

AUG. 1979

RIIS-RR-27-4

UDC 611.97 : 62-233/50/52

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-27-4

人工指の試作研究(第3報)

杉	本	旭
近	藤 太	二
深	谷	潔

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

人工指の試作研究(第3報)

—多関節人工指の角度及びにぎり圧の制御について—

機械研究部 杉 本 旭
近 藤 太 二
深 谷 潔

Test-Manufacture of Artificial Fingers (3rd Report)

—angle and grasping force control in the Artificial Fingers—

Noboru SUGIMOTO*
Taiji KONDO*
Kiyoshi FUKAYA*

As an effective safe measure of any dangerous or detrimental works, remote controlled manipulators should be expected to be introduced in place of men. But any manipulators could not be said to have met our expectation. We can point out that any manipulators, which have been developed and are now used at any spot, have so small degrees of freedom that they cannot be used in effectiveness.

In our study, an artificial multi-finger system, which might be said unique, were developed as an extremity of manipulators. The system has three fingers which correspond to the thumb, the forefinger and the middle finger, so that the system has nine degrees of freedom.

In order to control functionally so many degree of freedom, Electro-Viscous-Fluids Clutches are developed and used in our study which are different from any existing control methods.

The control of angle and grasping of the fingers can be accomplished by regulating the electric voltage applied to the clutch. In the control system, further, to improve response and stability, feedback compensation (angle and force pickups), differential compensation and integration compensation are systematized into the closed system. In the result, it was confirmed that angle was controlable within 1% error and as for grasping force within 4% error.

* Mechanical Engineering Research Division

1. 緒言

生産ラインにできるだけ汎用性を与える自動化の方式を Flexible Automation と呼ぶが、多品種少量生産指向の強いわが国では、すでに生産技術の中で定着した感がある。この手段として、NC 機械や産業用ロボット、電子計算機などプログラマブルなど方法がとられる場合が多い。

最も汎用性の高い機械が人間であるとすれば、このような機械は、何らかの形で人間の機能を代行する機械と見なしうる。産業用ロボットは人間のもつすぐれた動作の汎用性を模倣したものであるし、電子計算機は人間の思考能力を代行しようとする機械と言ってよい。さらに NC 機械は、人間のもつ作業の汎用性を機械自体に組み込んだものと言ってよい。

こういった Flexible Automation の技術は、危険・有害作業を安全省力化する大きな手段でもある。現に産業用ロボットなどは多くの危険・有害作業に導入されている。しかし、こういった汎用的機械も人間のもつ汎用性に較べれば原始的なものであり、特に、人間の手指のもつ複雑でかつ有機的な動作能力を代行する機械はまだ開発されていないし、人間のもつむしろ神秘的とも言えるパターン認識力や判断力など知的能力を機械の中に再現することはまだいふ先のようなのである。そのため産業界では、機械に代替えされた単純な作業から、複雑かつ危険な作業へと人間が移行してゆくといった矛盾をよく見掛けることになる。

自動化・機械化の嵐の吹きすさぶこの時代に、今もなお多くの危険・有害作業が残っており、そしてこれらの作業の多くは人間のもつ高度な汎用性に期待せざるを得ないものとしてやむを得ず行なっている作業も多い。さらに、産業活動が工場内だけでなく、地下、山地、さらに海中や宇宙へと広がったことによる新たな危険性の発生も懸念される。

これらの問題解決には最終的には高度な知能ロボットの出現に期待するところであるが、筆者らは、その primitive な段階として多自由度人工指を持つパイラテラル制御型マニピュレータの開発をめざし、人間のもつ知的能力を借りて、知能ロボットの代行をさせるべく研究に入った。

本研究で開発した多自由度人工指は、できるだけ人間の手指に近い形状にし多自由度化した。そのため、

従来の制御方式ではなく、より小型で、かつ力の制御も容易に行ないうる電気粘性流体駆動方式を採用している点が特徴となっている。ここで報告するのはこの電気粘性流体駆動方式による多関節人工指の角度およびにぎり力の制御に関するものである。

2. 多関節人工指をもつマニピュレータの構成

2.1 マニピュレータ本体の構成と機能

本研究で構成したマニピュレータ本体は、目下研究対象となっている多関節人工指の制御性能をチェックするためのものであり、本研究の最終目標であるパイラテラル制御型のマニピュレータではより人間に近い上腕および前腕を構成することになるものと予想される。

マニピュレータの外観を Photo 1 に示す。その構成は胴部、腕部と指部から成っている。指部は別項にて説明するとし、本節では胴部ならびに腕部について述べる。

腕部には3パッケージの電気粘性流体クラッチおよび指を伸展するための3台のヒステリシスクラッチと、これらクラッチの一次側の動力源であるモータと、手首回転用、示指内外転用、母指対立運動用および腕の前進後退用の合計4台のステッピングモータが配置されている。さらに胴部には腕の旋回用誘導モータ・クラッチブレーキシステムおよび腕上下運動用ボ

