

非線形成分を考慮した MT 法（2次元非線形 MT 法）の研究

Study of MT-Method to mitigate Non-linear Phenomena(2-Dimensional Non-linear MT-Method)

有限会社 増田技術事務所 増田 雪也

1. はじめに

MT 法は、「機械学習」の中の「分類問題」を扱う AI 手法である。近年急速に普及が進み、ロケットの打ち上げ判断アルゴリズム¹⁾の AI として採用されるなど、様々な分野での実績が多く報告されている。

分類問題を扱う同様な手法に「ディープラーニング」があるが、「膨大なデータ数」と「潤沢な CPU パワー」が必要となり、気軽に活用できる手法ではない。技術者が直面する分類問題では、データが豊富にあるケースは少なく、また、CPU パワーも潤沢に使用できるとは限らないため、ディープラーニングより MT 法の方が活用場面が多いと考えられる。

MT 法の特徴は、項目（特徴量）のパターンを相関行列で特徴化し、マハラノビスの距離を求めることである。しかし、相関行列を作成する際、「項目間に非線形成分が存在すると、判別精度が悪化する」という問題点がある。

そこで本研究では、「非線形成分を考慮した T 法の研究」²⁾³⁾で報告した非線形成分を補正する方法を流用し、2 項目間（2 次元）の非線形成分を補正する MT 法（2 次元非線形 MT 法）を検討した。その結果、従来の MT 法に比べ、判別精度を向上させることができた。

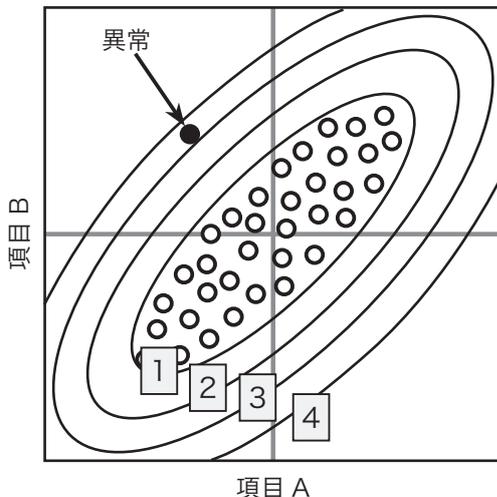


図1 マハラノビスの距離

従来の MT 法ではこの異常は判別が困難

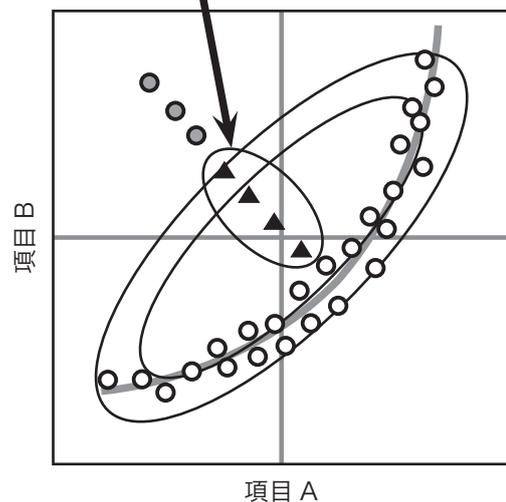


図2 項目間の非線形成分

2. 従来の MT 法の問題点

MT 法は、図 1 に示すように、正常品（単位データ）の項目間の分布からマハラノビスの距離（以後、MD 値と呼称する）を算出する。項目間の分布は、非線形成分が無いことを前提としているため、図 2 に示すように、項目間に非線形成分が存在すると、▲で示す異常品の MD 値は小さな値となり、【正常品】であると誤判別されてしまう。これが従来の MT 法の問題点である。

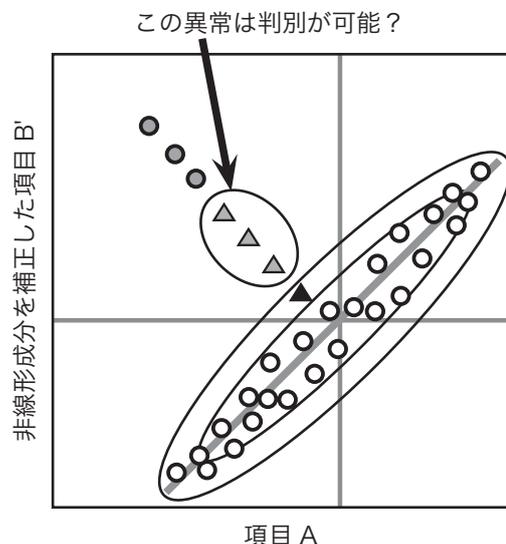


図3 項目間の非線形成分を補正する

Masuda Setsuya (info2qe@abox3.so-net.ne.jp)
Masuda Engineering Consultant Office, Inc.

