

(24)

空気圧駆動型ゴムアクチュエータを用いた マニピュレータの位置と力の制御

(名古屋大学) 福田 敏 男
(㈱日立製作所) 宮 原 健 一

1. 本研究の目的

現在、福祉、医療分野や、農業分野、食品加工分野、その他の分野において、人間や、柔らかい物体の把握の作業の自動化が重要となってきた。これらの作業をロボットで行うためには、ロボットが、対象となる柔らかい物体をセンシングして、力を調節制御する必要があるが、従来のロボットは、これらの柔らかい物体の制御には必ずしも適していない¹⁻³⁾。そこで本研究では、柔らかい物体のハンドリングが可能なロボットについて考案し、位置と力を独立に制御できる、それぞれ4自由度を有する2本のマニピュレータを試作した。本マニピュレータは水平面内で動作し、アクチュエータとして空気圧駆動型ゴムアクチュエータを用いた。また、表面およびマニピュレータ先端に取り付けられたゴムアクチュエータの制御を行うことにより、コンプライアンスを考慮した物体把握の可能性について検討することを目的とする。

2. マニピュレータの構造と概念

(1) 自由度

把握という動作において、1本のマニピュレータの機能を考えると、1自由度の場合も2自由度の場合も包み込むという動作を行うことが不可能である。そこで、ジョイント部の自由度が3のマニピュレータを考えてみると、包み込むという動作が行えるので、摩擦のない対象物も把握することが可能となる。しかし、3自由度の欠点としては、把握した状態からの向きを変えることができないことが挙げられる。このため関節軸の方向が違、もう1つの自由度が必要となる。この1自由度を加える場合、どこに配置するかが問題

となるが、把握ということを考えれば、連続した同じ方向の関節が必要となる。このため、4自由度目は人間の指と同様な、“把握の3自由度”の末端に配置するのが適当と考えられる。

また、把握動作を行うために、マニピュレータは2本とする。これらは、それぞれ1本の人間の指と同じ自由度を有するが、1つの関節は $\pm 90^\circ$ 移動できるのが特徴である。

(2) 空気圧駆動型ゴムアクチュエータ

アクチュエータとして、空気圧を加圧することにより収縮するゴムアクチュエータを採用する。これを採用したのは、

- 軽量である。
- 制御がマイコンに適している。
- 無段階に動作する。

等の理由による。

(3) 表面ゴムアクチュエータ

マニピュレータ表面部、および先端部分にはゴムを

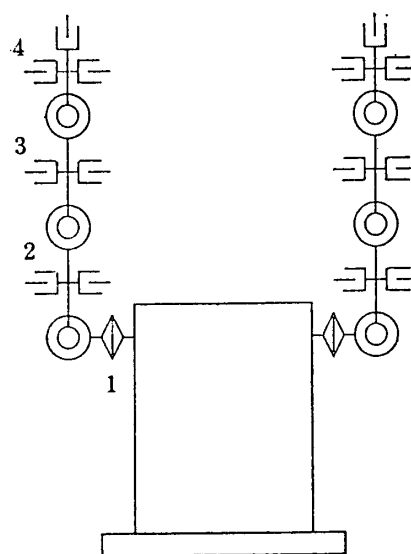


図1 表面アクチュエータを考慮した自由度

はり、その下に中空部分をつくり、その空気圧を可変にすると、コンプライアンスを調整することができる。これにより、

- 面接触の割合が可変である。
- マニピュレータを動作させなくても、把握が可能である。
- ゴムであることにより、オーバーロードにも耐え、対象物を傷つけ難い。

等の利点が挙げられる。

また、図1は本マニピュレータの自由度配列を示すものである。

3. アクチュエータ

3.1 ゴムアクチュエータの利用

前節でも述べたが、本研究で用いた空気圧駆動型ゴムアクチュエータの利点と欠点を述べる。まず、利点として、

(1) 軽量である。

このゴムアクチュエータ本体のみは、ナチュラルラバーとナイロンスリーブ、口金となるアルミ、留め金からのみ成り立っている。軽量のため、ハード的負担が軽くなる。

(2) 制御がマイクロコンピュータに適している。

このゴムアクチュエータの空気の流入出は、電磁弁の開閉によって行われ、この電磁弁はパルスによって駆動するので、マイクロコンピュータによる制御に適する。

(3) 無段階に動作する。

マニピュレータの動きには、把握動作において微妙なコンプライアンスとなる位置制御や、力制御が必要となる。このため、動作に段階があるというのは不向きである。このゴムアクチュエータの電磁弁の開閉時間(PWM)によって、収縮量が無段階に制御可能となる。

