Model-Based Temperature Control of Cooking Appliance Using Softsensor

Yu Kawamura Non-member (Nara Institute of Science and Technology)
 Kentaro Hirata Non-member (Nara Institute of Science and Technology)
 Arata Suzuki Member (ZOJIRUSHI Corporation)
 Kenji Sugimoto Non-member (Nara Institute of Science and Technology)

Keywords: cooking appliance, modeling, temperature control, observer, PID control

1. Introduction

In this paper, a model-based temperature control method for cooking appliances is proposed. In cooking appliances, to keep the specified temperature profile is the most important design specification. However, due to the structural and sanitary problem, it is impossible to measure the temperature of the rice during the cooking. Thus, the objective of the temperature control of the rice cooker is to track the reference temperature profile without the direct measurement of temperature. In this paper, we propose the following control scheme: First a mathematical model of the temperature dynamics of the rice cooker is derived. Then we construct an observer to estimate the rice temperature. Based on this estimated value, a feedback control is attempted (Fig.1).

Fig. 1. Structure of Proposed Control System

2. Modeling

The simplest model of cooking appliances would be the second order one since the temperature points of our interest are the center of the cooking object and the outside of the inner vessel where the built-in sensor is located. A schematic diagram of the rice cooker is shown in Fig.2. Let $\mathbf{x} = [\theta_m \ \theta_c]^T$, $\mathbf{u} = [\theta_a \ q]^T$. Then from the heat balance and the heat transfer models, a state-space representation is given as

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

Fig. 2. Structure of Proposed Control System

where

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ma}+R_{mc}}{C_m V_m R_{mc}} & -\frac{1}{C_m V_m R_{mc}} \\ \frac{1}{C_c V_c R_{mc}} & -\frac{C_m V_m R_{mc}}{R_{ca}+R_{mc}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_m V_m R_{mc}} & \frac{1}{C_m V_m} \\ \frac{1}{C_c V_c R_{ca}} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \ 0]$$

3. Feedback Controller Design

Based on the mathematical model (1), and identified parameters, we design the following observer to estimate θ_c :

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)) \quad (2)$$

where $\hat{\mathbf{x}}(t)$ and $\mathbf{L}$ denote the estimate of $\mathbf{x}(t)$ and the observer gain to be designed.

Then to achieve the tracking of the estimated temperature of the cooking object to the reference trajectory $\mathbf{x}(t)$, a PID controller

$$u(t) = K_p \left(\bar{e}(t) + \frac{1}{T_I} \int \bar{e}(t) dt + T_D \frac{d\bar{e}(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\bar{e}(t) = r(t) - y(t) \quad (4)$$

is employed.

4. Experiment

We demonstrate superiority of the proposed method via an experiment. The result of the experiment in Fig.3 reveals a good tracking performance.

Fig. 3. Experimental results

ソフトセンサを用いた調理家電のモデルベース温度制御

非会員 川村 雄* 非会員 平田健太郎*
正員 鈴木 新** 非会員 杉本 謙二*

Model-Based Temperature Control of Cooking Appliance Using Soft Sensor

Yu Kawamura*, Non-member, Kentaro Hirata*, Non-member, Arata Suzuki**, Member,
Kenji Sugimoto*, Non-member

In this paper, a model-based temperature control method for cooking appliances is proposed. Due to structural and sanitary limitations, no sensor for the temperature of the cooking object is equipped in general. After constructing a state space model for the heating process and identifying the model parameters for each distinct volume of the cooking object, a state observer is designed. By using this observer as a softsensor, feedback temperature control is implemented instead of the conventional model-less on-off pattern control. Its high tracking performance is demonstrated via numerical examples and experiments.

キーワード：調理家電，モデリング，温度制御，オブザーバー，PID 制御。

Keywords: cooking appliance, modeling, temperature control, observer, PID control

1. はじめに

従来より家電製品は厳しい価格競争にさらされているが、近年、消費動向の二極化によって、普及価格帯を大きく超えた製品に対する需要も高まってきている。その代表例のひとつに炊飯器がある。誘導加熱 (IH) 方式はもとより、新素材釜の採用⁽¹⁾や圧力⁽²⁾、超音波⁽³⁾を併用した炊飯など、様々なアプローチが採られ、市場の活性化に貢献している。もちろん、これは米を主食とする我が国の消費者心理と強く結びついているものと考えられるが、一方で米食文化はアジア一円に広がっているため、高付加価値化による競争力強化はグローバルな観点からも重要である。

