

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開発

加藤 直熙・堂田 周治郎*・赤木 徹也*・小林 亘*

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

(2016年9月30日受付、2016年12月5日受理)

1. 緒言

高齢者や身体障害者などのQOL (Quality of Life, 生活の質) の向上から医療介護、リハビリテーション (以下 リハビリ) 分野での福祉機器の重要性が増している。このようなシステムに使用されるアクチュエータは、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とされる¹⁾。本研究では、以前に柔軟空気圧シリンダ²⁾を用いたロボットアーム³⁾を試作し、手首のリハビリ装置に応用してきた。しかし従来のロボットアームでは、患者は手をロボットの上に置くため手首だけでなく、上肢全体に動きを加えることになり、手首だけを対象としたリハビリは行いにくい。また、患者がベッドで横になっている時間を利用してのリハビリができないなどの問題がある。

そこで、本研究では、従来のロボットアームを腕に装着し、手首のみにリハビリ動作が加えられ、さらに患者がどのような姿勢であっても使用できる装着型手首リハビリ機器の開発を目的とする。

2. 柔軟空気圧シリンダ

以前の研究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(φ9mm)、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から構成される。鋼球は、両サイドから2つの真鍮製ローラ(φ4mm)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され、それに伴いチューブを変形させながら鋼球がローラを押すことで、スライドステージを駆動する。また、スライドステージを固定するとチューブを押し出すことができる。本研究では前者の動作原理を利用する。最低駆動圧力は、120kPaである²⁾。

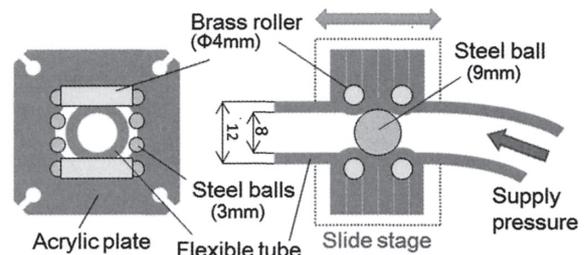


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

3. 装着型手首リハビリ機器

前述の柔軟空気圧シリンダを用いて、患者が横になった状態でも使用できる手首リハビリ機器⁴⁾を試作した。試作した装着型手首リハビリ機器とその機器に搭載された制御システムの外観を図2に示す。このリハビリ機器の可動部分である中空ロボットアームは、内径100mmの穴のあいた三角形ステージを2つ有しており、ハンドルのついた把持側のエンドステージに中心から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ている。そして、腕に固定するベース側ステージにはそれぞれ3組のシリンダ端を接続している。また各シリンダを駆動するための12個のON/OFF弁(株KOGANEI, G010HE-1)のうち6個はエンドステージに配置され、残りの6個はベースステージに配置している。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⁵⁾を構成している。また空気圧はベース側のステージから配管と管継手を使ってそれぞれの疑似サーボ弁に供給され、エンドステージとベースステージ間はコイル状の配管チューブにより供給される。またコントローラとなるマイクロコンピュータ(ルネサスエレクトロニクス(株), SH7125)はベースステージの下側に設置し、弁駆動用のトランジスタ回路や2つの加速度センサにフラットケーブルを使って接続している。このロボットアームのサイズはφ207×142mm、全質量は、前述のコントローラを含み1.14kgと軽量である。

