

氏名・(本籍)	モリワケ ヨシノ 守分 善法 (岡山県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第工45号
学位授与の日付	平成29年3月20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	ウェアラブル疑似サーボ弁の開発と応用
論文審査委員	主査 教授 堂田周治郎 副査 教授 赤木 徹也 教授 吉田 浩治 教授 藤本 真作 教授 高岩 昌弘 (徳島大学大学院理工学研究部)

# 論文内容の要旨

申請者氏名 守分 善法

論文題目 ウェアラブル疑似サーボ弁の開発と応用

近年、我が国においては欧米諸国も経験したことないほどの急速な勢いで高齢化が進んでいる。2015年10月1日には総人口における65歳以上の高齢者の割合は26.7%である。また、2035年には33.4%で3人に1人となる社会が到来されると予測されている。そのため、日常生活の支援・介護を行うことができる介護・支援ロボットが必要となり、それらの実現にはウェアラブル機器の開発が必須であると考えられる。それらを目標とし、本研究では、主に次のようなことについて研究を行った。以前、趙らの研究で開発された疑似サーボ弁とその解析モデルを用いて、流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁の開発を行った。また、超小型疑似サーボ弁の開発やゴム人工筋内蔵型変位センサを試作し、人工筋の位置決め制御へ適用し、それらの有効性を確認した。

## 流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁の開発と力制御システムへの適用

疑似サーボ弁の仕様を満たすため、圧力センサを用いて、圧力制御型疑似サーボ弁の開発を行った(図1)。また、弁からの出力圧力検出が可能となったことから、流れの状態を考慮した弁の出力流量補正方法を提案し、流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁の開発を行った。これには提案された弁の解析モデルを利用したシミュレーションと実験により、試作弁の性能評価を行った。提案した流量補正方法は、実機でも使うことを考慮し、計算式は処理能力の低いマイクロコンピュータ向けに線形近似された。提案する補正方法の性能評価をシミュレーションと実機による実験の両方において行った結果、提案する補正方法は、低圧付近での追従偏差を十分低減できることを確認した。さらに、解析モデルを用いて最適ゲインの推定や弁の制御則の検討を行い、圧力制御性能の改善を行った。また、試作した圧力制御型疑似サーボ弁の応用として、空気圧シリンダによる力制御システム(図2)を構成し、その力制御システムには摩擦補償を適用し、力制御実験を行った。

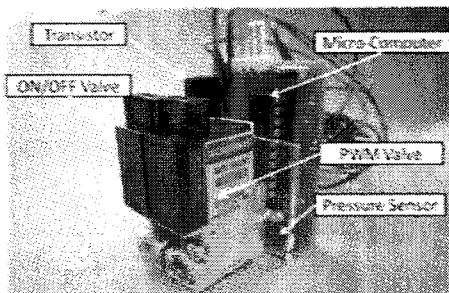


Fig.1 Tested quasi-servo valve

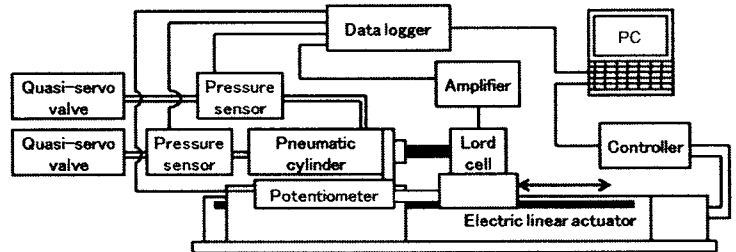


Fig.2 Schematic diagram of force control system

## 疑似サーボ弁の小型化と弁の解析モデル

よりウェアラブルな小型制御機器の開発を目的として、前述の疑似サーボ弁に使用されたオンオフ弁よりも、さらに小さなオンオフ弁を用いて超小型疑似サーボ弁の開発を行った。小型化された疑似サーボ弁と従来の疑似サーボ弁の容積と重量を比較すると、容積で約 58%小型化され、重量では約 60%軽量化された。はじめに使用する弁の構造 (図 3) を解析し、その構造に基づいて、小型弁の解析モデルを新たに作成した (図 4)。次に、作成した解析モデルに使用されるシステムパラメータを計測とシミュレーションにより同定した。そして、提案した解析モデルを使用し、シミュレータによる計算と実機を用いた実験で、疑似サーボ弁の出力流量を調べ、モデルやパラメータの有効性を確認した。さらに実験により、小型疑似サーボ弁の性能を確認した。実験と解析の結果、小型化された弁では、内部の可動部の質量が小さくなることで、その速応性が向上し、デューティ比・流量特性におけるデューティ比のデッドゾーンが小さくなることを確認した。また、改良した小型疑似サーボ弁を用いて、圧力追従実験を行った。この実験結果から、小型疑似サーボ弁のバンド幅周波数は約 2.8Hz であり、位相線図から 90 度位相差周波数は約 3.5Hz であることを確認した。

