

空気圧ソフトグリップを用いたハンドリング装置の試作

大内田 学・堂田周治郎*・松下 尚史*

岡山理科大学大学院工学研究科

*岡山理科大学工学部機械工学科

(1994年9月30日 受理)

1. 緒 言

ロボットアームの先端に取り付けて、対象物に直接作用を及ぼす装置をエンドエフェクタ¹⁾と呼ぶ。人体では「手」がエンドエフェクタに対応することから、ハンドという用語も使われる。人の手のように、接触作業における衝突力の緩和や柔らかな動作を実現するためには、空気の圧縮性によるコンプライアンスを利用した空気圧ロボット²⁾やゴム製のハンドが有効である。著者らは、鈴森康一氏（株東芝総合研究所）により考案された柔軟構造アクチュエータ³⁾に注目し、それを大型化したシリコンゴム製の空気圧駆動ラバーアームに関する研究^{4),5)}を行い、制御方法の確立およびその実用性を検討してきた。シリコンゴム製のアクチュエータは、1) 構造が簡単で小型軽量化が容易、2) 摺動部がなく、動作が滑らか、3) ゴム製であり安全、4) 潤滑の必要がなく環境を汚さないなどの特長を有している。しかし、ラバーアームはアーム自体の力が弱く、極めて軽い物以外の搬送作業には適さないことがわかった⁵⁾。また、一般に産業用ロボットのアームには高い剛性を持たせる必要があるため、コンプライアンスはハンドに持たせるのが一般的である。

そこで本研究では、繊維強化を施したシリコンゴム製の空気圧ソフトグリップを試作し、これを用いて物体の把持実験を行い、ソフトグリップの有効性を検討することを目的とする。本論文では、試作したソフトグリップの構造、動作原理、製作方法を述べるとともに、ソフトグリップの基本特性やハンドリング装置の特性を調べ、それに適した制御方法を検討する。そして実際にハンドリング実験を行い、試作装置の有効性を検討する。

2. 制御システムの構成

Photo. 1 にハンドリング装置の外観を示す。等辺の鋼板とアルミ合金板を組み合わせた土台の上に、X軸移動のロッドレスシリンダ（SMC製 MYH32G-500H）を取り付け、鋼板を介してZ軸移動のスライドユニット（SMC製 CXWL25-200）を取り付けている。研究の中心となるソフトグリップは、Fig. 1 に示すようにスライドユニットの先端に下向きに4指取り付ける。

制御信号の流れを Fig. 2 に示す。パーソナルコンピュータ（NEC製 PC-9801 RA）か

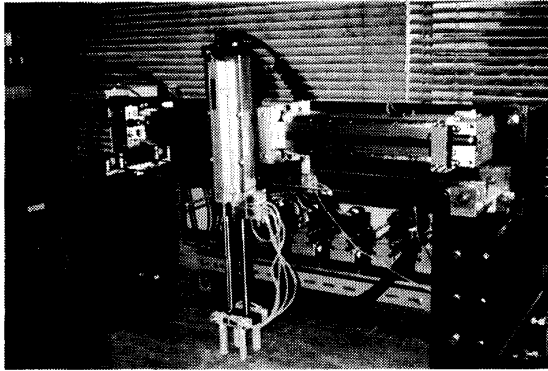


Photo. 1 The tested handling machine

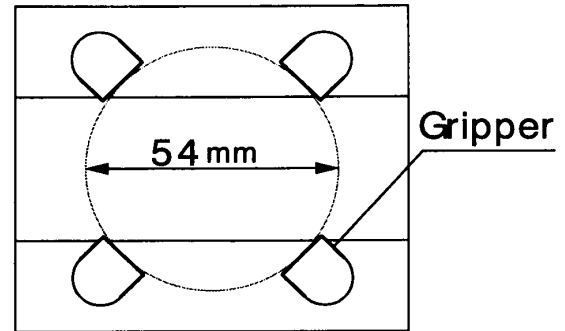


Fig. 1 Arrangement of soft gripper

ら出力された指令電圧に相当するデジタル信号を D/A コンバータ (コンテック製 DA12-8(98)) によりアナログ信号に変換し, 弁駆動アンプ (SMC 製 VEA-250) でその信号を増幅し 5 個の電空比例圧力制御弁 (SMC 製 VEP-3121-1) を駆動する。この電空比例弁により, ハンドリング装置の各圧力室に圧縮空気を供給する。なお, 制御弁の電圧-圧力変換係数は 165 kPa/v である。X 軸方向の変位はタイミングベルトを介しロータリーエンコーダ (オムロン製 E6B-CWZ3E) で検出し, カウンタ (インターフェイス製 AZI-9201 98ENCODER (4)) によってパーソナルコンピュータに入力される。24ビットカウンタを含めた位置検出の分解能は 0.056 mm である。Z 軸方向の変位はポテンショメータにより検出する。12ビット A/D 変換器を含めた電圧-変位変換係数は 40.5 mm/v で, 位置検出分解能は $1.3 \times 10^{-4} \text{ mm}$ である。また, 各圧力室の内圧は圧力センサにより検出する。その

