切削加工における解析及び経験知識勘案型の 知識表現 (第1報)*

[JSPE-57-02
91-02-250]

——再生びり安定境界の予測——

井 原 透** 三 木 勉***

Knowledge Representation Fusing Experimental Knowledge and Theoretical
Model Methods for Cutting Operation Plan (1st Report)
-Prediction of Stability Boundary of Chatter Vibration-

Tohru IHARA and Tsutomu MIKI

It is important to establish a form of the knowledge representation system when we construct an intelligent manufacturing system. A knowledge representation system which compensates for errors of models by experiences has been developed, based on a combination of fuzzy inference and theoretical model methods like equations, simulation and so on. It has been applied in a case study to compensate and to predict for chatter vibration in an operation plan for turning. This paper describes a conception of the knowledge representation for compensating errors of models by experiences and the system to predict for stability boundary of chatter vibration.

Key words : knowledge representation, knowledge base for cutting, fuzzy inference, stability boundary, chatter vibration, frame system, learning function

1. は じ め に

知識表現形式の決定は知識ベースの構築および生産システムの知能化を図るうえで重要な問題¹⁾であり、これについては幾つかの先駆的な調査研究、実験的検討、統合的提案が行われている^{2)~4)}。しかしいずれも対象が設計および工程設計全般と幅広く、切削加工の作業設計に適合した知識表現についての提案を試みようとするものではない。また、切削加工におけるエキスパートシステムの開発に関する多くの研究がなされているが⁵⁾、これらは利用可能な特定の知識表現形式を用いたものであり、知識表現形式について論じているものではない。

切削加工の作業設計においては、数値計算や解析結果などの情報が未加工で使われることはほとんどなく、被削材形状や工作機械の機差などによる現場的な不確定性を作業者の経験的なノウハウによって加味されて処理されることが多い⁶⁾。こうした作業設計に適合し

た知識表現には解析知識とこれを補完するための経験的知識の両者を融合的に取り扱うことが必要とされる。本研究では切削加工に関係する解析知識とこれを補完する経験知識を融合して、フレーム知識表現化し、実際の作業設計に特化した知識表現形式の構築を試みたものである。本報では知識表現形式の構成の大略とこれを用いて作成された2次元再生びりりの絶対安定境界を予測するシステムについて報告する。

2. 対象問題の設定と知識表現の概念

切削加工の原理・原則に関する基本的な解析知識を考える。基本的な解析知識の多くは現場的な被削材形状の変化や把持状態、工作機械の違いなどを考慮しないため、熟練切削作業者は経験的な知識を用いて解析結果の補正や補完を行う。たとえば図1のような被削材の自由端近傍での溝入れ加工を考える。びりり予防のためにはセンタを使うのであろうが、旋削が可能なマシニングセンタを利用する場合やターニングセンタでも設計条件や現場環境によっては簡便な同加工法ととられることがある。また本研究の検討例としても効果的であったので、同図に示す加工法における再生びりりの絶対安定境界の予測を問題とする。この場合、解析知識としてMerrittの理論式を考える。

* 原稿受付 平成2年 6月29日、昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年 3月16日)、及び1990年度精密工学会春季大会学術講演会(平成2年3月28日)にて発表

** 正 会 員 中央大学理工学部(東京都文京区春日1-13-27)

*** 学生会員 中央大学大学院

Fig.1 Example of workpiece

Fig.2 Comparison between experimental value and theoretical value on the limit of chatter vibration

$$B = \frac{k\delta\sqrt{1-\delta^2}}{\lambda\cos(\alpha-\beta)\cos\alpha} \quad (\delta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}) \quad (1)$$

