

日立電動式サーボマニプレータ

Hitachi Servo-Manipulator with All-Transistorized Control Systems

和 世 啓 三* 宮 沢 浄*
 Keizô Wase Kiyoshi Miyazawa
 江 尻 正 員** 鴨 井 章**
 Masakazu Ejiri Akira Kamoi

内 容 梗 概

放射性物質などの遠隔操作を目的とした従来の機械式マニプレータにおいて、その主動側と従動側の連結を断ち、そのかわりにバイラテラルサーボと称する力感覚伝達能力のあるサーボ系をそう入して構成した日立電動式サーボマニプレータの概要について述べている。制御装置はすべてトランジスタ化され、主従間の連結が単に電氣的配線だけで済むので、広い範囲の操作ができる「電子の手」ともいふべき遠隔操作装置である。

1. 緒 言

放射線レベルの高い場所における諸作業は、作業者の保護のために安全な場所から遠隔操作で行なう必要がある。この目的のために作られた従来の機械式マニプレータは、遮へい室の外に設置した主動側と中に設置した従動側とを、天井または側壁にあけた穴を通してリンク装置、回転チューブ、テープ、ロープなどで純機械的に連結していた⁽¹⁾。この場合には遮へい室にあけた穴を通しての放射線散乱などに制約され、取り扱い得る放射性物質もたかだか 10^3 キュリー程度であった。

日立製作所では、 10^4 キュリー以上の放射線源の取り扱いを目的として、今回、電源や増幅器に真空管をまったく使わず、すべてトランジスタなどの半導体素子を用いた制御装置を完成し、それを介して主従両側が電氣的に連結された電動式サーボマニプレータを開発したので、その概要と動作特性について以下に紹介する。

2. 装置の概要

2.1 機 構 部

サーボマニプレータは主動側機構部、従動側機構部およびそれらの動作を制御する制御部から構成されている。操作者が主動側を操作すると、制御装置を介して電線で連結された従動側が操作者の意のままに作業を行ない、同時に作業に伴う力を操作者に反射して感覚を伝えるものである。

主動側ならびに従動側の機構部の写真を第1図に、その概略図を第2図に示す。機構部はつかみ機構を除いて主従両側ともまったく同一であり、電気部品以外はほとんどが耐食アルミニウム合金で作られている。機械部の片腕には、サーボモータ、タコジェネレータ、シンクロ、ブレーキを取り付けた7個のギヤボックスがそれぞれ所定の位置に配置され、計7個の動作を行なう。7個の運動の自由度とその動作範囲は

前後運動: $+45^\circ \sim -45^\circ$

上下運動: $+45^\circ \sim -135^\circ$

左右運動: $+45^\circ \sim -45^\circ$

腕回転運動: $+170^\circ \sim -170^\circ$

手首振り運動: $+20^\circ \sim -110^\circ$

手首ねじり運動: $+180^\circ \sim -180^\circ$

つかみ運動: 最大つかみ幅 70 mm

である。このうち変位の3運動(前後, 上下, 左右)は、ギヤボックス出力軸の回転運動をレバーもしくはリンク装置で

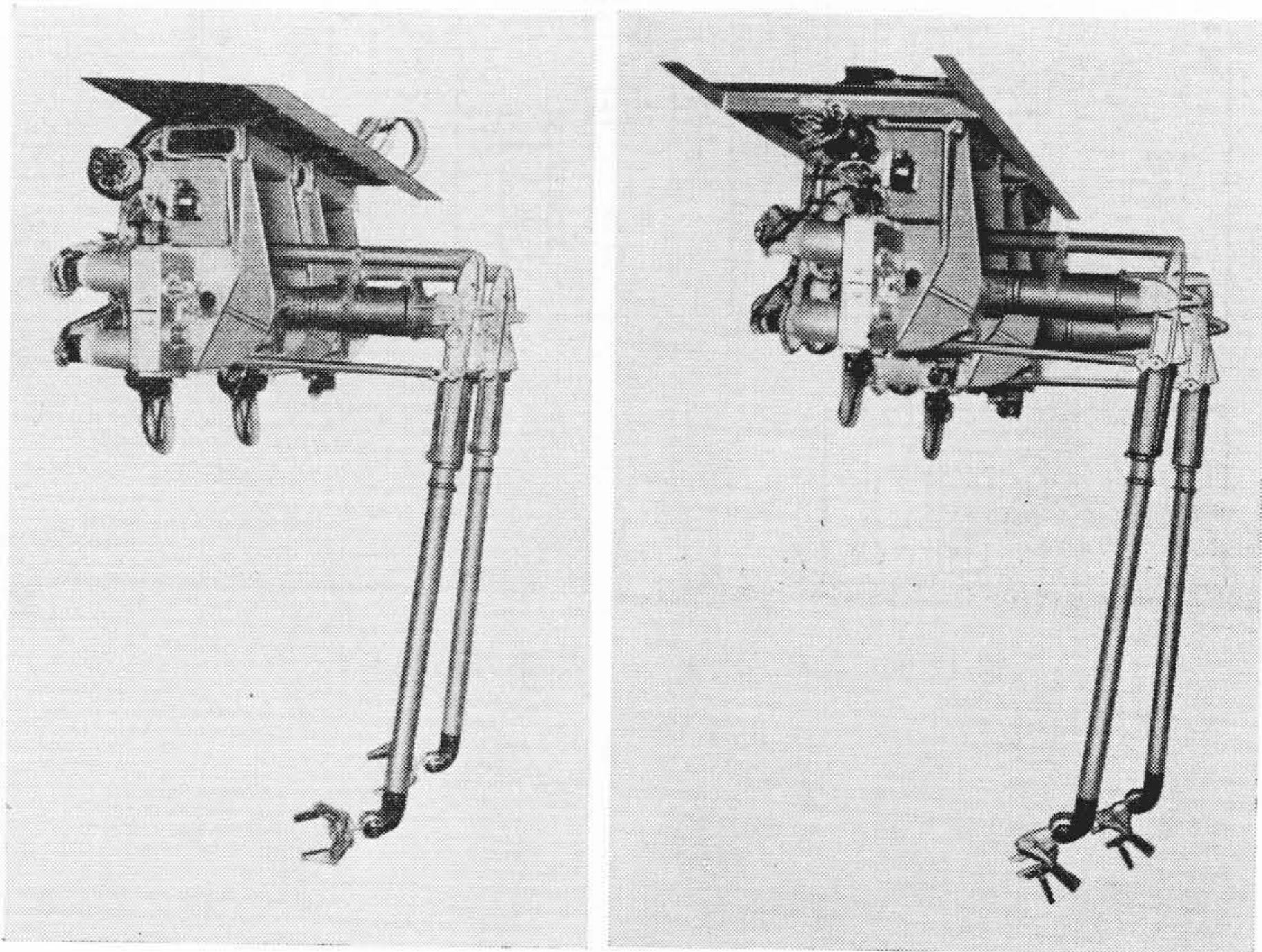
拡大して腕の最終運動に変換している。その際、レバーやリンク装置の重量を打ち消して操作しやすくするため、鉛のカウンタウェイトを取り付けてすべての腕位置でつり合うようにした。回転の3運動(腕回転, 手首振り, 手首ねじり)とつかみ運動は、ギヤボックス出力軸にプーリを取り付けてステンレスワイヤロープを通して最終運動に変換している。手首の動作の一例を第3図に示す。

