

ステップモータ <シリーズ②>

日立製作所中央研究所* 後 藤 達 生

1. ま え が き

ステップモータとはパルス入力により一定の角度だけ回転する一種のD-A変換器である。最近工作機械をはじめ各種の制御装置において、その精度を良くし速応性を増すためにパルス技術を取り入れたデジタル制御が適用され、その出力装置として高速可逆ステップモータが広く使われつつある。

電氣的なパルス信号を一定回転角の機械的な動きに変換する方式としては外にデジタルサーボがあるが、図1(a), (b)に比較したようにフィードバックループをもつ

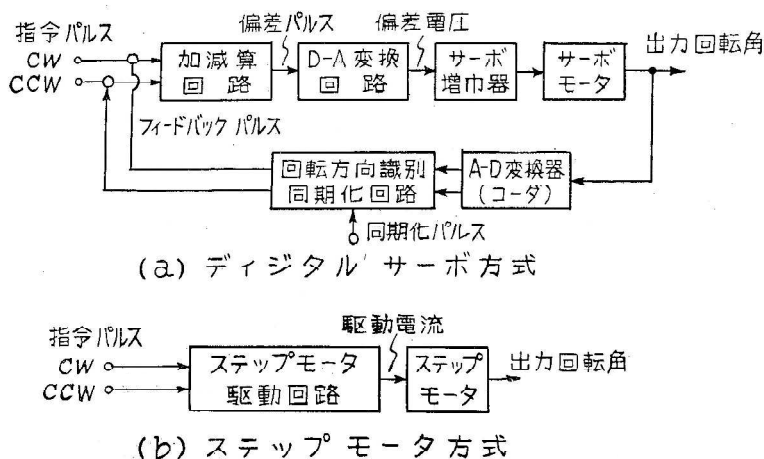


図1 D-A変換部の比較

のでかなり複雑になり、安定性速応性精度の点にも種々の問題がある。それに反しステップモータは正常に動作さえさせれば安定で精度が良く装置も簡単になる。

このような用途に使われるステップモータは高速で正逆回転でき、しかも広い周波数範囲にわたって乱調なく安定に動作しなければならない。従来機械的な逆転止め、あるいは力伝達機構をもった低速のソレノイドフタエット型とは違った色々の問題がある。モータ自体はむしろその動特性をも理解して駆動方式ならびに駆動回路素子にも十分注意を払わねばならない。

2. サーボ用ステップモータの動作原理

ステップモータはその動作原理によりソレノイドラチ

エット型と相切換え型にわけることができる。前者はソレノイドによって鉄心を吸着するときに得られる直線的な往復運動を機械的な方法で回転運動に変換するもので応答速度トルクともサーボ用としては不足である。一方相切換え型は一般に3相以上の固定子とこれに対応する凸極をもった純鉄の回転子からなり、図2に示すように励磁されている固定子磁極に最も近い回転子極が吸引され磁氣的に平衡状態をとろうとする。したがって回転子の極位置と固定子極の関係位置を少しずつずらせば固

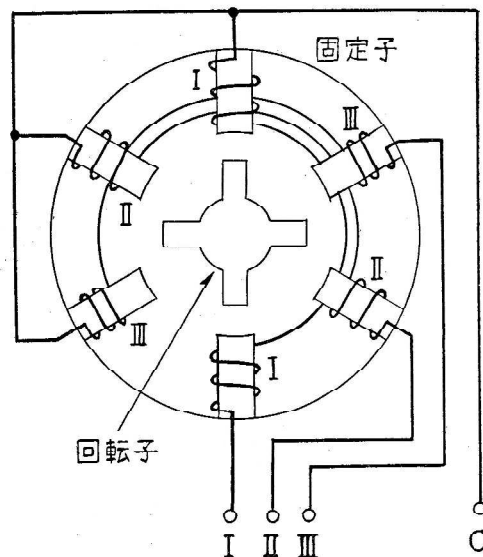


図2 相切換え型3相ステップモータの動作原理図

定子を順々に励磁することにより回転運動を得ることができる。例えば図においてI II III I...の順に励磁すれば時計方向の回転が、I III II I...の順に励磁すれば反時計方向の回転が得られる。この種のものはほとんど機械的な接触部分をもたないので相当大容量のものも可能であり、応答速度も速い。

