

# マハラノビス距離を適用した切削異常診断の研究

○ (株) ジャパンテクニカルソフトウェア 手島 昌一  
 奥野 拓  
 (株) 日鋼機械センター 青野 文朗  
 室蘭工業大学 久保 洋

本研究は、切削加工における刃物の摩耗・破損監視のための新たな方法に関する。加速度計により計測した振動波形から多次元の特徴量を抽出する。正常な波形から得られた特徴量により、基準空間としてのマハラノビス空間を構成し、切削状態の波形がこの正常空間に帰属するか否かをマハラノビス距離として求めた。実験の結果、マハラノビス距離は刃物の状態と高い相関があることを確認した。

## 1. 概要

切削加工では、切削刃物が次第に摩耗したり欠けることがあるため、刃物の状況を監視する必要がある。こうした異常は熟練者にとっては、音や振動などによって判断が可能とされているが、どのような変化があると異常と判定するかは、熟練者が明確に表現することが困難である。一般に人間の非明示な情報処理を機械に置換えることは困難であり、切削問題に限らず有効な方法が求められている。

本研究では、正常/異常を監視するために、正常切削状態における計測値から基準空間を構成し、任意の切削状態からの計測値がこの空間に帰属するか否かをマハラノビス距離から判定する方法を採用した。計測値としては、切削刃物の付近に取り付けた加速度計により得た振動とし、振動波形から微分特性・積分特性を抽出した。その結果、刃物の折損の状態とマハラノビス距離とが高い相関にあることを確認することができた。

## 2. 振動波形

図1に切削時の振動波形を示す。それぞれ、0.2秒分の振動である。そして、①は切削が正常に行われているとき、②は刃物の損傷がやや進行しているとき、③は損傷がかなり進行しているときの切削波形である。これら波形を目視しただけでは、その相違を明確に示すことは困難であるが、熟練者は切削時の音や振動から異常を監視することができると言われている。すなわち、波形の中に正常と異常を識別する情報が含まれていると考えられる。

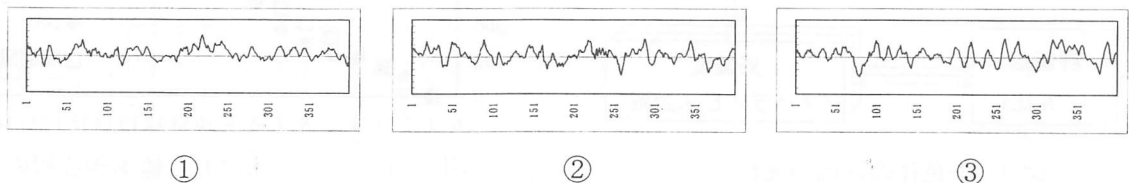


図1. 切削振動波形

## 3. 基準空間とマハラノビス距離

### 3.1 基準空間

正常と異常を判定するための照合空間として、従来、正常データと異常データの両方の特徴量を学習させる方法も提案されているが、本研究では正常データのみから基準空間を作り、監視対象の波形データがこの基準空間に帰属するか否かを判定することとした。

正常データのみから基準空間を作る理由は、

- ・ 正常な現象は正常状態に帰結するべき理由に拘束されており、そこから得られる特徴量は均質性を持つと考えられる
- ・ これに対して、異常な現象は予想できないさまざまな原因に起因するのでデータは均質性を持たない
- ・ したがって、両者を同じ照合空間で処理することは適切ではなく、均質性を有する集団のみを対象とした照合空間を用いるべきである

からである。均質性のあるデータ群に対する帰属度を判定することにより、異常なデータは原因・理由が何であっても“非正常”と判定することができる。

このような基準空間の構成および帰属度判定の有効な手段として、マハラノビス・タグチ・システム法(MTS法)が提案されている[1][2]。均質性を有するデータ群から基準空間を構成し、任意の対象の基準空間への帰属度をマハラノビス距離として求める。マハラノビス距離は、従来は判別分析に適用されてきたが、多次元情報処理あるいはパターン認識への適用については近年、田口により新しい枠組として提案されている。

### 3. 2 マハラノビス距離

いま、データの次元（特徴量の数）が $k$ 、基準データ群のデータ数を $n$ とすると、この $k$ 次元、 $n$ 組のデータから平均値 $m_1, m_2, \dots, m_k$ 、標準偏差 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ を求めて、次の基準化値

$$\chi_{ij} = (y_{ij} - m_i) / \sigma_i \quad (1)$$

( $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, n$ )

