

# デジタル定値制御装置

## Digital Compensation Controller

白石久敬\* 井手寿之\* 井原広一\*  
Hisayoshi Shiraiishi Jushi Ide Hirokazu Ihara

### 要 旨

最近のアナログ制御装置は電子技術、特に半導体回路技術の採用により、性能の著しい向上がはかられてきたが、これに伴い従来さほど問題とされなかった外乱、長時間の安定性などが問題にされるようになってきた。本稿ではこの種の安定性に及ぼす外乱の性質につき考察を行ない、その解決法の一つとしてデジタル技術を併用した制御方法を提案し、いくつかの実例により具体的な方法を説明している。またデジタル技術を併用することによる他の利点、たとえば装置の起動時間の短縮などについても言及している。

### 1. 緒 言

最近のアナログ制御装置は、半導体を用いた増幅器の使用、サイリスタ駆動方式の採用などにより非常に高度化し、制御系に要求される精度、安定度もますます高まる傾向にある。このため従来さほど問題とならなかった外乱、制御機器の長時間安定性などが問題となってきた。この傾向は特に定値制御系において顕著である。本稿ではまず定値制御系におけるこの種外乱について検討し、従来のアナログ技術のみの制御系では補償しきれないことを明らかにし、問題の解決方法として従来のアナログ系にデジタル補償回路を組み合わせた新しい制御方法を提案する。つぎに実際の応用例について説明を行ない、さらに関連する複数系の制御対象を扱う場合のシステム構成法についても言及する。

### 2. 制御系の外乱とデジタル補償

一般に自動制御系は使用目的により定値制御系と追値制御系とに大別されるが、本文では定値制御系を対象として、系にはいる外乱ならびにその補償方法を検討する。

#### 2.1 制御基本方程式

基本的な自動制御系のブロック図を図1に示す。このブロック図より自動制御系の基本式を導くと次のようになる。すなわち制御量  $C(S)$  は、

$$C(S) = \frac{G(S)R(S) + Y(S)D(S)}{1 + H(S)G(S)} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで  $Y(S), H(S), G(S)$  はおのおの独立で外乱、フィードバック系ならびに前向の伝達関数であり、 $R(S)$  は目標値である。 $D(S)$  は外乱で、たとえば御制対象の過渡的な負荷変動である。この外乱により生ずる誤差  $C_D(S)$  は、

$$C_D(S) = \frac{Y(S)D(S)}{1 + H(S)G(S)} \dots\dots\dots (2)$$

となり系のループ利得を大きくすることにより(系の安定性を損うことのない範囲で)きわめて小さくすることが可能である。ところで、上述の過渡的な外乱のほか定常的な外乱または長時間にわたって少しずつ生ずる外乱、たとえばアナログ御制系における目標値のドリフト、フィードバック系における検出器の非直線性、温度経時変化ドリフトなどにより生ずる外乱が考えられるが、これについては図1のブロック図では表現されていない。前述の  $D(S)$  を第1種の外乱  $D_1(S)$  とするならばこの外乱は第2種の外乱  $D_2(S)$  ということができる。

