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*

手島昌一** 奥野 拓** 青野文朗*** 佐藤功一*** 久保 洋†

A Study on Cutting State Observation using Mahalanobis Distance

Shoichi TESHIMA, Taku OKUNO, Fumiaki AONO, Koichi SATO and Hiroshi KUBO

In automated manufacturing processes, it is indispensable to have the ability to monitor and diagnose automatically the faults occurring in machining processes. To realize such ability, it is important to develop a pattern recognition from the measured value of the state to give correct judgment of the normality. This paper presents a new recognition process based on Mahalanobis distance. The distance is calculated with the so-called Mahalanobis Space that is constructed by characteristics derived from only the normal states' wave patterns of cutting vibration. The "differential and integral" characteristics were picked up from the wave patterns. Experimental result shows that an on-line monitoring with high sensitivity can be realized. And, a method to progress the sensitivity keeping the high speed processing was examined using Genetic Algorithm (GA).

Key words: cutting process, cutting vibration, monitoring, Mahalanobis distance, MTS (Mahalanobis-Taguchi System), differential and integral characteristics

1. はじめに

切削状態の自動監視技術は工作機械の自動運転のために不可欠であり、計測された状態量から加工状態の正常/異常を精度よく判定する認識技術の開発が重要である^{1)~4)}。状態量の計測手段としては、切削時の振動波形を利用する方法は有効で信頼性が高く、これまで多数の研究が行われてきた。ここでは、振動波形から周波数特性などの特徴量を抽出し、振動が正常な状態にあるか否かを認識している。

認識方法としては、正常/異常の両方の特徴量を学習して認識処理する方法と、正常な特徴量を基準としてそこからの相違の大小を判定する方法の2種類に分類される。前者では、ニューラルネットワークなど汎化能力を持つ認識空間を利用する場合が多い。しかし切削加工における異常には工具損傷（摩耗・欠損）、自励振動、構成刃先などがあり、その種類や程度はさまざまで原因の複合もあり得るため、あらかじめ異常データを網羅的に収集して学習させることが困難で、認識空間として不十分となる可能性が高い。また正常な状態量のみを利用する研究でも、正常と異常の相違を定量的に扱う研究はあまりなかった。

本研究では、正常状態の計測値には均質性が期待できるということに注目し、正常な特徴量のみから認識空間として、マハラノビス空間を構成する方法を適用し、有効な切削異常監視を可能とする新たな方法を提案する。また、波形特徴量として従来は周波数特性を用いることが多かったが、ここでは微分特性・積分特性を適用する。これらは波形の周波数や

振幅に関する情報だけではなく、その分布も含めてとらえることができ、かつ高速処理が可能である。微分・積分特性を特徴量とし、マハラノビス空間を構成するパターン認識手法は、MTS (Mahalanobis-Taguchi System) 法として田口により提案されているものであり⁵⁾、これを応用したパターン認識の研究も進められている⁶⁾。本研究では、B.T.A方式による深穴加工を対象として実験を行い、刃物の損傷発生を高い感度でリアルタイムに検出可能なことを確認した。また、特徴量設定最適化のために遺伝的アルゴリズム (GA) を適用し、処理の高速性を維持したまま異常検出感度を向上する方法についても検討した。

2. 異常監視とマハラノビス距離

2.1 認識空間の定義

異常監視の方法として、従来は正常・異常状態から得た代表的な特徴量を学習し、対象がどのカテゴリーに近似しているかを判定する方法が採られることが多かった。場合によっては異常の種類も含めて複数の状態を学習することもある。この場合の利点は、発生する異常の種類およびそれら特徴量の現れ方が限定されている場合に、1個の認識空間で多数のカテゴリー化された状態の認識が可能なことである。また認識空間に汎化能力があれば、少ないデータで学習が可能である。しかし異常は一般的に予測が困難であり、異常データを網羅的に準備することはきわめて困難である。予測がつかないから異常なのだとも言え、もしカテゴリー以外の現象が現れた場合には、認識が困難となる。

これに対して、正常な状態というのは意図された状態が再現されているということであり、多少のばらつきはあるものの現象として一定であり、そこから得られた特徴量は均質であることが期待できる。正常状態から得た均質性のある特徴量

*原稿受付 平成11年2月8日

**正会員 (株) ジャパンテクニカルソフトウェア (札幌市北区北21条西3丁目)

***正会員 (株) 日鋼機械センター (室蘭市茶津町39-5)

†正会員 室蘭工業大学 (室蘭市水元町27-1)

Fig.1 Wave patterns of cutting vibration.

