

寄 書

ブロック線図のデジタル・シミュレーションに関する
プログラム作成の一方法*

的 場 進**

1. ま え が き

デジタル計算機の一つの応用として、最近、各種のデジタル・アナログ・シミュレータと呼ばれるものが開発されており、これらは一般にブロック線図で表示された系の情報をそれぞれの方法によりシンボリ化して処理するようになっている^{1,2)}。したがって、ある特定の系を解析しようとする場合、たとえば、その系において、むだ時間や不感帯やリミッタなどを用いる必要がなくても、シミュレータとしてはそれらのものをもってなければ、一般性にとぼしいものとなる。結局、限られた大きさの記憶装置を利用して与えられた系を解析しようとする、シミュレータは効率の悪いものとなり、その系のみをシミュレートするプログラムを作るのが最良の方法といえる。

しかし、一般にはブロック線図表示された系をプログラムで表現しようとする、種々の計算上の技術が必要となり、かなりの困難性をともなうことになる。そこで、各種のサブプログラムを準備し、それらを適当に結合することにより、与えられた系を解析するためのプログラムの作成を容易にしようとする試みが田川氏によりなされた³⁾。これはラプラス演算子 S を含んだ伝達関数で表示される系を、積分要素の直後にサンプラーと零次ホールド要素を挿入することにより、サンプル値系モデルとして近似し、それを FORTRAN によりプログラムしようとするものである。

一方、この種の問題をそのままデジタル計算機で解析しようとする、これは常微分方程式の初期値問題に帰着する。ここでは、与えられた系を連立常微分方程式の初期値問題として考え、Runge-Kutta-Gill

法⁴⁾により数値計算する方法を示す。

以下において、ブロック線図表示された系の解析に便利と思われる種々のサブプログラムの使用方法を説明する。なお、ここで用いるプログラム言語としては科学計算においてもっとも広く用いられている FORTRAN を採用した（ただし、FORTRAN に関する説明は各種マニュアル、専門書にゆずりここでは述べない）。

2. 基本的伝達関数要素

いわゆる伝達関数表示されたブロック線図をもとにして、その系のみをシミュレートするプログラムを、FORTRAN を用いて作成する場合、積分、1次遅れ、むだ時間、リミッタ、不感帯などといった基本的なものを、処理しやすい形にしておく必要がある。そのため、ここでは基本的な伝達関数を S を含むものと含まないものに大別し、すべてをサブルーチン型のサブプログラムとして構成した。ここで準備したものを第1表に示す。これだけのものがあれば比較的容易にプログラムの作成ができる。

3. メインプログラムの構成

ブロック線図表示された系をもとにして、それをシミュレートするようなプログラムを FORTRAN を用いて作成するわけであるが、そのときのプログラムは第1表に示した各要素をサブプログラムとして用いるメインプログラムとして作成される。そして、メインプログラムは大別してつぎの三つの部分から構成されなければならない。

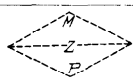

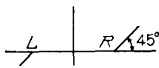
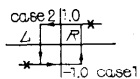
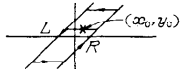

- (1) 定数および初期値の設定部分
- (2) 演算部分
- (3) 計算結果のプリントその他の処理部分

これらについて FORTRAN で一般的に表示すると第2表に示すような構成になる。

* Digital Simulation Program System for Block Diagram, by Susumu Matoba (Faculty of Scientific Engineering, Osaka University)