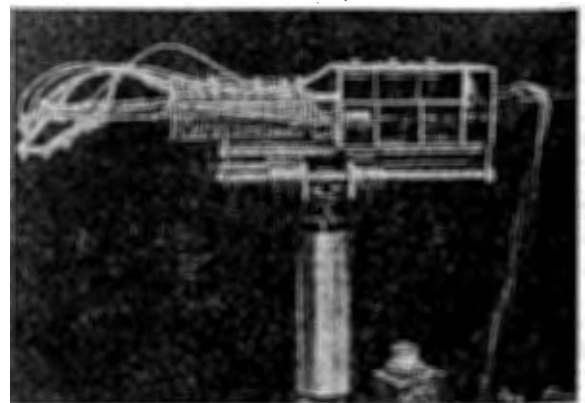


Photo 1 Manipulator System with multi-fingers
多関節人工指をもつマニピュレータ

Table 1 The specification of proper body of the manipulator system
マニピュレータ本体の仕様

movable area of the arm	up and down	300 mm
	extention swing	250 mm 120 degree
moving velocity	up and down	150mm/s(max.)
	extention suing	250mm/s(max.) 60degree/s(max.)
sensor		Potentiometer

ールネジ・直流モータ・クラッチブレーキシステムが組み込まれている。胴体機能としては腕の左右(旋回)前進・後退, 上昇・下降の3自由度からなり, その仕様を Table 1 に示す。

2.2 多関節人工指の構成

人間の指の運動機能としては, 関節を内側に曲げる屈曲運動, 外側に伸ばす伸展運動, 指の間で物体を挟むときにみられる, 物体を挟む方向に動く場合の内転運動, 物体を離す方向に動く場合の外転運動, また, 母指については旋回するような運動の対立運動が加わる。

本多関節人工指では人間の母指, 示指, 中指に類似した骨格と関節を持つ3本指の構成となっている。この3指があれば日常生活のほとんどの動作は可能であるとされている。したがって, 本人工指は手首を加えて全部で12自由度を持っている。また各指の長さは人間の約1.4倍としている。

指の運動機能として, 母指には屈曲, 伸展, 内転, 外転および対立運動を持たせ, 他の2指には屈曲, 伸

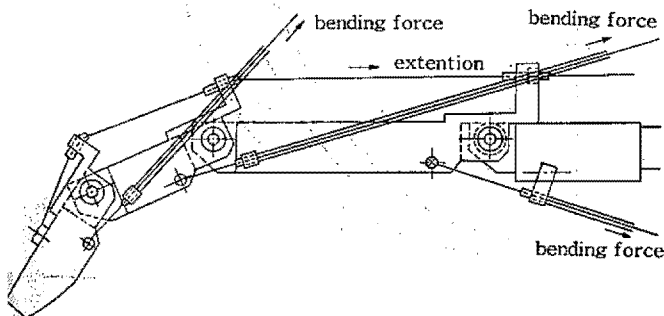


Fig. 1 movement of bending and extention
屈曲・伸展運動の方法

展, 内転, 外転運動を持たせている。

指の屈曲運動は後述する電気粘性流体クラッチで, 伸展運動はヒステリシスクラッチで駆動させる。屈曲運動, 伸展運動の方式を Fig. 1 に示す。また, 母指の対立運動および手首の回転はステッピングモータを用いて駆動する構造としている。

3. 多関節人工指の制御システム

本研究の最終目標であるパイラテラル制御型多関節マニピュレータに指向する第1段階として, マイクロコンピュータによる目標値設定に対し, 人工指の関節角および圧力を制御することを今回の研究課題としている。

制御システムの基本構成を Fig. 2 に示す。本図は単一関節についてであるが, 各指の関節ができるだけ相互に独立して制御可能となるようにしているため, 他の関節についても基本的には同じである。ここでマイクロコンピュータはデジタル信号によって, 屈曲動作回路, 伸展動作回路, にぎり圧制御用回路, 角度制御用回路を切り換える機能およびそれぞれの選択下で角度, にぎり圧の目標値を設定する機能を有する。

一般に制御系を設計するためには, 制御対象である関節に操作量(本研究では引張力)を与える制御要素の設計製作が優先され, 次に, 制御量(本研究では角度とにぎり力)を適確に制御するための補償要素を考慮してゆくといった順序を踏む。そこで, まず制御システムの制御要素である電気粘性流体クラッチおよび高電圧制御装置の制御特性について述べる。

3.1 電気粘性流体クラッチ

電気粘性流体¹⁾²⁾³⁾の特性を利用して出力トルクを外部電界によって制御できる電気粘性流体クラッチが Photo 2 の腕部にセットされている。このクラッチはシャフトともに回転する入力側の円板と, 1mm の間隙を介した出力側の円板とからなっており, それらの円板が交互に配置された多重円板形で, 側面にワイヤを巻き取るためのリールを設けている。これらの円板は電極を兼ねており, このクラッチ内に電気粘性流体を満たし, 電界を加えることによりトルクを得ることができる。