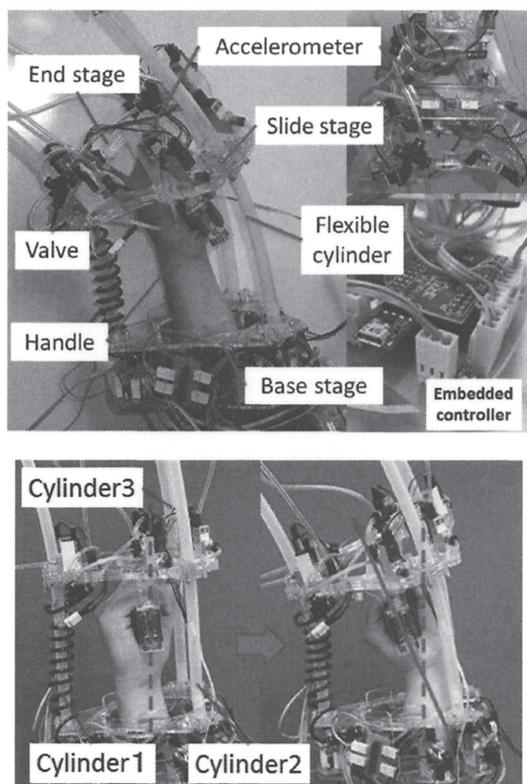


図2 装着型手首リハビリ機器の構造

4. 解析モデルおよび姿勢制御実験

ロボットアームの姿勢角の定義と制御のための解析モデル⁶⁾を図3に示す。図3(a)に、ロボットアームの湾曲方向角 α と湾曲角 β の定義を示す。また、図3(b)は各シリンダ(L_1 , L_2 , L_3)の投影モデル図である。図3(a)、(b)に示すようにロボットアームが湾曲した時の柔軟空気圧シリンダの形状が、常に円弧であると仮定する。ここで、ロボットの中心から、ある1つのシリンダ中心に向かう方向をX軸方向として、X軸からの角度を湾曲方向角 α 、Z軸とロボットアーム上面の法線ベクトルとなす角度を湾曲角 β と定義する。

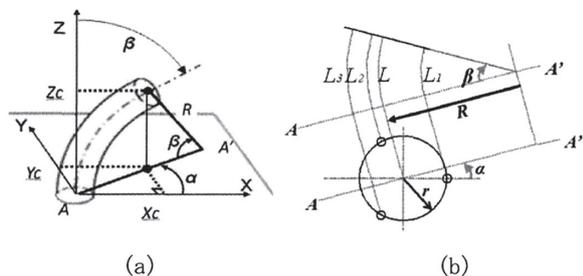


図3 機器の解析モデル

図3の幾何学的な関係から、各シリンダ長さ L_1 , L_2 , L_3 と曲率半径 R について以下の式が得られる。

$$L_1 = (R - r \cdot \cos \alpha) \cdot \beta \quad (1)$$

$$L_2 = \left\{ R - r \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha \right) \right\} \cdot \beta \quad (2)$$

$$L_3 = \left\{ R - r \cdot \cos \left(\frac{4\pi}{3} - \alpha \right) \right\} \cdot \beta \quad (3)$$

$$R = L / \beta \quad (4)$$

ここで、 L は人間の腕の長さ($L=100\sim 200\text{mm}$)、 r はシリンダの中心からの距離($r=87.5\text{mm}$)を示す。角度 α と β は、加速度計の出力電圧から水平面に対する重力加速度を計測し、その値から求めることができ、次式で与えられる。

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \quad (5)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{V_z}{V_{z\max}} \quad (6)$$

ここで、 V_x , V_y , V_z は加速度センサの初期値からの差電圧であり、 V_x , V_y は水平面からの角度、 V_z は鉛直面からの角度に対応するものである。また、 $V_{z\max}$ はステージが水平と鉛直になる場合の V_z の差電圧である。上述のモデルにより得られたシリンダの変位から目標値との偏差を求め、PID制御則を用いて擬似サーボ弁を駆動し、柔軟空気圧シリンダを動かすことで、姿勢制御を行う。ここで用いたPID制御則を(7)式に示す。

$$u_j(k) = K_p \cdot d_j(k) + K_d \{d_j(k) - d_j(k-1)\} + K_i \cdot \sum d_j(k) \quad (7)$$

Switching valves

End stage : OFF, Base stage : ON ($u_j(k) > 0$)

End stage : ON, Base stage : OFF ($u_j(k) < 0$)

End stage : OFF, Base stage : OFF ($u_j(k) = 0$)

上式中の j はシリンダの番号1, 2, 3を示し、 $d_j(k)$ は現在の偏差、 $d_j(k-1)$ は1サンプル前の偏差を示す。 $u_j(k)$ の絶対値は擬似サーボ弁のPWM駆動弁の入力duty比であり、また、上述の条件分けのように $u_j(k)$ の正負により、給気・排気を変える切替用のON/OFF弁が駆動される。