** 大阪大学基礎工学部 (現 神戸商船大学)
本研究は著者が、三菱重工神戸研究所に在職中にに行ったものである。

第1表 伝達関数要素一覧表

Subroutine Name	制御特性	伝達特性	Arguments
INTEGR	積分	$\frac{1}{S}$	(IN, PI, QI)
FDELAY	1次遅れ	$\frac{1}{1+TS}$	(IN, PI, QI, T)
DIFFER	微分特性	$\frac{T_D S}{1+T_F S}$	(IN, PIO, PI, QI, TD, TF)
PICONT	PI制御特性	$\frac{1}{P} \left(1 + \frac{1}{TS}\right)$	(IN, PIO, PI, QI, P, T)
PIDCON	PID制御特性	$\frac{1}{P} \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S\right)$	(IN, PIO, PI, QI, PJ, QJ, P, TI, TD, TF)
SDELAY	2次遅れ	$\frac{1}{S^2 + 2\zeta\omega S + \omega^2}$	(IN, PI, QI, PJ, QJ, ZETA, OMEGA)
DLYTM	むだ時間	e^{-LS}	(IN, OUT, IC, L, TIME, DT, J)
SWITCH	スイッチング特性		(IN, OUT, M, Z, P)
LIMITR	リミッタ特性		(IN, OUT, U, L)
DEADZN	不感帯特性		(IN, OUT, L, R)
ONOF	オン・オフ特性		(IN, OUT, L, R, CASE) CASE: 1 or 2
HYSTER	ヒステリシス特性		(IN, OUT, L, R, XO, YO)
FGENER	関数発生器		(IN, OUT, TABLE, N) 2 ≤ N ≤ 50

第2表 FORTRAN 表示によるメインプログラムの構成

```

DIMENSION X(301), Y(301)*
EQUIVALENCE (X(1), TIME), (X(2), P1),.....
EQUIVALENCE (Y(2), Q 1), (Y(3), Q 2),.....
.....
1 READ ..... } 定数, 初期値の決定および
  READ TIME, DT, TMAX } t, dt, tmax の決定
  K=1
  GO TO 3
2 K=2
3 DO 4 J=1, 4
  CALL RGKSUB (J, K,X, Y, DT).....積分ルーチン
  の呼び出し
  演 算 部
  GO TO (5, 4), K
4 CONTINUE
5 WRITE ..... } 計算結果のプリントその
  ..... } 他の処理
  IF(TIME-TMAX) 2, 1, 1
  .....
END
    
```

* 本システムでは積分器を300台まで使用可能としたため、必要に応じて変えることができる。

4. メインプログラムの書き方

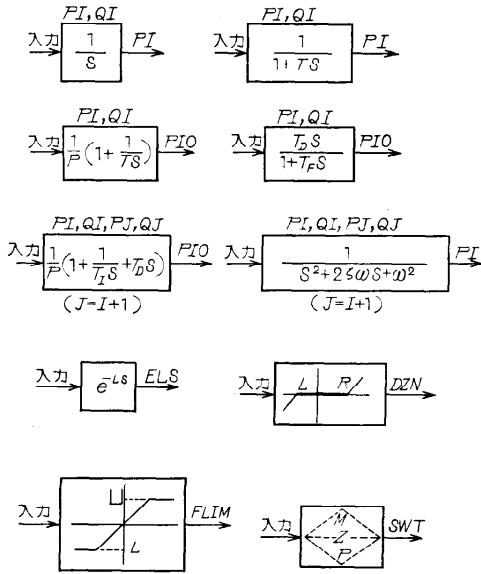
ここでいよいよメインプログラムを作成する場合に具体的にどのようにすればよいかについて述べる。

4.1 伝達関数要素にたいする出力変数名のつけ方

ここで、ブロック線図で示される系の中に含まれている各伝達関数からの出力にたいして変数名をつけてやらなければならない。これは任意に定義してもよいが、プログラム作成を容易にし、プログラム・ミスをなくするために、つぎに示すような方法で出力変数に名前をつけると便利である。

すなわち、ブロック線図中にあらわれる伝達関数のうちから、むだ時間要素を除いたSを含む伝達関数に注目して、それらにたいして、1から順に番号を与える。ただし、PID要素と2次遅れ要素にたいしては連続する二つの番号を与えることにする。このように

