

| | |
|---------|--|
| 氏名・(本籍) | マツイ ヤス 松井 保子 (岡山県) |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 甲第工46号 |
| 学位授与の日付 | 平成30年9月10日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当(課程博士) |
| 学位論文題目 | 柔軟空気圧球面アクチュエータを用いた 低コスト・可搬型上肢リハビリテーション機器の開発 |
| 論文審査委員 | 主査 教授 赤木 徹也 副査 教授 吉田 浩治 教授 山田 訓 教授 藤本 真作 特任教授 堂田 周治郎 教授 神田 岳文 (岡山大学自然科学研究科) |

論文内容の要旨

申請者氏名 松井 保子

論文題目 柔軟空気圧球面アクチュエータを用いた
低コスト・可搬型上肢リハビリテーション機器の開発

近年、高齢者の身体能力維持や一時的に障害を負った患者の機能改善などの QOL の向上から医療介護、リハビリテーションの分野での福祉機器の重要性が増している。そこで、本研究では、家庭で、専門医や補助員なしに使用できる「ホームリハビリテーション」機器の開発をめざす。このような機器に使用されるアクチュエータには、高い人間親和性が求められるため、安全で人体に優しいソフトアクチュエータの開発が望まれる。そこで、上記の要求を満たすアクチュエータとして、柔軟チューブを用いた柔軟空気圧シリンダ（図 1）を開発し、手首の関節可動域を広げる動作に加えて、腕をねじる動作など、上肢全体に他動運動を誘導する球面アクチュエータを試作した（図 2）。これは、柔軟空気圧シリンダの柔軟チューブをリング状に曲げ、それを 2 本直角に交差させ、互いのスライドステージとチューブ両端を結合することで、球面上をスライドステージが移動できるアクチュエータである。本論文では、この球面アクチュエータを改良し、家庭で使用できるほど「安全」で、操作が「容易」かつ、「低コスト」な可搬型のリハビリテーション機器の開発について述べる。

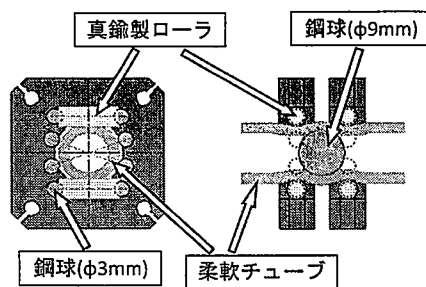


図 1 柔軟空気圧シリンダ

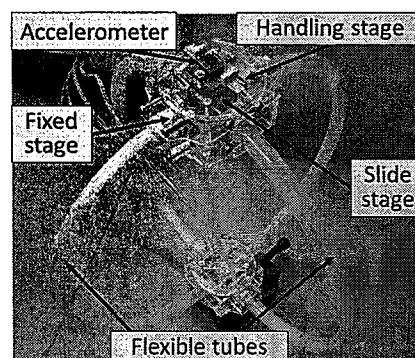


図 2 球面アクチュエータ

周辺機器一体型上肢リハビリテーション機器

可搬型上肢リハビリテーション機器の姿勢制御には複数の ON/OFF 弁や制御用マイコンなどの多くの周辺機器を必要とする。また、これらに接続される電源ケーブルや多数の配管も転倒などの事故を誘発する原因になりかねない。そのため、弁やコントローラを球面アクチュエータ内部に内蔵した周辺機器一体型上肢リハビリテーション機器を提案・試作した。さらに、ON/OFF 操作による性能低下(抑制)を考え、より開口面積の小さな小型 ON/OFF 弁を使用し、より簡単な制御システムで使用者に他動運動を与えることができることを確認した（図 3）。この改良により、機器外部からの接続は電源ケーブルと空気圧供給配管のみとなり、より可搬性と安全性が向上した。しかし、機器使用時にアクチュエータの変形などにより、使用者の手が接触するなどの障害(事故)が生じた。そこで、保持ステージの位置を知るため、柔軟空気圧シリンダの変位センサの開発について検討した。

