

電子義手について

加藤 厚生 小島 幹雄

This paper describes the basic considerations of a artificial hand system. This system has pressure, stiffness and ship receptors, these receptors change repetition frequency of pulse generator output, and is controlled with pulse frequency.

In general, gripping force control of externally powered arm prosthesis have been made with amputee, but this system presents the necessity of self gripping action prosthesis by itself.

はじめに

最近発表されている医用人工の手（電子義手）または、工業用人工の手には、感覚検出装置を設けたものが多い。

これらは、感覚機能の附加によって人工の手の制御性を、一步人間のそれに近付けしめようとする意図に基づいている。

人工の手用感覚機能の中で、最も一般的なものは、圧力感覚、および接触感覚機能であって、圧力検出器を1個設けて握力の強さを検出しようとする加藤らのワセダハンド⁽¹⁾や Skackhov⁽²⁾, Ring⁽³⁾らの報告がある。また、電子計算機によって制御される工業用人工の手に、複数の圧力および接触検出器を設け、汎用性の拡大を計った井上⁽⁴⁾らの報告がある。

少し別の分野でも、多数の圧力検出器を持った人工の手によって、握った物体のパターン認識をしようとする試みが、木下⁽⁵⁾らによって行なわれている。

これらの内で、電子義手においては、義手の拇指先端に設けた圧力検出器からの信号を機械振動または、電気振動として装着者である人間へフィードバックし、人間の判断機能を介して握力調節を行なっている。

筆者らは、電子義手が本質的にマンマシンシステムである以上、電子義手の状態に関する情報が何らかの形で人間（装着者）へ与えられるべきであると考えているが、電子義手自体のもつ制御能力を高めることによって、人間へのフィードバックと、人間に要求される操作上の負担を少なくする事が、マンマシンシステムとしての電子義手—装着者系の全体的な操作性を増大するうえで、不可欠の条件であると考えている。

同様の事は、電子計算機で制御される工業用人工の手にも言及することができる。

この立場から、握力調節を自身で行なうことのできる電子義手を試作中である。

生体の皮膚感覚

ヒトの皮膚感覚には、触覚、圧覚、温覚、冷覚、痛覚⁽⁷⁾、振動感覚⁽⁸⁾がある。

触覚は Meisner 氏小体、圧覚は Pachini 氏小体、温覚は Ruffini 氏小体、冷覚は Krause 氏小体、痛覚は神経の自由終末、振動感覚は圧覚と同じく Pachini 氏小体でとられるとされているが、これは極端に単純化した表現である。

各受容器は、いずれも生物的 analogue digital convertor であって、その入出力関係は精神物理学的法則として知られる Wever-Fechner の法則⁽⁷⁾または Stevens の法則⁽⁹⁾にかなり近似する。すなわち