主動側機構部と従動側機構部はそれぞれの架台に取り付けられ、従動側機構部は走行機構によって架台天井のレール上を移動できるようにし、広範囲の作業を可能にしている。

2.2 原 理

主従両側の機構部を連結する制御装置としては、主動側に与えた変位に従動側に忠実に再現するとともに、従動側に働く力を主動側の操作者に感覚として伝え、作業の実態を正しく感知させる機能が要求される。このような能力のあるサーボ系をバイラテラルサーボ系と称し、対称形・力逆送形・力帰還形の3種が考えられている⁽²⁾。本装置は、第4図に示すような電動式に構成した対称形バイラテラルサーボ系を片腕につき7組用いて、腕の七つの運動を制御するようにした電動式サーボマニプレータである。

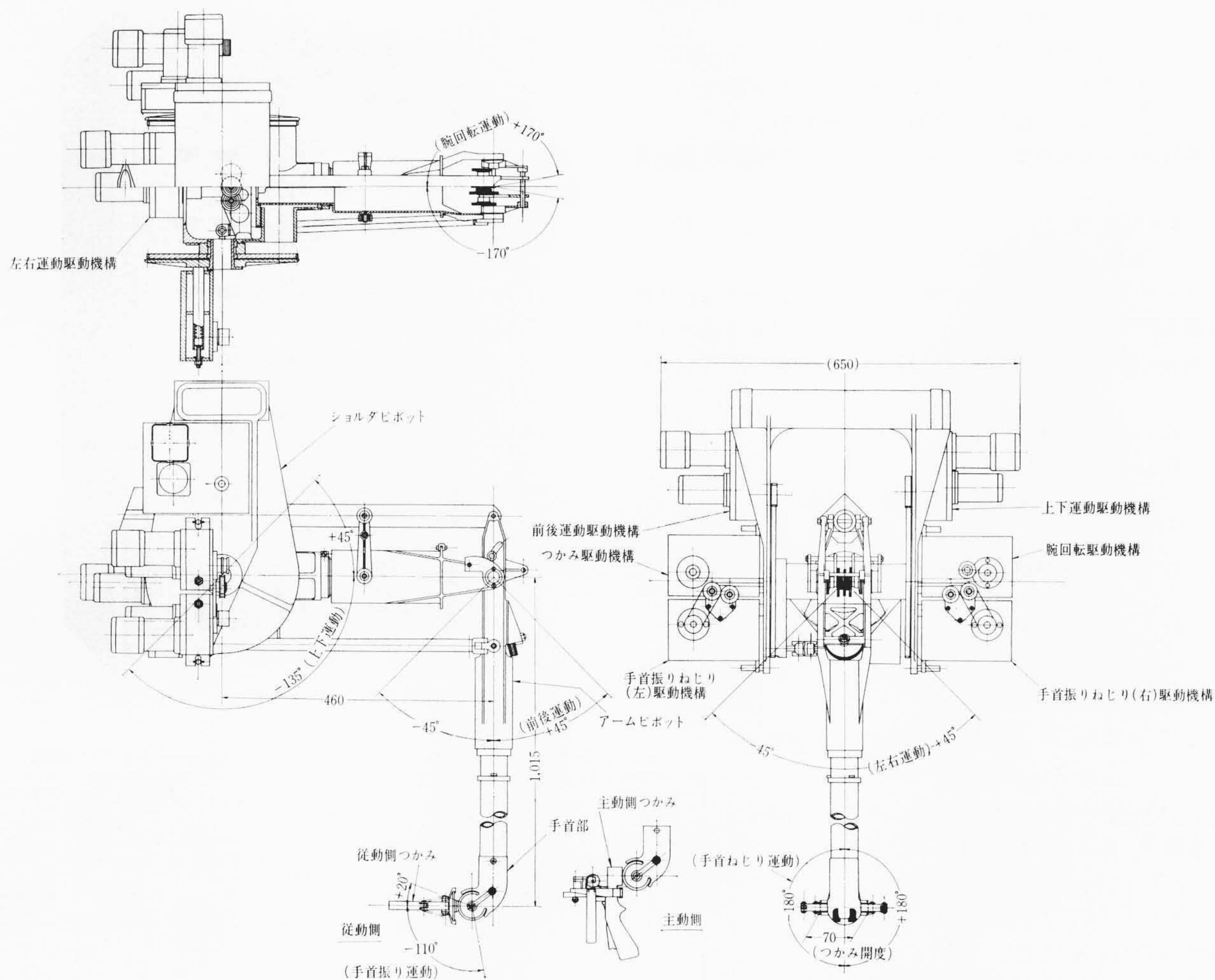
その原理は、主動側と従動側の軸位置のずれ $\theta_1 - \theta_2$ をシンクロにて検出し、そのずれ(位置偏差)を0にするような向きのトルクを主従両側のサーボモータで発生させるものである。したがって操作者が主動側の腕を動かして軸位置 θ_1 を変位させると位置偏差 $\theta_1 - \theta_2$ が生じ、その偏差に比例したトルクが主従両側のサーボモータで発