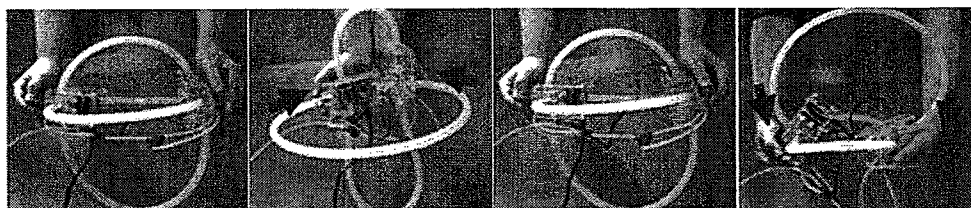


図3 周辺機器一体型上肢リハビリテーション機器

柔軟空気圧シリンダ用変位センサの開発

柔軟空気圧シリンダの変位を計測する変位センサとして、糸状抵抗体である炭素被覆ナイロンを用いて、柔軟空気圧シリンダの表面にポテンショメータを形成する手法や、市販のワイヤ式リニアエンコーダを用いて、シールを保ちながら柔軟空気圧シリンダのシリンダヘッド部分である鋼球の変位を計測するシステムを構築した。さらに、このエンコーダでの計測方法をより安価で、さらにマイコンを使用しても高速で計測できるようにするため、ゼンマイによるワイヤ巻取り機構と10回転分の計測が可能なヘリカルポテンショメータを組み合わせたワイヤ式リニアポテンショメータ(図4)を提案・試作した。その結果、ワイヤ式リニアポテンショメータを内蔵した柔軟空気圧シリンダ(図5)により、湾曲時の変位計測が可能であることを確認し、オンオフ制御則による位置決め制御も実現した。しかし、この計測方法を、球面アクチュエータに組込む場合、リニアポテンショメータとワイヤ巻取り装置を保持ステージ部に搭載する必要がある、コンパクトなセンサ配置など機械的・構造的な設計問題が生じた。そこで、より簡単な方法での2つの保持ステージの相対位置を計測する方法について検討した。

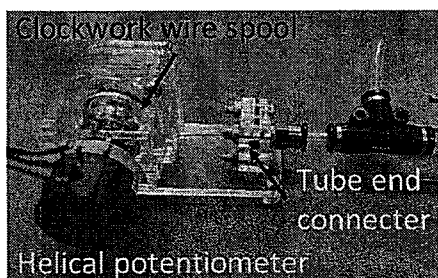


図4 ワイヤ式リニアポテンショメータ

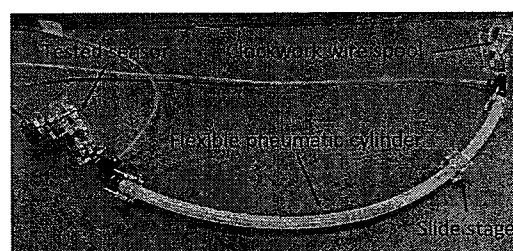


図5 センサ内蔵式柔軟空気圧シリンダの位置決め制御

センサ内蔵型可搬型上肢リハビリテーション機器

2つの保持ステージの相対位置を直接計測するため、ワイヤ式リニアポテンショメータを3つ用いて、異なる3点からの位置計測により3次元位置を計測する安価なシステム(図6)を提案・試作した。座標計測実験を行った結果、シリンダが制御できるx,y座標で±5mmの精度で位置計測が可能であることを確認した。また、球面アクチュエータに用いる柔軟空気圧シリンダの低摩擦化と製作の省力化を考えた新たな柔軟空気圧シリンダ(図7)を提案・試作し、これを用いた球面アクチュエータを試作した。さらに、この改良した球面アクチュエータに3次元位置計測システムを搭載するために、計測システムのコンパクト化を行うとともに、図8に示す試作計測システムを搭載した可搬型上肢リハビリテーション機器(球面アクチュエータ)を用いて、両ステージの相対座標を計測することで

