

# 柔軟空気圧アクチュエータを用いた探索型レスキューロボットの試作

川崎 貴博・赤木 徹也\*・堂田 周治郎\*・王 琳\*

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

(2011年9月29日受付、2011年11月7日受理)

## 1. 緒言

近年、地震や地球温暖化に伴う異常気象などの影響で水害を伴う自然災害が多発している。最近では、2008年の岩手・宮城内陸地震や2009年の中国・九州北部豪雨災害、2011年の東日本大震災などが記憶に新しい。これらの事例では、大規模な崩落や土砂崩れ、土石流、また大雨による都市型水害などが報告されている。特に、土石流などでは民家に大量の土砂が侵入し、生き埋めになるといったケースも珍しくない<sup>1),2)</sup>。こういった水分を含む環境下での要救助者や遺体の探索では、感電による2次災害の危険から空気圧アクチュエータを用いたロボットを使用するのも有効な手段の1つである。また、被災地など不整地での移動では、ロボットが落下や横転など大きな衝撃を受ける場面が多い。そのため、ロボット本体の構造を頑健にする場合が多いが、重量が大きくなり機動性が劣ってしまう。そこでロボットとして軽量で柔軟な構造を有するものを開発するのも、1つの有効な手段と考える。そこで本研究では、衝撃に強い柔軟な構造を有し、さらに水分や土砂を含む環境下で使用する探索型レスキューロボット<sup>3),4)</sup>の開発を目指す。つまり、感電の危険性が少なく軽量で柔軟な空気圧アクチュエータを用いた探索型のレスキューロボットの開発を検討する。

## 2. ロッドレス型柔軟空気圧シリンダ

### 2-1 柔軟空気圧シリンダの構造

柔軟性を有したロボットを開発する上で必要となる柔軟な空気圧アクチュエータとして、図1に以前開発したロッドレス型柔軟空気圧シリンダ<sup>5)</sup>の構造を示す。シリンダは、柔軟チューブ(株式会社SMC TUS1208)と、直径9mmの2個の鋼球、2個の鋼球の間のチューブを外側より直径4mmの真鍮製ローラにより締付けを行ったスライド

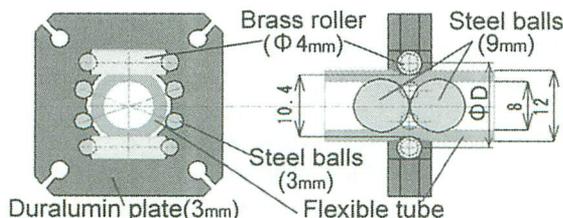


Fig.1 Rodless type flexible pneumatic cylinder

ステージから構成される。また、チューブと内部の鋼球の間には、潤滑のためシリコングリスを塗布している。

### 2-2 柔軟空気圧シリンダの動作原理

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、図1の片側の圧力室を加圧すると、真鍮製ローラに力が伝わり、ステージが動く。ここで、シリンダ内のシールは、チューブ自身がパッキンの役割を果たすことで行う。また、内部の鋼球は、シリンダチューブが湾曲しても直線動作と同様にステージに動力を伝えることができる。また、シリンダの動作として図2に湾曲したチューブ上でのスライドステージの動作と、スライドステージを保持した状態での動作の様子を示す。図2に示すように、曲がったシリンダ上でもスライドステージはスムーズに移動できているのが分かる。また、ステージを固定することで、押し出し動作も可能である。このシリンダの最低駆動圧力は120kPaである。

