

プロセス制御系設計用CADソフト(その19) —省エネを考慮に入れたPIDコントローラの調整—

CAD Software for Designing Process Control System —Tuning of PID Controller under Consideration of Energy Savings—

増淵 寿・黒須 茂・佐藤 隆太*

Hisasi MASUBUCHI・Shigeru KUROSU・Ryuta SATO*

1. はじめに

近年、世界規模の資源枯渇問題から省エネ対策がクローズアップされている。本研究では、1次おくれ+むだ時間系のプラントを取り上げ、PIDコントローラを採用したさいの種々の調整法による応答特性ならびに操作量に対する評価の比較検討を行っている。

2. 種々の調整方法

つぎに示す8種類の調整方法を比較検討する。

- (1) 限界感度法
- (2)～(5) 部分的モデルマッチング法
 - (2) オーバーシュート10%の参照モデル(目標値追従特性)
 - (3) オーバーシュート10%の参照モデル(外乱抑制特性)
 - (4) オーバーシュート0%の参照モデル(目標値追従特性)
 - (5) オーバーシュート0%の参照モデル(外乱抑制特性)
- (6)～(8) 最適化手法
 - (6) PID方式(目標値追従特性)
 - (7) I-PD方式(目標値追従特性)
 - (8) 外乱抑制特性

(1)の限界感度法¹⁾とは、制御系のインディシャ

ル応答が振幅減衰比 $\lambda=1/4$ の状態、すなわち25%減衰の応答を経験上最適と考え、半経験的に導いたものである。

部分的モデルマッチング法の場合、参照モデルによってさまざまな応答を得ることができる。本研究では、オーバーシュート10%のモデルとオーバーシュート0%のモデルを参照モデルとして使用している。また、PID方式の外乱から出力への伝達関数 y/d においてオーバーシュート0%の参照モデルを使用した場合に、微分ゲイン k_d が求まらないという問題が生じたため、オーバーシュート10%のモデルとオーバーシュート0%のモデルとの混合モデルを考案し、そのさいの重み係数を0.2としている。D動作を用いない場合にはこのような問題は生じないので、PI方式の場合にはオーバーシュート0%のモデルをそのまま使用する。

最適化手法の場合、ある評価関数を定義し、その評価関数が最小になるようにPIDゲインを探索する方法である。本研究では限界感度法によるPIDゲインを初期値に与え、つぎの偏差の2乗積分値

$$PI = \int_{L_p}^{100} (r-y)^2 dt \quad (1)$$

を最小にするようにPIDゲインを求める。最適化

* 平成10年度機械工学科卒業生(現 岩手大学)

