

プロセス制御系設計用 CAD ソフト(その 28) —省エネを考慮した PID コントローラの調整—

渡利 久規, 小沢 圭介*, 野田 善之**, 黒須 茂

Hisaki WATARI, Keisuke OZAWA*, Yoshiyuki NODA**, Shigeru KUROSU

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

For conventional process control, a well-tuned PID controller has been considered adequate. It is, however, questionable whether the PID controller insures that the control system can be operated at the most efficient condition for energy consumption. In this paper, we focus on the tuning problem of the PID controller for energy savings. The controlled plant is assumed a first-order lag plus deadtime system with I-PD control configuration. Comparison of the control performance is presented for load disturbance change. The optimal PID gains can be obtained as functions of ratio of deadtime to time-constant graphically.

1. はじめに

本稿では、最適化手法を用いて評価関数にエネルギーを考慮にいて PID コントローラの調整値を探索している。著者らは、1 次おくれ+むだ時間系に対して種々の調整法を適用して応答特性ならびに操作量に関する評価を定量的に検討した結果、

制御方式に関して：PID より I-PD 方式

調整法に関して：従来からの調整法の中では限界感度法、部分的モデルマッチング法

応答特性：目標値追従特性より外乱抑制特性を重視などを明らかにしている¹⁾。

また、近年では省エネの観点から設備の最適運用計画が実施され、その成果が報告されている²⁾。しかし本稿では、従来からの消費エネルギーを最小にするといった積極的な意味ではなく、操作量が平滑化されて操作部に損傷を与えないという消極的な意味での省エネを考えている。

2. 制御系の概要

2.1 プラントとコントローラ

一般性のある結論にするため、時間軸をプラントの

時定数 T_p で正規化している。プラントの伝達関数 $G_p(s)$ は、つぎのように表す。

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

I-PD 方式におけるコントローラの伝達関数 $G_c(s)$ は、つぎのように表す。

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = k_p + \frac{k_i T_p}{s'} + \frac{k_d s'}{T_p} \quad (2)$$

このように時間軸 $\tau = t/T_p$ を導入することにより、プラントはパラメータ L_p/T_p によって特徴づけられる。つまり、制御のしにくさを表す尺度 L_p/T_p によって正規化されたことになる。

このとき、制御系全体の構成は Fig.1 のようなブロック線図で表せる。

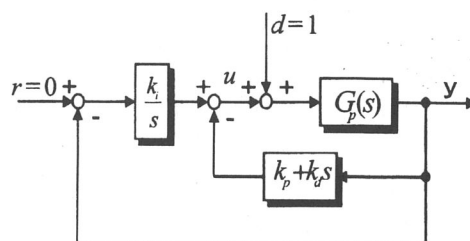


Fig.1 I-PD Control

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 $L_p=1[\text{min}]$ として数値計算を実施する。

*電子システム専攻科 2 学年

**平成 12 年度電子システム専攻科卒業生
(現豊橋技術科学大学大学院)

2.2 評価関数

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

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

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

をもとにして、評価関数はつぎのように3通りを定義する。

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

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

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

2.3 最適化手法

最適化手法には、共役勾配法(Fletcher-Reevesの方法)を採用している。この方法は、評価関数の一階の導関数だけを利用して最適解への収束を速める方法で、計算量および記憶容量も少なく広く用いられている³⁾。

初期値には、従来からの調整法(限界感度法、部分的モデルマッチング法(オーバーシュート0%, 10%の参照モデル)による調整値を選んで同じ最適値に収束することを確認している。そのとき、停止基準は、評価関数の変化分 ΔJ を用いて、

$$|\Delta J| < \varepsilon \quad (9)$$

の条件を満足するとき停止する。このとき ε は 10^{-9} を採用した。

3. 数値計算による結果

3.1 J_1 による最適化手法

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。また、重み w_1 に対する PID ゲイングラフを Fig.2 に示す。

Table 1 PID gains optimized

w_1	k_p	k_i	k_d
0	13.4459	9.7472	8.0394
0.001	13.0519	8.8252	7.6473
0.002	12.7760	8.1803	7.3792
0.003	12.5172	7.7288	7.2032
0.004	12.3573	7.3833	7.0482
0.005	12.1830	7.0751	6.9318
0.006	11.9843	6.7328	6.8182
0.007	11.8873	6.4888	6.7207
0.008	11.7198	6.3466	6.6737
0.009	11.6350	6.1411	5.9360
0.01	11.5594	5.9729	6.5279

