

対話型制御系設計支援システム LACE について†

松浦卓丈** 片岡正俊**

現在、計装制御の分野における計算機利用は、設計の評価・解析を目的としたシミュレーションが主である。そこで試行錯誤型環境下での制御系設計の生産性と技術力の向上をねらって、現在広く使われている古典制御理論を対象とした対話型制御系設計支援システム LACE を開発した。LACE は、伝達関数やブロック線図を入力すると周波数応答、根軌跡、過渡応答を出力するもので、その特徴は、(1)制御系指向のコマンド型入力方式による入力の容易性、(2)制御系の種類・規模によらない汎用性、(3)安定で高精度な数値計算法による信頼性、(4)エディタ、データベースなどの採用による対話時の操作性、(5)設計結果のグラフによる視覚化、(6)関連ソフトウェアとのインタフェース、などである。

1. まえがき

工業の各方面で広く使われている計装制御の分野では、その研究成果が比較的計算機の利用という面ではじめよく、計算機利用実用化の早期から盛んに計算機が使用されてきた。

しかし、その使用形態は設計された制御系の評価・解析のためのシミュレーションを中心にしたものであって、計算機が制御系設計技術者個人の設計活動と一体になり、技術者の創造性発揮を直接支援するという面ではまだ問題が多いのが現状であろう。

普通、制御系の設計では伝達関数やブロック線図をモデル化の手段として用いるが、設計プロセスは試行錯誤的である。したがって、制御系設計用ソフトウェアは十分この点に対応できるものであることが望ましい。すなわち、設計用ソフトウェアには、(1)操作性がよく使いやすいこと、(2)設計対象や設計技術の多様化に柔軟に対応できること、(3)信頼性の高い解が得られること、(4)設計の途中経過や最終結果がタイムリに視覚化されること、(5)使用コストが低く容易に利用できること、などの条件が求められる。

本稿では、制御技術の分野で広く頻繁に使用されている古典制御理論を対象に、以上の観点から筆者らが開発し実用化している対話型制御系設計支援システム LACE (Linear system Analyzer for Control Engineers) について述べる¹⁾。

古典制御理論を含めて種々の制御系設計手法を対象とした制御系設計プログラムが発表されている²⁾⁻⁶⁾。

しかし、筆者らは、実用性を高める立場から、現代制御理論やシステムシミュレーション技術など制御系の設計・解析に不可欠ではあるが機能が大きく異なるものについては別のソフトウェアとし、利用頻度の高い古典制御理論に的を絞ることによって、先に述べた五つの条件、すなわち操作性、汎用性、信頼性、視覚化、低コスト性を満足する対話型制御系設計支援システム LACE を開発した。

2. LACE の概要

LACE の基本設計にあたっては、前述の五つの条件を満たすべく、次の特徴をもたせた。

(1) 入力として、汎用的な伝達関数、およびブロック線図を採用することによって、制御系の種類・規模によらず利用できる。

(2) コマンド型の対話形式プログラムとすることによって試行錯誤的設計活動を支援する。入力は、LACE 用に開発した制御系指向のコマンドを用いることにより、設計者の入力操作の負担を軽減している。

(3) 出力として、制御系設計でよく用いられるボード線図、ゲイン位相図、ナイキスト線図、根軌跡図、および過渡応答図を直接グラフ形式で出力して、設計者の視覚に訴える。

(4) 制御系の特性計算に用いる数値計算法には、制御系設計解析システムとして、精度、安定性、計算コストなどの面で適切な手法を採用している。

(5) 専用のエディタをもったデータベースをもつことによって操作性の向上をはかっている。データベース上の制御系と特性計算の仕様は独立になっていて、設計作業の進行に応じてそれらの任意の組合せによる特性計算も可能である。

(6) 関連する他の制御系設計・解析用ソフトウェ

† A Program for Computer-Aided Control System Design: LACE by TSUNETOMO MATSUURA and MASATOSHI KATAOKA (Information Systems Department, Mitsubishi Electric Corp.).