手法を行うさいの終端時刻は長いほどよいが、ここでは100(min)とする。

3. 制御方式

Fig.1に示す2つの制御方式を比較検討する。

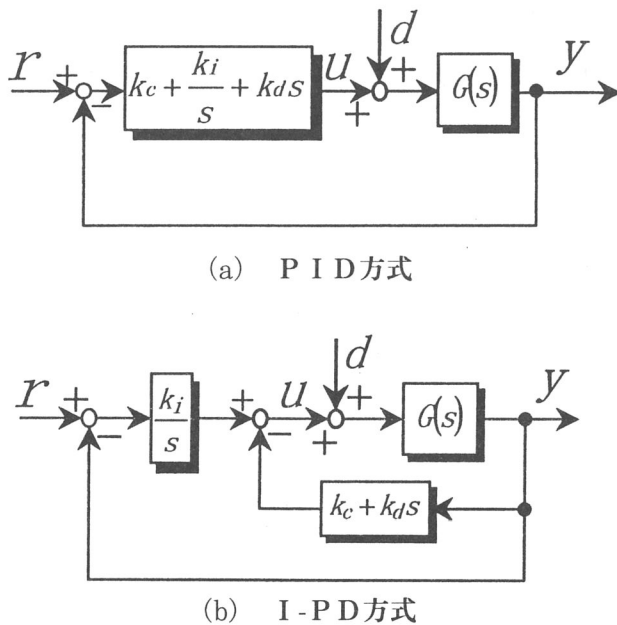


Fig.1 P I D方式とI-P D方式

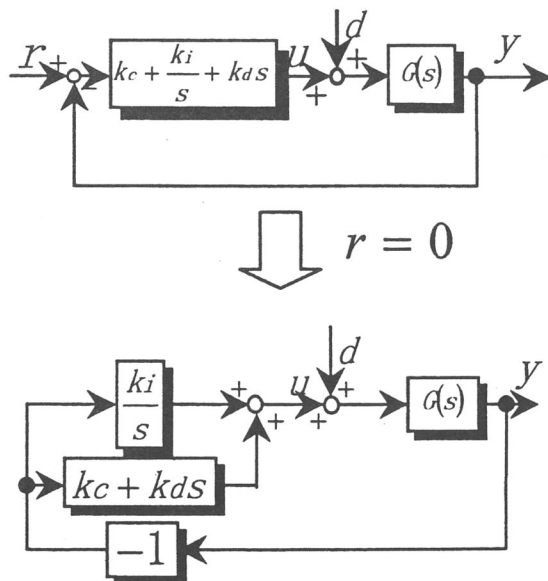


Fig.2 外乱に対する閉ループ系

一般に、プロセス制御系における主たる制御目的は外乱抑制である。そのようなことから、目標値 r が変化した場合におけるアクチュエータへの負担を軽減する観点から、目標値追従特性を緩やかにすることが求められ、I-PD方式が提案された。また、外乱 d から出力 y への閉ループ系伝達関数 y/d は、PID方式でもI-PD方式でも差異はないことを、Fig.2のブロック線図を用いて証明できる。

4. プラントの伝達関数

プロセス制御系は高次おくれ系で表現されるが、1次おくれ+むだ時間系で近似することが一般的である。本研究では、さまざまなPIDコントローラの調整方法を容易に比較できる例として、つぎに示す1次おくれ+むだ時間系を採用する。

$$G(s) = \frac{e^{-L_p s}}{T_p s + 1} \quad T_p = 10(\text{min}), L_p = 1(\text{min}) \quad (2)$$

5. 評価関数

PIDコントローラの調整方法を、定量的に比較検討するために、本研究では、つぎの式(3)に示す4つの評価関数を導入する。

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \int_0^{20} (r-y)^2 dt \\ J_{2.1} &= \int_0^{20} u dt \\ J_{2.2} &= \int_0^{20} (u-u_0)^2 dt \\ J_3 &= \int_0^{20} \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 u_0 とは r に対する操作量の定常値である。一般的には、操作量に対する評価関数、 $J_{2.1}, J_{2.2}, J_3$ が小さいもののほうが、使用するエネルギーは小さくて済むと考えられる。また、 J_1 は誤差の二乗積分値(ISE)であるから目標値の変化に対する追従特性、または外乱抑制特性を表しており、 J_1 が少ないほど目標値に速く追従し、外乱がうまく抑制されていることを示す。

6. PIDゲイン

6.1 PID方式

PID方式において、それぞれの調整方法により計算されたPIDゲインをTable 1に示す。

Table 1 PIDゲイン

方法	k_c	k_i	k_d
(1)	9.77	5.06	4.72
(2)	7.43	0.72	2.24
(3)	10.52	4.66	3.23
(4)	4.23	0.42	0.45
(5)	7.03	1.95	2.37
(6)	10.27	0.83	5.01
(7)	15.19	9.43	7.44
(8)	13.43	10.05	8.18

これより最適化手法の(7),(8)が、極端に各ゲインが大きいことがわかる。また、PID方式において目標値追従特性に対して各ゲインを求めた方法(2),(4),(6)は積分ゲインが必ず1以下になっていることに注意しよう、このことから、PID方式における目標値追従特性については、 k_i を殺し、PD動作によって応答を改良しようとしていることがわかる。

6.2 PI方式

PI方式において、それぞれの調整方法により算出されたPIゲインをTable 2に示す。

Table 2 PIゲイン

方法	k_c	k_i
(1)	7.33	2.28
(2)	5.03	0.50
(3)	5.89	2.16
(4)	3.73	0.37
(5)	4.10	0.89
(6)	7.71	0.50
(7)	9.94	4.02
(8)	11.31	2.84

Table 1とTable 2を比較すると、PI方式の各ゲインの値が小さいことに注意しよう。また、PI方式において目標値追従特性に対してゲインを求める方法(2),(4),(6)は、D動作を使わない場合でも積分ゲイン k_i は1以下である。

7. 制御成績と応答特性

種々の調整方法により求められたPIDゲインを用いて目標値追従特性、外乱抑制特性についてのシミュレーションを行い、評価関数を求め、種々の調整方法と制御方式の比較検討を行う。

7.1 PID方式とI-PD方式

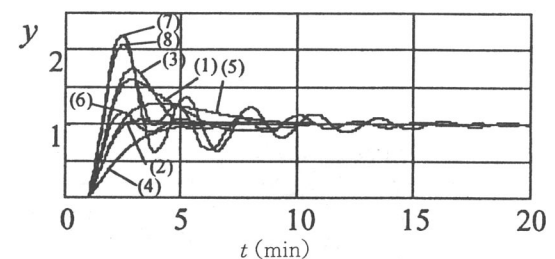
(1) PID方式

PID方式において、それぞれの調整方法により求められたPIDゲインを使用し、目標値追従特性についてのシミュレーションを行った。その制御成績と目標値追従特性をTable 3とFig. 3に示す。

