錯触により生じる表面の触感

大岡 昌博^a, 小村 啓^a

^a 名古屋大学 大学院情報学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

Surface Sensations Generated by Tactile Illusion

Masahiro OHKA^a and Hiraku KOMURA^a

^a Graduate School of Informatics, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601)

Keywords : Surface Sensation, Tactile Illusion, Psychophysics, Brain-machine Interface, Haptic Device, Tactile Display

1. はじめに

表面状態を確認するとき、光にすかししたりしてよく見るとかなり細かい凹凸までわかる。しかし、それだけでは十分ではなく、手で触れて確認することをよく行う。これは、ヒトがもつ習性に近いものと思われる。その証拠に、よく「触れないでください」という表示をよく目にする。このように、ヒトは触覚を使って表面粗さレベルの微小な凹凸、特徴的な出っ張りやへこみ、滑らかさ、硬さなど表面の状態の情報を獲得している。

一方、世間ではバーチャルリアリティ (VR; Virtual reality) が盛んに使われている。ゲームやエンタテインメントだけでなく、地震や火災などの疑似体験にも使われ、用途の広がりには留まることを知らないかのようなものである。その中で、視覚に対する VR は成熟してきたようで、10 年前と比べると価格もかなり低下して普通に購入できるレベルになっている。これに対して、Haptic デバイスと呼ばれる触覚の VR 機器については現在盛んに研究が進められているところである。研究領域で盛んであるということは、ユーザーが納得する製品が世の中に出ていない証左である。Haptic デバイスの中でも特に触感を再現する触覚ディスプレイについては、マイクロアクチュエータのさらなる発展が求められている。理想的な触覚ディスプレイの実現には、アクチュエータ研究¹⁾が不可欠であり今後の成果が期待される。

理想的なデバイスへの探求は重要である一方で、別のアプローチも考えられてきている²⁾。VR では、適切な刺激を人工的に作って、リアルな現実を感じさせているわけであるから、リアルな人工的刺激でなくても現実を感じさせてしまえば目的を達するのではないかという考えも成り立つ。そこで「錯覚」を利用する方法が浮かんでくるわけである。この方法は、理想的なデバイスへの探求と相反するのではなく、現状のデバイスの不完全性を補うことが期待されるために、両者は相補的な関係にあるものである。

さらに、例えば Kaniza の三角形³⁾のような錯覚現象を例にとると、同錯覚現象ではそこには存在しない主観的輪郭線

が現れる。それは部品単体では生ぜず、部品が集まって初めて感じられるものであるから、大脳の中で情報が統合化される過程で生じる現象である。すなわち、錯覚を応用した VR の研究は、突き詰めると上の統合化過程の仕組みを解明する手がかりを得ることも期待される。

そこで本稿では、触覚の錯覚(錯触)を取り上げて、滑らかな表面状態を感じさせる方法について紹介する。初めに、錯触現象をいくつか解説した後に、ベルベット錯触に焦点を当てて、心理物理学実験法やブレインマシンインタフェース (BMI) を用いた実験結果について解説する。その後に、ベルベット錯触を制御可能な触覚ディスプレイについて紹介する。

2. 平面状態に関係する錯触現象

2.1 Ridge-trough illusion⁴⁾

視覚の錯覚である錯視については、これまでに色々なものが発見されている⁵⁾。これに対して、錯触については錯視に比べると数が少ないものの、それでも相当数のものが知られている。Hayward⁴⁾が種々の錯触についてまとめているので、詳しく知りたい方は参照されたい。本稿では Hayward がサーベイした錯触の中で、特に表面状態を錯覚させる錯触を取り上げて概説する。なお、本稿で主題としているベルベット錯触については、Hayward は取り上げていないので、この章の最後で詳しく述べることにする。

まず、Ridge-trough 錯触を紹介する。Trough とは、南海トラフなどの地震関係の用語で知られたあのトラフで気圧の谷のように低くなった箇所のことである。紙などに軽い粘着性のある固形糊のようなものを細い矩形状につける、あるいはその逆に全体に糊が塗布されているが細い矩形状の部分だけ糊がついていない状態にしておく。被験者がその矩形状の部分で指でなぞると、前者の場合は出張って感じ、後者の場合は引っ込んで感じるという錯覚である。同じ面であっても、指をなぞった場合に抵抗がある場合と少ない場合では、せん断方向の情報の変化にも関わらず凹凸として感じる点が興味深い。