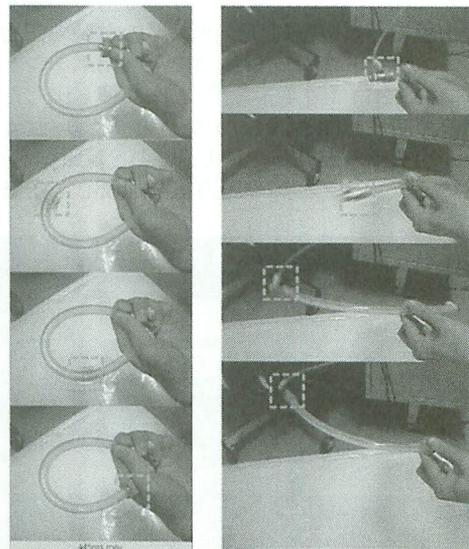


Fig.2 Movement of rodless type flexible pneumatic cylinder

## 3. 柔軟空気圧シリンダ用いたレスキューロボット

### 3-1 ロボットの構造と動作原理

図3に柔軟空気圧シリンダを用いたスライド型推進

機構を有するレスキューロボットを示す。ロボットはストローク550mmの3本のロッドレス型柔軟空気圧シリンダ、配管用の1本の柔軟チューブ(株式会社SMC TUS1208)、推進を行うための開閉爪付スライドステージ、湾曲時のずれを防ぐためのガイド、空気圧シリンダを駆動するための8つのON/OFF弁とマイクロコンピュータ((株)ルネサステクノロジ H8/3664)から構成される。柔軟空気圧シリンダは、そのステージの中心から半径12mmで中心軸から90deg.の位置に並列に3本配置し、同じく90deg.の位置に配管用のチューブを配置している。ロボットのサイズは長さ1120mm、直径70mmであり、質量は1.08kgと軽量である。

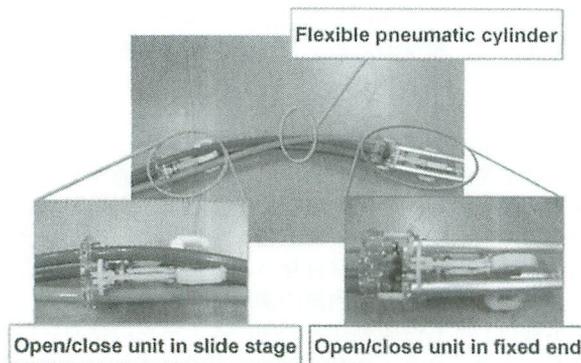


Fig.3 Construction of the tested robot using flexible pneumatic cylinder

### 3-2 ロボットの推進原理

ロボットの推進原理を、図4に示す。このロボットは狭隘な空間内の移動を考えたものである。図4に示すように固定端側つまり、図4の右側の開閉爪を開いて(図4②参照)土砂に対して引っかかりをつくった状態で、柔軟空気圧シリンダの右側の圧力室を加圧し、スライドステージについた開閉爪をシリンダ端部まで押し出す(図4③参照)。次に押し出したスライド側の開閉爪を開き、引っかかりをつくり(図4④参照)、固定端側の開閉爪を閉じ(図4⑤参照)、その後柔軟空気圧シリンダ左側の圧力室を加圧し、空気圧シ

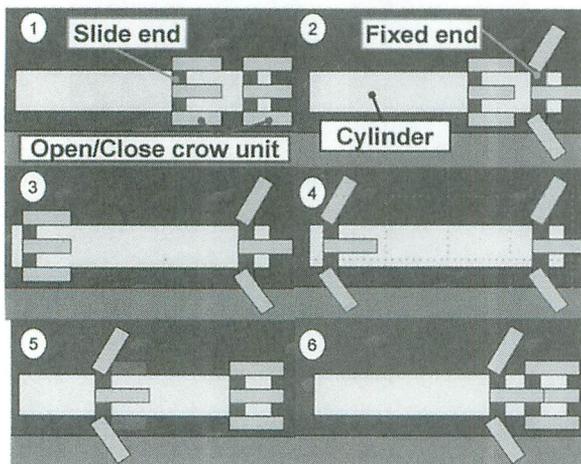


Fig.4 Operating principle of the tested robot

リンダのチューブ端を図2の押し出し動作のように伸ばすことで、固定端側を左方向に引き寄せ、推進するというものである。この推進方法では3本のシリンダの圧力室に同時に加圧している。

