

電子計算機による自動制御系の最適設計

Optimum Design of Automatic Control Systems with the Aid of Digital Computer

In this paper, utilization of digital computers in optimum design of automatic control systems is discussed. DDS (Digital Dynamics Simulator) and DDS-OPT (DDS Optimization Version) are problem-oriented softwares especially suited for the analysis and design of automatic control systems. The optimum design of hot strip mill control systems using this software is presented.

DDS is a kind of block diagram simulator enabling the user to easily compute the response of the control system if the structure of the control system is given in the form of numerical tables. DDS-OPT is a DDS appended with the function of optimization mode. In this mode, design parameters are automatically adjusted to obtain optimum response. As the method of searching the optimum point, a parallel tangent method is used in the DDS-OPT. By this searching method, the number of required searches increases only about proportionally to the number of design parameters.

The hot strip mill control system is studied to optimize design parameters under the constraints on impact drop, recovery time, offset error and motor current. The performance index is defined as the sum of the absolute error and the penalty values. These penalty values are defined as the excess values over the constraints of the design object. The optimum designs are executed with 2 design parameters, with 6 design parameters and with changing the condition of the design constraints. The computer design gives better performance than the design aided by human decisions.

三巻達夫* *Tatsuo Mitsumaki*

水野雄弘** *Katsuhiko Mizuno*

春名公一*** *Kôichi Haruna*

並木成之**** *Shigeyuki Namiki*

1 緒 言

自動制御系の解析、設計にはアナログ計算機、ハイブリッド計算機がよく利用される。デジタル計算機は速度向上に伴い制御系を非線形系として詳細に解析、設計を行なうことが可能となってきた。本論文では、制御系のブロック線図を数表の形式で記述すれば時間応答が容易に計算できるDDS (Digital Dynamics Simulator) と、これに最適設計機能を付加したDDS-OPT (DDS Optimization Version)、応用例として圧延機制御系の最適設計について述べる。DDSは昭和43年より日立製作所内の多くの設計、研究部門で制御系の解析、設計に使用されているが、アナログ計算機より1けた以上少ない時間で制御系の記述ができ、また非線形性を考慮して制御系を扱えるので現場における調整時間の短縮、問題の生じ方の減少などの効果が得られている。DDS-OPTは計算機で自動的に最適設計を行なうものであるが、多数の設計パラメータの最適点を求めること、制御系の性能を定義する評価関数をどのような形にするかが問題である。最適点の探索に関してはパラレル タンジェント法を用い設計変数の増加に対してもほぼ比例的な探索回数の増加で良い方法を用いており、評価関数としては現実の制御系における設計目標の概念を考慮した一つの提案を行なっている。圧延機制御系の設計例では設計者の判断による設計より良い結果が得られている。

制御系の解析 (動特定の解析) ではIBM (International

Business Machines Corporation) のCSMP (Continuous Systems Modeling Program) がよく利用されており、わが国にも若干の開発があるが⁽¹⁾⁽²⁾、DDS-OPT⁽³⁾のような最適設計を行なうソフトウェアはまだ開発されていない。日立製作所は、昭和46年アメリカ航空宇宙局とソフトウェアの交換を行ない、本DDS-OPTは同航空宇宙局ライブラリに登録されている。

2 DDS (Digital Dynamics Simulator)

DDSはブロック線図で表現されたシステムを数表の形で記述すれば時間応答が容易に得られるソフトウェアである。DDSの入力情報を大別すると下記の二つに分けられる。

(a) ブロック線図情報

(b) DDSジョブコントロール情報

ブロック線図情報は、表1に示す約60種の要素を組み合わせて制御系の構成を記述するもので、普通の線形/非線形系、むだ時間を含む系、サンプル値制御系、論理判断機構を含む制御系、パラメータが計算結果により変化する系などを扱うことができる。ジョブコントロール情報はブロック線図情報で記述された制御系の時間応答の解法を指定するもので、普通のラン、応答を接続して解く、パラメータを自動的に変えて数種の応答を求める、最適設計と四つのモードを有している。最後の最適設計モードはDDS-OPTの機能である。表2

* 日立製作所システム開発研究所 工学博士 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所システム開発研究所 **** 日立製作所中央研究所

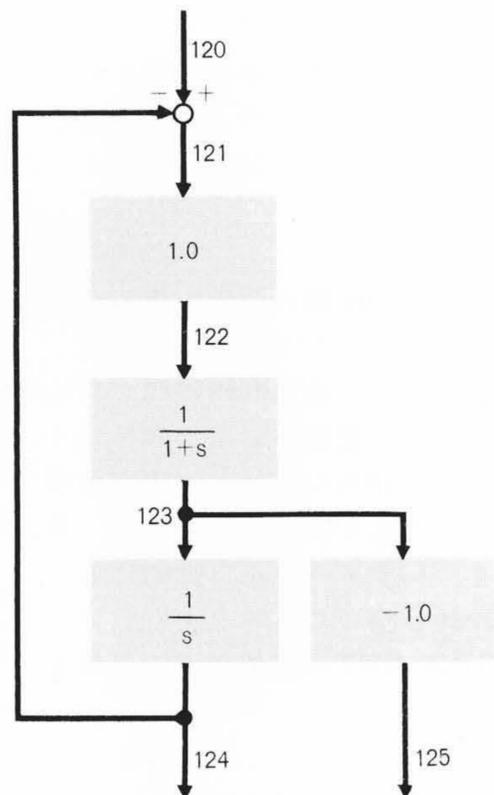
表1 DDS要素一覧表 制御系のブロック線図の情報をこのDDS要素を用いて記述する。ブロック要素の数にほぼ等しい枚数のカード情報が準備される。