2. 2 Comb illusion⁴⁾

Comb とは櫛のことである。櫛の歯の先に指を押し当てた状態で、根元をボールペンの先などでこすると、歯が飛び出て感じる現象である。根元をこすると指に対して歯先はせん断方向の振動をして、皮膚に対して垂直振動はしないのにも関わらず凹凸を感じる。この現象もせん断方向の情報が凹凸感を生じさせるものであり、凹凸感を生成する場合にせん断振動でも同じ効果がある点で VR 機器開発のヒントとなっている。

2. 3 Fishbone illusion^{4),6)}

金属などの平板に、人差し指で一撫でできるサイズの魚の骨のようなパターンを作る。すなわち、幹は直線でありその両側に幹にから垂直に生えた直線の枝が数本、幹に対して左右対称に並んでいるパターンである。幹と枝の表面は完全に平坦に加工されている。被験者が幹を指先で撫でると、幹と枝の高さは変わらないのに、幹の方が引っ込んでいるように感じるという錯覚である。この錯覚は、前述の Ridge-trough 錯触で言えば、幹が上述の細い矩形部分に相当し、周りの枝の部分が触ったときの抵抗になるために、Ridge-trough 錯触と同様の現象が生じたものと解釈される。

2. 4 皮膚うさぎ^{4),7)}

皮膚の上で、ある点をトントンと軽くタッピングした後に、間髪を入れず 10 cm ほど離れた別の点をトントンと軽くタッピングすると、本来刺激を与えていない 2 点間に刺激が兎のようにピョンピョンと移動して感じる現象である。この現象自体は古くから知られているようであるが、Miyazaki らはさらにこの兎の感触が身体から飛び出る現象を報告している⁷⁾。すなわち、左右の人差し指の間に平板を細く切った棒(アルミニウム製、100×10×5 mm)を設置して、両方の人差し指に先ほどの皮膚に与えた刺激と同じタイミングで刺激を与えると、棒の上を刺激が移動していくように感じるということである。

2. 5 ベルベット錯触 (Velvet Hand Illusion; VHI)^{2),8)~10)}

これは、金網を両手でこすると両手の間に滑らかなベルベット生地のような感触を得るという錯覚である⁸⁾。このとき、両手は左右同期して動かすことが肝要であり、両手の位置関係をずらさずに動かさないとこの感覚は生じない。

サンフランシスコの博物館 Exploratorium (https://www.exploratorium.edu/xref/exhibits/velvet_hands.html; 図 1) には、

図 1 Exploratorium 外観

図 2 Exploratorium に展示されている Velvet hands

2001 年ごろから VHI を生じる装置が展示されている。同博物館では Velvet hands と呼び、展示されている様子を図 2 に示す。網目は、テニスラケットのガットの網目よりかなり広い。網目のタイプ(中央の円形の木枠)と平行線のタイプ(向かって右の小さな木枠)が展示されていて、両方とも VHI をよく感じることができる。

VHI の魅力は、滑らかな面を演出できる点にあり、しかも我々の両手の間にその面が実際には存在しないという点にある。すなわち、「ない」という状態から「ある」という状態を演出できる。このことは、VR において仮想の面の呈示に有効であると思われる。

望山らが行った初期の研究では、一本の鋼線では生じず、二本以上の鋼線で発生すること、片手では生じず両手では生じて生じること、二本の鋼線が手の動きに対して垂直であると強く発生することなどが明らかにされた⁸⁾。その後、著者らによって、詳細な検討が進み^{9),10)}、鋼線間距離と移動ストロークの比と VHI の強さの関係、移動速度と VHI の強さの関係などが明らかにされた。これらについては、次章でさらに詳しく論じる。

