

超音波センサ内蔵型ゴム人工筋の試作と位置決め制御

下岡 綜・堂田 周治郎*・赤木 徹也*・守分 善法**

岡山理科大学大学院工学研究科知能機械工学専攻

* 岡山理科大学工学部知能機械工学科

** 岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

(2015年9月30日受付、2015年11月9日受理)

1. 緒言

近年の急速な高齢化社会の進行に伴い、高齢者介護の労働者不足が深刻な問題になりつつある。そのため、人間を介護・支援できるロボットやパワーアシスト装置などに用いるウェアラブルアクチュエータの開発が望まれている¹⁾。また、これらのシステムでは高い自由度を必要とし、複数のアクチュエータや制御弁が必要となるため、装着者への負荷は増加する。従って、使用者の負担を軽減し、簡素で制御性の高い弁の開発が強く望まれる。著者らはオンオフ弁を用いた小型・軽量の小型疑似サーボ弁を開発した²⁾。

本研究では、この弁を用いてマッキベン型ゴム人工筋の位置決め制御を行うとともに、人工筋に内蔵するための変位センサ³⁾の開発を行い、コンパクトなアクチュエータの開発することを目的とする。変位センサとして、超音波センサを用いて、センサ内蔵型のゴム人工筋の試作を行う。そして、それらを用いて、ゴム人工筋の位置決め制御を行う。

2. センサ内蔵型ゴム人工筋

2-1 センサ内蔵型ゴム人工筋の構成

超音波とは、人間の可聴範囲(約 20 [kHz])以上の音波をいう。超音波センサの特長として、小型でマッキベン型ゴム人工筋に挿入することが可能であり、非接触で変位が測定できる、安価である、人体に無害であることなどが挙げられる。空气中を伝わる音波の伝播速度 $V[m/s]$ は次式で与えられる。

$$V = 331.5 + 0.607t \quad (1)$$

ここで、 t は温度 [°C] である。

試作超音波センサの構造図を図 1 に示す。超音波センサは市販の超音波センサ (Parallax Inc. Ltd., 28015) を分解し、小型の超音波送信器 (NIPPON CERAMIC CO. LTD T4008A1) と受信器 (NIPPON CERAMIC CO. LTD R4008A1) を対向させて用いる。

超音波センサを用いたセンサ内蔵型ゴム人工筋の構造と外観図をそれぞれ、図 2 と図 3 に示す。用いた人

工筋の自然長は 270 [mm]、内径は 20 [mm]、供給圧 500 kPa 加圧時の収縮変位は 50 [mm] である。超音波センサは、図 2 の右側に送信機、左側に受信機を配置する。右側の送信器から 40 [kHz] の超音波を出力し、図の左側の受信器で取得するまでの時間 $T[s]$ をマイコンでカウントすることにより、センサ間の距離 $L[m]$ 、すなわち人工筋の変位を測定することができる。音速を $V[m/s]$ とすると、距離は次式で表される。

