

ファジィ推論を応用したPIDコントローラ用オートチューニングシステム

An Auto-Tuning System Based on Fuzzy Reasoning for PID Controllers

プロセスオートメーションの分野でも、人間の経験的知識やノウハウが見直され、知識処理技術の利用が進められている。ところで、この分野ではPID(比例・積分・微分)コントローラが幅広く使用されているが、制御パラメータのチューニングは非常に難しく、運転員の経験的知識やノウハウに基づいて手動で行われ、多くの時間と労力が費やされていた。このため、チューニング作業の自動化を目的に、オートチューニングシステムを実用化した。本技術は、人間の持つ定性的な経験則を数学的に取り扱うことができるファジィ推論を応用したものであり、制御応答波形から特徴量を抽出し、推論によって制御パラメータを自動的に変更できる。実用化に当たり、使い勝手と運転員が受け入れやすいシステム構成を目標にした。

野村政英* Masahide Nomura
 斎藤忠良* Tadayoshi Saitō
 横川信幸** Nobuyuki Yokokawa
 高橋 進** Susumu Takahashi
 菅野 彰*** Akira Sugano

1 緒 言

プロセスオートメーションの分野では、タンクの温度、配管の流量などの制御量を自動調整するために、PID(比例・積分・微分)コントローラが幅広く使われている。このコントローラは、目標設定値と現在値との偏差に対し、比例(P)、積分(I)、微分(D)の演算を行い、その和で操作用出力値を変化させる。ところで、このコントローラは適用範囲が広く、ほとんどのプロセスに適用できるが、同時に対象に合わせてP、I、D各演算の係数(制御パラメータ)の調整が必要である。このパラメータ調整のために、Ziegler Nichols法などの古典的ガイドはあるが、実際の現場では、熟練した運転員がコントローラの動作(制御応答波形)の特徴を見て、経験的知識やノウハウによって調整を行っている。この調整作業は非常に難しく、時間がかかる。また近年、人材の確保が難しくなってきた、調整作業のできる熟練運転員が不足し、パラメータ調整の自動化が強く求められてきた。

一方、産業分野では、人間の経験的知識やノウハウを計算機に組み込むために、知識処理技術を利用したエキスパートシステムの実用化が進められている。この知識処理技術の一つとして、「湯が温(ぬる)いので熱くする」の「温い」、「熱くする」など定性的なことばで判断し、扱っている人間の知識処理を計算機で定量化して処理するのに適したファジィ(あいまい)推論があり、その有効性は十分認められている。そこで、

運転員の定性的な経験的知識とノウハウを調整ルールで表現し、制御応答波形の特徴からファジィ推論によって制御パラメータを決定するオートチューニングシステム^{1)~3)}を実用化した。このシステムは、マイクロプロセッサを用いて実現している。実用化に当たって、単一ループの制御^{1),2)}からカスケード制御³⁾への展開を図り、使い勝手と運転員が受け入れやすいシステム構成を目標にした。

本稿では、以下にこのシステムの概要について紹介する。さらに、実用化例として、シミュレーション評価結果および実機試験結果について述べる。

2 オートチューニングの概要

2.1 コントローラのチューニング

PIDコントローラのチューニングでは、目標値が変動したとき、制御量が設定目標値に短い時間で、かつ少ないオーバーシュート量で安定するように、P、I、Dのパラメータを決める。このとき時間とオーバーシュート量は干渉し、時間を短くしようとするとオーバーシュート量が大きくなる。また、パラメータの値によっては、制御量がハンチングを起こす場合がある。

この制御パラメータのチューニング方法は、次に示すように二通りの方法がある。

(1) 数式モデル法

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所那珂工場 *** 日立製作所大みか工場

コントローラの操作量にテスト信号を加え、プロセスの応答を見て、微分方程式などの形でプロセスの数式モデルを推定し、この数式モデルを用いて望ましい制御応答が得られるようにパラメータを決定する方法〔図1(a)〕である。

(2) 経験法

コントローラの動作(制御応答波形)から、オーバシュートのような特徴量を求め、この情報を用いて制御応答が改善されるようにパラメータを決定する方法〔図1(b)〕である。

(1)の方法は、モデル推定用テスト信号がプロセスにとって外乱となり、これにより制御量の変動して、プロセスの製品品質が低下するおそれがある。また、推定したモデルとプロセスの間の誤差の問題があり、この誤差のために望ましい制御応答波形が得られない場合、再度より細かなチューニングが必要となる。ただ、この方法では、数式モデルに対する理論的アプローチが比較的容易に行える。

(2)は、制御応答波形の特徴量と制御パラメータとの対応関係を用いる方法である。図2に示すように、運転員は経験的知識やノウハウによって応答波形の特徴量をとりえ、例えば次に述べるような経験則によって、制御パラメータを決定している。

「オーバシュート量も減衰比も大きいなら、比例ゲイン(P)

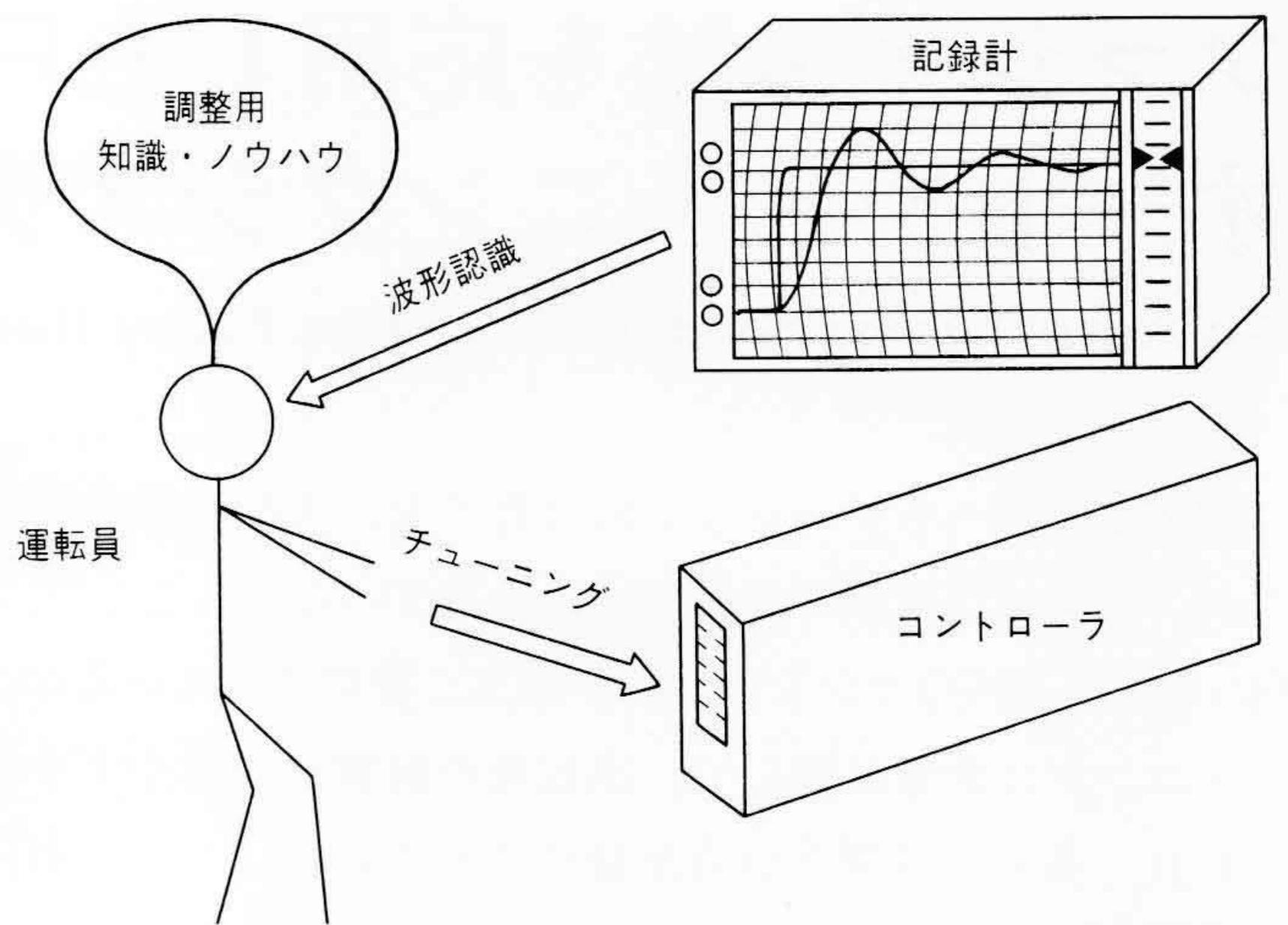


図2 運転員のチューニング方法 運転員は制御応答波形を見て、経験的知識やノウハウによってチューニングする。

と微分時間(D)を下げる。」

したがって、このような運転員のパラメータ調整則を自動的に実現できれば、運転員にも容易に受け入れられるものと考えられる。なお、この方法ではモデル推定誤差の問題はなく、応答波形の形状を望ましい形にチューニングできる。

2.2 ファジィ推論

2.1節で述べたように、(1)と(2)の方法は、それぞれメリットおよびデメリットがある。しかし、使い勝手や運転員の受け入れやすさを重視して考えると、(2)のほうの方が優れていると思われる。ところが、この方法では運転員の経験的知識やノウハウを実現する手段が必要となる。

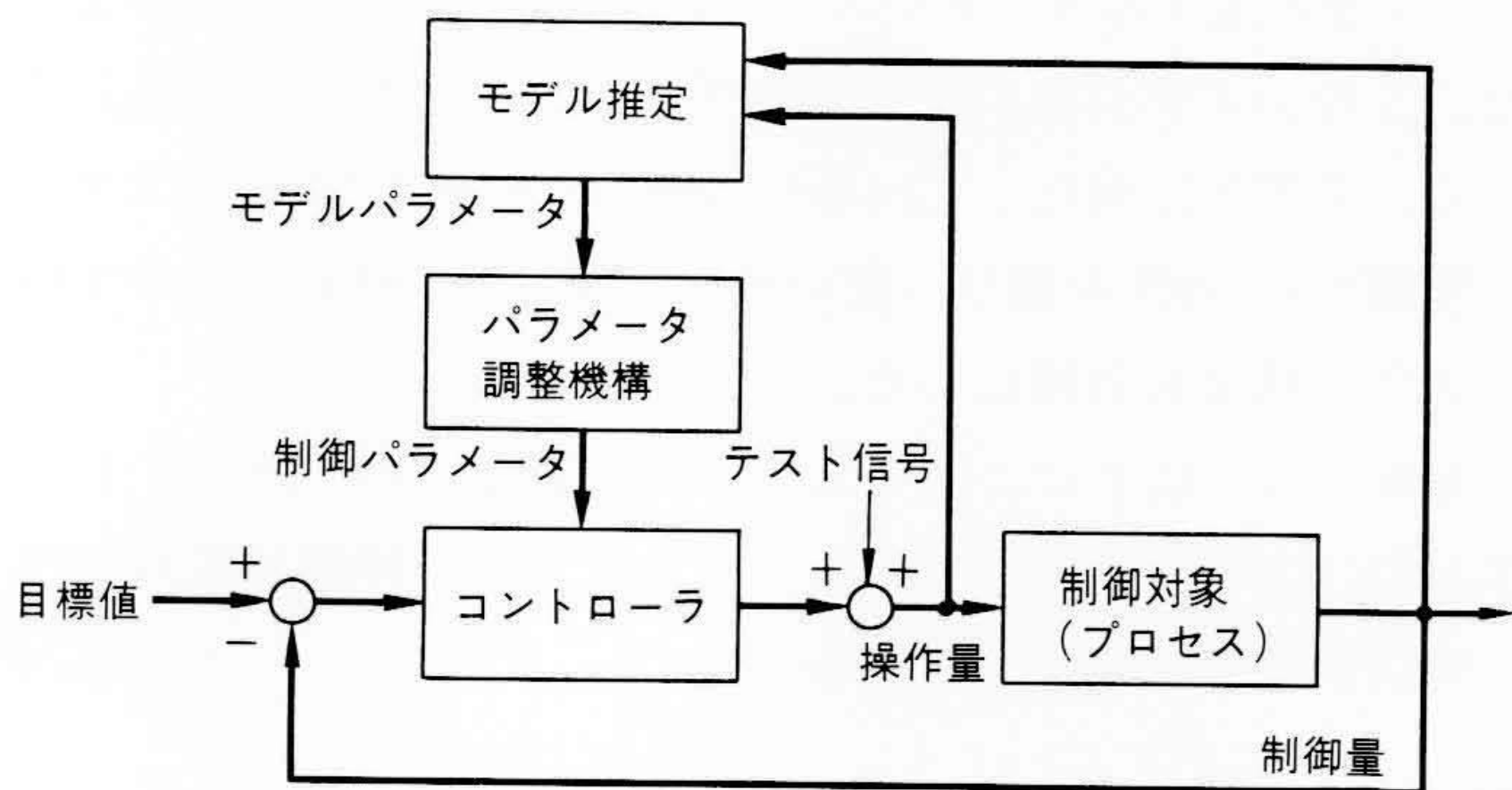
一方、人間の持っている知識やノウハウを計算機に入力し、専門家と同等な機能を実現するエキスパートシステムが近年種々提案されている。このエキスパートシステムを実現するために、ファジィ推論などの知識処理技術が利用されている。