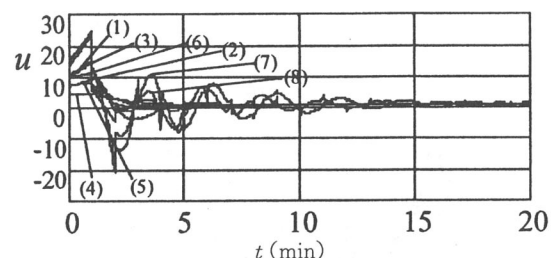
Table 3 PID方式の制御成績

方法	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3	ω
(1)	1.95	30.8	171	2955	17.0
(2)	1.46	29.6	57.9	335	5.75
(3)	2.04	30.8	213	1546	7.22
(4)	1.85	28.6	22.3	8.05	0.36
(5)	1.68	30.5	72.2	333	4.59
(6)	1.35	29.8	109	3788	34.3
(7)	2.85	30.8	767	32281	39.5
(8)	2.49	30.9	530	39677	71.6

ここで、 $\omega = J_3/J_{2.2}$ である。



(a) 出力



(b) 操作量

Fig.3 目標値追従特性($r=1, d=0$)

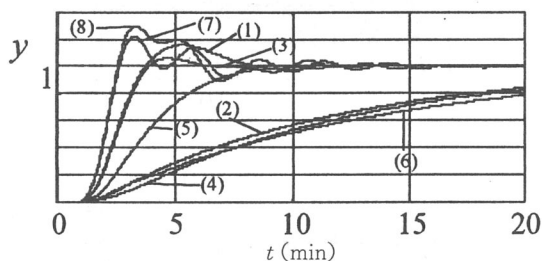
Table 3によると、偏差の2乗積分値 J_1 が最も少

なく、目標値に対する追従性が最もよいのは、最適化手法の(6)である。偏差の2乗積分値が最小になるように各ゲインを求めたのだから、当然の結果といえる。

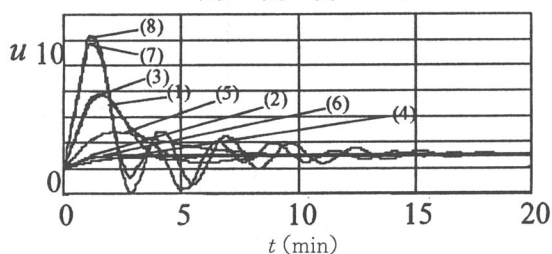
評価関数 $J_{2.1}$ をみると、調整方法による大きな違いはないことに注意しよう。これは、操作量の定常値(例えば、空気調和装置などを考えた場合、流れる空気量)は、応答特性に関係なくほぼ一定であることを示していると考えられる。次に Fig.3 の目標値追従特性をみると、PID方式において外乱抑制特性に対して各ゲインを求めた方法(8)は、応答特性が非常に振動的なものにもかかわらず、 $J_{2.1}$ に他の調整方法との大きな違いは見られない。しかしながら、操作量の変動を示す評価関数 $J_{2.2}$ 、 J_3 をみると、振動的な応答を示している調整方法ほど、その値が大きいことがわかる。

Table 4 I-PD方式の制御成績

方法	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3	ω
(1)	2.18	28.9	36.4	36.5	1.00
(2)	6.57	19.3	0.47	0.64	1.36
(3)	2.18	28.5	32.5	35.7	1.10
(4)	7.26	18.5	0.86	0.31	0.36
(5)	3.10	26.9	8.89	5.13	0.58
(6)	7.25	17.8	0.58	0.79	1.36
(7)	1.86	29.2	90.5	260	2.87
(8)	1.93	29.6	96.3	242	2.51



(a) 出力



(b) 操作量

Fig.4 目標値追従特性 ($r=1, d=0$)

(2) I-PD方式

Table 4 と Fig.4 は Table 1 のPIDゲインをI-PD方式において使用し、目標値追従特性のシミュレーションを実施したものである。PID方式において目標値追従特性に対してPIDゲインを求めた方法(2),(4),(6)は、I-PD方式における目標値追従特性が非常に援慢である。よって、PID方式において目標値追従特性に対して求められたPIDゲインをI-PD方式において使用するべきではない。

$J_{2.1}$ が20(単位ステップ関数の面積)ならば、それはステップ入力そのものであるが、Table 4によると、方法(2),(4),(6)は $J_{2.1}$ が20以下であることがわかる。また、Fig.4(b)からも同じことがいえる。

PID方式の目標値追従特性 (Fig.3) においてオーバーシュートの大きい方法(1),(3),(7),(8)は、I-PD方式の目標値追従特性 (Fig.4) において、オーバーシュートが小さい。これから、I-PD方式には目標値の変化に対してオーバーシュートを抑える働きがあることがわかる。

