

サ　　ー　　ボ　　機　　構

大　島　康　次　郎

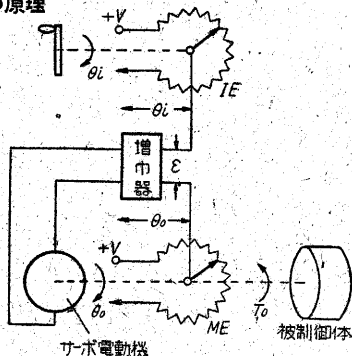
サーボとは専門外の人には耳なれない言葉であるが、自動的に船舶を操縦したり、天望望遠鏡を照準したり、工作機械を動かしたりする追従制御をさすものであり、ここではその原理、機構、応用例についてのべている。

1. 緒　　言

サーボ機構 (servomechanism) は、あるいはサーボ系 (servo system), または簡単にサーボとも呼ばれる。自動制御系を自動調節系とサーボ系とに大別する分類がよく行われる。自動調節系では、たとえば温度、壓力等のプロセス制御のように、ある量または状態を希望の一定値に保ち、また場合によつては時間的に豫定された変化をするようにすることが目的である。これに對してサーボ系では時間的に任意に與えられる入力信號を力を増幅して再現することが目的である。したがつてそれは追従制御でもある。自動制御に共通なことであるが、サーボ機構でもその出力が復原されて、それと入力との偏差に應じて作動が行われる。すなわち閉じたループを構成している。サーボ機構の嚴密な定義をすることはむずかしい。廣い意味ではたとえば“出力と入力との偏差に應じて増幅された力で自動的に作動する制御系¹⁾”とされている。しかしながら本來そのおもな対象は力学系であり、せまい意味では位置制御である。ここではせまい意味のサーボ機構だすについてのべることにする。このようなサーボの用途としてはたとえば船舶、航空機等の自動操縦、物體、裝置の遠隔操作、計器指示の遠方傳達、自動切削工作機械、計算機構、天望望遠鏡の自動照準等廣い範圍の應用が考えられる。

2. サーボ機構の原理

サーボ機構の原理を説明するため、その簡単な一例を第1圖に示す。これは入力軸の回轉 θ_i に対して慣性體をとりつけた出力軸 θ_o を追従させるサーボ系である。入力軸、出力軸ともに摺動抵抗の刷子がとりつけてあつて、軸と一緒に回轉するようになつてい



第1圖 サーボ機構の例

源に接續し、他端はアースしてある。したがつて兩刷子間の電壓は兩軸の回轉角の偏差 $\varepsilon = \theta_i - \theta_o$ に比例する。この電壓を直流増幅してその出力をサーボ電動機に加える。サーボ電動機のトルクは偏差に比例して、それを訂正する向きに生ずる。この系をブロック線圖で示すと第2圖のようにな

第2圖 サーボ機構の原理

る。圖において IE は入力變換部 (input element), ME は出力變換部 (monitoring element) で、この系ではそれぞれ入力軸、出力軸の摺動抵抗に相當し、ここで回轉角を電壓信號に變換している。 A は差動部、 A は増幅部である。この系には差動部に相當する特別の要素はなくて、兩摺動抵抗と増幅器との接續からなつてい

る。 S はサーボ電動機、 CM は被制御體である。 T_0 は出力軸に作用する妨害トルクである。このブロック線圖からわかるようにサーボ系は閉じたループを構成している。 $CM \rightarrow ME \rightarrow A$ の接續が復原である。

被制御體の慣性モーメントを J 、角速度に比例する制動力の係数を f 、偏差に比例するサーボ電動機のトルクを $\tau = k\varepsilon$ とすれば、このサーボ系の運動方程式は

$$J \frac{d^2 \theta_o}{dt^2} + f \frac{d\theta_o}{dt} = k(\theta_i - \theta_o) - T_0$$

方程式を書きなおして偏差 ε についてあらわすと

$$(J \cdot p^2 + f \cdot p + k) \varepsilon = (J \cdot p^2 + f \cdot p) \theta_i + T_0$$