3. VHI の特性

3. 1 線間距離とストロークが VHI に及ぼす影響^{9),10)}

前述の Velvet hands の網目ではずいぶん粗いものを使用している。フェンスによく使用される六角形の金網でも VHI を体験することは可能であるが、ある程度間隔をとった二本の鋼線の方がより強い VHI を体験することができる。そこで、Rajaei らは二本の鋼線の線間距離 D が変化すると VHI にどのような影響があるのか調べた⁹⁾。このため彼らは、線間距離を種々変えた枠を多数用意して、モータドライブの X テーブルに設置して、試料の運動速度も統制して実験を行った。このときの心理物理実験として Thurstone の一対比較法¹¹⁾を採用した。この実験では、 D の異なる一対の試料の VHI を評価して、どちらが強い VHI か被験者に判定させた。すなわち、総当たりのリーグ戦をやって勝率を競う実験である。その時の勝率は選択確率と呼ばれ、その値が高いほど強い VHI が惹起されると判断する。

実験結果を図 3 に示す。図からわかるように、 D の変化に対して選択確率は大きく変化して、 D の増加に伴って選択確

図3 線間距離 D の変化に伴う VHI の変化 図4 VHI と r/D の関係

率はほぼ比例している。ここで、 D をどの程度まで大きくすると最大の VHI 感が得られるのかという疑問が生じる。宮岡は、 D を十分大きくとれる装置を製作して、それを用いて D と VHI 感の関係を調べた¹²⁾。それによると、 D が 100 mm のとき最大の VHI 感が得られるようである。宮岡は、それよりも大きい D では、VHI 感は D の増加に伴い弱くなることを報告している。

また、Rajaei らは D を固定する一方でストローク r を変化させて、VHI 感を評価した⁹⁾。その結果を図4に示す。横軸は、ストローク r を D で除して得られる比 r/D である。図4からわかるように、 r/D が 1.25 で選択確率が最大になってそれより r/D が大きくなってもほぼ一定値をとるという結果が得られた。

次に、Rajaei らは掌の VHI についてステージの移動速度を種々変化させて、一対比較法で VHI 感の大きさを評価した¹⁰⁾。その結果を図5に示す。図5からわかるように、速度が 80 mm/s のとき最大の VHI が生じている。80 mm/s のとき、0.8 mm の鋼線が皮膚上を走行することにより皮膚に加

図5 鋼線の平均移動速度が選択確率に及ぼす影響

える振動刺激の振動数は 50 Hz である。

この結果を元に、4 種類存在する機械受容単位¹³⁾(触覚を感知するシステム)のうちどれが VHI に関与しているのかを考察する。この周波数の振動の感知に関連する機械受容単位は、速順応 I 型単位 (FA I, 検出範囲: 3 ~ 40 Hz) と速順応 II 型単位 (FA II, 検出範囲: 40 ~ 500 Hz) である。したがって鋼線が動くという信号は、FA I と FA II を通じて獲得していると思われる。また、それと同時に、手を合わせることによって生じる一定の圧力は、遅順応 I 型 (SA I) で感知されているので、SA I からの信号がある状態で FA I と FA II の信号を受けて初めて VHI が生じるということがわかる。FA I, FA II および SA I の統合によって錯覚が現れるということは、大脳での統合の結果生じた錯覚であることが推察される。

3. 2 VHI の神経基盤の調査^{14), 15)}

望山らは、機能的核磁気共鳴装置 (fMRI) を用いて VHI が惹起されている時の脳の賦活状態をはじめて報告した¹⁴⁾。彼らの報告では、VHI 惹起時には第一次体性感覚野、小脳、運動前野、補足運動野が賦活するとしている。

Rajaei らは、さらに詳細に VHI の機序を調査する研究を行った¹⁵⁾。彼らは、3 テスラ fMRI 装置 (Verio, Siemens 社) を用いて VHI 発生時の脳の賦活状態を計測した¹⁵⁾。その際に、すべての材料をエンジニアリングプラスチックとカーボン繊維となるように刺激装置を製作して調査に供した。実験では、健常者 29 名が参加して、①強い錯触条件 (Strong illusion, Si), ②弱い錯触条件 (Weak illusion, Wi), ③本物のベルベット生地を使用する条件 (REAL), ④何も触れない条件 (Nw) を設定した。被験者に前述の①~④の刺激のいずれかを両手に呈示した後、被験者は「自分の皮膚でない素材を格子の中にどの程度感じたか」について、その強さを 10 点満点で回答した。

得られた MRI のデータから、Wi より Si で強く活動する領域 (Si > Wi) として、第一次体性感覚野に相当する中心後回の一部が活動することがわかった。またその活動のレベルは、先ほどの被験者が感じた錯触の主観的レベルと高い相関があった。また、REAL 条件と Nw の比較 (REAL > Nw) を行い、その活動と Si-Wi の活動の重複を確認した。また、Si と