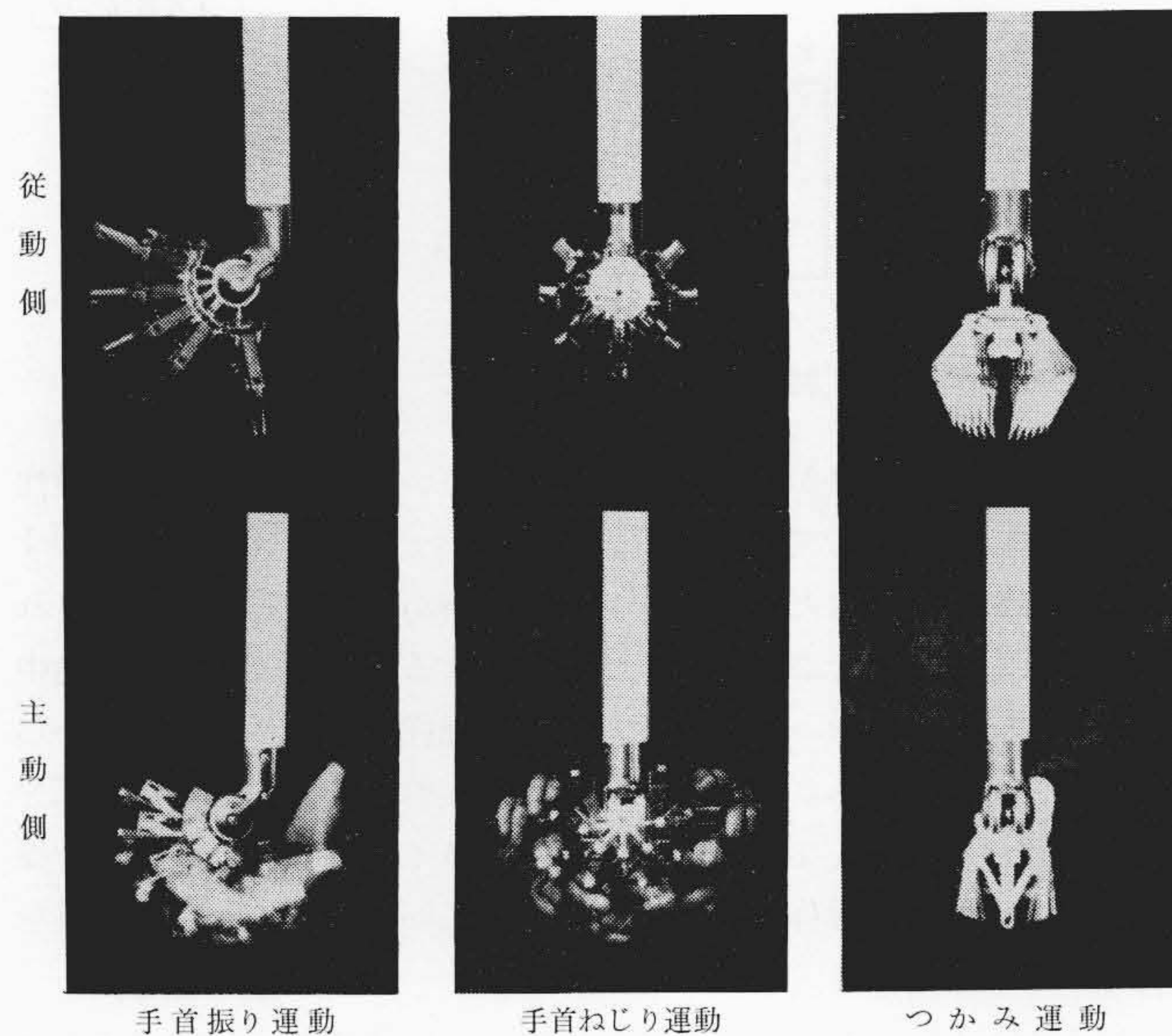
第1図 機構部の外観

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所中央研究所

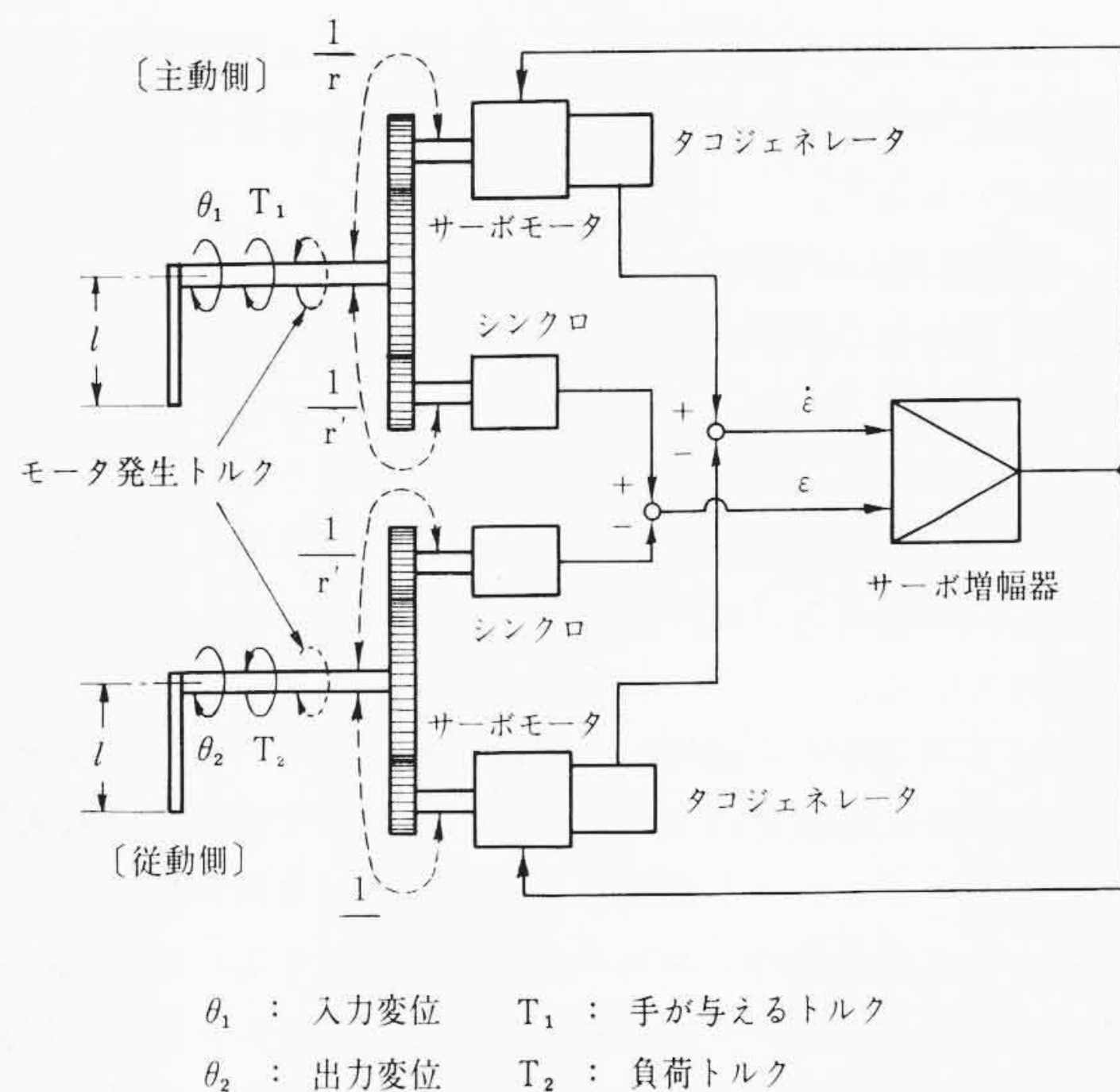


第2図 機構部概略図



第3図 手首の動作(多重露出により撮影)

生し、従動側では軸位置 θ_2 が θ_1 に追従するように働き、主動側では軸位置 θ_1 を制動して θ_2 に一致させるように働くことになる。この系に負荷トルク T_2 が掛かると、これを保持するために位置偏差が大きくなり、したがって主動側にも大きな反力を与える。このようにして力の感覚伝達ができるわけである。この系では、系を安定化させるために主動側と従動側のタコジェネレータの出力の差、すなわち速度の偏差を制御信号に加えてダンピングを与えている。



第4図 電動式対称形バイラテラルサーボ系

いま従動側に負荷トルク T_2 があり、主動側に手でトルク T_1 を与えたとき、主動側と従動側が運動して両者の軸位置に角度偏差 $\theta_1 - \theta_2$ が生じたものとする。これはシンクロ軸では $r'(\theta_1 - \theta_2)$ の角度偏差に相当するのでシンクロからの位置偏差信号 ϵ は

$$\epsilon = k_e r' (\theta_1 - \theta_2) \quad [\text{V}] \quad \dots \quad (1)$$

k_e : シンクロの電圧係数 $[\text{V/rad}]$

$\frac{1}{r'}$: シンクロ軸から出力軸への歯車減速比

同様にタコジェネレータからの速度偏差信号 $\dot{\varepsilon}$ は

$$\dot{\varepsilon}=k_t r(\theta_1-\theta_2) \quad [\text{V}] \quad \cdots \cdots (2)$$

k_t : タコジェネレータの電圧係数 (V・s/rad)

