

## ゴム人工筋を用いた柔軟湾曲アクチュエータの開発と応用

趙 菲菲・堂田 周治郎\*・赤木 徹也\*

岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

\* 岡山理科大学工学部知能機械工学科

(2010年9月30日受付、2010年11月9日受理)

### 1. 緒言

近年の急速な高齢社会の進行にともない、高齢者や障害者の介護に伴うヘルパーの人手不足が深刻な問題になりつつある。そのため高齢者や障害者の日常生活の支援・介護を行うことができる介護支援ロボットの開発や、それらに用いるウェアラブル制御機器の開発が活発に行われている<sup>1)~3)</sup>。そのようなロボットは人間との接触が避けられず、用いる制御機器は小型、軽量、柔軟性、安全性、信頼性といった人間親和性が要求される。アクチュエータにおいても柔軟なアクチュエータの開発が重要となってくる<sup>4)</sup>。

介護支援ロボットには、移動して様々な作業をするために、人間のような器用なソフトハンドが必要不可欠であり、本研究室では、鈴木らが開発した繊維強化ゴム製のフレキシブルマイクロアクチュエータに注目し、指やハンドの研究を行ってきた。篠原らはシリコンゴム製のソフトグリッパ<sup>5)</sup>を開発したが、発生力が小さい、製作に数日を要するなどの問題があった。そこで、本研究では、小型のマッキベン型ゴム人工筋を利用して、短時間かつ容易に製作でき、発生力の大きい柔軟湾曲アクチュエータの開発を目的とした。さらに、試作した湾曲アクチュエータをレスキューロボットにおける柔軟ロボットハンドに応用した。なお、この柔軟湾曲アクチュエータは、将来、手・指の不自由な人のための代用ハンドとして使用したり、マッサージ用アクチュエータなどとして使用することを考えている。

### 2. ソフトグリッパ

篠原ら<sup>5)</sup>が開発したソフトグリッパの構造を図1に示す。このグリッパはハンドを構成することで、いろいろな形状をした対象物を柔軟な指で確実に把持することを目的としたものである。ソフトグリッパは繊維拘束された中空薄錐型のシリコンゴムで構成され、その底面には、伸張を防ぐためのプラスチックシートが埋め込まれている。動作原理は以下の通りである。グリッパの圧力室を加圧すると膨張力が生じ、繊維拘束により軸方向に伸びるが、グリッパ底部の伸びが抑えられるため、グリッパは底面側に湾曲する。このグリッパを用いて柔軟なロボットハンドを構成し、種々の軽量物体を把持することができた<sup>5)</sup>。しかしながら、このグリッパの製作には数日を要し、熟練した技術も必要である。また、発生力も3N(500kPa印加時)程度で人間の指(約15N)に比べる

