Robust PID Parameter Design for Embedded Temperature Control System Using Taguchi Method

Arata Suzuki Member (Zojirushi Corporation)

Kenji Sugimoto Non-member (Nara Institute of Science and Technology)

Keywords: embedded temperature control system, PID control, Taguchi's robust design

Embedded temperature control systems are widely used in various fields such as household electric appliances. In such applications, robustness against outside temperature is a crucial issue because of a wide variety of environmental conditions.

Conventional parameter design methods for PID control are not necessarily robust in this regard. On the other hand, if we adjust the parameter according to outside temperature measurement, we need additional sensors to this end, which means a cost-increase and is undesirable in mass-production-type embedded systems such as household electric appliances.

In this paper, we apply Taguchi method to the design of PID control parameter. Taguchi method is widely used in industry, and it is a promising method known in quality engineering (robust design). However, few applications have been found in control engineering so far. In particular, to the best of the authors' knowledge, there has been no report using Taguchi method for robust design of PID control against disturbances.

The authors have performed experiment with an experimental system in order to evaluate the effectiveness of the PID parameter design by Taguchi method (Fig. 1). Output signals by Taguchi method (proposed) and Limit Cycle method (conventional), respectively, are given in Fig. 2 and Fig. 3 for the outside temperatures 5 [°C] and 30 [°C], for the objective temperature 70 [°C]. The proposed method results in the difference 0.3 [°C] in the steady state, while the conventional method gives 2.4 [°C]. Therefore the proposed method has turned out to be robust against the change of outside temperature.

Fig. 1. Experimental System

Fig. 2. Output Signals (Taguchi Method)

Fig. 3. Output Signals (Limit Cycle Method)

タグチメソッドによる組み込み温度制御システムの ロバスト PID パラメータ設計

正 員 鈴木 新* 非会員 杉本 謙二**

Robust PID Parameter Design for Embedded Temperature Control System Using Taguchi Method

Arata Suzuki*, Member, Kenji Sugimoto**, Non-member

This paper proposes a robust PID parameter design scheme using Taguchi's robust design method. This scheme is applied to an embedded PID temperature control system which is affected by outside (room) temperature. The effectiveness of this scheme is verified experimentally with a cooking household appliance.

キーワード：組み込み温度制御システム，PID 制御，タグチメソッド

Keywords: embedded temperature control system, PID control, Taguchi's robust design

1. はじめに

組み込み温度制御システムは、調理家電や感熱印字プリンタなど家庭電化製品として広く利用されている。これらの組み込み温度制御システムの商品価値や品質を決定する重要な機能として、温度制御性能があげられる。例えば、調理家電の目的は、調理対象を設定した温度で加熱調理することであり、温度制御性能が商品価値を左右する調理の仕上がりに大きく影響する。

しかし、組み込み温度制御システムの温度制御性能には様々な要因が影響を与える。特に、外気温の変化は調理対象である被加熱物の温度勾配を変化させ、内部と外表面部の温度差を大きくするために、調理の仕上がりを悪化させる。しかし、外気温の変化は、寒冷地と温暖地、季節による違いなど、客先での使用条件が多岐にわたる組み込み温度制御システムでは、避けることのできない要因である。外気温の変化に対応できない商品では、季節によって調理の仕上がりが変化し、消費者からは品質不良として返品されることになり、商品価値や企業価値を下げることになってしまう。

上述の問題点に対応するため、外気温を計測し、外気温に適した制御パラメータをリアルタイムで選択する方法な

ども考えられる。しかし、この方法では温度制御用とは別に外気温を計測するセンサが必要となる。センサの追加は、調理家電のような大量生産型の組み込みシステムでは、コスト競争力を低下させるので望ましくない⁽¹⁾。そこで、センサの追加を必要とせず、外気温に対してロバストな制御パラメータを持つ固定された制御器の設計ができれば望ましい。

