

NAIST-IS-DD0361014

博士論文

判別分析と独立成分分析によるシステムの
品質評価手法に関する研究

鈴木 新

2006年03月16日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

鈴木 新

審査委員：

杉本 謙二 教授 (主指導教員)

西谷 紘一 教授 (指導教員)

小笠原 司 教授 (委員)

平田 健太郎 助教授 (委員)

判別分析と独立成分分析によるシステムの 品質評価手法に関する研究*

鈴木 新

内容梗概

近年，コンピュータの高性能化により，従来は困難であった大量のデータ処理や複雑なデータ解析が短時間で実行できるようになった．

データ解析技術の進歩によって，産業界では統計的手法を利用した品質評価が行われるようになっていった．品質評価に利用される統計的手法にMTシステム（品質工学）と独立成分分析があり，特に新しい手法として注目されている．双方とも，多変量解析でよく知られた主成分分析と密接に関連した手法であり，高精度化のために多数のパラメータを扱うような品質評価への適用が期待されている．

そこで，本論文はMTシステムと独立成分分析に基づく新しい品質評価手法を提案する．特に実応用の立場から，外乱の影響の下でのシステムの振る舞いに着目し，3種類の手法を提案する．また，その効果を実験によって評価する．

まず，伝熱システムのように応答が遅いシステムを評価する場合には，外乱の分離のために必要なデータ量の蓄積に多くの時間が必要になる．このような場合，外乱を分離するよりも外乱の影響を受けたデータから評価ができれば，評価時間が短く，実用上望ましい．そこで，判別分析と類似するMTシステムを用いて，外乱の影響を受けたデータを含んだ基準空間を作成し，基準空間からの距離によって品質を評価する．

次に，独立成分分析でよく知られた信号分離法を改良し，センサ信号から外乱の影響を除去することによってシステムのパラメータ変化をリアルタイムで検出

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DD0361014, 2006年03月16日.

する手法を提案する．この手法は機械システムの故障検出に有用であるため，柔軟構造体による実験を行って効果を確認する．

最後に，家電機器などの組み込み温度制御システムでは，消費者によって使用方法や使用環境が様々に変化する．特に季節や地域による外気温の変動は，制御性能に影響を及ぼすので外乱と考えられる．外乱の影響を受けやすい組み込み温度制御システムは，不良品とみなされて返品などの商品クレームになる可能性もある．そこで，設計工学の分野で利用されるタグチメソッドを制御パラメータの設計に適用し，外気温変動に強い組み込み温度制御システムの設計を試みる．

キーワード

判別分析，独立成分分析，品質工学（タグチメソッド，MTシステム），組み込みシステム

Studies on Quality Evaluation Method of Systems via Discriminant and Independent Component Analysis *

Arata Suzuki

Abstract

Recent progress in computer technology has made it possible to process a vast amount of data and analysis those complex data in more feasible time than ever.

In view of this, statistical methods are now widely used for quality evaluation in industry. Among others, MT system (quality engineering) and independent component analysis are particularly attracting a lot of attention in industry. Both of them are closely related to principle component analysis which is well known in multivariate analysis. These methods are expected to be effective in various systems dealing with multiple parameters.

This thesis proposes new system evaluation methods based upon MT system and independent component analysis . In particular, by focusing on the system behavior under disturbance, the thesis develops three kinds of quality evaluation methods and then verify their effectiveness by means of experiments.

Firstly, in evaluating systems with slow response such as heat transfer systems, separation of disturbance needs a lot of time. From a practical viewpoint, it is desirable to evaluate such systems directly form noisy data, rather than separating the disturbance. This is achieved via MT system similar to discriminant analysis. The method generates one-sided unit space from various data groups containing

*Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0361014, March 16, 2006.

noisy data. Then evaluation is performed with respect to distances from the those unit space. The effectiveness of this method is verified by experiment with a heat insulator.

Secondly, the thesis gives a method for real-time detection of system parameter change by eliminating the effect of disturbance on the sensor signal. This is done by improving a signal separation method well-known in independent component analysis. This is useful in fault detection in machines, which has been verified with an experiment performed with a flexible structure.

Thirdly, in embedded temperature control systems such as cooking household appliances, it is regarded as a disturbance how the users use the system or in what circumstances they use. In particular, the outside temperature due to seasons and locations affects control performance, and hence it is important to take them into consideration in order to avoid a complaint. The thesis designs control parameter robust to the variation of the outside temperature. This is done by applying Taguchi method and by allotting the outside temperature as a noise factor. The effectiveness of this method is verified with an embedded temperature control system.

Keywords:

Discriminant Analysis, Independent Component Analysis, Taguchi's Robust Engineering, Embedded System

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 本論文の目的と意義	3
1.3 本論文の構成	3
2. マハラノビスの距離による伝熱システムの品質評価	6
2.1 はじめに	6
2.2 従来の方法と改善策	8
2.3 品質評価システム	9
2.3.1 評価原理とシステム構成	9
2.3.2 MTシステムの概要	14
2.3.3 基準空間の作成	16
2.4 品質評価実験	18
2.5 本章のまとめ	23
3. 独立成分分析による機械システムの品質評価	24
3.1 はじめに	24
3.2 変化検出法	26
3.2.1 VAR-ICAの概略	26
3.2.2 故障検出アルゴリズム	29
3.2.3 逆システムによる定常監視	30
3.2.4 FastICAの援用	30
3.3 数値シミュレーション	33
3.3.1 ブラインド同定	33
3.3.2 故障検出	34
3.4 故障検出実験	35
3.4.1 実験装置	35
3.4.2 実験方法	37

3.4.3	実験結果	38
3.5	本章のまとめ	41
4.	組み込み温度制御システムの品質評価とパラメータ設計	43
4.1	はじめに	43
4.2	背景	45
4.3	パラメータ設計法	47
4.3.1	タグチメソッド概要	48
4.3.2	タグチメソッドの制御システムへの適用法	50
4.4	実験	56
4.4.1	実験方法	56
4.4.2	実験結果	57
4.5	本章のまとめ	61
5.	結論	62
	謝辞	64
	参考文献	65

目 次

1	熱動特性計測による品質評価システム	10
2	断熱構造体表面の伝熱イメージ	10
3	熱動特性計測による品質評価システムの電気回路モデル	11
4	ステップ応答の比較 (良品性能製品, 外乱下での良品性能製品, 良品性能限界製品)	13
5	基準空間の作成に用いたデータによるマハラノビスの距離ヒストグラム	17
6	入力信号波形	18
7	計測点 1 の温度出力波形	19
8	計測点 2 の温度出力波形	19
9	要因効果図 (品質評価システムの判定データの項目選択)	20
10	品質評価システムの最適化基準空間のマハラノビスの距離ヒストグラム	21
11	マハラノビスの距離の比較 (良品性能製品, 良品性能限界製品, 欠品性能製品)	22
12	提案手法と従来手法の評価結果の散布図	23
13	逆システムによる定常監視法のブロック線図	31
14	$\hat{G}(z)$ のボード線図 (solid: 実システム, dashed: $\mu = 2$, dotted: $\mu = 5$)	34
15	故障検出実験装置の外観	36
16	故障検出実験装置のシステム構成図	37
17	故障検出実験のタイムチャート	38
18	観測信号	39
19	ボード線図 $\mu = 2, 3, \dots, 6$ (solid: $\mu = 2$, dashed: $\mu = 3$, dash-dotted: $\mu = 4$, dotted: $\mu = 5$, cross: $\mu = 6$.)	40
20	FastICA による故障発生時の残差比較	41
21	調理家電の概略構造	45
22	外気温と調理対象温度との相関図	46

23	組み込み温度制御システムの電気回路モデル	47
24	内側直交表と外側直交表	50
25	誤差因子による入出力関係のバラツキ	51
26	PID制御器のブロック線図	51
27	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	53
28	目標値での折り返し出力信号波形	54
29	PIDパラメータ実験装置	57
30	PIDパラメータ実験の要因効果図	59
31	タグチメソッドによる出力波形	60
32	リミットサイクル法による出力波形	60
33	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])	61

表 目 次

1	基準空間の作成に用いたマハラノビスの距離データ例	17
2	特徴量の有無によるSN比の差 [db] (Sub = Subtraction)	20
3	最適化 (取捨選択) 前後のマハラノビスの距離比較	22
4	L18直交表	49
5	任意の行の実験結果行列	55
6	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	58
7	SN比の計算結果 [db]	58

1. 序論

1.1 背景

家電機器などの工業製品や果物などの農畜産物は、生産工程や出荷前に規定の品質であるか確認するために様々な検査、品質評価が行われている。品質評価は、欠品性能の製品を出荷しないために非常に重要な工程であり、日本の製造業の強みである高品質の源ともいわれている。

従来、これらの品質評価は評価対象になんらかの働きかけ（信号の入力）を行い、評価対象から得られる結果（観測される出力信号）を品質基準としてあらかじめ設定された閾値と比較して、良否の判定を行っている。このような方法では、ひとつの信号の変化、すなわちスカラー量の情報のみで品質を評価するため、ノイズの影響などによって誤判定が起きないように、長時間の測定を行うなどの工夫が必要となる。生産性を考慮すれば、とても全数検査を行うことは不可能であり、代替として抜き取り検査や経験から得られた知識をもとに評価時間や評価項目を削減する簡易検査が行われている。また、精度を落とさずに全数検査をする方法として、高機能な検査装置を複数組み合わせる方法が外観検査などに用いられている。実用の立場から見れば、前者の方法では出荷される製品に欠品性能品が混入する可能性が高く、後者の方法では莫大な設備投資が必要となるので、困難な場合が多い。

そこで、本論文では設備投資を抑えた短時間、高精度な品質評価手法として次の2つの方法の組み合わせを提案する。

1. 評価対象から得られる出力信号の特に過渡的なデータに注目し、動きのある時系列データを評価することで短時間化をはかる。
2. 評価対象から得られる複数の出力信号を計測し、それらの出力信号間の関係を総合的に評価することで高精度化をはかる。

以下に補足をする。1. では、過渡状態の出力信号は安定状態の出力信号に対して大幅に短時間で蓄積することができる。しかし、過渡状態の出力信号は振動的であったり、蓄積する時間が短いので情報の量も少なく、外乱の影響を受けやす

い．そこで本論文では，出力信号から得られる情報が豊かになるまでに長時間必要なシステム（例えば応答が遅い伝熱システムなど）には，外乱の影響を受けた状況でも精度の落ちない手法を提案し，出力信号から得られる情報が短時間で豊かになるシステム（例えば応答が早い機械システムなど）には，外乱を分離して評価する手法を提案する．

2. では，複数の変数の時間による変化とそれらの相関関係を計算することで，総合的な評価指標を導入し，高精度化をはかる．一変数だけでは品質の評価が困難な場合も多く，特に1. で短時間化のために過渡状態の出力信号から評価するので，多変数による評価は精度を確保するためにも必要である．この手法のように大量のデータを扱う複雑な解析技術は，近年のコンピュータの高性能化によって容易に実現できるようになり，評価精度の向上に貢献している．

上記で提案した品質評価手法は，多変量解析によって実現できる．多変量解析は複数の変数からなるデータの相互関係を分析，評価する統計的手法であり，マーケティングの分野などにも幅広く利用されていて，品質評価にも有効な手法である．多変量解析には，重回帰分析，判別分析，主成分分析などが有るが，近年，品質評価の分野で判別分析や主成分分析を応用した新しい手法が提案されている [1, 2]．ひとつはマハラノビスの距離を応用する MT システム，もうひとつは主成分分析を出発点とする独立成分分析である．どちらも 1980 年代以降に研究されるようになった比較的新しい分野である．

ここで，MT システムと独立成分分析のそれぞれの特徴を説明する．MT システムはマハラノビスの距離を利用する判定法で，従来のマハラノビスの距離による判別分析と類似した手法である．しかし従来の手法とは違い，判別に用いられる群がただひとつしか無く，そのひとつの群を基準空間として基準空間からの距離を求めることで基準の群との一致度を測る．このような特徴から，パターンマッチングの手法として適用されている [3, 4]．

一方，独立成分分析は主成分分析を計算の出発点としているが，信号の相関関係に着目する主成分分析と違って，信号の統計的独立性に着目する．つまり，複数の信号が混合されて観測される状況で，混合前の信号が統計的に独立であるという情報のみを頼りに，混合された信号を分離して混合される前の信号を推定す

ることを目的としている．このような特徴を持つので，カクテルパーティー効果といわれる目的の音を取り出す信号分離の手法として適用されている [5] ．

本論文では，新しい手法として注目される判別分析と独立成分分析を，設備投資を抑えた短時間，高精度な品質評価手法の実現のために適用する．2 章から提案手法に関する詳細な説明を行っていく．それに先立ち，1.2 節で本論文の目的と意義を説明し，1.3 節で本論文の構成を説明する．

1.2 本論文の目的と意義

本論文の目的は，設備投資を抑えた短時間，高精度な品質評価手法の提案である．この目的を実現するために，評価対象から得られる出力信号の過渡的なデータを処理することにより短時間化をはかる．さらに，複数の信号を計測し，それらの関係を巧みに利用する総合的な評価によって高精度化をはかる．また，実際の品質評価の現場では外乱の影響を避けることは難しく，特に提案手法は過渡的なデータを扱うために外乱の影響を受けやすく，そのため外乱を強く意識した手法を提案する．提案する手法は多変量解析の中でも特に新しい手法である MT システムと独立成分分析を利用しているので，研究事例の少ない新しい分野において，従来は行われていなかった適用事例を作り，効果を確認することも重要と考える．これらの手法の適用に際しての周辺技術や工夫についても紹介する．

本論文で提案する品質評価手法は，実用上要求される低コスト化，短時間化，高精度化，外乱への強さに答えることができる手法であり，工業製品の品質評価をはじめ，様々な分野に応用できると考える．

1.3 本論文の構成

本論文では，設備投資を抑えた短時間，高精度な品質評価手法を 3 種類提案している．それぞれの手法の概要と論文の構成を説明する．

2 章では，マハラノビスの距離による熱動特性計測による品質評価手法を提案する．熱の動きから品質評価を行う例は，伝熱システムの品質評価において一般的な手法である．従来の手法は，伝熱が平衡した後の計測値を閾値と比較して品質評価を行っているが，伝熱現象を扱うシステムは応答が遅く，平衡状態に達する

までに相当な時間を必要とするので、抜き取り検査でしか品質を評価できなかった。このような従来手法を全数検査が可能な時間にまで無理に短時間化を行えば、外乱の影響もあり、とても正確な評価はできなかった。そこで、本論文では断熱構造体の品質評価を例に、新しい品質評価手法を提案する。断熱構造体を通過する熱を計測する従来の手法とは異なり、本論文の手法は熱の入力と同じ面の熱の動きを複数の点で計測する。計測されたデータは温度上昇と温度拡散を表す時系列データであり、これらの情報の総合的な評価を行うためにMTシステムを導入する。MTシステムではマハラノビスの距離を利用し、良品性能製品から得られた群を基準空間として基準空間からの距離によって品質の評価を行う。しかし、計測されるデータは過渡状態にあり外乱の影響も受けやすいため、基準空間の作成にも工夫が必要となる。そのため基準空間のデータに、外乱を与えた良品性能製品のデータ含むことで品質評価の精度を上げる。

2章では製品の品質評価に関する提案を行うが、3章ではそれらの製品を生産する機械である生産設備に目を向け、独立成分分析を用いた機械システムの品質評価手法を提案する。通常、生産設備は休み無く運転しており、メンテナンスが十分に行えない。もし生産設備に故障が発生した場合、故障の検出が遅れると山のような不良品を抱えることになる。生産設備の故障が即座に検出できれば、不良在庫を防ぐことができるので望ましい。しかし、生産設備のどの部品が故障するのかが分からないため、各部品にセンサを取り付けるような方法では、多くの投資が必要となるので得策とはいえない。そこで、生産設備から発生する振動を計測するだけで故障の検出が可能となる手法を提案する。ただし、ただ単純に振動を計測しても、生産設備には外乱の影響による振動も発生するので、故障による振動の変化か外乱による振動の変化かを区別しなければならない。そこで、独立成分分析を導入して外乱を分離することで故障による変化と外乱による変化とを区別する。しかし、生産設備などの機械振動系に独立成分分析を適用することはできないので、機械振動系のような動的システムに対応できるように拡張する。また、実用上は故障検出が自動化されなければならず、取得した振動データをその都度分離する作業はある程度の計算時間を必要とするので、処理用コンピュータも高性能なものが要求される。この対策として、動的システムに対応す

るように拡張した独立成分分析によって混合振動を分離する分離行列を求めておき、その分離行列によって分離された信号が独立かどうかを判定することで故障検出を行う。つまり故障が発生した場合、対象が変化して混合振動の状況も変化する。同じ分離行列では混合振動を独立に分離できなくなる。振動の計測という既存の生産設備にも容易に導入できる方法によって、故障という品質問題を検出する。

4章では、2, 3章とは少し異なった視点で品質評価の結果を設計にフィードバックする手法を提案する。実際の商品開発の現場では、量産体制に入る前に品質問題が発覚し、量産（販売）時期の延期などを行うことは意外に多い。このような事態は、企業としては信頼を失墜することとなるので避けなければならない。この原因の多くは、設計の不具合によるものである。このような背景から、研究、開発の段階から積極的に不具合の発生源となる外乱のもとで実験を行い、その結果を利用して設計を行う手法としてタグチメソッドが提案されている。一方で、調理家電のような組み込み温度制御システムでは、季節や地域の違いによる外気温の変化が制御性能に影響を及ぼし、品質問題に発展する例もみられる。そこで、本論文ではタグチメソッドによって外気温変化に強い温度制御パラメータの設計を試みる。通常、タグチメソッドは設計工学などのハードウェアの設計に用いられることが多く、制御パラメータのようなソフトウェアへの適用例は少なく、適用には様々な工夫が必要となる。提案手法では、時間の経過によって積算される出力信号と目標値との偏差（Integral Absolute Error）が外気温変化に対して最小となる制御パラメータを求めることを評価指標とする。

