

# 柔軟空気圧シリンダを用いたウェアラブル手首リハビリ機器の姿勢制御

加藤 直熙・堂田 周治郎<sup>\*</sup>・赤木 徹也<sup>\*</sup>・小林 亘<sup>\*</sup>

岡山理科大学大学院工学研究科知能機械工学専攻

<sup>\*</sup> 岡山理科大学工学部知能機械工学科

(2017年10月31日受付、2017年12月4日受理)

## 1. 緒言

高齢者や身体障害者などの生活の質の向上から医療介護、リハビリテーション分野での福祉機器の重要性が増している。特に、近年の超高齢化社会の進行に伴い福祉事業分野での人手不足は大きな課題である。たとえば、捻挫や骨折などの一時的な怪我による身体機能不全からの回復をめざすリハビリテーションには、理学療法士(PT)などの支援者が必要となる。しかし、現状でPTの数は十分ではなく、またPTの施術に関しても時間的な制約を受けている。もし自宅で患者自身が自ら行うことのできるリハビリテーション機器ができれば、身体機能の改善・維持やそれに伴う介護などの福祉事業費の削減などが可能になる。そこで本研究の目的は、患者自身が特別な知識を必要とせず機能改善のため自宅で使用でき、また国費の補助なく購入が可能なるほど安価な「ホームリハビリテーション機器」の開発である。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、安全で人体に優しいソフトアクチュエータの開発が必要である。そこで、本研究室では、柔軟なチューブを用いた柔軟空気圧シリンダ<sup>1)</sup>を開発し、これを用いて手首に他動運動を加えることのできるリハビリテーション機器<sup>2)</sup>を開発した。また、機器に使用する柔軟空気圧シリンダ特有の大きな摩擦やリハビリテーションを受ける患者からの力といった外乱の影響を軽減するため、外乱オブザーバ<sup>3)</sup>を用いた制御システムを開発し、柔軟空気圧シリンダ1本での位置決め制御実験を行った<sup>4)</sup>。その結果、位置決め誤差が40%ほど改善され、提案した制御方法の有効性を確認した。

そこで本論文では、本手法をウェアラブル手首リハビリテーション機器の姿勢制御へ適用した結果について述べる。制御則の適用にはシリンダ変位を計測する必要があるが、湾曲した柔軟空気圧シリンダの変位計測は市販のセンサでは困難である。そこで本論文では、ワイヤ式リニアポテンシオメータ<sup>5)</sup>を用いた新たな変位計測方法を提案し、その計測実験を行った結果について述べる。また、提案した制御方法を用いたウェア

ラブル手首リハビリテーション機器の姿勢制御実験結果について述べる。

## 2. 柔軟空気圧シリンダ

以前の研究<sup>1)</sup>で開発した柔軟空気圧シリンダの構造を図1に示す。シリンダは、シリンダとガスケットに相当する柔軟チューブとシリンダヘッドに相当する一つの鋼球(外径9mm)、チューブの外側に沿ってスライドできるスライドステージで構成される。鋼球は、両サイドから2つの真鍮製ローラ(外径4mm)によって挟まれている。柔軟空気圧シリンダの動作原理は以下の通りである。まず、片側の圧力室を加圧すると内部の鋼球が押し、それに伴いチューブを変形しながらローラが押しされることで、スライドステージが動く。ここで、このシリンダの最低駆動圧力は120kPaである。

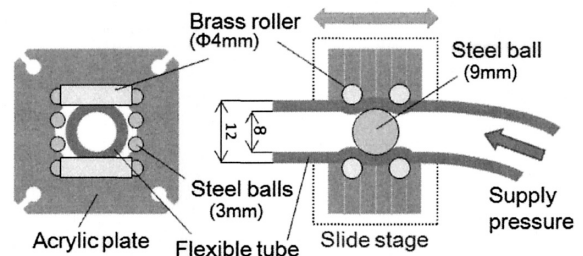


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

## 3. ウェアラブル手首リハビリテーション機器

開発したウェアラブル手首リハビリテーション機器の構造を図2に示す。リハビリテーション機器は3本の柔軟空気圧シリンダと2つの三角形のステージから構成され、1つは下側のφ100mmの穴の開いたベースステージともう1つはハンドルのついた把持側のエンドステージである。エンドステージには中心からφ175mm、120degの位置に柔軟空気圧シリンダのスライドステージを取り付け、腕に固定するベースステージには3組のシリンダ端を接続している。またシリンダを駆動する12個のON/OFF弁(株式会社コガネイ、G010HE-1)のうち6個はエンドステージ、残りはベースステージに