このような要求に対して、本研究では温度制御系に多く用いられている PID 制御のパラメータ設計をタグチメソッド⁽²⁾によって行う方法を提案する。タグチメソッドは、製品開発などの設計工学の分野でロバストデザインと呼ばれる設計手法として様々な適用例^{(3)~(5)}がある。また、PID 制御は、P、I、D の 3 種類のパラメータによって制御入力を決定する非常に簡便な構造を持つ制御手法であり、制御動作も分かりやすく、現場での調整も容易に行えるので広く実用化されている。また、そのパラメータ設計法も様々なアプローチによって研究されており、伝統的な設計法として、限界感度法、ステップ応答法、リミットサイクル法などがある⁽⁶⁾。これらの方法は、古典的ではあるが現在でも多く利用されている。また、近年はパラメータの自動調整（セルフチューニング）に関する研究なども盛んに行われている⁽⁷⁾。

しかし、上述の古典的な PID パラメータ設計法は、制御システムが定常状態では十分な性能を有するが、外乱などの不確かな要因のもとでは制御性能が不十分になる場合もある。このような外乱に対してロバストな PID 制御系の設計手法として、部分的モデルマッチングによる I-PD 制御法⁽⁸⁾、特性変動分を考慮した設計法⁽⁹⁾、複数の混合感度問題によるロバスト設計法⁽¹⁰⁾などが提案されている。これらの

* 象印マホービン（株）
〒530-8511 大阪市北区天満 1-20-5
ZOJIRUSHI Corporation

1-20-5, Kitaku tenma, Osaka 530-8511
** 奈良先端科学技術大学院大学
〒630-0192 生駒市高山町 8916-5
Nara Institute of Science and Technology
8916-5, Takayama-cho, Ikoma 630-0192

方法は伝達関数などで表されるモデルをもとに、パラメータ変動によってシステムが受ける影響からロバスト性を議論している。それに対して本研究で提案する方法では、実験結果を直接利用して、外気温変化に強いパラメータを統計的手法から設計することに特徴がある。このようなアプローチは、設計工学の分野だけでなく制御の分野でも有効であると考えられる。制御の分野におけるタグチメソッドの適用例は、ファジー制御において最適なメンバーシップ関数などを求める問題に GA と組み合わせて用いた例⁽¹¹⁾や、省エネなどの観点から位置決め時間を最小とする制御パラメータの設計に用いた例⁽¹²⁾などがあるが、まだ数が少ない。また、これらは交互作用のある設計パラメータのために、設計が煩雑になることを回避する目的でタグチメソッドを適用しており、本研究のように外乱に対するロバスト性を得ることが目的ではない。このように、本研究で取り上げる使用環境の変化などの外乱に強い制御システムを設計するというタグチメソッドのロバスト設計を積極的に活用した例は、筆者らの知る限りない。

以上のように、本研究で提案する制御システムの設計法では、センサの追加などのハードウェアの変更を行わずに、PID パラメータというソフトウェアの変更のみで、使用環境の変化に対してロバストな組み込み温度制御システムを設計することが可能となる。提案手法の実証のために、実機モデルによる実験を行って、その効果を確認した。その結果、提案手法によって外気温変化にロバストな組み込み温度制御システムを実現できた。

2. 背景

組み込み温度制御システムの一例として調理家電の構造を説明し、外気温の変化がどのように被加熱物に影響するのかを説明する。通常、調理家電は図 1 のような構造をしている。図 1 から分かるように、センサは内部の調理対象とは接触していない。使用方法やコストの制約などによって、センサが調理対象と接触する構造にはできない。

このように、調理対象の温度を鍋などからの伝熱を通して間接的に計測する場合、温度センサと調理対象との間に温度勾配が発生し、正確な調理対象の温度を計測できない。もし、この温度勾配が一定であれば、補正によって正しい温度が得られる。しかし、実際の環境では外気温は様々に変化する。同様に温度勾配も変化するのでも、補正だけでは正確な調理対象の温度を計測することはできない。

調理対象に対する外気温変化の影響は、簡単な実験から確認することができる。外気温が 5, 20, 35 [°C] において、70 [°C] で温度制御を行った場合、外気温が変化することで調理対象の温度がどのように変化するのか確認する。この実験における外気温と調理対象の温度の散布図を図 2 に示す。このように、外気温が 5 [°C] の場合の調理対象の平均温度は 74.8 [°C]、同様に外気温が 35 [°C] の場合では 71.6 [°C] となり、外気温の変化によって調理対象の温度に 3.2 [°C] の差が生じる。なおサンプル数はそれぞれ 8 ケで

図 1 調理家電の概略構造

Fig. 1. Structure of a Cooking Household Appliance.