Table 1 List of DDS Elements

| 要素番号 | 形式 | 内容 | 要素番号 | 形式 | 内容 | 要素番号 | 形式 | 内容 | 要素番号 | 形式 | 内容 |
|--------|---|---|-------|-------------------------|---|----------|-------------------|----------------------------|----------|------------------|--|
| 1 | Time | | 23 | Weighted SUM | $O = (I) + A(I) + B(I) + C(I)$ | 36 | Dead Zone On off | | 51 | Constant Power | $O = K * (I)^A + C$ |
| 3 | Step input | | 24 | GAIN | $O = K * (I) + C$ | 37 | Hysteresis On off | | 52 | Variable Power | $O = K * (I)^{(1)} + C$ |
| 4 | Ramp input | | 25 | Asymmetric GAIN | $O = \begin{cases} K_R * (I) + C & (I) \geq 0 \\ K_L * (I) + C & (I) < 0 \end{cases}$ | 38 | Friction | | 58 | MAX | $O = \begin{cases} (I) & \text{if } (I) > (I1) \\ (I1) & \text{if } (I1) > (I) \end{cases}$ |
| 5 | Sinusoidal wave input | | 26 | MULT | $O = K * (I) * (I1) + C$ | 40 | SIN | $O = K * \sin(I) + C$ | 59 | MIN | $O = \begin{cases} (I) & \text{if } (I) < (I1) \\ (I1) & \text{if } (I1) < (I) \end{cases}$ |
| 10 | $\frac{K}{S}$ | K, IC | 27 | Complex MULT | $O = A(I) + B(I1) * (I2) * (I3) * (I4)$ | 41 | COS | $O = K * \cos(I) + C$ | 60 | Input Switch | $O = \begin{cases} 1 & \text{if } (I) \geq 0 \\ 0 & \text{if } (I) < 0 \end{cases}$ |
| 11 | $\frac{K}{1 + T_s S}$ | K, T, IC | 28 | DIV | $O = K * (I) / (I1) + C$ | 44 | SQRT | $O = K * \sqrt{(I)} + C$ | 61 | AND | $O = (I) \text{ AND } (I1)$ |
| 12 | $\frac{K}{S(1 + T_s S)}$ | K, T, IC, IC' | 29 | Complex DIV | $O = A(I) + \frac{B * (I1) * (I2)}{(I3) * (I4)}$ | 45 | ABS | $O = K * \sqrt{ (I) } + C$ | 62 | OR | $O = (I) \text{ OR } (I1)$ |
| 13 | $\frac{K}{(1 + T_{s1} S)(1 + T_{s2} S)}$ | K, T ₁ , T ₂ , IC, IC' | 30 | Saturation | | 46 | LOG 10 | $O = K * \log_{10}(I) + C$ | 63 | Exclusive OR | $O = (I) \text{ EXOR } (I1)$ |
| 14 | $\frac{K}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2}$ | K, ω_n , ζ , IC, IC' | 31 | Dead Zone | | 47 | LOGE | $O = K * \log_e(I) + C$ | 64 | NOT | $O = \text{Not}(I)$ |
| 20 | ADD | $O = (I) + (I1) + C$ | 32 | Hysteresis | | 48 | EXP | $O = K * e^{(I)} + C$ | 65 | Output Switch 1 | $O = \begin{cases} (I1) + C & \text{if } (I) = 1 \\ 0 + C & \text{if } (I) = 0 \end{cases}$ |
| 21 | SUB | $O = (I) - (I1) + C$ | 33 | Broken line (Symmetric) | | 49 | EXP 10 | $O = K * 10^{(I)} + C$ | 66 | Output Switch 2 | $O = \begin{cases} (I1) + C & \text{if } (I) = 1 \\ (I2) + C & \text{if } (I) = 0 \end{cases}$ |
| 22 | SUM | $O = (I) + (I1) + (I2) + (I3) - (I4) - (I5) - (I6)$ | 35 | On off | | 50 | ATAN | $O = K * \tan^{-1}(I) + C$ | 68 | Parameter Modify | Constant of 0 number element $C(A) \leftarrow (I)$ |
| 時間関数要素 | | | 演算要素 | | | 関数要素 (一) | | | 特殊要素 (一) | | |
| おくれ要素 | | | 非線形要素 | | | 関数要素 (二) | | | 特殊要素 (二) | | |

表2 二次線形制御系解析のDDSデータ DDS使用の簡単な実例。この例ではブロック線図情報の次に解法として、固定ステップ幅積分方式で時間応答、位相面応答の記録をし、次に可変ステップ幅積分方式での記録、最後にゲイン定数1.0~2.0を0.2おきに変えて6とおりの応答を指示している。

Table 2 DDS Data for Analysis of Second Order Linear Control System



| No. | 1 | 8 | 16 | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | コメント |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------|
| 1 | 1 | 0 | 2 | | | | | | | | | タイトル印字 |
| 2 | EX | AM | PL | E | | | | | | | | 入力初期化 |
| 3 | THE | AN | AL | Y | S | I | S | O | F | | | ブロック線図情報入力 |
| 4 | 1 | 1 | | | | | | | | | | 計算順序づけ標準運用 |
| 5 | 1 | 2 | 6 | | | | | | | | | 計算終了条件 |
| 6 | | 1 | 2 | 0 | 3 | | 1 | | | | | 積分時間幅 |
| 7 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | | | | 一定指定 |
| 8 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 1 | | | | 出力メモリ |
| 9 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | | | | 計算実行指令 |
| 10 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1 | | | | | プロット指令 |
| 11 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 5 | 2 | 4 | | | | 時間応答 |
| 12 | 1 | 5 | | | | | | | | | | 位相面応答 |
| 13 | 1 | 7 | | 1 | | | | | | | | 積分時間幅自動調整 |
| 14 | 1 | 8 | | 0 | | | | | | | | 計算実行指令 |
| 15 | 1 | 0 | 5 | | | | | | | | | プロット指令 |
| 16 | 2 | 0 | 2 | | | | | | | | | パラメータ変更 |
| 17 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5 | | | ゲイン定数変更 |
| 18 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | | | 計算実行指令 |
| 19 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | | プロット指令 |
| 20 | 2 | 2 | | | | | | | | | | パラメータラン |
| 1 | 2 | 4 | 2 | | | | | | | | | パラメータラン |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | | | | ゲイン定数1.0~2.0 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | | | DDS終了 |

