

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22869

研究課題名（和文）触覚のGestaltが生み出す仮想表面の材質感制御

研究課題名（英文）Material feeling control of virtual surface generated through tactile Gestalt

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、心理物理学実験の結果に基づき触覚のGestalt理論を確立することを目指す。このため、まず二本の鋼線の位相差と速度比を種々変化させて心理物理実験を行い、この2つのパラメータとVHI感の関係を調査した。その結果、触覚のGestaltとして平行移動と伸張の要因を新しく導入して、これらによりVHI感を予測する数式を定式化した。この導かれた数式を用いれば、本年度の実験結果だけでなく、条件の異なる実験結果に対しても精度の高い予測が可能となることを明らかにした。また、心理物理学実験法とNIRSにより、触覚次元を構成する要因やVHIと脳賦活の関係についても調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、新しいVRの開発に役立てるために触覚のGestalt理論の確立を目指し、心理物理学実験とブレインマシンインタフェース技術を駆使してベルベット錯触とGestaltの関係を調査した。その結果、平行移動の要因と伸縮の要因によりベルベット錯触の生起の強度を予測できることを示し、定式化に成功した。また、因子分析により、ドットマトリクスディスプレイで生起されるベルベット錯触が二本鋼線で生起されるものと同等であることを示し、VRにおいて滑らかさの演出の制御を可能とする道を開いた。

研究成果の概要（英文）：In order to progress this study, first we investigate relationships between VHI intensity and some parameters such as phase difference and velocity ratio based on psychophysical experimental results which are performed by a presentation machine capable of changing two wires' phase difference and velocity ratio. As the result of this study, we introduce new Gestalt factors such as translation factor and elasticity factor to formulate equations for tactile Gestalt. We prove that these equations can estimate not only the present results but also the previous results performed under different experimental conditions. Furthermore we investigate factors constituting the tactile dimension and activated areas in brain caused by VHI using another psychophysical experiments and NIRS experiments.

研究分野：人間情報学，ロボット工学

キーワード：触覚 Gestalt 仮想表面 材質感制御 バーチャルリアリティ 情報統合化 理論構築

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) Gestalt について：Gestalt とは、感覚器で得た部品情報を統合化して得られた統合化情報のことである。図 1 (a) に示すように部品単体だけではわからなくても、部品が組み合わさると輪郭線を感じて見えてくる三角形が Gestalt である。視覚の Gestalt については、図 2 に例示した Prägnanz の法則によりほとんどの性質が明らかにされている。図 1 (b) の例のように、デザインによく活用されている。

Gestalt の例) 欠陥部分を埋めようとする心理

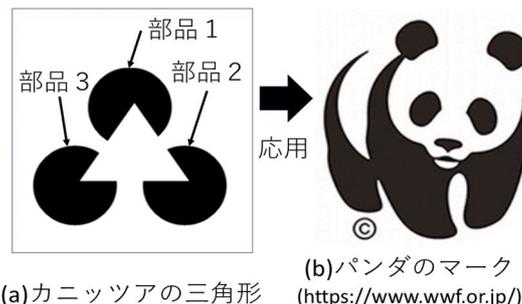


図 1 Gestalt の直感的説明

(2) 錯触について：触覚の錯覚（錯触）は錯視に比べれば少ないもののいくつか知られている。ベルベット錯触 (Velvet Hand Illusion; VHI) とは、目の大きい金網を両手で挟んでこすると両手の間に柔らかいすべすべした感触を感じる錯覚である (図 3 参照)。金網より二本の鋼線の場合の方が強く感じ、鋼線が一本ではなく二本以上で初めて生じる現象である。したがって、部品 1, 2 単体では生じず、両方揃って初めて生じることから VHI は Gestalt であることがわかる。しかも、その Gestalt がもたらす情報がすべすべという表面状態である点が、視覚の Gestalt と根本的に異なる。