このファジィ推論の適用例として、電車の速度制御システム⁴⁾がある。このシステムは、日立製作所が国内で初めて実用化したものである。電車の熟練運転者は、現状の走行状態でどの制御指令を出したら、電車が少し走った後に目的を満足できるかどうかという経験則、すなわち目的評価制御によって巧みに運転している。例えば、駅のホームに停止するとき、次に述べるような状況判断の経験則を用いている。

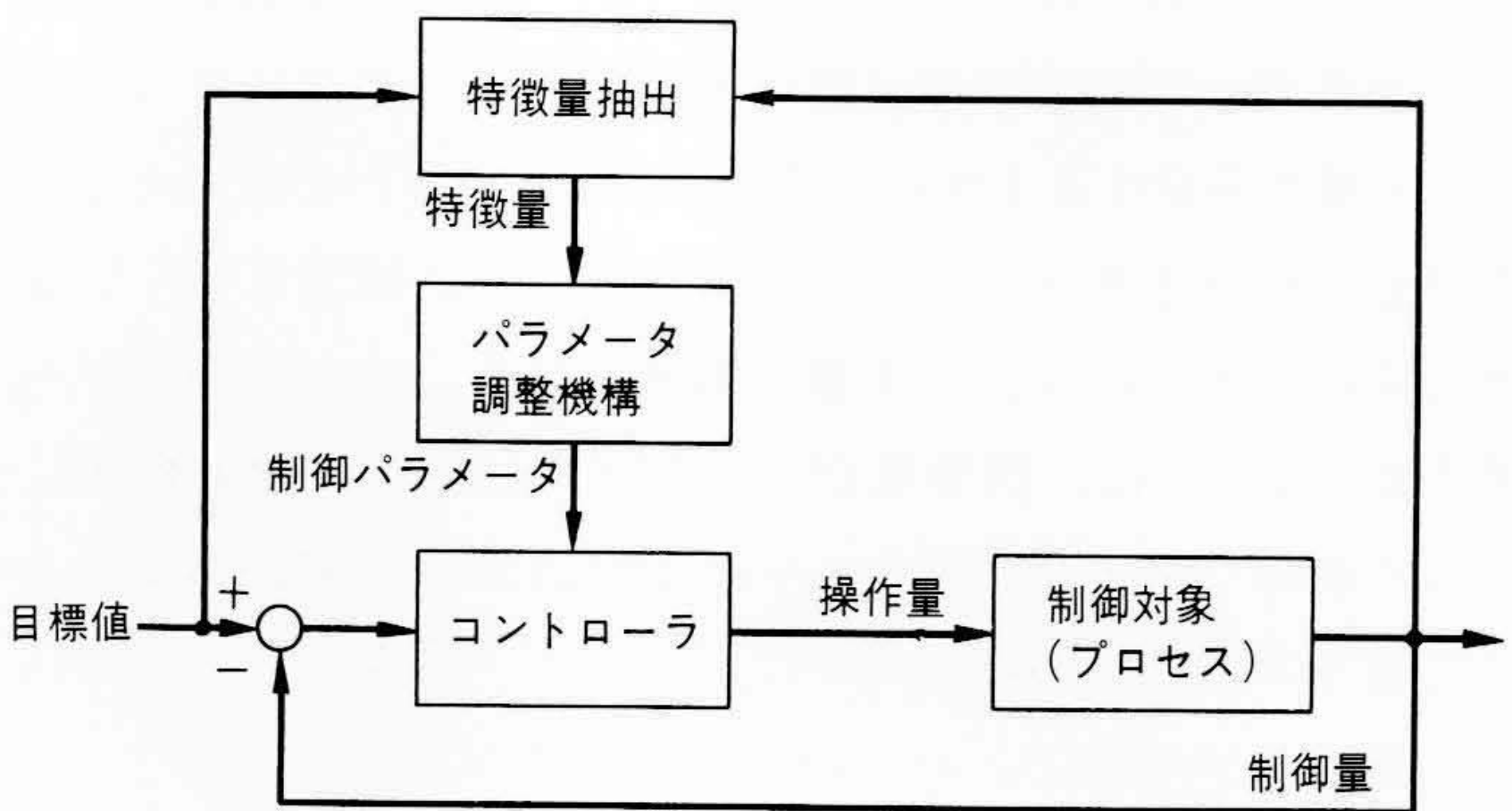
「もし、ブレーキの強さを現状のまま保持したとき、うまく停止できるなら、ブレーキを保持する。」

「もし、ブレーキを現状より少し強くしたとき、乗り心地よく、正確に停止できるなら、ブレーキを少し強くする。」

熟練運転者は制御性能の評価として、走行速度、乗り心地、停止精度、安全性、駅間走行時間、消費電力など複数の指標を用いている。そこで、熟練運転者の経験則を次式に示すファジィ制御ルールで表し、計算機シミュレーションによって



(a) 数式モデル法



(b) 経験法

図1 制御パラメータのチューニング方法 プロセスのモデルを用いる方法と、制御応答波形の特徴量を用いる方法に大別できる。

細部を調整した。

if(u is A $\rightarrow$ x is B and y is C) then u is A

このルールは、「もしuをAとしたとき、xがB、yがCとなるならば、uをAとせよ」ということを意味する。このようにして実現したファジィ制御システムは、従来の制御システムと比べて、停止精度の分散が $\frac{1}{3}$ に、乗り心地に関するノッチの切換回数が $\frac{1}{3}$ に、消費電力が10%削減、駅間走行時間が10%短縮できた。

上記の例から、人間の経験的知識やノウハウを数学的に取り扱うのにファジィ推論が適していることがわかる。特に、ファジィ推論は、制御性能の評価指標が複数の場合に有効である。PIDコントローラのチューニングでも、応答波形の複数の特徴量がそのまま評価指標になっており、この点でもファジィ推論が適していると考えられる。このため、PIDコントローラのオートチューニングにファジィ推論を応用することにした。

3 ファジィ推論によるオートチューニング方式

PIDコントローラがよく使用される形態は、図3に示すように、(a)単一ループ制御系と(b)カスケード制御系である。

(b)のカスケードコントローラは、シリーズに接続された二つのプロセスの制御を目的に、2個のPIDコントローラをシリーズに結合して構成され、外乱に強いと幅広く使用されている。本稿では、上記二つのコントローラの形態について、オートチューニング方式を紹介する。なお、制御対象としては、プロセス制御の分野で大半を占める一次遅れ要素と、むだ時間で応答が近似できるプロセスを対象にしている。

3.1 単一ループコントローラ

単一ループコントローラに対するオートチューニングシステムを図4に示す。このシステムは、(1)特徴量抽出、(2)パラメータ修正、(3)パラメータ計算の三つの主要部分から成る。次に、これらの部分の機能を簡単に述べる。

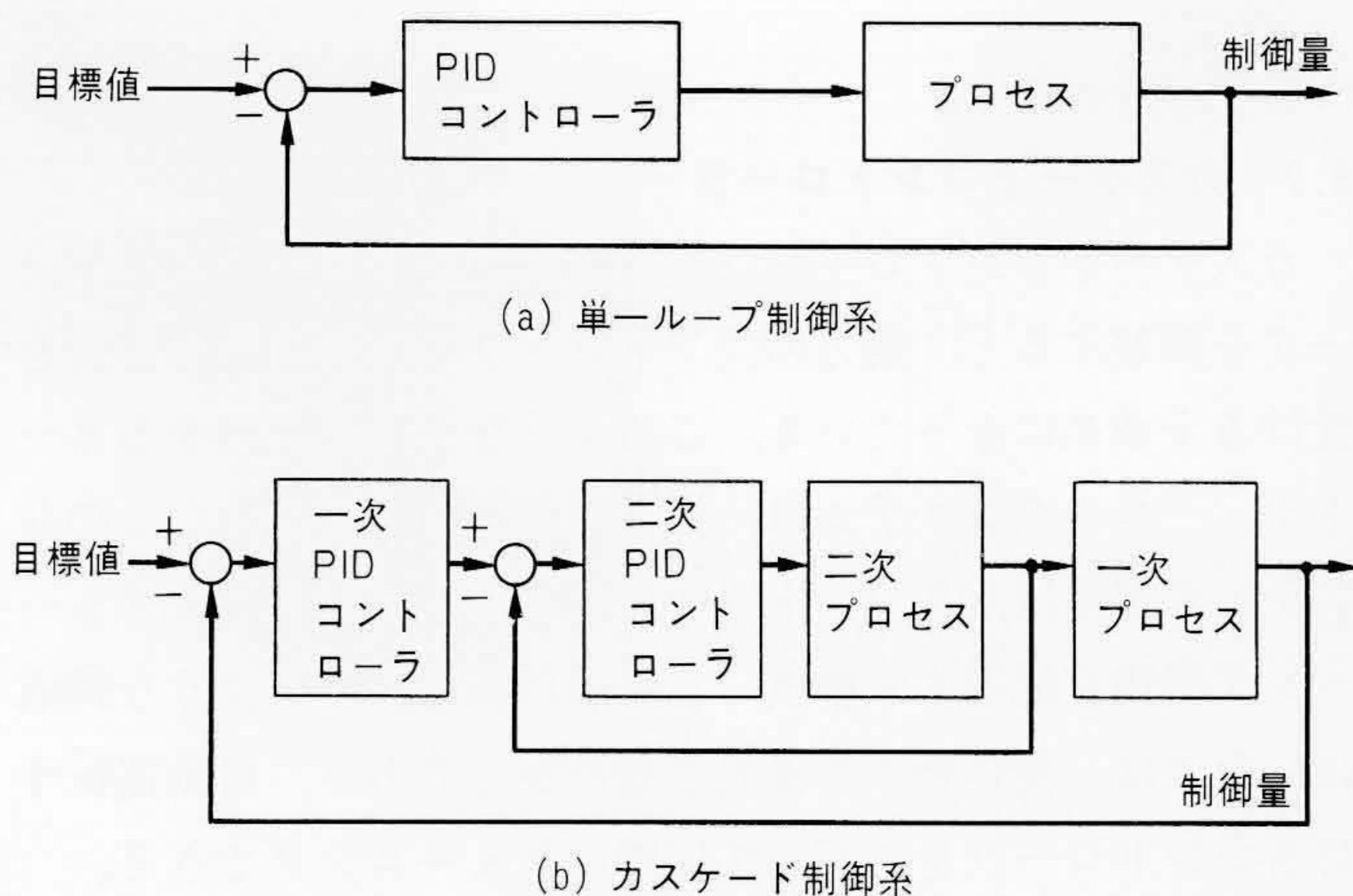
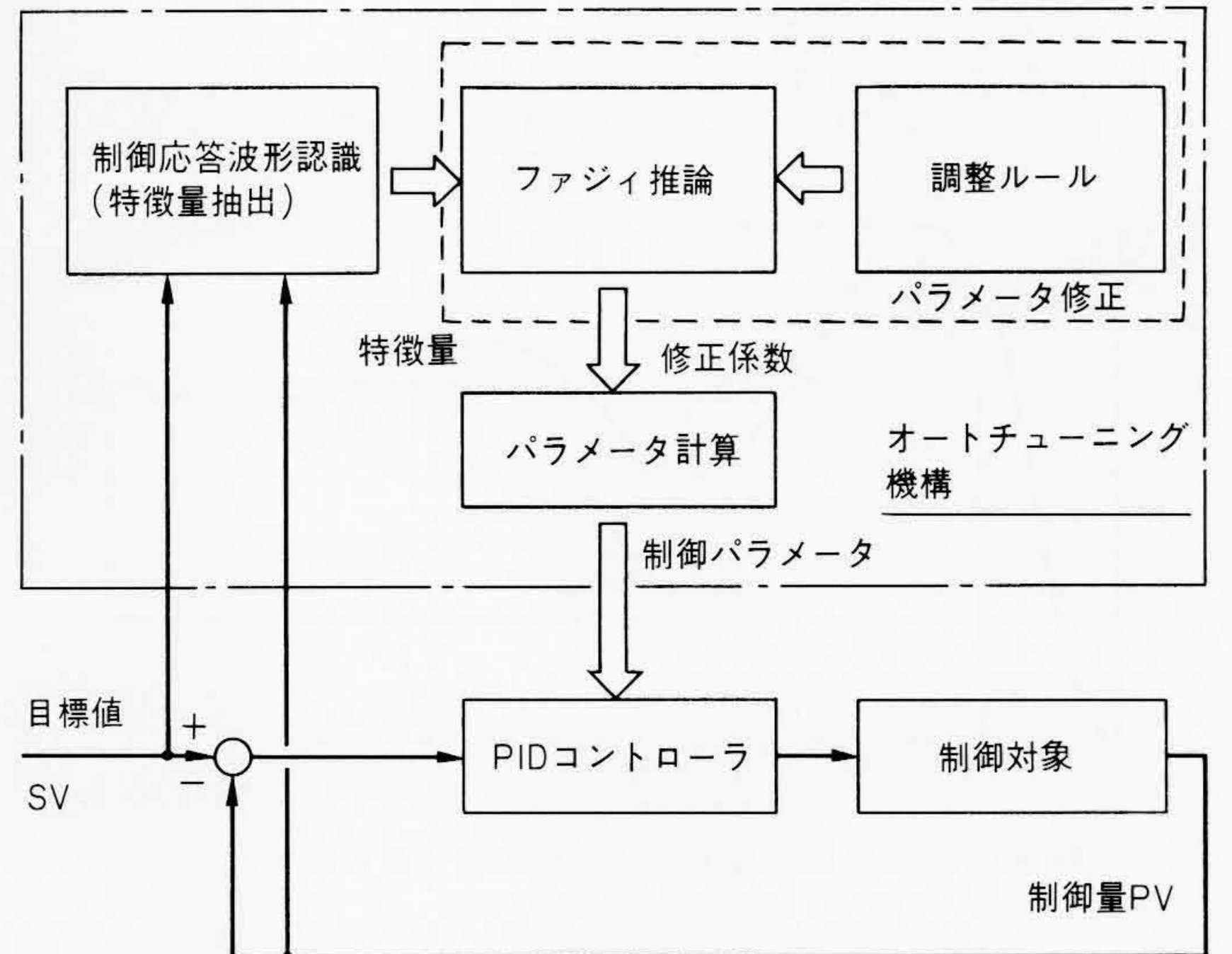