図 2 外気温と調理対象温度との相関図

Fig. 2. Correlation Graph of Room and Cooking Object Temperature.

図 3 組み込み温度制御システムの電気回路モデル

Fig. 3. Electric Circuit Model of Embedded Temperature Control System.

ある。

このような外気温の影響を受けないための対策として、想定するすべての外気温で制御パラメータを求めておき、それらをデータベースに蓄えて、現在の外気温に応じて参照する方法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾なども利用できる。しかしながら、外気温をモニタするための温度センサを追加する必要がある、大量生産型の組み込みシステムでは僅かなコストアップが生産数量分の影響を及ぼすため、望ましい方法ではない。

ここで、本研究の目的を明確にするために、組み込み温度制御システムの電気回路モデル(図 3)を表現し、外気温変化の影響を説明する。ここで、ヒータの熱入力を Q_H 、鍋、フタ等を含む制御対象の外気温に対する熱抵抗と熱容量をそれぞれ R_G 、 C_G 、温度センサの熱抵抗と熱容量をそれぞれ R_S 、 C_S とする。温度基準であるグラウンドは外気温 T_O であるので、外気温の変化が制御対象と温度センサに影

響を及ぼすことが、図3より分かる。このような外気温の影響を受けにくい固定された制御パラメータの組み合わせを求めることが、本研究の目的である。

本研究の方法では、センサの追加などのハードウェアの変更は一切行わず、ソフトウェアである制御パラメータの変更だけで、性能を向上できるのでコストの影響を受けず、組み込み温度制御システムに適している。

3. パラメータ設計法

本節では、タグチメソッドの概要と制御システムへ適用するための方策について示す。

〈3・1〉 タグチメソッド概要 タグチメソッドでは、システムが持つ理想的な振る舞いを基本機能と呼び、原点比例式、

y = βM,.....(1)

として定義する。Mは信号因子と呼ばれる使用者や設計者がシステムに対して印加する入力信号であり、yは出力特性と呼ばれるシステムから得られる出力信号からなるデータである。βはシステムの特性を表す比例定数であり、設計可能なパラメータを持つ。その実現値をA、B、C、...と表し、制御因子と呼ぶ。制御因子には水準があり、通常タグチメソッドで用いられるL18直交表(表1)では、2水準が1個、3水準が7個、合計で8個の制御因子がある。直交表の利用目的は、実験効率の向上のためである。2水準が1個、3水準が7個の組み合わせでは、2¹×3⁷=4,374通りの実験数となるが、それを直交表実験では18通りまで削減する。

直交表に制御因子を割り付けて実験を行う。実験結果の解析は、計量可能な因子である信号因子Mと計測によって得られる出力特性yから、βを求めることから始める。直交表に従って制御因子の水準を変化させると、制御因子に

対応してβも変化する。βの変化は比例定数の傾きの大小、つまり感度の変化である。βの傾きが最も大きい水準の組み合わせが、最も感度の高い組み合わせになる。

しかし、感度だけではロバスト性に対しては不十分である。ロバスト性を考慮するために誤差因子N_r(r=1,...,R)を導入する。誤差因子は、対象とするシステムに影響を及ぼし、かつ設計者が変更することができない因子である。本研究の場合では、外気温の変化が誤差因子になる。外気温の変化は、設計対象の温度制御システムに影響を及ぼし、かつ設計者は外気温の変化を止めることはできない。また、誤差因子は実験数を増やさないために、複数の誤差因子を出力特性が大きくなる方向と小さくなる方向に調合し、N₁、N₂の2水準とする方法が一般的である。誤差因子の割り付けは、制御因子の外側に割り付け、制御因子と誤差因子の交互作用がすべて検出できる配置(図4)とする。これによって、制御因子が誤差因子によって受ける影響を測ることができる。