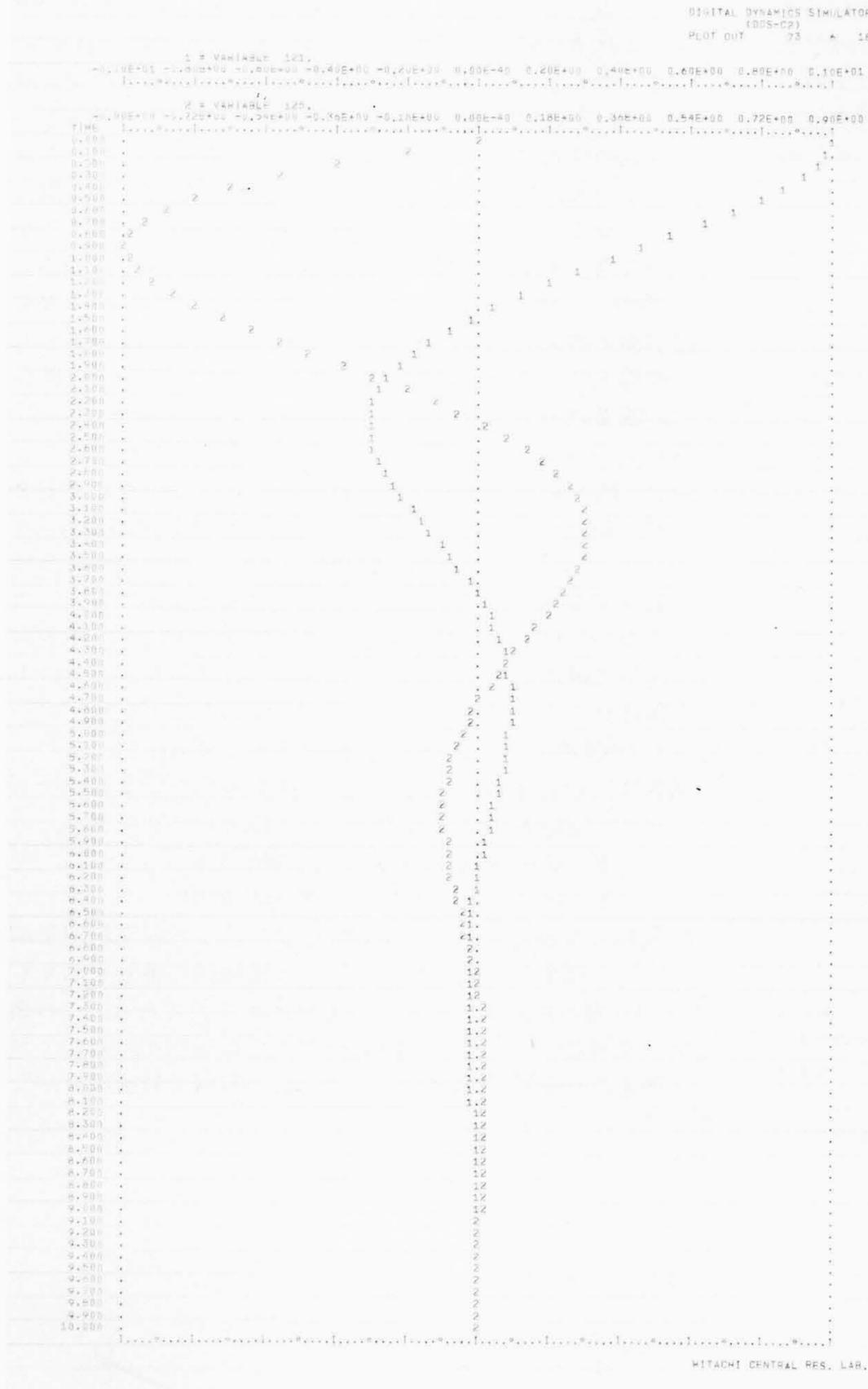


図1 二次線形制御系の応答のラインプリンタ図形記録(時間応答) ラインプリンタの時間応答の記録を示すもので、最大7個までの変数の記録が可能であり、座標軸のスケールは波形の変動範囲から自動的に決定される。使用者がスケールを指定する使用法も可能である。

Fig. 1 Line Printer Graph of the Second Order Linear Control System (Time Response)

は簡単な制御系のDDS入力情報の例を示すものである。計算結果の一例は図1に示すとおりである。ほかに位相面応答を記録することも可能であり、またXYプロッタを用いる高精度の図形記録も可能である。

DDSの機能としては、

(1)ブロック線図の部分訂正機能：制御系の構成の部分的な変更も処理できる。(2)計算ステップ幅の自動調整：計算誤差を一定範囲内に調整しつつ計算を進める機能。(3)計算順序づけの実行：使用者がブロック要素を任意の順に記述しても計算機が正しい順序づけを行なう。(4)初期演算の実行：微分方程式の繰返し計算の前に1回の初期計算を行ない計算を早める機能などがある。DDSの使用法の詳細は他の資料⁽⁴⁾を参照されたい。

