識別関数による被削性の表現*

——パターン認識手法の適用による被削性データベースの構築(第2報)——

樋口 誠 宏** 矢野 章 成** 杉本 剛 一郎***

Expression of Machinability by Discriminant Function
—Construction of Machinability Data Base Employing
Trainable Pattern-classifying Technique (2nd Report)—

Masahiro HIGUCHI, Akishige YANO and Koichiro SUGIMOTO

This paper describes that the discriminant function utilized in the field of pattern recognition is quite able to depict the machinability response. For the shadowy goal given by the abstract expression like an easiness of chip disposal or a good surface finish as well as the definite goal given by the concrete expression like a 30-minute tool life, the discriminant function can classify the set of achievable cutting variables. Therefore, we can put it to use of the decision making of the desirable cutting variables.

Key words: machinability, tool life, discriminant function, mathematical model

1. 緒 論

加工技術上の自動化レベルを高めるためには、それを熟知したオペレータのノウハウに代替する加工用ソフトウェアが要求され、我が国ではMELTSの名称で知られるシステムが構築されている。ところが、生産加工の分野では、多様な技術革新の成果をすぐに活用することが求められ、柔軟で効率的なソフトウェアに組み込まれたデータ類の更新が常に追い求められる。たとえば、個々の生産現場で切削加工に携わる技術者は新しい被削材料、工具材料、加工技術の開発に対応して、それらの被削性を把握する必要に迫られる。このような場合、技術者自らが現場データの収集とマクロ分析を行って、素早く数学モデルを設定しなければならない。

筆者らはこのような問題に直面した場合、熟練オペレータの切削現象に対する鋭い観察力を基礎に置くパターン認識によるクラス分類の手法が現場的であり、欠落する情報量も少なく、迅速な被削性モデル式の設定に役立つことを示した¹⁾。

被削性モデル式を設定するための数ある手法²⁾³⁾のなかで、識別関数を用いるパターン認識手法の特徴と

するところを挙げれば、次のように要約される。

- (1) 被削性モデル式設定の対象が数値的取扱いを困難とする被削性概念にも及ぶ。
- (2) 被削性モデル式の決定過程では、オペレータが経験を積み重ねる過程と類似の学習プログラムが採用される。そのため、オペレータの判断を効率的に挿入できるので、モデル式の更新が柔軟に行える。

切削諸元を自動決定する過程で、目標とする被削性を達成するために用いる、筆者らの提案したモデル式は、次のようなものであった。

いま、

$$X_1 = \log T, \quad T: \text{切込み (mm)}$$

$$X_2 = \log F, \quad F: \text{送り (mm/rev)}$$

$$X_3 = \log V, \quad V: \text{切削速度 (m/min)}$$

とすれば、

- (1) 旋削面粗さに関しては

$$k \in i \{i, k=1(\nabla), 2(\nabla\nabla), 3(\nabla\nabla\nabla)\}$$

なるすべての k に対して、 $g_i(\mathbf{X}) > g_k(\mathbf{X})$ が成立するとき、旋削面粗さはクラス i となる。ただし、

$$g_i(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^3 W_{i,j} X_j + W_{i,4}$$

- (2) 旋削面のびりマークに関しては

$$g(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^3 W_m X_m + W_4 \leq 0$$

となるとき、びりマークが発生する。

* 原稿受付 昭和60年6月20日、昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月3日)にて発表

** 正会員 関西大学工学部(吹田市山手町3-3-35)

*** 学生会員 関西大学工学部

(3) 旋削面の構成刃先に関しては

$$g(X) = \sum_{n=1}^3 W_n X_n + W_4 \leq 0$$

となるとき、構成刃先が生成する。

(4) 切りくずの処理性に関しては

$$g(X) = \sum_{p=1}^3 W_{pp} X_p^2 + \sum_{p=1}^2 \sum_{q=p+1}^3 W_{pq} X_p X_q + \sum_{p=1}^3 W_p X_p + W_{10} > 0$$

となるとき、切りくず処理性が良い。

のように与えられる。ここに、 $g(X)$ は識別関数、 W は重みである。

ところで、被削性は工具寿命の長短によっても判断されるが、識別関数で定式化されるかどうかについては前報では触れなかった。また、前述の旋削面の品質や切りくず処理性から見た被削性を判断する識別関数には、切れ刃摩耗の影響が考慮されておらず、今後の課題として残されていた。そこで、本報では任意の旋削時間における被削性を予測することのできる識別関数と論理について検討したので、以下に記述する。