と、小さいという欠点を有する。そこで、本研究では、より容易に製作でき、さらに、大きな発生力が得られる柔軟湾曲アクチュエータを提案し、試作する。

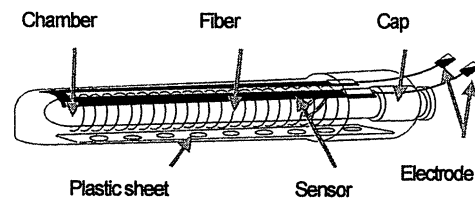


Fig. 1 View of soft gripper

### 3. 柔軟湾曲アクチュエータ

#### 3-1 構造と動作原理

図2、図3にゴム人工筋であるマッキベン型アクチュエータを用いた柔軟湾曲アクチュエータの構成要素と構造を示す。試作したアクチュエータは市販の配管用チューブ(株式会社SMC製:内径12mm,外径18mm)の表面にチューブ幅の2/3程度の深さ(8mm)で、4mm幅の溝を7mmピッチで切り込み、内部に直径10mmのマッキベン型アクチュエータを入れている。また、配管用チューブを用いることで、内部のマッキベン型アクチュエータを変えることなく、外側のチューブのみの交換で仕様の変更が容易であり、外側の拘束体が分離できることから追加加工がしやすくなっている。また、マッキベン型アクチュエータの両端には外側の拘束用のチューブの内径より大きなキャップとコネクタをつけており、アクチュエータが湾曲する時に内部のマッキベン型アクチュエータがずれるのを防止している。マッキベン型アクチュエータは、内径3mm,外径4mmのシリコンチューブを電線被覆チューブ(FLチューブ:デンカエレクトロン製FL-6L-10)で覆った簡単な構造のアクチュエータである。この湾曲アクチュエータの構造は簡単で、製作も容易で、一時間程度で完成し、製作時間を大幅に減少することができた。

柔軟湾曲アクチュエータの動作原理は以下の通りである。ゴム人工筋を加圧すると、半径方向の伸びが抑えられ、軸方向に自然長の1/4程度の収縮が生じる。この収縮は外部に切込みのあるチューブにより、軸方向の片側が拘束されるため、切込みのある側へ湾曲する。

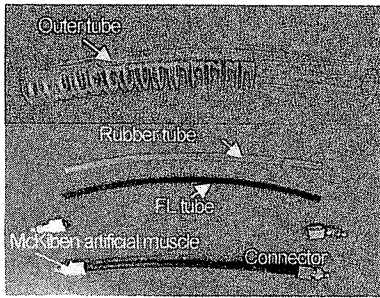
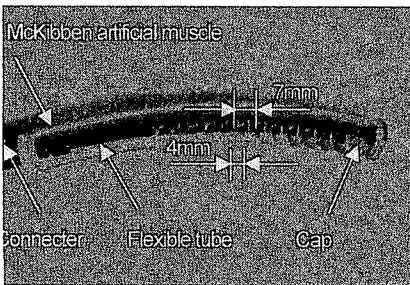
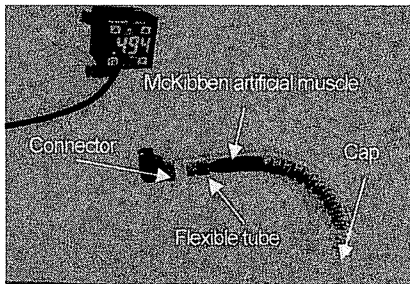


Fig. 2 Components of tested actuator



(a) View of tested actuator



(b) Principle of operation

Fig. 3 Tested bending actuator

3.2 基本特性

試作した柔軟湾曲アクチュエータの基本特性として供給圧力を変えた場合の発生力について調べる。実験方法は以下の通りである。図4に示すように湾曲アクチュエータを固定し、その先端がデジタルフォースゲージ (SHINPO 製: FGC-0.5) と垂直に接触するように設置する。また、アクチュエータやフォースゲージは実験台上に固定されている。実験では、湾曲アクチュエータの切り込み割合 (アクチュエータの全長に対する切り込み部分の長さの割合) が 25%, 30%, 50%, 70% のものを用いて、アクチュエータの供給圧力と、アクチュエータがデジタルフォースゲージを押し付ける力を発生力として、供給圧力-発生力特性を調べる。図5に供給圧力として 0kPa から 500kPa まで 100kPa 毎に加圧した際の湾曲アクチュエータの供給圧力と発生力の関係を示す。図中の記号◆, ■, ▲, ●はそれぞれアクチュエータの切り込みの割合が 70%, 50%, 30%, 25% の場合を示す。図4より、供給圧力

の増加とともに発生力は2次関数的に増加することがわかる。また、切り込み割合が大きくなれば発生力が小さくなること分かる。これは、外側の拘束体の剛性が低くなるため、アクチュエータ先端部での力が弱くなるためである。このように、アクチュエータの発生力は最も大きい切り込み割合 70% の場合で 14.3N, 最も小さい切り込み割合 25% で 23.9N となり、従来のソフトグリップに比べ、5~8倍の発生力を得ることができた。