3 DDSにおける積分方式

DDSは可変ステップ幅積分方式を採用しており、積分誤差を一定の範囲内に調整しつつ計算が進められる。可変ステ

ップ幅積分方式の効果については文献⁽³⁾を参照されたい。

4 DDS-OPT

最適設計では制御系の構成を示すブロック線図情報と、制御系の評価関数の情報の両者が必要となる。評価関数は一般に、 $\int g(e, u, t) dt$ と制御偏差 e 、操作量 u 、時間 t の関数であり、これはDDSブロック要素を組み合わせれば簡単に計算できる。したがって最適設計モードでは、ブロック線図の特定の変数値(評価関数の計算値)を最大/最小にすることにより、DDS-OPTで使用者が指定するものは、

- (1) 設計パラメータの個数
- (2) 評価関数の変数番号、最大/最小の指定
- (3) 各設計パラメータとブロック要素との対応づけ：設計パラメータの上下限值、最適探索の初期値
- (4) その他、最適探索過程をコントロールするファクタ：探索打ち回数、探索終了条件、黄金分割の回数などである。

最適探索モードではある設計パラメータの値で過渡応答を計算し、これをくり返しつつ最適パラメータを探索するが、この過程では過渡応答そのものは記録せず、くり返し探索時の設計パラメータの値、このときの評価関数の値のみ逐次記録される。設計パラメータの数は本質的には制限はないが、本DDS-OPTの標準では10変数までの最適設計が可能である。

5 DDS-OPTの最適探索アルゴリズム

最適探索手法で最も一般的なものは、最大傾斜法である。これは等高線に直角に昇ってゆくものであるが、1回の探索ごとに傾斜方向を常に求めるので試行の回数が増加するのが

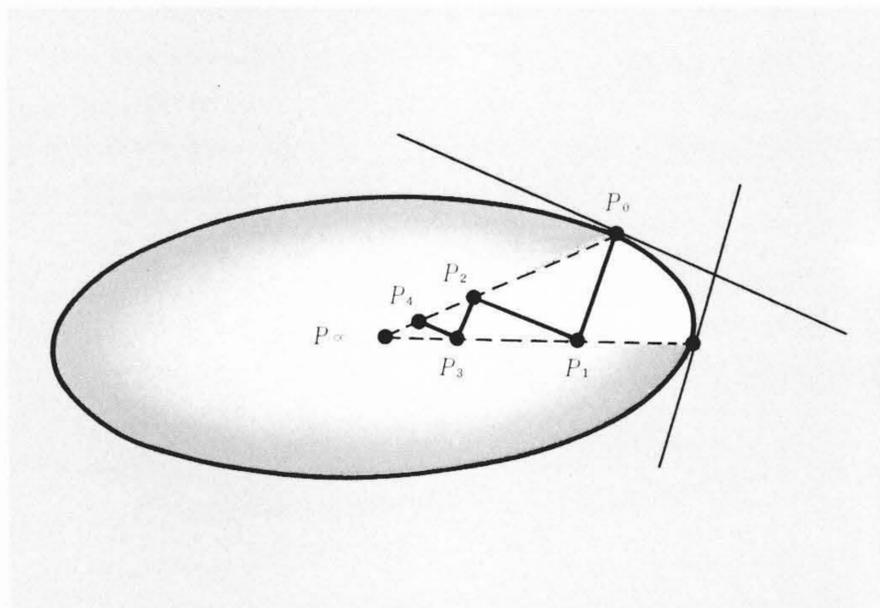


図2 最適傾斜法の収束およびパラレルタンジェント法 最適傾斜法は最大傾斜法に対し1変数の最適探索を行ない $P_0, P_1, P_2, \dots, P_\infty$ の過程をたどる。パラレルタンジェント法は P_1, P_2 の次に P_0, P_2 の延長方向を次に探索する。

Fig. 2 Convergence of Optimum Gradient Method and Parallel Tangent Method

欠点である。これを避けるため、最適傾斜法と称し図2に示すように P_0 点で最大傾斜方向を見つけたらその方向に極値 P_1 まで進んでしまい、ここで最大傾斜方向を求め同じ過程を続ける。この方法は最大傾斜方向を見つけたら、その方向という1変数の探索に置き換えて多変数の探索を行なうものであるが、その欠点は極値に近づくにつれて評価関数の改良される割合が少なくなることおよび何回の最適傾斜で極値に収束するかが不明な点である。ここで用いたパラレルタンジェント法は、「 n 変数の二次関数の最適点は、互いに平行な二つの $n-1$ 次元の超平面と該二次関数との二つの交線上のそれぞれの極値を結ぶ直線上にある」という原理に基づいている。 $n=2$ の場合には、図2に示すように最適点 P_∞ は P_0, P_2 の延長上にある。パラレルタンジェント法はこのように2回の最適傾斜探索とこの P_0, P_2 の延長方向の探索を行ない、次にこの点で(図2では P_∞)最適傾斜を行ない、これと P_1 を結ぶ方向を探索する。パラレルタンジェント法では評価関数が二次形式の場合は $(n-1)$ 回の延長方向の探索で極値に達することができ、二次形式でない一般の場合でも変数の増加にほぼ比例した探索回数の増加で最適点を得ることができる。設計パラメータの上下限値はグラディエントプロジェクション法により処理し、指定した範囲内の最適探索を行なうものである。

図3は圧延機制御系の最適設計の探索過程を示すものである。ゲイン定数 K 、時定数 T の二つの設計パラメータを、

$$\begin{cases} K: \text{範囲 } 0.1 \sim 30.0 & \text{初期値 } 6.0 \\ T: \text{範囲 } 0 \sim 0.1 & \text{初期値 } 0.01 \end{cases}$$