を用いて認識空間を構成した場合、均質性が保たれていない状態の認識結果は正常値を示さないことになる。

図1は、切削振動を示す波形である。この波形は加速度計により検出したもので、縦軸が振幅、横軸が時間を示し、一つの波形は0.2秒分である。そして、同図(a)は刃物に異常がない場合、(b)は切削の進行により刃物に損傷が発生しはじめている場合、(c)は損傷がさらに進んだ場合、から取り出した波形である。波形パターンはどの瞬間を取り出してもすべて異なっているが、正常な状態での波形には正常であるが故の均質な特性があると考えられる。それは、振動数や振幅など波形の特性を表す特徴量の中に潜んでいると推定することができる。本研究では正常波形からこうした特徴量を抽出し、認識空間としてマハラノビス空間を構成し、任意波形の正常度をマハラノビス距離として求めることとした。

2.2 マハラノビス距離の計算

正常波形群からのマハラノビス空間の構成、および監視対象波形のマハラノビス距離の計算について以下に記す。これらの処理は、後述する「波形特徴量」を使用する。マハラノビス空間の構成はオフライン処理であり、距離の計算はオンライン処理である。

2.2.1 マハラノビス空間

まず正常な波形、すなわち切削が正常に進行している状態の振動波形から、一定時間幅の n 組を切り出し基準データとする。それぞれの波形から k 次元の特徴量を求め、これらを、

$$X_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

とすると、各特徴量について、平均値 $m_1, m_2, \dots, m_k$ 、および標準偏差 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ を求める。

そして、次の規準化値

$$x_{ij} = (X_{ij} - m_i) / \sigma_i \quad (i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

を求める。さらに、次の相関行列 R を計算する。

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} r_{ij} = (\sum x_{ij} \times x_{ji}) / n \quad (i, j=1 \sim n) \quad (4)$$

次に相関行列 R の逆行列 R^{-1} を行列 A とする。この行列 A がマハラノビス空間を表現する行列である。

$$A = R^{-1} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{kk} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.2.2 マハラノビス距離

監視対象となる波形から求めた特徴量

$$(Y_1, Y_2, \dots, Y_k) \quad (6)$$

が得られたとき、このデータ組の基準空間におけるマハラノビス距離 D^2 は、 Y を式(1)により y に規準化して、これを

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_k) \quad (7)$$

とした後

$$D^2 = y^T A y / k \quad (8)$$

で求められる。

マハラノビス距離は理論上ゼロから無限大までの値をとるが、小さいほど基準データ群、すなわち正常データに帰属する確率が高く、大きいほどその確率が小さくなる。例えば、基準データ群の個々のマハラノビス距離の平均値は1であり、値が4を越えた場合、それが基準データに帰属する確率は極めて小さくなる。

2.3 波形特徴量の抽出

切削異常監視で最も一般的な計測手段の一つが振動計測である。本研究でも、機械に取り付けた加速度センサにより振動を計測した。連続的に計測される振動から、一定時間間隔(0.2秒間)ごとに波形を切り出し、これを1単位とした。そして、これらの波形から前節に記したマハラノビス空間およびマハラノビス距離を求めるための有効な特徴量を抽出する。

波形から得られる特徴量としては、従来振動スペクトルを用いることが多かったが、本研究では次の新規な特徴量を適用した。この特徴量は田口が音声認識のために提案したが、本研究では一般的に振動特徴を表現するものとして適用した。

