

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：23201
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2019～2022
課題番号：19K04313
研究課題名(和文)ハイブリッド力覚提示による腕手リハビリテーションロボット

研究課題名(英文)Whole arm rehabilitation robot by hybrid force display

研究代表者
小柳 健一 (Koyanagi, Ken'ichi)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：30335377
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、上肢リハビリロボットに必要な運動の自由度を低減し、低コストで高いリアリティを持つ訓練環境を提供する、維持期上肢リハビリテーション支援ロボットの開発を当初目的とした。これは未達だったが、基盤技術となる各研究要素は大きく進展した。ロボットに能動要素として用いるEHDポンプや空気圧アクチュエータは、最適設計を施して発生力や変形量が大きなものを開発した。受動要素としてER流体ブレーキの導入を検討し、新規な内部構造をした小型大トルクのものを開発した。圧電粒子を混合した高性能なER流体を開発した。さらに、研究目的の一つである訓練動機を評価するために、脳波を用いた生体解析を行い新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた各研究要素の成果は、いずれも基盤技術として活用できるものである。EHDポンプは可動部のないポンプとして広く利用できる。空気圧アクチュエータは、3Dプリンタによる製作物ならではの構造であり、今までにない新たな空気圧アクチュエータの使い方につながる。圧電粒子を混合した高性能なER流体は、特に高周波入力に対してこれまでのER流体の性能を凌駕するもので、高価だった高速高電圧アンプを低価格なパルス電源に置き換えることが期待でき、ER流体の広まりを支援する。脳波により動機の一面を定量評価した。これは訓練や教育における新たなフィードバックにつながり、トレーニングの質向上への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The initial target of this study was to develop a maintenance phase upper limb rehabilitation support robot that would provide a low cost by reducing the degree of freedom of movement required for upper limb rehabilitation robots while providing a highly realistic training environment. Although this goal was not achieved, significant progress was made in each of the fundamental technologies. EHD pumps and pneumatic actuators used as active elements in the robot were optimally designed to generate large forces and deformations. The introduction of an ER fluid brake as a passive element was investigated, and a compact, high-torque brake with a novel internal structure was developed. A high-performance ER fluid mixed with piezoelectric particles was developed. Furthermore, to evaluate the training motivation, which is one of the objectives of our research, we conducted bioanalysis using electroencephalogram (EEG) and obtained new findings.

研究分野：ロボティクス、メカトロニクス

キーワード：力覚提示 リハビリロボット パッシプロボティクス 機能性材料

1. 研究開始当初の背景

ロボットやバーチャルリアリティ (VR) を用いた脳血管障害後の上肢運動機能障害者に対するリハビリテーション支援は、リハビリの効率化につながる重要な取組みである。日常生活における机の奥の方にあるものを手元にとってくる動作でも、腕と手の上肢全体の協調運動トレーニングが必要である。しかし、提案されているものは、米国 InMoion のように腕のトレーニングを対象にした多関節型ロボットのみか、逆にダイヤ工業、チームアトムのように手指のトレーニングを行うグローブ型装置のみがほとんどである。単純に既存の多関節型ロボットにこれらのグローブをつけたのでは、非常に自由度が多く、制御面でも安全面でも開発コストが大きい問題がある。特に、日常での作業を意識し様々な状況に対応したリハビリロボットにしようとする、ソフトウェア開発への負担も大きくなり、その価格増大と普及の妨げの原因となる。中長期にわたるトレーニング期間において、集中力やモチベーションの維持は重要であり、それに対するソフトウェアの貢献は大きい。

研究代表者は、3.1 節に詳述する 3 次元上肢リハビリロボット EMUL [1] と 2 次元上肢リハビリロボット SEMUL [2] をそれぞれ腕用に、パッシブ型力覚提示グローブ [3] を手のリハビリに応用すべく開発研究してきた。EMUL や SEMUL では臨床実験において良好な改善効果も確認できた [1, 2] が、上記と同じ課題が残った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、適切に動作自由度を低減して開発コストを低くし、なおかつリハビリへのモチベーションを維持するのに十分な高いリアリティを持つトレーニング環境を提示するという、相反する設計課題を解決する維持期上肢リハビリテーションにおける支援ロボットを開発することである。