表1 手順を説明するための数値データ

項目 A	2.69	4.62	8.85	12.88	14.62	23.46
項目 B	13.46	18.65	14.42	20.38	24.23	26.73

表2 数値データ (補正した項目 B')

項目 A	2.69	4.62	8.85	12.88	14.62	23.46
補正した項目 B'	B ₁ '	B ₂ '	B ₃ '	B ₄ '	B ₅ '	B ₆ '

表3 数値データ (項目値を2乗)

項目 A	2.69	4.62	8.85	12.88	14.62	23.46
項目 B	13.46	18.65	14.42	20.38	24.23	26.73
項目 B ²	181.21	347.97	208.03	415.53	587.13	714.53

表4 数値データ (補正して求めた項目 B')

項目 A	2.69	4.62	8.85	12.88	14.62	23.46
項目 B	13.46	18.65	14.42	20.38	24.23	26.73
補正した項目 B'	5.27	7.68	5.29	9.74	16.53	22.60

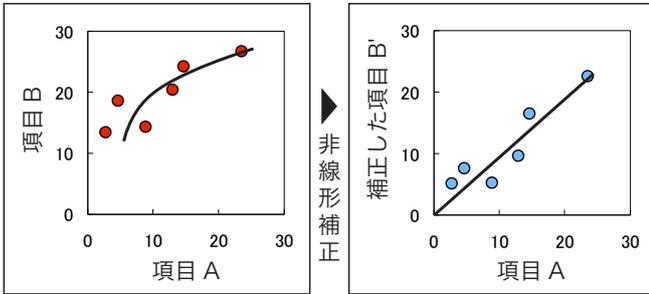


図4 非線形成分を補正する数値モデル

そこで本研究では、項目間の分布におけるこの非線形成分を図3に示すように補正できれば、MT法の判別精度を向上させることができると考えた。次に、この非線形成分を補正する方法を述べる。

3. 非線形成分を考慮した MT 法

「非線形成分が強い場合、判別精度が下がる」というMT法の問題点を解決するために、「非線形成分を考慮したT法の研究」²⁾³⁾で報告した非線形成分を補正する方法を用いた。

3.1 非線形補正の手順

本研究で用いた非線形補正の手順は、以下の通りである。

- 1) 項目 A と項目 B を 2 次の多項式で近似する
- 2) 近似した多項式を用いて補正した項目 B' を求める

表1の数値データを用いて、非線形補正する手順を具体的に説明する。「非線形補正する」とは、表2に示すように「補正した項目 B' を求める」ことである。非線形補正のイメージをグラフにプロットすると、図4のようになる。ばらつき成分はそのまま、非線形成分のみを補正するのである。

手順1)「項目 A と項目 B を 2 次の多項式で近似する」について述べる。まずは表3に示すように、項目 B の 2 乗の値 B² を求める。次に MS-Excel の「LINEST」関数を用いて、項目 A の多項式を求めると、

$$A = 0.104B^2 - 2.877B + 25.141$$

となる。

この多項式が、図4の左のグラフ上にある近似曲線である。

次に手順2)「近似した多項式を用いて補正した項目 B' を求める」について述べる。

■補正した項目 B₁' の求め方

先ほど求めた多項式に「項目 B₁=13.46」を代入する。

$$\begin{aligned} A &= 0.104B_1^2 - 2.877B_1 + 25.141 \\ &= 0.104 \times 13.46^2 - 2.877 \times 13.46 + 25.141 \\ &= 5.27 \end{aligned}$$

ここで求めた A の値を補正した項目 B₁' とする。つまり、

$$B_1' = A$$

よって、

$$B_1' = 5.27$$

となる。

■補正した項目 B₂' の求め方

補正した項目 B₂' も同様に求める。先ほど求めた多項式に「項目 B₂=18.65」を代入する。

$$\begin{aligned} A &= 0.104B_2^2 - 2.877B_2 + 25.141 \\ &= 0.104 \times 18.65^2 - 2.877 \times 18.65 + 25.141 \\ &= 7.68 \end{aligned}$$