ハビリテーション機器の姿勢制御が可能（図9）であることを確認した。

以上、本研究では家庭で患者自身が1人でも使用できるほど「安全」で、操作が「容易」かつ、使い捨て可能なほど「低コスト」な可搬型のリハビリテーション機器の開発を行った。本研究の成果が我が国の福祉事業に貢献できるものと期待する。

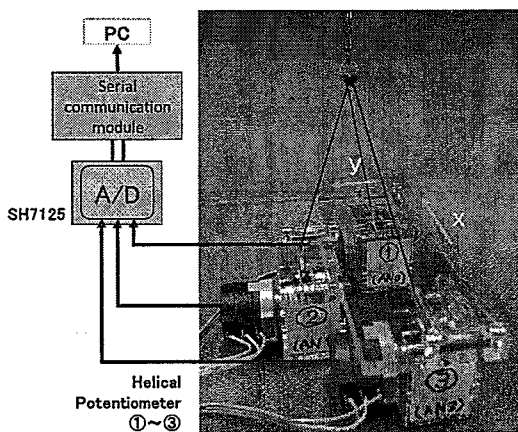


図6 3次元位置計測システム

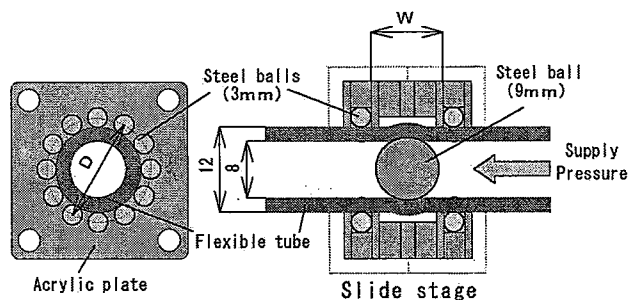


図7 低摩擦型柔軟空気圧シリンダの構造図

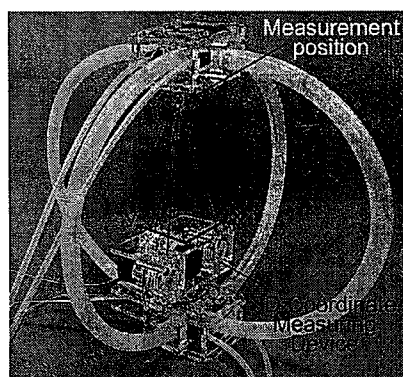


図8 センサ搭載型リハビリテーション機器

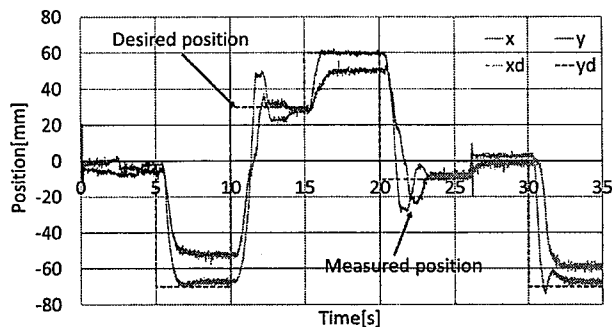


図9 改良機器を用いた位置決め制御結果

発表論文：

学術論文（査読有）

- [1] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Mohd Aliff and Changjiang Liu, Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator and Embedded Controller, Lecture Notes in Electrical Engineering 293, Volume 1, Springer, pp.231-238 (2014).
- [2] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi and Shujiro Dohta, Development and Control of Flexible Spherical Actuator for Portable Rehabilitation Device, International Journal of Materials Science and Engineering, Vol.3, No.1, pp.49-54 (2015).
- [3] Hiroaki Tamaki, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and Yasuko Matsui, Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator with Built-in Embedded Controller and Valves, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol.4, No. 4, pp.314-318 (2015).
- [4] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Shinsaku Fujimoto, Development of Flexible Pneumatic Cylinder with String-Type Displacement Sensor for Flexible Spherical Actuator, Lecture Notes in Electrical Engineering 345, Springer, pp.75-81 (2015).
- [5] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Wataru Kobayashi and Hiroaki Tamaki, Development of Simple 3D Measuring Device using Low-cost Wire Type Linear Potentiometer for Flexible

Spherical Actuator, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol.6, No. 3, pp. 215-218 (2017).