ここで $p = d/dt$ である。入力軸が等速度運動をするとして、その角速度を ω_i とする。制動力によつて系は安定であり、入力軸が等速度運動をはじめてからしばらくの過渡状態のち、出力軸は入力軸と同じ角速度で回轉するようになる。しかしながら回轉角についていえば、定常状態で

$$\varepsilon_s = f \omega_i / k + T_0 / k$$

の誤差を生ずる。 $f \omega_i / k$ は速度遅れ (velocity lag), T_0 / k はトルク遅れ (torque lag) である。

速度遅れを改善するには、たとえば入力軸に回轉計發電機をとりつけ、入力軸の角速度に比例するその直流出力電壓を増幅器入力に追加すればよい。電動機トルクを $\tau = k(\varepsilon + g' \cdot p \theta_i) = k\varepsilon + g \cdot p \theta_i$

とすれば、系の運動方程式は

$$(J \cdot p^2 + f \cdot p + k) \varepsilon = [J \cdot p^2 + (f - g) \cdot p] \theta_i + T_0$$

係数 g を適当に選ぶことによって速度遅れをのぞくことができる。これに対して出力軸に回転計発電機をとりつけ電動機トルクを

$$\tau = k(\varepsilon - b' \cdot p \theta_0) = k\varepsilon - b' \cdot p \theta_0$$

とすれば、系の運動方程式は

$$J \cdot p^2 \theta_0 + (f + b) \cdot p \theta_0 = k\varepsilon - T_0$$

となつて、見掛けの制動がふえたことになり、安定をよくすることができる。しかしながらそれに相當して速度遅れが大きくなる。偏差の變化割合に比例する信号を加えて電動機トルクを

$$\tau = k\varepsilon + s \cdot p\varepsilon$$

とすれば速度遅れを大きくすることなく、安定をよくすることができる。出力軸角速度に比例する信号の向きを前の場合とは逆に加えて、速度遅れ改善に利用することもある。つぎに出力軸角加速度に比例する信号を加えると、系の見掛けの慣性をかえることができる。以上の微分動作を適当に組合わせることによって、系の安定をよくするとともに、速度遅れをのぞくことができる。

つぎに積分動作を加えてサーボ電動機のトルクを

$$\tau = k\varepsilon + a \int \varepsilon dt$$

とすれば、速度遅れ、トルク遅れ（妨害トルク一定の場合）ともにのぞくことができる。

以上はサーボ機構の原理を簡単に説明したにすぎない。理論の詳細は適當な文献^{(2)~(5)}を参照されたい。

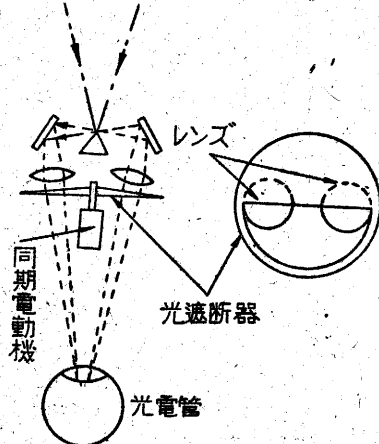
3. サーボ機構の構成要素

サーボ機構では位置偏差の検出、變換の仕方、被制御體への制御トルクの加え方にいろいろの方法が用いられている。ここではそのうちの代表的なものだけについておべる。まず偏差の検出、變換の方法としては抵抗型、光電型、容量型、誘導型等をあげることができる。

抵抗型では前述の例に示したような抵抗のブリッジ接続による方法が用いられる。また抵抗型の例としてシルバースタット (Silverstat) がある。これは抵抗に多くのタップを設けて、それを接点のついた一列にならんだ薄

い板ばねに接続する。偏差に應じた板ばねの撓みによつて、接点をつぎつぎに閉じ、それに相當して抵抗を短絡する。したがつて抵抗が偏差に應じて變ることになる。（後掲第 16 圖参照）