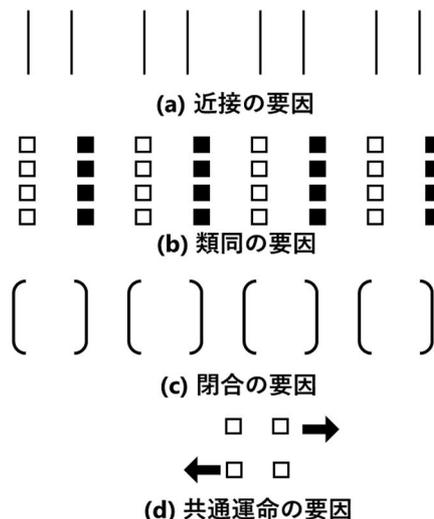


図 2 Prägnanz の法則の一部

(3) 期待される成果：Gestalt 理論はこれまでに、視覚認識や音声認識などに適応されてきたが、触覚については上述の議論からその適用の可能性が期待されるもののこれまで深く議論されることはなかった。触覚の Gestalt 理論が確立されれば、VR 技術や手で触るもの全体のデザインに指針を提供することが可能となるために、これら関連分野から進展が望まれている。

2. 研究の目的

(1) 本研究が目指すところ：本研究では、ヒトが物体を触って得られる種々の情報を統合して、最終的に触っているものが何であるか理解する過程を明らかにする理論構築を目指している。Gestalt 理論は、情報を統合化する過程を研究する上で重要であることから、錯触現象を通じて触覚の Gestalt について実験的に明らかにして新しい触覚の Gestalt 理論を構築する。目的は以下の三つである。

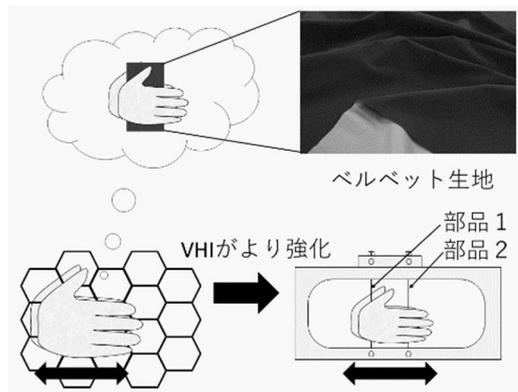


図 3 ベルベットハンド錯触

(2) 目的 1：Prägnanz の法則の中の要因の中から関連が深いと考えられる「閉合」、「共通運命」(図 2)、及び「よい連続」などを取り上げ、それらが錯触に及ぼす影響を調査する。

(3) 目的 2：錯触を呈示する面材料の材質や表面粗さを種々変化して、呈示面の表面状態が錯触に及ぼす影響を調査する。

(4) 目的 3：近赤外線分光法 (NIRS) を用いて、錯触時の脳の賦活状態の計測により、Gestalt の

要因と呈示面の状態を変化させることが大脳に及ぼす神経基盤への影響を調査する。

3. 研究の方法

(1) 研究体制：本研究は、研究代表者、鈴木泰博准教授（名大，連携研究者），北田亮准教授（南洋工科大，研究協力者）の三名，および大学院生三名で実施される。

研究代表者及び小村啓（当時 D2，現在九州工業大学助教）：研究全体の総括をするとともに，本研究で使用する二種類の装置，材質感因子決定装置及び広域ドットマトリクスディスプレイ装置を開発する。

鈴木泰博准教授及び M1 学生：鈴木准教授は，触覚の時系列データ（触譜）を分析する触譜の研究をしている。同准教授には触覚の Gestalt の時系列特性の調査をお願いする。M1 学生は代表者，鈴木准教授及び D2 学生の指導のもとに，心理物理実験の実施とデータ分析を行う。

北田亮准教授及び M1 学生：大脳生理心理学を専門とする北田准教授には，大脳の神経基盤の考察に加わっていただく。M1 学生は，代表者，北田准教授及び D2 学生の指導のもとに，NIRS により錯触時の脳賦活状態の実験実施とデータ分析を行う。

(2) 1 年目：2 つの実験装置，すなわち装置

1) 材質感因子決定装置，及び装置 2) 広域ドットマトリクスディスプレイ装置の設計製作を行う。まず，装置 1) については，温度管理（-15 ~ 40 °C）したスライダーを設置した自動テーブルを製作する。装置 1) では，このテーブルの上に，各種布，皮革，ゴム，金属などの板状試料を交換設置可能とする機構が備わっている。次に装置 2) はドットパターンを自在に発生可能な装置で，ヒトの掌全体を刺激できる呈示面積を有するものである。また，手を置く呈示面の材質を金属，布，皮革，プラスチックに交換可能になっている。この装置では，任意のパターンを生成できるように，VHI 以外にも Kanizsa の三角形など Gestalt に関係する図形を呈示する。装置の設計製作の後に，装置 1) を用いて 20 種類程度の材料を被験者に判断させて材質感次元を決定する。