サーボ用ステップモータは高い周波数のパルスに応答し、しかも両方向に回転できなければならない。したがって必然的にこの相切換え型の構造にして、応答を阻害する要素は全てとり去らねばならない。すなわち、

- (1) 回転子の径を小さくして慣性性能率を減らす。
- (2) 固定の起磁力を大きくとれる構造にしてトルクを増す。

* 東京都北多摩郡国分寺町大字忍ヶ窪字羽沢280

- (3) 極数を増しトルクを大きくすると共に1ステップの回転角を小さくする。
- (4) 励磁回路の二次回路効果を少なくする。
- (5) 応答を阻害しない乱調防止法を考察する。

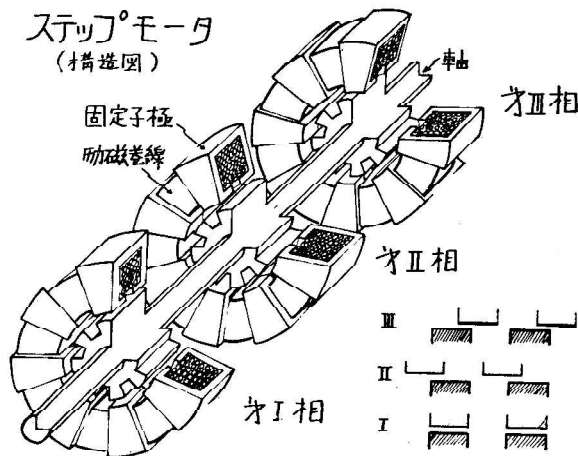


図3 サーボ用ステップモータの構造

図3はわれわれが開発した3相ステップモータの模型図で、上記の高速化の要件を満たすべく種々の工夫がされている。すなわち本ステップモータは先の分類による相切換え型ではあるが、各相の固定子回転子極群を軸方向に配置し、各相の固定子極に共通に環状の励磁線輪が巻かれている。そして各相の極の関係位置を例えば図3のごとく、回転子極は各相軸方向に一致するように配置し、固定子極の方を極幅の $\frac{1}{2}$ づつずらして配置すれば、励磁相を第I相、第III相、第II相の順に切換えることにより時計方向の回転が得られ、励磁の順序をかえることにより反時計方向の回転が得られる。

一般に ϕ 相、 p 極のこの種のステップモータの1ステップの回転角 θ_0 は

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{\phi p} \quad [\text{rad}] \quad (1)$$

静トルクの最大値 T は近似的に

$$T = \frac{1}{2} U_g^2 \frac{dP}{d\theta} = \frac{1}{\mu_0} g b \gamma B_g^2 (1-q) \quad (2)$$

但し U_g : 空隙における起磁力

P : 磁路のパーミアンス

g : 空隙長

b : 極幅

γ : 回転子極半径

B_g : 磁束密度

q : 漏洩係数 $2g/b + 2g/h$ (h : 極厚)

で表わされる。実際には隣りの極からの逆向のトルク、ならびに磁極の飽和、尖端効果のために励磁巻線の一相のみに電流を流して回転子極と固定子極の相互位置とトルクの間係をとった静トルク特性は山形になる。図4は3相20極（1ステップ 6° ）のステップモータの静トルク

特性を実測した結果である。

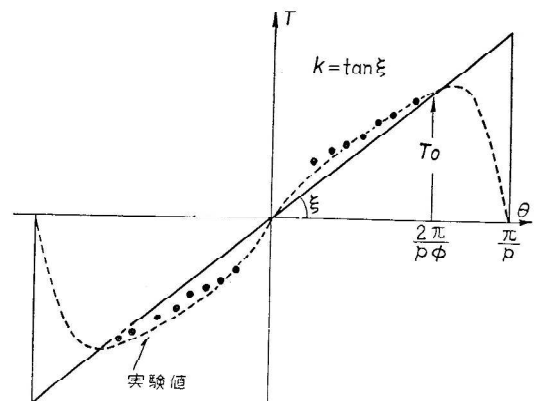


図4 ϕ 相 P 極ステップモータの静トルク特性

3. ステップモータの動特性 ならびに駆動方式

簡単のためにステップモータの静トルク特性を線形近似し、巻線の時定数をはじめ電気磁気的なおくれを全て省略するとステップモータのブロック線図は図5のごと

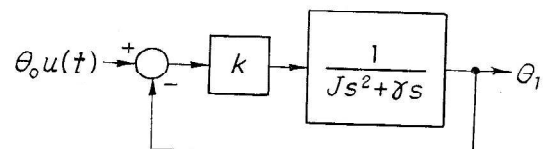


図5 線形化したステップモータのブロック線図

く表わされる。そしてこれより伝達関数として

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3)$$

$$\text{但し} \quad \zeta = \frac{\gamma}{2\sqrt{Jk}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (4)$$