制御技術の側面から見た場合、炊飯は加熱プロセスに他ならない。したがって、厳密な温度管理こそが重点課題と考えられるが、現状では周辺温度のセンシングに基づくパターン制御 (on-off) が主として用いられており、最適制御理論やロバスト制御理論などに代表される先進的な制御理論はほとんど使われていない。これはプロセス産業や移動

体、ロボット制御などの分野との顕著な違いである。このようなモデルレスの、フィードフォワードに近い制御方式が使い続けられてきた背景としては、a) 構造的あるいは衛生面からの制約によって調理対象物の温度が直接計測できないこと、b) 新製品の投入ピッチが早く、前述の他の産業分野に比べて開発期間が短いこと、c) 長いコスト競争の影響で、基礎的な制御技術に対する投資よりは、前出のような消費者心理に直接訴えかける技術開発に重きがおかれてきたこと、などが考えられる。

冒頭で述べたような最近の消費動向の変化は、c) の状況を改善するための契機を与えているといえよう。そこで本論文では、調理対象物の温度に基づいた、炊飯器の温度制御方式について検討し、実験による効果の検証をおこなう。具体的には、制御工学では広く用いられている状態推定器 (オブザーバ) をソフトセンサ⁽⁴⁾⁽⁵⁾として利用することで、従来は未知であった調理対象物温度をリアルタイムで検出し、これと目標温度との偏差に基づいたフィードバック制御により厳密な温度プロファイルの管理を実現する。これは a) に対する本質的な対策である。また状態推定器を用いることは、とりもなおさずモデルベースへの移行を意味しており、制御の基本的なスタンスを大きく変えるものである。モデルベースの制御系設計の導入は、現状の問題点 b) に対しても有効に機能する可能性を秘めている。実際、現状での制御ロジックのチューニングは、様々な条件下での膨大な数の実験結果に基づいて、巨大な IF-THEN ルールテーブルをメンテナンスすることによって行なわれてお

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, 8916-5 Takayama-cho, Ikoma, Nara 630-0192

** 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

り、この観点からは効率的とはいえない。基本的な温度計算モデルを確立し、多品種への対応を部分的なパラメータの再同定によっておこなうことができれば、環境条件を変えた場合の検討はシミュレーション上で速やかに実行できる。これはCAE(Computer Aided Engineering)におけるrapid prototypingに他ならず、設計の効率化に関して圧倒的な効果を持つものである。

2. 炊飯器の温度モデル

炊飯器の温度ダイナミクスに関して、特徴的なのは以下の点である：

- (1) 制御したいのは調理対象物の温度であるが、構造上、衛生上の問題から対象物温度は直接計測できない[†]。
- (2) 調理対象物の量によって、熱容量等のモデルパラメータが変化する。
- (3) 製品バラツキ、外気温、経年変化等の影響を受ける。ここでは、項目1については対象の数値モデルに基づく状態推定器(オブザーバ)を構成することで対処し、項目2については炊飯器では調理対象物の量が離散的に変化することに着目したゲインスケジューリングをおこなうことで対処する。項目3については、今後、フィードバックによって、on-off制御よりは影響が減っていると考えられるが、より明示的には、設計法のロバスト化、適応化によって対応可能と考えられる。

制御対象は空間的な温度分布をもつ分布定数系であるが、モデリングの容易さ、将来的なマイコンへの実装を考え、ここでは有限個の代表点の温度を状態とする集中定数系としてモデル化することを考える。項目1に述べたように、温度センサは容器の外側に設置されている(Fig. 1)。

したがって調理対象物と容器部分の温度分布を表現する最も単純なモデルとして、本研究においては、容器の温度 $\theta_m(t)$ と、調理対象の温度 $\theta_c(t)$ を代表点とする2次システムを考える。熱の供給は容器の下部から電磁誘導加熱によっておこなわれる。容器の外側に接する温度センサと外気温 $\theta_a(t)$ を測定できる温度センサが取り付けられている。Fig. 1中の記号が示す物理量をTable 1に示す。