図3 PIDコントローラの使用形態 単一ループ制御系およびカスケード制御系が多く用いられる。



注：略語説明 SV (Set Point Variable), PV (Process Variable)

図4 単一ループコントローラ用オートチューニングシステム
このシステムは、制御応答波形認識、ファジィ推論、調整ルールおよびパラメータ計算から成る。

(1) 特徴量抽出

制御系の応答波形から特徴量を抽出する。

(2) パラメータ修正

特徴量と制御パラメータとの対応関係をファジィルール(調整ルール)で表し、(1)で抽出した値と調整ルールからファジィ推論によって制御パラメータの修正係数を決定する。

(3) パラメータ計算

制御パラメータの前回値と(2)で求めた修正係数から、今回のパラメータ値を計算する。

調整ルールは、応答波形の特徴量と密接に関係する。従来、運転員が使用していた特徴量は、図5に示すように、目標値がステップ変化したときの制御量のオーバシュート量、振幅減衰比、整定時間などである。これらに対応して応答波形を分類すると、表1に示すように大きく8種類に分けられる。制御パラメータの調整のためには、同表の波形から望ましい応答波形を選定し、この波形が得られるように調整ルールを作成することになる。

この調整ルールの構築に当たり、運転員にインタビューして、その結果に基づいて調整ルールの原案を作成した。その後、シミュレーションによって調整ルールを手直しして、表2に示すルールが得られた。

なお、当初特徴量として、図5に示すオーバシュート量、振幅減衰比、整定時間を用いることにしたが、プロセス量にノイズが加わるとき、抽出した値の誤差が大きくなり、チューニングの試行回数が増える場合が生じた。このため、ノイズに強い特徴量を検討し、図6に示す時間積分値(面積値)ベースのものを採用することにした。この時間積分値ベースの

オーバーシュート量 : $E=e_1/e_0$
振 幅 減 衰 比 : $D=b/a$
整 定 時 間 比 : $R=T(\text{前回値})/T(\text{今回値})$

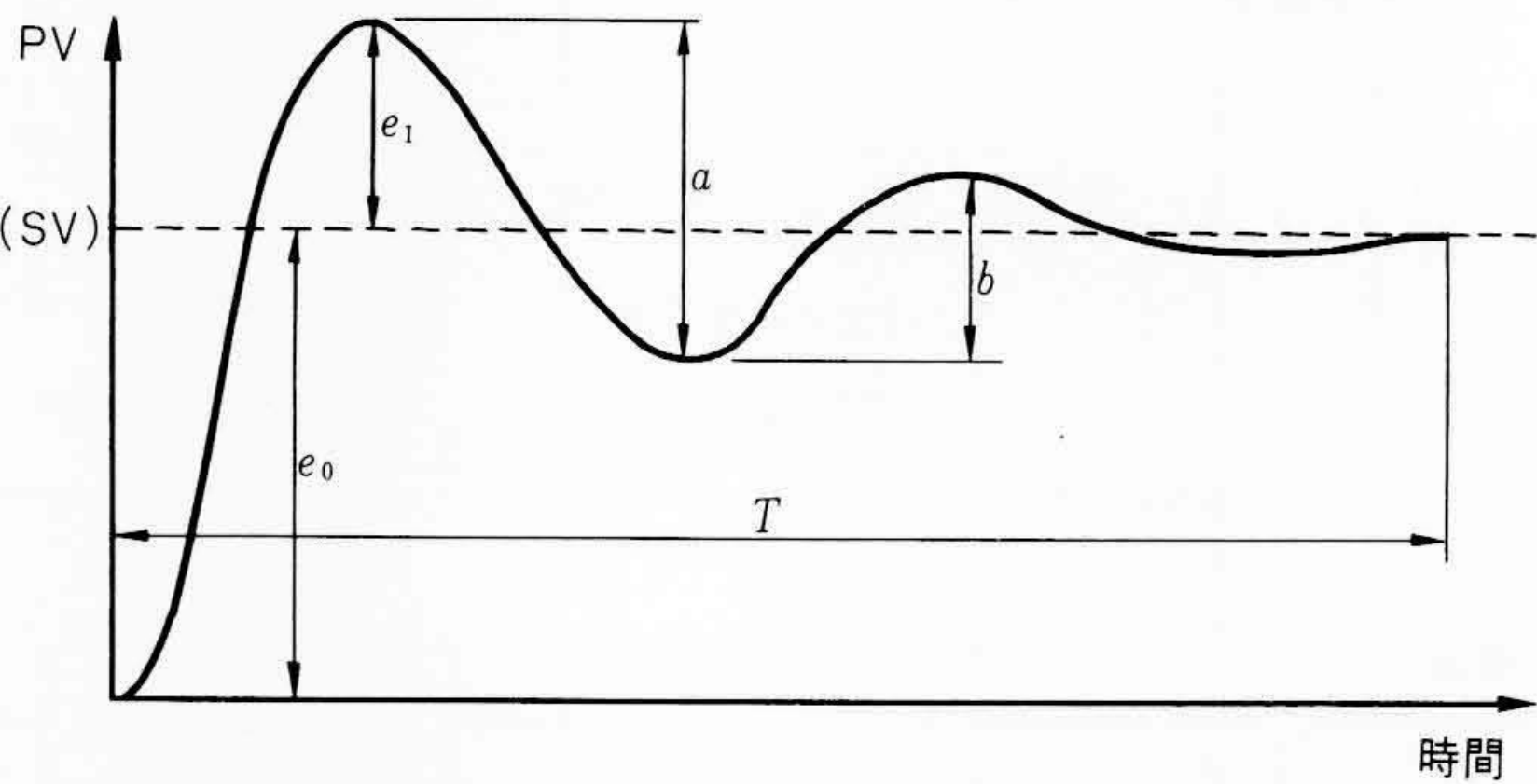


図 5 制御応答波形の特徴量 波形の極値から求める。

表 1 制御応答波形の分類 オーバシュート量および減衰比を、おのおの 3 段階の定性量で分類した。

		オーバーシュート量 E		
		大	適正	なし
減衰比 D	大			
	中位			—
	適正			

注：点線(SV)，実線(PV)

ものと図 5 に示す瞬時値ベースのものとは、ほぼ 1 対 1 に対応し、調整ルールもほとんど同じになる。

次に、ファジィ推論の方法について説明する。図 7 に推論の例を示す。同図は、表 2 のルール番号 R 2、R 3 の推論例であり、(a)は特徴量 E (オーバーシュート量)、 D (減衰比)、 R (制御面積比) および制御パラメータ P 、 I 、 D の修正係数 CP 、 CI 、 CD に対し、NB (小)、ZO (適正)、PB (大) などの度合いを示すメンバーシップ関数、(b)はファジィ推論の方法を示す。ファジィ推論は条件部と結論部から成り、同図(b)の左側が条件部に、右側が結論部に対応している。このファジィ推論は、ルールごとに各特徴量に対する度合いを求めて、これらの度合いの最小値を結論部に当てはめ、これを推論結果とする。この後、ファジィ推論結果を数値化する非ファジィ化演算が必要であり、ファジィ推論結果の結論部の重心を求めること

表 2 調整ルール 表 1 に示した各制御応答波形の特徴量と、制御パラメータの修正係数を定性的な関係で表している。

ルール番号	特 徴 量			修 正 係 数		
	E	D	R	CP	CI	CD
R 1	PB	PB	—	NB	ZO	NB
R 2	PB	PM	PB	NB	NB	ZO
R 3			ZO	ZO	ZO	PB
R 4			NB	PB	PB	PB
R 5	PB	ZO	PB	NB	ZO	ZO
R 6			ZO	ZO	PB	ZO

オーバーシュート量(面積) : $E= \frac{A_2}{A_1}$
減 衰 比(面 積 比) : $D= \frac{A_3+A_4}{A_2+A_3}$
制 御 面 積 比 : $R= \frac{\sum A_i(\text{前回値})}{\sum A_i(\text{今回値})}$

