世界知的所有権機関
国　際　事　務　局

PCT

特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(51) 国際特許分類6
G05B 13/04, 11/36, 21/02

A1

(11) 国際公開番号 **WO99/44105**

(43) 国際公開日 1999年9月2日(02.09.99)

(21) 国際出願番号 PCT/JP99/00837

(22) 国際出願日 1999年2月24日(24.02.99)

(30) 優先権データ
特願平10/87887　1998年2月25日(25.02.98)　JP

(71) 出願人（米国を除くすべての指定国について）
株式会社 アドテックス(ADTEX INC.)[JP/JP]
〒370-1201 群馬県高崎市倉賀野町2454番地1 Gunma, (JP)
(71) 出願人；および
(72) 発明者
二木剛彦(FUTATSUGI, Takehiko)[JP/JP]
〒379-0127 群馬県安中市磯部四丁目11番12号 Gunma, (JP)
(72) 発明者；および
(75) 発明者／出願人（米国についてのみ）
千葉光晴(CHIBA, Mitsuharu)[JP/JP]
〒375-0024 群馬県藤岡市藤岡2006番地59 Gunma, (JP)

(81) 指定国　AL, AU, BA, BB, BG, BR, CA, CN, CU, CZ, EE, GE, GM, HU, ID, IL, IS, JP, KR, LC, LK, LR, LT, LV, MG, MK, MN, MX, NO, NZ, PL, RO, SG, SI, SK, SL, TR, TT, UA, US, UZ, VN, YU, 欧州特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), ARIPO特許 (GH, GM, KE, LS, MW, SD, SZ, UG, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM)

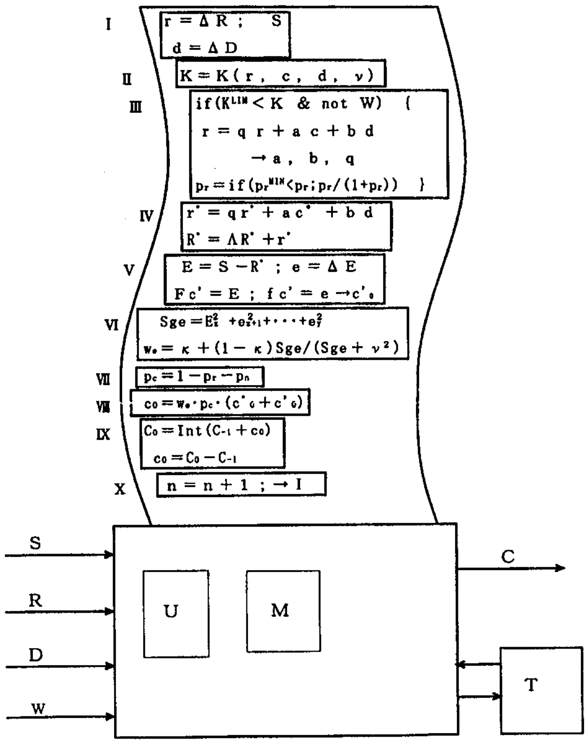
添付公開書類
国際調査報告書

(54)Title: **CONTROL METHOD AND ITS DEVICE**

(54)発明の名称　制御方法とその装置

(57) Abstract

To output the manipulated variable calculated by an arithmetic unit (U) including a nonvolatile memory device (M) by inputting a desired value (S), a controlled variable (R), and a disturbance value (D), a response function is identified by using data of when the (R), (C), and (D) vary greatly though not abnormally, the (R) is predicted by using the (R), (C), and (D)s of the past, present, and future (plan), and the correction value of the (C) for equalizing the (R) to the (S) is calculated, as the present value of the differential of the (C), based on the predicted valuable of the (R). The product of the correction value, the coefficient which is the remainder obtained by subtracting the uncertainty of the response function and the model unsuitability from 1, and the noise compressibility is made the differential of the present output value, and the differential is added to the output value of previous control period, thus outputting the sum. The data, such as the response function, obtained during a control is stored in the (M). Any sudden failure occurring during conventional digital control where a response function is identified and controlled and any noise amplification state are avoided. Feedforward is realized, and control disorder due to a knowable disturbance is prevented.



(57)要約

目標値S，制御値R，外乱値Dを入力して、不揮発性記憶装置Mを含む演算装置Uで計算した操作値Cを出力する場合において、異常時でなく、R，C，Dの変化が大きい場合のデータで応答関数を同定し、R，Cと過去、現在、未来(予定)のDを用いてRを予測し、その予測値を元にRをSに一致させるCの修正量をCの差分の現在値として算出します。この値に、1から応答関数の不正確さとモデル不適性を引いた係数と、雑音圧縮率を乗じた値を、現時点の出力値の差分とし、前制御周期の出力値に加えて出力します。応答関数等、制御中に求めたデータは、Mに保存します。

応答関数を同定して制御する、従来のデジタル制御に起こる、突然の破綻や、雑音増幅状態をが避けられます。フィードフォワードが実現し、可知的外乱による制御の乱れが防げます。

明　細　書

制御方法とその装置

技術分野

本発明は制御と同時に応答関数を同定(以下、修正を含む)する近代制御理論を用いたデジタル制御に発生する突発的な破綻（制御不能状態や発振状態に陥る事）や雑音を増幅した様な制御状態に陥らない制御方法とその制御装置に係わります。測定可能であるか予定により知り得る外乱(可知的外乱 obtainable disturbance Ｄで表す)がある場合にはＤの悪影響を打ち消すフィードフォワードも実現できます。

背景技術

≡で定義、⇒で帰結、⇔で同値、∈で要素、∉で非要素、∃で存在、¬で否定、∀で全て、∧でかつ、∨で又は、Min()で最小値、Max()で最大値、||で絶対値、^{t}で転置行列、Σで和を表します。

最近デジタル処理をする演算装置を備えた機器が増えています。これらの装置ではカムや歯車等の機械要素の機能が演算装置内で行われる演算で代替され、演算方法が様々な形や大きさのカムや歯車の組み合わせに相当しています。そのような代替の典型的な装置の一つが制御装置です。伝達方程式を用いた制御方法は近代制御法と呼ばれ、従来のＰＩＤ制御に代わりに近代制御法が試行されています。近代制御法を用いると高速でかつ正確な制御が実現します。しかも、従来のＰＩＤ制御法のＰＩＤの係数に相当する伝達方程式の係数(応答関数と言う)の推定や修正

（同定と言う）を制御を行いながらできる手軽さがあります。しかし、理論の難解さに加えて、同定しながら制御していると、突然の制御不能状態(破綻)や、安定時に雑音を増幅したような不規則な制御状態の継続が起こりました。

演算するにはそのモデル系が必要です。普通は、連続系ならば微分方程式で、離散系ならば差分方程式で表される程度の、あまり複雑でない系を考えます。そして、その系にはエネルギー定理、線形性、重ね合わせの原理が仮定されます。エネルギー産出能の無い系を受動系と言いますが、制御系が受動系であれば、操作値Ｃを一定値に保持すると、やがて制御置Ｒも一定値に近づきます。Ｃを保持した時に、やがてＲが一定値になる事をエネルギー定理が成り立つと言います。火薬に着火した場合や倒立振子がエネルギー産出系の例になります。通常、火薬は着火するとその後の爆発状態をコントロールできません。倒立振子では、放置すると準安定点からどんどん離れます。エネルギー産出系は能動系と呼ばれますが、制御可能な能動系はエネルギー定理が成り立つか、少なくともＣの変化でＲを自由に変化できる必要があります。エネルギー定理はエネルギー発生のない系で、エネルギーがエントロピーの大きな状態に変化して平衡状態が実現する事を表現したものです。

次に、近代制御理論での伝達方程式の導出過程を説明します。

原因Ｃ，Ｄを保持した時に、結果Ｒが一定値に近づく(エネルギー定理)事を数値的に表現するため、測定や設定される生の値(実値と言う)でなく、変化量(時間による微分値や時系列を表す数列の差分)を用います。

変化量を用いると、エネルギー定理を「原因ｃ，ｄが０になれば、やがて結果ｒも０になる」と表現できます。

$c=\partial C,\ d=\partial D,\ r=\partial R$　　∂：時間微分　　連続系　　(1)

$c=\Delta C,\ d=\Delta D,\ r=\Delta R$　　Δ：差分　　離散系　　(2A)

連続系で、因果関係を、(３)の様に線形微分方程式で表します。

$$u(\partial)r(t)=v(\partial)c(t)+w(\partial)d(t) \tag{3A}$$

$$\left.\begin{aligned} u(\partial)&\equiv u_0+u_1\partial+u_2\partial^2+\cdots+u_{\omega q}\partial^{\omega q}\\ v(\partial)&\equiv v_0+v_1\partial+v_2\partial^2+\cdots+v_{\omega a}\partial^{\omega a}\\ w(\partial)&\equiv w_0+w_1\partial+w_2\partial^2+\cdots+w_{\omega b}\partial^{\omega b}\end{aligned}\right\} \tag{3A'}$$

考えている全て原因の発生時点前迄時間の原点をずらし、$t<0$での関数の値を０にします。ラプラス変換では関数は時間$t<0$で０です。

$$r(t<0)=c(t<0)=d(t<0)=f(t<0)=g(t<0)=0 \tag{3A''}$$

ラプラス変換した $r(t), c(t), d(t), f(t), g(t)$を$\mathbf{r}(s), \mathbf{c}(s), \mathbf{d}(s), \mathbf{f}(s), \mathbf{g}(s)$とします。(3A)をラプラス変換すると、

$$\mathbf{u}(s)\mathbf{r}(s)=\mathbf{v}(s)\mathbf{c}(s)+\mathbf{w}(s)\mathbf{d}(s) \tag{3B}$$

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{u}(s)&\equiv u_0+u_1s+u_2s^2+\cdots+u_{\omega q}s^{\omega q}\\ \mathbf{v}(s)&\equiv v_0+v_1s+v_2s^2+\cdots+v_{\omega a}s^{\omega a}\\ \mathbf{w}(s)&\equiv w_0+w_1s+w_2s^2+\cdots+w_{\omega a}s^{\omega a}\end{aligned}\right\} \tag{3B'}$$

s:ラプラス演算子

となります。有理式$\mathbf{f}(s), \mathbf{g}(s)$を用いると、(5B)となります。

$$\mathbf{r}(s)=\mathbf{f}(s)\mathbf{c}(s)+\mathbf{g}(s)\mathbf{d}(s) \tag{5B}$$

$$\mathbf{f}(s)\equiv\mathbf{v}(s)/\mathbf{u}(s),\ \mathbf{g}(s)\equiv\mathbf{w}(s)/\mathbf{u}(s) \tag{6A}$$

(5B)を逆ラプラス変換すると(5A)となります。

$$r(t)=\int f(t-x)c(x)\,dx+\int g(t-x)d(x)\,dx \tag{5A}$$

(5A)で、$f(t)$, $g(t)$をラプラス変換できる任意の関数にすると、(3A)の微分方程式で表し得ないむだ時間要素等も表現できます。

連続系を離散系にするには、(3A)で微分を差分にし、r, c, dを周期T

でサンプリングした(3C')で置き換えてからラプラス変換し、

$$\left.\begin{aligned} r(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} r_n \delta(t-nT), \quad r_n \equiv r(nT) \\ c(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} c_n \delta(t-nT), \quad c_n \equiv c(nT) \\ d(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} d_n \delta(t-nT), \quad d_n \equiv d(nT) \end{aligned}\right\} \quad \delta():\text{デルタ関数} \qquad (3C')$$

$Z \equiv e^{sT}$で置換します。ラプラス変換できる関数は(3C°)の様にZ^{-1}の0次から始まる級数になり、その係数が時系列になっています。

$$u(\Delta)r(Z) = v(\Delta)c(Z) + w(\Delta)d(Z) \qquad (3C)$$

$$\left.\begin{aligned} u(\Delta) &\equiv u_0 + u_1\Delta + u_2\Delta^2 + \cdots + u_{\omega q}\Delta^{\omega q} \\ v(\Delta) &\equiv v_0 + v_1\Delta + v_2\Delta^2 + \cdots + v_{\omega a}\Delta^{\omega a} \\ w(\Delta) &\equiv w_0 + w_1\Delta + w_2\Delta^2 + \cdots + w_{\omega b}\Delta^{\omega b} \end{aligned}\right\} \qquad (3C'')$$

$$r(Z) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} r_n Z^{-n}, c(Z) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} c_n Z^{-n}, d(Z) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} d_n Z^{-n} \qquad (3C^{\circ})$$

その級数に$1-Z^{-1}$を掛けると、Z^{-n} の係数が差分になるので、差分演算子を(8A)で置き換えます。この一連の手続をZ変換と言います。

$$\Delta = 1 - Z^{-1} \qquad (8A)$$

$u(\Delta), v(\Delta), w(\Delta)$を$Z^{-1}$の級数に書き換えると(4D)になります。

$$r(Z) = a(Z)c(Z) + b(Z)d(Z) + q(Z)r(Z) \qquad (4D)$$

$$\begin{aligned} u(\Delta) &= u_0 + u_1\cdot(1-Z^{-1}) + u_2\cdot(1-Z^{-1})^2 + \cdots + u_{\omega q}\cdot(1-Z^{-1})^{\omega q} \\ &= (u_0 + u_1 + u_2 + \cdots + u_{\omega q}) + (-u_1 - 2u_2 - \cdots - \omega q \cdot u_{\omega q})Z^{-1} + \\ &\quad \cdots + u_{\omega q}\cdot(-1)^{\omega q}\cdot Z^{-\omega q} \end{aligned} \qquad (4D')$$

$$u^* \equiv u_0 + u_1 + u_2 + \cdots + u_{\omega q} \qquad (4D'')$$

$$\left.\begin{aligned} a(Z) &\equiv v(\Delta)/u^* \equiv a_0 + a_1\cdot Z^{-1} + a_2\cdot Z^{-2} + \cdots + a_{\omega a}\cdot Z^{-\omega a} \\ b(Z) &\equiv w(\Delta)/u^* \equiv b_0 + b_1\cdot Z^{-1} + b_2\cdot Z^{-2} + \cdots + b_{\omega b}\cdot Z^{-\omega b} \\ q(Z) &\equiv 1 - u(\Delta)/u^* \equiv \quad q_1\cdot Z^{-1} + q_2\cdot Z^{-2} + \cdots + q_{\omega q}\cdot Z^{-\omega q} \end{aligned}\right\} \qquad (4D^{\circ})$$

$a(Z), b(Z), q(Z)$は$v(1-Z^{-1})$, $w(1-Z^{-1})$, $u(1-Z^{-1})$を$u(1-Z^{-1})$の定数項u^*

で割って得られる$v(\Delta), w(\Delta), u(\Delta)$の$\Delta$の次数と同じ$Z^{-1}$の次数の$Z^{-1}$の多項式です。他方、(5A)をZ変換すると、(5D)になります。

$$r(Z)=f(Z)c(Z)+g(Z)d(Z) \qquad (5D)$$

$$f(Z)\equiv\sum_{n=0}^{\infty} f_n Z^{-n},\ g(Z)\equiv\sum_{n=0}^{\infty} g_n Z^{-n} \qquad (5D')$$

$$\left.\begin{aligned} f(t)&=\sum_{n=0}^{\infty} f_n\,\delta(t-nT),\quad f_n\equiv \mathbf{f}(nT)\\ g(t)&=\sum_{n=0}^{\infty} g_n\,\delta(t-nT),\quad g_n\equiv \mathbf{g}(nT)\end{aligned}\right\} \qquad (5D'')$$

(4D)(5D)がZ変換を用いた制御論の基本方程式です。

(4D)(5D)で$r(Z)$のZ^{-n}の係数を等値すると、(4E)(5E)が得られます。

$$r_n=\sum_{i=0}^{\omega a} a_i c_{n-i}+\sum_{i=0}^{\omega b} b_i d_{n-i}+\sum_{i=1}^{\omega q} q_i r_{n-i} \qquad (4E)$$

$$r_n=\sum_{i=0}^{n} f_i c_{n-i}+\sum_{i=0}^{n} g_i d_{n-i} \qquad (5E)$$

(4E)(5E)の右辺c，dは原因、左辺のrは結果であるので、結果が原因より遅れる事と(4D°)より(10A)が成立します。

$$f_0=g_0=a_0=b_0=q_0=0 \qquad (10A)$$

$$r_n=\sum_{i=1}^{\omega a} a_i c_{n-i}+\sum_{i=1}^{\omega b} b_i d_{n-i}+\sum_{i=1}^{\omega q} q_i r_{n-i} \qquad (4E')$$

$$r_n=\sum_{i=1}^{n} f_i c_{n-i}+\sum_{i=1}^{n} g_i d_{n-i} \qquad (5E')$$

演算子の算法は、一般の代数演算に従う事が仮定され、$g(Z), f(Z)$が(6B)(6B')の関係を満たします。

$$f(Z)=a(Z)/(1-q(Z)),\ g(Z)=b(Z)/(1-q(Z)) \qquad (6B)$$

$$f(Z)=v(1-Z^{-1})/u(1-Z^{-1}),\ g(Z)=w(1-Z^{-1})/u(1-Z^{-1}) \qquad (6B')$$

一般の数列を英字で、特殊な役目をする数列をギリシャ大文字や数字で始まる記号で示します。実値を大文字で、変化量を対応する小文字で表す事に対応させ、差分和分の関係にある数列は和分を大文字で、差分を対応する小文字で表します。数列を表す記号(例えばA)や式（例えばA＋B)に下付文字(例えばk）を付し、その数列や式の意味する数列の