このように制御因子だけでなく誤差因子を配置した実験結果からβを求めると、同じ制御因子の組み合わせでも、与える誤差因子によってβの値が少なからず変化することとなる(図5)。これは、誤差の不等分散性が繰り返し精度などによる偶然誤差ではなく、意図的に与えられた誤差因子による変化(バラツキ)となる。このような誤差因子のもとでβを評価すれば、誤差因子に対してロバストな制御因子の組み合わせを求めることができる。つまり、与える誤差因子によってβが変化しない、またはβの変化が最も小さくなる制御因子水準の組み合わせが、誤差因子に対してロバストな水準の組み合わせである。以上がタグチメソッドの設計の概要である。(タグチメソッドには、損失関数に

表1 L18 直交表
Table 1. L18 Orthogonal array.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

図4 内側直交表と外側直交表
Fig. 4. Orthogonal Array (Inner and Outer).

図5 誤差因子による入出力関係のバラツキ
Fig. 5. Input/Output Relation Data Spread (Affected by Noise Factors).

図 6 PID 制御器のブロック線図

Fig. 6. Block Diagram of PID Controller.

関する項目も含まれているが、本研究においてはパラメータ設計のみを利用したので説明も割愛する。）

〈3・2〉 タグチメソッドの制御システムへの適用法 設計対象の PID 制御器を用いた組み込み温度制御システムの構成を説明する。制御対象を G 、それを制御するコントローラを C 、 C から G への入力信号を $u(k)$ 、 G から得られる出力信号を $y(k)$ 、目標値を SV 、外乱を d とすると、ブロック線図は図 6 のように表される。ここで、 k はサンプリングを表す。

このような温度制御システムにタグチメソッドを適用するためには、基本機能 (1) 式で表される原点比例式を定義しなければならない。信号因子 M は、設計対象となるシステムへの入力信号であるが、プラント G に対する入力信号 $u(k)$ を信号因子とする方法は用いられない。この理由は図 6 の制御システムでは、入力信号 $u(k)$ と内部パラメータである制御因子、つまり P 、 I 、 D の各パラメータとの間に、

$$u(k+1) = K_P e(k) + K_I T_S \sum e(k) + K_D \frac{1}{T_S} (e(k) - e(k-1)), \dots \dots \dots (2)$$

の関係式が成立するためである。ここで、 K_P は比例ゲイン、 K_I は積分ゲイン、 K_D は微分ゲイン、 T_S はサンプリングタイム、 $e(k)$ は時刻 k における目標値と出力値との偏差 $e(k) = SV - y(k)$ を表す。(2) 式において、 P 、 I 、 D パラメータを変化させれば、入力信号 $u(k)$ も変化する。このように、信号因子と制御因子が独立に調整ができないので、入力信号 $u(k)$ を信号因子 M とすることはできない。

ここで、原点に戻り制御システムの理想機能を考える。制御とは、「注目している対象物に属する注目している動作が、何らかの目標とする動作になるように、その対象物に操作を加える行為」⁽¹⁵⁾ である。これは、本研究で取り扱っている定値制御では、どれだけ時間が経過しても、常に目標値と注目する対象から得られる出力信号が、偏差無く一致することである。このような理想関係にある場合の経過時間と出力信号 $y(k)$ を、基本機能 (1) 式にあてはめる。改めて経過時間を T として、これを信号因子と考えると T は線形に増加する。制御の理想関係にあれば出力信号 $y(k)$ が目標値と一致し定値になるので、 T と同じく出力信号 $y(k)$ の積分値も線形に増加する。これは、出力信号 $y(k)$ の積分値を出力特性 y とすれば、

$$y = \sum y(k) = \beta T, \dots \dots \dots (3)$$

の関係が成立する。図 6 の制御対象とコントローラを含ん

図 7 制御システム設計におけるタグチメソッド基本機能のブロック線図

Fig. 7. Taguchi's Basic Function for Control System Design.

図 8 目標値での折り返し出力信号波形

Fig. 8. Waveform that turned by the SV.

