誤差因子を用いたMTシステムにおける単位空間擬似データ作成法と評価実験

鈴木 新，　杉本 謙二

1　はじめに

多変量解析の一種であるMT(マハラノビス・タグチ)システム[1]が，パターンマッチングや推定，検査などの分野[2, 3, 4]へ応用されて注目されている．MTシステムはマハラノビス空間を用いた群判別と類似した手法であるが，群判別が複数の群を作成するのに対して均質な対象からひとつの群を作成し，そこからの距離によって判別を行うことを特徴とする．このひとつの群は評価対象を計るための基準単位となるために，単位空間と呼ばれている．単位空間は評価の基準となるために非常に重要である．また作成には非常に多くのサンプル数を必要とするために，相当な時間と労力が必要とされる．これらの欠点を補うための方法として，2水準直交表を用いた擬似データ作成法[5]や乱数によるデータ増殖法[6]などが提案されている．これらの方法は，取得した複数個のデータをもとにして，擬似的なデータを作成しているが，そのもととなるデータに関する指針が示されていない．また適当な数%の誤差を与えているが，どの程度の誤差があれば評価に有効に働くのかが明確ではない．

そこで本論文では，タグチメソッドの直交表実験で用いられる誤差因子の考え方を利用した擬似データ作成法を提案する．タグチメソッドで用いられる誤差因子は，対象とするシステムに影響を及ぼし，かつ設計者が意図的に変更できない因子とされ，通常は実験数を増やさないために両極端な2水準とされる．このような誤差因子の考え方を用いて，評価対象であるシステムから得られる信号が最も大きくなる環境と最も小さくなる環境の両極端な2種類のデータを取得し，これらのデータをもとに擬似データを作成する．このような擬似データから作成された単位空間は，設定された誤差因子に対してロバスト性を持ったデータとなるために，従来の方法に対して実際の現場で必要とされる開発期間とロバスト性において優れる．

以下，2章で提案手法の説明，3章で擬似データを用いる提案手法と実データを用いた先行研究[7]との比較実験，4章でまとめを行う．

2　提案手法

2.1　MTシステムの説明

MTシステムは基準とする対象から得られた項目からマハラノビス空間を作成し，これを単位空間として評価対象の判定を行う統計的判定法である．以下，MTシステムの計算

表 1: 計測項目とサンプル数，およびその平均と標準偏差の関係．

	Item 1	Item 2	Item 3	$\cdots$	Item J
Sample 1	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	$\cdots$	Z_{1J}
Sample 2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	$\cdots$	Z_{2J}
Sample 3	Z_{31}	Z_{32}	$\cdots$	$\cdots$	Z_{3J}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
Sample I	Z_{I1}	Z_{I2}	Z_{I3}	$\cdots$	Z_{IJ}
$\boldsymbol{m}$	m_1	m_2	m_3	$\cdots$	m_J
$\boldsymbol{\sigma}$	σ_1	σ_2	σ_3	$\cdots$	σ_J

方法について簡単に説明する．

基準とする対象から J 個の項目を計測し，これらを I サンプル取得する．ここで $I \geq J$ であり，計測された項目を Z_{ij} として，平均を m_j，標準偏差を σ_j とすると表 1 が得られる．ただし $i = 1, \cdots, I$，$j = 1, \cdots, J$ である．次に計測項目 Z_{ij} を次のように規格化する．

$$z_{ij} = \frac{Z_{ij} - m_j}{\sigma_j}.$$

規格化されたサンプルデータ i 番目を行ベクトルとして，

$$\mathbf{zc_i} = (z_{i1}\ z_{i2}\ \cdots\ z_{iJ}),$$

とし，計測項目データ j 番目を列ベクトルとして，

$$\mathbf{zr_j} = (z_{1j}\ z_{2j}\ \cdots\ z_{Ij})^T,$$

とする．$\mathbf{zr_j}$ を用いて相関行列 $\mathbf{R}$ を，

$$\mathbf{R} = \frac{1}{I}\begin{bmatrix} \mathbf{zr_1} * \mathbf{zr_1^T} & \mathbf{zr_1} * \mathbf{zr_2^T} & \cdots & \mathbf{zr_1} * \mathbf{zr_J^T} \\ \mathbf{zr_2} * \mathbf{zr_1^T} & \mathbf{zr_2} * \mathbf{zr_2^T} & \cdots & \mathbf{zr_2} * \mathbf{zr_J^T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{zr_J} * \mathbf{zr_1^T} & \mathbf{zr_J} * \mathbf{zr_2^T} & \cdots & \mathbf{zr_J} * \mathbf{zr_J^T} \end{bmatrix}$$