(4) 大きさに比べて発生する力が大きい。

また、以上のような利点に対して、次のような欠点が挙げられる。

(1) 製作が困難である。

空気圧による駆動のため、空気漏れは大きな欠点となる。このため、密封するためのOリングの使用や、接着剤、留め金による締め付け作業など、技術が必要となる。

(2) 大型コンプレッサの使用

アクチュエータ自体はコンパクトな物であるが、空気を送り込むための装置として、コンプレッサを用いるので、外部装置が大きくなり、移動には不向きである。本研究では、ロボット自体の移動ということは考えず、また製作の困難さよりも、その利点のほうに重点を置き、このゴムアクチュエータを採用し、製作、実験を行うことにした。

3.2 ゴムアクチュエータの構造

このマニピュレータを2本有するロボットは、コンプライアンスを考慮した制御が可能である。このロボット用のアクチュエータであるゴムアクチュエータは、図2に示すように、ゴムチューブをナイロンスリーブで覆い、両端を口金で固定するという基本構造を有している。本研究で用いたアクチュエータは市販のものではなく⁵⁾、任意の太さ・長さのアクチュエータを実験室で自作できるようにした。ゴムチューブは市販のもので、材質はナチュラルラバーである。これを覆うナイロンスリーブは、ケーブル外皮用でナイロン繊維を筒状に編み上げられたものを使用している。ナイロンスリーブは加圧によるゴムチューブの変形方向を規定し、軸方向の変位に変換する。

ナイロンスリーブの長さを、その内径がゴムチューブの外径と等しいときの長さで比較して、ナイロンスリーブ長とゴムチューブ長との比 S/T 値 (≥ 1) を変えることにより、アクチュエータの伸縮特性を操作することができる。本研究では、 $S/T=1$ とし、アクチュエータが収縮するように設定した。空気を送り込み加圧することによって、収縮して剛性が高くなり、減圧すれば、ゴムの弾性によって伸張するという特性を有する加圧収縮型を用いる。

また $S/T > 1$ としたものは、加圧伸張型となる。本研究ではトルクの発生に焦点を置きたいため、トルク発生力の小さい加圧伸張型を用いず、加圧収縮型とし

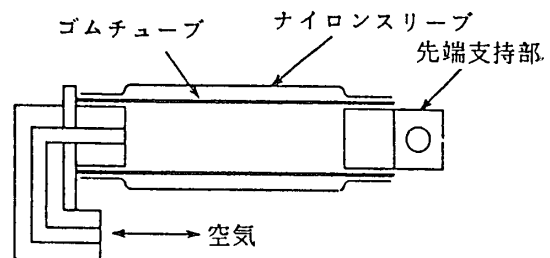


図2 アクチュエータ構造図

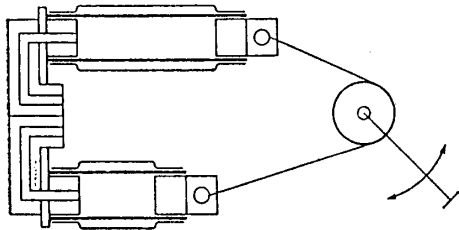


図3 アクチュエータ配置図

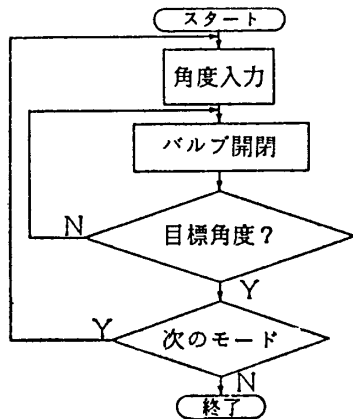


図4 フローチャートA

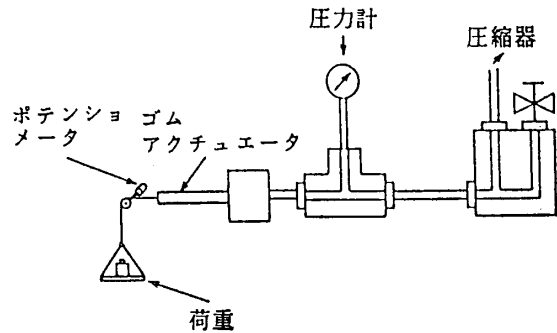


図5 アクチュエータ試験

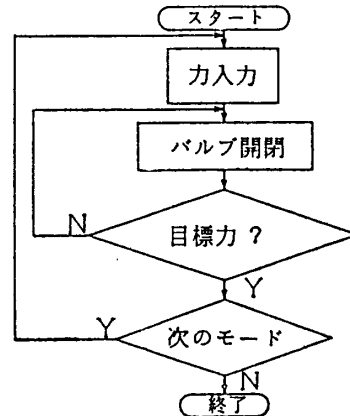


図6 フローチャートB

た。

3.3 駆動方式

このゴムアクチュエータは、マイクロコンピュータより電磁弁を介して駆動される。目標値をマイクロコンピュータに設定してやると、パルスが発生し、それが電磁弁へ送られる。それによる電磁弁の開閉により、空気の流入出が行われる。ゴムアクチュエータは、図3に示すように2本1対の差動型として用いられ、1つ関節内に配置される。