試作湾曲アクチュエータの供給圧力に対する湾曲角を調べる実験は発生力の測定の場合と同様にアクチュエータをステージに固定した状態で供給圧力を加え、その湾曲状態をデジタルカメラで撮影し、湾曲角を測定する。ここで湾曲角の定義としては図6に示すように、アクチュエータ根元部分 (固定部分) の軸線ベクトルとアクチュエータ先端部の方向ベクトルが交差する角度を湾曲角とする。図7に 0kPa

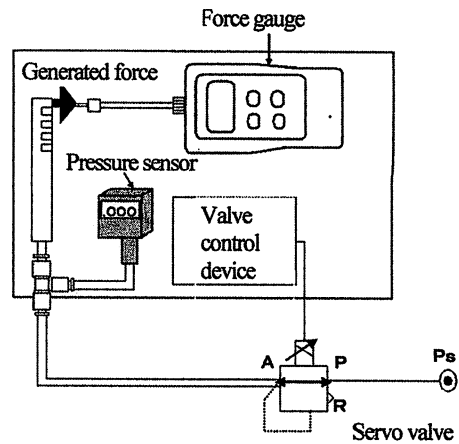


Fig. 4 The measurement device of generated force

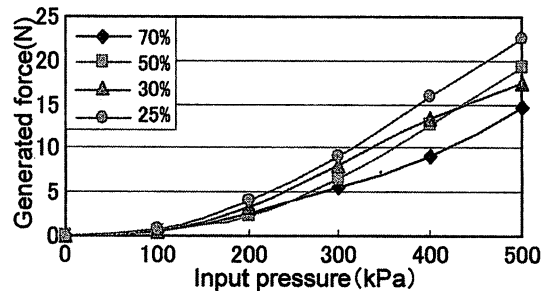


Fig.5 Relation between input pressure and generated force of tested actuator

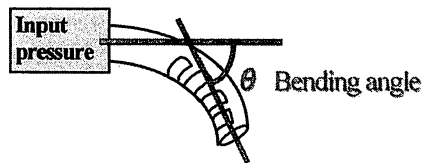


Fig.6 Definition of bending angle

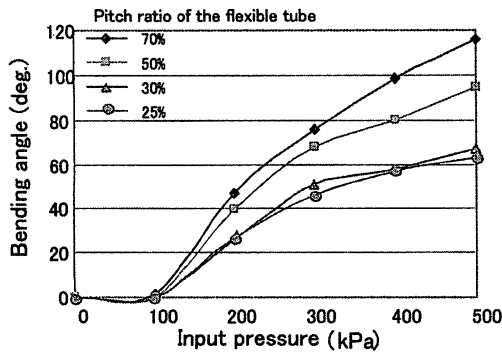


Fig.7 Relation between input pressure and bending angle of tested actuator

から500kPaまで100kPa毎に供給圧力を変えた場合の湾曲アクチュエータの供給圧力と湾曲角の関係を示す。図中の記号◆, ■, ▲, ●はそれぞれアクチュエータの切り込み割合が70%, 50%, 30%, 25%の場合を示す。図7から切り込み割合が大きくなるとチューブの剛性が低くなり曲がりやすくなる。そして、それに伴い湾曲角が大きくなる事が分かる。実験では切り込み割合70%の場合、最大116deg.であった。これまでの結果から、発生力特性と湾曲角特性を合わせて評価すると、切り込み割合が25%と70%では最大発生力で8.9Nの差しかなく、70%の場合が湾曲角も大きく、発生力も15N程度と人間の指程度の力を発生することから、ハンドに用いる湾曲アクチュエータとして切り込み割合が70%のものが推奨される。

