切削加工における状態監視システムについて*

酒井義郎**, 友貞賢二***

On a Software System for Supervision of Cutting Processes

Yoshiro Sakai and Kenji Tomosada

Described is the software system for the diagnosis of the cutting status in machining and its adaptive control. For the diagnosis of the cutting status, the concept of "information vectors" is introduced, which form a partially-ordered space for pattern recognition. The fuzzy set theory is also employed for the data handling and the control of the cutting status. Instructions from the human boss as his skill in machining are accepted on the CRT by writing them as fuzzy control rules with the fuzzy information of the concrete values required in describing them.

Key Words: Cutting, Failure, Fuzzy Set Theory, Diagnosis, Control

1. 緒言

切削加工の分野においては、近年、製品の高品質、低コスト化にこたえるために、自動化・無人化が進められている。しかし、解析的な方法を用いた、従来の自動化手法では加工中の異常に十分対処できない。このような、従来の手法がうまく機能しないような複雑な対象に対しては、人間の知識、経験を取り込むことによって自動化を図ることが行われつつある。このような方法の利点は、制御対象の状態や、その対処法としての値にあいまいさが許され、それにより、熟練者と同等なことが行えることである。

著者らはこれまで切削加工における状態監視システムの可能性や構成について検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。また、その構成要素としてカルマンフィルタを用いた工具欠損、びびりの検知システムについても検討し⁽³⁾、状態監視システムの制御部分に、人間のもつあいまいさを表現できる Zadeh の提唱するファジィ集合⁽⁴⁾を用いることをも検討してきた⁽⁵⁾。

ここでは、これまで検討してきた状態監視システム

を具現化するために、用いた手法や、カルマンフィルタによる検知とともに、パワースペクトルなども情報として用いた、より確実に状態を診断する手法およびそれによりコンピュータプログラムとして作成した状態監視システムの結果について述べる。

2. 切削状態監視のための情報

切削状態を監視するためのシステムとして、大きくわけてカルマンフィルタによる切削抵抗の推定値や切削抵抗変動分を用いる。

まず、前者について述べる。あるシステム、ここでは被削材-工具-切りくず系、の状態を観測しようとする、得られた観測値にはシステム雑音や観測雑音が含まれている。そこで、観測値から必要なデータを取り出すためにカルマンフィルタを用いる。このカルマンフィルタにより得られる推定値を用いて、連検定、尤度比検定によって工具欠損、びびりの発生の検知を検討してきた⁽³⁾。これらの統計的検定が正しい判断である確率をこの異常の判断のための情報とする。

切削抵抗の変動分には周期性に関する情報が含まれているので、変動分を処理することによりびびりや切りくず流出状況について知ることができる。

ここでは、主に摩耗によるびびりを扱う。びびりの

* 昭和61年10月6日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年3月25日。

** 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台)。

*** 山口大学大学院。

発生によって、被削材新表面には凹凸が残る。すなわち、びびりの凹凸に比例して工具刃先は振動しているので、切削抵抗には周期的な大きな振動がある。かつこの振動は高い周波数で生じる。よってびびりの有無に関して切削抵抗の周期的変化で大きい振幅を有し、その周波数が高いか否かを監視していればよい。その方法として、高速フーリエ変換(FFT)を用いた。切削抵抗の周波数の大きい部分に大きい振幅を有する振動があるか否かを情報とする。

次に、切りくず長さ異常の検知について考える。切りくず長さの変化は、切削加工の無人化には大きな障害となる。切りくずの折断はほぼ周期的に起こっており、周波数分析によってその周期は確認できる。その周期により、大体の切りくず長さは判断できる。よって切りくず折断の周期の変化を観測すればよい。切りくず長さ異常の判断の情報として、切削抵抗の低周波域における最大振幅を有する振動の周波数の変化をとる。

工具欠損の検知には、工具欠損によって切削抵抗が急激に変化するため、工具欠損の推定に用いる情報として切削抵抗の静的成分の急激な変化の量をとる。

3. 切削状態の推定

種々の情報から、より確実な状態の診断を行うための方法について述べる。切削状態の推定の方法として情報ベクトルと名付けるものを用いる。すなわち、前段において述べた情報を、順序づけられた組、すなわち、情報ベクトルとして扱う。その情報ベクトルの座標を次に列記する。

(1) 連検定による工具欠損確率	y_1
(2) 尤度比検定によるびびりの確率	y_2
(3) 最大振幅を有する周波数	y_3
(4) 低周波域の周波数と変化	y_4
(5) 高周波域の最大振幅	y_5
(6) 切削抵抗の急激な変化の量	y_6

