

プロセス制御系設計用CADソフト (その25) —省エネを考慮した最適化手法によるPIDコントローラの調整—

猪瀬 善郊, 黒須 茂, 松本 武士*, 野田 善之**

CAD Software for Designing Process Control System (Part25) —Tuning of PID Controller by Optimization Technique under Consideration of Energy Savings—

Yochihiro INOSE, Sigeru KUROSU, Takeshi MATSUMOTO*, Yoshiyuki NODA**

1. はじめに

最適化手法を用いてPIDゲインを探索するさいの評価関数が偏差の自乗積分値 (ISE) である場合には, 操作量の自乗積分値 (ISC) ならびに操作量の時間微分の自乗積分値 (ISTC) が著しく増大してしまうので, 省エネの観点からまず実用性はない.

本稿では, 評価関数に操作量に関する項目を付け加えて最適化問題を定式化し, PIDゲインを提案してその応答と制御特性を比較検討する.

2. 制御方式

制御方式としては, 前稿¹⁾と同じように, PIDとI-PD方式の2種類を採用する. プラントの伝達関数 $G_p(s)$ は

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + T_p s} e^{-L_p s} \quad (1)$$

ここに, プラントのゲイン $K_p = 1$, 時定数 $T_p = 10[\text{min}]$, むだ時間: $L_p = 1[\text{min}]$ とする.

コントローラの伝達関数 $G_c(s)$ は

$$G_c(s) = \frac{ki + k_p s + k_d s^2}{s} \quad (2)$$

最適化手法はつぎの3種類に適用する.

- (a) PID方式(目標値追従特性)(OPT - PID - r)
- (b) I-PD方式(目標値追従特性)(OPT - I - PD - r)
- (c) 外乱抑制特性(OPT - d)

評価関数は, 前稿にならって,

$$ISE = \int_{L_p}^{80} (r - y)^2 dt \quad \text{誤差自乗積分値(ISE)} \quad (3)$$

$$ISC = \int_0^{80} (u - u_0)^2 dt \quad \text{操作量自乗積分値(ISC)} \quad (4)$$

$$ISTC = \int_0^{80} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad \text{操作量の時間微分自乗積分値(ISTC)} \quad (5)$$

をもとにして, つぎのように定義する.

$$J_1 = \int_{L_p}^{80} (r - y)^2 dt + w_1 \int_0^{80} (u - u_0)^2 dt \quad (6)$$

$$J_2 = \int_{L_p}^{80} (r - y)^2 dt + w_2 \int_0^{80} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (7)$$

$$J_3 = \int_{L_p}^{80} (r - y)^2 dt + w_1 \int_0^{80} (u - u_0)^2 dt + w_2 \int_0^{80} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (8)$$

(重み係数 $w_1 = 0.001 \sim 0.1$, $w_2 = 0.001 \sim 0.1$)

3. 評価関数 J_1 による最適化問題

3.1 OPT - PID - r

重み w_1 の種々の値に対して求めたPIDゲインを Table 1 に示す.

Table 1 Tuned PID gains

w_1	Kp	Ki	Kd
0	10.27	0.83	5.01
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	0.02

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table 1 に示すPIDゲインを用いて, PID方式で目標値追従特性を示したのが Fig. 1 であり, その制御成績を示したのが Table 2 である.

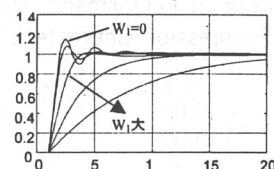


Fig. 1 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

*) 平成11年度機械工学科卒業生(現(株)第一テクノ)

**) 平成12年度電子システム専攻科卒業生(現豊橋技科大学)

Table 2 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	0.35	109	3788	0.35
0.00	0.38	80.8	1729	0.46
0.01	0.69	32.1	9.47	1.01
0.1	1.57	7.79	0.57	2.35
1	3.60	0.58	0.02	4.18

$w_1 > 0.1$ では、応答が緩慢となり、制御効果がでていないとはいえない。逆に $w_1 \leq 0.001$ になると、応答が振動的になる。

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table 1 に示すPIDゲインを用いて、I-PD方式で目標値追従特性とその制御成績を示したのがFig. 2であり、その制御成績をTable 3に示す。

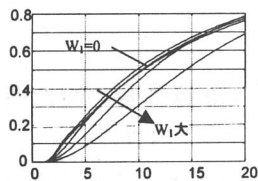
Fig. 2 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

Table 3 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	6.25	0.5754	0.7892	6.251
0.001	6.63	0.7646	0.5477	6.638
0.01	6.73	0.9498	0.3072	6.739
0.1	7.48	1.5871	0.16	7.64
1	9.57	3.246	0.0777	12.82

w_1 のすべての値に対して応答は緩慢になり、20分経過しても目標値に到達していない。この事実は前稿において、PID方式で求めたPIDゲインをI-PD方式に使った結果が悲惨であることは前稿からも明らかである。

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table 1 に示すPIDゲインを用い、外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig. 3とTable 4である。

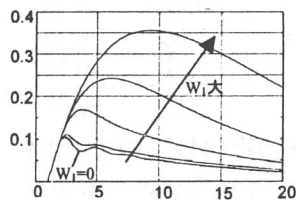
Fig. 3 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_1