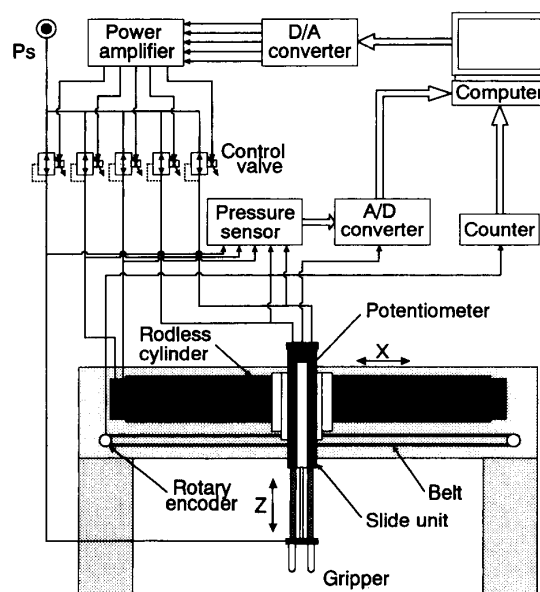


Fig. 2 Schematic diagram of the control system

時の電圧—圧力変換係数は125 kPa/v で、検出分解能は0.15 kPa である。圧力センサの測定可能範囲は0~500 kPa である。この変位信号と圧力信号に相当するアナログ信号が A/D コンバータ (I・O データ機器製 PIO-9045) によりデジタル信号に変換され、パーソナルコンピュータに送られる。

3. ソフトグリッパの動作原理と製作

3.1 構造と動作原理

ソフトグリッパの構造を Fig. 3 に示す。グリッパはシリコンゴム (ダウコーニング社のシラスコン RTV-7000) 製で、長さ80 mm、幅12 mm の中空筒錐形の2重構造で、円筒内壁には中心軸に対して垂直に純絹坪糸 (通常、建築の墨付け作業時に使用される。) で繊維強化がなされている。また、内壁の片側中心軸方向に同糸で繊維拘束がなされている。純絹坪糸を用いた理由はグリッパ成形時にシリコンをよく含み、シリコン硬化後にズレや食い込みの心配がなく伸びが少ないためである。グリッパの圧力室は繊維強化がなされているため、圧力室を加圧すると膨張力は繊維により半径方向の伸びは抑えられ軸方向の伸びとなり、空気圧を解放するとゴムの弾性力によって復元する。圧力室を加圧することにより、中心軸方向に繊維拘束されていない側が伸び、拘束されている側に曲がる構造となっている。

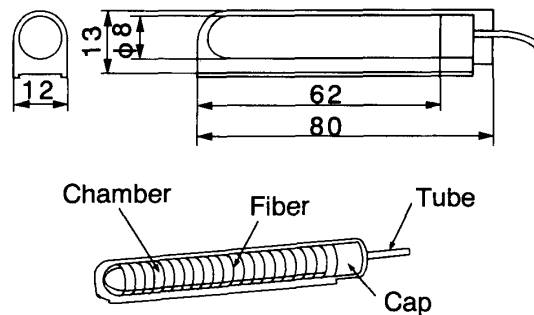


Fig. 3 Structure of soft gripper

3.2 製作方法

ソフトグリッパの製作過程を Fig. 4 に示す。以下、工程ごとに説明する。

(I) 内壁製作

グリッパの伸び率を高め、製作時の気泡を取り除くためにシリコンシンナー10%添加のシリコンゴムを真空デシケータ内で脱泡し、内壁型に流し込み中子をゆっくりと挿入する。シリコンゴムが硬化する (24時間) のを待って内壁型から円筒内壁を取り外す。

(II) 繊維巻き付け

(I) で製作した内壁に、繊維を中心軸に対して垂直に等間隔 (4 mm) で巻いていく。また、同糸で片側中心軸方向に 2 本並べて巻き、軸方向の伸びを拘束する。

(III) 本体製作

金型に (I) と同様のシリコンゴムを脱泡した後流し込み、(II) で作った繊維強化した内壁をゆっくりと挿入する。シリコンゴムが硬化する (24時間) のを待って型から本体を取り外す。

(IV) キャップの埋め込み

予めシリコンチューブを貫通したキャップを製作し、圧力室に埋め込み、(I) と同様のシリコンゴムを脱泡した後、流し込み密閉する。

(V) 完成

最後にソフトグリッパを型から取り外し完成となる。

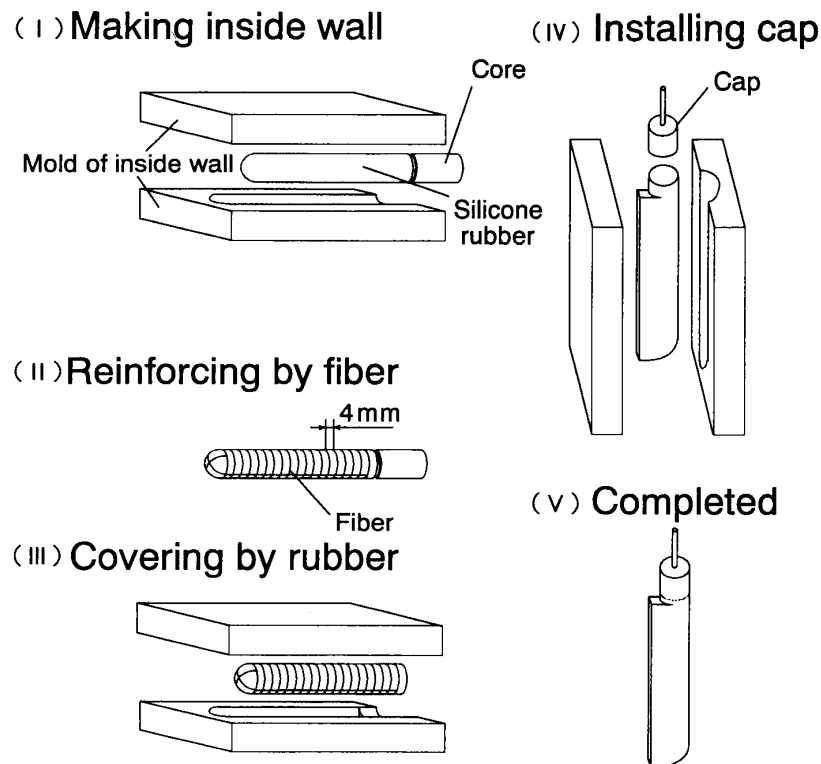


Fig. 4 Fabrication process of soft gripper

4. ソフトグリッパの基本特性

4.1 静特性解析

特性解析を行うために静特性を中心としたモデル化を行い、ソフトグリッパの特性式を導出する。モデル化に際して以下の仮定を設ける。

- 1) グリッパの湾曲角は小さい。
- 2) グリッパは一定の曲率で湾曲する。

3) グリッパの軸方向に繊維拘束している側は伸びない。

定常状態におけるソフトグリッパの形状(湾曲角と曲率半径), グリッパの発生力, 可搬力, 円柱または球体の対象物に接触するまでの圧力などを求める。グリッパの中心変位 x と圧力室に加える圧力 P との間には次の関係がある⁴⁾。