ここで求めた A の値を補正した項目 B₂' とする。つまり、

$$B_2' = A$$

よって、

$$B_2' = 7.68$$

となる。

このようにして、B₁' ~ B₆' まで求めると、表4のようになり、図4のイメージで示した補正となる。

3.2 非線形補正の手順【図解】

非線形補正する手順をより分かりやすくイメージできるように、手順の図解を図5に示す。

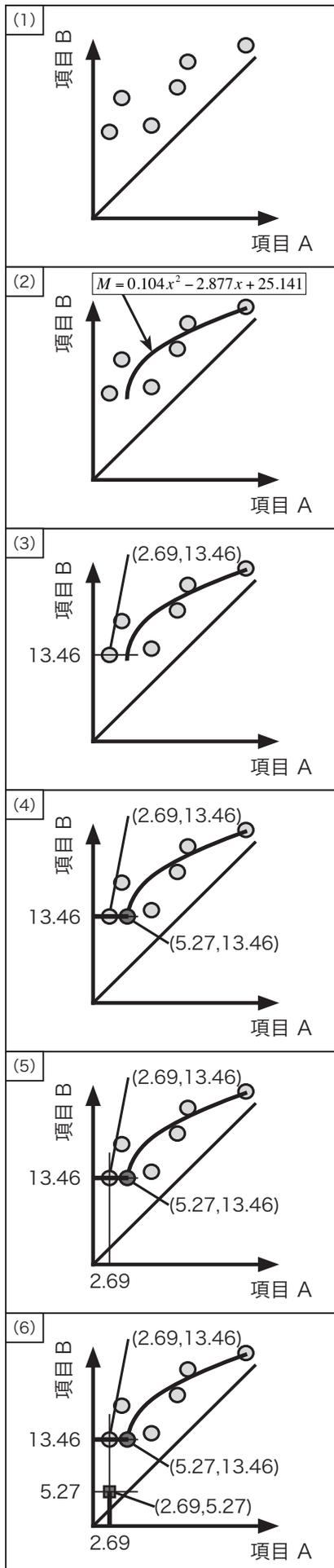


図5 【図解】非線形成分を補正する手順

- (1) 表1で示したデータをプロットする。
- (2) MS-Excelの「LINEST」関数を用いて多項式を求める。
- (3) $(A_1, B_1) = (2.69, 13.46)$ についての補正值 B_1' をこれから求めることにする。まずは $B = 13.46$ の位置に水平にラインを描く。
- (4) 「 $B = 13.46$ のライン」と「先ほど求めた多項式」との交点座標を求めると $(5.27, 13.46)$ となる。
- (5) $A = 2.69$ の位置に垂直にラインを描く。
- (6) $A = 2.69$ のライン上の $B = 5.27$ の座標 $(2.69, 5.27)$ が補正した項目 B_1' となる。

以上のような図解の手順で $B_1' \sim B_6'$ を求めていく。

3.3 2項目間のMD値を算出する手順

図6に2項目間(項目Aと項目B)のマハラノビスの距離を算出する手順を示す。なお、この正常品(単位データ)の項目間には非線形成分が存在している。図6の左のグラフは、項目Aを横軸に、項目Bを縦軸にプロットしたものである。ここで、「3.1 非線形成分を補正する手順」にて説明した方法で、項目Bを非線形補正する。非線形補正した項目Bを項目 B' とする。図6の右のグラフは、項目Aと項目 B' をプロットしたものである。正常品(単位データ)の非線形成分が補正され、線形に近い特性になっていることがわかる。

