岡山理科大学紀要 第48号 A pp. 17-21(2012)

ゴム人工筋の変位計測用内径センサの改良

劔持　雄司・赤木　徹也*・堂田　周治郎*・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

（2012年９月28日受付、2012年11月１日受理）

１．緒　言

近年、少子高齢化進行から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行われ、医療・福祉分野への応用が期待されている[1),2)]。すなわち、人間親和性の高い軽量かつ制御性能の良いアクチュエータの開発が望まれる。しかし実用化のためには、さらなるアクチュエータの高機能化が必要である。また、ウェアラブル性向上の目的から外部に変位センサを有しないアクチュエータの開発も必要である。

そこで、本研究では外部のセンサを用いることなくゴム人工筋の軸方向変位を推定できる内径センサの開発と、それを用いて位置決め制御を行うことを目的とする。本論文では試作した内径センサの構造やその改良点について述べる。

２．従来の内径センサ[3)]

２－１　基本特性と動作原理

ゴム人工筋は、内径が膨らむことによって網目状の被覆繊維の交差角が変化し、軸方向の変位に変換される構造を有している。したがって、ゴム人工筋の内径を知ることによって軸方向の変位を推定することができる[4)]。図１に従来の内径センサの構造を示す。センサは市販のフォトリフレクタ(GENIXTEK CORP。製TPR-105) 2個と、その回路基板と高さ調節用の厚さ1mmのアクリル板で構成されている。2個のフォトリフレクタは基板を介して両面に配置されている。またセンサの根元にはフォトリフレクタの出力端子が配置され、シールを保つために円板状の隔壁が取り付けられている。センサの寸法は縦9mm、横45mm、厚さ8mmで、これをゴム人工筋内部に組み込む。人工筋の自然長は250mm、加圧しない場合の内径は10mmである。

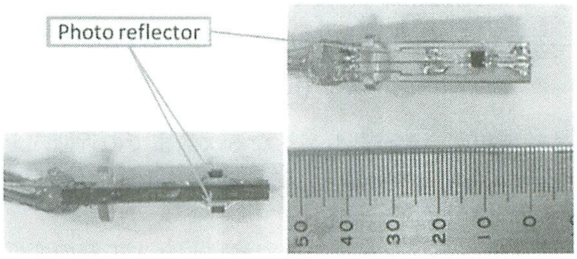
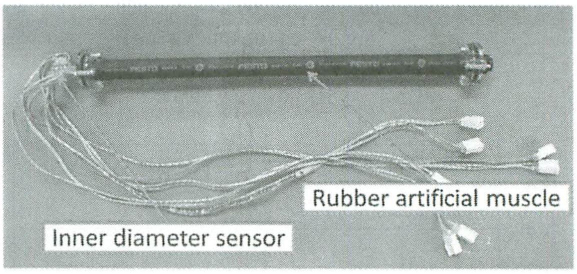
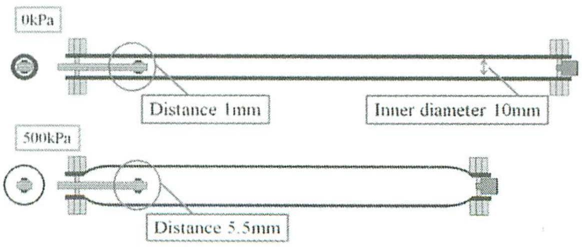


図1　従来の内径センサ

図２(a)に内径センサ入りゴム人工筋の外観、図２(b)にその測定原理図を示す。内径センサの測定原理は以下の通りである。印加圧力によって、人工筋チューブが膨らむと壁面とフォトリフレクタとの間の距離が大きくなり、フォトリフレクタの出力電圧が下がる。その出力電圧の変化から人工筋の内径を知ることができる。フォトリフレクタと人工筋チューブの内壁面との初期間隔は1mmに設定している。



(a)　外観



(b)　測定原理図(人工筋の断面図)

図２　内径センサ内蔵型ゴム人工筋

２－２　センサの変位特性

図３に、内径センサの出力値(A/D変換値)とゴム人工筋に並列に配置したポテンショメータによる測定変位(真値)の関係を示す。実験では人工筋の入力圧力を0～500kPaまで50kPa毎に加圧し、その後減圧した。図は5回の測定結果である。図より非線形な関係であるが再現性があることがわかる。このデータをもとに軸方向変位y[mm]とセンサ値x[AD変換値]との間の次式で表わされる近似関数を求め、位置決め制御に用いる。

$$y = 2.003\times 10^{-13}x^6 - 1.477\times 10^{-10}x^5 + 3.878\times 10^{-8}x^4 - 3.235\times 10^{-6}x^3 - 1.091\times 10^{-4}x^2 + 6.086\times 10^{-2}x \quad \left(\text{相関係数}：R^2 = 0.999\right) \tag{1}$$