$$L = V \cdot T \quad (2)$$

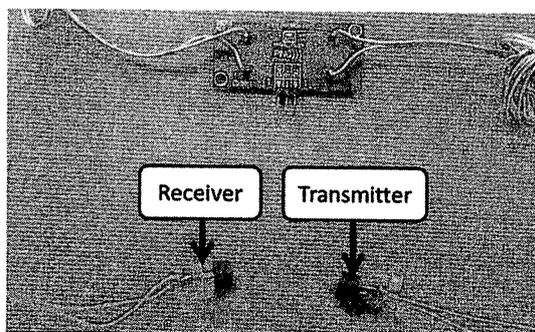


図 1 超音波センサの構造図

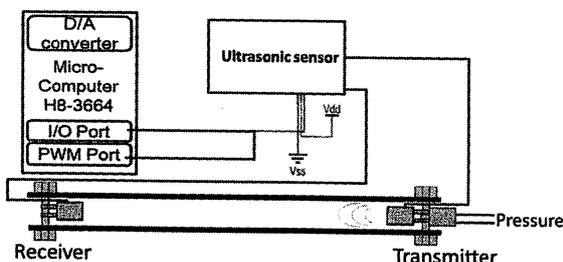


図 2 センサ内蔵型ゴム人工筋の構成

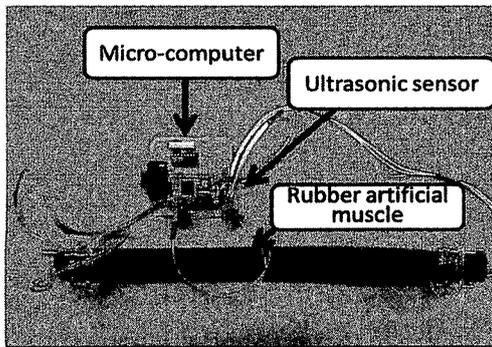


図3 センサ内蔵型ゴム人工筋の外観図

2-2 センサ内蔵型ゴム人工筋の特性実験

次に、超音波センサを用いた人工筋変位の測定結果について述べる。まず、実験方法について述べる。密閉したマッキベン型ゴム人工筋内の両端に、図2で示すように超音波センサの送信機と受信機を配置する。そして、ゴム人工筋に圧力を加え、各圧力における超音波センサから求めたセンサ値と実際の長さを測定する。実際の長さはスケールで測定した。その結果を図4に示す。これは人工筋を0[kPa]から450[kPa]まで50[kPa]ごとに加圧した場合の圧力と変位の関係を示す。赤の実線がセンサ値、青の実線が実際の長さである。これを見るとセンサから求めた距離と実際の距離がよく一致しているのが分かる。次に、この結果を用いて求めたセンサ値と実際の長さの関係を図5に示す。図5を見ると、センサ値と実際の長さとの線形性も良く、人工筋内蔵型センサとして使用できることが分かる。

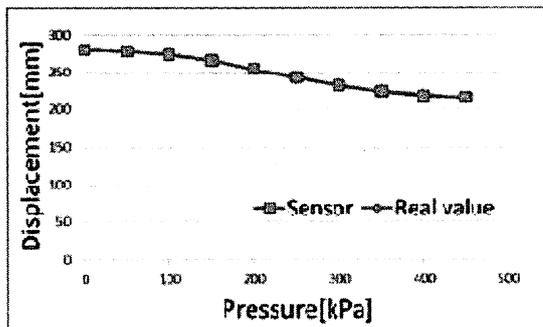


図4 圧力と変位の関係

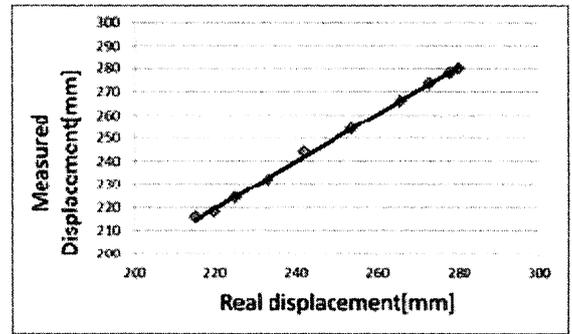


図5 実際の変位とセンサ出力変位の関係

3. 小型疑似サーボ弁

次に、本研究で用いる安価な小型疑似サーボ弁^{4), 5)}について述べる。弁の構造と外観図をそれぞれ図6、図7に示す。この疑似サーボ弁は小型オンオフ(株)SMC製 S070C-SDG-32)を2個繋ぎ合わせ、供給源側の弁を給排気弁(2位置3ポート弁)、アクチュエータ側の弁を流量調整のための可変絞りのPWM駆動弁(2位置2ポート弁)として使用する。PWM弁によって、デューティ比を変えることで開口面積を制御し、圧力や流量をアナログ的に調整することが可能になり、オンオフ弁では困難であった比例制御などのアナログ制御則の適用が可能となる。