5章では、本論文で提案した3種類の手法を振り返り、まとめと今後の展望を示す。

本論文では、3種類の手法の提案とシステムの開発を通して、実用上必要とされる短時間、高精度、大規模な設備投資を必要せず、外乱の影響を受けにくい品質評価手法を提案している。以下、2章より提案手法について、順次説明を行う。

2. マハラノビスの距離による伝熱システムの品質評価

本章では、環境に配慮した省エネルギー製品として期待される断熱構造体などの伝熱システムの品質評価手法の短時間化、高精度化について提案する。

2.1 はじめに

近年、環境問題への配慮 [6] から熱を効率よく利用し、エネルギー消費を削減することが重要になっている。例えば、ヒータなどの加熱装置の効率設計や断熱構造体の利用などがあげられる。特に、断熱構造体は様々な用途に使用されており、住宅においては複層ガラス、浴室、給湯配管など、電化製品においては冷蔵庫、ジャーポットなど、産業用途では断熱配管、保存庫などがある [7, 8]。

このように省エネ加熱器具や断熱構造体の使用用途は拡大しているが、工業生産に適した短時間で高精度な品質評価手法の開発は不十分である。例えば、断熱構造体の品質評価では、断熱構造体の片側の面に加熱源を設置し、その加熱面の温度と反対面の温度の差から熱貫流を測定する方法などが知られている [9, 10, 11]。しかし、この方法では熱貫流が平衡するまで待つ必要があり、評価対象である断熱構造体は熱容量、熱抵抗ともに大きいので、評価には相当な時間が必要となり効率的とは言えない。また、この方式を無理に短時間化した場合は、良品性能限界にある製品を識別することができない。良品性能限界製品は、断熱層の経時変化によって性能が悪化して欠品性能に変化するおそれがあるので、これを識別できなければ、欠品性能製品を出荷したと同じことになる。

一方で、マハラノビスの距離を使ったマハラノビスタグチシステム (MT システム) [12, 13, 14, 15] を、工業生産における品質評価に適用する研究が注目されている [16]。MT システムは、パターンマッチングの手法であり、あらかじめ適切に選択された特徴量から基準空間を求めておき、基準空間からの距離によってその一致度を知る手法である。応用分野として、健康診断データをもとにした健康予測、火災報知器、自動車の衝突防止センシングシステム、などの研究が行われている [17, 18, 19]。

本研究で対象としている工業生産の品質評価では、生産上発生する品質バラツ

キの影響を受ける。また、品質評価装置が複数ある場合は装置間のバラツキも影響する。このように実応用では、様々なバラツキ要因を避けることはできない。ましてや、季節による環境変化は避けることができない要因である。そのようなことから、あらかじめ様々なバラツキや環境で良品性能製品の検査データを集め、そのデータから基準空間を求めておけば、ロバストな品質評価システムの構築が可能である。このような基準空間のモデルを数学的に求めることは非常に困難であるが、MTシステムでは実験的に求めることができるので、比較的容易に導入ができる。また、本研究で取り扱う工業製品は伝熱システムであり、機械システムなどに対して応答が遅いシステムである。伝熱システムは応答が遅いので、バラツキ要因である外乱を分離できるほどの豊かな情報量となるまでには、相当な時間が必要となる。本研究の方法は、外乱を受けた状態を含んだデータから基準空間を作成し、評価に与える影響が大きい特徴量を選択して精度をあげることに より、外乱の影響を受けたデータを直接評価できる。よって、情報の蓄積時間による制約は受けない。

そこで本研究では、伝熱システムの品質評価の短時間化・高精度化をめざして、以下のような手法の組合せを提案する。

1. まず、伝熱システムにおける熱貫流を直接計測するのではなく、加熱源と同一表面上の点での熱の動きを計測する。これによって、間接的に品質評価を行い短時間化を図る。原理は、熱流の等価回路モデルを用いて説明する。
2. 加熱源と同一表面上の点での温度が定常状態に達するのを待たずに、過度応答を計測することで高速化を図る。これは、ステップ応答からの同定と考えられ、複数の特徴量からそれらの相関関係をもとにシステムパラメータを推定する。
3. しかし、生産環境からの種々の要因による外乱によって推定にはバラツキが避けられない。そこで、MTシステムを導入し、マハラノビスの距離によって良品・不良品の判定を行う。

最後に本手法の有効性が実験によって確認されたことを述べる。本研究によって、外乱などのバラツキに対してロバストな品質評価ができ、工業生産で必要と

される短時間化・高精度化を達成できるものと期待される。

以下では、2.2 節で従来の方法、2.3 節で開発したシステムの概要、2.4 節で実験について説明し、2.5 節でまとめを行う。

2.2 従来の方法と改善策

伝熱システムは非常に応答が遅く、従来これらの品質評価には相当な時間を必要としていた。断熱構造体を例に説明すると、容器形状の断熱構造体の場合では熱湯を容器内部に注ぎ、1 日後の温度を計測し、初期温度からの温度降下を計測することで品質を評価していた。また、パネル形状の断熱構造体の場合、加熱源（ヒータ等）を片方の面上に設置し、その加熱面の対面の温度を計測して、その温度差によって評価する方法が用いられてきた。この方法では、加熱面の対面温度が平衡状態に達した後に評価するので、平衡状態に達するまでに 30 [min] 以上の時間が必要であった [7, 9, 10, 11]。

一方、加熱時間を強制的に 5 [min] 程度にまで短縮し、対面の温度上昇を評価するという簡易法も考えられる。しかしこのような簡易化を行うと、精度の低下が確かめられた。

このように、従来の方法は断熱構造体を通過する熱を計測しているのので、断熱構造体の熱抵抗による応答時間の遅れを考慮すると、精度良く評価するためには相当な時間が必要であった。そのため、生産ロット毎の抜き取り検査でしか品質を評価できず、工業生産に用いるには不十分であった。

そこで、伝熱システムの品質評価方法として工業生産で使用できる短時間、高精度な品質評価方法である本研究の基本アイデアを説明する。伝熱システムに熱を入力し、その応答として温度を計測するという手段は従来品質評価手法と同じであるが、本研究の品質評価手法は温度計測の方法が従来とは異なる。伝熱システムに入力された熱は、伝熱システムが持つ伝熱、断熱層を伝播する熱と伝熱、断熱層によって制限されて加熱面を伝播する熱に分かれる。このとき、加熱面を伝播する熱は伝熱、断熱層によって制限されるので品質と相関があり、この加熱面を伝播する熱の計測値から品質評価を行うのが本研究の方法である。さらに、加熱面を伝播する熱は加熱源からの距離が熱抵抗となるので、一次遅れの回路が連

続に接続されたモデルとして考えることができる。このことは、任意の複数点で計測された温度はすべて品質と相関があることになるので、複数点（多変量）を扱うことで短時間化を行っても高精度が期待できる。従来の方法では、複数の層からなる伝熱、断熱層を伝播する熱を計測するので、出力が得られるまでに時間がかかる。これに対して、加熱面を伝播する熱は非常に短時間で出力が得られる。

このように本研究の品質評価手法は、従来と異なる温度計測方法によって短時間化を行っている。

2.3 品質評価システム

本節では提案する品質評価手法の原理とシステム構成を説明する。伝熱システムの品質評価への適用例として、短時間化の効果が大きい断熱構造体を用いて説明する。

2.3.1 評価原理とシステム構成

提案する品質評価システムは断熱構造体を加熱するヒータ、断熱構造体の温度計測を行う温度センサ、それらの制御、情報処理を行うコンピュータによって構成する（図 1）。温度センサは厚み 0.5 [mm] の接触式フィルム状白金測温抵抗体、ヒータはカートリッジヒータを用いている。

品質評価原理を説明するため、ヒータによって断熱構造体に入力された熱の振る舞いについて説明する。断熱構造体に入力された熱は、断熱層を通過する熱と加熱面の外装材を伝播し、拡散する熱に分かれる（図 2）。断熱層を通過する熱は断熱層の非常に大きな熱抵抗から大きく減少し、出力として得られるまでに時間がかかる。それに対して加熱面の外装材は熱抵抗が小さく、はやく出力が得られる。また、品質が悪い場合、断熱層の熱抵抗は小さく熱が通過しやすくなるので加熱面の外装材を伝播する熱は小さくなる。このように、短時間で出力が表れる加熱面の外装材を伝播する熱の特性から品質評価を行う方法が、提案手法の基本アイデアとなる。

これらの関係をより明確にするために、熱抵抗を抵抗器、熱容量をコンデンサ、温度を電圧、熱流を電流と置き換えて [20, 21]、電気回路モデルで表現する（図 3）。

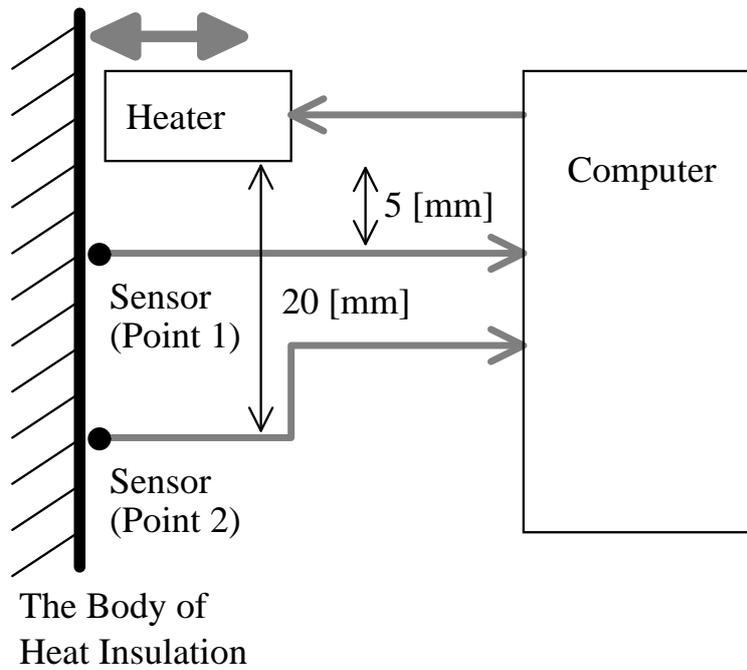


図 1 熱動特性計測による品質評価システム

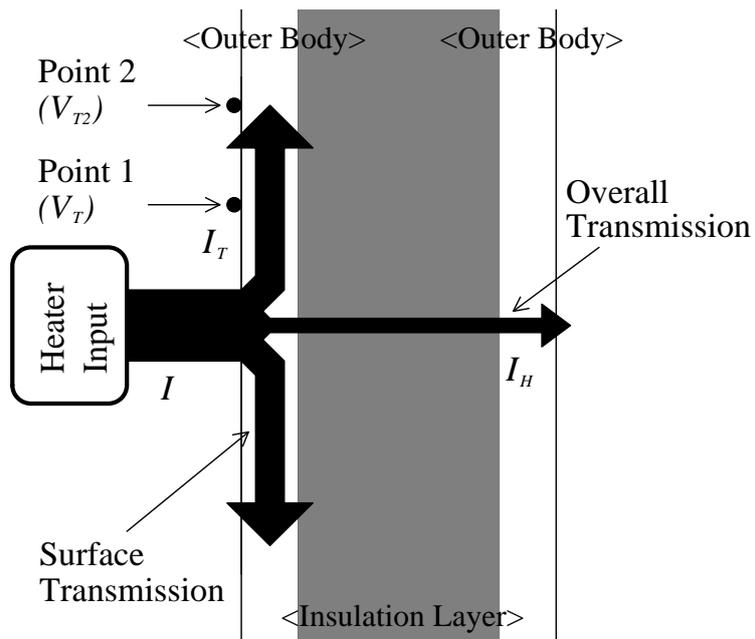


図 2 断熱構造体表面の伝熱イメージ

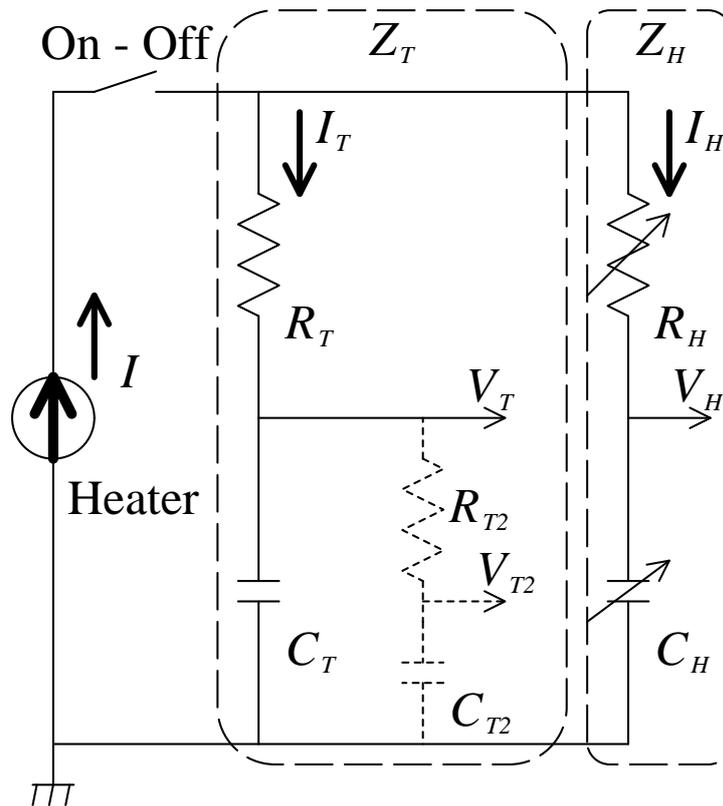


図 3 熱動特性計測による品質評価システムの電気回路モデル

ここで、 I はヒータからの熱流、 R_T 、 C_T は提案する加熱面の熱伝播特性による評価方法のヒータから計測点 1 までの熱抵抗と熱容量、 V_T は計測点 1 の温度を表し、 R_{T2} 、 C_{T2} は計測点 1 から計測点 2 までの熱抵抗と熱容量、 V_{T2} は計測点 2 の温度を表す。また、 R_H 、 C_H は従来手法のヒータから計測点までの熱抵抗と熱容量、 V_H は従来手法の計測点の温度を表す。

電気回路モデルから、断熱層も加熱面の外装材も熱抵抗 R 、熱容量 C からなる RC 直列回路の 1 次遅れ系である。一般に、RC 直列回路の伝達特性 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{C}{CRs + 1} \quad (1)$$

と表すことができる。

ここで、従来手法と提案手法の違いを電気回路モデルから説明する。従来手法

の時定数は (1) 式より $C_H R_H$ で表され、同様に提案手法の計測点 1 の時定数は、 $C_T R_T$ で表される。断熱層の熱抵抗 R_H は、加熱面の熱抵抗 R_T に対してはるかに大きいので、それぞれの時定数を比較すると、 $C_H R_H \gg C_T R_T$ となり、従来手法より提案手法のほうがはるかに時定数が小さく、出力が早く表れることが分かる。このように、従来と異なる計測位置によって、はるかに短時間に出力が得られることが分かる。

次に、品質の差により計測点 1 の温度 V_T がどのように変化するか説明する。品質が良い（良品性能製品）場合、ヒータによって入力された熱流 I が、断熱層を通過する熱流 I_H と加熱面の外装材を伝播する熱流 I_T に分けられるとき、断熱層を通過する熱流 I_H は断熱層の大きな熱抵抗によって制限されるので、入力された熱流 I のほとんどが加熱面の外装材を伝播する熱流 I_T になる。すなわち、 $I_H \ll I_T$ となり、加熱面の温度 V_T が大きくなる。一方、品質が悪い（欠品性能製品）場合、断熱層の熱抵抗が小さいので、通過する熱流 I_H が大きくなり、ヒータによって入力される熱流 I は品質性能に関係なく一定であるので、加熱面の外装材を伝播する熱 I_T が品質が良い場合に比べて小さくなる。

この関係も、電気回路モデルから説明できる。提案手法の計測点 1 において、 C_T が飽和するまでの過渡的な状態を考える。このとき R_{T2} には殆ど熱流は流れないので、計測点 1 における温度 V_T は、

$$V_T(s) = \frac{1}{C_T s} I_T(s). \quad (2)$$

で表すことができ、加熱面の外装材を伝播する熱 I_T に比例することが分かる。ここで、図 3 に示すように、断熱層の合成インピーダンスを Z_H 、加熱面の外装材の合成インピーダンスを Z_T とすると、 I_T は

$$I_T(s) = \frac{1}{1 + \frac{Z_T}{Z_H}} I(s). \quad (3)$$

で表され、品質の変化、すなわち Z_H の変化によって、加熱面の外装材を伝播する熱 I_T も変化する。その変化が温度 V_T の変化となって表れることが分かる。つまり、温度 V_T の時系列データによって品質評価が可能となる。この方法は、従来の断熱層を通過する熱を計測する品質評価方法に対して、はるかに短時間化が