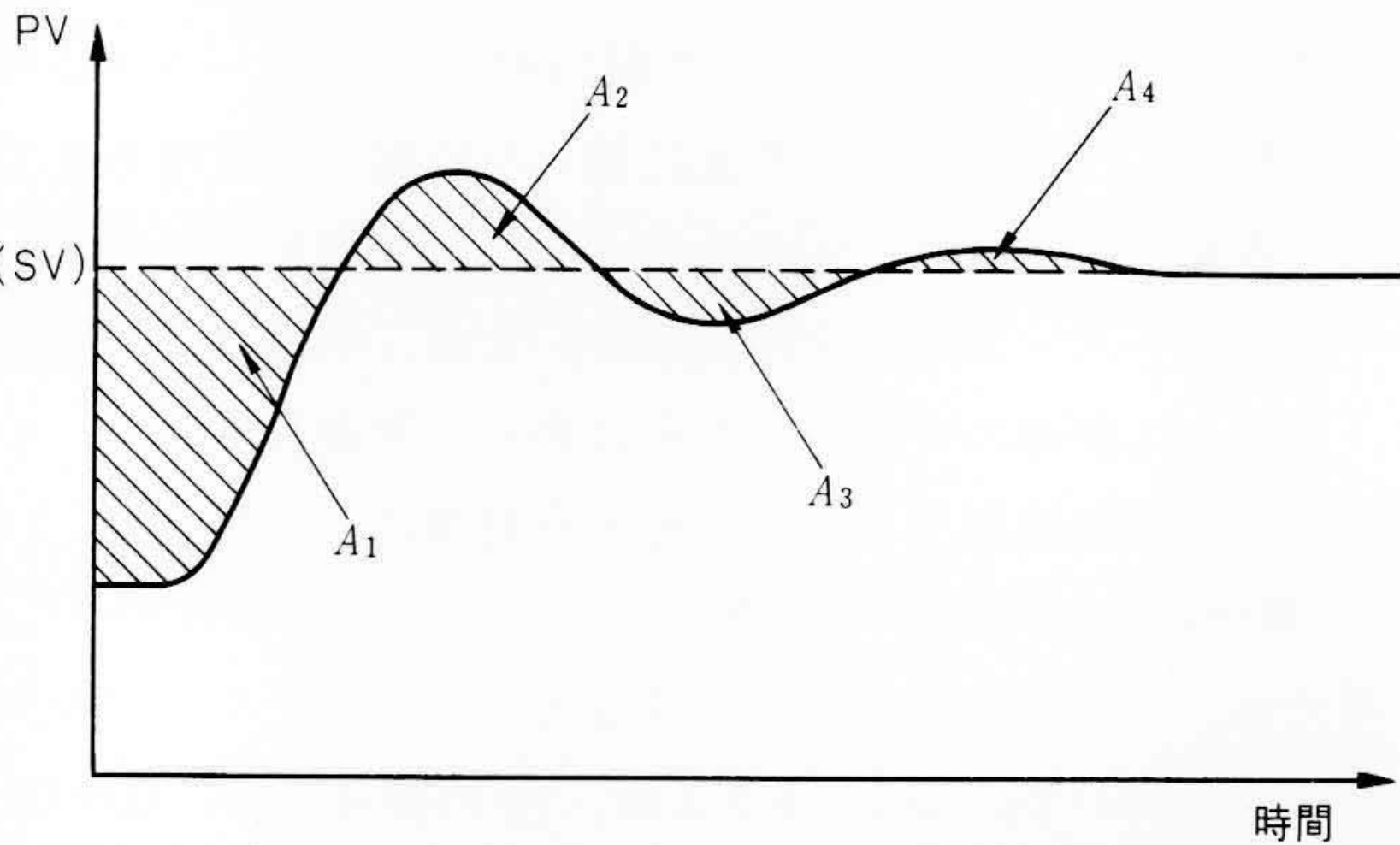


図 6 制御応答波形の特徴量(面積値) 半サイクルごとの制御面積値から求める。

によって行われる。

3.2 カスケードコントローラ

カスケードコントローラは、一方のコントローラのパラメータを調整すると、他方のコントローラの応答波形も影響を受ける干渉系になっている。このような干渉系に対するオートチューニングシステムは、図 8 に示すようになる。このシステムの特徴は、各コントローラに対応して独立したチューニング機構を配置する構成にした点にある。このような構成にしたのは、使い勝手を優先させたからであり、自動運転中に各コントローラを並行して同時にチューニングできる。

各オートチューニング機構は、図 9 に示すように単一ループコントローラ用オートチューニング機構に相互干渉を抑制

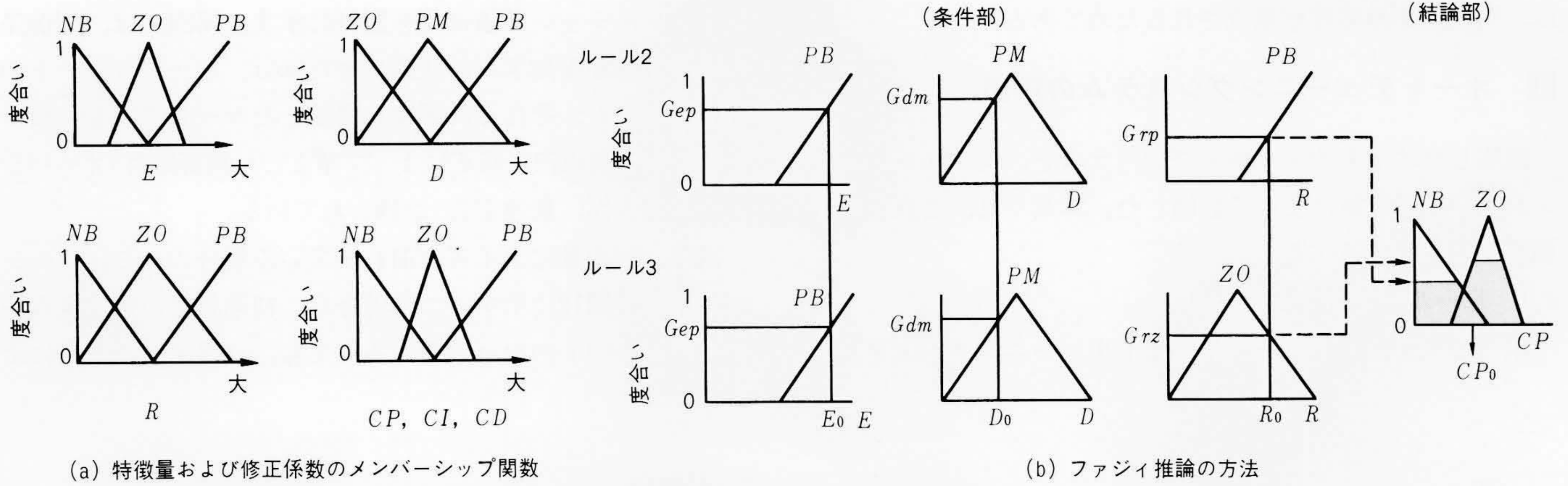


図7 ファジィ推論による修正係数の決定方法 Min-Max法に基づいたファジィ推論を用いている。

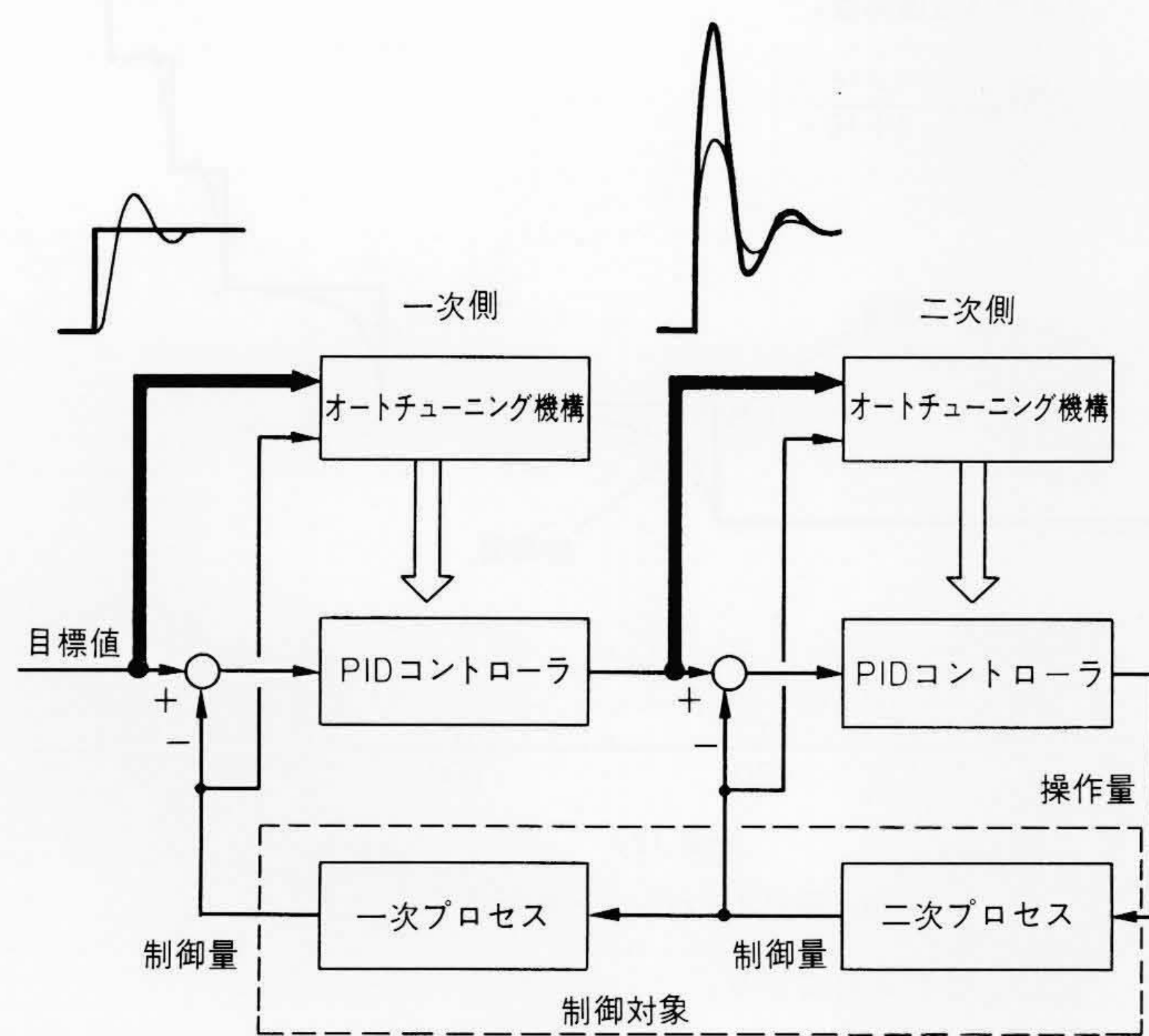


図8 カスケードコントローラ用オートチューニングシステム 各PIDコントローラごとに、オートチューニング機構を分散配置した構成をとっている。

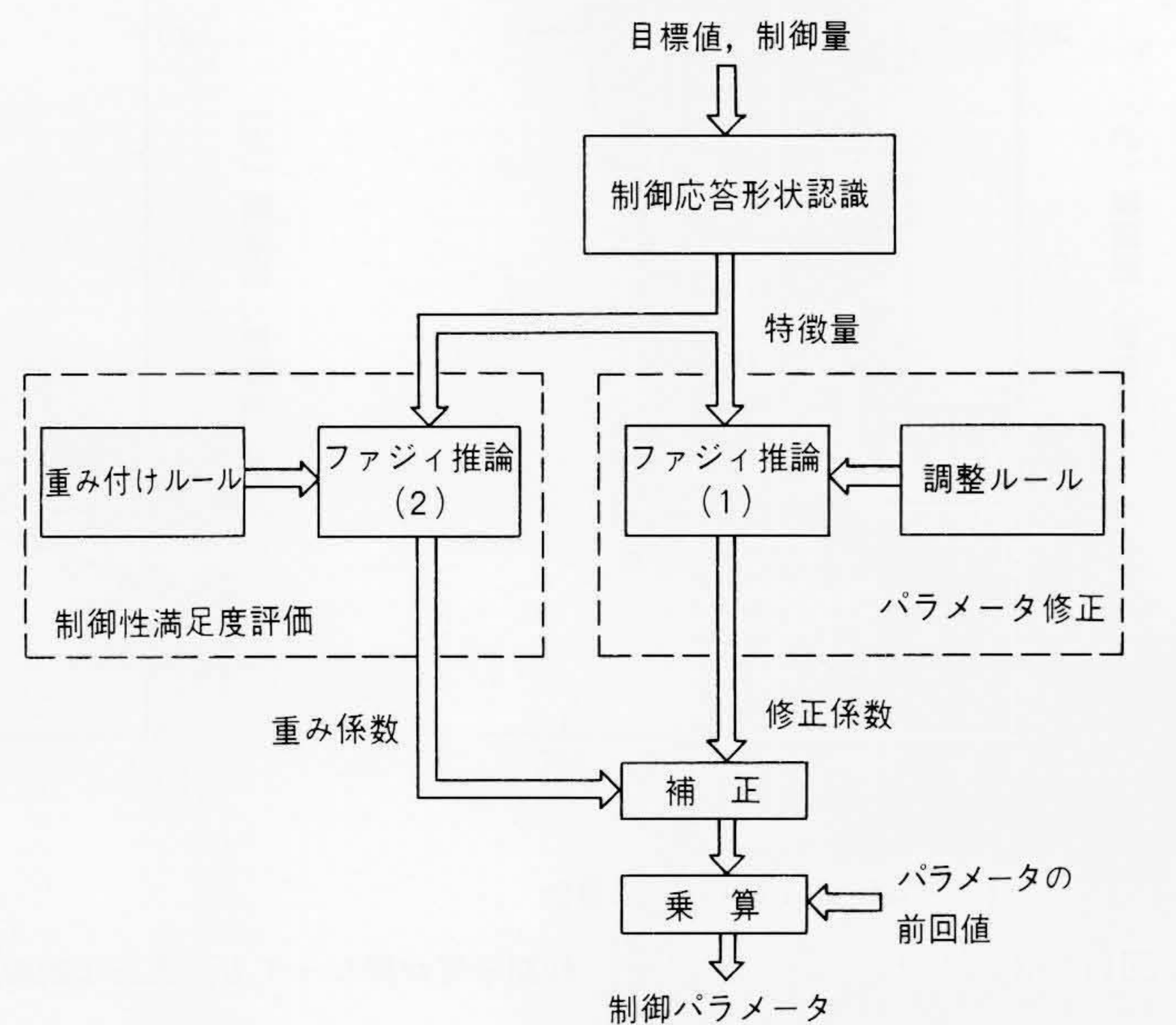


図9 カスケードコントローラ用オートチューニング機構の構成 制御性満足度評価機能によって、チューニングを安定に収束できる。

する機能，すなわち制御性満足度評価機能を追加した構成になっている。この機能は，図9，10に示すように応答波形の特徴量から制御性をファジィ推論によって評価し，制御性が良くなれば，制御パラメータの修正を抑制する機能である。これによりパラメータ調整の試行回数が減少するとともに，他のコントローラのパラメータ修正の影響を抑制できる。ただ利用する特徴量は，一次側と二次側で異なり，一次側は図6に示すものを利用するのに対して，二次側はこれらのうちからオーバーシュート量を除いたものを利用する。これは，一次側に対する目標値がステップ状に変化するのに対して，二次側に対する目標値はスパイク状に変化し，オーバーシュート量の抽出が非常に難しいためである。また，一次側に対しては，変動抑制性(オーバーシュート量)，安定性(減衰比)および速応性(整定時間)が制御性の評価項目であるが，二次側に対して