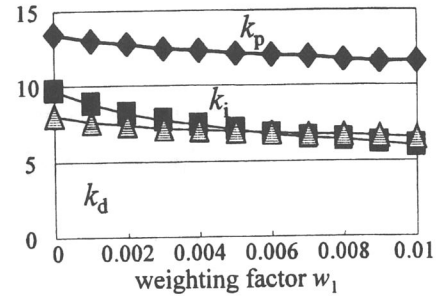


Fig.2 PID gains for various weighting factors w_1

重み w_1 の増加に伴い k_i , k_d の効果を弱める傾向にあり、 k_p はほとんど変わらない。

Table 1 に示す PID ゲインを用いて、外乱抑制特性を示したのが Fig.3(a)であり、その操作量を示したのが Fig.3(b)である。

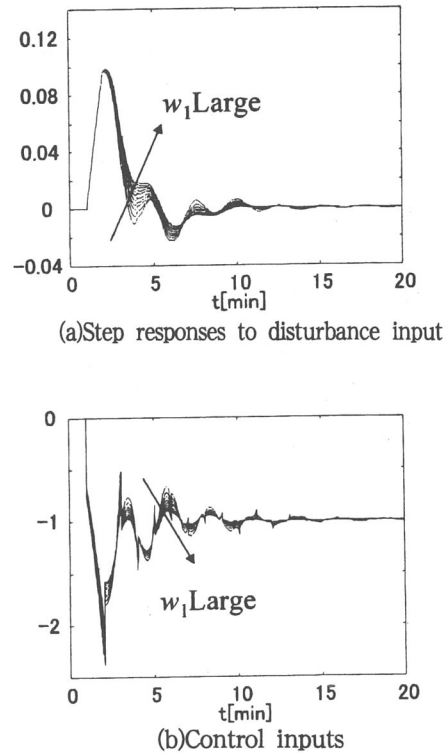


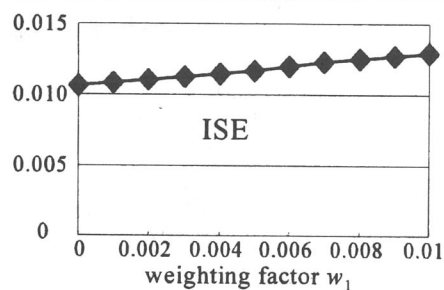
Fig.3 Step responses to disturbance input for various weighting factors w_1

Fig.3 より、外乱応答、操作量ともに振動的である。とくに操作量が突変しているのは、むだ時間をもつシステムに対しては偏差の急激な変化に D 動作が大きく反映していることによる。省エネの観点から操作部に損傷を与えるためには実用性は薄い。

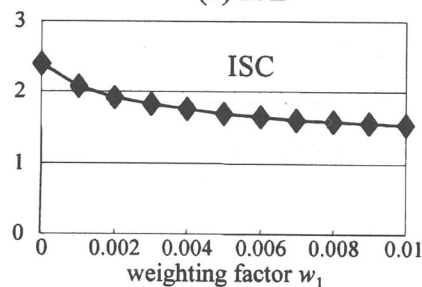
制御成績を Table 2 に示す。また、重み w_1 に対する評価関数を Fig.4 (a)~(c)に示す。

Table 2 Control performance indices for disturbance suppression characteristics

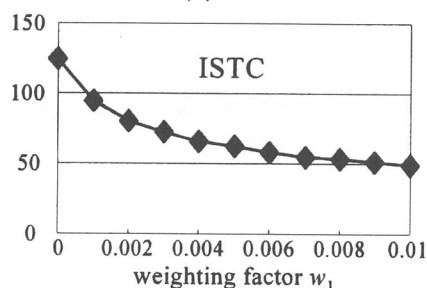
w_1	ISE	ISC	ISTC
0	0.0106	2.3864	124.1821
0.001	0.0108	2.0849	94.9467
0.002	0.0110	1.9261	80.3113
0.003	0.0113	1.8220	72.2223
0.004	0.0115	1.7545	66.0419
0.005	0.0117	1.6976	61.7843
0.006	0.0120	1.6402	57.9267
0.007	0.0123	1.6057	54.9173
0.008	0.0125	1.5751	53.4212
0.009	0.0127	1.5484	51.1604
0.01	0.0129	1.5267	49.3843



(a) ISE



(b) ISC



(c) ISTC

Fig.4 Performance indices for various weighting factors w_1

ここで、ISC はむだ時間 $L_p = 1$ [min] であるために Fig.4(b)において $w_1 \rightarrow \infty$ のとき $ISC=1$ が収束値となることがわかる。Fig.4(c)より、ISTC は非常に大きな値を示している。これは、 J_1 による最適化手法では ISTC を考慮していないため当然の結果といえる。

3.2 J_2 による最適化手法

重み w_2 の種々の値に対して求めた PID ゲインを Table 3 に示す。また、重み w_2 に対する PID ゲインのグラフを Fig.5 に示す。

Table 3 PID gains tuned

w_2	k_p	k_i	k_d
0	13.4459	9.7472	8.0394
0.001	11.8907	4.1847	2.4322
0.002	11.0724	3.6113	1.6824
0.003	10.5734	3.3061	1.3114
0.004	10.1162	3.1262	1.0806
0.005	9.8397	2.9851	0.8301
0.006	9.5454	2.9085	0.8301
0.007	9.4368	2.7985	0.7423
0.008	9.1542	2.7093	0.6656
0.009	9.0621	2.6726	0.6202
0.01	8.8697	2.6427	0.5809

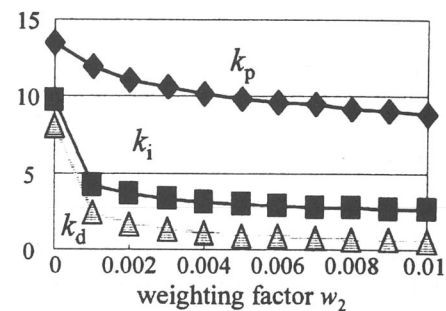
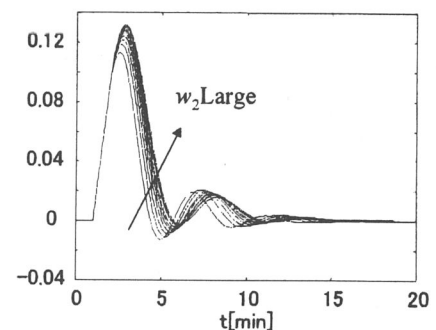
Fig.5 PID gains for various weighting factors w_2