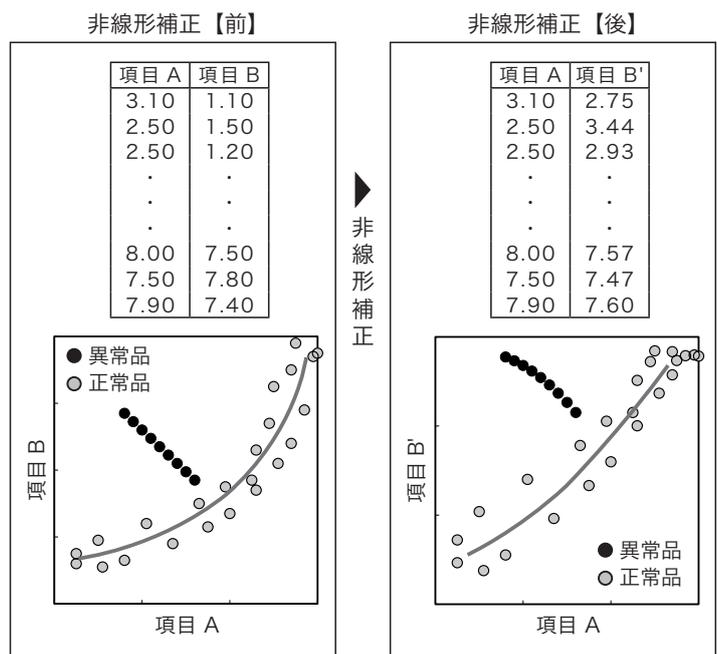


図6 項目Bの非線形成分を補正する

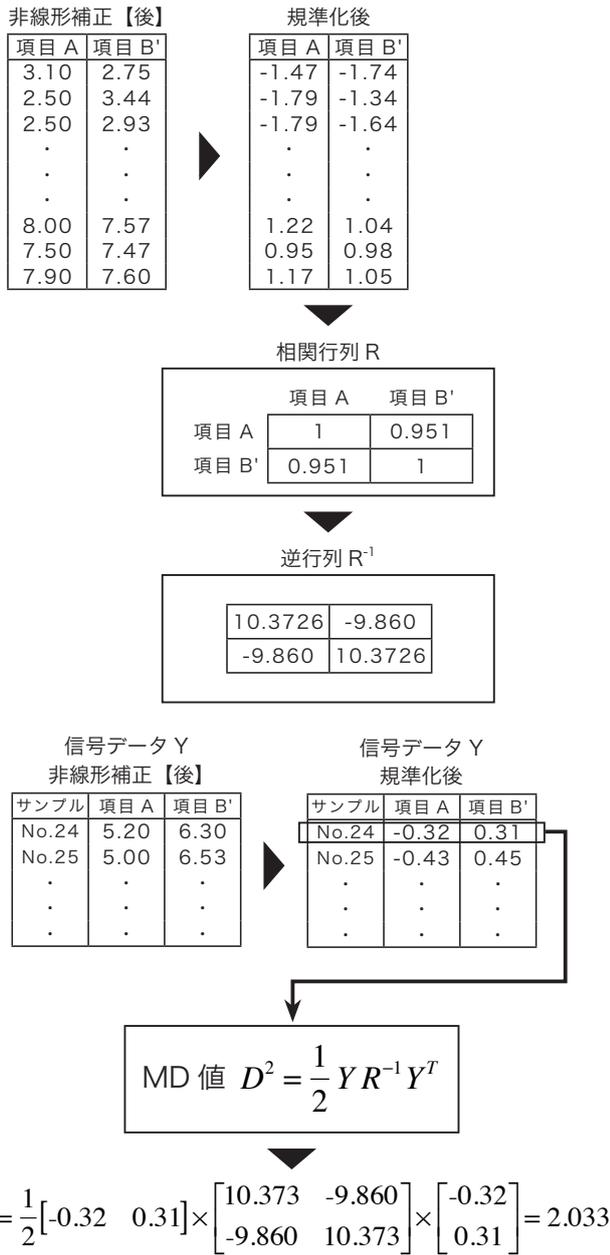


図7 マハラノビスの距離を求める手順

図7にこの2項目間のMD値を求める手順を示す。非線形補正した項目Aと項目B'を規準化した後、2次の相関行列Rを作成し、その逆行列R⁻¹を求める。MT法の数式により、信号データYのサンプルNo.24の項目Aと項目B'のMD値は、「2.033」と算出される。

図8にサンプルNo.24の「MD値マトリクス」を示す。先ほど求めた項目Aと項目B'のMD値は2.033なので、該当する部分にMD値を記入する。

次に、項目Bを横軸に、項目Aを非線形補正した項目A'を縦軸にする。同様に、この項目間のMD値(=1.923)を求め、MD値マトリクスに記入する。このようにして、全項目間について非線形補正処理とMD値の算出を行い、MD値マトリクスを完成さ

	項目 A'	項目 B'	項目 C'	項目 D'	項目 E'	項目 F'
項目 A		2.033				
項目 B						
項目 C						
項目 D						
項目 E						
項目 F						

図8 サンプルNo.24の項目Aと項目B'のMD値

	項目A'	項目B'	項目C'	項目D'	項目E'	項目F'
項目 A	0.052	2.033	0.068	0.281	0.469	0.267
項目 B	1.923	0.007	0.233	0.319	0.138	0.156
項目 C	1.242	0.674	0.430	1.195	0.685	0.552
項目 D	0.406	0.527	0.711	0.406	0.407	0.481
項目 E	1.012	0.343	0.313	0.463	0.141	0.264
項目 F	1.329	1.013	0.175	0.342	0.562	0.156

図9 サンプルNo.24のMD値マトリクス

	項目A'	項目B'	項目C'	項目D'	項目E'	項目F'
項目 A	0.094	3.913	0.22	0.791	0.389	0.819
項目 B	3.281	5E-07	0.058	0.443	0.019	0.910
項目 C	1.274	0.822	0.118	0.273	0.611	0.742
項目 D	0.875	0.399	0.973	0.395	0.749	0.407
項目 E	2.719	1.347	1.003	1.051	0.926	1.304
項目 F	1.007	0.683	0.378	0.385	1.354	0.085

図10 サンプルNo.25のMD値マトリクス

せる。なお、項目A同士の組み合わせについても非線形補正するが、これは同じ数値同士なので非線形補正しても数値は変わらない。よって、求めるMD値は1次元のマハラノビスの距離となる。

図9にサンプルNo.24のMD値マトリクス、図10にサンプルNo.25のMD値マトリクスを示す。

3.4 サンプル毎のMD値を算出する手順

項目数が6つの場合、このように各サンプルで6×6=36個のMD値が求まり、それがMD値マトリクスとなる。本手法では、このMD値マトリクスの中から、一番大きなMD値をそのサンプルの代表MD値とする。サンプルNo.24では、項目Aと項目B'(項目Bを非線形補正したもの)の組合せで最大値=2.033となり、これを代表MD値とする。サンプルNo.25では、最大値=3.913が代表MD値となる。