$$x = \frac{AP}{K} \tag{1}$$

ここで, A : グリッパ圧力室断面積, K : 弾性係数である。

また, ソフトグリッパを加圧した時のグリッパ中心軸を Fig. 5 に示すように円弧で近似すると, 幾何学的な関係から次式を得る⁴⁾。

$$L_0 + x = R\alpha \tag{2}$$

$$(R-r)\alpha = L_0 \tag{3}$$

$$d = D - 2R(1 - \cos\alpha) - 2r\cos\alpha \tag{4}$$

ここで, L_0 : グリッパの自然長, R : 曲率半径, α : 湾曲角, r : グリッパの圧力室中心から接触面までの距離, d : 対象物直径, D : グリッパ中心軸間対角距離, である。

(2), (3)式より湾曲角は

$$\alpha = \frac{x}{r} = \frac{AP}{Kr} \tag{5}$$

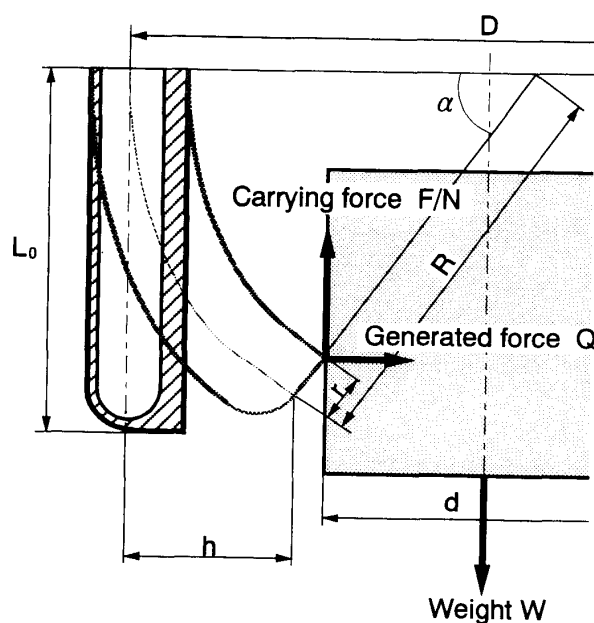


Fig. 5 Analytical model of soft gripper

曲率半径は

$$R = \frac{(L_0 + x)}{\alpha} = \frac{L_0 K r}{A P} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 $L_0 \gg x$ を仮定している。また、(1)式と(4)~(6)式から湾曲角 α が小さいとして $\cos \alpha \doteq 1 - \alpha^2/2$ で近似すると、対象物直径がグリッパ内接円直径より小さい場合、対象物に接するまでの最低圧力 P_c は、

$$P_c = \frac{(D - 2r - d) K r}{L_0 A} \quad (7)$$

で与えられる。

次にグリッパの発生力と可搬力を求める。材料力学のはりにおける手法を適用することによりグリッパの発生力 Q は次式で与えられる。

$$Q = \frac{3EI}{L_0^3} h \quad (8)$$

ここで、 E ：縦弾性係数、 I ：断面2次モーメント、である。また、 EI は曲げ剛性とも呼ばれはりの曲げにくさを示す重要なパラメータである。さらに、 h はグリッパの指先変位であり、幾何学的な関係より

$$h = R(1 - \cos \alpha) \quad (9)$$

となる。ここで $\cos \alpha \doteq 1 - \alpha^2/2$ とし、(5)、(6)式を用いると

$$h = \frac{L_0 A}{2K r} P \quad (10)$$

となる。これを、(8)式に代入することによりグリッパの発生力は次式で表される。

$$Q = \frac{3EIA}{2K r L_0^2} P = \beta P \quad (11)$$

ここで、

$$\beta = \frac{3EIA}{2K r L_0^2} \quad (12)$$

である。また、Fig. 5に示す可搬力 F は

$$F = N \mu Q = N \mu \beta P \quad (13)$$

で与えられ、対象物直径が小さい場合の可搬力 F は(7)式で与えられる圧力 P_c を用いて、

$$F = N\mu\beta(P - P_c) \tag{14}$$

となる。ここで、 N ：グリップ本数， μ ：グリップと対象物の摩擦係数，である。

4.2 システムパラメータの同定

ソフトグリップ（1指）の先端（付け根から60 mm）に糸を取り付け水平に張り、滑車を介してグリップと平行に糸を張る。その先に分銅を取り付け電子天秤上に置き、グリップを加圧し分銅を持ち上げる時の圧力は圧力センサで、力は電子天秤を用いて測定することにより圧力-発生力の関係を調べる。このときのグリップの形状は、絶えずまっすぐにしておく。

ソフトグリップ加圧時の圧力と発生力の関係を Fig. 6 に示す。低圧時はソフトグリップ自身の伸びがあり、この付近を無視すると(1)式の係数 β は2.23 m²となる。簡単のため弾性係数 K を一定 (2850 N/m) とし、(1), (5), (6), (9)式と β の値を用いて計算した結果を実線で示す。計算結果と実験結果がよく一致していることがわかる。