重み付けルール

オーバーシュート量が満足かつ
減衰比が満足かつ
制御面積比が満足

ならば 重み係数を小

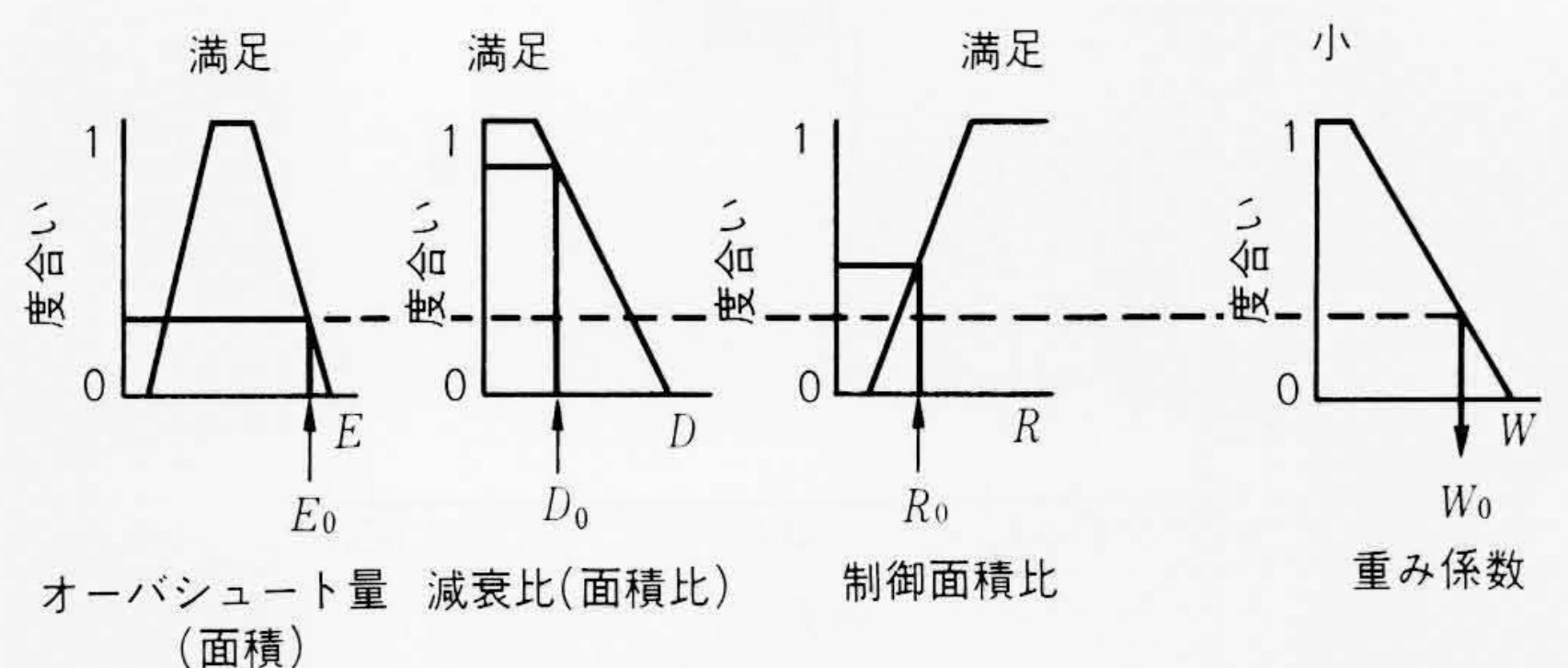


図10 ファジィ推論による重み係数の決定方法 特徴量の満足度から重み係数を求める。

は、安定性と速応性が重視されるためである。

4 オートチューニングシステムの評価

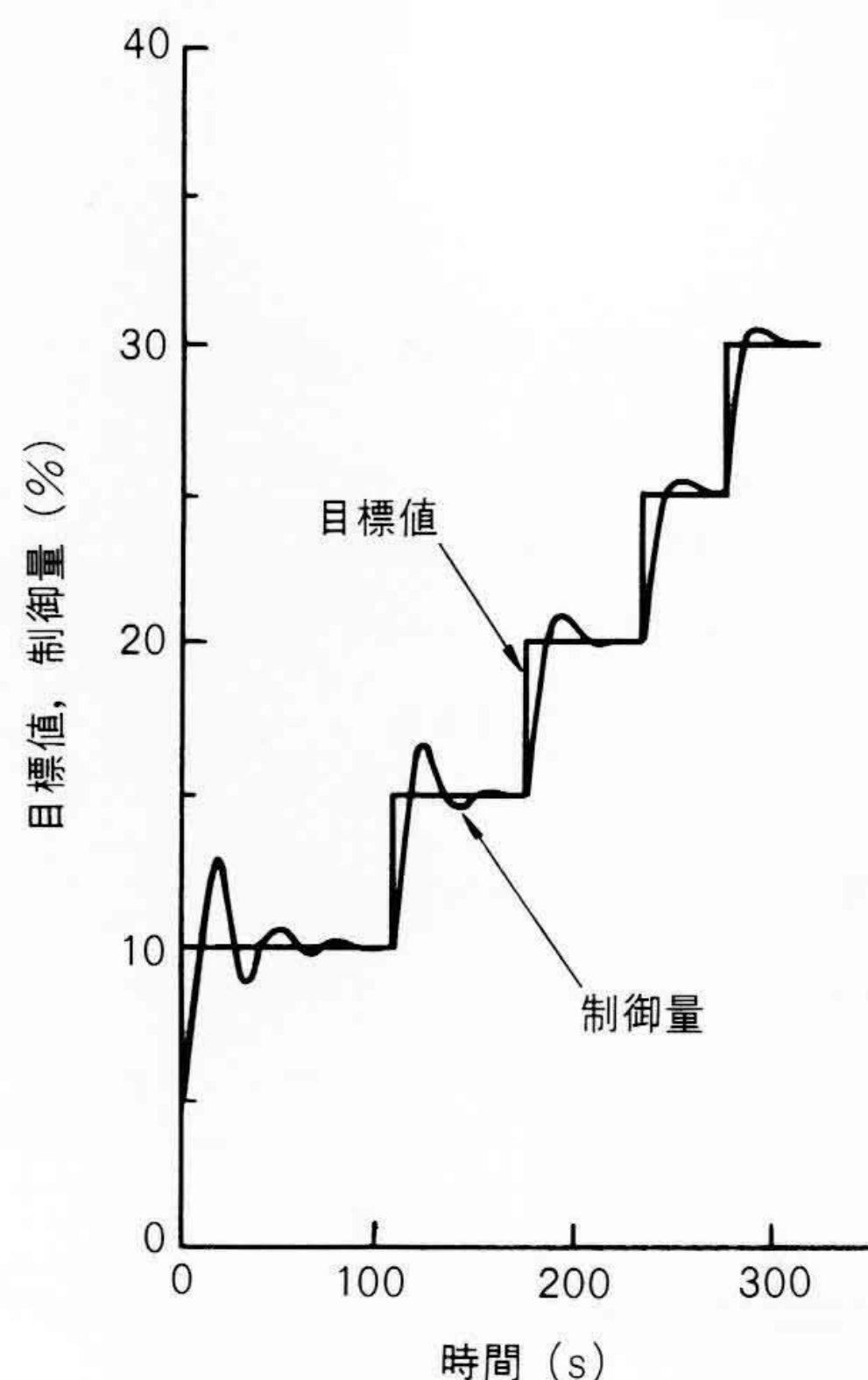
提案したオートチューニングシステムを、シミュレーションおよび実機試験によって評価した。本章では、これらの評価結果について述べる。

4.1 単ループコントローラ

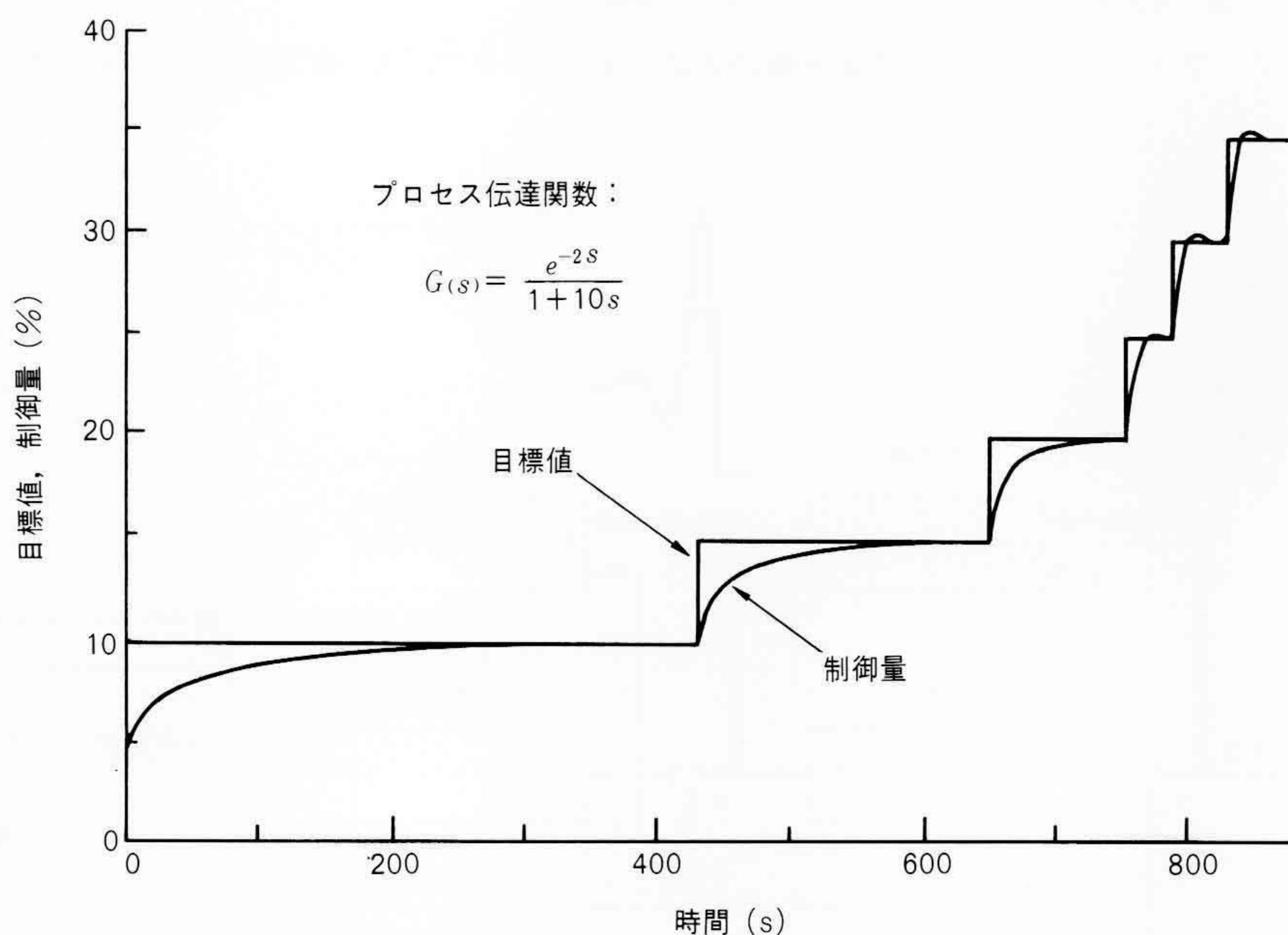
単ループコントローラ用オートチューニングシステムの

シミュレーション評価結果を図11に示す。同図(a)は、制御系の応答波形が振動ぎみの状態、また(b)は、オーバシュートのない状態から、それぞれ調整を開始したケースである。両ケースとも5回以内の修正によって望ましい制御応答(オーバシュート量5%, 最速応答)が得られている。

