

# 柔軟チューブを用いた超音波式柔軟変位センサの開発

森本 貴文・赤木 徹也\*・堂田 周治郎\*・松井 保子

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

(2015年9月30日受付、2015年11月9日受理)

## 1. 緒言

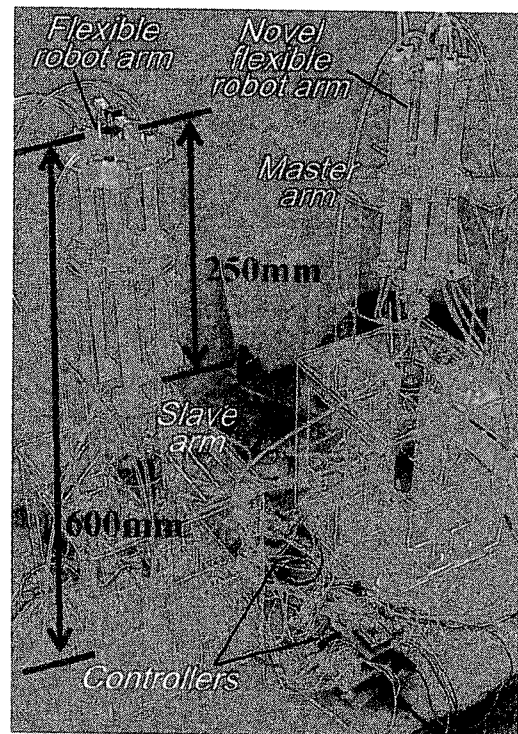
近年、高齢者や身体障害者などのQOL(生活の質)の向上の観点から医療介護、リハビリテーションの分野での福祉機器の重要性が増している。このようなシステムに使用されるアクチュエータは、高い人間親和性が求められる。また、安全で人体に優しいソフトアクチュエータの開発が求められている<sup>1)</sup>。著者らの研究室では、以前よりこのような要求を満たすアクチュエータとして、柔軟空気圧シリンダ<sup>2)</sup>を用いたロボットアームを開発し、手首のリハビリテーションを想定したバイラテラル制御システム<sup>3)</sup>を提案・試作しました。

しかし、そのシステムにおける変位計測はロボットに直列に接続した直動式センサを用いているため、装置のサイズの問題が依然として残されている。そこで、本研究では変位計測システムの小型化および低コスト化を目指す。すなわち、本論文では、小型かつ低コストな柔軟性を有する計測システムとして、柔軟チューブと超音波センサを用いて、超音波式柔軟変位センサを提案・試作した結果について述べる。

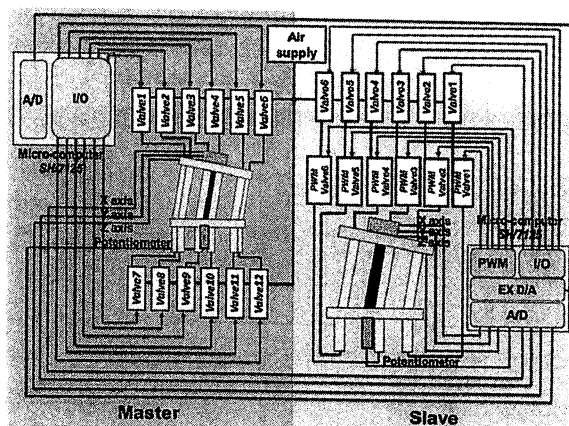
## 2. バイラテラル姿勢制御システムの構成

図1に以前の研究<sup>4)</sup>で開発したロボットアームを用いたバイラテラル姿勢制御システムを示す。各ロボットアームは、2つの円形のステージと3つの柔軟空気圧シリンダで構成されている。これは外径100mmの上部および下部ステージを有しており、ステージの中心からφ66mm、120deg.の位置に3本の柔軟空気圧シリンダが取り付けられている。各柔軟空気圧シリンダの端部は、上部ステージに固定されている。このロボットアームのサイズはφ100×250mm、全質量は450gと軽量である。

患者が使用するロボットアームには、柔軟空気圧シリンダを3本並列に配置した柔軟ロボットアームを用い、加速度センサ、組み込みコントローラ(樹ルネサステクノロジ SH/7125)と6個の疑似サーボ弁<sup>5)</sup>で構成されている(以後このロボットアームを「スレーブアーム」と呼ぶ)。PT(理学療法士)が使用する柔軟ロボットアームは、3つの新規の柔軟空気圧シリンダ<sup>6)</sup>から構成されたロボットアームを用いる(以後このロボットアーム