によって求める．さらに $\mathbf{R}$ の逆行列を $\mathbf{A} = \mathbf{R^{-1}}$ として，マハラノビスの距離 D は，

$$D_i = \frac{1}{J}\mathbf{zc_i} * \mathbf{A} * \mathbf{zc_i^T},$$

によって求められる．

ここで，データベースとして記憶する項目は，

$$\mathbf{A} = \mathbf{R^{-1}}, \quad \mathbf{m} = (m_1\ m_2\ \cdots\ m_j), \quad \boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1\ \sigma_2\ \cdots\ \sigma_j),$$

である．実際の評価は対象から得られたデータベクトル $\mathbf{Zc} = (Z_1\ Z_2\ \cdots\ Z_J)$ をデータベースである平均ベクトル $\mathbf{m}$ と標準偏差ベクトル $\boldsymbol{\sigma}$ によって規格化し，相関行列の逆行列 $\mathbf{A}$ を用いて，

$$\frac{1}{J}\mathbf{Zc_i} * \mathbf{A} * \mathbf{Zc_i^T},$$

によってマハラノビスの距離を求めればよい．マハラノビスの距離の大小によって単位空間からの乖離度が求められる．以上が MT システムの手順である．

2.2 従来の方法

2.1 章にて MT システムについて簡単に説明したが，単位空間の作成で問題となるのが計測項目数 J とサンプル数 I の関係である．参考文献 [8] ではサンプル数 I は，計測項目数 J の 3 倍以上が望ましいとしている．多くの計測項目を用いて精度を上げようとすれば，サンプル数も多く必要となるので擬似的なデータを作成する [5, 6] 必要が出てくる．

これらの擬似データ作成方法について説明する．参考文献 [5] では，ロボットによる触診を目指して触覚センサーを用いたセンシングシステムの判定アルゴリズムに MT システムを適用している．この例では，2 水準直交表を用いて第 1 水準には数サンプルの平均データの $+5\%$ を割り付け，第 2 水準には -5% を割り付けて直交表のすべての行で擬似データを作成して，単位空間を形成するデータ数を増加させている．このようにして作成されたデータは直交表の性質より，もとの数サンプルのデータにあった相関が無くなるので，単位空間はマハラノビス空間ではなくユークリッド空間となる．

参考文献 [6] では，エンジンの異音良否判定のアルゴリズムに MT システムを適用している．この例では，数サンプルのもととなるデータベクトルに対して，これらのそれぞれの値に乱数を与えて擬似データを作成している．このようにして作成されたデータは，もととなる数サンプルのデータベクトルのパターンを維持したままデータベクトル数を増加させることとなる．

これらの方法は，取得したデータをもとに擬似データを作成しているが，もとになるデータを取得する条件について議論されていない．また，それぞれ数%の誤差を与えてデータを増加させているが，誤差の与え方についても議論されていない．

そこで，本論文ではタグチメソッドで用いられる誤差因子の考え方に基づいて取得したデータから，単位空間を作成する方法を提案する．以下，2.3 章にて提案する擬似データ作成法について説明する．

2.3 擬似データ作成法

本論文で提案手法する擬似データ作成法について説明する．MT システムでは単位空間からの距離によって良否判定を行うため，単位空間はすべての基準となり，その作成は非常に重要な作業である．品質問題などでは正常品を単位空間としてデータを集めることになるが，通常の判別分析との違いは不良品のデータを集めないで，正常品のみから不良品を評価することである．単位空間の分布に関しては特に規定は無く，重視するのは判定の妥当性を示す SN 比による計測項目の選択である．分布よりも判定に対して有効な単位空間を作成することが重要とされている．