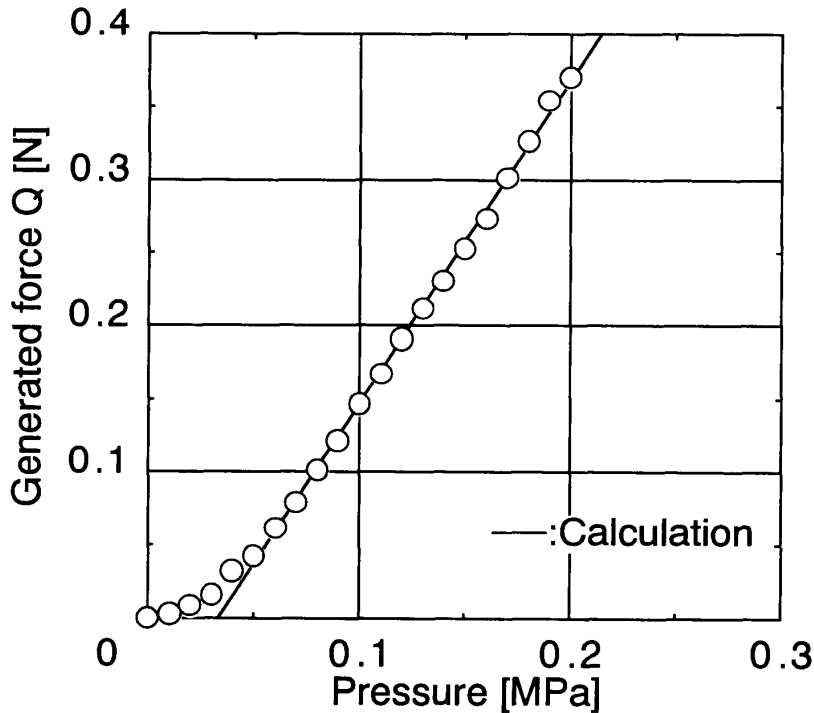
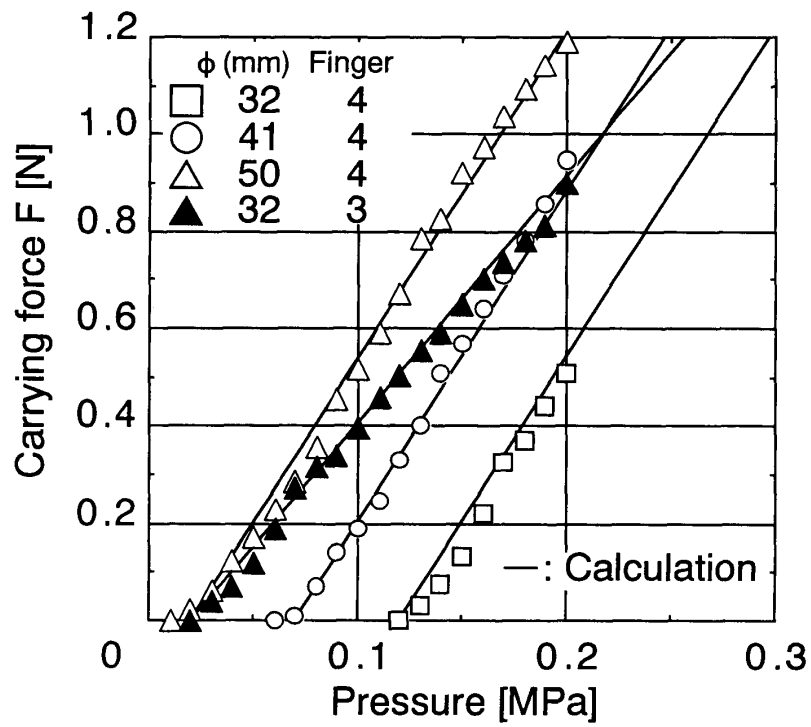


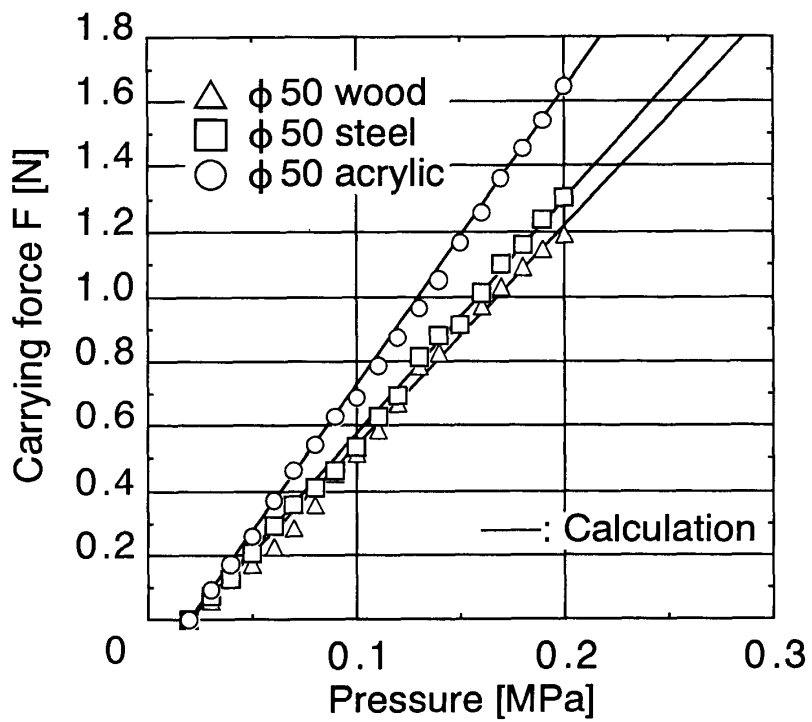
Fig. 6 Relation between pressure and generated force