Fig. 5 より、 k_p 、 k_i 、 k_d は J_1 による最適化手法より小さい。つまりフィードバックの効果を弱めている。

重み w_2 を加味することで操作量の急激な変化を抑えるために、 k_d を大幅に減少させる。それにもいない振動成分に影響する k_i も減少させている。

Table 3 に示す PID ゲインを用いて、外乱抑制特性と操作量を示したのが Fig. 6 (a), (b) である。



(a) Step responses to disturbance input

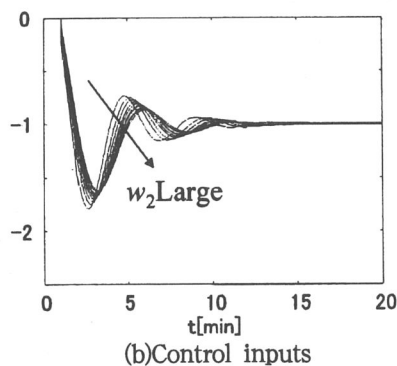


Fig.6 Step responses to disturbance input for various weighting factors w_2

Fig.6 より, 外乱応答の過渡的な最大振幅が J_1 による最適化手法に比べ大きくなっているが, 振動は抑制されている。また, 重み w_2 の影響で ISTC を大幅に減少させることで操作量の振る舞いは非常になめらかになっている。しかし, まだ若干の揺れが残る, 整定時間も長いのでプロセス系においては実用的ではない。

制御成績を Table 4 に示す。また, 重み w_2 に対する評価関数を Fig.7 (a)~(c) に示す。

Table 4 Performance indices for disturbance suppression characteristics

w_2	ISE	ISC	ISTC
0	0.0106	2.3864	124.1821
0.001	0.0196	1.9584	6.9826
0.002	0.0231	1.9742	4.4852
0.003	0.0254	1.9698	3.5244
0.004	0.0274	1.9567	2.9300
0.005	0.0288	1.9442	2.6477
0.006	0.0301	1.9371	2.4136
0.007	0.0310	1.9272	2.2693
0.008	0.0324	1.9092	2.0818
0.009	0.0330	1.9099	2.0123
0.01	0.0340	1.9067	1.9155

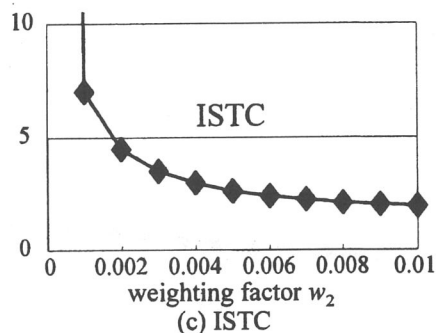
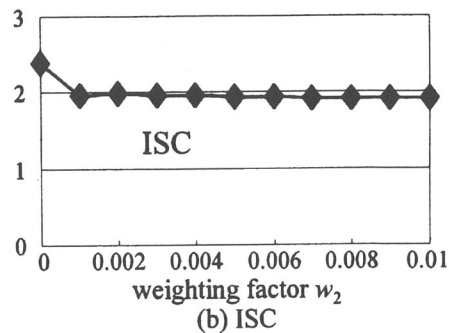
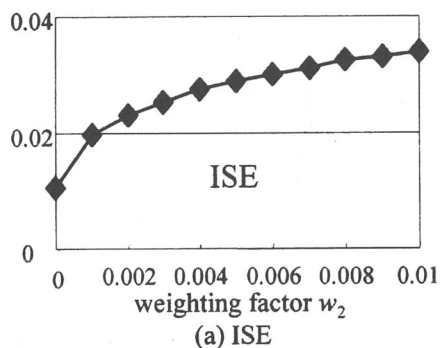


Fig.7 Performance indices for various weighting factors w_2

Fig.7(c)より, 重み w_2 の増加にともない k_d が減少しているため, ISTC も減少することがわかる。

3.3 J_3 による最適化手法

重み w_1 , w_2 の種々の値に対して求めた PID ゲインを Table 5 に示す。また, 重み w_2 に対する PID ゲインのグラフを Fig.8 (a)~(c) に示す。

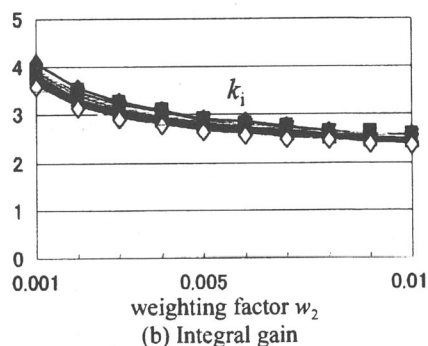
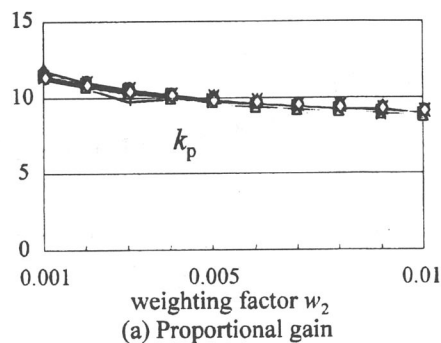