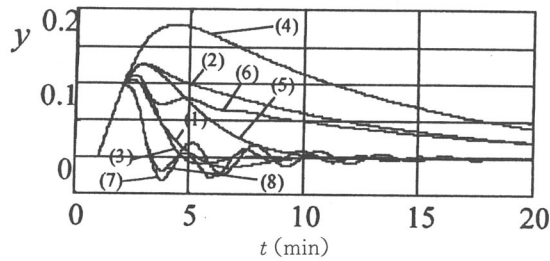
また、PID方式の操作量 Fig.3(b) と、Fig.4(b) を比較すると、I-PD方式の方がPID方式に比べて操作量が少ないことがわかる。よって、省エネを考慮した場合には、PID方式よりもI-PD方式のほうが優れているといえる。

(3) 外乱抑制特性

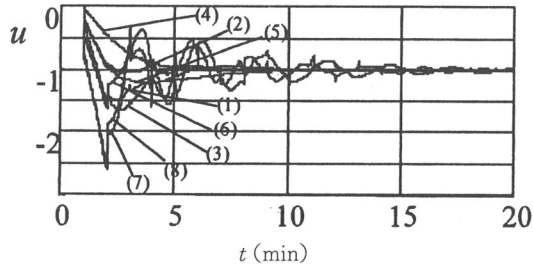
外乱に対する閉ループ系伝達関数が、PID方式とI-PD方式で全く同じであることは、前に述べたとおりである。外乱抑制特性を Table 5 と Fig.5 に示す。

Table 5 外乱に対する制御成績

方法	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3	ω
(1)	0.02	-19.8	1.44	31.0	36.8
(2)	0.09	-18.6	1.24	6.15	8.93
(3)	0.02	-19.8	1.65	14.0	16.4
(4)	0.24	-17.6	1.77	0.53	0.73
(5)	0.04	-19.5	1.36	6.88	9.63
(6)	0.06	-18.8	1.16	36.0	54.4
(7)	0.01	-19.9	2.93	139	80.4
(8)	0.01	-19.9	2.40	218	154



(a) 出力



(b) 操作量

Fig.5 外乱抑制特性($r=0, d=1$)

PID方式において目標値追従特性に対してゲインを求めた方法(2),(4),(6)は, Fig.5から明らかなように応答が極めて緩慢であり, 評価関数 J_1 も大きい. このように, PID方式において, 目標値追従特性に対してゲインを求めた場合, 目標値に対する追従性は非常によいものの, 外乱に対しては非常に弱い制御系になってしまう. また逆に, 外乱抑制特性に対してゲインを求めた場合, 外乱抑制特性は改善されるものの, 目標値が変化した場合に, 応答特性が振動的になってしまう.

このようなことから, プロセス制御系のような, 外乱抑制を主な目的とする制御系においては, PID方式よりもI-PD方式を用いるべきである.

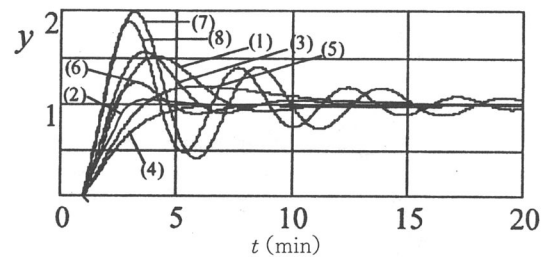
制御成績において, 評価関数 J_1 が小さいと同時に, $J_{2.2}$, J_3 も小さいのは, 限界感度法の(1)と, 部分的モデルマッチング法の(3)であろう. また, もし $J_{2.1}$ が-20であるならば, J_1 は0である. Table5によると, $J_{2.1}$ が-20に近いほど J_1 が少なくなることがわかる.

7.2 PI方式とI-P方式

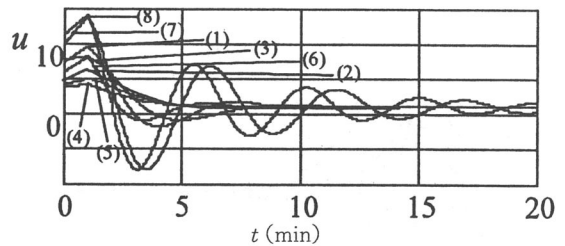
(1) PI方式

Table 6 PI方式の制御成績

方法	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3	ω
(1)	2.00	30.6	120	63.2	0.53
(2)	1.69	29.0	33.3	8.71	0.26
(3)	2.11	30.5	90.0	31.6	0.35
(4)	1.97	38.3	18.3	2.70	0.15
(5)	1.93	29.9	32.2	4.84	0.15
(6)	1.52	29.1	76.7	47.8	0.62
(7)	3.50	30.6	395	416	1.05
(8)	2.88	30.7	383	492	1.28



(a) 出力



(b) 操作量

Fig.6 目標値追従特性($r=1, d=0$)

Table 6 と Fig.6 は, PI方式によるシミュレーションの結果である. PID方式によるシミュレーション結果(Fig.3)と比較すると, Fig.6は目標値に達するまでの時間が遅くなり, オーバーシュートも大きくなっている. これより, D動作には振動を抑え, 整定時間を短くする働きがあることがわかる.