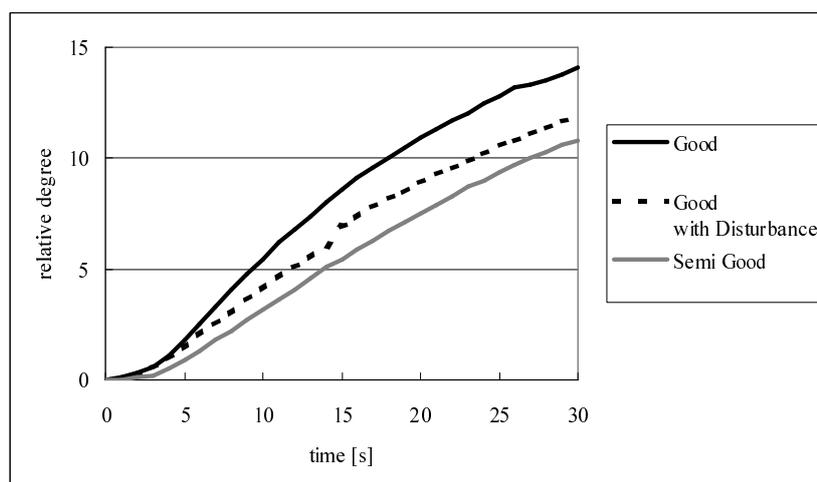


図 4 ステップ応答の比較（良品性能製品，外乱下での良品性能製品，良品性能限界製品）

可能となる品質評価方法である．なお，計測点 2 についても同様の熱の振る舞いとなり，計測点数を増やすことで精度を向上できる．

しかしながら，本研究では工業生産で利用できる方法を考えているので，実際の工業生産で考えられる誤差要因を与えても品質評価がロバストである必要がある．そこで誤差要因として実際にヒータの接触状態を悪くし，電気回路モデルの熱流 I が減少した場合の 30 [s] のステップ応答波形（図 4）を比較してみる．良品性能製品（Good）と良品性能限界製品（Semi Good）では確かに差が見られるが，同じ良品性能製品であっても誤差要因を強く与えた場合（Good with Disturbance）の波形は，良品性能限界製品と僅かながらの差しか見られない．この程度の差の場合，誤判定を起こす可能性が高く，ステップ応答波形だけでは，ロバストな評価は難しい．

そこで，このようなバラツキに対してもロバストな評価ができるように，MT システム [13] を適用する方法を次節で説明する．

また，他の品質評価方法として，システム同定 [22] の手法によって，パラメータ推定から良否判定を行う方法も考えられ，本研究のような熱系に適用した例 [23] も見られる．しかし，システム同定では入力信号が十分に豊かであるという条件

を満たさなければ正しい推定が行えず，本研究のように時定数の大きい熱系で，バラツキの影響を受ける場合は短時間化は難しいと考える．

2.3.2 MTシステムの概要

MTシステムは，システムの設計者が選択した特徴量からマハラノビスの距離による基準空間を作成し，測定（評価）対象がその基準空間の中心からどの程度離れているかを距離によって求めるパターンマッチング手法である．また，基準空間を作成した後に直交表とSN比を用いた実験によって，選択した特徴量の最適化（取捨選択）が可能である．

具体的に，MTシステムのステップを記述する．

1. 良品性能製品から J 個の特徴量を取得する． J 個の特徴量を I 種類のサンプルを集める．サンプルの i 番目をベクトル形式で表すと，

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iJ}), \quad (4)$$

となる．ここで， $i = 1, \dots, I$ ， $j = 1, \dots, J$ であり， $J \leq I$ とする．本研究の場合，選択する特徴量は加熱面外装材の熱伝播特性であるので，図 1 で示す計測点 1，2 の入力開始時を基準とした相対温度の時系列データとした．

2. それぞれの特徴量から平均 m_j と標準偏差 σ_j を求め，基準化データ

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{\sigma_j}, \quad (5)$$

を求める．これらの基準化データは行列形式で，

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1J} \\ X_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ X_{I1} & \cdots & \cdots & X_{IJ} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

と表すことができる．ここで，それぞれの特徴量ベクトルを，

$$X_j = (X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Ij})^T, \quad (7)$$

とし，基準化された時系列データからなるデータセットベクトルを，

$$Z_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iJ}), \quad (8)$$

とする．

3. 基準化された特徴量から相関行列 R を，

$$R = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} X_1^T X_1 & X_1^T X_2 & \cdots & X_1^T X_J \\ X_2^T X_1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ X_J^T X_1 & \cdots & \cdots & X_J^T X_J \end{bmatrix}, \quad (9)$$

によって求め，その逆行列 A を，

$$A = R^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1J} \\ a_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ a_{J1} & \cdots & \cdots & a_{JJ} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

とする．求められた A ， m_j ， σ_j をデータベースに記憶しておく．ここで，データセットベクトル Z_i のマハラノビスの距離 D^2 は，

$$D_i^2 = \frac{1}{J} Z_i A Z_i^T, \quad (11)$$

で，求めることができる．実際の処理は，評価対象の特徴量データを m_j ， σ_j によって基準化し，マハラノビスの距離を求めて，閾値と比較すれば良い．

4. 最後に，選択した特徴量の最適化（取舍選択）を行う．基準空間に属さない対象，つまり本研究では欠品性能製品の特徴量データを d 組取得する．この特徴量データを，2水準直交表 [12, 24] に割り付ける．第1水準の場合，その特徴量を“有り”，第2水準の場合，その特徴量を“無し”としてマハラノビスの距離 D_1^2, \dots, D_d^2 をすべての行で求める．このようにして，求められたマハラノビスの距離は，基準空間に属さない欠品性能の集団であり，より遠くに離れた距離であることが望ましい．そこで，望大特性のSN比，

$$\eta = -10 \log \frac{1}{d} \left(\frac{1}{D_1^2} + \cdots + \frac{1}{D_d^2} \right), \quad (12)$$

を計算する。計算の結果，“有り”の方がSN比が高い特徴量は用いた方が精度が良く，“無し”の方がSN比が高い特徴量は用いない方が精度が良いことになる。“無し”の方がSN比が高い特徴量は削減しても評価に影響しないので，SN比の計算結果から特徴量の取捨選択を行うことができる。

2.3.3 基準空間の作成

MTシステムでは，まず最初に，正しいとされる集団の特徴量から基準空間を求める。文字通り基準空間が判定基準となるので，基準空間の作成は非常に重要な作業である。本研究の基準空間は，断熱性能が高い良品性能製品の特徴量集団であるが，本研究が目的とする工業生産では様々な要因による不確かな要素（生産ロット，気候，装置，作業者などによるバラツキ）が影響するので，それらを考慮した特徴量集団とする。つまり，基準空間の作成段階でそのような環境下で取得したデータを含む必要がある。

実際に生産現場で考えられる要因を考慮し，良品性能製品A，Bの2個を使用して下記条件でデータを取得した。

1. 良品性能製品A，室温 20 []。
2. 良品性能製品A，室温 20 []，風の影響有り。
3. 良品性能製品A，室温 25 []。
4. 良品性能製品B，室温 20 []。
5. 良品性能製品B，室温 20 []，風の影響有り。
6. 良品性能製品B，室温 25 []。

ここで，風の影響とは 100 [W] の送風機で 1.5 [m] 離れた距離から品質評価システムに向けて送風している。各条件とも5回データを取得し，合計で6条件×5回の30通りのデータサンプルとした。なお，条件(2)，(5)のうちそれぞれ3回を意図的に，ヒータの接触を悪くして誤差を増大させている。このようにして取得したデータは，A，Bの2種類の若干性能が異なる製品と計測時に与えた風の影

表 1 基準空間の作成に用いたマハラノビスの距離データ例

No.	Point 1 (10s)	Point 1 (20s)	...	Point 2 (40s)	Point 2 (50s)
Sample 1	0.92	0.85	...	0.43	0.73
Sample 2	1.59	1.50	...	1.42	0.73
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Sample 30	-1.76	-1.35	...	-2.06	-1.83

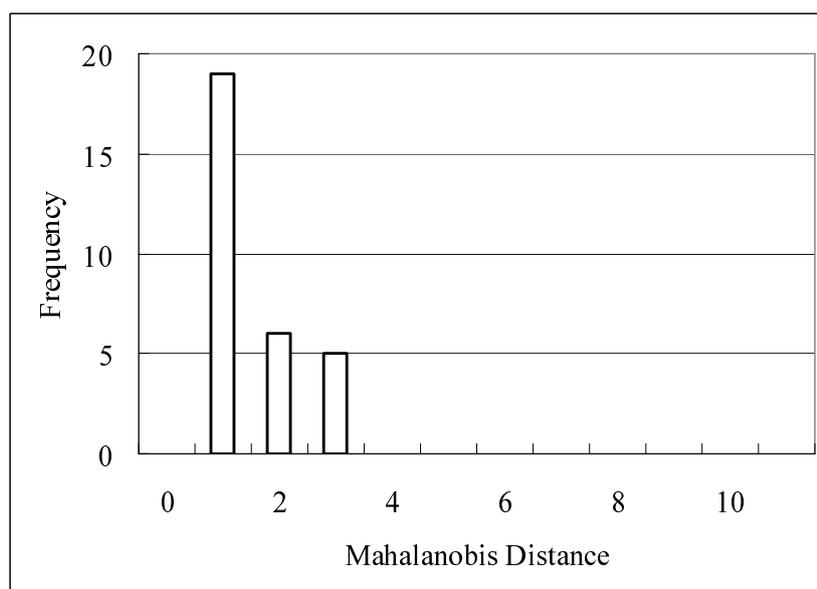


図 5 基準空間の作成に用いたデータによるマハラノビスの距離ヒストグラム

響やヒータの接触状態の変化などによって、製品と計測の両方に不確かな要因を含んだデータサンプルとなった。このデータサンプルから、特徴量ベクトル x_i として計測点 1, 2 で取得した時系列データ（サンプリング周期 10 [s]、特徴量数 $5 \times$ 計測点数 2 の 10 個）によって基準空間を作成した。

基準空間データサンプルの 1 例を表 1 に、基準空間の作成に用いた 30 通りのマハラノビスの距離のヒストグラムを図 5 に、それぞれ示す。

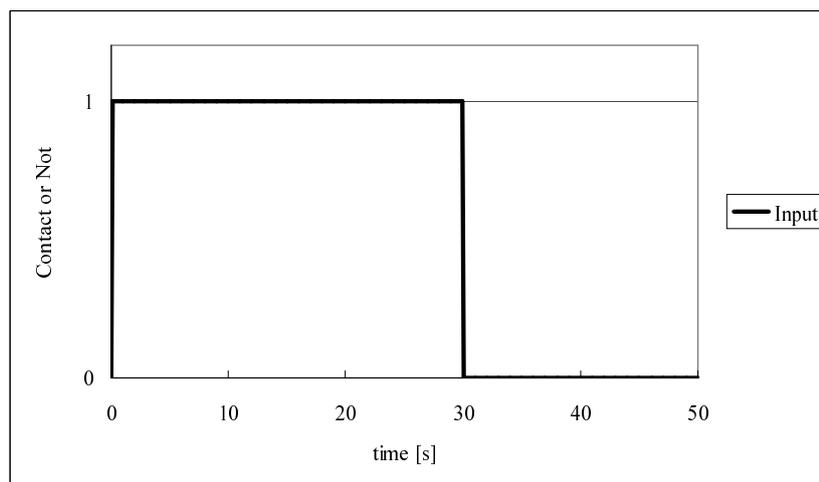


図 6 入力信号波形

2.4 品質評価実験

基準空間の作成に用いていない良品性能製品，良品性能限界製品，欠品性能製品をそれぞれ 2 本ずつ使用して良否判定の妥当性を確認した．確認実験における入出力信号波形の一例を，図 6 に入力信号，図 7 に計測点 1（Point 1）の出力信号，図 8 に計測点 2（Point 2）の出力信号をそれぞれ示す．なお，これらのデータはすべて 20 [] の室温で取得した．計測点 1（図 7）の温度データにおいて，良品性能限界製品と風の影響を与えた良品性能製品の波形は，非常に似た波形をしているが，これらは区別しなければならない．また，同じ良品性能製品であっても，風の影響を与えた良品性能製品と通常の良品性能製品では波形に違いが見られ，良否判定は目視のみでは単純には行えないことが分かる．計測点 2（図 8）の温度データでも，同様のことが言える．

そこで，これらのマハラノビスの距離を求めてみる．良品性能製品，良品性能製品に風の影響を与えた場合では，0.76，3.50 であるが，良品性能限界製品では，6.03，10.36 と明らかに差が出ている．欠品性能製品では，30 以上と大きな差が出ている．品質が悪化するのに従って，マハラノビスの距離も大きくなっており，品質と距離とに相関があることも分かる．

次に，選択した特徴量の最適化（取捨選択）の結果を示す．基準空間に属さな

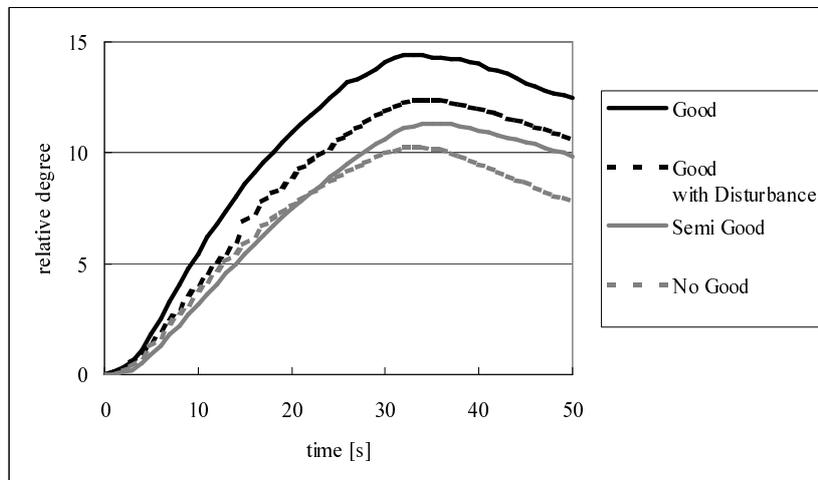


図 7 計測点 1 の温度出力波形

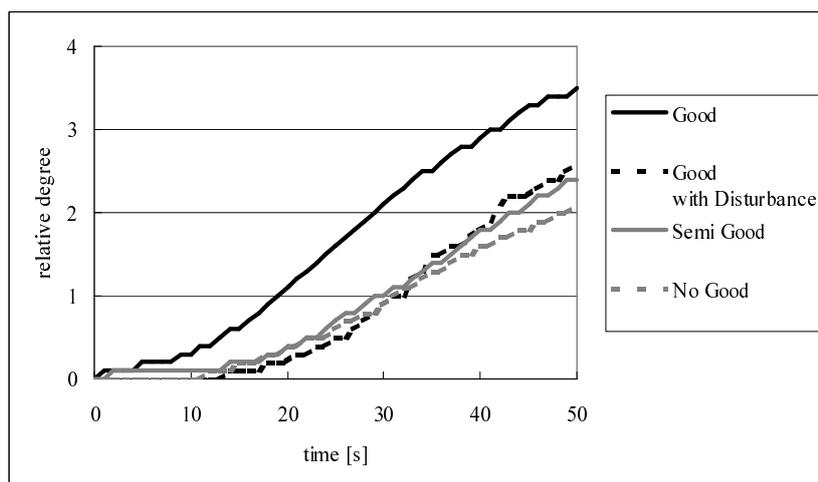


図 8 計測点 2 の温度出力波形

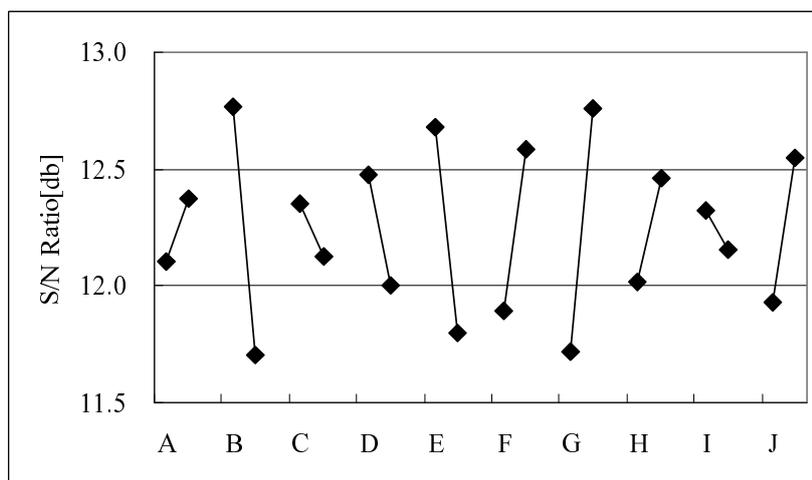


図 9 要因効果図 (品質評価システムの判定データの項目選択)

表 2 特徴量の有無による SN 比の差 [db] (Sub = Subtraction)

	Control Factors									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Sub	-0.27	1.06	0.22	0.48	0.88	-0.69	-1.05	-0.44	0.17	-0.62

いい良品性能限界製品と欠品性能製品を用いて、8通りのデータサンプルを作成した。本研究の特徴量は10ヶなので、11項目の特徴量を割り付けることができるL12の直交表を用いて(12)式で示した望大特性のSN比を求めた。SN比の計算結果をグラフ化した要因効果図を図9に示す。要因効果図(図9)において、それぞれの項目の左側の値がその特徴量“有り”の時、右側が“無し”の時である。取捨選択を行う目安として、特徴量“有り”のSN比から特徴量“無し”のSN比を引いた結果を表2に示す。差が正で大きいほどその特徴量が識別に対して優位に働くといえる。また、AからEは計測点1の特徴量、FからJは計測点2の特徴量であり、Aは計測開始から10[s]後、BはAから10[s]後のデータで、以下10[s]サンプリング周期ごとにC、D、…となり、Fからは計測点2の同様のデータである。図9と表2から、計測点1では特徴量B、C、D、Eを用いた場合がSN比が高く、計測点2では特徴量Iを用いた場合がSN比が高いことが分か