Table 5 PID gains optimized

w_1	w_2	k_p	k_i	k_d
0.001	0.001	11.7717	4.0958	2.4883
	0.002	10.9601	3.5590	1.7277
	0.003	10.4712	3.2755	1.3546
	0.004	10.1189	3.0875	1.1228
	0.005	9.8232	2.9182	0.9552
	0.006	9.5693	2.8439	0.8502
	0.007	9.3745	2.7479	0.7606
	0.008	9.2229	2.6475	0.6824
	0.009	9.1837	2.5750	0.6295
	0.01	8.8960	2.5760	0.5880
0.002	0.001	11.4559	3.8960	2.4885
	0.002	10.9221	3.4904	1.7730
	0.003	10.4508	3.2250	1.3947
	0.004	10.1189	3.0522	1.1647
	0.005	9.8232	2.8834	0.9797
	0.006	9.5693	2.7862	0.8698
	0.007	9.3377	2.7250	0.7827
	0.008	9.2229	2.5908	0.6985
	0.009	9.0085	2.5897	0.6515
	0.01	8.8983	2.5455	0.6066
0.003	0.001	11.5625	3.9477	2.5943
	0.002	10.8618	3.4402	1.8150
	0.003	10.3844	3.1705	1.4230
	0.004	10.0645	2.9079	1.1793
	0.005	9.7970	2.8553	1.0159
	0.006	9.4323	2.7666	0.8890
	0.007	9.3169	2.6979	0.8052
	0.008	9.2093	2.6137	0.7305
	0.009	9.0102	2.5799	0.6737
	0.01	8.8877	2.5148	0.6219
0.004	0.001	11.4543	3.9001	2.6455
	0.002	10.7878	3.3999	1.8566
	0.003	10.3742	3.1242	1.4589
	0.004	10.0356	2.9670	1.2172
	0.005	9.7593	2.8355	1.0458
	0.006	9.5333	2.7219	0.9150
	0.007	9.3043	2.6639	0.8231
	0.008	9.1938	2.5944	0.7477
	0.009	8.9779	2.5055	0.6782
	0.01	8.8955	2.4878	0.6376
0.005	0.001	11.4086	3.8382	2.6912
	0.002	10.7267	3.3314	1.8854
	0.003	10.3257	3.0901	1.4957
	0.004	9.9984	2.9227	1.2431
	0.005	9.7711	2.7990	1.0711
	0.006	9.5304	2.7222	0.9488
	0.007	9.2922	2.6510	0.8457
	0.008	9.1911	2.5754	0.7715
	0.009	9.0372	2.5124	0.7070
	0.01	8.8891	2.740	0.6552

0.006	0.001	11.2764	3.7774	2.7244
	0.002	10.7346	3.2299	1.9335
	0.003	10.3096	3.0402	1.5214
	0.004	10.0002	2.8918	1.2741
	0.005	9.6906	2.7524	1.0834
	0.006	9.3889	2.6981	0.9653
	0.007	9.2852	2.6058	0.8639
	0.008	9.1702	2.5436	0.7852
	0.009	9.0107	2.4733	0.7186
	0.01	8.8863	2.4474	0.6712
0.007	0.001	11.2326	3.7380	2.7726
	0.002	10.6719	3.2621	1.9691
	0.003	9.7570	3.0482	1.5381
	0.004	9.8826	2.8303	1.2860
	0.005	9.7023	2.7326	1.1155
	0.006	9.5130	2.6385	0.9831
	0.007	9.3080	2.5903	0.8862
	0.008	9.1545	2.5164	0.8049
	0.009	9.0776	2.4604	0.7434
	0.01	8.8672	2.4085	0.6806
0.008	0.001	11.1550	3.6956	2.8138
	0.002	10.5861	3.2224	1.9964
	0.003	10.2369	2.9766	1.5843
	0.004	9.9608	2.8182	1.3248
	0.005	9.6697	2.6940	1.1389
	0.006	9.3900	2.6299	1.0019
	0.007	9.2613	2.5803	0.9071
	0.008	9.1642	2.5111	0.8232
	0.009	9.0486	2.4222	0.7512
	0.01	8.8698	2.3879	0.6943
0.009	0.001	11.1028	3.6486	2.8498
	0.002	10.5691	3.1927	2.0341
	0.003	10.1969	2.9534	1.6136
	0.004	9.8920	2.7788	1.3395
	0.005	9.6968	2.6824	1.1647
	0.006	9.4767	2.6109	1.0312
	0.007	9.2416	2.5348	0.9198
	0.008	9.1376	2.4730	0.8396
	0.009	9.0099	2.4091	0.7681
	0.01	8.9117	2.3458	0.7075
0.01	0.001	11.0606	3.5961	2.8790
	0.002	10.5310	3.1541	2.0634
	0.003	10.1304	2.8935	1.6239
	0.004	9.8960	2.7826	1.3779
	0.005	9.5710	2.6360	1.1696
	0.006	9.4693	2.5584	1.0449
	0.007	9.2589	2.4959	0.9379
	0.008	9.1470	2.4732	0.8609
	0.009	9.0074	2.3791	0.7792
	0.01	8.8667	2.3435	0.7238