#### 2.2 第2種外乱の性質と補償

つぎに第2種外乱について検討する。前節に述べたようにこの外

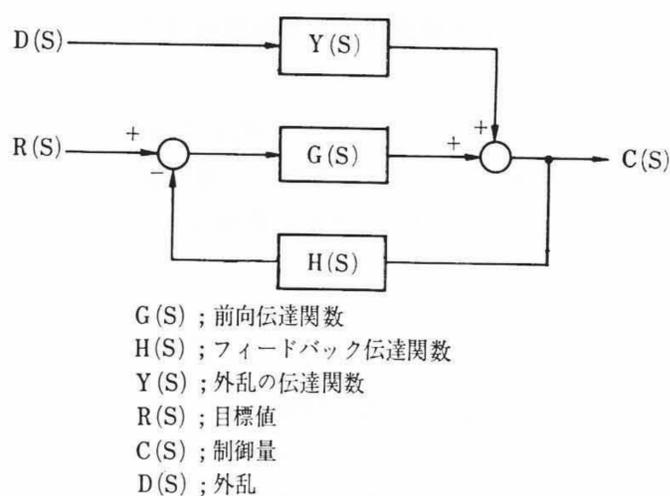


図1 定値制御系ブロックダイアグラム

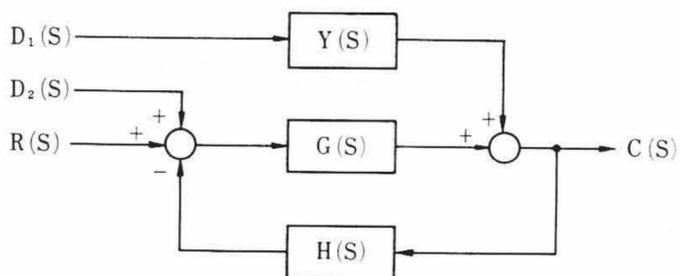


図2 第2種外乱を考慮した定値制御系のブロックダイアグラム

乱は図1のブロックにおけるフィードバック系では補償ができないので目標値  $R(S)$  の変化分としておきかえることが可能である。これを考慮したブロック図を図2に示す。第2種の外乱による誤差  $C_{D_2}(S)$  は、下式で与えられる。

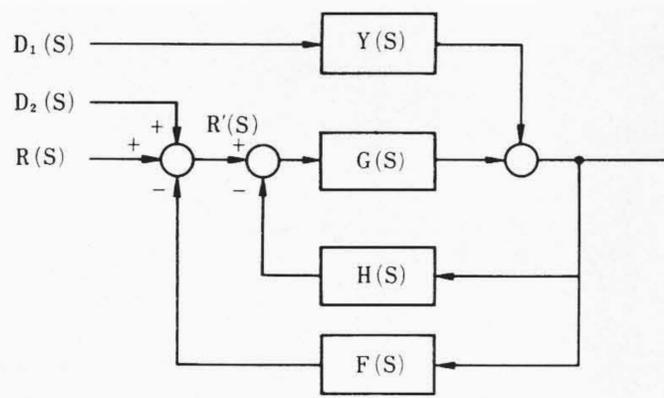
$$C_{D_2}(S) = \frac{G(S)D_2(S)}{1 + H(S)G(S)} \dots\dots\dots (3)$$

この第2種外乱に対する補償のためには新たなフィードバック系を設けて目標値の修正を行なうことが考えられる。一般にこの第2種の外乱は、(1) 検出器の非直線性のように一意的に定まり、(2) 負荷変動のように外乱の変化が瞬時的でない、この目標値修正のためのフィードバック系は(1) 応答の早い必要がない。(2) この補償がない場合の偏差値を高精度に検出しなければならない。(3) このためにはアナログ系の目標値よりさらに精度の高い目標値を新たにもったものであることが必要である。

この要求を満たす補償系は図3に示すブロックとなり、この場合には、長時間にわたっての御制は図3の補償系にある高精度の目標値により行なわれ、瞬時の御制は  $R'(S)$  により行なわれる。

この種の補償系を実際に構成するにはアナログ系のみでは不可能でデジタル技術を導入することが必要となる。

\* 日立製作所日立工場



F(S) ; D<sub>2</sub>(S) 補償のループ  
他は第1図に同じ

図3 第2種外乱に補償を施した定値制御系のブロックダイアグラム

### 3. 第2種外乱のデジタル補償

デジタル補償方式は系に加わる外乱の大きさをデジタル量で正確に検出し、外乱の影響を打ち消すように外乱と逆位相の信号を目標値に加えるものである。外乱の大きさを検出するためには、外乱のない場合の信号と外乱の存在する場合の信号とを比較すればよいが、アナログ量による目標の変動をも補償するためには御制系の目標値をデジタル的に与えて外乱検出の目標値とすることが必要となる。図4は本方式の原理図である。以下図4に従って説明する。

外乱  $D_2$  の加わった目標値  $R$  をサンプリングにより検出し A-D 変換器 AD によりデジタル量  $R^*$  に変換する。 $R^*$  と目標値  $N_0$  との偏差を  $\Delta$  により検出すれば偏差  $\Delta = R_0^* - N_0$  は正確に外乱の影響分となる。(ただし A-D 変換器の精度は十分高いことが必要) このデジタル偏差値を D-A 変換器 DA を介して逆位相でアナログ目標値に加えてやれば外乱  $D_2$  は相殺されて等価的には外乱の加わらない場合と等しいものとなる。