装着型手首リハビリ機器の制御システムの構成を図4に示す。システムは前述のリハビリ機器、6個の擬似サーボ弁、コントローラであるマイクロコンピュー

タ(SH7125)から構成される。また疑似サーボ弁はPWMポートとI/Oポートに接続され、それぞれ3本の柔軟空気圧シリンダのシリンダ端部に接続されている。またエンドステージにはエンドステージの傾斜を測定するための加速度センサ(株式会社KIONIX, KXM52-1052)が取り付けられており、その x, y, z 軸方向の加速度成分はマイコン内のA/D変換器を介して取り込まれる。制御の流れは以下の通りである。加速度センサとモデルを使って求めた各シリンダ変位と、前もって設定していた目標値との偏差を求め制御則により疑似サーボ弁を駆動し、各シリンダの位置決め制御を行い、姿勢制御を行う。

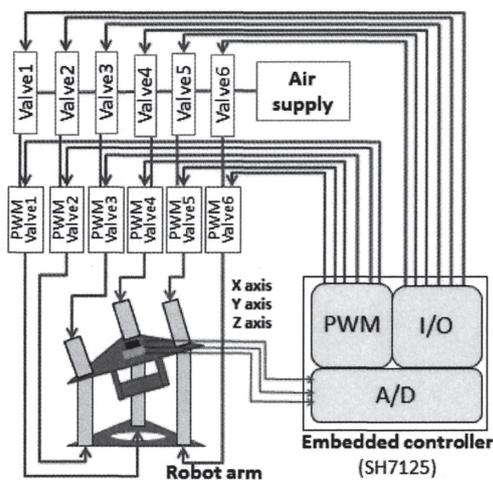


図4 システム構成図

姿勢制御実験における各シリンダ長さの過渡応答結果を図5に示す。実験では、サンプリング周期7msでPID制御を用い、初期長さ $L=150\text{mm}$ である。また、各制御ゲインは、 K_p を3.5%/mm、 K_d を2.5%/mm、 K_i を0.05%/mmとした。図5において、破線および実線は、それぞれ、各シリンダの目標変位と制御変位を示す。図の実験結果から、手首の負荷がある状態でも各シリンダ変位は約1秒以内に目標値に達していることが確認できる。

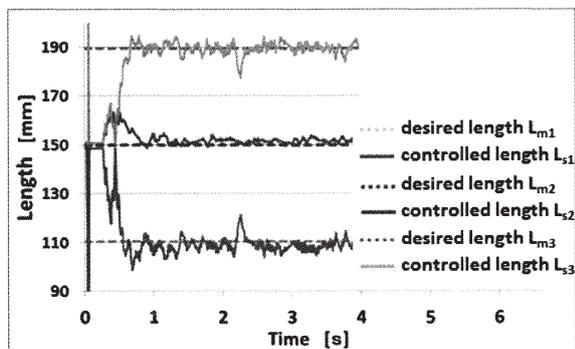


図5 過渡応答実験結果

そこで、次に実際のリハビリを想定した各シリンダ長さの多点位置決め制御を行う。その制御結果を図6に示す。図6 (a), (b), (c)はそれぞれシリンダの長さ L_1, L_2, L_3 (図3参照)の応答を示す。実験では4秒ごとに各シリンダの目標角度を変化させ、機器の目標値追従能力を確認する。図6中の破線は各シリンダの目標値、実線は各シリンダの制御変位を示す。図6を見てわかるように、シリンダ変位は多少振動的ではあるが、時間的に変化する目標値に対して3本のシリンダがそれぞれ追従できていることが確認できる。