J : 回転子の慣性性能率

γ : 摩擦抵抗

k : トルク係数

したがって1ステップ入力に対する応答は

$$\theta_1(t) = \theta_0 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} t + \varphi) \right] \quad (5)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \quad (6)$$

すなわち2次系の応答になる。実際にはこの種の高速ステップモータでは巻線の時定数をも考慮しなければならないが詳細は文献^{[1][2][3])}を参照されたい。図6は3相ステップモータを1相励磁方式によって駆動した場合のインディシャル応答（1ステップする場合の回転角の過渡的応答波形）の実測結果で、極めて振動的であることがわかる。したがって指令パルスの周波数をあげていくとこの振動のために逆戻りや、行過ぎが起り、いわゆるステップモータの乱調現象が生じる。筆者はすでにステップ

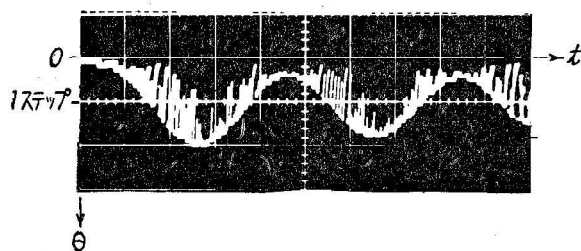


図6 ステップモータのインディシャル応答
(1相励磁方式)

モータの2ステップ応答を解析することにより乱調の原因を明確にし、乱調なく安定に動作するための安定動作条件を導いたが⁶⁾、ここでは簡単に乱調防止法を説明すると

- (a) 機械的な摩擦、電磁的な制動をあたえ、インディシャル応答の減衰をきかせる。
- (b) 振動振幅に対し安定動作角範囲を大きくする(例えば相数を増す)。
- (c) 駆動方式により制動をかける(ポジカスト補償⁵⁾)
- (d) 2相可逆ステップモータ

などが考えられる。(a)の方法は最も簡単で手軽ゆえソレノイドラatchet型のステップモータ、あるいは一方向回転ステップモータに広く採用されている。歯止め、クラッチ、ダンパ巻線、粘性ダンパ等種々のものがあるが、一般に応答特性を阻害すること、摩擦、温度変化により特性のかわること等の欠点がある。(b)の方法は応答を害さないでサーボ用ステップモータには好適である。ただトルク慣性比、工作上の制約でむやみに相数を多くすることはできない。(c)の方法は駆動方式によってポジカスト補償するもので、減衰のきいた応答をうることができるが、外乱特に負荷変動の影響をうけやすい欠点がある。(d)は更にこれを進めて相数を2相にし慣性率を最少にすると共に、駆動回路との協調をとることによって安定な可逆回転を得ようとするもので詳細は後に説明する。

さてここで3相ステップモータの駆動方式について簡単に説明すると、3相励磁巻線の電流をオン、オフする組み合わせにより得られる3つないしそれ以上の安定点を入力パルスに応じ順次たどるように駆動回路の論理を構成すれば良い。

(1) 1相励磁方式

3相のうちの1相づつ励磁したときに得られる3つの安定点を順次たどるもので、最も簡単な駆動方式であるが、図6に示したインディシャル応答からもわかるように極めて振動的で方々に乱調領域が表れる。第7図は本駆動方式による許容摩擦負荷特性で、可変周波数のない方はほとんどできないが単一周波数の入力パルスにより駆動する位置決め等には十分使用できる。