### 3-3 ロボットの動作実験

ロボットの動作実験として、図5に湾曲動作(図5①~③参照)と上方推進動作(図5④~⑥参照)の様子を示す。図5①~③に示す実験では、前述の推進動作の場合と違い、3本のシリンダ圧力室を同時に加圧するのではなく、1本のシリンダの圧力室を加圧した状態でその他2本のシリンダの逆側の圧力室を加圧する。これにより、スライドステージを挟んで、それぞれ反対方向に力が加わり、湾曲角90度以上の滑らかな湾曲が実現できた。また、スライドステージを手で保持して3本のシリンダの片側のみ加圧(350~400kPa)した上昇実験でも約220mm/sの速度でチューブが推進できることを確認した。また、図5にも示す様に、ロボットは柔軟空気圧シリンダできており、さらに、曲がってもスライド動作が可能であるため、ロボットに衝撃が加わってもロボット自身に変形して、力を逃がすことができる。

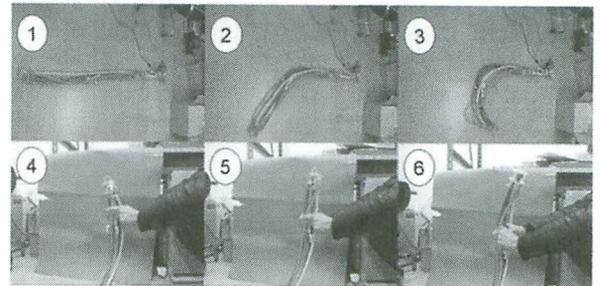


Fig.5 Motion of the tested robot

## 4. 長変位型ゴム人工筋

### 4-1 長変位型ゴム人工筋の構造

前述の柔軟空気圧シリンダはシリンダ1本当たりの発生力が約15Nと比較的小さい。これは1kg程度の軽量のロボットの推進用のアクチュエータとしては有効であるが、5kg以上のロボットに対しては力不足である。そこで、さらに大きな力を生じる柔軟な空気圧アクチュエータとして、以前に開発した「長変位型空気圧ゴム人工筋」<sup>6)</sup>を図6に示す。試作アクチュエータの構造は、網目状繊維をゴムでコーティングした市販のゴム人工筋(株式会社FESTO MXAM-10、初期内径10mm)と内径部にφ5mmの鋼球を周方向に配置した転がり接触型スライドステージから構成される。ゴム人工筋はチューブ内部にあるφ14mmの鋼球を鋼球のついたステージ部で周方向から押さえ付けることで、2つの圧力室を構成している。さらにステージ部のφ5mmの鋼球が回転しながらチューブを周方向から均等に締め付けることによって、ステージ部での摺動摩擦を減らすことが可能である。このアクチュエータは500kPaの印加圧力でもシールを保ち、さらに最低駆動圧力も64kPaと比較的小さい

特性を有する。

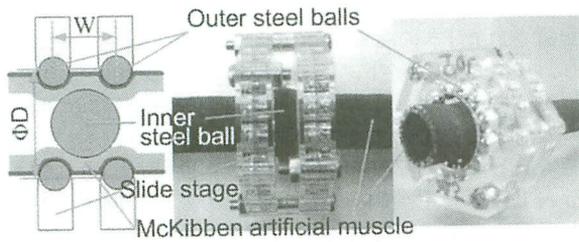


Fig.6 Construction of Mckibben actuator with long stroke motion

4-2 長変位型ゴム人工筋の動作原理

図7にアクチュエータの動作原理の概略図を示す。ここでスライドステージを挟んで左側をA側、右側をB側と呼ぶ。動作原理はまず、図7の①のステージ部を固定した状態からA(自由端)側のチューブに印加する(図7の②参照)ことで、ステージ部に小さな引張り力が生じ、対象物に接続されたB側のチューブがA側に引込まれる。このチューブが引っ張られた状態で、さらにB側を加圧する(図7③参照)と、B側はゴム人工筋として作用し大きな発生力を生じ、対象物を動かす。また、B側を排気することで、チューブにたわみが生じ(④参照)、A側に常に生じている引張り力によりB側のチューブが引込まれ、長さが短くなる。同様に図7⑤から図7⑥のようにB側のチューブへの給排気を繰り返すことで、ストロークを可変しながら重量物の長変位引込み動作が可能になる。上述の動作での発生力は150N以上と非常に大きく、片側の圧力室に加圧した場合でも約20Nの押し出し力が得られる。