** 三菱電機(株)情報システム部

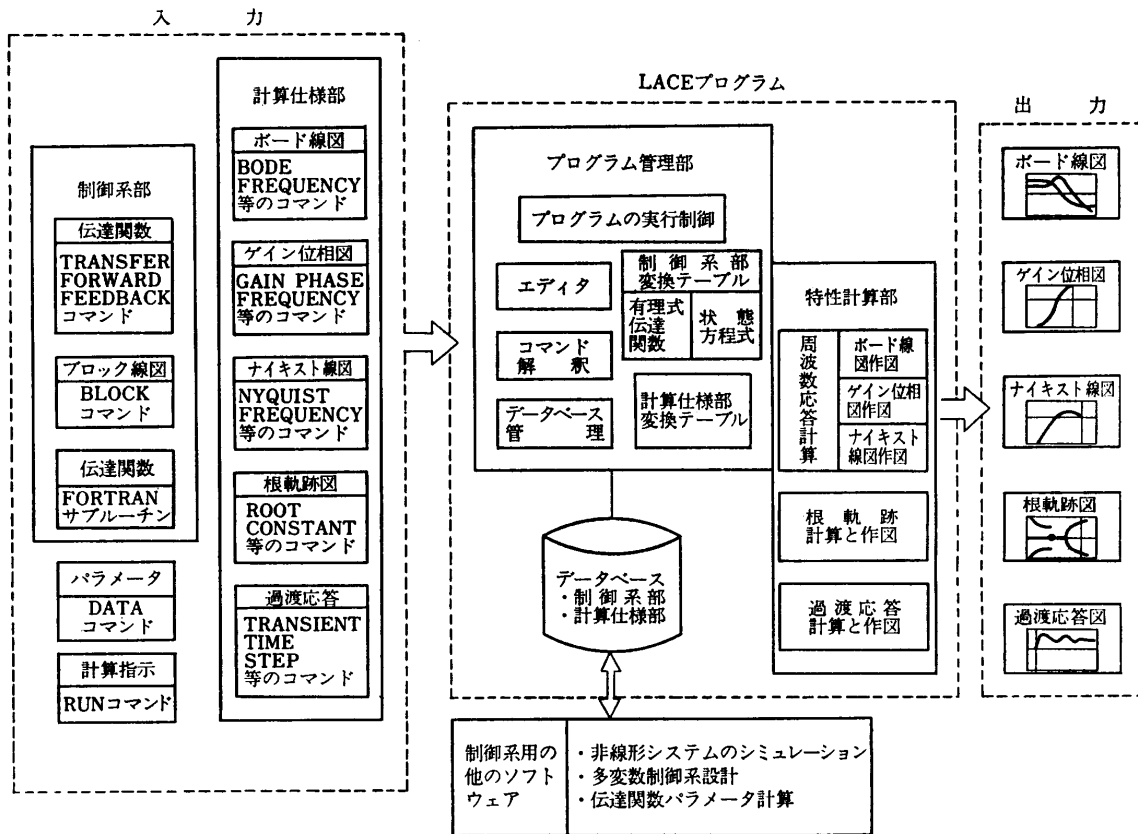


図 1 LACE の概念図

Fig. 1 Structure of LACE system.

アとのインタフェースを用意してあり、発展性と柔軟性をもっている。このインタフェースは、伝達関数をデータベース、あるいは FORTRAN サブルーチンにより行う。

LACE のプログラム構成は、大別してプログラム管理部と特性計算部に分けられる。図 1 にその概念図を示す。プログラム管理部は、使用者入力、すなわち対象となる制御系、その制御系内のパラメータの値、および特性計算の計算仕様を読み込み、これを必要に応じてデータベースに保持するとともに、適当な編集を行って特性計算部に送ったり、また使用者が対話形式で入力するコマンドに応じて実行処理の流れを制御する。特性計算部は、プログラム管理部から送られてくる情報にしたがってボード線図、ゲイン位相図、ナイキスト図、根軌跡図、および過渡応答図を出力する。