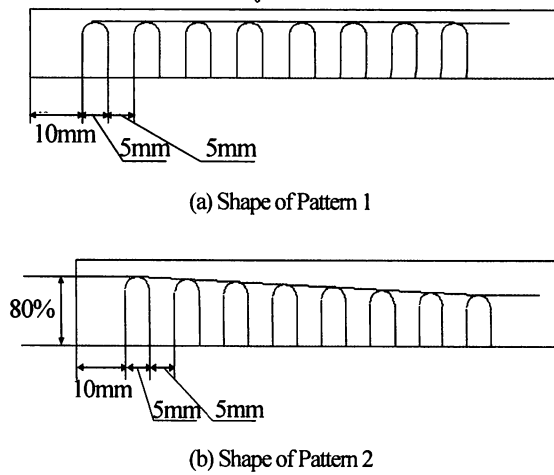
これまで、製作方法や発生力、湾曲特性について述べた。しかし、チューブの種類や切り込み方については検討していない。また、試作した湾曲アクチュエータは、人間の指と比べて太い。そこで、次節ではチューブの種類や切り込み方を変えることで発生力や湾曲角がどのように影響されるかについて調べる。そして、湾曲アクチュエータを細くしても、発生力、湾曲角がともに向上するチューブの種類や切り込み方について検討する。

#### 4. 改良した湾曲アクチュエータ

##### 4.1 チューブや切り込み深さの影響

前節までのチューブは、内径12mm、外径18mmと肉厚であるため剛性が高く湾曲しにくくなっていた。そこで、内径12mm、外径14mmのチューブ1と内径12mm、外径15mmのチューブ2に変更し、従来のチューブより剛性を低くして実験を行う。また、前節の湾曲アクチュエータは、外側の拘束チューブの切り込みをハンドソーを用いて加工していた。しかし、ハンドソーでは切り込み形状の工作精度が低く、切り込みすべてを均一に切り込むのは困難であった。そこで、ここではレーザ加工機(株comnet製Laser Pro Venus 12W)を用いて切り込み加工を行う。前節では切り込み割合を変えて発生力や湾曲角などの特性を調べたが、切り込み深さの影響を調べ

る。図8に示すように全体の長さは150mmと同じであるが、先端部を10mm残し、5mm幅の溝を10mmピッチで数を8個に固定し、チューブ幅(外径)に対する切り込み深さの割合を切り込み深さ割合と定義し、その影響を調べる。図8より切り込み割合は57%となる。



(a) Shape of Pattern 1

(b) Shape of Pattern 2

Fig. 8 Slit shape of tube

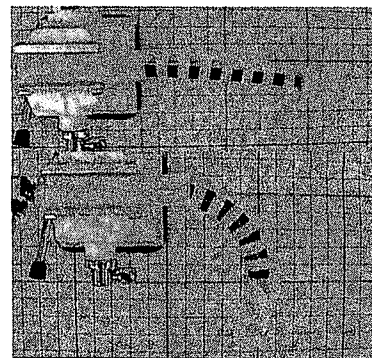


Fig.9 Improved bending actuator (Pattern 1)

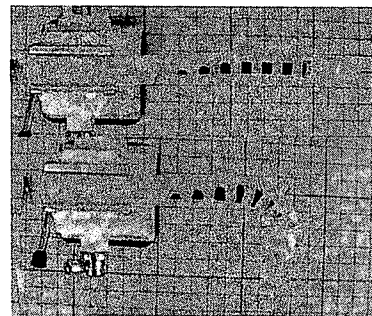


Fig.10 Improved bending actuator (Pattern 2)

さらに、切り込みパターンの違いで湾曲角などが変化するかを調べるため2つのパターンのアクチュエータを試作した。パターン1(図9)では、切り込み深さを一定にし、切り込み深さ割合を40%, 60%, 80%の三種類のものを製作した。

パターン2 (図10) では、先端の溝の切り込み深さ割合を80%に固定し、末端(根元側)の溝の切り込み深さ割合を80%以下に変えることで、先端から末端にかけて次第に溝が浅くなるテーパ状に切り込みを入れ、切り込み深さ割合を80%~40%、80%~60%の二種類のものを作製した。切り込みは内径12mm、外径14mmのチューブと内径12mm、外径15mmのチューブのどちらも切り込み深さ割合を同様にした。