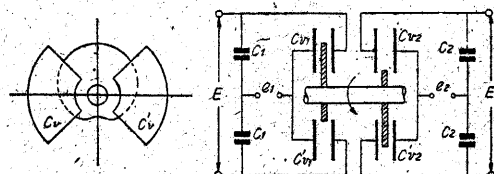
光電型はたとえば曲線自動追従の場合などに用いら



第3圖 光電型變換器の例

れる。⁽⁶⁾ 他の一例として天體望遠鏡を天體に自動的に追従させるのに用いられた方法⁽⁷⁾を第3圖に示す。上面をめぐした直角プリズムを望遠鏡の焦點面に置いて、星の光を二分する。この光は鏡によつて反射され、レンズを通つて光電管に入る。レンズ面近くに置かれた光遮断器を同期電動機によつて回轉し、二つの光を交互に遮断する。星の像がプリズムの頂點からずれると、左右で光量が不平衡となり、偏差に應じた交流が発生する。

容量型の例としては M.I.T. の微分解析機の積分機構に用いられた方法⁽⁸⁾がある。第4圖に示すように、扇形

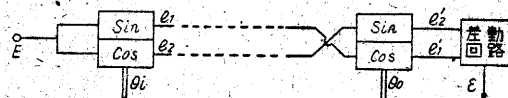


第4圖 容量型變換器の例

固定電極の間に特殊な形状の誘電體が回轉する二つの可變コンデンサ C_v , C_v' と二つの固定コンデンサ C とで容量ブリッジを形成する。入力軸にはこの二つの容量ブリッジを設け、一定の交流電圧を加える。二つのブリッジの不平衡電壓がそれぞれ

$$e_1 = kE \sin \theta_i, \quad e_2 = kE \cos \theta_i$$

の關係式を満足するように誘電體の形状が決められている。出力軸にも同じような二つの容量ブリッジを設ける。入力軸の二つのブリッジの不平衡電圧を増幅して、第5圖に示すように、出力軸の二つのブリッジに加える。したがつてその出力電圧はそれぞれ



第5圖

$$e_1' = k^2 E \sin \theta_i \cos \theta_0, \quad e_2' = k^2 E \cos \theta_i \sin \theta_0$$

となる。この電圧を適當な差動回路に入れて、その差をとりだすと

$$\varepsilon = e_1' - e_2' = k^2 E \sin (\theta_i - \theta_0)$$

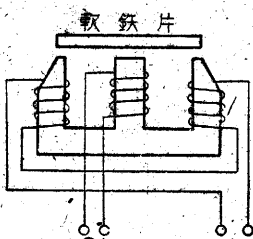
$\theta_i - \theta_0$ がサーボ機構によつて小さく保たれるならば

$$\varepsilon \approx k^2 E (\theta_i - \theta_0) = k^2 E \varepsilon$$

このようにして出力軸と入力軸との回轉角の偏差が検出される。この方法は連続的な回轉を追従するために複雑になっているが、回轉角の制限された範囲内の追従ならば、入力軸と出力軸によつて回轉される二つの可變コンデンサをふくむ交流ブリッジによつて偏差を検出することができる。

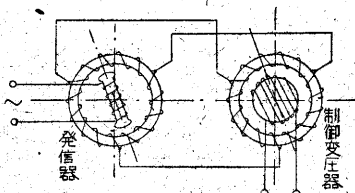
つぎに誘導型の一つに差動變壓器 (differential transformer) がある。差動變壓器には多くの種類があるが、⁽⁹⁾

その一例を第6圖に示す。圖の軟鐵片は主動體に、山型鐵心は從動體にとりつける。山型鐵心の中央巻線を交流電源によつて附勢し、左右巻線を差動的に接續しておく。平衡位置においては左右巻線の誘起電壓は相互に打消しあつて、出力端子にはなんら電壓を生じない。主動體が回轉して軟鐵片が左右いずれかに動くとき、移動した側の磁氣回路の磁束が増し、他方のそれが減るから、移動の向きと大きさに應じた位相、大きさの交流出力電壓が生ずる。反對に左右巻線を附勢して、中央巻線から出力をとりだすこともある。