本補償系の精度は A-D 変換器、D-A 変換器により左右されるが、D-A 変換は偏差値  $\Delta$  に対して行なうもので補償部分  $\Delta$  が全体の目標値に対して 1/10 またはそれ以下となるから(本補償系を含めぬ系の精度が 1% であれば、このデジタルの補償は高々数% でよい。) D-A 変換器の誤差の影響はきわめて小さなものとなる。したがって本補償系の精度はおもに A-D 変換器のそれにより決まってくる。A-D 変換器の例としては速度制御系における回転数に比例したパルスジェネレータとそのパルスを一定時間計数する装置がある。この場合パルス数の精度はきわめて高く、カウントする時間 ( $T$ ) を長くすることにより A-D 変換器の分解能は良くなるから精度はサンプル時間を決定するゲート時間の精度に依存することになる。実際にはゲート発生器の基準信号として水晶発振器を用いるならば、アナログ系のみ偏差検出より約 2 けた程度精度のよい誤差検出は容易に実現できる。

### 4. デジタル補償の実際

以上の考察より開発されたデジタル補償方式の具体例について紹介する。これらはすでに製品化し、実際に稼動しているものである。

#### 4.1 単一系の定値制御

図5に定値速度制御系のデジタル補償方式(以下これを DASR という)のブロック図を示す。以下ブロック図により動作を説明する。この制御系の御制対象は回転機で回転速度をあらかじめ定めた速度になるよう御制するものである。主御制系はアナログ要素で構成され、アナログ基準値の変動、系に含まれる非直線性素子の補償を図5のデジタルループにより行っている。手動により設定した

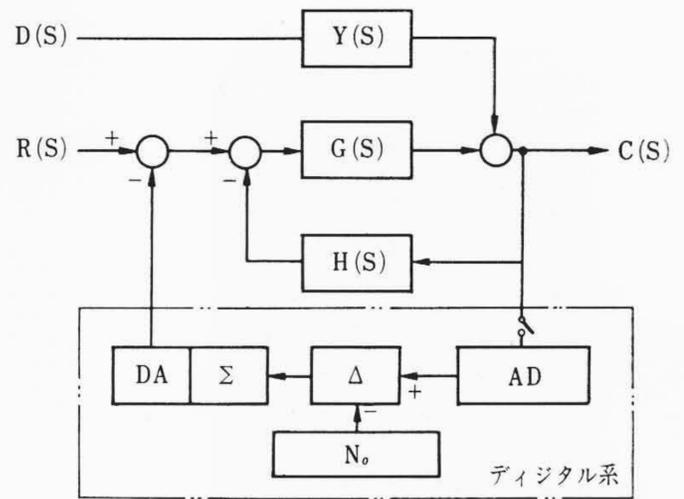


図4 デジタル制御系ブロックダイアグラム

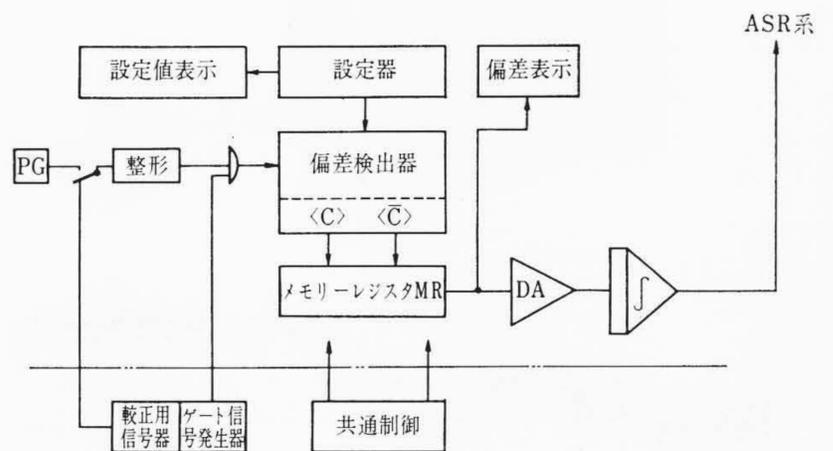


図5 DASR ブロックダイアグラム

デジタル設定値を偏差検出器にプリセットし、回転機に直結しているパルスジェネレータ (PG) からのパルス信号を整形同期化して偏差検出器に導き、ある定まった時間そのパルス信号をカウントし、プリセット値との差を検出する。この偏差値をメモリーレジスタに移し D-A 変換器を介して積分器に加える。積分器の出力は、その時点までの偏差値の累積されたものとなり、この補償ループがない場合の誤差を示すからこれをアナログ系の基準値の補正に使用することにより高精度の御制が実現されるのである。なお、偏差の正負判定およびあらかじめ定められた偏差の限界を越えているか否かの監視はカウント中に行なわれる。

つぎにこの系の全体の精度(静特性)を考えてみる。

$N_0$ : サンプリング中のパルス数(御制対象の速度を  $V_0$  とする。)

$n_0$ : デジタル系で補償する限界値

$\eta_{DA}$ : DA変換器のフルスケールに対する精度

$\eta_t$ : サンプリング時間の精度

とすると御制対象の速度が  $V$  の場合には静的な御制誤差  $\epsilon$  は次式で与えられる。

$$\epsilon = \eta_t + \frac{1}{V \cdot N_0} + \frac{n_0}{V \cdot N_0} \cdot \eta_{DA} \quad \dots \dots \dots (4)$$

たとえば  $V=100 \text{ m/min}$  のときのパルス  $10^4$  パルス/秒

$$n_0 = 100$$

$$\eta_t = 5 \times 10^{-5}$$

$$\eta_{DA} = 0.002 = 0.2\%$$

の場合には

$$\epsilon = 5 \times 10^{-5} + 10^{-4} + 0.002/10^4 = 17 \times 10^{-5} = 0.017\% \quad \dots (5)$$

となりアナログ要素のみで構成された制御系の長時間特性がたかたか 0.5% 止まりであることに比べて、1 けた程度の改善された安定度を期待することができる。

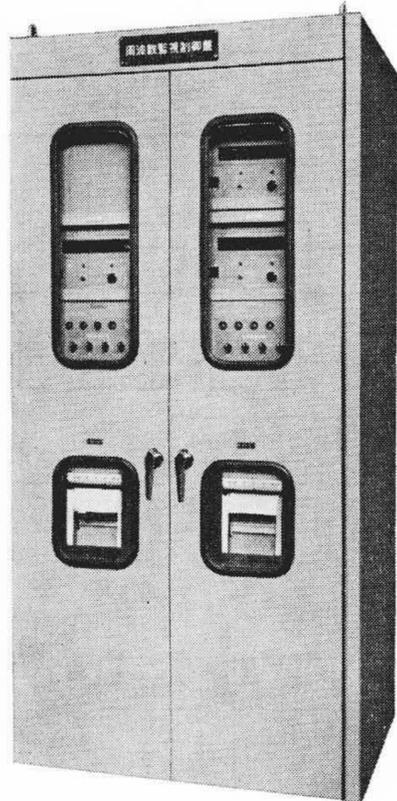
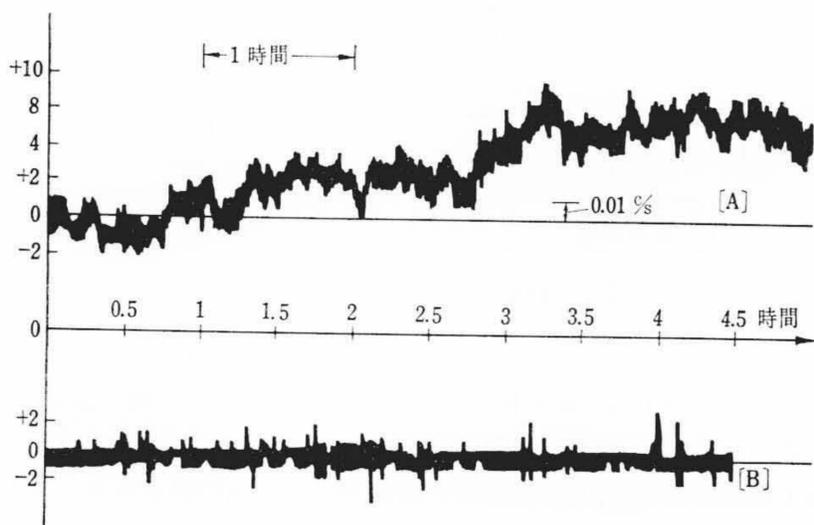


図6(a) 単一系 DASR 装置



[A] アナログ系のみ単独運転 52.90%  
[B] DASR補正時の運転 52.90%

図6(b) 単一系 DASR の性能

4.1.2 単一系の定値制御の実例

前節で説明した DASR の原理を定周波電源装置に応用した例について紹介する。本装置は某社に納入後、すでに2年近い稼働実績をもっている。装置の概要を下記する。

- (1) 主アナログ制御系：演算磁気増幅器 (MAGOPE®)
- (2) 制御方式：ワードレオナード方式
- (3) アナログ短時間精度：0.05%
- (4) アナログ長時間精度：0.5%程度
- (5) 電源周波数 (出力)：10.00 c/s~80.00 c/s

本装置に用いた DASR 装置の外観を図6(a)に示す。DASR 装置は完全に密べいされ標準ユニット化しており、図6(a)は2組の DASR 装置と運転記録装置を収容している。使用した DASR の諸定数は次のとおりである。

- (1) パルス発振器：200パルス/回転
- (2) サンプリング時間：3秒間
- (3) サンプリングゲート精度： $\pm 5 \times 10^{-5}$
- (4) サンプリング周期：3秒
- (5) D-A変換器精度：0.1%
- (6) 補償限界値： $\pm 25$  (パルス)

以上により(4)式から DASR の御制誤差を算定すれば、

主機回転数 80 c/s のとき  $9 \times 10^{-5} \sim 0.01\%$   
10 c/s のとき  $22 \times 10^{-5} \sim 0.02\%$

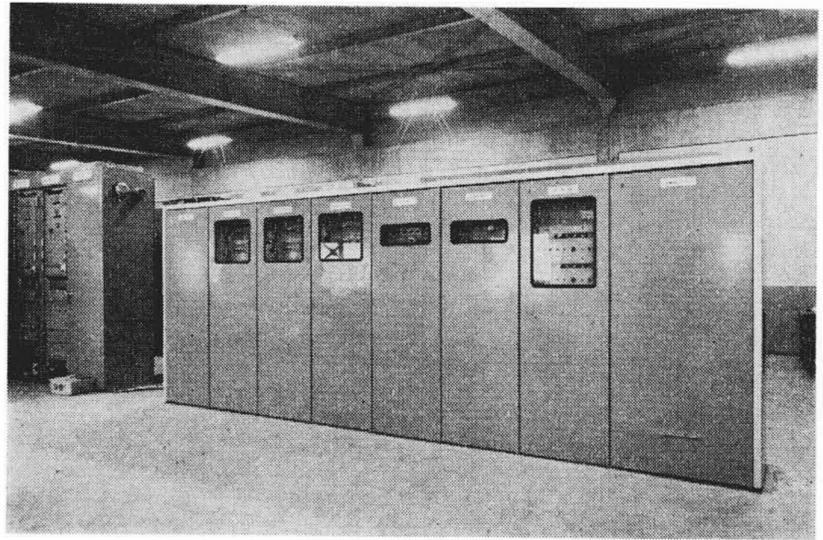


図7 抄紙機ロー制御用 DASR 装置全体図

となり、最悪の場合でも、0.02は確保できる設計となっている。

図6(b)は本装置の運転記録の1例であるが、この記録からもわかるとおり、DASR のはいた系の長時間精度は、アナログ系のみ比べて1/6~1/8程度改善されていることがわかる。またこの種の御制系では、温度ドリフトなどの影響により定常運転にはいるのに数時間を要するのであるが、起動後直ちに DASR 系を投入すれば、過度的な温度ドリフトなども吸収できるので、きわめて短時間のうちに、定常運転へ移行せしめることができた。

4.2 複数の定値制御系における例

圧延機、抄紙機などにおいては複数の回転機をあらかじめ定められた関係で制御することが要求される。特に最近では各セクションを個々に御制する純電氣的なセクショナルドライブ方式が採用される傾向にあるが、この場合にも各セクションを高精度に長時間にわたって御制するためにはデジタル補償が有効である。このような複数の系を御制する場合には(1)基準になる系の目標値(基準になる系は1個とは限らない)と(2)各セクションと基準になる系との関係を規定するもの  $D_{io}$  とが必要である。相互の関係を規定する量  $D_{io}$  はたとえば、次式で定義される。

$$D_{io} = \frac{N_{io} - N_o}{N_o} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $N_{io}$ ：第*i*セクション目標速度

$N_o$ ：基準セクションの目標速度

多くの関連ある目標値が与えられた場合の御制システムの構成にはいくつかの方法が考えられるが、ここでは次に述べる二つの方法について紹介する。

4.2.1 各セクションを直接目標回転数で制御するシステム

システムのブロック図を図8に示す。図8中の各 DASR の内容は前節の単一系におけるデジタル補償ループと同一である。このシステムには、基準制御系の速度  $N_o$  とその基準に対する各セクションの  $D_{io}$  が与えられ、これにより(6)式にしたがい各セクションの目標速度  $N_{io}$  を計算器により算出して、DASR の基準値として与える方式である。計算器は時分割で使用され、 $N_o$ 、 $D_{io}$  が変化したときのみ、各セクションの目標速度  $D_{io}$  が再計算され、DASR の基準値が更新される。本システムの主たる特長は次のとおりである。

- (1) 各セクションの目標値と基準系の目標値との関係式(たとえば(6)式が複雑な場合でも、演算内容の修正のみで適用可能なため応用分野がきわめて広い。
- (2) 各セクションごとの DASR が単一系の場合と同一になり系全体の構成が単純化できる。
- (3) 計算器を時分割で用いるので、安価で信頼度が高い。

本システムでは、計算器が重要な役割を果たしているために、

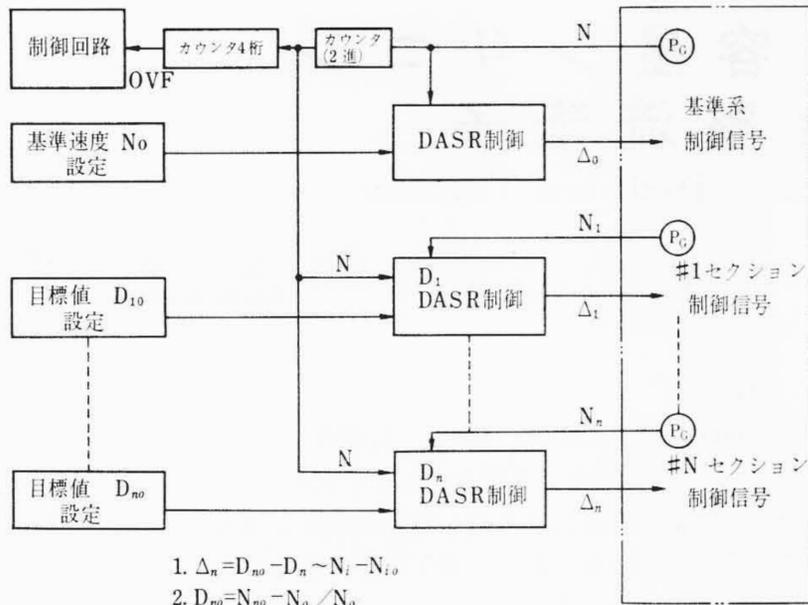


図8 各セクションの目標値を各々の回転数で与える制御系システム

1.  $\Delta_n = D_{no} - D_n \sim N_i - N_{i0}$
2.  $D_{no} = N_{no} - N_0 / N_0$

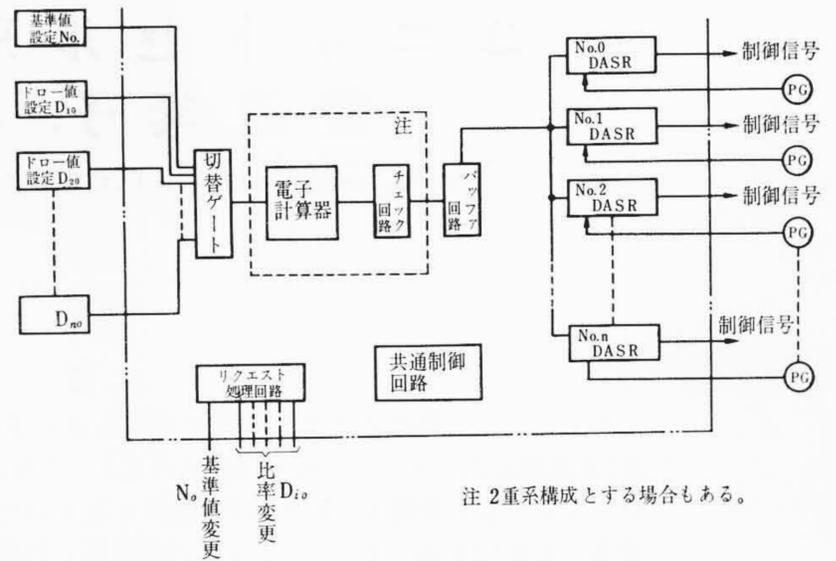


図9 ドロー  $D_{io}$  制御システム

$$D_{io} = \frac{N_{io} - N_0}{N_0} \text{ の場合}$$

計算結果のチェックには特に留意せねばならない。本方式を採用した某社納めの抄紙機ドロー制御装置の例では、計算器およびその制御回路を2重系に構成し、結果の照合チェックを行なう方式を採用して、システム全体の信頼性を高めることに成功している。図7右端きょう体が2重系計算機構を収容している部分である。

#### 4.2.2 セクション間のドロー値を目標値とする制御システム

このシステムのブロック図を図9に示す。本システムでは、基準系に対しては、基準目標速度  $N_0$  を与えて単一系の場合と同様なDASRによる制御を行なう一方、各セクションでは、(6)式で定義されるドロー目標値  $D_{io}$  を与え、セクションごとのデジタル検出器では、(7)式で規定される。実測ドロー値  $D_i$  を測定して、偏差  $J = D_i - D_{io}$  を検出する方式である。この方式の制御目標は、セクション間のドロー値を一定にすることであって各セクションの速度を一定に制御しようとする前節の方式とは異なるが、制御が完全に行なわれた状態では両方式は一致した結果を与える。

$$D_i = \frac{N_i - N}{N} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $N_i$ : 第  $i$  セクションの実測速度  
 $N$ : 基準セクションの実測速度

本方式の主たる特長は次のとおりである。

- (1) 複雑な計算機構を必要としない。
- (2) 各セクションのデジタル検出器が複雑化する。

- (3) 関係式  $D_{io}$  (6)式が単純なドロー値を示す場合以外には適用不可能となる。
- (4) 基準系の制御精度が各セクションの速度に影響するため、各セクションごとの速度が問題となる場合には好ましくない。

上記2方式にはおのおの長短があるため、適用する被制御系により適切なエンジニアリングを行なわねばならない。

### 5. 結 言

本稿では定値制御系において従来のアナログ制御のみでは補償しきれない外乱について検討し、デジタル技術を利用した補償の方式を提案し、実例について説明した。この種のデジタル補償には

- (1) 高精度の設定が可能になり、複数個の関連する系をもったシステムでは起動が容易になる。
- (2) 長時間にわたって、精度のよい制御が可能である。
- (3) 定常運移行までの時間が大幅に短縮される。
- (4) 将来の計算制御などにもつながる。

など、かずかずの特長を有しているため、今後アナログ系のみでは不可能であった高精度制御の要求される新しい応用分野が開けるものと期待される。また制御ループに非線形要素を含む制御系の正確なアナログ目標値の設定手段として利用することもできるので、本方式の適用範囲はきわめて広いものである。

目 次

- 自由ピストン・ガス発生機設計因子の検討
- 自由ピストン・ガス発生機における吸気管効果
- 自由ピストン・ガス発生機の燃焼およびガス流れと性能
- 実船と模型の相関例および操だ速度と操縦性の関係
- 可変吸入口つきアングル弁
- 船内吸音構造の組合せ変化とその効果
- エポキシ樹脂製各種機器すえつけ用ライナ
- 垂直蒸発管における熱伝達と動特性 (第1報) 一管内沸騰に関する実験的研究
- 強じん鋳鉄による超高張力鋳鉄の研究

……………本誌に関する照会は下記に願います……………

日立造船株式会社技術研究所  
 大阪市此花区桜島北之町 60