LACE における使用者入力は、制御系を表現する制御系部、その制御系内にあるパラメータにデータを与えるパラメータ部、および特性計算の計算仕様を指示する計算仕様部から構成されている。

制御系部の入力方式としては、ラプラス演算子 s の有理式である伝達関数、それを伝達要素としたネットワークであるブロック線図、および FORTRAN サブルーチンによる伝達関数の 3 通りがあり、使用者は状況に応じて適当な方式を選択できる。

計算仕様部には、先に述べた 5 種類の特性に対応してそれぞれ独自の入力形式があり、使用者はそのなかで特性計算の条件と出力の表示形式を指定する。

LACE のプログラムは、すべて FORTRAN で書いてあり約 11 k ステップの大きさである。所要メモリは、伝達要素の次数が最高 20 次、個数が 20 個程度の入力に対してオーバーレイを行って約 250 kB である。

3. 制御系部の入力

一般に、対話型の設計支援システムの重要な評価項目の一つとして、その操作性と柔軟性が挙げられる。ここでは、LACE の操作性と柔軟性に大きな影響を与える使用者入力の方式について述べる。

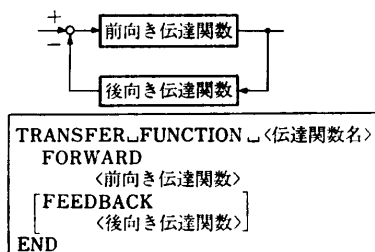


図 2 基本ループとその入力形式
Fig. 2 Fundamental loop and its input form.

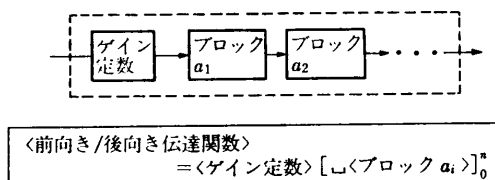


図 3 前向き/後向き伝達関数とその入力形式
Fig. 3 Forward/feedback transfer function and its input form.

LACE の使用にあたって使用者はまず制御系を入力する。この制御系部は、対話形式で編集された後で制御系部変換テーブルに変換され、それぞれの特性計算部へ送られる。この内部テーブルには、信頼性の高い特性計算を行うために、ラプラス演算子 s による伝達関数用のもののほかに、状態方程式用のものがある。

制御系部の入力には、データベースを介するものや FORTRAN サブルーチンを用いる方法も可能である。

3.1 伝達関数による入力方式

3.1.1 標準形式

操作性に重点を置いた標準形式で取り扱う制御系は、前向き伝達関数 (FORWARD コマンド) と後向き伝達関数 (FEEDBACK コマンド) によるフィードバック制御系である (図 2)。各伝達関数はゲイン定数と多数のブロックの積である (図 3)。ここでブロックとはラプラス演算子 s の有理式の和であって、有理式の分子および分母の多項式の係数は図 4 に示すように入力する。以上の入力形式によって、有理式形式の伝達要素の直列結合、並列結合、およびフィードバック結合を表現することができる。

さらに、標準形式の伝達関数にラベルを付し、これをブロックに記すことにより、フィードバックループを含む伝達関数を上位の標準形式伝達関数の中で呼び

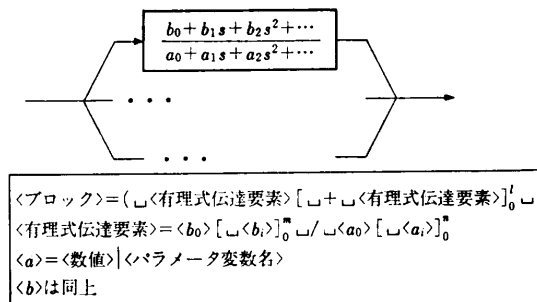


図 4 ブロックとその入力形式
Fig. 4 Block and its input form.