#### 4.2 発生力特性

改良した湾曲アクチュエータの基本特性として供給圧力を変えた場合の発生力について調べた。実験方法は前節と同様である。実験では、湾曲アクチュエータの切り込み深さ割合が切り込みパターン1の40%、60%、80%、パターン2の80%~40%、80%~60%のものを用いて、供給圧力-発生力特性を調べた。しかし、図11に示すように、内径12mm、外径14mmのもの(チューブ1と呼ぶ)では供給圧力を高くすると切り込みパターン1、パターン2ともに座屈するという問題が生じたため、計測できなかった。これは、肉厚を小さくしたため剛性が低くなったためである。次に、内径12mm、外径15mmのもの(チューブ2と呼ぶ)だが、パターン1の80%と同様の座屈問題が起きたが、その他のものでは生じなかった。

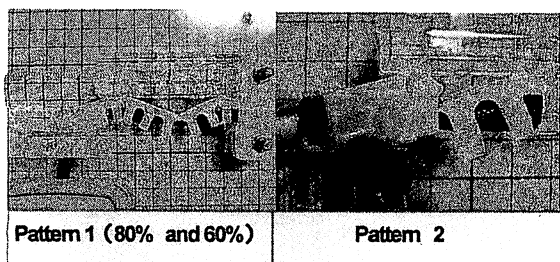


Fig. 11 Buckling of the improved actuator (Tube1)

図12に供給圧力として0kPaから500kPaまで100kPa毎に加圧した際の、内径12mm、外径15mmのチューブ2を用いた湾曲アクチュエータの供給圧力と発生力の関係を示す。図中の記号◆, ■, ▲, □, △はそれぞれアクチュエータの切り込み深さ割合が切り込みパターン1の80%、60%、40%、パターン2の80%~60%、80%~40%の場合を示す。図12より、パターン1の80%では座屈問題が生じたため発生力が2次関数的に増加していないが、その他のものでは2次関数的に増加していることがわかる。また、前節のアクチュエータと同じように切り込み割合が大きくなると外側の拘束体の剛性が低くなり、アクチュエータ先端部での発生力が小さくなることがわかる。実験で得られた最大発生力は80%~40%の切り込みの場合19.3Nであった。前節のアクチュエータと比較すると4.6N減少したが、ここでの切り込み割合は、前節の57%の湾

曲アクチュエータの発生力(17N程度)に相当するため、約2N増加したことになる。

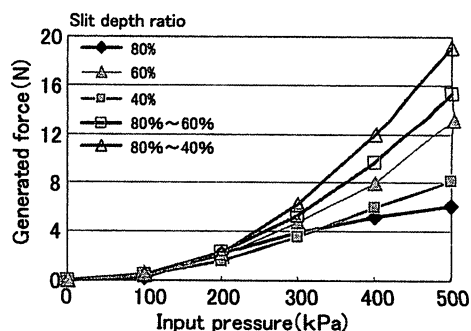


Fig. 12 Relation between input pressure and generated force of improved actuator (Tube 2)

#### 4.3 湾曲角特性

改良した湾曲アクチュエータの供給圧力に対する湾曲角を調べる実験方法は前節と同様である。図13に0kPaから500kPaまで100kPa毎に供給圧力を変えた場合の湾曲アクチュエータ(内径12mm、外径14mmのチューブ1を使用)の供給圧力と湾曲角の関係を示す。図中の記号◆, ■, ▲, □, △はそれぞれアクチュエータの切り込み深さ割合が切り込みパターン1の80%、60%、40%、パターン2の80%~60%、80%~40%の場合を示す。この図からパターン1では切り込み割合が大きくなると湾曲角が大きくなる。これは、チューブの剛性が低くなるためである。実験ではパターン1の切り込み深さ割合が80%の場合で最大100deg.、パターン2の切り込み深さ割合が80%~60%の場合で最大104deg.であった。前節のアクチュエータの最大湾曲角116deg.と比較すると少し小さいが切り込み割合57%(105deg.程度)を考えると差はないと言える。また、図9と図10の下側の写真を見て分かるように、パターンを変えることで湾曲状態に違いが見られる。