本人工指制御では, 指の第1, 第2, 第3関節を動作させるため, それぞれ小, 中, 大の3種のクラッチ

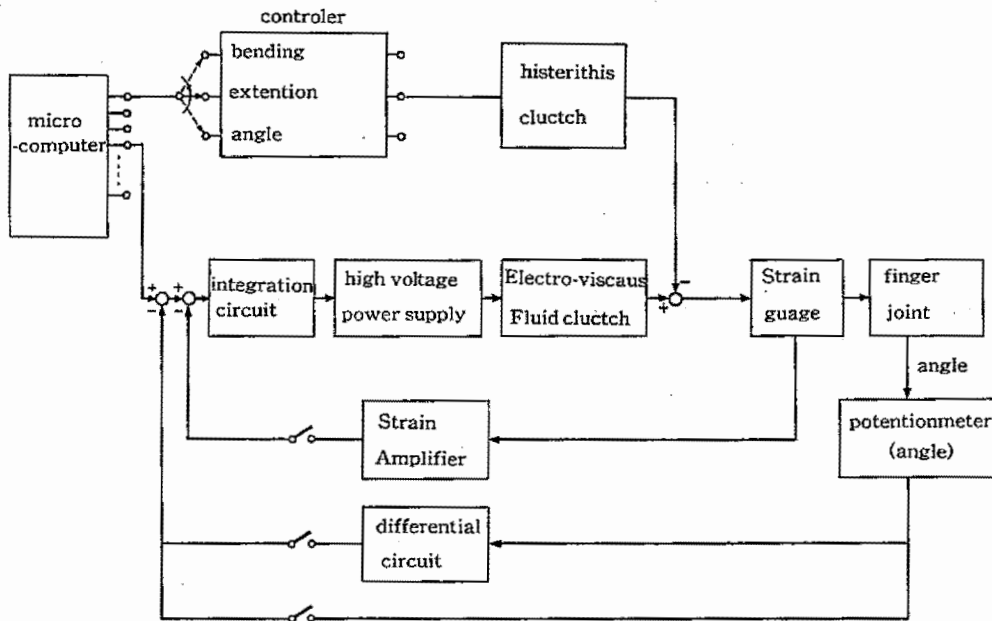


Fig. 2 Block diagram of the control System
コントロールシステムのブロック線図

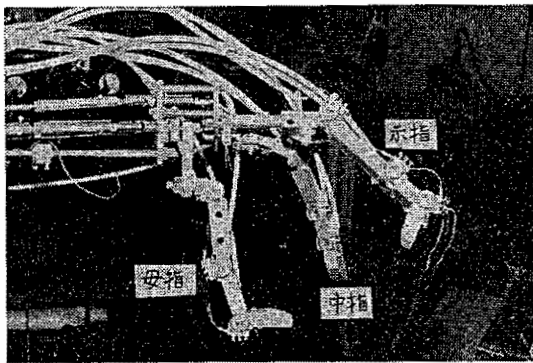


Photo 2 The Artificial Finger System
多関節人工指

を製作した。これらは、出力側円板がそれぞれ 4, 6, 8枚となっている。Fig. 3 にそれぞれのクラッチの電圧—トルク特性の試験結果を示す。

電気粘性流体クラッチの動特性については、1次側を一定回転させておき、ステップ状電圧を加えて発生するトルクの変化をシンクロスコープで観測することによって、いわゆるインデシャル応答をとった。その結果、例えばクラッチ大において入力電圧に対するトルクの伝達関数は