配置されている。弁は1つのシリンダ圧力室に対して2個のON/OFF弁を用いて制御され、それぞれPWM弁と切替弁とした疑似サーボ弁<sup>6)</sup>を構成している。また、これらの弁を駆動する駆動回路や姿勢制御のための組み込みコントローラ（ルネサスエレクトロニクス㈱、SH7125）はベースステージに搭載されている。ベースステージから患者の手を通しエンドステージのハンドルに手を固定し機器を動作させることで、患者の手首に他動運動を加えることができる。

この機器の姿勢制御には、各シリンダの変位を計測する必要がある。しかし、現状で、曲率半径が時々刻々変わる湾曲シリンダの変位を計測できる変位センサは開発されていない。そこで、次節でこの湾曲シリンダの変位の計測方法について述べる。

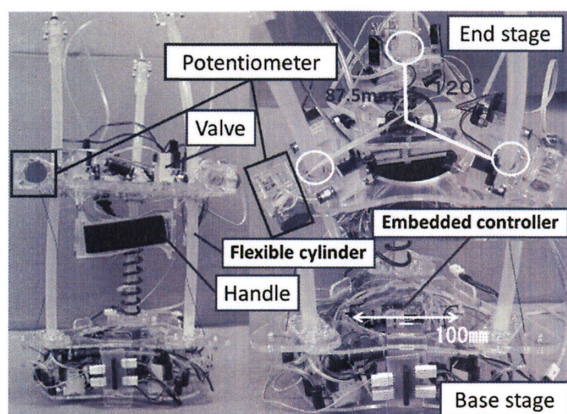
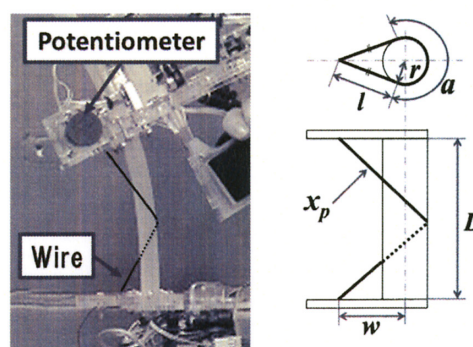


図2 ウェアラブル手首リハビリ機器の概観

#### 4. 柔軟空気圧シリンダの変位計測方法

湾曲したシリンダの変位計測方法として、提案するワイヤ式リニアポテンシオメータ<sup>5)</sup>を用いた計測モデルとその様子を図3に示す。図3(a)に示すように、ワイヤ式リニアポテンシオメータをエンドステージの外周側に取付け、ワイヤをエンドステージからベースステージにかけて柔軟空気圧シリンダの周りを1周巻きつけるようにし、ワイヤの端を同じくベースステージの外周側に固定する。この方法により、ワイヤの変位はシリンダに巻きつけた分、実際のシリンダ長より長い変位を計測することになる。そこで、図3(b)に示すようにワイヤがチューブの中間位置で折り返すと仮定し、次式で示す補正式によりその誤差を補正する。



(a) 変位計測方法 (b) 計測モデル

図3 変位計測方法と計測モデル

$$L = \sqrt{x_p^2 - (2l + a)^2} \quad (1)$$

$$l = \sqrt{w^2 - r^2} \quad (2)$$

$$a = 2r \left( \pi - \cos^{-1} \frac{r}{w} \right) \quad (3)$$

ここで $L$ はシリンダの長さ、 $x_p$ はワイヤ長、 $l$ と $a$ はチューブの半径 $r$ とワイヤ固定位置 $w$ に依存する定数であり、この実験では $l = 19.1\text{mm}$ 、 $a = 22.4\text{mm}$ を用いた。図3(b)に示すように、式(1)を用いることでシリンダ長が近似的に計測できる。