表 2 任意の行の実験結果行列

Table 2. Matrix of Arbitrary Law's Experimental Result.

Noise Factors	Signal Factors			
	M_1	M_2	$\dots$	M_N
N_1	y_{11}	y_{12}	$\dots$	y_{1N}
N_2	y_{21}	y_{22}	$\dots$	y_{2N}
$\vdots$				
N_R	y_{R1}	y_{R2}	$\dots$	y_{RN}

だ組み込み温度制御システム全体を、設計対象のシステム β としたことによって、基本機能 (1) 式が成立するようになった (図 7)。このように信号因子を経過時間とする方法は、化学反応にタグチメソッドを適用する場合⁽¹⁶⁾ によく用いられ、タグチメソッドの指針「実験特性の 2 乗が、エネルギーに比例すること」にも合致している。

ただし、出力信号 $y(k)$ をそのまま積分しても正しく評価できない。これは、制御システムで通常良く見られるハンティング現象を考慮していないためである。ハンティングのある系では、オーバーシュートによる偏差とアンダーシュートによる偏差が相殺されてしまうので、IAE (Integral Absolute Error) による評価ができないためである。そこで、二見ら⁽¹²⁾ の方法と同じく、次のような対策を行う。

$$y_T(k) = \begin{cases} y(k) & \text{if } y(k) \leq SV \\ SV - (y(k) - SV) & \text{if } y(k) > SV \end{cases}$$

このようにして、オーバーシュートを目標値 SV で折り返して、アンダーシュートと等価にする (図 8)。このような

対策を行った出力信号を、折り返し出力信号 $y_T(k)$ とした。 $y_T(k)$ からなる出力特性を y_T として (3) 式に代入し、

$$y_T = \sum y_T(k) = \beta T,$$

を得る。折り返し出力信号 $y_T(k)$ では、オーバーシュートとアンダーシュートが、目標値に対する誤差という点で等価になるので、IAE による評価と同じである。以上のような方策によって、タグチメソッドが制御システムへ適用可能となった。

具体的な設計手順について、簡単に記述する。

- (1) 限界感度法やリミットサイクル法などの従来から用いられている PID パラメータ設計法によって、パラメータを推定する。
- (2) P, I, D の各パラメータを L18 直交表に割り付ける。割り付け方は、従来手法によって推定した値を第 2 水準にして、それより小さな値を第 1 水準、大きな値を第 3 水準とする。
- (3) 誤差因子を設定し、外側直交表に割り付ける。誤差因子は、現実を考えられる両極端な 2 水準とする。
- (4) 直交表に基づいて実験を行う。実験結果データは、表 2 に示す信号因子と誤差因子の 2 元配置データとなる。例えば、誤差因子 $N_1, \dots, N_R$, 信号因子 $M_1, \dots, M_N$ として、直交表の任意の l 行 ($l = 1, \dots, L$) の実験結果行列 $\mathbf{Y}_l$ は、

$$\mathbf{Y}_l = \begin{bmatrix} y_{l11} & y_{l12} & \cdots & y_{l1N} \\ y_{l21} & y_{l22} & \cdots & y_{l2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{lR1} & y_{lR2} & \cdots & y_{lRN} \end{bmatrix}.$$

となる。ここで、出力特性 y_{lm} は誤差因子 N_r のもとでの折り返し信号波形 y_{Tl_r} から、

$$y_{lm} = \sum_{k=M_{n-1}}^{M_n} y_{Tl_r}(k),$$

によって求める ($r = 1, \dots, R, n = 1, \dots, N$)。L18 直交表では $l = 18$ なので、実験結果行列 $\mathbf{Y}_l$ が 18 個求まる。

- (5) 得られた実験結果から最もロバストな制御因子の水準の組み合わせを求める。ロバスト性の評価は、通信工学で用いられる SN 比によって行う。SN 比を η , 感度を β , バラツキの大きさ (ノイズによる影響) を σ とすると、

$$\eta = 10 \log \frac{\beta^2}{\sigma^2},$$

となる。これらの計算方法の詳細は、文献 (2) を参照。

- (6) ロバストな制御因子の水準の組み合わせで確認実験を行い、必要があればパラメータの微調整を行う。

4. 実験

〈4・1〉 実験方法 本研究で用いた実験装置の概略を図 9 に示す。鍋の中に被加熱物として水 1,200 [ml] を入れて、制御用温度センサ部 70 [°C] で温度制御を行う。水中

図 9 実験装置

Fig. 9. Experimental System.

