パーソナルコンピュータによる油圧制御系のデジタルシミュレータ* (第1報, 油圧サーボ系への適用)

武 藤 高 義**, 粥 川 浩 宣***

Digital Simulator for Hydraulic Control Systems by Personal Computer (1st Report, Application to Hydraulic Servosystem)

by Takayoshi MUTO and Hirotaka KAYUKAWA

A program system for simulating hydraulic control systems is developed, being written in BASIC for personal computers. Various graphic functions supported by a personal computer were applied to the program system so that the simulation could be made graphically on the display. The simulation for a given control system can be accomplished straightforwardly only by drawing or constructing the corresponding block diagram on the display. The simulated time responses are compared with the measured responses of hydraulic servosystem.

Key Words: Hydraulic Control Systems, Digital Simulator, CAD, Personal Computer, Block Diagram, Time Response, Hydraulic Servosystem

1. ま え が き

制御系の開発・設計にとって不可欠な特性解析は、時間応答シミュレーションによるのが最も簡便かつ直接的な方法である。このシミュレーションのための制御系 CAD (Computer Aided Design) システムは、これまではもっぱら大形計算機と図形処理端末を利用して行われてきたが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、近年における計算機技術の発達は、それをパーソナルコンピュータ (パソコン) 上で実現する可能性を開きつつある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

パソコンによる制御系 CAD システムとは、設計技術者が個々に活用できるシステム (パーソナル CAD) を意味し、付随する利点として、パソコンのもつ多彩なグラフィック機能の活用により、優れた対話形処理の導入がはかられる。

油圧系を対象としたデジタルシミュレーションとしては、現在、DSH⁽⁶⁾ (西ドイツ、アーヘン工科大学における Program system for digital simulation of hydraulic system) にその本格的な実用例を見ることができる。DSH による解析例⁽⁶⁾によれば、油圧制御系

の分野におけるシミュレーションの重要な役割が認識され、また我が国においても今後の発展・普及化が大いに期待されている⁽⁷⁾。本研究の目的は、油圧制御系に対するシミュレータをパソコン上で開発・実現することにあるが、その第一段階としての本報では、次の点を主眼に置く。

(1) 油圧制御系は、ブロック線図によって表現される機会が多く、そこで時間応答解析のための本シミュレータでは、ブロック線図に即した図的なシミュレーション法の導入をはかる (これにより、設計者はプログラムの作業からほぼ解放され、シミュレーションに伴う労力は大幅に軽減される)。

(2) 電気・油圧式サーボ系 (油圧サーボ系) が油圧系の代表とみなされることから、本シミュレータが具備すべき基本的機能 (扱いうるブロック要素の数、伝達関数の形、非線形特性など) の用途を、少なくとも油圧サーボ系への適用が可能である所に求め、したがってその実現をもって本報における到達目標とする。

2. シミュレーションの概要

2・1 時間応答の計算法 まず図1のブロック線図で表される制御系を具体例として、本シミュレーシ

* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年9月27日。

** 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

*** 学生員、岐阜大学大学院。

ョンで採用した時間応答の計算法を説明する〔図中に示されるラプラス領域変数 $R(s)$, $E(s)$ などの時間領域変数を, 以下 $r(t)$, $e(t)$ などと記す〕。

その手法として本報では, 通常の数値積分法によらず, Duhamel の重畳積分法⁽⁸⁾を改良した方法を用いる。その理由は, 本研究で主眼とする管路要素(分布定数系)に由来しており, この方法によれば集中定数系要素のみならず, 分布定数系要素に対しても同様に適用が計られる。ただしそれへの準備過程としての本報では, まず集中定数系要素のみを考察の対象とする。

いま, 図2に示されるように, 任意の時間関数 $e(t)$ を, 時間幅 $\Delta\tau$ ごとに分割し, その間の各曲線部を一次曲線で近似する(図中の斜線部参照, Duhamel の方法ではこれをステップ波形で近似する)。このとき $e(t)$ は次式で表される。

$$e(t) = k_0 u(t) + \sum_{i=1}^{n-1} a_i \{T_{0i} u(T_{0i}) - T_{1i} u(T_{1i})\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} a_i &= (k_i - k_{i-1}) / \Delta\tau \\ T_{0i} &= t - (i-1)\Delta\tau, \quad T_{1i} = t - i\Delta\tau \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

であり, $u(t)$ は単位ステップ関数を表す。

いま, 図1に示される伝達関数 $G(s)$ の要素に対し, その入力 $e(t)$ が式(1)によって与えられるものとすれば, その出力 $c(t)$ は次式によって表される。

$$c(t) = k_0 \phi(t) + \sum_{i=1}^{n-1} a_i \{ \phi(T_{0i}) u(T_{0i}) - \phi(T_{1i}) u(T_{1i}) \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし, $\phi(t)$, $\psi(t)$ はそれぞれ $G(s)$ のインディシアル応答とランプ応答を表す。