本研究の当初の計画では、腕・手首・指のリハビリテーション VR ロボットを開発する。制御性の高い機能性材料をアクチュエータ要素やブレーキ要素に用いた、アクティブ/パッシブなハイブリッド力覚提示が行えるもので、低開発コスト、高い安全性、日常生活に根差した動作をトレーニングできるという特徴を持つ。また、より動作自由度の高いリハビリロボットと実験的に比較し検証する。

3. 研究の方法

(1) 開発するシステムと研究方法の概要

触れたり操っている物体からの反力や環境からの力を提示する力覚提示は、リハビリテーションに有効である [4-6]。ここで、モータなどを用いず、ブレーキ要素のみを力発生に用いるパッシブ型ロボットであれば、暴走等の危険性とそれに対処するためのコストを大幅に削減できる。図 1 の SEMUL とは、そのような 2 次元パッシブ型リハビリテーションロボットであり、機能性流体である ER 流体を応用し電場で制動トルクを制御できるブレーキを用いている。一方、掴んだ物の弾性力の提示は硬さや質感の表現に重要であるため、指にはアクティブに力を発生する要素が必要である。

そこで、本研究で新規に開発する図 2 のハイブリッド力覚提示グローブ (HBG) は、甲側に電場で摩擦抵抗力を制御できる EA ゲルシート [7, 8] によるパッシブ型力覚提示を、掌側に EHD 流体アクチュエータによるアクティブ型力覚提示を実現する。EHD 流体は、電圧印加で流動圧力が発生する機能性流体で、手が開く方向に力を発生するのに用いる。特に脳卒中患者に顕著だが、麻痺者は手を握るのは容易で手を開くようなトレーニングが必要である。すなわち、HBG はアクティブかつパッシブな力を手を開く方向へ提示する、上肢リハビリテーションに適した力覚提示グローブである。

なお、対照実験として、より多くの運動自由度を有する 3 次元アクティブ型ロボットである EMUL (図 3) を SEMUL の代わりに用いることも考える。EMUL は、ブレーキではなく ER 流体アクチュエータを用いている。運動の自由度が大きく異なるロボットを用いることで、モチベーションの維持に必要なリハビリ環境のリアルさがどの程度であるか検証する。

実際に行った研究を総括すると、主なものはハードウェア開発であった。1 年度目には、EHD 電極形状の最適化、EHD 流体アクチュエータの設計、ER 流体の性能向上に関する研究を行った。2 年度目は、EHD 電極形状の最適化、小型 ER 流体ブレーキの開発、ER 流体の性能向上に関する研究を行った。3 年度目は、EHD 電極形状の最適化、空気圧アクチュエータの開発、SEMUL および EMUL の整備、ER 流体の性能向上に関する研究を行った。4 年度目には、EHD 電極形状の最適化、ソフトウェアシステム全体の基盤開発、脳波の事象関連電位を用いたモチベーションの評価に関する研究を行った。結果として、当初の研究目的の実施には至らなかったが、基盤技術となる各研究要素は大きく進展した。次項以降に個別に記す。