Table 4 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	0.05	1.16	35.96	0.056
0.001	0.07	1.13	20.84	0.071
0.01	0.20	1.67	0.4393	0.217
0.1	0.58	2.57	0.163	0.867
1	1.59	4.61	0.0695	6.200

w_1 のすべての値に対して、20分経過しても零点に復帰していないので、実用性はない。

3.2 OPT - I-PD - r

重み w_1 の種々の値に対して求めたPIDゲインをTable 5に示す。

Table 5 Tuned PID gains

w_1	Kp	Ki	Kd
0	15.19	9.43	7.44
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

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table 5 に示すPIDゲインを用いて、PID方式で目標値追従特性を示したのがFig. 4であり、その制御成績を示したのがTable 6である。

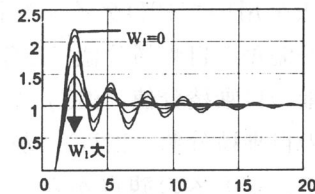
Fig. 4 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

Table 6 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	1.85	766.5	32281	1.85
0.001	1.50	591.3	25260	2.09
0.01	0.93	336.7	13490	4.30
0.1	0.53	194.8	7080.	20.01
1	0.38	135.0	4812.	135.38

すべて振動的で使いものにならない。

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table 5 に示すPIDゲインを用いて、I-PD方式で、目標値追従特性とその制御成績を示したのがFig. 5とTable 7である。これより、 $w_1 \leq 0.001$ では振動的であるが、Fig. 4と比較すると、オーバーシュートは少ない。 $w_1 \geq 0.1$ では、緩慢な応答になり、制御効果がでていないとはいえない。

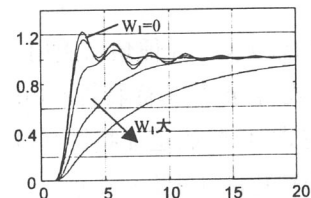
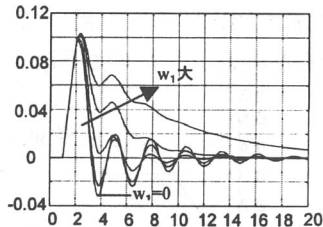
Fig. 5 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

Table 7 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	0.86	90.5	260	0.36
0.001	0.87	71.3	180.7	0.94
0.01	1.04	34.7	64.6	1.39
0.1	1.93	8.16	11.9	2.75
1	3.88	0.96	2.43	4.84

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table 5 に示すPIDゲインを用いて, 外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig. 6 と Table 8 である.

Fig. 6 Comparison of responses to Disturbance input changes for various weighting factor w_1 Table 8 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics w_1

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	0.01	2.93	138.54	0.01
0.00	0.01	2.44	117.55	0.01
0.01	0.01	1.75	77.16	0.03
0.1	0.01	1.35	50.04	0.05
1	0.03	1.20	40.56	1.23

(2) に述べたことがそのまま成り立つ. つまり, $w_1 \leq 0.001$ では振動的で, $w_1 \geq 0.1$ では緩慢な応答になる.

3.3 OPT - d

重み w_1 の種々の値に対して求めたPIDゲインを Table 9 に示す.

Table 9 Tuned PID gains

w_1	K_p	K_i	K_d
0	13.43	10.05	8.18
0.001	12.97	8.34	7.53
0.01	11.77	5.64	6.46
0.1	9.461	2.8	5.42
1	8.435	1.37	4.95

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table 9 に示すPIDゲインを用いて, PID方式で目標値追従特性を示したのがFig. 7 であり, その制御成績を示したのがTable 10 である.

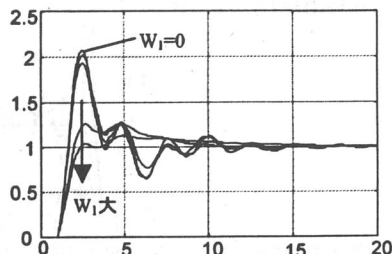
Fig. 7 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

Table 10 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	1.49	530.11	39677	1.49
0.001	1.18	397.38	23799	1.58
0.01	0.81	239.16	10623	3.20
0.1	0.55	113.15	3927.4	11.86
1	0.46	74.410	2425	74.87

$w_1 < 0.01$ では振動的になり, $w_1 > 0.1$ では応答が緩慢となり, 実用性はない.

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table 9 に示すPIDゲインを用いて, I - PD方式で, 目標値追従特性とその制御成績を示したのがFig. 8 と Table 11 である. これより, $w_1 < 0.01$ では振動的であり, $w_1 = 1$ では減衰の強い応答となる. Fig. 7 と比較するとオーバーシュートは少ない.

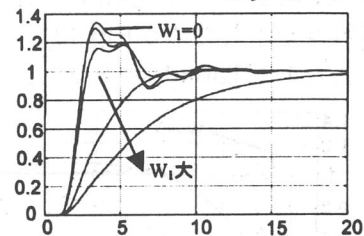
Fig. 8 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

Table 11 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	0.93	96.29	241.88	0.93
0.001	0.93	65.32	137.06	1.00
0.01	1.10	32.14	47.78	1.42
0.1	1.80	10.45	9.66	2.85
1	3.44	1.75	2.07	5.19

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table 9 に示すPIDゲインを用いて外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig. 9 と Table 12 である.