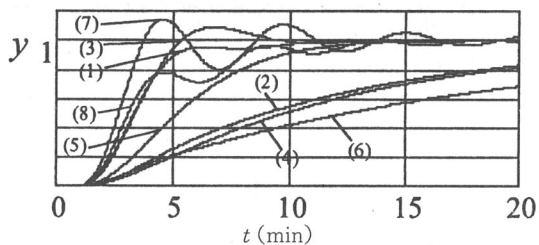
ω は, 操作量の2乗積分値 $J_{2.2}$ に対する操作量の微分の2乗積分値 J_3 の相対比である. PID方式のTable 3とPI方式のTable 6を操作量について比較すると, PI方式のほうが操作量の2乗積分値 $J_{2.2}$ 操作量の微分の2乗積分値 J_3 ともにPID方式よりも少ない. このことから, 省エネを考慮した場合には, 目標値追従特性においてD動作は使わないほうがよいと言える.

(2) I-P方式

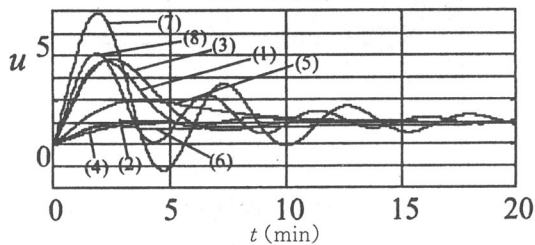
Table 2のPIゲインをI-P方式において使用した場合の制御成績と目標値追従特性をTable 7とFig.7に示す。

Table 7 I-P方式の制御成績

方法	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3	ω
(1)	2.76	27.3	15.4	10.4	1.87
(2)	6.88	18.9	0.69	0.42	1.76
(3)	2.79	27.8	19.2	9.85	1.41
(4)	7.48	18.2	0.98	0.27	0.77
(5)	4.17	25.3	4.31	1.53	0.99
(6)	8.59	15.4	1.46	0.38	0.66
(7)	2.35	28.4	50.4	56.6	3.14
(8)	2.80	26.6	17.3	23.2	3.75



(a) 出力



(b) 操作量

Fig.7 目標値追従特性($r=1, d=0$)

PI方式よりも、I-P方式の方が評価関数 $J_{2.2}$ 、 J_3 ともに小さいことがわかる。以上のことから考えると、目標値追従特性において最も省エネに貢献できる制御方式はI-P方式であるといえる。

また、部分的モデルマッチング法の(5)は、応答の速い集団方法(1),(3),(7),(8)と、応答の緩慢な集団である方法(2),(4),(6)の中間に位置した応答を示している。

(3) 外乱抑制特性

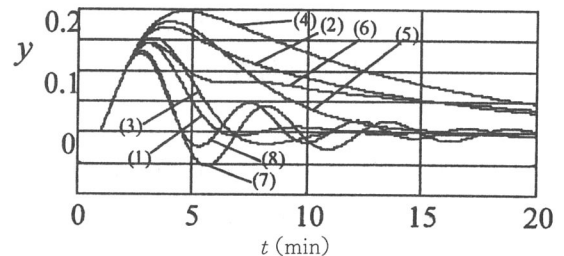
Table 8とFig.8は外乱抑制特性(PI方式とI-P方式では外乱抑制特性は同じ)である。PID、I-P方式のTable 5とFig.5と比較すると、PI、I-P方

式は評価関数 J_1 と $J_{2.2}$ が大きいものの、 J_3 は小さい。

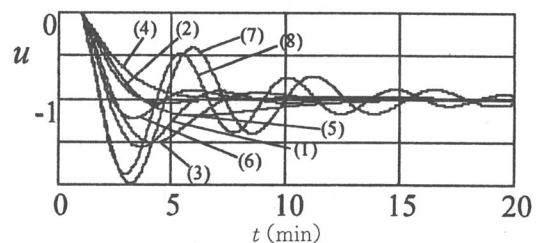
PI、I-P方式において、評価関数 J_1 が小さいと同時に $J_{2.2}$ 、 J_3 も小さいのは、限界感度法の(1)と部分的モデルマッチング法の(3)である。

Table 8 外乱に対する制御成績

方法	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3	ω
(1)	0.05	-19.6	2.01	1.29	0.64
(2)	0.18	-18.0	1.70	0.43	0.25
(3)	0.06	-19.5	2.12	0.99	0.47
(4)	0.30	-17.3	1.98	0.27	0.14
(5)	0.14	-18.9	1.94	0.41	0.21
(6)	0.12	-18.2	1.53	0.86	0.56
(7)	0.04	-19.8	3.51	4.03	1.15
(8)	0.03	-19.6	2.89	3.91	1.35