これは相関係数が最も高くなる次数までの近似式をエクセルを使って計算した結果であり、センサ値xの6次まで必要である。

図４にポテンショメータで測定した人工筋の変位(真値：実線)と、内径センサで求めた式(1)による推定変位の比較結果を示す。図を見ると、真値と推定変位がよく一致しており、内径センサの有効性が確認できる。

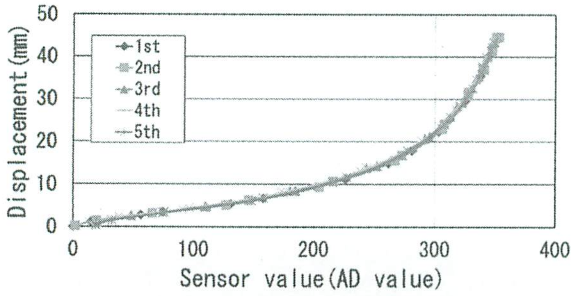


図３　内径センサの特性

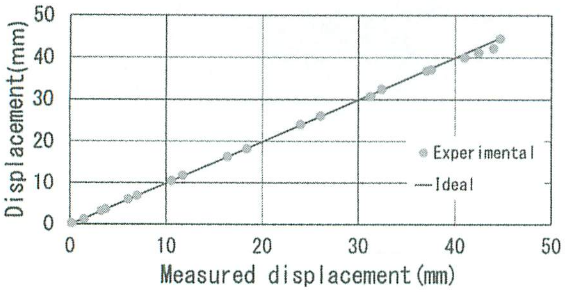


図４　計測値と推定変位の比較

３．改良型内径センサ(片端式)

３－１　構造と改良点

図１に示す従来の内径センサでは、構造上空気の供給口とセンサの位置を同一端に設置できなかったため、動作範囲に制約を受けていた。またセンサ設置部に曲げ力が加わった場合チューブが変形し誤差を生じるという問題があった。そのため本研究では図5に示すように、回路基盤の間に薄いプラスチックシートを挟み蝶が羽を広げたようにチューブを保持することで、人工筋の中心付近に内径センサを設置できるように改良した。また、このプラスチックシート(サイズ:縦20mm×横40mm×厚さ0.1mm)は、フォトリフレクタによる計測の障害にならないように、フォトリフレクタを中心に約8mmの幅で切り込みを入れている。また、従来のセンサは、2つのフォトリフレクタを個々に独立した回路で構成していたため、各基板に赤外線LEDと受光素子用の電源(Vcc) 2端子とGND、出力端子の計4端子が必要であり、両面では計8本必要であった。これに対し、改良センサでは従来センサの外部で構成していた回路をチップ抵抗を用いて構成することで、電源、GND、2出力の4端子のケーブルに集約した。また各基板での電源とGNDを共有するため、図５の上図で示す3つのスルーホールを使って両面に供給している。なお、プラスチックシート部分をのぞくセンサの基板サイズは従来のものと同じである。

これらの改良により、内径センサを円板状の隔壁に直接取り付けなくなったため、図５の下図に示すように隔壁のスペースが空き、空気供給口とセンサ用ケーブルをゴム人工筋の一端に集約することができた。

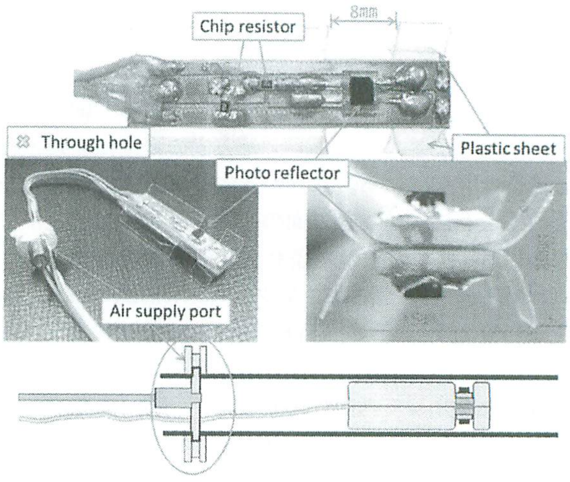


図５　改良型内径センサ(片端式)