次に数本のソフトグリップを使用し、対象物として分銅を取り付けている直径の異なる3種類（32 mm, 41 mm, 50 mm）の木製円柱を電子天秤上に置きつまみ動作で把持させ圧力を圧力センサで、ゆっくりと持ち上げるときの可搬力（摩擦力）を電子天秤を用いて測定する。次に対象物として材質の異なる3種類（木, 金属, アクリル）の直径50 mmの円柱をつまみ動作で把持させ、そのときの可搬力を測定する。

直径の違う3種類の木製円柱をつまみ動作で把持した時の圧力と可搬力の関係を Fig. 7



(a)



(b)

Fig. 7 Relation between pressure and carrying force

(a)に示す。実線で示す計算値は、摩擦係数 $\mu=0.76$ として(14)式を用いて求めた。対象物の径やグリップの数が異なっても摩擦係数は一定であることがわかる。

次に対象物に材質の違う3種類の直径50 mmの円柱のつまみ動作で把持した時の圧力と可搬力との関係を Fig. 7 (b)に示す。実線で示す計算値は、(14)式を用いて求めた。木製の場合は摩擦係数を0.76、鋼の場合は摩擦係数を0.81、アクリルの場合は摩擦係数を1.02とすると計算値は実験値とよく一致する。これらのシステムパラメータをまとめて Table 1 に示す。

Table 1 System parameters

A : Pressure chamber sectional area of soft gripper	50.3 mm ²
L ₀ : Natural length of soft gripper	62 mm
r : Distance from pressure chamber center of soft gripper to contacting surface	7 mm
D : Diagonal distance between central axes of soft gripper	68 mm
K : Elastic modulus	2850 N/m

5. ハンドリング制御

5.1 ハンドリング装置の摩擦特性

ハンドリング作業を確実にを行うためには、ハンドリング装置の摺動部に存在する摩擦特性を把握しておかなければならない。そこで、ロッドレスシリンダとスライドユニットの静止摩擦力（最低駆動差圧）を求める。

ロッドレスシリンダの最低駆動差圧を測定するために、左右両シリンダの圧力室に等しい圧力を0 kPaより300 kPaまで供給し、その状態より一方の圧力室を加圧または減圧を行い、駆動したときの差圧を測定する。なお、ロッドレスシリンダのシリンダ内径は32 mmである。

スライドユニットに関しても同様の実験を行うが、鉛直方向の移動のため重力を考慮しなければならない。そのため、下降側の圧力室に0 kPaより300 kPaまでの空気を供給し、上昇側の圧力室には重力を補償できる分だけの圧力（約27 kPa）を加えて差圧を測定する。なお、スライドユニットのシリンダ内径は25 mmである。

Fig. 8 (a)にロッドレスシリンダの最低駆動差圧を示す。各基準圧力の平均値から求めた全体の平均値は31 kPaとなった。Fig. 8 (b)にスライドユニットの最低駆動差圧を示す。なお、重力補償を加えた状態での差圧を0としているため、上昇時の平均値は34 kPaであり、また下降時の平均値は32 kPaとなった。以上の結果より、ロッドレスシリンダには約200 kPaの空気を供給し、その状態で左右両圧力室への加減圧が等しく行えるように微調整を行う。また、スライドユニットには下向移動用圧力室に約200 kPaの空気を供給し、上向