調理対象の沸点付近の物理現象は相変化を伴うため、それ以下の温度域でのダイナミクスとは大きく異なった複雑なものになると考えられる。そこで今回はモデル化の第一段階として、沸点よりも低温部(～70℃程度)のダイナミクスを考える。この温度域は炊飯時間の前半での予熱工程に対応している。ご飯の甘みや旨さを引き出すためには、米の胚乳組織に十分に吸水させ、これを加熱することでデンプンのアルファ化を促進させる必要がある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。したがって通常は1時間程度、米を浸漬させて吸水を行うべきであるが、実際にはそのような時間をとるのは難しく、洗米後

図1 単純化した炊飯器

Fig. 1. Simplified rice cooker

表1 変数とパラメータ

Table 1. List of variables and parameters

Variables	Physical quantity
$\theta_c(t)$	Temperature of cooking object [°C]
$\theta_a(t)$	Atmospheric temperature[°C]
$\theta_m(t)$	Temperature of pan[°C]
C_c	Specific heat of cooking object [kJ/kg·°C]
C_m	Specific heat of pan [kJ/kg·°C]
V_c	Mass of cooking object [kg]
V_m	Mass of pan [kg]
$q(t)$	Input power[kW]
R_{mc}	Heat resistance between pan and cooking object [°C/kW]
R_{ca}	Heat resistance between cooking object and external [°C/kW]
R_{ma}	Heat resistance between pan to external [°C/kW]

すぐに調理を開始することが多い。そのため、予熱工程として60℃以下の比較的低温でゆっくり加熱し、吸水速度を高めて短時間でアルファ化を促進させる。予熱工程において米が高温にさらされると、米粒表層が糊化して吸水を妨げるためにアルファ化が起こらないため、この工程での温度管理は高品質な調理と炊飯の短時間化にとって重要である。さらに現段階では簡単のため、実験中の調理対象は水のみとしている。

〈2・1〉モデリング 以下では、制御対象である炊飯器の温度ダイナミクスの状態空間モデルを導出する。容器に流入する熱量はヒータの供給熱量 $q(t)$ であり、容器から流出する熱量は外気への放熱 $q_{ma}(t)$ および調理対象物への熱供給 $q_{mc}(t)$ である。従って、熱収支から容器に供給される正味熱量は

$$q(t) - q_{ma}(t) - q_{mc}(t)$$

となる。ここで異なる温度領域間での熱量の移動を熱抵抗を用いて表すと

$$q_{ma}(t) = \frac{1}{R_{ma}}(\theta_m(t) - \theta_a(t)),$$

$$q_{mc}(t) = \frac{1}{R_{mc}}(\theta_m(t) - \theta_c(t))$$

となるので、容器の温度 $\theta_m(t)$ の変化率は

$$\dot{\theta}_m = \frac{1}{C_m V_m} \left(q - \frac{\theta_m - \theta_a}{R_{ma}} - \frac{\theta_m - \theta_c}{R_{mc}} \right)$$

[†] 複数の赤外線センサを搭載して、予熱工程の温度管理を行なう製品⁽¹⁾もあるが、大きなコストアップ要因となるため例外的である。

図 2 同定入力 ($V_c=1.44$)

Fig. 2. Input for parameter identification ($V_c=1.44$)

となる⁽⁶⁾。ただし記述の簡略化のため、時間関数の (t) を省略した。同様に調理対象の温度 $\theta_c(t)$ について

$$\dot{\theta}_c = \frac{1}{C_c V_c} \left(\frac{\theta_m - \theta_c}{R_{mc}} - \frac{\theta_c - \theta_a}{R_{ca}} \right)$$

を得る。状態変数を $\mathbf{x} = [\theta_m \ \theta_c]^T$ とする。前述のように、本論文で実験の対象としている炊飯器には外気温センサが内蔵されている。したがって θ_a は既知なので入力の一部と見做し、 $\mathbf{u} = [\theta_a \ q]^T$ として式を整理すると、状態方程式は

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ma}+R_{mc}}{C_m V_m R_{mc}} & -\frac{1}{C_m V_m R_{mc}} \\ \frac{1}{C_c V_c R_{mc}} & -\frac{R_{ca}+R_{mc}}{C_c V_c R_{mc} R_{ca}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_m V_m R_{ma}} & \frac{1}{C_m V_m} \\ \frac{1}{C_c V_c R_{ca}} & 0 \end{bmatrix}$$