- [6] Hiroaki Tamaki, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, Wataru Kobayashi, and Yasuko Matsui, Development of Electric Flexible Spherical Actuator for Rehabilitation, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 6, No. 4, pp. 327-330 (2017).
- [7] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Wataru Kobayashi, Hiroaki Tamaki, Development of Flexible Spherical Actuator with 3D Coordinate Measuring Device, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, Vol. 6, No. 2, pp.95-106 (2018).

Proceedings など (査読有)

- [1] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Development of Flexible Displacement Measuring System Using Wire-type Linear Encoder for Flexible Spherical Actuator, Procedia Computer Science, Vol. 76, pp.113-118 (2015).
- [2] Takafumi Morimoto, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Yasuko Matsui, Development of Flexible Displacement Sensor Using Ultrasonic Sensor for Flexible Pneumatic Robot Arm, Procedia Computer Science, Vol. 76, pp.107-112 (2015).
- [3] Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Takafumi Morimoto, Yasuko Matsui and So Shimooka, Development of Compact Flexible Displacement Sensors Using Ultrasonic Sensor for Wearable Actuators, MATEC Web of Conferences, Vol.51, 2016 International Conference on Mechanical, Manufacturing, Modeling and Mechatronics, (IC4M 2016), No.02002 (2016).
- [4] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Development of Low-cost Wire Type Linear Potentiometer for Flexible Spherical Actuator, Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2016), 16340660.pdf (2016).
- [5] Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Yasuko Matsui, Hiroaki Tamaki, Naoki Kato, Low-cost wearable rehabilitation devices using flexible pneumatic cylinder with built-in pneumatic driving system, Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2016), 16340667 (2016).
- [6] Hiroaki Tamaki, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, Wataru Kobayashi and Yasuko Matsui, Development of Hybrid Type Flexible Pneumatic Cylinder for Considering Less Air Consumption, MATEC Web of Conferences, Vol. 82, 2016 International Conference on Design, Mechanical and Material Engineering (D2ME 2016), No. 01002 (2016).
- [7] Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Yasuko Matsui, Hiroaki Tamaki and Naoki Kato, Low-cost Portable Rehabilitation Device using Flexile Pneumatic Cylinders Built-in Pneumatic Driving System Controlled by Embedded Controller, Proceedings of the 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power 2016, pp.83-87 (2016).
- [8] Hiroaki Tamaki, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, Wataru Kobayashi, Yasuko Matsui, Development of Flexible Electro-Hydraulic Cylinder for Flexible Spherical Actuator, Proceedings of the 10th JFPS International Symposium on Fluid Power 2017, 2A19.pdf, pp.1-7 (2017).
- [9] Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Wataru Kobayashi, Hiroaki Tamaki, Development of Flexible Spherical Actuator with 3D Coordinate Measuring Device Using Low-cost Wire Type Linear Potentiometers, Proceedings of the 10th JFPS International Symposium on Fluid Power 2017, 2B09.pdf, pp.1-7 (2017).