$$N = K \log S$$

または

$$N = K (s - s_0)^n \quad (2)$$

ただし N は感覚受容器からの毎秒のパルス発射数。

K は定数。

S は刺激の強さ。

S₀ は閾値

ΔS は刺激の強さの変化分。

n は巾乗の数で感覚の種類によって 0.5 から 3.5 の値をとる。

振動感受容器は、刺激振動数に応じて、毎秒数十から数百個のパルスを発生する。

各受容器の分布の模様を図1に示す。

これらの感覚は、ヒトが物体を把持するときに基本的に必要な感覚である。痛覚は言うまでもなく、温覚、冷覚も生体を危険から守るために不可欠の感覚である。

触覚は、手と物体との接触を検知しその閾値は指尖で 3g / mm² である。

圧覚は、把持力に依存し、深部感覚（筋、腱、関節の

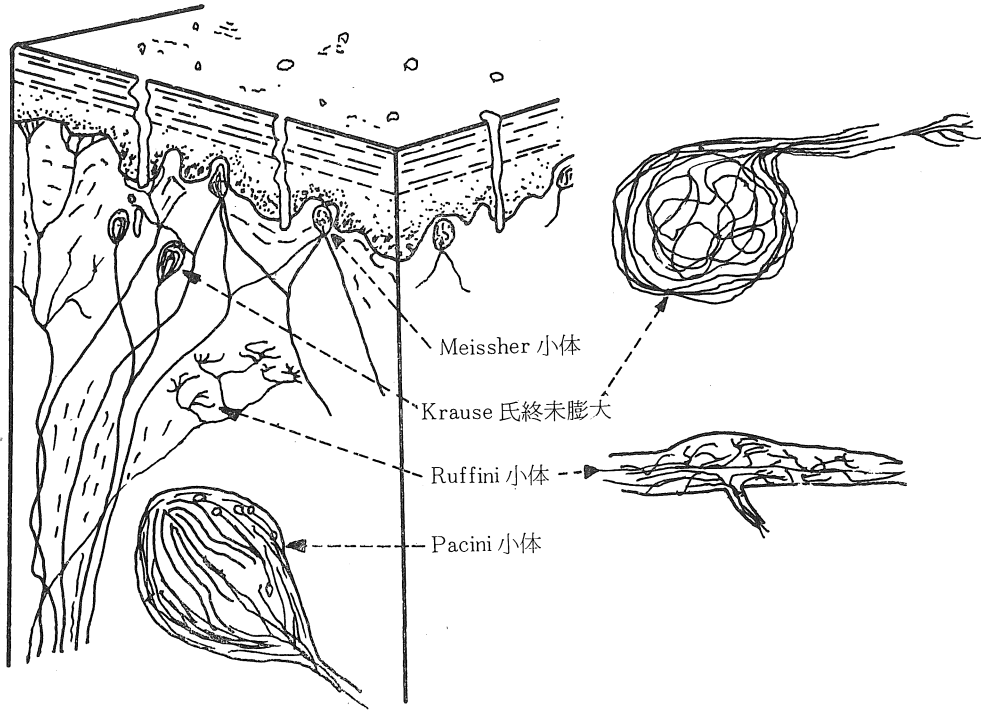


図 1 皮膚の感覚受容器

感覚)と共に、適当な握力を物体に加えるために必要な感覚である。

目を閉じた状態でも物体を把持し得るためには以上の感覚の他に、物体の変形の様子(反作用としての指の変形の様子)を検出する感覚(以後これをかたさ検出感覚という)、および物体と指との相対的動き(以後すべりという)を検出する感覚が必要である。かたさは、多数の圧力受容器を有するヒトの手では、複数の圧力受容器出力の論理出力として検出される。すべりは、この論理出力の時間的変化と考えることも可能であるが、筆者らは、むしろ、すべりによって指表面に誘起された微小な振動を、振動感覚受容器によって検出しているものとの考えを採っている。すべりの検出については Baits⁽¹⁰⁾らの報告がある。

電子義手用感覚装置

前節の考察から、義手自体のもつ制御によって物体を把持することの出来る電子義手が要求する感覚は、最小限、圧力、かたさ、およびすべりの検出感覚である。その他の感覚、温・冷覚、痛覚、深部感覚は、ここでは考慮しないものとする。