情報ベクトルは、それぞれの異常のパターンを表している。ベクトルを用いたパターン認識により、それぞれの異常を判断する方法を次に述べる。

ある切削状態を表す情報ベクトル $\mathbf{a}$ を考える。他の状態の情報ベクトル $\mathbf{b}$ があり、 $\mathbf{b}$ は大きさも方向も $\mathbf{a}$ とほぼ同じであるとする、 $\mathbf{b}$ の表す状態は $\mathbf{a}$ の表す状態と変わらないと判断できる。人間が同一の状態を示すと判断する情報ベクトル達のそれぞれの要素の最大、最小のベクトルを考えると、その状態を表す情報ベクトルは、最大と最小のベクトルにはさまれる。いいかえると、情報ベクトルは、数学的なベクトルの大

小関係において、最大のベクトルより小さく、最小のベクトルより大きいということである。この大小関係を満たすベクトル同士、すなわち、同一の状態を示す情報ベクトル同士は、半順序の関係にあり、大きさや方向が多少異なることが許される。この許容されることが人間のもつあいまいさを表現している。最大、最小のベクトルにはさまれる情報ベクトルは同一の状態であると判断できることを用いてパターン認識を行う。

異常の推定、すなわち、異常の有無の判断だけであれば、 $y_1 \sim y_6$ については、それぞれの取り得る値を、2値(0, 1)としても可能である。よってここでは簡単のため2値とした。

ある異常が生じた場合、考えられるすべての情報をもつベクトルを経験、知識を基づいて作る。切りくず長さ異常、工具欠損、びびりの場合のベクトルを次に示す。

切りくず長さ異常

$$\mathbf{y}_{\max}^I = (0, 1, 0, 1, 0, 0)$$

工具欠損

$$\mathbf{y}_{\max}^{II} = (1, 1, 1, 1, 0, 1)$$

びびりの発生

$$\mathbf{y}_{\max}^{III} = (1, 1, 1, 0, 1, 0)$$

異常である可能性を調べるには、それぞれの異常である可能性のベクトルの和、 $\mathbf{y}_D = \{y_i = \max(y_{\max,i}^I, y_{\max,i}^{II}, y_{\max,i}^{III}), i=1, \dots, 6\}$ を考えればよい。しかし、ここでは、 $\mathbf{y}_D = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$ となり、どんな $\mathbf{y}$ も $\mathbf{y}_D \geq \mathbf{y}$ となり判断できず、異常の有無には正常の情報ベクトル $\mathbf{y}_C$ を考えることによって行う。ここで $\mathbf{y}_C$ は、 $\mathbf{y}_C = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ と定義する。すなわち、ある切削状態 $\mathbf{y}$ が、 $\mathbf{y} \geq \mathbf{y}_C$ であれば、いずれかの異常を生じている可能性がある。

これまでに示した、 $\mathbf{y}_C, \mathbf{y}_{\max}^I, \mathbf{y}_{\max}^{II}, \mathbf{y}_{\max}^{III}$ を用いて、正常か否か、また、生じている可能性のある異常の種類を、 $\mathbf{y} \geq \mathbf{y}_C, \mathbf{y}_{\min}^I \leq \mathbf{y} \leq \mathbf{y}_{\max}^I, \mathbf{y}_{\min}^{II} \leq \mathbf{y} \leq \mathbf{y}_{\max}^{II}, \mathbf{y}_{\min}^{III} \leq \mathbf{y} \leq \mathbf{y}_{\max}^{III}$ によって分類し、同定できる。 $\mathbf{y}_{\min}^i, i=I, II, III$ はそれぞれの異常を生じていると判断できるために最小限必要な情報ベクトルである。次にその最小限必要な情報ベクトルを示す。

切りくず長さ異常

$$\mathbf{y}_{\min}^I = (0, 0, 0, 1, 0, 0)$$

工具欠損

$$\mathbf{y}_{\min}^{II} = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

びびりの発生

$$\mathbf{y}_{\min}^{III} = (0, 1, 1, 0, 0, 0)$$

$$\mathbf{y}_{\min}^{III} = (0, 0, 1, 0, 1, 0)$$

例えば、工具欠損を生じていると判断される場合を考えると、その情報ベクトル y は、 $y \geq y_c$ で、 $y_{\min}^H \leq y$ かつ $y \leq y_{\max}^H$ を満たしている。

4. 切削状態の程度評価

4.1 切りくず長さ異常の程度評価 切りくず長さ異常は、無人化に際しての切りくずの処理性に関係している。すなわち、切りくずに関する異常の程度評価は処理性を評価するのが望ましい。しかし、処理性という対象は不明確ゆえ、切りくず長さ自体を評価する。