各関節の回転角度は、関節内部に設置してあるポテンシオメータによって検出され、A/Dを通してマイクロコンピュータへ入力される。これを示すフローチャートを図4に示す。

3.4 表面ゴムアクチュエータの駆動

先端部およびマニピュレータ表面部に取り付けられた表面ゴムアクチュエータも、また、マイクロコンピュータからの信号を受けた電磁弁の開閉によって駆動される。この表面ゴムアクチュエータは、右側マニピュレータの先端と、左側マニピュレータの先端は同じ圧力、右側マニピュレータの第1関節部と、左側マニピュレータの第1関節部とは同じ圧力というように、左右各相当する部分は同じ圧力が発生するようにでき

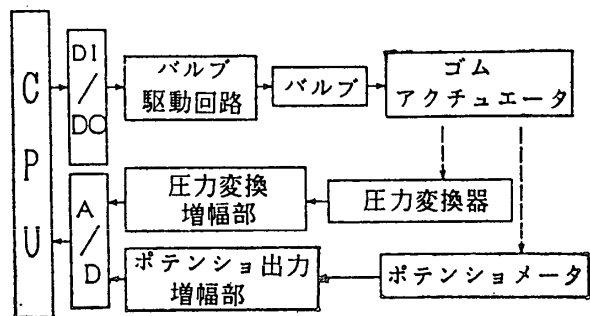


図7 システム構成図

ている。左右同じにした理由は、物体を把握する場合に左右違うコンプライアンス制御を行っても、あまり大きな有効性が感じられなかったためである。

この制御におけるフローチャートを図6に示す。また、本実験装置のシステム構成図を図7に示す。

3.5 ゴムアクチュエータの駆動試験

試作したゴムアクチュエータの性能を調べるために、図5のような実験装置を用いて、本研究で用いるゴムアクチュエータの性能試験を行った。実験装置は1本のゴムアクチュエータに、圧力計と手動弁を接続したコンプレッサから空気を送り込む。ゴムアクチュエータの変位はポテンシオメータにより検出される。この

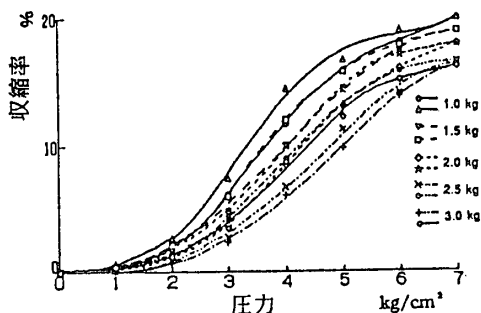


図8 各荷重での圧力変位における
ゴムアクチュエータの変位

ような実験装置を用いて、ゴムアクチュエータへの荷重を各種設け、各荷重下での圧力とゴムアクチュエータの変位を調べたものである。試験結果を図8に示す。

3.6 試験結果

図8に示したような性能が得られた。1.0kgの荷重で、約20%の収縮がみられ、最大3.0kgの荷重で、約15%の収縮が得られた。このゴムアクチュエータはナイロンスリーブ(φ6)と、ナチュラルラバー(φ6)のもので試験を行ったが、他の材料で製作したものは、

- ① φ10 ナイロンスリーブ
スリーブ径が大きすぎて変位なし。
- ② φ6 ガラス繊維スリーブ
スリーブが硬すぎて変位なし。
- ③ φ6 針金スリーブ
圧力をかけた直後に破壊。
- ④ φ10 針金スリーブ
③に同じ。

という結果であった。また、本実験で用いたゴムアクチュエータも7 kg/cm²以上の空気圧を加えると、破壊に至った。またヒステリシスも多少見受けられる。この理由として、このゴム自体のヒステリシス特性や、ナイロンスリーブの非線形特性、ゴムチューブとナイロンスリーブ間の接着効果等の問題があるので、アクチュエータとしてのヒステリシスが発生すると思われる。しかし、これによる違いが出て力制御の観点からは表面ゴムアクチュエータによる力で、補償することが可能であるので解決できる。

4. 力制御

把握する対象が剛体である場合は、多少の力のかけすぎが起ころうとも、対象物が破壊したり、あるいは傷つけるということは少ない。しかし対象物がフレキ

シブルなものである場合には、さまざまな問題が起こり得る。例えば、イチゴや桃等といった農作物を把握する場合は、力をかけすぎると、即、破壊となり、商品価値がなくなる。また、卵等というものは、一見剛体のように見えても、フレキシブルな部類に入る物もある。かといって力が少なければ、滑りが生じ、剛体でさえ把握することができない。また風船のように、対象物が伸び縮みする物等、最適な力を見だし難い物も存在する。よって、把握作業においては、力を検出し制御することが重要な課題となっている。