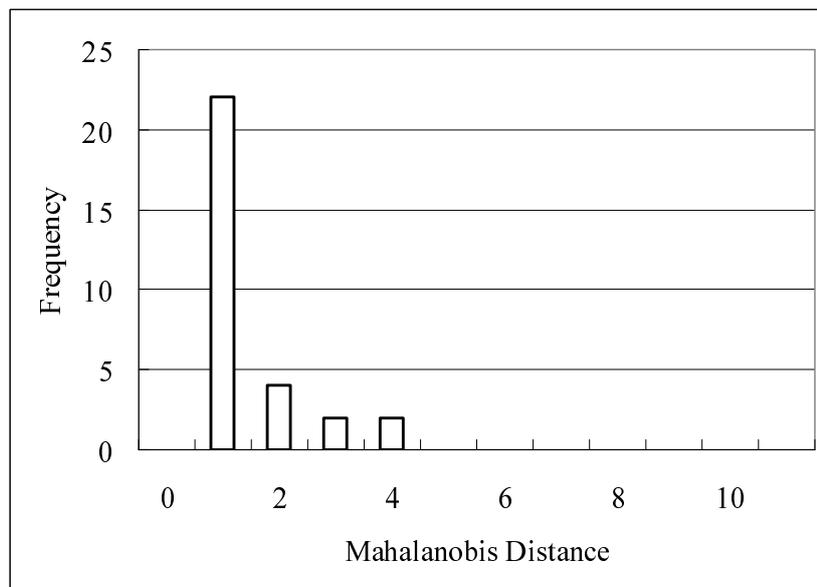


図 10 品質評価システムの最適化基準空間のマハラノビスの距離ヒストグラム

る．計測点 2 で，選択した特徴量が品質の評価に優位に働かなかつたのは，ヒータからの距離が遠く，なおかつセンサの熱容量の影響によって，品質による温度上昇幅の差が表れにくかったことが原因と考える．

これらの結果を受け，SN 比の高い特徴量から最適化基準空間を作成した．最適化基準空間のヒストグラムを図 10 に示す．

また，最適化した基準空間の妥当性を確認するために，基準空間に属さない対象に対して再度マハラノビスの距離を求めた．結果を最適化前と合わせて表 3 に示す．

最適化した基準空間のヒストグラム（図 10）を見ると，誤差要因を与えたものの中で距離が大きくなったものもあるが， $D^2 = 1$ に大きなピークを持つようになった．その結果表 3 では，良品性能限界製品の距離は良品性能製品に誤差要因を与えたときの増加分以上に大きくなっており，精度が向上したことが分かる．良品性能製品と良品性能限界製品の分布を確認するため，ヒストグラムを図 11 に示す．

さらに，本研究の提案手法による評価結果と従来手法の評価結果を確認するた

表 3 最適化（取捨選択）前後のマハラノビスの距離比較

	D^2	Optimal D^2
Good	0.76	0.86
Good with Disturbance	3.50	3.62
Semi Good 1	6.03	7.49
Semi Good 2	10.36	13.12
No Good 1	38.33	37.73
No Good 2	36.50	36.41

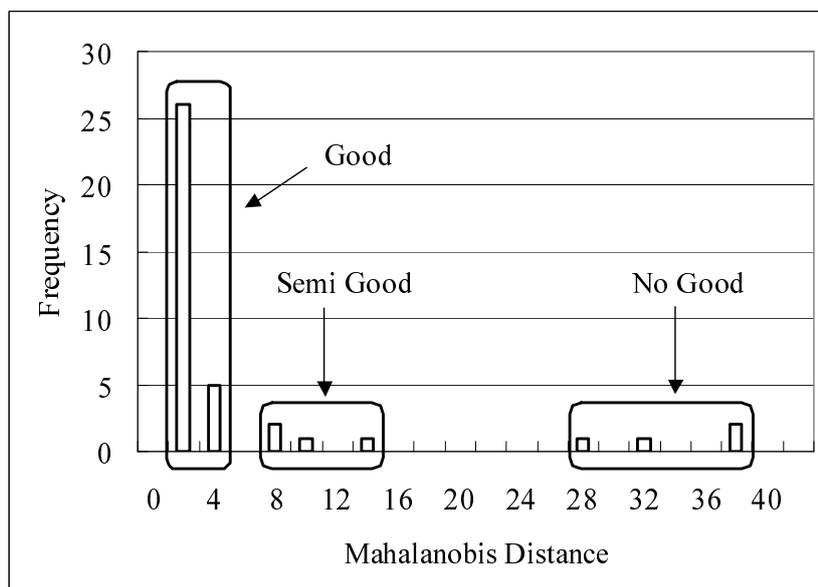


図 11 マハラノビスの距離の比較（良品性能製品，良品性能限界製品，欠品性能製品）

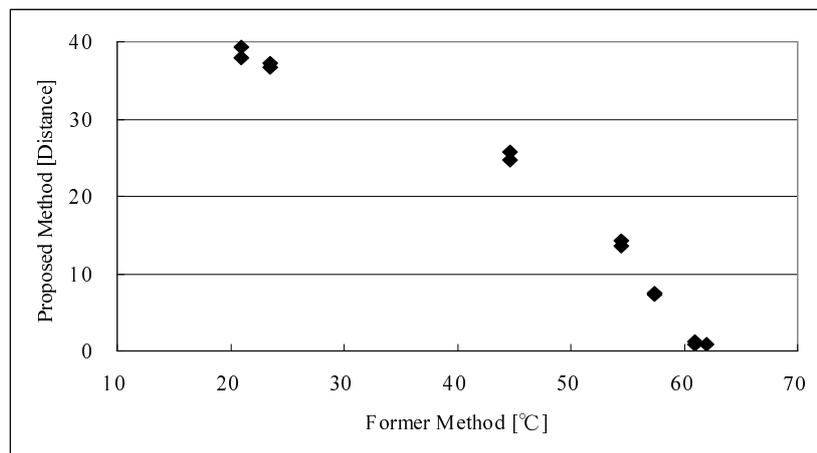


図 12 提案手法と従来手法の評価結果の散布図

めに，散布図（図 12）を示す．従来手法は，容器形状の断熱構造体に 95 [] の熱湯をいれ，1 日後の温度を測る方式であり，高温であるほど断熱品質が優れている．図 12 より，本研究の提案手法と従来手法との間に強い相関があることが分かる．

これらの実験結果から，本品質評価システムは従来手法に代わる品質評価が可能であり，短時間で高精度に品質評価が行えることが証明できた．

2.5 本章のまとめ

本研究では，熱入力と計測位置を改良し，かつ MT システムを適用するというハード・ソフト両面からの工夫をしているため，大きな効果が得られたものと考えられる．なお，ステップ応答からパラメータを取得するという意味では，これはシステム同定の一手法とも見なせるが，従来の同定手法が前提としている信号条件を満たさなくても，特徴量を適切に選ぶことによって良品・不良品の識別を実現している点に大きな特長がある．このような発想は断熱構造体の品質評価だけでなく，種々の応用が可能であると考えられる．

3. 独立成分分析による機械システムの品質評価

本章では，2章において提案した工業製品の品質評価から，工業製品の生産を行う生産設備に目を向け，生産設備のような機械システムの故障検出手法について提案を行う．

3.1 はじめに

システムに複数の互いに独立な信号が加わり，それらが線形に混合された信号として観測される状況で，観測信号のみから独立な入力信号を推定するという独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) の方法論が，近年，注目を集めている [25, 26, 27, 28, 29, 30] ．

独立成分分析の有用性は，様々な適用分野からも明らかである．例えば，音響信号処理では，音声の分離に用いられ [5]，石油精製プラントや化学プラントでは，有毒ガス漏洩検出などが提案されている [31]．また，生体信号解析では脳活動解析へ適用しており [32]，画像認識では肌の状態観測へ適用されている [33]．さらに，制御工学の分野ではプロセス管理への適用が報告されている [34] ．

しかしながら，制御工学で広く独立成分分析が活用されているとは必ずしも言えない．その理由の一つは，制御では動的なシステムを取り扱うためである．動的な混合を扱った研究として，例えば音声の分野では残響を考慮した信号分離のために，FIR フィルタによる混合を受ける場合の分離問題が扱われている [27] ．しかし解法が困難なために，周波数領域で分離することによって，静的な混合に帰着させる方法が主流である [28] ．一方，制御で扱うシステムは内部フィードバック構造を有するため，IIR フィルタによる混合を考える必要があるが，近似的に FIR フィルタの分離問題として扱くと，タップ数が増大するために多量のデータが必要となるし，周波数帯域が比較的に限られるため時間領域での解析が望ましい場合もある．そこで新田らは，ある種の状態空間モデルに独立成分分析を適用し，多変量 AR モデルに対するブラインド同定アルゴリズム (以下，VAR-ICA と呼ぶ) を提案している [35, 36, 37] ．また，これを応用した外乱低減法も提案している [38] ．

本論文ではVAR-ICAの応用として機械システムの故障検出について議論する。従来、独立成分分析は音声などに代表される信号処理の分野で活発に研究されてきたが、それらは信号そのものの分離が主たる目的であった。これに対し、故障検出では分離した信号と分離系の両方に着目している点が特徴であり、主たる論旨はつぎの2点である。

1. 振動が表れやすいように柔軟フレームで製作した機械振動系を用いて、VAR-ICAの有効性を実験によって検証する。VAR-ICAでは対象システムや入力信号に幾つかの仮定があり、これらがどの程度まで制約になるかは、理論だけでは明らかでない。逆に、仮定を満たさなくても部分的に有効なこともあるため、実機によって確認する。
2. VAR-ICAの応用として、システムに何らかの変化が生じた際の検出法を提案する。通常のシステム同定では、同定後に制御入力を設計するので、入力が未知とは考えにくい。しかし、外乱のように未知の入力信号が印加される場合や、入力がアクチュエータの飽和などにより不確かになる場合など、入力信号を利用できないことも多々ある。こういった状況下で、故障や劣化によってシステムの構造が変化すれば、出力信号にも影響する。このとき、構造の変化を出力のみから検出できれば、実用上も望ましい。そこで、これを実験によって確認する。

以下、それぞれについて補足する。1. に関しては、多変量ARモデルという仮定が必ずしも満たされなくても、システムに対する一部の情報が得られることを示す。2. については、出力信号には入力信号とシステムの伝達特性の両方の影響が現れるため、そのみでは入力の変化と伝達特性の変化（故障）とを区別することはできないが、独立成分分析の適用により故障を正しく検出できることを示す。

この目的を達するために、伝達行列の推定にはVAR-ICAを用い、故障検出には、なるべく短時間で効率よく検出を行なうためにFastICA[26]を用いる方法を提案する。以下、3.2節で提案するアルゴリズムを説明し、3.3節でARMAモデルの同定シミュレーションを通じて、変化の検出が可能であることを示し、3.4節で実験とその結果について述べる。

3.2 変化検出法

3.2.1 VAR-ICA の概略

本節では準備のために、標準的な独立成分分析の問題設定と学習則、そして動的システムに対する独立成分分析である VAR-ICA の概略を説明する。

独立成分分析は、未知の入力信号 $s(t)$ が、未知の混合行列 A によって

$$\eta(t) = As(t), \quad (13)$$

と（瞬時）混合されるとき、 $\eta(t)$ のみから $s(t)$ と A を復元する手法である。このとき $s(t)$ の各成分は統計的独立であり、混合行列 A は正則な定数行列であるという前提がある。信号復元（分離）は逆混合

$$\hat{s}(t) = W\eta(t), \quad (14)$$

を考え、 $\hat{s}(t)$ が独立になるように分離行列 W を学習させる方法がとられる。学習にはいくつかの手法 [25, 26, 29] が提案されているが、おおむねつぎの学習則で W を更新する。

$$\Delta W = \left(I - E[\phi(\hat{s})\hat{s}^T] \right) W. \quad (15)$$

ここで $E[\cdot]$ は期待値を表す記号、 $\phi(\cdot)$ は適当な非線形ベクトル値関数 [30]、 I は単位行列である。

学習が収束し、 $W = A^{-1}$ となれば入力 $s(t)$ が完全に復元できるが、独立性のみを基準にしているので、一般に、適当な対角行列 Γ と置換行列 P によって

$$W = P\Gamma A^{-1} \quad (16)$$

の形で求まる。したがって、再現された信号 $\hat{s}(t)$ は振幅と順序の不定性を残しており、 $s(t)$ と必ずしも一致はしないことを注意する。

さて、上記の問題設定は静的な混合（瞬時混合）であるが、これを動的システムによる混合

$$y(t) = G(z)u(t), \quad (17)$$

に拡張する手法について説明する．ここで $u(t)$ は未知入力信号， $y(t)$ は出力信号， $G(z)$ は安定かつ可逆で最小位相な離散時間伝達行列である．また， z は単位シフト演算子であり， $zu(t) = u(t+1)$ を意味する．

静的な混合の場合と同様に， $u(t)$ の各成分は独立であるとし， $y(t)$ の情報のみから $u(t)$ を復元することを試みる．これは静的な混合とは格段に困難な問題設定であるが，新田ら [35, 36] は以下の仮定のもとで，ある種の解法を与えている．

まず (17) 式において，システム $G(z)$ がつぎのような左既約分解で表されるとする．

$$\begin{aligned} G(z) &= D^{-1}(z)N(z), \\ D(z) &= z^\mu I + z^{\mu-1}D_1 + \cdots + D_\mu, \\ N(z) &= z^\mu N_0. \end{aligned} \quad (18)$$

ここで μ は既知の自然数であり，分母多項式行列の次数である．また $N_0 = (n_{ij}^0)$ は正則で，

$$n_{ii}^0 = 1, \quad |n_{ij}^0| < 1, \quad (i \neq j) \quad (19)$$

を仮定する．この仮定は独立成分分析における振幅の不定性を避けるためのものであり，一般性は失わない．

このとき，入出力関係は，

$$D(z)y(t) = N(z)u(t) \quad (20)$$

となり，さらに z がシフト演算子であることから

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(t-\mu) \\ \vdots \\ y(t-1) \\ y(t) \end{bmatrix}}_{\eta(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} I & & O & O \\ & \ddots & & \vdots \\ O & & I & O \\ -D_\mu & \dots & -D_1 & N_0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} y(t-\mu) \\ \vdots \\ y(t-1) \\ u(t) \end{bmatrix}}_{s(t)}, \quad (21)$$

という状態空間表現が得られる (O は零行列である．) この式を $\eta(t) = As(t)$ と略記するとき，入力ベクトル $s(t)$ が

$$s(t) = \left(y^T(t-\mu), \dots, y^T(t-1), u^T(t) \right)^T, \quad (22)$$

となり，独立成分 $u(t)$ 以外を含むため既存の独立成分分析で信号復元を行うことができない．しかし入出力ベクトルに $y(t-k)$ ($k = 1, \dots, k$) という項を含むことに着目すると，この問題に特化した独立成分分析のアルゴリズム (VAR-ICA) を得ることができる．

結果として分離行列 W の学習則は

$$\Delta W = T \left(I - E[\phi(\hat{s})\hat{s}^T] \right) W, \quad (23)$$

で与えられる．ここで T は次式で定義されるブロック対角行列である．

$$T = \text{block diag}(O, \dots, O, I). \quad (24)$$

これは通常の独立成分分析アルゴリズムにブロック対角行列 T を左から掛けたものに等しく， $s(t)$ のうち $u(t)$ のみを独立成分分析で復元していることになる (詳細は [36] 参照)．

独立成分の復元は (21) 式に対応する次の分離系において， W の最下位ブロックに配置されたパラメータ行列 W_k を (23) 式を用いて同時に更新することで行われる．

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(t-\mu) \\ \vdots \\ y(t-1) \\ \hat{u}(t) \end{bmatrix}}_{\hat{s}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} I & O & O \\ & \ddots & \vdots \\ O & I & O \\ W_\mu & \dots & W_1 & W_0 \end{bmatrix}}_W \underbrace{\begin{bmatrix} y(t-\mu) \\ \vdots \\ y(t-1) \\ y(t) \end{bmatrix}}_{\eta(t)}, \quad (25)$$

学習が収束すると VAR-ICA の分離行列 W は

$$W = \begin{bmatrix} I & O & O \\ & \ddots & \vdots \\ O & I & O \\ N_0^{-1}D_\mu & \dots & N_0^{-1}D_1 & N_0^{-1} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

となるから，分離系 $H(z)$ は

$$H(z) = (Iz^\mu)^{-1}(N_0^{-1}z^\mu + N_0^{-1}D_1z^{\mu-1} + \dots + N_0^{-1}D_\mu) \quad (27)$$

として求めることができる。

分離系 $H(z)$ が求まると、元のシステムは $\hat{G}(z) = H^{-1}(z)$ として推定される。独立成分分析を用いたシステム同定の特徴は、逆システムを推定することにより、これには入力信号を用いないため、未知入力システム同定もしくはブラインド同定と呼ぶ。

一方、分離系を FIR フィルタとして推定する従来の時間遅れ作用素を用いた方法 [39] でも、パラメータ行列 W_k を決定することができる。この方法を便宜的に VAR-ICA と同様の形式で表すと、

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{u}(t-\mu) \\ \vdots \\ \hat{u}(t-1) \\ \hat{u}(t) \end{bmatrix}}_{\hat{s}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} W_0 & O & \dots & O \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ W_{\mu-1} & \dots & W_0 & O \\ W_{\mu} & W_{\mu-1} & \dots & W_0 \end{bmatrix}}_W \underbrace{\begin{bmatrix} y(t-\mu) \\ \vdots \\ y(t-1) \\ y(t) \end{bmatrix}}_{\eta(t)}, \quad (28)$$

という形で分離系 W を学習することになる。この方法では各パラメータ行列を個別に学習する必要があり、学習効率の観点からは疑問が残る。これに対し VAR-ICA は分離系を近似なしに厳密に推定することができ、しかもパラメータ行列を同時に学習するアルゴリズムなので、逆システム $H(z)$ を得るのに有利である。

3.2.2 故障検出アルゴリズム

上で述べたブラインド同定法には、次のような応用が考えられる。入力と出力の両方を用いてシステムを同定するのが通常システム同定であるが、実際にはアクチュエータの飽和によって操作量が未知となる場合や、未知外乱が定常的に加わる場合など、複数の入力未知の場合も十分にあり得る。これらは要因が異なるので、独立な値をとると仮定するのは自然である¹。そこで、VAR-ICA により未知入力信号から出力（観測）信号への伝達行列を得ることができる。こうしてあらかじめ未知入力から出力への影響（システム構造）がわかっているならば、