第6圖 差動變壓器

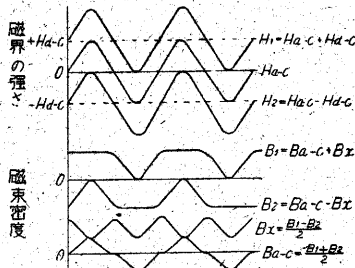
誘導型でよく用いられるのはセルシン装置の受信器を制御變壓器として使用する方法である。普通のセル



第7圖 セルシン装置

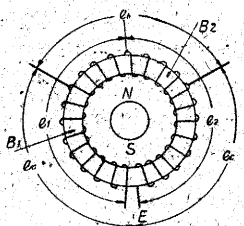
シン装置では発信器から受信器に回轉を伝えるのが目的である。これを制御變壓器として使用するには、第7圖に示すように、発信器回轉子だけを附勢し、受信器固定子に発信側の磁界を再現させる。受信器回轉子がこれと直角の位置では回轉子巻線は交番磁界と鎖交せず、なんら電壓を誘起しない。受信器回轉子がこの平衡位置からはずれると、偏差の向きと大きさに應じた交流出力電壓が生ずる。

つぎにマグネシン¹⁰⁾ (Magnesyn) についてのべよう。マグネシンは永久磁石の回轉子とパーマロイのような材料の環狀鐵心に巻線をほどこした固定子とからなっている。永久磁石の磁界は環狀鐵心の半分ずつに等しくわかれる。これを H_{1-c} とする。巻線の交流勵磁によ



第8圖 マグネシンの原理

る交番磁界を H_{a-c} とする。永久磁石の磁界の強さ H_{d-c} がパーマロイの磁化曲線の飽和部分近くにあれば磁界の強さと磁束密度との関係は第8圖のようになる。ここで H_1 , B_1 および H_2 , B_2 はそれぞれ鐵心の左半分および右半分の磁界の強さ、磁束密度である。

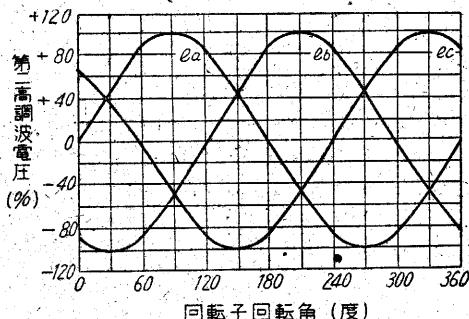


第9圖 マグネシン

H_{d-c} と同じ周波數で變る B_{d-c} とその2倍の周波數で變る B_x とからなっている。第9圖において左右半分の巻線に誘起する逆起電力 e_1, e_2 はそれぞれ

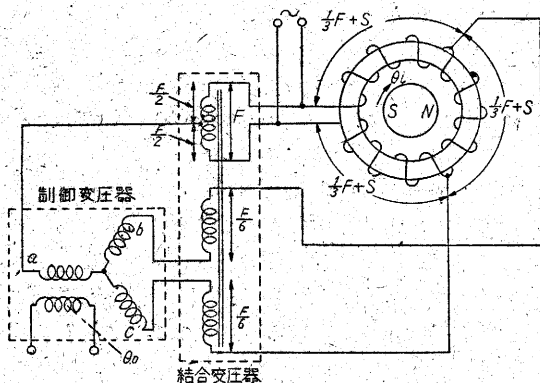
$$e_1 = \frac{E}{2} + e_x, \quad e_2 = \frac{E}{2} - e_x$$

ここで E は巻線に加えた交流電壓、 e_x は第二高調波の電壓 $(-k \frac{dB_x}{dt})$ である。圖に示すように相互に 120° はなれて巻線にタップを設けると、回轉子の回轉によつてその間の第二高調波電壓は第10圖のように變化する。



第10圖

2個のマグネシンのタップを相互に接續して、兩方の巻線に交流電壓を加えると、セルシンのように発信側の回轉を受信側に伝えることができる。マグネシンをサーボ機構の検出に用いるには、これをセルシン制御變壓器と組合せる。この場合にはマグネシンの基本波電壓を