を求める。そして、次の相関行列 $R$ を計算する。

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここに、

$$r_{ij} = (\sum \chi_{i1} \times \chi_{j1}) / n \quad (3)$$

( $1:1 \sim n$ )

そして、任意のデータ組

$$(y_1, y_2, \dots, y_k)$$

が得られたとき、そのマハラノビス距離 $D^2$ は、 $y$ を式(1)により $Y$ に基準化して、

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_k) \quad (4)$$

とした後

$$D^2 = Y^T R^{-1} Y / k \quad (5)$$

で求められる。

マハラノビス距離は、基準パターンに近ければ1付近あるいはそれ以下の値をとり、基準とした集団と異なる度合いが大きいと急激にその値が大きくなる。一般に値が4を越えると基準集団に含まれる確率が極めて小さくなる。

### 4. 診断実験

以上のように基準空間を構成し、実際の切削時の振動波形について異常の有無を判定する実験を行った。図1に示す各波形のマハラノビス距離を求めると次のようになった。

$$\textcircled{1} 1.32 \quad \textcircled{2} 13.10 \quad \textcircled{3} 128.0$$

マハラノビス距離は一般に4を超えると正常空間に

帰属する確率がきわめて小さくなる。したがって、 $\textcircled{2}$ 、 $\textcircled{3}$ は正常ではないと判断され、さらに $\textcircled{3}$ は $\textcircled{2}$ より異常の程度が大きいと言える。

次に、この値を連続的に求めたのが図2である。棒グラフの1本ずつが0.2秒単位のマハラノビス距離である。横軸は経過時間であり、60本あるので全部で12秒分の振動波形の正常度を示している。(1)は刃物に損傷がない場合の連続切削時の状態であり、(2)および(3)は損傷の程度が大きくなった状態における観測値である。(1)よりも(2)、(2)よりも(3)と大きな値を示す頻度が多くなっており、正常な状態への帰属度が次第に小さくなっていることが分かる。縦軸は最大値を100としているが、オーバーフローしている棒グラフの値は場合によっては1,000を越えることもある。

なお、特徴量とマハラノビス距離の計算時間は、0.01秒である。すなわち、図2のグラフは0.2秒で波形を計測し、0.01秒で計算するという処理を連続していることになる。計算中は波形データのサンプリングをしていないが、波形パターンの異常監視という目的から考えて、リアルタイムで振動波形の監視を行っていると言うことができる。

### 5. まとめ

均質なデータ群のみから基準空間を構成し、そこからマハラノビス距離を求めることにより、切削刃物の異常の有無をリアルタイムで監視可能なことが確認できた。波形の相違は明示することが困難であるが、今回示した方法により熟練者の知識を機械に置換えることが可能になったといえる。こうした熟練者知識のコンピュータへの置換えは、振動問題だけではなく、画像認識をはじめとするさまざまなパターン認識問題共通の課題であるが、本研究の成果によりこれら課題への応用が可能と考えている。

### 参考文献

- [1] 田口玄一：パターン認識のための品質工学(3)、品質工学, vol. 3, No. 4(1995), pp2-5
- [2] 田口玄一：音声のパターン認識, 品質工学, vol. 3, No. 5(1995), pp3-7

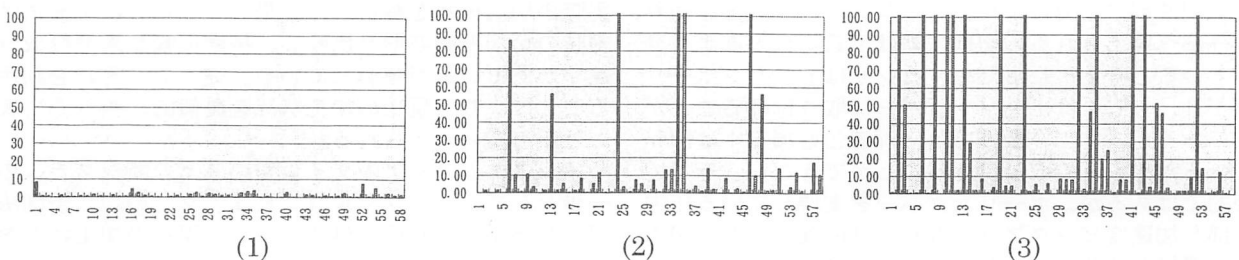


図2. 連続診断結果