弁の具体的な動作は、制御入力の正負によって、給排気弁をオン、オフすることで給排気を切换え、制御入力の大きさによって、PWM弁の入力デューティ比を変え流量や圧力を調節する。使用したオンオフ弁の質量は6g、サイズは12×33×7mmである。弁を操作するためのコントローラはマイクロコンピュータ(株)Renesas製 SH-7125)とトランジスタから構成されている。これらを含めた弁システム全体の外観図を図8に示す。また、システムの質量は73gと通常のサーボ弁単体(FESTO(株) MPYE-5-8/1-HF-010B : 330g)に比べ非常に軽量である。

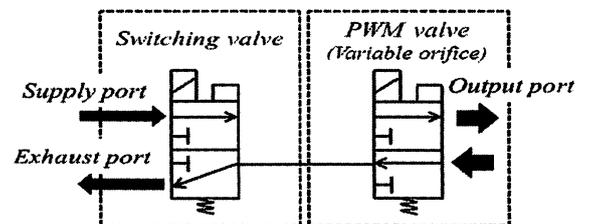


図6 小型疑似サーボ弁の構造

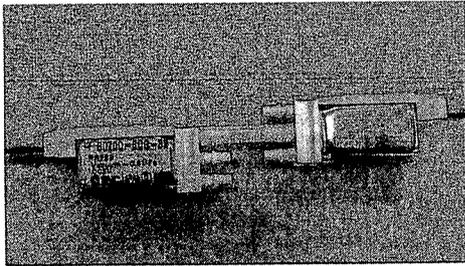


図7 小型疑似サーボ弁の外観図

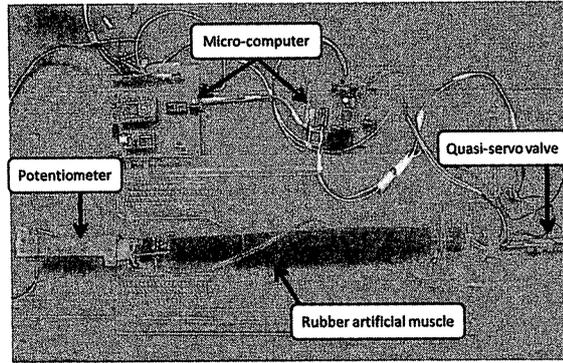


図10 位置決め制御システム外観図

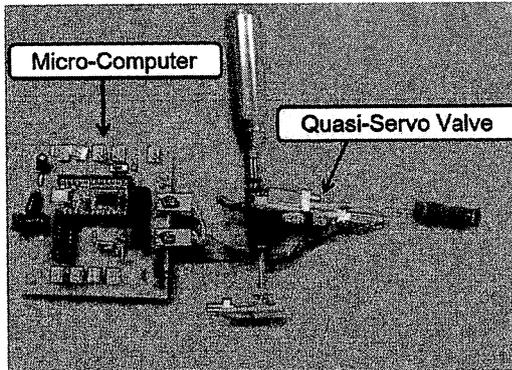


図8 制御弁システムの外観図

4. ゴム人工筋の位置決め制御

4-1 位置決め制御システムの構成

図9、図10に、超音波センサ内蔵型ゴム人工筋の位置決め制御システムの構成と外観図を示す。制御の流れは、超音波センサからの出力変位を図のH8マイコン内で計算し、外部D/A変換器でSHマイコンに送り、目標値との偏差を求め、下記の制御則により疑似サーボ弁へのデューティ比 $u[\%]$ を求め、疑似サーボ弁を駆動する。

$$u = k_p \cdot |e| + 20.0 \quad (3)$$

ここで、 k_p は比例ゲイン、 e は目標変位と出力変位との偏差である。また、疑似サーボ弁のデューティ比-流量特性におけるデッドゾーン⁶⁾を補償するために、常に20%のデューティ比を上乗せしている。