次に、制御量にノイズが加わっている場合のシミュレーション結果を図12に示す。この場合も、初期状態が振動ぎみやオーバシュートのない状態であっても、パラメータ修正によ

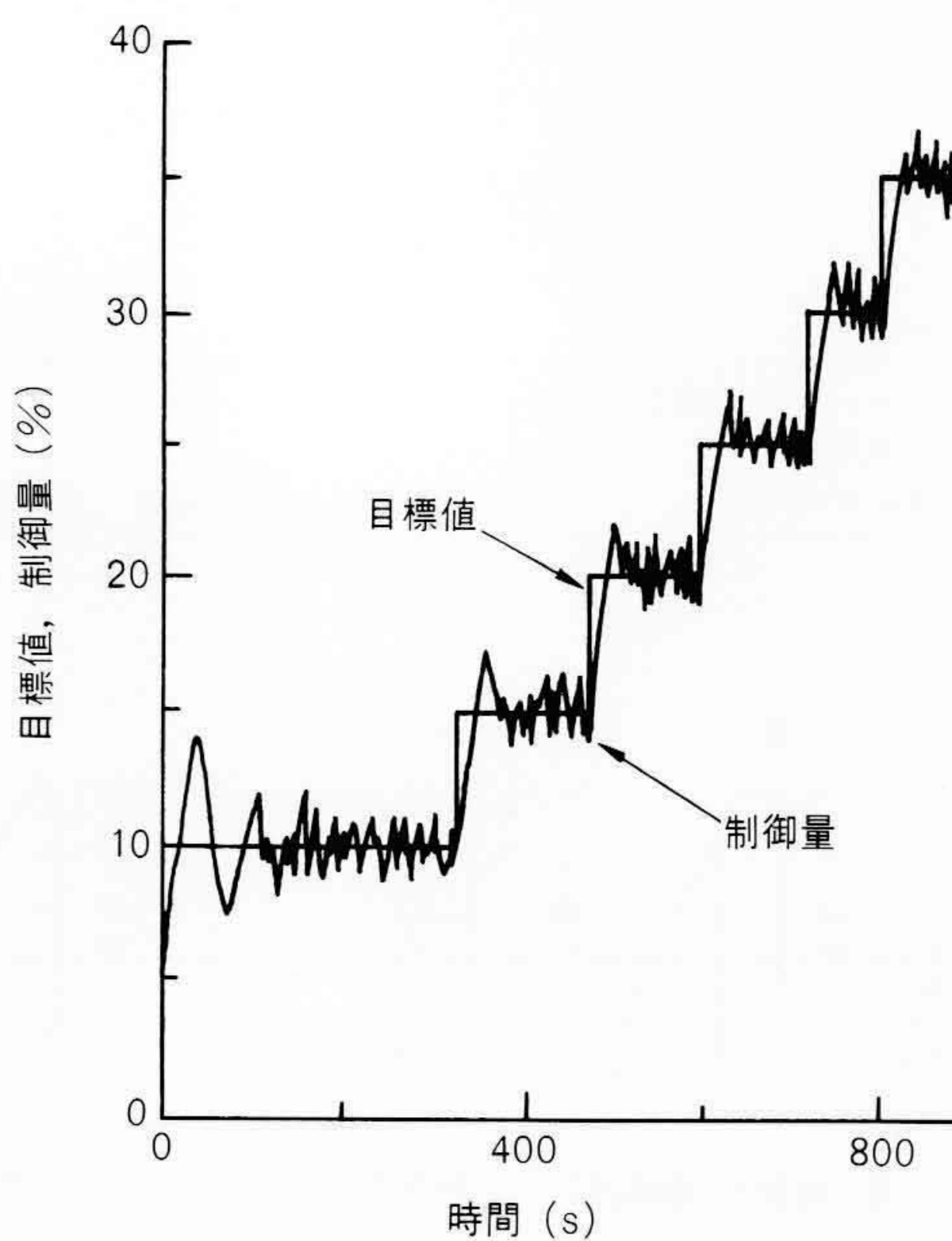


(a) 初期応答が振動ぎみの場合

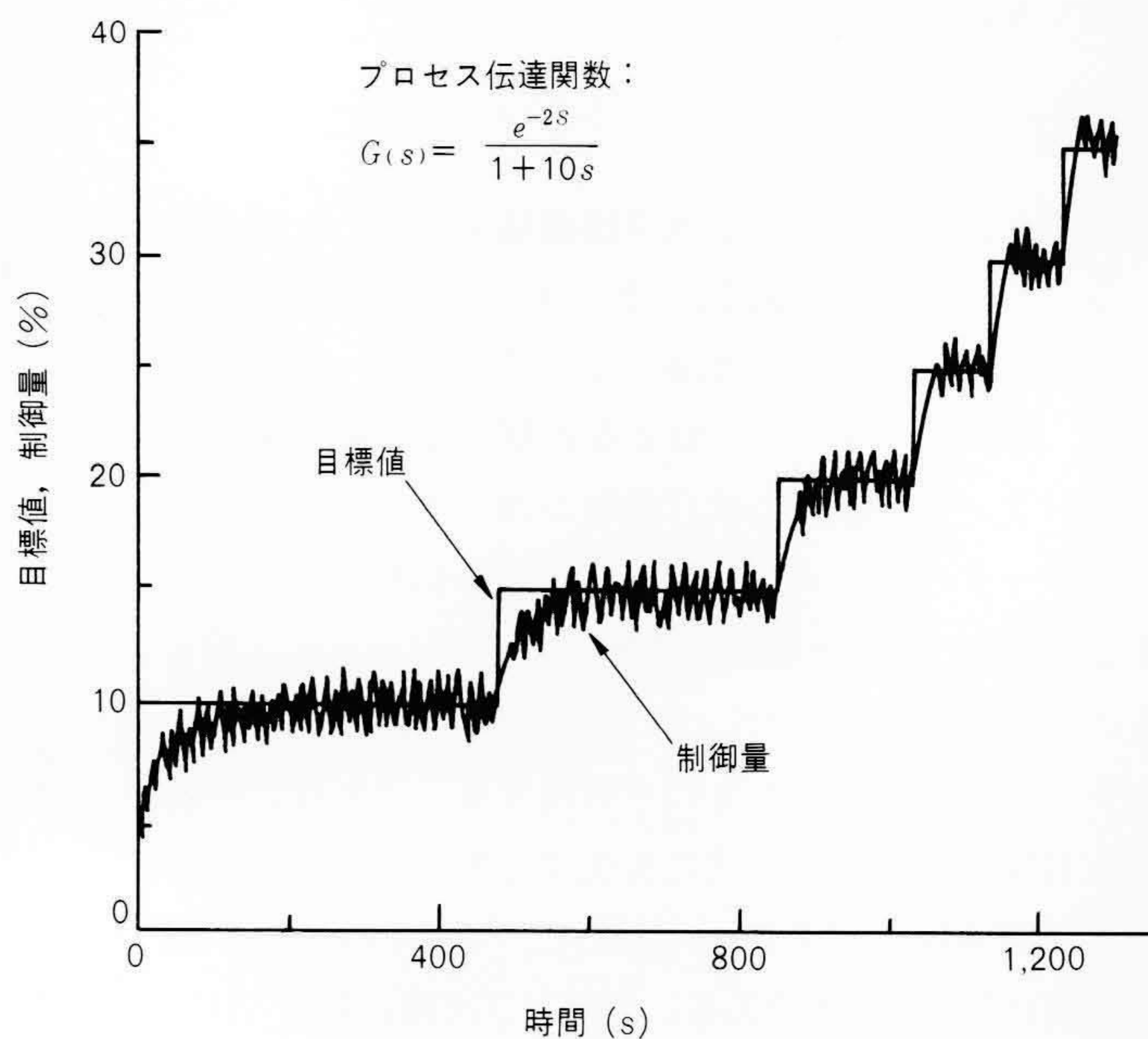


(b) 初期応答がオーバシュートなしの場合

図11 オートチューニング例 初期応答が異なっても、適正な制御応答にチューニングされている。



(a) 初期応答が振動ぎみの場合



(b) 初期応答がオーバシュートなしの場合

図12 オートチューニング例(制御量にノイズを含む場合) ノイズがあっても適正な制御応答にチューニングされている。

り適正な制御応答が得られている。

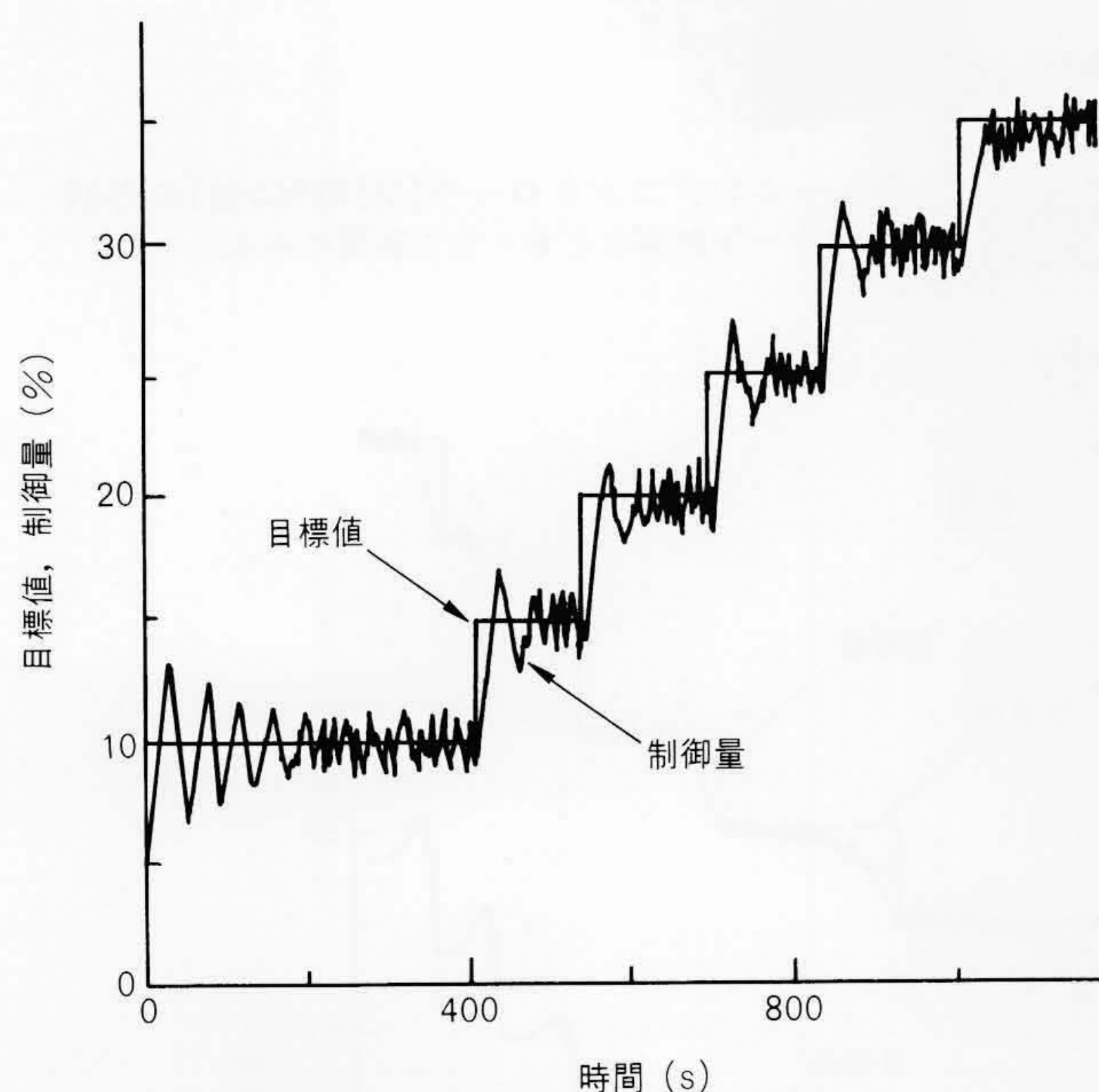
さらに、 L/T (むだ時間/時定数) 比が大きく、制御が難しいケースについてのシミュレーション結果を図13に示す。この場合も調整によって適正な制御応答が得られている。

また、実機に適用した例を図14に示す。この実機試験は、図15に示す装置構成で行った。この例でも、調整によって適正な制御応答が得られている。なお、この試験で用いたオー