成分(項と言い、その番号を項位と言う)を、“A_k”，“$(A+B)_k$” の様に表します。数列の一般的な項(一般項)を第n項とし、$A\equiv\{A_n\}$の様に表したり、項を並べたり、条件を書いて表します。{}内に項を一つだけ書いた場合は、第n項を意味します。従来法では制御開始時点を第0項にして、制御周期をTとする時、その後のT，2T，3T，・・・ 時点の値を第1項，第2項，第3項，・・・とする数列(右無限数列)で表しました。その代わりに、第－1項，第－2項，第－3項，・・・という項位が負になる項もある数列(両無限数列) を考えます。任意の右無限数列Aに対し、0 の値をとる負の項位の項を付加した両無限数列A'を考え、これをAと同一視します。

$$A\equiv\{a_0, a_1, a_2, \cdots\}, A'\equiv\{\cdots, 0, 0, a_0, a_1, a_2, \cdots\} \quad A'\equiv A \qquad (11)$$

n未満の項位となる項が全て0である事を“(n,” で表します。“(-∞,” を“(,” と略記します。“(n,” かつ第n項が0でない事を[n,” で表し、この様なnが存在する事を“[,” と略記します。 nを初位、第n項を初項と言います。“α” の後に数列や式を“αA”，“α(A＋BC)”の様に付けて、数列Aや式A＋BCで表される数列の初位を表現します。同様に、n超の項位の項が全て0である事を“n)” で、“n)” かつ第n位が0で無い事を“n]” で表し、“+∞)” を“)” で、“n]” となる nが存在する事を“] ” で略記します。このnを終位、第n項を終項と言い、初位における“α” 同様に“ω” を用いて終位を表します。 数列AのX未満とY超の項位の項を0として、第X項から第Y項迄を算出したり、 観測したりする場合、便宜的にXをαA，YをωAとし、A∈(αA，ωA) と表現します。0に限らない項の数を項数と言います。

以上を数列の集合としてまとめると、次の様になります。

$$A \in [X, Y] \quad \Leftrightarrow \quad X = \alpha A, Y = \omega A \tag{12A}$$

$$A \in (X, Y) \quad \Leftrightarrow \quad A_{n<X} = A_{n>Y} = 0 \tag{12B}$$

$$A \in [X, Y) \quad \Leftrightarrow \quad X = \alpha A, Y \geqq \omega A \tag{12C}$$

$$A \in (X, Y] \quad \Leftrightarrow \quad X \leqq \alpha A, Y = \omega A \tag{12D}$$

(12A)で初位がX，終位がYとなる数列の集合を[X,Y]と定義し、(12B)で項位がX未満とY超の項が０となる数列の集合を(X,Y)と定義しています。(12C)(12D)も同様です。

右無限数列全体は(0,)で、両無限数列全体は(,)で表されます。

$$\{\cdots, 0, 0, a_0, a_1, a_2, \cdots\} \in (0,) \tag{12E}$$

$$\{\cdots, a_{-1}, a_0, a_1, a_2, \cdots\} \in (,) \tag{12F}$$

初項がある数列[,)を左正則数列と言い[)で表し、終項がある数列(,]を右正則数列と言い(]で表します。項数が1以上の有限個の数列[,]を有限数列と言い､[]と略記します。(]と[)との積集合は[]です。０と、[)，(]，[]との和集合(合併集合)を左正則的数列，右正則的数列，有限的数列と言い、[)+0，(]+0，[]+0で表します。(0,)を拡張して加減乗除が自由に計算ができるのは[)+0です。[]を拡張して加減乗除が自由に計算ができる集合を有理数列と言います。本発明の説明は主に左正則的数列又は有理数列を用います。第X項から第Y項の間で関係(例えば$A = B$，$C \neq D$)が成立する事を$A = B$，$C \neq D$ [X,Y] の様に表します。

[,(,),]の使い方は数列の初位、終位の表現や省略法に準じます。

特殊な数列を定義しておきます。

$$\Lambda \equiv \{\Lambda_{n \neq 1} = 0, \Lambda_1 = 1\} \in [1, 1] \tag{8B}$$

$$\Lambda^m \equiv \{\Lambda_{n \neq m} = 0, \Lambda_m = 1\} \in [m, m] \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots \tag{8C}$$

$$\Delta \equiv \{\cdots, 0, 0, 0, \Delta_0 = 1, \Delta_1 = -1, 0, 0, 0, \cdots\} \tag{8D}$$

$\Sigma \equiv \{\Sigma_{n<0}=0,\ \Sigma_{n\geqq 1}=1\}=\{\cdots 0,0,\Sigma_0=1,1,1,\cdots\}$ (8E)

$N \equiv \{\cdots,0,0,N_0=N,0,0,\cdots\}$　　N：数字 (8F)

$0=\{\cdots,0,0,0,\cdots\},\quad 1=\{\cdots,0,0,1_0=1,0,0,\cdots\}$ (8G)

$\Phi(k)=\{k\}=\{\cdots,k,k,k,k,k,\cdots\}$ (8H)

数列０には初項も終項もありません。特殊な数列の定義で、数列が重複して定義されていますが、この重複(13)は、後述のべき乗の定義に従っています。左正則的数列Λ^{-1}がＺ演算子の働きをします。

$\Lambda^0=1,\quad \Lambda=\Lambda^1$ (13)

$Z \equiv \Lambda^{-1}$ (8I)

二つの数列がある時、数列の和や差を項毎の和や差で定義します。

$A \pm B \equiv \{A_n \pm B_n\}$ (14A)

また、数(スカラー)ｋとの積を全項をｋ倍する事で定義します。

$kA \equiv \{kA_n\},\quad -A \equiv (-1)A$ (14B)

この定義により、次の諸関係が成り立ちます。

$A \pm 0 = A$ (15A)

$A - A = A + (-A) = 0$ (15B)

$A + B = B + A$ (16A)

$A + (B + C) = (A + B) + C$ (17A)

$A \pm B \in (\mathrm{Min}(\alpha A, \alpha B), \mathrm{Max}(\omega A, \omega B))$ (18A)

$\{A_n\}=\cdots+A_{-2}\Lambda^{-2}+A_{-1}\Lambda^{-1}+A_0+A_1\Lambda+A_2\Lambda^2+\cdots$ (19)

(15A)(15B)は０が加法の単位元である事、(16A)(17A)は交換法則と結合法則が成立つ事を表します。(18A)は[)+0同士の和や差が[)+0になる事を表します。(19)は数列がΛのLaurent級数で表わせる事を示します。右無限数列が$\Lambda=Z^{-1}$の第０次から始まる級数になる事の拡張です。

数列の値を決める方法に、漸化式があります。これは、一般項を、より小さな項位の項のみで表す方法です。この漸化式(20B)を(20A)の様に積で表す事にすると任意の数列A，Bの積の定義が(14C)の様に、

$$r = q \cdot r \qquad q \in (1,] \tag{20A}$$

$$r_n = q_1 \cdot r_{n-1} + q_2 \cdot r_{n-2} + q_3 \cdot r_{n-3} + \cdots + q_{\omega q} \cdot r_{n-\omega q} \tag{20A'}$$

$$q \cdot r \equiv \{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} q_i \cdot r_{n-i}\} \tag{14C}$$

畳み込みconvolutionとか Cauchy積とか呼ばれる式になります。{}内は約束に従い第n項を表します。q，r ∈ [)+0であれば、q_i又はr_{n-i}が0にのため0になる項を除くと、任意のnについてΣが有限和になります。積の定義により、次の諸関係が成り立ちます。

$$0 \cdot A = 0 \cdot A = 0,\ 1 \cdot A = A \cdot 1 = A \tag{15C}$$

$$A \cdot B = B \cdot A \tag{16B}$$

$$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C) \tag{17B}$$

$$A \cdot (B \pm C) = (A \cdot B) \pm (A \cdot C) \tag{21A}$$

$$A \in [),\ B \in [) \Rightarrow \alpha (A \cdot B) = \alpha A + \alpha B \tag{18B}$$

$$A \in (],\ B \in (] \Rightarrow \omega (A \cdot B) = \omega A + \omega B \tag{18C}$$

$$A \cdot B = 0,\ A \in [)+0,\ B \in [)+0 \Rightarrow (A = 0) \vee (B = 0) \tag{22}$$

積の記号・は省略しても良い事にします。結合法則(17A)(17B)が成立つので、括弧が無い時は積を和差より優先して演算します。例：

$$A + BCD + EF = (A + ((B \cdot C) \cdot D)) + (E \cdot F)$$

q，r ∈ [)+0の場合は、還元則(22)により、r = q r，(1 − q) r = 0から1 − q ≠ 0なので、r = 0となってしまい、r ≠ 0の時は(20B)を全項ついて満足させられません。(20B)を満たさない項X〜Y で(20C')を満たし、(20B)を満たす項では0となるc'を用いれば、全ての項で(20C)を満

$c' = r - qr \quad c' \in (X, Y)$ (20C')

たします。結果$r \neq 0$には、原因$c' \neq 0$が必要です。

$r = qr + c' \quad q \in (1,)$ (20C)

(20B)のqrの代わりにfcで置き換えると、第n時点よりi時点前の原

$r = fc \quad f \in (1,)$ (20D)

$r_n = f_1 \cdot c_{n-1} + f_2 \cdot c_{n-2} + f_3 \cdot c_{n-3} + \cdots + f_i \cdot c_{n-i} + \cdots$ (20D')

因c_{n-i}のi時点後の効果f_iが第n時点r_nに現れると解釈できます。

(20D)は原因cと結果rとを動的に結ぶ関係です。

この様に、漸化式や因果関係を数列で表すと、その係数f，qが(1,)になります。これが、(10A)で説明したことの数列での表現です。

$f, q \in (1,)$ (10B)

(20C)の右辺のc'をacで置換すると、(20E)が得られます。

$r = qr + ac \quad a, q \in (1,) \quad r, c \in [)$ (20E)

原因をc以外にdも考え、(4F)(5F)を得ます。

$r = qr + ac + bd \quad a, b, q \in (1,)$ (4F)

$r = fc + gd \quad f, g \in (1,)$ (5F)

(4F)(5F)は(4E')(5E')になっています。これらの因果関係を表す関係式が伝達方程式と呼ばれる制御の基本方程式です。これらは、漸化式になっており、任意の項が初項側から順次計算できます。

数列Aに対して初項と終項を除いた数列${}^{\alpha}A$と${}^{\omega}A$を定義します。

$A = \{A_n\} \in [) \Rightarrow {}^{\alpha}A \equiv A - A_{\alpha A} \Lambda^{\alpha A}$ (23A)

$A = \{A_n\} \in (] \Rightarrow {}^{\omega}A \equiv A - A_{\omega A} \Lambda^{\omega A}$ (23B)

上付の“α”，“ω”は初項，終項を除く数列を定義する記号です。

$A_{\alpha A}$，$A_{\omega A}$はAの初項と終項、Λのべき乗は(8C)で定義した数列です。

すると、ＡＢ＝Ｃの時、

$C = AB = A_{\alpha A}\Lambda^{\alpha A}B + {}^{\alpha}AB$

$B = (A_{\alpha A})^{-1}\Lambda^{-\alpha A}C - {}^{\alpha}A(A_{\alpha A})^{-1}\Lambda^{-\alpha A}B$ (14D)

$B = \{\cdots, 0, 0, 0, B_{\alpha B = \alpha C - \alpha A} = C_{\alpha C}/A_{\alpha A}, (C_{\alpha C+1} - B_{\alpha B}\cdot A_{\alpha A+1})/A_{\alpha A},$
$(C_{\alpha C+2} - B_{\alpha B}\cdot A_{\alpha A+2} - B_{\alpha B+1}\cdot A_{\alpha A+1})/A_{\alpha A}, \cdots\}$ (14D')

$(A_{\alpha A})^{-1}\Lambda^{-\alpha A}C \in [\alpha C - \alpha A,)$ (14E)

${}^{\alpha}A(A_{\alpha A})^{-1}\Lambda^{-\alpha A} \in (1,)$ (10C)

なので、(14D)はＢについての漸化式形(20C)になっており、初項側から計算できます。(14D)を書き下すと、(14D')になります。左正則的数列Ｃと左正則数列より(14D) による計算で除算を定義し、算出される数列を商と言い、(14F)で表します。

$B = C / A \qquad C \in [)+0,\ A \in [)$ (14F)

０の左正則数列による商を０と定義します。左正則的数列は、０による

$0 / B \equiv 0 \quad B \neq 0$ (14H)

除算を除き、常に除算が可能で、その商は左正則的数列になります。

この除算の定義により、次の諸関係が成り立ちます。

$A / 1 = A$ (15D)

$B \neq 0 \Rightarrow \alpha(A/B) = \alpha A - \alpha B$ (18D)

$B \neq 0 \Rightarrow (A+B)/C = (A/C) + (B/C)$ (21B)

乗除算が定義されたので、べき乗を定義します。

$A \in [) \Rightarrow A^{0} \equiv 1,\ A^{n+1} \equiv A\cdot A^{n},\ A^{n-1} \equiv A^{n}/A$ (14I)

$0^{1} \equiv 0,\ 0^{n+1} \equiv 0\cdot 0^{n>0} = 0$ (14I')

代数式は()で括らない限り、除算を乗算と共に加減算に優先さます。

この様に、左正則的数列の加減乗除に成り立つ法則は、実数や複素数と

全く同じです。行列のような制限が無く、気楽に計算できます。

左正則数列で成立つ事は、初項と終項を入れ替えると、右正則数列でも成立ちます。(23B)より左正則的数列の除算と逆に、終位側からの計算できる漸化式(14K)(逆漸化式と言う)が得られます。この計算を右除算と言い、得られる数列を右商と言い、(14M)で表します。

$$(A_{\omega A})^{-1}\Lambda^{-\omega A}C \in (\alpha C-\omega A,\ \omega C-\omega A) \tag{14J}$$

$$^{\omega}A(A_{\omega A})^{-1}\Lambda^{-\omega A} \in (,-1) \tag{10D}$$

$$B=(A_{\omega A})^{-1}\Lambda^{-\omega A}C-{}^{\omega}A(A_{\omega A})^{-1}\Lambda^{-\omega A}B \tag{14K}$$

$$\begin{aligned} B=\{\cdots,\ &(C_{\omega C-2}-B_{\omega B}\cdot A_{\omega A-2}-B_{\omega B-1}\cdot A_{\omega A-1})/A_{\omega A},\\ &(C_{\omega C-1}-B_{\omega B}\cdot A_{\omega A-1})/A_{\omega A},\ B_{\omega B=\omega C-\omega A}=C_{\omega C}/A_{\omega A},\ 0,\ 0,\ \cdots\} \end{aligned} \tag{14L}$$

$$B=A\diagdown C \quad A,C\in[\,] \tag{14M}$$

右正則的数列の右正則数列による右商は、右正則的数列になりますが、左正則的数列になるとは限りません。右商が有限数列になる時に限り、左正則数列の商(区別する時は左商と言う)と一致します。従って、右除算は終項側から有限数列になる商を求める場合の道具です。

四則演算が定義されたので、特別な数列の性質を説明します。

Λ^mは、任意の数列Aをm項だけ項を右にずらす働きをします。

$$\Lambda^m A=\{A_{n-m}\} \tag{8J}$$

従って、時系列で考える時は、$\Lambda^m A$はm時点前のAを意味します。

Δは、Λで$1-\Lambda$と表現でき、任意の数列Aとの積を差分にします。

$$\Delta=1-\Lambda \tag{8A'}$$

$$\Delta A=\{A_n-A_{n-1}\}=A-\Lambda A \tag{8K}$$

Σは、ΔでΔ^{-1}と表現でき、任意の数列Aとの積を和分にします。

$$\Sigma=\Delta^{-1} \tag{8L}$$

$$\Sigma A = \{A_{\alpha A} + A_{\alpha A+1} + \cdots + A_n\} \qquad (8M)$$

和分、差分の関係は左正則的数列の中では一意的ですが、両無限数列に拡張すると、和分に任意の定数数列Φ(k)∉［）が付加します。

$$a = \Delta A \quad \Leftrightarrow \quad A = \Sigma a + \Phi(k) \quad A \in (,) \qquad (2B)$$

$$a = \Delta A \quad \Leftrightarrow \quad A = \Sigma a \quad A \in [)+0 \qquad (2C)$$

左正則的数列にならない実値を表現する場合には、この点に注意が必要です。特定時点以前で同じ値になる実値同士の差として導入される実値や差分表現を分離する事で導入される実値(例:(2D)(2E)のS，R)は、左正則的数列である必要はありません。

$$e = s - r \quad \Rightarrow \quad E = \Sigma e = \Sigma s - \Sigma r = S - R \qquad (2D)$$

$$r = \Delta R = R - \Lambda R \quad R = \Lambda R + r \qquad (2E)$$

整数同士の和、差、積は整数になりますが、商は１／３の様に整数にならない場合があり、自由に実行できません。０以外での除法を自由にしようとすると、有理数を用いなければなりません。しかし、円周率や２の平方根等は、整数同士の除算で得られないので、無理数と呼ばれます。整数を拡大して除法が自由にできる様にした最小の集合が有理数です。この様に、加減乗法が自由にできる集合に、０以外での除法を自由にできる様にした最小の集合を商体 field of quatients と言います。整数の商体が有理数で、(0,)の商体が[)+0で、[]+0の商体が有理数列です。有理数列は[)+0の稠密 dense (ほぼ連続的)な部分集合です。

因果関係を表す(20D)の両辺にΣを乗じると、(20D″)が得られます。

$$r = f\,c \qquad r \equiv \{r_n\},\ f \equiv \{f_n\},\ c \equiv \{c_n\} \qquad (20D)$$

$$\Sigma r = \Sigma f\,c = f\,\Sigma c,\quad R = \Sigma r,\quad C = \Sigma c$$

$$R = f\,C \qquad (20D'')$$

R，CはR∈[]，C∈[]を満たす様に単位の原点を調整した実値です。(20D″)でパルス状に原因を変化(C＝1)させるとR＝fとなります。即ち、fはパルス応答関数です。階段状に原因を変化C＝Σさせると、R＝Σfですので、Fが階段応答関数になります。

$$F \equiv \Sigma f = \Lambda F + f \qquad (20F)$$

f，g等がパルス応答関数で、F，G等が階段応答関数になります。パルス応答関数と階段応答関数とは差分和分の関係になります。

制御手段の能力は、通常、時間的な変化を無視して表現されます。例えば、この調整弁は、開度1度当たり流量50mm^3/secの調節ができるといった具合です。これは開度を1度変化させた瞬間に50mm^3/secだけ流量が変化するのでなく、時間をかけてこの量の変化をします。即ち操作手段の静的特性は、階段応答関数の極限値に他なりません。