$\frac{1}{r}$: モータ軸から出力軸への歯車減速比

サーボ増幅器に入る信号は $\varepsilon+\dot{\varepsilon}$ であるから、サーボ増幅器の出力電圧 V は

$$V=k(\varepsilon+\dot{\varepsilon}) \quad [\text{V}] \quad \cdots \cdots (3)$$

k : サーボ増幅器のゲイン

一方、サーボモータのトルク速度特性を線形化して考えると、主動側と従動側のサーボモータで発生するトルク T_{m1} , T_{m2} は $\theta_1>\theta_2$ のとき主動側では θ_1 と反対方向、従動側では θ_2 と同じ方向になるので、

$$\left. \begin{aligned} T_{m1} &= k_m V + k_v r \dot{\theta}_1 \\ T_{m2} &= k_m V - k_v r \dot{\theta}_2 \end{aligned} \right\} \quad [\text{kg} \cdot \text{cm}] \quad \cdots \cdots (4)$$

k_m : サーボモータの停動トルク係数 (kg・cm/V)

k_v : サーボモータのトルク減少係数 (kg・cm・s/rad)

となる。したがって主動側と従動側の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} Jr\ddot{\theta}_1 &= \frac{T_1}{r} - T_{m1} \\ Jr\ddot{\theta}_2 &= -\frac{T_2}{r} + T_{m2} \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (5)$$

J : サーボモータ軸に集中換算した慣性能率 (kg・cm・s²)

となる。(1)～(4)式を(5)式に代入しラプラス変換すれば、変数 θ_1 , θ_2 , T_1 , T_2 の間に

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad \cdots \cdots (6)$$

なる関係が成り立つ。ただし

$$\left. \begin{aligned} y_{11} &= -y_{22} = Jr^2s^2 + (kk_mk_t + k_v)r^2s + kk_mk_vrr' \\ y_{12} &= -y_{21} = -(kk_mk_t r^2s + kk_mk_vrr') \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (7)$$

であり、 s はラプラス演算子である。(6)式が本装置に用いた電動式対称形バイラテラルサーボ系の動作を表わす運動方式である⁽³⁾。

2.3 制御部および制御方式

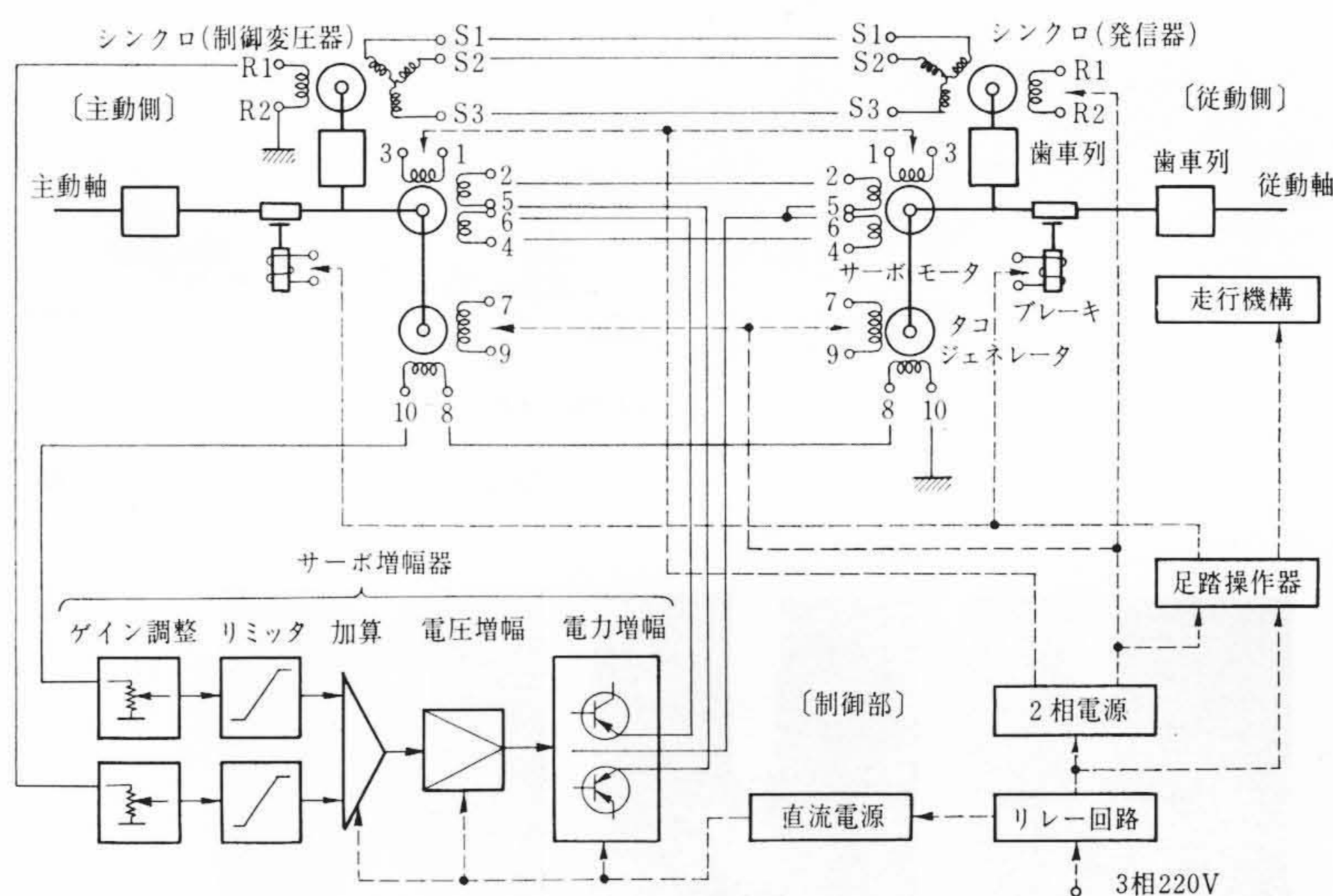
主動側と従動側の機構部を連結しそれらの動作を制御するには、上述のようなバイラテラルサーボ系で腕の全運動をサーボ化すればよいわけである。本装置の制御部は、電源とサーボ増幅器を片腕分(7個)ずつ組み込んだ第5図に示すような制御装置と、操作者の足もとに置かれる足踏式操作器から構成されている。

電源には3相220Vを使用し、電源ジャンプ内のスコット結線変圧器にて2相100V電源を作り、そのうちの1相で主従両側機構部の全部の2相サーボモータを励磁し、他の1相で主従両側のタコジェネレータおよび従動側のシンクロ発信器を励磁する。第6図に示すように、主動側のシンクロ制御変圧器から得られる位置偏差に比例した信号と、主従両側のタコジェネレータ出力巻線の差動結線によって得られる速度偏差信号を、それぞれのサーボ増幅器に導いている。サーボ増幅器にはいった両信号は、ゲイン調整回路、リミッタ回路を通ったあと加算され増幅され、出力段のパワートランジスタ(2SB332)のエミッタフォロワ形プッシュプル接続によって主従両側の2個のサーボモータを直列かつ共通に駆動する。このサーボ増幅器の出力は120Wであり、サーボモータは制御巻線電圧を下げてトランジスタ駆動用とした定格100V-15V、15W出力の2相サーボモータである⁽⁴⁾。