となり、出力方程式はセンサーによって観測できる状態量が θ_m のみであることから

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

となる。以上により状態空間モデル (1) 式, (2) 式が得られた。

〈2・2〉 パラメータ同定 次にこの状態空間モデルに含まれるパラメータ $C_m, C_c, V_m, V_c, R_{mc}, R_{ca}, R_{ma}$ の同定法について考える。釜の質量 V_m は不変であるので、事前の計測により決定できる。調理対象物の質量 V_c は、項目 2 で述べたように調理の状況に伴い変化する。通常この V_c を計測するためのセンサは取り付けられておらず、何らかの推定が必要である。比熱 C_m, C_c は本来材質固有のものであるが、ここでは空間的分布や複合部材などを代表させた値であるので、状況に応じたチューニングを要する。同様に熱抵抗 R_{mc}, R_{ca}, R_{ma} も、温度領域間の接触面積等に依存するため、 V_c と共に変化する。

しかし、炊飯器においては、 V_c は連続的に変化する量ではなく、1 合、2 合といった具合に予め定まったパターンで離散的に変化する、という際立った特徴がある。したがって、有限個の V_c に対する各パラメータの値をオフラインで同定しておき、調理時に何らかの手段で V_c を判別することにより、対象の正確なパラメータを決定することができる。

図 3 $V_c=0.72$ のときの時間応答

Fig. 3. Time response for $V_c=0.72$

図 4 $V_c=1.08$ のときの時間応答

Fig. 4. Time response for $V_c=1.08$

図 5 $V_c=1.44$ のときの時間応答

Fig. 5. Time response for $V_c=1.44$

図 6 $V_c=1.8$ のときの時間応答

Fig. 6. Time response for $V_c=1.8$

表 2 シミュレーション条件

Table 2. Simulation condition

V_c	$\theta_a(0)$	$\theta_m(0)$	$\theta_c(0)$
0.72	28	25.5	25.5
1.08	28	27.8	26.7
1.44	27	25.8	24.3
1.8	27.8	25.5	25

ここでは V_c は 0.72, 1.08, 1.44, 1.8[kg] の 4 個の離散値をとるとして、以下の手順でパラメータ同定をおこなった。まず製品の炊飯器の釜に V_c だけ調理対象物 (今回は

表 3 パラメータの同定値

Table 3. Identified values of parameter

V_c [kg]	V_m [kg]	C_m [kJ/kg·K]	C_c [kJ/kg·K]	R_{mc} [K/kW]	R_{ca} [K/kW]	R_{ma} [K/kW]
0.72	0.72	3.64	7.41	7.46	7.33×10^4	1.15×10^3
1.08		3.57	7.27	7.61	7.48×10^4	1.32×10^3
1.44		3.57	7.27	7.61	7.48×10^4	1.33×10^3
1.8		3.57	7.27	7.61	7.48×10^4	1.06×10^3

水)を入れる。調理対象物温度を計測するために熱電対を容器中央部の水中に支持棒を用いて固定する。容器外側の接触センサと外気温センサの出力は制御回路基盤上から信号を取り出す。さらに、製品に実装されている制御ロジックに従って加熱されるときヒータ出力指令値も基盤上から信号を取ってモニタする。そして炊飯器を炊飯モードで動作させ、調理対象物を加熱する。このとき得られたヒータ出力指令値を用いて、実験時の θ_c, θ_m の温度変化を最もよく説明するパラメータ群をカーブフィッティングから求めた(すなわち、ここでおこなった同定は閉ループ同定である)。同定入力例として $V_c = 1.44$ [kg] の時のものを Fig. 2 に、同定した各パラメータの値を Table 3 に示す。そして、同定したパラメータを用いたモデルによるシミュレーションと実験結果の比較を Figs. 3-6 に示す。ただし、シミュレーションの条件は Table 2 のとおりであり、 $\theta_a(t)$ は表中の $\theta_a(0)$ の高さのステップとして与えた。

3. 制御系設計

この節では、得られた状態空間モデル (1), (2) を用いてフィードバック制御系を設計することを考える。制御目的は調理対象物の温度 $\theta_c(t)$ をあらかじめ定められた目標温度の時間関数 $r(t)$ に追従させることである。前述のように市販の炊飯器には、調理対象物の温度を直接計測するためのセンサは取り付けられていない。そこで、オブザーバを構成し、 θ_c を推定する。得られた推定値と目標温度の差に基づいて、PID 制御をおこなう (Fig. 7)。なお、本節の設計例は $V_c = 1.44$ [kg] のときのパラメータを用いた場合である。