形式的な第∞項で極限を表します。

$$F_\infty \equiv \lim(n \to +\infty)\ F_n \qquad (14N)$$

数列の極限値について、次式が成り立ちます。

$$\left.\begin{array}{l} (\Sigma(a \pm b))_\infty = (\Sigma a)_\infty \pm (\Sigma b)_\infty \\ (\Sigma(a \cdot b))_\infty = (\Sigma a)_\infty \cdot (\Sigma b)_\infty \\ (\Sigma(a / b))_\infty = (\Sigma a)_\infty / (\Sigma b)_\infty \end{array}\right\} \qquad (14o)$$

有限数列aの極限値については、(14P)が成り立ちます。

$$A_\infty = (\Sigma a)_\infty = (\Sigma a)_{\omega a} = A_{\omega a} \qquad a \in [] \qquad (14P)$$

左正則的数列の固有値問題は、少し変則的な形になります。固有値問題は、作用素Aに対し、(A－λ)B＝0を満たすスカラーλと数列B≠0を求める事です。λを固有値、Bを固有元と言います。還元則が成り立つので左正則的数列では、条件を(A－λ)B＝0 [N,M] とある項位

で成り立つ関係にします。両無限数列では[N,M] の制限は不要です。Aとして、Z演算子(数列Z)を採ると次の結果を得ます。

$(Z-\lambda)B=0 \quad \Rightarrow \quad B=\{B_N\cdot\lambda^{n-N}\} \quad [N,M] \quad (25A)$

$(Z-\lambda)^{m+1}\cdot B=0 \quad \Rightarrow \quad B=\{f^m(n)\cdot\lambda^n\} \quad [N,M] \quad (25B)$

$(Z-\lambda_1)^{m1}\cdots(Z-\lambda_k)^{mk}B=0 \Rightarrow B=\{\sum_{i=1}^{k} f^{mi-1}(n)\cdot\lambda_i{}^n\} \quad [N,M] \quad (25C)$

$f^m(n)$で項位nの任意のm次多項式を表します。

さて、(4F)で(26A)が成り立つ時点(第N時点～第M時点)を考えます。

$ac=0,\ bd=0 \quad [N,M] \quad (26A)$

(27B)が成立しますので、両辺に$Z^{\omega q}$を乗じると(27C)になります。

$r=qr,\ (1-q)r=0 \quad [N,M] \quad (27A)$

$1-q=1-q_1Z^{-1}-q_2Z^{-2}\cdots-q_{\omega q}Z^{-\omega q}\in[1,) \quad (27B)$

$(Z^{\omega q}-q_1Z^{\omega q-1}-q_2Z^{\omega q-2}-\cdots-q_{\omega q})\,r=0 \quad [N+\omega q, M+\omega q] \quad (27C)$

Zについて因数分解し、(25C)を用いると、変化の止み方が、(27E)のように、指数関数的になると言う結果が得られます。

$(Z-\lambda_1)^{m1}\cdots(Z-\lambda_k)^{mk}\,r=0 \quad m_1+m_2+\cdots m_k=\omega q \quad (27D)$

$r=\{\sum_{i=1}^{k} f^{mi-1}(n)\cdot\lambda_i{}^n\} \quad [N,M] \quad (27E)$

応答関数の有理式の分母1－qの固有値λ_iを極 pole と呼びます。

極の中に、絶対値が1以上のものがあると、永久に変化が止まないか、増大し続ける事になります。これはエネルギー定理に反します。エネルギー定理の成り立つ制御系では全ての極の絶対値が1未満になり、指数関数的に減少する事になります。

振動要素がある時には、極が一対以上の複素数で表され、これらの極の間でエネルギー交換が起こっていると考えられます。音の圧力と運動エネルギー、振り子の位置のエネルギーと運動エネルギー、電磁波の磁場

と電場等、皆その例です。従って、共役複素数対をセットで考えれば、その合計エネルギーは単調減衰すると考えられます。つまり、振動要素は、エネルギーをセット(和)で考える事で振動の効果を除けますので極が１未満の正の実数になります。温度制御をモデルに考えると、温度制御をする点の周りを、空気や断熱材等の熱伝達の小さな隔壁で多重に包まれています。露出していたとしても、実験台周辺、実験室、研究棟・・・と多重な環境になっている事に変わりありません。これらの多重な環境の隔壁内での熱平衡は内側から外側に向かって、時定数が大きくなります。つまり、極の配列が、多重な空間を表している事になります。当座の制御は、最小の空間で充分な筈ですが、安定した状態になると、次々に外の空間の効果が観測されてくる事になります。絶対値の最小の極のみで、他の極は考えなくとも良い場合が多々あります。必要に応じて極の数を増やし、負や複素数の極を考慮すれば良いのです。

yと $\mathbf{x} \equiv {}^t(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ を測定して、一次式(観測方程式と言う)を仮定／推定／期待してkを求めます。

$$\left.\begin{aligned} & y = k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_2 + \cdots + k_m \cdot x_m = \mathbf{x}\,\mathbf{k} \\ & \mathbf{x} \equiv (x_1, x_2, \cdots, x_m) \\ & \mathbf{k} \equiv {}^t(k_1, k_2, \cdots, k_m) \end{aligned}\right\} \tag{28A}$$

(4F)を観測方程式として有限数列ａ，ｂ，ｑを求めるなら、(28B)です。

$$r = q\,r + a\,c + b\,d \qquad a, b, q \in (1,] \tag{4F}$$

$$\left.\begin{aligned} & m = \omega a + \omega b + \omega c \quad , y = r_0 \\ & \mathbf{k} = {}^t(q_1, q_2, \cdots, q_{\omega q}, a_1, a_2, \cdots, a_{\omega a}, b_1, b_2, \cdots, b_{\omega b}) \\ & \mathbf{x} = (r_{-1}, r_{-2}, \cdots, r_{-\omega r}, c_{-1}, c_{-2}, \cdots, c_{-\omega r}, d_{-1}, d_{-2}, \cdots, d_{-\omega r}) \end{aligned}\right\} \tag{28B}$$

サンプリング時を第０項として表しました。データ(y, $\mathbf{x}$)がｎ組あり、

$(y_1, \mathbf{x}_1), (y_2, \mathbf{x}_2), \cdots, (y_n, \mathbf{x}_n)$

$\mathbf{k}$が真値$\mathbf{k}^\circ$に対する誤差$\boldsymbol{\eta}$があるため、誤差$\boldsymbol{\varepsilon}$が増したと考えます。

$$\left.\begin{array}{ll} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\,\mathbf{k} = {}^t(\varepsilon_i) & i = 1 \sim n \\ \boldsymbol{\eta} = \mathbf{k}^\circ - \mathbf{k} = {}^t(\eta_j) & j = 1 \sim m \end{array}\right\} \qquad (29A)$$

$$\left.\begin{array}{l} \mathbf{y} \equiv {}^t(y_1, y_2, \cdots, y_n) \\ \mathbf{X} \equiv {}^t({}^t\mathbf{x}_1, {}^t\mathbf{x}_2, \cdots, {}^t\mathbf{x}_n) \end{array}\right\} \qquad (28C)$$

この連立方程式を構造方程式と言います。$\mathbf{k}^\circ$の推定値に誤差$\boldsymbol{\varepsilon}$の二乗和を最小にする$\mathbf{k}$を選ぶのが最小自乗法でその手法は広く知られ、その推定値は最尤推定量(最適推定量)になります。x_jによって誤差ε_iが増減する向きを考えて、誤差η_jを減少させる方向にk_jを修正する方法が逐次同定法と呼ばれ、推定量は一致推定量(不偏推定量)になります。

最小自乗法では、n行m列，n行1列の構造行列$\mathbf{X}$，$\mathbf{y}$から(30A) で作られるm行m列，m行1列の正規行列$\mathbf{M}$，$\mathbf{u}$を用いた正規方程式(31A)を満たす

$$\mathbf{M} \equiv {}^t(M_{i,j}) = {}^t\mathbf{X}\,\mathbf{X}\ ;\ \mathbf{u} \equiv (u_i) = {}^t\mathbf{X}\,\mathbf{y} \qquad i, j = 1 \sim m \qquad (30A)$$

$\mathbf{k}$を求めます。一般には、(31A)を掃出し法で解きます。

$$\mathbf{M}\,\mathbf{k} = \mathbf{u} \qquad (31A)$$

掃出し法は$\mathbf{M}$，$\mathbf{u}$のコピーについて$\mathbf{M}$の1行目から始めて第i－1行目迄の掃出し操作によって変形した$\mathbf{M}$，$\mathbf{u}$について、第i行目の掃出し操作を次の様にし、 最終行(第m行)迄実行します。

対角成分$M_{i,i}$が0であれば、i＋1行からn行迄行(第j行)を調べ、$M_{j,i}$が0でなければ、$\mathbf{M}$，$\mathbf{u}$の第j行と第i行とを交換して、対角成分が0でない場合の処理に移る。

※　全ての$M_{j,i}$が0であれば、第1行からi－1行迄の対角成分が0の行

※　(第j行)を調べ、$M_{j,i}$が0でなければ、$\mathbf{M}$，$\mathbf{u}$の第j行と第i行とを交

※ 換して、対角成分が0でない場合の処理に移る。全ての$M_{j,i}$が0であ

※ れば、第i行目の操作を終了する。

対角成分$M_{i,i}$が0でない場合、**M**, **u**の対角行(第i行)の全成分を$M_{i,i}$で割って、対角成分を１にする。続いて、**M**, **u**の対角行以外の全行(第j行)について、対角行の$M_{j,i}$倍を引く。対角成分が1になっているので、対角行を除く全ての対角列が0になる。

第i行目の操作を終了する。

m＝４で掃出した結果の例は (32D)の様になります。掃出し法の操作を$\mathbf{M}^-$で表すと、結果として$\mathbf{M}^-\mathbf{M}$と$\mathbf{M}^-\mathbf{u}$が得られます。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & * & 0 \\ 0 & 1 & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ u_4 \end{pmatrix} \qquad (\mathbf{M}^-\mathbf{M})\,\mathbf{k} = (\mathbf{M}^-\mathbf{u}) \tag{32D}$$

$$\mathbf{M}^-\mathbf{M}\,\mathbf{k} = \mathbf{M}^-\mathbf{u} \tag{32A}$$

$\mathbf{M}^-\mathbf{M}$の対角成分は1又は0で、対角成分が0である対角列の対角成分より上(*の部分)は0であるとは限りません。対角成分が0の行は全列0になります。 $\mathbf{M}^-\mathbf{M}$の第i行の対角成分が0の場合、k_iが一次従属で、独立に決める事ができません。対角成分が0になる行のｋ成分k_iを0にした場合の解が$\mathbf{M}^-\mathbf{u}$で与えられます。**M**が正則の場合、$\mathbf{M}^-\mathbf{M}$の対角成分が全て

$$\mathbf{k} = \mathbf{M}^-\mathbf{u} \tag{32B}$$

１になり※を付した４行が実行されません。**M**が正則でない場合、※を無視して、対角成分が0でない場合の操作をすると、0除算エラーになります。**M**が正則な場合、$\mathbf{M}^-$が逆行列$\mathbf{M}^{-1}$になります。

$$\mathbf{k} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{u} \tag{32C}$$

(30A)で、n－1組のデータにn組目のデータを加える事を、データの更新と言い左向きの矢印で示し、組番号nを省くと(30B)になります。

$$\mathbf{M}\leftarrow\mathbf{M}+{}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x}\ ;\ \mathbf{u}\leftarrow\mathbf{u}+y\cdot{}^t\mathbf{x} \qquad (30B)$$

(30B)で、同じデータ組w_l個を一度に追加更新するならば、(30C)となります。(30C)はこのデータ組がw_l個分の価値があると解釈できます。

$$\mathbf{M}\leftarrow\mathbf{M}+w_l\cdot{}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x}\ ;\ \mathbf{u}\leftarrow\mathbf{u}+w_l\cdot y\cdot{}^t\mathbf{x} \qquad (30C)$$

w_lを加重と言い、(30C)の方法を加重型と言います。(30C)でw_lが実効組数を示すのなら、更新前の**M**，**u**はn－1個の、更新後の**M**，**u**は n個のデータ組を含んでいます。1組当たりの**M**，**u**で表すと(30D) になり、1/nを$p_r\cdot w_l$とすると更新型(30E)が得られます。(30B)でデータ組数が増

$$n\mathbf{M}\leftarrow(n-1)\mathbf{M}+{}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x}\ ;\ n\mathbf{u}\leftarrow(n-1)\mathbf{u}+y\cdot{}^t\mathbf{x} \qquad (30D)$$

$$\mathbf{M}\leftarrow(1-1/n)\mathbf{M}+(1/n)\cdot{}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x}\ ;\ \mathbf{u}\leftarrow(1-1/n)\mathbf{u}+(1/n)\cdot y\cdot{}^t\mathbf{x}$$

$$\mathbf{M}\leftarrow(1-p_r\cdot w_l)\mathbf{M}+p_r\cdot w_l\cdot{}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x}\ ;\ \mathbf{u}\leftarrow(1-p_r\cdot w_l)\mathbf{u}+p_r\cdot w_l\cdot y\cdot{}^t\mathbf{x} \qquad (30E)$$

えると、**M**，**u**の成分が大きくなり、数値オーバーフローを起こしますが、(30E)はこれがないので好まれます。 $p_r\cdot w_l$は、nに無関係な 0に近い正数も用いられます。データの組数が mで一次独立な場合、最小自乗法で計算する事と、(28C) の連立一次方程式を解く事は同値ですので、連立一次方程式を解く事は最小自乗法の特殊型とみします。

一次式(28A)のデータx_iの発生頻度が極端に異なる場合、(31C)(31D) を用いると、頻度の低い部分が桁落ちを起こして情報を失います。これを避けるのに、データの発生頻度の異なるグループに分け、別々の観測方程式にする事があります。２つの場合を例示すると、(28D)の様に、k1, k2のそれぞれについて観測方程式を立てて解きます。

$$y1=x1k1\ ;\ y1\equiv y-x2k2$$

$y2 = x2k2$; $y2 \equiv y - x1k1$ (28D)

能く知られている様に、最小自乗法は、不偏推定量を与えません。

未知数$\mathbf{k}$の数を１個とします($y \sim k\,x$)。σ_{xy}を共分散、σ_x^2をxの分散、σ_y^2をyの分散、$r_{xy} = \sigma_{xy}/\sigma_x\sigma_y$を相関係数とすると、$|r_{xy}| \leqq 1$が成立ちます。xを独立変数，yを従属変数に採った最小自乗法の回帰関数は$y = k_x x$，$k_x = \sigma_{xy}/\sigma_x^2$となり、xを従属変数，yを独立変数に採った最小自乗法の回帰関数は$y = k_y x$，$k_y = \sigma_y^2/\sigma_{xy}$となります。独立変数、従属変数とは、従属変数にのみ誤差があり、独立変数に誤差がないとする立場を表します。実際にはx，yともに誤差がありますので、真のkはk_xとk_yの間の筈です。k_xとk_yの相乗平均k°を真値と仮定すると、$k_x/k^\circ = |r_{xy}| \leqq 1$になります。即ち、通常の最小自乗法で推定した値$k_x$の絶対値は真値の絶対値より小さくなります。$|r_{xy}|$は推定に用いたデータに含まれる雑音(誤差)が大きい程小さくなります。$1 - |r_{xy}|$を不一致度と言う事にすると、雑音が大きい程不一致度が大きくなります。この事情は未知数が２以上の場合でも同じです。

逐次同定法で(28A)の観測方程式のkを求めるには、k_i，x_iの単位を揃える必要があります。それには、同じ性質を持つx_iの係数k_iの代表値k^*_i（平均値、期待値、近似値、和、最大範囲の逆数等）を用いて、x_i，k_iを$k^*_i x_i$，k_i/k^*_iとして、単位を換算します。最大範囲は数値範囲を統一するので換算係数に転用できます。x'_i，k'_iは換算前の値です。

$$\mathbf{x} \equiv (x_1, x_2, \cdots, x_m) = (k^*_1 x'_1, k^*_2 x'_2, \cdots, k^*_m x'_m)$$

$${}^t\mathbf{k} \equiv (k_1, k_2, \cdots, k_m) = (k'_1/k^*_1, k'_2/k^*_2, \cdots, k'_m/k^*_m) \qquad (45A)$$

任意のデータ組で、$y - \mathbf{x}\,\mathbf{k}^\circ = 0$を仮定し、特定の$\eta_i$に注目します。

$$\varepsilon = y - \mathbf{x}\,\mathbf{k} = y - \mathbf{x}\,(\mathbf{k}^\circ + \boldsymbol{\eta}) = \mathbf{x}\,\boldsymbol{\eta} \qquad y - \mathbf{x}\,\mathbf{k}^\circ = 0 \qquad (29B)$$

$$\varepsilon = x_1\eta_1 + x_2\eta_2 + \cdots + x_i\eta_i + \cdots + x_m\eta_m \qquad (29B')$$

$$\boldsymbol{\eta} \equiv (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \cdots, \eta_m) \qquad (29C)$$

(η_i, x_i)の符号(+,+)；(+,-)；(-,+)；(-,-)によってεは+;-;-;+に偏り、η_iの符号は、x_iとεとの積の符号と一致します。そして、εの偏りはη_iが大きい程大きい筈です。そこで(33)として、(29B)に代入すると、(34A)を得ます。

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{x} \cdot \varepsilon / Sg \qquad (33)$$

$$Sg \equiv x_1{}^2 + x_2{}^2 + \cdots + x_m{}^2 = \mathbf{x}^t \mathbf{x} \qquad (34A)$$