表 3 制御因子 (P, I, D), 誤差因子 (O. T. = Outside temperature), 信号因子 (E. T. = Elapsed time) の一覧

Table 3. A List of Control Factors, Noise Factors, and Signal Factors.

Control Factors	Level		
	1	2	3
A: e	—	—	—
B: e	—	—	—
C: P	0.4	1.2	3.6
D: e	—	—	—
E: I	33.0	99.0	297.0
F: e	—	—	—
G: D	8.0	24.0	72.0
H: e	—	—	—
Noise Factors	Level		
	1	2	
N: O. T.	5 [°C]	30 [°C]	
Signal Factors	Level		
	1	2	3
T: E. T.	400 [s]	800 [s]	1200 [s]

と制御用温度センサの側近に本研究の制御性能評価用センサを設置し、評価用センサから得られるデータは温度計測用インターフェースを備えたパソコンによって計測される。

次に、直交表実験について示す。L18 直交表にリミットサイクル法で求めた PID パラメータを、制御因子第 2 水準に割り付け、それらの 3 分の 1 と 3 倍の値をそれぞれ第 1 水準、第 3 水準に割り付ける。さらに、誤差因子として 2 水準、室温 5, 30 [°C] をそれぞれ N_1, N_2 として外側直交表に割り付ける。同じく外側直交表に信号因子を 3 水準、経過時間 400, 800, 1,200 [s] をそれぞれ M_1, M_2, M_3 として割り付けた。制御因子、誤差因子、信号因子の一覧を表 3 に示す。

後は、直交表に従って実験を行う。18 通りの組合せを誤差因子数 2 の条件で実験を行うので、総実験数は 32 となる。

〈4・2〉 実験結果 直交表実験の結果から、SN 比とそのグラフ表現である要因効果図を求めた。SN 比を表 4 に、要因効果図を図 10 に示す。PID パラメータを割り付けた因子は、C, E, G であるので、これらの因子の SN 比を見ると、C3, E1, G2 が SN 比の高い組み合わせとなる。これは、PID パラメータでは $P = 3.6, I = 33.0, D = 24.0$ となり、この組み合わせが外気温の変化に強いことになる。

表 4 SN 比の計算結果 [db]

Table 4. Result of Computing the S/N Ratio [db].

	Control Factors							
	A: e	B: e	C: P	D: e	E: I	F: e	G: D	H: e
1	-0.46	-0.10	-1.27	-0.10	1.88	0.14	0.20	0.08
2	0.46	-0.63	0.28	-0.17	1.28	-1.08	0.24	-0.14
3	—	0.74	0.99	0.26	-3.16	0.94	-0.45	0.05

図 10 要因効果図

Fig. 10. Graph of Factorial effects.

図 11 タグチメソッドによる出力波形

Fig. 11. Output Signals (Taguchi's Robust Design Method).

次に、求められた PID パラメータがどれだけ外気温の変化に強いかを確かめるための実験を行った。実験方法は直交表実験と同様に、外気温 5, 30 [°C] の 2 条件で、制御用温度センサ部 70 [°C] に被加熱物を制御したときの観測信号の波形を比較する。タグチメソッドによる PID パラメータの出力波形を図 11 に示し、同様にリミットサイクル法での出力波形を図 12 に示す。この結果から、タグチメソッド手法では外気温 5 [°C] と 30 [°C] の波形は定常時平均して 0.3 [°C] と多少の違いはあるものの非常に似た波形を示している。それに対して、リミットサイクル法の波形は定常時平均して 2.4 [°C] とタグチメソッドによる方法に対して大きな違いが見られる。

また、本研究で提案した IAE による制御性能の評価結果を図 13 に示す。リミットサイクル法による IAE は、外気温 5, 30 [°C] の場合にそれぞれ 371.1, 564.6 となっている。それに対してタグチメソッドによる方法では、外気温 5, 30 [°C] においてそれぞれ 189.8, 284.4 であり、リミットサイクル法より小さいことが分かる。また、外気温 5 [°C] と 30 [°C] の IAE の差、つまり外気温の変化に対するロバ

図 12 リミットサイクル法による出力波形

Fig. 12. Output Signals (Limit Cycle Method).