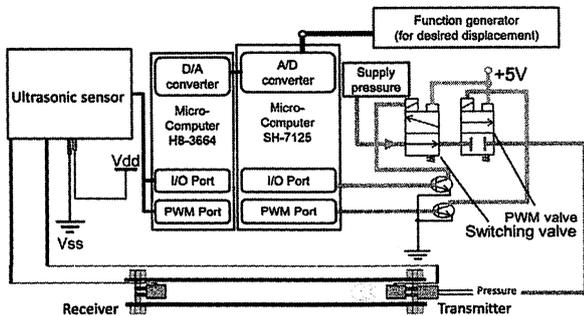


図9 位置決め制御システム構成図

4-2 位置決め制御実験結果と考察

まず、センサ内蔵型人工筋の位置決め制御方法について述べる。オフセット変位25mm、変位振幅20mm、目標周波数0.1Hz、弁への供給圧力400kPaとしてゴム人工筋の位置決め制御実験を行う。位置決め制御則は、式(3)の比例制御則を用いる。比較のために、変位センサとしてポテンショメータ(図10のようにゴム人工筋に直列に接続する)を用いた実験と、内蔵超音波センサを用いた実験を行った。

図11に、変位センサとしてポテンショメータを用いて位置決め制御した時の実験結果を示す。破線が目標変位、太い実線がポテンショメータの変位、実線が超音波センサの出力変位を示している。図を見ると、超音波センサの変位出力が階段状に変化していることが分かる。これは、超音波センサの処理時間が長く、センサ値の更新が遅くなるためと考えられる。また8秒付近で、超音波センサの出力変位に、一瞬大きな値が現れる。これは、サーボ弁の給気時に、超音波センサの受信器で強い圧力が加わり音波を取得するのが困難になるためと考えられる。次に、変位のフィードバックセンサとして、超音波センサを用いて位置決め制御実験を行った結果を図12に示す。図11と同様に、超音波センサの出力が2秒、9秒付近で急激な変化を示している。しかしながら、実際の変位であるポテンショメータの変位応答に注目すると、なんとか超音波センサによる位置決め制御が実現していることが分かる。

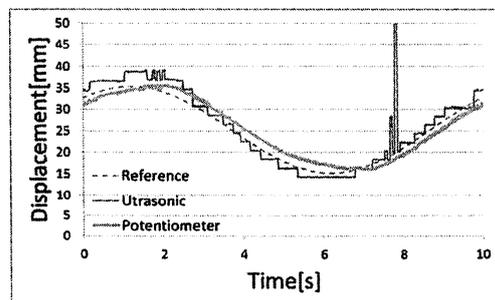


図11 位置決め制御結果 (ポテンショメータの場合)

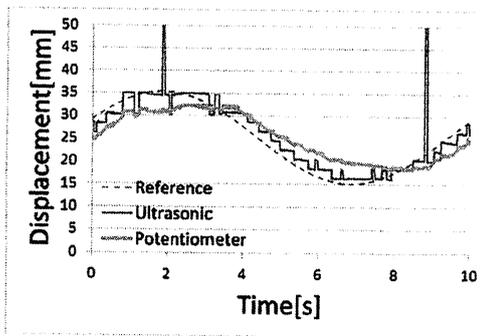


図12 位置決め制御結果 (超音波センサの場合)