してから、 S を含んだ各々の伝達関数にたいして、出力変数名および補助変数名を上で与えた番号をもとに



第1図 出力変数名のつけ方

して、 $P1, Q1, P2, Q2, \dots$ のように第1図に示すような方法で決定し、ブロック線図中に記入する。

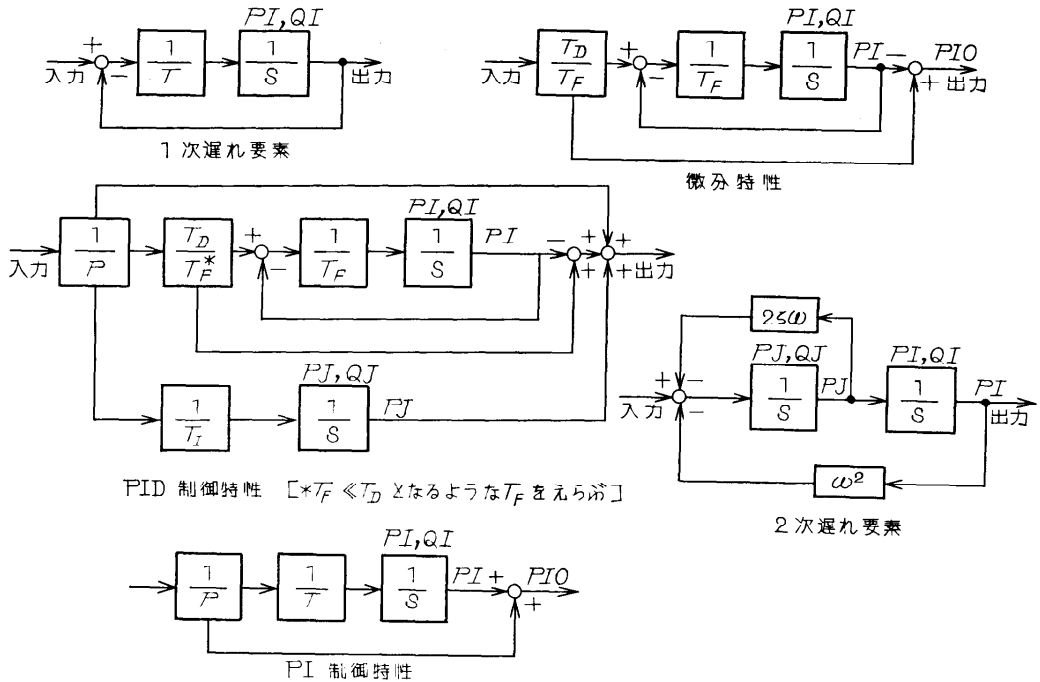
また、むだ時間要素および S を含まない伝達関数については、プログラム作成に便利な変数名を与えればよい。これらについての一例も第1図に示す。

4.2 定数および初期値の設定その他

前節で述べた方法で定義された S を含む伝達関数からの出力変数にあたる $P1, Q1, P2, Q2, \dots$ といったものと、独立変数として処理される時間 t は、第1表に示したように、DIMENSION ステートメントで定義した別の変数名と EQUIVALENCE ステートメントにより結合してやる。いいかえると、このような結合が容易になるように $P1, Q1, P2, Q2, \dots$ を定義したわけである。なお、 S を含まない伝達関数からの出力変数にはこのような制限はない。

また、 $P1, P2, \dots$ で示される変数名は 4.4 で後述するように、実際には常微分方程式の初期値がセットされるべき場所に相当する。

そこで、実際に与えられた系をシミュレートするためのプログラムを作成し、計算を行なう場合、その計算に必要な定数、4.1 で定義した変数 $P1, P2, \dots$



第2図 各要素の分解図

にセットすべき初期値, および, 独立変数である時間 t のスタートするときの値, 計算ステップ Δt , 時間 t の上限を示す t_{\max} などを設定してやらなければならない。これらは FORTRAN における Arithmetic ステートメント, DATA ステートメント, READ ステートメントなどにより処理することができる。

つぎに, $P1, P2, \dots$ について初期値の意味をはっきりするために, 1次遅れ要素, 微分特性, PI 制御特性, PID 制御特性, 2次遅れ要素などを $1/S$ について分解したものを第2図に示す。

4.3 演算部の書き方

定数や初期値が設定されるといよいよ第2表における演算部の作成になる。これは与えられた系を表わすブロック線図をもとにして, 4.1で述べた方法で定義した出力変数名を用いて作成される。

まず積分ルーチン呼び出し (CALL RGKSUB), 初期値が与えられている変数名から順に処理し, 順次各出力変数に値がセットされるように, FORTRAN の各種ステートメントにより処理する。その際必要に応じて第1表に示す種々のサブプログラムを適当に用いなければならない。

4.4 メインプログラムと積分ルーチン

ここまで述べてきた方法によりメインプログラムを作成すると, 結果的には, 与えられたブロック線図表示による系を連立常微分方程式の初期値問題として処理する場合とまったく同じことになる。