REAL 条件を直接比べ、Si 条件では前頭から頭頂領域を中心に広範な脳活動が観察された。

さらに解析を進め、第一次体性感覚野(中心後回)で獲得した触覚情報が上頭頂小葉、頭頂弁蓋部、中心前回および小脳と連携して素材を感じるという機序を世界に先駆けて明らかにした。VHI とリアルなベルベット生地により感じる滑らかな触覚は上述の神経ネットワークにより惹起されるもので、前節で議論された統合の過程をより具体的に示したものと考えられる。

3. 3 位相差と VHI の関係¹⁶⁾

ここまで述べてきた VHI の実験では、二本の鋼線が絶えず同方向に運動している場合を調べてきた。二本の鋼線が逆方向に運動する場合に VHI は生じるのであろうか？ Mochiyama は逆位相の場合でも VHI が生じるとのことを報告している⁸⁾が、位相差を連続的に変化する場合どのように VHI 強度が変化するかは不明である。その疑問に答えるために、著者らは、図 6 に示すように一本の鋼線を張った枠を直線方向の単振動運動ができるようにして、その枠を二つ設置して両者の運動の位相差を変更可能とする装置を開発した。回転盤に固定された歯車 A とハンドルが接続された歯車 B が噛み合うことでフレームが直線方向に駆動される仕組みとなっている。それぞれのフレーム用の歯車 A と歯車 B の噛み合わせを一歯分ずつずらすことで、2 本のワイヤーの往復運動の位相を 4 度刻みで変更することができる。実験では位相を 0 度から 180 度まで 20 度刻みで変化させた。

実験の手順は、本物のベルベット生地を標準刺激として呈示して、図 6 の位相差 VHI 呈示装置により位相差刺激を比較刺激としてランダムに呈示する。評価方法は間隔尺度法を採用した。実験参加者にはベルベット生地の刺激強度を 7 と

図 6 位相差 VHI 呈示装置

図 7 位相差と VHI 強度の関係

して、それぞれの位相差刺激を 0～7 の間の実数で答えさせた。

実験参加者 10 人に対しそれぞれ 6 回実験を行った合計 60 回分のデータの平均値を図 7 に示す。錯覚強度は、位相差が 0 度から 80 度の間で位相の増加に伴って線形に減少していることがわかる。しかし位相差 100° 以降はほぼ変化がない。位相差 100° 以降のデータ間に有意差はなく錯覚強度は位相差に依存しない傾向があることがわかる。

以上のように、同位相の場合強さが 5 程度だったものが、逆位相になると低下するものの 3 程度の強さがあることがわかる。したがって、VHI の惹起条件として鋼線が同方向であるという条件は必ずしも必要でないことがわかる。従来 VHI が惹起される解釈として、「同方向に動く二本の鋼線が囲む領域が運動しているにも関わらず両手の間に相対運動がないから摩擦零の面を感じる」ということが考えられてきたが、それだけでは説明しきれていないことがわかる。

3. 4 NIRS による VHI の評価¹⁷⁾

fMRI は、空間分解能が高く深部脳の賦活も計測できる優れた測定方法である。前述の Rajaei らによって VHI における滑らかさの感覚の惹起の機序が示された。しかし、fMRI では持ち込むことの可能な機材に制限があるので、触覚ディスプレイに触っている時の脳の状態を評価することはできない。そこで、著者らは触覚ディスプレイにより惹起される VHI 感の評価に近赤外線分光法(NIRS)を用いた評価法が適用できるか調査を行っている¹⁷⁾。

この実験では、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 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。ワイヤー感はあるが VHI は生じない装置としてワイヤー 1 本から成る装置を作り、これを比較対象とした。被験者は、一つの刺激に対して、①休憩、②安静、③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 8 に示す。

図 8 両側全頭前野における脳賦活状態

この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。fMRIにより同様な評価を行った前述の Rajaei らも「Si と REAL 条件を直接比べ、Si 条件では前頭-頭頂領域を中心に広範な脳活動が観察された」¹⁵⁾とあるので、NIRSで観察された前頭前野における賦活はfMRIによる実験結果と一致している。全頭型のNIRSの結果を待つ必要があるが、この結果は触覚ディスプレイによる VHI の実験にもNIRSの使用が適用できる可能性があることを示している。