ワイヤ式リニアポテンシオメータで計測した長さと同スケールを用いて計測した実際の湾曲シリンダ長との比較を図4に示す。実験では、リハビリ機器の3本のシリンダの内2本を150mmに固定した状態で、1本のシリンダ長を60~270mmまで30mmごとに変えた場合の湾曲シリンダ長を、上述の手法で計測した。図4中の破線はスケールを用いて測定した実際のシリンダ長、実線は上述の補正を加えたセンサにより計測した長さである。図4から、湾曲が大きな(変位60mm以上)範囲で多少の誤差が生じているものの、提案手法による計測長さと実際の長さがよく一致しており、提案する計測方法の有効性が確認できる。

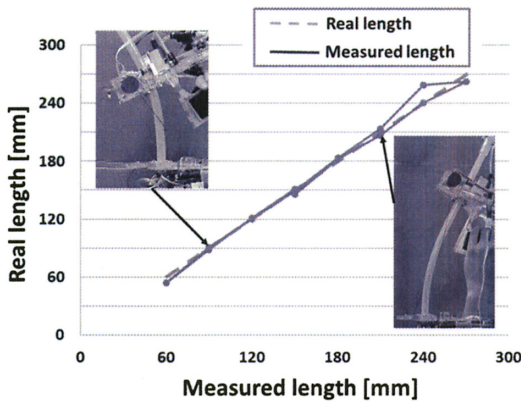


図4 シリンダの計測実験結果

### 5. むだ時間を考慮した制御系の設計

次に前述のセンサ出力を使った姿勢制御法について述べる。提案する制御方法のブロック線図を図5に示す。図中の $r(t)$ ,  $u(t)$ ,  $d(t)$ ,  $y(t)$ ,  $e(t)$ ,  $L_t$ はそれぞれ目標値, 制御入力, 外乱, 出力, 偏差およびむだ時間であり,  $P(s)$ ,  $P_n(s)$ ,  $Q(s)$ はそれぞれシステム, システムのノミナルモデル, フィルタの伝達関数を示す。本制御系は, 外乱を補償するための外乱オブザーバと目標値追従性のためのPID制御の2自由度制御系で構成される。また, 提案制御システムのむだ時間0.5sを試行錯誤的に求め, このむだ時間を補償するため外乱オブザーバにむだ時間補償器, PID制御にスミス補償器を付け加えている。

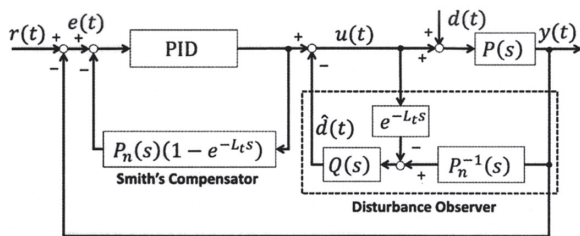


図5 提案する制御方法のブロック線図

提案する制御システムのノミナルモデル, フィルタの伝達関数を以下の式に示す。

$$P_n(s) = \frac{1}{1 + T_n s} \quad (4)$$

$$Q(s) = \frac{1}{1 + T_q s} \quad (5)$$

ここで, 規範モデルの時定数 $T_g$ を0.001s, ノミナルモデルの時定数 $T_n$ を1s, フィルタの時定数 $T_q$ を0.025sとした。 $T_g$ ,  $T_n$ ,  $T_q$ の値は試行錯誤的に決めたものである。また, 使用した柔軟空気圧シリンダのモデルは1型の伝

達関数で近似されるが, 制御系の安定性の問題および組込みコントローラの計算負荷の軽減を考慮して, 1次遅れ要素で近似している。

### 6. 姿勢制御実験

姿勢制御システムの構成図を図6に示す。システムは, ウェアラブル手首リハビリテーション機器, 6個の疑似サーボ弁, 組込みコントローラから構成される。また疑似サーボ弁はコントローラ内のPWMポートとI/Oポートを介して駆動され, 2つの疑似サーボ弁で1つの柔軟空気圧シリンダを駆動している。変位は上述のポテンシオメータの出力がA/D変換器を介して取り込まれ, 式(1)により変位に換算される。そしてシリンダ変位とファンクションジェネレータによる変位の目標値との偏差を求め, 提案する制御方法により疑似サーボ弁を駆動することで各シリンダの位置決め制御を行い, 機器の姿勢制御を行う。