図 13 リミットサイクル法とタグチメソッドの IAE の比較 (0-1,200 [s])

Fig. 13. Comparison of IAE (0-1,200 [s]), Limit Cycle Method and Taguchi's Robust Design Method.

スト性を見ても、リミットサイクル法の 193.5 に対して、タグチメソッドによる方法は 94.6 であり、100 近くも小さいことが分かる。なお、本研究の IAE は 0 [s]-1,200 [s] までの積算値である。

以上のように、制御パラメータ設計にタグチメソッドを利用することで、外気温の変化に強い組み込み温度制御システムが得られることが確認できた。

5. おわりに

本研究では、外気温の変化に強い組み込み温度制御システムの制御パラメータ設計にタグチメソッドの適用法を提案し、実機による実験によってその効果を確認した。提案手法は、外気温変化のような外乱に対してロバストな制御性能を得ることを目的としたパラメータ設計法であるので、温度制御システム以外にも様々な環境下で使用されることが想定される組み込みシステムにおいて、種々の応用が可能であると考えられる。

今後の研究課題としては、PID 制御よりパラメータ数が多くチューニングの困難な一般の制御則に適用し、性能の向上を目指すことや、コストに影響を与えないハードウェアの情報 (センサの位置など) を設計パラメータに追加してロバスト性を向上させることなどが考えられる。また、応用分野を広げるという観点から温度制御以外の種々の制御システムへの適用も重要である。

提案手法の特徴は実験結果を利用する設計手法であるタグチメソッドを制御系の設計に適用するものであり、直交表に割り付けた制御因子のロバストな組み合わせを求めるものである。これらの組み合わせは、直交表に割り付けた3水準の離散的なパラメータの組み合わせであるので、水準数を増やすことでよりピークに近い組み合わせを求める設計手法の研究や一般に広く研究されているモデルベースのロバスト制御（例えば H_∞ 制御など）との性能比較も今後の重要な課題と考えている。

（平成17年11月24日受付，平成18年6月21日再受付）

文 献

- (1) 高田広章他：「リアルタイム OS と組み込み技術の基礎」，CQ 出版社 (2003)
- (2) 田口玄一：「品質工学の数理」，日本規格協会 (1999)
- (3) C. Yoshimura, H. Ishikawa, S. Furuta, H. Aoki, and S. Sugiyama: "Development, Strength and Functional Evaluation of Plastic Microneedle Array Fabricated by Injection Molding", *IEEJ Trans. SM*, Vol.124, No.10, pp.387-392 (2004)
- (4) Y. Okada and Y. Kawase: "Optimization of Interior Permanent Magnet Motor by Quality Engineering and Multivariate Analysis", *IEEJ Trans. IA*, Vol.123, No.12, pp.1516-1522 (2003-12) (in Japanese)
岡田幸弘・河瀬順洋：「品質工学と多変量解析法による磁石埋め込み形モータの最適設計」，電学論 D, **123**, 12, pp.1516-1522 (2003-12)
- (5) Y. Enomoto, M. Kitamura, Y. Motegi, T. Andoh, M. Ochiai, and T. Abukawa: "Study on a New Combination Method and High Efficiency Outer Rotor Type Permanent Magnet Motors", *IEEJ Trans. IA*, Vol.124, No.6, pp.529-535 (2004-6) (in Japanese)
榎本裕治・北村正司・茂木康彰・安藤隆司・落合 誠・蛇川俊美：「新締結方法を採用した外転型磁石モータの小形・高効率化」，電学論 D, **124**, 6, pp.529-535 (2004-6)
- (6) 須田信英：「PID 制御，システム制御情報ライブラリー」，朝倉書店 (1992)
- (7) 重政 隆：「セルフチューニング PID 制御の動向」，システム/制御/情報，Vol.42, No.1, pp.35-40 (1998)
- (8) 北森俊行：「I-PD 制御方式の原理と設計法」，システム/制御/情報，Vol.42, No.1, pp.7-17 (1998)
- (9) M. Kotaki, T. Yamazaki, T. Matuba, K. Kamimura, and S. Kurosu: "A Tuning Method for PID Controller under Consideration of Changes in Plant Characteristics", *Trans. of SICE*, Vol.41, No.2, pp.177-179 (2005-2) (in Japanese)
古瀧雅和・山崎敬則・松葉匡彦・神村一幸・黒須 茂：「特性変動分を考慮に入れた PID コントローラの調整」，計測自動制御学論，**41**, 2, pp.177-179 (2005-2)
- (10) Y. Ohta, J. Li, K. Tagawa, and H. Haneda: "Design of PID Controller Satisfying Robust Performances", *Trans. of ISCIE*, Vol.11, No.1, pp.26-34 (1998-1) (in Japanese)