初期値 P_0 より開始し、二重丸の最適設計値への収束状況を示している。図中探索点の数(番号)は探索通し番号を示すもので、()内の数値は評価関数の値を示すものである。この2変数の最適設計では、約100回の探索で最適点を得られており、後述の6変数の最適設計では、約300回で最適設計がなされている。

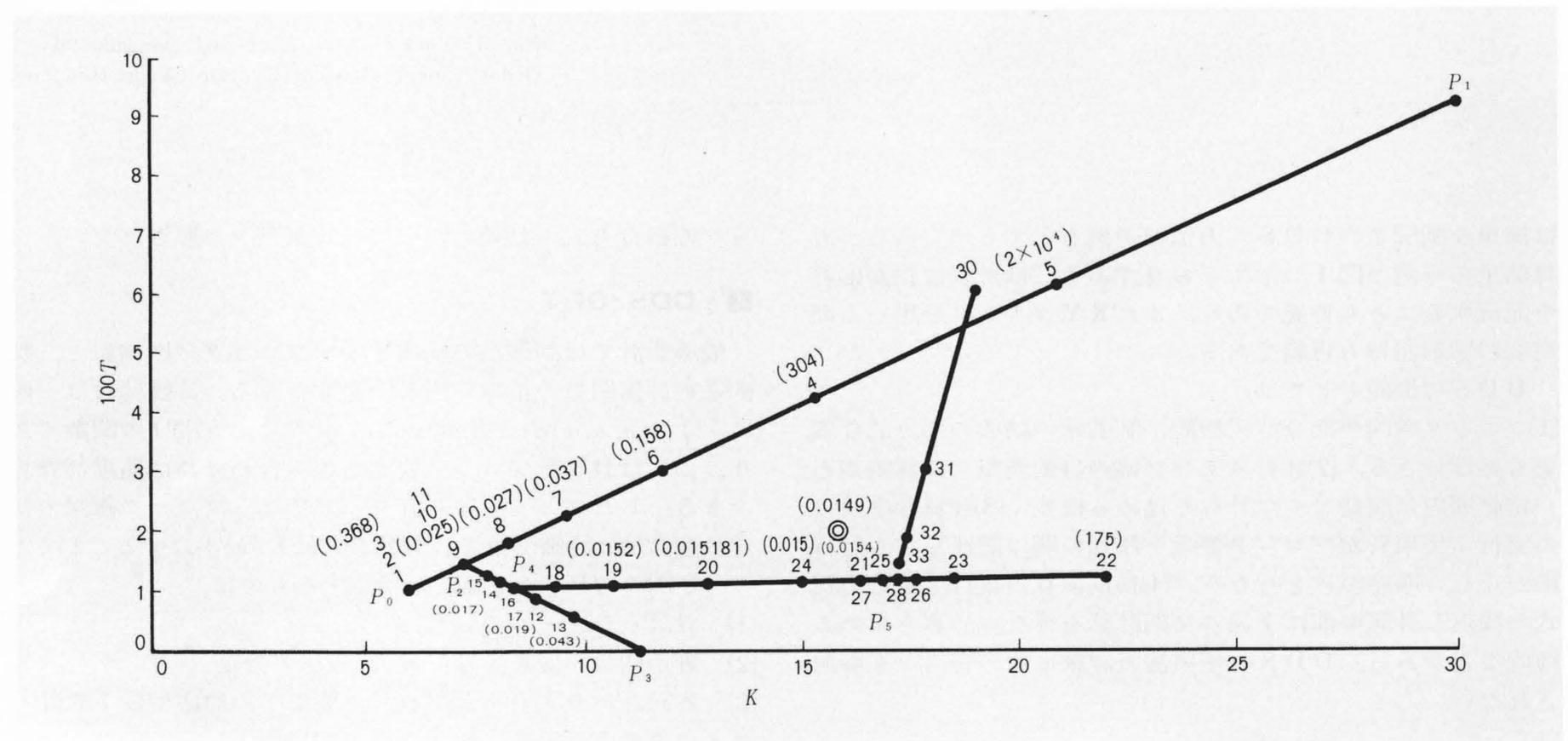


図3 最適点の探索 圧延機制御系における2変数(K, T)の最適点の探索過程を示す。 P_0 よりスタートしパラレルタンジェント法で二重丸の点に収束している。

Fig. 3 Searching Process of the Optimum Point with 2 Design Parameters

