

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630083

研究課題名(和文) 道具を操る分布触覚の機能解明と拡張技術の提案

研究課題名(英文) Investigation of Multi-Point Cutaneous Activity on Skin and Proposal of Sensory enhancement technologies for Tool Manipulation

研究代表者

昆陽 雅司 (Konyo, Masashi)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20400301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトが道具に加わる力を知覚する際の皮膚感覚の関与と役割を実証することを目的として研究をおこなった。ペン状の物体を把持した際の、接触の分布圧を計測する装置TAKO-Penを開発するために、外力と分布圧の関係を剛体の多点接触モデルにより近似し、吸引圧により、外力を加えずに皮膚刺激を与える触覚ディスプレイを開発し、分布圧の変化によって、外力の方向、および強度を制御できることを確認した。また、吸引圧ディスプレイおよび外部負荷によって皮膚および深部感覚を個別に刺激可能な条件下で、力の記憶および再現実験を行うことで、道具に加わる外力の知覚とその際の皮膚感覚と深部感覚の関係を調査した。

研究成果の概要(英文)：Humans can perceive external forces applied on a grasping tool based on skin pressure distribution at multiple contact areas during grasp. We have developed the TAKO-Pen, a pen-type pseudo-haptic interface using suction pressure stimulation on each skin. We confirmed that an appropriate quadrant values could represent the magnitudes of forces in multiple directions. Experimental results also showed that the proposed method could represent arbitrary directions between a pair of the orthogonal axes. This study also experimentally investigates the perceptual mechanism of the force applied to a grasping tool based on the hypothesis that perceptual force is mediated by the combination of cutaneous and kinesthetic sensation. The results support the hypothesis that the combination of cutaneous and kinesthetic sensation is used for the perception of force.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：人間機械システム

1. 研究開始当初の背景

皮膚に振動刺激やせん断変形を与えることによって、実際の力を発生せずに疑似的な力覚を呈示するという試みがいくつか報告されている。筆者らも、皮膚に与える振動刺激によって、摩擦や慣性・粘性など運動中に物体から加わる抵抗力の知覚を錯覚させることに成功している^{①②}。

筆者は、皮膚刺激による力覚知覚は、単なる錯覚ではなく、皮膚本来の機能であると考えている。すなわち、皮膚感覚は、これまで力覚として区別されてきた深部感覚 (=筋、腱などの受容器で感じる感覚) では不足する感度と応答速度を補完する「力覚」センサとして機能していると考えられる。

本研究は、このような皮膚で感じる力覚に関して、これまで明らかにされてこなかった、多点で接触する分布的な皮膚感覚によって得られる高次の力覚認知機能について探求する。従来から道具を把持した際の「身体の延長」に触覚が関与することは知られているが、分布的な触覚がどのように統合的に機能するかといったメカニズムや、それを考慮した応用研究などは報告されていない。

2. 研究の目的

ヒトが道具に加わる微細な力をあたかも身体の一部のように感じながら操ること (=身体の延長) ができる理由を探求し、皮膚の分布的な触覚の関与と役割を実証することを目的とする。具体的には、(1) 心理物理実験による「身体の延長」の知覚能力の検証、(2) 皮膚の分布圧計測と多点接触モデリング、および (3) 吸引触覚ディスプレイによる触覚分布の再現・拡張によって、分布的な触覚が「身体の延長」に貢献していることを実証する。さらに、得られたメカニズムを元に、道具に加わる触覚をより高感度に増強する新しい触覚デザイン法を考案することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 吸引圧刺激による疑似力覚呈示

① 従来手法

著者らは道具把持時のような複数接触点に、圧力分布刺激を呈示することで疑似的な力覚表現を試みた^{③④⑤}。圧力分布の組み合わせで力とトルクの表現が可能であること、それら6自由度表現は最小8分割の異なる分布で表現可能だということを示した。この知見と力覚センサを組み合わせ、ペン先に加わる外力を拡張する触覚インタフェース TAKO-Pen (Tactile Augmented Kinesthetic IlluSiOn Pen) を提案した。

図1に TAKO-Pen 外観を示す。ペンの軸方向を Z 軸、把持する方向を Y 軸と定義した。本インタフェースは、母指と示指が対面する形で把持し、把持部分に触錯覚現象を誘発するサイズの吸引穴を多数配置している。片側の接触部ごとにペン内部で圧力室が4分割さ