図 1 SEMUL

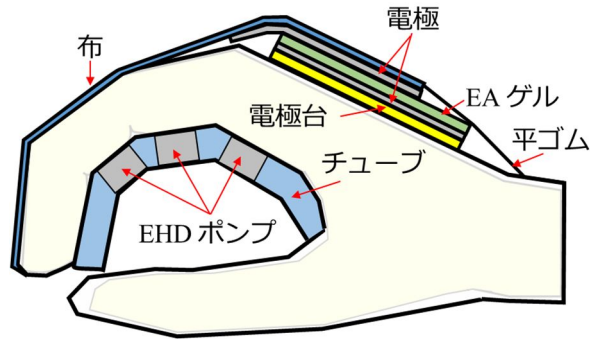


図 2 ハイブリッド力覚提示グローブ構成図



図 3 EMUL

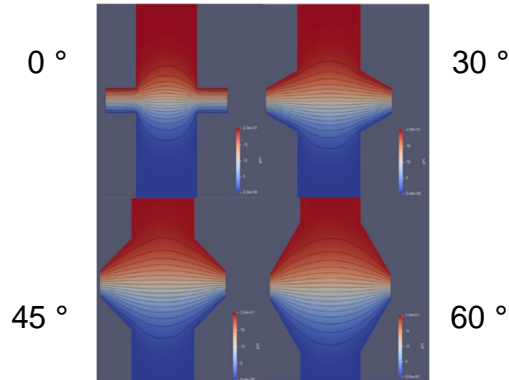


図 4 EHD 電極の傾きの電場の関係

(2) EHD 流体アクチュエータの開発

HBG に用いる EHD 流体アクチュエータは、EHD ポンプを内蔵し、そこに EHD 電極がある。先行研究で製作したものは、グローブ型力覚デバイスに利用できる小型なものであったが、発生圧力が 10mPa と非常に小さかった。そこで、3 万倍の圧力である 3kPa を目指し、高出力化を図った。ただし、なるべく形状は単純なものにして、安定して高出力が得られ製作がしやすい形状であるように留意した。そのため、アルミ円板にいわゆる皿もみ加工をした形状とした。そこで、内外径と皿もみ穴径をそろえ、皿もみ部の傾きが異なる電極や、電極間に挟む絶縁シートの形状を変えたものを製作し、実験的に調査することにした。

製作前に、EHD ポンプ内で起こる現象を把握するため、磁場と流れの連成解析を行った知見[9, 10]を活かし、OpenFOAM を用いて図 4 のように内部の電場を明らかにした。その知見に基づき具体的な電極形状の候補を選出した。図 4 で 0° と示される電極が互いに平行なものが最も電場が強く流体に印加されるものの、流れには貢献しないため、45° 程度が良好であろうと当初は考えた。しかし、実際には 0° のものが最も大きな圧力を示した。

また、電極を 1~3 組直列にしたものや、同じポンプ断面積で小さな電極を複数並列に配置した形状を考案した。微差圧計を導入して実時間で精密に発生圧力を計測したところ、電極間や電極組間に挟んだ絶縁体の製作精度に大きく影響されることが分かった。しかし、良好なものでは、電極のペアが 1 段のもので 126Pa、3 段のもので 252Pa を実現した。同様に増加すると、13 段で目標の圧力である 3kPa に達することが分かった。

(3) HBG のための空気圧アクチュエータ

十分大きな発生力を有する EHD アクチュエータを開発できない場合を考え、空気圧アクチュエータの応用を考えた。一般的な空気圧アクチュエータでは応答速度が遅く、変形の向きが HBG にそぐわないため、柔軟素材を溶融材料に用いた 3D プリンタにより図 5 のように製作した。図 6 に示すように、内部に縦横に梁を設け、指先に当たる部分を薄くした。それぞれの寸法を設計変数として繰り返し計算を行い最適化した。結果として、発生力の大きさや変形量がリハビリに十分用いられるものが開発できた[11]。ただし、応答を高速化できたとはいえ、単独で力覚提示に用いるのは不十分と考えられた。そのため、より応答の早い EA ゲルとの連携的な制御を行うことで、HBG 全体として良好な力覚提示を行い、リハビリに应用することとした。

(4) 小型 ER 流体ブレーキおよび高性能 ER 流体の開発

手首部のパッシブ型力覚提示は、当初は EA ゲルベルト機構の転用を考えていた。しかし、それより省スペースな要素として、過去に研究した ER 流体ブレーキの導入を検討し、小型で大トルクのものを実験製作した。回転範囲が限られているため、揺動型で用い、内部に中間的な電極を有する構造にした。このため、一般的な ER ブレーキのように流体と電極間のせん断抵抗だけでなく、電極間に流体が通るときの流れ抵抗や、スクイーズフィルム効果もブレーキトルクに