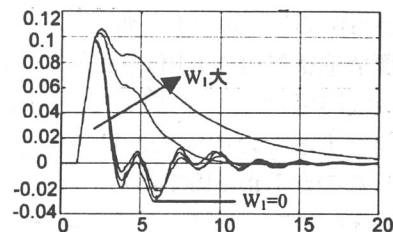
Fig. 9 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_1

Table 12 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_1	ISE	ISC	ISTC	J_1
0	0.01	2.40	217.76	0.01
0.001	0.01	1.98	140.40	0.01
0.01	0.01	1.51	76.45	0.03
0.1	0.02	1.19	43.94	0.14
1	0.05	1.11	34.16	1.16

この結果も $w_1 < 0.01$ では振動的であり, $w_1 = 1$ では減衰の強い応答となる. 重み w_1 の最適値は $0.1 > w_1 > 0.01$ である.

4. 評価関数 J_2 による最適化問題

4.1 OPT - PID - r

重み w_2 の種々の値に対して求めたPIDゲインをTable13に示す.

Table13 Tuned PID gains

w_2	Kp	Ki	Kd
0	10.27	0.83	5.01
0.001	4.84	0.79	-0.0083
0.01	1.86	0.3	-0.0083
0.1	0.85	0.12	-0.0083
1	0.40	0.05	-0.0083

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table13に示すPIDゲインを用いて, PID方式で目標値追従特性を示したのがFig.10であり, その制御成績を示したのがTable14である.

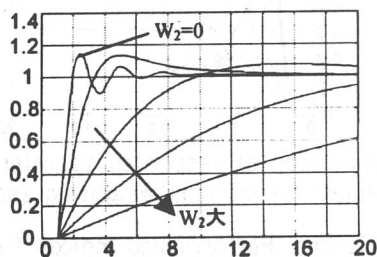


Fig.10 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table14 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	0.06	1.16	35.96	0.06
0.001	0.13	1.76	0.46	0.13
0.01	0.65	2.98	0.14	0.66
0.1	2.03	5.54	0.06	2.04
1	3.84	9.96	0.02	3.86

w_2 を大きくすることは減衰を強めることとなり重みの最適値は $0.001 > w_2 > 0$ である.

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table13に示すPIDゲインを用いて, I-PD方式で目標値追従特性を示したのがFig.11であり, その制御成績を示したのがTable15である.

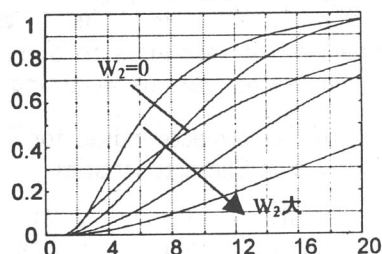


Fig.11 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table15 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	6.25	0.58	0.79	6.25
0.001	3.78	2.01	1.09	3.78
0.01	5.90	1.81	0.27	5.90
0.1	9.57	3.31	0.08	9.57
1	13.49	8.12	0.03	13.51

w_2 のすべての値に対して実用性はない. Table15の制御成績に統一性を欠いている.

(3) 外乱抑制特性 (PID・I - PD方式)

Table13に示すPIDゲインを用いて, 外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig.12とTable16である.

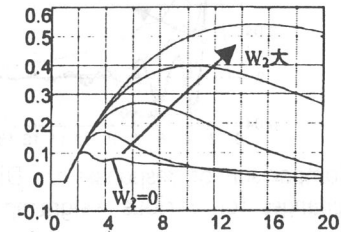


Fig.12 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table16 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	0.35	109	3788	0.35
0.001	0.75	36.9	8.09	0.758
0.01	1.97	5.98	0.2	1.972
0.1	4.53	0.24	0.02	4.532
1	8.95	2.53	0.01	8.96

w_2 のすべての値に対して, 実用性はない.

4.2 OPT - I-PD - r

重み w_2 の種々の値に対して求めたPIDゲインをTable17に示す.

Table17 Tuned PID gains

w_2	Kp	Ki	Kd
0	15.19	9.43	7.44
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

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table17に示すPIDゲインを用いて目標値追従特性を示したのがFig.13であり, その制御成績を示したのがTable18である.

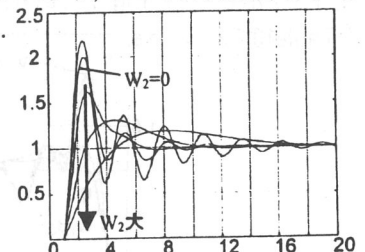


Fig.13 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table18 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	0.01	2.93	138.54	0.01
0.001	0.01	1.99	75.23	0.09
0.01	0.02	1.42	30.34	0.32
0.1	0.04	1.36	9.74	1.02
1	0.16	1.74	3.01	3.17

$0 < w_2 \leq 0.001$ では振動的となり、 $w_2 > 0.1$ では、応答が緩慢となるので、 w_2 の最適値は $0.1 > w_2 > 0.001$ である。

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table17に示すPIDゲインを用いて、I-PD方式で目標値追従特性とその制御成績を示したのがFig.14とTable19である。