ここでは, 常微分方程式の数値解法として Runge-Kutta-Gill 法を用いているが, その計算式はよく知られているようにつぎのようになる。

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i(t, y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

を初期条件

$$y_i(a) = \eta_i \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

のもとで解くとき, 独立変数 t をキザミ幅 h で増加させ, ある t にたいする y_i の値を y_{i0} として, つぎに示す計算により, 求められる y_{i1} を $t+h$ にたいする y_i とする。

$$k_{i0} = hf_i(y_{00}, y_{10}, \dots, y_{m0})$$

$$r_{i1} = \frac{1}{2}(k_{i0} - 2q_{i0})$$

$$y_{i1} = y_{i0} + r_{i1}$$

$$q_{i1} = q_{i0} + 3r_{i1} - \frac{1}{2}k_{i0}$$

$$k_{i1} = hf_i(y_{01}, y_{11}, \dots, y_{m1})$$

$$r_{i2} = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{2}}\right)(k_{i1} - q_{i1})$$

$$y_{i2} = y_{i1} + r_{i2}$$

$$q_{i2} = q_{i1} + 3r_{i2} - \left(1 - \sqrt{\frac{1}{2}}\right)k_{i1}$$

$$k_{i2} = hf_i(y_{02}, y_{12}, \dots, y_{m2})$$

$$r_{i3} = \left(1 + \sqrt{\frac{1}{2}}\right)(k_{i2} - q_{i2})$$

$$y_{i3} = y_{i2} + r_{i3}$$

$$k_{i3} = hf_i(y_{03}, y_{13}, \dots, y_{m3})$$

$$r_{i4} = \frac{1}{6}(k_{i3} - 2q_{i3})$$

$$y_{i4} = y_{i3} + r_{i4}$$

$$q_{i4} = q_{i3} + 3r_{i4} - \frac{1}{2}k_{i3} \quad (i=0, 1, 2, \dots, m)$$

ただし, 式中 t を y_0 で表わしてあり, したがって $f_0(y_0, y_1, \dots, y_m)$ の値はつねに1に等しく, y_{00} は t 自身である。また, q_{i0} は出発点ではすべて0とするが, それ以後は一つ前のステップでの q_{i1} を q_{i0} として使用する。

そこで, 第2表と上式を対照させてみると, DIMENSION ステートメントで定義される変数 X は, 上式においては独立変数 t および従属変数 y_i に対応し, 変数 Y は上式における f_i に対応する。また, 第2表において DO ステートメントにより変数 J を1から4まで変化させるわけであるが, $J=j$ ($j=1, 2, 3, \text{or } 4$) のとき

CALL RGKSUB (J, K, X, Y, DT)

が実行されるということは, 上式においては, y_{ij} の計算が実行されることに相当し, 演算部において, サブルーチン INTEGR, FDELAY, SDELAY などが CALL されるということは, 上式における $f_i(y_{0,j-1}, y_{1,j-1}, \dots, y_{m,j-1})$ の計算が行なわれることに相当している。

5. む す び

ブロック線図表示された系を連立常微分方程式の初期値問題として処理するとき, FORTRAN によるプログラム作成を容易にするためのサブプログラム・システムについて述べた。このシステムを利用することにより, FORTRAN さえ知っておれば, ブロック線図の解析はもとより常微分方程式の初期値問題についても, その数値計算法に関する知識なしに容易にプログラムすることができる。

最後に本システム作成にあたり助言を賜った三菱

重工神戸研究所甲藤昭二氏、岡本展一氏に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) J.J. Clancy and M.S. Fineberg: Digital Simulation Languages: A Critique and a Guide, Proc. FJCC, 1965
- 2) 的場 進: アナログむき入力言語によるディジ

タル・シミュレータ (MDAS), 信学誌, Vol. 47, No. 7 (1966-07)

- 3) 田川遼三郎: サンプル値系モデルおよび遅延掃選サンプル値系モデルによる系応答の数値計算法, 自動制御 Vol. 4, No. 8 (1965-08)
- 4) 森口繁一: 連立常微分方程式の解法, 情報処理 Vol. 4, No. 1 (1963-01)

(昭和42年6月23日受付)