移動用圧力室に重力を考慮して上昇時と下降時の上下両圧力室の加減圧が等しくなるように供給する。

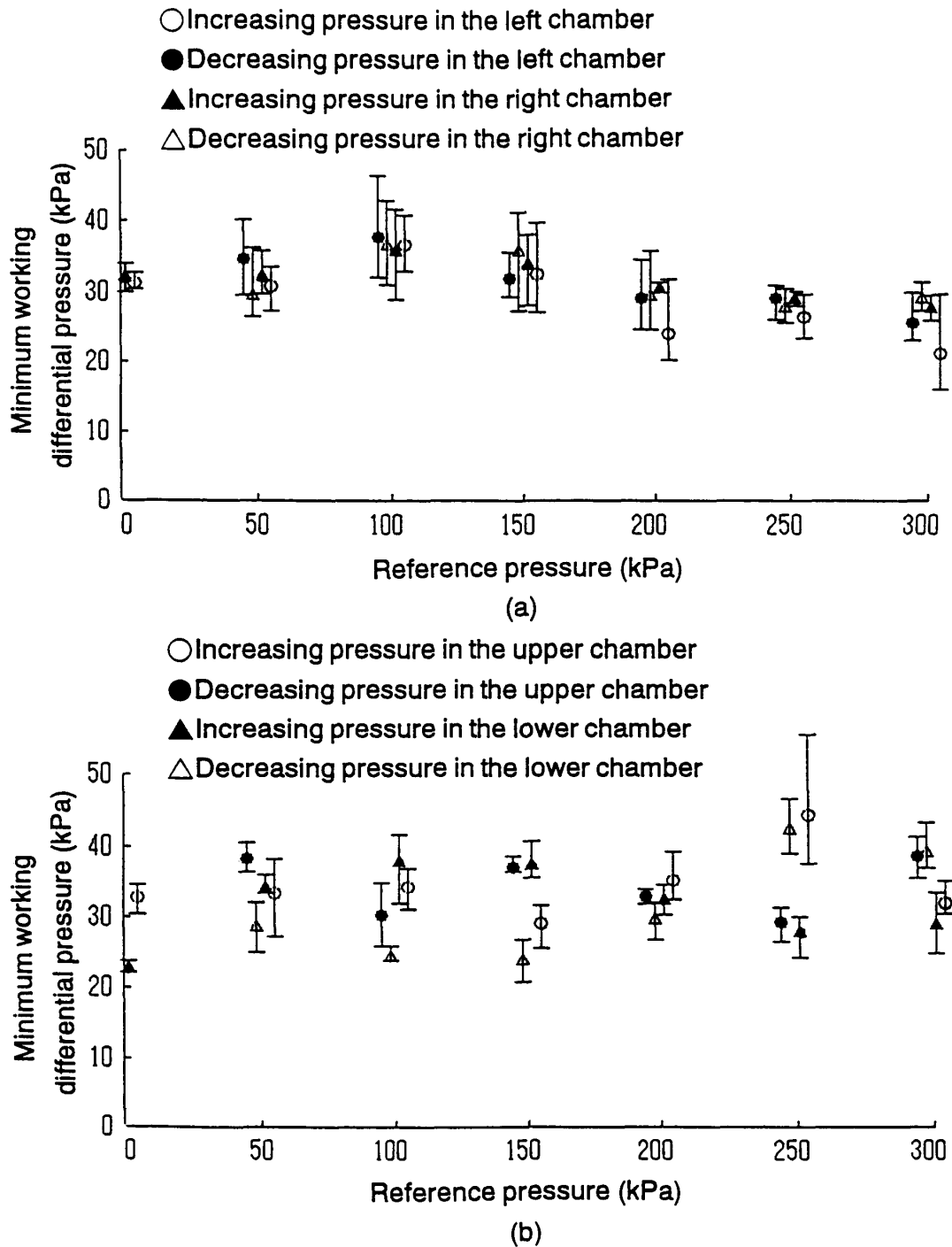


Fig. 8 Minimum working differential pressure of (a) rodless cylinder, (b) slide unit

5.2 ハンドリング装置の位置決め制御

ハンドリング制御は、手先の変位を検出し、PID制御を用いてフィードバック制御を行った。離散時間系のPID制御は、次式で表される⁶⁾。

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k T e(j) + K_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (16)$$

ここで、 u ：制御入力電圧、 K_P ：比例ゲイン、 K_I ：積分ゲイン、 K_D ：微分ゲイン、 T ：サンプリング周期、 e ：偏差（目標値－変位）、である。

実際に2つの弁駆動アンプ A, B に与える電圧 V_A , V_B は次式で表される。

$$V_A(k) = V_{A0} + \frac{u(k)}{2} \quad (17-a)$$

$$V_B(k) = V_{B0} - \frac{u(k)}{2} \quad (17-b)$$

ここで、 V_{A0} , V_{B0} は基準圧力（200 kPa）に相当する電圧である。なお、各ゲインの値は変位の時間変化がオーバーシュートなく、すみやかに目標値に達するものを試行錯誤的に選び、 $K_P = 2.66$ V/m, $K_I = 0.71$ V/m·s, $K_D = 0.36$ V·s/m とした。

ロッドレスシリンダにステップ状の目標値を与えた場合の目標値応答波形を Fig. 9(a)に示す。摩擦の影響により、目標値に整定する前に停止する傾向がある。これは積分動作が有効に働いていないためと考えられるが、これ以上高い積分ゲインを与えると応答が振動的になり、良好なハンドリング動作が行えないのでハイゲインにすることができない。なお、各目標値における定常偏差はすべて、目標値の5%以上であった。

次に、この摩擦の影響を軽減するために制御入力電圧に摩擦補償電圧を加えた場合について述べる。摩擦補償電圧は、制御入力の符号に応じて加え、その大きさは前節の実験より得られた結果をもとに最低駆動差圧のおよそ半（13.2 kPa）に相当する電圧（0.08 V）を加えることにした。

離散時間系の制御則は、次式で表される。

$$u(k) = K_P e(k) \quad (18)$$

$$V_A(k) = V_{A0} + \frac{u(k)}{2} + V_F \cdot \text{sgn}(u(k)) \quad (19-a)$$

$$V_B(k) = V_{B0} - \frac{u(k)}{2} - V_F \cdot \text{sgn}(u(k)) \quad (19-b)$$

ここで、 V_F ：摩擦補償電圧、である。

なお、各ゲインの値は変位の時間変化がオーバーシュートなく、すみやかに目標値に達するものを試行錯誤的に選び、 $K_P = 2.50$ V/m, $V_F = 0.04$ V, とした。ロッドレスシリンダにステップ状の目標値を与えた場合の目標値応答波形を Fig. 9(b)に示す。前述の摩擦を考慮しないPID制御結果に比べ、偏差も小さく良好な位置決め制御が得られることがわか