4. ハプティック・デバイスによる VHI の制御

4.1 掌呈示触覚マウス²⁾

VHI をVRで利用するには、鋼線ではなく可能な限り汎用のハプティック・デバイスで VHI が再現できると都合がよい。そこで、盲人に図形を呈示するための点図ディスプレイに注目し、それに二本の鋼線を模した凸部を形成してそれを運動させれば、 VHI が生成できるのではないかと考えた。ただし、点図ディスプレイのドットの間隔は2.4 mmと指先の二点弁別閾よりやや大きく、指先にリアリティのある凹凸を形成するには間隔が広すぎる。しかしながら、掌の二点弁別閾は指先より広いので、指先に呈示するのではなく、掌に限定すればVR機器として十分使用できるのではないかと考えた。さらに、都合のよいことに VHI は指先より掌の方が生じやすいので、 VHI 呈示にはこの点図ディスプレイの使用は適当である。

以上の考えのもとに、Rajaei らは掌呈示触覚マウスを製作した²⁾。この触覚マウスは、光学マウスと点図ディスプレイを物理的に接続することによって構成されている。点図ディスプレイの長方形の呈示面の範囲が仮想物体の上を通過すると仮想物体の形状と同じ形状がドットで呈示面に形成される。ドットの突き出し量とドットの直径はそれぞれ0.7 mmと1.3 mmであるために、二本の直線を呈示してそれを往復運動させると直径約1 mmの鋼線に触るときの感覚を模擬できる。被験者は、呈示面の上に手を置き上述の二本線の往復運動を感じると、 VHI に酷似した感覚が生じる。この場合は、相手が自分の手でなく呈示面のドットのみで穴が多数明いたプラスチック板であるので、両手で生じる VHI とは多少異なる。しかし、この点図ディスプレイに前述の二本線の往

復運動を生じさせて呈示面に掌を当てると、プラスチックの板が滑らかで柔らかくなった感触が生じる。

4.2 他の試料との比較²⁾

VHI の生成実験では、前述の掌呈示触覚マウスは固定された状態で使用した。マウスを動かさない状態で二本線を往復運動させた。このようにして生成された VHI 感と他の試料を比較することによって、この掌呈示触覚マウスで VHI 感が呈示できるかどうか検討した²⁾。比較として用いた試料は、①本物のベルベット生地、②金網(フェンスによく使われる緑色の六角形の金網)、③二本鋼線である。

実験では、上の①～③に加えて、④触覚マウスをランダムに被験者に提供し、掌に感じる滑らかさを評価した。①～④の試料を順に呈示して、最初に呈示されたものを1として、二番目以降の程度を評価した。より滑らかであれば、1より大きい数字で答えさせ、滑らかさが減れば、小さな数字で答えさせた。

試料の呈示順をランダムとすると24通りとなるので、上の4回1組の呈示を24回繰り返した。10人の被験者により評価してベルベット生地が1となるように正規化した。その結果最も評価値が高かったのは③の二本鋼線で、④触覚マウス、②金網の順であった。統計解析を実施した結果、触覚マウスと二本鋼線、ベルベット生地と触覚マウス、ベルベット生地と二本鋼線の間に有意な差は認められなかった。金網と触覚マウスの間には有意な差が認められたので、触覚マウスは金網よりはっきりとした VHI を呈示できることがわかった。

4.3 VHI 感の制御性²⁾

点図ディスプレイで VHI を生じさせることが可能であるとはっきりしたため、今度は VHI の強度を変化できるかどうかを検討した。この検討では、線間距離 D を固定して、往復運動のストローク r を種々変更して、Thurstoneの一对比較法により検証した²⁾。その結果、 r/D が0～1.5の条件では、選択確率と r/D の関係はほぼ正比例であったが、 $r/D=1.5$ 以降のほぼ一定の選択確率であった。したがって、 $r/D < 1.5$ では、この点図ディスプレイにより VHI 感を制御できる。

さらに、著者らの後続の研究では、上述の点図ディスプレイにより惹起される VHI 感をより強くするために、呈示面積を2倍とするために前述の点図ディスプレイを2個並べて使用している(図9)¹⁸⁾。この点図ディスプレイを用いて VHI を生じるのに必要なドット間隔の最大値、およびドットが形