2.3.1 微分特性

まず、図2に示すように X 軸に平行な複数の標本線を引く。そして、各線における波形との交点数を微分特性とする。同図から分かるように微分特性は波形の変化頻度となるので、周波数に類似した特徴量となる。そして、これが各標本線ごとに求められるので、微分特性は周波数的特性の振幅方向への分布も表し、必然的に振幅に関する情報も有する。

2.3.2 積分特性

各線上の波形存在部分の長さの和を積分特性とする。すなわち、積分特性は波形の各線ごとの強度を示し、全体としてやはり振幅方向への分布を示すものである。

以上のように微分・積分特性は、周波数や振幅に関する情報と各々の分布も表す特徴量であり、計算処理も極めて簡素であるため、リアルタイム処理に適している。

Fig.2 Differential and integral characteristics

3. 切削監視への適用実験

3.1 実験対象と計測値

切削加工の中でも、加工状況を直接監視することができず、作業者の技能に頼る部分が多い B.T.A.方式による深穴加工を対象として実験を行った。B.T.A.方式は加工穴径などにより、数種類の工具を使用するが、ここではその中のトレパンボーリング工具による加工を対象とした。ボーリングバーと呼ばれる鋼管の先端に取り付けた工具の切れ刃部に、高圧で多量の切削油剤を供給することで、切りくずの排出と切れ刃の冷却、潤滑をし、深穴加工を行う。切削振動は工具切れ刃部より発生していると考えられるため、センサ（加速度計）はトレパンボーリング工具もしくはボーリングバーに取り付けることが理想であるが、両者とも加工中は回転しているため、直接取り付けることができない。そこで、間接的ではあるが、ボーリングバーを支持している圧力台上部にセンサを取り付けた。検出された切削振動は、図3に示すようにアナログ信号からAD変換されPCに取り込まれる。

3.2 正常データの採取

ボーリング加工条件の詳細を表1に示す。基準データは正常切削が進行している状態から採取する。実験ではまず、熟練作業者が立ち会い、振動・切削音あるいは排出された切り屑の状態から正常な切削が行われていることを確認した状態での振動を計測した。被削材の長さ方向の位置により振動条件が異なることも考えられるので、長さ方向数か所で正常データを採取した。サンプリング周波数は 2000Hz、すなわち 0.5ms ごとのサンプリングを行った。

このように採取したデータは長時間連続した波形であるが、この波形からマハラノビス空間を構成するための特徴量群を抽出する。そのため、まずこの連続波形から 400 サンプルすなわち 0.2 秒間隔の波形を切り出し、これを 1 単位とし、採取したすべての正常波形の中から 200 通りの波形を選択した。そして、それぞれの波形に対して X 軸に平行な標準線を

Fig.3 Measuring devices

Table 1 Cutting conditions

Workpiece	Material	SMn443HS45
	Length	6310mm
	Diameter	φ 340mm
Tool	Type	P25
Condition	Boring diameter	φ 250mm
	Feed	10mm/min
	Material rotating speed	18rpm
	Bar rotating speed	60rpm

20 本引き、各線ごとに微分・積分特性を求めた。すなわち、特徴量数は 40 となる。したがって、40 次元・200 組のデータからマハラノビス空間を構成した。

3.3 切削監視実験

表1に示した条件で改めて切削を行い、やはり 0.2 秒単位の波形を切り取った。切り取った波形ごとに微分・積分特性を求め、マハラノビス距離を求めた。その一例として図1に示した振動波形についての値を示すと、図1(a)~(c)それぞれのマハラノビス距離は 1.32, 13.10, 128.0 となった。マハラノビス距離は一般に 4 を超えると基準データへの帰属確率が小さくなる。実際にこれらの波形はそれぞれ図1(a)は正常、(b)および(c)は刃物に損傷が発生した状態でのデータである。さらに、このほかの波形とそれぞれのマハラノビス距離を図4に示す。図4(a)~(c)は正常状態における振動波形であり、同図(d)~(f)は刃物に損傷がある場合の波形である。それぞれの群でマハラノビス距離に相違があることが分かる。