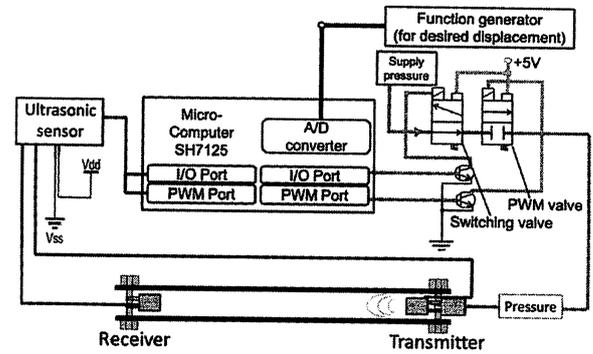


図15 改良した位置決め制御システムの構成

5. センサ内蔵型ゴム人工筋の改良と位置決め制御

5-1 センサ内蔵型ゴム人工筋の改良

前節の位置決め制御結果から、超音波センサの変位が階段状に出力されたり、音波の受信が困難であったり、センサの処理時間が長いなどの問題点があることが分かった。そこで、これらの問題を解決するために、ゴム人工筋の改良、位置決め制御システムのコンパクト化や制御プログラムの改良を図る。改良したセンサ内蔵型ゴム人工筋の外観図を図13に示す。制御システムをコンパクト化するための変更点として、マイクロコンピュータをH8マイコンからSHマイコンに変更し、人工筋の内径を10mmに変更し、それに伴い人工筋内に挿入できるよう超音波センサの改良も行った。それを図14に示す。新しい位置決め制御システムの構成図と外観図を図15、図16に示す。

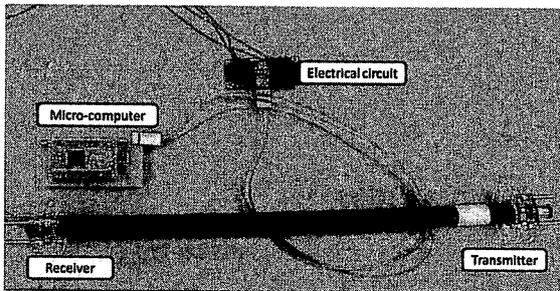


図13 改良したセンサ内蔵型ゴム人工筋

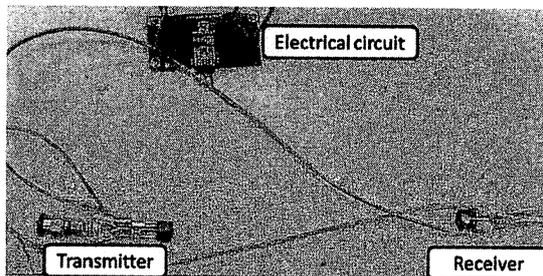


図14 基盤を取り付けた場合の超音波センサ

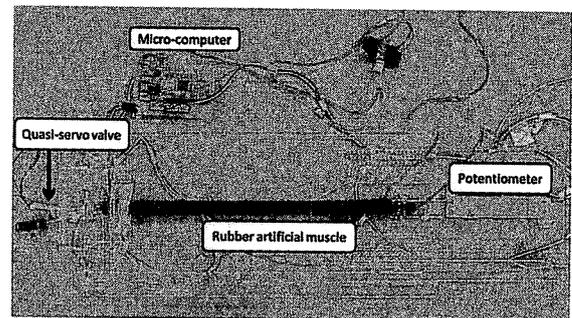


図16 位置決め制御システムの外観

5-2 位置決め制御実験結果

位置決め制御方法は、オフセット変位30mm、変位振幅20mm、目標周波数0.1Hz、弁への供給圧力500kPaとし、超音波センサを用いてゴム人工筋の位置決め制御実験を行う。位置決め制御則は、式(3)の比例制御則を用いる。その制御結果を図17に示す。破線が目標変位、太い実線がポテンシオメータの変位、実線が超音波センサの出力変位を示している。これを見ると、図11や図12に比べ、超音波センサ出力の階段状の変化が小さくなり、急激な変位出力も現れなくなった。さらに、目標変位に対して、超音波センサの変位が良く追従していることが分かる。しかし、変位が大きい場合にセンサ出力が振動している現象が見られる。この原因は現在のところ不明である。この振動現象は、ポテンシオメータの出力変位にはほとんど影響がなく追従できていることが分かる。このように、超音波センサは、センサ内蔵型人工筋の変位センサとして、使用可能であることが分かる。