(33)をそのまま修正量としたのが基本形(35A)で、1／p_r回に分けて修正する事で雑音の影響を減らすのが更新型(更新率p_r)(35B)、加重を付けて動的にしたのが加重型(加重w_l)(35C)です。

$$\mathbf{k} \leftarrow \mathbf{k} + \boldsymbol{\eta} \qquad (35A)$$

$$\mathbf{k} \leftarrow (1 - p_r)\,\mathbf{k} + p_r \cdot \boldsymbol{\eta} \qquad 0 \leqq p_n \leqq 1 \qquad (35B)$$

$$\mathbf{k} \leftarrow (1 - p_r \cdot w_l)\,\mathbf{k} + p_r \cdot w_l \cdot \boldsymbol{\eta} \qquad 0 \leqq w_l \leqq 1 \qquad (35C)$$

単位を揃えておかないと、(34A)で温度，高さ，電力等々が混ざった二乗和を計算する事になります。単位の取り方で小さな数値になったx_iに対応するk_iは殆ど同定されなくなり、逆に大きくなったx_jに対応するk_jは他の$k_{i \neq j}$が不正確なために生じるεにより大きな修正を受け続けます。

　以上、本発明を説明するために必要な、左正則的数列の説明と、標準的な近代制御理論、制御に用いる計算手法を説明しました。各種学問の結果を羅列した形になりましたが、数学的な説明を厳密にしたり、制御論を詳述するといくら紙面があっても足りませんし、理解が困難になります。浅深を別にすると、制御論については、どのデジタル制御論にも書いてあると思われる事を、左正則的数列を用いた表現に合わせて記述

し直したものです。

高橋安人著　システムと制御　岩波書店　１９７８年

数学セミナー　vol.21,No.07,1982 PP.38〜44

早原四郎・春木茂　新しい演算子法と離散解析関数論　槇書店

岩波数学辞典　日本数学会編集　岩波書店

齋藤正彦　線形代数入門　東京大学出版会

明石　一・今井弘之　制御工学演習　共立出版株式会社

制御工学ハンドブック　朝倉書店

小島紀男・篠崎寿夫　ｚ変換入門　東海大学出版会

発明の開示

FIG.1に示す様に、制御において、ある値(制御値と言い、Ｒで表す)を目標値(設定値とも言い、Ｓで表す)に一致させる(整定と言う)ための値(操作値と言い、Ｃで表す)を変化させます。従って、制御装置とは、少なくともＲとＳの入力装置とＣの出力装置と、周期的に処理するためのタイマーと、ＲとＳとの差に応じたＣの決定装置（演算装置と言い、Ｕで表す）とを有しています。Ｕには記憶装置Ｍを必要とします。必要に応じて表示装置，警報装置，安全装置の入力装置等が付属します。本発明では、この他に、異常時を知る為の入力装置（装置の場所で検知できる場合は、その検知装置を含む）と、が入手可能な可知的外乱Ｄの入力装置が必要となります。Ｍには、プログラムと、制御に必要な初期値データが納められています。通信手段を用いて、外部からこれらのプログラムやデータあるいはタイマーの信号を入手する事もできます。通信手段で外部から入手するものは装置に付属したものとみなします。

デジタル制御装置においてはUで行う入出力値間の演算が機械のカムや歯車の役をしています。制御される対象(制御系)は、制御装置から出力されたCや観測されるDを原因とし、Rを結果とする因果関係を持っています。因果関係を記述する方程式を伝達方程式と言い、伝達方程式を線形方程式で記述した時の係数を応答関数と言います。

近代制御法は、応答関数を求め、応答関数に基づいて出力値Cを決定する事に特徴があります。しかし、従来の方法では理論が複雑で、応答関数を求めながら制御をしていると、突然に制御不能状態に陥ったり、雑音を増幅したような状態になりました。また、高速な計算を要求されて演算回数の制限があるため、データを保存しておいて制御の終了時、休止時間、次回の制御開始時等に応答関数を同定すると、この後の制御が不可能になる事がありました。左正則的数列を用いた理論を使って、実動作を解析しているうちに、これらの原因がわかりました。

入力について極端な例を考えてみます。制御ではRを入力装置より入手し、Cを出力装置から出力します。デジタル式計算機を演算装置に用いる場合、これらの数値は離散化された整数値又は整数値を換算した値となっています。応答関数はこれらの離散化した数値間の関係を表し、Rは測定によって得られます。身長1.65m の人の身長を、誤差の標準偏差0.05mで測定し1m未満を四捨五入したとします。 正規分布を仮定すると、100,000回に135回程度は1mとなり、残りの99,865回は2mとなる事が期待されます。この平均値は1.99865mで1.65mにはなりません。 測定を10億回にしても、1兆回にしてもこの事態は改善しません。 身長を測定し記録する場合にこの様な四捨五入をする人は殆どいないでしょう。しかし、一般の測定ではありふれた現象なのです。デジタル表示された測

定値は、数値のふらつきがあるとアナログ表示よりも視認が困難です。そこで、通常表示が安定する様に測定雑音よりもデジタル化(量子化)の最小単位(量子，デジット)をかなり大きく採ります。表示が安定していると測定者は安心します。それでもふらつきが気になると、ヒステリシスをかけます。身長測定の例では、一度2mと測定されたら、1.40m未満でない限り1mとせず、逆に1mと測定されたら、1.60m以上でない限り2mとしないのです。1mと測定された後に2mと測定され得ますが、一度2mと測定されると、1mと測定される見込みが殆ど無くなります。即ち、デジット変化の少ないデータを統計処理しても信号雑音比S/N の改善が期待できません。このような統計処理の効果がないデジタル化の効果を量子現象と言います。近代制御法では速やかに整定状態に入り安定します。当然、RもCもデジット変動幅が小さくなります。その状態は、応答関数では記述できない雑音と量子現象に支配された世界です。この状態で応答関数の修正を繰り返しているとやがて全くでたらめな応答関数になってしまいます。これが破綻の主な原因でした。この様に、応答関数を同定する近代制御では、量子現象を含めた雑音問題を解決できなければ、ただの理論であり、実用価値がありません。制御しながら同定するからこそ学習効果が生じ、予備測定や装置立ち上げの負担が減少するのです。量子現象を考えると、信号雑音比S/Nが5以上もあるから測定回数を増やせば更にS/Nが改善できると期待できません。

S/Nが10で応答関数を同定しても、1桁の精度もないのです。

この様に、デジット変化の小さい時には応答関数の同定を避けなければなりません。S/N を統計処理で改善できるのは、5～10デジット以上の大きさの白色雑音があり、かつ、デジットの大きさのばらつきやヒステ

リシス等が均され得る場合に限ります。デジタル化の性質が悪いと、多数のデジットにわたる白色雑音でも、測定値の平均値と真値との関係が非直線的になり、S/N が向上しません。応答関数は、原因と結果とを結ぶ係数ですから、結果Ｒの測定だけでなく、原因Ｃ，Ｄの測定や設定についても同様な事が言えます。Ｃの１デジット幅のばらつき、ヒステリシス、不安定性等は、Ｃの変動幅が数デジット程度になった時には大きく影響してきます。

皮肉にも近代制御法で、高速にかつ正確な制御が実現するため、大半の時間が信号の大きさが0～2デジットに雑音が加わった状態になります。量子効果が働き、統計的な手法でS/N が改善されません。

この状態で応答関数の修正を続ける結果、応答関数が破壊されます。

近代制御法は雑音に極めて弱いのです。そこで、

Ｉ)応答関数を、雑音や外乱から保護する。

Ⅱ)不要な雑音に対する操作値の変動を制限して、雑音を増幅しない。

Ⅲ)雑音となる外乱を減らす。外乱の中でも、情報を入手できる可知的外乱Ｄは制御に組み込み、外乱の影響を減殺する。但し、Ｄが入手できない場合は、この限りでない。（Ｄが入手できない場合は、以下の説明でＤ，ｄ，ｂに関する事項を略すか、ｄ＝０とする。）

と言う三つの方針を立てました。

制御には、過去の情報が不可欠であるので、負の項位のある数列で、右連続数列の商体となる左正則的数列で表す事にし、(5F)(4F)を制御系の記述する対等な基本方程式と考えます。

$$r = a c + b d + q r \qquad (4F)$$

$$r = f c + g d \qquad (5F)$$

$$\left.\begin{array}{ll} r=\{\cdots,0,0,r_{\alpha r},r_{\alpha r+1},r_{\alpha r+2},\cdots\}\in[\,)+0 & r=\Delta R \\ c=\{\cdots,0,0,c_{\alpha c},c_{\alpha c+1},c_{\alpha c+2},\cdots\}\in[\,)+0 & c=\Delta C \\ d=\{\cdots,0,0,c_{\alpha d},c_{\alpha d+1},c_{\alpha d+2},\cdots\}\in[\,)+0 & d=\Delta D \end{array}\right\} \quad (7F)$$

$$\left.\begin{array}{l} a=\{\cdots,0,0,a_1,a_2,\cdots,a_{\omega a},0,0,\cdots\}\in(1,\omega a) \\ b=\{\cdots,0,0,b_1,b_2,\cdots,b_{\omega b},0,0,\cdots\}\in(1,\omega b) \\ q=\{\cdots,0,0,q_1,q_2,\cdots,q_{\omega q},0,0,\cdots\}\in(1,\omega q) \end{array}\right\} \quad (7G)$$

$$\left.\begin{array}{ll} f=\{\cdots,0,0,f_1,f_2,\cdots\}\in(1,) & F=\Sigma f \\ g=\{\cdots,0,0,g_1,g_2,\cdots\}\in(1,) & \end{array}\right\} \quad (7H)$$

重ね合わせの原理が成り立つ制御系を考えているので、可知的外乱がN個であれば、(4F)(5F)は次の様になりますが、簡単のため1つとして

$$r=q\,r+a\,c+b1\cdot d1+b2\cdot d2+b3\cdot d3+\cdots+bN\cdot dN \quad (4G)$$

$$r=\qquad f\,c+g1\cdot d1+g2\cdot d2+g3\cdot d3+\cdots+gN\cdot dN \quad (5G)$$

説明します。応答関数f，g；p，a，bの関係は、

$$r-q\,r=a\,c+b\,d,\quad (1-q)\,r=a\,c+b\,d \quad (6C)$$

$$r=a\,c/(1-q)+b\,d/(1-q)=f\,c+g\,d \qquad \therefore$$

$$f=a/(1-q),\ g=b/(1-q) \quad (6D)$$

$$a=(1-q)\,f,\ b=(1-q)\,g \quad (6E)$$

$$a=f-q\,f,\ b=g-q\,g \quad (6F)$$

$$f=a+q\,f,\ g=b+q\,g \quad (6G)$$

となり、a，b，qを既知とする時、f，gが漸化式(6G)で第1項から順次計算できます。逆にf，gよりa，b，qを求めるには、(6F)の第$\omega a+1$項以降をqについての連立方程式(27F)と見てqを算出し、

$$f=q\,f \quad [\omega a+1,\ \omega a+\omega q] \quad (27F)$$

漸化式(6F)で、第1項から順に、a，bを算出します。

ａ，ｂ，ｑが有限数列ですから、ｆ，ｇが有理数列となります。有理数列は、左正則数列の稠密な部分集合ですから工学上左正則数列と考えて支障ありません。即ち、任意の左正則数列に対して、いくらでも差のない有理数列があります。有理数は実数の稠密な部分集合です。円周率を有理数で表しても工学上問題ありません。

即ち工学的な意味で(4F)と(5F)とは等価な表現で、どちらが基本方程式であるとの議論は不要です。

ｒ，ｃ，ｄを制御値、操作値、可知的外乱として、(4F)を次の様に解釈します。Ｚ変換理論でｒ，ｃ，ｄはインパルス応答でした。しかし、Ｚ演算子は、左正則数列ですから他の数列と区別して特別扱いする理由がありません。(4F)(5F)で制御系が過不足無く表現できれば良く、ｒ，ｃ，ｄを単に時系列を表す数列と考えます。インパルス応答とは考え難い二重積分ＡＤコンバータの出力値や統計処理した値でも、測定や設定のタイミングが異なるｒ，ｃ，ｄでも、一向に構いません。ｑ，ａ，ｂの項数も記述に十分であればそれで良しとします。機械設計に、素粒子の場の理論や太陽やアンドロメダ星雲の効果を考慮しないのと同じです。必要な時に考慮すれば良いのです。何が観測でき、何が観測できないかという可観測性と、何が制御でき、何が制御できないと言う可制御性を、予め確認し、制御系が可観測性と可制御性を満たしていれば、連続系との関連を無視しても良い事になります。従来強調されてきた、陰の応答で代表されるサンプリング定理も、可観測性を満たさない制御周期を選んではならないと言うだけの事です。

従来解釈がされていないｑ，ａ，ｂを次の様に解釈します。

ｑ，ａ，ｂは、初位が１以上であり、応答関数としての資格を備えてい

るので、応答関数であると認めます。すると、ｑは、結果であるｒを原因とする応答関数です。即ち、結果の中に蓄積された、未来に影響を与える要素に対しての応答関数です。ベルを鳴らす場合を考えます。ベルに瞬時の衝撃を与えたとしても、ベルは暫く鳴り響きます。瞬時の衝撃（ｃ，ｄ）はベルに変形（ｒ＝ａｃ＋ｂｄ）を与えます。この変形（ｒ）は、歪みエネルギーと運動エネルギーで、新たな変形（ｒ＝ｑｒ）をもたらします。変形はこの総合効果（ｒ＝ａｃ＋ｂｄ＋ｑｒ）です。変形は周囲の空気に振動を与え続けて音になります。同じ変形であれば、その後の効果は、ベルに依存し、衝撃を与える手段には依りません。ただ、多くの場合、手段ｃ，ｄが違えば、異なった変形ａｃ，ｂｄを与えます。この様に、ｑは結果ｒの内部に蓄積される効果を示し、記憶効果や共鳴効果等の現象を記述する応答関数です。ａ，ｂを記憶効果を考慮した正味関数 net function、ｆ，ｇを総体関数 gross function と考えます。

初期値についても(20C) で述べた左正則的数列の表現の通則に従い、「結果には、原因がある」と考えます。伝達方程式(4F)(5F)が制御開始以前、開始後に拘わらず、常に成り立ち、初期値は、制御開始直前の初期原因によって発生した結果であると考えます。

(4F) をｃ，ｄについて解いた、

ｃ＝（ｒ－ｑｒ－ｂｄ）／ａ　(36A)

ｄ＝（ｒ－ｑｒ－ａｃ）／ｂ　(36B)

で、初期原因をｃに担わせる事も、ｄに担わせる事もできます。

必要であれば、観測値を元に推定すれば良いのです。原因が無ければ、結果が生じないと考えるだけです。この様にして、全ての時点で伝達方程式の成立が仮定できるので、制御開始時点を第０項にする理由が無く

なります。注目する時点、例えば現時点を第０時点にできます。

制御の手順を説明します。

(4F)を観測方程式として有限個の既知のデータｒ，ｃ，ｄを用い、ａ，ｂ，ｑを求めます。算出方法は、最小自乗法でも逐次同定法でも結構です。ａ，ｂ，ｑが求められれば(6G)によってｆ，ｇを算出します。

操作量ｃを過去の実績値及び今後について適当に仮定した値c°と制御値を目標値に一致させる修正値c'とに分けて考え、(4I)～(5L)を得ます。

$$c = c^\circ + c' \qquad c' \in (0, \omega c') \tag{37}$$

$$r^\circ = a c^\circ + b d + q r^\circ \tag{4I}$$

$$R^\circ = \Lambda R^\circ + r^\circ \tag{2F}$$

(4I)(2F)によって、予測値r°，R°を必要な項数(1～Y)計算します。

$$r = f (c^\circ + c') g d = r^\circ + f c', \quad r^\circ = f c^\circ + g d \tag{5I}$$

$$f c' = e \qquad e \equiv r - r^\circ = \Delta E \in (1,) \tag{5K}$$

$$F c' = E \qquad E \equiv \Sigma e = R - R^\circ \in (1,) \tag{5L}$$

(5L)で、ＳをＲを一致させる未来の時点X～YでＲをＳに置き換えて、c'

$$R = S, \quad r = s \qquad [X, Y] \tag{38}$$

を求めます。c'が求まったら$C = \Lambda C + c = \Lambda C + c^\circ + c'$の第０項を

$$C_0 = C_{-1} + c^\circ{}_0 + c'{}_0 \tag{39A}$$

本発明では修正係数k_cで修正(39B)して出力します。

$$C_0 = C_{-1} + c_0, c_0 \leftarrow k_c \cdot (c'{}_0 + c'{}_0) \tag{39B}$$

を出力します。

(4I)(2F)を一緒にして、(4J)でr°を使わずにR°を計算できます。

$$q' \equiv \Delta q + \Lambda \tag{6H}$$

$$R^\circ = a c^\circ + b d + q' R^\circ \tag{4J}$$

漸近式の計算が煩わしければ、同定の時に(6I)を求めておいて(4L)によってN時点後の実値の制御値$\Lambda^{-N}R^{\circ}$を推定できます。

式は複雑ですが、応答関数を頻繁に同定しない場合は便利です。

$$r^{\circ}=ac^{\circ}+bd+qr^{\circ}=ac^{\circ}+bd+q(ac^{\circ}+bd+qr^{\circ})=\cdots$$

$$=(1+q+q^{2}+\cdots+q^{N-1})(ac^{\circ}+bd)+q^{N}r^{\circ} \tag{4K}$$

$$\Lambda^{-N}r^{\circ}=(1+q+q^{2}+\cdots+q^{N-1})\Lambda^{-N}(ac^{\circ}+bd)+\Lambda^{-N}q^{N}r^{\circ}$$

$$\Lambda^{-N}R^{\circ}-R^{\circ}=\Sigma_{(1,M)}r^{\circ}=a_{(N)}c^{\circ}+b_{(N)}d+(q_{(N)}-1)R^{\circ}$$

$$\Lambda^{-N}R^{\circ}=a_{(N)}c^{\circ}+b_{(N)}d+q_{(N)}R^{\circ} \tag{4L}$$

$$\left.\begin{aligned}
&\Sigma_{(M,N)}\equiv\Lambda^{-M}+\Lambda^{-M-1}+\cdots+\Lambda^{-N}\\
&\Lambda_{(N)}\equiv\Sigma_{(1,N)}+q\Sigma_{(2,N)}+q^{2}\Sigma_{(3,N)}+\cdots+q^{N-1}\Sigma_{(N,N)}\\
&a_{(N)}\equiv a\Lambda_{(N)},\ b_{(N)}\equiv b\Lambda_{(N)}\\
&q_{(N)}\equiv 1+\Delta(\Lambda^{-1}q+\Lambda^{-2}q^{2}+\Lambda^{-3}q^{3}+\cdots+\Lambda^{-N}q^{N})
\end{aligned}\right\} \tag{6I}$$