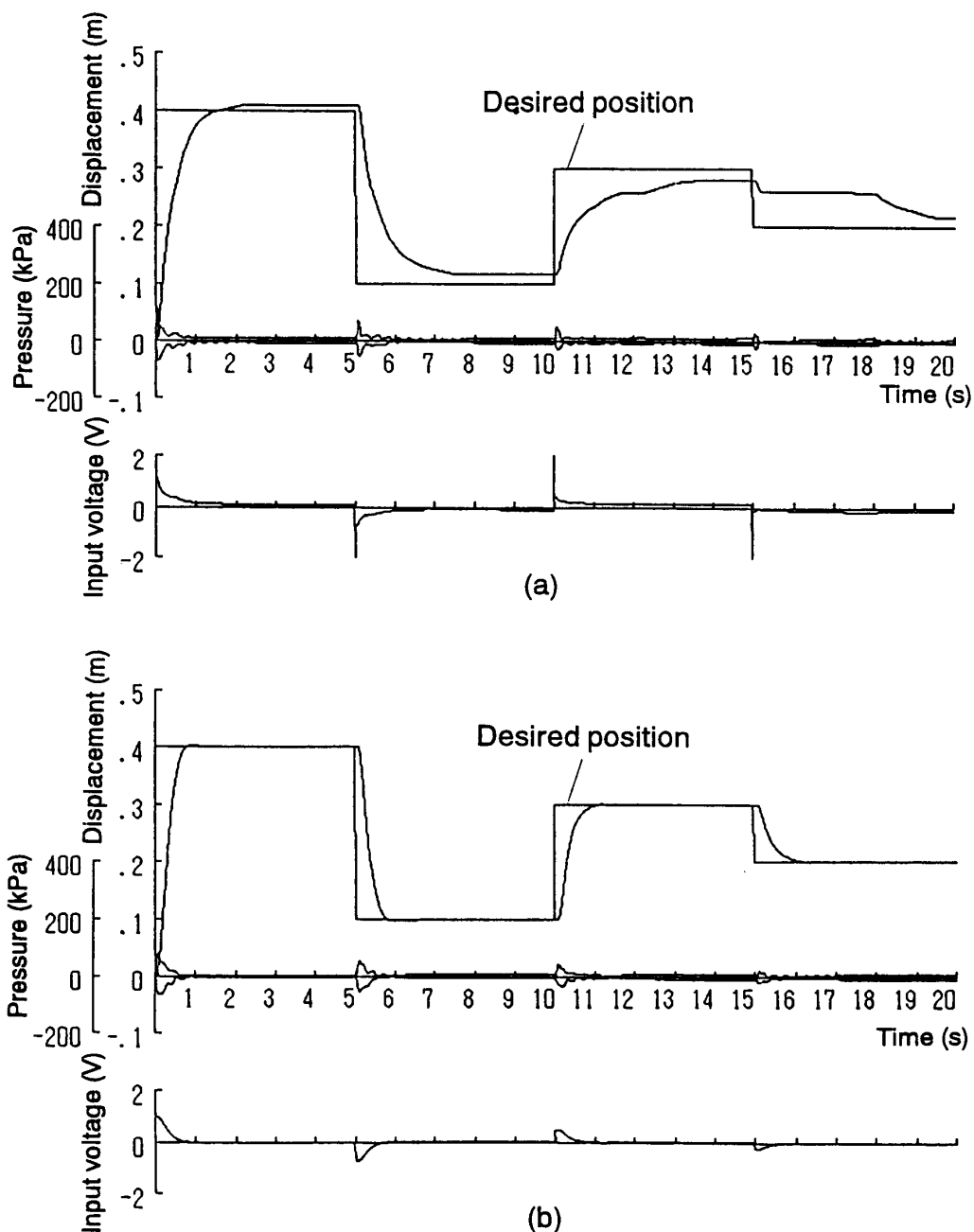


Fig. 9 Experimental results of carrying control with (a) PID controller, (b) P controller considering friction

る。なお、比例制御だけでなく摩擦を考慮した PID 制御も試みたが、積分ゲインと微分ゲインを大きくすると振動的になり好ましい応答が得られなかったので P 動作のみにした。したがって、次節のハンドリング制御ではこの制御方法を用いることにする。

5.3 ハンドリング制御実験

実際にソフトグリップによる対象物の把持実験を行い、ハンドリング制御実験として対象物の置き換え作業を行った結果について述べる。

置き換え作業の手順を Fig. 10 に示す。左と右の対象物の置き換えを以下のように行う。

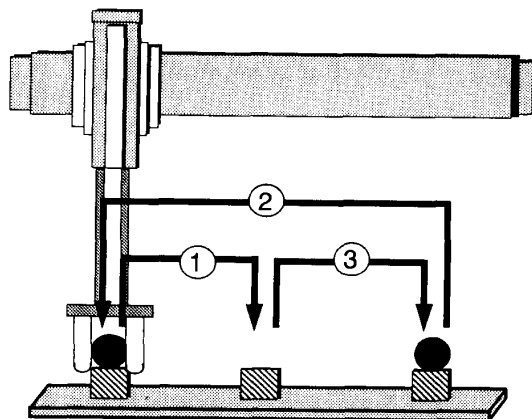


Fig. 10 Procedure of replacing work

まず左の対象物（対象物 1）を把持し、中央の中継点に搬送し台の上に置く。次に右の対象物（対象物 2）を把持し左に搬送し左の台の上に置く。最後に、中継点の対象物 1 を把持し、右に搬送し台の上に置く。対象物は、前節で用いた木製の円柱（直径41 mm、質量 62 g）とゴルフボール（直径42 mm、質量45 g）の 2 種類を使用する。