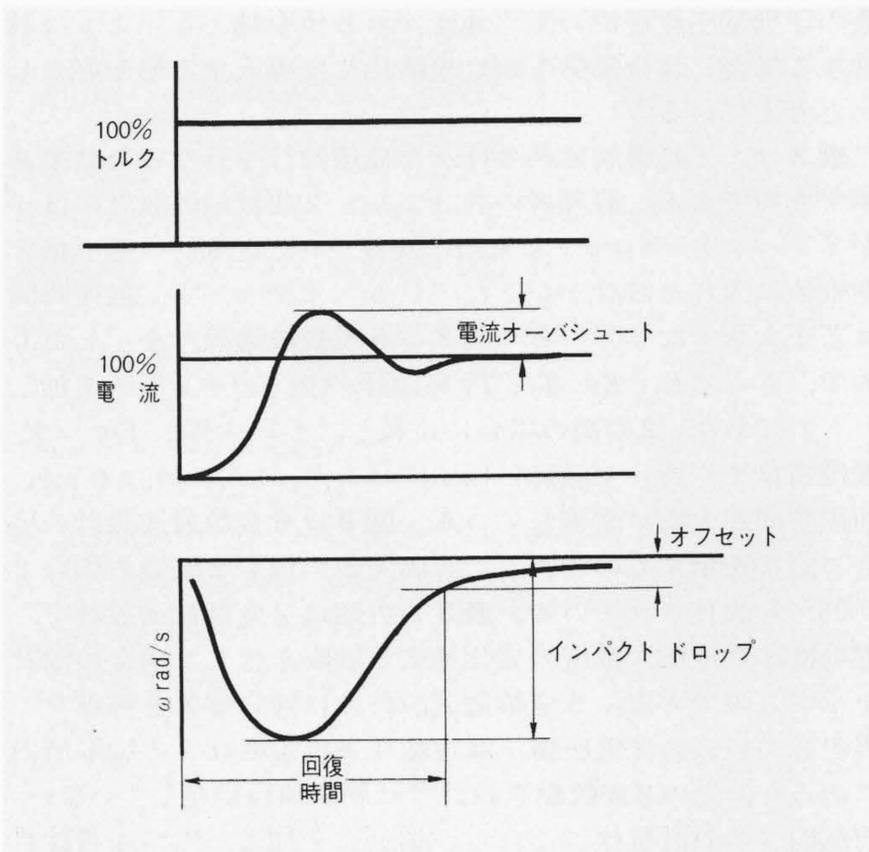


図4 設計目標 圧延機制御系では100%負荷変動に対し、インパクトドロップ、電流オーバーシュートなど四つの性能が重要である。これらの値に対し越えてはならないという設計目標が与えられる。

Fig. 4 Design Criteria

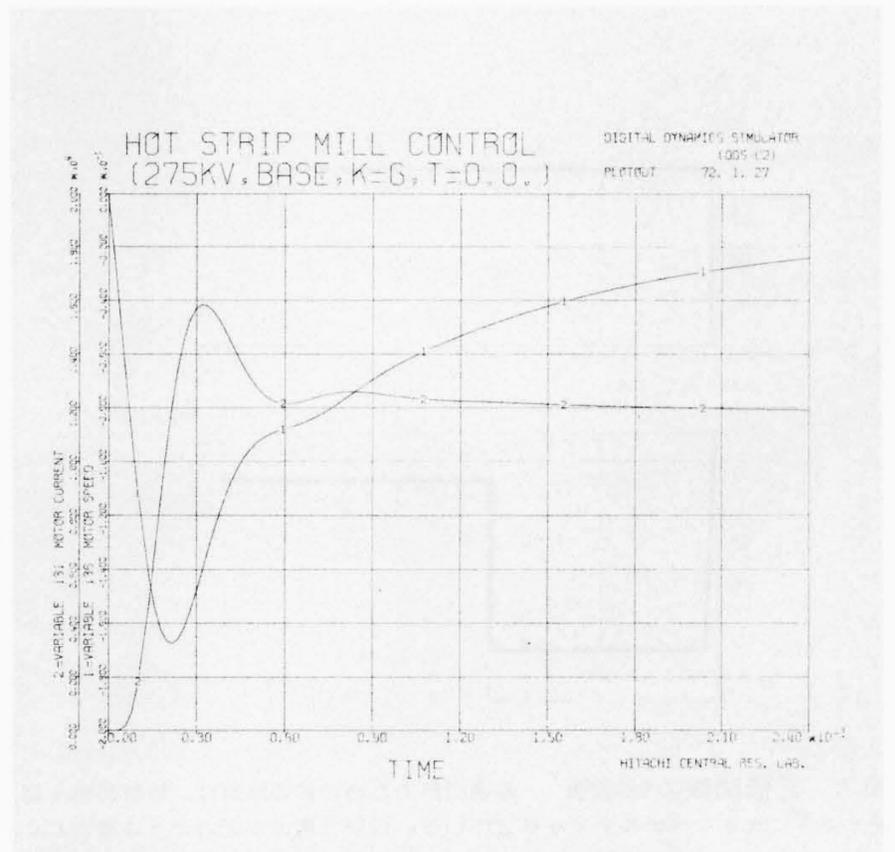


図6 設計者の判断による設計 圧延機の二つの設計パラメータ（ゲイン定数および時定数）を設計者が適切に設計した過渡応答。負荷変動に対し回転数のインパクトドロップ、電動機電流の波形を示している。