出すことができる。これによって伝達関数の階層表現が可能である。また、ラベル前に % 記号を付すことにより伝達関数の逆数を呼び出すことができる。以上に述べた直列結合、並列結合、フィードバック結合、逆数、および階層表現を組み合わせると、任意のブロック線図を、若干の人手による変換を加えて標準形式で入力することが可能であり、この結果、閉ループ伝達関数が s の有理式として求まる。

伝達関数内の各係数にパラメータ変数を用いることができる。

3.1.2 プログラム形式

この形式は、伝達関数を使用者が作成する FORTRAN サブルーチンによって入力するもので、伝達関数がサブルーチン内の計算によって得られる場合などに用いると便利である。

LACE 本体と使用者定義の FORTRAN サブルーチンとのインターフェースは、閉ループ伝達関数を表す有理式の分子および分母の多項式を格納した配列で行う。ただし、周波数応答を求める場合のみ $s = j\omega$ とそれを閉ループ伝達関数に代入した値を用いることができる。プログラム形式でも TRANSFER FUNCTION コマンドを用いる。

3.2 ブロック線図による入力方式

制御系の設計ではよくブロック線図が用いられるが、複雑なブロック線図を手で標準形式の伝達関数に等価変換すると手間がかかることがある。このような時、等価変換前のブロック線図の情報を次に述べる方式で入力し、LACE により自動的に伝達関数を得ることができる。

まず準備として、ブロック線図内の伝達要素の出力、加え合わせ点、および外部信号に固有の番号を付す。入力は、BLOCK DIAGRAM コマンドに続き、各番号 (変数) 間の接続とその演算機能を標準形式に

```
BLOCK_<DIAGRAM_<ブロック線図名>
[<始ノード>_<終ノード>_<有理式伝達要素>];
END
```

図 5 ブロック線図 (信号線図) の入力形式
Fig. 5 Input form of block diagram (signal flow graph).

おける有理式伝達関数の入力形式によって図 5 に示すように構成する。ここで、有理式伝達関数のかわりに標準形式の伝達関数のラベルを用いることができるので、ブロック線図入力の場合も標準形式の伝達関数のときと同様に階層表現が可能である。

LACE には簡単なエディタを用意してあり、入力量が一般に多くなるブロック線図入力方式では有効である。これには入力モードと編集モードがあり、後者には行単位の削除・置換・表示、データベースへの転送、入力モードへの移行、入出力信号の指定の各コマンドがある。もちろん、一般の TSS エディタを用いて入力してもよい。

4. 計算仕様部の入力

LACE で求めることができる制御系の特性は、ボード線図、ゲイン位相図、ナイキスト線図、根軌跡図、および過渡応答である。これらの特性を求めて望ましい図表に出力するために必要な情報は、制御系を除いてそれぞれの計算仕様部で使用者が入力する。

ボード線図、ゲイン位相図、ナイキスト線図の周波数応答関係の入力形式を図 6 に示す。FREQUENCY コマンドは周波数の範囲を示し、AUTO では自動分割による周波数値の算出を、SPEC では対話入力を示す。OUT コマンドは、出力形式の選択 (数字、プロットグラフ、連続グラフ) を示す。また、GSCALE (ゲイン軸)、PSCALE (位相軸)、RSCALE (実軸)、ISCALE (虚軸) の各コマンドは、出力グラフにおける各軸のスケージングを示すものである。

次に、根軌跡図を求めるときの計算仕様部の入力形式を述べる。CONST コマンドは、パラメータ変数名とその値の範囲を示す。パラメータ値を指示した範囲で自動的に更新して根を求める AUTO 方式と、対話形式で使用者がパラメータ値を入力する SPEC 方式がある。

