

#### 4. 順応型マニピュレーティングシステムの開発

池田博康\*, 深谷 潔\*, 杉本 旭\*

#### 4. Development of Adaptive Manipulating System

by Hiroyasu IKEDA\*, Kiyoshi FUKAYA\*  
and Noboru SUGIMOTO\*

**Abstract:** Of the function of the man-machine interface of robot, those functions that are especially related to safety are described in this chapter. Based on the assumption that a human operator inadvertently makes mistakes when issuing commands to the robot, two types of interlocking are proposed for the remote control robot system. The robot system is equipped with a fundamental interlocking for safety monitoring on the robot side (i.e., fail-safe approach) and with a supplementary interlocking for exceptional tasks that cannot be covered by the fundamental interlocking (i.e., fool-proof approach).

For many assembly operation, a manipulator is required to have dexterity, achieved by position, force and compliance control of high degrees of freedom, as well as tactile sensing. The manipulator controlled by pneumatic servomechanism, which was used by the authors to control the force and compliance can be achieved to add the reliability of the supplementary interlocking.

This interlocking scheme that does not impair the safety of the operator when he makes mistakes is developed for the manipulator that can control the flexibility of operation over a wide range of conditions.

In this chapter, a new type of pneumatic servo system comprises two analog airflow valves with an electric-magnetically driven plunger.

The analysis and evaluation of this system are conducted. And examples are given to show the force and compliance control of the manipulator joints and artificial fingers.

**Key Words:** Manipulator, Pneumatic Control, Man-Machine System, Interlocking, Compliance, Servo Valve, Artificial Hand, Master-Slave System

##### 4.1 順応型マニピュレータの必要性

作業環境や作業条件から種々の制約を受ける場合、自動化は従来の自動機械の延長という方法だけでは対処しきれなくなっている。そこに、人間が介在せざるをえない環境が生じ、機械の制御系に人間が取り込まれる形態で人間・機械システムが構成される。特に、高度で複雑な作業を行う場合には、人間の知識、

\*機械研究部, Mechanical Safety Research Division

判断、技能に依存することになり、高齢熟練者の能力が発揮できる環境となっている。

一方、作業機械が複雑化、高出力化を辿るなかにあつて、高齢者が被る危険性が增大している。そして、一度機械系に組み込まれた高齢作業者の操作ミスに起因する災害は、大型化、重篤化するおそれがある。本質的に機械(制御)系は人間の曖昧な、また時として誤りを含む情報を許容しない構成となり、高齢

Table 4.1 Elements of adaptive manipulating system.  
順応型マニピュレーティングシステムの構成要素

名称	機能	特徴	参照
空気絞り弁	空気の流量調節弁であり、2つ連動して制御することにより空気圧が調節できる。	応答性に優れ、小型でありながら流量制御能力が高い。簡単な制御回路で高精度な圧力制御が可能である。ノーマルクローズ型である。	図 4.2 写真 4.1 写真 4.6
空気圧式マニピュレータ	空気圧駆動方式による4関節軸をもつ。力制御と共にコンプライアントな位置制御を行うことができ、外界との拘束に対し順応性を有する。	ゴム人工筋をアクチュエータとして用いており、人間の筋肉と類似の制御特性をもつ。異常時は姿勢保持、または弛緩する。	図 4.6 写真 4.3
指令装置	人間がマニュアルで空気圧式マニピュレータを操縦するための装置で、人間の腕と同じ動作をマニピュレータが行うマスター・スレーブ方式としている。角度とコンプライアンスを同時に指令できる。	導電ゴムを用いた簡単なセンサを人間が直接装着できるため、違和感なく操作できる。マニピュレータへの高剛性の指示は、人間の握力と意志の確認行為により実行される。	図 4.11 写真 4.2 写真 4.3
空気圧式ハンド	つかみ動作を行う2本指ハンドで、力制御用指とコンプライアントな位置制御用指を持つ。	接触センサを併用し、2本の指のハイブリッド制御を行うことにより、柔軟なつかみ動作ができる。	図 4.13 写真 4.4
	把握動作等の高度な作業を行うため、3本の多関節人工指（3関節指2本と2関節指1本）をもつ。	小型アクチュエータ（シリンダ）を用いることにより、人間の指に近い形状をもつため、柔軟で安定した把握動作ができる。	図 4.16 写真 4.5

者にとって肉体的、精神的負担となっているのが現状である。

人間が自身の機能の一部を機械に代行、あるいは拡大する手段としてマニピュレータがある。これは、重量物を扱う危険作業や悪環境下での作業のように、人間がマニュアルで遠隔操縦して作業をさせることが多い。この時人間による指令情報は誤りを含むことを前提とし、それに対処すべく安全機能を設けなければならない。この機能は、例えば操作者が絶えず確認作業をするような人間側の機能ではなく、マニピュレータ側で具備するものであり、当然その構造が安全上規定されることになる。

ここでは、マニピュレータとそれを操縦する高齢作業者が同一の領域で作業する環境を想定した。この領域では人間とマニピュレータの接触危険性が生じる。そこで人間が操縦する以上、接触（事故）は避けられないとする立場に立ち、マニピュレータ側でそれを保証する機能を構築するものとした。なお、開発した順応型マニピュレーティングシステムの基本構成要素を

Table 4.1 に示す。

#### 4.2 マン・マシンインタロックの構成

人間が絶えず注意を払って「安全」を確認し続けることは大きな負担となる。これは、人間の接近を検出して非常停止操作を行う方式（危険検出型監視）によって多少軽減されるが、この方式は人間のミスによって事故を生じやすい。安全の監視を人間に依存する限り、それによって達成される安全にはおのずと限界があるといわざるをえない。

そこで、新たな2重のインタロック<sup>1)</sup>を構成する。Fig. 4.1 にこのインタロックの構成を示す。この場合、安全監視は、マニピュレータを操作する人間が担う。図の構成によれば仕事をするために最も危険を伴う高剛性動作の要求 $Ia$ は、意志の表明 $C$ および人間による確認 $W$ によってのみ許可される。ただし、人間による確認 $W$ が十分でない場合は、低剛性動作しか実行できない構成である。図の意図するところは、「不慮の出来事の発生に対し、マニピュレータの柔ら

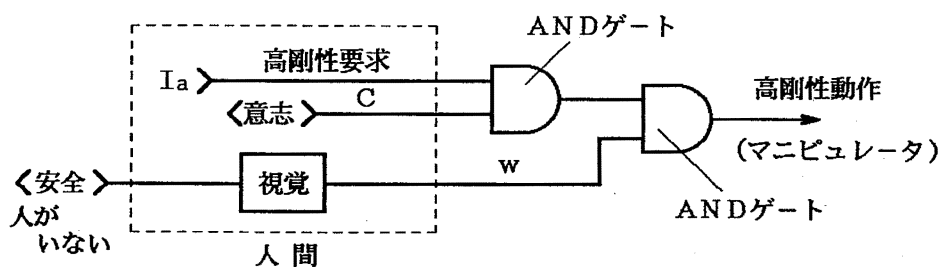


Fig. 4.1 Construction of duplicated quasi-interlocks.  
二重化されたインタロックの構成

かい動作に切り換えることによって、人間、あるいは周辺に重大な危害をおよぼさないようにすることにある。つまり、力を発生して作業を行う時のみ、マニピュレータを硬くし、それ以外では柔らかい状態を維持していれば、マニピュレータの持つ潜在的な危険性は大幅に抑えられる。ここにハードウェアとしてのANDゲートがフェールセーフANDゲート<sup>2)</sup>ならば、Wの誤りだけ許されない。しかし、人間が作業を行うため力を発生するのは明確な作業意志を持つ場合であるから、Wはマニピュレータに力を発生させるための人間の作業意志とみなせる。すなわち、Fig. 4.1のインタロックはきわめて人間の特性に適応しているといえる。

### 4.3 空気圧によるコンプライアンス

Fig. 4.1のインタロックを実現するためには、柔らかさの程度(コンプライアンス)を変化できるマニピュレータが必要となる。そのマニピュレータには①本質的には硬いマニピュレータでコントロールによって柔らかにするものと、②本質的に柔らかいマニピュレータでコントロールによって硬くするものの2種類がある。前者は、電気モータ式ロボットや油圧ロボットが相当し、柔らかい状態は(これを仮想コンプライアンスという)正常にコントロールされた時のみ得られるため、Fig. 4.1のインタロックには対応できない。後者は、本質的に柔らかさを持ち、正常にコントロールされた時のみ硬くできる空気圧式マニピュレータが相当する。このマニピュレータは、故障した場合空気圧が本質的に持つ高いコンプライアンスに移行するように設計されていれば、たとえ人間に触れても人間に大きな力を及ぼすことはない。

さらに、人間の手のような融通性を持つマニピュレータを構成するためには、以下の条件を満たすアクチュエータが必要とされる。

- a) 微妙な力の制御が可能で、かつ制御範囲が広い。
- b) 位置決め精度が高い。
- c) コンプライアンスを変化させて位置決め可能である。

空気の圧縮性は、空気圧アクチュエータの位置制御性という点で従来から大きな問題とされていた。しかし、空気の圧縮性は力の制御に利用でき、これを積極的に利用することにより、コンプライアントな位置制御が期待できる。

### 4.4 空気圧制御系の構成

空気圧アクチュエータの動作は空気圧制御系により達成され、そのためには空気圧力を制御する弁が必要となる。この弁は、マニピュレータ作業時のアクチュエータのパワーレート(すなわち、空気圧力の応答性)が十分余裕があるよう、応答が早く、しかも流量制御能力の大きいものが要求される。従来、これらの条件を満足する市販の弁は大型で高価となるため、新しい方式の空気絞り弁を開発した。

Fig. 4.2はプランジャ形空気絞り弁<sup>3)</sup>の構造を示している。これは、まずバネを調整して球形の弁体を弁座に押しつけ、圧力 $P_s$ との力のバランスをとる。電

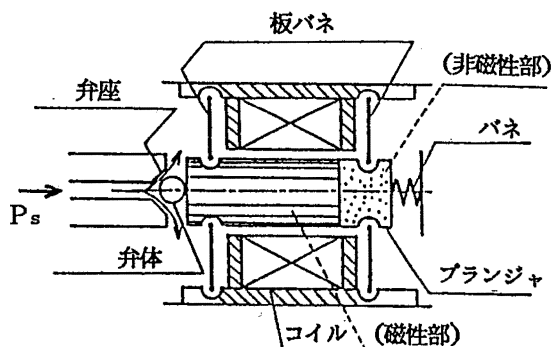


Fig. 4.2 Structure of air-flow valve of plunger type.  
プランジャ型空気絞り弁の構造

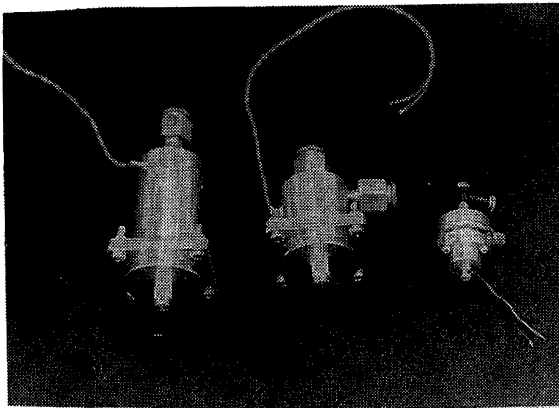


Photo 4.1 Three types of air-flow valves.  
3種類の空気絞り弁

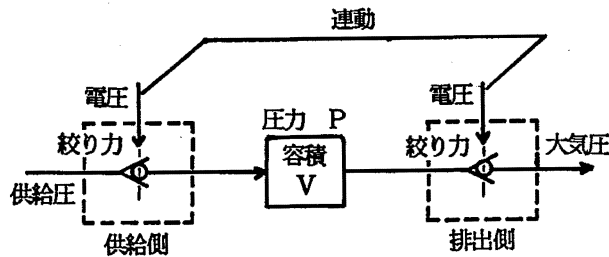


Fig. 4.3 Construction of pressure control system by two air-flow valves.  
2つの絞り弁による圧力制御方式

磁コイルに電流を流すと、プランジャを吸引する力が発生して、弁体・弁座間に間隙を生ずるので、電流に応じて空気流量を変化させることができる。また、電磁コイルの内側円筒とプランジャとの同心をとるための板バネにより、機械的摩擦をきわめて小さくしている。Photo 4.1は、左からおの最大流量 0.7,

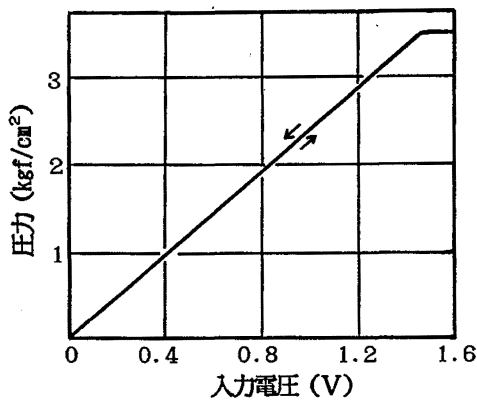


Fig. 4.4 Pressure control characteristic.  
圧力の静特性

0.4, 0.1 m<sup>3</sup>/min 用の絞り弁の外観を示す。

空気圧力の制御は、絞り弁を2つ連動して用いることにより、2つの弁の間の圧力を調節することができる。基本的には、Fig. 4.3に示すように、供給側と排出側の絞り弁の動作を切り換えて、負荷における圧力の上昇、下降を適切に調整することになる。

実際の圧力制御は、圧力の大きな変化は上昇に対して供給側絞り弁、下降に対しては排出側絞り弁がおのの単独で作動し、圧力の最終的微調整段階では供給側絞り弁のみ作動させるものとした。Fig. 4.4は、ループゲインを34.3 dBとした場合の圧力制御における静特性であるが、誤差0.1%以下となることを確認した。また、圧力制御の応答性に関しては、Fig. 4.5に示すステップ応答波形に見る通り、優れた応答性が得られた。

#### 4.5 空気圧マニピュレータの構成と制御

マニピュレータのコンプライアンスを制御する場合、アクチュエータ自体の内部摩擦が小さくしなければ制御範囲が限定されることになる。市販の空気圧シリングは空気をシールする構造上、内部摩擦は大きい。そこで、アクチュエータとしてマッキベン型ゴム

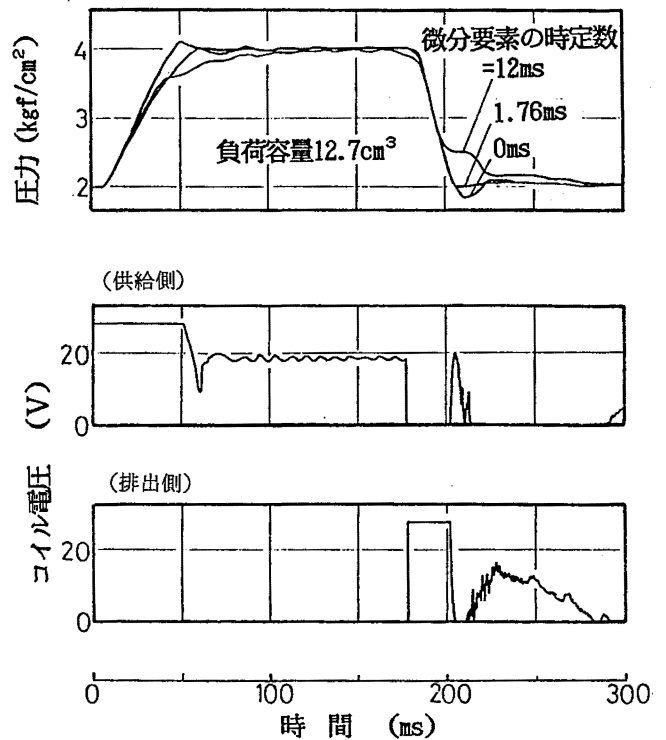


Fig. 4.5 Step response of pressure control.  
圧力制御のステップ応答

人工筋<sup>4)</sup>を2本、きつ抗形として用いた。この人工筋は、Fig. 4.6に示すようにゴムチューブの外側が繊維のスリーブで覆われており、空気圧力を加えると膨らむと共に縮んで変位するものであり、人間の筋肉と類似している。おのおのの筋に供給する空気圧を調節し、角度センサのフィードバックによる角度制御系を4軸分構成する。空気圧制御系は4.4節で示した2つのプランジャ形空気絞り弁を連動制御することにより、圧力フィードバック系を構成する。本弁は最大流量  $0.4 \text{ m}^3/\text{min}$  用であり、供給圧力を  $4 \text{ kgf/cm}^2$  とした。また、ノーマルクローズ型弁であるため、電源遮断に対して、マニピュレータの姿勢は保持される特徴を持つ。Fig. 4.7に駆動システム（1軸分）の構成<sup>5)</sup>を示す。

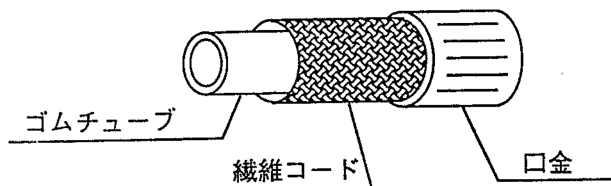


Fig. 4.6 Structure of rubber artificial muscle of Mac-kevin type.  
マッキベン型ゴム人工筋の構造

本マニピュレータシステムの簡略化した制御ブロック線図を Fig. 4.8 に示す。ここで、関節軸における角変位を  $\theta$ 、発生力を  $F$ 、空気圧制御系の電圧—圧力変換ゲインを  $G_{v1}$ ,  $G_{v2}$ 、人工筋の収縮量  $0$  における有効断面積を  $A_1$ ,  $A_2$ 、アーム系の慣性モーメント、粘

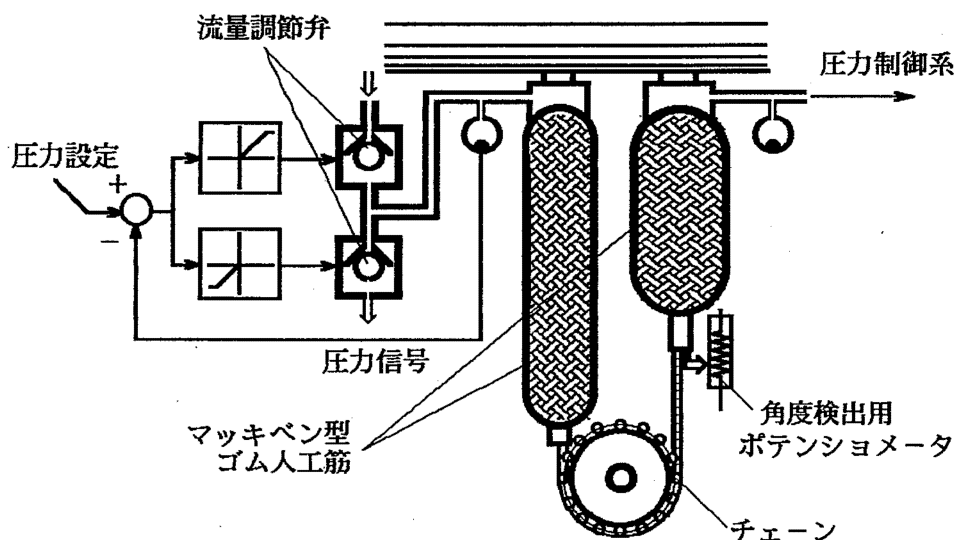


Fig. 4.7 Drive system (for one axis).  
駆動システム

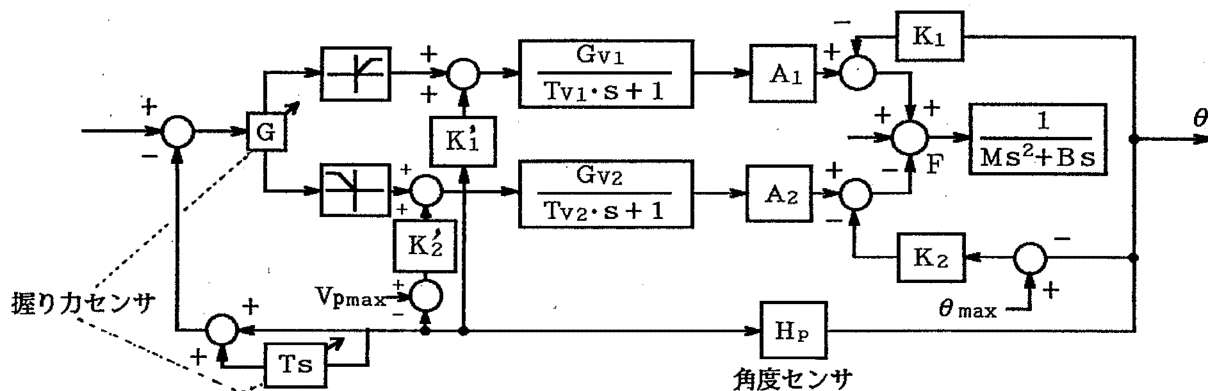


Fig. 4.8 Simplified control block diagram.  
簡略化した制御ブロック線図

性摩擦係数をそれぞれ  $M, B$ , 電気回路の電圧ゲインを  $G$ , 角度センサの角度—電圧変換ゲインを  $H_p$  とする。空気圧制御系は一次遅れ系に近似できる。人工筋はそれ自体が弾性係数 ( $K_1, K_2$ ) を持つが, これを  $K'_1, K'_2$  で消去し,  $G_{v1}A_1 = G_{v2}A_2 = G_v A$  とすると, 角度コンプライアンス  $\Delta\theta/\Delta F$  は次式に近似できる。

$$\Delta\theta/\Delta F = 1/(A \cdot G_v \cdot G \cdot H_p) \dots \dots \dots (4-1)$$

従って, ゲイン  $G$  を変化させることによりコンプライアンスを変化でき, この点で, 本マニピュレータは可変ループゲイン形マニピュレータということができ, 仮想的に柔らかさを作り出す高剛性マニピュレータのコンプライアンスとは根本的に異なる。また, ゲイン  $G$  の変化に伴い制御系の位相余裕が変化するため, 微分補償量  $T$  を  $G$  に連動させて制御系の安定化を図っている<sup>6)</sup>。

Fig. 4.9 にコンプライアンスの実測値の一例を示す。人工筋固有のコンプライアンスは  $3.4 \times 10^{-3} \text{m/N}$  であるが, それ以上に調節範囲が拡大されており,  $K_1, K_2$  消去の有効性が確かめられた。

なお, 角度制御はアナログ電子回路によりリアルタイムに行われるため, 動作状態にかかわらず外部より設定されたコンプライアンスを維持することができる。また, 角度制御精度は, ソフトウェアによる疑似

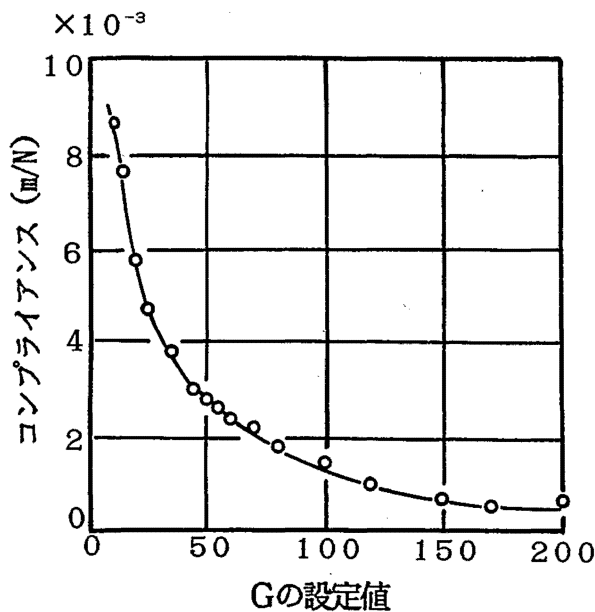


Fig. 4.9 Compliance characteristic of pneumatic manipulator.  
コンプライアンス特性

積分を付加することにより高めることができる。

#### 4.6 マスター・スレーブシステム

本マニピュレータシステムは, 人間 (マスター) がマニピュレータ (スレーブ) を遠隔操縦する, いわゆるマスター・スレーブ方式を構成する。コンプライアントなマニピュレータは本質的な柔らかさを持つので, 他物体と接触しても安全性は確保されており, 人間の操作は安全とは無関係な操作上の技巧に集中してもよい。また, 特に人間の視覚に基づきマニピュレータを操作するため, 位置的誤差は大きい。しかし, これはマニピュレータの柔らかさで対処できると考えられる。そこで, 特に反力をマスターにフィードバックすることを必要とせず, 本マニピュレータシステムはユニラテラル制御系で構成できる。ユニラテラル系におけるマスターとスレーブマニピュレータの作業の関係を Fig. 4.10 に示す。

マスター側の指令装置は, 空気圧マニピュレータを使用する場合, 高い精度は要求されないため, オペレータの関節部に貼り付ける伸張性導電ゴム (Ex-CR)<sup>7)</sup> を用いた簡単な角度センサを開発した。Fig. 4.11 にその構成を示す。

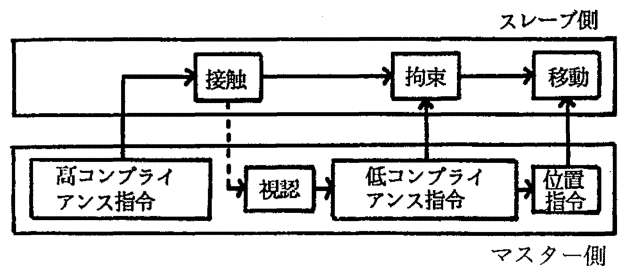


Fig. 4.10 Work relationship between master and slave.  
マスターとスレーブの作業の関連

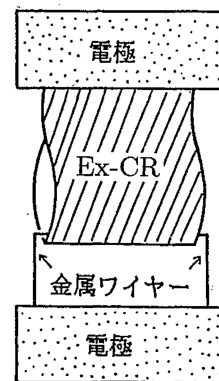


Fig. 4.11 Angle sensor made of extensible conductive rubber (Ex-CR).  
Ex-CR を用いたセンサ

その構成を示す。

また、コンプライアンス指令方式は人間が確認を伴った意識的行為を、人間にとって負荷の小さい動作として取り出すよう握り力検知の方式とした。握り力に応じて、Fig. 4.1における $I_a$ は高剛性動作か低剛性動作に設定される。この装置は楕円球状ゴム中空体の一端にEx-CRによる圧力センサ<sup>5)</sup>を取り付けたものである。Photo 4.2にその外観を示す。このゴム中空体の他端は開放されているので、マニピュレータの剛性を上げるためには意識的な動作として親指の遮蔽動作を要する。この動作は、Fig. 4.1のCに相当する。ただし、確認Wを特に装置として用意しなかったのは、安全を確認しないと高剛性動作の要求が

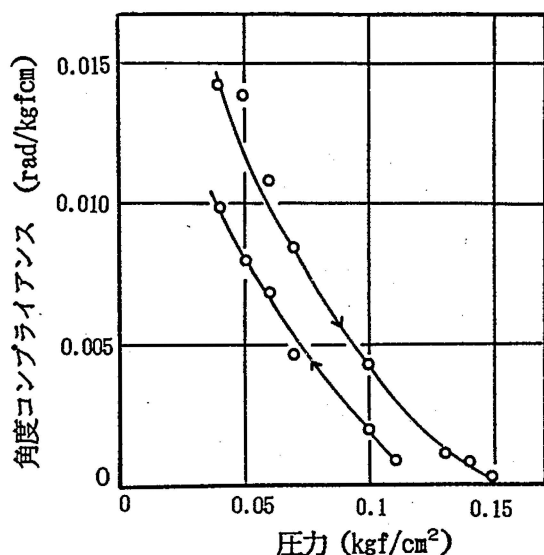


Fig. 4.12 Pressure-angle compliance characteristic of gripping force sensor.  
Ex-CRの圧力-角度コンプライアンス特性

なされないとする前提に立ったからである。従って、装置 $I_a$ はWと兼用される。

マニピュレータのコンプライアンスの調節は、この握り力センサの信号により、角度制御系の電圧ゲイン $G$ を変化することにより達成される。ただし、ゲイン $G$ がきわめて小さい場合、角度制御特性が劣るため、握り力に対するスレッシュド(下限)を設けて、そのレベル以上で握らないとゲイン $G = 0$ となり、マニピュレータは弛緩したままとなる。また、操作性を考慮し、握り力の上限スレッシュドを設け、それ以上のレベルで握ってもゲインは飽和( $G = 165$ )するものとした。また、Photo 4.3は操作状況である。なお、ゴム体内圧力に換算した角度コンプライアンス特性(肘部)を測定したところ、Fig. 4.12に示す結果を得た。ヒステリシスが $4.4 \times 10^{-3}$  rad/kgfcm生じたが、これは人間の曖昧さとマニピュレータ側の位置的誤差から許容される範囲内にあると考えられる。

本システムにおいては、人間のエラーに対して、作業対象物と目標位置指令の間に生ずる偏差を高コンプライアンス状態で吸収し、高剛性制御を誤って行わせる指令ミスを意識的な人間の安全確認によって対処している。高剛性マニピュレータを操縦する場合、人間は絶えず安全状態を確認するため緊張を強いられるが、本システムにおいては、オペレータのミスが許容されるため、安全制御のための精神的、肉体的疲労は軽減し、操作効率の向上が期待できる。

#### 4.7 コンプライアント機能を持つ空気圧式ハンド

マニピュレータ先端で、実際に対象物と接触しながら具体的な作業を遂行するためにハンドが必要となる。理想的なハンドは人間の手指であろう。人間の手

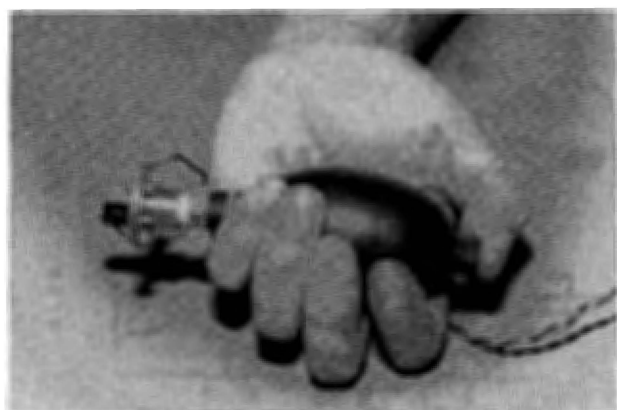


Photo 4.2 Gripping force sensor.  
握り力センサ



Photo 4.3 Experiment of master-slave system.  
マスター・スレーブ方式の実験

指は対象や状況の変化に応じて適用性の高い制御を行っており、柔軟性に優れた動作を実現している。これらの特質を有するハンド（人工指）を構成するには、小型、軽量のアクチュエータに加えて、力制御とコンプライアントな位置制御が必要となる。そこで、4.4 節の空気圧制御系を用いて 2 種類の空気圧ハンドを開発した。

(1) ハイブリッド制御によるハンド

つかみ動作のみを想定して開発したハンド<sup>8)</sup>を Photo 4.4 に示す。このハンドは、位置制御用指、力制御用指、検出器で構成され、指のアクチュエータには内径 15 mm、ストローク 45 mm、バネ定数 0.2 kgf/cm の単動空気圧シリンダを用い、最大力 6.5 kgf を発生できる。空気圧制御系を含めたハンドのシステム構成を Fig. 4.13 に示す。

つかみ力の制御は、摩擦係数の小さいテフロン樹脂等の使用により機械的摩擦を極力抑えた結果、ヒ

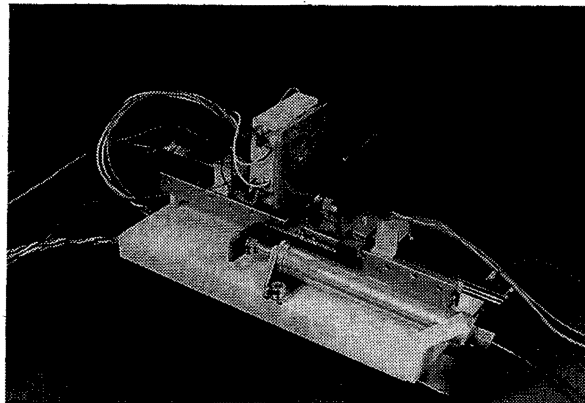


Photo 4.4 Two-fingered hand.  
2 本指ハンド

ステリシスを 200 gf 程度に抑えることができた。また、コンプライアンスの制御は、4.5 節と同様の制御系を構成した。しかし、シリンダのバネ定数が定常偏差として大きく現れるため、その影響を補正した。その結果、広範囲のコンプライアンスに対して高精度な位置決めが可能となった。

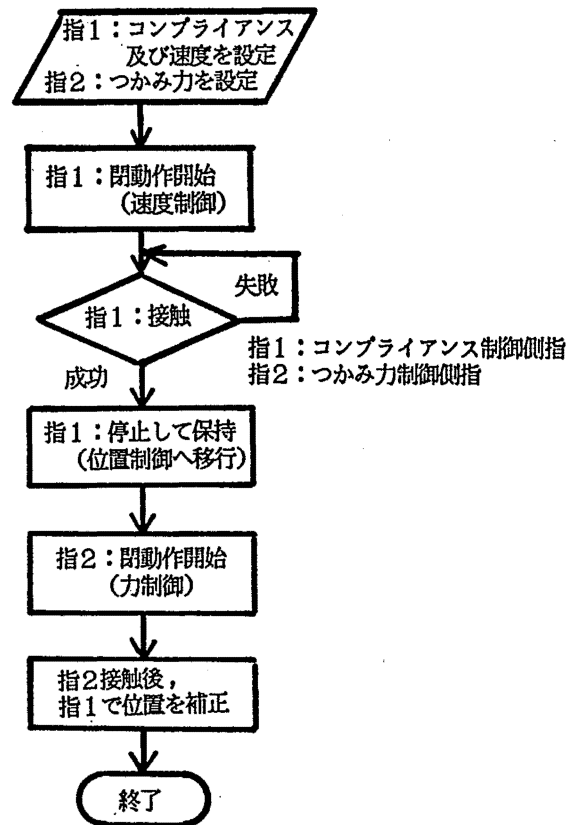


Fig. 4.14 Flowchart of hybrid control.  
ハイブリッド制御のフローチャート

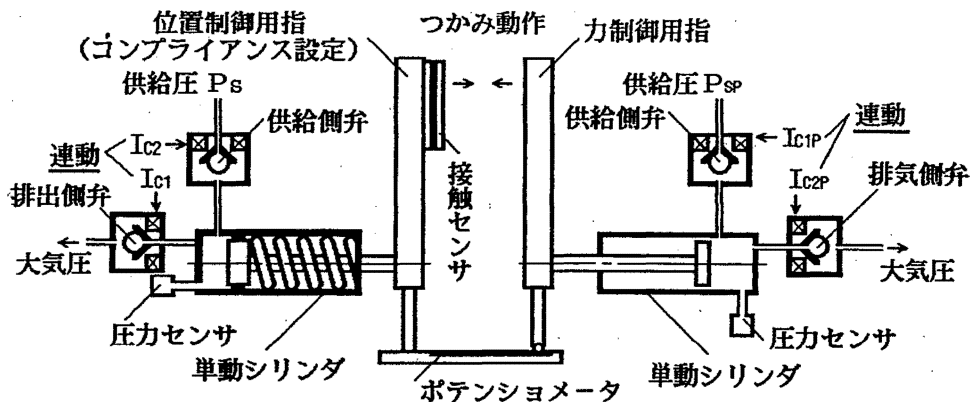


Fig. 4.13 Construction of two-fingered hand system.  
2 本指ハンドのシステム構成



以上の制御特性を総合し、Fig. 4.14のフローチャートに従って実際のつかみ動作を行った。これは、速度制御された位置制御用指が対象物に接触すると接触センサによりそれを感知し、その時の位置を保持（位置制御）して、次に力制御用指によりつかみ力を制御するものである。Fig. 4.15は実際のつかみ動作の一例であり、一連の動作は約1.2秒で完了している。

(2) 多関節人工指

つかみ動作に加えて、さらに高度な作業が可能な3本指の多関節人工指<sup>9)</sup>を開発した。これは、Photo 4.5に示すように、3自由度を持つ2本の人工指と2自由度を持つ1本の人工指を対向させて配置して、把握動作等ができるものである。Fig. 4.16は3自由度を持つ人工指の構造であり、シリンダ内圧と回転トルクが比例するように設計されたカムがシリンダロッド

先端に組み込まれている。また、伸展力はシリンダを真空で引き、プーリーを介したワイヤで引くことにより得ている。人工指の関節は成人男性の1.4倍程度とし、小型、軽量化を図るため関節機構はアルミニウムとテフロン樹脂を用いた。また、回転角度の検出は、ホール素子を用いた非接触磁気センサを構成した。なお、Photo 4.6は多関節人工指（3自由度分）用に開発した6連空気絞り弁である。

力制御を行ったところ、ヒステリシスが指骨格中心部に係る力に換算して64 gf程度であるため、微妙な把握力の制御が実現できた。また、角度制御については、繰り返し誤差±0.125%と非常に小さくできた。Fig. 4.17に制御特性を示す。動特性については、Fig. 4.18にステップ応答を示す。コンプライアンス特性については、Fig. 4.8におけるゲイン $G = 80$ まで制御可能であった。

人間の指が行う安定した柔軟性のある把握動作は、人工指の第一、第二関節を力制御系とし、第三関節をコンプライアントな位置制御系に使い分けることに

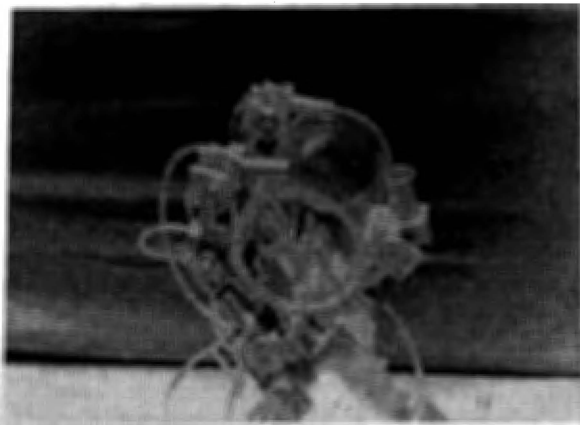


Photo 4.5 Three multi-joint fingers.  
多関節人工指（3本指）

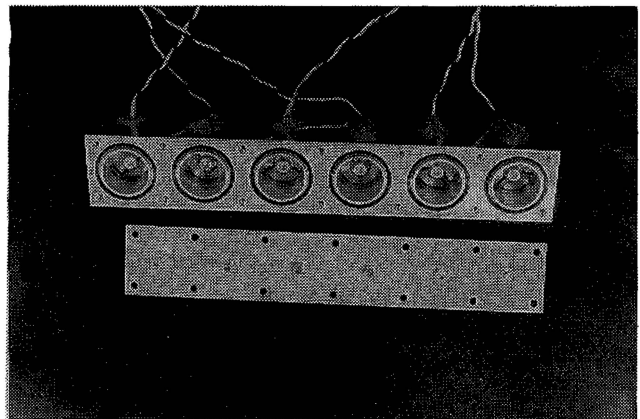


Photo 4.6 Small-sized serial six air-flow valves.  
小型6連空気絞り弁

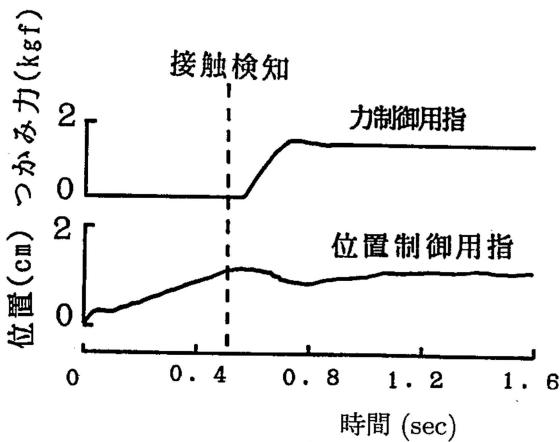


Fig. 4.15 Typical records of gripping motion.  
実際の掴み動作例

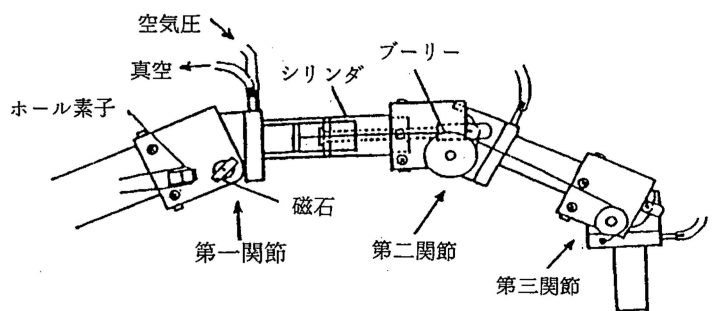


Fig. 4.16 Structure of multi-joint finger (for three degrees of freedom).  
多関節人工指（3自由度）の構造

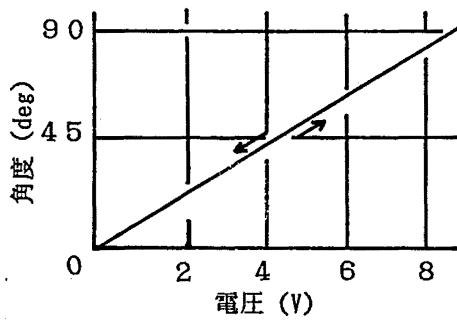


Fig. 4.17 Angle control characteristic of multi-joint finger.  
角度制御特性

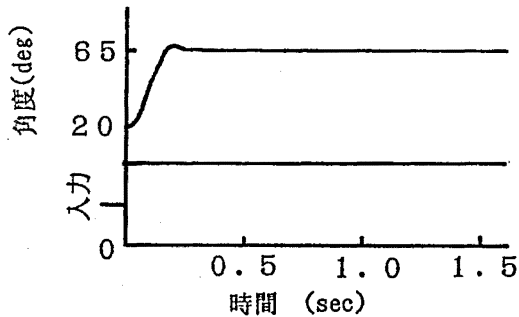


Fig. 4.18 Angle step response of multi-joint finger.  
ステップ応答

より実現できる。

(平成 2 月 11 月 30 日受理)

参考文献

1) N. Sugimoto, H, Ikeda: The construction of man-machine interface for remote control robot, Proceedings of the 5th international symposium on robotics in construc-

tion, Japan Industrial Robot Association, pp.151-160 (1988)

2) 蓬原: ウィンドウ・コンパレータ論理積発振器の高信頼化技術への適用, 電子通信学会研究会資料, R84-15 (1984)

3) 杉本: 空気圧マニピュレータの開発に関する研究 (第 1 報, 直動型流量制御弁の開発とその特性評価), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 53, No. 495, pp.2318-2324 (1987)

4) K. Inoue: Rubbertuators and applications for robots, Rob. Res., Vol. 4, pp.57-63 (1988)

5) H. Ikeda, N. Sugimoto: Pneumatic manipulating system provided with active compliance function, Ergonomics for Hybrid Automated Systems I, Elsevier Science Publishers B.V., pp.545-552 (1988)

6) 杉本, 鈴木, 橋野, 他: 空気圧駆動介助ロボットの開発, 第 5 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.647-649 (1987)

7) 杉本, 深谷, 池田, 他: 空気圧式マニピュレータの開発に関する研究—マスタ情報に基づくコンプライアンス制御について, 第 5 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.641-643 (1987)

8) 杉本, 駅, 鈴木, 他: コンプライアントな機能を持つロボットハンドのハイブリッド制御 (第 3 報), 第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.319-326 (1985)

9) 杉本, 駅, 坪内: 手指関節のための小型空気圧サーボ系の開発—小型多関節系のコンプライアンス特性の評価, 第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.323-326 (1985)