すなわち, この方法によればインディシアル応答と

図1 フィードバック制御系

図2 任意波形 $e(t)$ の近似法

ランプ応答が既知なる任意の伝達関数〔本報の場合, それを式(6)で与えた〕をブロック要素に選ぶことができる。

さて, $e(t)$ を入力とするときの $G(s)$ の出力 $c(t)$ が式(3)で表されるのと同様, $c(t)$ を入力とするときの $F(s)$ の出力 $d(t)$ も同じく式(3)によって表される〔ただしこのときの式(3)中の $\phi(t)$, $\psi(t)$ はそれぞれ $F(s)$ のインディシアル応答とランプ応答を意味するものとする〕。

次に, 図1中の加え合せ点における関係式を用いれば, 時刻 $t = i\Delta\tau$ における $e(t)$ 〔それを $e_i(t)$ のように書く〕は次式によって与えられる。

$$e_i(t) = r_i(t) - d_i(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上の関係式を用いれば, 入力 $r(t)$ に任意の波形を与えたときの応答 $c(t)$ ならびに $e(t)$, $d(t)$ が時々刻々に算出される。またこの方法は図1の系に限らず, 他のブロック線図系に対しても同様に拡張される。

2.2 計算誤差の検討 本シミュレーションの油圧サーボ系への適用を行うに先立ち, 本節では, 前節で述べた計算法の近似精度について, 同じく図1の系をもとに検討する。いま, 時間応答解が既知なる場合の一例として, 図1中の $G(s)$, $F(s)$ を次式で与える。

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)}, \quad F(s) = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

この場合, 入力 $r(t)$ を単位ステップとするときの応答解(厳密解)はラプラス変換表⁽⁹⁾中に与えられており, したがってこの値とシミュレーション解とを比較することにより, 誤差評価がなされる。図3がその検討例であり, 実線が厳密解, 他の3種の曲線は, 時間刻み幅 $\Delta\tau$ をパラメータとするときのシミュレーション解である。図によれば, $\Delta\tau$ をある値以下に選べば, 実際上の誤差は無視しうることが知られ, 先の計算法の妥当性が示唆される。

2.3 シミュレータの機能と概要 油圧系の代表例を, 図4に示すような油圧サーボ系⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾に求めつつ, 本シミュレータはそのブロック線図表示である図5に対して適用可能であることを所期の目標としている。

図3 刻み幅 $\Delta\tau$ と計算誤差

その実現のため、本シミュレータは主に次のような機能を保持して作成されている。

(1) 図1中に示されるような伝達関数 $G(s)$, $F(s)$ (以下、前向きと後向き経路の各伝達関数を、それぞれ $G(s)$, $F(s)$ で表す) を、いずれも次式によって与える。

$$G(s)=F(s)=\frac{D_js+E_j}{A_js^2+B_js+C_j}\dots\dots\dots(6)$$

$$(j=1, 2, \dots m)$$

このとき、そのインディシャル応答 $\phi(t)$ とランプ応答 $\psi(t)$ は既知⁹⁾であり、係数 $A_j \sim E_j$ の値に応じて9個の場合分けがなされる。例えばその一の場合の $\phi(t)$, $\psi(t)$ は次の各式で与えられる。

$$D=(B_j/A_j)^2-(4C_j/A_j)$$

とおき、 $D>0$ かつ $C_j \neq 0$ のとき

$$\phi(t)=\frac{D_j}{A_j(b-a)}(e^{-at}-e^{-bt})+\frac{E_j}{A_ja}b$$

$$\times \{1+(be^{-at}-ae^{-bt})/(a-b)\}\dots\dots\dots(7)$$

$$\psi(t)=\frac{D_j}{A_jab}\{1+(be^{-at}-ae^{-bt})/(a-b)\}$$

$$+\frac{E_j}{A_j(ab)^2}\left\{\frac{1}{a-b}(a^2e^{-bt}-b^2e^{-at})\right.$$

$$\left.+abt-a-b\right\}\dots\dots\dots(8)$$

ただし

$$a=\frac{1}{2}\left(\frac{B_j}{A_j}-\sqrt{D}\right), b=\frac{1}{2}\left(\frac{B_j}{A_j}+\sqrt{D}\right)$$

なお、シミュレータが許容する伝達関数の数 m は、計算機の記憶容量による制限を受けるが、本シミュレータ(計算機は PC-9801, 記憶容量は 512 K バイト)の場合、各 $G(s)$, $F(s)$ とともに m の目途を 10 とした(目途とする、の意味は、 m が時間刻み幅 $\Delta\tau$ に依存するためである)。