5. 協調制御方法

5.1 マニピュレータの制御用座標変換行列

5.1.1 マニピュレータの座標変換行列

図9にマニピュレータの座標を示す。これにより各関節の変換行列 A_n は次のように表せる⁴⁾。

$$A_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha & \sin \theta_n \sin \alpha & a \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha & -\cos \theta_n \sin \alpha & a \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

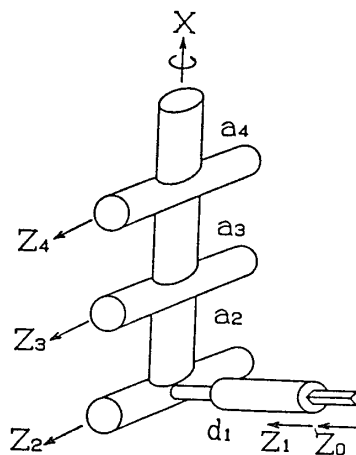


図9 マニピュレータの座標系

表1 リンクパラメータ

Link	Variable	α	a	d	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$
1	θ_1	90°	0	d_1	0	1
2	θ_2	0°	a_2	0	1	0
3	θ_3	0°	a_3	0	1	0
4	θ_4	0°	a_4	0	1	0

α : リンクのねじれ角

a : リンク間の距離

d : 関節軸同士の法線の距離

(1)式に表1の各数値を代入し $A_1 \sim A_4$ を求める.

ここで,

$$\begin{aligned} \sin \theta_i &= S_i & \cos \theta_i &= C_i \\ \sin(\theta_i + \theta_j) &= S_{ij} & \cos(\theta_i + \theta_j) &= C_{ij} \end{aligned}$$

とする.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & C_2 a_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & S_2 a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3 a_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3 a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & C_4 a_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & S_4 a_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$A_1 \sim A_4$ の各行列より, 基準座標系から見たマニピュレータ先端の座標変換行列 T_4 を, 次のように求めることができる.

$$T_4 = \begin{bmatrix} C_1 C_{234} & -C_1 S_{234} & S_1 & C_1 (C_2 a_2 + C_{23} a_3 + C_{234} a_4) \\ S_1 C_{234} & -S_1 S_{234} & -C_1 & S_1 (C_2 a_2 + C_{23} a_3 + C_{234} a_4) \\ S_{234} & C_{234} & 0 & S_2 a_2 + S_{23} a_3 + S_{234} a_4 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

5.1.2 マニピュレータのヤコビ行列

座標系 T の微小並進ベクトル ${}^T d$ と, 微小回転ベクトル ${}^T \delta$ は, 基準座標系の微小並進ベクトル d と微小回転ベクトル δ を用いて回転関節では次のように表せる.

$$\begin{aligned} {}^T d_x &= \delta \cdot (P * n) \\ {}^T d_y &= \delta \cdot (P * o) \\ {}^T d_z &= \delta \cdot (P * a) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} {}^T \delta_x &= \delta \cdot n \\ {}^T \delta_y &= \delta \cdot o \\ {}^T \delta_z &= \delta \cdot a \end{aligned} \quad (8)$$

これによりマニピュレータ先端までのヤコビ行列 J_4 を求めると,

$$J_4 = \begin{bmatrix} 0 & S_{34} a_2 + S_4 a_3 & S_4 a_3 & 0 \\ 0 & C_{34} a_2 + C_4 a_3 + a_4 & C_4 a_3 + a_4 & a_4 \\ \begin{bmatrix} -C_2 a_2 - C_{23} a_3 \\ -C_{234} a_4 \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ S_{234} & 0 & 0 & 0 \\ C_{234} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる.

5.2 座標系間での力の変換

本節では, 異なる座標系によって静的な力やモーメントを表した場合に, それらの表現間の変換を行う方法を与える. すなわち, ある固定された対象物に取り付けた, 1つの座標系の原点に作用する力とモーメントが与えられたとき, 対象物に取り付けられた別の座標系の原点に作用し, しかもこの座標系で表された等価な力とモーメントの表現方法の問題を扱う. 等価な力とモーメントとは, 対象物に対して同じ外部的な効果をもつものを指す.

この問題を解くのに仮想仕事の原理を用いる. すなわち, ある力とモーメント F が対象物に加えられるとし, これによって仮想的な微小変位が生じたとする. このいわゆる仮想変位 D は仮想仕事 δW を行う. 変位は小さく, それを零にもっていった極限においては, システムのエネルギーは変化しない. したがって, 対象物に作用する多くの力がなす仮想仕事は, 零でなくてはならない. 力 F を加えたことによる仮想仕事は,

$$\delta W = F^T D \quad (10)$$

である. ここで D は, 仮想変位を表す微小変位ベクトルで,

$$D = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

によって与えられ, F は力ベクトルで,

$$F = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

とする.