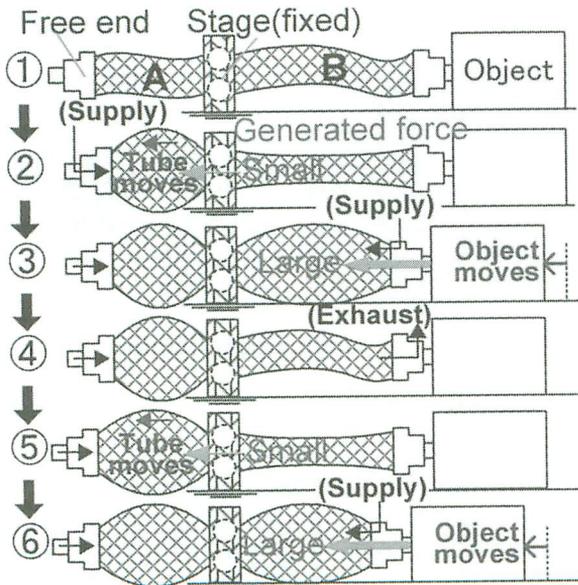


Fig.7 Operating principle of Mckibben actuator with long stroke motion

5. 長変位型ゴム人工筋を用いたレスキューロボット  
5-1 ロボットの構造

図8に長変位ゴム人工筋を用いたロボットの全体図を示す。ロボットは、空気圧モータを推進の駆動源とし、空気圧シリンダを用いた周方向開閉機構を有する移動ユニット、4本の長変位型ゴム人工筋とスライドステージから構成される方向転換ユニット、ゴム人工筋を駆動するためのON/OFF弁や制御用のマイクロコンピュータ(㈱ルネサステクノロジー H8/3664)が内封された弁制御ユニットから構成される。ロボット全体のサイズは長さ550mm、外径は周方向開閉機構が閉じた状態で290mm、開いた状態では490mmであり、質量は約6kgである。全てのアクチュエータの駆動に空気圧を用いることで、水などを含む悪環境で感電の心配がなく使用できる。また、前述の長変位ゴム人工筋を方向転換ユニットに用いることで、ロボットの長軸方向に曲げモーメントが加わっても、方向転換ユニットの柔軟性により、モーメントを吸収することが可能である。

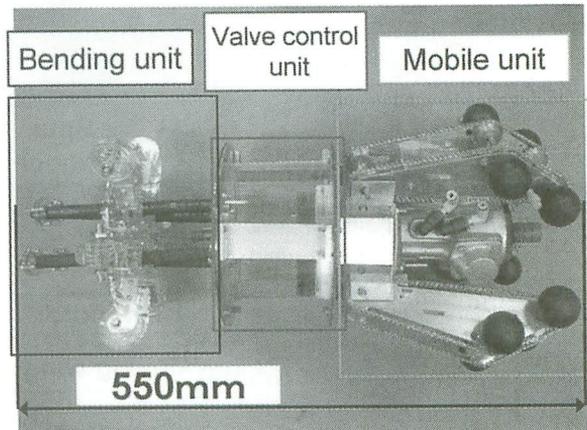


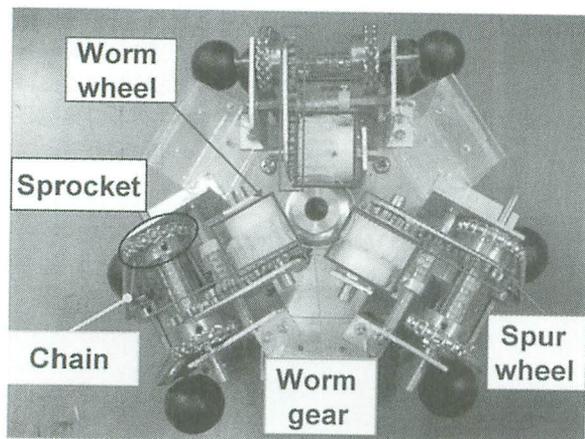
Fig.8 Rescue robot driven by pneumatic actuators