切りくず長さは、異常の判断の際に用いた切りくず折断周波数から近似的に求めることが可能である。

切りくず長さに対して、人間が異常の程度を、ファジィ集合を用いて与える。加工中の切りくず長さを評価する場合、あいまいさを許した切りくず長さがファジィ集合によって与えられ、切りくず長さ異常の程度は、それぞれの程度を表すファジィ集合と、切りくず長さのあいまいさを表すファジィ集合の minimum をとって、その minimum を最大にするファジィ集合をもつ程度であると判断する。

4.2 工具欠損の程度評価 工具に欠損を生じた場合、急激な切削抵抗の変化が生じる。これにより工作機械や製品に悪影響を与える。すなわち、切削抵抗の急激な変化の大きさが問題となる。評価の対象としては、急激な切削抵抗の変化量をとる。評価法は、切りくず長さの異常の場合と同様、人間が工具欠損の程度に切削抵抗の変化量でファジィ集合を与えて行う。

4.3 びびりの程度評価 びびりを生じた場合、被削材新表面にびびりあとが残り、仕上げ面粗さが問題となる。びびりによる凹凸が大きいほど、工具刃先に大きい変動力が加わり、工具欠損などの異常を誘発する可能性があり、問題である。びびりの程度は切削抵抗の変動分の振幅に対応している。したがって、その振幅に対して前と同様、程度に応じてファジィ集合を与えて、工具欠損の程度評価を行う。

5. 修正量の決定

切削状態の調整に関連する作業者の持つ知識は、ある状態と修正量との対応関係として表現することができる。すなわち、“IF 状態の異常 THEN 修正量の大きさ”のような制御則として表現される。修正量の決定には、この対応関係を用いる。

実際の修正量は、切削加工中の状態を種々の発生している異常の程度で表現した後、その状態を制御則に照合し、符合する制御則にしたがって対処方策、修正

量を求める。

6. システムの流れ

システムを動作させるための作業者のデータの入力について述べる。データの入力にはデータ入力用システムとの対話形式をとっている。システムの間に対して、作業者は CRT 上に表示されている略号を用いて入力する（図 1～3 参照）。

まずシステムは、どのような異常の場合か、すなわち IF 部の入力を求めてくる。切りくず長さ異常、びびり、工具欠損の順に程度の入力を行う。そしてその IF 部に対応する対処法とその操作量を入力する。どの程度の修正量が必要かは、その時点で用いられている切削条件により異なるから、次に、システムは一つの制御則に対して、切削条件の異なる場合の修正量の入力を要求してくる。切削条件を入力した後、その時の修正量をファジィ集合のメンバーシップ関数によって定義する。図 4 のように修正量の入力にはファジィ集合を視覚的に表し、入力の容易さを図っている。代表的なデータをいくつか入力した後、次の制御則の入力へ移る。以上の CRT 上のシステムとの対話によって図 5 のようなデータファイルが構成される。

以上のようにして状態監視システムの用いるデータを作製した後、実際に旋削による切削抵抗を用いてシステムを動作させた結果として、システムの CRT 上への出力を図 6, 7 に示す。

システムには上述の六つの情報を数値で入力する。システムはこれを 2 値に変換し、情報ベクトルとしてパターン認識を行う。異常の有無を調べ、なんらかの異常があると判断されたなら、入力された数値を用いてどんな異常で、どの程度かを判断する。異常の程度が ZO であれば、異常は発生していないと判断される。現在の切削状態（切りくず長さ異常の程度、びびりの程度、工具欠損の程度）を把握した後、‘KNOWLEDGE’ というランダムファイルの中から現在の状態に符合するデータを検索する。そしてデータの中の FILE NAME を読取り、次にそのファイルの中から現時点の切削条件に近いものを探し、符合する修正量を求める。しかし、すべての状態の制御則が備わっているとは限らないから、符合する制御則のない場合は、持っている知識から対処法を推測する。その方法として、切削状態をいくつかの切削状態にわけて考える。すなわち、

$$CL = \underline{PB} \text{ and } CH = \underline{PS} \text{ and } FR = ZO$$

↓

$$CL = \underline{PB} \text{ and } CH = ZO \text{ and } FR = ZO$$

CL = ZO and CH = PS and FR = ZO
 のようにする。それぞれに符合する制御則を探し、それぞれの修正量を合成して修正量を推測する。また、制御則の代表的な切削条件に近似できるようなデータ

がない場合、現時点の切削条件に近いデータ二つを取り出し、その二つの修正量を合成して現時点の切削条件に符合する修正量を推測する。切削条件が近いとか、遠いとかは、経験的に、送り、切削速度、切り込みに対