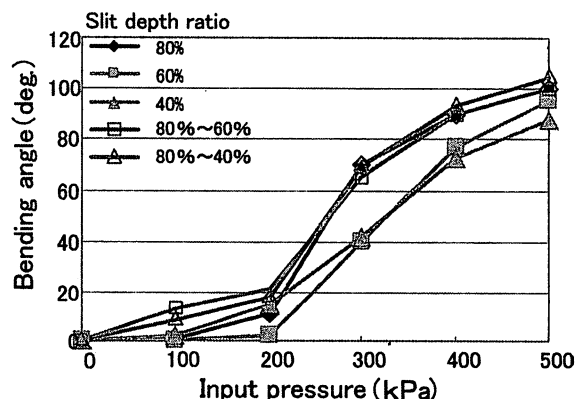


Fig. 13 Relation between input pressure and bending angle of improved actuator (Tube1)

これはパターン1とパターン2で末端(根元側)の剛性が変わるためである。

次に、図14に0kPaから500kPaまで100kPa毎に供給圧力を変えた場合の湾曲アクチュエータ(内径12mm, 外径15mmのチューブ2を使用)の供給圧力と湾曲角の関係を示す。図中の記号◆, ■, ▲, □, △はそれぞれアクチュエータの切り込み深さ割合が切り込みパターン1の80%, 60%, 40%, パターン2の80%~60%, 80%~40%の場合を示す。この図からパターン1, パターン2ともに切り込み深さ割合が大きくなると湾曲角が大きくなることわかる。実験ではパターン1の切り込み深さ割合が80%の場合で最大102deg., パターン2の切り込み深さ割合が80%~60%の場合で最大105deg.であり、内径12mm, 外径14mmのチューブ1と同程度の湾曲角が得られた。しかし、図15に示すように、パターン1と2の湾曲状態に大きな違いは見られなかった。これは、チューブの厚みを1mm厚くしたため全体の剛性が高くなり、少しの切り込み深さの違いでは湾曲に影響を及ぼさないためである。

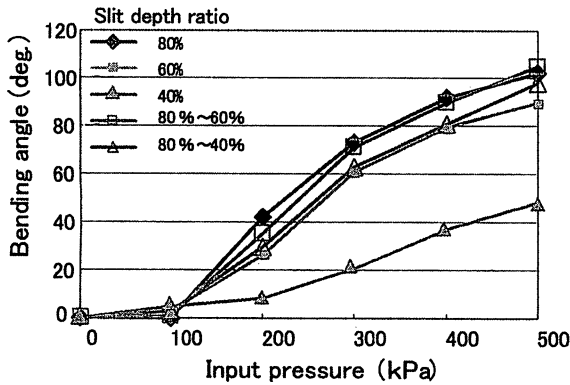


Fig. 14 Relation between input pressure and bending angle of improved actuator (Tube2)

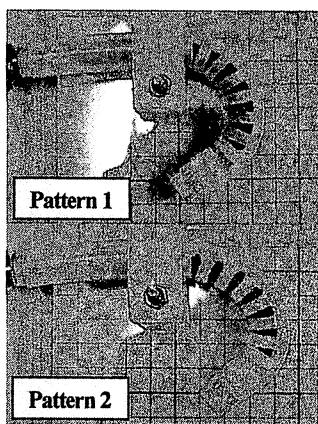


Fig. 15 View of bending state (Tube 2)

#### 4.4 チューブと切り込み方の総合評価

改良した湾曲アクチュエータについて、発生力特性と湾曲特性を合わせて評価すると、発生力特性から内径12mm, 外径

14mm(チューブ1)ではチューブの剛性が低く問題が生じるため内径12mm, 外径15mm(チューブ2)のチューブが適切である。次に切り込み方については、チューブ2でも切り込みパターン1の切り込み深さ割合が80%のもので問題が生じるため、湾曲特性と合わせて評価すると、切り込みパターン2の切り込み深さ割合が80%~60%の場合で最大湾曲角が105deg.となり、最大発生力も15.3Nとなることから、ハンドに用いるアクチュエータとしてチューブを内径12mm, 外径15mmのものにし、切り込み方を切り込みパターン2の切り込み割合が80%~60%のものが良いといえる。