一般に、電子義手用感覚装置に要求される条件は次のとおりである。

1. 小形、軽量、耐久性に優れた簡単な構造であること。

と。

2. 設置数が極力少なくてすむこと。
3. 消費パワーが小さいこと。
4. 人工の皮膚を介しても動作すること。
5. 人間の生活温度で作動すること。

これらの条件を可能な限り満足するように感覚装置の設計をする。

圧力感覚器

圧力感覚は、物体と手との接触の全期間に涉って動作する最も基本的な感覚であって、皮膚表面にはほぼ垂直に作用する。

感覚器は、刺激圧力に比例した個数のパルスを単位時間に発生する、すなわち、先に述べた Stevens の法則

$$N = K (S - S_0)^n \quad (3)$$

において $n=1$ Stevens によれば、手掌に圧力を加えたとき $n=1.1$ である。

S は時間関数で、ここでは圧力を示すから

$$S = P(t)$$

S_0 はパルス発生閾値で $S_0 = P_0(t)$ とおけば

$$N = K (P(t) - P_0(t)) \quad (4)$$

かたさ感覚器

物体のかたさを検出する感覚は、基本的には圧力感覚であり、物体の把持による反作用として指に加わる圧力

を、指腹上の二点以上から検出し、次の処理をほどこした出力を、かたさ信号とする。
 指の、物体との接触面に図2. のように複数個の圧力検出素子を設け、中心の一個の検出素子と、これをとりまく他の検出素子とにかかるときの圧力の差に比例する出力を取出す。

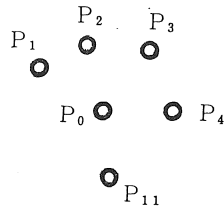


図 2 感圧素子の分布

各素子にかかる圧力を $P_0(t), P_1(t), \dots, P_n(t)$ とすれば、かたさ検出器出力 $h'(t)$ は、

$$h(t) = k_0 P_0(t) - \sum_{i=1}^n k_i P_i(t) \quad (5)$$

ここで $k_0 = \sum_{i=1}^n k_i = K$

$$k_i = k_{i+1} \quad i=1, 2, \dots, n-1$$

とすれば

$$h(t) = K \left(P_0(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t) \right) \quad (6)$$

$h(t)$ によって圧力パルス発生部のパルス発生閾値 $P_0(t)$ を変化する。

すべり感覚器

すべり感覚は皮膚表面に平行な微小振動としてとらえられる感覚であって、振動のエネルギーは、皮膚表面

と物体との相対速度と摩擦係数によって決まる。すべりの様子は、物体の重量、表面状態等によって異なるが、ここでは、すべっているか、いないかについてのみ検出する。すべり出力は、

$$S(t) = a \quad \text{すべりのあるとき} \quad (7)$$

$$S(t) = 0 \quad \text{すべりのないとき}$$

ただし a は一定電圧

とする。

すべり感覚器の検出閾値は、外部から変え得るようにする。

すべり感覚器出力によって圧力感覚出力を抑制する。

感覚受容器の構成

三種類の刺激を検出する受容器は、拇指の第一関節から先の部分に設け、構造は、図3に示すように三者を一体とした形とする。

ヒトの拇指先端は、受圧面が骨格に対して約30°傾斜しているから、ここで製作する感覚器も全体に30°の傾斜をもたせる。

圧力の強さは、中心部のゴムを支える板バネ1の変形量として検出する。把持物体のかたさは、中心部のゴムと、これをとりまく外側のゴムとにかかるときの圧力の差に相当するものとし、両方のゴムの間に渡した板バネ2の変形量として検出する。板バネは、燐青銅で作る。

すべりは、人工の皮膚に微小な振動を誘起するから、

この振動をピエゾ素子に加えて出力を得る。ピエゾ素子は、皮膚に平行な振動によってねじりを受け、ねじりに比例した電圧を発生する。したがって、ピエゾ素子は受圧面に平行な面内のいかなる方向へのすべりも検出できるように、受圧面に45°傾けて設定する。また、ピエゾ素子に振動を導くゴムと、受圧ゴムとは共通であるから、把持圧力によって、素子はたわみ、それに応じた出力を出す、これを防ぐためピエゾ素子の他方の端は、たわみを充分に吸収できるゴムで支える。試作受容器を写真1に示す。