AVAILABLE WORDS		EXAMPLE
SPEED (S)	POSITIVE BIG (PB)	If CL is PB
FEED RATE (F)	POSITIVE MEDIUM (PM)	and CH is PB
DEPTH OF CUT (DC)	POSITIVE SMALL (PS)	or FR is ZO
CHIP LENGTH (CL)	NEGATIVE BIG (NB)	then F is PB
CHATTER (CH)	NEGATIVE MEDIUM (NM)	
FRACTURE (FR)	NEGATIVE SMALL (NS)	
	ZERO (ZO)	

If CL is ___ and CH is ___ and FR is ___ then _ is _

図 1 対話形式を用いた制御則入力用システムの画面

AVAILABLE WORDS		EXAMPLE
	POSITIVE BIG (PB)	If CL is PB
	POSITIVE MEDIUM (PM)	and CH is PB
	POSITIVE SMALL (PS)	or FR is ZO
	NEGATIVE BIG (NB)	then F is PB
	NEGATIVE MEDIUM (NM)	
	NEGATIVE SMALL (NS)	
	ZERO (ZO)	

If CL is ___ and CH is ___ and FR is ___

図 2 対話形式を用いた制御則入力用システムの画面 (異常の程度入力時)

AVAILABLE WORDS		EXAMPLE
SPEED (S)		If CL is PB
FEED RATE (F)		and CH is PB
DEPTH OF CUT (DC)		or FR is ZO
		then F is PB

If CL is PM and CH is ZO and FR is ZO then _ is _

図 3 対話形式を用いた制御則入力用システムの画面 (制御策の
入力時)

図 4 切削条件の異なる場合の修正量の入力用画面

図 5 入力された制御則, 修正量の保存形式

```

Cutting condition (speed,feed,depth)  100 [m/min]  .2 [mm/rev]  2 [mm]
Run Test   キャンリツ                .99
Likelihood-R.   キャンリツ            .995
Frequency                71.8 [Hz]
delta Frequency                0 [Hz]
Amplitude of Pmax          20.7 [N]
Jump in Cutting Force      0 [N]

**CHPLG IS ZO                **CHTTR IS ZO                **FRCTR IS ZO
F   0.2000 [mm/rev] ニスル
    
```

図 6 切削状態が正常だった時のシステムの出力結果 (CRT)

```

Cutting condition (speed,feed,depth)  100 [m/min]  .2 [mm/rev]  2 [mm]
Run Test   キャンリツ                .99
Likelihood-R.   キャンリツ            .975
Frequency                31 [Hz]
delta Frequency                44 [Hz]
Amplitude of Pmax          28 [N]
Jump in Cutting Force      0 [N]

**CHPLG IS PM                **CHTTR IS ZO                **FRCTR IS ZO
F   0.2299 [mm/rev] ニスル
    
```

図 7 切りくず長さ異常を生じた時のシステムの出力結果 (CRT)

して同等の効果が得られる座標を設定して, 三次元距離空間として判断する。

7. 結 言

著者らがこれまで検討してきた切削加工における状態監視システムについて, コンピュータプログラムを試作した。この中では, 作業者の知識の導入にどのようなデータを, どのような方法で, どのような形で保持するかその手法を示した。まず, 制御則を入力し, それぞれに代表的な修正量の値をデータにしてとり, そ

の修正量の値の入力には, 作業者の入力を容易にするためにファジィ集合を用いてあいまいさを表現できるようにした。

切りくず長さ異常, びびり, 工具欠損を切削状態の異常とし, これらが発生しているか否かを判断するために六つの情報によって総合的に判断する方法を新しく採用した。

また, 実際の旋削のデータを用いて切削状態を監視し, それに対応する修正量を出力する様子を示した。切削加工へのファジィ制御の導入は著者らが以前に示

したとおり有効であり、このシステムの結果からも適切なデータの入力によって切削加工の自動化が可能であると思われる。ただし、周辺のデータ処理装置として、実時間で動作できるものが必要である。

文 献

- (1) Sakai, Y. and Ohkusa, K., *Systems & Control Letters*, 6 (1985), 117.
  - (2) Sakai, Y. and Ohkusa, K., *Proc. 16th CIRP Int. Seminar on Manufacturing Systems*, (1984), 185.
  - (3) Sakai, Y., ほか 2 名, *Proc. IMEKO TC-14 ISMQC*, (1984), 62.
  - (4) Zadeh, L. A., *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No.1, (1973), 28.
  - (5) Sakai, Y. and Ohkusa, K. (Sugeno, M. 編), *Industrial Applications of Fuzzy Control*, North-Holland, (1985), 139.
-