(a) 外観

(b) 使用法

図9 点図ディスプレイ (a)外観, (b)使用法

成する線分の長さの最小値を求めた。その結果、前者は 9.6 mm であり、後者は 29 mm であることがわかった。これらの数値は、滑らかさを呈示する VR 機器を設計する際の基本データとして活躍が期待される。

5. おわりに

本稿では、アクチュエーションにより皮膚に特定の刺激を与えると、本来そのような刺激では生じないと考えられる錯覚が生じる現象について紹介した。その中でも、表面の滑らかさを呈示できる VHI に着目してこれまでの研究成果を紹介した。すなわち、心理物理学実験によって明らかになった VHI の発生要件から、VHI が惹起される機序を明らかにするための大脳の神経ネットワークを調査した結果までを紹介した。さらに、様々な凹凸刺激のパターンを表示できる点図ディスプレイを用いて VHI を惹起させる試みについて紹介した。点図ディスプレイのドットの間隔は、まだ十分狭いというわけではないので理想的なものではない。しかし、今後のアクチュエータ技術が向上して、触覚受容器の分布の感覚より十分狭いディスプレイが開発されれば、ざらざらからすべすべまで様々な表面の触感が掌だけでなく指先にも呈示できるハプティック・デバイスが開発されることが期待される。

(Received November 9, 2018)

文 献

- 1) 樋口俊郎, 大岡昌博(監修); アクチュエータ研究の最前線(エヌ・ティー・エス, 2011).
- 2) N. Rajaei, M. Ohka, H. Nomura, H. Komura, S. Matsushita, T. Miyaoka; *Inter. J. of Advanced Robotic Systems*, **13**, (5), 1 (2016).
- 3) G. Kanizsa; *Organization in Vision: Essays on Gestalt Perception*, (視覚の文法－ゲシュタルト知覚論－, 野口監訳(サイエンス社, 1979).
- 4) V. Hayward; *Brain Research Bull.*, **75**, (6), 742 (2008).
- 5) 北岡明佳; だまされる視覚 錯視の楽しみ方(株化学同人, 2007).
- 6) 中谷正史, 梶本裕之, 川上直樹, 舘 暉; 日本バーチャルリアリティ学会10回大会論文集, 201 (2005).
- 7) M. Miyazaki, M. Hirashima, D. Nozaki; *J. of Neuroscience*, **30**, (5), 1856 (2010).
- 8) H. Mochiyama, A. Sano, N. Takasue, R. Kikuue, K. Fujita, S. Fukuda, K. Marui, H. Fujimoto; *Proc. of World Haptic Conference*, 645 (2005).
- 9) N. Rajaei, Y. Kawabe, M. Ohka, T. Miyaoka, A. Chami, Y. Hanafiah; *Inter. J. Social Robot*, **4**, 77 (2012).
- 10) N. Rajaei, M. Ohka, T. Miyaoka, Y. Hanafiah, A. K. Makhtar, S. N. Basir; *Inter. J. on Smart Sensing Intelligent Systems*, **6**, (4), 1516 (2013).
- 11) G. A. Gescheider; *Psychophysics: The Fundamentals*, Third ed. (Lawrence Erlbaum Associates, 1997).
- 12) 宮岡 徹; 日本心理学会第75回大会, p. 548 (2011).
- 13) L. A. Jones, S. J. Lederman; *Human Hand Function*, p.25 (Oxford University Press, Inc., 2006).
- 14) 望山 洋, 佐野明人, 武井直行, 藤本英雄; 第6回計測自動制御学会制御部門大会(2006).
- 15) N. Rajaei, H. K. Takahashi, T. Miyaoka, T. Kochiyama, M. Ohka, N. Sadato, R. Kitada; *Hum. Brain Mapp.*, **39**, (12), 4787 (2018).
- 16) 小村 啓, 中村俊貴, 宮岡 徹, 大岡昌博; 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C1-02 (2017).
- 17) 大岡昌博, 三井雄介, 小村 啓; [No.18-1] 日本機械学会2018 年度年次大会 講演論文集, J1620001 (2018).
- 18) H. Komura, M. Ohka; 2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence & Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), 58 (2018).