Fig. 6 Optimum Design by Manual Parameter Setting

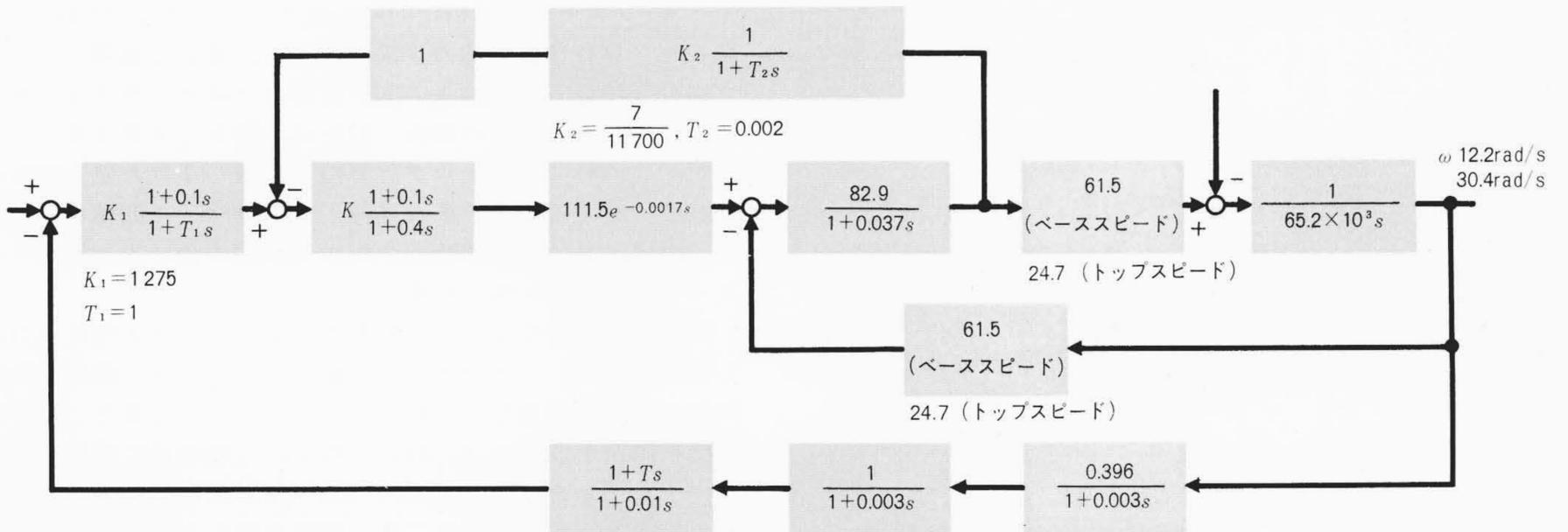


図5 圧延機制御系のブロック線図 圧延機ASR系のブロック線図。高速・低速の条件で検討が行なわれるが、標準ではK, Tの二つの設計パラメータを調整する。

Fig. 5 Block Diagram of a Hot Strip Mill Control System

6 圧延機制御系の最適設計

圧延機ASR (Automatic Speed Regulator) 系では、図4に示すように100%負荷変動に対するインパクトドロップ、回復時間、オフセット、電流の行き過ぎ量の四つが問題となる。設計ではこれらの四つの値が設計目標として与えられる。制御系は図5のK, T二つの設計パラメータを調整する。設計者の判断による設計では、運転状態（高速、低速）および設計パラメータの種々な値について検討し、K=6.0およびT=0.01に設定され、この場合の応答は図6に示すとおりである。

最適設計の評価関数は前述の設計目標も考慮し、またその中に設計者が決めるべき定数値の数は少ないほうが好ましい。すなわちここでは、

$$\text{評価関数} = W[e_{\text{over}} + wc_{\text{over}}] + \int_0^{T_0} |e(t)| dt$$

$$e_{\text{over}} = \int_0^{T_0} [\max\{-(e(t)+M), 0\} dt + \int_T^{T_0} [\max\{-(e(t)+N), 0\} dt$$

$$c_{\text{over}} = \int_0^{T_0} [\max\{c(t)-L, 0\} dt$$

ここで、W, w: 定数, T: 回復時間, T₀: 過渡応答時間
e(t): 回転速度, c(t): 電流, L, M, N: 定数

第1項は設計目標を満たさない量を示し、図7の時間関数からの超過分に対し大きなペナルティ値Wを乗じている。第2項は通常の意味の制御系の評価関数である。計算機は第1項をゼロにし、次に第2項も含めて最小にするように設計パラメータの調整がなされる。一般的に表現すれば、設計目標もしくは設計上押えたい値（たとえば、圧延機制御系で電動

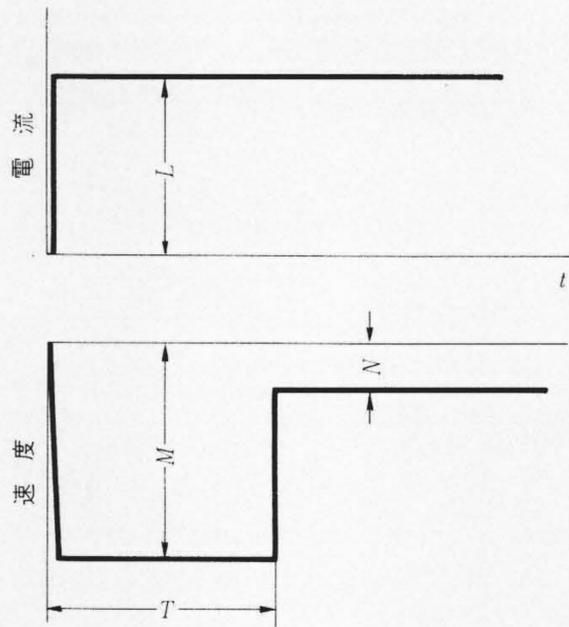


図7 評価関数の制約値 最適設計のための評価関数は、設計目標を超過する分に大きなペナルティを与えている。設計目標は本図のように電流および回転速度について時間関数を発生し、この波形からの超過分を取り出している。