そこで，本論文では単位空間の分布形状を意識せずに，タグチメソッドにおける誤差因子の考え方を利用して擬似データを作成する手法を提案する．これは，両極端な誤差因子環境で取得されたデータは，分布の両端に位置すると予測できるため，このようなデータから作成された擬似データからなる単位空間は，誤差因子に対してロバストな判定ができると考えられる．以下に具体的な作成手順を示す．

1. 単位空間に用いる個体に対して，出力が小さくなる（または大きくなる）誤差因子環境を N_1，出力が大きくなる（または小さくなる）環境を N_2 としてそれぞれ 2 回データを取得する．取得したデータは離散的な信号となり，N_1 ではそれぞれデータベクトル形式で，

$$\begin{aligned} \mathbf{DN1_1} &= (d1_1(0), d1_1(1), \cdots, d1_1(K)), \\ \mathbf{DN1_2} &= (d1_2(0), d1_2(1), \cdots, d1_2(K)), \end{aligned}$$

と表す．同様に N_2 でもデータベクトル形式で $\mathbf{DN2_1}$，$\mathbf{DN2_2}$ が得られる．ここで，K は取得したデータベクトルのサンプリング数であり，$k = 0, \cdots, K$ とする．

2. N_1 におけるデータベクトルから平均ベクトルを，

$$\mathbf{mDN1} = \frac{\mathbf{DN1_1} + \mathbf{DN1_2}}{2} = (md1(0), md1(1), \cdots, md1(K)),$$

によって求め，$\mathbf{DN1_1}$，$\mathbf{DN1_2}$ の差分ベクトルを，

$$\mathbf{sDN1} = \mathbf{DN1_1} - \mathbf{DN1_2} = (sd1(0), sd1(1), \cdots, sd1(K)),$$

とする．N_2 におけるデータベクトルでも同様に，平均ベクトルと差分ベクトルを作成する．

3. N_1 における平均ベクトルをもとに擬似データを作成する．作成する擬似データベクトルを $\mathbf{gDN1}$ とすると，

$$\mathbf{gDN1_l} = \mathbf{mDN1} + \mathbf{Rn1},$$

として増殖する．ここで $\mathbf{Rn1}$ は $\mathbf{sDN1}$ をもとにした乱数ベクトルであり，

$$\mathbf{Rn1} = (rn1(0), rn1(1), \cdots, rn1(K)),$$

で表され，それぞれの要素 $rn1(k)$ は，

$$rn1(k) = \mathrm{random}(a1(k)), \quad -\mid sd1(k) \mid \leq a1(k) \leq \mid sd1(k) \mid,$$

とする．擬似データの作成数 $L \quad (l = 0, \cdots, L)$ は，参考文献 [8] より計測項目数 J を用いて，$L = J \times 3/2$ を目安とする．N_2 においても同様に擬似データを増殖する．この結果，擬似データ数は $2L = J \times 3 = I$ となる．

4. 求められた擬似データから計測項目を選択し，平均ベクトル，標準偏差ベクトル，相関行列の逆行列を求めてデータベースに記憶する．後は単位空間に属さない個体のマハラノビスの距離を求めて，個体の乖離度を SN 比によって評価する．