(a) 出力



(b) 操作量

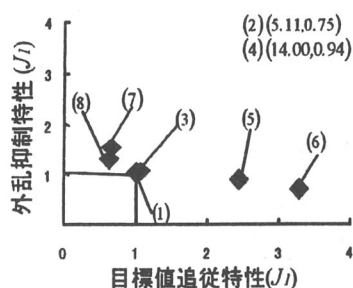
Fig.8 外乱抑制特性($r=0, d=1$)

8. 限界感度法を基準とした評価

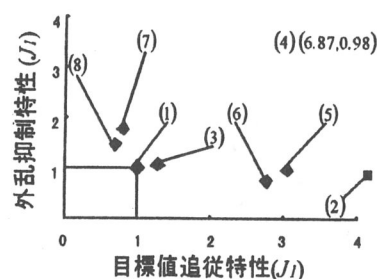
PIDコントローラの調整法の中で、依然信頼性の高い限界感度法の評価関数値を基準に、種々の調整法を比較検討する。

8.1 J_1 による評価

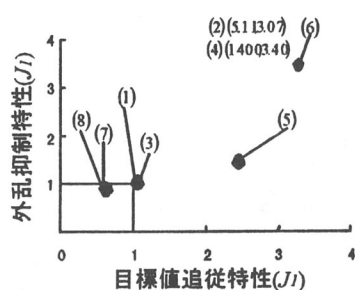
限界感度法の評価関数を1とした場合の、それぞれの調整方法における J_1 を、Fig.9に示す。ここで、Y軸を外乱抑制特性における J_1 、X軸を目標値追従特性における J_1 とした。評価関数値が大きく、このグラフに表示できない点は欄外に示している。この結果



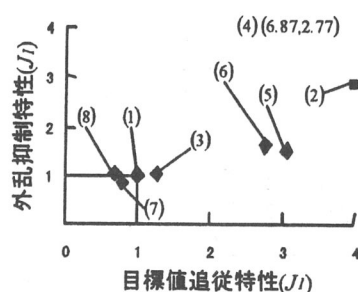
(a) P I D方式



(b) P I方式



(c) I - P D方式



(d) I - P方式

Fig.9 J_1 による評価

より、つぎのことがわかる。

1) P I D, P I 方式では、目標値追従特性において評価関数 J_1 が小さいものは、外乱抑制特性において評価関数 J_1 が大きい。しかし、I - P D, I - P 方式では、目標値追従特性において評価関数 J_1 が小さいものは、外乱抑制特性においても評価関数 J_1 が小さいことがわかる。

2) 限界感度法の(1)と、部分的モデルマッチング法の(3)は、ほぼ同じような制御成績を示している。

3) 最適化手法の(7),(8)は、目標値追従特性においても外乱抑制特性においても評価関数 J_1 が小さい。

4) 方法(2),(4)は、P I D, P I 方式における目標値追従特性に対する J_1 は極めて小さいが、外乱抑制特性における J_1 が極端に大きい。(Fig.9の欄外の数値はX軸、Y軸の値が逆である)

8.2 $J_{2.2}$ J_3 による評価

種々の調整方法における、評価関数 J_3 と $J_{2.2}$ の関係をFig.10とFig.11に示す。Fig.10は目標値追従特性、

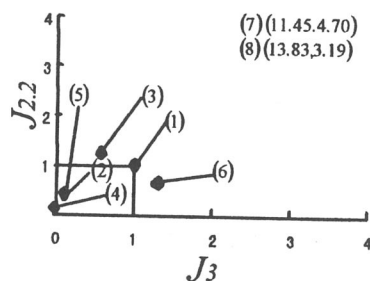
Fig.11は外乱抑制特性におけるものである。

目標値追従特性のFig.10と外乱抑制特性のFig.11を比較すると、Fig.10では一般に評価関数 J_3 が小さいものは $J_{2.2}$ も小さいのに対して、外乱抑制特性のFig.11では、評価関数 $J_{2.2}$ の大きさがほぼ一定であることが興味深い。

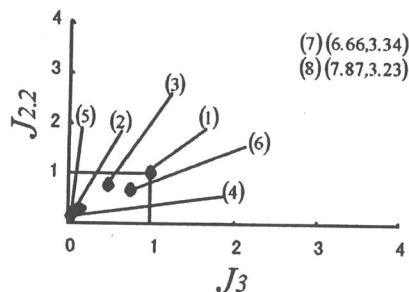
Fig.10において、評価関数 J_3 と $J_{2.2}$ が小さいのは、方法(2),(4),(5),(6)である。しかし、Fig.9をみると、これらの方法(2),(4),(5),(6)は、評価関数 J_1 が大きいことがわかる。また、Fig.11において J_3 が小さいのは、方法(2),(4),(5)である。