機構部の各ギヤボックスに取り付けられた電磁ブレーキは非励磁



第5図 制御装置



第6図 制御方式

のときブレーキが掛かるように構成されていて、通常は足踏式操作器のスイッチによってこれを励磁した状態でマニプレータを操作するが、停電の際にはただちにブレーキが掛かって各運動が施錠されることになる。またこのスイッチを操作することにより、作業途中の任意の腕位置でマニプレータを施錠し操作者がマニプレータから離れることもできる。このほか足踏式操作器には、従動側機構部を架台天井のレール上で移動させるためのスイッチがあり、これを操作することにより操作者は固定した位置にいて広域にわたる作業を行なうことができる。

以上のように本装置は、真空管をいっさい使用せず、すべてトランジスタ化された制御装置をもち、各方向に対し3～4.5kgの負荷能力を有するサーボマニプレータである。

2.4 特 長

本装置は従来の機械式マニプレータと異なり、主動側と従動側の連結が多心ケーブルによる電氣的配線だけで済むので、主従間の空間的配置がまったく自由にとれること、したがってITVや従動側走行機構の併用により任意の場所から操作でき、作業可能空間を任意に拡大できるという大きな特長を有している。また主従間の遮へ

いを完全にし、遮へい室の気密を容易に保持できるので、各種の強い放射線源の取り扱いを可能にする。さらに制御部が完全にトランジスタ化されているので、真空管式に比べ電力消費が少なく電源投入後ただちに運転できるなどの利点を有し、かつ信頼性も高く、手のかからない長い寿命が期待できるなどの特長を有している。

3. 装置の特性

3.1 剛性

マニプレータでは、従動側操作端を固定し主動側の操作端に力を加えると、わずかながら腕位置がたわんで操作端が変位する。この性質をマニプレータの剛性といい、このときの力と変位の比を剛性率という。たとえばマニプレータを用いて左手で重量物を持ち右手を無負荷で作業を行なう場合には、剛性が小さいと、従動側で左右同一高さにするのに主動側ではかなりずれた位置をとらせねばならない。操作者の眼からのフィードバックにより多少のずれは苦にならないが、動的によい力の伝達を得るためには当然剛性の大きいほうが望ましい。

実際のサーボマニプレータでは、歯車軸のねじれ、ワイヤロープの伸び、レバーの曲りなどに起因する機械的なたわみのほかに、サーボ系に起因するたわみがある。その理由は対称形バイラテラルサーボ系では、既述のように位置偏差があってはじめて負荷を保持できるからである。

いま、従動側を固定し、主動側操作端に W (kg) の力を加えたとき、主動側がサーボ的に δ (cm) だけ変位するとすると、サーボ系の剛性率 C は (6) 式から

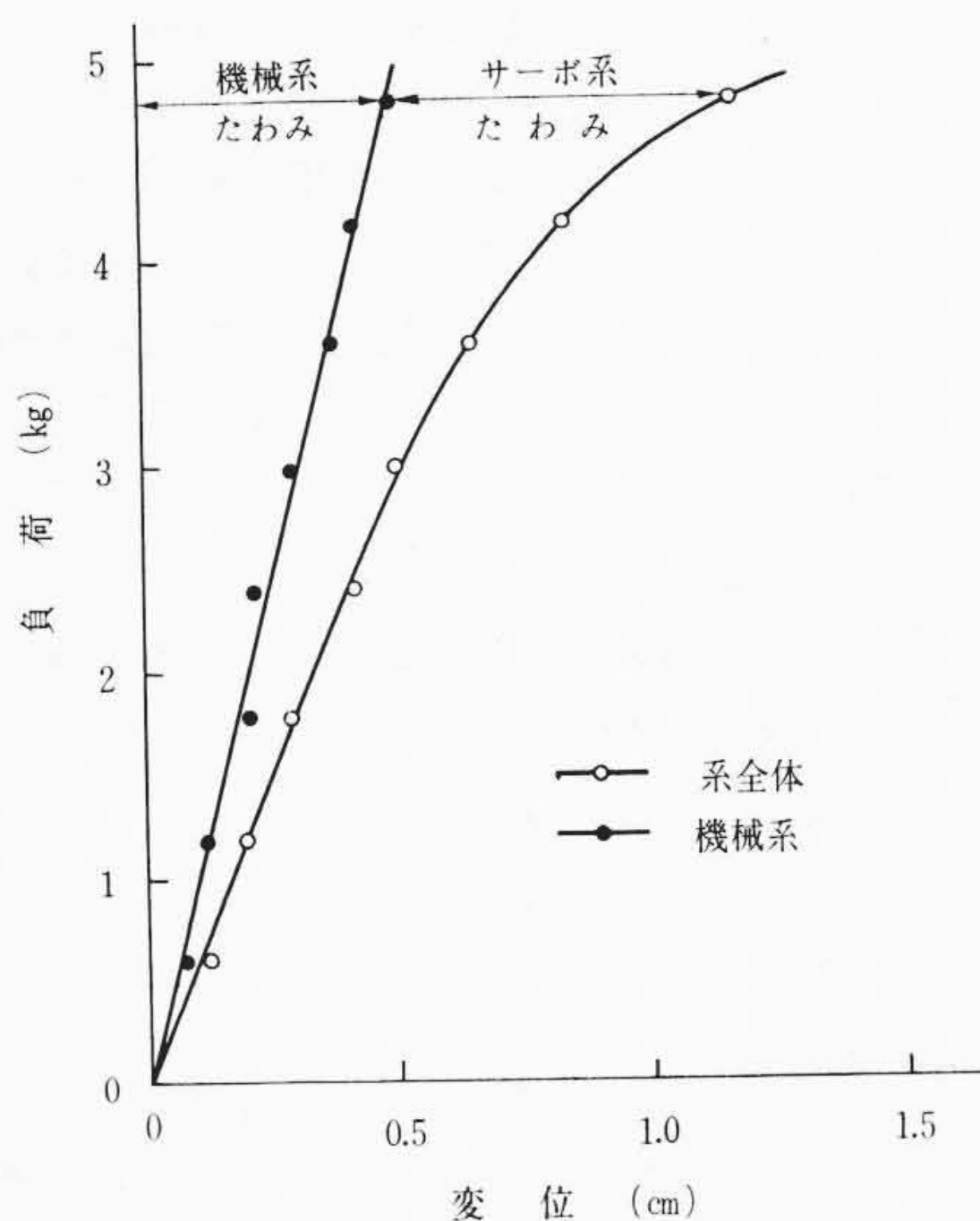
$$C = \frac{W}{\delta} = \frac{k k_m k_e r r'}{l^2} \quad [\text{kg/cm}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

l : ギヤボックスの出力軸から操作端までのレバーの長さ (cm)