5-2 空気圧モータを用いた移動ユニット

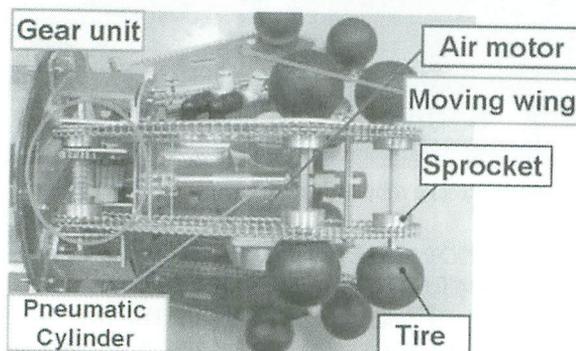
図9に移動ユニットの構成を示す。移動ユニットはラジアルピストン型空気圧モータ(㈱TAIYO TAM4-10)と空気圧シリンダ(㈱KOGANEI PBSA 10×30-7)、ギア部とまたそれらを固定するフレームから構成される。動力伝達の流れは図9(a)に示すように、ロボットの中心に設置した空気圧モータの回転動力を、モータ軸に取り付けたウォームに伝え、放射状に配置された3つのウォームホイールに伝える。次に、それぞれ平歯車、スプロケット、ラダーチェーンを介して3個の開閉ユニットに設置された計12個の球状タイヤを動かす。以上のように、1つの空気圧モータの動力を、ロボットの中心から120deg.に放射状に配置された開閉ユニットの球状タイヤに伝えることによりロボットが転倒した状態でも走行が可能となる。また球状タイヤは状況によりフィン(羽根)のついたタイヤにも変更可能である。

また、3つの開閉ユニットは空気圧シリンダを使って放射状に開閉する能力を有する。これは、ユニット内部にある一端を軸部に、もう一端を本体との接続部に

固定することでユニット自体を可動できる。また前述のようにユニットにはラダーチェーンが2つ並列に配置され、このユニットが開いた状態でも、モータの回転力を球状タイヤに伝えることができる。この機能は、ロボットがスタックした状況から回復するためや駆動ユニット自体でロボットを保持するため、また、ロボットの姿勢を変えるなど走行能力を向上させるためのものであるが、同時に走行時にロボット軸中心に向かって加わる力に対してダンパの役割を果たす。図10に開閉ユニットの開閉状態の様子を示す。図10に示すように、この開閉ユニットの最大可変角度は水平から60deg.である。



(a) Front view



(b) Side view

Fig.9 Construction of the mobile unit

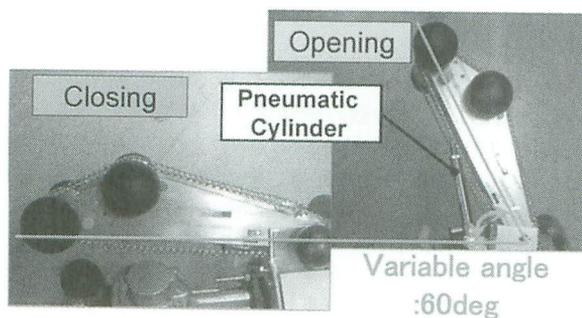


Fig.10 Operation of the moving wing of the mobile unit

### 5-3 長変位ゴム人工筋を用いた方向転換ユニット

図11に長変位ゴム人工筋を用いた方向転換ユニットの概観を示す。ユニットは中心から半径96mmに並列に配置された4本の長変位ゴム人工筋の一端を固定端とし、中央のスライドステージにステージ部に垂直に6個の補助輪を有し、ロボットの方向転換を補助するためのものである。またこの補助輪はフィンにも変更可能である。方向転換の動作原理は、曲げたい方向にある人工筋の固定端側を加圧し、その対称の位置にある人工筋の自由端側を加圧することにより、スムーズに補助輪のついたスライドステージが傾くことができ、推進の際の方向を変えることができる。