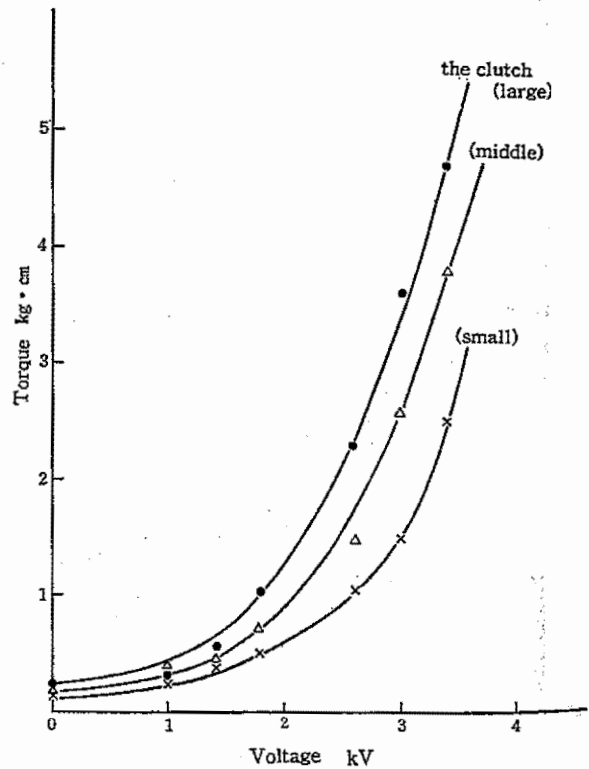


Fig. 3 Relationship between voltage and torque
電圧—トルク特性

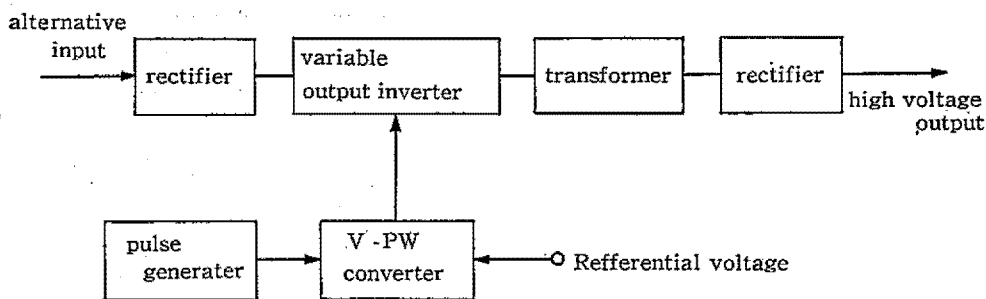


Fig. 4 diagram of switching regulator with inverter
インバータ制御方式によるスイッチングレギュレータの構成

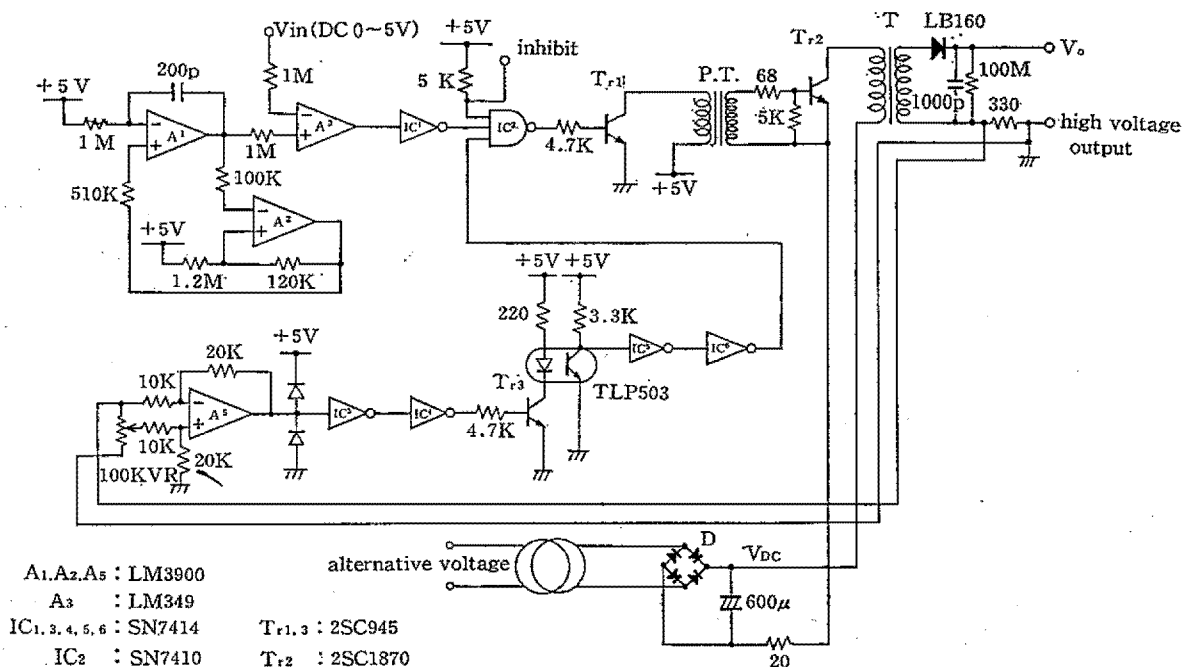


Fig. 5 the circuit of high voltage power supply
高電圧電源回路図

$$T(S) = \frac{1.25 \times 10^{-3}}{1 + 0.006 S} \text{ (kg} \cdot \text{cm/V)}$$

となる。これは、時定数が 6 ms の一次遅れ系であることを意味している。

3.2 高電圧制御装置

電気粘性流体クラッチに印加する電圧(最大 5 kV, 5 mA)をマイクロコンピュータ出力レベル 0~5 V の範囲で制御する高電圧制御装置が必要となる。同装置

は人工指の関節と同数だけ必要となるため、小型である必要がある。しかし市販されている電源はかなり大型であるため、本研究では Fig. 4 に示すスイッチングレギュレータシステム電源回路を開発して利用した。

原理は、交流を整流平滑して直流電圧を得、これを基準電圧によって幅制御されたパルスにより、トランジスタをスイッチングして方形波を得る。この方形波を高電圧トランスに通して昇圧後、整流平滑すること