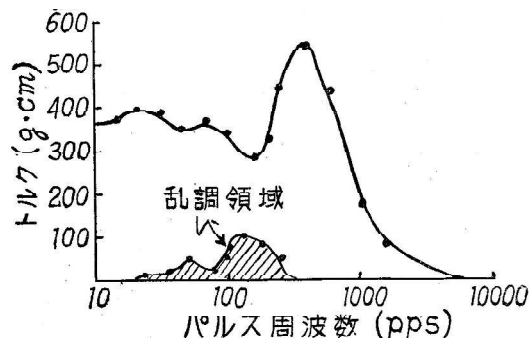


図7 1相励磁方式による許容摩擦負荷特性

(2) 2相励磁方式

3相のうちの適当な2相を組合わせて同時に励磁したときに得られる3つの安定点をステップする駆動方式で1相励磁方式同様駆動回路は簡単である。印加起磁力が2倍になるためにトルクが増し、励磁相の制動効果のためにその応答は1相励磁方式よりも良くなるが、本駆動方式の安定点が異なる2つの安定点をもつトルク特性の差によってできているので、図8に示すごとく例えばI・II相励磁の安定点 A_1 と A_2 の間に A' というトルクは小さいが別の安定点ができることがある。負荷を増したときにはこのために乱調になることが多い。

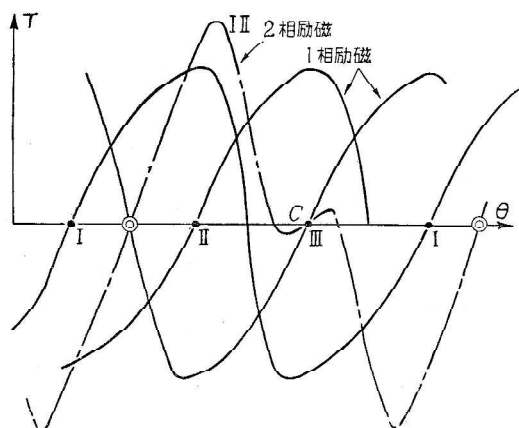


図8 1相励磁と2相励磁駆動方式
における静トルク特性の比較

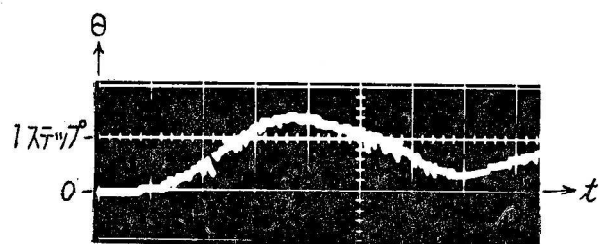
(3) 1・2励磁方式⁶⁾

上記の1相励磁方式と2相励磁方式を交互に行い、6つの安定点をステップするもので、1ステップの回転角は半分になるが乱調領域がほとんどなくなる。しかしながらステップモータにくわえられるパルスが等間隔でない場合にはやはり乱調周波数領域が現れる。

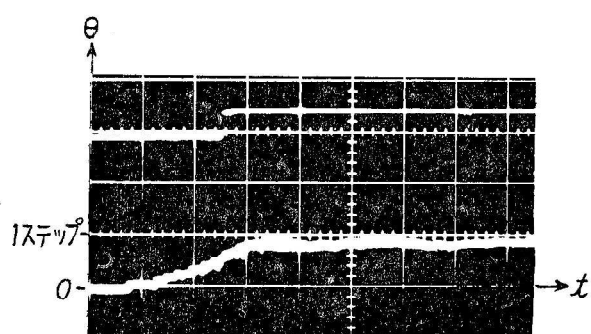
(4) 切換え励磁方式⁷⁾

1パルス入力に対し上記1・2励磁方式の2ステップ分を適当な時間切換えでステップさせるもので、ポジカスト補償されるように切換え時間を設定しておけば良い応答が得られる。図9(a)は2相励磁方式、(b)は本切換え励磁方式により駆動した場合のインディシャル応答であ

る。ただ本駆動方式は駆動回路中に切換え時間設定用回路を含むので、これにより最高応答周波数が制限されること、負荷変動により切換え時間の最適値が変わること等の欠点がある。



(a) 2相励磁方式



(b) 切換え励磁方式

図9 インディシャル応答の改善例

(5) 等価12相駆動方式⁸⁾

第3図に示したようにサーボ用3相ステップモータの巻線は分割励磁が容易に行える。したがって隣接する二相の励磁起磁力の比および励磁すべき相の選択を制御することにより構造上の相数は増すことなく、実効的には12相の如く動作せしめ応答を速くし乱調のない安定なステップモータの駆動方式を得ることができる。

具体的には各相巻線を主巻線と補助巻線とにわけ、流す電流の方向を逆にしておけば比較的簡単な論理回路により相異なる12の安定点をステップさせることができる。詳細は省略するが本駆動方式によると、許容摩擦負荷特性は図10のごとく非常にめづるべきで、いかなるパルス密度分布の指令パルスに対しても乱調領域は存在しない。