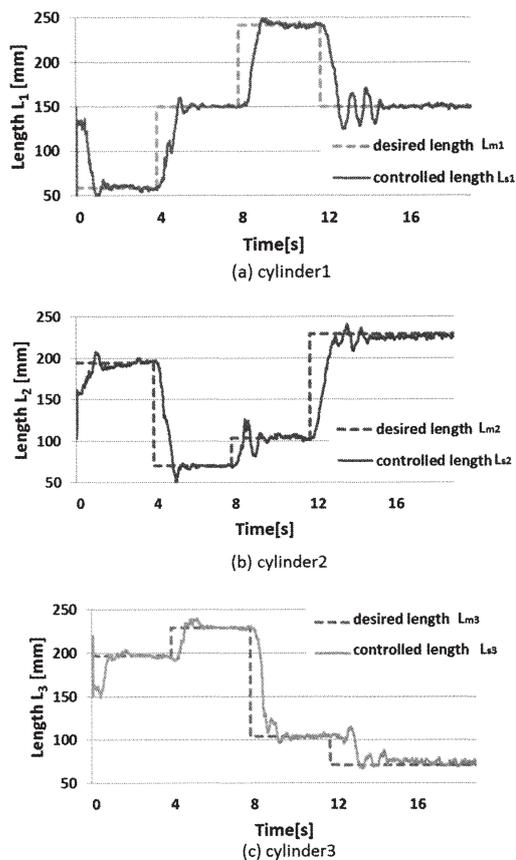


図6 多点位置決め制御実験結果

5. 装着型手首リハビリ機器の改良

前述のように、リハビリ機器内のシリンダは多点位置決めに対して比較的良く追従できることを確認した。しかし、この姿勢制御ではベースステージを水平に保つ必要があり、機器を傾けた状態で動作させると制御ができないという問題がある。そこで加速度センサをベースステージ、エンドステージそれぞれに取り付け、機器自体の姿勢も計測を行うように改良した。以上の改良により、加速度センサを2個使用するため(1)~(3)式の α, β は修正する必要がある。そこで、新たに2つの加速度センサ出力から湾曲方向角 α と湾曲角 β を求

める以下の式を導出した。

$$\alpha = \alpha_e - \alpha_b \quad (8)$$

$$\beta = \cos^{-1} (\cos \beta_e \cdot \cos \beta_b - \sin \beta_e \cdot \sin \beta_b \cdot \cos \alpha) \quad (9)$$

ここで、 α_e 、 β_e はエンドステージの湾曲方向角と湾曲角、 α_b 、 β_b はベースステージの湾曲方向角と湾曲角であり、これらは(5)、(6)式から求められる。(8)、(9)式を用いて α 、 β を求め、(1)～(4)式を用いて、各シリンダの長さや曲率半径を求めることができる。

改良したリハビリ機器のシステム構成図を図7に示す。基本的なシステムは以前のリハビリ機器と同様であるが、相違点としてベースステージに新たに加速度センサを取り付け、それをコントローラ内のA/D変換器で取り込む点が挙げられる。

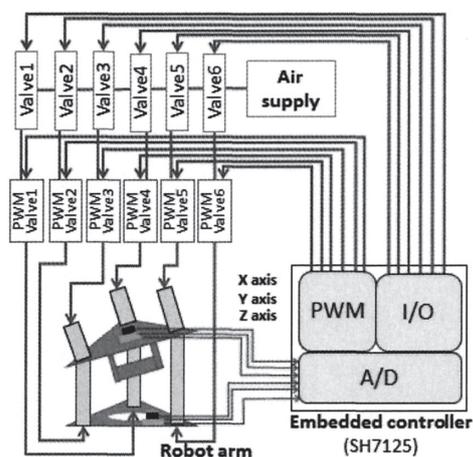


図7 改良したシステム構成図

改良したリハビリ機器を使用した多点位置決め制御実験結果を図8 (a), (b), (c)に示す。実験では、機器のベースステージを20度傾けた状態で位置決め制御を行った。制御におけるサンプリング周期は7ms、制御則としてPID制御を用い、各シリンダの初期長さ L を150mmとした。また、各制御ゲインは誤差が小さくなるように試行錯誤的に決め、 K_p を3.5%/mm、 K_d を3.5%/mm、 K_i を0.3%/mmとした。図8 (a), (b), (c)はそれぞれシリンダ長さ L_1 、 L_2 、 L_3 (図3参照)の時間変化であり、破線は目標値、実線は制御変位を示す。図8を見ると、図5の水平に設置した場合に比べ多少誤差は大きいものの機器を20度傾けた状態でも目標値に追従できていることが確認できた。