れており、両指で計8箇所の負圧を独立に制御する。力やトルクはこの8箇所の刺激呈示強度を組み合わせることで表現できる。

しかしこれまで実装された疑似力覚表現はヒューリスティックに求められていたため、精緻な力覚表現ができなかった。さらに、直交座標系における X, Y, Z 軸 (以下、座標軸という) 方向以外の力覚は表現できないといった問題点があった。

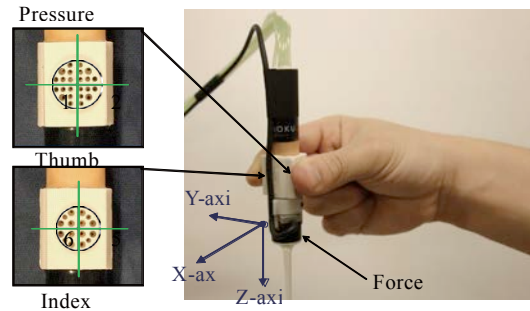


図1 疑似力覚インタフェース TAKO-Pen

② 4象限表現法の提案

本研究では、8分割の圧力刺激による全方位力覚表現手法を提案する。そのために、ヒトの知覚メカニズムを考慮した座標軸上の力覚表現手法を提案する。具体的には、心理物理評価と皮膚変形解析を用いて、力学情報と圧力刺激を結びつけることで、座標軸各軸の表現手法を導出する。その後、各軸の表現式を組み合わせることで最終的に全方位力覚表現を求める。

TAKO-Pen は負圧を用いて圧力分布を呈示する。ヒトは一定口径以下の穴から皮膚を吸引されると、あたかも棒状の物体に押されたような錯覚を得る^⑥。この現象は皮膚の静的な変形に反応する触覚受容器であるメルケル小体の活動量が、皮膚内部のひずみエネルギー密度 (Strain Energy Density: SED) と相関があることに起因する。ある条件下では、メルケル小体の分布位置に生じる SED が、棒状の物体を押し込んだ際の SED とほぼ同様の傾向を示すために起こる。そのため、メルケル小体の分布位置の SED に着目することが本手法への必要な手がかりとなる。

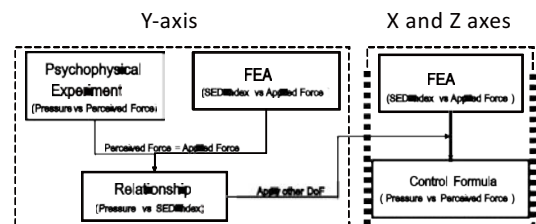


図2 SEDに基づく吸引圧導出過程

図2に SED に基づく吸引圧刺激式導出の流れを示す。まず、心理物理評価を用いて、圧力刺激と知覚される疑似外力の関係を取得した。その際、並進力 F_y を表現する圧力刺

激を被験者に呈示した。Fy は、ペンを把持する方向の力であり、片側1指の接触面に均一な SED 分布が生じるため呈示刺激の分布が明らかであった。その刺激と同等だと知覚する並進力を被験者に呈示してもらうことで、関係式を取得した。次に、ペンを把持した際の母指変形解析を用いて、外力と SED の関係を取得した。指の形状を模した線形弾性モデルへ各並進力(Fx, Fy, Fz)を負荷させ、メルケル小体位置の SED 分布を取得した。図3にZ軸方向に0.6Nの外力を与えた際の母指の SED 分布を示す。この図を見てわかるとおり、得られた SED 分布は複雑であり、そのまま吸引圧刺激で表現するのは困難である。

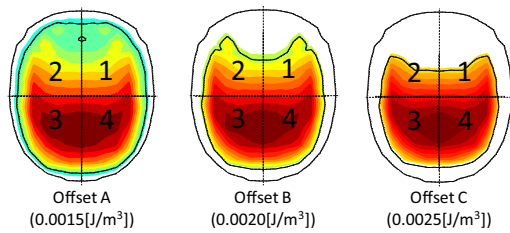


図3 接触面のZ軸方向のSED分布の例(Fz = 0.6N)