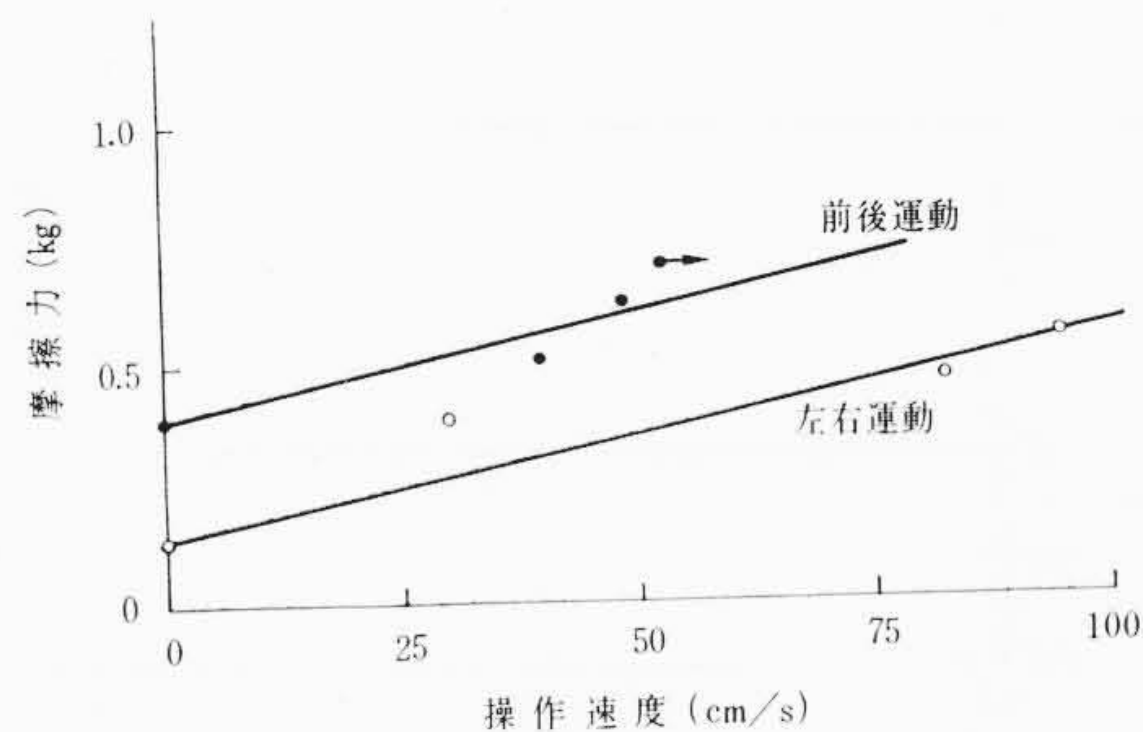
と計算される。本装置では、サーボ系剛性率 C は各運動について大略 4~8 kg/cm であり、第 7 図に例示するように、サーボ系のたわみは、必然的に存在する機械的なたわみに比べてほぼ同じ程度に過ぎない。

3.2 摩擦特性

マニプレータを無負荷で操作する場合でも、機構部各部に存在する摩擦に打ちかつだけの力を操作者が与える必要がある。摩擦には静的なものと動的なものがあり、その原因には機械的なもののほかサーボモータの逆起電力などの電気的なものもある。これらはでき



第 7 図 剛性の一例(上下運動)



第 8 図 摩擦特性の一例

るだけ小さいほうが操作もしやすく感覚伝達もいいわけである。

静摩擦はマニプレータを各運動方向に徐々に引張ったときの動きだす瞬間の引張り力であり、動摩擦は無負荷状態のマニプレータがある一定の速度で動かすときにどのくらいの力が必要かという値である。(6) 式のような運動方程式で表わされる線形系では、動摩擦 F_v は

$$F_v = \frac{2 k_v r^2}{l^2} v \quad [\text{kg}] \quad \dots\dots\dots (9)$$

v : 主動側操作端の線速度 (cm/s)

となり、速度に比例したいわゆる粘性抵抗であることがわかる。この式から左右運動の動摩擦を計算してみると $v=50$ cm/s で動かすには約 5 kg の力が必要なことになる。しかし一般に 2 相サーボモータのトルク速度特性は非線形であり、その様相は駆動方式によって大幅に異なるので、サーボ増幅器出力回路の適切な選択によって k_v を小さくすれば、第 8 図に例示するように動摩擦を小さくすることができる。本装置では、変位の 3 運動における静摩擦は 0.5 kg 以下、動摩擦は 50 cm/s の速度のとき 0.8 kg 以下であり、操作が非常に軽い。

3.3 追従性

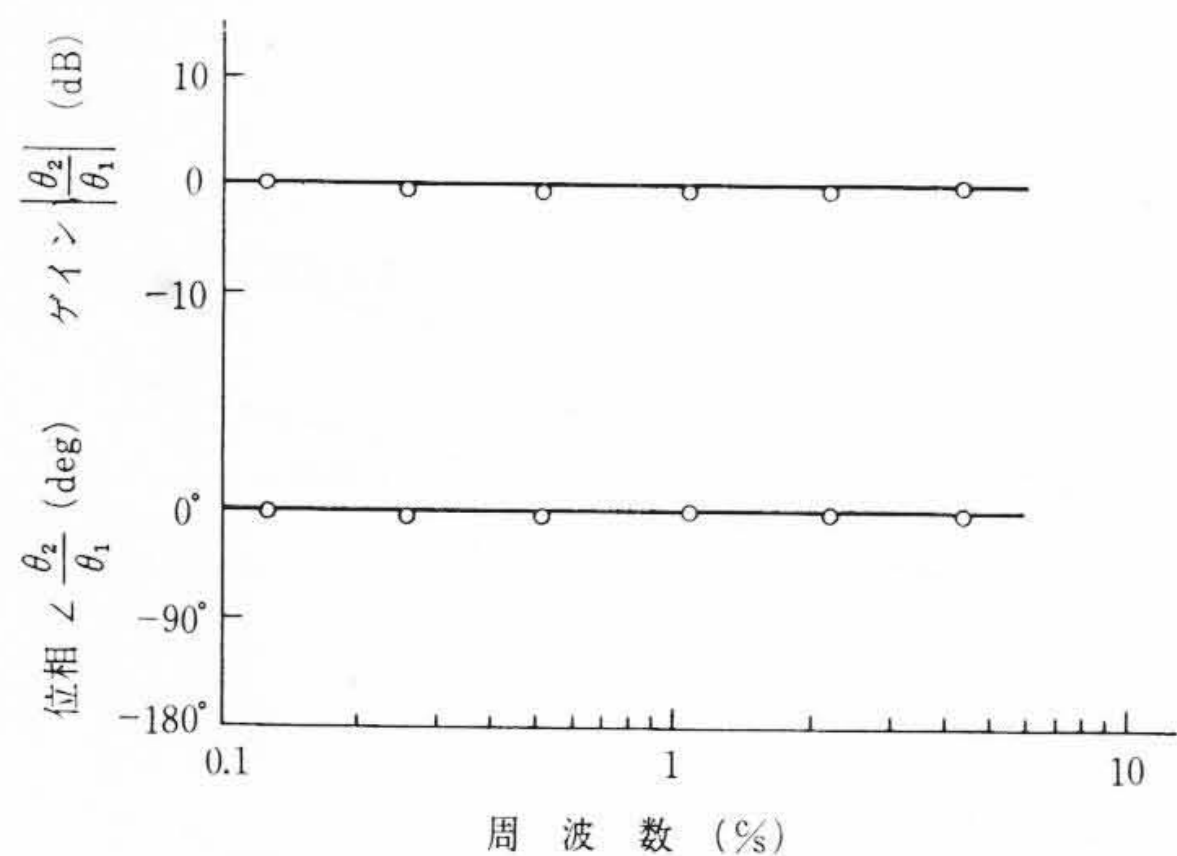
従来の機械式マニプレータでは、主動側をあやつる操作者の腕さえ動けば特に操作速度の上限はない。しかし人間の操作能力には限度があり、無負荷時の操作速度は通常 50 cm/s 程度である。サーボマニプレータでは、サーボモータの回転速度飽和、歯車列の減速比などのサーボ的要因で追従速度に上限が存在し、本装置では追従可能な最大線速度は約 100 cm/s であり、平均線速度は各方向に 80 cm/s である。