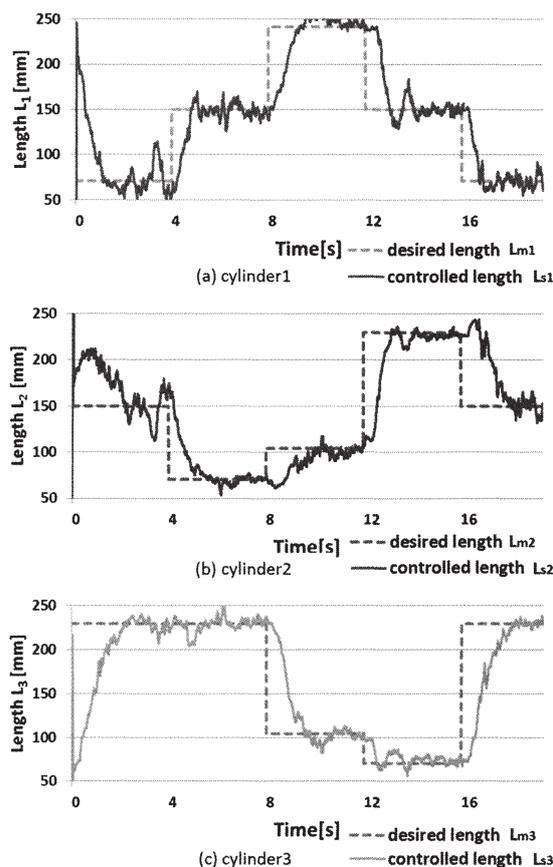


図8 改良した機器の多点位置決め制御実験結果

6. 結言

患者がどのような姿勢でも手首のリハビリが可能な装着型機器の開発をめざした本研究は以下のように要約される。

- (1) 3本の柔軟空気圧シリンダにより手首に湾曲動作を加えるリハビリ機器を提案し、試作した。さらにコントローラや弁を機器に搭載することで装着型の手首リハビリ機器を実現した。
- (2) 試作機器を用いて、解析モデルによるシリンダ変位の計測とその計測値を用いたPID制御による姿勢制御を行った。その結果、手首の負荷がある状態でも1秒以内で目標値に追従することができることを確認した。
- (3) 機器に傾斜を加えた状態でも動作可能にするための2つの加速度センサを用いた計測システムを構築し、改良した試作機器を用いてPID制御による姿勢制御を行った。その結果、機器を20度傾けた状態でも目標値に追従することができることを確認した。

実験結果より目標値付近での振動は、柔軟空気圧シリンダの摩擦やリハビリを受ける患者からの力といっ

た外乱も影響を与えていると考えられる。今後は、外乱を補償するために外乱オブザーバを用いたロバストな制御システムを開発し、組み込みコントローラにより柔軟空気圧シリンダの位置決め制御を行う予定である。

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) Y. Nagata et al. :Soft-Actuators-Forefront of Development, NTS Ltd., pp.291-335 (2004)
- 2) 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)
- 3) Takafumi Morimoto et al. :Development of Flexible Haptic Robot Arm Using Flexible Pneumatic Cylinders with Backdrivability for Bilateral Control, Lecture Notes in Electrical Engineering 345, Springer, pp.231-237 (2015)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) M. Aliff et al. :Development of a Simple-structured Pneumatic Robot Arm and Its Control using Low-cost Embedded Controller, Journal of Procedia Engineering, Vol.41, pp.134-142 (2012)

Development of Wearable Wrist Rehabilitation Device Using Flexible Pneumatic Cylinders and Embedded controller

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 September 30, 2016; accepted December 5, 2016)

Recently, rehabilitation devices using soft pneumatic actuators for disabled are actively researched and developed because of the insufficient number of physical therapists. In the previous study, the wrist rehabilitation device using flexible robot arm that consisted of three flexible pneumatic cylinders was proposed and tested. However, the device is necessary to set on the table. Therefore, in this study, the wrist wearable type rehabilitation device is proposed and tested. The attitude control based on an analytical model of the device is also carried out. As a result, it is confirmed that the device can trace the desired position when a human wears the device. In addition, the attitude control system of the device using an embedded controller and two accelerometers is investigated and carried out. The measuring system of differential bending angle between the base and the end stage of the device is also constructed in the built-in embedded controller. By using this measuring system, we can confirm that the improve device can realize the attitude control for rehabilitation even if the device is used in the tilted condition.

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