(4I)(4J)(4L)で可知的外乱dは、過去と現在の値だけでなく、未来の予定値が入手できる場合は、その予定値も利用します。R°の推定に可知的外乱dを用い、フィードフォワードを実現しています。この方法で可知的外乱をR°の推定に用いる方法を可知的外乱取込法と言います。

これらの式でR，S，R°は左正則的数列である必要はありません。

東京にいる時、ニューヨークから10分以内に来て欲しいと言われたとします。しかし切符の手配、空港迄の所要時間、飛行時間、ニューヨークの空港から現地迄の時間等を要します。10分後は、確かに未来ですが、少なくとも現在の交通事情では不可能です。短時間で行こうとすればする程無理が生じます。制御でも同じで、整定の準備を開始してから整定する迄にある程度の時間が必要です。この様子を調べてみます。

(5K)の初位に注目すると(5N)になっています。即ち、むだ時間である

$\alpha e = \alpha f + \alpha c' = \alpha f \quad e \in (\alpha f,)$ (5N)

αf時点以後でなければ一致させる事ができません。

(5K)や(5L)をc'について直接解くとすれば、(5M)になります。

$c' = F^{-1}E = f^{-1}e$ (5M)

f^{-1}を計算する除法に倣って、fを初項を元に展開して逆数列を求めてみると(6J″)となり、c'が(5M)を使って(43A)と求まります。

$f = f_{\alpha f}\Lambda^{\alpha f} + (f - f_{\alpha f}\Lambda^{\alpha f}) = f_{\alpha f}\Lambda^{\alpha f} + {}^{\alpha}f$ (6J)

$f = f_{\alpha f}\Lambda^{\alpha f}(1 + f'),\ f' \equiv {}^{\alpha}f\Lambda^{-\alpha f}/f_{\alpha f} \in (1,)$ (6J')

$f^{-1} = f_{\alpha f}{}^{-1}\Lambda^{-\alpha f}(1 - f' + f'^{2} - f'^{3} + \cdots) \in [-\alpha f,)$ (6J″)

$c' = f_{\alpha f}{}^{-1}\Lambda^{-\alpha f}(1 - f' + f'^{2} - f'^{3} + \cdots)e$ (43A)

$1 - f' + f'^{2} - f'^{3} + \cdots$の$f'^{k}$に注目すると、$f'^{k}$の中に、$\alpha f < j$となる全ての$j$について$(f_j/f_{\alpha f})^k\Lambda^{(j-\alpha f)k}$となる項が含まれます。もし、$1 \leqq |f_j/f_{\alpha f}|$であれば、ある時点で生じたeが、$c'$の未来に減衰せずに影響を与え続けます。このような操作は好ましくありません。

即ち、(43A)のc'を用いて制御するならば、(40A)が必要です。

$|f_j/f_{\alpha f}| < 1 \qquad \forall j > \alpha f$ (40A)

一般的には(40A)が成立しません。このため、各種の方法が工夫される必要があるのです。一つの方法は、(40B)を満たすZをさがします。

$|f_j/F_Z| < 1,\ \forall j > Z$ (40B)

そして、応答関数をこのZを初項とする(41A)の応答関数で近似し、乖離も第Z項から0でなくなる(42A)と仮定します。この近似応答関数なら、(40)を満たすので、(6J″)が収束します。

(41A)の近似は、連続系で ZieglerとNicholsの限界感度法に用いたもので、ＰＩＤ制御のチューニングに用いられています。

$f_z \leftarrow f_1 + f_2 + f_3 + \cdots + f_z = F_z, f_{n<z} \leftarrow 0, F_{n<z} \leftarrow 0, \alpha f \leftarrow Z$ (41A)

$e_z \leftarrow e_1 + e_2 + e_3 + \cdots + e_z = E_z, e_{n<z} \leftarrow 0, E_{n<z} \leftarrow 0$ (42A)

この近似でc'_0を求めると(6J″)より(43B)が得られます。

$c' = (1 - f' + f'^2 - f'^3 + \cdots)(E_z + e_{z+1}\Lambda + e_{z+2}\Lambda^2 + \cdots)/A_z$ (43B)

$c'_0 = E_z/A_z$ (43B')

(5K)(5L)に(1−q)を掛けると(4M)になります。この(4M)で強い収

$a c' = (1-q)e = (1-q) f c'; \; A c' = (1-q)E = \Sigma a c'$ (4M)

束条件が得られます。a^{-1}を初項を元に展開すると(6P″)となります。

もし、$\alpha a = \omega a$であれば、(27H)(6P°)となります。

$a = a_{\alpha a}\Lambda^{\alpha a} + (a - a_{\alpha a}\Lambda^{\alpha a}) = a_{\alpha a}\Lambda^{\alpha a} + {}^{\alpha}a$ (6P)

$a = a_{\alpha a}\Lambda^{\alpha a}(1 + a'), a' \equiv {}^{\alpha}a\Lambda^{-\alpha a}/a_{\alpha a} \in (1,)$ (6P')

$a^{-1} = a_{\alpha a}^{-1}\Lambda^{-\alpha a}(1 - a' + a'^2 - a'^3 + \cdots) \in [-\alpha a,)$ (6P″)

$a' = a'^2 = a'^3 = \cdots = 0$ (27H)

$a^{-1} = a_{\alpha a}^{-1}\Lambda^{-\alpha a} \qquad \alpha a = \omega a$ (6P°)

そこで、aを(41B)で近似して(42B)の条件で解くと(43C)となります。

$a_{\omega a} \leftarrow A_{\omega a}, a_{n<\omega a} \leftarrow 0$ (41B)

$e_{\omega a} \leftarrow E_{\omega a}, e_{n<\omega a} \leftarrow 0, e_{n>\omega a}$:不変 $\quad e \in (\omega a,)$ (42B)

$c' = A_{\omega a}^{-1}\Lambda^{-\omega a} e(1-q), \; c'_0 = E_{\omega a}/A_{\omega a}$ (43C)

この収束条件は完全です。第ωa時点以降が間に合う未来になります。

(43B')(43C)のc'_0が初点(E_z, $E_{\omega a}$)だけで決まるので、初点整定法と言います。(4M)の第$\omega a + \omega c' + 1$項以降を調べてみます。すると、(27G)

$a c' = 0 = e - q e \qquad [\omega a + \omega c' + 1,)$ (26B)

$e = q e \qquad [\omega a + \omega c' + 1,)$ (27G)

となり、$\omega a + \omega c' + 1$時点以降のeの値はそれ以前のeの値で決まり

ます。この時点以降で一致させようとすると、それ以前の時点での一致の少なくとも一部を諦めなければなりません。第ωa＋ωc'＋1時点以降は遠い未来です。まとめると、αa時点より前の整定は不可能で、Z時点以降で整定しないと拡大基調の操作になる危険があり、ωa時点以降で整定させれば操作は安定です。しかし、ωa＋ωc'＋1時点以降の整定は、この時点以前の整定に犠牲を要求します。

目標値が普段は一定で希に変化させる制御系と、目標値を時々刻々とプログラム的に変化させる制御系とがあります。前者の場合、可知的外乱の変化も散発的な変化に留まれば、Y＋1時点以降を不変、即ちeを

$$e = 0 \quad [Y+1,) \qquad e \in (1, Y) \tag{42C}$$

有限数列と仮定します。(5K)(5L)は(4M)となりますが、uを(5P)を満たす有限数列とすれば、(4M)は(43D)の解を持ちます。

$$a\,u = e \qquad u \in (0, \omega u),\ Y = \omega a + \omega u \tag{5P}$$

$$c' = u\,(1 - q),\ c' \in (0, \omega u + \omega q) \tag{43D}$$

(5P)で、u，eの項数はωu＋1，ωu＋ωaですので、ωa≠1であれば、uは(5P)で表される任意のeについて解く事ができません。そこで、(5P)の方程式数を(5P')の様にωu＋1に減らします。

$$(A\,u)_{\omega a} = E_{\omega a};\quad a\,u = e \quad [\omega a + 1, \omega a + \omega u] \tag{5P'}$$

この方程式は、解(5Q)を与えます。

$$u = a \setminus e \quad [1, \omega u];\quad u_0 = (E_{\omega a} - ({}^{\alpha}A\,u)_{\omega a})/A_{\omega a} \tag{5Q}$$

特に、ωu＝0とした時の解は、(5Q')(43E)となります。

$$u = u_0 = (\Sigma\, e)_\infty / (\Sigma\, a)_\infty = E_{\omega a}/A_{\omega a} \tag{5Q'}$$

$$c' = (E_{\omega a}/A_{\omega a})(1 - q),\quad c'_0 = E_{\omega a}/A_{\omega a} \tag{43E}$$

この方法は、ωa時点以降制御値が目標値に一致したまま固定されるの

ます。この時点以降で一致させようとすると、それ以前の時点での一致の少なくとも一部を諦めなければなりません。第ωａ＋ωc'＋１時点以降は遠い未来です。まとめると、αａ時点より前の整定は不可能で、Ｚ時点以降で整定しないと拡大基調の操作になる危険があり、ωａ時点以降で整定させれば操作は安定です。しかし、ωａ＋ωc'＋１時点以降の整定は、この時点以前の整定に犠牲を要求します。

目標値が普段は一定で希に変化させる制御系と、目標値を時々刻々とプログラム的に変化させる制御系とがあります。前者の場合、可知的外乱の変化も散発的な変化に留まれば、Y＋１時点以降を不変、即ちｅを

$e = 0 \quad [Y+1,) \qquad e \in (1, Y)$ (42C)

有限数列と仮定します。(5K)(5L)は(4M)となりますが、ｕを(5P)を満たす有限数列とすれば、(4M)は(43D)の解を持ちます。

$a u = e \qquad u \in (0, \omega u), Y = \omega a + \omega u$ (5P)

$c' = u(1 - q), c' \in (0, \omega u + \omega q)$ (43D)

(5P)で、ｕ，ｅの項数はωｕ＋１，ωｕ＋ωａですので、ωａ≠１であれば、ｕは(5P)で表される任意のｅについて解く事ができません。そこで、(5P)の方程式数を(5P')の様にωｕ＋１に減らします。

$(A u)_{\omega a} = E_{\omega a}; \quad a u = e \quad [\omega a + 1, \omega a + \omega u]$ (5P')

この方程式は、解(5Q)を与えます。

$u = a \backslash e \quad [1, \omega u]; \quad u_0 = (E_{\omega a} - ((A - A_{\omega a} \Lambda^{\omega a}) u)_{\omega a}) / A_{\omega a}$ (5Q)

特に、ωｕ＝０とした時の解は、(5Q')(43E)となります。

$u = u_0 = (\Sigma e)_\infty / (\Sigma a)_\infty = E_{\omega a} / A_{\omega a}$ (5Q')

$c' = (E_{\omega a} / A_{\omega a})(1 - q), \quad c'_0 = E_{\omega a} / A_{\omega a}$ (43E)

この方法は、ωａ時点以降制御値が目標値に一致したまま固定されるの

で、有限整定法と言います。しかし、この方法では、ｅが有限数列である事を前提しなければなりません。今後の操作値を一定に保つと仮定すると、ｅが有限数列になりません。雑音や追加される可知的雑音の効果を除くと、前制御周期で求めたＣの未来分を用いた推定値は、新しく追加される$e_{\omega a+\omega u}$以外は0の筈です。これは、ｅを有限数列とするには良い条件ですので、前制御周期で求めたＣを用いてR°を推定します。

次に目標値がプログラム的に変化する場合を考えます。

むだ時間以前の制御は不可能なので、$\alpha f \leqq X$ とします。そして、多少の無理があっても第X時点～第Y時点で加重w_iを調整することで最小自乗法でc'を求める方法を、最適制御法と言います。

(4o)を(4o')とは、加重の掛かり方を除くと同じ条件になります。

$$F c' = E \quad [X, Y] \qquad c' \in (0, \omega c') \tag{4o}$$

$$(F c')_X = E_X \; ; \; f c' = e \quad [X+1, Y] \quad c' \in (0, \omega c) \tag{4o'}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} w_X F_X, & w_X F_{X-1}, \cdots, w_X F_{X-\omega c'} \\ w_{X+1} F_{X+1}, & w_{X+1} F_X, \cdots, w_{X+1} F_{X-\omega c'+1} \\ \cdots & \cdots \\ w_Y F_Y, & w_Y F_{Y-1}, \cdots, w_Y F_{Y-\omega c'} \end{pmatrix} \tag{4o''}$$

$$\mathbf{c'} = {}^t(c'_0, c'_1, \cdots, c'_{\omega c'}) \tag{4o°}$$

$$\mathbf{E} = {}^t(w_X E_X, w_{X+1} E_{X+1}, \cdots, w_Y E_Y) \tag{4o+}$$

$$\mathbf{c'} = ({}^t\mathbf{F}\,\mathbf{F})^{-1}\,{}^t\mathbf{F}\,\mathbf{E} \tag{43F}$$

$({}^t\mathbf{F}\,\mathbf{F})^{-1}\,{}^t\mathbf{F}$を、ｑ，ａの同定時に算出しておくと便利です。

但し、c'_0の算出に必要なのは、$({}^t\mathbf{F}\,\mathbf{F})^{-1}\,{}^t\mathbf{F}$の第１行目だけです。

間に合う未来以降の遠くない未来でのみ整定することにし、c'の項数を方程式の数と同じにすると、(5R)より、$c' \in (0, \omega q)$となります。

$$Fc' = E \quad [\omega a, \omega a + \omega q] \tag{5R}$$

$$(Fc')_{\omega a} = E_{\omega a}\ ;\ fc' = e \quad [\omega a + 1, \omega a + \omega q] \tag{5R'}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_{\omega a}, & F_{\omega a-1}, & \cdots, & F_{\omega a-\omega q} \\ F_{\omega a+1}, & F_{\omega a}, & \cdots, & F_{\omega a-\omega q+1} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ F_{\omega a+\omega q}, & F_{\omega a+\omega q-1}, & \cdots, & F_{\omega a} \end{pmatrix} \tag{5R''}$$

$$\mathbf{c}' = {}^{t}(c'_0, c'_1, \cdots, c'_{\omega q}) \tag{5R°}$$

$$\mathbf{E} = {}^{t}(E_{\omega a}, E_{\omega a+1}, \cdots, E_{\omega a+\omega q}) \tag{5R⁺}$$

$$\mathbf{c}' = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{E} \tag{43G}$$

$\mathbf{F}^{-1}$を、q，aの同定時に算出しておくと便利です。但し、c'_0の算出に必要なのは$\mathbf{F}^{-1}$の第１行目だけなので、ωq＝１又は２の時は行列式の公式で容易に求める事ができます。(5R)は(5R')と表す事もできます。ωq＝１の場合の(5R)を解いてみると、(43G')が得られます。

$$\left.\begin{aligned} c'_0 &= (f_{\omega a}E_{\omega a} - F_{\omega a-1}e_{\omega a+1})/(f_{\omega a}A_{\omega a}) \\ c'_1 &= (F_{\omega a}e_{\omega a+1} - f_{\omega a+1}E_{\omega a})/(f_{\omega a}A_{\omega a}) \end{aligned}\right\} \tag{43G'}$$

この方法を多点整定法と言います。

(5R')で(42D)とすると(5S)になりますが、(27G)より(27I)になります。

$$(Fc')_{\omega a} = E_{\omega a},\ fc' = 0 \quad [\omega a + 1, \omega a + \omega q] \tag{5S}$$

$$e = 0 \quad [\omega a + 1, \omega a + \omega q] \tag{42D}$$

$$e = 0 \quad [\omega a + 1,) \tag{27I}$$

従って、(5V)も有限整定解を与えます。(42D)の連立する方程式があるので、c°の条件を任意に設定できます。有限整定法は(5Q)(5Q')よりも(5S)の形が一般的に知られています。(但し表現法が異なります)

以上述べた様に、操作値は(43H)(43H')の形の解になります。

$c'_n = H_{n,Z}E_Z + H_{n,Z+1}E_{Z+1} + H_{n,Z+2}E_{Z+2} + \cdots + H_{n,Y}E_Y$ (43H)

$c'_n = H_{n,Z}E_Z + h_{n,Z+1}e_{Z+1} + h_{n,Z+2}e_{Z+2} + \cdots + h_{n,Y}e_Y$ (43H')

$H_{n,i}$, $h_{n,i}$はＦ，ｆがｋ倍になれば、$H_{n,i}$, $h_{n,i}$は1/ｋ倍になります。最小自乗法で推定した応答関数の絶対値は真値の絶対値より小さいのでこの応答関数を用いると操作値の変動が過大になります。しかし、逐次同定法は同定に至る迄の時間が長い欠点があります。

ｃに対する静的特性はF_∞ですが、(43C)(43E)(43G')の$E_{\omega a}$に対する係数

$F_\infty = A_\infty / (1 - Q_\infty) = A_{\omega a} / (1 - Q_{\omega q})$ (44A)

$0 < 1 - Q_{\omega q} < 1$ (44B)

は$1/A_{\omega a}$です。操作値の変動がＥをF''で除す係数を持つ場合、静的特性で 必要なF_∞/F''倍の出力をしている事になります。従って、$1/F_\infty$よりも$1/(1-Q_{\omega q})$倍大きな出力になっています。これは短時間で制御値を目標値に近づけるために当然の事ですが同時に雑音も F_∞/F''倍に増幅する効果を持っています。制御値と目標値との乖離は逆位相になり相殺されますが、白色雑音は無位相なので、増幅された雑音状態になります。