最後に、過渡応答を求める時の計算仕様部の入力形式を述べる。TIME コマンドは、過渡応答の計算開始時間、終了時間、および計算間隔を示す。OSCALE コマンド、TSCALE コマンドは、出力グラフの応答値の軸と時間軸のスケージングをそれぞれ示す。外部入

```
{BODE
{GAIN_PHASE}
NYQUIST} <DIAGRAM_<計算仕様名>
[TITLE_<タイトル用文字列>]
FREQUENCY_<[RAD]_<[AUTO_<下限>_<上限>_<計算点数>]
[HZ]
[RPM] SPEC}
OUT_<出力タイプ>[_<出力タイプ>][_<出力タイプ>]
GSCALE_<ゲイン軸下限>_<ゲイン軸上限>_<目盛間隔>
PSCALE_<位相軸下限>_<位相軸上限>_<目盛間隔>
NYQUIST DIAGRAM の場合は、GSCALE, PSCALE の
代りに下記 RSCALE, ISCALE
RSCALE_<実軸下限>_<実軸上限>_<目盛間隔>
ISCALE_<虚軸下限>_<虚軸上限>_<目盛間隔>
END
```

図 6 計算仕様部 (周波数特性) の入力形式
Fig. 6 Input form of frequency characteristics specification.

力信号としては、ステップ (STEP)、ランプ (LAMP)、折線関数 (TABLE)、パルス関数 (PULSE)、および正弦波関数 (SIN) を用意した。

5. 特性計算

制御系の各特性を求めるには種々の計算手法が必要である。LACE のように、利用対象をとくに限定せず、しかも利用者側の利用技術についてもさまざまなレベルが考えられる汎用のプログラムにおいては、そのプログラムの信頼性を大きく左右する数値計算法の選択は重要な問題である。次に各特性を求める方法について述べる。

5.1 伝達関数による入力の場合

制御系部が標準形式の伝達関数として s の有理式で入力される場合、その入力から s の有理式に関する四則演算によって容易に閉ループ伝達関数を有理式 $G(s) = Q(s)/P(s)$ ($P(s)$, $Q(s)$ は s の多項式) として求めることができる。したがって、周波数応答は、 $s = j\omega$ (ω は周波数) を $G(s)$ に代入することにより求められる。また、根軌跡図は、代数方程式 $P(s) = 0$ の根をパラメータの各値に対して繰り返し求めて得られる。

5 次以上の代数方程式の根の数値解を求める方法は多数あるが、汎用プログラムへ組み込むために大域的収束性が必要である。そこで、現在定評のある平野法と Jenkins-Traub 法^{7),8)}により、制御系設計でよく出る 5~10 次の例を解いた結果、収束条件を同一にした場合の解所要時間では平野法が Jenkins-Traub 法の約 2 倍を要していたため、LACE では Jenkins-Traub 法を標準ルーチンとして用いている。

線形制御系の過渡応答の数値解を求める方法には、

(1) ルンゲ・クッタ法のような一般の常微分方程式の数値解法を用いるもの、(2) よく知られている状態方程式の解公式を数値計算するもの、(3) 逆ラプラス変換の数値解法によるもの、などがある。(1)では、解の精度を維持する必要から時間のステップ幅を一般にかなり小さくとらねばならず、このため処理時間が長くなる。また、(3)では、ラプラス変換が既知の入力しか扱うことができない。一方、(2)にはこれらの欠点がないので LACE では(2)を採用した。

まず、有理式の閉ループ伝達関数から標準形式の状態方程式 $\dot{x} = Ax + Bu$ (x は状態変数, u は入力) を導く。次に、入力 $u(t)$ を区間が時間のステップ幅 h である区間線形関数で近似し、これを状態方程式の解公式に代入すれば、時間 $t = nh$ における近似解 x_n の n に関する前進形の差分式を得る。この差分式の係数の中に行列指数関数 $\exp(Ah)$ があらわれる。

行列指数関数の数値計算法には大きくわけて、(1)級数打ち切り法、(2)有理関数による近似法、(3)固有値、固有ベクトルによる方法、(4)常微分方程式の数値解法による方法、の4通りがあるが、LACE では計算時間、解精度、および適用対象を特定しない汎用プログラムへの組み込みという見地から、(2)の一種であって相対誤差の評価ができる Padé 近似を用いた Ward の方法を用いている^{9),10)}。