(3) 2 年目：装置 2) を用いて，1) 呈示面の材質を変更，2) 二本線の間隔を変化する，3) 線の数を変更，4) 時系列パターンの変更，などの刺激の種類の変更に対して感じられる面の材質感の座標を決定するための間隔尺度法や一対比較法の心理物理実験や NIRS による脳の賦活計測を実施する。これらの実験の結果に基づき，材質の錯覚の数理モデルを構築して，所望の材質感を生じさせるため Gestalt 運動を算出できるような設計基盤をつくる。

4. 研究成果

(1) VHI の定式化：VHI の定式化のためには，連続値をとる刺激変数と VHI の強度の関係を調べることが役立つ。このためには，鋼線の移動速度，間隔，位相差などを変化させて VHI の強度を調べるための装置開発が求められる。図 4 にはそのために開発した装置が示されている。この装置では，ギア A と B の噛み合わせを組み替えることによって位相差を 0° ~ 180° まで変更することが可能である。

実験では，図 5 に示すベルベット生地を標準刺激とした。被験者には，VHI を感じる状態と同じように両手で挟んで滑らかさを感じ，図 5 の標準刺激で感じた滑らかさの程度を「7」として以後の VHI を評価させた。ここで，「7」段階とした理由は，4 を平均「普通」として，1~7 を 1：「かなり弱い」，2：「弱い」，3：「やや弱い」，5：「やや強い」，6：「強い」，7：「かなり強く本物のベルベット生地と同等である」というように判定させるためである。被験者は 10 人で，同じ実験を 1 人 10 回繰り返した。

実験の結果を図 6 に示す。縦軸と横軸にそれぞれ被験者の VHI 評価値と位相差をとって示す。図

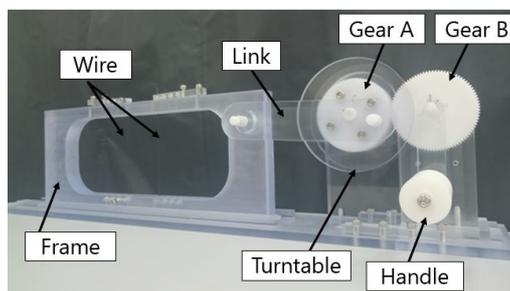


図 4 位相差呈示装置



図 5 標準刺激として用いた試料

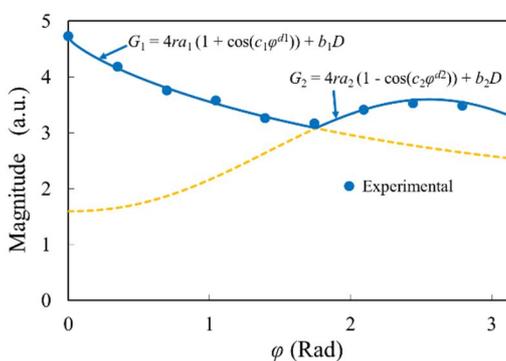


図 6 実験結果および定式化した Gestalt 要因による実験結果の予測

に示されているように、位相差が 0 のとき、二本の鋼線が同位相で運動しており、このとき最も高い評価値を示している、その値も 5 弱でやや強い VHI を示していることがわかる。また、位相差が ラジアン のとき、二本の鋼線の運動が逆位相の場合に相当している。この時の VHI 感はやや弱いから平均程度の強さの VHI 感を示すことがわかる。また、VHI 感は、位相差 0 から位相差が増加するに従って単調に減少するものの位相差が $\pi/2$ のときいったんは極小値をとりその後増加に転じて $3\pi/4$ のとき極大値をとるという変化を示している。図 6 の結果をみると、振動せずに整然とデータが並んでいるために、何らかの法則性があると考えた。