(a) システムの概観



(b) システム構成図

図1 バイラテラル姿勢制御システム

を「マスターアーム」と呼ぶ)。各シリンダ端とスライドステージが円板に締結され、12個のON/OFF弁と組込みコントローラ(株式会社ネサテクノロジー、SH/7125)を有している。さらに、両方のロボットアームは変位計測のため中央位置に下部円板から上部円板の変位を測定するポテンシオメータに接続された背骨柔軟チューブを有している。このため、ロボットアームの長さは250mmであるが、計測装置を含めた装置全体の長さは600mmと比較的大きい。

### 3. バイラテラル姿勢制御の流れ

図2にバイラテラル姿勢制御のブロック線図を示す。スレーブアームの姿勢制御では、スレーブ側の組込みコントローラが目標値としてA/D変換器を介してマスター側のポテンシオメータと3軸加速度センサの出力電圧を取得する。これらの値と柔軟ロボットアームの解析モデル(マスターモデルおよびスレーブモデル)<sup>4)</sup>から、マスターおよびスレーブアームの下部円板ステージから上部円板ステージのそれぞれのシリンダの長さを算出する。スレーブ側の各シリンダは、制御則に基づいて偏差を少なくするように制御を行う。ここで、制御則としてPID制御則を用い、サンプリング周期3msである。さらに、マスターとスレーブアームの各シリンダ偏差の絶対値が5mm以上になる場合のみ、マスターアームは、オン/オフ制御により偏差が小さくなるように駆動される。マスターアームのオン/オフ制御は、図2の「ジャッジ」を介して、スレーブアームのコントローラからの電圧信号に応じて駆動される。この他の信号には、シリンダと駆動させる方向の情報を27通りの動作パターンのアナログ閾値として与える。各シリンダの偏差が $\pm 5\text{mm}$ 内であれば、マスターアームは、手で自由に動かせる状態(リセット状態)を維持する。この方法により、特定の条件が満たされた場合にのみ、マスターアームはPTに位置を提示することができる。

バイラテラル姿勢制御の実験の様子を図3に示す。図3(②と③)の上下の矢印は、それぞれ操作者とマスターアームが与えた力の移動方向を示す。図3(③)でスレーブ

アームを手で固定した場合に、操作者の所望の方向とは逆方向に向かってマスターアームを引っ張るようにシリンダ内の鋼球が駆動されることがわかる。以上のように試作システムにおいて簡単な制御方法でバイラテラル制御が実現できていることを確認した。

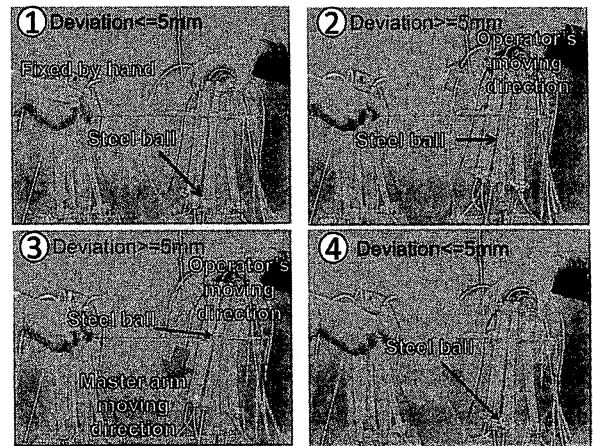


図3 バイラテラル姿勢制御の様子

### 4. 超音波式柔軟変位センサ

前述のリハビリテーション装置を使用する場合、図1(a)に示すように変位測定用ポテンシオメータを直列に配置する必要があり装置が大型になる。さらに、現状のポテンシオメータは約5万円と高価であり、全体のコストを高くしている。そこで、変位測定システムの小型化および低コスト化が必要である。また、ロボットの変位センサは柔軟性がありコンパクトで低コストである必要がある。そこで、柔軟チューブと超音波センサを用いた柔軟な変位センサを試作した。図3に超音波センサを用いた試作柔軟変位センサの構造を示す。試作センサは、市販の超音波センサ(PARALLAX製、28015-RT)とその超音波センサを覆うアクリルカバーとアクリルカバーに取り付けられた2つのチューブコネクタに接続された2つの細い柔軟チューブ(内径4mm、外径2.5mm)と内径8mm、外径12mmの柔軟チューブから構