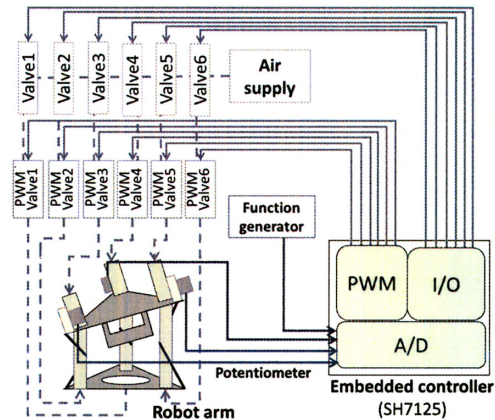


図6 システム構成図

組込みコントローラを用いた制御系では伝達関数を離散化する必要がある。そこで, 式(4)と式(5)をコントローラのサンプリング周期5msで離散化した式を以下に示す。なお, 離散化の手法としてゼロ次ホールドを用いている。

$$P_n(z) = \frac{0.004988}{z - 0.995} \quad (6)$$

$$Q(z) = \frac{0.1813}{z - 0.8187} \quad (7)$$

ここで,  $z$ は進み演算子であり, 信号 $x(k)$ に対して $zx(k) = x(k+1)$ を満たす。

提案する制御則の有効性を確認するため, まず, 一般的なPD制御を用いた姿勢制御実験を行った。その結

果を図7に示す。姿勢制御実験では、ファンクションジェネレータと組み込みコントローラにより各シリンダに周波数0.1Hzの正弦波状の目標値を与え、機器全体としてはエンドステージを40deg傾けたまま1周する動作を目標軌道として与えた。図中の破線は各シリンダ長の目標値、実線はポテンシオメータで計測した各シリンダ長である。図7より、各シリンダ変位は目標値に良好に追従できず大きな誤差を生じている箇所があることがわかる。

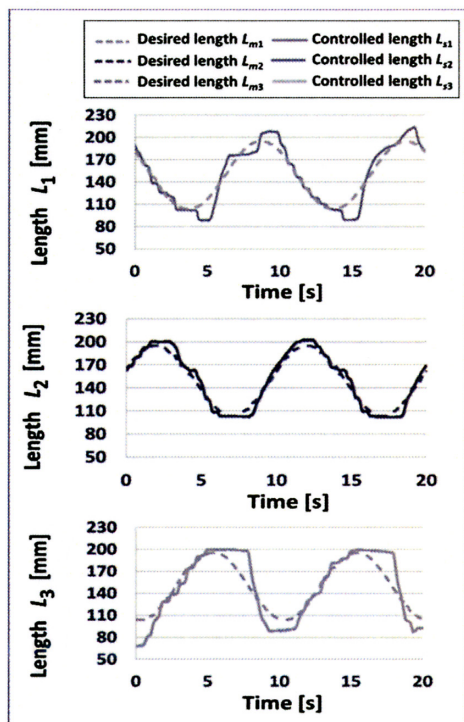


図7 姿勢制御実験結果 (PD制御のみ)