そこで、二本鋼線の間隔を変えずに移動する刺激を「平行移動の要因」： G_1 、二本鋼線の間隔が伸びたり縮んだりする刺激を「伸縮の要因」： G_2 として定式化を行った。定式化してパラメータ同定した結果が図 6 に示されている。図からわかるように位相差が $0 \sim \pi/2$ の範囲では、 G_1 が実験結果をよく表している。その後の $\pi/2 \sim \pi$ の範囲では、 G_2 が実験結果をよく表している。

研究代表者らは、 G_1 と G_2 により滑らかさが生起されるシステムが別々に存在し、強く反応したシステムが滑らかさの生起に関して支配的になっているものと考えている。すなわち式で表すと次式となる。

$$VHI = \max(G_1, G_2) \quad (1)$$

(2)触覚次元：次に、VHI が生起する感覚が現存する数ある材料の内では何に近いのか、あるいはドットマトリクスディスプレイ上の 2 本線が生起する感覚は、二本の鋼線が生起する感覚とどの程度類似しているのか調査するために、二本鋼線の VHI 感とドットマトリクスディスプレイの VHI 感が触覚次元上のどこに位置するのか調査する実験を行った。使用した形容詞対を表 1 に示す。

この実験では、一般的な供試材料として金属（銅・アルミ・ステンレス・洋白）、布（ベルベット生地・羊毛フェルト・デニム・ポリエステル・シルク）、プラスチック（発泡スチロール・アクリル・ポリ塩化ビニル）、紙（ティッシュ・コピー用紙）、木材（檜・パルサ材）、ゴム（ブチルゴム・ポリウレタンゴム）、皮革（羊皮・ヌバック・ベロア）の 21 種類を使用して 47 名の被験者に SD 法により表 1 の形容詞で判定させて触覚次元を求めた。実験結果から求めた 3 種類の潜在的因子に対して因子 1：

『Smooth/Rough 因子』、因子 2：『Soft/Hard 因子』、因子 3 『Sticky/Slippery 因子』と名付けた。

その因子空間上で、1 本線（VHI 無）、間隔の狭い 2 本線（弱い VHI ; W_i ）、間隔の広い 2 本線（強い VHI ; S_i ）の条件の実験をドットマトリクスディスプレイと二本鋼線のディスプレイを用いた実験を行った。

実験の結果を図 7 と 8 に示す。図 7 では第 1 因子（Smooth/Rough 因子）と第 2 因子（Soft/Hard 因子）を座標軸にとったときの評価を示している。また図 8 では第 2 因子と第 3 因子（Sticky/Slippery）を座標軸にとった場合を示している。

Table 1 Adjective pairs

Adjective pair		
Macro	-	Fine
Smooth	-	Rough
Prickly	-	No prickly
Uneven	-	Flat
Moist	-	Dry
Elasticity	-	Non elasticity
Hard	-	Soft
Warm	-	Cold
Sudden chill	-	Not sudden chill
No Friction	-	Friction
Sticky	-	Slip
Densely	-	Sparsely