３－２　基本特性

改良した内径センサの動作確認のため、人工筋の入力圧力を0～500kPaまで50kPa毎に変えた場合の変位とセンサ出力の関係を調べた。その結果を図６に示す。縦軸は人工筋の軸方向変位、横軸は内径センサ内の2つのフォトリフレクタからの電圧出力のA/D変換値の合計であり、図中の記号は測定回数の違いを示す。図に示すように、変位推定はできたものの内径センサが

チューブ内で動き、実験するたびに測定値が変わるという問題が生じた。これは、センサ基板の傾きによって生じると考え、センサの傾斜に対する補正を行うことにする。

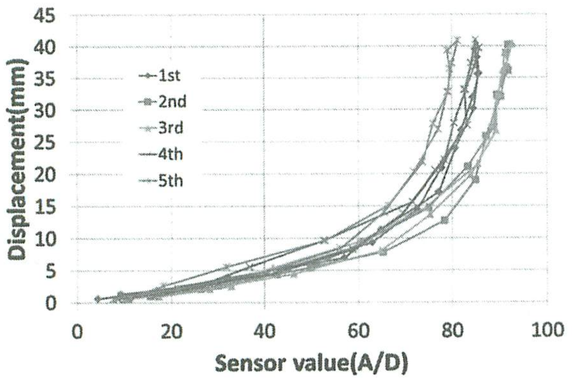


図６　内径センサの出力値（A/D変換値の合計）と人工筋の変位の関係

４．改良型内径センサ（両端式）

４－１　構造と改良点

ゴム人工筋チューブ長手方向の傾きによる誤差を補正するために、図７に示すように内径センサの長手方向に2つのフォトリフレクタを追加し、傾斜の補正を行う。ここで図７に示すセンサの基板サイズは図１、図５に示すものと同じく9×45×8㎜である。

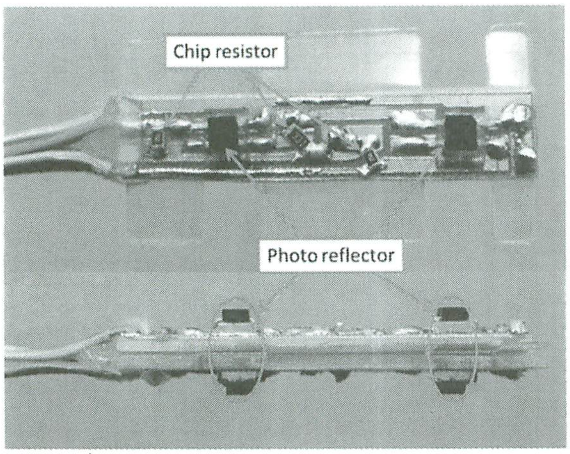


図７　改良型内径センサ（両端式）

４－２　補正解析モデル

図８に改良型内径センサの傾斜に対する補正解析モデルを示す。図は各フォトリフレクタの計測点（中心）でのチューブ内断面を示したものである。図はチューブ壁面に対してセンサ基板が交差角θを有している場合である。

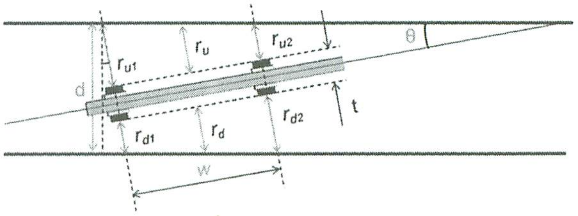


図８　傾斜補正のための解析モデル

各フォトリフレクタによる測定変位をr_{u1}、r_{u2}、r_{d1}、r_{d2}とすると同一基板上に設けたフォトリフレクタから得られる傾斜角θ_1、θ_2は以下の式で表される。

$$\theta_1 = \tan^{-1}\{(r_{u1} - r_{u2})/W\} \tag{2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\{(r_{d2} - r_{d1})/W\} \tag{3}$$

ここでWはフォトリフレクタ計測点間距離であり、W =20.4㎜である。また角度θ_1、θ_2は理想的な計測が行われていれば同一の角度となるため、センサの傾斜角θはその平均値と見なされるので、次式で与えられる。

$$\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2 \tag{4}$$

また各基板上の2つのフォトリフレクタ間の中心位置における距離r_u、r_dは次式で表わされる平均値として求められる。

$$r_u = (r_{u1} + r_{u2})/2 \tag{5}$$

$$r_d = (r_{d1} + r_{d2})/2 \tag{6}$$

さらに実際の人工筋の内径dは基板の厚さtを含むこれらの計測値r_u、r_dの和に計測値を考慮した値となるので次式で表わされる。

$$d = (r_u + r_d + t)\cos\theta \tag{7}$$

以上の式による内径dの計測手順は以下の通りである。まず、4つのフォトリフレクタの出力電圧からr_{u1}、r_{u2}、r_{d1}、r_{d2}を求め、式(2)、(3)よりθ_1、θ_2を求め、式(4)よりθを求める。そして、これらを(5)～(7)式に代入し、dを求める。