最小自乗法が逐次同定法より同定速度が速いので、初期の同定には好まれます。未知数の相互干渉を除くには、ｑ，ａとｂに分けるよりも、ｑ，ａ，ｂを一組として最小自乗法を用いるのが望ましい事です。しかし、可知的外乱は、時には長時間全く発生しない場合もあります。更新型最小自乗法を用いていると、可知的外乱の応答関数が突如狂う場合があります。極めて希にしか０以外の値にならない成分に関与した部分が桁落ちを起こす事が原因です。最小自乗法では(32B) の計算をします。$\mathbf{M}^-$が正則なので(31A)と(31C)とは同値ですが$\mathbf{M}^-\mathbf{M}$は対称行列とは限りません。そこで、(31C)を構造方程式とみなします。

$\mathbf{M}^{-}\mathbf{M}\,\mathbf{k}=\mathbf{M}^{-}\mathbf{u}$ (31C)

そこへ更新データ組が加わったとすると、(30G)となります。

$\mathbf{X}\leftarrow\mathbf{M}^{-}\mathbf{M},\ \mathbf{y}\leftarrow\mathbf{M}^{-}\mathbf{u}$ (31D)

$\mathbf{M}\leftarrow{}^{t}\mathbf{X}\,\mathbf{X}+p\cdot w_{I}\cdot{}^{t}\mathbf{x}\,\mathbf{x},\ \mathbf{u}\leftarrow{}^{t}\mathbf{X}\,\mathbf{y}+p\cdot w_{I}\cdot y\,{}^{t}\mathbf{x}$ (30G)

この方法を三角型最小自乗法と言います。p は更新率です。

$x_i{}^2$の代表値で１に規格化しておくと、w_Iが加重になります。

代表値として、最大範囲を採用すると、次の様になります。

$k_a{}^*\equiv C^{MAX}-C^{MIN}>0,\ k_b{}^*\equiv D^{MAX}-D^{MIN}>0,\ k_q{}^*\equiv R^{MAX}-R^{MIN}>0$ (45B)

C^{MAX}とC^{MIN}；D^{MAX}とD^{MIN}は原因の最大値と最小値で、R^{MAX}とR^{MIN}は制御値の最大値と最小値で、いずれも装置として安全域、出力可能域、入力庚範囲等の内の最小幅の最大値と最小値に採り、c，r，dを(45C)に

$c\leftarrow c/k_a{}^*,\ r\leftarrow r/k_q{}^*,\ d\leftarrow d/k_b{}^*$ (45C)

すると、最大振幅が±１になります。

次のa)～d)場合には、(31D)で$\mathbf{X}=\mathbf{1}$(単位行列)にできます。

$\mathbf{M}\leftarrow\mathbf{1}+p\cdot w_{I}\cdot{}^{t}\mathbf{x}\,\mathbf{x},\ \mathbf{u}\leftarrow\mathbf{u}+p\cdot w_{I}\cdot y\cdot{}^{t}\mathbf{x}$ (30H)

(30H)を単位型最小自乗法と言います。

a) 一度$\mathbf{X}=\mathbf{1}$となった後

b) $d_{-1}{}^2$が初めて大きな絶対値になった時から、ωb時点経過する迄の間に限り、$p\cdot w_I\cdot d_{-1}{}^2$を１より充分に大きくする$p\cdot w_I$を用いる時。こうすれば、dの初めての有効データを、対角成分の１を誤差と見る事ができます。

c) 前回の制御で得たq，a，bを初期値として用いる時。

対角成分が０のk成分を０としても良い実績がある事になります。

この場合、(32D)の＊を０にした対角行列を使う事もできます。

d) とりあえず、可知的外乱の影響を無視しても良いと考える時。

ｂ＝０を初期値として用いて、差し支えがない事であるので。

近代制御は、高速で正確な制御を実現するので、大半の時間が雑音に埋もれた状態である事を、逆に利用すると、雑音の程度を測定する事ができます。(4F)の左辺の$ac+bd+qr$を前時点迄に測定したデータで現時点のｒを予測した値、左辺のｒを現時点で測定したばかりの値とすると、両辺の乖離εは応答関数の不正確さ込みの測定誤差です。

$$\varepsilon = r - ac - bd - qr \qquad [0,0] \tag{29H}$$

この二乗の長時間平均を雑音の大きさν^2の推定値に利用します。

$$\nu^2 = \langle \varepsilon^2 + dgt^2 \rangle \tag{46A}$$

dgtは1デジット大きさです。単純に平均を求めても良いが、経時変化を

$$\nu^2 \leftarrow (1 - p_\nu)\nu^2 + p_\nu \cdot (\varepsilon^2 + dgt^2) \tag{46B}$$

考えた長時間平均を求めるならば、(46B)が使えます。ｎ回の制御時点数相当にするならば、$p_\nu = 1/n$にして、(46B)の更新の度にp_νを変えるか、ｎを一定にして、２ｎ回以上測定します。通常εの大きい場合のデータを除き$n = 1,000 \sim 10,000$ 程度にします。この様に、雑音は時機を得た測定はできませんが、その大きさはある程度推定できます。

伝達方程式で、雑音ｎも原因と考え、雑音の応答関数ｈとし、逐次同定法を利用すると、(34A)のSgが、(34B)の様になります。

$$r = qr + ac + bd + hn \tag{4o}$$

$$Sg = Sgs + Nz \tag{34B}$$

$$Sgr \equiv k_q{}^{*2}(r_{-1}{}^2 + \cdots + r_{-\omega q}{}^2),\ Sgc \equiv k_a{}^{*2}(c_{-1}{}^2 + \cdots + c_{-\omega a}{}^2),$$

$$Sgd \equiv k_b{}^{*2}(d_{-1}{}^2 + \cdots + d_{-\omega b}{}^2),\quad Sgf \equiv Sgr + Sgc \tag{34C}$$

$Nz \equiv n_{-1}{}^{2}+\cdots+n_{-\omega h}{}^{2} \fallingdotseq \nu^{2}$ (46C)

$Sgs \equiv Sgr + Sgc + Sgd = Sgf + Sgd$ (34D)

$k_a{}^*$, $k_b{}^*$は単位の換算係数で、a_i, b_jの代表値に和を用いれば、(45D)

$k_a{}^* = A_{\omega a}, k_b{}^* = B_{\omega b}$ (45D)

平均値を用いれば(45E)になります。(45D)(45E)の場合普通(45F)にし

$k_a{}^* = A_{\omega a}/\omega a, k_b{}^* = B_{\omega b}/\omega b$ (45E)

ます。最大範囲(45B)も利用できます。

$k_q{}^* = 1$ (45F)

Nzは、雑音成分の二乗和なので、その期待値がν^2になります。

伝達方程式に限らない、一般の場合では次の通りです。

$Sgs = x_1{}^2 + x_2{}^2 + \cdots + x_m{}^2, Sg = Sgs + \nu^2$ (34E)

(33)で、特定のη_iに注目すると、(33B)になります。

$\eta_i = x_i \cdot \varepsilon / Sg = w_i \cdot (\varepsilon / x_i)$ (33B)

$Sg_i = x_i{}^2$ (34C)

$w_i \equiv Sg_i / Sg$ (47A)

振幅の二乗は、パワーと呼ばれエネルギーの概念で把握されます。電磁波、音波、振り子、電圧等がこの例です。$x_i{}^2$ を信号パワーと言う事にすると、Sgは雑音を含んだ全信号パワー、$Sg_i = x_i{}^2$が注目した信号のパワー、w_iがSg_iの割合(信号率)という事になります。 未知数の推定に用いる信号振幅x_iの全体で考えると(47B)のwが全体としての信号率です。

$w = Sgs / Sg$ (47B)

a, b, qに対する信号率を(47C) で定義できます。一般に、±に振れ

$w_a = Sgc/Sg, w_b = Sgd/Sg, w_q = Sgr/Sg$ (47C)

る振幅x_iを元に計算される数値に対し、信号率が定義できます。雑音は

時々刻々の時系列として観測する事ができず、原因も複雑で応答関数の形には表せきれません。逐次同定法で、(29B)のy－$\mathbf{x}\mathbf{k}^{\circ}$は０でなく、測定誤差や雑音となるべきで、これを省くなら雑音項Nzが必要です。

従来の逐次同定法では、この点が無視されています。

(31A)が、真のｒ，ｃ，ｄ；ｆ，ｇで成り立つ時、ｒ，ｄに測定誤差r'，d'があり、ｆ，ｇにf'，g'の推定誤差があるために、ｃにc'の狂いが生じたとします。r'，c'，d'；f'，g'はｒ，ｃ，ｄ；ｆ，ｇに比べて小さいとし、二次の微小量を省きます。

$$r = fc + gd \tag{5F}$$

$$r + r' = (f + f')(c + c') + (g + g')(d + d') \tag{48A}$$

$$\fallingdotseq fc + gd + fc' + gd' + f'c + g'd$$

$$c' \fallingdotseq (r' - gd')/f - (g'/f)d - (f'/f)c \tag{48B}$$

(48B) は、測定誤差と可知的外乱の応答関数誤差は操作値の変動に加算的に働くが、操作値の応答関数の誤差は操作値の変動に比例すると言う事です。この事を踏まえ、現時点での操作値の変動c_0を加算的な誤差による修正率(雑音圧縮率)w_eと比例的な誤差による修正率(誤差分配率)p_cで修正してから、出力する事にします。但し、効果が小さいと考えられる修正係数p_c，w_eを1にする事ができます。

$$C_0 = C^{\circ}_0 + c_0, c_0 \leftarrow k_c \cdot c_0, c_0 = c'_0 + c^{\circ}_0, k_c = p_c w_e \tag{39C}$$

今後の操作値を一定にすると言う仮定で予測値R°を計算する場合は、(39D)に簡略化できます。

$$C_0 = C^{\circ}_0 + c_0, c_0 \leftarrow k_c \cdot c'_0, k_c = p_c w_e, c^{\circ} = 0\ [0,) \tag{39D}$$

$$p_r = |f'/f| \tag{49A}$$

応答関数の不正確さp_rと同様に、操作値の変動に比例すると考えられ

る雑音に、最小自乗法による推定量の非不偏性、a，b，dの項数の妥当性、制御系の非線形性等があります。これらの雑音p_nをモデルの不適性と言うことにして、p_nをp_rから分離します。応答関数を最小自乗法で求めてある程度精度が高くなってから逐次同定法に切り替えるとか、統計論を駆使して最小自乗法による推定量を不偏推定量に近づける等の工夫をしなくとも、p_nでその是正ができます。雑音が大きくなる程、最小自乗法での不一致度が大きくなります。逐次同定法でも、雑音が大きければ値が不安定になります。この意味で、モデルの不適性を雑音に対する分配率と言うこともできます。

$p_c = 1 - p_r - p_n \qquad p_c + p_r + p_n = 1 \qquad 0 < p_c, p_r, p_n \qquad (49B)$

操作値の変動c_0に、１から応答関数の不正確さp_rと、モデル不適性p_nを引いた分配率p_cを乗じる方法を誤差分配法と言います。$p_n = 0.01 \sim 0.05$にすると、応答速度の低下は認められなかったが、オーバーシュートが消えて滑らかな整定になった経験があります。

近代制御は応答関数を頼りに制御する方法です。その肝心な応答関数が不正確である事が分かっている場合は、出力変動を抑えるのが賢明でしょう。通常、過剰な出力の連発で振動状態を繰り返すよりも、多少の遅れがあっても滑らかな状態の方が好まれます。更新型最小自乗法の原形(31F)はn番目の有効データ組で元のデータを 1/nだけ修正します。これを実効データ量n組のデータより得た応答関数は1/nだけ修正されるべき誤差があると解釈します。

$p_r = 1 / n \qquad n = \Sigma w_i \qquad (49C)$

nは、実効組数であるので加重w_iの和になります。しかし、(49C)では、やがてn が数値オーバーフローを起こします。制御系は、環境温度変化

や劣化等様々な要因で、応答関数が微妙に経時変化します。経時変化に追随できる事が応答関数を同定しながら制御する醍醐味です。応答関数の経時変化を考え、p_rに最小値を設けます。

$p_r = \mathrm{if}(p_r^{MIN} < p_r ; p_r / (w_1 \cdot p_r + 1))$ (49D)

Z＝if(X;Y)で「Xの場合Z＝Y，　Xでない場合Zが不変」を表します。

(49D)の代わりに適切なq_Dを用いた(49E)で類似の効果が得られます。

$p_r = \mathrm{if}(p_r^{MIN} < p_r ; q_D \cdot p_r)$ 　　$0 < q_D < 1$ (49E)

p_rは、逐次同定法の更新率に使用できます。

(48B)でc'の代わりにｆc'で考え、ｃに比例しない部分分を取り出す

$f c' \fallingdotseq r' - g d' - g' d$ (48C)

と(48C)になります。 $r' - g d' - g' d$はｄの応答関数の不正確さを含んだｒの誤差です。c'はｒの差であるｅを用いて(5K)で算出され、近似で

$f c' = e$ 　　[X,Y] (5K)

のｅのみなしにより、予測値の乖離の信号パワーが(34F)になります。

$Sge = E_X{}^2 + e_{X+1}{}^2 + e_{X+2}{}^2 + \cdots + e_Y{}^2$ (34F)

$w_e = Sge / (Sge + \nu^2)$ (47B)

即ち、$E_X, e_{X+1}, e_{X+2}, \cdots, e_Y$ を用いて算出されるｃから雑音による影響を除くと、$w_e c$になります。信号Sge が小さい時に、ｃの絶対値が小さくなります。制御は雑音成分をF_∞ / F''倍に増幅します。Sge が小さい時ｃが雑音によって誘起され易い事を、(47B)が示しています。Sgeが小さい時、操作値をF'' / F_∞倍以下にし、雑音の帰還増幅率を１以下にしたい所です。しかし、これは同時に信号を制御に反映できなくし、不感帯を発生させます。仕方がないのでF'' / F_∞倍以上の適当な値κにします。多点整定法の場合、κを$1 - Q_{\infty q}$の1.5～5倍程度にします。 Sge/ν^2を横座

座標にw_eを縦座標にとったグラフをFIG.2に示します。(47D)に依らずκを0.01～0.3にしても雑音抑制効果がある事を経験しました。

$$w_e = \kappa + (1-\kappa)Sge/(Sge+\nu^2) \quad (47C)$$

$$(\kappa \fallingdotseq F''/F_\infty) \wedge (F''/F_\infty < \kappa) \quad (47D)$$

(47E)でも(47C)と同様に整定時の雑音振動が減少しました。

$$w_e = \kappa + (1-\kappa)\sqrt{(Sge)}/(\sqrt{(Sge)}+\nu) \quad (47E)$$

この経験によると、κも厳格である必要が無く、(47C)(47E)に似た形の関数を用いれば、雑音抑制効果が期待できると言えそうです。近代制御法による制御状態を観測したり、シミュレーションをすると、かなり不正確な応答関数でも良好な制御をしています。しかし、応答関数が不正確な状態では、小発振状態に陥り易く、安定状態からの破綻が起き易くなります。誤差分配法は応答関数が不正確な状態で小発振状態を抑え、応答関数の精度向上を待つ上で大きな効果を持ちます。単に応答関数の修正率p_rを小さくするだけでは、応答関数の精度が向上する速度が遅くなり、破綻に陥る可能性が増します。修正率を大きくし過ぎると、応答関数が破壊され易くなります。この精度の低い状態では、操作値の変動を小さめする事で、制御系が暴走する操作値変化を起こさなくなりますが、反面、r，cの変化幅も小さくなり S/Nの良好なデータが得られなくなります。誤差分配法でこの調和が得られます。

同定は、制御と同時に進行するのが望ましいが、演算速度の制限等でやむを得ない場合は同定用のデータを保存しておき、時分割処理で同定したり、制御の休止期間，制御終了後次回の制御開始時に同定します。同定用のデータ組の信号率は(47B) になり、これは逐次同定法では、従来法の補正量をw倍すべきであり、最小自乗法では加重wとして用いるべ

きである事を示しています。しかし、$w=0.5$の時は、信号パワーと雑音パワーとが等しい時です。量子現象は、平均を取っても白色雑音の様に雑音率を軽減できません。白色雑音が小さい状態で10デジットの信号振幅があったとすると、$w\fallingdotseq 0.99$です。10デジットの信号振幅で5個の未知数を推定するとしたら、1未知数当たり2デジットです。多数のデータ組を集めたとしても精度の向上が望めません。量子現象が支配的でない場合は雑音が大きくなり応答関数の同定精度が悪くなります。同定用の情報力として、k_dデジットを基準にするのであればw^*又はw°を同定用の加

$$w^*=Sgs/(Sgs+(kd\cdot dgt)^2) \tag{47F}$$

$$w^\circ=Sgs/(Sgs+\nu_1{}^2) \qquad \nu_1{}^2\equiv\langle\varepsilon^2+(k_d\cdot dgt)^2\rangle \tag{47G}$$

重w_1にすべきです。FIG.3 の実線がw_1のグラフです。$\nu_1{}^2$はk_dデジットを下限とした雑音の二乗の長時間平均です。即ち、操作に用いる信号率と同定に用いる信号率とを区別して考える必要があります。但し、w^*やw°にも問題があります。w_1が小さい時は元になるx_iの絶対値も小さく、大数に加減算される時に桁落ちを起こします。k_dを大きくすると、w_1が小さくなるだけでなく、w_1が大きなデータの発生頻度が急激に低下し、この桁落ちを起こす追加データの割合が支配的になります。チリも積もれば山となるの諺の通り応答関数の破壊に至ります。w_1に基準を設け、$w_1<w_1{}^{LIM}$ 又は$w_1\leqq w_1{}^{LIM}$ の場合は$w_1=0$にして、同定をしない様にしなければなりません。k_dは、目標値の変更幅等の装置設計時の仕様や、稼働時の観測で制御中に発生する最大デジット数よりも小さい数値、例えばその最大デジット数の0.7 倍にします。$w_1{}^{LIM}$ は有効数字で1～2桁が確保できずに桁落ちする数値にします。通常、安全動作範囲が設定され、制御値や操作値が危険域に入ると、リミット回路、リミットスイッ