4. 非線形成分を考慮したMT法の事例

非線形成分を補正する有効性を検証するため、システム開発ソフトウェア「LabVIEW」を用いて専用

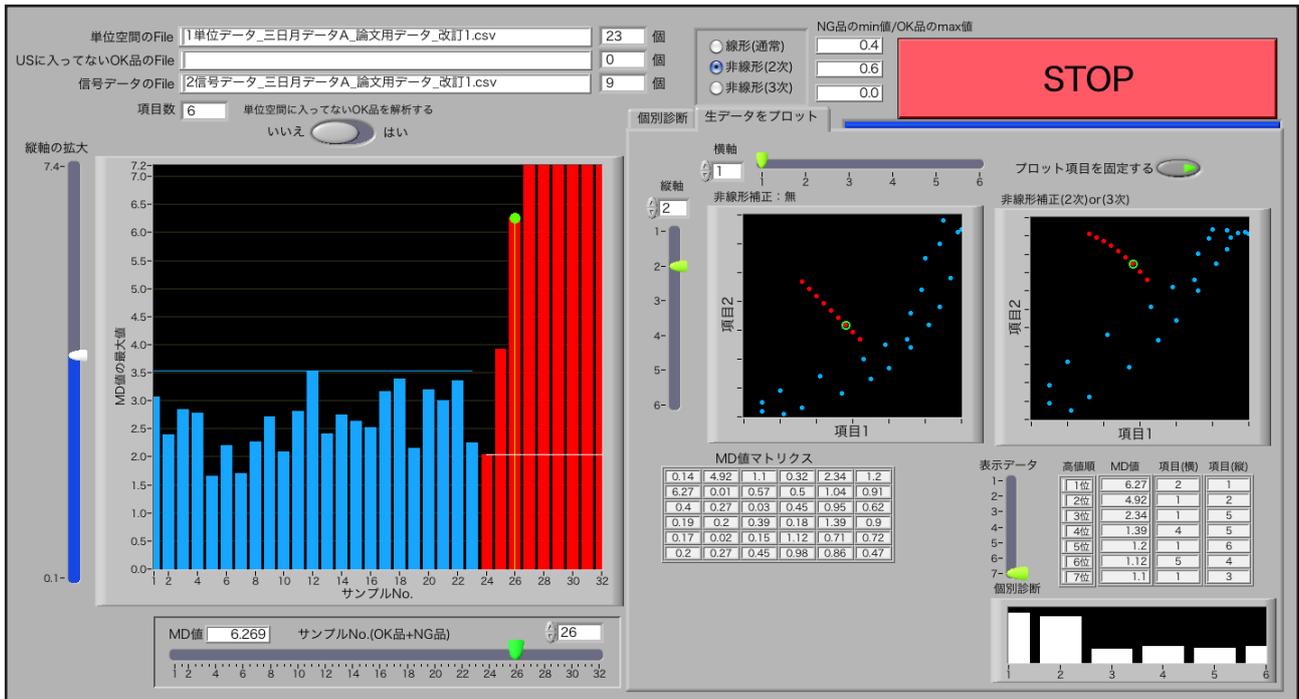


図 11 専用解析ソフト (LabVIEW によりプログラミング)

解析ソフトを作成した。図 11 に専用解析ソフトの画面を示す。単位データおよび信号データは、CSV形式のファイルで読み込み、MD 値を算出する。このソフトを使って実際の事例で解析した結果を以下に 2 つ紹介する。

4.1 事例 1 「三日月データ」

事例 1 は、非線形補正の有効性を視覚的に分かりやすく検証するために、三日月型のダミーデータを作成した。図 12 に示すように、全 6 項目の内、項目 A と項目 B をプロットすると、正常品は三日月型の分布となるようなデータとした。異常品は、三日月型の円弧から法線方向に伸びるように分布させた。残りの項目 C ~ F は、ランダムな分布となるようにデータを作成した。

図 13 に MD 値による全判別結果を示す。灰色の棒グラフは正常品、黒の棒グラフは異常品の MD 値を示している。非線形成分を補正した MT 法 (右) の方が判別精度が高いことがわかる。

図 14 に判別結果の詳細を示す。非線形補正をしない MT 法 (左) では、三日月型の分布の近くに位置している異常品 No.24 ~ 28 は、正常品の MD 値の max 値よりも MD 値が低く、判別不能となっている。異常品 No.29 でようやく判別可能領域となる。よって、異常品 No.24 ~ 28 の合計 5 個は判別不能という結果となった。