Fig. 7 Penalty Threshold for the Performance Index

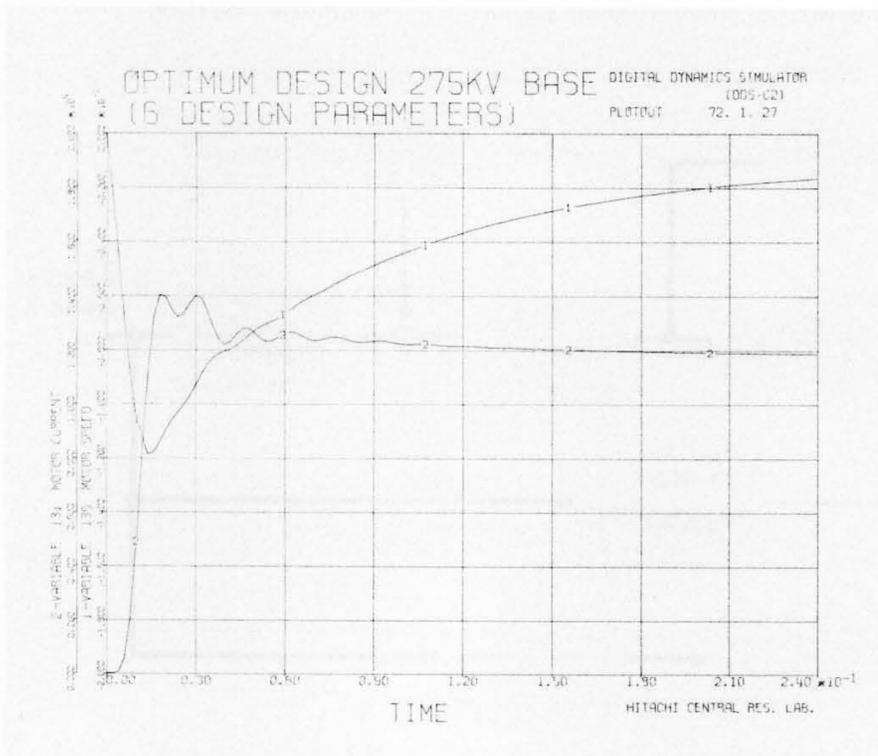


図8 6変数最適設計の応答 圧延機の6個の設計パラメータの最適設計を行なった場合の過渡応答を示す。負荷変動に対し回転数のインパクトドロップ、電動機電流の波形を示している。電流波形は許容値限度が与えられ、速い応答が得られている。

Fig. 8 Optimum Design with 6 Design Parameters

表3 最適設計の性能比較 圧延機制御系でインパクトドロップなど四つの値を種々な最適設計について示してある。左端の従来の設計は設計者の判断による設計であり、計算機による最適設計で2変数、6変数となるにつれ性能が改善されている。電圧、電流の変化速度も考慮した最適設計を右端に示してある。

Table 3 Performance of the Control System Designed by Various Types of Optimum Design.

| 項目 | 従来の設計 | 最適設計 | | | 電圧、電流、変化速度を加味した最適例 | |
|--------------|-------|-------|-------|------|--------------------|------|
| | | 2変数 | 6変数 | 設計目標 | 2変数 | 設計目標 |
| インパクトドロップ(%) | 1.38 | 0.875 | 0.98 | 1.5 | 0.99 | 1.5 |
| 電流オーバシュート(%) | 35 | 19.9 | 20.2 | 20 | 18.9 | 20 |
| オフセット値(%) | 0.198 | 0.211 | 0.137 | 0.3 | 0.191 | 0.3 |
| 回復時間(s) | 0.17 | 0.184 | 0.124 | 0.2 | 0.18 | 0.2 |

機の印加電圧や電流の変化速度がある値を越えないように設計する場合)は全部第1項に規準化して導入する形が好ましいと考えている⁽³⁾。

表3は、圧延機制御系で種々な最適設計を行なった結果を示すものである。設計者の設計よりも2変数最適設計のほうがインパクトドロップも大幅に改善され、電流行き過ぎ量も制限値に入れた設計がなされている。オフセット、回復時間は若干大きくなっている。図8は6変数最適設計を示したもので、さらに K_1, K_2, T_1, T_2 を設計パラメータとして追加したものであり、2変数の場合に比較し、インパクトドロップ、電流値はやや悪いが設計目標値内にあり、むしろオフセット、回復時間を大幅に改善している。図8は6変数最適設計の場合の応答を示すものである。評価関数の値も2変数の場合より25%も改良されている。表3の右端は2変数最適設計で、電動機印加電圧、電流の変化速度の制限を付した場合の設計を示すものである。6変数最適設計では速い応答を無理なく実現しているので電圧値、電流変化速度もこれらの制限値内にあるが、先の2変数最適設計では制限値は満足していない。前記四つの設計目標にこれらの制限値を加え、六つの設計目標値を置いて最適設計を行なえば、制限値を満足させる最適設計を得ることができる。

7 結 言

自動制御系もしくは非線形微分方程式で記述されるダイナミックシステムの解析に便利な汎用ソフトウェアDDSを開発した。DDSは多種の要素を内蔵し、多彩な運用、ステップ幅可変積分方式、結果の図形記録など高度な機能を有するものである。制御系の解析、設計にDDSを使用することは問題記述の時間がアナログ計算機に比較し1けた以上少ない時間で行なえること、また非線形性を加味して問題を扱えるので現場における調整時間の短縮や問題の生じ方が減少するという効果が得られている。

最適設計を行なうため、DDSに最適点の探索機能を付加し複数の設計パラメータを上下限值の中で最適に調整する実用的な手法を開発した。最適設計の具体的な応用としては圧延機制御系を取りあげ、設計目標よりの超過分に対して大きなペナルティを与え、目標内にはいった場合には通常の意味での最適を定義する評価関数の提案を行ない、従来の設計者の判断による設計より良い値、具体的にはインパクトドロップで約30%、電流行き過ぎ量で40%の改善を得た。

終わりに本研究にあたり、終始ご指導をいただいた日立製作所システム開発研究所三浦博士、田上博士ならびに本DDSの応用に関しご指導をいただいた日立製作所日立工場岩田部長、同大みか工場齊藤部長、またDDSのXYプロット、最適探索部分の開発にご協力をいただいた前記システム開発研究所塩田、山根両氏に深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 外山、松浦：ブロック線図のデジタル・シミュレーション・システム・プログラム、第6回自動制御連合講演会、No. 340 (1963)
- (2) 的場：アナログ向き入力言語によるデジタル・シミュレータ(MDAS)、電気通信学会誌、49-7、1351~1356 (1966)
- (3) 三巻、水野、春名、並木：電子計算機による自動制御系の最適設計、計測と制御、11-5、455~467、(1972)
- (4) DDS、プログラム・マニュアル HITAC 8400/8500、(1969)