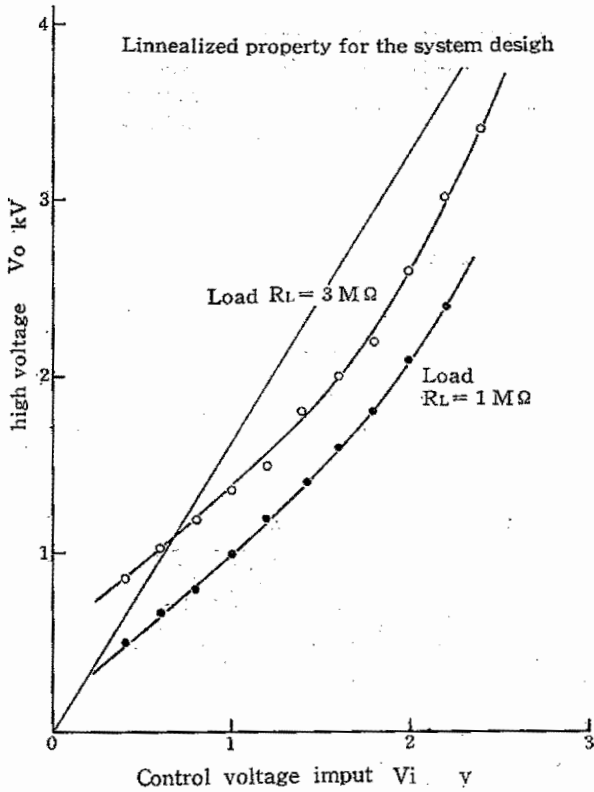


Fig. 6 Relationship between control voltage input and high voltage output
制御入力電圧—高電圧特性

によって直流高電圧が得られる。高電圧制御装置の回路を Fig. 5 に示す。

本高電圧制御回路の負荷特性を Fig. 6 に示す。これによると、同じ制御電圧でも、負荷の大きさによって出力電圧が異なることおよび直線性がやや劣ること

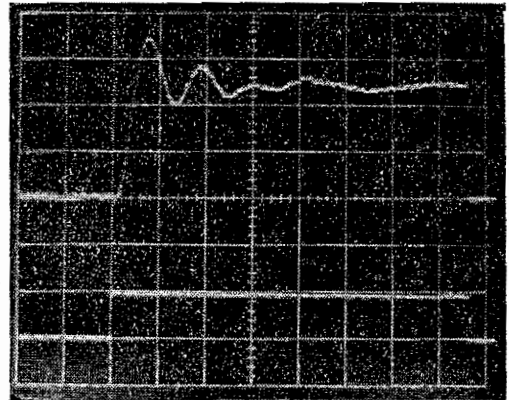


Photo 3 Transient response (horizontal : 50 ms/div.)
過渡応答 (水平 : 50 ms/div.)

などが言えるが、制御特性として線形近似は十分可能である。

動特性については、制御入力電圧 2.4 V のステップ状入力の場合の出力電圧の過渡応答を調べた。その結果この系が一次遅れ系であることが解り、その時定数は 1.6 ms であった。また、Fig. 6 の曲線を、 $V_o = 1.667 V_i$ の直線で代表近似すると、本高電圧制御装置の伝達関数は、

$$G_p(S) = \frac{1667}{1 + 0.0016 S} \text{ (v/v)}$$

となる。

3.3 制御要素のオーバオール伝達関数

ここで制御要素とは高電圧制御装置—電気粘性流体クラッチ—ワイヤといった、入力信号から出力信号に

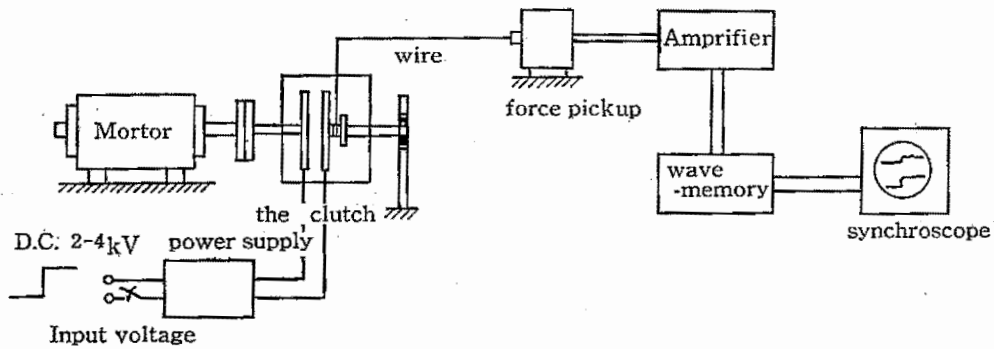


Fig. 7 the measurement system for transient response
過渡応答実験装置

至るまでの要素を意味している。このまるめの伝達関数はある程度計算上推測可能であるが、摩擦抵抗やワイヤのパネ定数など、個々の詳細な定量評価が必要となる。そこで、クラッチ小、中、大のそれぞれについて制御要素を構成し、インデシャル応答を測定して、伝達関数を評価した。

実験方法はクラッチの1次側を一定回転させておき、高電圧制御装置にステップ電圧を加える。その時に発生した力を荷重計で検出し、それを増幅してウェーブメモリに記憶させ、その波形をシンクロスコープで観測し、解析した。その実験装置を Fig. 7 に示し、過渡応答波形の一例を Photo 3 に示す。