最適化手法の(7)と(8)は、 $J_{2.2}$ J_3 とともに非常に大きく、省エネの観点からみるとよい調整方法ではない。すべての評価関数が平均的に小さいのは、方法(1)と(3)であろう。また、方法(5)も比較的よい制御成績を示している。

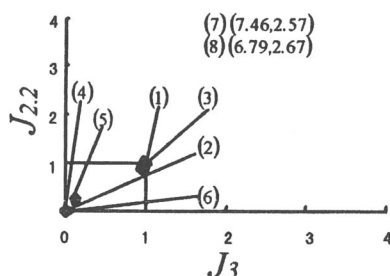
(1) 目標値追従特性



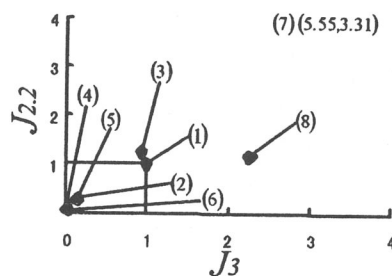
(a) P I D方式



(b) P I方式



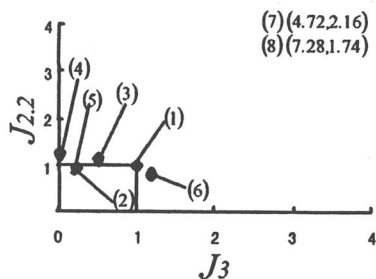
(c) I - P D方式



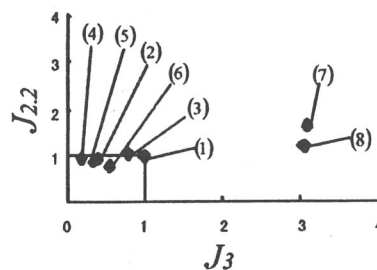
(d) I - P方式

Fig.10 $J_{2.2}$ J_3 による評価

(2) 外乱抑制特性



(a) PID, I-PD方式



(b) PI, I-P方式

Fig.11 $J_{2.2}$ J_3 による評価

9. おわりに

以上の結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) P I, I-P方式は, P I D, I-P D方式よりも操作量の2乗積分値 $J_{2.2}$ 操作量の微分の2乗積分値 J_3

ともに小さい。よって、操作量の観点からみると、目標値追従特性においてP I, I-P方式の方が優れている。

(2)外乱抑制特性に対して求めたゲインを使用した場合において、目標値が変化するとP I D, P I方

式では、オーバーシュートが大きくなるが、I-PD、I-P方式ではそのようなことはない。また、 $J_{2.2}$ 、 J_3 ともにI-PD、I-P方式の方が少ない。よって、I-PD、I-P方式の方が実用的である。

(3)調整方法としては、限界感度法の(1)と部分的モデルマッチング法の(3)が、 $J_{2.2}$ と J_3 ともに小さく、 J_1 も小さい。また、さらに省エネを考慮して操作量を小さくしたければ、部分的マッチング法の(5)も有効であろう。

(4) 最適化手法は $J_{2.2}$ と J_3 ともに非常に大きく、操作量の観点からみてよい調整法ではない。しかしながら、最適化手法を行うときの評価関数式(3)の J_1 に $J_{2.2}$ 又は J_3 を付け加えることにより、 $J_{2.2}$ 又は J_3 も少なくすることができる(附録参照)。

(5)限界感度法は、古典的なPIDコントローラの調整方法であるが、比較的よい制御成績を示している。

参考文献

- 1) 黒須；制御工学入門，パワー社
- 2) 渡利，長浜ほか；多変数系における部分的モデルマッチング法の適用，小山高専紀要No32(1999)

附録

最適化手法によるPIDゲインの最適調整

最適化手法を行うさいの評価関数に、操作量に関する項を付け加えて(式(4),(5))，PID方式において最適化を行った。その結果をつぎに示す。

$$PI = \int (r-y)^2 dt + w \int (u-u_o)^2 dt \quad (4)$$

$$PI = \int (r-y)^2 dt + w \int \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (5)$$

ここで、 w は重み係数である。

PIDゲインの算出結果と目標値追従特性，そして制御成績を，それぞれTable 9とTable 11，Fig.12とFig.13，Table 10とTable 12に示す。

本研究では、式(4)と式(5)の重み係数は同じとしたが、両者の応答特性を比較する際には、評価関数

$J_{2.2}$ よりも、評価関数 J_3 のほうが大きいという事実(Table 3)から、式(5)の w は、式(4)の w より小さく(0.00001~0.1程度)するべきである。

Table 9 PID方式(式(4))の評価関数

w	k_c	k_i	k_d
0.001	9.12	0.70	4.02
0.01	5.08	0.43	0.14
0.1	2.52	0.25	0.02
1	1.18	0.13	0.00