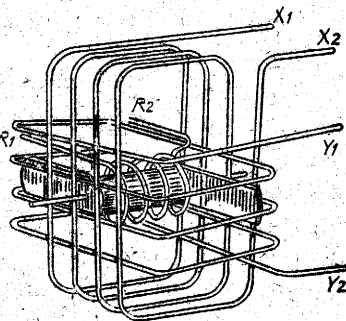


第11圖 マグネシンを検出部に用いる例

打消すために第11圖のような結合變壓器を用いる。たとえば b と c との間の電壓は

$$E_{bc} = -\frac{1}{6}F + \frac{1}{3}F + S - \frac{1}{6}F = S$$

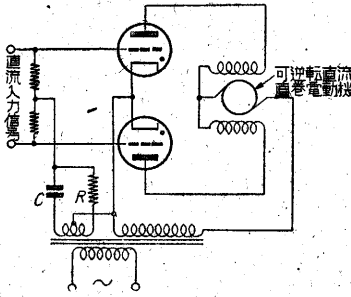
ここで F = 基本波電壓、 S = 第二高調波電壓である。



第12圖 テレゴン

・つぎにテレゴン¹¹⁾ (Telegon) についてのべる。第12圖に示すように、これは非磁性材料のコアに巻線をほどこした固定子と磁性材料でできた2枚の翼をもつた回転子とからなっている。回転子軸のまわりに固定の単相勵磁巻線がある。回転子の翼が勵磁巻線から互に直角におかれた二つの固定子巻線へ交番磁束を導く。二つの固定子巻線に誘起する起電力はそれぞれ回転子回転角の正弦および餘弦状に変化する。2個のテレゴンを接続してセルシンのように回転を伝えることができる。テレゴンをサーボ機構の検出に用いるには、これを二相セルシン制御變壓器と組合わせる。テレゴンはその回転に要するトルクが極めて微弱でむづかしいことが特徴である。

つぎに制御トルクのかねえ方についてしらべよう。よく用いられる方法に直流電動機のサイラトロン制御がある。この場合サイラトロンの格子偏倚電壓に陽極電壓より位相が $90^\circ \sim 150^\circ$ 遅れた交流電圧を用いるのが普通である。サイラトロン制御回路の一例を第13圖に示す。格子偏倚電圧を遅らせるのはCとRの回路である。直流入力信号によつて一方のサイラトロン電流がふえ、他方のそれがへる



第13圖 サイラトロンによる直流電動機の制御

から可逆轉直流巻電電動機 (split series motor) の一方の界磁が他方のそれより強くなつて、これに應じた向きに電動機のトルクが生ずる。

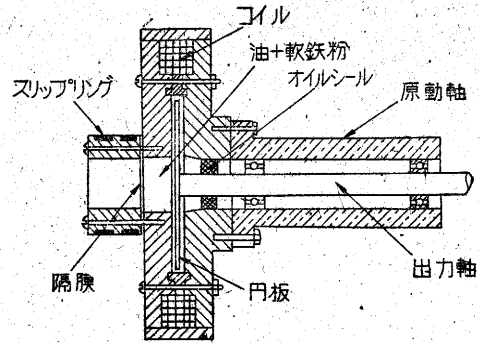
また小型のサーボ機構では真空管の出力で小型二相誘導電動機を駆動する場合が非常に多い。¹²⁾

大きな出力を必要とする場合にはワードレオナード方式あるいはアンブリダイン方式が用いられる。

つぎに電動機のリレー制御がよく用いられる。接点によつて偏差の向きを検出し、リレーによつて可逆轉直流電動機を制御すれば、オンオフ制御ではあるが、簡単にサーボ機構を構成することができる。リレー制御でも比例制御を行う方法¹³⁾がある。