今、ある座標系 C で記述された別の力とモーメントが、対象物上の F が加わった点とは異なる点に作用することによって同じ変位が生じたとすると、上と同じ仮想仕事を得られることになる。すなわち、

$$\delta W = {}^c F^T {}^c D \quad (13)$$

$${}^c F^T D = {}^c F^T {}^c D \quad (14)$$

座標系 C における仮想変位 ${}^c D$ は、基準座標系における仮想変位 D に等価であるから、次の式を得る。

$$\begin{pmatrix} {}^c d_x \\ {}^c d_y \\ {}^c d_z \\ {}^c \delta_x \\ {}^c \delta_y \\ {}^c \delta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & (P^* n)_x & (P^* n)_y & (P^* n)_z \\ o_x & o_y & o_z & (P^* o)_x & (P^* o)_y & (P^* o)_z \\ a_x & a_y & a_z & (P^* a)_x & (P^* a)_y & (P^* a)_z \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & o_x & o_y & o_z \\ 0 & 0 & 0 & a_x & a_y & a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix} \quad (15)$$

すなわち、

$${}^c D = J D \quad (16)$$

ゆえに、

$${}^c F^T D = {}^c F^T J D \quad (17)$$

を得る。上式は、いかなる仮想変位に対しても成立しなければならないので、

$${}^c F^T = {}^c F^T J \quad (18)$$

すなわち、

$$F = J^T {}^c F \quad (19)$$

を得る。これを詳しく書けば、

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 & 0 & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 & 0 & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 & 0 & 0 \\ (P^* n)_x & (P^* o)_x & (P^* a)_x & n_x & o_x & a_x \\ (P^* n)_y & (P^* o)_y & (P^* a)_y & n_y & o_y & a_y \\ (P^* n)_z & (P^* o)_z & (P^* a)_z & n_z & o_z & a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^c f_x \\ {}^c f_y \\ {}^c f_z \\ {}^c m_x \\ {}^c m_y \\ {}^c m_z \end{pmatrix} \quad (20)$$

となる。上式より ${}^c F$ を解き出すと、

$$\begin{pmatrix} {}^c f_x \\ {}^c f_y \\ {}^c f_z \\ {}^c m_x \\ {}^c m_y \\ {}^c m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & 0 & 0 & 0 \\ o_x & o_y & o_z & 0 & 0 & 0 \\ a_x & a_y & a_z & 0 & 0 & 0 \\ (P^* n)_x & (P^* o)_x & (P^* a)_x & n_x & n_y & n_z \\ (P^* n)_y & (P^* o)_y & (P^* a)_y & o_x & o_y & o_z \\ (P^* n)_z & (P^* o)_z & (P^* a)_z & a_x & a_y & a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} \quad (21)$$

となる。最後に力の要素とモーメントの要素の順を入れ替えると、

$$\begin{pmatrix} {}^c m_x \\ {}^c m_y \\ {}^c m_z \\ {}^c f_x \\ {}^c f_y \\ {}^c f_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & (P^* n)_x & (P^* n)_y & (P^* n)_z \\ o_x & o_y & o_z & (P^* o)_x & (P^* o)_y & (P^* o)_z \\ a_x & a_y & a_z & (P^* a)_x & (P^* a)_y & (P^* a)_z \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & o_x & o_y & o_z \\ 0 & 0 & 0 & a_x & a_y & a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \\ f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} \quad (22)$$

を得る。上式は、(15)式と同じ形をしており、モーメントと力の座標系間での変換は、微小並進、および回転ベクトルの変換と同じであることが分かる。よって、

$$\begin{aligned} {}^c m_x &= n((f^* P) + m) \\ {}^c m_y &= o((f^* P) + m) \end{aligned} \quad (23)$$

$${}^c m_z = a((f^* P) + m)$$

$$\begin{aligned} {}^c f_x &= n \cdot f \\ {}^c f_y &= o \cdot f \end{aligned} \quad (24)$$

$${}^c f_z = a \cdot f$$

と表すことができる。ここで n , o , a , P は、微分座標変換行列の列ベクトルである。モーメントは微小並進と同じ変換に従い、力は微小回転と同じ変換に従う。これらを用いて、マニピュレータの位置と力の制御が可能となる。

6. マニピュレータの駆動実験

6.1 対象物の違いによるマニピュレータ

先端圧力の変化実験

マニピュレータを駆動し、先端を対象物に衝突させ、先端ゴムアクチュエータの内部圧力を検出する4種類の実験を行った。条件は、以下に示すものである。

- (1) 対象物なし
- (2) 剛体に衝突させた場合
- (3) 柔軟体に衝突させた場合1

これは、対象物に風船を用いる。

- (4) 柔軟体に衝突させた場合2

これは対象物として、タオルを膜として用いた場合である。

これらの実験結果を以下の図10~13に示す。

対象物がない場合は、先端は何にも触れないので、当然、先端ゴムアクチュエータには圧力の変化が見られない。これと比較して、剛体に衝突させたときであるが(この場合、どの条件の場合も、対象物は 0° の位置にある)、関節4は、対象物に衝突して静止して