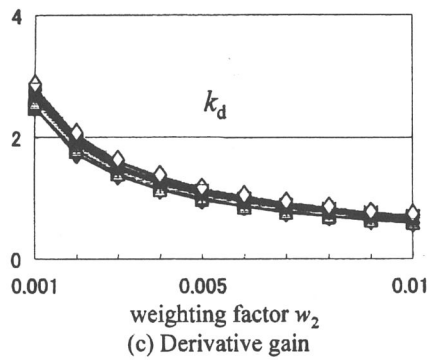


Fig.8 Comparison of PID gains for various weighting factors w_1 and w_2

Fig. 8 より, PID パラメータは J_2 による最適化手法に比べほとんど差異はないことがわかる。

k_p は重み w_1 に対してほとんど変わらないが, w_2 に対して多少減少傾向にある。

k_i は重み w_2 の増加に対して減少し, w_1 の影響はほとんどない。

k_d は重み w_2 の増加にともない著しく減少する。 k_p , k_i 同様重み w_1 の影響はない。

Table 5 に示す PID ゲインを用いて, 外乱抑制特性と操作量を示したのが Fig. 9 (a)~(d) である。

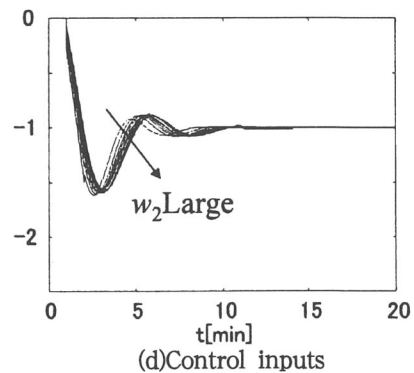
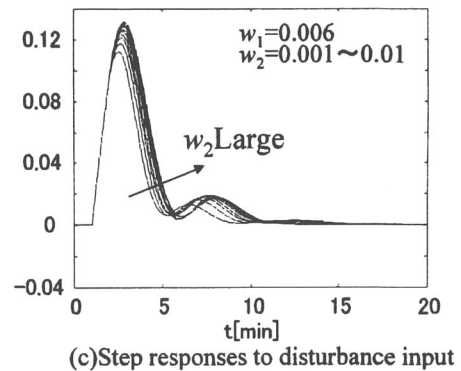
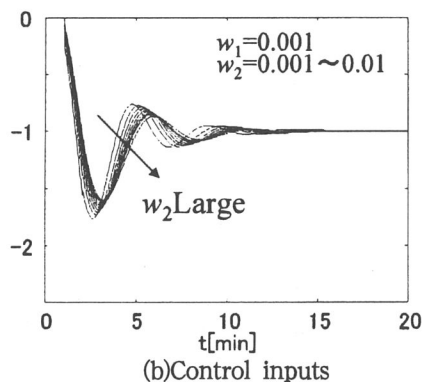
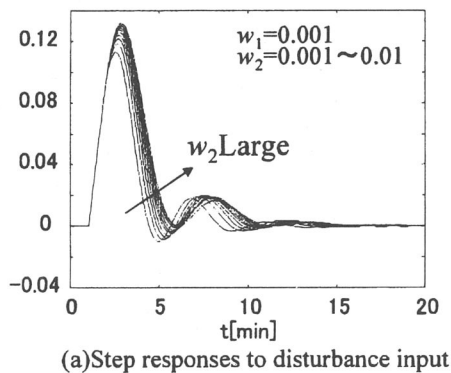
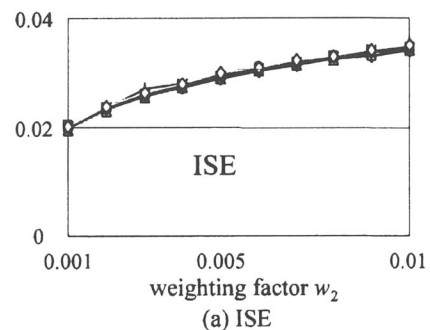


Fig.9 Step responses to disturbance input for various weighting factors w_1 and w_2

Fig.9 より, 重み w_1 の影響で外乱応答の揺れが若干抑えられている。 J_2 による最適化手法に対しても同じことがいえる。また, 操作量も小さくなっている。

このことから, 重み w_1 , w_2 を考慮することは外乱応答における揺れを防ぎ, 操作量をなめらかにすることからプロセス系において実用的である。

重み w_1 , w_2 に対する評価関数を Fig.10 (a)~(c) に示す。



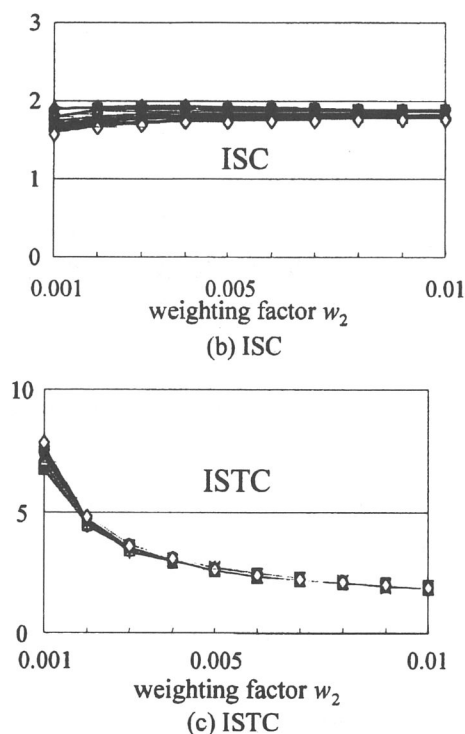


Fig.10 Comparison of performance indices for various weighting factors w_1 and w_2