そこで、取得した SED 分布を本手法に適合するため8箇所値へと単純化する。単純化する際、SED 分布の分布的な特徴や局所的な特徴を考慮しながら、2指4象限に分割した代表値を複数提案した。各代表値に基づいた圧力刺激を実際に被験者に呈示、それらと比較した結果、SED 分布のピークと平均値の特徴量を組み合わせた代表値が精度の高い表現力をもつことがわかった。以上2つの検討から得た外力を等価とみなすことで、圧力刺激と SED の関係式が導出できる。この関係式を他軸(Fx, Fz)の SED の代表値に代入することで、基軸3方向の並進力を表現する圧力刺激式が求められる。

③ 全方位力覚表現法

②で提案した3軸の吸引圧刺激法を組み合わせ、全方位の力覚を表現する方法を提案する。まず、呈示したい方向の外力を3軸に分解する。3軸方向に分解された力を各軸の吸引圧刺激式に代入する。そして得られた3軸の吸引圧式を足しあわせたものがその力の方向を表現する吸引圧刺激とした。

(2) 筋活動が道具を介した外力知覚に及ぼす影響の調査

① 目的

ヒトは、道具を把持し操る時、動作を行いながら道具に加わる外力を知覚利用している。力の知覚は、筋や腱、関節に存在する深部受容器からの情報が寄与することが知られており、道具を介した外力の知覚においてもそれらの受容器の関与が考えられる。しかし、生成される動作は複数の筋が統合的に活動した結果であり、生成動作の違いによつ

て深部感覚も異なる。つまり、外力の知覚と深部感覚の関係は、単一の筋活動が知覚する力を決定するような単純な関係ではないと考えられる。

本研究では、道具に加わる外力の知覚と皮膚感覚と深部感覚の関係を明らかにするため、外力の記憶・再現タスクに着目する。Shergillらは、自らの運動を伴わず受動的に記憶した力は、同じく受動的に再現した力とほとんど等しくなる一方で、運動を伴って能動的に再現した力に比べ小さくなる現象を報告している^⑦。本研究では、吸引圧ディスプレイによって皮膚感覚を制御する。外部荷重によって深部感覚にバイアスを付加可能な条件下で、外力の記憶・再現タスクを行う。皮膚感覚と深部感覚を可能な限り独立に刺激することで、外力の知覚における皮膚感覚と深部感覚の寄与に関する次の仮説を実験的に検証する。

② 実験方法

実験装置を図4に示す。図4(a)に示すように、DCモータを制御することで示指の腹に対して1方向の力を発生させるとともに、吸引圧による擬似力覚を提示することができる。また、ロードセルによって発生力を計測する。それに加え、図4(b)に示すように、滑車と重りによって実験参加者の手に負荷を掛けることで、深部感覚への刺激を与える。

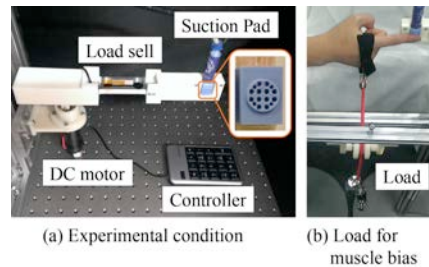


図4 筋バイアス吸引圧呈示実験装置

本実験では、示指の腹に垂直な方向への擬似的な力覚を利用し、可能な限り深部感覚が変化しない条件下で、皮膚感覚のみを刺激することで実験参加者が知覚する力を変化させる。

実験参加者は、右手を利き手とする健康な20代の男性2名である。実験の開始前、参加者は台に右腕を置いた状態で右手示指の腹が吸引部分に触れるように待機した。また、指腹接触面からの空気漏れによって吸引圧が不安定になることを避けるため、DCモータによって3Nの負荷をあらかじめ加えた。

実験では、筋バイアスの有無および、再現時の能動・受動性の異なる4種の条件下で、以下に示す力の記憶および再現タスクを行った。

記憶タスクでは、参加者は吸引圧による皮膚刺激(16, 27, 36, 47 kPaの5種)による擬似的な力を5s間記憶した。このとき、条件1および2では、皮膚刺激に加え重りと滑車によって一定の負荷(4N)が与えられ、条