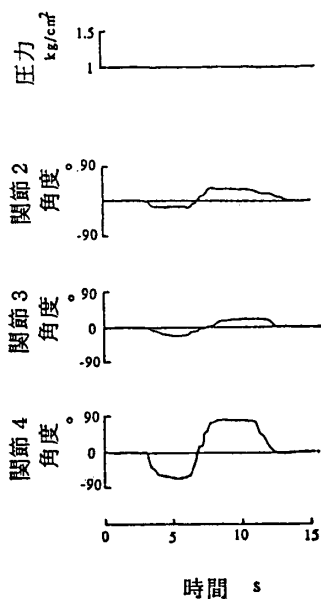


図 10 対象物なしのとき

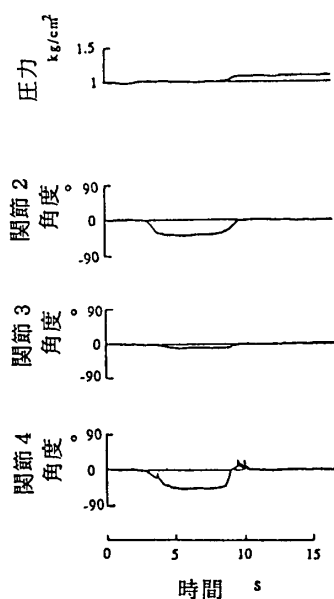


図 11 剛体に衝突させたとき

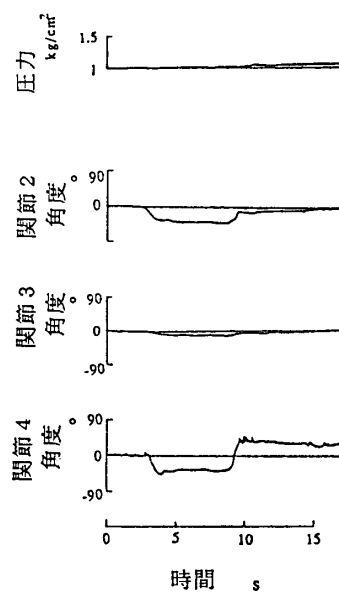


図 12 対象物が風船のとき

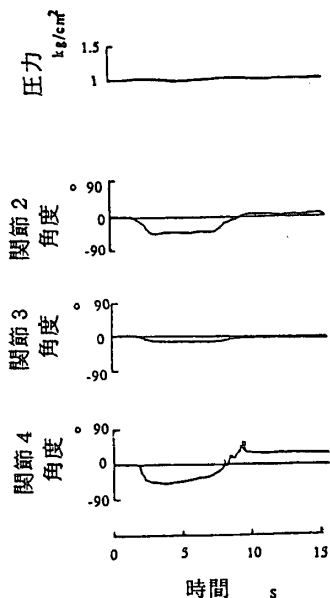


図 13 対象物が膜のとき

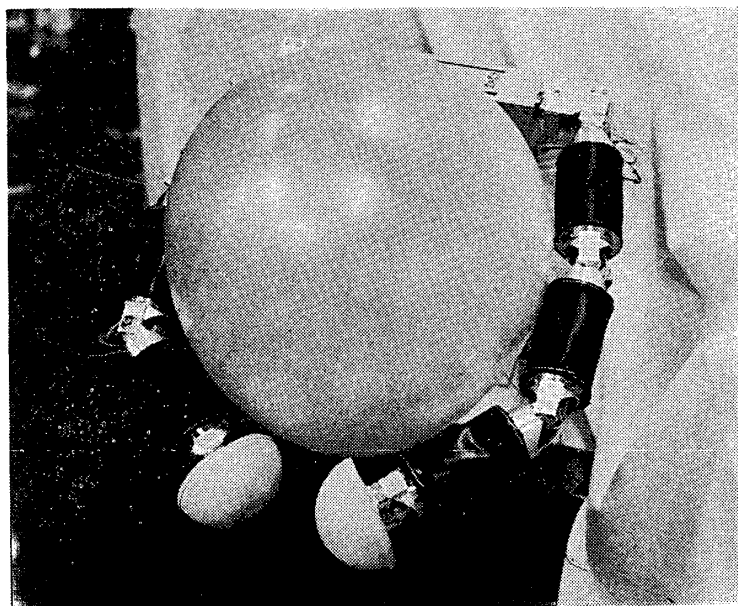


図 14 抱きかかえる写真

いる。このときに、先端ゴムアクチュエータの圧力が上がっている。これより対象物に力が加えられていることが分かる。次に、柔らかい風船を対象物としたときは、関節4が対象物を押し止まっていることが確認される。また、対象物が柔らかいので、先端ゴムアクチュエータで、検出される圧力は小さいものとなっている。また、スタビリングコントロールのような膜やぶりの場合は相手が柔らかすぎて、のれんに腕押し状態になっていると思われる。この点をうまく利用すれば、対象物が柔らかいか、硬いかを分からなくても、まず、軽い接触により対象物を認識し、後に把握に移