(2) 図5に示されるブロック要素〔その伝達関数は $G(s)$ または $F(s)$ である〕中には、上記第(1)項の扱いによって処理されるもののほかに、クーロン摩擦特性、平方根、乗算演算などの非線形に関わる要素が

存在している。そこでこれらを、主に次のような二つの方法(2変数の単なる乗算を実行する場合については後述する)によって処理する。まず、クーロン摩擦特性を始めとする飽和、不感帯などの、比較的単純な形の非線形特性に対しては、CRT上に設定される座標面を利用して、図的入力をはかる。すなわち、CRT上で関数形を作画し、それを $G(s)$ または $F(s)$ の特性として与える。この作画法はさまざまに考えられるが、本シミュレーションで取り入れた場合の実行例を図6に示す。次に上記とは別個の方法として、要素の特性をプログラム入力によって与える。シミュレーションの実行途上で行うこの処理の場合、該当する要素 $G(s)$, $F(s)$ の各入・出力信号(変数)は、すでに定義化がはかられており、したがって指示された2変数間の関数関係のみを、独立にプログラムして与えればよい(その後、このプログラムは他のシミュレーションプログラムと自動的に連結される)。

(3) 本シミュレータは、シミュレーションのための具体的操作(入力)が、単に CRT 上でブロック線図を作画することによって実行されるところに特色をもつ。その入力法は次による。CRTの下部(それ以外の大部分の画面は、ブロック線図を描くための空間として用意されている)には、ブロック線図を作画するに必要とされる基本の要素が図7のように指示されている。このとき各要素の番号は、キーボード上の数値キィと対応づけられており、したがって数値キィを適当な順番で押していけば所望のブロック線図が得られる。なお前項(非線形要素の扱い)に関連するが、これ

図4 油圧サーボ系

図5 油圧サーボ系のブロック線図

ら基本の要素中には、乗算器が含まれており (図7中の7), これによって2変数の乗算が容易になされる。

上述の内容を主要機能に備えた本シミュレータは図8のように構成されている。同図によればシミュレーションの手順および進行過程が同時に理解される。

3. 油圧サーボ系への適用

松崎ら⁽¹⁰⁾は、図4に示されるような油圧サーボ系 (電気油圧式振動試験機) を対象として、その時間応答 (ステップ応答) を詳しく実測し、あわせてアナログ計算機による計算結果との比較を行い、両者に関する良好な一致を得ている。一方、本シミュレータは上記油圧サーボ系が適応されるに足る機能を備えており、そのステップ応答 (シミュレーション解) を求めうる。そこで本章では、シミュレーションによる解を松崎らの実測値と比較検討し、その妥当性を検証する。

図4の系に対するシミュレーション法は、図5のブロック線図をもとに、図8に示される順序(a)~(f)に従って行われる。このとき順序(b)の過程で得られる CRT 上のブロック線図を図9に示す。なお、シミ

ュレーションに用いられた系諸元の値 (松崎らによる測定値) を一括して表1に示す (表中の記号は図5参照)。

系の入力波形を選択し (いまの場合、 r はステップ波形)、刻み幅 Δt を指定すれば各伝達関数要素 (図9中の G1~G7, F1~F8) の応答が計算される。これら計算値と実験値との比較図を図10, 11に示す (図示のシミュレーション解は、いずれも $\Delta t = 0.0001(s)$ として求めた)。各図の(a)が実験値、(b)がシミュレーション解であり、それぞれの曲線は、いちばん上が入力信号 r 、下の三つが負荷 (振動台) の変位 y 、速度 $\dot{y}$ 、加速度 $\ddot{y}$ を示す。負荷質量 M を2とおりに変化させたときの両図によれば、本シミュレーション解は、いずれも実験値と良好に一致し、その妥当性が確認される (なお図11に関するその一致状況は、図10におけるよりもやや劣っているが、図11(a)に対応する松崎らのアナコン解⁽¹⁰⁾と比較することにより、本応答解のより良好な精度が確かめられる)。

4. あとがき

以上の検討結果によれば、油圧系に対するシミュレータの第一段階として開発された本シミュレータは、油圧サーボ系への適用が可能であり、また計算精度も

表1 油圧サーボ系の諸元

A_p	0.0022	m^2	F_s	980	N
b	100	Ns/m	k_i	2×10^{-5}	$m^3/(s mA)$
F_d	780	N	k_p	0.74×10^{-12}	$m^3/(s Pa)$
k	370	mA/V	P_s	2.1×10^7	Pa
k_a	0.00305	Vs^2/m	ω_n	630	rad/s
k_v	0.183	Vs/m	ζ	0.70	
k_y	25.2	V/m	c	0.17×10^{-12}	m^3/Pa
r	0.05	V

