わらず、強制的伸展がない場合より大きい最大伸展角度が得られた。この

ことにより、通常のリハビリに加えて運動錯覚を生起させるとより手首が動く感覚が生じることが示された。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

小村啓, 大岡昌博, 滑らかさを惹起する触覚の Gestalt に関する研究, TVRSJ, 24-1, 2019, pp. 43-51, 査読有

横山綾亮, 小村啓, 坪井諭之, 大岡昌博, Pseudo-haptics と触覚刺激の複合による硬さ表現能力の向上, 日本機械学会論文集, 84, 2018, pp. 1-18, 査読有.

### 〔学会発表〕(計11件)

向畑健人, 小村啓, 本多主計, 大岡昌博, パワーアシストと振動刺激が生起する運動錯覚現象, IIP2019 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 2019.

Hiraku Komura and Masahiro Ohka, Stimulation Conditions to Generate Velvet Hand Illusion through a Dot-matrix Display, CIVEMSA 2018, 12-14 June, 2018, Ottawa, Canada.

Masahiro Ohka, Yusuke Mitsui, Hiraku Komura, Brain Activation Measurement of Velvet Hand Illusion Using Pocket NIRS, ASME-JSME ISPS-MIPE2018, 29-30 Aug. 2018, San Francisco, CA, USA.

志村知輝, 小村啓, 本多主計, 大岡昌博, 運動錯覚とラバーハンドイリュージョンの複合効果の促進法, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2018年9月, 東北大学.

池田慧, 小村啓, 本多主計, 大岡昌博, 屈曲方向の運動錯覚惹起のために振動刺激を印加する手首の伸筋腱の選定, 2018年9月, 東北大学.

小村啓, 久保拓夢, 池田慧, 大岡昌博, 村瀬文彦, 内藤宏, 運動錯覚のためのアクチュエーション条件, 日本機械学会2018年度年次大会, 2018年9月, 関西大学.

大岡昌博, 三井雄介, 小村啓, ポケット NIRS によるベルベット錯触の発生メカニズムの解明, 日本機械学会2018年度年次大会, 2018年9月, 関西大学.

小村啓, 大岡昌博, ベルベットハンドイリュージョンを生起する2本の平行線の刺激条件について, 日本機械学会2018年度年次大会, 2018年9月, 関西大学.

Hiraku Komura, and Masahiro Ohka, Effects of Active or Passive Touch on Perception Precision of Edge Direction Using Tactile Mouse Exhibiting Convex Dot-patterns on the Palm, 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, 5-7 Oct. 2017, Ottawa, Canada.

Hiraku Komura, Shumpei Yoshida, Tomoki Shimura, Masakazu Honda, and Masahiro Ohka, Vividness Control of KI with Variations in Visual Stimulus Patterns, 4-6 Dec. 2017, Nagoya, Japan.

Hiraku Komura, Shumpei Yoshida, Yuki Kato, Tomoki Shimura, Masakazu Honda, Masahiro Ohka, Research on a Haptic Device's Capability to Enhance the Degree of Kinesthetic Illusion Through Vibro-and-visual Stimulation, The 25<sup>th</sup> International Display Workshops, 6-8 Dec. 2017, Sendai International Center, Sendai, Japan.

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

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

該当なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 宮岡 徹

ローマ字氏名: MIYAOKA, Tetsu

研究協力者氏名: 北田 亮

ローマ字氏名: KITADA, Ryo

研究協力者氏名: 齋藤洋典

ローマ字氏名: SAITO, Hirofumi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。