バイラテラルサーボ系では、制御ループの中にはいって安定性に関与する歯車列減速比は、サーボモータからシンクロまでの r'/r である。したがってそのあとの減速はまったく任意であり、通常サーボモータの定格トルクを勘案してマニプレータの負荷容量と操作速度の要求から決定される。本装置では歯車比 r'/r は各運動につき 1.5/100~4.5/100 程度に選んである。シンクロ出力電圧は $k_e=1$ V/deg、増幅器電圧ゲインは $k=10$ であるから、シンクロ軸での偏差 1 度についてサーボモータは定格の 50~70% のトルクを出すことになる。

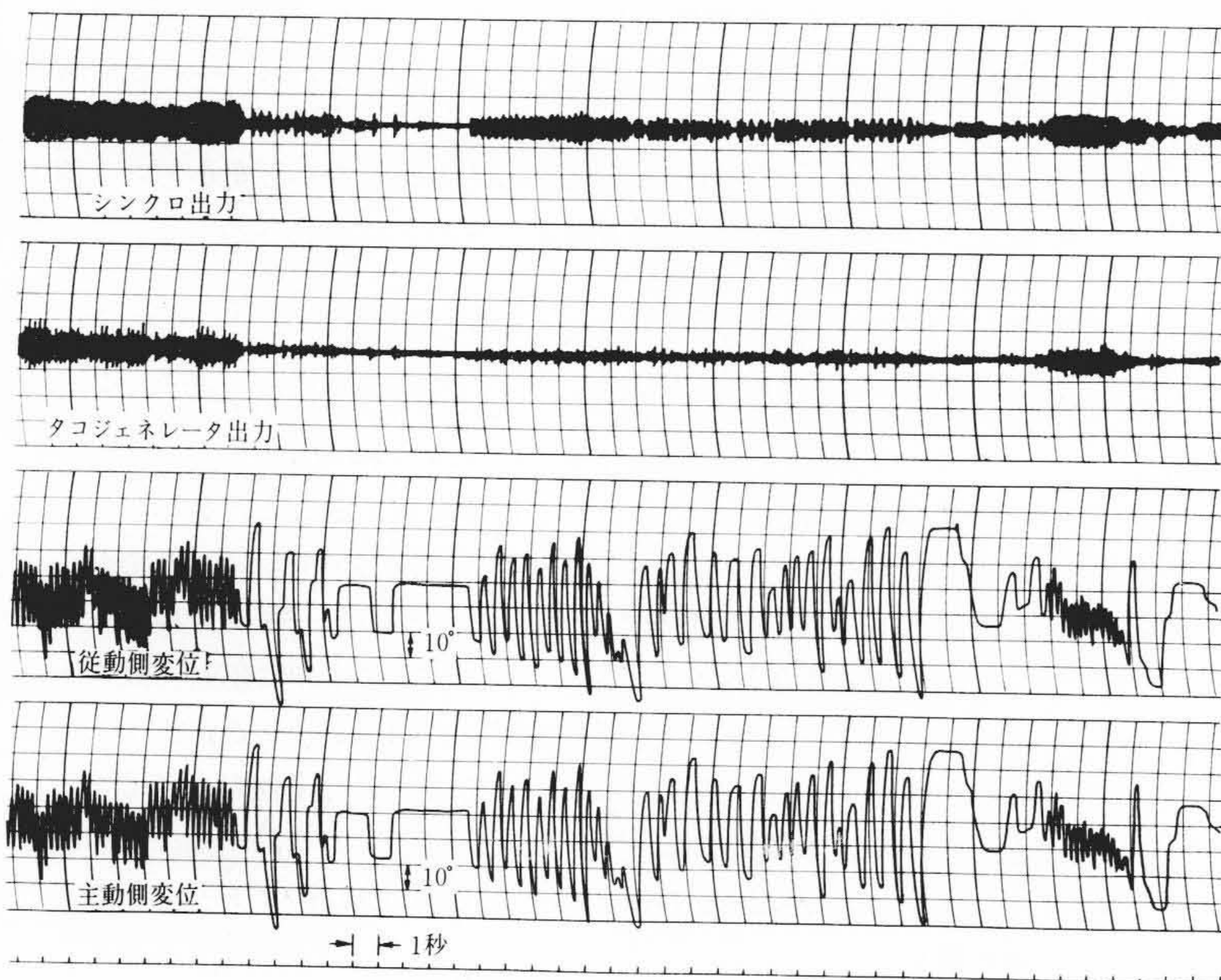
バイラテラルサーボ系の主動側出力軸を正弦波状にゆすったときの従動側出力軸の応答は、第 9 図に例示するように実用範囲に対してほとんどフラットである。またこの系の任意入力に対する応答は第 10 図のとおりであり、追従性はきわめてよい。

3.4 安定性

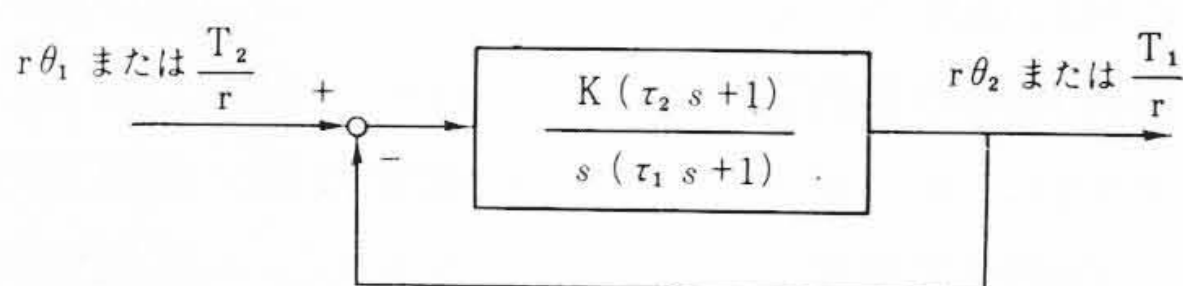
無負荷のときの変位の応答と、定常状態で従動側の負荷が変化したときの主動側での感覚の応答は、(6) 式から線形領域内でまったく同一の 2 次制御系として表現できることがわかる。この制御系は二つの時定数 τ_1 , τ_2 とループゲイン K を用いて簡略化すると第 11