以上の方法より、傾斜によらず正確な内径を計測することが可能となる。

４－２　基本特性

前述の式(2)～(7)を用いて内径測定の補正を行った。この解析モデルを用いた算出内径と、人工筋変位との関係を図９に示す。図中の各記号は実験回数を示す。実験では、人工筋の入力圧力を0～500kPaまで50kPa毎に変えた場合の人工筋の軸方向変位と、マイクロコンピュータにより計算を行った補正後の内径を、シリアル通信を利用してパソコンに取り込み、測定した。図９から測定回数によらずセンサ出力は常に同じように変化し、内径に対して人工筋の変位が大きなヒステリシスを生じることなく変化していることがわかる。

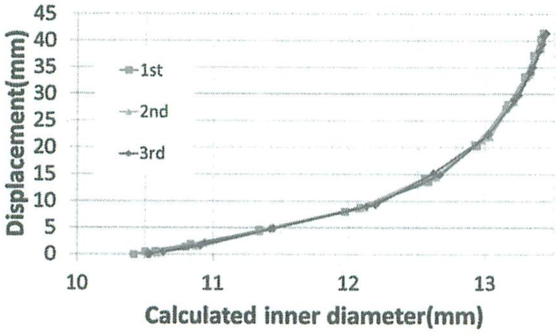


図９　内径センサ算出内径と人工筋変位の関係

５．結 言

本研究では、ゴム人工筋に大きな力を加えた場合でも正確に内径を測定できるセンサへの改良を行った。本研究で得られた結果は以下のように要約される。

1)　羽根のついた内径センサを提案し、試作し、内径センサをゴム人工筋チューブ中央部に配置することができ、さらに、空気の供給口とセンサ出力端子をゴム人工筋の一端に集約することができた。
2)　内径センサ基板上にチップ抵抗を使った回路を構成し、従来の内径センサに比べ、人工筋の端部から出力する端子数を8つから4つにすることができ、コンパクト化が実現できた。
3)　フォトリフレクタ4つを用いて内径サンサの傾きを補正して、内径測定を行う方法を提案した。さらに実際の変位と推定変位を比較し、その有効性を確認した。

今後の課題として、試作した内径センサ内蔵型ゴム人工筋を使って、実際に浴槽などで用いる入浴介助機器を構成し、制御実験を行うことなどが挙げられる。

参考文献

1) T. Noritsugu, M. Takaiwa and D. Sasaki: Development of Power Assist Wear Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.21, No.5, pp.607-613(2009)
2) H. Kobayashi, T. Shiban and Y. Ishida : Realization of all 7 motions for the upper limb by a muscle suit, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.5, pp.504-51(2004)
3) 赤木徹也，堂田周治郎，趙菲菲，藤田圭司：内径センサ内蔵型ゴム人工筋の開発と制御，日本機械学会論文集(C編)，Vol.77, No.779, pp.2711-2719(2011)
4) C. Chou and B. Hannaford: Measurement and Modeling of Mckibben Peumatic Artifical Muscles, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.12, No.1, pp.90-102(1996)

Improvement of Inner Diameter Sensor to Measure the Displacement of Rubber Artificial Muscle

Yuji KENMOTSU, Tetsuya AKAGI*, Shujiro DOHTA*
and Yoshinori MORIWAKE
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 28, 2012; accepted November 1, 2012)

The purpose of this study is to develop a high-power flexible actuator with a displacement sensor which can be used in supporting a bathing. In our previous study, we proposed and tested a rubber artificial muscle with the inner diameter sensor. The sensor consists of two electric circuit boards with two photo reflectors. The sensor is inserted into the tube of the artificial muscle. This sensor can be expected to estimate the axial direction displacement of the rubber artificial muscle, because the relation between the inner diameter and the axial directional displacement of the muscle has a strong correlation. However, if the external bending force is applied to the end of the muscle, the inner diameter sensor cannot hold at the center position of the tube. Therefore, the sensor cannot measure the inner diameter exactly. In this study, the improvement of the inner diameter sensor was executed. The improved sensor has 4 photo reflectors on the two electric circuit boards to compensate the measuring error. As a result, the axial direction displacement of the muscle could be estimated well by the tested inner diameter sensor.

Keywords: rubber artificial muscle; built-in sensor; position control; inner diameter sensor.