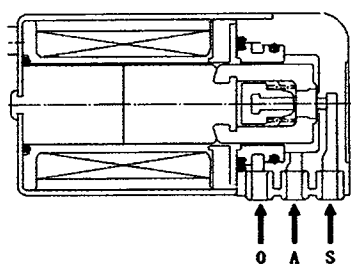


Fig.3 Structure of on/off control valve

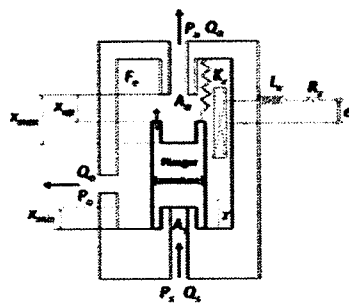


Fig.4 Analytical model of on/off control valve

## 人工筋内蔵変位センサの試作と人工筋位置決め制御への応用

超小型疑似サーボ弁の応用として、マッキベン型ゴム人工筋を使用し、その位置決め制御を行った。従来、ゴム人工筋の長さを制御するための変位センサとしては直動型ポテンシオメータや外周計測センサが使用されていた。しかし、これらのセンサは、人工筋の外部に取り付けられるため、機器自体の柔軟性や装着者への快適性を損なうという問題点があった。そこで、超音波センサを使用し、人工筋の内部に小型超音波センサを設置することによって、その問題点を解決することを考えた。まず、内径 20mm の大型ゴム人工筋に超音波センサを内蔵し、人工筋変位計測や位置決め制御が実現できることを確認した。次に、超小型疑似サーボ弁の流量特性に相応しい容積を有する内径 10mm のゴム人工筋に小型送受信器を内蔵した。そして、小型疑似サーボ弁と試作した変位センサ内蔵型ゴム人工筋を用いて、人工筋の位置決め制御実験を行い、超小型疑似サーボ弁や人工筋内蔵変位センサの有効性を確認した。

本研究で開発・試作された流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁や小型疑似サーボ弁、内蔵型変位センサは、ウェアラブル機器の要求に応える小型・軽量化につながり、ウェアラブルシステムへの使用が期待できる。

発表論文：

1. 学術論文 (査読有)

- [1] Yoshinori Moriwake, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Feifei Zhao, “Development of low-cost pressure control type quasi-servo valve using embedded controller”, *Journal of Procedia Engineering*, Vol.41, (2012), pp.493-500.
- [2] So Shimooka, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, Yoshinori Moriwake and Feifei Zhao, “Estimation of Pressure Control Performance in Low-Cost Quasi-Servo Valve Using Embedded Controller”, *Lecture Notes in Electrical Engineering 293, Volume 1*, Springer, (2014), pp.359-366.
- [3] Yoshinori Moriwake, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, and So Shimooka, “Application of Pressure Control Type Quasi-Servo Valve to Force Control System”, *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol.4, No.3, (2015), pp.209-212.
- [4] So Shimooka, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and Yoshinori Moriwake, “Position Control of Rubber Artificial Muscle Using Built-in Ultrasonic Sensor and Quasi-servo Valve”, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol.4, No. 4, (2015), pp.304-308.
- [5] So Shimooka, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, Yoshinori Moriwake, “Analysis and Simulation of Small-Sized Quasi-servo Valve Using Tiny On/Off Control Valve”, *Lecture Notes in Electrical Engineering 345*, Springer, (2015), pp.59-66.

2. Proceedings など (査読有)

- [1] Yoshinori Moriwake, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Feifei Zhao, “Development of low-cost pressure control type quasi-servo valve using embedded controller”, *Proceedings of International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012*, (2012.9), 1569623695.pdf, pp.1-8.
- [2] Yoshinori Moriwake, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Feifei Zhao, “Analysis of Pressure Control Type Quasi-servo Valve Using Embedded Controller”, *Proceedings of The 5th International Conference on Positioning Technology 2012*, (2012.11), pp.255-258.
- [3] Yoshinori Moriwake, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Feifei Zhao, “Improvement of Pressure Control Type Quasi-servo Valve and On/Off Valves Using Embedded Controller”, *Proceedings of 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, (2013.7), pp.882-887.
- [4] Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Mohd Aliff, Yoshinori Moriwake and Feifei Zhao, “Application and Analysis of Flexible Pneumatic Cylinder Driven by Low-cost Quasi Servo Valve”, *Proceedings of 2013 IRCET International Research Conference on Engineering and Technology*, (2013.9), pp.55-63.