第 9 図 サーボ系の周波数応答



第 10 図 サーボ系の任意入力に対する応答例



第 11 図 無負荷時の変位系および定常時のトルク系

図のようになる。ただし

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{J}{k_v}, \quad \tau_2 = -\frac{k_t}{\frac{r'}{r} k_z} \\ K &= \frac{k k_m k_z \frac{r'}{r}}{k_v} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

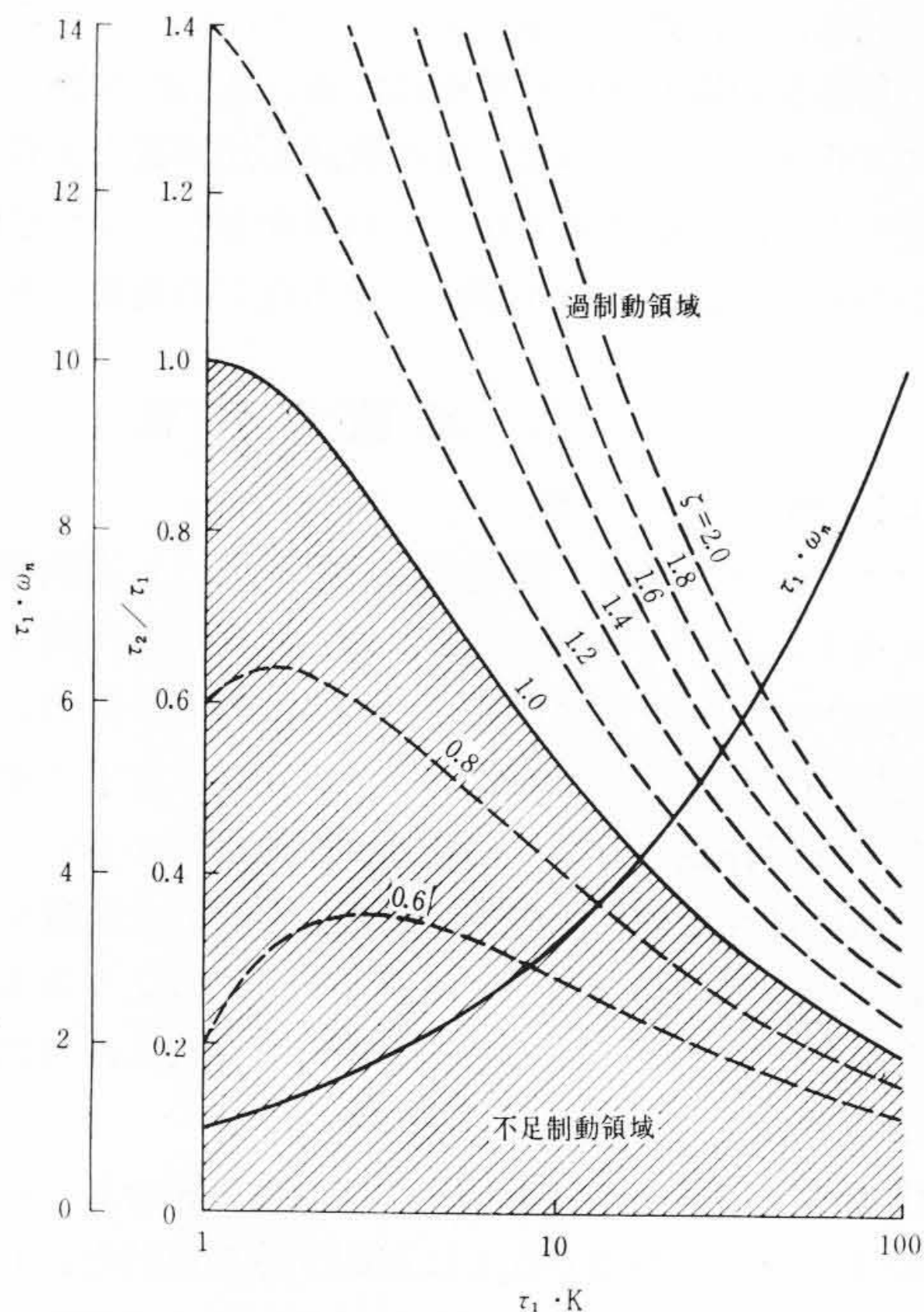
である。この 2 次系の特性方程式から減衰係数 ζ と自然周波数 ω_n は

$$\zeta = \frac{1 + \tau_2 K}{2 \sqrt{\tau_1 K}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau_1}} \dots\dots\dots (11)$$

となり、これから ζ をパラメータとした無次元数 τ_2/τ_1 と $\tau_1 K$ の関係、 $\tau_1 \omega_n$ と $\tau_1 K$ の関係を求めると第 12 図のようになる。マニプレータの変位の応答では極力行き過ぎ量を押えることが必要であり、本装置では多少過制動ぎみにして各運動で $\zeta = 1.0 \sim 1.5$ 程度に選んでいる。

3.5 その他の特性

マニプレータの主動側操作端から従動側操作端までには、多かれ少なかれ必ず機械的なガタが存在する。サーボマニプレータではガ



第 12 図 サーボ系の特性線図

タはサーボ系の不感帯であり、ガタが大き過ぎると応答特性が悪化し動的力伝達能力が低下するが、全然ガタが無くても摩擦が増したりサーボモータの微小振動（びりつき）が手首に伝わるなどの理由で好ましくない。通常歯車列のバックラッシュおよび軸受部公差だけで最大 0.2 cm のガタが必要的に存在するわけであり、本装置では歯車列以外のガタも含めて主従両側操作端の間に 0.4 cm 以内に押えたとともに、びりつき感覚を伝えないようにしている。

サーボマニプレータは本質的に効率の低い 2 相サーボモータを用いているので、これが熱源となって機構部がかなり温度上昇する。しかしその熱放散には十分の考慮を払っているので各部とも規定温度以下であり、もちろん操作端の手首部までは熱は伝わらない。

4. 結 言

今回新しく開発した全トランジスタ化制御装置をもった電動式サーボマニプレータについて概説した。本装置は力を感覚として伝達できるのみならず、主従間の関係位置が従来の機械式マニプレータに比べてまったく任意にとれるという特長を有するので、完全に密閉された遮へい室内を自由に動きまわって広い範囲の作業を行なわせることができ、高い放射線源の取り扱いを可能にする。

将来この種の遠隔操作装置は、主従間での力拡大、力縮小、運動拡大、運動縮小その他の技術開発によって、単に原子力工業や化学工業の用途だけにとどまらず、海洋科学、土木工事、精密工業、生産工業など広範囲の用途が期待される⁽⁵⁾。

終わりにのぞみ、本装置開発にあたり種々ご指導ご協力いただいた日立製作所本社、日立工場、水戸工場、中央研究所の関係各位に深じんの謝意を表わす。

参 考 文 献

- (1) 宮沢, 和世: 日立評論 45, 1967 (昭 38-12)
- (2) 江尻: 制御工学 7, 283 (昭 38-5)
- (3) 江尻, 鴨井: 計測と制御 2, 483 (昭 38-7)
- (4) 江尻, 鴨井, 和世, 宮沢: 第 6 回自動制御連合講演会前刷 247 (昭 38-10)
- (5) 江尻: 機械の研究 16, 17 (昭 39-1)