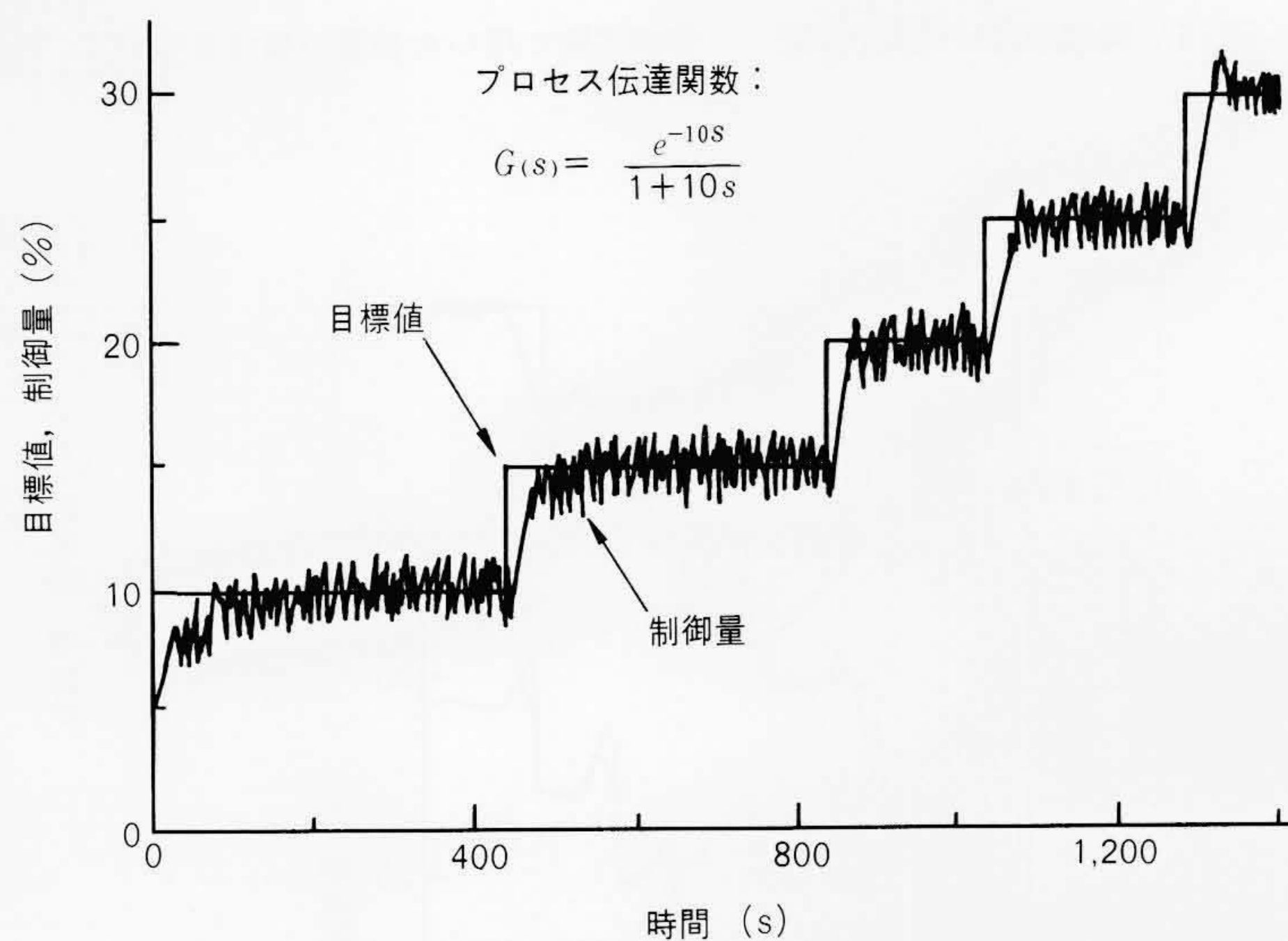
トチューニングコントローラの外観を図16に示す。

4.2 カスケードコントローラ

カスケードコントローラ用オートチューニングシステムのシミュレーション結果を図17に示す。同図からわかるように、一次側と二次側の干渉が制御性満足度評価機能によって抑制され、チューニングが適度な試行回数で収束し、適正な制御応答が得られている。