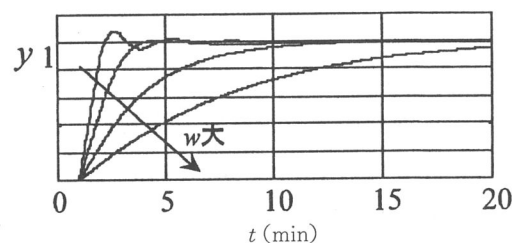


Fig.12 目標値追従特性($r=1, d=0$)

Table 10 PID方式の制御成績

w	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3
0.001	1.38	29.6	80.8	1729
0.01	1.69	28.7	32.1	9.47
0.1	2.57	27.0	7.79	0.57
1	4.60	23.0	0.58	0.02

Table 11 PID方式(式(5))の評価関数

w	k_c	k_i	k_d
0.001	4.84	0.79	0.00
0.01	1.86	0.30	0.00
0.1	0.85	0.12	0.00
1	0.40	0.05	0.00

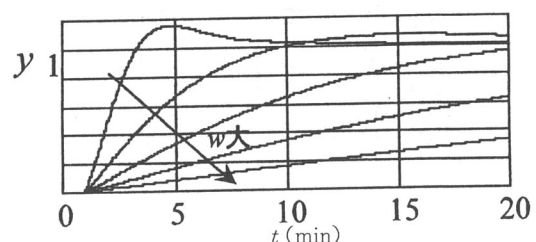


Fig.13 目標値追従特性($r=1, d=0$)

Table 12 P I D方式の制御成績

w	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3
0.001	1.75	29.7	36.9	8.09
0.01	2.97	27.9	5.98	0.20
0.1	5.53	21.8	0.24	0.02
1	9.95	13.3	2.53	0.01

また、式(5)の評価関数を用いた場合に、微分ゲイン k_d がゼロとなるであることが興味深い。これは、P I D方式の場合 k_d を小さくすれば J_3 が小さくなることを示している。

I - P D方式でも同様にして、評価関数式(4)と式(5)を用いてP I Dゲインを求めることができる。P I Dゲインの計算結果と目標値追従特性、そして制御成績を、それぞれTable 13とTable 15, Fig.14とFig.15, Table 14とTable 16に示す。

I - P D方式の場合、 $J_{2.2}$ と J_3 の大きさはほぼ同じである(Table 4)から、式(4)の w と、式(5)の w は同じでよい。

このほかに、P I, I - P方式においても最適化を行うことができる。この際に、P Iゲインが正しく求まらない場合があった。これは、数値計算の誤差によるものであると考えられる。

Table 13 I - P D方式(式(4)の評価関数)

w	k_c	k_i	k_d
0.001	14.6	8.62	7.18
0.01	13.2	6.10	6.44
0.1	11.9	2.98	5.62
1	10.9	1.43	5.23

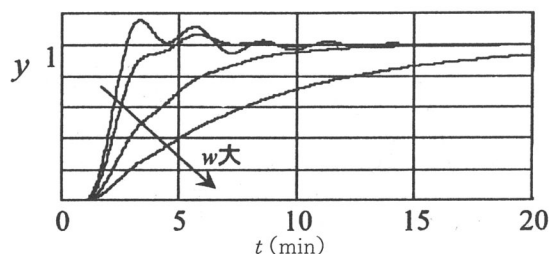
Fig.14 目標値追従特性($r=1, d=0$)

Table 14 I - P D方式の制御成績

w	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3
0.001	1.90	29.2	71.3	181
0.01	2.04	28.7	34.7	64.6
0.1	2.93	26.7	8.16	11.9
1	4.88	22.5	0.96	2.43

Table 15 I - P D方式(式(5)の評価関数)

w	k_c	k_i	k_d
0.001	13.8	7.67	6.37
0.01	10.7	4.72	4.66
0.1	6.59	2.15	2.85
1	3.65	0.83	1.61

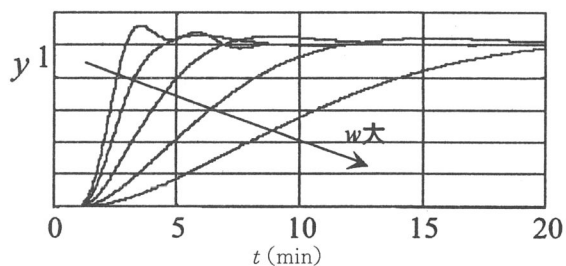
Fig.15 目標値追従特性($r=1, d=0$)

Table 16 I - P D方式の制御成績

w	J_1	$J_{2.1}$	$J_{2.2}$	J_3
0.001	1.91	29.1	27.1	117
0.01	2.20	28.5	27.9	31.4
0.1	2.94	27.5	12.1	6.25
1	4.40	25.5	4.31	1.19

「受理年月日 1999年7月30日」