紀要など

- [1] 松井保子, 赤木徹也, 堂田周治郎, 球面アクチュエータを用いた可搬型リハビリ機器の試作と制御, 岡山理科大学紀要 A, 第 50 号, pp.67-72 (2014).
- [2] 松井保子, 赤木徹也, 堂田周治郎, ワイヤ式エンコーダを用いた柔軟空気圧シリンダ用変位計測システムの開発, 岡山理科大学紀要 A, 第 51 号, pp.57-62 (2015).
- [3] 松井保子, 赤木徹也, 堂田周治郎, 小林亘, ワイヤ式リニアポテンシオメータを用いた柔軟空気圧シリンダの位置計測システムの開発, 岡山理科大学紀要 A, 52 号, pp.85-90 (2017).
- [4] 玉木博章, 堂田周治郎, 赤木徹也, 小林亘, 松井保子, 家庭用リハビリテーション機器のための柔軟油圧シリンダの試作と制御, 岡山理科大学紀要 A, 第 53 号, pp.89-94 (2018).

審査結果の要旨

この研究は、患者が自宅で「容易」に使える、「安全」で「安価」なホームリハビリテーション機器の実現をめざし、両手に持って使うことで上肢全体に他動運動を誘導できる可搬型上肢リハビリテーション機器の開発を目的とした研究であり、機器の構造や機構を工夫し、さらに柔軟な構造に適合した安価なセンサの開発や、マイコン技術を活かした低価格なリハビリテーション機器の開発を行った研究である。学位論文は、序論と結論を含む7章から構成される。第2章の「設置型球面アクチュエータ」では、開発を行うリハビリテーション機器の基本となるロッドレス型柔軟空気圧シリンダの構造と動作原理について示し、このシリンダを用いた設置型球面アクチュエータについてその構造と動作原理、基本特性、制御システムや制御結果について論じた。第3章の「可搬型上肢リハビリテーション機器」では、両手で持つことを考慮した球面アクチュエータ内の柔軟空気圧シリンダの配置の設計や、可搬型上肢リハビリテーション機器の構造と動作原理を示すとともに、マイコンを用いた機器の姿勢制御システムを開発した。さらに、それを用いたシーケンス制御や目標値追従制御結果について評価した。第4章の「周辺機器一体型上肢リハビリテーション機器」では、開発機器の安全性をより高めるため、弁やコントローラなどの周辺機器を内蔵し、外部との接続配線が少ない可搬型上肢リハビリテーション機器の開発を行い、その動作試験評価を行った。第5章の「柔軟空気圧シリンダ用変位センサの開発」では、開発機器に用いている柔軟空気圧シリンダ用の変位センサとして、炭素被覆ナイロンを用いた糸状変位センサや、シリンダヘッド部分に連結したワイヤ式リニアエンコーダによりシールを保ちながら変位を計測する手法や、多回転可能なヘリカルポテンシオメータとワイヤ巻き取り機構を組み合わせた安価なワイヤ式リニアポテンシオメータなどの3種類のセンサを提案・試作した。さらに、マイコンを用いた安価で計測システムを開発し、試作センサの性能評価を行った。第6章の「センサ内蔵型可搬型上肢リハビリテーション機器」では、ワイヤ式リニアポテンシオメータを用いて3点計測の原理から2つの保持ステージの相対位置を計測できる3次元位置計測システムを開発するとともに、その計測システムを搭載したセンサ内蔵型可搬型上肢リハビリテーション機器の開発し、センサ情報をもとにした姿勢制御を行い、開発機器の有効性を評価した。

本研究の成果は、自宅で患者が一人で使用することを考慮した「ホームリハビリテーション」を実現するため、「安全」「容易」「安価」に注目した新たなリハビリテーション機器の提案や開発を行ったことであり、新しいアクチュエータ機構の開発や、新しいセンサの開発やマイコン技術駆使した機器の開発を通じて、メカトロニクス分野や空気圧制御機器分野に関する新規性のある優れた知見を得られ、この分野の研究発展や要素技術開発に資するものである。上述の研究成果は7編の論文として学術論文誌に掲載され、9件の国際会議で発表が行われている。これらのことを総合的に審査した結果、本論文は博士学位論文として合格であると判断し、論文提出者である松井保子は博士（工学）の学位を授与するのにふさわしいと認める。