2. 被削性データの収集方法

切れ刃の初期状態の被削性を判断する諸識別関数の与える実行可能解¹⁾(切込み、送り、切削速度などの切削諸元)の下で、連続長手外丸削りを行った。一定時間ごとに工具の逃げ面摩耗幅を測定して、それが加速度的に進む V_B 寿命点を、フランク摩耗幅-時間曲線の第2変曲点基準から得た。また、旋削面粗さ、びびりマークや構成刃先痕の有無、切りくず形状なども観察して、切れ刃の初期状態の被削性が持続する限界旋削時間を求めた。切削工具としては、超硬スローアウェイチップ DNMG 432 (P 20 種) を $(-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 0^\circ, 62.5^\circ, 27.5^\circ, 0.8 \text{ mm})$ の刃先角度となるように、クランプオン式ホルダ NCEDM 44-4 に取り付けて使用した。

3. 工具寿命の識別関数による表現

被削性モデル式として用いられる識別関数は図1に示すように、切削諸元空間から被削性空間への写像として定義される。このような識別関数の構造を図的に表現すると、図2の多クラス分類機械となる。

検討課題として残されていた被削性項目の一つ、工具寿命の長短についての写像関係が成立するかどうかを明らかにするために、旋削しきい時刻 15 min および 30 min を設けて、3 値論理を取り扱う識別関数を検討してみた。

Fig. 1 Concept of machinability model employing pattern-classifying technique

Fig. 2 Basic model for pattern classifier trained to respond machinability to cutting variables

多数の工具寿命データから無作為に選んだ教師パターンが各寿命クラスのなかにあって、比較的容易に分離可能であるときに限って、ノンパラメトリック学習¹⁾が完了して、写像関係に矛盾を生じない識別関数の解荷重が得られるはずである。そこで、対数変換した切削諸元空間が旋削しきい時刻で線形分離されるかどうかを試す学習を行ってみたところ、荷重が収束して、以下の識別関数が導出された。

$$\left. \begin{aligned} g_1(X) &= 7.47X_1 + 27.8X_2 + 15.8X_3 - 23.0 \\ g_2(X) &= 6.05X_1 + 8.37X_2 - 2.16X_3 + 12.0 \\ g_3(X) &= -10.5X_1 - 33.2X_2 - 10.6X_3 + 14.0 \end{aligned} \right\} (1)$$

すなわち、工具の寿命時間 T_L (min) はこれらの識別関数から、次のような論理により決定される。

任意の切削諸元 X について、 $j \neq i$ ($i, j=1, 2, 3$) なるすべての j に対して、 $g_i(X) > g_j(X)$ が成り立つとき、

$$i = \begin{cases} 1, & X \in T_L < 15 \text{ を与える切削諸元} \\ 2, & X \in 15 \leq T_L < 30 \text{ を与える切削諸元} \\ 3, & X \in T_L \geq 30 \text{ を与える切削諸元} \end{cases}$$

となる。

以上のように、切削諸元空間から工具寿命空間への写像が可能であることが明らかとなった。図3はその関係を図示したものである。

さて、一般に工具寿命モデル式として送り、切込みの影響も加味したテーラーの拡張モデル式がよく用いられる。そこで、式(1)の学習に使った同じ工具寿命データを重回帰分析して、次式を得た。

Fig. 3 Cutting variable space separated by machining time until flank wear at tool nose terminates tool life

$$T_L \cdot V^{2.16} \cdot F^{1.04} \cdot T^{0.085} = 48\,500 \quad (2)$$

式(2)の回帰は分散分析の結果、 $F_0 = 52.1 \geq F_{40}^{0.05} = 2.84$ となって、5%水準で有意であるので、全体として工具寿命の予測に役立つといえる。ところが、工具寿命に対する個々の変数の偏相関係数は $r(T_L, V) = -0.837$, $r(T_L, F) = -0.339$, $r(T_L, T) = -0.083$ となって、高い相関関係を示す切削速度を除いては、切込みも送りも工具寿命の予測になんら役立っていないといえる。このようなことは、切削諸元を広範囲にとる場合に起こるといわれ⁴⁾、望ましいモデル式を得るためには、より複雑な回帰式²⁾を採用しなければならない。

これに対して、式(1)の識別関数が数多くの工具寿命データについて正しい寿命クラスを応答した識別率は84%であった。残りの16%の工具寿命データの大部分は図3に示した分離超平面近傍に位置するデータであって、特にある切削諸元領域の工具寿命データがすべて誤って識別されたものでなかった。したがって、識別率の向上は教師パターンを増やすことによって、十分達成されるものであるといえる。

図4は式(2)から得られる回帰平面を示すものであるが、図3と比較すると高切込み、高送りの切削諸元領域の工具寿命データが重回帰式のなかで十分に表現されていないことが知れる。