〈3・1〉オブザーバの設計 ここでは $\theta_c(t)$ を推定するためにオブザーバ

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \cdots \cdots (3)$$

を構成する。ここで、 $\hat{x}(t)$ と L はそれぞれ $x(t)$ の推定値とオブザーバゲインを表す。可観測性行列を M_o とすると、状態空間モデル (1), (2) より

$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{R_{ma}+R_{mc}}{C_m V_m R_{mc} R_{ma}} & \frac{1}{C_c V_c R_{mc}} \end{bmatrix}$$

である。rank $M_o = 2$ よりこのシステムは可観測であり、出力フィードバック $A-LC$ により任意の極配置が可能である。オブザーバの極が -1 と -1.5 となるようにオブザーバゲイン L を設計すると $L = \begin{bmatrix} 2.4361 & 28.7765 \end{bmatrix}$ となる。推定誤差を $e = x - \hat{x}$ で定義する。このオブザーバゲイン

図 7 提案手法

Fig. 7. Structure of Proposed Control System

図 8 推定誤差

Fig. 8. Estimation error

を用い、初期誤差 $e(0) = [-10 \ 10]^T$ から推定を開始した場合の推定誤差 $e(t)$ の時間応答を Fig. 8 に示す。推定誤差が収束するまでに約 7 [sec] ほどかかっているが、次節で見るように対象システムの時定数はおよそ 1.7×10^4 [sec] と非常に大きいため、この収束時間は十分に短いと考えることができる。 V_c の値によって、システムのパラメータ行列は変化するために、上記のオブザーバゲイン L も各 V_c の値によって再設計されなければならない。

〈3・2〉PID 制御器の設計 前述のとおり、推定された温度を目標温度に追従させるために PID 制御器

$$u(t) = K_p \left(\bar{e}(t) + \frac{1}{T_I} \int \bar{e}(t) dt + T_D \frac{d\bar{e}(t)}{dt} \right) \cdots (4)$$

$$\bar{e}(t) = r(t) - y(t) \cdots \cdots (5)$$

を使用する。パラメータ K_p, T_I, T_D のチューニングに際しては、制御対象のステップ応答より PID ゲインを決定する CHR 法⁽⁹⁾を用いる。特に、今回の制御対象は冷却機能を持たないため、オーバーシュートが発生すると制御性能が著しく劣化する。このため、設定値変更に対するオーバーシュートが 0 となるような CHR 法の調整則を用いた。システム (1), (2) のステップ応答から、定常ゲイン K 、時定数 T 、むだ時間 h の値を定めると

$$K = 1324.5 \quad T = 1.73 \times 10^4, \quad h = 15$$

となり、制御器のパラメータは $K_p = 0.6T/(Kh) = 0.52$, $T_I = T = 17300$, $T_D = 0.5h = 7.5$ となる。制御対象が積分器に近い特性を持っているため、積分時間 T_I が非常

に大きな値となっている。このため、積分ゲインは小さくなるが、これはあえて制御器側で積分補償せずとも、制御対象がもともと有している積分特性によってサーボ性能が達成できるということを示唆している。上記のステップ応答は V_c に依存して変化するので、PID ゲインも各 V_c の値によって再設計されなければならないことに注意する。

4. 数値シミュレーション

本節では従来法と提案法の数値シミュレーションを行い、提案手法の有効性の確認を行う。

〈4・1〉 従来法 従来多く用いられている温度制御に on-off 制御がある。これは容器に取り付けられた温度センサの出力が上限値 T_{upper} を超えた場合はヒータをオフにし、センサの出力が下限値 T_{lower} を超えた場合にはヒータをオンにするという単純なものである。ここでは、この on-off 制御のシミュレーションをおこなう。調理対象物の目標温度履歴には Fig. 9(a) の破線で表される参照温度を用い、 T_{upper}, T_{lower} は目標温度 ± 5 [°C] とした。外気温 $\theta_a(t) \equiv 27$ [°C]、容器の初期温度を 25.8 [°C]、調理対象物の初期温度を 24.8 [°C] とした。シミュレーション結果を Fig. 9 に示す。炊飯器には冷却機能がなく保温効果も高いため、一旦生じたオーバーシュートが長時間にわたって持続する様子が見て取れる。