前述の置き換え作業は、上下左右の停止位置として18の目標位置を設け、各目標位置における停止時間をそれぞれ3秒間として制御を行った（1サイクル54秒）。

Fig. 11にハンドリング制御を行った場合の変位，入力電圧，ソフトグリップの入力電圧

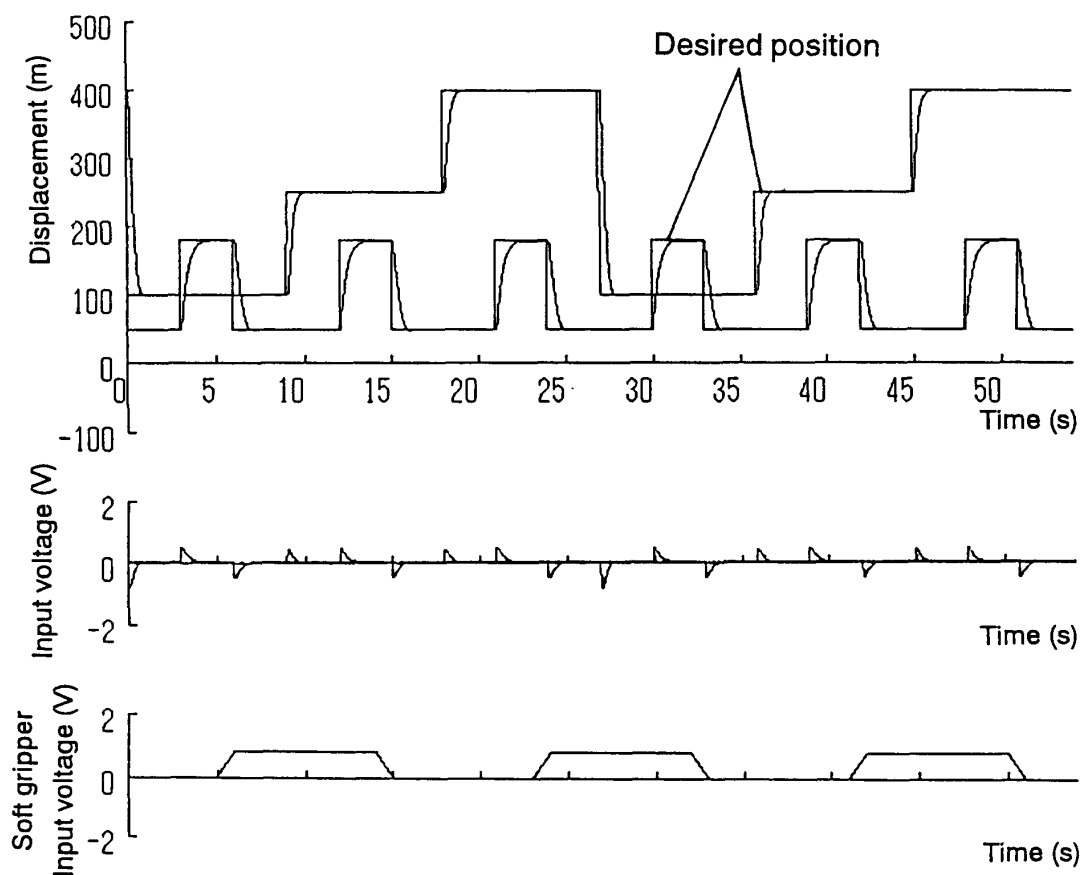


Fig. 11 Handling control

の応答波形を示す。ロッドレスシリンダ、スライドユニットとも目標値に追従していることがわかる。なお、各目標値における定常偏差はそれぞれ1%未満であった。また、対象物の位置が多少ずれてもソフトグリッパのコンプライアンスによって容易に把持することができ、対象物を落下させることなく搬送することができ、そして滑らかに台上に置くことができた。

6. 結 言

本研究では、シリコンゴムを繊維で強化した空気圧ソフトグリッパと、ロッドレスシリンダとスライドユニットからなるハンドリング装置の試作を行い、それらの特性を調べハンドリング制御実験を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) ソフトグリッパのモデル化を行い、ソフトグリッパの発生力、可搬力を導いた。そして、計算結果と実験結果はよく一致していることがわかった。
- 2) 位置決め制御に2種類の制御則を試みた結果、通常のPID制御に比べ摩擦を考慮した比例制御の方が優れた制御性能が得られることがわかった。
- 3) 実際にハンドリング作業を行った結果、対象物の位置が多少ずれていてもソフトグリッパのコンプライアンスによって容易に把持することができ、落とすことなく搬送でき、そして滑らかに台上に置くことができるので、ゴム製ソフトグリッパはハンドに有用であることがわかった。

最後に、本実験に協力された本学学生の縄田幸則君、開洋一君に厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 日本ロボット学会編：ロボット工学ハンドブック，コロナ社，297—320，231—236（1990）
- 2) 則次俊郎，角垣一志，堂田周治郎：空気圧ロボットのコンプライアンスとその制御，日本ロボット学会誌，Vol. 11, No. 2, 291—298（1993）
- 3) 鈴森康一：フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究（第1報，3自由度アクチュエータの静特性），日本機械学会論文集（C編），55—518，2547—2552（1986）
- 4) 宇都宮豊和，堂田周治郎，松下尚史：空気圧駆動ラバーアームの試作と制御，岡山理科大学紀要，第29号，169—179（1994）
- 5) 宇都宮豊和，堂田周治郎，松下尚史：空気圧駆動ラバーアームの基本特性と制御，計測自動制御学会中国支部学術講演会講演論文集，114—115（1993）
- 6) 高橋安人：デジタル制御，岩波書店，88—95（1985）

Development of Handling Machine using Pneumatic Soft Gripper

Manabu OOUCHIDA, Shujiro DOHTA* and Hisashi MATSUSHITA*

Graduate School of Engineering,

**Department of Mechanical Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1994)

In our previous paper, we investigated a rubber robot arm which seemed to be useful for a contacting task. This rubber arm was made bigger than a flexible microactuator which was developed by K. Suzumori. The flexible microactuator has following advantages: 1) it is easy to miniaturize because of its simple structure, 2) movement of multi degrees of freedom is possible, 3) it operates smoothly and gently because of no friction, 4) it is safer because it is made of rubber.

We tried to use a flexible microactuator as a soft gripper of an automatic handling machine. In this paper, the development of a handling machine using the soft gripper and its control are discussed. First, the structure of the tested gripper, its operating principle and its production procedure are shown. Second, the static characteristics of soft gripper is investigated theoretically and experimentally. Finally, the positioning control of the handling machine and the grasping and carrying control of the soft gripper are tested.

The results obtained from the works can be summarized as follows:

- 1) Proposed analytical model of soft gripper can explain well the statics of a soft gripper: the predicted generated force and carrying force of a soft gripper agree with experimental ones.
- 2) In a positioning control of the handling machine with relatively large friction, the proportional control scheme with compensation of friction gave much better control performance than usual PID control scheme.
- 3) Using the tested soft gripper, satisfactory grasping and carrying tasks were obtained, because the soft gripper had its inherent compliance.