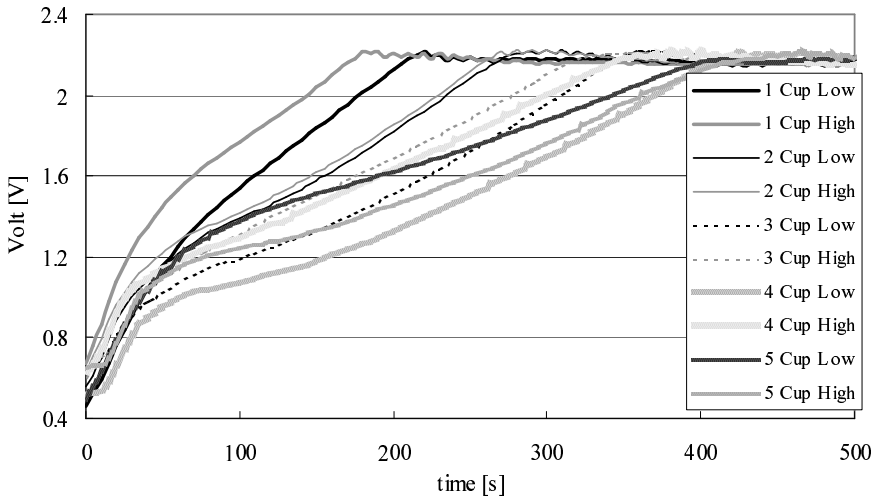

図 1: 外気温変動が温度制御システムの出力波形に与える影響．

3 実験

3.1 実験方法と外気温の影響について

本論文で実験に用いたデータは，熱負荷変動のある温度制御システムの応答波形である．温度制御システムでは，熱負荷にあわせて制御ゲインを変化させることによって性能の向上を実現するために，熱負荷を正しく推定することは重要な技術である．しかしながら外気温が変化した場合，応答波形は負荷の増加した時と同じような傾向を示すため，熱負荷を正しく推定することは困難であった．外気温の変化が応答波形に与える影響を説明するために，図 1 を示す．

図 1 は鍋の内容物を加熱する温度制御システムの熱負荷（cup 数）を変化させて，外気温が高温と低温の環境でそれぞれの応答の違いを示したものである．この図から同じ cup 数であっても外気温を変化させた場合，応答波形も変化することが分かる．これは外気温が高いときは，加熱対象表面からの放熱量が小さいために温度上昇が早く，逆に外気温が低いときは，加熱対象表面からの放熱量が大きいために温度上昇が遅くなるためである．例えば，熱負荷が 3 cup で外気温が低温の場合と熱負荷が 4 cup で外気温が高温の場合をみると，目標温度に達するまでの速度が 4 cup のほうが早く，温度上昇波形が逆転していることが分かる．4 cup 以上の熱負荷においても同様の傾向が読み取れ，熱負荷の違いによる温度上昇の差がなくなったり逆転している．このように外気温の変化がある環境では，温度上昇から単純に熱負荷を推定することが出来ない．しかしながら実際に温度制御システムが使用される現場では，外気温の変化は避けることが出来ないため，このような環境変化の下でも熱負荷の差が読み取れることが求められる．

そこで本論文の提案方法によって，これらの違いが読み取れるかどうかを実験によって確認する．実験の焦点は以下の 2 点である．

1. 本論文で提案する擬似データから作成した単位空間のヒストグラムと参考文献 [7] で

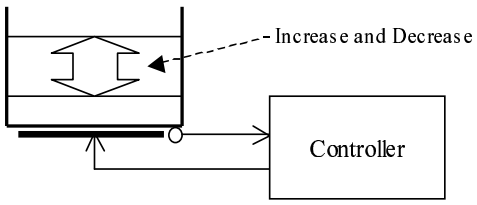

図 2: 実験装置．

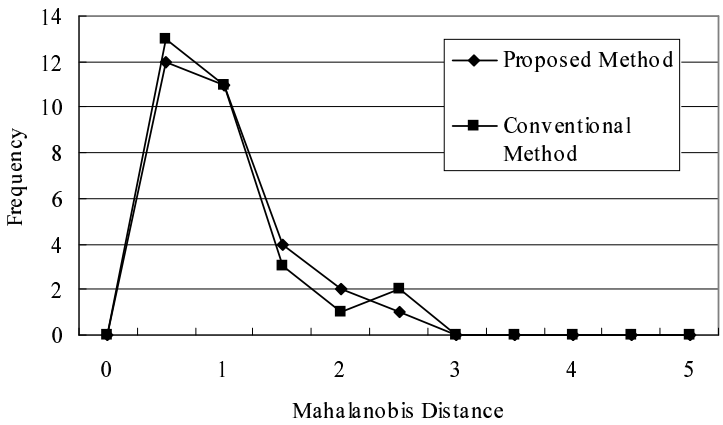

図 3: 単位空間のヒストグラム．

求めた実データ 30 サンプルから作成した単位空間のヒストグラムを比較する．これによって実データによる方法と単位空間にどのような違いがあるか確認する．

2. 実験装置（図 2）において加熱対象の熱負荷を 1 cup から 5 cup 用意し，それぞれの熱負荷において外気温が高温の場合と低温の場合で加熱制御応答データを取得する．取得したデータに対してマハラノビスの距離を求め，熱負荷容量との関係をもとに回帰直線を作成する．回帰直線から SN 比を求め，熱負荷の推定精度を実データによる方法と比較する．