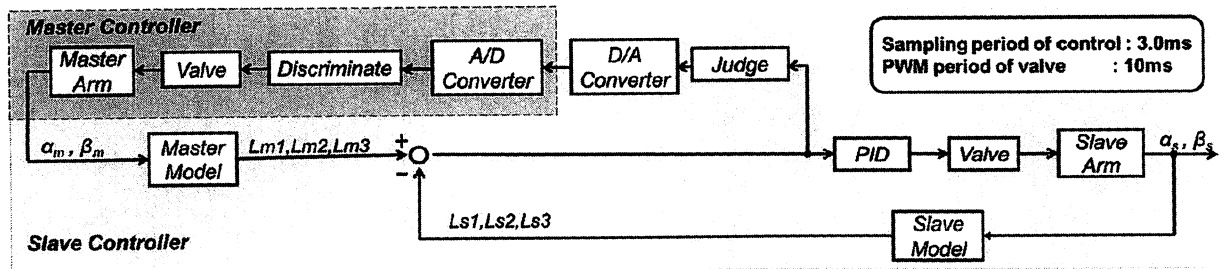


図2 バイラテラル姿勢制御のブロック線図

成される。この2本の細径チューブが大径(8mm)チューブに接続されている。また、ロボットアームの上部および下部ステージ間の距離を測定するために、大径チューブ上にスライドステージが必要となる。そこで、内径13mm、外径25mm、厚さ5mmのリング状のネオジウム磁石と鋼球をスライドステージとして用いた。測定システムは、試作センサ、スライドステージと組み込みコントローラ(ルネサステクノロジ製、SH7125)で構成される。超音波センサを含む試作変位センサと磁石のコストは、約4000円と安価である。このコストはポテンショメータを使用した場合のコストの約12分の1である。

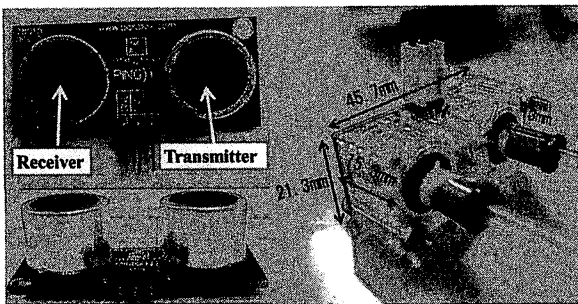


図4 柔軟変位センサの構造

図5に試作センサの測定原理を示す。測定手順は以下の通りである。まず、測定システム内の組み込みコントローラ(SH7125)が、 $5\mu s$ のトリガパルスを超音波センサに送信する。その信号入力に伴い、超音波の発信器は40kHzの周波数で $200\mu s$ 間超音波を発振する。図5に示すように、生成された超音波が内径2.5mmの柔軟チューブを伝送管として通過する。その後、超音波がチューブの端部に達し、内径8mmの柔軟チューブに伝達される。その後、超音波がスライドステージの鋼球で反射し、内径2.5mmのもう1つの柔軟チューブを介して受信機に到達する。組み込みコントローラ(SH7125)は、受信機が送信機からの超音波を検出するまでの時間をカウントすることにより超音波センサとスライドステージ間の距離を測定することができる。これは、測定された時間と音速の乗算で距離を表すことができる。この方法により、試作変位センサは柔軟チューブが曲がった場合でもスライドステージまでの変位を測定することが可能となる。

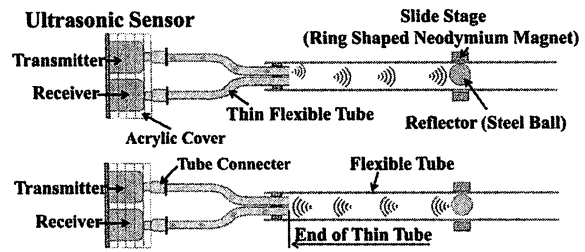
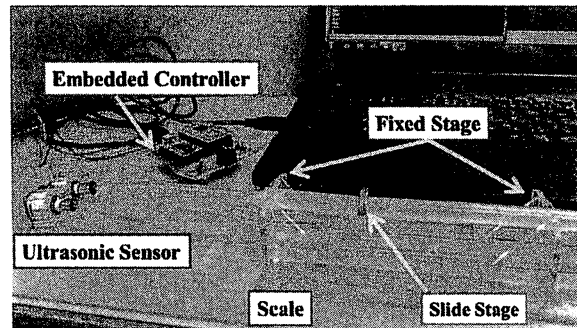