各受容器は、これらに続くパルス発生回路(写真2)と共に感覚器を構成する。

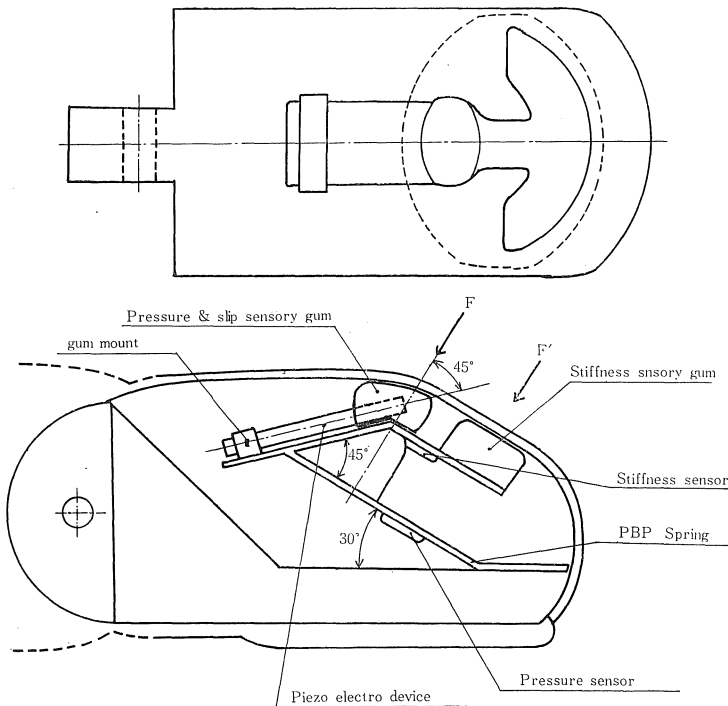


図 3 感覚受容器の構成

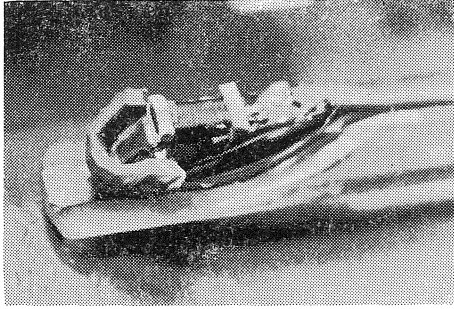


写真1 試作した感覚受容器

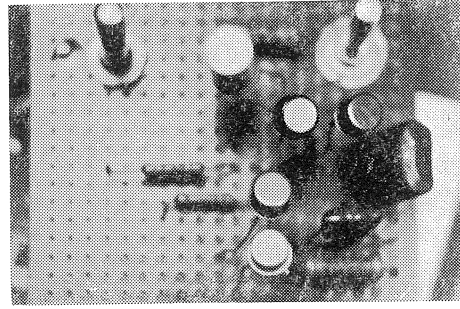


写真2 パルス発生器

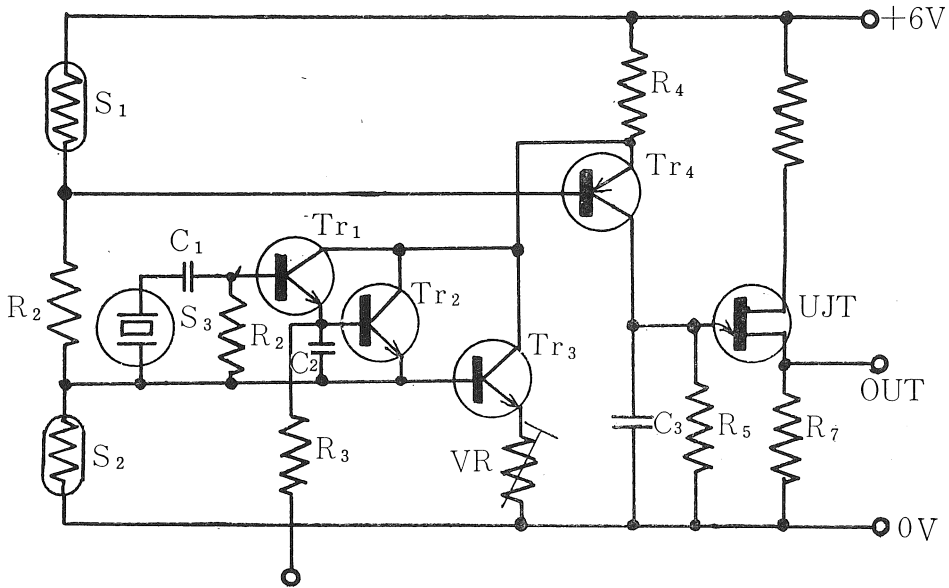


図 4 パルス発生回路

パルス発生回路

図4にパルス発生回路を示す。

圧力-抵抗変換素子 S_1, S_2 は共に n-G₀ 半導体歪

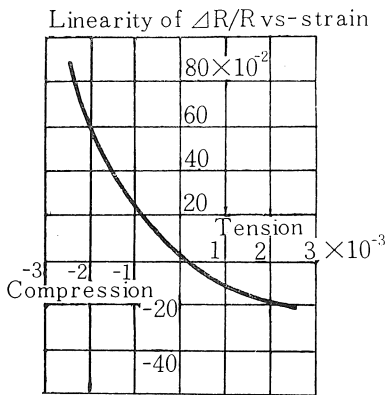


図 5 n-G₀ 歪ゲージの特性

ゲージを用い、温度特性を互に打消すように回路中に挿入する。

n-G₀半導体歪ゲージは、図5のように Compression を受けると抵抗が増加し、この抵抗値の変化分は、Tension の場合に比べ約2倍とれるから、 S_1, S_2 は、圧力または圧力差に比例した Compression を受けるように板バネの裏側に固定する。

R_5 は、 S_1 にかかる残留圧力および Tr_4 の漏洩電流によるパルスの発生を抑止するために設ける。

S_1 にかかる圧力が、皮膚による残留圧力だけのとき Tr_4 を cut off 状態にしておくと、 C_3 は充電されず、パルスが発生しない。 S_1 に残留圧力以上の圧力が加わり、抵抗値が増加すると、 Tr_4 が On 状態になって、 S_1 の抵抗値に比例した充電電流を C_3 に流し、UJT はパルスを発生する。このとき、かたさ検出素子 S_2 の抵抗値の大小によって Tr_1 が、On から Off へ移行する状況が

異なり、パルス発生開始閾値が、かたさに比例して上下する。

S_3 はピエゾ素子であり、すべりによる振動電圧を発生する。発生した振動電圧は、その成分中から、指と物体との接触開始時の圧力変化に比例する低周波成分を C_1R_2 によって除いたのち、 Tr_1, Tr_2, Tr_3 の三段ダーリントン接続に導いて増幅し、 Tr_4 を Cutoff してパルスの発生を禁止する。 C_2 は必要なパルス発生禁止時間を得るために挿入する。