測定の結果、制御要素の伝達関数は2次遅れ系として十分近似できる。したがって、この系は、固有振動数 ω_n とダンピング係数 ζ を用いて一般に次式で示される。

$$W(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2}$$

ここで、 ζ と ω_n を写真の行き過ぎ時間と最大行き過ぎ量から求めると Table 2 のような結果が得られた。これによるとクラッチの大きさによって伝達関数は多少変わってくるが、後述する制御システムの制御補償を考える際に複雑なとるので、平均的な代表伝達関数として伝達関数を考える必要がある。ここでは思い切って $\zeta=0.3$ $\omega_n=100$ と設定して、ゲインはクラッチ大で得られたものを採用して次式にまとめあげ、制御補償は次に示す伝達関数によって検討をすすめることにした。

$$W(S) = \frac{8330}{S^2 + 60S + 10000} \text{ (kg/v)}$$

4. 人工指の制御系の構成

4.1 人工指の力の制御系

人工指の安定な力の制御を行なうために系のブロック線図を構成し、それに含まれる各要素の定数を決定するのに、計算機によるシミュレーションを行なった。

力の制御を行なうためのブロック線図を Fig. 8 に示す。系は制御要素の伝達関数が近似であることとゲインが小さいことを考慮し、直列に積分補償要素を加え、力を検出してフィードバックするクローズドシステムを採用した。えこで外乱となっている $V(S)$ は

Table 2 results of the measurements
観測結果

clutch	time consec	station- ary torque kgcm	maxi- mum over- shoot	re- spouse time msec	ζ	ω_n
(large)	20.1	2.80	0.370	36.2	0.302	91.0
(middle)	19.8	2.50	0.442	34.5	0.252	94.1
(small)	12.5	1.56	0.649	30.4	0.136	104.3

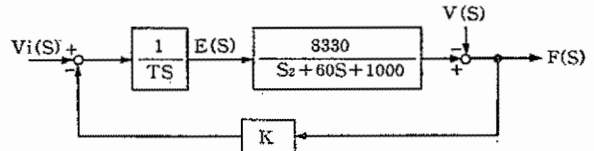


Fig. 8 Blockdiagram of control of grasping force
力の制御のためのブロック線図

伸展力のことであり、積分補償要素は $V(S)$ の存在如何にかかわらず安定した制御を行なう意味も持っている。

Fig. 8 のブロック線図から、伸展力を零とした場合の伝達関数 $G_1(S)$ は次式にまとめることができる。

$$G_1(S) = \frac{F(S)}{V_i(S)} = \frac{8330}{TS^3 + 60TS^2 + 10000TS + 8330K}$$

系の安定判別にラウスの方法を採用すると、結局、 $T > 0.01388K$ の条件を満足するよう T および K を定めればこの系は安定であることが判る。もう一つの条件として、高電圧電源の入力電圧が常に 5V 以下となる点を考慮して両変数を定めることとなる。具体的には、電算機シミュレーションによって $T=0.1(s)$, $K=1(V/kg)$ とした。この値は、後述する角度制御における制御回路となるべく共通させたいこともあり、角度制御の安定性も考慮して定めたものである。

外乱の存在する場合も同様にシミュレーションを行なったが上記の定数によって有効に制御可能であることがわかった。

4.2 人工指の角度制御系

Fig. 9 は角度制御のブロック線図を示している。角度制御については他のシステムもあるが、なるべく力の制御と回路を共通にしたいため本図のようなブロック線図となった。したがって変数 T は $0.1(s)$ としている。本ブロック線図で、 B は関節における粘性抵

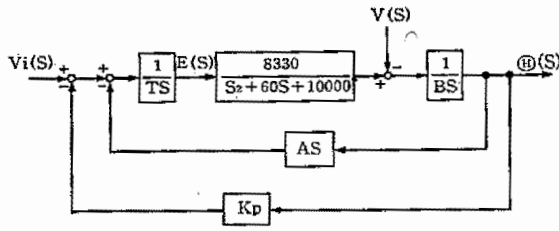


Fig. 9 Blockdiagram of control of angle
角度制御のブロック線図

抗に対応するもので別途行なった測定によって平均値 0.0654 [kg·s/vad] を採用した。また、 K_p は関節角をポテンショメータで検出するため変換係数で 3.18 [V/vad] の値とした。

系に含まれる微分補償要素 AS は角度制御に速応性を与えるために挿入した補償要素である。

結局、系の全体の伝達関数は次のようになる。

$$\frac{\theta(S)}{V_i(S)} = \frac{8330}{0.00654 S^4 + 0.3924 S^3 + 65.4 S^2 + 8330 AS + 26489}$$

系の安定判別を行なうと $0.0199 < A < 0.4512$ の範囲の A を選択すればこの系は安定であることがわかる。次に A の値を具体的に決定するために、上式の伝達関数のインデシャル応答をシミュレートしてみると Fig.10 のようになる。また入力電圧 $V_i(S)$ に対する $E(S)$ のインデシャル応答を次式に従ってシミュレートしてみると Fig.11 のようになる。これら両図より $A=0.2\sim0.3$ がよいように思えるが、0.2 では