5.2 ブロック線図による入力の場合

ブロック線図から先に述べた制御系の特性を求め方法には、(1)ブロック線図の等価変換によって有理式の閉ループ伝達関数を求める、(2)信号線図から Mason の公式によって有理式の閉ループ伝達関数を求める、(3)状態方程式を導き、これから Fadeeva の公式によって有理式の閉ループ伝達関数を求める、(4)上記の(3)と同じように状態方程式を導くが、周波数応答は $(sI - A)^{-1}$ を各 $s = j\omega$ について求め、また根軌跡については A の固有値を QR 法で求める、などのものが考えられている。これらの各方法にはそれぞれ長所と短所があり、(1)では、プログラムが比較的簡単になるが、複雑なブロック線図に対してアルゴリズムの完全性の保証がない、(2)では、アルゴリズムは完全であるが、処理時間が長くなる、(3)では、アルゴリズムが完全でプログラムも簡単になるが、Fadeeva の公式の中で丸め誤差が大きく生じ信頼性が下がる、(4)では、(2)、(3)と同様にアルゴリズムの完全性が保証されていて、しかも(3)と違って数値計算の信

頼性が高いが、プログラムが大きく処理時間も長くなる、というのが現状である。LACE では、対象とするブロック線図が比較的簡単なものが多いこと、信頼性を高めるため解精度がよいこと、対話型利用のため処理時間が長くないこと、などの条件から(1)を用いている。

(1)によりブロック線図から有理式の伝達関数が得られると、特性計算の処理は5.1節と同じである。

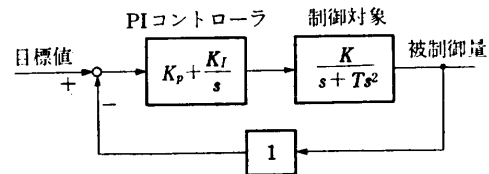


図7 簡単なPIコントローラ系

Fig. 7 An example of a simple PI-controller system.

```

1  TRANSFER FUNCTION PI-CONT
2  FORWARD
3  1 ( KP / 1 + KI / 0 1 ) ( K / 0 1 T )
4  FEEDBACK
5  1
6  END
7  DATA
8  T = 1.1 K = 0.5 KI = 2
9  END
10 ROOT LOCUS PI-CONT
11 TITLE PI-CONTROLLER
12 CONST KP AUTO 0 10 50
13 OUT N
14 RUN
15 OUT C
16 RSCALE -1 1 8
17 ISCALE -2 2 8
18 RUN
19 END
20 DATA
21 KP = 5
22 END
23 BODE DIAGRAM PI-CONT
24 TITLE PI-CONTROLLER KP=5
25 FREQUENCY RAD AUTO -2 2 25
26 OUT C=OP
27 RUN
28 OUT N
29 FREQUENCY RAD AUTO 0 1 50
30 RUN
31 END
32 TRANSIENT RESPONSE PI-CONT
33 TITLE PI-CONTROLLER KP=5
34 OUT C
35 TIME 0 20 0.1
36 STEP 0 1
37 OSCALE 0 2 20
38 RUN
39 DATA
40 KP = 10
41 END
42 TITLE PI-CONTROLLER KP=10
43 RUN
44 END

```

図8 LACE の使用例

Fig. 8 Illustration of LACE program.