チ、機械的手段、安全装置等でそれ以上の変化を阻止します。この様な状態は正常な操作値と制御値との関係でありません。操作値が出力制限回路等やデジタル値化等で変更された時には、変更され、実際に操作した値を元に応答関数を同定しなければなりません。修正値を用いずに同定すると応答関数を破壊するのは当然です。修正値が入手できない限り制御環境が異常な間のデータを同定に用いません。制御装置に、これらの異常時を認識する為の信号（異常信号）の入力装置が必要です。w^*やw°で連続的に加重を変化させても、同定する，同定しないの二値化をしなければなりません。二値化するのなら、FIG.3の破線で示す $w_1=0, 1$ でも良いはずです。そこで応答関数の同定用指標に x_iとν^2より作られる非負の指標 $w; w^*; w^\circ; Sgs; Sgf, Sgd; Sgs/\nu^2; Sgf/\nu^2, Sgd/\nu^2; |c_{-1}|, |r_{-1}|, |d_{-1}|$ を用います。これらの指標の一つを、Ｋとし、Ｋに対する基準値をK^{LIM}、期間をK^{PRD}とします。異常時でない、$K^{LIM}<K$又は$K^{LIM}\leqq K$となった以後のK^{PRD}の間のデータを同定に用います。

K^{LIM}は、制御中に確実に$K^{LIM}<K$となるＫが発生しそのＫが充分にS/Nが大きくなる様に選びます。次の手法（選択更新法）でK^{LIM}を自動設定できます。

－－適当な値をK^{LIM}の初期値にし、１以上の値k^M(例えば1.3)を用い、
　　$k^M K^{LIM}<K$ 又は $k^M K^{LIM}\leqq K$ となるＫが観測されたら、
　　$K^{LIM}=K$とする。

K^{LIM}の初期値には、20デジット程度の値が使えます。但し、ビット数が少なく連続量的に扱えない場合は注意が必要です。可知的外乱は、バイパス弁の開閉等の様に１ビットの情報や数ビットの情報の場合もあります。この様な場合は、$K^{LIM}=0$としなければなりません。このような

場合を除くと、必ず大きいと判断されるＫが観測され、やがて最も信頼度の高いデータのみでｑ，ａ，ｂが同定される様になります。k^Mは時間と共にｑ，ａ，ｂが変化する事が予測される場合は大きくし、ｑ，ａ，ｂが不変であると予測される場合は１に近い値を選びます。

ｑ，ａ，ｂをセットで同定する場合は　Ｋとしてw;w*;w°;Sgs;Sgs/ν^2;(|c_{-1}|,|r_{-1}|,|d_{-1}|)の内の一つ(一組)を用います。

(ｑ，ａ)とｂとに分けて同定する場合は(ｑ，ａ)用のＫとしてSgf;Sgf/ν^2;(|c_{-1}|,|r_{-1}|) の内の一つ(一組)を用い、ｂ用のＫとしてSgd;Sgd/ν^2;|d_{-1}|の内の一つを用います。

w;w*;w°;Sgs;Sgf,Sgd;Sgs/ν^2;Sgf/ν^2,Sgd/ν^2のK^{PRD}は１に、|c_{-1}|,|r_{-1}|,|d_{-1}|のK^{PRD} はωａ＋ωｑ，ωｑ，ωｂに、ｍ以下の非負の任意付加値α(Ｋによって異なっても良い)を加えた値になります。

一組をＫにするには、その構成員各々についてK^{LIM}, K^{PRD}を決めます。

(|c_{-1}|,|r_{-1}|,|d_{-1}|)のK^{LIM}ならば、(r^{LIM}, c^{LIM}, d^{LIM})を決めます。

|c_{-1}|,|r_{-1}|,|d_{-1}|のK^{PRD}はSgf,Sgr,Sgdの成分数で、ｆ，ｑ，ｂを決めるのに必要な最短時間です。これは大きな|r_{-1}|,|d_{-1}|が生じた後、Sgr,Sgdが大きな値として継続する時間になります。

一般的に、大きな信号Ｋが発生した時、その後も暫くやや大きな信号になるだけでなく、適切な操作値によりＫが小さくなったとしても、小さくなったと言うことが、ａ，ｂ，ｑの決定には必要な情報です。そこにαを加える効果があります。しかし、αを０にしてはならないと言うことではありませんので、任意とします。

この様にすれば、後から追加されるデータほど信頼性の高いデータになり、かつ、ある頻度で応答関数の同定が続けられます。最小自乗法、逐

次同定法を問いませんし、w_1に連続量を用いる用いないを問いません。操作値，制御値，可知的外乱の差分の過去値又はこれらと雑音の大きさを用いて、同定用信号の大きさＫを算定し、異常時やＫの小さなデータを同定に用いない様にする方法を同定維持法と言います。応答関数が破壊された場合操作値の算出に直接影響を与える操作値と制御値（記憶効果）の応答関数ｆ；ｑ，ａが破壊されると致命的な破綻になりますが、可知的外乱の応答関数ｇ；ｂの場合、可知的外乱の悪影響が大きくなるだけで、致命的にならないで済みます。ｇ；ｂが破壊されたと判断できる場合にはｇ＝０；ｂ＝０とすれば、フィードフォワードが無い状態での制御状態に戻せます。

以上をまとめると、

ａ：同定維持法で、安定動作時の応答関数の破壊を防ぎます。

ｂ：誤差分配法で、操作と応答関数の修正の調和をとり、応答関数の精度が低い時期の破綻を防ぎます。

ｃ：雑音圧縮法で、雑音の増幅を抑える事ができます。

ｄ：可知的外乱取込法で、可知的外乱の分、雑音／外乱を減らします。

応答関数を同定する近代制御法の最大の欠点は、突如の破綻です。同定維持法と誤差分配法で、この破綻を避けるのが肝要です。これに、雑音圧縮法を組み合わせる事で、破綻に至りそうな状態を避け、より安定した制御を実現します。可知的外乱は常に入手が可能とは限りませんが、入手できる時には、可知的外乱取込法で、その外乱の悪影響を除き破綻に導く外乱を減らす事ができます。

これらの対策は、破綻という絶悪な状態の予防策となるだけでなく、増幅雑音状態、最小自乗法による過操作、外乱による制御精度の低下等の

の質の低下も防いでいます。制御装置に、可知的外乱と目標値と制御値と異常信号（異常時を検知する信号）の入力装置を設け、演算装置で応答関数を同定しながら、予測値を元に操作値を算出し、修正して出力装置より操作値を出力する際に、同定維持法と誤差分配法を不可欠な手段とし、必要に応じて、雑音圧縮法、可知的外乱取込法を実施する事により、破綻の起きず、雑音を増幅した状態にならない制御装置が実現します。動作としては、操作値Ｃの出力装置，演算装置Ｕ，記憶装置Ｍ及び制御値Ｒと目標値Ｓと可知的外乱Ｄの入力装置を備え、Ｕを用いた演算により、Ｃ，Ｒ，Ｄの差分の過去値又はこれらと雑音の大きさを元に信号の大きさを求め、信号が大きく、異常時で無い場合のＣとＲとＤの値を応答関数の同定用のデータとし、同定した応答関数又は応答関数の同定用のデータをＭに保存し、ＲとＣと過去、現在、未来の利用できる範囲のＤを用いて推定したＲの予測値を修正してＲをＳに一致させるＣの値を求め、その現時点で出力すべきＣの差分を、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値と雑音圧縮率とを乗じて補正した値をＣの差分の現在値として出力します。但し、可知的外乱が得られない場合は、可知的外乱の入力装置は不要であり可知的外乱取込法を実行しません。また、量子効果が大きく、白色雑音が小さい場合は、雑音圧縮率を乗じる必要がありません。応答関数又は応答関数の同定用のデータを不揮発性記憶装置に保存して、次回に役立てると次回の応答関数の初期値の精度を向上でき、制御の破綻防止に役立ちます。

図面の簡単な説明

FIG.1は、本発明を構成する制御装置の構成図に制御用プログラムの

流れを示す概念図です。

符号の説明

S　目標値の入力装置　　R　制御値の入力装置

D　可知的外乱の入力装置　　C　操作値の出力装置

U　演算装置　　M　記憶装置

T　タイマー　　W　異常信号の入力装置

I〜X　1制御周期の処理

I　S，R，Dを入力し、差分をとる

II　同定用信号の大きさKを計算する

III　Kが大きく、異常時でなければ、
応答関数a，b，qを同定し、
応答関数の不確かさp_rを修正する

IV　可知的外乱dを利用して、Rの予測値R°を求める

V　目標値Sと予測値R°との乖離Eを元に、操作値の修正量c'を算出する

VI　乖離を元に、雑音圧縮率w_eを算出する

VII　分配率p_cを計算する

VIII　分配率と雑音圧縮率で操作値の差分(変動)c_0を修正する

IX　操作値を出力可能な数値に直して、出力する

X　制御周期を更新する

FIG.2は、雑音圧縮法に用いる関数を示します。横座標は信号パワーで、縦軸が関数の値です。

FIG.3は、応答関数を同定するデータ組の同定信号率を実線で示します。破線で、同定信号率を二値化した場合の関数の概念を示します。横軸が

同定信号の大きさＫで、縦軸が同定用の加重w_1です。

発明を実施する場合の最良の形態

制御と同時に行う同定する手段に、最小自乗法を用いるか、逐次同定法を用いるか、適宜切り替えて併用するかは、選択の問題です。どの操作値の算出方法を用いるかも自由です。そこで三角型最小自乗法を用いて同定し、多点整定法で操作値を決定し、同定維持法にr_{-1}, c_{-1}, d_{-1}を用いる方法とその装置を例にして説明します。(45C) で、ｒ，ｃ，ｄの数値範囲を±1にしておきます。この数値を採用すると、1未満となる$|F_\infty|$が、全出力Ｃ＝±1 にしても、整定が不能なＲの領域が発生する事を意味します。Ｒの全範囲にわたって充分に速く整定できるためには、操作値の静特性の絶対値$|F_\infty|$が3以上、30以下が望ましい条件です。100以上なると階段応答で制御値が飽和してしまったり、操作値の分解能が16ビット程度かそれ以上ないと操作手段のデジタル性が顕在化し、制御精度が低下します。

制御系を解析して、制御周期と応答関数ａ，ｂ，ｑの項数を決めます。解析ができない場合は山勘でもしかたがありません。例えば、ｑの項数を1、ａ，ｂの項数を4とします。この設定でq_1＝0.9～0.999, a_2＝0.001～0.008程度になるような制御周期の場合、従来のＰＩＤでは得られなかった高速で高精度の精度になった経験があります。 q_1が0.2以下になる制御周期にすると、ＰＩＤ制御とほぼ同じ制御速度でした。

$$r = fc + gd \tag{5F}$$

$$= qr + ac + bd \tag{4F}$$

$$r = \Delta R,\ d = \Delta D,\ c = \Delta C \tag{2A}$$

解析だけで、a，b，qを完全確定できれば、制御中に同定する必要がありません。制御装置で、制御周期に合わせてタイマー割り込みにする事も、随時タイマーをチェックして処理する事もできます。

rについて1デジットの大きさや雑音の程度は、制御装置を製造した時の試験値や代表的な製品の値を元に、或いは前回の制御での保存値として（46A)で算出した、雑音ν^2の大きさとして用意しておきます。

同様に、$|r_{-1}|$，$|c_{-1}|$，$|d_{-1}|$用の$K^{LIM}(r^{LIM}, c^{LIM}, d^{LIM})$と$k^M$，$p_r^{MIN}$，$p_n$，$\kappa$を用意しておきます。

制御開始時点から、応答試験の終了迄の間は、現時点を第n時点、制御開始時を第$-\alpha_1-1$時点とします。三角型最小自乗法では$\mathbf{M}^-\mathbf{M}$が$\mathbf{X}$、$\mathbf{M}^-\mathbf{u}$が$\mathbf{y}$でかつ$\mathbf{k}$となるので$\mathbf{X}$，$\mathbf{y}$を使わずに表現します。

$$\alpha_1 \equiv \mathrm{MAX}(\omega\alpha, \omega b, \omega q) \tag{50}$$

$$\left.\begin{aligned} &m = \omega a + \omega b + \omega c \quad, y = r_0 \\ &\mathbf{k} = {}^t(q_1, q_2, \cdots, q_{\omega q}, a_1, a_2, \cdots, a_{\omega a}, b_1, b_2, \cdots, b_{\omega b}) \\ &\mathbf{x} = (r_{-1}, r_{-2}, \cdots, r_{-\omega r}, c_{-1}, c_{-2}, \cdots, c_{-\omega r}, d_{-1}, d_{-2}, \cdots, d_{-\omega r}) \end{aligned}\right\} \tag{28B}$$

応答関数a，b，qについて全く情報が無い場合は応答試験をします。

応答試験終了時点を第m時点、この期間の各値を(51A)とします。

$$\left.\begin{aligned} &p_r = 1 \\ &c = c_0(\Lambda^0 - \Lambda^{\omega a + \omega q}) \end{aligned}\right\} \tag{51A}$$

c_0は通常1にしますが、過剰操作を避けるため、応答試験中に雑音より十分に大きなrを惹起する値にする場合もあります。

$\mathbf{M}=(M_{i,j}=0)$，$\mathbf{k}=(k_i=0)$を初期値にしたq，a，bを未知数とするの正規行列$\mathbf{M}$，$\mathbf{k}$にデータを追加します。

$$\mathbf{M} \leftarrow \mathbf{M} + p_r \cdot {}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x}, \quad \mathbf{k} \leftarrow \mathbf{k} + p_r \cdot y \cdot {}^t\mathbf{x} \tag{30I}$$

第m－1時点迄は正規方程式を解かず、第m時点で解きます。

$\mathbf{k} \leftarrow \mathbf{M}^{-}\mathbf{k}, \quad \mathbf{M} \leftarrow {}^{t}(\mathbf{M}^{-}\mathbf{M})(\mathbf{M}^{-}\mathbf{M})$ (32E)

$Q_{\omega q} = q_1 + q_2 + \cdots + q_{\omega q}$ (6Q)

$\kappa = 2(1 - Q_{\omega q})$ (47F)

$0 \leqq n \leqq \omega a + \omega q$ で $d_n = 0$ の場合と、$d = d_0(\Lambda^0 - \Lambda^{\omega a + \omega q})$ 等で、c やd自身の変化と一次従属の場合はb又はbの一部が同定できません。

$p_r = 1/m, Icount = \omega b$ (51B)

にし、応答試験を終了します 。

応答試験をしない場合は初期値を(51C)し、第0時点迄、観測するだけにします。p_nは0.05を初期値にして適宜調整します。

$Icount = 0, \mathbf{M} = \mathbf{1},$

$q, a, b; p_r; \kappa$ ＝前制御で得た値 (51C)

第m＋1時点以降、現時点を第0時点として説明します。

r, c, dの過去の値と、測定されたr_0とを用い、同定維持条件と異常時（W＝1：正常時W＝0）をチェックし、乖離εを計算します。

$$\left.\begin{array}{l} Check1 = (c^{LIM} < |c_{-1}|) \vee (Icount < \omega a + \omega q) \\ Icount = If(Check1; \omega a + \omega q) \\ Check2 = (d^{LIM} < |d_{-1}|) \vee (Icount < \omega b) \\ Icount = If(Check2; \omega b) \\ Check3 = (r^{LIM} < |r_{-1}|) \vee (Icount < \omega q) \\ Icount = If(Check3; \omega q) \\ Icount = If(W; 0) \end{array}\right\} \quad (52A)$$

$\varepsilon = r_0 - a_1 c_{-1} - \cdots - a_{\omega a} c_{-\omega a} - b_1 d_{-1} - \cdots - b_{\omega b} d_{-\omega b} - q_1 r_{-1} - \cdots - q_{\omega q} r_{-\omega q}$

Icountが正値の時のみ(52B)～(20H)で応答関数を修正し$\mathbf{F}^{-1}$を求める。

$$\mathrm{Icount}=\mathrm{Icount}-1 \qquad (52B)$$

$$p_r=\mathrm{if}(p_r^{MIN}<p_r;p_r/(p_r+1)) \qquad (49F)$$

$$\mathbf{M}\leftarrow\mathbf{M}+p_r\cdot{}^t\mathbf{x}\,\mathbf{x},\ \mathbf{k}\leftarrow\mathbf{k}+p_r\cdot y\cdot{}^t\mathbf{x} \qquad (30I)$$

$$\mathbf{k}\leftarrow\mathbf{M}^{-}\mathbf{k},\quad \mathbf{M}\leftarrow{}^t(\mathbf{M}^{-}\mathbf{M})(\mathbf{M}^{-}\mathbf{M}) \qquad (32E)$$

$$F=\Sigma\ a+q\ F \qquad (20H)$$

$$\mathbf{F}=\begin{pmatrix} F_{\omega a}, & F_{\omega a-1}, & \cdots, & F_{\omega a-\omega q} \\ F_{\omega a+1}, & F_{\omega a}, & \cdots, & F_{\omega a-\omega q+1} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ F_{\omega a+\omega q}, & F_{\omega a+\omega q-1}, & \cdots, & F_{\omega a} \end{pmatrix} \qquad (5R'')$$

同定した応答関数等は、適時不揮発性記憶装置に保存し、次回の制御に役立てます。次に、今後の操作値を不変と仮定して、ω a ～ω a ＋ω q 時点の予測値を計算します。第１時点より漸化式(4J)で算出します。

$$R^{\circ}=a\ c^{\circ}+b\ d+q'R^{\circ}\qquad c^{\circ}\in[,-1) \qquad (4J)$$

$$\begin{aligned}R^{\circ}{}_n=&a_{n+1}c_{-1}+a_{n+2}c_{-2}+\cdots+a_{\omega a}c_{n-\omega a}\\&+b_1d_{n-1}+b_2d_{n-2}+\cdots+b_{\omega b}d_{n-\omega b}+(1+q_1)R^{\circ}{}_{n-1}\\&+(q_2-q_1)R^{\circ}{}_{n-2}+\cdots+(q_{\omega q}-q_{\omega q-1})R^{\circ}{}_{n-\omega q}-q_{\omega q}R^{\circ}{}_{n-\omega q-1}\end{aligned} \qquad (4J')$$