次に、提案する制御方法を用いた姿勢制御実験結果を図8に示す。図8より各シリンダは目標軌道によく追従しており、提案する制御方法での姿勢制御の有効性が確認できる。

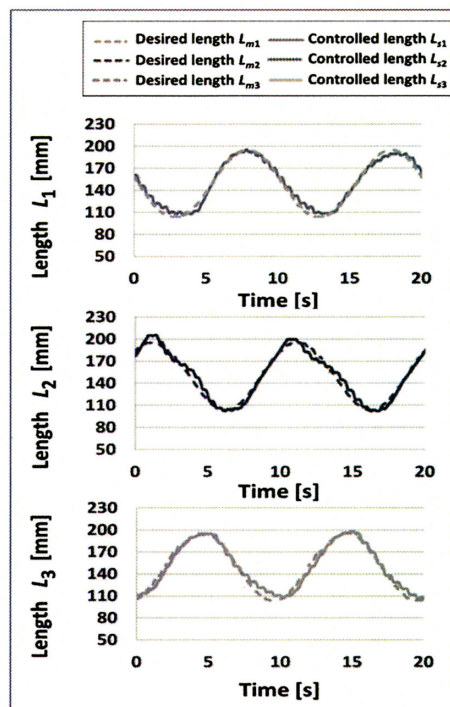


図8 提案する制御方法を用いた姿勢制御実験結果

## 7. 結言

患者自身が自宅で使用することのできるホームリハビリテーション機器としてウェアラブル手首リハビリテーション機器の開発を行い、機器の姿勢制御性能の向上をめざした本研究は以下のように要約される。

湾曲した柔軟空気圧シリンダを計測するためにワイヤ式リニアポテンシオメータを用いた計測方法とその補正式を提案し、計測実験を行った。その結果、提案した計測方法により、湾曲した柔軟空気圧シリンダ変位を計測することが可能であることを確認した。

また、むだ時間を考慮した外乱オブザーバを用いた2自由度制御系を、計算能力や使用メモリに制限のある組み込みコントローラを用いて構成し、ウェアラブル手首リハビリ機器の姿勢制御実験を行った。その結果、周波数0.1Hzの正弦波状の目標値に対して各シリンダが良好に追従できることを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は文部科学省の研究における財政支援事業であるQOL事業および、科研費 JP24560315, JP16K06202の助成を受けたものであり、ここに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 赤木徹也, 堂田周治郎: ロッドレス型柔軟空気圧シリンダの開発とその応用, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 73, No. 731, pp. 2108-2114 (2007)
- 2) N. Kato et al.: Development of Wearable Wrist Rehabilitation Device Using Flexible Pneumatic Cylinders, MATEC Web of Conferences, Vol.51, No.02003, pp.1-5 (2016)
- 3) 伊藤和寿ほか: 水圧サーボモータシステムのロバスト制御に関する性能評価(第2報 外乱オブザーバおよびスライディングモード制御手法による制御系設計), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 38, No. -2, pp. 21-28 (2007)
- 4) 加藤直熙ほか: 外乱オブザーバを用いた組込みコントローラによる柔軟空気圧シリンダの位置決め制御, 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 63-65 (2016)
- 5) Yasuko Matsui et al.: Development of Low-cost Wire Type Linear Potentiometer for Flexible Spherical Actuator, Proc. AIM2016, AIM16\_-294.pdf (2016)
- 6) 趙 菲菲ほか: 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)

# Attitude Control of Wearable Wrist Rehabilitation Device Using Flexible Pneumatic Cylinders

Naoki KATO, Shujiro DOHTA\*, Tetsuya AKAGI\*

and Wataru KOBAYASHI \*

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

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

*Okayama University of Science,*

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

(Received October 31, 2017; accepted December 4, 2017)

Recently, rehabilitation devices using soft pneumatic actuators for the elderly and the disabled are actively researched and developed because of the lack of physical therapists. The purpose of our study is to develop a home rehabilitation device that can be used at home without special knowledge. In ideal, the device is better to be produced at low cost so that user can buy it without financial support from the government. In the previous study, the wrist rehabilitation device using flexible robot arm that consisted of three flexible pneumatic cylinders was proposed and tested. To improve the position control performance of the single cylinder, a disturbance observer with time-delay compensation and Smith's compensator were applied into a built-in tiny embedded controller. In the next step, we aim to apply the proposed controller into the attitude control system of the wrist rehabilitation device. To realize the attitude control of the device, it is necessary to measure the position of bending cylinders. Therefore, we propose a measuring method of bending tube length by using a twisted wire type linear potentiometer and a simple analytical model, and then we apply the method to the attitude control of the device. As a result, the measured length agrees well with the real length of the cylinder. The attitude tracking control of the tested device is also carried out. As a result, we can confirm that the proposed controller is valid to apply the rehabilitation device because of less tracking error.

**Keywords:** wearable wrist rehabilitation device; flexible pneumatic cylinder; embedded controller.