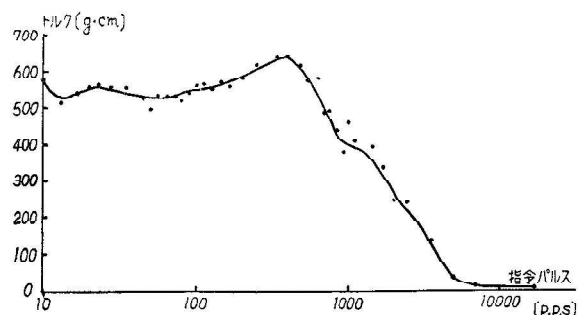


図10 連続応動周波数と許容摩擦負荷トルク

4. 2相可逆ステップモータ⁹⁾

本ステップモータの構造としては例えば図3における1相分の固定子回転子極群を取り除いたものを考えれば良い。そして極の関係位置は図11に示すようにI相とII相で半ピッチだけずらされている。したがってI II相を同時に励磁した場合、I相の回転子極に働く半時計方向のトルクとII相に作用する時計方向のトルクが平衡して

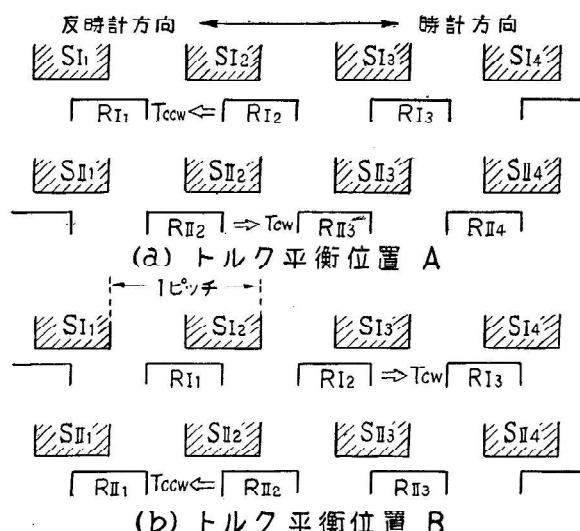


図11 二相ステップモータの固定子回転子極の配置

図11(a)のごとく停止する。この状態でI相の励磁をオフにすれば、トルクの平衡がくずれ回転子は時計方向へ回転し始め固定子と丁度重り合う位置を通り越して同図(b)の位置までくる。この瞬間に再びI相励磁をオンにすればその位置がそのまま新しいトルク平衡点になるので減衰のきいたステップ応答を得ることができる。図12は2

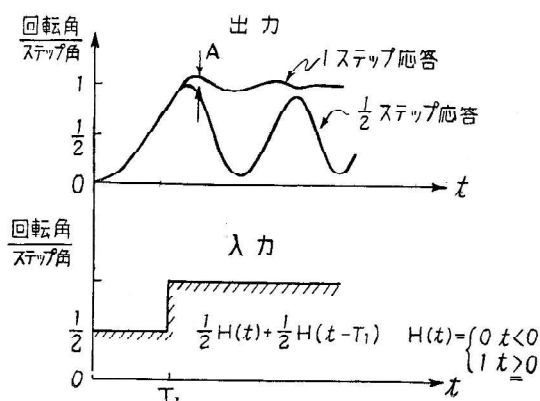


図12 二相ステップモータのインディシャル応答

相ステップモータの応答波形の入出力関係を示しており、ほとんど振動をなくすることができる。連続して与えられる指令パルスに対しては、I相II相を交互に一定時間(T_1) オンにすれば回転する。また同じ相を二度続

けてオフにすれば回転方向をかえることができる。このような論理を実現する駆動回路は極めて簡単で本ステップモータの大きな特徴の一つとつづている。外にモータ自体が小型になること、トルク慣性比の増すこと、乱調領域のないこと等数々の長所をもっている。図13は本2相ステップモータの許容摩擦負荷特性である。図14はこの2相ステップモータを使って構成した数値制御用D—A変換器で、毎秒500パルスまでの全周波数領域にわたって安定に動作する。