太田有三・李 静・田川聖治・羽根田博正：「複数のロバスト仕様をみたす PID 制御器の設計」，システム制御情報学論，**11**, 1, pp.26-34 (1998-1)

- (11) C.-H. Hsieh, J.-H. Chou, and Y.-J. Wu: "Optimal Takagi-Sugeno Fuzzy Gain-Scheduler Design Using Taguchi-MHGA Method", *JSME International Journal Series C*, Vol.44, No.1, pp.143-155 (2001-1)
- (12) S. Futami, A. Zenri, T. Kaneda, H. Hamamatsu, and T. Tsuji: "Optimal Parameter Design of a Position System Incorporated an Acceleration Feedback", *JSPE*, pp.1157-1158 (2004) (in Japanese)
二見 茂・善利淳臣・金田武志・浜松 弘・辻 輝生：「加速度制御を付加した位置決め制御系の最適パラメータ設計」，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.1157-1158 (2004)
- (13) J. Ohta and S. Yamamoto: "Database-Driven Tuning of PID Controllers", *Trans. of SICE*, Vol.40, No.6, pp.664-660 (2004-6) (in Japanese)
太田 純・山本 茂：「PID 制御器のデータベース駆動型チューニング」，計測自動制御学論，**40**, 6, pp.664-660 (2004-6)
- (14) K. Takao, T. Yamamoto, and T. Hinomoto: "A Design of Memory-Based PID Controllers", *Trans. of SICE*, Vol.40, No.9, pp.898-905 (2004-9) (in Japanese)
高尾健司・山本 透・雛元孝夫：「Memory-Based 型 PID コントローラの設計」，計測自動制御学論，**40**, 9, pp.898-905 (2004-9)
- (15) 大須賀公一・足立修一：「システム制御へのアプローチ」，コロナ社 (1998)
- (16) 久米昭正 他：「化学・薬学・生物学の技術開発（品質工学応用講座）」，日本規格協会 (1999)

鈴木 新（正員）1998 年 3 月和歌山大学卒業。同年 4 月象印マホービン（株）入社，現在に至る。2006 年 3 月奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。博士（工学）。主として，コンピュータ制御システムの設計手法，品質工学の制御系への応用に関する研究に従事。システム制御情報学会の会員。

杉本 謙二（非会員）1982 年 3 月京都大学大学院数理工学専攻修士課程修了。同年 4 月三菱電機（株）入社。1985 年 7 月京都大学工学部数理工学科助手，1989 年 10 月岡山大学工学部情報工学科助教授，1995 年 5 月名古屋大学大学院工学研究科助教授，1999 年 11 月奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授となり現在に至る。線形システムの制御理論に関する研究に従事。工学博士。1997 年システム制御情報学会論文賞受賞。IEEE，システム制御情報学会，計測自動制御学会，電子情報通信学会，日本航空宇宙学会，人工知能学会などの会員。