サーボ機構には電磁クラッチも用いられる。これはたえず回転している電動機から摩擦または渦流による電磁力によつてトルクを伝えるのである。

最近電磁流體クラッチ¹⁴⁾¹⁵⁾ (magnetic fluid clutch) が考案され、サーボ機構に應用されている。電磁流體クラッチは、第14圖に示すように、原動軸にフランジをとりつけ、これにコイルと空隙とを設ける。コイルにはスリップリングより電流を供給する。空隙には軟鐵粉をまぜた油 (重量比で油 1, 軟鐵粉 3~6) を満たす。この油を満たした空隙の中で出力軸にとりつけた圓板が回転



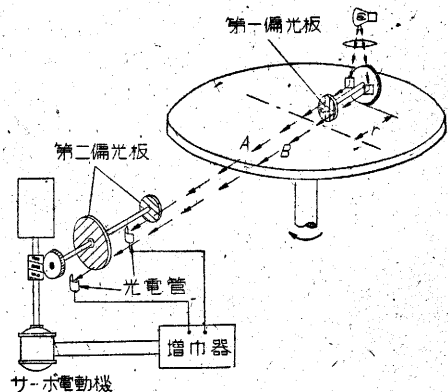
第14圖 電磁流體クラッチ

するようになってい。原動軸を電動機によつて常に一定に回転しておいて、コイルに電流を通ずると、その磁力で油の中の軟鐵粉が凝固し、その摩擦によつて出力軸にトルクを伝える。ここでトルクは電流に比例する。電磁流體クラッチをサーボ機構に應用するには、たがいに反対に回転する2個の電磁流體クラッチを用いる。

このように制御トルクを加えるのにもいろいろの方法があるから、前述の検出、變換の方法、追加信号のかねえ方と組合わせると、サーボ機構には多種多様の構成が考えられるわけである。ここでその一二の應用例について簡単にのべることにしよう。

4. サーボ機構の應用例

(1) 計算機構への應用 G.E. の微分解析機の積分機構に用いられたサーボ機構¹⁶⁾についてのべる。積分機のローラの回転力は圓板との摩擦による微弱なものであるから、これから積分値をとりだして他に伝えるにはサーボ機構が必要である。G.E. の方法は、第15a圖に示

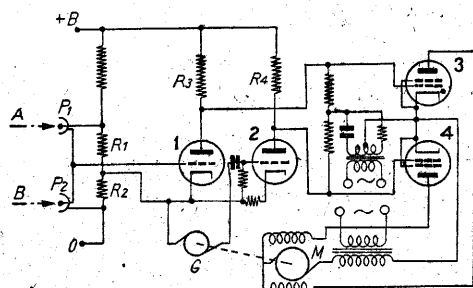


第15a圖 G.E. の微分解析機の積分機構

(a) とその回路 (b)

すように、ローラの回転軸に偏光板をとりつけ軸と一緒に回転するようにする。光源からの二つの光のビームがこの偏光板を通過して偏光される。その偏光面はローラの回転と一緒にまわる。出力軸には二つの偏光板が、その偏光面が互に直角をなすようにとりつけてある。二つの光のビームはこの二つの第二の偏光板を別々に通過して二つの光電管に入る。第一の偏光板の偏光面が二つの第

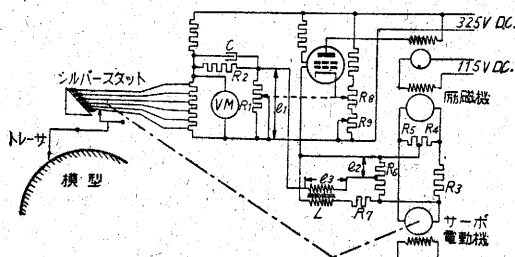
二の偏光板の偏光面を二等分する位置すなわち相互に 45° をなす位置においては両方の光電管に入る光量は等しい。ローラが回転してこの平衡位置からはずれると、二つの光電管に入る光が不平衡となり、サーボ機構が作動して、出力軸を平衡位置にもどす。このようにしてローラの回転に對して出力軸を追従させる。つぎに電気回路を第 15b 圖に示す。二つの光電管は抵抗 R_1, R_2 と