#### 5. 柔軟ロボットハンドへの応用

改良した湾曲アクチュエータを、レスキューロボットコンテストで用いる救助ロボットの柔軟ハンドに応用した。図16にレスキューダミー(ダミヤン)救助用に開発した柔軟ロボットハンドを示す。このハンドは中心から60deg毎に6本のアクチュエータ(前節のチューブ2)を放射状に配置し、要救助者を模擬したダミヤンの両肩, 両腕, 両足を支えるように6方向から優しく包み込むことができる。把持の際、アクチュエータの端部の爪がダミヤンの底部を支えているため、ダミヤンに横方向からの力を加えることなく、把持や搬送ができる。

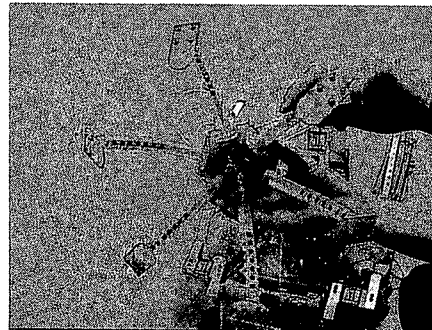
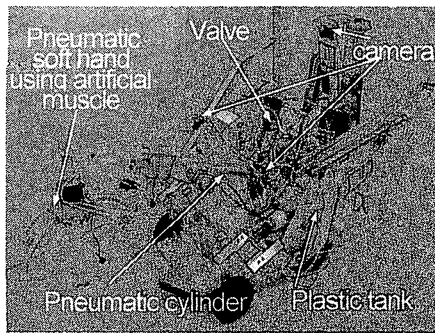


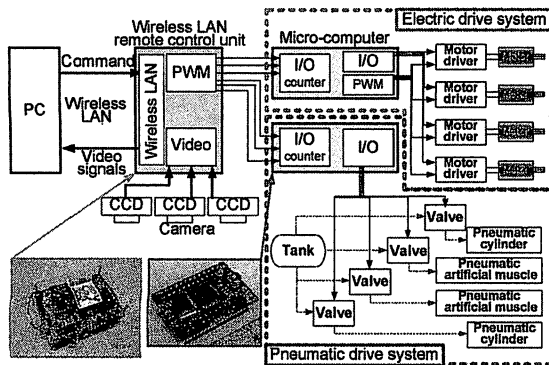
Fig. 16 Application of the bending actuator

図17(a), (b)はレスキューロボット概観と制御システムの構成図を示す。ロボットハンドを制御するための制御システムを試作し、ロボット内部に内蔵した。図17(b)に示すように、制御システムは電気駆動システムと空気駆動システムの二つの部分に分かれる。両システムともに、I/Oポートを通じ、マイクロコンピュータで遠隔操作ジョイスティックからのPWM信号がカウントされ、その値に従い、モータと弁を駆動する。

第8回レスキューロボットコンテスト(2008年8月神戸市で開催)に参加した結果、柔軟湾曲アクチュエータを用いたロボットハンドはダミヤンを優しく救助し搬送することができ、第2位となった。また、湾曲アクチュエータを用いた柔軟ハンドを搭載した2機のロボットは、日本ロボット学会から「ベストロボット賞」を受賞した。