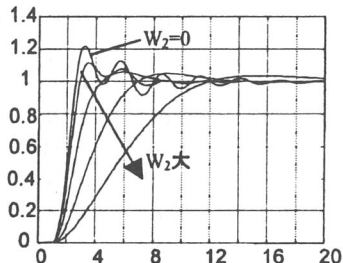
Fig14 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table19 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	0.01	2.40	217.76	0.01
0.001	0.02	1.94	9.36	0.03
0.01	0.03	1.88	2.13	0.05
0.1	0.07	1.83	0.74	0.15
1	0.25	2.01	0.28	0.54

Fig.13と比較して、オーバーシュートは小さい。 w_2 の最適値は $0.01 > w_2 > 0.001$ である。

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table17に示すPIDゲインを用いて、外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig.15とTable20である。

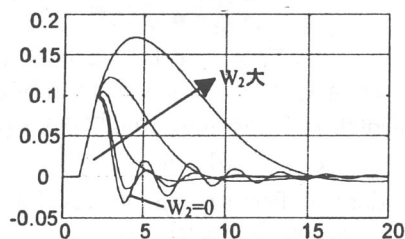
Fig.15 Comparison of responses to Disturbance input changes for various weighting factor w_2

Table20 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	1.85	766.46	32281	1.85
0.001	1.27	435.26	14418	15.68
0.01	0.83	187.86	3470	35.5
0.1	0.78	67.93	416.46	42.42
1	1.11	23.06	38.36	39.48

$w_2 = 0.001$ は振動的な応答であり、 $w_2 = 0.1$, 1は落ち着くのが遅い。よって最適値は $w_2 = 0.01$ である。

4.3 OPT - d

重み w_2 の種々の値に対して求めたPIDゲインをTable21に示す。

Table21 Tuned PID gains

w_2	Kp	Ki	Kd
0	13.43	10.05	8.18
0.001	11.81	4.19	2.42
0.01	9.278	2.51	0.57
0.1	5.66	1.513	0.107
1	3.52	0.504	0.046

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table21に示すPIDゲインを用いて、PID方式で目標値追従特性を示したのがFig.16であり、その制御成績を示したのがTable22である。

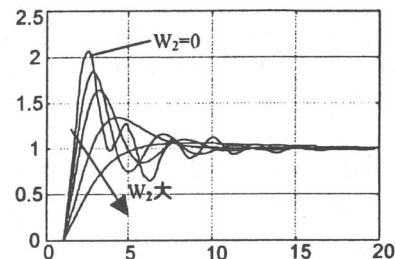
Fig.16 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table22 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	0.86	90.5	260	0.86
0.001	0.91	57.1	117	1.027
0.01	1.20	27.9	31.4	1.514
0.1	1.94	12.1	6.25	2.565
1	3.40	4.31	1.19	4.59

すべて、振動的または緩慢であり、使いものにならない。

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table21に示すPIDゲインを用いて、I-PD方式で目標値追従特性とその制御成績を示したのがFig.17とTable23である。

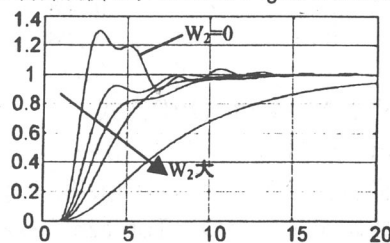
Fig.17 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

Table23 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	0.93	96.29	241.88	0.932
0.001	1.29	25.58	33.88	1.33
0.01	1.80	12.62	11.80	1.92
0.1	2.28	8.67	4.16	2.70
1	4.84	1.29	0.51	5.35

すべて、振動的または緩慢であり、使いものにならない。

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table21に示すPIDゲインを用いて、外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig.18とTable24である。

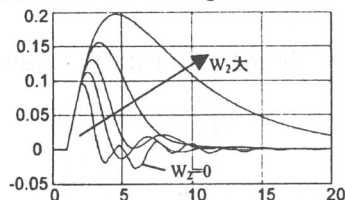


Fig.18 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_2

Table24 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC	J_2
0	1.49	530.11	39677	1.49
0.001	1.21	292.90	1293.9	2.50
0.01	0.96	170.60	172.51	2.69
0.1	0.84	63.30	19.28	2.77
1	1.01	19.13	2.26	3.27

$w_2 = 0.001, 0.01$ は振動的な応答であり、 $w_2 = 1$ は緩慢な応答である。よって、最適値は $w_2 = 0.1$ 付近である。

5. 評価関数 J_3 による最適化問題

5.1 OPT - PID - r

重み w_1, w_2 の種々の値に対して求めたPIDゲインをTable25に示す。

Table25 Tuned PID gains

w_1	w_2	Kp	Ki	Kd
0	0	10.24	0.79	4.92
0.001	0.001	4.30	0.686	-0.0083
	0.01	1.59	0.256	-0.0083
	0.1	0.810	0.144	-0.0083
0.01	0.001	3.80	0.587	-0.0083
	0.01	1.88	0.283	-0.0083
	0.1	0.810	0.121	-0.0083
0.1	0.001	2.37	0.308	-0.0083
	0.01	1.63	0.238	-0.0083
	0.1	0.797	0.125	-0.0083

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table25に示すPIDゲインを用いて、PID方式で目標値追従特性を示したのがFig.19, Fig.20であり、その制御成績を示したのがTable26である。