図6は、 S_1 と S_2 の抵抗値変化による発生パルス数の増減を示す。破線は、パルス発生開始閾値であって、これ以下ではパルスを発生しない。

図7は、 S_1, S_2 の抵抗値変化と S_3 の振動電位とによるパルス発生状況の変化を示す。見易くするため

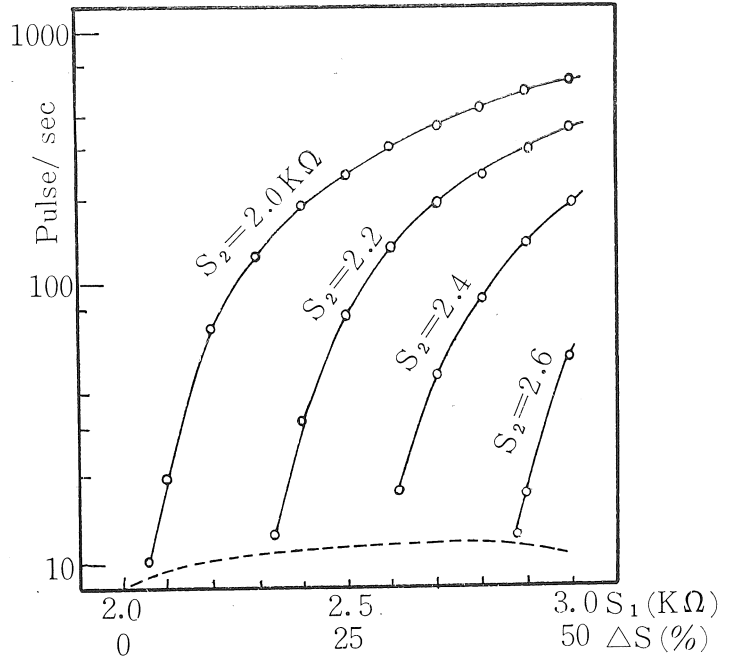


図 6 S_1, S_2 による発生パルス数の変化

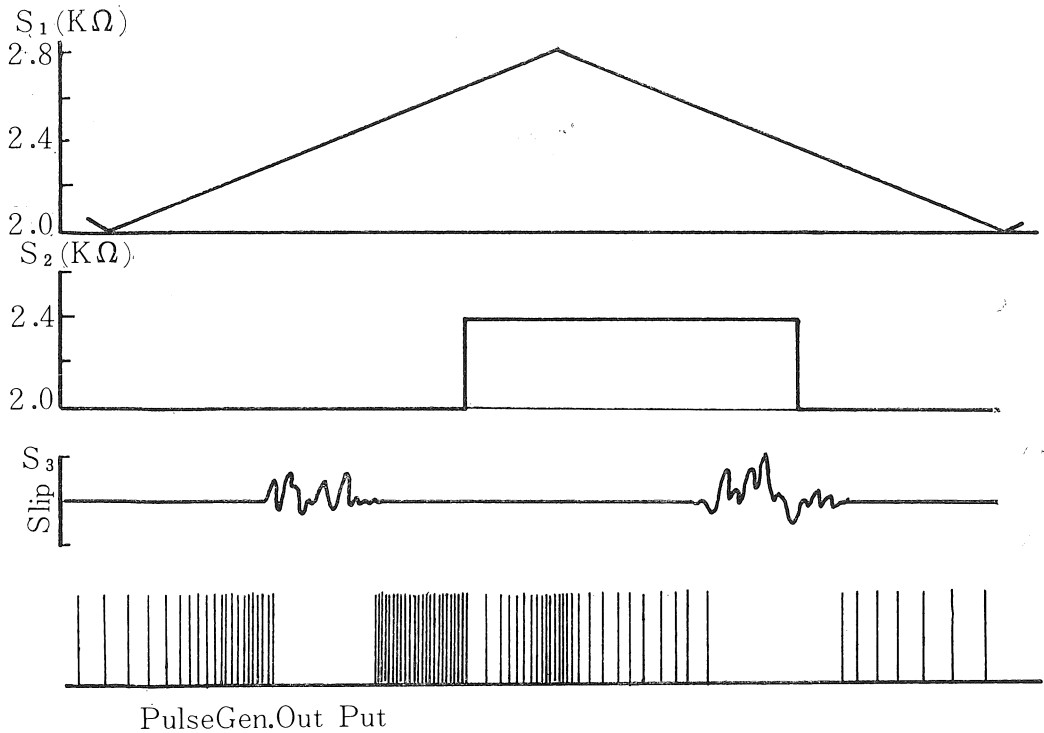


図 7 S_1, S_2, S_3 とパルス発生数の関係

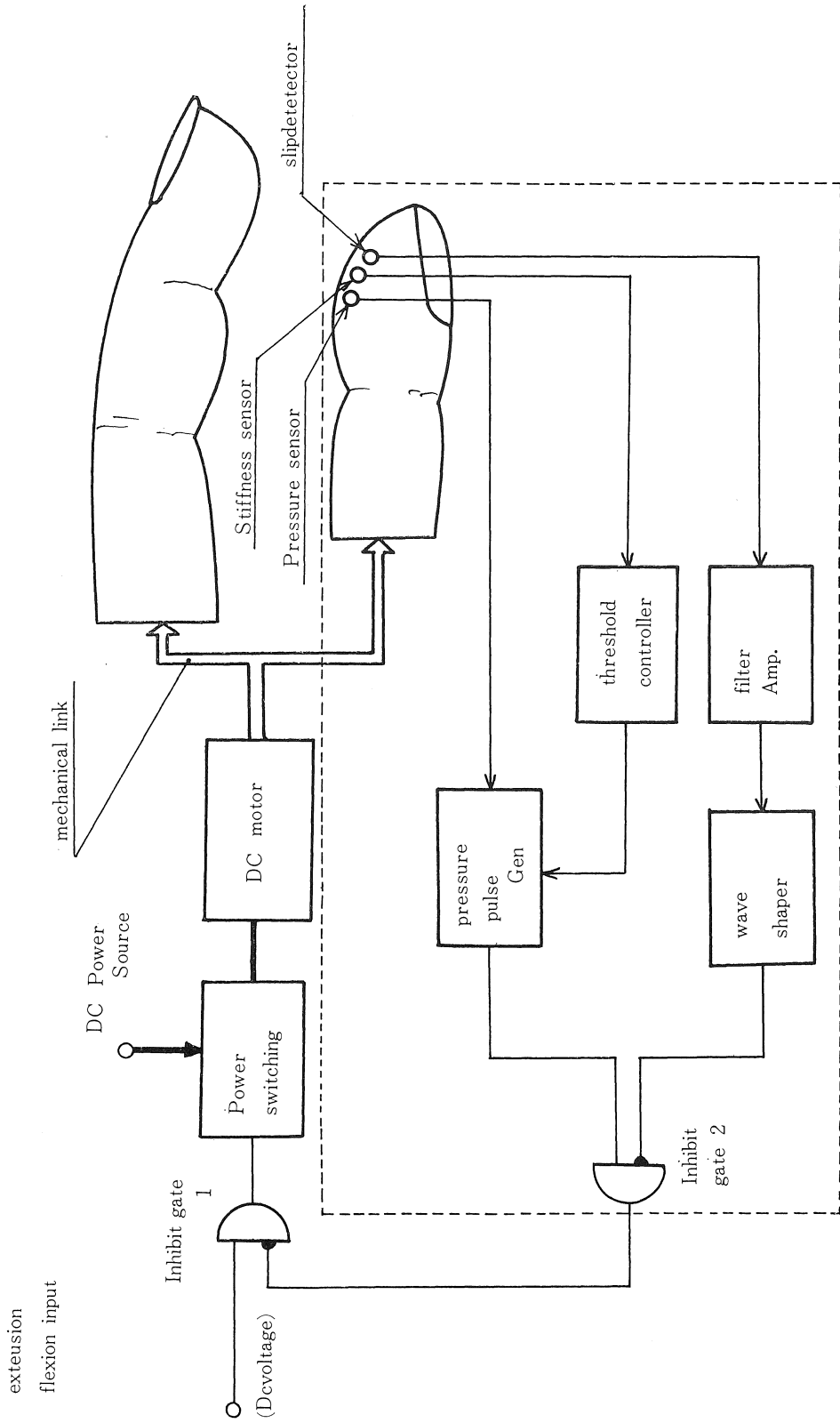


図 8 系のブロック線図

に、電磁オシログラムからトレースして示す。

実際の使用状態では、物体を把持していないとき毎秒10~20パルスを発射するようにVRを設定する。

このパルス発生器の全消費電力は、電源電圧6vのとき20mw以下である。

電子義手制御系の構成

三種類の検出器を設けた制御系のブロック線図を図8に示す。点線で囲んだ部分は、前節の検出器を機能的に分解して示してある。

指へのリンクは、この系では一応物体を把むことだけを目指としたから1モーター方式を採用したが、手首から先だけを使って文字を書くことの出来るような高度の自由度を必要とする系では、少くとも1指1モーター方式を採らねばならない。