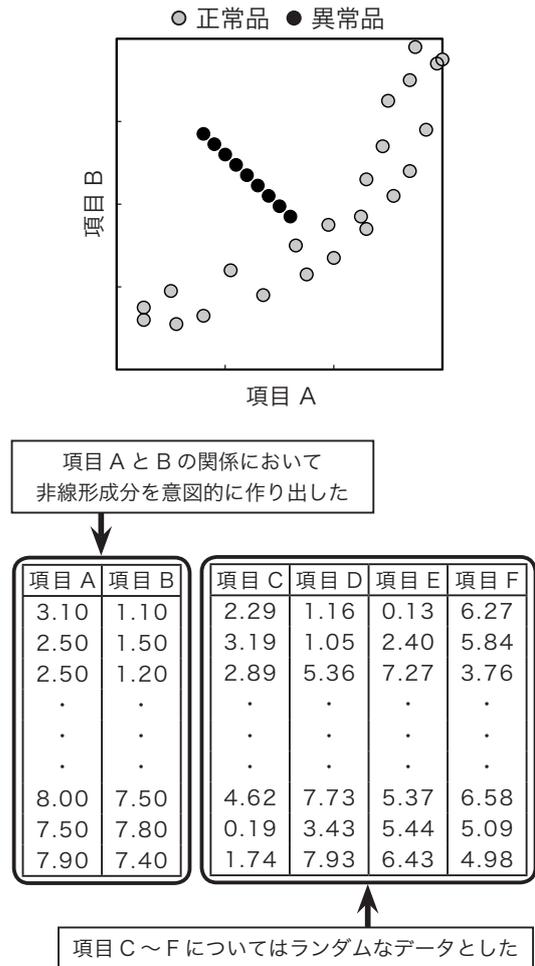


図 12 三日月データ

一方、非線形補正した MT 法 (右) では、三日月型の分布は非線形補正することで線形な分布に補正されており、正常品にもっとも近い異常品 No.24 は

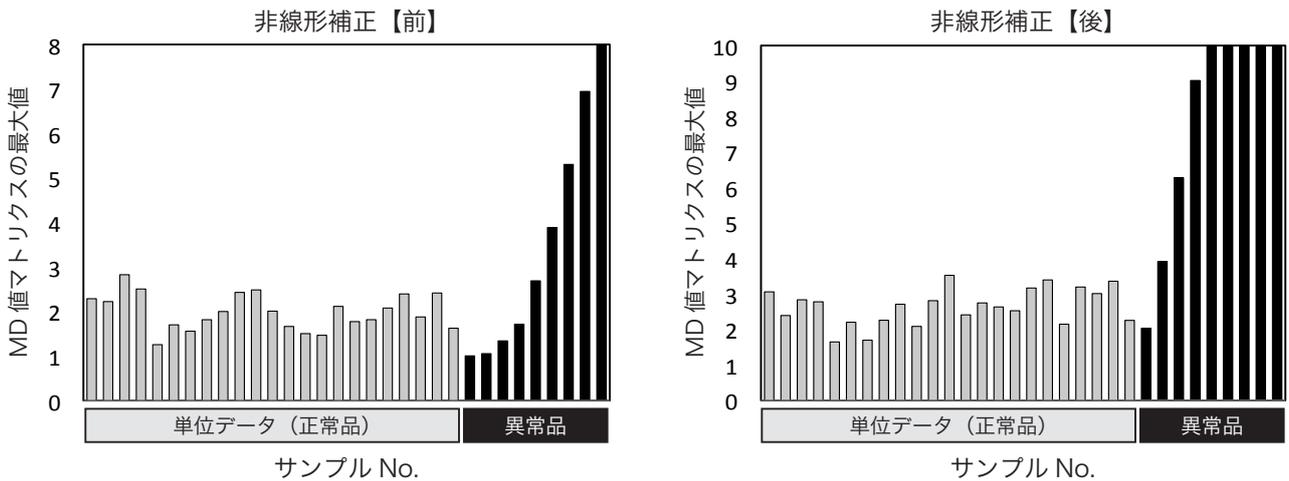


図13 「三日月データ」の判別結果

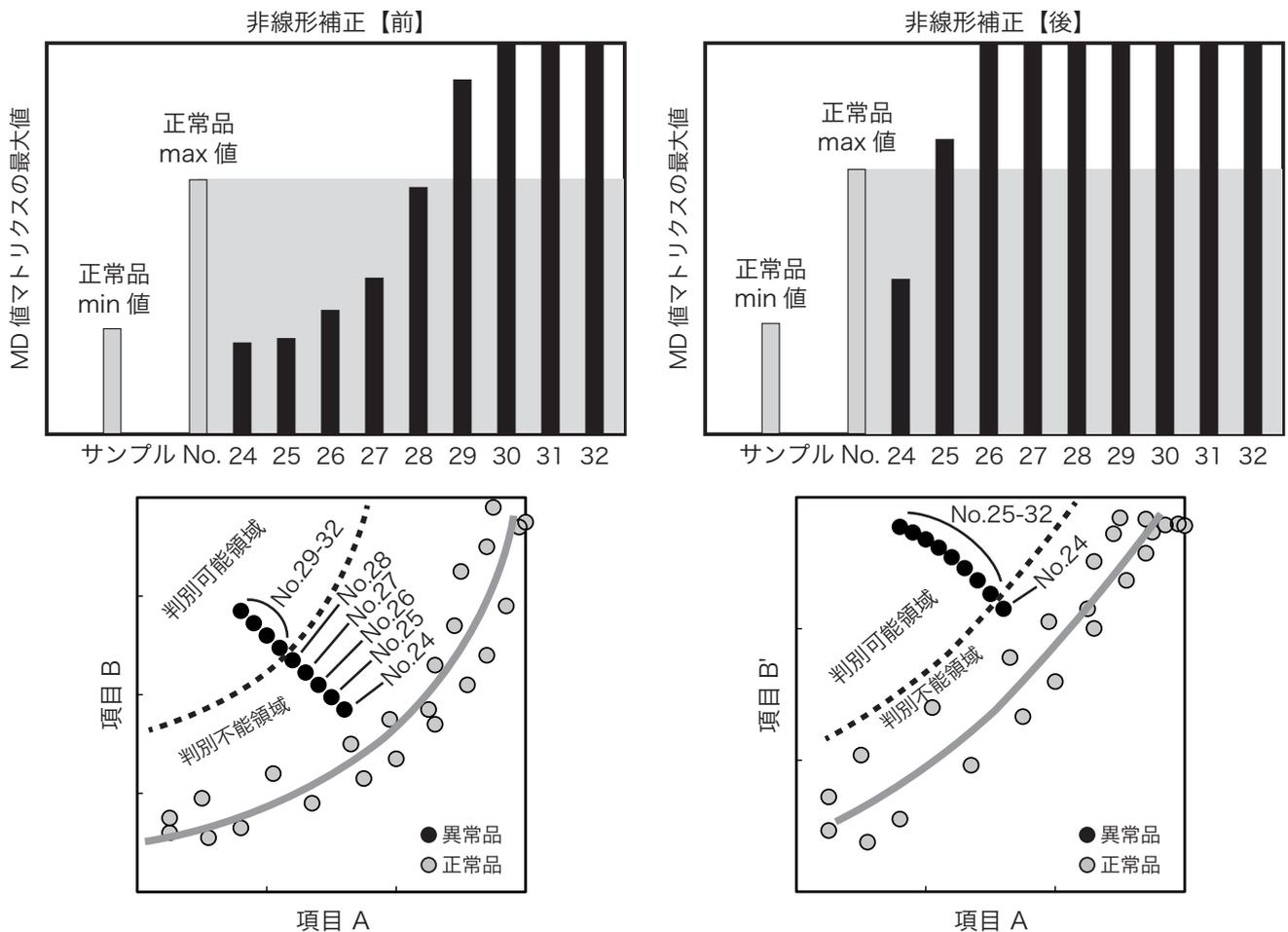


図14 三日月データの判別結果（詳細）

判別不能であるが、異常品 No.25 以降では判別可能領域となっている。

以上まとめると、事例1「三日月データ」では、非線形成分を補正したことにより、判別精度を向上させることが可能となった。

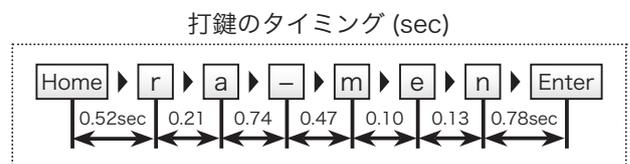


図15 打鍵間隔の時間を項目に設定

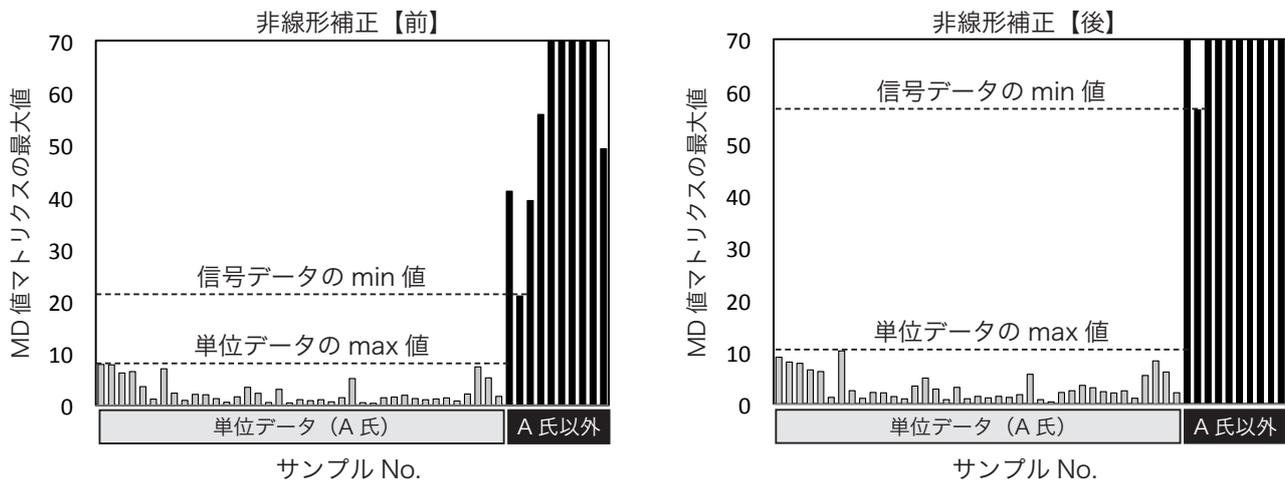


図16 「キーボードの打鍵パターンから個人を判別したデータ」の判別結果

4.2 事例2 「キーボードの打鍵パターンから個人を判別したデータ」

事例2は、QES2008（第16回品質工学研究発表大会）で発表した「MTシステム教育用教材の開発」⁴⁾にて検討した事例を解析した。PCキーボードの打鍵タイミングから、個人を判別する事例である。図15に示すように、「Home・r・a・.・.・m・e・n・Enter」の打鍵間隔の時間を7つの項目に設定し、各個人のパターンを解析/判別した事例である。図16に、A氏を単位空間として、A氏以外の打鍵を判別できるかを試した結果を示す。灰色の棒グラフはA氏、黒の棒グラフはA氏以外である。非線形補正しないMT法（左）では、判別可能ではあるが、単位データ（A氏）のmax値と信号データ（A氏以外）のmin値の差は小さい。一方、非線形補正したMT法（右）では、単位データ（A氏）のmax値と信号データ（A氏以外）のmin値の差が大きく、完全に判別が可能となっている。