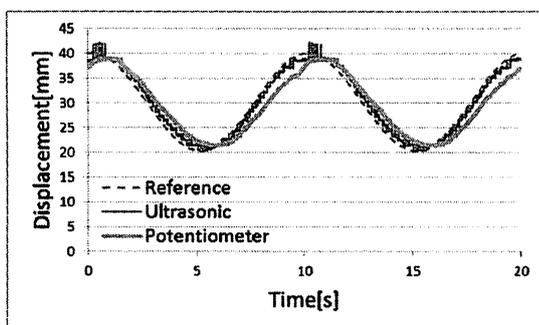


図 1 7 位置決め制御結果

6. 結 言

ゴム人工筋の変位センサとして超音波センサを用いたセンサ内蔵型人工筋を試作した。センサ特性実験を行い、センサの有効性を確認した。さらに、センサ内蔵型人工筋の位置決め制御システムを構築し、追従制御実験を行った。その結果、階段状の変位出力や急激な変位出力が見られた。そこで、制御性能の改善やコンパクト化を図るため、センサ内蔵型ゴム人工筋の改良を行った。改良された人工筋を用いて位置決め制御を行った結果、改良前の結果よりセンサの変位出力が目標値に良く追従できていることが確認された。なお、変位の大きい所で超音波センサの出力値に振動が見られたが、ポテンシオメータの変位には影響がなく追従できていることが確認できた。したがって、超音波センサは、センサ内蔵型ゴム人工筋の変位センサとして使用できることが確認できた。

参考文献

- 1) 長田義仁編：ソフトアクチュエータ開発の最前線～人工筋肉の実現をめざして～, NTS, pp. 294-321 (2004).
- 2) 趙 菲菲, 堂田周治郎, 赤木徹也：柔軟湾曲アクチュエータ用小型疑似サーボ弁の試作と解析, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 76, No. 772, pp. 3665-3671 (2010).
- 3) 藤田圭司, 堂田周治郎, 赤木徹也, 針原健吾：“内径計測によるゴム人工筋の位置決め制御”, 平成 22 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 61-63 (2010).
- 4) Y. Moriwake, T. Akagi, S. Dohta and F. 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, pp. 882-887(2013).
- 5) S. Shimooka, S. Dohta, T. Akagi, Y. Moriwake and F. Zhao : Estimation of Pressure Control Performance in Low-Cost Quasi-Servo Valve Using Embedded Controller, Lecture Notes in Electrical Engineering 293, Springer, Vol. 1, pp. 359-366(2014).

- 6) S. Shimooka, S. Dohta, T. Akagi, Y. Moriwake, “Analysis and Simulation of Small-sized Quasi-servo Valve Using Tiny On/off Control Valve,” Lecture Notes in Electrical Engineering 345, Springer, (2015).

Development and Position Control of Rubber Artificial Muscle using Built-in Ultrasonic Sensor

So SHIMOOKA, Shujiro DOHTA*, Tetsuya AKAGI* and Yoshinori MORIWAKE**

Master's Program in Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,

** Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,*

*** Doctoral Program in System Science, Graduate School of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received September 30, 2015; accepted November 9, 2015)

Today, the care and welfare pneumatic equipment to support a nursing care and a self-reliance of the elderly and the disabled are actively researched and developed by many researchers. These wearable devices require many servo valves for multi degrees of freedom and precise control performance of the wearable actuator. The total weight of the wearable devices increases according to the degree of freedom. In the previous study, a small-sized and light-weight pressure control type quasi-servo valve and rubber artificial muscle using built-in displacement sensor were developed. The quasi-servo valve consists of two on/off control valves and an embedded controller.

In this study, an ultrasonic sensor was installed in the rubber artificial muscle as a displacement sensor. Then, the position control system of the artificial muscle using the built-in displacement sensor and an embedded controller was proposed and tested. As a result, it was confirmed that the ultrasonic sensor could be used as a built-in sensor of the rubber artificial muscle. In the experimental results, however a rapid change and larger stepwise change of the ultrasonic sensor output were observed. Therefore, the control system and the rubber artificial muscle were improved. As a result, the rapid change was eliminated and the stepwise change was reduced.

Keywords: mckibben artificial muscle; built-in sensor; ultrasonic sensor; quasi-servo valve; embedded controller.