第 15b 圖

もにブリッジを構成している。その不平衡出力電圧を真空管1の格子に加える。真空管1は真空管2および抵抗 R_3, R_4 とともに第二のブリッジ回路を構成している。その出力を前述のサイラトロン制御回路に入れる。サーボ電動機の軸に回転計発電機がとりつけられ、その出力電圧がコンデンサと抵抗とに加えられる。この抵抗の端子電圧は発電機出力電圧の變化割合したがって出力軸の角加速度に近似的に比例するから、これが真空管2の格子に加えられる。

(2) 工作機械への應用 サーボ機構の工作機械への應用としては以前からケラーの型彫盤がよく知られている。最近は G.E. において光電的な曲線自動追従を利用した工作機械¹⁷⁾ やガス切断機¹⁸⁾ が考案されている。ここでは船のプロペラ翼の自動微削フライス盤¹⁹⁾ に應用されたサーボ機構²⁰⁾ についてのべよう。これは模型にならつてフライス工具の位置を自動的に制御するのである。第 16 圖に示すように模型(石膏, 木材)が回轉して、



第 16 圖 自動倣削フライス盤への應用

その上にあつてはいるトレサが動かされると、二重レバーによつてシルバースタットの機みが變化して、それに相當してシルバースタットの抵抗したがつて電壓が變化する。これに追加信號を加えたものを増幅して、ワードレオナード方式によつてサーボ電動機を駆動し、工具の位置を動かすと同時にトレサ・サドルを動かしてトレサとシルバースタットをもとの平衡位置（シルバースタット抵抗の半分短絡）にもどす。増幅器の入力は偏差とその變化割合とにそれぞれ比例した電壓の和 e_1 、出力軸の角速度に比例した電壓 e_2 、出力軸の角加速度に比例した電壓 e_3 とからなつてゐる。偏差の變化割合に比例した電壓はコンデンサー C によつて與えられる。この信號を加えたのは安定をよくするためである。抵抗 R_0 、 R_4 、 R_5 およびサーボ電動機の電機子抵抗からなるブリッジ回路は平衡してゐるから抵抗 R_0 の端子電壓は電動機の逆起電力したがつて出力軸の角速度に比例する。この一部から電壓 e_2 をとりだす。これを加えたのは速度遅れをへらすためである。電壓 e_3 をとりだす變壓器の一次回路の時定數は小さくしてあるから、一次電流は R_0 の端子電壓と位相がほぼ同じである。したがつて一次電流の變化割合に比例する二次電壓 e_3 が出力軸の角加速度に比例することになる。

文 献

- 1) Nomenclature Panel of Ministry of Supply Inter-Departmental Technical Committee on Servo-Mechanisms (英國)
- 2) McColl: Fundamental Theory of Servomechanisms (1945)
- 3) Lauer, Lesnick & Matson: Servomechanism Fundamentals (1947)
- 4) James, Nichols & Phillips: Theory of Servomechanisms (1947)
- 5) Brown & Campbell: Principles of Servomechanisms (1948)
- 6) Hazen, Jaeger & Brown: Rev. of Sci. Instr. Vol. 7 p. 353 (1936)
- 7) Whitford & Kron: Rev. of Sci. Instr. Vol. 8 p. 77 (1937)
- 8) Bush & Caldwell: J. Franklin Inst. Vol. 245 p. 255 (1945)
- 9) MacGeorge: Instruments Vol. 23 p. 613 (1950)
- 10) Blackburn: Components Handbook (1949)
- 11) 10) に同じ
- 12) Greenwood, Holdam & MacRae: Electronic Instruments (1948)
- 13) 12) に同じ
- 14) Bettis & Mann: Rev. of Sci. Instr. Vol. 20 p. 97 (1949)
- 15) Nelson: Electronics Vol. 22 p. 100 (1949)
- 16) Berry: Trans. A.I.E.E. Vol. 63 p. 195 (1944)
- 17) Berry: G.E. Rev. p. 44 (1950)
- 18) McComb: Welding Jour. p. 11 (1944)
- 19) Morton & Rutemiller: Trans. A.I.E.E. Vol. 64 p. 265 (1945)
- 20) Hanna, Osbon & Hartley: Trans. A.I.E.E. Vol. 64 p. 201 (1945)