Fig.10 より、つぎのことがわかる。

重み w_1 によって評価関数の各値に影響を与えない。

ISC に対し、重みの影響はほとんどない。

w_2 をある程度大きくすると、多少 ISE に影響がでるものの ISC, ISTC は一定値に近づく。

4. J_3 による最適化手法と部分的モデルマッチング法(オーバーシュート 0%)の比較

制御方式：I-PD 方式、制御目的：外乱抑制に対して求められた PID ゲインを用いて、 J_3 による最適化手法(OPT-d)と部分的モデルマッチング法(PMM-d(0%))を外乱応答、目標値応答から比較する。

このとき、 J_3 による最適化手法の重み係数は $w_1=0.001$, $w_2=0.008$ である。PID ゲインを Table 6 に示す。

Table 6 PID gains tuned

	k_p	k_i	k_d
OPT-d	9.2229	2.6475	0.6824
PMM-d(0%)	6.853	1.973	1.700

・外乱抑制特性：

Table 6 に示す PID ゲインを用いて、I-PD 方式で外乱抑制特性を示したのが Fig. 11 (a), (b) であり、その制御成績を示したのが Table 7 である。

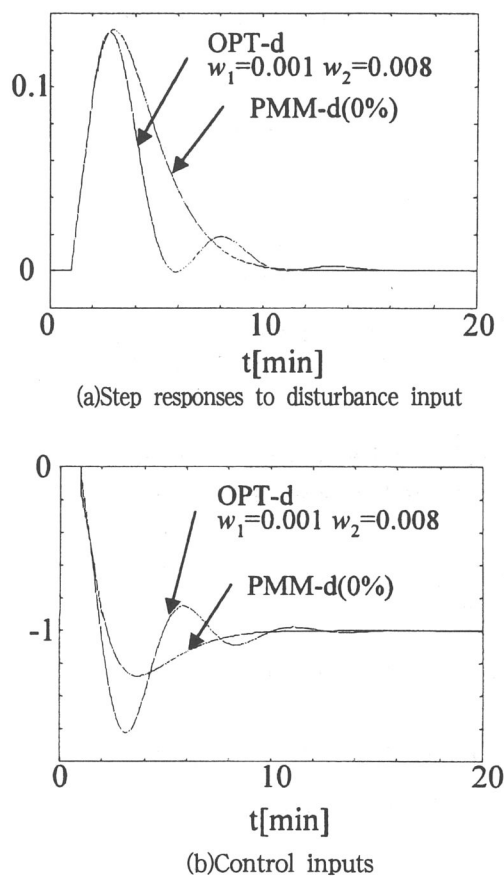


Fig.11 Comparison of responses to disturbance input for OPT-d and PMM-d (0%)

Fig.11 より、OPT-d は過渡的な振れ幅が PMM-d(0%) に比べ小さいが、整定時間はほぼ同じことがわかる。

Table 7 Performance indices for disturbance suppression characteristics

	ISE	ISC	ISTC
OPT-d	0.0324	1.8840	2.0901
PMM-d(0%)	0.0464	1.4779	3.8814

ISE は PMM-d(0%) の 2 倍程度よくなっているが、応答が振動的なのは重みをどのように選んでも改善されない。したがって、評価関数に非振動性を考慮する必要がある。

・目標値追従特性：

目標値追従特性を示したのが Fig.12 であり、その制御成績を示したのが Table 8 である。

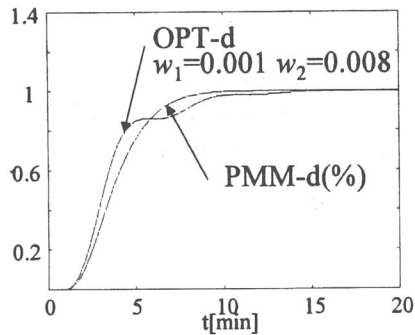


Fig.12 Comparison of responses to reference input for OPT-d and PMM-d(0%)

Table 8 Performance indices for reference tracking characteristics

	ISE	ISC	ISTC
OPT-d	1.7122	14.2936	13.1189
PMM-d(0%)	2.0263	10.0617	5.7141

Fig.12 より, OPT-d は PMM-d(0%) に比べ速応性はよい。

PMM-d (0%) との比較では, OPT-d の k_d に対し k_i が大きいことため応答に揺れが残る結果となっている。

5. J_3 による最適化手法

以上の結果より, J_3 による最適化手法の実用性が認められたので, $w_1=0.001$, $w_2=0.008$ のとき, むだ時間 $L_p=1\sim 10[\text{min}]$ まで変化させたときの OPT-d と PMM-d(0%) の比較を兼ねて考察する。

・OPT-d :