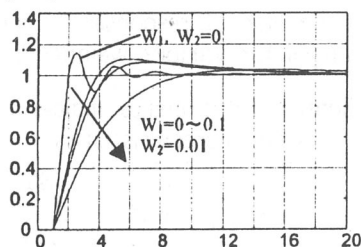


Fig.19 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1
($w_1 = 0 \sim 0.1, w_2 = 0.001$)

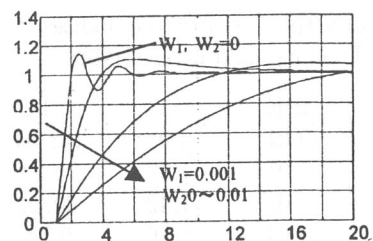


Fig.20 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2
($w_1 = 0.001, w_2 = 0 \sim 0.1$)

Table26 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	0.36	109.1	3788	0.36
0.001	0.001	0.83	29.4	5.05	0.86
	0.01	2.33	4.16	0.11	2.34
	0.1	4.32	0.79	0.04	4.32
0.01	0.001	0.93	23.1	3.09	1.16
	0.01	1.99	5.64	0.19	2.05
	0.1	4.64	0.34	0.02	4.64
0.1	0.001	1.58	8.20	0.45	2.40
	0.01	2.32	3.82	0.11	2.70
	0.1	4.62	0.42	0.03	4.67

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table25に示すPIDゲインを用いてI-PD方式で目標値追従特性を示したのがFig.21, Fig.22であり、その制御成績を示したのがTable27である。

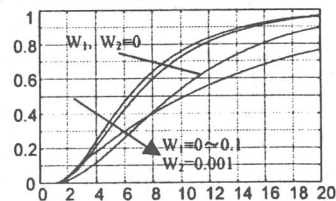


Fig.21 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1
($w_1 = 0 \sim 0.1, w_2 = 0.001$)

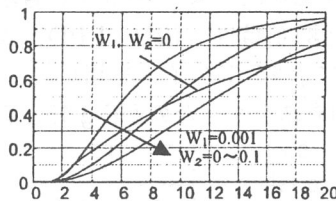


Fig.22 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2
($w_1 = 0.001, w_2 = 0 \sim 0.1$)

Table27 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	6.85	0.70	0.71	6.85
0.001	0.001	4.05	1.79	0.86	4.05
	0.01	6.40	1.94	0.218	6.40
	0.1	8.57	2.91	0.11	8.58
0.01	0.001	4.39	1.58	0.67	4.41
	0.01	6.20	1.71	0.24	6.22
	0.1	1.99	10.80	5.80	2.68
0.1	0.001	6.26	1.36	0.245	6.40
	0.01	6.81	1.84	0.19	7.00
	0.1	9.46	3.22	0.09	9.79

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table25に示すPIDゲインを用いて外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig.23, Fig.24とTable28である。

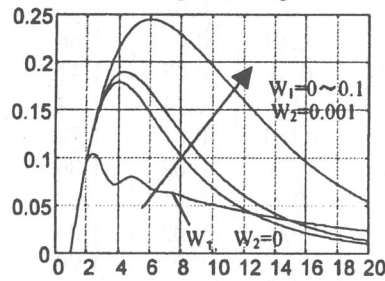


Fig.23 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_1

($w_1 = 0 \sim 0.1$, $w_2 = 0.001$)

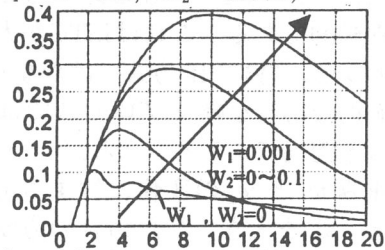


Fig.24 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_2

($w_1 = 0.001$, $w_2 = 0 \sim 0.1$)

Table28 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	0.06	1.15	34.30	0.06
0.001	0.001	0.17	1.84	0.39	0.17
	0.01	0.84	3.34	0.12	0.84
	0.1	2.09	5.33	0.06	2.10
0.01	0.001	0.21	1.94	0.32	0.23
	0.01	0.69	2.30	0.14	0.71
	0.1	2.45	5.65	0.06	2.51
0.1	0.001	0.54	2.59	0.17	0.80
	0.01	0.87	3.33	0.12	1.20
	0.1	2.40	5.63	0.06	2.97

(4) 結論

- ・ PID-r に対して求められたゲインをI-PD方式, 外乱で用いた場合応答は緩慢になるので使えない。
- ・ 重み w_1 と w_2 の変化に対する応答の変化をみると, w_2 を大きくした場合の方が応答は緩慢になりやすいことがわかる。
- ・ PID-r をI-PD-r, OPT-d と比較すると外乱抑制特性は非常に悪いことがわかる。プロセス制御は主に外乱に対する制御を必要とするので, 外乱抑制特性が悪いPID-r は使えないといえる。
- ・ PID-r に対して求めたゲインを用いたため, PID方式での制御成績が一番小さい。

5.2 OPT-I-PD-r

重み w_1, w_2 の種々の値に対して求めたPIDゲ

ンをTable29に示す。

Table29 Tuned PID gains

w_1	w_2	Kp	Ki	Kd
0	0	14.8	9.28	7.43
0.001	0.001	13.4	7.24	6.23
	0.01	10.6	4.67	4.71
	0.1	6.73	2.16	2.95
0.01	0.001	13.3	5.88	6.12
	0.01	10.7	4.22	4.80
	0.1	6.81	2.10	2.96
0.1	0.001	11.7	2.94	5.54
	0.01	11.0	2.72	5.10
	0.1	8.01	1.83	3.59