図5 バルーンアクチュエータ

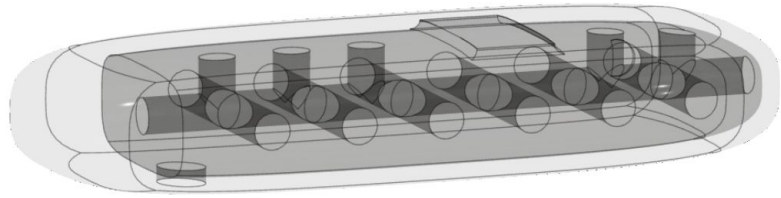


図6 バルーンアクチュエータ内部



図7 小型ERブレーキ

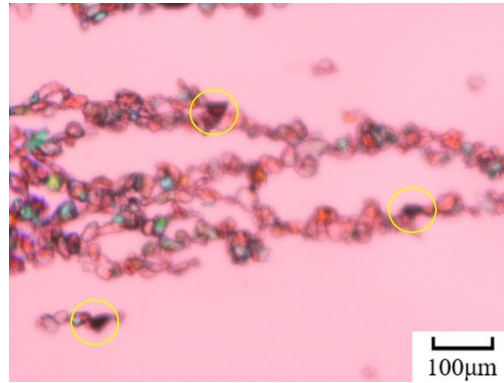


図8 圧電粒子混合 ER 流体の応答

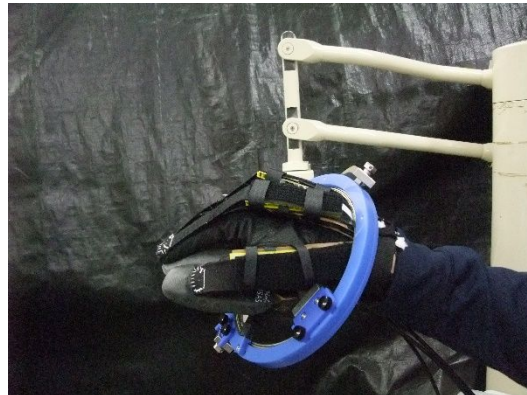


図9 EMULに取り付けたハイブリッド力覚提示グローブ

寄与できるようにした。図7に示すのは製作したERブレーキで、流体封入のためのチューブを取り付け、仮操作のつまみを回転軸に取り付けている。

SEMUL および EMUL も ER 流体を用いているので、ER 流体の改質は全体のパフォーマンス向上に寄与する。そこで、圧電粒子を ER 流体に混合することで、電場に対する応答性、特に高周波入力に対するせん断応力を向上できると考えた[12, 13]。添加剤含めいくつかの候補を実験的に検証し、ER 流体単独よりも高性能なものが得られた。図8はその ER 流体に 300Hz の交流電場を印加したときの粒子挙動を偏光顕微鏡観察したものである。黄色で囲っている粒子が圧電粒子であって、ER 粒子の鎖状構造形成を補助しているように思われる。

(5) HBG システムの開発

HBG のパッシブ型力覚提示には、EA ゲルシートへ高電圧を印加することで発生する制動力を用いる。従って、HBG に用いるソフトウェアシステムは、力発生要素に電圧を印加する高電圧アンプに対して、DA 変換器を介して実時間で指令電圧値を送信する必要がある。なお、空気圧アクチュエータをアクティブ側に用いる場合は、LAN 通信にて空気圧アクチュエータのサーボドライバに指令値を送る。それらとユーザインタフェースを実装する Windows PC の間は、LAN によるソケット通信でつなく、これらを踏まえ、全体的なソフトウェアシステムを構築した。HBG に用いるため、EA ゲルの動作特性や初期面圧の影響についても深く調査した [14, 15]。EA ゲルと空気圧アクチュエータ、および 3 次元ハンドルを EMUL に装着した例を図9に示す。

(6) モチベーションの定量評価に関する研究

研究目的の一つにモチベーションを維持するには、トレーニング動作にどの程度の「リアルさ」が必要かというものがあるが、そのモチベーションを評価するために、脳波を用いた生体解析を行った。SEMUL を用いたリハビリソフト実行時の、使用者の事象関連電位を測定し、その大きさと得点などとの関連を調べた。