以上まとめると、事例2「キーボードの打鍵パターンから個人を判別したデータ」においても、非線形成分を補正したことにより、判別精度を向上させることができた。

5. その他の検討

5.1 原因診断のやり方

通常のMT法では直交表を用いて原因診断を行うが、本手法では図17に示すように、MD値マトリクスの各項目の平均値を計算することで原因診断を行う。直交表を用いないため、簡単に原因の診断ができるメリットがある。また、全ての2項目間の組合せで原因診断を行うため、項目間に交互作用が存在しても正しい原因診断結果が得られるというメリットもある。

	項目A'	項目B'	項目C'	項目D'	項目E'	項目F'	
項目A	0.052	2.033	0.068	0.281	0.469	0.267	→ 項目Aの平均値を算出
項目B	1.923	0.007	0.233	0.319	0.138	0.156	→ 項目Bの平均値を算出
項目C	1.242	0.674	0.430	1.195	0.685	0.552	→ 項目Cの平均値を算出
項目D	0.406	0.527	0.711	0.406	0.407	0.481	→ 項目Dの平均値を算出
項目E	1.012	0.343	0.313	0.463	0.141	0.264	→ 項目Eの平均値を算出
項目F	1.329	1.013	0.175	0.342	0.562	0.156	→ 項目Fの平均値を算出

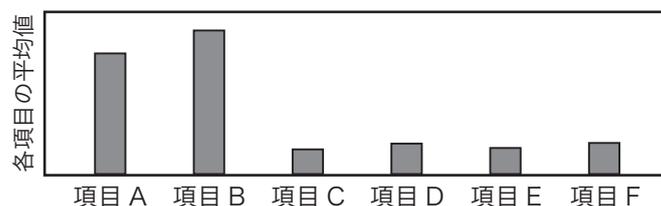


図17 原因診断のやり方

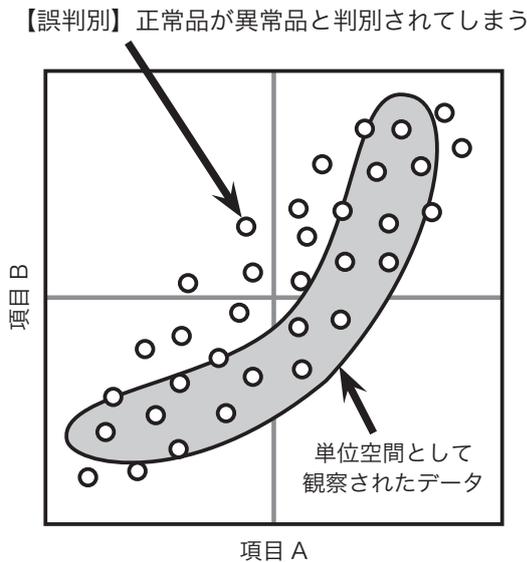


図 18 判別精度が悪化するケース

5.2 判別精度が悪化するケース

非線形成分が弱い場合は、非線形補正する効果は低く、この方法を導入するメリットは小さい。しかし、非線形成分が弱いケースに適用したとしても、判別精度が悪化することは無いため、どのような事例でも安心して非線形補正することができる。

ただし、図 18 に示すように、本来は非線形成分が小さい特性にも関わらず、観測されたデータが偶然にも非線形成分を持っていた場合は、逆に判別精度を悪化させてしまう。そのような場合には、「非線形補正する」「非線形補正しない」の両方を試し、判別精度の高い方を採用すれば良い。

5.3 n次元のパターン認識

本手法では、全 2 項目間 (2 次元) のパターン認識を行っているため、「項目数が単位データ数よりも少ない場合でも適用可能」という副次的なメリットがある。このこと自体はメリットであるが、通常の MT 法では最大 n 次元のパターンを認識できるのに

対して、本手法では最大 2 次元のパターンしか認識できない。よって、2 次元より大きなパターンを持つ場合は、判別精度が落ちるというデメリットがある。

6. さいごに

今回の研究では、MT 法の判別精度を向上させるため、非線形成分を補正する方法を検討した。その結果、判別精度を向上させること可能となった。

非線形成分が存在しない場合でも気軽に便利に使える手法であり、ぜひいろいろな事例に活用していただきたい。

謝辞

非線形 MT 法の閃きのきっかけ及び数式に関する有益な助言をいただいた日本電産サンキョー (株) の中西徹氏及び長野県品質工学研究会のメンバーに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 手島昌一：MT 法の特質と大規模機器監視への適用，標準化と品質管理，Vol.70, No.7, pp.16-18, 2017
- 2) 増田雪也：非線形成分を考慮した T 法の研究，第 17 回品質工学会研究発表大会論文集，(2009), pp.422-425
- 3) 増田雪也：非線形成分を考慮した T 法の研究，増田技術事務所技報，Vol.1, 2008
(http://masudaqe.sakura.ne.jp/pdf/paper_QE_TMethod_nonlinear.pdf)
- 4) 増田雪也：MT システム教育用教材の開発，第 16 回品質工学会研究発表大会論文集，(2008), pp.298-301