以上の実験によって，本論文で提案する擬似データによる単位空間のロバスト性を判断する．

3.2 実験結果

以下に，3.1 章において提起した実験の焦点についての結果を示す．

1. ヒストグラムによる単位空間の比較
   本論文の提案手法による単位空間のヒストグラムと実データによる単位空間のヒストグラムを図 3 に示す．この図から分かるように，ヒストグラムには大きな差はな

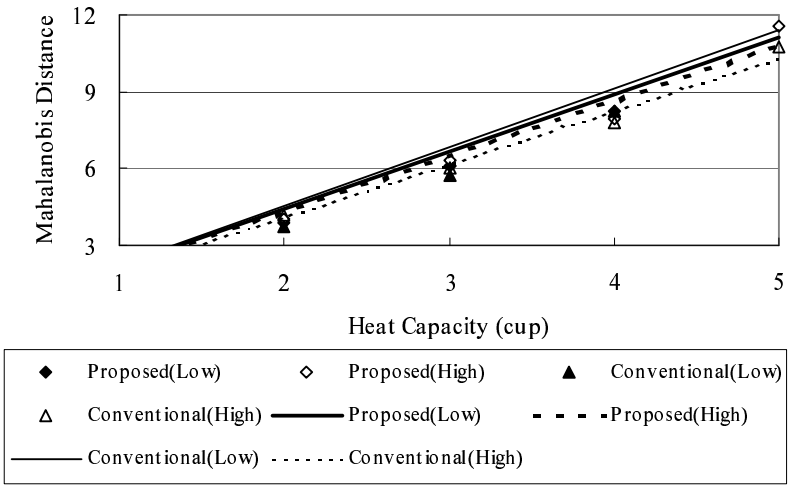

図 4: 回帰直線．

く，提案手法の単位空間は実データによる単位空間と比較しても妥当であることが分かる．

2. 回帰直線と SN 比による比較
本論文の提案手法による単位空間をもとにした回帰直線と実データによる単位空間をもとにした回帰直線を図 4 に示す．この図より，提案手法の回帰直線のほうが従来手法の回帰直線よりも外気温変化に対してバラツキが小さいことが分かる．また SN 比は，提案手法：3.24 [dB]，従来手法：1.77 [dB] となっており，提案手法のほうが実データに対して良い結果が得られている．

これらの結果より提案手法は，MT システムにおける単位空間の作成に十分に利用できることが分かった．

4 まとめ

本論文では作成に多くの労力が必要とされる MT システムの単位空間を，タグチメソッドで利用される誤差因子の考え方から擬似データを作成する方法を提案した．提案手法の効果を確認するために，実データを用いた実験と比較し，遜色のない結果が得られることを示した．本論文の提案手法は，単位空間作成の労力を削減するだけでなく，誤差因子の考え方を用いることで推定のロバスト性を得ることも可能とした．

今後の方針としては，擬似データの作成の理論的な実証と計測項目のロバスト選択法の開発などが考えられる．また，熱負荷以外にも機械系の負荷に対しての適用実験なども重要と考えられる．

参考文献

[1] Taguchi, G. and Jugulum, R. : The Mahalanobis-Taguchi Strategy – A pattern technology system, John Wiley & Sons (2002)

[2] 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；電学論 C，Vol. 120, No. 8, pp. 1157–1164 (2000)

[3] 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, pp. 150–156 (2006)

[4] 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 – 今年の健康から来年の健康を予測する方法– ；品質工学，Vol. 7, No. 4, pp. 49–57 (1999)

[5] 藤本 和城，松田 光央，尾股 定夫，坂野 進：触覚センサーの製作と柔軟物の測定；計測自動制御学会東北支部 第 213 回研究集会資料番号 213–3 (2003)

[6] 溝口 健二：未知の異音を検出する異音判定技術 – エンジン異音の市場流出防止を目指して– ；OMRON TECHNICS, Vol. 45, No. 1, pp. 32–36 (2005)

[7] 鈴木 新，杉本 謙二：マハラノビス距離による制御対象の熱容量推定手法；奈良先端科学技術大学院大学テクニカルレポート，NAIST–IS–TR–2007008

[8] 田口 玄一：品質工学の数理；日本規格協会 (1999)