図6 非線形関数の図的入力

図7 ブロック線図の基本要素

図8 シミュレータの基本構成

図9 CRT上に描かれたブロック線図

(a) 実験結果

(b) シミュレーション解

図 10 実験値との比較 ($M=1700$ kg)

(a) 実験結果

(b) シミュレーション解

図 11 実験値との比較 ($M=4700$ kg)

ほぼ良好であることが結論される。したがって本シミュレータを基本に据えて、今後、より広範な機能を備えた簡便なシミュレータへの発展が期待されう。

なお付記として、本シミュレータで用いられたプログラム言語はベーシック (N 88-BASIC) であること、図 10, 11 の結果に対する各計算時間は約 24 時間であったこと (この計算時間を減らすことは可能であり、後報で検討する)、また 2・1 節で述べた計算法を通常の数値積分法 (ルンゲ・クッタ・ギル法) に変更した場合、先の計算所要時間は約 30 分となったことを添える。

終わりに、本研究のために貴重な実測写真の提供をいただいた、日立製作所機械研究所の松崎淳氏、平井洋武氏の両氏に厚く感謝する。

文 献

- (1) 諸岡・田沼, 日経メカニカル, 1.4 (昭 57), 66.
- (2) Mock, W., 4. *Aachener Fluidtechnisches Kolloquim*, (1980), 149.
- (3) Backé, W. and Hoffman, W., 6th *Int. Fluid Power Sympo.*, 8-10 (1981-4), Paper C1.
- (4) 木村・ほか 4 名, PC-9801 制御系設計プログラミング, (昭 60), 1, 日刊工業新聞社.
- (5) 高橋, パーソナルコンピュータによる自動制御計算法, (昭 58), 1, オーム社.
- (6) Hahmann, W. and Hoffmann, W., 4. *Aachener Fluidtechnisches Kolloquim*, (1980), 165.
- (7) 平井, 油圧と空気圧, 13-4 (昭 57), 220.
- (8) 例えば, 高橋, 自動制御の数学, (昭 45), 216, オーム社.
- (9) 例えば, 加藤・菊池, ラプラス変換関数表, (昭 43), 55, 97, 日刊工業新聞社.
- (10) 松崎・平井, 機論, 42-353 (昭 51), 135.

討 論

〔質問〕 本 江 明 (㈱東芝総合研究所)

(1) 本文中で Duhamel 公式自体が近似解法であるかのごとき表現が見られる。例えば「Duhamel の方法では、これをステップ波形で近似する.」。Duhamel の公式は形式的表現であり、厳密な表現と考えるのがか。〔なお文献 (8) を読むとわかるように「ステップ関数による近似」として載っている。〕

(2) Duhamel 公式を、そのまま離散化すると、そ

の積和の数からも予想されるように、時間の経過とともに演算時間が二乗で増える。あえてこの積分法を選定した理由は、演算時間の不利に対し、これを克服するまでの利点は何か。対象とする油圧制御系の何に起因するのか。

(3) 文献として挙げている (8) は、絶版であり適当とは言えないと思う。また文献 (8) でなければならぬ理由もないように思うがいかがか。

〔回答〕 (1) 本来は、「Duhamel」の公式にもとづくときの通常の計算法では、入力波形をステップ波形の積和で近似する」のように表現すべきところを、簡略的に先のように記したが、厳密にはご指摘のとおりである。

(2) 本文でも触れたが、本研究では、集中定数系要素に加え、分布定数系要素(油圧管路)に対してもシミュレーションが可能であることを目指しており、本積分法を選んだのはこの理由による(ただし、管路要素を含む系に至る準備段階としての本報では、まず集中定数系要素のみを考察の対象とした)。

このとき、管路要素を対象とした場合の本計算法が、例えば Zielke による特性曲線法(付1)などと比べて、どの程度(演算時間その他の点で)有利なのか問題となるわけであるが、本シミュレータでは、ブロック線図表示との適合性を優先させて、本計算法を採用し

た(なお、演算時間に関する特性曲線法などとの比較検討は、まだ行っていない)。図2に示されるような波形近似を用いている本計算法では、ステップ波形近似法に比して精度上の改善がはかられており、その分、演算時間も短縮されているが、ご指摘のように、それでもなお、演算時間上の問題点を解消していない。著者らも、よりいっそうの時間短縮化に意を払っており、今後の検討課題とさせていただきたい(第2報において、その部分的検討結果が述べられる予定である)。

(3) 例示として、手許にあった文献(8)を挙げたが、それが絶版であったとすれば、ご指摘のように不适当であり、類似の成書(付2)に代えさせていただく。

(付1) Zielke, W., *Trans. ASME, Ser. D.* 90-1 (1968), 109.

(付2) 例えば, Wylie, C. R., (富久訳), 工業数学 (上), (昭55), 273, プレイン出版.