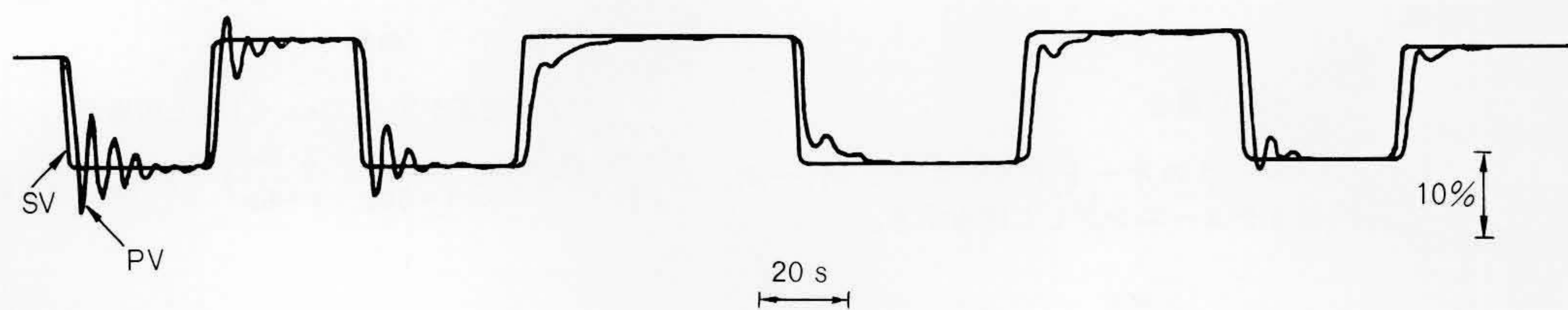


(a) 初期応答が振動ぎみの場合

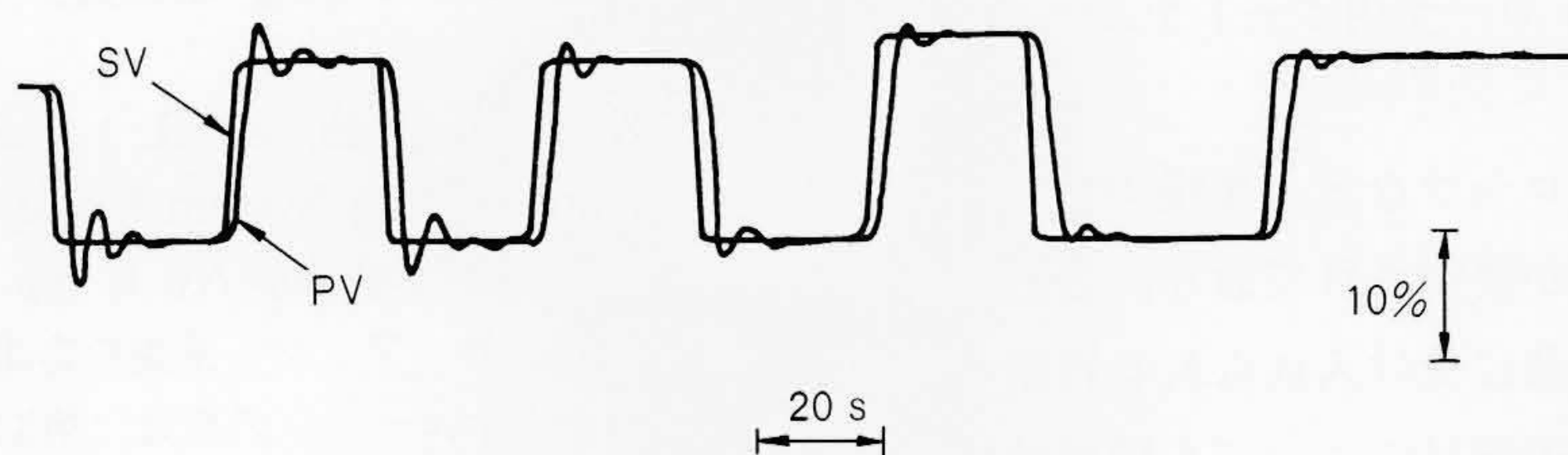


(b) 初期応答がオーバーシュートなしの場合

図13 オートチューニング例($L/T=1$ の場合) 比較的 L/T の大きいプロセスに対しても、適正な制御応答にチューニングされている。



(a) ケース I



(b) ケース II

図14 実機適用例 振動ぎみの初期応答が、適正な制御応答にチューニングされている。

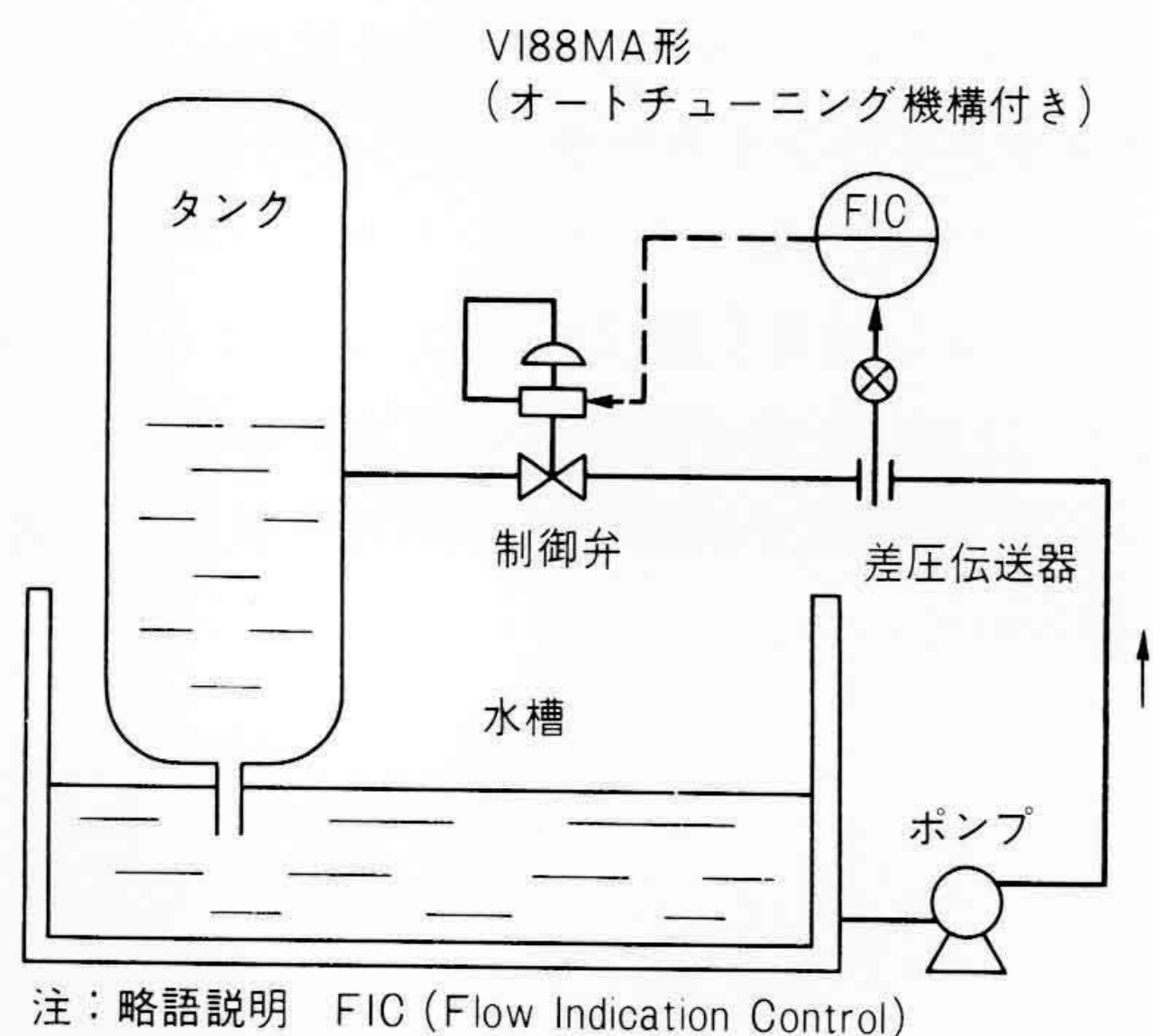


図15 実機試験の装置構成 実機試験に用いた装置の構成を示す。

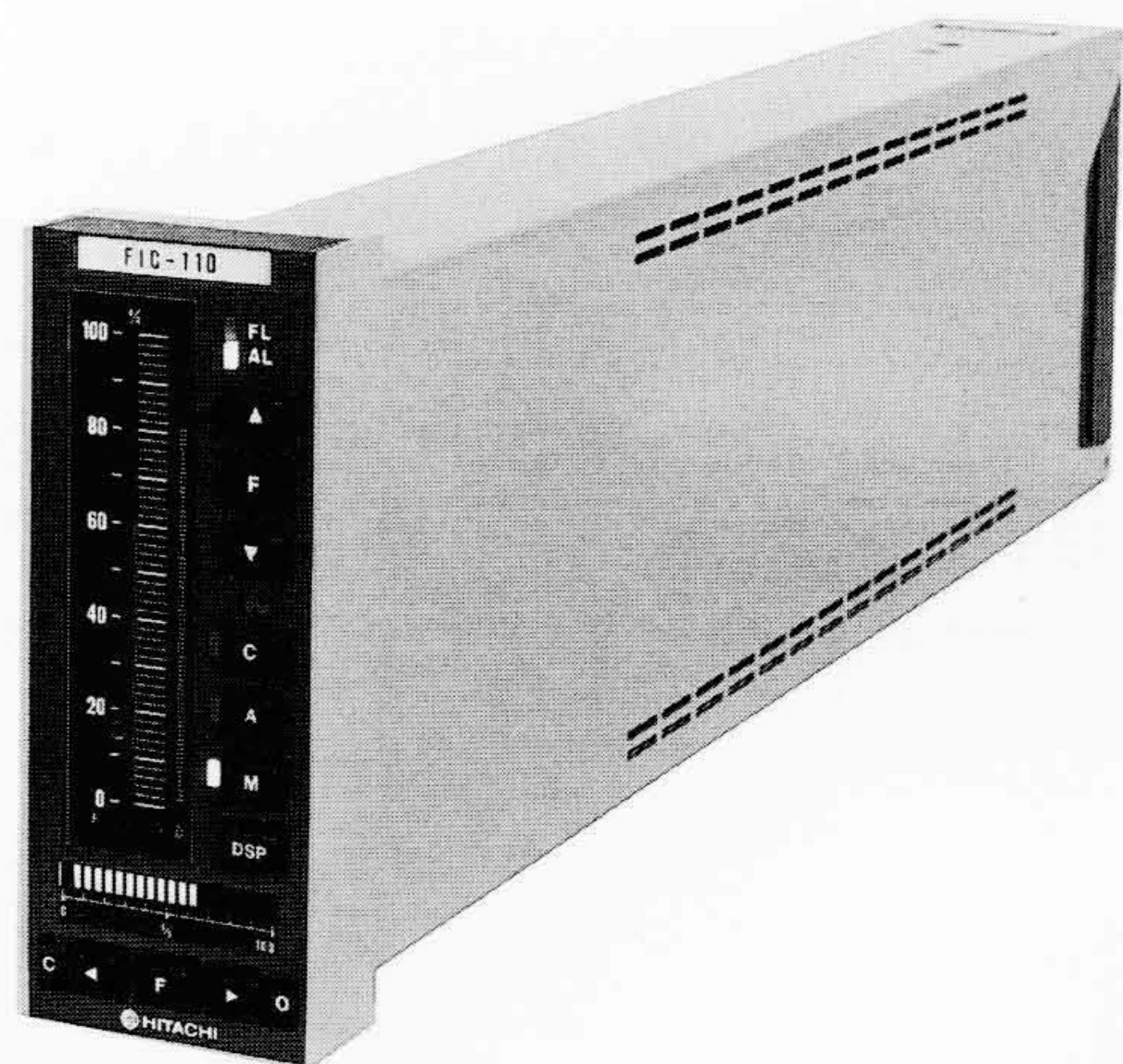
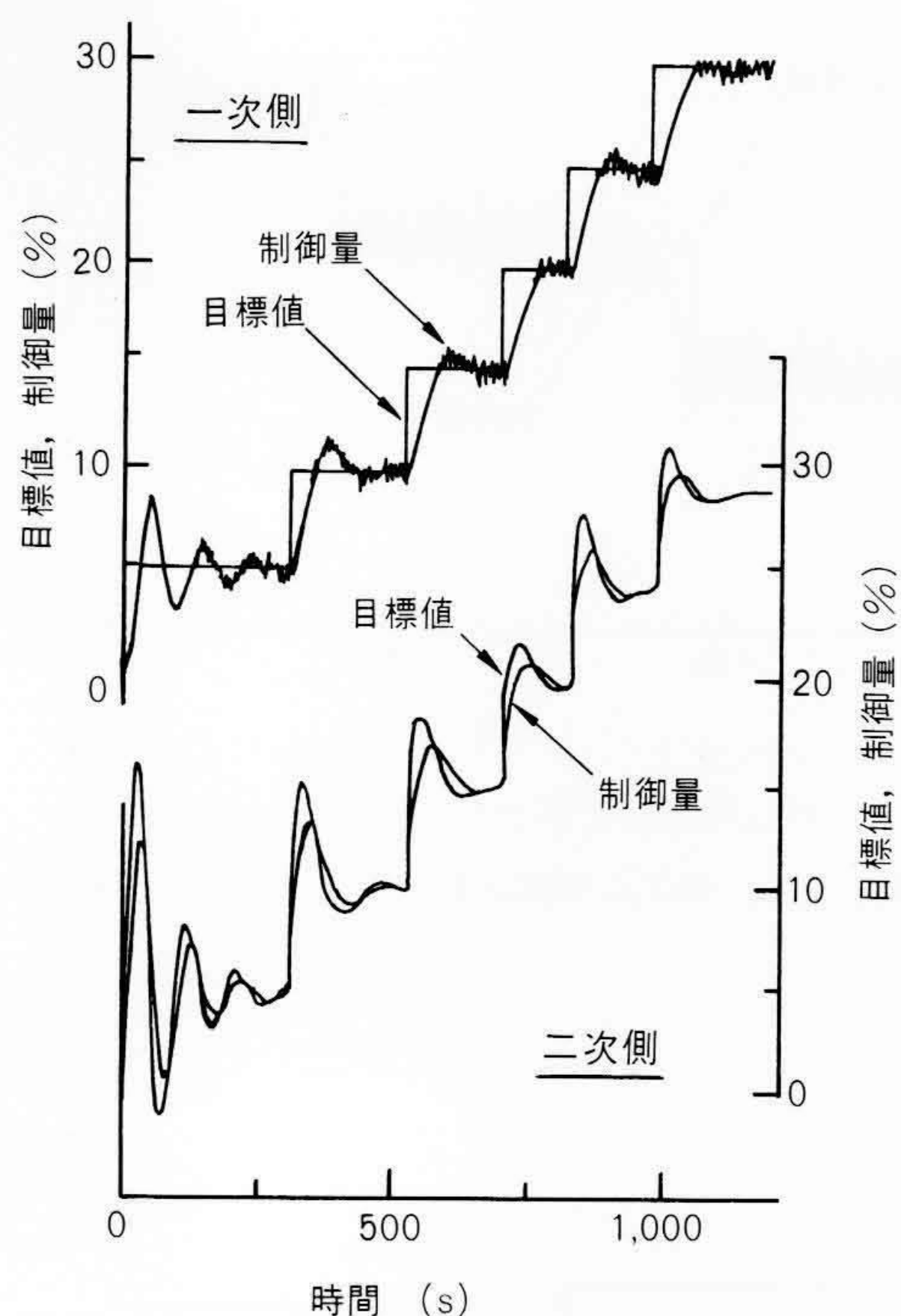
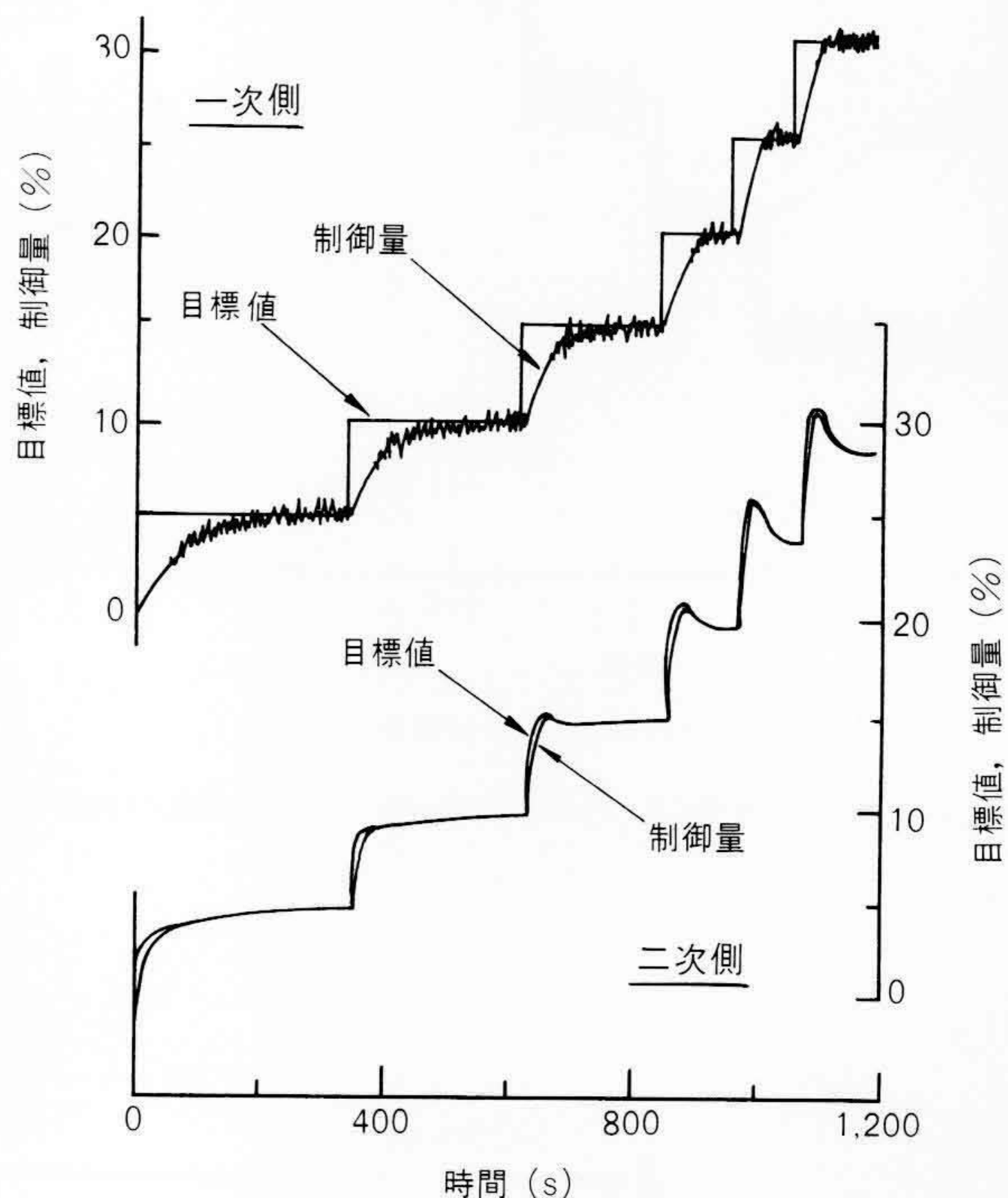


図16 オートチューニングコントローラ(VI88MA形)の外観 単一ループ、カスケード制御などを1台で実現できる。



(a) 初期応答が振動ぎみの場合



(b) 初期応答がオーバーシュートなしの場合

図17 カスケードコントローラのオートチューニング例(一次, 二次プロセス: $\frac{e^{-5s}}{1+30s}$, $\frac{e^{-2s}}{1+6s}$) 一次側目標値を変更して, 一次, 二次のPI値をチューニングした例を示す。

5 結 言

制御応答波形の特徴量からファジィ推論によって制御パラメータを決定する, PIDコントローラ用オートチューニングシステムについて紹介した。

今後, マルチループコントローラなど, 規模の大きいコントローラのチューニング技術が要望されており, この場合も使い勝手が良く, 運転員に容易に受け入れられる技術を開発する必要がある。このため, 運転員のニーズを積極的に取り入れ, 知識処理技術や多変数制御技術を組み合わせて対応していく考えである。

参考文献

- 1) 斎藤, 外: ファジィ推論を応用したPIDコントローラ用オートチューニング方式, 第13回システムシンポジウム, 65~69(昭62-11)
- 2) K. Tachibana, et al.: A Single Loop Controller with Auto-Tuning System Using the Expert Method, Hitachi Review, Vol.36, No.6, pp.357~362(1987-12)
- 3) 斎藤, 外: ファジィ推論を応用したカスケードコントローラ用オートチューニング方式, 第31回自動制御連合講演会, 545~546(昭63-10)
- 4) 安信, 外: Fuzzy制御の列車自動運転システムへの応用, 電気学会誌, Vol.104, No.10, 867~874(昭59-10)