むだ時間に対して求めた PID ゲインを Table 9 に示す。また, そのグラフを Fig.13 に示す。

Table 9 PID gains optimized

L_p	k_p	k_i	k_d
1	9.2229	2.6475	0.6824
2	6.1366	1.1367	2.1260
3	4.4969	0.6865	3.3802
4	3.5440	0.4757	4.2693
5	2.9218	0.3551	4.9068
6	2.5638	0.2789	5.4423
7	2.1589	0.2348	5.7689
8	1.9530	0.1819	5.8546
9	1.7488	0.1612	6.2844
10	1.5734	0.1480	6.4561

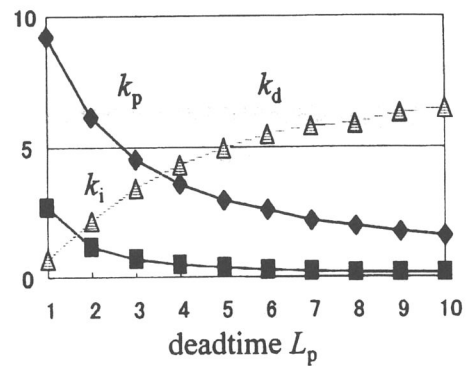


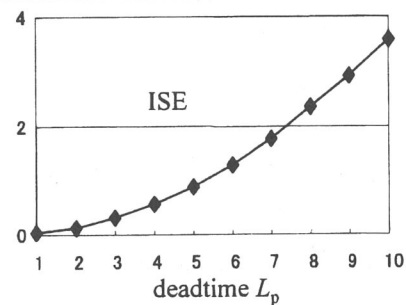
Fig.13 PID gains versus deadtime L_p

Fig.13 より, むだ時間 L_p に対し k_p , k_i は減少し, k_d は増加傾向にある。

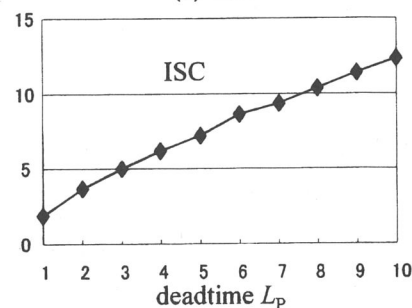
制御成績を Table 10 に示す。また, むだ時間 L_p に対する評価関数のグラフを Fig. 14 (a)~(c) に示す。

Table 10 Performance indices for disturbance suppression characteristics

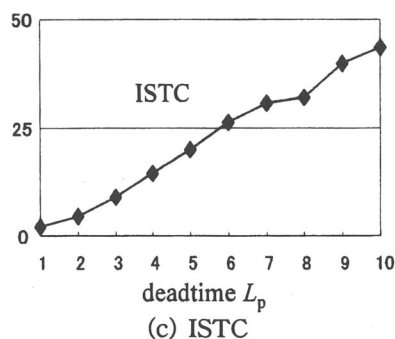
L_p	ISE	ISC	ISTC
1	0.0324	1.8840	2.0901
2	0.1328	3.7107	4.4011
3	0.3063	5.0086	8.9387
4	0.5562	6.1653	14.3606
5	0.8848	7.2512	19.8791
6	1.2859	8.6236	26.0859
7	1.7663	9.3671	30.6284
8	2.3404	10.3840	31.9349
9	2.9160	11.3726	39.8074
10	3.5840	12.3495	43.4681



(a) ISE



(b) ISC

Fig.14 Performance indices versus deadtime L_p

むだ時間の増加に対し，評価関数は増える傾向にある。とくに ISTC は k_d を強めていることから明らかである。

・PMM-d(0%) :

むだ時間に対して求めた PID ゲインを Table 11 に示す。また，そのグラフを Fig.15 に示す。

Table 11 PID gains tuned

L_p	k_p	k_i	k_d
1	6.853	1.973	1.700
2	3.237	0.540	1.503
3	2.035	0.261	1.311
4	1.436	0.159	1.124
5	1.079	0.110	0.942
6	0.842	0.082	0.764
7	0.674	0.065	0.590
8	0.549	0.053	0.419
9	0.452	0.044	0.251
10	0.375	0.038	0.087

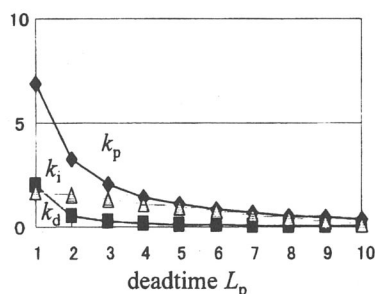
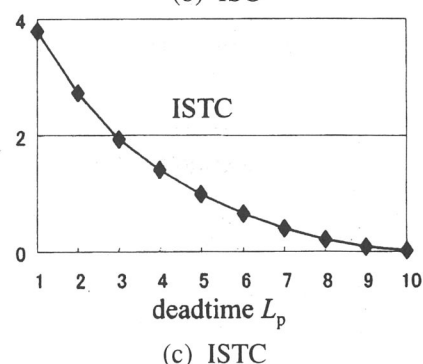
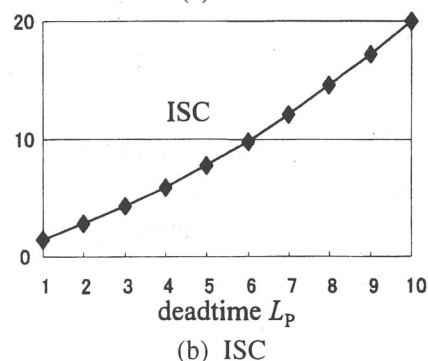
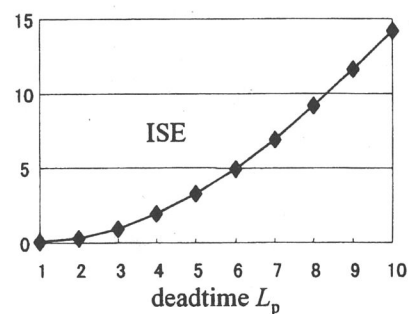
Fig.15 PID gains versus deadtime L_p