4. 研究成果

本研究では、ハードウェア開発に時間を要し、当初目的達成には至らなかったが、それらの各研究要素は大きく進展した。ロボットに能動要素として用いる EHD ポンプや空気圧アクチュエータは、最適設計を施して発生力や変形量が大きなものを開発した。受動要素として ER 流体ブレーキの導入を検討し、新規な内部構造をした小型大トルクのものを開発した。圧電粒子を混合した高性能な ER 流体を開発した。さらに、研究目的の一つである訓練動機を評価するために、脳波を用いた生体解析を行い新たな知見を得た。

本研究で得られた各研究要素の成果は、いずれも基盤技術として活用できるものである。EHD ポンプは可動部のないポンプとして広く利用できる。空気圧アクチュエータは、3D プリントによる製作物ならではの構造であり、今までにない新たな空気圧アクチュエータの使い方につながる。圧電粒子を混合した高性能な ER 流体は、特に高周波入力に対してこれまでの ER 流体の性能を凌駕するもので、高価だった高速高電圧アンプを低価格なパルス電源に置き換えることが期待でき、ER 流体の広まりを支援する。脳波により動機の一部を定量評価した。これは訓練や教育における新たなフィードバックにつながり、トレーニングの質向上への貢献が期待できる。

参考文献

- [1] 宮越浩一, 道免和久, 小山哲夫, 古荘純次, 小柳健一, 「脳卒中片麻痺患者に対する上肢機能訓練装置の使用経験」(短報), リハビリテーション医学, 43(6), 347-352 (2006).
- [2] K. Koyanagi 他 9 名, "Case studies in poststroke hemiplegic patients using SEMUL: a passive 2-DOF rehabilitation robot," Proc. of the 38th IEEE Annual Int'l Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 4678-4681 (2016).
- [3] K. Koyanagi, 他 4 名, "Evaluation of Grasping Accuracy When Using a Passive Force Display Glove," SICE J. of Control, Measurement, and System Integration, 10(3), 170-176 (2017).
- [4] 小柳健一 他 6 名, 「巧緻性と敏捷性改善を狙う VR を用いた上肢リハビリテーション課題の開発と年齢層に対する馴化効果の検証」, ライフサポート学会誌, 29(4), 128-138 (2017).
- [5] K. Koyanagi 他 9 名, "Robotic Upper Limb Rehabilitation Intervention with Feedback of Motor Function Scores to Improve Motivation," Proc. of the 2018 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 1500-1505 (2018).
- [6] A. Mori, K. Koyanagi 他 6 名, "Improving Motivation for Training Using a Rehabilitation System for Upper Limbs to Provide Feedback on Motor Function Scores," Proc. of the SICE Annual Conference 2017, 1272-1275 (2017).
- [7] K. Miyama, K. Koyanagi 他 7 名, "Force Feedback Device using Electro-Rheological Gel and One-sided Pattern Electrodes," Proc. of ICAT-EGVE2016 Posters and Demos, 7-8 (2016).
- [8] K. Koyanagi 他 7 名, "Effect of surface conditions of one-side patterned electrodes applied to ER gel," J. of Intelligent Material Systems and Structures, 29(2), 223-231 (2018).
- [9] Y. Baba, K. Sugioka, 他 5 名, "Relationship between Applied Static Magnetic Field Strength and Thermal Conductivity Values of Molten Materials Measured Using an EML Technique," J. of Chemical Engineering of Japan, 44(5), 321-327 (2011).
- [10] K. Sugioka 他 4 名, "Effect of static magnetic field on thermal conductivity measurement of a molten Si droplet by an EML technique: Comparison between numerical and experimental results," Int'l J. of Heat and Mass Transfer, 53(19-20), 4228-4232 (2010).
- [11] K. Koyanagi 他 5 名, "Design and development of a 3D-printed balloon type actuator for a hybrid force-display glove," Int'l J. of Mechatronics and Automation, 9(1), 47-59 (2022).
- [12] K. Koyanagi 他 2 名, "Research on Shear Stress of Electrorheological Fluid Containing Piezoelectric Powders," J. of Intelligent Material Systems and Structures, 33(8), 1101-1112 (2022).
- [13] X. Wang, T. Karaki, K. Koyanagi 他 1 名, "BaTiO₃ piezoelectric powder blended electrorheological fluids," Japanese J. of Applied Physics, SCCB05 (2019).
- [14] K. Koyanagi 他 5 名, "Large force actuator using an electro-adhesive gel super multi-disk," Advanced Robotics, 36(19), 983-994 (2022).