次に、連続的にマハラノビス距離を示したのが図5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を示す。横軸は経過時間であり、ここではそれぞれ 60 本の棒グラフが表示されているので全部で約 12 秒分の結果を示している。図5(a)の各値を見ると、全体に安定して小さな値が連続している。これに対して同図(b)ではマハラノビス距離が数十あるいはそれ以上をとる場合が発生しており、同図(c)ではその傾向がより顕著になっている。(a)は実際に切削が正常であったが、(b)から(c)へと刃物の損傷が進行していた。図6に図5(c)の状態の最後に取り出した刃物の状態を示す。この図から刃物に損傷が発生していることが分かる。図の丸穴のすぐ上に見える面とその右側の面の上端部が切削の行われる刃部である。中央面上端部には被削材が溶着しており、右面上端の右側部には欠損が見られる。

Fig.4 Wave patterns and their Mahalanobis distances

Fig.6 Damaged cutting tool

また、実験では同時に熟練技術者が振動や切削音あるいは排出された切りくずの状態から切削状態を監視したが、刃物の損傷の進行を同様に確認した。

なお、400 サンプリングの波形からの特徴量の抽出およびマハラノビス距離の計算処理時間は0.01 秒である。すなわち、図5では0.2 秒で波形を計測し、0.01 秒でマハラノビス距離を出力するという処理を表している。切削異常監視という目的から考えて、この処理速度は十分実用的な値である。

4. GAによる特徴量設定の最適化

前述の実験では微分・積分特性を求めるための標本線の引き方は等間隔であった。しかし、標本線の配置が異常検出能力に大きく影響を与えるものと考えられる。ここでは遺伝的アルゴリズム (GA) を用い、より異常検出率を高めるような標本線の位置 (間隔) を探索的に求める。

4.1 標本線位置の符号化

異常検出の精度は標本線の数と相関を持つと考えられるが、同時に識別処理時間とトレードオフの関係にあるため、ここでは標本線の数を一定とし、その位置をGAにより決定する

Fig.7 The process of GA

Table 2 GA parameters

Population	30
Crossover	One-point
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.05
Generation	50

Fig.8 Optimized line allocation

こととした。具体的には遺伝子座の数を標本線の数と同数に設定し、その値が標本線の位置を表現するものとした。したがって、染色体は一般的なビットストリングコード化手法ではなく、実数コード化手法で表現した⁸⁾。

4.2 適合度関数

異常な状態であることが分かっている波形のマハラノビス距離は大きいことが望ましい。すなわち、ある標本線位置の組合せの持つ異常検出能力は、異常な波形パターンの特徴量を与えたときのマハラノビス距離が大きいこと、と定義することができる。そこで、異常な波形データの特徴量を複数種類与えたときの望大特性のSN比 η ⁹⁾を適合度関数として用いた。

$$\eta = -10 \log \{ (1/D_1^2 + 1/D_2^2 + \dots + 1/D_m^2) / m \} \quad (9)$$

m : 異常データの数

4.3 GAの処理の流れ

GAの処理の流れは以下の通りである。なお、マハラノビス空間構成のための正常データは200組、SN比を求めるための異常データは50組使用した。

- 1) 染色体からデコードされた標本線位置に基づき、正常波形群および異常波形群から特徴量を抽出する。
- 2) 正常波形の特徴量からマハラノビス空間を構成する。
- 3) 異常波形群の各々について、マハラノビス距離を求める。

Fig.9 Comparison of Mahalanobis distances before and after the optimization

- 4) 式(9)により SN比を計算し、これを各染色体の適合度とする。
- 5) 適合度に基づき染色体の選択を行う。さらに交叉、突然変異により新たな染色体を生成する。

上記の処理を繰り返すことにより、より適合度の高い染色体を求める。なお、染色体の初期状態は標本線をランダムに配置した状態に、等間隔にある状態を1個含ませた。図7に、以上に示した染色体の評価の流れを示す。