件3および4では、皮膚刺激のみが加えられた。記憶時、掌屈方向の出力に深く関わる尺側手根屈筋および橈側手根屈筋の活動を筋電計を用いて計測した。

再現タスクでは、皮膚刺激および筋バイアスを取り除いたのち、記憶した擬似的な力を再現した。このとき、条件1および3では、参加者が能動的に示指を装置に押し付けることで、記憶した力と同じだと感じる力を発生させた。また、条件2および4では、手元のキーボード入力によってDCモータの出力を調整することで、記憶した力を再現した。

4. 研究成果

(1) 吸引圧刺激による疑似力覚呈示

① 4象限表現法の実現

3.(1)②で述べた提案手法では、これらピークと平均という2つの特徴量に着目してSEDの分布を表現する手法を考案した。この代表値を4象限代表値(Quadrant Represent Value; QRV)と名付ける。QRVに基づいてX, Z軸の吸引圧式を求める。図2の導出で示したように、心理物理評価から吸引圧刺激 $P_{suction}$ と被験者が知覚した外力 $F_{perceived}$ の関係を得た。また、数値解析からQRVとペンに与えた外力 $F_{applied}$ の関係を得た。ここで、力成分 $F_{perceived} = F_{applied}$ とみなすと、Y軸に関して、

$$QRV = 3.35 \times 10^{-5} \times P_{suction} + 2.33 \times 10^{-3}$$

という関係を得る。この関係式を図2に示す通り、X, Z軸(せん断)方向のQRVに代入すると、 $P_{suction}$ と $F_{applied}$ は図5に示す関係で表すことができた。

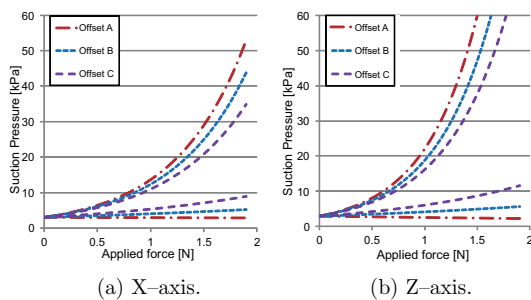


図5 呈示したい力と吸引圧の関係の導出結果

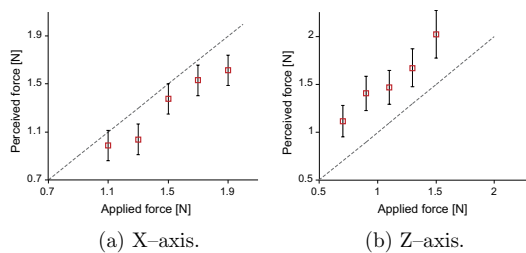


図6 呈示された疑似力覚 (X軸, Z軸)

横軸はペンに与えた外力、縦軸は吸引圧刺激である。グラフでは、3種類のオフセット圧力を求めている。吸引圧は、せん断方向の外

力の場合、図3にみられるように、分布の対称性から、高圧力側と低圧力側の2種類のカーブで表現することができる。図4の各条件2本のカーブは、その高圧力側と低圧力側を表している。心理物理実験により、最も適切なオフセット圧力を求めた結果、中央のOffset Bの条件のとき、もっとも線形的に外力を呈示できることが確認された(図6)。

以上で、SEDに基づいたせん断方向の吸引圧刺激を導出でき、これをTAKO-Penに実装することで、従来のヒューリスティックな方法から、皮膚の分布圧計測と多点接触モデリングに基づいて、吸引圧を決定できるようになった。

② 全方位力覚表現法の評価

提案した吸引圧刺激で座標軸の間の方向の力を表現できるか確認する。具体的には、被験者にある吸引圧刺激を呈示し、どの方向から力を受けるかを質問、被験者に回答してもらうことで、表現力を評価する。図7(b), (c)に示すX-Z平面, X-Y平面の2平面を評価した。実験条件として、座標軸を除いた30度ごとの力方向(座標軸4方向を除いた計8方向)を各平面で呈示した。被験者は20代男性5名試行回数はそれぞれ5試行おこなった。結果を図8に示す。各方向の回答率をチャートグラフに記した。各平面の全体として完全に正答した割合はX-Z平面では59%, X-Y平面では58%だった。また、正解の力方向の隣接した力方向も正答として評価するとそれぞれ、90%, 93%という正解率となった。