4. 任意の旋削時間経過後の旋削面の品質と切りくず処理性を表現する識別関数

切れ刃の摩耗は不可避の現象である。そのため、

Fig. 4 Tool life identified by multiple regression analysis

“▽▽の粗さに仕上げたい”のような具体的表現，“処理性の良い切りくず形状としたい”のような抽象的表現で与えられる目標を達成する切削諸元は切れ刃交換直後には数多く存在するが、任意の旋削時間経過後には目標を達成する切削諸元は減少する。したがって、切削諸元の選択という意味決定を望ましい形で行うには、目標とする被削性を達成するすべての切削諸元の集合（前報で詳述した切れ刃交換直後の諸識別関数で与えられる）を、累積旋削時間によって部分集合に細分割する識別関数が組立てられる可能性について調べてみるが必要であると思われる。

そこで、まず切れ刃交換直後にはびびりを起こさない種々の切削諸元で旋削を行い、仕上面にびびりマークを認めるまでの累積旋削時間を調べた。その結果、旋削開始後5 min以内にびびり状態、15 min以内にびびり状態、30 minを越えてもびびり状態を引き起こさない切削諸元にグループ分けされることがわかった。これらのデータを基に、びびりの発生限界旋削時間へ任意の切削諸元を写像する識別関数を求めたところ、次式を得た。

$$\left. \begin{aligned} g_1(\mathbf{X}) &= 1.30X_1 + 11.5X_2 + 7.39X_3 - 9.0 \\ g_2(\mathbf{X}) &= 0.10X_1 + 1.19X_2 + 2.64X_3 - 2.0 \\ g_3(\mathbf{X}) &= 1.60X_1 - 9.67X_2 - 7.03X_3 + 14.0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、任意の切削諸元 $\mathbf{X}$ に関して、式(3)の識別関数から予測されるびびりの発生限界旋削時間 t (min) は $j \neq i$ ($i, j = 1, 2, 3$) なるすべての j に対して、 $g_i(\mathbf{X}) > g_j(\mathbf{X})$ の成立する i について、次のようになる。

Fig. 5 Cutting variable space separated by machining time until generation of chatter mark

- $$i = \begin{cases} 1, & X \in t < 5 \text{ を与える切削諸元} \\ 2, & X \in 5 \leq t < 15 \text{ を与える切削諸元} \\ 3, & X \in t \geq 30 \text{ を与える切削諸元} \end{cases}$$

この識別関数による3値論理の識別率は他の60個のびびりデータによって検定した結果、88%であった。

図5はびびり発生限界旋削時間で切削諸元空間を細分割したものである。また、同図の一点鎖線で示す超平面は切れ刃の初期状態にびびる可能性のある切削諸元を識別するものである。したがって、この識別関数と限界旋削時間を決める識別関数の論理を同時に満たす切削諸元の集合が“一定旋削時間びびりを起こさない切削諸元”となる。

ところで、旋削を始めてすぐにびびりを起こす切削諸元領域を見ると、図3と工具寿命の短いそれと共通する領域の多いことがわかる。このことは、ここで観察されたびびりが工具逃げ面の摩耗がある幅以上になった場合に引き起こされる摩擦形びびりであったことを裏付けている。

次に、切りくず処理性という抽象的な表現で与えられる被削性項目について考察する。

これに関しては、INFOSの分類法に従ってその形状を記述して、処理上好ましい形状の切りくずを生成する切削諸元の有効範囲を識別関数で判別している。ところが、切れ刃の漸進的摩耗がそのような有効範囲の増減に影響することが明らかとなれば、処理性の良い切りくずを生成する切削諸元の集合を、任意の旋削時間好ましい形状の切りくずを生成する切削諸元の部分集合に細分割する識別関数を作成することができる

Fig. 6 Space of cutting variables which produce chip of easy-to-dispose shape

かどうかを検討する必要がある。

そこで、旋削時間の経過に伴う切りくず形状の変化を注意深く観察してみた。その結果、旋削を始めて5 min以内にリボン状をしたり、もつれたり、平らならせん状をした処理性の悪い切りくずを生成する切削諸元のあるのが認められた。しかし、これらの切削諸元を除けば、切れ刃摩耗の影響を受けて切りくず形状が変化することはなかった。このような結果を踏まえて、切れ刃交換の後5 min以内に処理性の悪くなる切削諸元を判別する識別関数を求める学習を行ってみると、荷重が収束して識別率86%の次式を得た。

$$g(X) = -1.49X_1^2 + 3.27X_2^2 - 0.61X_3^2 + 0.58X_1X_2 + 0.45X_1X_3 + 3.48X_2X_3 + 2.0X_1 + 0.55X_2 + 2.28X_3 + 1.24 \quad (4)$$

$$g(X) \begin{cases} > 0, & X \in \text{旋削時間によらず、切りくず処理性の良好となる切削諸元} \\ \leq 0, & X \in 5 \text{ min 以内に、切りくず処理性の不良となる切削諸元} \end{cases}$$