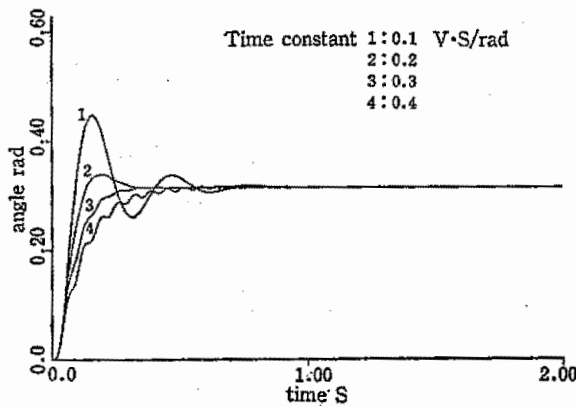


Fig. 10 Indicial response of angle control (in case of no extention applied)
角度のインデシャル応答(伸展力がない場合)

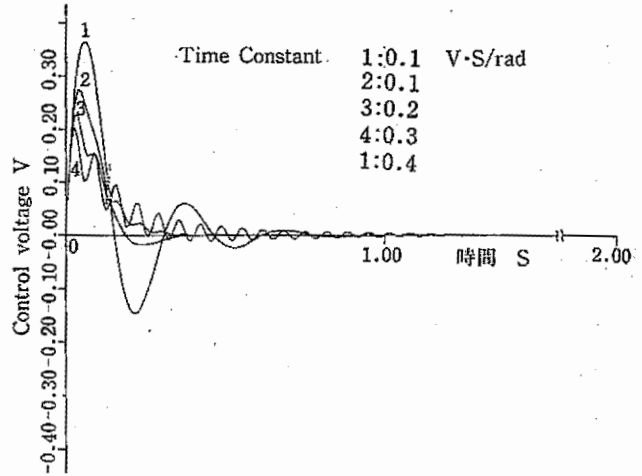


Fig. 11 Indicial Response of control voltage (in case of no extention applied)
角度の制御における制御電圧のインデシャル応答(伸展力がない場合)

0.13秒あたりから制御電圧が負の電圧の域になるのに対して、0.3 では定常に達するまで制御電圧がほとんど正の領域にあると言ってよい。したがって A の値は 0.3 [V·S/vad] に決定する。

同様に伸展力の存在する場合も $U=2, 3, 4$ kg に対するシミュレーションを行なったが、その影響はほとんどみられない。したがって、角度の制御は、人工指にかかる外力に無関係に十分制御可能と言える。

5. システム制御と考察

今回の実験では、各指の関節ができるだけ相互に独立して制御が可能ないように構成しているため、いくつかの関節を選び、次の実験を行なった。

- (1) 屈曲・伸展動作実験
- (2) にぎり圧制御実験
- (3) 角度制御実験

5.1 屈曲・伸展動作実験

Fig.2 において、マイクロコンピュータによって、ヒステリシスクラッチコントローラに屈曲信号を出力すると、コントローラはヒステリシスクラッチに 1.2 V を出力する。これによってヒステリシスクラッチは約 300g を発生し、伸展用ワイヤのたるみをなくす。次に屈伸動作回路に 2V を出力して、屈伸動作を行なわせ、次にデジタル信号によって伸展信号を出力すると、コントローラはヒステリシスクラッチに 10

V を出力し、同時に屈伸動作回路の出力電圧を零にする。この動作を繰り返して実験を行なった。実験の結果、1.5 秒のサイクルに十分に応答することを確認した。

5.2 にぎり圧制御実験

Fig.2 において、マイクロコンピュータのデジタル信号によって屈曲信号を出力すると、コントローラはヒステリシスクラッチに 1.2 V を出力して、ワイヤに若干の張力 (300 g) を与える。これは、伸展動作を行なわせるためのワイヤかプリー溝からはずれることを防ぐためである。次にマイクロコンピュータによるデジタル信号によって角度制御回路のポテンショメータ、微分補償回路が切り離されて、圧力制御用回路、つまりストレンゲージ・ひずみ増幅器系が選定されてクローズドシステムに切り替えられる。次にマイクロコンピュータより目標値が出力され、にぎり力が制御される。

Photo 4 は目標値を 2kg とした場合のワイヤに係る力を示している。この実験結果とシミュレート結果と比較すると、実験結果の方がやや立ち上がりがゆるいこと、定常値に近づくにつれ力の上昇度がにぶること、および速応性の点でやや劣ることなどがあげられるが、ほぼ当初の予想したシミュレーション結果に近い特性を示した。

しかし、ワイヤにかかる引張力をもって指のにぎり

力としたところは若干の問題を残している。というのはワイヤとコンジット間の摩擦係数を下げるため数種類のコンジット材質について検討した結果、テフロン製のコンジットを用いているが、まだ摩擦抵抗が大きくなり、ワイヤ引張力によって指先にかかる力を正確に推定しえないからである。この誤差について具体的な評価はしていないが、力のセンサをもっと関節に近い所に取り付ける構造を考えて改良すべきであると思われる。

圧力の制御は、各関節が独立して行なえるため、今回の実験結果より、指全体の圧力制御がハードウェア的には可能となったと解しうる。しかしそれを有機的に結合して、力の制御からにぎりの制御へ移行する場合は、むしろ人間の手の特性を研究して、協調制御を行なわせるための、ソフトウェア研究が必要となるであろう。