可知的外乱は、過去の値に限らず、未来の予定値も入手可能であれば利用します。可知的外乱が入手できない場合は、ｄ＝０とするか、計算プログラムからｂｄに関する部分を削除します。予測値が求まったら、設定値Ｓと予測値R°との差Ｅを用いて、(43G)でc'_0を得ます。

$$\mathbf{c}'={}^t(c'_0,c'_1,\cdots c'_{\omega q}) \qquad (5R^{\circ})$$

$$\mathbf{E}={}^t(S_{\omega a}-R^{\circ}{}_{\omega a},S_{\omega a+1}-R^{\circ}{}_{\omega a+1},\cdots,S_{\omega a+\omega q}-R^{\circ}{}_{\omega a+\omega q}) \qquad (5R^{+})$$

$$\mathbf{c}'=\mathbf{F}^{-1}\mathbf{E} \qquad (43G)$$

次に、誤差分配法の分配率p_cと、雑音圧縮係数w_cを計算し、(39E)で

$$p_c = 1 - p_r - p_n \tag{49B}$$

$$e_{\omega a+1} = E_{\omega a+1} - E_{\omega a}, \cdots, e_{\omega a+\omega q} = E_{\omega a+\omega q} - E_{\omega a+\omega q-1} \tag{29G}$$

$$Sge = E_{\omega a}{}^2 + e_{\omega a+1}{}^2 + e_{\omega a+2}{}^2 + \cdots + e_{\omega a+\omega q}{}^2 \tag{34G}$$

$$w_e = \kappa + (1 - \kappa) Sge / (Sge + \nu^2) \tag{47C}$$

$$C_0 = C^{\circ}{}_{-1} + c_0,\ c_0 \leftarrow p_c \cdot w_e \cdot c'_0 \tag{39E}$$

修正してC_0を出力します。実際は、出力値もデジタル化等で修正されているので、実際の出力された値C_0を元に、c_0を再修正します。

$$c_0 = C_0 - C_{-1} \tag{39F}$$

計算時間の都合等で、雑音圧縮法を用いない場合は$w_e = 1$とします。

前評価が不十分で、制御中にνを更新するならば、Icount＝0の時に、(46A)で更新します。

$$\nu^2 \leftarrow (1 - p_\nu)\nu^2 + p_\nu \cdot (\varepsilon^2 + dgt^2) \tag{46A}$$

κの変更は必要ありませんが、変更するならば、(47F)で更新します。

$$\kappa = 2(1 - Q_{\omega q}) \tag{47F}$$

これで、制御周期の操作が終了です。R，C，D，S；r，c，d，sを１項ずらして、次の時点の操作を待ちます。

産業上の利用可能性

高速で、正確な制御は、近代産業で常に求められている技術です。近代制御理論を用いた制御法は、高速さと正確さには目を見張るものがありましたが、雑音による不安定さと、突発的に起こる制御破綻は、一度採用した近代制御法をあきらめざるを得ない状態にしていました。本発明は制御破綻を回避し、安定性が良く、しかもフィードフォワードが可能な、高速で正確な本発明による制御方法とそれを実現する装置です。

請求の範囲

1．制御中に応答関数を同定し、目標値Ｓ，制御値Ｒを用いて、操作値Ｃを算出するデジタル制御において、Ｒ，Ｃの差分の過去値又はこれらと雑音の大きさとを用いて信号の大きさを求め、信号が大きく、異常時でない時のＲ，Ｃを用いて応答関数を同定し、Ｒの推定値を元に、ＲをＳに一致させる値として算出される操作値の差分の現在値に、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値を乗じて補正した値をＣの差分の現在値とする事を特徴とする制御方法。

2．操作値Ｃの出力装置，演算装置Ｕ，記憶装置Ｍ及び制御値Ｒと目標値Ｓと異常信号の入力装置Ｗを備え、Ｕの演算により、Ｃ，Ｒの差分の過去値又はこれらと雑音の大きさとで信号の大きさを算出し、信号が大きく、異常時でない時のＲとＣを応答関数の同定用のデータとし、同定した応答関数又は応答関数の同定用データをＭに保存し、ＲとＣとを用いて推定したＲの予測値を修正してＲをＳに一致させるＣの値を求め、その現時点で出力すべきＣの差分に、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値を乗じて補正した値を出力する事を特徴とする制御装置。

3．制御中に応答関数を同定し、目標値Ｓ，制御値Ｒを用いて、操作値Ｃを算出するデジタル制御において、Ｒ，Ｃの差分の過去値又はこれらと雑音の大きさを元に信号の大きさを求め、信号が大きく、かつ、異常時でない時のＲ，Ｃの値を用いて応答関数を同定し、Ｒの推定値を元にＲをＳに一致させる値として算出された操作値の差分の現在値に、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値と、雑音圧縮率とを乗じて補正した値をＣの差分の現在値とする事を特徴とする制御方

法。

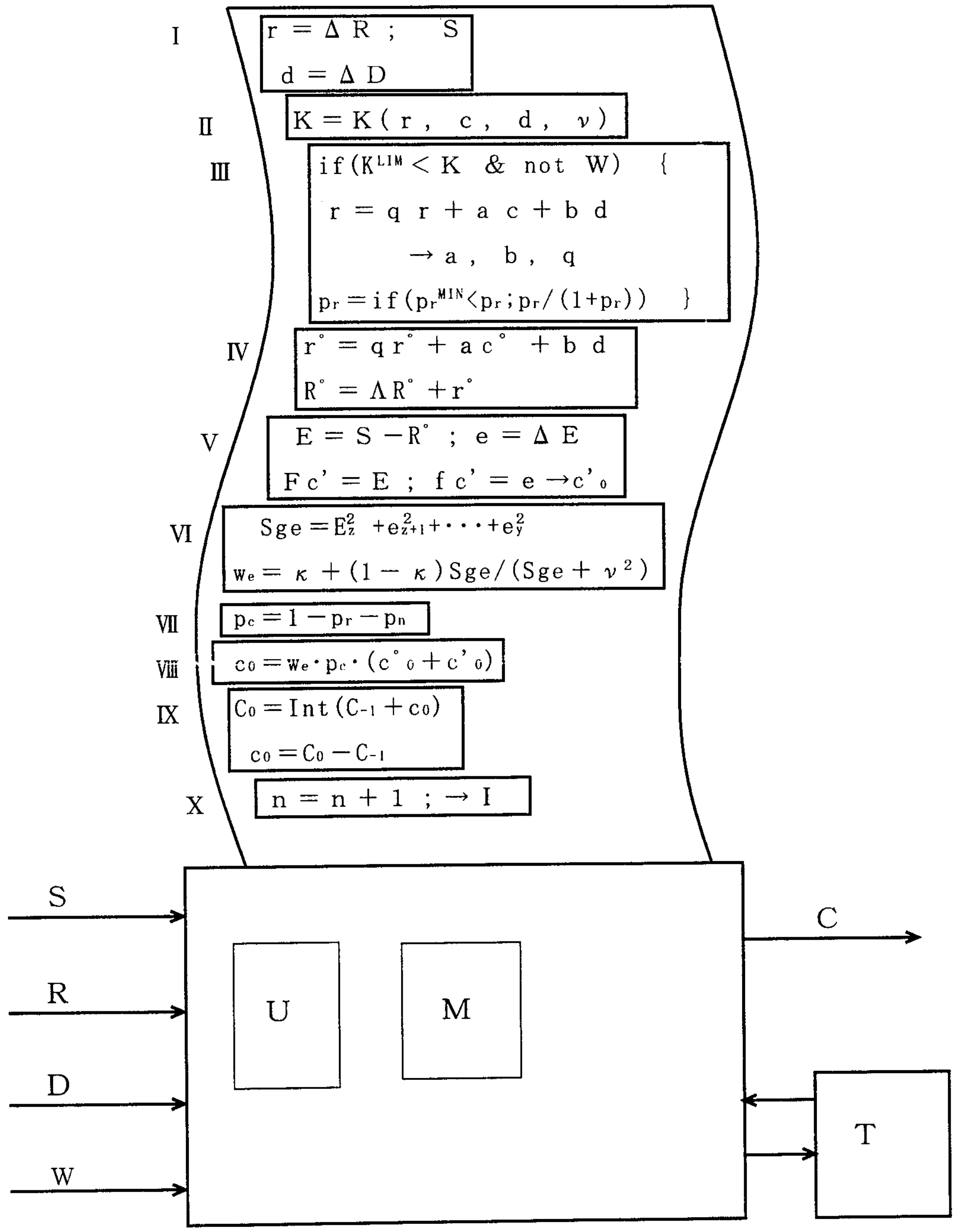
４．操作値Ｃの出力装置，演算装置Ｕ，記憶装置Ｍ及び制御値Ｒと目標値Ｓと異常信号の入力装置Ｗを備え、Ｕを用いた演算により、Ｃ，Ｒの差分の過去値、又はこれらと雑音の大きさを用いて信号の大きさを求め、信号が大きく異常時でない時のＣとＲを応答関数の同定用のデータとし、同定した応答関数又は応答関数の同定用のデータをＭに保存し、ＲとＣとを用いて推定したＲの予測値を修正してＲをＳに一致させるＣの値をＵで求め、その現時点で出力すべきＣの差分を、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値と雑音圧縮率とを乗じて補正した値をＣの差分の現在値として出力する事を特徴とする制御装置。

５．制御中に応答関数を同定し、目標値Ｓ，制御値Ｒ，可知的外乱Ｄを用いて、操作値Ｃを算出するデジタル制御において、Ｒ，Ｃ，Ｄの差分の過去値又はこれらと雑音の大きさを元に信号の大きさを求め、信号が大きく、異常時でない時のＲ，Ｃ，Ｄを用いて応答関数を同定し、Ｒ，Ｃと過去，現在，未来の利用できるＤを用いて予測したＲの推定値を元に、ＲをＳに一致させる値として算出された操作値の差分の現在値に、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値とを乗じて補正した値をＣの差分の現在値とする事を特徴とする制御方法。

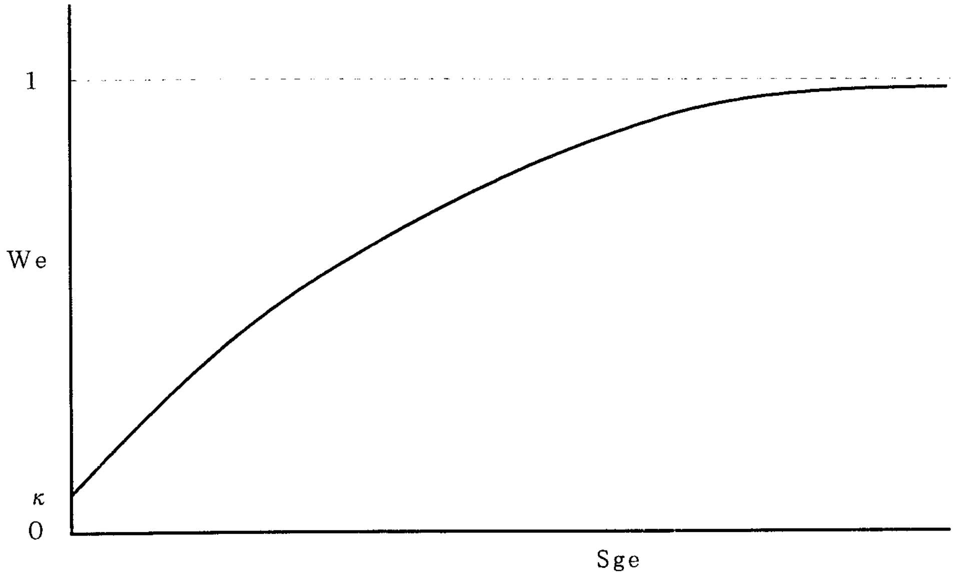
６．操作値Ｃの出力装置，演算装置Ｕ，揮発性及び不揮発性の記憶装置Ｍ及び制御値Ｒと目標値Ｓと可知的外乱Ｄと異常信号の入力装置とを備え、Ｕを用いた演算により、Ｃ，Ｒ，Ｄの差分の過去値又はこれらと雑音の大きさを元に信号の大きさを求め、信号が大きく、異常時で無い時のＣとＲとＤを応答関数の同定用のデータとし、同定した応答関数又は応答関数の同定用のデータを不揮発性記憶装置に保存し、ＲとＣと過去

と現在と未来の利用できる範囲のＤを用いて推定したＲの予測値を修正してＲをＳに一致させるＣの値を求めて、その現時点で出力すべきＣの差分に、１より応答関数の不正確さとモデル不適性を差し引いた数値を乗じて補正した値をＣの差分の現在値として出力する事を特徴とする制御装置。

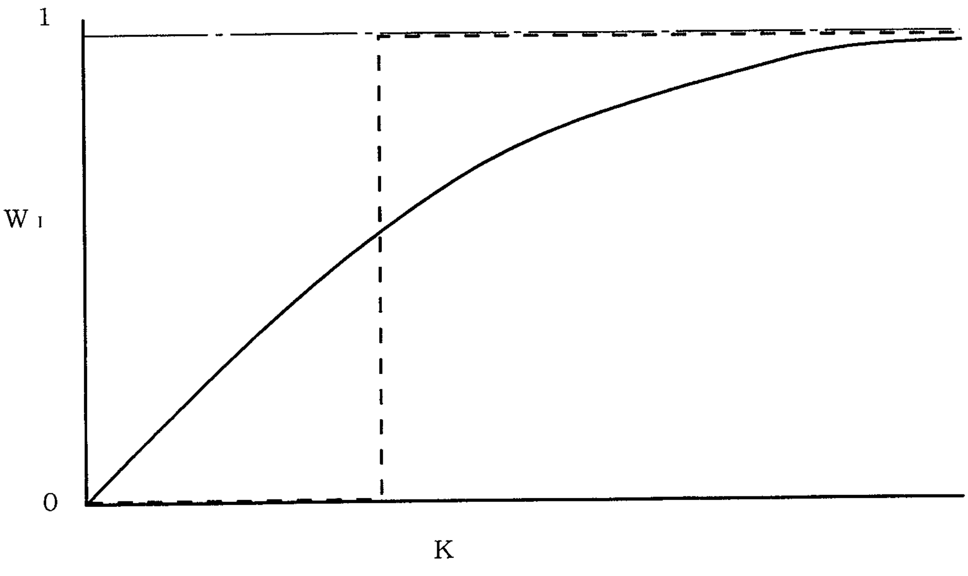
FIG. 1


I
r = ΔR ; S
d = ΔD
II
K = K (r, c, d, ν)
III
if (K^LIM < K & not W) {
r = qr + ac + bd
→ a, b, q
pr = if (pr^MIN < pr ; pr/(1+pr)) }
IV
r° = qr° + ac° + bd
R° = ΛR° + r°
V
E = S − R° ; e = ΔE
Fc' = E ; fc' = e → c'0
VI
Sge = Ez² + ez+1² + ・・・ + ey²
We = κ + (1 − κ) Sge/(Sge + ν²)
VII
pc = 1 − pr − pn
VIII
c0 = We・pc・(c°0 + c'0)
IX
C0 = Int (C-1 + c0)
c0 = C0 − C-1
X
n = n + 1 ; → I
S
R
D
W
U
M
C
T

F I G. 2



F I G. 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP99/00837

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl^6 G05B13/04, G05B11/36, 507, G05B21/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl^6 G05B13/02, G05B13/04, G05B11/36, 507, G05B21/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1926-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-1999
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-1999	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-1999

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JICST File (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Mitsuru Terao, et al., "Robasuto Tekiou Seigyou Nyuumon", 1st edition, 25 September, 1989 (25. 09. 89), Omusha, Ltd. , P147-152	1-6
A	JP, 8-123507, A (Fujitsu Ltd.), 17 May, 1996 (17. 05. 96), Page 4, Par. No. [0035] to page 5, Par. No. [0039], Page 5, Par. No. [0043] to page 12, Par. No. [0133] & US, 5724239, A	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier document but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 14 April, 1999 (14. 04. 99)	Date of mailing of the international search report 27 April, 1999 (27. 04. 99)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号 ＰＣＴ／ＪＰ９９／００８３７

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Ｉｎｔ．Ｃｌ^{6}　Ｇ０５Ｂ１３／０４，Ｇ０５Ｂ１１／３６、５０７，Ｇ０５Ｂ２１／０２

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Ｉｎｔ．Ｃｌ^{6}　Ｇ０５Ｂ１３／０２，Ｇ０５Ｂ１３／０４，Ｇ０５Ｂ１１／３６、５０７，Ｇ０５Ｂ２１／０２

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報　１９２６－１９９６
日本国公開実用新案公報　１９７１－１９９９
日本国登録実用新案公報　１９９４－１９９９
日本国実用新案登録公報　１９９６－１９９９

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

ＪＩＣＳＴファイル（ＪＯＩＳ）

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求の範囲の番号
Ａ	寺尾　満、外１名著、「ロバスト適応制御入門」、第１版、２５．９月．１９８９（２５．０９．８９）、オーム社、Ｐ１４７－１５２	１－６
Ａ	ＪＰ、８－１２３５０７、Ａ（富士通株式会社）、１７．５月．１９９６（１７．０５．９６）、第４頁【００３５】欄－第５頁【００３９】欄、第５頁【００４３】欄－第１２頁【０１３３】欄、＆ ＵＳ，５７２４２３９，Ａ	１－６

☐ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日　１４．０４．９９	国際調査報告の発送日　27.04.99
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	特許庁審査官（権限のある職員）　３Ｈ　９５２２ 仁　科　雅　弘　印 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３３１６