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table29に示すPIDゲインを用いて, PID方式で, 目標値追従特性を示したのがFig.25, Fig.26であり, その制御成績を示したのがTable30である。

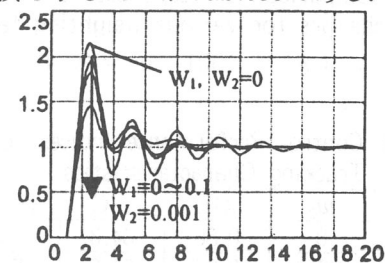


Fig.25 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1

($w_1 = 0 \sim 0.1$, $w_2 = 0.001$)

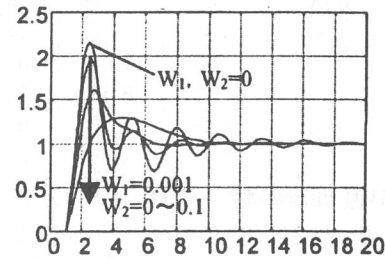


Fig.26 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2

($w_1 = 0.001$, $w_2 = 0 \sim 0.1$)

Table30 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	1.66	664	30083	1.66
0.001	0.001	1.16	384	12578	14.12
	0.01	0.81	183	3488	35.87
	0.1	0.76	69.1	467	47.52
0.01	0.001	0.93	337	11655	15.96
	0.01	0.72	174	3720	39.66
	0.1	0.73	38.7	482	49.32
0.1	0.001	0.52	185	6554	25.57
	0.01	0.50	155	4590	61.90
	0.1	0.54	77.0	1019	110.14

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table29に示すPIDゲインを用いてI-PD方式で, 目標値追従特性を示したのがFig.27, Fig.28であり, その制御成績を示したのがTable31である。

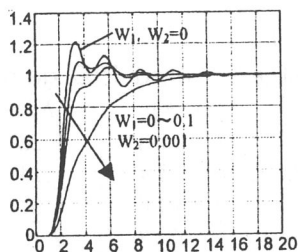
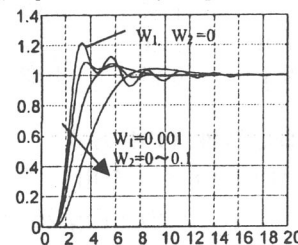
Fig.27 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1 ($w_1 = 0 \sim 0.1$, $w_2 = 0.001$)Fig.28 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2 ($w_1 = 0.001$, $w_2 = 0 \sim 0.1$)

Table31 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	0.86	84.3	228	0.86
0.001	0.001	0.93	51.0	97.1	1.08
	0.01	1.21	27.5	30.4	1.54
	0.1	1.95	11.7	6.21	2.58
0.01	0.001	1.06	32.6	59.6	1.45
	0.01	1.30	21.6	24.0	1.76
	0.1	1.99	10.8	5.80	2.68
0.1	0.001	1.93	8.11	11.4	2.75
	0.01	2.00	7.53	9.22	2.85
	0.1	2.41	5.46	3.96	3.35

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table29に示すPIDゲインを用いて外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig.29, Fig.30とTable32である。

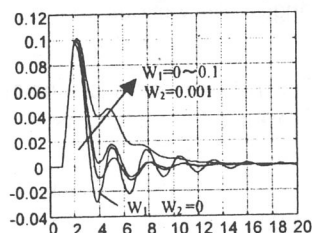
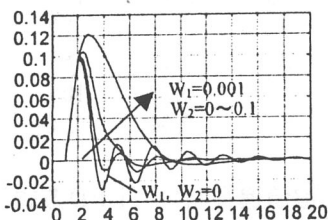
Fig.29 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_1 ($w_1 = 0 \sim 0.1$, $w_2 = 0.001$)Fig.30 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_2 ($w_1 = 0.001$, $w_2 = 0 \sim 0.1$)

Table32 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	0.01	2.65	136	0.01
0.001	0.001	0.01	1.86	69.6	0.08
	0.01	0.02	1.41	31.1	0.33
	0.1	0.04	1.34	10.5	1.09
0.01	0.001	0.01	1.73	65.7	0.09
	0.01	0.02	1.36	32.5	0.36
	0.1	0.04	1.33	10.5	1.10
0.1	0.001	0.02	1.33	47.9	0.20
	0.01	0.02	1.26	38.0	0.53
	0.1	0.04	1.19	16.0	1.76

(4) 結論

- ・ PID-r, OPT-d と比べると応答が全体的に振動的である。これはISTCが大きいことからわかる。特にPID方式ではかなり振動的であり、振動的な応答を嫌うプロセスではOPT-I-PD-rは不適當であるといえる。
- ・ 重み w_1 と w_2 の変化に対する応答の変化をみると、 w_2 を大きくした場合の方が応答は緩慢になりやすいことがわかる。
- ・ I-PD-r に対して求めたゲインを用いたため I-PD方式での制御成績が一番小さい