¹本論文では、正規分布に従う入力信号は1つ以上含まないと仮定する。これは独立成分分析では本質的に多次元正規分布に従う信号を分離できないためである。

個々の入力を再現したりシステムの様子を監視することができるので有用と考えられる。

そこで、本論文では故障や経年変化により構造が変化したときの検出に、VAR-ICA を適用することを提案する。特に、常時システムの出力を監視しておき、構造が突発的に変化したとき、これをなるべく短時間で検出する手法を以下で述べる。

3.2.3 逆システムによる定常監視

独立な信号が動的システム $G(z)$ に入力されているとき、VAR-ICA により

$$H(z)G(z) = I, \quad (29)$$

なる分離系 $H(z)$ を得ることができる。これは未知入力の挙動を観測することにも利用できるが、ここでは $G(z)$ の構造（具体的にはパラメータ行列 $N_0, D_i (i = 1, \dots, \mu)$ ）が変化したときの検出方法を検討する。

単純に考えつくのは、VAR-ICA を繰り返し適用して、一定時間ごとに $G(z)$ の推定結果を監視するという方法である。しかし、VAR-ICA は自然勾配法に基づくアルゴリズムであるために、パラメータ行列の繰り返し学習には時間を要するし、推定パラメータが多いために、ある程度のデータ点数も必要となる。他方、故障検出の観点では、変化の事実を直ちに知ることが問題であり、変化後のパラメータ行列を求める必要はあまりない。むしろ複数のパラメータ行列から故障を検出することは難しく、自動化にふさわしくない。この問題を解決するために、さらに独立成分分析を適用することを考える。

3.2.4 FastICA の援用

常時、システム同定を繰り返して変化を検出するのは上述の問題があるので、逆システムの構築後はこれを固定し、分離された信号をモニタすることによって、故障を検出する手法を提案する。

(17) 式において、 $y(t)$ から $u(t)$ を推定する逆システム $H(z)$ を、3.2.1 節の手法 (VAR-ICA) で求め、この系を通過した分離信号 $\hat{u}(t)$ を生成する。

$$\hat{u}(t) = H(z)y(t). \quad (30)$$

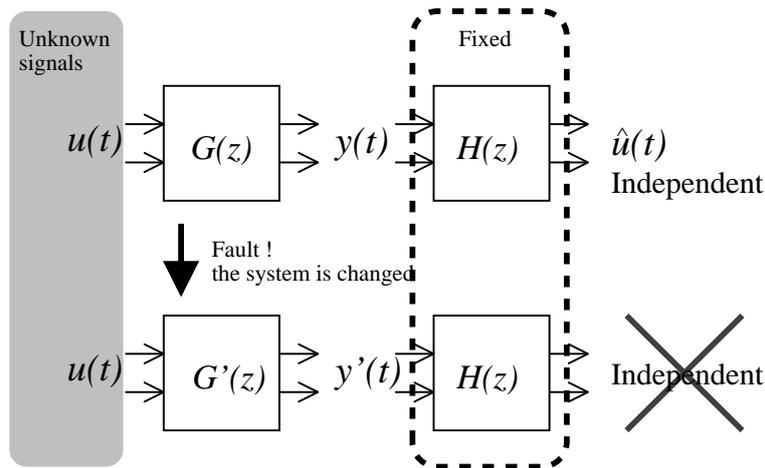


図 13 逆システムによる定常監視法のブロック線図

このとき，システムに何らかの変化が発生し，伝達行列 $G(z)$ が $G'(z)$ に変化すれば， $H(z)$ は当然 $G'(z)$ の逆システムではないので， $\hat{u}(t)$ は独立にならないはずである²（図 13）．したがって，通常時に分離系 $H(z)$ を一度推定しておけば， $\hat{u}(t)$ の独立性を調べることで故障の検出が可能となる．

しかし，一般に独立であることを直接示すのは困難であるので FastICA を用いた簡便な方法を提案する．

まず，分離信号 $\hat{u}(t) \in \mathbb{R}^n$ に FastICA を適用しよう．すると，

$$\tilde{u}(t) = F\hat{u}(t), \quad (31)$$

のように分離行列 F が決定され，独立成分 $\tilde{u}(t)$ が得られる．故障前（図 13 上）は， $\hat{u}(t)$ は独立だから，分離行列 F は振幅と順序の不定性の影響を受けるが，適当な置換行列によって対角行列に変換できる．故障後（図 13 下）は， $\hat{u}(t)$ は独立でなくなるが，FastICA ではチャンネルごとに順に独立な信号を取り出す算法であるため，それでも学習は収束して F が算出される．ただし，正しい分離を

² $G(z)$ が $G'(z)$ に変化しても独立成分が得られるのは $H(z)G'(z) = \Gamma P$ となる場合である．（ Γ, P はそれぞれ適当な対角行列および置換行列である．） Γ は入力信号の振幅が変化した効果を， P は入力源の入れ替わり（もしくは出力側センサの付け替え）が生じたことを意味しているが，物理システムがこのように変化することは稀であり，本論文ではこのような変化は生じないと仮定する．

与えないため F は置換しても対角行列にならないか、そもそも置換行列が存在しない。

これらのことを、つぎのようにして系統的に判定しよう。まず、 F の第 i 行について、その行ベクトルの要素のうち絶対値が最大の要素を 1、その他を 0 とした自然基底（行）ベクトル e_i を求め、置換行列

$$E = (e_1^T, \dots, e_n^T), \quad (32)$$

を生成する。 E がフルランクでない場合、 F には置換行列が存在しないため、故障が発生したと判断できる。 E がフルランクの場合、

$$\bar{F} = FE, \quad (33)$$

として順序の不定性を取り除き、これを各列について規格化する。すなわち、 $\bar{F} = (\bar{f}_{ij})$ とするとき第 j 列について、

$$\bar{f}_{kj} = \frac{\bar{f}_{kj}}{\bar{f}_{jj}}, \quad (k = 1, \dots, n) \quad (34)$$

として振幅を規格化する。規格化された行列を \bar{F}' とするとき、この行列の対角成分は 1 であり、もし非対角成分に絶対値が 1 以上の成分があれば F は対角優位ではなかったため、この場合も故障が発生したと判断する。対角優位の度合いを数値として表すには、 n 次の単位行列を I_n として、

$$\epsilon := \|\bar{F}' - I_n\|_F \quad (35)$$

のように非対角成分の 2 乗和で単位行列からの残差を定義し、これを独立性の尺度として見積もればよい。ここで $\|\cdot\|_F$ はフロベニウスノルムを表す。

このように、FastICA を用いると独立性の判断材料として残差 ϵ のみを与えることができ、検査結果を評価して警告を発す場合などには有益な情報となる。しかも FastICA の特徴である計算速度を生かすことができる。ただし、実用上は、正常時に ϵ を複数回計算しておき、それをもとに判定基準として閾値を設定する必要がある。

以下に故障検出の処理手順をまとめる。

1. 機械システムが正常な状態で，VAR-ICA を用いて，逆システム $H(z)$ を求める．
2. 逆システム $H(z)$ を固定し，出力信号 $y(t)$ から推定入力信号 $\hat{u}(t)$ を求める．
3. $\hat{u}(t)$ に FastICA を適用し，FastICA の分離行列 F を得る．
4. 機械システムに故障が発生していなければ，FastICA の分離行列 F は対角優位な行列に変換できる．対角優位であるかを (35) 式の残差で測り正常時に取得した閾値と比較する．
5. 機械システムに故障が発生していない場合は，2. に戻る．故障が発生した場合は，報知し運転を停止する．

3.3 数値シミュレーション

提案した故障検出アルゴリズムが有効であることを確認するために数値シミュレーションを行った．まず，システムの伝達行列が VAR-ICA が仮定する多変量 AR モデルにならない場合，VAR-ICA によって，どの程度の同定結果が期待できるのかを示し，その結果をもとに，提案手法に従って故障検出を行う．

3.3.1 ブラインド同定

想定するシステム $G(z) = D^{-1}(z)N(z)$ としてつぎの多変量 ARMA モデルを用いた．

$$D(z) = Iz^2 + \begin{bmatrix} 0.37 & 1.69 \\ -0.04 & 0.24 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0.63 & 0.78 \\ -0.03 & 0.37 \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$N(z) = \begin{bmatrix} 1.97 & -0.39 \\ 1.26 & 1.50 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} -1.09 & -0.69 \\ -0.62 & -0.21 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

このとき，次数 μ (分母多項式行列 $D(z)$ の最高次数) を 2 および 5 として，ブラインド同定を行った．その結果をボード線図として図 14 に示す．この図は，伝達行列の各成分についてゲイン線図と位相線図を描き，それぞれに対応させて

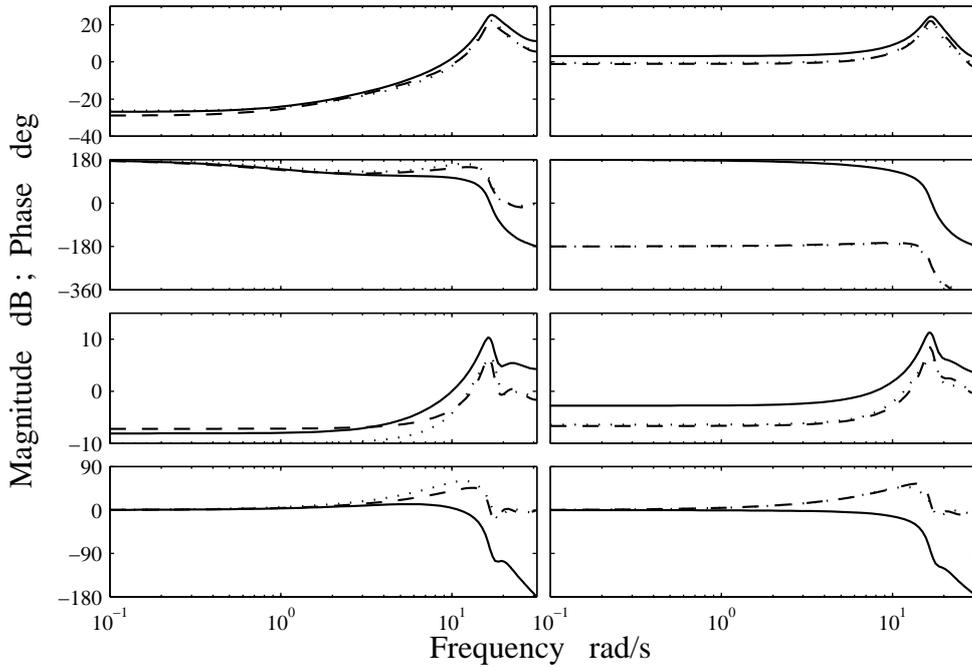


図 14 $\hat{G}(z)$ のボード線図 (solid : 実システム, dashed : $\mu = 2$, dotted : $\mu = 5$)

配置したものである．例えば，(1,1)成分を左上に描くなどの対応関係である．図より，多変量 AR モデルという仮定を満たさず，かつ次数も真のものとは異なっても，システムの特徴（共振ピークなど）を正しく推定していることがわかる．

3.3.2 故障検出

そこで $\mu = 2$ の同定結果を用いて逆システム $H(z)$ を取得し，これにより入力信号 $u(t)$ の推定 $\hat{u}(t)$ を求める．もし，逆システムが正しく推定されているならば $\hat{u}(t)$ は独立であるはずであり，これを提案手法で確認する．

$\hat{u}(t)$ を FastICA で処理し，分離行列 F を得るとつぎのようになった．

$$F_1 = \begin{bmatrix} -0.006 & 0.648 \\ -0.671 & -0.008 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

この分離行列に対して残差 ϵ を求めると $\epsilon = 0.015$ となる．これから，分離系の推定に成功したとともに，システムに故障が発生していないことがわかる．

一方，2つの未知入力信号のうち，1つの信号をM系列から正規乱数に変化させたとき，分離行列は

$$F_2 = \begin{bmatrix} -0.672 & 0.010 \\ 0.019 & -0.638 \end{bmatrix}, \quad (39)$$

となり，残差は $\epsilon = 0.033$ となった．残差が十分に0に近いので，故障が発生していないことがわかる．

最後に，故障の発生として分子多項式行列 $N(z)$ が次のように変化した場合を考える．

$$\bar{N}(z) = \begin{bmatrix} -0.32 & -2.65 \\ -1.18 & -0.34 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} -1.83 & -0.18 \\ -0.19 & -0.66 \end{bmatrix}. \quad (40)$$

このとき，先ほど設定した $H(z)$ によって観測信号から入力信号を推定し，それにFastICAを適用した結果，つぎの分離行列を得た．

$$F_3 = \begin{bmatrix} 0.329 & -0.191 \\ -0.505 & -0.756 \end{bmatrix}. \quad (41)$$

この分離行列に対して残差を求めると $\epsilon = 1.555$ となった．この残差は先の2例と比べても0より十分に大きいため，この場合は F_3 は対角優位でもないため，システムに故障が発生したと判断できる．

以上のシミュレーション結果より，VAR-ICAは，それ自身が仮定するよりも広いクラスのシステムを同定することができることが分かった．また，意図的に入力信号を変化させても，独立性を用いることで故障の発生のみを正しく検出できることも分かった．以上のことから，提案した故障検出アルゴリズムが有効に機能することが確認できた．

3.4 故障検出実験

3.4.1 実験装置

提案した変化検出アルゴリズムを評価するために，機械システムの実験装置（図15）を製作した．実験装置を構成するフレームは，ステンレスロッド（直径

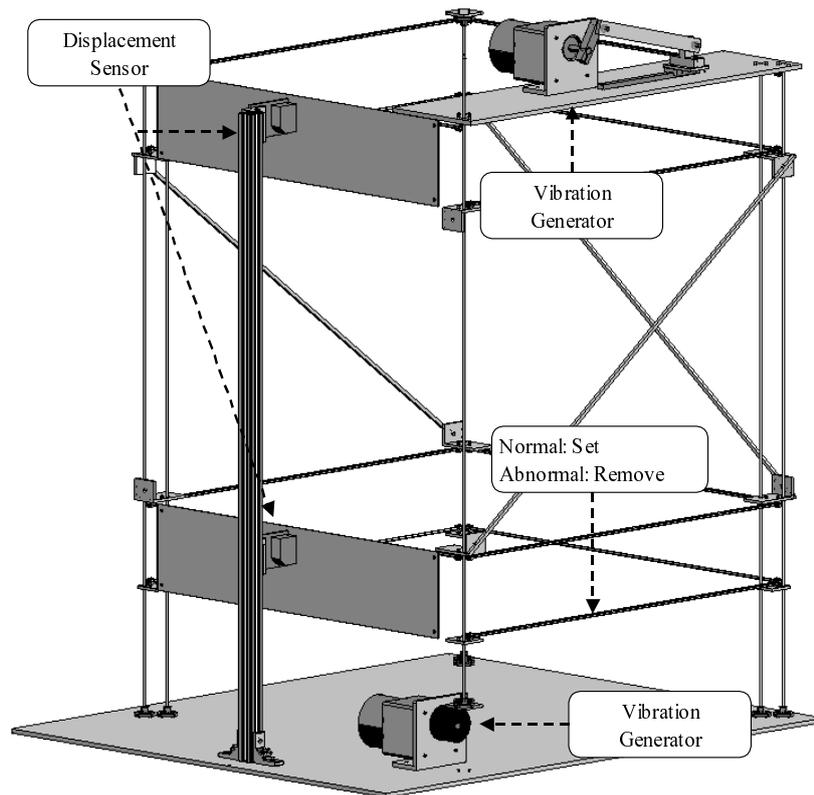


図 15 故障検出実験装置の外観

4 [mm] , 肉厚 0.5 [mm]) を , 高さ 750 [mm] , 幅 500 [mm] , 奥行き 500 [mm] に組み合わせている .

この装置の上部に取り付けられたモータ・スライダ・リンクから構成される部分は , 機械システムの機構を模擬した信号入力部であり , 下部に取り付けられたモータと偏心幅 2 [mm] を持つ偏心円盤により構成される部分は , 機械システムへ作用する外乱を模擬した外乱入力部である . なお , 信号入力部 , 外乱入力部ともに減速比 1:5 のギヤヘッドを付けたブラシレス DC モータ (FED6P20PF-D3 : 日本サーボ製) を用いた . これらの制御はマイコンボード (BTC050 : ベストテクノロジー製) で行っている . この機械システムはこれらのモータによる加振で振動している .