〈4・2〉 提案法 次に提案手法のシミュレーションを行う。ここでは、現実のヒータ出力に関する制約を考慮して、PID 制御器のあとに上下限値をそれぞれ u_{max}, u_{min} とする飽和要素を挿入する。設計したオブザーバゲイン (6) と PID ゲイン (10) を用いて、Fig. 7 に示される閉ループ系のシミュレーションをおこなう。調理対象物の目標温度

図 9 シミュレーション結果 (従来法)
Fig. 9. Simulation results (conventional)

図 10 シミュレーション結果 (提案手法)
Fig. 10. Simulation result (proposed method)

履歴は従来法のとときと同様に Fig. 10(a) の破線で示されるものを用いる。また、入力飽和限界 $u_{max} = 1.6, u_{min} = 0$ で与えられるものとし、初期値や外気温 $\theta_a(t)$ は従来法のシミュレーションで用いたものを用いる。このときの結果を Fig. 10 に示す。良好な追従性能が得られていることがわかる。また、両手法の目標温度との偏差を Fig. 11 に示す。

5. 実験

〈5・1〉 実験方法 本研究で用いた実験環境を Fig. 12 に示す。炊飯器は象印製 NP-JP10 を用いた。鍋の中に V_c [kg] の調理対象物 (今回は水) を入れる調理対象物の中央に T 型熱伝対を浸し、熱電対のもう一方をデータロガー (GRAPHTEC 製 midi LOGGER GL200) に接続し、調理対象物の温度計測を行った。

今回使用した炊飯器には on-off の 2 値信号によって駆動するタイプの IH (Induction Heater) が使用されている。そこで、PID 制御器から出力される連続的な制御入力とのこぎり波の差をコンパレータに通して、PWM 信号に変換した。制御系の実装には MATLAB/SIMULINK®, Real-Time Workshop® およびデジタルコントローラ (Inteco 社製 RT-DAC/USB) を用いた。ここでは、目標

図 11 追従誤差
Fig. 11. Tracking state error

図 12 実験環境
Fig. 12. Experimental setup

表 4 実験条件

Table 4. Experimental condition

V_c	θ_a	K_p	T_I	T_D	L	
0.72	24.5	28	25.5	0	0.95	0.22 T
1.08	25	28	27.8	0	0.95	0.38 T
1.44	25	27	25.8	0	0.95	0.46 T
1.8	24.5	27.8	25.5	0	0.95	0.50 T

図 13 実験結果 ($V_c=0.72$)Fig. 13. Experimental result for $V_c=0.72$ 図 14 実験結果 ($V_c=1.08$)Fig. 14. Experimental result for $V_c=1.08$ 図 15 実験結果 ($V_c=1.44$)Fig. 15. Experimental result for $V_c=1.44$ 図 16 実験結果 ($V_c=1.8$)Fig. 16. Experimental result for $V_c=1.8$

温度入力を $r(t) \equiv 40$ [°C] とし, V_c が 0.72, 1.08, 1.44, 1.8 の 4 つの値をとるものとして実験を行った。実験のサンプリング時間は 0.1[sec] であり, 用いた PID ゲインとオブザーバゲイン L を Table 4 に示す。

〈5・2〉 実験結果 実験結果を Figs. 13-16 に示す。それぞれ (a) が水の温度の時間変化, (b) が定常偏差, (c) が PWM 信号に変換された後の制御入力を表す。良好な追従性能が得られていることがわかる。

〈5・3〉 推定精度 図 17 にオブザーバによる調理対象物の温度推定の誤差を示す。過渡状態では誤差が大きいものの, 定常値では良好な推定精度が得られていることがわかる。ほかの V_c についても同程度の推定精度が得られて

図 17 推定誤差 ($V_c = 1.44$ [kg])Fig. 17. Estimation error ($V_c = 1.44$ [kg])

いるが, 煩雑となるためここでは結果を省略する。

〈5・4〉 容量の誤判定に関する検討 上記の結果から, V_c の判別ができれば, 提案手法によって高精度な温度制御

図 18 容量の誤判定時の実験結果

Fig. 18. Experimental result under mismatch of V_c

が実現できることが分かった。この V_c の分類は、容量判別とよばれる、炊飯器の技術開発上の重要課題になっている⁽¹⁰⁾。そこで、 V_c の推定を誤った場合の実験を行い、その影響を検討する。ここでは、調理対象物の容量が $V_c = 0.72$ [kg] の状況で、 $V_c = 1.8$ [kg] に対する数理モデルを用いた場合について実験を行った (Fig. 18)。 V_c の判定が正しい場合の実験結果 (Fig. 13) と比較すると、追従性能が劣化していることが分かる。この結果より、提案手法の実用化にあたっては、容量判別精度の向上が不可欠であるといえる。