るというモードも考えられる。

6.2 抱きかかえによる把握

マニピュレータの関節4, 3を用いての把握を行い、表面ゴムアクチュエータの駆動を行った。最初が硬いバネ定数の大きい対象物で、次が小さい物である。結果を図15, 16に示す。図14に実験風景を示す。

6.3 先端による挟み込み

先端ゴムアクチュエータによる、摘むという動作を行う。対象物は2種で、前節で使用した物と同じであ

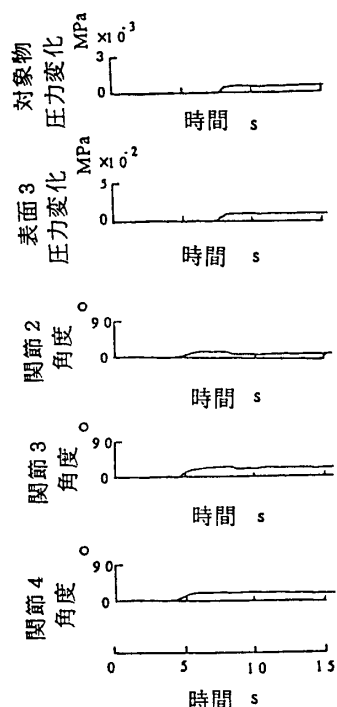


図 15 表面ゴムアクチュエータの駆動結果 (大きい対象物)

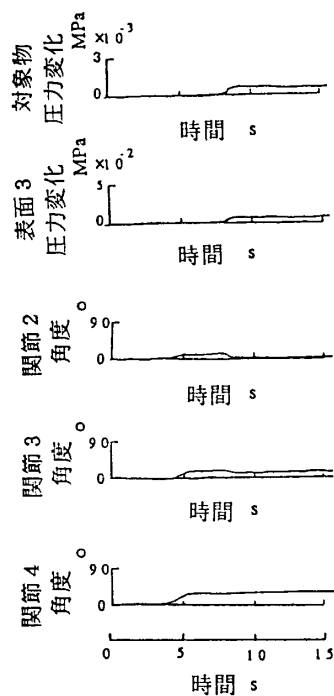


図 16 表面ゴムアクチュエータの駆動結果 (小さい対象物)

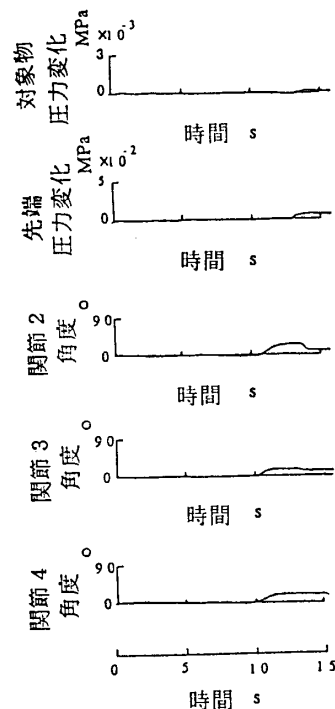


図 17 先端ゴムアクチュエータの駆動結果 (大きい対象物)

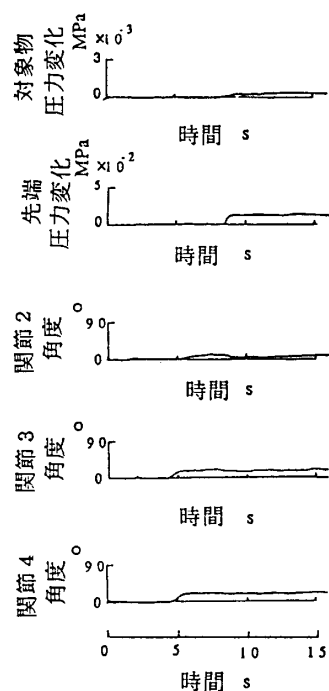


図 18 先端ゴムアクチュエータの駆動結果 (小さい対象物)