その振動を , 実験装置の接地面より 250 [mm] と 750 [mm] の場所に取り付け

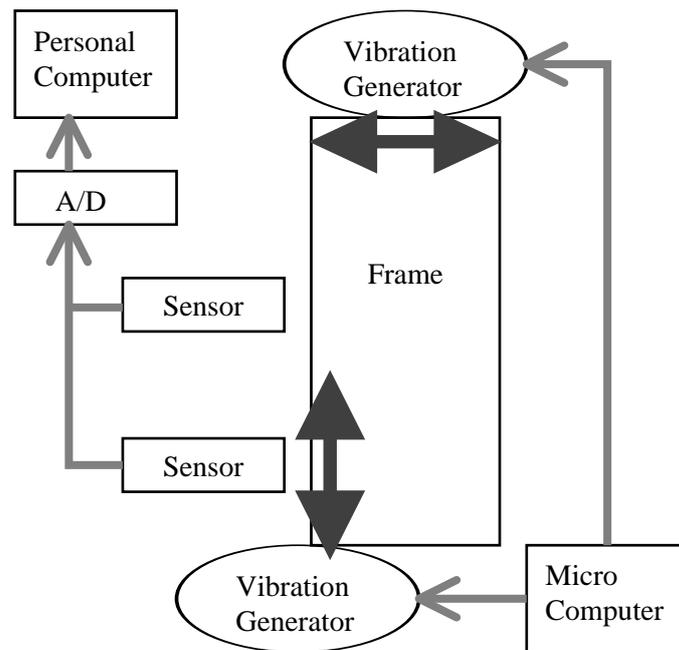


図 16 故障検出実験装置のシステム構成図

た，レーザ変位センサ（ZX-LD40：オムロン製）で計測し，アンプ（ZX-LDA11：オムロン製）を通して変位データが電圧出力として観測される．この信号を，パソコンのPCIバスに接続されたA/D変換ボード（ADA16-32/2(PCI)F：コンテック製）によって逐次取得し，そのデータを提案アルゴリズムで処理する（図16）．

3.4.2 実験方法

実際の故障は，ボルトが緩みいずれ脱落するといった過渡的な場合が想定されるが，今回の実験では

1. 機械システムが正常な状態
2. 機械システムは正常な状態で，作業スピードを上げたと想定し，信号入力部のモータの印加電圧を変化させた状態（印加電圧を 0.89 [V] から 1.23 [V] に変化させた．回転速度が早くなることに相当．）

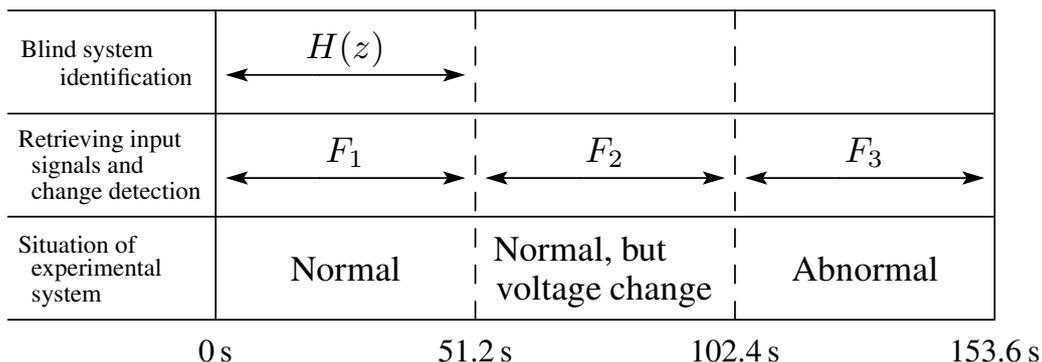


図 17 故障検出実験のタイムチャート

3. 機械システムに変化が発生した状態（図 15 の底辺に配置されたステンレスロッド固定ボルトが外れた状態）

の 3 状態を設定し，それぞれ 51.2 [s] のデータを取得し，これら 1. 2. 3. のデータを順番につなげることで擬似的に故障発生時のデータを生成した．なお，2. は故障発生のみを識別できることを確認するためのデータである．

まず，最初の 51.2 [s] を正常な状態として，機械システムのブラインド同定を行い，分離系 $H(z)$ を推定する．故障検出は， $H(z)$ を用いて推定した入力信号の独立性を FastICA を用いて調べるが，この際の統計処理にも 51.2 [s] ごとのデータを用いた．実験のタイムチャートは図 17 のようになる．実験では未知入力信号として M 系列信号を想定し，それを上下のモータへの印加電圧とした．計測はサンプリング周期 100 [ms] にて行った．

3.4.3 実験結果

図 18 にレーザ変位センサによる観測値を示す．上図，下図がそれぞれ上下のセンサアンプの出力電圧に対応する．また 0 – 51.2 [s] までが通常時，51.2 – 102.4 [s] にかけては上側のモータアンプのゲインが変化し，102.4 [s] に図 15 にあるように，底辺に配置されたステンレスロッドの 1 本の締結が外れる事故が発生したと想定し，それ以降，153.6 [s] までその信号を観測したとする．

まず，分離系 $H(z)$ を推定するために次数 μ を決定しなければならない．そこ

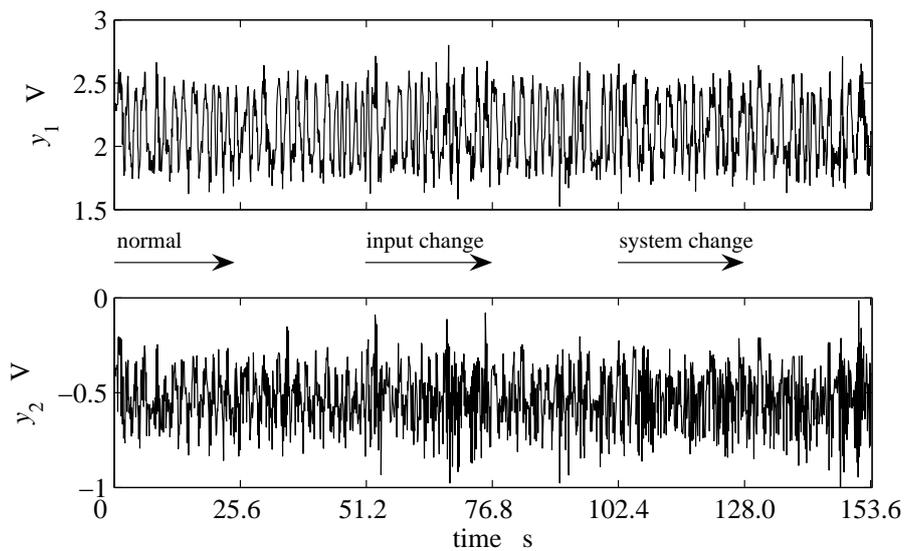


図 18 観測信号

で正常時のデータに対して、 $\mu = 2, 3, \dots, 6$ と変化させて VAR-ICA によりブラインド同定を行った。

同定結果を図 19 に示す。図より $\mu = 4, 5, 6$ では同様の周波数特性を有していることから、VAR-ICA の次数 μ を 5 と設定した。また、この同定結果から、VAR-ICA は、適切な次数を設定すれば同様の特性を得ることができるため、ある程度の頑健性も備えていることがわかる。なお、 $\mu = 5$ として 512 点のデータを用いて逆システム $H(z)$ を推定したが、これには 7.18 [s] (Celeron, 2.2 [GHz]) の計算時間を要した。

この計算時間の短縮のために、提案法である FastICA を用いた故障検出を行った。FastICA には VAR-ICA と同様に、512 点の分離した推定信号を用いた。FastICA によって得られた分離行列 F および (35) 式によって求めた残差を以下に

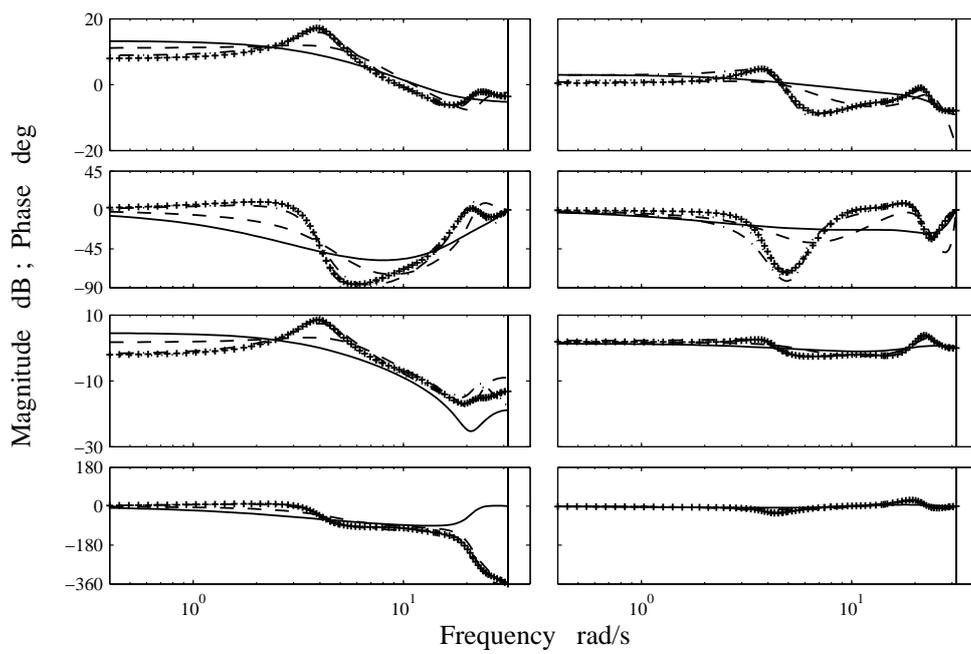


図 19 ボード線図 $\mu = 2, 3, \dots, 6$ (solid : $\mu = 2$, dashed : $\mu = 3$, dash-dotted : $\mu = 4$, dotted : $\mu = 5$, cross : $\mu = 6$.)

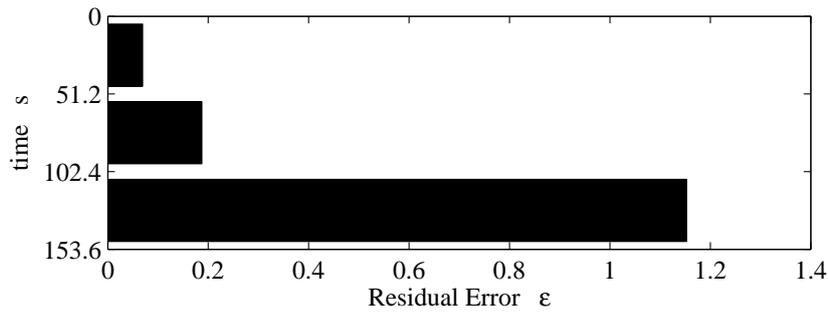


図 20 FastICA による故障発生時の残差比較

示す．

$$F_1 = \begin{bmatrix} -0.574 & 10.754 \\ 8.292 & -0.004 \end{bmatrix}, \quad \epsilon_1 = 0.069,$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} -8.630 & 1.568 \\ -0.211 & 8.437 \end{bmatrix}, \quad \epsilon_2 = 0.187,$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 4.706 & 4.519 \\ 3.836 & -5.544 \end{bmatrix}, \quad \epsilon_3 = 1.153.$$

また，残差を図示したものを図 20 に示す．図 20 より 102.4 [s] 以降では残差が大きくなりシステムに故障が発生していることが分かる．FastICA を用いた処理にかかった時間は平均 0.53 [s] と非常に短時間で検出できることが分かった．

3.5 本章のまとめ

本論文では，独立成分分析を機械システムの故障検出に応用し，検出法の有効性を確認するために，柔軟フレームの実験装置を製作し，それをを用いた実験を行った．VAR-ICA によるブラインド同定により逆システムを求め，その逆システムから推定される入力信号の独立性を FastICA によって測ることで，より短時間で故障の検出が可能であることを実験により確認した．

なお，本論文では VAR-ICA と FastICA を併用しているが，これらの独立性基準は異なるので， $H(z)$ を確定した直後に得られる F が対角行列になることが理論的に保証されているわけではない．シミュレーションおよび実験では対角に

なっているが、さらに厳密に変化検出を行うには、正常時に得られる定数分離行列 F_1 を基準とし、それ以降に得られる F_n については $F_n F_1^{-1}$ の対角優位性を (35) 式で測るといった方法が考えられる。これについては今後の課題としたい。

また、実用に向けては、実際の環境にあった故障検出に取り組む必要がある。たとえば入力が互いに干渉し合う場合である。この場合は、分離信号が個々の独立成分とはならないため、グループ間での独立性を議論しなければならない。この際、独立の判定にはブロック対角行列を考えることになるが、グループの再編を考慮に入れるなどの措置が必要となる。これについても今後の課題としたい。

4. 組み込み温度制御システムの品質評価とパラメータ設計

本章では、2章と3章で行った品質評価と異なった視点で、品質評価の結果を温度制御システムの制御パラメータの設計に応用する手法を提案する。

4.1 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は、オペレータによって適宜制御パラメータが調整される生産プラントのような高度な制御システムとは異なり、通常制御パラメータは製造時に組み込まれたまま変更されない。このように固定されたパラメータしか持たない組み込み温度制御システムでは、使用される環境の変化によって温度制御性能が一定しないという問題が度々発生する。組み込み温度制御システムでは、温度制御性能が商品価値や品質を決定する重要な機能であるので、温度制御性能が一定しなければ品質問題などを引き起こす原因になる。

例として、代表的な組み込み温度制御システムである調理家電で考えた場合、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、調理の仕上がりを悪化させる。このような外気温の変化は、寒冷地と温暖地、季節による違いなど、消費者の使用状況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外乱要因である。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するなどの品質不良が発生し、消費者からの返品などにより商品価値や企業価値を下げることになってしまう。このように、組み込み温度制御システムの温度制御性能は、使用される環境などの避けることのできない様々な要因が影響を与えるので、安定した制御性能を持った制御パラメータの設計はかなり困難な問題である。

上述の外気温変化による制御性能の低下に対応するため、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[40]。そこで、センサの追加を必要とせず、外気温の変化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[12]によって行う方法を提案する。タグチメソッドは、設計工学や品質管理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分野[24, 41, 42, 43]に適用されている。また、PID制御[44]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。PIDパラメータの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。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[45]。

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[46]、特性変動分を考慮した設計法[47]、複数の混合感度問題によるロバスト設計法[48]などが提案されている。これらの方法は伝達関数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、タグチメソッドが利用される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[49, 50]は少なく、特に、本研究で取り上げる使用環境の変化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

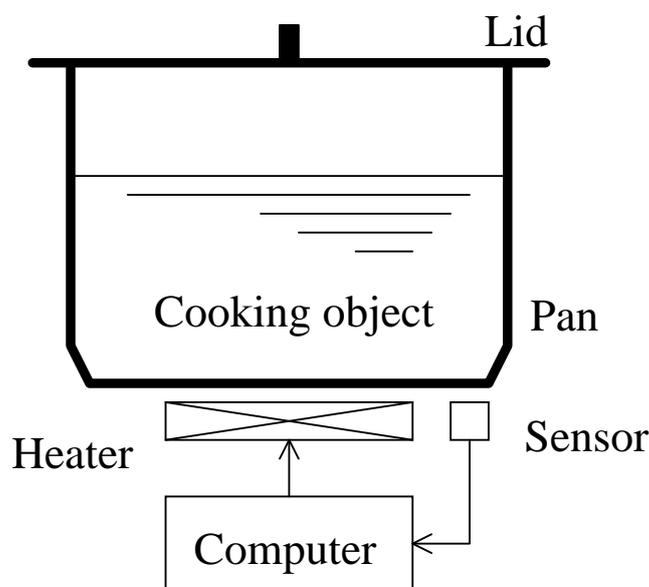


図 21 調理家電の概略構造

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型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．

4.2 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，外気温変化による影響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 21 のような構造をしている．図 21 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出来ない．

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，調理対象の正確な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

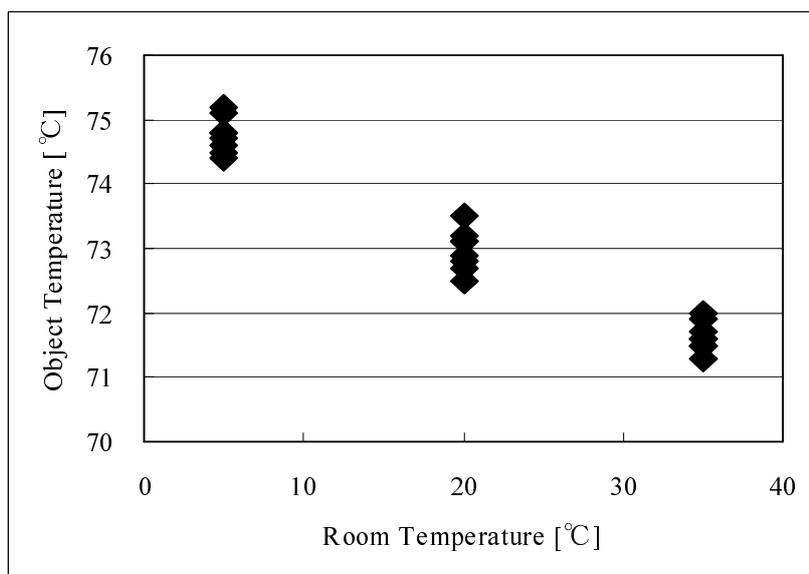


図 22 外気温と調理対象温度との相関図

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．外気温の変化は温度勾配にも影響し変化させるので，補正だけでは正確な調理対象の温度を計測することは出来ない．

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出来る．外気温が 5, 20, 35 [] において，温度センサ部の温度を 70 [] で制御した場合，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かを確認する．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 22 に示す．このように，外気温が 5 [] の場合の調理対象の平均温度は 74.8 []，同様に外気温が 35 [] の場合では 71.6 [] となり，外気温の変化によって調理対象の温度に 3.2 [] の差が生じる．なおサンプル数はそれぞれ 8 ケである．

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 [51, 52] など利用できる．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り，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．

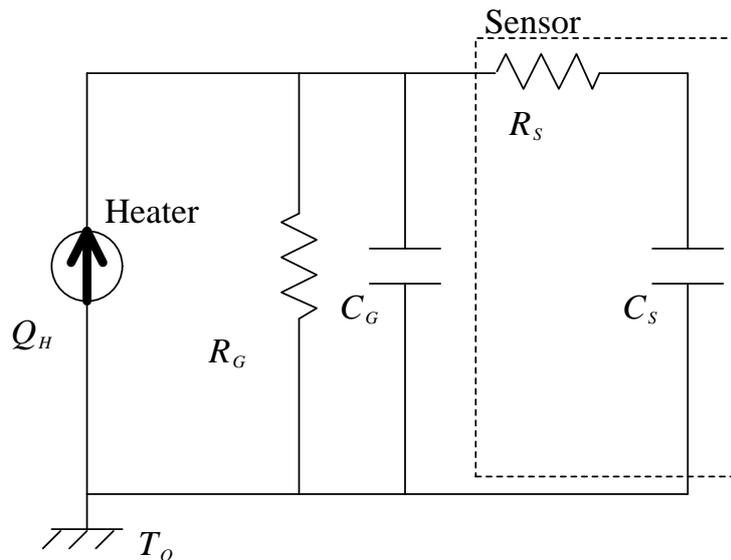


図 23 組み込み温度制御システムの電気回路モデル

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 23）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_0 であるので、外気温 T_0 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 23 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。