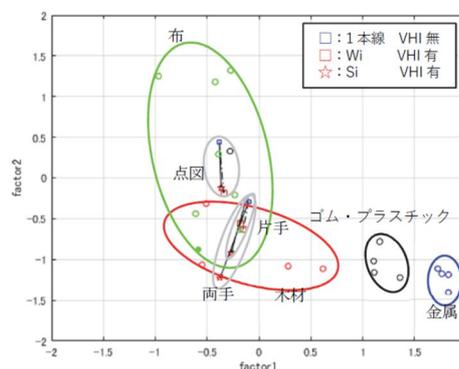


図 7 第 1 因子と第 2 因子平面内での結果

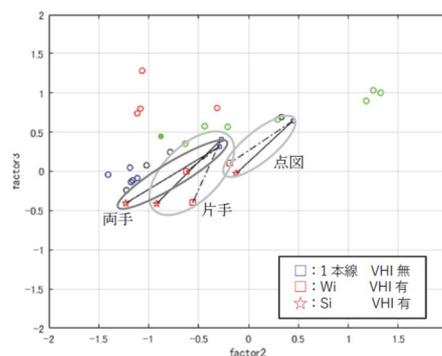


図 8 第 2 因子と第 3 因子平面内での結果

図7からわかるように、VHI 感は布の感覚の領域内にあるために、ワイヤディスプレイもドットマトリクスディスプレイも布の感覚に近い VHI 感を表示することがわかる。また、一本線から二本線に変化するとワイヤディスプレイもドットマトリクスディスプレイでも柔らかさ感が増すもののドットマトリクスディスプレイについては粗さ感がほとんど変化していないことがわかる。一方、図8についても、ワイヤディスプレイとドットマトリクスディスプレイの1本線から2本線の変化が直線で示されているが、それらをベクトルとしてみると、ディスプレイの相異に関わらずベクトルの方向はほぼ一致している。このことから、すべすべ感については両ディスプレイが生起する感覚は同等であるものと思われる。

(3)NIRS による賦活領域の観察：Gestalt の統合化過程を詳しく調査するにはブレインマシンインタフェース技術の活用は必須である。本研究のように点図ディスプレイなどを用いる場合 fMRI (機能的核磁気共鳴イメージング) が使用できない。そこで、本研究では電磁ノイズの影響の少ない NIRS (近赤外分光法) を用いる。図9には NIRS の外観とプローブの位置を示している。実験材料として、本物のベルベット生地と1本、2本、3本のワイヤーの全部で4種類を実験条件として選定した。ワイヤー2本の条件では、線間距離を60[mm]とし、3本の条件では30[mm]とした。これらに合わせて、ベルベット生地の幅は60[mm]とした。

実験参加者は20代の男性6名である。実験参加者には、あらかじめ実験内容の説明を行い、同意を得ている。

被験者間の比較を行うために、実験結果の解析には oxy ヘモグロビンの変化から z-score を計算してそれを用いた。z-score の計算では、各セッションで得られた oxy ヘモグロビンのデータに対して、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 の平均を被験者ごとに求めた。さらに、全被験者の z-score の平均を求めて、仮説：“4種類の刺激の母平均は等しい”に対する分散分析を行い、その結果求めたチャンネルごとの有意確率を図10に示す。赤い丸は特に有意確率が低いチャンネルを示し、左から ch13, ch53, ch66 である。これらのチャンネルのうち、2本のワイヤーにおいて最も z-score が大きくなっていったものは ch13 のみであった。ch13 の z-score 平均を図11に示す。z-score の値が大きいくほど脳が活性化していることを表す。ch13 は右中前頭回に含まれており、この結果は先行研究の右中前頭回が賦活したという結果とも一致している。

(4)まとめと今後の展望：新しい VR の実現に役立てるために、触覚の Gestalt 理論確立のための研究を進めた。研究の結果を以下に要約する。

- ・位相を変化に対するベルベット錯触の強度変化を調査して、平行移動の要因と伸縮の要因によってベルベット錯触の生起強度が予測可能であることを示した。
- ・触覚次元上で各種材質とベルベット錯触を評価した結果、ドットマトリクスディスプレイ上の二本線の往復運動で生起されるベルベット錯触は2本鋼線によって生起されるベルベット錯触と滑らかさの点で類似であることを示した。
- ・ベルベット錯触生起中の脳の賦活状態を NIRS によって観察した結果、ベルベット錯触中に右中前頭回が賦活することを示した。