a) Rescue robot with flexible hand



b) Pneumatic and electric control system

Fig.17 Control system of the tested rescue robot

## 6. 結論

マッキベシ型アクチュエータを利用した柔軟湾曲アクチュエータの開発と応用を目的とした本研究は、以下のように要約される。

- (1) マッキベシ型アクチュエータを、切り込みを入れた配管用チューブで覆った簡単な構造の柔軟湾曲アクチュエータを提案し、試作した
- (2) 湾曲アクチュエータの外側のチューブへの切り込みを自然長に対して変えた場合の湾曲角と発生力を調べた結果、湾曲角は切り込み割合が大きくなると曲がりやすくなることを確認した。また切り込み部分の割合が大きくなれば剛性が低くなり、発生力が小さくなることもわかった。切り込み割合が70%の場合、最大で116deg、発生力は23.9Nとなった。
- (3) チューブの種類や切り込み方の影響を調べるため、チューブ内径12mm、外径18mmのものから内径12mm、外径15mmのものに変更した。全体の長さを150mm、先端部を10mm残し、5mm幅の溝を10mmピッチで数を8個固定した。また、2種類の切り込みパターンについて調べた。そして、外側のチューブの切り込みをチューブ幅に対して40%、60%、80%、80%~40%、80%~60%と変えた場合の発生力の変化を調べた結果、切り込み深さ割合が大きくなれば剛性が低くなり、発生力が小さくなることがわかった。

- (4) 切り込み深さ割合40%、60%、80%、80%~40%、80%~60%の供給圧力に対する湾曲角と発生力を調べた結果、切り込み深さ割合が大きくなると曲がりやすくなり、切り込み深さ割合80%~60%の場合で最大湾曲角105deg、最大発生力15.3Nが得られ、人間の指の発生力15N以上を維持しながら、最初のアクチュエータに比べ外径を小さくすることができた。
- (5) 改良した柔軟湾曲アクチュエータを用いて、レスキューロボット用の柔軟ロボットハンドを試作した。そして、ロボットコンテストに出場し、柔軟ハンドは十分使用できることを確認するとともに高い評価を得た。

## 参考文献

- 1) 井上博充, 比留川博久, 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, 19-1, (2001), pp.2-7.
- 2) 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, (2009), pp. 607-613.
- 3) 堂田周治郎, ウェアラブル制御機器の開発と生活支援機器への応用, 第22回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 特別講演1, (2010), p.1.
- 4) 長田義二 編 ソフトアクチュエータ開発の最前線 -人工筋肉の開発をめざして-, NTS, (2004)
- 5) 篠原隆, 堂田周治郎, 松下尚史, 湾曲空気圧ソフトアクチュエータの開発と応用, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No.711, (2005), pp.3167-3173.
- 6) F. Zhao, T. Akagi and S. Dohta, "Development of a bending actuator and position control using small-sized control valves", Proceedings of FLUCOME, 42.pdf (2007), 7page.
- 7) T. Akagi, S. Fujimoto, H. Kuno, K. Araki, S. Yamada and S. Dohta, "Mechatronics Education Using Robot Competition in Okayama University of Science", Proceedings of ACEE2009, Korea, (2009), pp. 146-153.

# Development of Bending Actuator Using Rubber Artificial Muscle and Its Application

Feifei Zhao, Shujiro Dohta \*, and Tetsuya Akagi \*

*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, 2010; accepted November 9, 2010)

Recent years, with rapidly growing number of nuclear families, the homes which only have the senior married couple and elderly person who lives alone are increasing. So the development of a human-friendly-robot which can take care of human daily life is strongly desired. This robot has to work just like a human, so it is needed to have a dexterous soft hand in the robot. Therefore, we have developed an artificial soft gripper in our laboratory. This robot hand has five fingers and it is made of silicone rubber. The hand can grasp some objects that have the different shape and stiffness. However, the soft gripper could not generate a larger force; less than 3N. In addition, it needs longer time and skill to produce the finger.

In this study, we proposed and tested a bending actuator that could be easily constructed by putting the rubber artificial muscle into the flexible tube. We also investigated the generated force and bending angle of the actuator. As a result, the generated force of the actuator was improved about 8 times as large as previous one. We also improved the bending actuator with two kinds of pattern and investigated the effects on the generated force and bending angle by changing the tube or the pitch of the flexible tube surface. As a result, an artificial finger with a diameter and generated force as large as human finger can be realized. And finally, as an application of the bending actuator, the tested actuator was applied to a flexible robot hand in the rescue robot contest and it showed the good performance.

**Key words:** bending actuator, pneumatic actuator, robot hand, McKibben artificial muscle