4.3 パラメータ設計法

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

4.3.1 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、

$$y = \beta M, \quad (42)$$

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可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, \dots 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 4) 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、 $2^1 \times 3^7 = 4,374$ 通りの実験数となるが、直交表を用いた実験では 18 通りに削減できる。

基本機能を定義し、制御因子の水準を決定すれば、直交表にあわせて制御因子の水準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、制御因子の変化に対応して 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 ($r = 1, \dots, R$) 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出来ない因子である。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、 N_1, N_2 の 2 水準とする方法を一般的に用いる。誤差因子は、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 24) 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出来る。

表 4 L18 直交表

	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

	Control Factors	Noise Factors
		Signal Factors
1	Inner Orthogonal Array	Outer Orthogonal Array
2		
⋮		
⋮		
⋮		
18		

図 24 内側直交表と外側直交表

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 25）。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って変化することとなる。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出来る。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を割愛する。）

4.3.2 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 26 のよう表される。ここで、 k はサンプリングを表す。

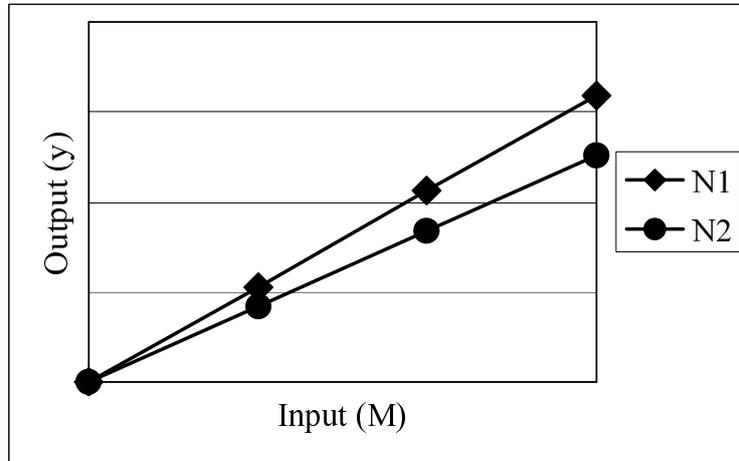


図 25 誤差因子による入出力関係のバラツキ

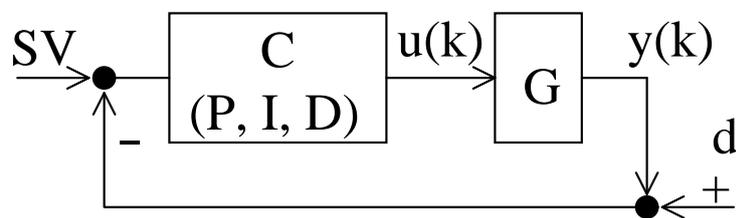


図 26 PID 制御器のブロック線図

このような組み込み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 (42) 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 $u(k)$ を信号因子とすることは出来ない．この理由は図 26 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，

$$u(k+1) = K_P e(k) + K_I T_S \sum e(k) + K_D \frac{1}{T_S} (e(k) - e(k-1)), \quad (43)$$

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，

$$e(k) = SV - y(k), \quad (44)$$

を表す．(43) 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出来ないので，入力信号 $u(k)$ を信号因子 M とすることは出来ない．

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」[53] 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制御対象から得られる出力信号 $y(k)$ を，基本機能 (42) 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． T は経過時間であるので線形に増加する．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はずである．これは，出力信号 $y(k)$ の積分値を出力特性 y とすれば，

$$y = \sum y(k) = \beta T, \quad (45)$$

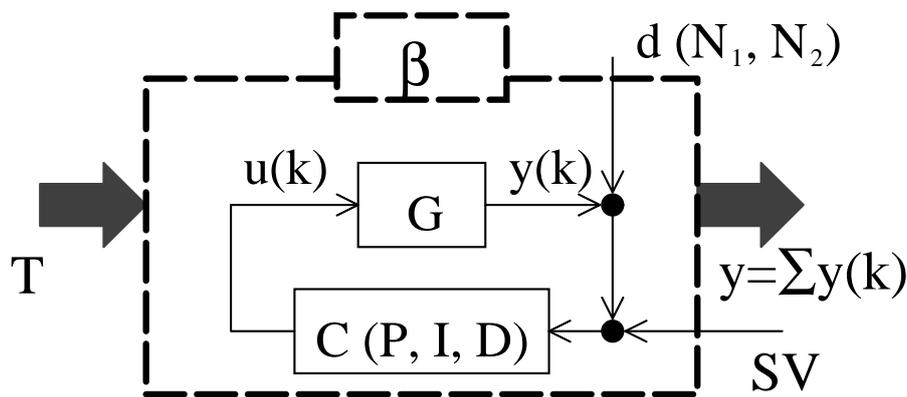


図 27 制御システム設計におけるタグチメソッド基本機能のブロック線図

の関係が成立する．図 26 の組み込み温度制御システム全体を含んだ系を，設計対象のシステム β としたことによって，基本機能 (42) 式が成立するように出来た (図 27)．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 [54] 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出来ない．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) による評価が出来ないためである．そこで，二見ら [50] の方法と同じく，次のような対策を行う．

$$y_T(k) = \begin{cases} y(k) & \text{if } y(k) \leq SV \\ SV - (y(k) - SV) & \text{if } y(k) > SV \end{cases} \quad (46)$$

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 28)．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 (45) 式に代入し，

$$y_T = \sum y_T(k) = \beta T, \quad (47)$$

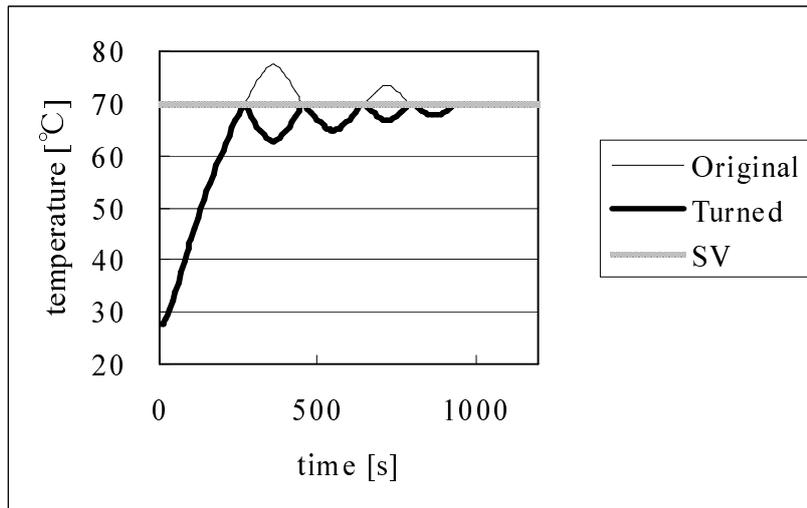


図 28 目標値での折り返し出力信号波形

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．具体的な設計手順を以下に記述する．

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．一般的に誤差因子は，現実には考えられる両極端な 2 水準とすることで実験数の増加を抑える．
4. 直交表に基づいて実験を行う．実験結果データは，表 5 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

表 5 任意の行の実験結果行列

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

列 \mathbf{Y}_1 は,

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2N} \\ \vdots & & & \\ y_{R1} & y_{R2} & \cdots & y_{RN} \end{bmatrix}. \quad (48)$$

となる．ここで，出力特性 $y_{Tl_{rn}}$ 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，

$$y_{Tl_{rn}} = \sum_{k=M_{n-1}}^{M_n} y_{Tl_r}(k), \quad (49)$$

によって求める ($r = 1, \dots, R$. $n = 1, \dots, N$) . L18 直交表で，誤差因子を 2 水準とした場合， $l = 18$ ， $R = 2$ となり，実験結果行列 \mathbf{Y}_1 が $18 \times 2 = 36$ 個求まる．以下，本研究の例にあわせて，誤差因子の水準数を $R = 2$ ，信号因子の水準数を $N = 3$ として説明する．

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．ロバスト性の評価には，通信工学で用いられる SN 比を導入する．実験結果行列から得られる出力の全 2 乗和 S_T は，

$$S_T = y_{l_{11}}^2 + y_{l_{12}}^2 + y_{l_{13}}^2 + y_{l_{21}}^2 + y_{l_{22}}^2 + y_{l_{23}}^2, \quad (50)$$

誤差因子によるバラツキを含んだデータとなる．つまり，

$$S_T = S_\beta + S_{N \times \beta} + S_e, \quad (51)$$

のように分解することができる．ここで， S_β は感度である比例定数 β の効果， $S_{N \times \beta}$ は誤差因子 N_1, N_2 による感度の変動， S_e は原点比例式である基本機能式からの誤差変動である．ここで， $S_\beta, S_{N \times \beta}, S_e$ をそれぞれ求めて³，SN比 η を，

$$\eta = 10 \log \frac{\frac{1}{2U}(S_\beta - V_e)}{V_N}, \quad (52)$$

として求める．なお，基本機能式からの誤差分散 V_e と誤差因子による変動も含めた全体の誤差分散 V_N は，

$$V_e = \frac{S_e}{2N - 2}, \quad (53)$$

$$V_N = \frac{S_{N \times \beta} + S_e}{2N - 2}, \quad (54)$$

によって計算する（52）式で通信工学におけるSN比と同様に，分母は変動などバラツキの影響を表し，分子は感度を表している．

6. SN比が高い制御因子の水準を組み合わせた制御パラメータによって確認実験を行い，必要があればパラメータの微調整を行う．

4.4 実験

4.4.1 実験方法

本研究で用いた実験装置の概略を図 29 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 [] で温度制御を行う．水中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．

³ $S_\beta = (L_1 + L_2)^2/2U$ ， $S_{N \times \beta} = (L_1 - L_2)^2/2U$ ， $S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta}$ ．なお， L_1, L_2 は線形式といわれ， $L_1 = y_{11}T_1 + y_{12}T_2 + y_{13}T_3$ ， $L_2 = y_{21}T_1 + y_{22}T_2 + y_{23}T_3$ によって与えられる． U は入力の大さを表し， $U = T_1^2 + T_2^2 + T_3^2$ によって与えられる．なお，SN比の算出法の詳細は[12, 55]が詳しい．

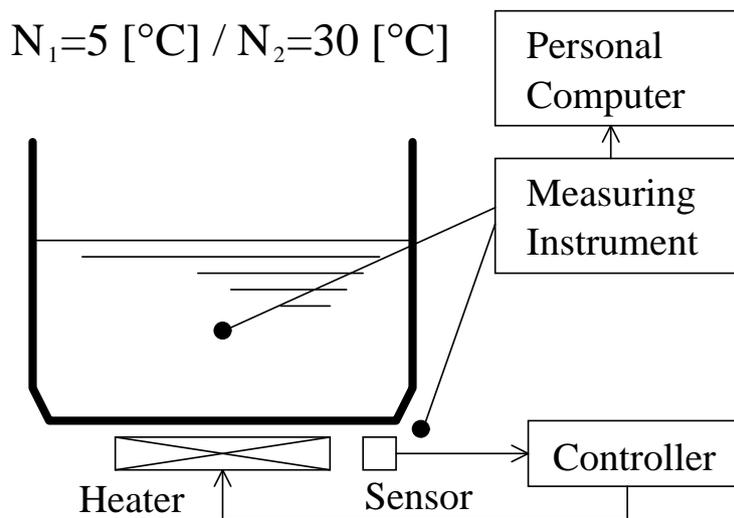


図 29 PID パラメータ実験装置

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 [] 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 6 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。

4.4.2 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 7 に、要因効果図を図 30 に示す。PID パラメータを割り付けた制御因子は、C, E, G であるので、これらの制御因子の 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 PID パラメータが外気温の変化に強い組み合わせとなる。

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認する

表 6 制御因子 (P. I. D.) , 誤差因子 (O. T. = Outside temperature) , 信号因子 (E. T. = Elapsed time) の一覽

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 []	30 []

Signal Factors	Level		
	1	2	3
T: E. T.	400 [s]	800 [s]	1200 [s]

表 7 SN比の計算結果 [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

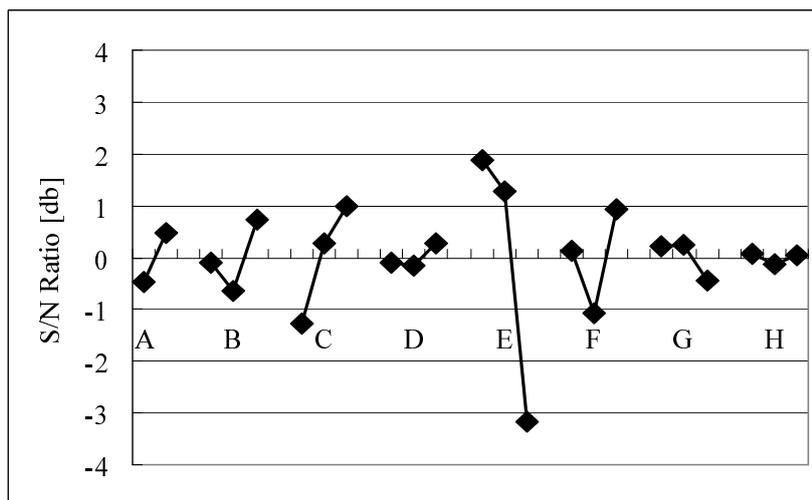


図 30 PID パラメータ実験の要因効果図

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 [] の 2 条件で，制御用温度センサ部の温度 70 [] 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 31 に示し，比較としてリミットサイクル法の出力波形を図 32 に示す．この結果から，タグチメソッドによる設計法では外気温 5 [] と 30 [] の波形は，定常時平均して 0.3 [] 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 [] とタグチメソッドによる設計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 33 に示す．リミットサイクル法による IAE は，外気温 5, 30 [] 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 [] 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 [] と 30 [] の IAE の差，つまり外気温の変化に対するロバスト性を見ても，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

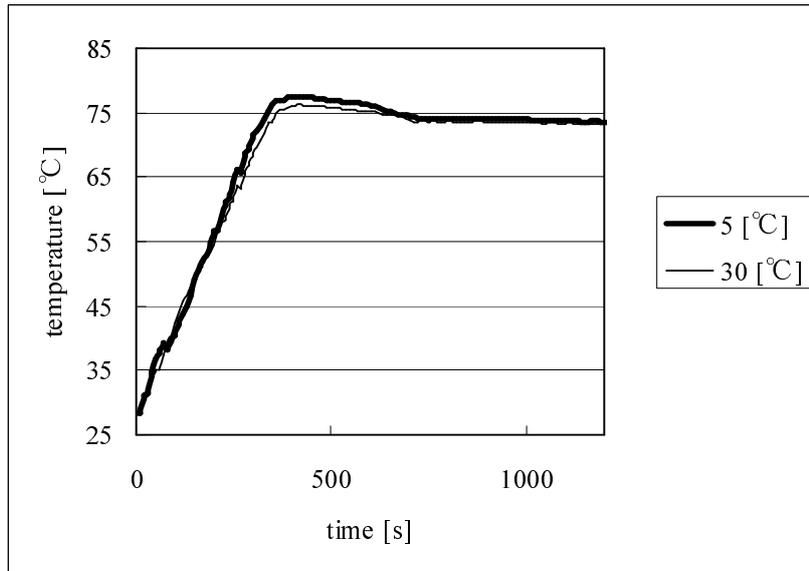


図 31 タグチメソッドによる出力波形

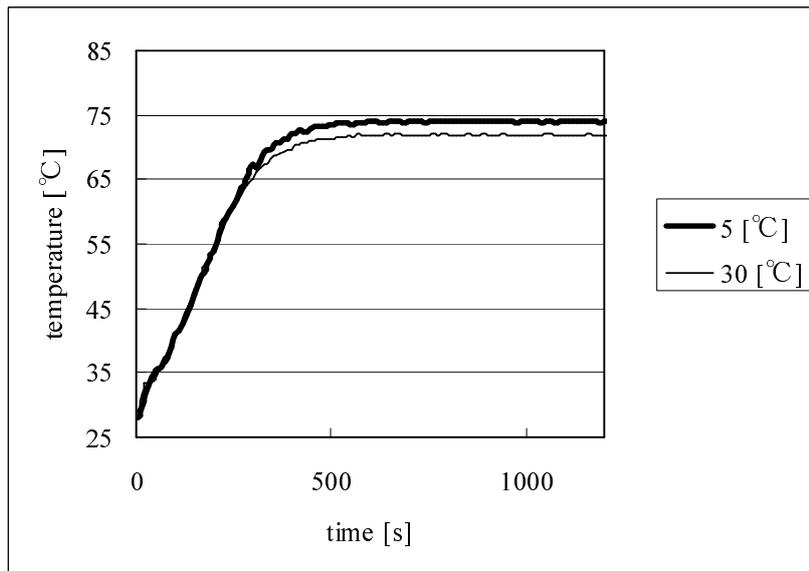


図 32 リミットサイクル法による出力波形

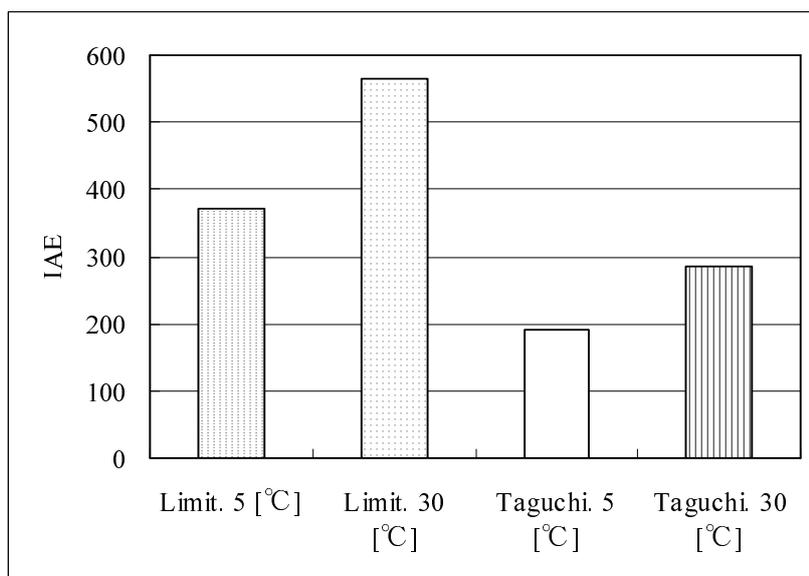


図 33 リミットサイクル法とタグチメソッドのIAEの比較 (0 - 1,200 [s])