- [5] Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Yoshinori Moriwake, Ayumu Ono and Abdul Nasir, “Low-Cost Pressure Control Valves Using On/Off Valves and Servo Motor Controlled by Embedded Controller”, Proceedings of The 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and visualization, (2013.11), OS4-03-5.pdf, pp.1-9.
- [6] So Shimooka, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi, Yoshinori Moriwake, “Application of Pressure Control Type Quasi-Servo Valve for Positioning of Rubber Artificial Muscle”, International Forum on Systems and Mechatronics, (2014), Proceedings A06.pdf, pp.1-6.
- [7] Yoshinori Moriwake, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and So Shimooka, “Application of Pressure Control Type Quasi-Servo Valve to Force Control System”, Proceedings of 2015 3rd International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, (2015), pp. 82-86.
- [8] So Shimooka, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and Yoshinori Moriwake, “Position Control of Rubber Artificial Muscle Using Built-in Ultrasonic Sensor and Quasi-servo Valve”, Proceedings of 2015 5th International Conference on Robotics and Automation Sciences, (2015), S08.pdf, pp.1-5.
- [9] Yoshinori Moriwake, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and So Shimooka, “Miniaturization of a Quasi-Servo Valve and Its Application to Position Control of a Rubber Artificial Muscle with Built-in Sensor”, 2016 International Conference on Design, Mechanical and Material Engineering, (2016.9), D030, pp.1-6. (MATEC Web of Conference).

## 審査結果の要旨

この研究の目的は、将来、パワーアシスト装置や着用型リハビリ機器で使用するために、従来の疑似サーボ弁を改良し、圧力制御型弁の試作、弁の小型・軽量化、モデル化、シミュレーションなどを行い、ウェアラブル疑似サーボ弁を開発すること、および、試作弁を力制御システムや、パワーアシスト装置などで使用されるマッキベン型ゴム人工筋の位置決め制御システムに応用することである。学位論文は、序論と結論を含む7つの章から構成されている。第2章の「流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁の開発」では、本研究の基本となる疑似サーボ弁の構成や解析モデルの説明、流れの状態を考慮した弁の出力流量補正方法の提案や組み込みコントローラによる実現を行い、流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁を開発した。そして、圧力追従制御の解析と実験により提案方法の有効性を示した。第3章の「圧力制御性能の改善と力制御システムへの応用」では、圧力制御型疑似サーボ弁の圧力制御性能の改善を行うとともに空気圧シリンダを用いた力制御システムへの応用を行い圧力制御型弁の有用性を確認した。第4章の「疑似サーボ弁の小型化と弁の解析」では、弁の小型・軽量化を図り、従来弁に比べて容積で58%、質量で60%のウェアラブル小型疑似サーボ弁を実現した。そして、このウェアラブル小型弁の解析モデルの作成やシステムパラメータの同定を行い、実験結果と比較した結果、解析モデルや同定したパラメータ値の有効性を確認した。第5章の「小型疑似サーボ弁による圧力制御」では、試作小型弁と15ccの負荷容積を用いて圧力制御実験を行い、小型疑似サーボ弁の制御性能や動特性を明らかにした。そして、弁のバンド幅周波数が2.8Hzであることを確認した。第6章の「小型疑似サーボ弁の人工筋制御システムへの応用」では、まず、ゴム人工筋に内蔵する変位センサとして、超音波センサを利用した変位センサを試作し、実験により人工筋変位計測ができることを確認した。次に、試作センサと小型弁を用いてセンサ内蔵型ゴム人工筋の位置決め制御実験を行い、超音波センサを利用した内蔵型変位センサと小型疑似サーボ弁の有用性を確認した。第7章の「結論」では、本研究で開発・試作された流量補正付圧力制御型疑似サーボ弁や小型疑似サーボ弁、内蔵型変位センサは、ウェアラブル機器の要求に応える小型・軽量化につながり、ウェアラブルシステムへの使用が期待できると結んでいる。

本研究の成果は、ロボティクス・メカトロニクス分野や空気圧制御機器分野の問題に関連した優れた知見を含んでおり、これらの分野の研究発展や技術開発に資するものである。これらの研究成果は5編の論文として学術論文誌に公表され、多くの国際会議において口頭発表されている。これらのことを総合的に審査した結果、本論文は博士學位論文として合格であると認め、論文提出者の守分善法君は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。