Fig.15 より，むだ時間の増加に対し， k_p ， k_i ， k_d すべてのゲインを減らす傾向にある。

制御成績を Table 12 に示す。また，むだ時間に対する評価関数のグラフを Fig.16 (a)~(c) に示す。

Table 12 Performance indices for disturbance suppression characteristics

L_p	ISE	ISC	ISTC
1	0.05	1.48	3.80
2	0.32	2.82	2.72
3	0.94	4.27	1.93
4	1.93	5.90	1.40
5	3.26	7.73	0.98
6	4.93	9.79	0.64
7	6.89	12.06	0.39
8	9.16	14.55	0.21
9	11.60	17.19	0.09
10	14.23	19.97	0.03

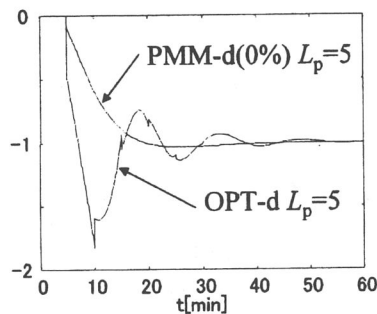
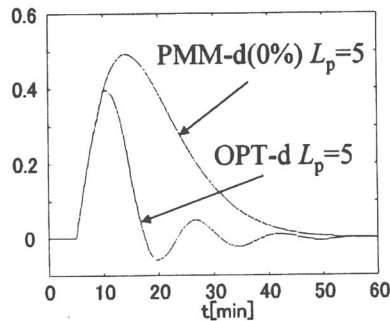
Fig.16 Performance indices versus deadtime L_p

むだ時間の増加に対し，ISE，ISC は増える傾向にあり，ISTC は減る傾向にある。これは，最適化手法とは逆に，むだ時間とともに k_d を減少させているからである。

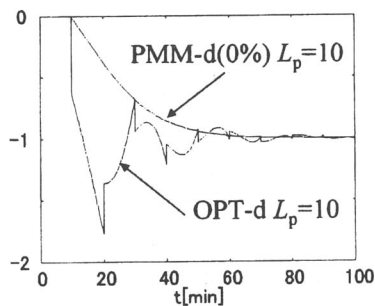
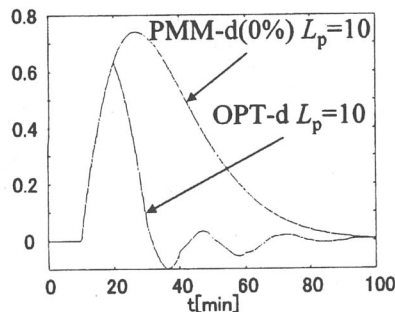
・応答比較:

OPT-d と PMM-d(0%)の外乱応答および操作量を比較する。このとき, 比較にはむだ時間 $L_p=5[\text{min}]$, $10[\text{min}]$ のパラメータを用いた。

以下に外乱抑制特性と操作量を Fig.17 (a),(b) に示す。



(a) $L_p = 5$



(b) $L_p = 10$

Fig.17 Comparison of responses to disturbance input for OPT-d and PMM-d(0%)

OPT-d に対して, 外乱応答は PMM-d(0%)に比べて過渡的な振幅は小さいが, むだ時間の増加にともない振動的になる。また, 操作量に関しても同じようにむだ時間の増加にともない振動的になり, 徐々に振る舞いが複雑になる。これは, PMM-d(0%)がむだ時間の増加にともない k_d を減らすのに対し, OPT-d は k_d を増やすことに原因がある。したがって, J_3 による最適化手法 ($w_1=0.001$, $w_2=0.008$) はむだ時間 L_p の大きなシステムに対し, 外乱応答はおよび操作量は振動的になり実用性はない。

応答を改善するには, むだ時間に対して適切な重み係数を設定する必要がある, 外乱応答の 0 付近での揺れを防ぐために評価関数偏差の項 $\int_{L_p}^{80} (r-y)^2 dt$ を変更し, $\int_{L_p}^{80} t^2 (r-y)^2 dt$ を導入する必要がある。

6. おわりに

本研究では, 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, 最適な PID ゲインを求めた。その結果, 外乱応答及び操作量の振動を抑制することから J_3 による最適化手法の実用性を明らかにしたつもりであったが, 最適化手法による応答では, どうしても振動を抑えるという結果はでていない。そこで, 評価関数そのものの修正が必要となってきた。

7. 参考文献

1. K.Kamimura et al : A Comparison of Controller Tuning Methods for Energy Savings, ASHRAE Transaction 107-2 (2001) (to appear)
2. 伊東弘一ほか: コージェネレーションの最適計画 産業図書 (1990)
3. T.Kuo : Optimal Control by Mathematical Programming, Prentice Hall Inc, 52/56 (1971)

「受理年月日 2001 年 8 月 24 日」