- [15] K. Koyanagi 他 4 名, "Experimental Confirmation of a Controllable Transmission/Braking Element Consisting of a Functional Elastomer Pasted on a Winding Surface," Actuators, 11(4), 114 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koyanagi Ken'ichi, Takata Yudai, Kakinuma Yasuhiro, Anzai Hidenobu, Sakurai Koji, Oshima Toru	4. 巻 36
2. 論文標題 Large force actuator using an electro-adhesive gel super multi-disk	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 983 ~ 994
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2117573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koyanagi Ken'ichi, Kakinuma Yasuhiro, Anzai Hidenobu, Sakurai Koji, Oshima Toru	4. 巻 11
2. 論文標題 Experimental Confirmation of a Controllable Transmission/Braking Element Consisting of a Functional Elastomer Pasted on a Winding Surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act11040114	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 -
1. 著者名 Koyanagi Ken'ichi, Takata Daisuke, Tamamoto Takumi, Noda Kentaro, Tsukagoshi Takuya, Oshima Toru	4. 巻 9
2. 論文標題 Design and development of a 3D-printed balloon type actuator for a hybrid force-display glove	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 47 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJMA.2022.120485	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koyanagi Ken'ichi, Wang Xu, Karaki Tomoaki	4. 巻 33
2. 論文標題 Research on shear stress of electrorheological fluid containing piezoelectric powders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Material Systems and Structures	6. 最初と最後の頁 1101 ~ 1112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1045389X211048219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Xu, Karaki Tomoaki, Koyanagi Ken'ichi, Fujii Tadashi	4. 巻 59
2. 論文標題 BaTiO3 piezoelectric powder blended electrorheological fluids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCB05 ~ SCCB05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4d11	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8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 竹田真之介, 小柳健一, 李豊羽, 塚越拓哉, 野田堅太郎, 大島徹
2. 発表標題 ハイブリッド型力覚提示グローブに用いるバルーンアクチュエータの応答性改善
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2023年度合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木康介, 杉岡健一, 小柳健一
2. 発表標題 静電場解析を用いたEHDポンプの高出力化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2023 年度合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹田真之介, 小柳健一, 玉本拓巳, 塚越拓哉, 野田堅太郎, 大島徹
2. 発表標題 指の曲げ状態を用いたハイブリッド型力覚提示グローブの 制御系構築
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹田真之介, 小柳健一, 玉本拓巳, 塚越拓哉, 野田堅太郎, 大島徹
2. 発表標題 力覚提示グローブに用いるバルーンアクチュエータの内部構造の最適化設計
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koyanagi Ken'ichi, Tamamoto Takumi, Noda Kentaro, Tsukagoshi Takuya, Oshima Toru, Takata Daisuke
2. 発表標題 3D-Printed Balloon Type Pneumatic Actuator for Hybrid Force Display Glove
3. 学会等名 2021 International Conference on Mechatronics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹田真之介, 小柳健一, 玉本拓巳, 野田堅太郎, 塚越拓哉, 大島徹
2. 発表標題 力覚提示グローブに用いるバルーンアクチュエータの変位を考慮した内部構造の最適化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年度合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉岡 健一, 高藤大希, 小柳 健一, 中山 勝之
2. 発表標題 電場の数値解析を用いた電歪現象によるEHDポンプの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉岡健一, 村田尋斗, 小柳健一, 中山勝之
2. 発表標題 小型 EHDポンプ内に生じる静電場解析
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	杉岡 健一 (Sugioka Ken-ichi) (80438233)	富山県立大学・工学部・准教授 (23201)	

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
---------	---------