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を確認できた。

4.5 本章のまとめ

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を提案し、実機による実験によってその効果を確認した。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組み込みシステムに種々の応用が可能であると考えられる。

また、本研究ではP、I、Dの3つのパラメータを直交表に割り付けたが、センサの位置などのコストに影響を与えないハードウェアの情報を直交表に追加し、パラメータ(制御因子)数を増やすことで、さらに性能の向上が期待できる。また、PID制御よりパラメータ数の多い複雑な制御則を適用することでも、同様に性能の向上が期待できる。これらを、今後の研究課題としたい。

5. 結論

本論文では、設備投資を抑えた短時間、高精度な3種類の品質評価手法を提案した。

2章では、マハラノビスの距離による熱動特性計測による品質評価手法を提案した。熱の動きから品質評価を行う例として、伝熱システムの品質評価に適用し、従来手法とほとんど同じ精度で大幅な短時間化を達成した。従来のように熱の移動が平衡状態に達してから品質評価を行う手法ではなく、過渡状態で品質評価を行う提案手法において、複数の変数から得られる情報を適切に処理することによって正確な評価が可能であることを示した。また、熱入力と計測位置を改良し、かつMTシステムを適用するというハード・ソフト両面からの工夫によって、過渡状態の計測でも外乱の影響を受けにくい評価が可能であることを示した。伝熱システムは応答が遅く、従来の同定手法の前提条件を満たすには相当な時間が必要となるが、特徴量を適切に選ぶことによって同定精度を落とさずに、短時間化できることも提案手法の大きな効果である。

3章では生産設備へ目を向け、振動の計測から故障検出を行う手法を切り口に、独立成分分析を用いた機械システムの品質評価手法を提案した。多数のセンサや特殊なセンサを追加しなくても、振動を計測するセンサを追加するだけで、機械システムの故障検出が可能であることを示した。また、独立成分分析を機械システムのような動的な対象に対応できるように拡張し、実用での自動化を考えて、より短い計算時間で故障が検出できる手法を提案した。提案手法は、少額の設備投資によって生産設備の故障を管理でき、生産される商品の品質維持に貢献できることを示した。

さらに4章では2,3章とは少し異なった視点で、外乱を与えたときの品質を評価し、その結果を設計に活用する手法を提案し、組み込み温度制御システムの品質評価とパラメータ設計に適用した。調理家電に代表される組み込み温度制御システムの制御性能は、季節や使用場所による外気温の変動によって悪化するが、外気温を計測するセンサを追加しなくても制御パラメータを適切に選択することで、外気温変動に強い温度制御システムの設計が可能であることを示した。また、本論文で扱った外気温変動の影響はモデルパラメータを変化させ、かつ計測信号

にも影響を及ぼす困難な問題であるが、このような問題に対する制御パラメータ設計にもタグチメソッドが有効であることを示した。

3種類の手法とも、複数の変数を取り扱う多変量解析を応用したものであり、実用上は避けられない外乱の影響を考慮し、かつ設備投資を抑えた手法である。提案手法は本論文の適用分野だけでなく、種々の分野で応用できると考える。

今後は、外乱を使用者の違いによるバラツキにまで拡張し、人、特に高齢者や身体の不自由な方などに優しい技術の研究、開発に応用する。また、自然と調和した技術として、“設備投資 = 過剰な資源投入”を極力少なくできる本論文の手法を発展させて、新しい技術を創造していきたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたって、暖かいご指導を頂きました奈良先端科学技術大学院大学 杉本 謙二 教授に深く感謝致します。杉本教授には、入学前から暖かいご指導を頂きました。筆者の勤務の関係で打ち合わせが、夜間や土、日曜日の休日ばかりでありましたが、それにもかかわらず熱心なご指導を頂きましたことを、あらためて深く感謝致します。

お忙しい中、論文審査委員をして頂き、貴重なご助言を頂きました奈良先端科学技術大学院大学 西谷 紘一 教授，小笠原 司 教授，平田 健太郎 助教授に深く感謝致します。

研究者としての生き方など、ご自身の経験をもとにしたご助言を頂きました奈良先端科学技術大学院大学 安達 直世 助手，小木曾 公尚 助手に深く感謝致します。ご自身の経験から研究の進め方など、研究生活に関することに対して広く様々なご助言を頂きました京都大学大学院 笠原 正治 助教授，岩手大学 佐藤 淳 講師に深く感謝致します。

奈良先端科学技術大学院大学応用システム科学講座の皆様に深く感謝致します。秘書の橋本 洋子さんには、海外出張など不在の多い筆者の事務処理を代理して頂きました。博士後期課程の新田益大氏には、共同研究者として研究内容に対する新しいアイデアの議論など、研究生活を有意義に過ごすことができました。学生の皆様には実験装置の改良，事務手続きの代行など本当に様々な面でお世話になり、夜間や休日のみしかない大学院生活を楽しく過ごすことができました。ここに、あらためて深く感謝致します。

最後に、両親をはじめとする家族，親戚，特に研究を支えてくれた妻 綾子と愛娘 心に感謝をする。

参考文献

- [1] 手島昌一，奥野拓，青野文朗，佐藤功一，久保洋：マハラノビス距離を適用した切削異常監視に関する研究；精密工学会誌，Vol. 65, No. 9, pp. 1325–1329 (1999)
- [2] 加納学，長尾浩二，大野弘，長谷部伸治，橋本伊織：移動主成分分析を用いた運転監視；化学工学論文集，Vol. 25, No. 6, pp. 998–1003 (1999)
- [3] 鴨下隆志，奥村健一，高橋和仁，増村正男，矢野 宏：文字認識におけるマハラノビスの距離による判定の研究；品質工学，Vol. 6, No. 4, pp. 39–45 (1998)
- [4] 長尾光悦，山本雅人，鈴木恵二，大内東：表情識別に対する MTS 法の適用；電気学会論文誌 C，Vol. 120, No. 8, pp. 1157–1164 (2000)
- [5] 中迫昇，小倉久直：独立成分分析の基礎と音響信号処理；システム/制御/情報，Vol. 46, No. 7, pp. 400–408 (2002)
- [6] 気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書 (2005)
- [7] 石田尚司，西野憲司，友末 洋一：水を発泡剤とする硬質ウレタンフォーム保冷材の開発；圧力技術，Vol. 40, No. 2, pp. 73–80 (2002)
- [8] 清水則夫，成瀬哲生：複層ガラスの断熱性能に関する研究 - スペース部の冷橋と表面熱伝達率について - ；空気調和・衛生工学会論文集，No. 72, pp. 75–84 (1999)
- [9] 板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法 (JIS R 3107)
- [10] 建築用構成材の断熱性測定方法 (JIS A 1420)
- [11] 建具の断熱性試験方法 (JIS A 4710)
- [12] 田口玄一：品質工学の数理；日本規格協会 (1999)

- [13] Rajesh Jugulum, Leslie Monplaisir: Comparison between Mahalanobis-Taguchi System and Artificial Neural Networks; Journal of Quality Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 60-73 (2002)
- [14] 中津川雅史, 大内東: MTS アルゴリズムにおけるしきい値設定法に関する考察; 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J84-A, No. 4, pp. 519-527 (2001)
- [15] 中津川雅史, 大内東: MTS アルゴリズムにおける項目選択法に関する検討; 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J85-A, No. 4, pp. 434-441 (2002)
- [16] 間ヶ部明, 高田圭, 矢野宏: はんだ自動外観検査へのマハラノビスの距離の適用; 品質工学, Vol. 6, No. 6, pp. 66-73 (1998)
- [17] 中島尚登, 高田圭, 矢野宏, 柴本由香, 高木一郎, 山内眞義, 戸田剛太郎: 健康診断データを用いた MTS 法による予測の研究 - 今年健康から来年健康を予測する方法 - ; 品質工学, Vol. 7, No. 4, pp. 49-57 (1999)
- [18] 鴨下隆志, 田端和人, 岡野晴敏, 高橋和仁, 矢野 宏: マハラノビスの距離による多次元情報システムの最適化 - 火災報知システムの場合 - ; 品質工学, Vol. 4, No. 3, pp. 54-68 (1996)
- [19] 溝口和貴, 河合昭夫, 浜田和孝, 鴨下隆志: マハラノビスの距離を用いた衝突防止センシングシステムの研究; 品質工学, Vol. 7, No. 3, pp. 79-86 (1999)
- [20] 小林幹, 稲村實, 井出英人: 電気回路の動的解析; 森北出版 (1992)
- [21] 南野郁夫, 田中政仁, 松永信智, 川路茂保: 温度均一化を目的とする傾斜温度制御法の効果分析; 電気学会論文誌 C, Vol. 124, No. 8, pp. 1606-1612 (2004)
- [22] 足立修一: ユーザのためのシステム同定理論; コロナ社 (1993)
- [23] 田才忠, 藤井隆雄: 半導体製造における熱プロセスの非線形システム同定と制御; システム制御情報学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 124-130 (2001)
- [24] 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; 電気学会論文誌 D, Vol. 123, No. 12, pp. 1516-1522 (2003)

- [25] Shunichi Amari, Andrzej Cichocki and Harward Hua Yang: A New Learning Algorithm for Blind Signal Separation, *Advances in Neural Information Processing Systems 8*; The MIT Press (1996)
- [26] Aapo Hyvärinen and Erkki Oja: A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis; *Neural Computation*, Vol. 9, No. 7, pp. 1483–1492 (1997)
- [27] Anthony J. Bell and Terrence J. Sejnowski: An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution; *Neural Computation*, Vol. 7, No. 6, pp. 1129–1159 (1995)
- [28] Shiro Ikeda and Noboru Murata: A Method Of ICA In Time-Frequency Domain ; *In Proceedings of 1st International Workshop on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation*, pp. 365–371, Aussios, France (1999)
- [29] Juha Karhunen, Erkki Oja, Liuyue Wang, Ricardo Vigário and Jyrki Joutsensalo: A Class of Neural Networks for Independent Component Analysis; *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 8, No. 3, pp. 486–504 (1997)
- [30] Harward Hua Yang and Shunichi Amari: Adaptive On-line Learning Algorithms for Blind Separation: Maximum Entropy and Minimum Mutual Information; *Neural Computation*, Vol. 9, No. 7, pp. 1457–1482 (1997)
- [31] 小谷学, 有本隆彦, 小澤誠一: 独立成分分析による漏洩音検出に関する検討; システム制御情報学会論文誌, Vol. 16, No. 10, pp. 539–547 (2003)
- [32] 和久屋寛, 山下和男, 信太克規: 頭部生体モデルを用いた脳内部温度の推定: 独立成分分析による温度変化検出の可能性; 信学技報, MBE2001-153 (2002)
- [33] Norimichi Tsumura, Hideaki Haneishi and Yoichi Miyake: Independent component analysis of skin color image; *Journal of Optical Society of America*, Vol. 16, No. 9, pp. 2169–2176 (1999)

- [34] 加納学, 田中章平, 丸田浩, 長谷部伸治, 橋本伊織, 大野弘: 外部分析と独立成分分析を用いた統計的プロセス運転監視; 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 11, pp. 958–965 (2002)
- [35] 新田益大, 杉本謙二: Kullback-Leibler 情報量に基づく多変量 AR モデルのブラインド同定; 計測自動制御学会第 33 回制御理論シンポジウム, pp. 225–228 (2004)
- [36] 新田益大, 杉本謙二, 佐藤淳: 独立成分分析を用いた自己回帰モデルの未知入力同定法; 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 5, pp. 444–451 (2005)
- [37] Kenji Sugimoto and Masuhiro Nitta: Polynomial Matrix Approach to Independent Component Analysis: (Part I) Basics; *The 16th IFAC World Congress*, CD-ROM, Prague, Czech Republic, July 4–8 (2005)
- [38] Masuhiro Nitta and Kenji Sugimoto: A BSD Approach to Estimation and Suppression of Disturbance with Unknown Dynamics by H^∞ Feedback; *IFAC Workshop on ALCOSP*, Yokohama, JAPAN, August 30–September 1 (2004)
- [39] Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen and Erkki Oja: *Independent Component Analysis*; John Wiley & Sons (2001)
- [40] 高田広章, 岸田昌巳, 宿口雅弘, 南角茂樹: リアルタイム OS と組み込み技術の基礎; CQ 出版社 (2003)
- [41] Chisato Yoshimura, Hiroyuki Ishikawa, Shinji Furuta, Hikoharu Aoki and Susumu 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)
- [42] 榎本裕治, 北村正司, 茂木康彰, 安藤隆司, 落合誠, 虻川俊美: 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; 電気学会論文誌 D, Vol. 124, No. 6, pp. 529–535 (2004)

- [43] 江崎和博, 山田茂, 高橋宗雄, 日原圭祐: ソフトウェア設計過程の信頼性に影響を及ぼす人的要因の品質工学的アプローチ; 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J83-A, No. 7, pp. 875–882 (2000)
- [44] 須田信英編著: PID 制御, システム制御情報ライブラリー; 朝倉書店 (1992)
- [45] 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)
- [46] 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)
- [47] 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; 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 177–179 (2005)
- [48] 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会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 26–34 (1998)
- [49] Chen-Huei Hsieh, Jyh-Horng Chou and Ying-Jeng 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)
- [50] 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; 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 1157–1158 (2004)
- [51] 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; 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 6, pp. 664–660 (2004)
- [52] 高尾健司, 山本透, 雛元孝夫: Memory-Based 型 PID コントローラの設計; 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 9, pp. 898–905 (2004)
- [53] 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)

- [54] 久米昭正編集主査：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）
- [55] 矢野宏：品質工学計算法入門；日本規格協会（1998）

業績一覧

論文

1. 鈴木 新, 杉本 謙二 : マハラノビスの距離と熱流の動特性計測を用いた断熱品質評価システム ; システム制御情報学会論文誌 , Vol. 19, No. 4, 2006 (掲載決定)
2. 新田 益大, 鈴木 新, 杉本 謙二, 安達 直世 : 独立成分分析を用いた機械振動系のブラインド同定実験と構造変化検出 ; システム制御情報学会論文誌 , Vol. 19, No. 5, 2006 (掲載決定)

国際会議

1. Suzuki, A., Nitta, M., Adachi, N. and Sugimoto, K. : Detection of Mechanical Vibration Modes via a Blind System Identification Method; Proceedings of the 36th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications, pp. 240–245, 3–4 November (2004)
2. Sugimoto, K., Suzuki, A., Nitta, M., and Adachi, N. : Polynomial Matrix Approach to Independent Component Analysis: (Part II) Application; The 16th IFAC World Congress, CD-ROM, 4–8 July (2005)
3. Suzuki, A., Sugimoto, K. : Robust PID Control Parameter Design by Taguchi Method; 37th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Application, 28–29 October (2005)

国内発表

1. 鈴木 新, 新田 益大, 杉本 謙二: 独立成分分析による機械システムの異状検出; 第48回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'04), 2004年05月19日-21日, 講演論文集 pp. 187-188.
2. 高橋 雄三, 鈴木 新, 佐藤 淳, 杉本 謙二: 音源方向追尾サーボ系の設計; 第47回自動制御連合講演会, 2004年11月26日-27日.
3. 高橋 雄三, 鈴木 新, 佐藤 淳, 杉本 謙二: 音源方向追尾サーボ制御系の設計; 平成16年度計測自動制御学会関西支部学生研究発表会, 2005年03月07日.
4. 鈴木 新, 杉本 謙二: マハラノビスの距離による熱伝播特性の品質評価; 第49回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'05), 2005年05月18日-20日, 講演論文集 pp. 563-564.
5. 鈴木 新, 杉本 謙二: タグチメソッドによる温度制御システムのロバストPIDパラメータ設計; 第50回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'06), (発表予定)

その他の業績

特許

1. 鈴木 新 他：
真空構造体及びその封止方法；特許登録番号 3646105 号
2. 鈴木 新 他：
金属製真空二重容器およびその製造方法；特許登録番号 3650761 号
3. 鈴木 新 他：
金属製真空断熱構造体の製造方法；特許登録番号 3682276 号
4. 鈴木 新：
電気加熱器；特許公開 2001-28288
5. 鈴木 新 他：
真空断熱体；特許公開 2001-311496
6. 鈴木 新 他：
真空断熱体；特許公開 2001-311497
7. 鈴木 新 他：
圧着端子および圧着端子の圧着検査方法；特許公開 2002-93486
8. 鈴木 新 他：
真空断熱体の製造方法；特許公開 2002-130583
9. 鈴木 新 他：
通電検査装置；特許公開 2002-131360
10. 鈴木 新 他：
携帯電話機用音声入力装置；特許公開 2002-135390
11. 鈴木 新 他：
蓄熱具および蓄熱機能を有する容器；特許公開 2004-12023

12. 鈴木 新 他：
金属製真空二重容器およびその製造方法；特許公開 2004-16741
13. 鈴木 新 他：
真空構造体及びその封止方法；特許公開 2004-57675
14. 鈴木 新 他：
真空断熱体及びその製造方法；特許公開 2004-60852
15. 鈴木 新 他：
金属製真空構造体の製造方法；特許公開 2004-65393
16. 鈴木 新 他：
家電機器；特許公開 2005-218489