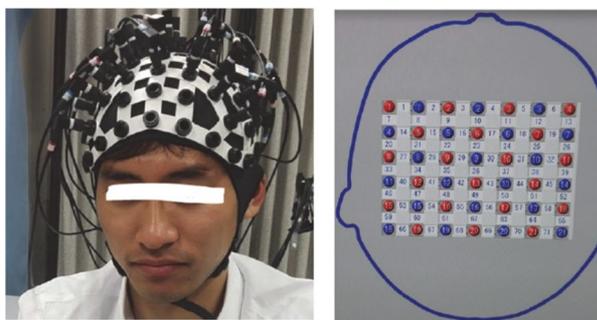


図9 NIRS とプローブの位置

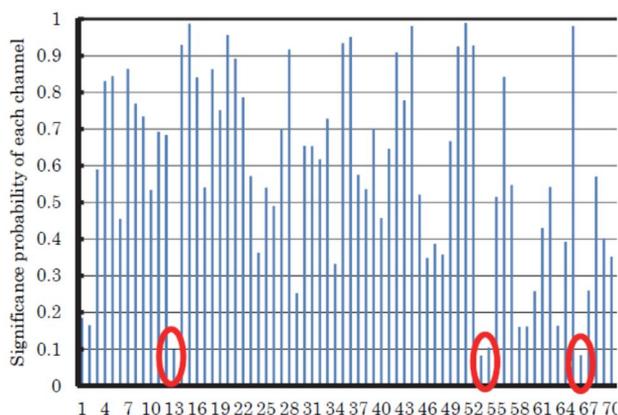


図10 各チャンネルの有意確率

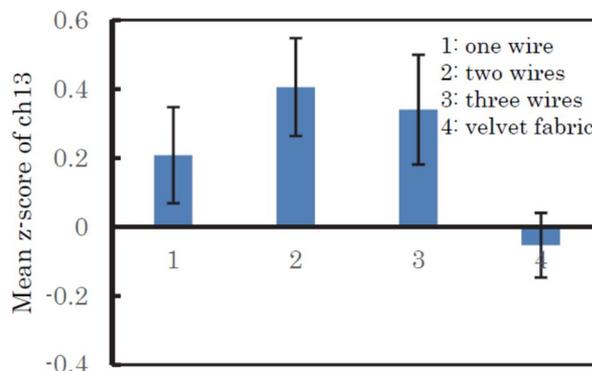


図11 ch13 の平均 z-score

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KOMURA Hiraku, NAKAMURA Toshiki, OHKA Masahiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Formulation of tactile Gestalt to express variation in velvet hand illusion caused by out-of-phase cycles of two wires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0088
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小杉弘明, 小村啓, 大岡昌博
2. 発表標題 LABNIRSによるVHI発生時の脳賦活状態の計測
3. 学会等名 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小村啓, 大岡昌博
2. 発表標題 VHIの機序解明に向けた材質次元によるVHIの評価
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Komura, T. Nakamura, M. Ohka
2. 発表標題 Formulation of Tactile Gestalt to Express Variation in Velvet Hand Illusion Caused by Out-of-Phase Cycles of Two Wir
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Komura, H. Kosugi, M. Ohka
2. 発表標題 Elucidation of Velvet Hand Illusion using LABNIRS toward a New Haptic Display
3. 学会等名 30th 2019 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Hanai, H. Komura, M. Honda, M. Ohka
2. 発表標題 Enhancement process of Kinesthetic Illusion caused by stimuli of vibrations and movies, The inter
3. 学会等名 Display Workshops (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小村啓, 久保拓夢, 本多正計, 大岡昌博
2. 発表標題 手首関節の運動錯覚に及ぼす筋腱の緊張状態の影響
3. 学会等名 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小村啓, 矢崎武瑠, 大岡昌博
2. 発表標題 心地よさを生起するHaptic デバイス開発に向けた触覚のGestaltの定式化
3. 学会等名 IIP2021情報・知能・精密機器部門 (IIP) 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 花井哲哉, 小村啓, 本多正計, 大岡昌博
2. 発表標題 滑らかさを惹起する触錯覚現象の機序解明に向けた基礎調査
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大岡昌博・小村啓
2. 発表標題 インフォメーションと触譜
3. 学会等名 人工知能学会行動研究会第34回ナチュラルコンピューティング研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大岡昌博
2. 発表標題 アクチュエーションと触覚
3. 学会等名 日本機械学会2020 年度年次大会 先端技術フォーラム - 触覚技術の展開（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大岡昌博	4. 発行年 2020年
2. 出版社 科学情報出版	5. 総ページ数 230
3. 書名 ロボット用触覚センサの設計法 - 実用ロボット・VR・触覚ディスプレイ開発へ向けて -	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	北田 亮 (Kitada Ryo)	南洋工科大学・School of Social Sciences・准教授	
連携研究者	鈴木 泰博 (Suzuki Yasuhiro) (50292983)	名古屋大学・大学院情報学研究科・准教授 (13901)	
連携研究者	小村 啓 (Komura Hiraku) (00881096)	九州工業大学・大学院工学研究院・助教 (17104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関