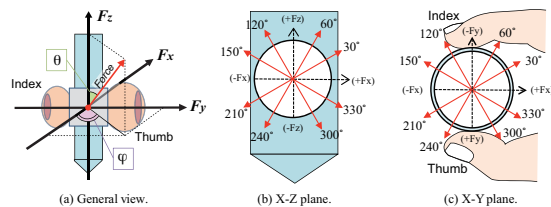


図7 全方位力覚呈示の評価

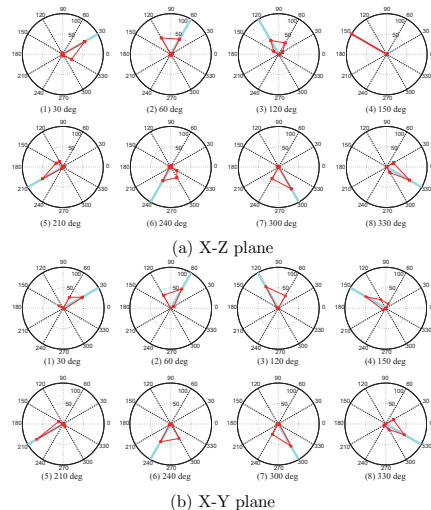


図8 全方位力覚呈示の結果

(2) 筋活動が道具を介した外力知覚に及ぼす影響の調査

3. (2) で述べた, ヒトは道具に加わる外力の知覚において筋活動と皮膚変化の関係を利用しているかを調査するために実験をおこなった.

はじめに, 4 種の条件において力を記憶する際に計測された尺側手根屈筋および橈側手根屈筋の筋活動量を調査した結果, 実験結果から, 尺側手根屈筋および橈側手根屈筋のいずれにおいても, 筋への負荷バイアスを与えた時の方が筋活動が大きくなっており, 深部感覚への刺激が行えていることが確認された. 皮膚刺激は吸引圧刺激のみで制御されるため, 皮膚感覚と深部感覚を独立して呈示可能であることが確認された.

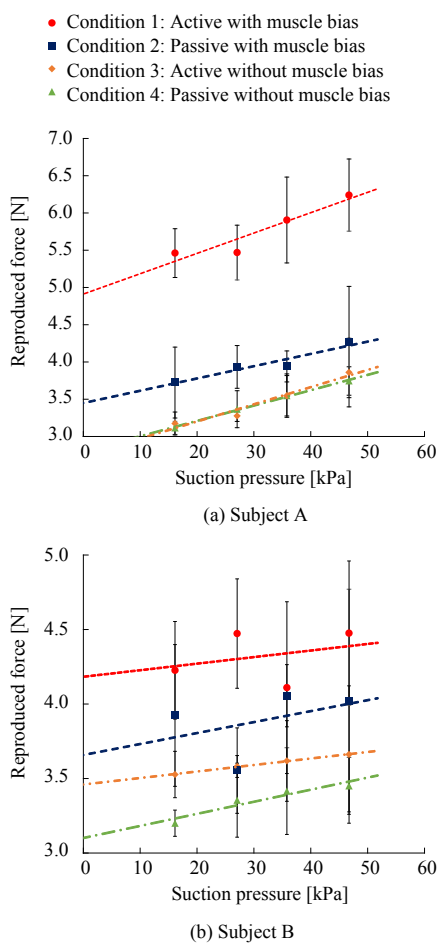


図9 筋バイアスによる記憶した力再現への影響

つぎに, 4 種の条件における再現された力を図9に示す. 2名の被験者の結果を示しており, 横軸は呈示した吸引圧の大きさ, 縦軸は再現した力の大きさの平均とその標準偏差を示す. 筋バイアスの有無によらず, 吸引圧の増加に伴って再現する力も増加しており, 皮膚感覚が力の知覚に影響することが分かる. また, 受動的再現時に比べ能動的再現時の力が大きくなったことから, 皮膚感覚とは異なる情報が力の知覚に寄与することが示唆された. そして, 筋バイアスの有無に着

目すると, 筋バイアス無しの条件に比べ, 筋バイアス有りの条件で, 再現される力が大きいことが示された.

以上の実験結果に基づき, 仮説「ヒトは道具に加わる外力の知覚において筋活動と皮膚変化の関係を利用している」かを検証する.

皮膚感覚と深部感覚の関係ではなく, 皮膚感覚のみで外力を知覚しているならば, 能動的および受動的再現時の力は筋バイアスの有無に寄らない結果になると予想できる. しかし, 実験結果では, 筋バイアスの有無が力の知覚に影響しており, 皮膚感覚のみで外力を知覚したわけではないと言える.