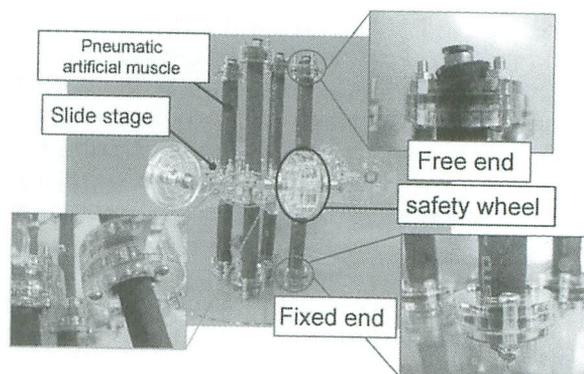


Fig.11 Changing unit for changing the direction

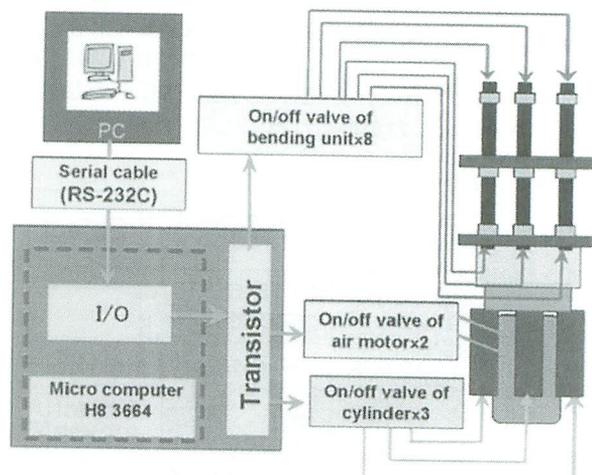


Fig.12 Robot control system using serial communication

## 6. 走行制御システム

### 6-1 操作制御システムの構成

図12に有線による操作制御システムの構成を示す。システムは空気圧モータと3本の空気圧シリンダ、4本の長変位ゴム人工筋、13個のON/OFF弁(株式会社KOGANEI G010HE-1)とマイクロコンピュータ(H8/3664)、トランジスタを用いた制御回路から構成される。これらの装置は防水のできる弁コントロールユニット内に内封されている。制御の流れは、まずパソコンより入力されるコードがシリアルケーブル(RS-232C)を通じてマイ

コンへ送信される。マイコン内ではそのコメントを内部のシリアル通信ポートを介して受信し、受信コードに対応するプログラムを実行し、I/Oポートを介してON/OFF弁の操作を可能にする。また実験ではコードの受信確認のために、マイコンからコードに対応した動作をメッセージとしてパソコン側へ送信している。

### 6-2 走行実験

図13 に動作確認のため有線による操作システムを用いて、平坦な床で行った走行実験風景を示す。ロボットは前進、後退や左右旋回が可能であり、また空気圧シリンダを用いた開閉ユニットにより、ユニットが開いた状態でもスプロケット介して球状のタイヤに動力を伝達できることを確認している。

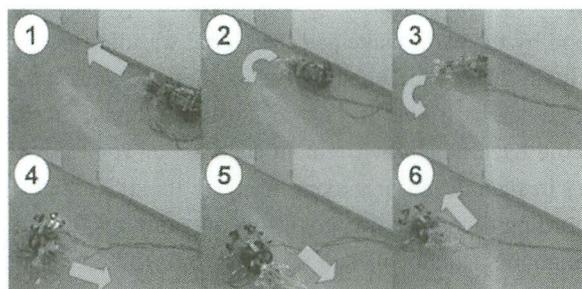


Fig.13 Motion of the tested robot

## 7. 結 言

本研究では、衝撃に対する耐性のため柔軟性を有し、さらに水分を含む環境下でも使用できるレスキューロボットとして狭隘空間を柔軟に移動するため柔軟空気圧シリンダを用いたロボットと空気圧モータと長変位型空気圧ゴム人工筋を用いた探索型レスキューロボットを提案し、試作した。また、マイコンを用いて、PCからの文字コードによる操作システムやPS2用ジョイスティックによる操作システムを提案、試作し、ロボットの動作を確認した。

今後の課題として、試作したロボットや推進機構を用いて実環境下での走行実験を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 山口県ホームページ, 防災危機管理課,  
災害記録～平成 21 年 7 月 21 日豪雨災害～  
<http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a10900/bousai/20090721saigai.html>
- 2) 岩手・宮城内陸地震-社団法人共同通信者ニュース  
特集-, 不明者捜索難航、長期化も 作業を阻む  
大量の土砂  
[http://www.kyodonews.jp/feature/iwate-miyagi\\_earthquake/2008/06/post\\_53.html](http://www.kyodonews.jp/feature/iwate-miyagi_earthquake/2008/06/post_53.html)
- 3) 田所 諭: ロボティクスと関連技術による災害対応,  
日本機械学会誌, Vol. 112, No. 1091, pp. 35-36 (2009)
- 4) 田中 良典・新井 雅之・津久井 慎吾・広瀬 茂男: 瓦  
礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍V号機」の開発, シス  
テムインテグレーション部門 講演会講演論文集,  
pp. 319-320 (2005)
- 5) 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)

- 6) 赤木徹也・堂田周治郎: ロングストローク動作  
可能なマッキベン型アクチュエータの開発,  
日本機械学会論文集(C編), Vol. 73, No. 735,  
pp. 2996-3002 (2007)
- 7) Kengo Harihara, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and  
Feng Zhang : Development of a Search Type Rescue  
Robot Driven by Pneumatic Actuator, Proceedings  
of SICE Annual Conference 2010, pp.1311-1317 (2010)

# Development of Search Type Rescue Robot Using Flexible Pneumatic Actuator

Takahiro Kawasaki\*, Tetsuya Akagi\*\*, Shujiro Dohta\*\* and Lin Wang\*\*

*\*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 29, 2011; accepted November 7, 2011)

Recently, the natural disasters that lead to the flood by the earthquake and the global warming due to carbon dioxide are happened frequently. Specifically, in 2011, East Japan Great Earthquake caused the serious flood damage by Tsunami. These news can be heard all over the world. In such a situation, the rescue robots are required the higher mobility for the hazardous environment such as uneven narrow space or wet mud. In order to get the higher mobility in such the environment, we think that the variable structure that can change the shape of the robot according to the narrow area is one of solutions for this problem. In addition, a fluidic actuator such as pneumatic actuator is also useful, because it is easy to make waterproof. As a method of deforming the shape of the robot, the combination of the actuators with high stiffness is commonly used. In ideal, it is more desirable that the shape of the robot changes naturally because of the lower energy consumption. In this study, we aim to develop the search type rescue robot with flexible structure using flexible pneumatic actuators. In this paper, two types of robot were proposed and tested. First, we develop the flexible mobile mechanism for a rescue robot. The proposed sliding mechanism consists of three flexible cylinders that are set on parallel and two expanding claw units to hold it in narrow space by the use of claws. Each end of the cylinder is connected each other. Three slide stages are connected with the claw unit. The other claw unit is set on the one end of the cylinder. As a result, we can confirm that the sliding mechanism can bend by changing the pressurized chamber in the cylinder. The mechanism can also travel in the narrow space smoothly by sliding the claw unit with the slide stage as an inchworm.

In addition, a rescue robot using a pneumatic motor and the long stroke type artificial rubber muscles was proposed and tested. The robot is composed of three units. One is "a mobile unit" that makes the robot move forward or backward. The middle one is "a valve control unit" that consists of thirteen on/off control valves and a micro-computer. These elements are surrounded by an acrylic cylindrical chamber connected to an exhaust pipe that includes an air supply pipe and electrical cables in it. The chamber is isolated from the outer environment to make them waterproof. The other is "a steering unit" that can change the forward direction using the McKibben artificial muscle with a long stroke motion. The robot also has the opening and closing mechanism. The principle of operation and the performance of the tested robots are also described in the paper. As a result, the tested robot could be operated well. We can confirm the possibility and the validity of the tested robot for applying in the wet condition.

**Keywords:** rescue robot; flexible structure; flexible pneumatic cylinder; pneumatic motor; McKibben artificial muscle.