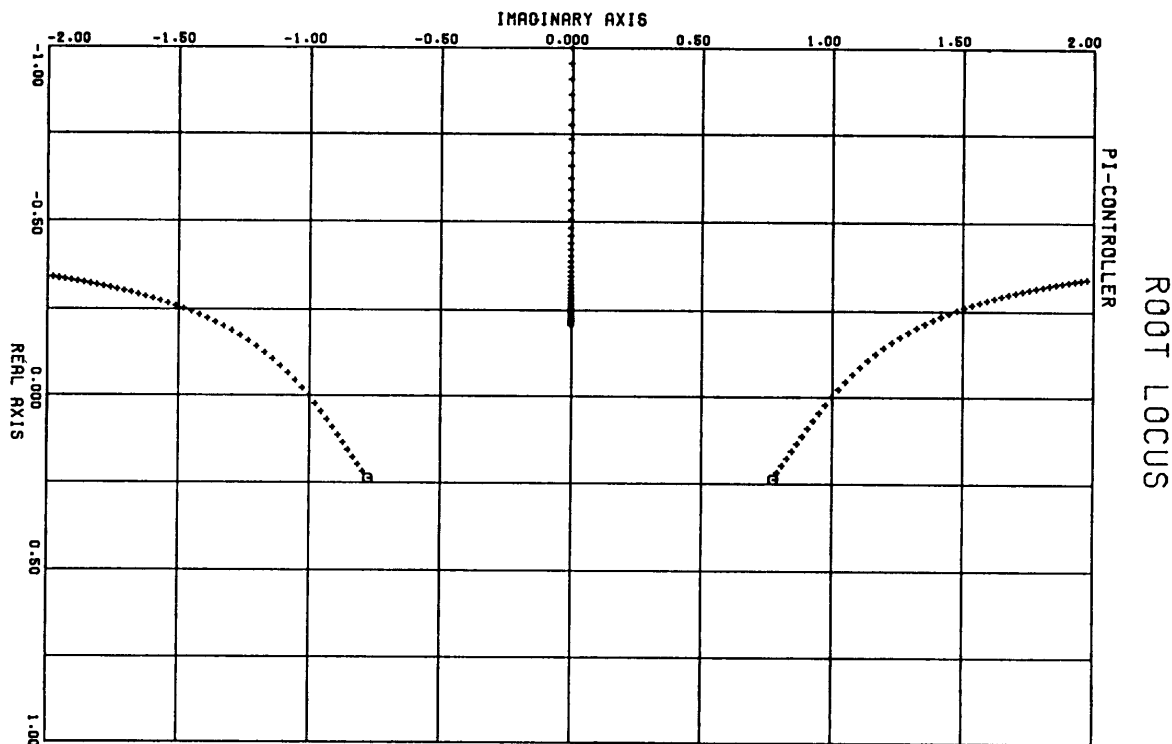


図 9 根軌跡図

Fig. 9 An example of root locus.

なお、(4)は多変数制御系設計では不可欠なプログラムであり、LACEでも予備にこのサブルーチンもっていて、(1)で処理できない複雑なブロック線図の処理にあてることができる。

5.3 特性計算の実行

制御系部にパラメータ変数を用いている場合には、DATAコマンドによりそれらに数値を与える。DATAコマンドは、計算仕様部の内側でも外側でもよい。特性計算の実行指示は、RUNコマンドにより行い、このコマンドの位置はDATAコマンドと同様である。

6. LACEの使用例

図7に示す簡単なPIコントローラ系において、系が安定となるKPを定め、次に制御性能の指標である位相余裕、交差周波数、過渡応答などを求めるという一連の制御系設計作業をLACEによって行った例を示す。

図8は、説明をわかりやすくするために、対話型でLACEを使用したときの入力部分のみをまとめて示したものである。

行番1のTRANSFER FUNCTIONコマンドか

ら行番6のENDまでは制御系部で、パラメータ変数としてKP, KI, K, Tの4個を用いている。

行番7のDATAコマンドから行番9のENDまででKP以外のパラメータ変数に数値データを与えている。

行番10のROOT LOCUSコマンドから行番14までは、パラメータ変数 $KP=0\sim 10$ の範囲の特性根を50回求めてまずそれを数字形式で出力させている。行番15から行番18までは根軌跡図のスケージング仕様を与えて根軌跡図を描かせている(図9)。行番19のENDにより根軌跡の計算仕様を終わる。以上の根軌跡計算から、制御系安定の範囲で行番20のDATAコマンドにより $KP=5$ と選定している。