また, 皮膚感覚と深部感覚の関係ではなく, 深部感覚のみで外力を知覚しているならば, 吸引圧による皮膚刺激の違いは知覚される力に影響しないと考えられる. しかし, 実験結果では, 吸引圧力の増加に伴って再現する力も増加しており, 筋活動のみで外力を知覚したわけではないと言える.

以上のように, 実験結果は, ヒトは外力を知覚するとき皮膚感覚と深部感覚の関係を利用しているという仮説を支持する結果であった.

<引用文献>

- ① M. Konyo et al., Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force, EuroHaptics 2008, pp. 619-629.
- ② S. Okamoto, M. Konyo et al., Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display, IEEE Trans. on Haptics, vol. 2, issue 2, 2009, pp. 73-84.
- ③ L. B. Porquis, M. Konyo et al., Enhancement of human force perception by multi-point tactile stimulation, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011, pp.3488-3493.
- ④ L. B. Porquis, M. Konyo et al., Tactile-Based Torque Illusion Controlled by Strain Distributions on Multi-Finger Contact, IEEE Haptics Symposium 2012, 2012, pp. 393-398.
- ⑤ L. B. Porquis, et al., Haptic cue of forces on tools: Investigation of multi-point cutaneous activity on skin using suction pressure stimuli, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013, pp.2023-2029.
- ⑥ Y. Makino and H. Shinoda, A method to produce tactile sensation using suction pressure, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.11, No.1, 2006, pp. 123-2.

- ⑦ S. S. Shergill, et al., Two eyes for an eye: the neuroscience of force escalation. Science, Vol. 301, No. 5630, pp. 187-187, 2003.

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)

- ① Daiki Maemori, Lope Ben Porquis, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro, Pseudo-Haptic Interface Using Multipoint Suction Pressures and Vibrotactile Stimuli, Haptic Interaction, Part III, LNEE277, Springer Berlin Heidelberg, pp. 131-133, 2015, DOI: 10.1007/978-4-431-55690-9_24 (査読有り)
- ② Daiki Maemori, Lope Ben Porquis, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro, A Multi-DOF Haptic Representation Using Suction Pressure Stimuli on Finger Pads, EuroHaptics2014, Part II, LNCS8619, Springer Berlin Heidelberg, pp. 285-294, 2014, DOI: 10.1007/978-3-662-44196-1_35 (査読有り)

[学会発表] (計 7件)

- ① 永野光, 皮膚吸引刺激と筋バイアスを用いた道具を介した外力知覚メカニズムの検証, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'16 講演論文集 (ROBOMECH2016), 横浜, 2016年6月8日(予定).
- ② 牧角将, 皮膚吸引圧刺激を用いた道具に加わる外力の知覚メカニズムの調査, 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2015), pp.1763-1765, 名古屋市, 2015年12月14日.
- ③ Masashi Konyo, TAKO-Pen: a pen-type pseudo-haptic interface using multipoint suction pressures, SIGGRAPH Asia 2015 Haptic Media and Contents Design, Kobe, 16, Nov., 2015
- ④ 牧角将, 筋活動の能動性が知覚された力覚の大きさに及ぼす影響の調査, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'15 講演論文集 (ROBOMECH2015), 2A1-B09, 京都市, 2015年5月17日.
- ⑤ 前森大貴, TAKO-Pen: 皮膚への吸引圧刺激を用いたペン型疑似力覚インタフェース-第4報: 疑似トルク呈示法の提案と評価-, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.822-824, 東京都, 2014年

12月15日.

- ⑥ 前森大貴, 多点吸引圧と振動刺激を用いたペン型疑似力覚インタフェース, 計測自動制御学会東北支部 50周年記念学術講演会, P106, 仙台市, 2014年12月11日.
- ⑦ 前森大貴, TAKO-Pen: 皮膚への吸引圧刺激を用いたペン型疑似力覚インタフェース-第3報: 複数皮膚刺激を用いた全方位力覚表現-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演概要集, 1P1-X07, 富山市, 2014年5月26日.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等
<http://www.rm.is.tohoku.ac.jp/~konyo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

昆陽 雅司 (KONYO, Masashi)
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 20400301

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: