

機械で操作される人工の指と そのマテリアルズハンドリングへの応用*

山 下 忠**

Mechanical Fingers Controlled by Machine and Their Applications to Materials Handling

Tadashi YAMASHITA

Recently the artificial hands have been investigated from various viewpoints and some hardware have been presented. Compared these hands with natural hands, they are extremely lacking in degrees of freedom of the motion, and they can not do dexterous works. The author has made a model of mechanical fingers having many degrees of freedom in order to investigate the possibility of making highly efficient mechanical fingers.

The model made by the author has three fingers, which correspond to the thumb, index finger and middle finger respectively. Each finger has three degrees of freedom, consequently, there are nine degrees of freedom, and these nine joints can be moved independently by compressed air. Each joint has sense organ which detects the angular displacement of a joint.

Manipulators are worked by human operators, but this model can be worked automatically according to predetermined programs without aids of men. As an example the rotation of a grasped object by sequentially changing grasping fingers is performed, such a complicated work can not be done by other artificial hands which have been made till now.

These artificial fingers possessing advanced functions may be used as powerful control organs of materials handling, which is contained almost every industrial process. However, actual applications of mechanical fingers to industrial processes have many difficult problems, the largest problem may be the pattern recognition.

1. まえがき

人工の手については最近研究されており、2, 3のモデルも発表されている。その研究の意義としては多くのものをあげることができるであろう。筆者は以下のような理由から人工の手の研究は必要であると考えている。

人工の手は人間の手の機能を延長、模写しようとするものであって、生来の手の代用器官としての利用を目的として以前から研究されている。たとえば、義手は喪失した手の機能を代行させようとして造られているものである。一方放射性物質あるいは無菌動物など、人間が直接手をふれることのできない物を取り扱うの

に使われるマニピュレータは、人間の手の代用器官ではなく、手の機能を延長しようとするものである。義手はもちろんのことであるが、現在のところマニピュレータもその使用はごく特殊な場合に限られている。しかし、巧妙な動作のできる人工の手は要求されている。

また、生物工学的に見ても、人工の手に関する研究はハンドリング機器の機構、情報検出、制御方式などに多くの有益な示唆を与えることが期待できると考えている。操作部としては流体管路を開閉する弁しかない制御工学にとって、人間の手のように自由自在に固体を取り扱うことのできるハンドリング機器の研究、開発はぜひ行なわなければならないものであろう。

さらに、オートマトン理論が真に工学的意義を發揮するためには外界と相互作用を営める系を金物で造ることが必要であるといえるが、この系の操作部として

* 昭和39年1月30日原稿受付、3月5日再受付

** 東京大学大学院

やはり人工の手は役立つであろう。

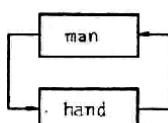
以上少し考えてみても、人工の手に関する研究の意義として多くのものをあげることができる。しかも、その1つ1つがたいへん大きなものであって、少し大きすぎて“明日の工学”的問題とも思えるが、研究に値するテーマであり、また、その結果として得られたものも多大であろうと筆者は考えている。

ただ一口に人工の手といっても、応用はいろいろあり、その目的により備えなければならない条件は変わってくる。たとえば、人間の手の代行をさせようとする義手では、機能、形態ともに生来のものにできるだけ近いものを造らなくてはならないが、他の応用を目指す人工の手にとってはまず機能が問題であって、その形態は二義的なものとなってくる。筆者が行なった研究はこの後のほうの場合についてである。

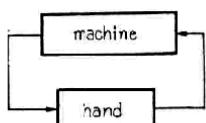
以下には、まず今までの人工の手に関する研究の展望を試み、つぎに人工の手の工学的応用についてマテリアルズハンドリングとの関連で論じ、最後に筆者が試作した指の装置の概要とこれを用いて行なった実験の1例を紹介する。筆者の試作した指は従来のマニピュレータなどと異なり、人間によって操作されるのではなく、あらかじめ組み込まれたプログラムに従って機械によって制御されて動作するところに特長がある。

2. 人工の手の研究の展望

手は普遍器官であるといわれるほど自由自在な機能、運動を行なう器官であるから、この多様な機能のうちほんのごく1部分でも代行できるものを人工の手とすれば、多くの道具、機械がこの範囲にはいってくることとなり、どの程度の機能を果たせるものからを人工の手とするかはむずかしいことである。ここでは行なえる操作のはん用性の程度と、種々の形状の品物をつかむことができるかどうか、すなわち、対象物の形に対する手先の形の適応の良さとから常識的に考えて人工の手の範囲を定めて論じていく。たとえば、鍛造作業に使われる工具であるやっこは2本指とするにははん用性、適応性ともになさすぎるし、ひしゃくは両手を合わせて指を曲げた形にあたるが、対象物をにぎりしめることはできず、やはり人工の手と考える



(1) Type 1
Controlled by man



(2) Type 2
Controlled by machine

Fig. 1 Two types of artificial hand

ことはできない。

筆者は、一般に人工の手を操作の仕方に注目すれば大きく2つに分類できると考える。すなわち、Fig. 1

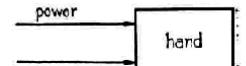


Fig. 2 Inputs to hand mechanism

のように人間によって操作されるタイプ1と、機械によって操作されるタイプ2とに分けられる。さらに、手の運動を考えてみると、手の運動機構への入力はFig. 2に示すように動力と制御信号とであり、Fig. 1のタイプ1の中には動力、制御信号ともに人間が供給している場合と、動力は他から供給し人間は制御だけを担当している場合との2通りのものが含まれていることになる。まず、タイプ1の人工の手から筆者の見解を入れながら展望しよう。

2.1 タイプ1の手

放射性物質の安全な取り扱いの必要性から造られたマニピュレータは、機械式のマスタスレーブ式のものからサーボ式のものへと進歩している⁽¹⁾。その使用も深海下での作業⁽²⁾、宇宙空間での使用など人間にとつて有害な、耐えられないような環境での仕事⁽³⁾、およびこれらとは逆に無菌動物の飼育、実験などのように人間が直接手をふれると被操作物へ悪い影響を与えるような作業での使用などへ広がりつつある。このような人間の近づけない場所での仕事は、今後人間の活動範囲が深海、地中、宇宙へと広がるにつれていっそう増すであろうから、すぐれたマニピュレータを今後も開発していくかねばならないといえる。

現在のマニピュレータは人間の手先に比べて手先の指の運動の自由度が少なく、人間の手先で行なえるような巧妙なことはできない。多数の自由度をもった指を手先につけて操作能力を高めることが必要であると筆者は思うが、人間がスレーブのほうの運動を見ながら操作するのであるから、現在以上に自由度を多くもたせたとしても、これら多数の自由度間の協調をうまく行なって、この新しいマニピュレータを操作できるかどうかも問題があるので、手先の自由度を増しても操作者の制御負担をあまり増加させないためには、指の部分だけでも機械によって制御できるようにする必要があるといえよう。

義手の問題で新しい発展をもたらしたものは、筋電流より情報を抽出し、これをを利用して外部からの動力を制御して義手を動かす方式のものである。この義手については1955年にBattyeら⁽⁴⁾によって最初の装置がつくられ、1957年以降おもにソ連でKobrinskiら⁽⁵⁾⁽⁶⁾によって研究がすすめられている。また、日本では鈴木ら⁽⁷⁾が研究を行なっている。この方法の原理

は皮膚上に電極をはり付け、筋電流の変化を検出し、手への情報を抽出するものである。この方法では人間の協調の能力をそのまま取り入れることができるので、この形式の人工の手の工学的応用としては、1人の人が多数の人工の手を同時に多くの場所で動かせ一度に多くの仕事を行なえるところにある、と筆者は考える。しかし、この方法では手先への情報をどれほど詳しく検出できるかによって手の行なえる巧妙さの程度は決ってくるのであり、この情報検出の可能性の限界はまだわかつていないようであるから、この方式でどれほど巧妙な動作のできる人工の手がつくれるかはまだ今後の問題であるといえる。

2・2 タイプ2の手

Tomovic'はオートメーションを現段階よりさらに発展させるためには、はん用性のある制御機器の開発が必要であると考え、手動作に注目して人工の手をつくった⁽⁸⁾。これは指が対象物にふれると、指が曲がり品物をしっかりとぎりしめるものである。かれはさらに改良を加え、対象物の重さに従ってにぎる力を自動的に調節できるとともに、指への対象物のふれ方ににぎるときの手先の形が変化できるものを作った⁽⁹⁾。

Ernst⁽¹⁰⁾はマニピュレータにモータと感覚器をとりつけて、これを計算機で制御して動作させる研究を行なった。この研究は手動作を情報処理の立場より取り扱ったもので手の運動機構などは問題としていないが、計算機に外界と相互作用を行なえる操作部、感覚器を持たせようとしているのは新しい方向であり興味深い。

種々のプログラムに従って動作のできる人工の手は多種少量生産工程のハンドリングの自動化の1つの有力な方法であるという報告が出されている⁽¹¹⁾。この手の構造はマニピュレータと類似のものである。

筆者は、対象物に直接ふれて操作を行なう指が手の中で最も重要な部分であると考え、指の機能を自由度との関連で定量的にはあくし⁽¹²⁾、3本指の装置を試作した⁽¹³⁾。筆者のこの試作研究については本論文4、5で説明するが、筆者の研究には、他の人工の手に関する研究と比べて以下に述べるような特徴がある。

上述の現存している人工の手の中でマニピュレータ、Battyeらの手先は、指の本数が2本で対象物をつかむための最低条件を満たしているだけである*。また、Kobrinski、Tomovic'らの手には、それぞれ形として

は5本の指があるが、動かすのにはただ1つのモータを用いて行なっており、それぞれの指を1本ずつ独立に動かすことはできず、指と対象物との関係は密着しているか離れているかであって、つかんだものを持ちかえたりはできない。したがって、かれらの手も等価的には指の本数は2本であるといえる。すなわち、従来の人工の手は指の部分の運動性は人間の手に比べて著しく劣っており、その機能は低かった。また、手の機能と構造とは関係づけて研究されていなかったといえる。そこで筆者は先に報告した研究⁽¹²⁾では、指の機能と構造との基本関係の一部を理論的に追求した。また、この研究の結果と、実際の人間の手の使用法に関する調査研究の結果とから、機能度の高い人工の指の備えるべき条件を自由度の面から求めた⁽¹³⁾。今度筆者が試作した指は筆者のこの理論的研究に立脚して造られたものである。

3. 人工の手の工学的意義

人工の手を造るということは多くの人も描いている人工間の夢へつながるものであるが、以下では工学の問題として考え、人工の手の応用の可能性について考察してみよう。

人工の手の応用は結局、固体のハンドリングへの応用ということになる、と筆者は考える。マテリアルズハンドリングはすべての産業に含まれている操作であるから、この工程の自動化は自動化率の向上へ大きく寄与することが期待されるが、従来制御工学者によってほとんど取り上げられてない問題であるので、ここで少しハンドリングについて説明する必要があると思う。

3.1 マテリアルズハンドリング

一般にマテリアルズハンドリングとは、字のとおり“品物を取り扱う技術”のこときいう。この中には荷役、運搬、貯蔵などの操作がある。これはすべての工業に必要なだけでなく、農業、建設業、サービス業など人間の活動するほとんどの分野で必要な重要な操作となっている。その目的を要約すると「必要な品物を必要な量だけ、必要な時刻に、その品物を要求している場所へ最も効果的に運ぶこと」といえる⁽¹⁴⁾。

たとえば、機械の組み立てでは、それぞれ別々に製作された部品を順序正しく組み立ていかねばならず、各部品の到達順序、到達時刻は正確でなくてはならない。また、1つの加工を終わった品物をつぎの加工場所へ運ぶ操作は、最少の労力でなされなければならない。マテリアルズハンドリングは操作としては単調ではあるが、なくてはならない操作であることは以上の簡単な説明からでも明らかであろう。

* 1本の指に2つの関節のあるマニピュレータも発表されている⁽¹⁵⁾が、これも指の本数は2本であって、つかんだ品物に種々の操作をすることはできない。ただ、マニピュレータの場合は、一般に2本の腕を1組として使用しているから、本文で考えているよりもマニピュレータの能力は高いと見なければならないであろう。本文では1つの手の手先に注目して論じている。

工学の問題として取り上げて研究しなくてはならないものは、運搬物の計量法と効果的な運搬手段の創造である、といえよう。そこで、以下では品物の形態とこれらの問題について基本的考察をしておこう。

material	transportation	measure	handling capability of hand
flow	gas	pipe (fluidization)	volume weight
	liquid		
solid	bulk solid	container	high
	formed solid		

Table 1 Material forms and transportation

3-2 品物の形態と運搬法

まず、広くマテリアルズハンドリングについて基本概念を明確にするために、一般の品物を形態にしたがって分類し、各形態の品物に使用されるおもな運搬法、それらと人間の手の能力の比較、輸送量の計量について、筆者はまとめ、Table 1 の結果を得た。すなわち、品物を大きく 2 つに分類すると、連続体である流体とそうでない固体となり、前者はさらに気体と液体とに分けられる。後者のほうは粉粒体のばら状固体と各種の部品などのような成形固体とに分けられる*。このばら状固体と成形固体との間の大きな差違は、ばら状固体では、一般に個々の粒子は問題ではなく、集合体として意味をもっており、その計量は個数ではできず、体積あるいは重量で行なわれるものである。一方、成形固体は個々の単独体が意味をもっているもので、計量は個数で行なわれる。

上に分類した各種の形態に応じて使われている運搬法について説明すると、流体は周知のように管路で行なわれる。ばら状固体の運搬はベルトコンベヤをはじめとし、各種のコンベヤで行なわれるが、空気あるいは水を用いて流動化して輸送する**のが非常に効果的であり、最近の傾向である⁽¹⁵⁾。つぎに、成形固体の運搬であるが、これは多数個を適当な容器につめて、この容器をパレットを用いて大きな荷物にまとめ、各種の車などの機械力を使って運んでいる。

上述の運搬法を自動化の立場から考えてみよう。連続体である流体と、集合体として問題にされるばら状

* 紙、布などのように形態が一定しない品物もあり、ここではこれらを一応除外して考えている。しかし、これらのハンドリングはここで述べる品物よりいっそう困難なものであることは明らかであろう。

** たとえば、空気を用いる空気コンベヤでは、真空または圧縮空気で輸送管路中に気流をつくって、粉炭、穀類などのばら状物を運搬するものである。また、空気よりも比重の大きい水を管内に流せば、空気コンベヤで運べるものよりも重い品物を運ぶことが可能であって、これは水コンベヤといわれている。

固体の運搬では、輸送量の制御が要求される。周知のように流体の流量制御は現在ではだいたいうまく行なえるが、粉粒体の流量制御はまだ今後の問題である。とくに、上で述べた流動化による運搬法では固体と流体が混合しており、しかもその混合状態は時間と場所によって変動するから、流量の検出、操作ともにむずかしい問題である。粉粒体の管路による輸送方法は、1 つの場所から他の場所へ粒粉体をとにかく輸送するのに非常に効果的な方法ではあるが、粉粒体の瞬間輸送量の制御が必要な場合には、上述した理由から適さないものであると筆者は考える。

つぎに、成形固体の運搬の場合であるが、この場合問題となるのは、輸送量よりも品物の姿勢の制御であるといえよう。たとえば、品物を容器につめることを考えてみよう。品物を容器内にきちんとつめるには、全部の品物の姿勢をある規則に従うようにして入れなくてはならない。このためには新しく品物をつめるたびごとに品物の動かし方を変えなくてはならず、単に機械的に同じ動作を繰り返す操作機構では、このようなことはできず、だめである。すなわち、いろいろな操作を行なうことができる人間の手のような多能機が必要であるといえる。また姿勢の検出もむずかしい問題である。これは一般的にいえば人間が眼と頭脳で行なっているパターン認識の問題となり、この問題は今日まだ解決されていない問題である。

以上に説明した運搬法と、筆者が研究し、すでに報告した人間の手のハンドリング能力⁽¹³⁾とを比較してみよう。人間の手は流体物質のハンドリング能力は小さく、成形固体のハンドリング能力が大きいことは明らかである。人間の手では十分に操作ができない流体を取り扱う機械には現在すぐれた機械が造られており、一方、成形固体のハンドリングに対しては巧妙な動作のできる人間の手のほうが操作能力は大きく、強力ではあるが巧妙な動作のできない現存の機械のほうが非力であるという対応はおそらく、人間の手の能力が高いということが固体のハンドリングの自動化を遅らせているともいえよう。

3-3 ハンドリング機器としての人工の手

上述したように人工の手は固体のハンドリングに広く応用できるものであるが、周知のようにパターン認識がうまく行なえない現在では残念ながらその使用は限られてくる。すなわち、Fig. 1 タイプ 2 の機械によって操作される人工の手には、多くの応用の可能性はあるが、現在ではパターン認識を必要としない安定な工程で、しかも同じ操作を何回も繰り返すようなものにしか使用できないといえる。しかし、Fig. 1

タイプ1の人間によって操作される人工の手では、操作者である人のパターン認識の能力を利用することが可能であることと、2で述べたようにマニピュレータがサーボ化されてきたのでテレビなどを併用すれば、操作域を相当に広げることができるので、今後応用分野が広くなることが期待されている。

人工の手の能力を高めるためには、2で述べたように構造の面からいえば、多くの自由度をもった指の製作が必要である。また、実際に使用することを考えれば、タイプ2の人工の手ではもちろん機械によって制御されるのであるが、またタイプ1の人工の手として人間によって操作されるものであっても、操作者の負担ができるだけ少なくすることが必要であるから、いずれにしても機械によって制御され、自動的に動作できる人工の指の実現可能性を調べてみなくてはならない。筆者は以上のような理由から以下に述べる指の試作研究を行なったのである。

4. 試作した指の概要

筆者は指の本数は3本あり、各指には3つの自由度をつけ、それぞれの指先には3次元運動を行なわせることのできる指を試作した。さらに、この指を自動的に動作させるために各関節には1ビットの感覚機能をもたらせた。この感覚器をおおしてのフィードバック情報を利用することによりシーケンス制御を行なうことが可能となり、今までの人工の手では不可能であった3本の指で品物を回転させるような高級な動作をプログラムに従って自動的に行なわせることに一応成功した⁽¹³⁾。この試作した指の構成図はFig.3に示すものである。以下

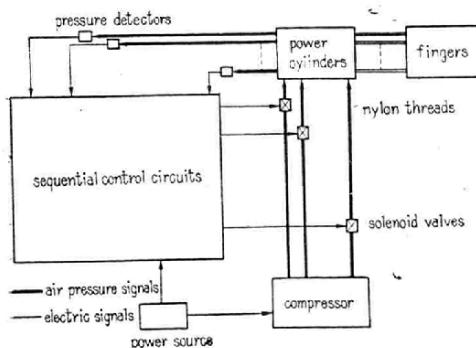


Fig.3 Block diagram of made finger

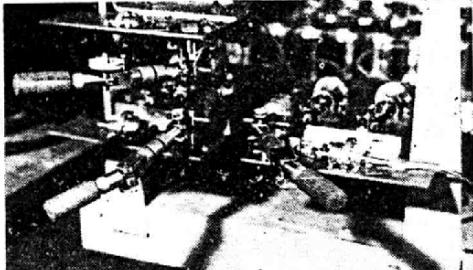


Photo. 1 Arrangement of three fingers

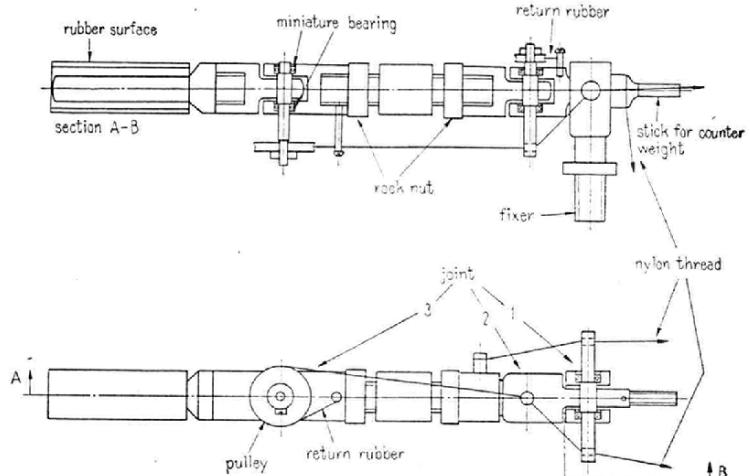


Fig.4 Mechanism of finger

に各部の説明を簡単に行なう。

4.1 指本体の機構

3本の指は皆同じ構造であって、その配置は Photo. 1に示すようになっている。すなわち、2本の指が上下に並び残りの1本の指はこれらに対向する位置に置かれている。これを人間の手と対応づけると、上下に並んだ2本の指は人さし指と中指に、対向位置の指は親指にあたる。

1本の指の構造を Fig.4 に示す。3つの関節のうち、先の2つは同じ平面内で動き、根元の関節はこれと直角な面内で動くものである。1本の指に3個の関節があり、指の本数は3本であるから、全体では9個の自由度があることになる。しかもこれらは皆独立に駆動できるものであって、以下に述べるパワーシリンダ、圧力検出器も9個ずつある。

4.2 パワーシリンダ

筋肉に相当し、関節に回転運動を与えるのがパワーシリンダである。動力としては圧縮空気を用い、圧力を変位に変換するものである。このパワーシリンダはベロフラムを用いて造った。その構造は Fig.5 に示すとおりである。シリンドラの右端の穴より圧縮空気がはい

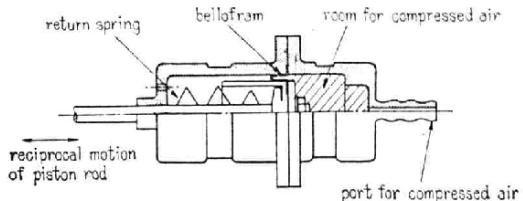


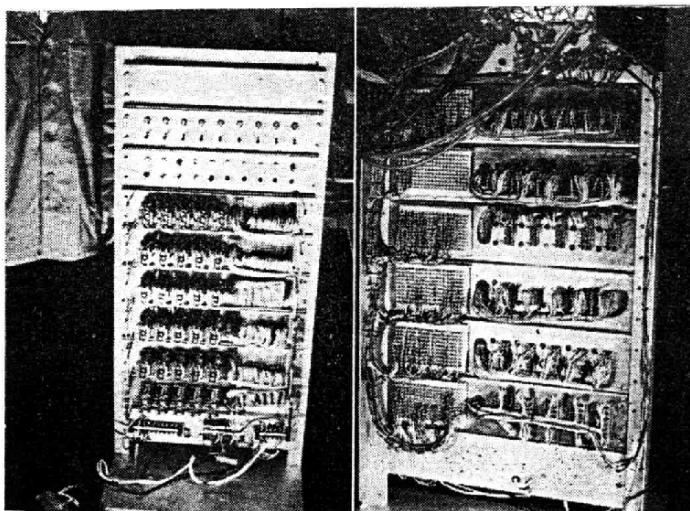
Fig. 5 Structure of power cylinder actuated by compressed air

ってくると、この圧力をペロフラムを介してピストンヘッドで受け、ピストンは左方へ動く。また、シリンドラ内の圧力が小さくなると、シリンドラ内の左側の部屋にとりつけてあるばねの力でピストンは元の位置に復元する。このパワーシリンダのピストンロッドには、ピストンの往復運動を関節へ伝えることができるナイロン糸が固定してあるから、ピストンの往復運動によって指を動かすことができる。

4・3 圧力検出器

周知のように人間の手で触覚は大きな働きを果たしており、これがなければ巧妙な動作はできない。人工の手の能力を高めるためには、やはりこの触覚に相当する感覚器が必要である。本装置ではパワーシリンダ内の圧力を圧力検出器で検出し、これで指先にかかる力を間接的に調べることにした。この圧力検出器はペローズとマイクロスイッチを組み合わせて造ったものであって、マイクロスイッチの動作で順次シーケンスを進展させ、指をプログラムにしたがって自動的に動作させようとするものである。

4・4 制御装置



(1) Front view

(2) Back view. Programs for control are made in this side

Photo. 2 Controller

Valve Actions		Air	Piston
V_1	V_2		
On	On	Enter	Go
Off	Off	Held	Stop
Off	On	Exhaust	Return

Table 2 Relations between valve actions and motions of piston rod.

関節を動かすための圧縮空気をパワーシリンダに入れ、保持し、出すの操作は電磁弁で行なった。1つのパワーシリンダに対して2個の電磁弁を使った。弁動作とパワーシリンダのピストンの動き、すなわち、関節の運動との関係を Table 2 に示す。

この電磁弁の操作は、繼電器を用いて作ったシーケンス制御装置で行なった。制御装置の写真を Photo. 2 に示す。

5. 実験

指の本数が2本、3本の場合についてそれぞれの場合で最も特徴的である仕事についてプログラムを組み、実際に指を動作させて、筆者はこのような多自由度の指の実現可能性を示すとともに、その実現に際しての問題点を調べてみた⁽¹³⁾。ここでは3本の場合の実験を紹介しよう。

3本の指で行なう仕事として、品物を順次持ちかえて回転させるものを取り上げた。本論文の2で行なった展望で述べたように、このような高級な仕事は従来の人工の手では行なえないものであった。

この仕事を行なわせるためには、3本の指をそれぞれ Fig. 6 に示すように動かした。この場合の制御回路を示すと Fig. 7* のとおりである。このプログラムに従って動作する場合の装置各部の状態の変化、指の運動、指と品物との関係の変

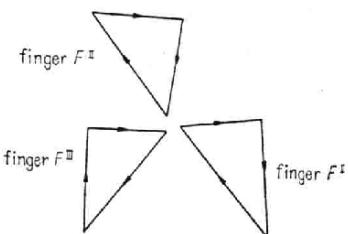
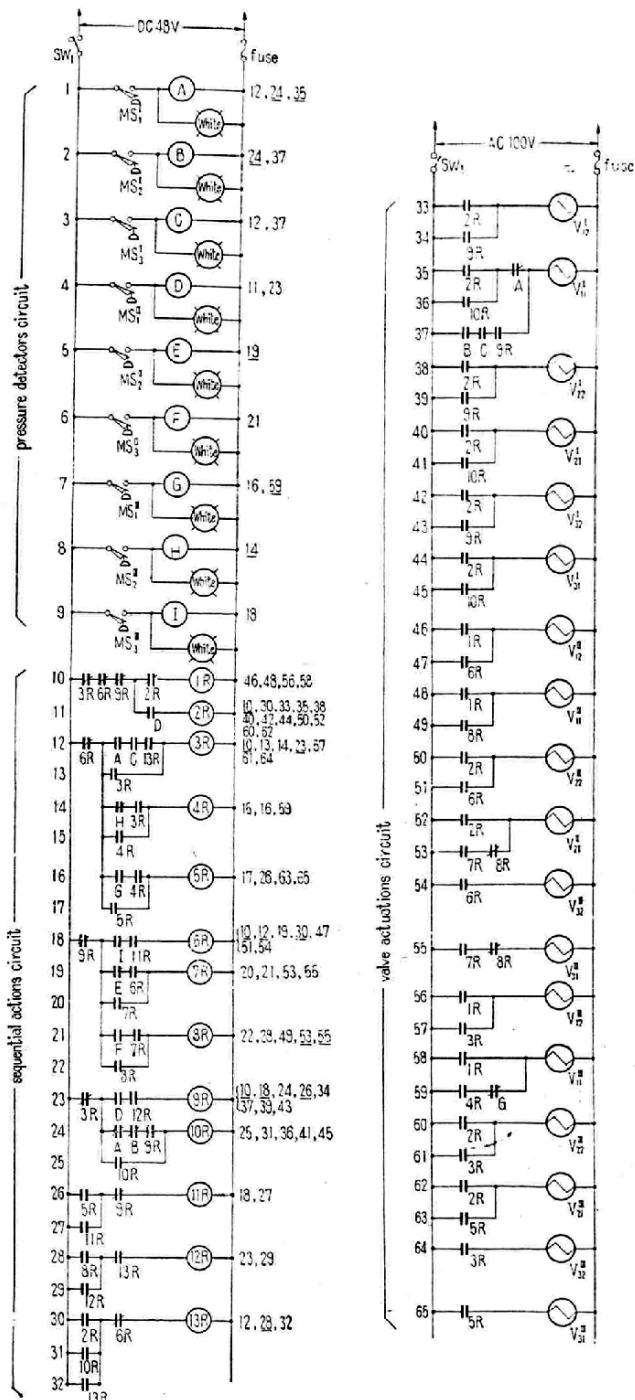


Fig. 6 Sketch showing motion of each finger tip in front view

* Fig. 7 のシーケンス制御回路図の読み方については付録を参照していただきたい。



Subscript

I, II, III : Finger number (see Fig. 6)

1, 2, 3 (Former undersubscript) : Joint number (see Fig. 3)

1, 2 (Latter undersubscript) : Valve order (see Table 2)

Fig. 7 Sequential control circuit of three fingers work

化を表にまとめると Table 3 のようになる。

実際に指が動作しているときのスナップ写真を、Table 3 のシーケンスの進行状態と関連づけて Photo. 3 に示す。品物に塗っている白ペイントに注目すると、持ちかえのたびに少しづつ品物が回転されていることがわかる。

6. む す び

筆者は本論文においてまず人工の手に関する研究の展望を行ない、つぎに、人工の手の工学的応用の分野であるとともに、本研究を行なうにいたった思想的背景の一部であるマテリアルズハンドリングについて自動化的面より考察を加え、最後に筆者の試作した3本指の装置の説明とこれを用いて行なった実験について述べた。

実験で取り上げた3本の指で品物を回転する仕事は、われわれは日ごろ樂々と無意識的にでも行なえるものであるが、これを機械で行なわせるためには、Fig. 7, Table 3 に示したようなかなり複雑な制御プログラムが必要であって、われわれの手の優秀さにはいまさらながら驚嘆させられる。

人工の手の工学的応用としてもっとも興味があり、かつ大きな収穫が期待されるものは、成形固体のハンドリングの自動化であって、これができれば工場内の自動化は飛躍的発展をとげることが予想できるのであるが、パターン認識の問題に関連するだけに実現はむずかしく、当面の応用としては、人間が直接手をふれることのできない品物を取り扱うという特殊な場合に限られることになる。すなわち、必要なパターン認識は操作者である人間が行なう、いわゆる遠隔操作装置として使われることになるが、これらにあっても本論文で述べたような多自由度の指を手先につけることにより、従来のものより機能度の高い人工の手をつくることが可能となる。

本論文で述べた指の能力をさらに高めるためには、品物との接触状況を良好とするために指先の形状、人間の皮膚面に相当する表面部分の柔らかさについての改良と、操作を確実にするために感覚器の能力を高めること、制御プログラムの柔軟性を増すことなどが必要であると筆者は考えている。

Grasping an object

1. Switch SW₃ ON. → Relay 1R (10) ON. → { Valve V₁₂^I 48 ON. ; Valve V₁₁^I 48 ON. } → Air enters into cylinder P₁^I. (Joint J₁^I rotates.)
- { Valve V₁₂^I 60 ON. ; Valve V₁₁^I 60 ON. } → Air enters into cylinder P₁^I. (Joint J₁^I rotates.)
2. When an object is grasped by fingers F^I, F^{II} → Micro switch MS₁^I (4) ON. → Relay D (4) becomes ON. → Relay 2R (11) becomes ON.
- Moving fingers
- Relay 1R (10) OFF. → { Valve V₁₂^I 48 OFF. ; Valve V₁₁^I 48 OFF. } → Air entered into cylinder P₁^I is held. (Joint J₁^I stops.)
- { Valve V₁₂^I 60 OFF. ; Valve V₁₁^I 60 OFF. } → Air entered into cylinder P₁^I is held. (Joint J₁^I stops.) } (Grasping by fingers F^I and F^{II} is completed.)
- Valve V₁₂^I 33 ON. ; Valve V₁₁^I 33 ON. } → Air enters into cylinder P₁^I.
- as long as relay A (1) OFF.
3. By action of relay 2R (11) → { Valve V₂₂^I 38 ON. ; Valve V₂₁^I 40 ON. } → Air enters into cylinder P₂^I. } (Finger F^I approaches to the grasped object, where the rotation of joint J₁^I is controlled by break contact of relay A 38.)
- { Valve V₃₂^I 42 ON. ; Valve V₃₁^I 44 ON. } → Air enters into cylinder P₃^I.
- { Valve V₂₂^I 50 ON. ; Valve V₂₁^I 52 ON. } → Air enters into cylinder P₂^I. } (The object grasped by fingers F^I and F^{II} is moved to finger F^I.)
- { Valve V₂₂^I 60 ON. ; Valve V₂₁^I 62 ON. } → Air enters into cylinder P₂^I.

Changing fingers F^I by F^{II}

4. { When finger F^I contacts with the object grasped by fingers F^I and F^{II}. } → { Micro switch MS₃^I (3) ON. } → Relay C (3) ON. } → Relay 3R (12) becomes ON and self-holds (13). (The object can be grasped by fingers F^I and F^{II}.)
- { When micro switch MS₁^I (1) limiting the rotation of joint J₁^I becomes ON. } → Relay A (1) becomes ON. }
5. (By action of relay 3R (12)) → Relay 2R (11) OFF. → { Valve V₁₂^I 33 OFF. ; Valve V₁₁^I 35 OFF. } → Air entered into cylinder P₁^I is held.
- { Valve V₂₂^I 38 OFF. ; Valve V₂₁^I 40 OFF. } → Air entered into cylinder P₂^I is held. } (The object is held by fingers F^I and F^{II}.)
- { Valve V₃₂^I 42 OFF. ; Valve V₃₁^I 44 OFF. } → Air entered into cylinder P₃^I is held.
- { Valve V₂₂^I 50 OFF. ; Valve V₂₁^I 52 OFF. } → Air entered into cylinder P₂^I is held. }
- Valve V₁₂^I 59 ON. → Air entered into cylinder P₁^I is exhausted.
- Valve V₂₂^I 60 ON. → Air entered into cylinder P₂^I is exhausted. } (Finger F^{II} leaves from the object grasped by fingers F^I and F^{II}.)
- Valve V₃₂^I 64 ON. → Air entered into cylinder P₃^I is exhausted.)
6. { When finger F^{II} has sufficiently left from the object grasped by fingers F^I and F^{II}. } → Micro switch MS₂^I (8) OFF. → Relay H (8) becomes OFF. → { Relay 4R (14) ON and self-holds (15). }
- * Micro switch MS₂^I is adjusted so that this becomes OFF at the lowest pressure in switches MS₁^I, MS₂^I, and MS₃^I. Consequently, MS₁^I and MS₃^I become OFF before MS₂^I becomes OFF.
7. By action of relay 4R (14) → { Valve V₁₁^{II} 58 ON because relay G (7) OFF. } → Air enters into cylinder P₁^{II}. (Joint J₁^{II} rotates and finger F^{II} goes upwards.)
8. When joint J₁^{II} rotates to the limit. → Micro switch MS₁^{II} (7) ON. → Relay G (7) ON. → { Relay 5R (16) becomes ON and self-holds (17). }
- { Valve V₁₁^{II} 58 becomes OFF. (Rotation of joint J₁^{II} is stopped.) }
9. (By action of relay 5R (16)) → { Valve V₂₁^{II} 62 ON. → Air enters into cylinder P₂^{II} because valve V₂₂^{II} 60 ON. ; Valve V₃₁^{II} 65 ON. → Air enters into cylinder P₂^{II} because valve V₃₂^{II} 64 ON. } (Finger F^{II} approaches to the object grasped by fingers F^I and F^{II}.)

Table 3 Table of sequential actions of Explanations on control circuit of Fig. 7.

Changing fingers F^I by F^{II}

10. (When finger F^{II} contacts with the object) → Micro switch MS₁^I (9) ON. → (Relay 6R (16) ON. because 11R (20) ON.) (The object can be grasped by fingers F^{II} and F^I.)
 (grasped by fingers F^I and F^{II})
11. (By action of relay 6R (16)) → { Relay 3R (13) OFF. → Valve V₁₂^I (46) OFF. → Air entered into cylinder P₁^I is held.
 Relay 4R (14) OFF. → Valve V₂₂^I (50) OFF. → Air entered into cylinder P₂^I is held.
 Relay 5R (15) OFF. → Valve V₃₂^I (54) OFF. → Air entered into cylinder P₃^I is held. } (The object is held by fingers F^{II} and F^I because finger F^I is kept rest.)
 Valve V₁₂^I (46) ON. → Air entered into cylinder P₁^I is exhausted.
 Valve V₂₂^I (50) ON. → Air entered into cylinder P₂^I is exhausted. } (Finger F^{II} leaves from the object grasped by fingers F^{II} and F^I).
 Valve V₃₂^I (54) ON. → Air entered into cylinder P₃^I is exhausted.
12. (When finger F^{II} has sufficiently left from the object grasped by fingers F^{II} and F^I) → Micro switch MS₂^I (5) OFF. → Relay E (5) OFF. → Relay 7R (19) ON and self-holds. (20).
 ** (Micros switch MS₂^I is adjusted in order to become OFF at the lowest pressure among the switches MS₁^I, MS₂^I, and MS₃^I (see the notes)).
13. (By action of relay 7R (19)) → { Valve V₁₁^I (53) ON. → Air enters into cylinder P₁^I because Valve V₁₂^I (46) ON. } (Finger F^{II} goes to the object)
 { Valve V₂₁^I (53) ON. → Air enters into cylinder P₂^I because Valve V₂₂^I (50) ON. } (grasped by fingers F^{II} and F^I.)
14. When Joint J₃^I rotates to the limit. → Micro switch MS₃^I (6) ON. → Relay F (6) ON. → Relay 8R (21) ON and self-holds (22).
15. (By action of relay 8R (21)) → { Valve V₁₁^I (48) ON. → Air enters into cylinder P₁^I because valve V₁₂^I (46) ON. (Joint J₃^I rotates and finger F^{II} approaches to the object grasped by fingers F^{II} and F^I). } (Finger F^{II} approaches to the object grasped by fingers F^{II} and F^I).
 { Valve V₂₁^I (52) OFF. → Air entered into cylinder P₂^I is exhausted. } (Finger F^{II} goes downwards).
 { Valve V₃₁^I (55) OFF. → Air entered into cylinder P₃^I is exhausted. }

Changing fingers F^I by F^{II}

16. (When finger F^I contacts with the object) → Micro switch MS₁^I (1) ON. → Relay D (1) ON. → Relay 9R (23) ON. (The object can be grasped by fingers F^{II} and F^I.)
 (grasped by fingers F^I and F^{II})
17. (By action of relay 9R (23)) → { Relay 6R (16) OFF. → Valve V₁₂^I (46) OFF. → Air entered into cylinder P₁^I is held.
 Relay 7R (19) OFF. → Valve V₂₂^I (50) OFF. → Unexhausted air of cylinder P₂^I is held. } (The object is held by fingers F^{II} and F^I because finger F^I is kept rest.)
 { Relay 8R (21) OFF. → Valve V₃₁^I (55) OFF. → Unexhausted air of cylinder P₃^I is held. }
18. (When finger F^I has sufficiently left from the object grasped by fingers F^{II} and F^I) → { Both micro switches MS₁^I (1) and MS₂^I (2) OFF. } → { Both relays A (1) and B (2) OFF. } → { Relay 10R (24) ON and self-holds (25). } (Finger F^I leaves from the object grasped by fingers F^{II} and F^I).
19. (By action of relay 10R (24)) → { Valve V₁₁^I (43) ON. → Air enters into cylinder P₁^I because valve V₁₂^I (43) ON. } (Finger F^I approaches to the object grasped by fingers F^{II} and F^I, where the rotation of joint J₃^I is controlled by break contact of relay A (25).
 { Valve V₂₁^I (49) ON. → Air enters into cylinder P₂^I because valve V₂₂^I (49) ON. }
 { Valve V₃₁^I (44) ON. → Air enters into cylinder P₃^I because valve V₃₂^I (43) ON. }
20. The next action returns to sequence 4, and these sequential actions are repeated as long as switch SW₃ is ON.

three fingers

Figure in () shows an address in Fig. 7.

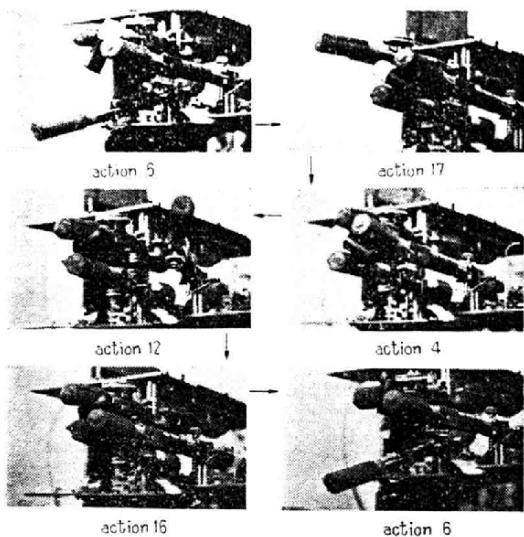


Photo. 3 Snapshots of three fingers work. Figures correspond to sequential steps of Table 3

本研究を行なうにあたり終始ご激励とご指導をいただいた東京大学生産技術研究所 森政弘助教授、および装置の製作、実験にご協力いただいた長谷川一、吉田蒼生両氏に感謝する。また、本学会自動制御部会の集会(1963年11月)での本研究の発表に際し、有益なご討論をいただいた会員諸氏に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) Handling Radioactive Materials, Nuclear Engineering, 7, 37, 224/238, (1962-June)
- (2) J. W. Clark : Applying Remote-Handling Techniques for Marine Science, ISA Journal, 8, 9, 58/63 (1961-Sept.)
- (3) J. W. Clark : Telechirics-for Operations in Hostile Environments, Battelle Technical Review, 12, 10, 3/8, (1963-Oct.)
- (4) C. K. Battye, A. Nicthingale & J. Whills : The Use of Myo-Electric Currents in the Operation of Prostheses, Journal of Bone and Joint Surgery, 37B, 3, 506/510 (1955-Aug.)
- (5) А. Е. Кобринский, М. Г. Брейдо, В. С. Гурфинкель, А. Я. Сысин, М. Л. Цейтлин и Я. С. Якобсон : Биоэлектрическая Система Управления, Доклады Академии Наук СССР, 117, 1, 78/80 (1957)
- (6) A. E. Kobrinskiy, S. V. Bolkhovitin, L. M. Voskoboinikova, D. M. Ioffe, E. P. Polyan, B. P. Popov, Ya. L. Slavutski, A. Ya. Sysin & Ya. S. Yakobson : Problems of Bioelectric Control, Automatic and Remote Control (Proc. 1st IFAC Congress), Butterworths, 2, 619/623, (1961)
- (7) 鈴木良次, 南定雄 : 生体電流による機械系の制御, 第6回自動制御連合講演会前刷, 249/250, (1963)
- (8) R. Tomovic' : Human Hand as a Feedback System, Automatic and Remote Control (Proc. 1st IFAC Congress), Butterworths, 2, 624/628, (1961)
- (9) R. Tomovic' & G. Boni : An Adaptive Artificial

- Hand, IRE, Trans., AC-7, 3, 3/10, (1962-Apr.)
- (10) H. A. Ernst : MH-1, A Computer-Operated Mechanical Hand, Proc. 1962 Spring Joint Computer Conference, National Press, 39/51, (1963)
- (11) Unimation, Mechanical Engineering, 83, 4, 72/73, (1961-Apr.)
- (12) 山下忠 : 指の機能の自由度にもとづく解析、計測と制御, 2, 4, 15/23, (1963-4)
- (13) 山下忠, 森政弘 : 指の機能の工学的研究(英文), 東京大学生産技術研究所報告, 13, 3, (1963)
- (14) J. M. Apple : Plant Layout and Materials Handling, Ronald Press, 204, (1963)
- (15) この問題についてつぎのような書物がある。
上瀧具眞, 西岡富士夫 : 粉粒体の空気輸送, 日刊工業新聞社(1961). 寺田進 : ハイドロリックコンベヤ, 日刊工業新聞社(1963). スモルゼイレフ(外尾善次郎, 永井正夫訳) : パイプ輸送, 技術書院(1963)

付録：シーケンス制御回路 Fig. 7 の読み方

シーケンス制御回路になじまれていない読者も多いかと思われる所以、Fig. 7 の回路図の読み方を簡単に説明しておこう。

シーケンス制御装置がどのような制御信号を出してシーケンスを進展させていくかを調べるために、各継電器の接点の動作を調べなくてはならない。このためには各継電器の接点の存在場所を明示しておくと便利であり、この目的に合致するものが JIC (Joint Industry Conference) の電気回路図である*。この表示方法の要点を Fig. 7 を参照しつつ述べると以下のようになる。

- (1) 継電器のコイルと接点とは、実際には一体となっているわけだが、別々に切り離して書く。
- (2) 継電器のコイルは円で表わし、その中に継電

symbol	component
,	relay
○	coil
	make contact
	break contact
○○	pressure detector
○ white	pilot lamp (white color)
○○	solenoid valve

Table 4 Symbols for components used in Fig. 7

* JIC の標準表示法については、その原本が日本規格協会、溶接学会に備えてある。

器の記号または番号を記入する。(例 ④, ⑩)

(3) 接点は、マーク接点を \parallel , ブレーク接点を $\#$ で表わし、そのわきに継電器の記号または番号を記入する。(例: \parallel_A は継電器 A のマーク接点, $\#_A$ は継電器のブレーク接点を表わす).

(4) 他の回路部品もそれぞれの記号で表わし、番号を付記する. Fig. 7 ではペローズとマイクロスイッチを組み合わせて作った圧力検出器, バイロットランプ, 電磁弁が使われている. Fig. 7 に使われている部品に対する記号を表になると Table 4 となる.

(5) 回路は、2本の縦の電源基線を書き、この間

に各部品を横に並べて記入する.

(6) 左側の電源基線に沿って、横線の番地を表示する.

(7) 右側の電源基線に沿って、継電器コイルのある横線の位置に、その継電器の接点の所在する番地を記入し接点分布を示す. この際、ブレーク接点の所在番地を示す数字の下にアンダーラインを引く.

以上の要点を心得ていただければ、Table 3 のシーケンス動作表を参照しつつ Fig. 7 のシーケンス制御回路を上から下へ番地を追って追読できるはずである.