5.3 角度制御実験

マイクロコンピュータのデジタル信号によって角度制御信号を出力すると、コントローラはヒステリシスクラッチに 3 V (約 1kg) の電圧を出力して伸展力を与える。それと同時に角度制御用回路のポテンショメータ・微分補償回路系が選択されてクローズドシステムが構成される。次に目標値がマイクロコンピュータからアナログ出力されて角度制御が開始される。

Photo.5 は目標値を 60 度とした場合の角度の変化

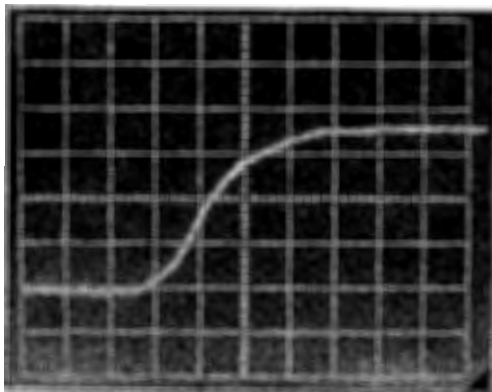


Photo. 4 Time response of grasping force (horizontal 0.2 s/div., desired value 2 kg, error 4%)
にぎり力の制御特性
(水平 0.2 s/div. 目標値 2 kg, 誤差 4%)

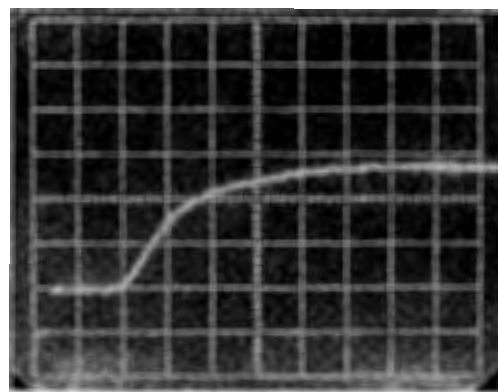


Photo. 5 Time response of angle (horizontal 0.2 s/div., desired value 2 kg, error 4%)
角度の制御特性(水平 0.2 s/div., 目標値 60°, 誤差 1%)

をウェーブメモリに記憶されたものである。これを Fig. 10 のシミュレーション結果と比較すると、やや立ち上がりがなまっていること、速応性がやや低いことなど若干の相違はあるが、比較的良好的なパターンで制御されていると評価できると思われる。

また、角度の制御の目的は、人間の指の状態をそのままの形で人工指に再現することであるので、人間の関節角を検出するセンサの開発が、本人工指を有効に作動させるきめてとなる。本研究で採用した角度制御は各関節がほぼ独立に制御しうるので、多関節を並行に動作させることは問題はない。したがって今後の課題は、小形で易容に人間の手指に装置しうる角度センサの開発ということになろう。

6. 結 言

筆者らは電気粘性流体の開発研究を行ってきたがこれは、人工指のように多自由度をコンパクトに納め

た機構を制御するには従来の方式では大型になってしまいうため実用にならないと解したためである。この点に関しては、電気粘性流体駆動方式は最適であることが再認識された感がある。しかし、考察の項ですでに述べたように、いくつかの問題点が明確にされた。今後は、それらの点を改良しつつ、バイラテラル制御型の多関節マニピュレータ研究の核心へ移行させてゆくつもりである。

(昭54.3.28受理)

参 考 文 献

- 1) 近藤・杉本, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-22-3, (1973), 4
- 2) 近藤・杉本, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-24-8, (1976), 6
- 3) 杉本, 日本機械学会論文集, 43-367 (昭 52-2) 1075

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-27-4

昭和 54 年 8 月 1 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒 108 東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号

電話 (03) 453-8441(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 611.97 : 62-233/50/52

人工指の試作研究 (第3報)

—多関節人工指の角度及びにぎり圧の制御について—

杉本 旭・近藤太二・深谷 潔

産業安全研究所報告 RIIS-RR-27-4

本研究ではマニピュレータの把持機構として、多関節人工指の開発及びその角度、にぎり圧の制御に関する研究を行なった。

人工指は人間の母指、示指、中指に対応する3本指構成とし、9自由度を持たせている。人工指は人間の指の約1.4倍の大きさであり、制御装置の小型化をはかるため、電気粘性流体駆動方式を採用している。

その結果、角度制御においては誤差1%以内に、また、にぎり圧制御においては誤差4%以内で制御可能であることが確認された。(図11, 表2, 写真5, 参考文献3)



UDC 611.97 : 62-233/50/52

Test-Manufacture of Artificial Fingers (3rd Report)

—angle and grasping force control in the Artificial Fingers—

by Noboru Sugimoto, Taiji Kondo, Kiyoshi Fukaya

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-27-4

In this study, multi-fingers system was developed and the controllability of the angle and the grasping force were examined.

The fingers system has three fingers which correspond to the thumb, the forefinger and the middle finger, it makes 9 degrees of freedom. Each finger is as about 1.4 times as human's finger in size, in order to make controller smaller, Electro-Viscous-Fluids control method was adopted.

As the result, it was confirmed that angle was controllable within 1% error and as for grasping force within 4% error.

(11 Figures, 2 Tables, 5 Photographs, 3 referenses)