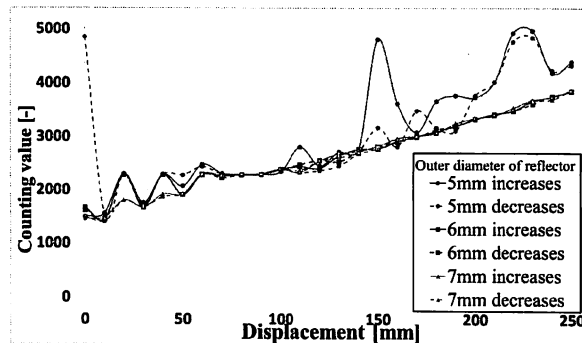
図5 試作変位センサの動作

### 5. 柔軟変位センサの基本特性

試作センサの特性を調べるために、磁石のスライドステージの変位を測定する実験を行った。図6(a)は、スライドステージの変位を測定するための実験装置を示す。実験装置は試作センサ、チューブの端を固定するための2つの固定ステージとスライドステージで構成される。実験ではスライドステージの鋼球として外径が5mm、6mmおよび7mmのものを使用した。図6(b)は、チューブの端部からのスライドステージの変位と組み込みコントローラのカウント値との関係を示す。装置の関係上、カウント値は受信信号の先端から $250\mu s$ を除外した値である。また、超音波センサは、トリガ信号から $750\mu s$ 後に対応する信号を発生する。したがっ



(a) 変位測定装置

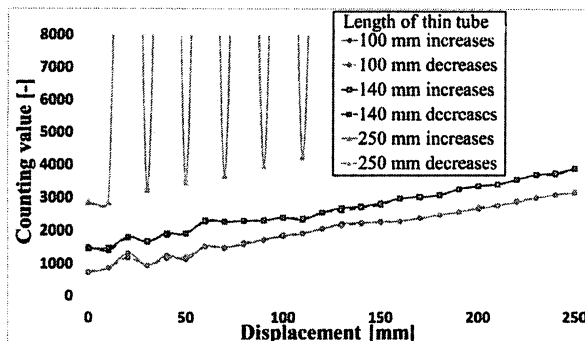


(b) 鋼球のスライドステージの変位とカウント値の関係

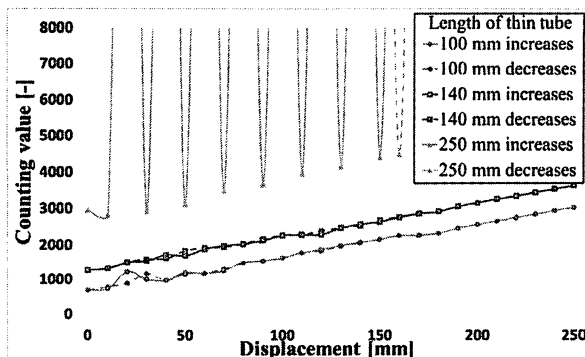
図6 試作変位センサの変位測定実験

て、組込みコントローラは、トリガ信号から1ms後にこの信号を測定し始める。図6(b)において、各線は鋼球の外径の違いを示す。実線と破線は、それぞれスライドステージの変位の増加する場合と減少する場合を示している。図6(b)に示すように、小径の鋼球を用いた場合に大きな測定誤差があることが分かる。これは、小径の鋼球では超音波が十分に反射しないためと思われる。この結果から、外径の大きい鋼球をリフレクタとして使用することが有用であると分かる。

つぎに、細径チューブの長さの影響を調べるために、100mm、140mm、200mmの異なる長さの細いチューブを用いた実験を行った。図7(a)および(b)に7mmの鋼球と長さ9mm、外径7.5mmの円筒状のアクリル製リフレクタを使用した場合のスライドステージの変位とカウント値の関係を示す。円筒形リフレクタは、磁石の動きに追従させるために内部に外径5mmの鋼球を有している。各線は細いチューブの長さの違いを示す。また、スライドステージの変位が増加する場合と減少する場合を実線と破線で示す。両図において、カウント値が2200あたりに不感帯が存在することがわかる。この現象はまだ明らかにされていないが、この現象の影響が少なく、より直線的な関係を示す140mmの長さの細い柔軟チューブと円筒形リフレクタを使用した方がよいことがわかる。



(a)  $\phi$  7mmの鋼球使用例



(b) 外径7.5mmの円筒形リフレクタ使用例

図7 細径チューブの長さのスライドステージの変位とカウント値の関係

このセンサの分解能は、カウントのサンプリング周期 ( $0.602 \mu\text{s}$ ) と音速 ( $20^\circ\text{C}$ ,  $343.26\text{m/s}$ ) から計算することができ、約0.1mmである。この分解能は柔軟ロボットアームの変位センサに適用するのに十分である。また、円筒形リフレクタが細いチューブ端を閉じたときに、短い変位の範囲内でエコー音によりエラーが現れている。しかし、この0から約50mmの範囲は、柔軟ロボットアームの構造上、柔軟変位センサとして使用しない範囲である。ここで、サンプリング周期は、200mmの変位を測定する場合、約4msである。