5.3 OPT - d

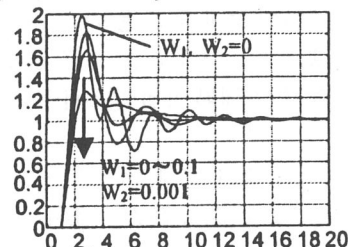
重み w_1, w_2 の種々の値に対して求めたPIDゲインをTable33に示す。

Table33 Tuned PID gains

w_1	w_2	Kp	Ki	Kd
0	0	13.26	8.99	7.91
0.001	0.001	11.62	4.20	2.77
	0.01	9.05	2.44	3.71
	0.1	6.63	1.22	5.43
0.01	0.001	10.9	3.51	3.11
	0.01	9.00	2.33	3.86
	0.1	6.73	1.23	5.47
0.1	0.001	9.40	2.12	4.43
	0.01	8.66	1.77	4.89
	0.1	6.83	0.992	6.885

(1) 目標値追従特性 (PID方式)

Table33に示すPIDゲインを用いて目標値追従特性を示したのがFig.31, Fig.32であり、その制御成績を示したのがTable34である。

Fig.31 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1 ($w_1 = 0 \sim 0.1$, $w_2 = 0.001$)

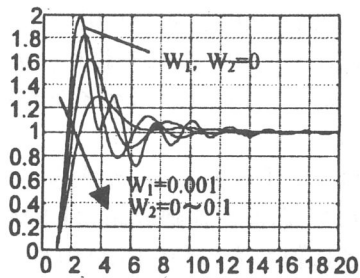


Fig.32 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2
($w_1=0.001$, $w_2=0\sim0.1$)

Table34 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	1.30	463	31884	1.30
0.001	0.001	1.15	276	1298	2.72
	0.01	0.92	159	155	2.63
	0.1	0.65	70.3	29.8	3.70
0.01	0.001	0.82	198	1293	4.09
	0.01	0.85	148	161	3.94
	0.1	0.65	71.4	31.2	4.48
0.1	0.001	0.50	106	1762	12.9
	0.01	0.59	105	278	13.9
	0.1	0.58	67.0	33.4	10.6

(2) 目標値追従特性 (I-PD方式)

Table33のPIDゲインを用いてI-PD方式で目標値追従特性を示したのがFig.27, Fig.28であり,その制御成績を示したのがTable35である。

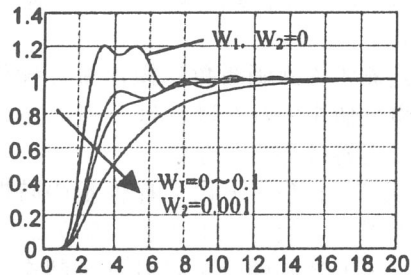


Fig.33 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_1
($w_1=0\sim0.1$, $w_2=0.001$)

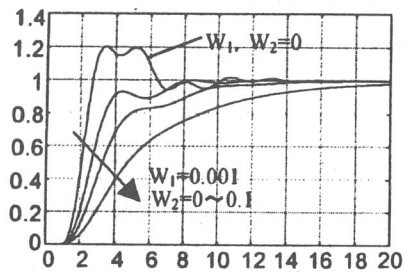


Fig.34 Comparison of responses to reference input changes for various weighting factor w_2
($w_1=0.001$, $w_2=0\sim0.1$)

Table35 Control Performance Indices for Reference Tracking Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	0.91	75.7	177	0.91
0.001	0.001	1.28	25.6	32.9	1.34
	0.01	1.83	12.1	10.9	1.95
	0.1	2.34	8.01	3.94	2.74
0.01	0.001	2.03	10.4	11.3	2.14
	0.01	2.06	9.50	8.39	2.24
	0.1	2.43	7.02	3.61	2.86
0.1	0.001	3.29	2.49	2.97	3.54
	0.01	3.24	2.59	2.85	3.53
	0.1	3.19	2.85	2.10	3.69

(3) 外乱抑制特性 (PID・I-PD方式)

Table33に示すPIDゲインを用いて外乱抑制特性とその制御成績を示したのがFig.35, Fig.36とTable36である。

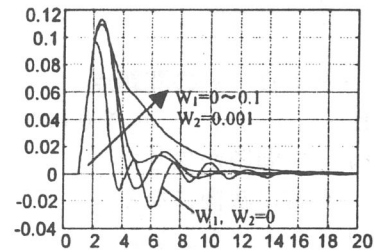


Fig.35 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_1
($w_1=0\sim0.1$, $w_2=0.001$)

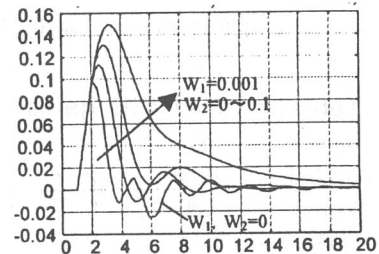


Fig.36 Comparison of responses to disturbance input changes for various weighting factor w_2
($w_1=0.001$, $w_2=0\sim0.1$)