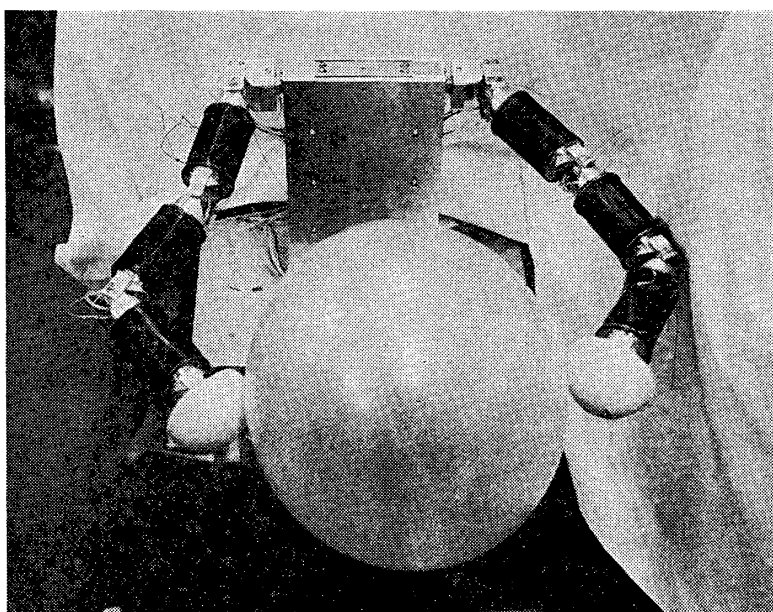


図 19 先端で挟み込んでいる写真

る。その実験結果を図 17, 18 に示す。図 19 はその実験風景である。

上記の 6.2, 6.3 どちらの実験も、挟み込んだ状態から圧力を上げたものである。実験装置の性能上、多少マニピュレータに動きがみられるが、静止状態から、

表面ゴムアクチュエータが作動したことが確認される。これにより、表面ゴムアクチュエータの独立な動きにより、コンプライアンス制御ができる。

7. 結 論

- (1) マニピュレータによる物体把握の方法として、コンプライアンスを考慮した空気圧制御法を提案した。
- (2) 対象物の違いによるコンプライアンス制御ができることを確認した。
- (3) 接触により、対象物の硬さを認識できることを確認した。

参考文献

- 1) 福田, 北村, 谷江: 対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式 (第1報, 適応力制御によるグリップの把握動作の力制御), 機論, C編, 53-487, (1986), 726-730.
- 2) 福田, 北村, 谷江: 対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式 (第2報, 適応ハイブリッド力制御による1自由度マニピュレータの制御), 機論, C編, 53-496, (1987), 2577-2582.
- 3) 福田, 北村, 谷江: 対象物の特性を考慮したグリップの適応ハイブリッド制御方式, 日本ロボット学会誌, 91-99, Apr. 1988.
- 4) R. P. ボール, 吉川恒夫訳: ロボット・マニピュレータ, コロナ社, 41-114.
- 5) 大国, 坂口: ゴム製アクチュエータの原理, 日本機械学会講演論文集, No. 870-3, (1987), 75-79.
- 6) 福田, 下中: 5本指ハンドの機構と把握力制御方法, バイオメカニズム 9, (1988), 219-229.
- 7) 福田, 下中: 人工の指の協調制御に関する基礎的研究 (第1報, 5本指多自由度の人工の手の機構と3次元把握の基本的考え方), 機論, C編, 53-487, (1987), 731-737.
- 8) 福田, 下中: 人工の指の協調制御に関する基礎的研究 (第2報, 静的平衡条件による指関節の協調的力配分方法), 機論, C編, 54-504, (1988), 1812-1819.

POSITION AND FORCE CONTROL OF MANIPULATORS WITH PNEUMATIC DRIVEN RUBBER ACTUATORS

Toshio FUKUDA* and Kenichi MIYAHARA**

* Nagoya University

** Hitachi Inc.

It is coming to be more important than ever before, in the welfare, medical, agricultural, food production and other application sectors, that skill-based work, such as grasping of human and other soft objects, should be automated and done by robots, if possible. In order for robots to carry out these handling tasks, they must be capable of sensing soft objects and adjusting their position and the applied force to objects. Conventional robots generally lack these control abilities and are not able to handle soft objects.

In this paper, a robot is proposed which can handle such soft objects, so that the robot can control the position and force independently and simultaneously by two-arm configuration with four degrees of freedom at each. The manipulator can move horizontally and employ rubber actuators with air-driven mechanisms. By feeding air into

the actuator, the rubber becomes contractive in the direction of length to produce the displacement. The displacement as the actuator output can be controlled by air supply amount at the joint in the PWM manner after sensing the joint angle. This type of actuator has advantages, such as light weight and microprocessor-based control compatibility.

In particular, the manipulator proposed here has actuators around the surface and at the tip, so that it can adjust the required force for grasping compliant objects by controlling the surface and tip actuator pressures. Thus the robot can adjust the surface contact ratio and can grasp objects without moving its joint actuators. Since the surface is made of rubber, the robot can handle objects without applying excessive force and damaging objects.

By using both joint and surface/tip actuators, the manipulator can perform position and force control independently and simultaneously. Grasping motion control is also possible using the Jacobian matrix of the manipulators. Experiments have been carried out to verify the proposed manipulator's

capabilities for handling rigid and soft objects in a wide range of applications. The robot, with a grasping motion, can pinch objects and also hold them. It is shown through experiments that the robotic manipulator can sense object hardness and handle compliant objects.