4.4 結果と確認実験

上述の手法について表2に示すパラメータ設定で実験を行った。標本線位置の最適化を行った結果を図8に示す。横軸は標本線の番号(1~20)、縦軸が標本線の波形振幅方向位置(加速度計のレベル)を示している。そして、□は標本線の間隔を等間隔にとったときの線の位置、◆はGAにより最適化したときの位置を示す。標本線の位置が100付近および500付近での間隔が密になっており、これら範囲の微分・積分特性が異常認識に重要であると考えられる。また、最適化前と後とのSN比はそれぞれ、3.90db、5.30dbであり、1.40db改善されている。

次に、最適化後の標本線位置により3.3節に述べたデータによる実験を行った。すなわち、標本線位置を図8縦軸の100付近および500付近で密にとった状態で波形特徴量を求め、マハラノビス空間を構成した上で検査対象波形のマハラノビス距離を求めた。その結果を図9に示す。図9は図5(c)に示した「刃物の損傷がかなり進行した状態」での認識結果について、最適化前と後の値を並べて表示した。2本ずつ並べた棒グラフの左側(色がやや薄い)が最適化前、右側(色が濃い)が最適化後を示す。棒グラフの高さが4を越えた箇所、すなわち異常と判定される箇所では、明らかに最適化後の方が値が大きくなっている。したがって、最適化により異常時における検出感度が向上したとすることができる。

5. おわりに

切削状態の異常監視のために、正常切削状態のみによる特徴量からマハラノビス空間を構成し、異常の有無をマハラノビス距離として求める方法を提案した。特徴量として微分特性、積分特性という新たな特徴量を適用し、高速で感度の良い監視が可能であることを明らかにした。

以下に本研究の内容をまとめる。

- (1) 切削振動の中で正常な振動波形のみによる特徴量から正常空間としてのマハラノビス空間を構成した。そして、正常空間への帰属度をマハラノビス距離として求めた。
- (2) 波形パターンの特徴量として、微分特性・積分特性を用いた。これらは波形の周波数の特徴、強度的特徴およびそれぞれの分布を示す特徴量であり、計算処理が簡素である。
- (3) B.T.A.方式による深穴加工を対象として実験を行った結果、刃物の損傷の進行状態と非常に良い相関を示した。これは、熟練者による判定および刃物の損傷状態と一致した。
- (4) 遺伝的アルゴリズムにより特徴量のとり方の最適化を行った。その結果、異常状態の検出感度を高めることを確認した。

検出感度をより向上させるために、波形の1単位の数(サンプリング数)や微分・積分特性を求めるための標本線数などの最適化が考えられるが、これらは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 近藤英二：スペクトルマップのパターン認識による切削異常の検知(第1報、自励びり振動の検知)、日本機械学会論文集(C編)、63、606(1997)592。
- 2) 早川 保、和田候衛、青野文明、佐藤功一：深穴加工の切削異常監視(第三報)ーセンサ信号を用いたリアルタイム切削異常診断ー、1998年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集、(1998)18。
- 3) 竹下拓利、稲崎一郎：アコースティックエミッションセンサを用いたフライス加工状態の自動監視、精密工学会誌、59、5(1993)779。
- 4) 森脇俊道、森 芳信：ニューラルネットワークを用いた切削状態の認識に関する研究、精密工学会誌、59、2(1993)269。
- 5) 田口玄一：音声のパターン認識、品質工学、3、5(1995)3。
- 6) S. Teshima, T. Bando and D. Jin : A Research of Defect Detection using the Mahalanobis-Taguchi System Method, Proc. 4th Ann. Int. TPD Symp./Robust Engineering Conference, (1998)169。
- 7) 田口玄一：多次元情報による統合評価とSN比ー多次元センシングシステムの設計、品質工学、3、1(1995)2。
- 8) L・デービス編(嘉致侑昇ほか訳)：遺伝的アルゴリズムハンドブック、森北出版、(1994)61。
- 9) 田口玄一：品質工学講座(3)、品質評価のためのSN比、日本規格協会、(1988)50。