6. おわりに

本稿では、調理家電、とりわけ炊飯器の温度制御について検討した。まず、炊飯器の温度ダイナミクスについて整理し、炊飯器の数理モデルを導出した。制御したい調理対象物の温度を直接計測できない問題を解決するために、得られた数理モデルにもとづいたオブザーバを構成し、鍋の温度から調理対象物の温度を推定し、得られた推定値を用いてフィードバック制御を行う手法を提案した。そして、数値シミュレーションと実機による実験を行い、本手法の有効性を確認した。今後の課題としては、まず高精度な V_c の判別機構の開発が挙げられる。さらに、製品のバラツキや経年変化に対応した制御則 (ロバスト制御や適応制御) の適用や、モデルのパラメータ同定の自動化 (システム同定手法の適用) などが、制御理論の側面からの検討課題である。また実用化の観点からは、沸点を含む温度域や調理対象を米と水の混合物とした場合のモデリングが次のステップの研究課題といえる。

(平成 19 年 10 月 25 日受付, 平成 20 年 2 月 28 日再受付)

文 献

- (1) 井坂久夫・久保田哲正:「ジャー炊飯器のおいしさ向上技術—「本炭釜」の炊飯特性—」, 三菱電機技報, 11, pp.53 (2006)
- (2) 島田淳子・大田原美保・綾部園子・畑江敬子・小西雅子:「タイ国産米の炊飯特性と加圧炊飯による食味改良効果」, 日本調理学会誌, 28, 3, pp.158-166 (1995)
- (3) 菅波拓也・古石喜郎・長峯長次・猪熊 晶・菱山弘司・坂本博夫:「誘導加熱式炊飯器の超音波振動に関する研究」, 日本機械学会論文集 C 編, 70, 696, pp.2301-2307 (2006)
- (4) S. Lee, M. Kano, and S. Hasebe: Softsensor Development and Disturbance Estimation through Two-Stage Subspace Identification, Proc. of IEEE CCA 2007, pp.521-526 (2007)
- (5) M. Kano, S. Lee, and S. Hasebe: Improving Estimation Performance of Softsensors through Two-Stage Subspace Identification, Proc. of IFAC IFAC MMM 2007, pp.185-190 (2007)

- (6) R. Cannon, Jr.: Dynamics of Physical Systems, Dover, 2003.
- (7) 星川清親:「米—イネからご飯まで—」, 柴田書店 (1979)
- (8) 福場博保:「炊飯の科学」, 全国米穀協会, (1985)
- (9) 山本重彦・加藤尚武:「PID 制御の基礎と応用」, 朝倉書店 (1997)
- (10) 鈴木 新・杉本健二:「MT システムによる加熱対象の熱容量同定」, 電学論 D, 127, 12, pp.1247-1248 (2007-12)

川 村 雄 (非会員) 2008 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在は富士電機アドバンステクノロジー (株) に勤務。在学中は制御理論の温度制御への応用に関する研究に従事。ISCIE の会員。

平 田 健太郎 (非会員) 1990 年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。住友金属工業, 京都大学, 大阪府立大学を経て, 奈良先端科学技術大学院大学准教授となり現在に至る。制御理論と各種制御応用の研究に従事。博士 (工学)。97 年 SICE 論文賞武田賞, 2005 年 ISCIE 論文賞受賞。SICE, ISCIE, IEEE の会員。

鈴 木 新 (正員) 2006 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。象印マホービン (株) に勤務。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。博士 (工学)。ISCIE の会員。2007 年 ISCIE 奨励賞受賞。

杉 本 謙 二 (非会員) 1982 年京都大学大学院修士課程修了後, 三菱電機, 京都大学, 岡山大学, 名古屋大学を経て奈良先端科学技術大学院大学教授となり現在に至る。制御理論に関する研究に従事。工学博士。IEEE, SICE, IEICE, 人工知能学会などの会員。2007 年 SICE 論文賞受賞。