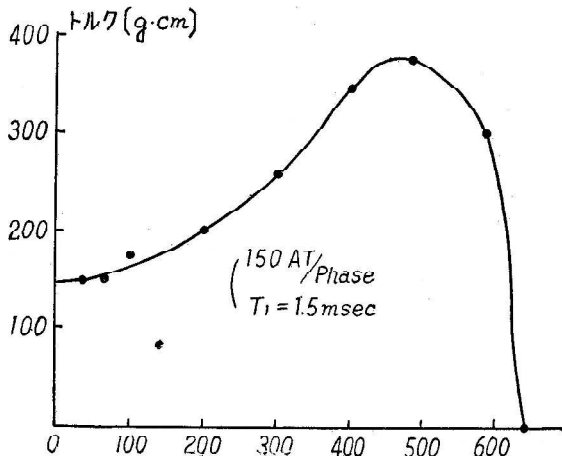


図13 入力周波数 (PPS) 許容摩擦負荷特性

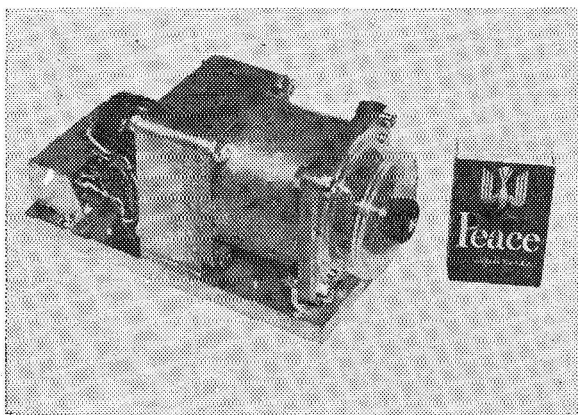


図14 2相可逆ステップモータによるD—A変換器

5. ステップモータの応用面

ステップモータの開発が進むに従い、その応用面も相当広範囲に及んでいる。主なものだけでも、

- a) 各種数値制御用D—A変換器
- b) 電子計算機出力装置としてのデジタルプロッタ
- c) プレータローグ関係におけるスキャナ
- d) 紙送り装置等における同期運転
- e) 広範囲連続変速機構 (Electrical gear system)
- f) その他パルスカウンタ並にその標示装置

等々で、それぞれの用途に対しどのステップモータが適しており、どのような駆動方式を採用すべきかがわか

る。すなわち所要トルク、負荷の慣性モーメント、所要停止点精度、回転方向、所要起動最高パルス周波数、指令パルスの周波数範囲、指令パルスの密度分布の均一度、電源、周囲条件等を考慮して最も安価で簡単なものを採用すべきであろう。

例えば軽負荷で500 (PPS) 程度までの連続変速を要する用途に対しては、上述の2相可逆ステップモータが適しており、負荷がかなり大きく単一周波数で動作させる用途に対しては、3相ステップモータの1相励磁方式で十分である。また工作機械の数値制御におけるように、起動周波数、連続動作周波数共に高くしかも不均一パルス密度の指令パルスに対しても全周波数領域にわたって安定に動作することが要求される用途に対しては、少々装置の規損は大きくなっても、上述した等価12相駆動方式のようなものを採用すべきかもしれない。

6. あとがき

主としてサーボ用高速ステップモータについて、その構造的な特徴を説明し、駆動方式で注意すべき点を指摘した。

最近の情報処理、データ伝送の技術がますますデジタル化されつつあるすう勢に鑑み、これらの装置と駆動部の連結をステップモータによって有効適切に行われるなら、全装置の信頼度の向上、原価低減に少なからず寄与するものと思う。最後に終始御指導いただいている当所須藤部長に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 後藤, 須藤; ステップモータの動特性について
自動制御連合 235 (昭35)
- 2) 池辺; パルスモータのインディシャル応答について
自動制御連合 251 (昭36)
- 3) 西村, 爪生; ステップモータのインディシャル応答
自動制御連合 270 (昭37)
- 4) 後藤, 須藤; ステップモータの安定動作条件
電気四学会連合 285 (昭37)
- 5) O. J. M. SMITH; Feedback Control Systems
P331 McGRAW-HILL (1958)
- 6) 伊藤, 土屋; ステップモータの駆動法
電気東京支部 (昭35)
- 7) 大島, 江川, 有川; 高速ステップモータ
自動制御連合 258 (昭34)
- 8) 後藤; 3相ステップモータの駆動方式
自動制御連合 269 (昭37)
- 9) 後藤; 2相可逆ステップモータ
計測と制御 Vol. 2 No1