Table36 Control Performance Indices for Disturbance Suppression Characteristics

w_1	w_2	ISE	ISC	ISTC	J_3
0	0	0.01	2.21	180	0.01
0.001	0.001	0.02	1.88	9.70	0.03
	0.01	0.03	1.84	2.02	0.05
	0.1	0.07	1.65	0.81	0.15
0.01	0.001	0.02	1.56	11.0	0.05
	0.01	0.03	1.75	2.12	0.07
	0.1	0.07	1.64	0.83	0.17
0.1	0.001	0.03	1.19	20.1	0.17
	0.01	0.04	1.41	3.84	0.22
	0.1	0.08	1.56	0.83	0.32

(4) 結論

- ・ OPT-d に対して求められたゲインをPID方式に用いると応答が振動的になる。これに対して、I-PD方式では、比較的よい応答を示している。また、OPT-d に対して求めたゲインを用いたため、外乱抑制特性での制御成績が一番小さい。このことより、OPT-d に対して求められたPIDゲインは、I-PD方式にて用いるべきだといえる。
- ・ 重み w_1 と w_2 の変化に対する応答の変化をみると、 w_2 を大きくした場合の方が応答は緩慢になりやすいことがわかる。
- ・ プロセス制御は主に外乱に対する制御を必要するので、外乱抑制特性の制御成績が一番よいOPT-d をプロセス制御には用いるべきである。その際、I-PD方式で用いれば目標値に対してよい応答がえられる。

6. OPT-PID-r の問題点

OPT-PID-r の J_3 にて w_2 を 0.001~0.1 とした場合以下のような問題が生じた

- (1) 応答が非常に緩慢になる。
- (2) 微分ゲイン k_d が 0 となる。

注：OPT-PID-r の J_3 にて w_2 が 0.001~0.1 の場合は $k_d = 0$ と $k_d < 0$ では応答が全く同じであったため $k_d = 0$ とした。

このため、 $w_1 = 0 \sim 0.01$ 、 $w_2 = 0.0000001 \sim 0.00001$ とし、PIDゲインを再度求めた。Table37にこのPIDゲインを示す。

Table37 Tuned PID gains

w_1	w_2	k_p	k_i	k_d
0	0.0000001	10.16	0.78	4.64
	0.000001	9.80	0.77	3.43
	0.00001	7.15	0.64	-0.04
0.001	0.0000001	9.13	0.72	3.90
	0.000001	8.72	0.68	2.87
	0.00001	6.66	0.68	-0.03
0.01	0.0000001	5.33	0.38	0.13
	0.000001	5.26	0.38	0.07
	0.00001	5.17	0.30	-0.02

Table37よりPID-rにおいて w_1 が 0~0.01 の場合、 w_2 が 0.000001 以下であればPID-rにおいて微分ゲインが負にならないことがわかる。よって、OPT-PID-rにおいて $w_2 \leq 0.000001$ にすべきであるといえる。

7. おわりに

以上の結果により、以下のことがわかった。

- (1) J_1 及び J_2 によるI-PD-rでは重み $w_1 = 0.01$ で、OPT-dでは $w_1 = 0.1$ のとき応答がよい。
- (2) J_3 によるI-PD-rでは重みが

$w_1 = 0.001 \sim 0.01$ 、 $w_2 = 0.01$ のときのゲインがPMM10%-dと似ており、 $w_1 = 0.001 \sim 0.01$ 、 $w_2 = 0.1$ のときのゲインがPMM0%-dと似ていた。

- (3) J_3 において重み w_1 、 w_2 が大きくなっていくにつれて、応答と制御成績はUSM・PMM10%-dに似たものからPMM0%-dへと移っていくことがわかった。
- (4) (3) と (4) からUSM・PMM10%-dは操作量を小さく考えた調整法であり、PMM0%-dは操作量を大きく考えた調整法だといえる。
- (5) J_3 におけるI-PD-rの重みは $w_1 = 0.001$ 、 $w_2 = 0.1$ に、OPT-dの重みは $w_1 = 0.001$ 、 $w_2 = 0.01$ にすればよい応答がえられる。
- (6) J_3 における最適化手法ではOPT-dを用いれば、良い応答がえられる。
- (7) OPT-PID-rにおいて $w_2 > 0.00001$ にすると応答が緩慢になり、微分ゲイン k_d が 0 になるので、 $w_2 < 0.00001$ でなければならない。

本研究は、前稿²⁾過去に報告した“省エネを考慮に入れたPIDコントローラの調整”と照らし合わせて最適化手法にて省エネを実現する場合の方法と他の調整法との関係を示した。

最適化手法を用いて省エネのためのPIDゲインを決めるためには、以下のことを考慮しなければならない。

- (1) 定義する評価関数に操作量と操作量の時間微分値をいれなければ、省エネに貢献できる応答はえられない。
- (2) OPT-PID-rにて操作量の時間微分値を考慮して最適化手法を行なうことは難しい。
- (3) プロセス制御は主に外乱抑制を主な目的とする制御系であることと、重み w_1 、 w_2 が大きくなると外乱に対する応答が必ず緩慢になることを考えると重み w_1 、 w_2 はなるべく小さな値にすべきである。

以上の観点から、最適化手法にて省エネを考慮に入れたPIDゲインの簡易調整法を実現できる。

9. 参考文献

- 1) 松本 武士：プロセス制御系設計用CADソフト（その24）、小山高専研究紀要、No.33（2001）
- 2) 佐藤 隆太：プロセス制御系設計用CADソフト（その19）、小山高専研究紀要、No.33（2000）