図6に $g(X)=0$ で分離された切削諸元空間を示すが、すぐに処理性の悪くなる領域は、全く摩耗していない切れ刃でも処理しにくい切りくずを生成する切削諸元領域（一点鎖線で示す。前報図7）を包含していることが知れる。このことから、切れ刃交換の後5 min程度旋削してみて、好ましくない形状の切りくずが生成されなければ、それ以降切りくず処理に関するトラブルは起こらないものと考えられる。それゆえに、式(4)で与えた論理を実現する識別関数を組立てるのが妥当と思われる。

次に、旋削面粗さについて考察してみる。

粗さについては、中仕上以上の▽▽▽や▽▽の粗さ

しても、目標とする被削性の実現されることが明らかとなった。この点からも、パターン認識手法の識別関数で表現される被削性モデル式の有効性が指摘される。

6. 結 論

切れ刃摩耗の影響を受けて、切れ刃の初期状態の被削性が変化する。その結果として、旋削目的が達成されなくなる。本研究は任意の旋削時間経過後の被削性を予測するモデル式を、パターン認識の分野で用いられている識別関数で表現することについて検討し、以下に要約する結論を得た。

- (1) 被削性を判断する一つの項目、工具寿命の長短が識別関数で定式化される。これにより、目標とする寿命時間を満たす切削諸元の集合を見つけることができる。
- (2) 目標とする被削性、たとえば良好な切りくず処理性や旋削面の品質などを実現する切削諸元の集合を考えると、任意の旋削時間経過後も目標を

満たす切削諸元の集合を、切れ刃交換直後のその部分集合として取り扱うことによって、任意の旋削時間における被削性を予測する識別関数を組立てることができる。

- (3) 切削諸元を断続的に変化させた旋削過程の被削性に対しても、決定した各種の識別関数から予測できる。

参 考 文 献

- 1) 樋口誠宏, 矢野章成: パターン認識手法の適用による被削性データベースの構築, 精密機械, 50, 8 (1984) 1255.
- 2) M. Y. Friedman and M. Field: Building of Tool Life Model for Use in a Computerized Numerical Machining Data Bank, Proc. I.C.P.E., Tokyo, (1974) 596.
- 3) 長坂一徳, 橋本文雄: 工具摩耗量を考慮した工具寿命予測モデルの同定, 精密機械, 47, 2 (1981) 185.
- 4) 機械振興協会技術研究所加工技術データファイル編集委員会編: 加工技術データファイル, 機械振興協会技術研究所 (1977).

(p.761より続く)

[新合金製造システム] 形状記憶合金, 水素吸蔵合金, アモルファス合金などに代表されるいわゆる機能性合金は、積層化、複合化、表面改質、ドーピングなどの処理を施さず、バルクの状態で作られる合金であるにもかかわらず、これまでにない新しい機能を示すことはよく知られている。

こうした機能性合金の新しい製造法として急冷凝固法と気相拡散浸透法を、一貫融合システムの考え方で組み合わせた製造システムを提案する。

〈図2〉はこの両方を組み合わせた銅・亜鉛・アルミニウム系形状記憶合金の製造システムである。

現在、同合金は実用化が進んでいるが、亜鉛含有量のコントロールが難しい製造上の問題と、結晶粒径の微細化がしにくい性能上の問題がある。ここで提案する同システムはその二つの問題点を解決する有力な方法とな

る。

同システムの長所は、① 精密な亜鉛濃度の調節が可能、② 部品にした後でも亜鉛濃度を調節できる、③ 焼結条件と拡散条件を適当に選べば、急冷凝固法で得た微細結晶粒をそのまま保持することができる——などである。

また短所としては、① 密閉容器が必要、② 焼結ならびに気相拡散浸透のための加熱温度と時間によっては、結晶粒が粗大化する恐れがある、③ 亜鉛を吸収または放出した分だけ体積変化が生じる——などである。

こうしたことから微細結晶粒と適正な合金組成の両者を、同時に必要とする各種高性能合金の製造法として極めて有用であり、また実現可能なものである。

(p.788へ続く)

〈図2〉 急冷凝固法と気相拡散浸透法を組み合わせた一貫融合加工システム