行番23のBODE DIAGRAMコマンドから行番27のRUNコマンドまでは、周波数 10^{-2}rad/sec から 10^2rad/sec までの範囲で25点計算してボード線図を求めている。この結果を判断して交差周波数などをさらに詳しく求めるために、行番28のOUTコマンドから行番30のRUNコマンドまでによって、 10^0rad/sec から 10^1rad/sec までの周波数特性を50回計算して数字形式で求めており、行番31のENDでボード線図の計算仕様を終わる。

行番 32 の TRANSIENT RESPONSE コマンドから行番 44 の END までは過渡応答を求めるもので、行番 35 の TIME コマンドは 0 秒から 20 秒までを 0.1 秒間隔で計算させることを示し、行番 36 の STEP コマンドは 0 秒から出力 1 のステップ入力に加えらるることを示す。行番 39 の DATA コマンドから行番 43 の RUN コマンドまでは、パラメータ KP を 10 に変更した場合の応答を前者と比較するために再度過渡応答を求めている。以上の処理に要した CPU 時間は IBM3081D で約 1.7 秒である。

7. む す び

現在、おもに計装制御の分野で広く使われている古典制御理論を対象とし、制御系技術者の生産性と設計技術の向上を目的として、筆者らが開発し実用化している対話型の制御系設計プログラム LACE の概要を述べた。LACE では、制御系用の新しい対話型入力方式を開発し、試行錯誤型設計環境下での操作性の良さや制御対象に依存しない汎用性を確保している。また、行列指数関数など制御系特性計算に必要な数値計算法を比較評価することによって、制御系特性計算用として信頼性の高い計算方法を採用している。さらに、他の制御系設計・解析用システムとのインタフェースについても配慮し柔軟性をもたせてある。この結果 LACE は、制御系設計技術者にとって使いやすく、信頼性の高い有効な設計手段といえよう。

最近、計装制御技術の分野において現代制御理論を用いた設計が一部で行われ、現代制御理論実用化にあたっての問題点が検討されている。今後、これらの成果を踏まえた、現代制御理論による設計支援システムの開発が期待されるわけで、LACE のような古典制御理論を対象とした設計支援システムとの統合も検討課題であろう。

参 考 文 献

- 1) 松浦, 片岡: 対話型制御系設計システム LACE, 情報処理学会第 22 回全国大会, pp. 1001-1002 (1981).
- 2) Edmunds, J. M.: Cambridge Linear Analysis and Design Programs, Computer Aided Design of Control Systems, *Proc. IFAC Symp.*, pp. 253-258 (1980).
- 3) Furuta, K., Kajiwara, H. and Tsuruoka, K.: Computer Aided Design Program for Linear Multivariable Control Systems, *Proc. IFAC Symp.*, pp. 267-272 (1980).
- 4) Muno, N.: The UMIST Control System and Synthesis Suites, *Proc. IFAC Symp.*, pp. 343-348 (1980).
- 5) 渡辺, 永安, 若色: 航技研・対話型制御系設計システム, JAAC 第 24 回システムと制御研究発表会講演会, pp. 103-108 (1980).
- 6) 田沼, 高野: 線形制御系の対話型応答解析システム, SICE 第 19 回学術講演会, pp. 41-42 (1980).
- 7) Jenkins, M. A. and Traub, J. F.: A Three-Stage Algorithm for Real Polynomials Using Quadratic Iteration, *SIAM J. Num. Anal.*, Vol. 7, No. 4, pp. 545-566 (1970).
- 8) Jenkins, M. A. and Traub, J. F.: Algorithm 419: Zeros of a Complex Polynomial [C 2], *Comm. ACM*, Vol. 15, No. 2, pp. 97-99 (1972).
- 9) Ward, R. C.: Numerical Computation of the Matrix Exponential with Accuracy Estimate, *SIAM J. Num. Anal.*, Vol. 14, No. 4, pp. 600-610 (1977).
- 10) 松浦, 片岡: 行列指数関数の数値計算について, 情報処理学会第 21 回全国大会, pp. 935-936 (1980).

(昭和 58 年 2 月 14 日受付)

(昭和 58 年 7 月 19 日採録)