図8は、柔軟チューブをランダムに屈曲させた時の測定実験の様子を示す。図8中の矢印は柔軟チューブに力を入れた方向を示す。実験では、スライドステージを特定の位置に固定している。図8に示すように、チューブが屈曲してもカウント値がほとんど変化しないことが分かる。これは、チューブが曲がった場合でも正確に変位計測が出来ていることを示している。

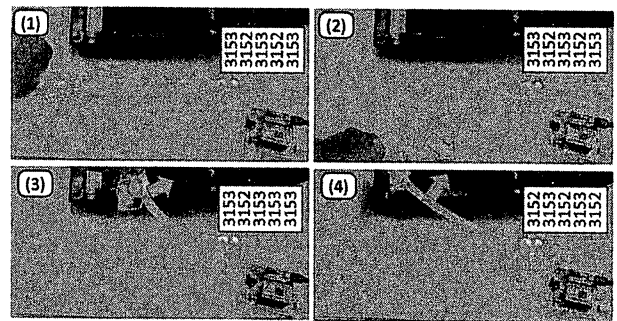


図8 柔軟チューブを屈曲させた時の測定実験

## 6. 結言

本研究は以下のように要約される。

- (1) 超音波センサとアクリルカバー、2つの細い柔軟チューブ、リング状ネオジウム磁石を使用したスライドステージとリフレクタを入れた柔軟チューブから構成される柔軟な変位センサを提案し、試作した。
- (2) 試作変位センサの測定原理を述べるとともに、試作変位センサは柔軟チューブが曲がる場合でもスライドステージまでの変位を測定することができる。試作変位センサのコストは、約4000円と安価である。
- (3) 試作変位センサの性能を調べるために、リフレクタの大きさや細い柔軟チューブの長さの影響を調査した。その結果、不感帯が少なく、より直線的な関係を有する140mmの長さの細い柔軟チューブと円筒形リフレクタの組み合わせが適していることを確認した。このセンサの分解能は約0.1mm、計測のサンプリング周期は約4msと短く、試作センサは柔軟ロボットアームの変位センサとして有用であることを確認した。

## 参考文献

- 1) Y. Nagata, ed., "Soft-Actuators-Forefront of Development", NTS Ltd., (2004), pp291-335.
- 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, (2007), pp. 2108-2114.
- 3) T. Morimoto, T. Akagi, S. Dohta, S., "Development of Flexible Haptic Robot Arm Using Flexible Pneumatic Cylinders with Backdrivability for Bilateral Control", Lecture Notes in Electrical Engineering 345,(2015).
- 4) M. Aliff, S. Dohta, T. Akagi and H. Li, "Development of a Simple-structured Pneumatic Robot Arm and Its Control using Low-cost Embedded Controller", Journal of Procedia Engineering, Vol.41, (2012), pp.134-142.
- 5) F. Zhao, S. Dohta and T. Akagi, "Development and Analysis of Small-Size Quasi-Servo Valve for Flexible Bending Actuator", JSME Trans., Series C, Vol.76, No.772, (2009), pp.3665-3671.
- 6) T. Morimoto et. al. "Development of Flexible Pneumatic Cylinder with Backdrivability and Its Application", International Journal of Materials Science and Engineering, Vol.3, No.1, (2015), pp.7-11.

# Development of Ultrasonic Type Flexible Displacement Sensor Using Flexible Tube

Takafumi MORIMOTO, Tetsuya AKAGI\*, Shujiro DOHTA\*  
and Yasuko MATSUI

*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, 2015; accepted November 9, 2015)

In our previous study, the flexible robot arm using the flexible pneumatic cylinders for human wrist rehabilitation was proposed and tested. The low-cost bilateral control system using tested robot arm was also proposed and tested. However, there is the following problem when it is used for the rehabilitation device. This device becomes larger in size, because the displacement sensor (potentionmetar) is connected to the central tube in series. In this paper, in order to miniaturize the displacement measuring system and reduce its cost, the flexible and compact displacement sensor using the ultrasonic sensor is proposed and tested. The fundamental characteristics of the tested sensor are investigated. As a result, the flexible displacement sensor with the resolution of about 0.1 mm and the measuring sampling period of about 4 ms could be realized.

**Keywords:** flexible displacement sensor; pneumatic robot arm; flexible pneumatic cylinder; rehabilitation device; ultrasonic sensor.