この系では、flexion および extension 命令はDC電圧の正負で与え、運動の速度は電圧の大小で決める。

flexion or extension inpnt 端子へ正のDC電圧を加えると power switch を通じて DC-Motorへ power が供給され指は屈曲運動を行なう。物体を把み pressure sensor が作動すると pressure pulse gen. からパルスが発射され、その個々のパルス期間だけ、flexion inpnt をinhibitし、DCmotor への Total input powerを減少する。パルス発射数は、把持力に比例するから、両者の平衡状態で把持力は定常状態に入る。物体が軟い場合は、pressure sensor の出力が小さいから、stiffness sensor によって閾値を下げ、硬い場合は閾値を上げる。

物体の重さ、表面状態による把持力調節は slip detector 出力によって pressure pulse を禁止し、DC motor の入力を増加することにより行なう。これだけでは、slip がなくなればまたもとの力の平衡へもどってしまい、slip- hold を繰返し、ついには物体を落してしまう。

これを防ぐためには、slip による Pulse の禁止期間を検出して、一パルス毎の流通期間を変え adaptation 機能を Inhibit gate 2 にもたすことが必要である。

DCmotor から指までの mechanical link には逆動禁止機構を入れない。

ま と め

試作した電子義手用感覚装置について、不十分ながら測定結果を添えて報告した。

先に述べた一般要件から考察すると

1. 検出器は、拇指の中に三種共設定できる程小形であり、パルス発生部もIC化によってTr一個分の大きさにすることが可能である。
2. 設置数は、拇指に設けることによって一組におさえ

ることができる。

3. 消費パワは29mw以下と微小である。また系全体の制御信号電力も、パルス制御方式としたことによって本質的に小さく抑えることが可能である。
4. 圧力検出はもちろん、この方式では、すべりの検出も皮膚を介して行うことができる。
5. 感覚器全体で最も温度の影響を受けやすいのは半導体歪ゲージである。この感覚器回路では一応温度補償方式をとり使用温度範囲を拡げているが、さらに良好な補償について目下検討中である。補償については五十嵐⁽¹¹⁾の報告がある。

他の製作例に見られるように、電子義手では、モーターから指までのリンクに逆動禁止機構を入れ、一旦物体を把んだ状態では、把むためのエネルギー消費が零となるように設計されている。このような方式は、重い物体を長時間持ったままで動作しなければならない場合には有利であるが、日常生活のように比較的軽い物体を把んだり離したりする動作が多い場合には、エネルギー消費面から考えても、かならずしも有利であるとは断言出来ない。

ここに報告したシステムは、上の考えに基づいて設計されており、電子義手の一方式として充分使用に耐えるものと考えている。

参 考 文 献

- 1) 加藤, 山川, 市川 電子義手について
電通学会資MBE69—6
- 2) 加藤 人間の手足の制御
- 3) N. D. Ring, D. B. Welbourn A self-adaptive gripping device its design and performance
Symposium of The basic problems of prehension, movement and control of artificial limbs 1968
- 4) 井上 計算機で制御される双動性を備えた人工の手
第1回バイオメカニズムシンポジウム前刷 1970
- 5) 木下, 高瀬, 森 触覚によるパターン認識
同上 シンポジウム前刷 1970
- 6) 山口, 他 先天性上肢欠損児用電動義手の研究
同上 シンポジウム前刷 1970
- 7) 時実編 脳の生理学
- 8) 勝木編 感覚の生理学 生理学大系
- 9) S. S. Stevens To Honor Fechner and Repeal His Law SCIENCE vol 133 80~85 JUN. 1961

- 10) J. C. Baits, R. Todd, J.M. Nightingale The feasibility of an adaptive control scheme for artificial prehension Symposium on The basic problems of prehension movement and control of artificial limbs 1968
- 11) 五十嵐, 中村 半導体ひずみゲージとその使い方 2. マシニスト Dec.1969