ただし、 α 、 β 、 λ は各々被削材の振動方向、切削力方向、比切削抵抗を表す。また B は切削幅、 m 、 k 、 c は各々相当質量、相当ばね定数、相当減衰係数を表す。 α 、 β 、 λ は一定値だとすると、求める安定限界値 B は振動パラメータ m 、 k 、 c の値によって変化する。同パラメータは周波数伝達関数から求められる。この結果、図2の破線のように被削材形状ごとにびり限界の解析結果が得られる。横軸は切削速度、縦軸は切削幅を示すが、絶対安定境界は切削速度に依存しないので横軸に平行となる。同図実線はびり限界の実測値を示す。Work 1では実測値と解析結果が比較的近い値となっているが、Work 2では実測値と解析結果との間にかなり大きな誤差が生じる。この理由は主軸系、チャッキング、被削材形状、切削過程などの影響が考えられるが因果関係を明らかにするのは困難である。

作業者が行う現場的な補正は例えば次のようなものである。典型的な1自由度系で振動すると考えられるWork 1とそうではないWork 2とに分け、両者の誤差割合を記憶しておき、両者の中間に属する被削材に関しては、被削材形状が典型的な1自由度系の振動とみなせる割合(代表値)に応じて誤差割合を推定し、この割合を用いて解析結果を補正する。ここでは解析知識をこのような経験知識によって補正する場合を問題にする。多変量解析などによって厳密に因果分析した結果の知識に基づいて補正を行う方法もあるが、分析に手数がかかり柔軟性に劣る。また分析結果を解析的知識

と解釈すれば本報の知識表現で同様に取り扱えるのでそういった方法は扱わない。

要約すると熟練作業者は、解析的知識を用いて算出された解析結果が、解析時に考慮されない要因のために生じた実際の値との間の誤差を被削材形状の違いといった代表値を用いて経験的に補正し、作業設計に役立つ予測値を求めるわけである。したがって作業者は解析的知識と同時に補正用の代表値を推定するための経験的知識と、同値から解析結果の誤差を同定するための経験的知識を持っている。こうした熟練作業者の持つ知識の概念単位を「ひとつの解析知識とこれを補正するための経験的知識および作業設計に役立つ予測値を算出するための処理機能知識」と考える。これを

Fig.3 Conception of knowledge on cutting operation plan

解析・経験的知識勘案型の知識と呼び単位知識化すると、図3に示すように切削加工の作業設計に関してはびり限界算出知識、切削力算出知識、工具たわみ算出知識等の解析・経験的知識勘案型の単位知識がサブクラスとして想定でき、作業者の知識情報モデルが作成できる。サブクラスのインスタンスとしては実在する特定の加工システムにおける単位知識が存在する。具体的なインスタンスとしては被削材や工作機械などの違いを考慮した経験的知識が相当する。なお作業設計に用いる知識としては解析知識を含まないような一般的知識情報が多数あるが、解析・経験的知識勘案型知識の特殊な場合として取り扱うことができるのでここでは考えない。

3. フレーム表現とファジィ推論との融合

本研究ではフレーム型知識表現を基本的な知識表現形式として採用した。対象とした単位知識は、図3に示すびり限界算出知識である。単位知識は、次に挙げる5つのスロットで構成される。

- ①補正された予測値
- ②解析的知識により算出される理論値
- ③経験的知識により推定される補正量
- ④同代表値
- ⑤理論値の誤差量

これらのスロットを前章で述べた「熟練作業者の持つ知識の概念単位」に当てはめると、解析知識はスロット②、経験知識はスロット④、処理機能知識は残りのスロットが対応する。後述するが「理論値の誤差量」や「経験的知識により推定される代表値の値」スロットは被削材や工作機械などの違いを判別する分類の仕方によって、内部構造を持つ場合がある。本知識表現形式ではこれを許すことにする。スロットが属性を表すと定義した場合、属性が内部構造を持つことは好ましくない⁶⁾ので問題は残るが、知識表現の柔軟性と作業設計レベルでの概念単位との整合性を重視することにする。後述するように本手法で有効な成果が得られるので実用的には差支えないと考える。フレームシステムの一般的な特徴は、複数のフレームがフレーム間の参照関係や階層関係によってスロット値を自動的に求めていく点にあるが、この点の応用については次報で詳述する。

ファジィ推論は人間の持つ曖昧ながらも的を得た主観的概念を表現するのに適した理論であり、既に被削材形状から定性的なびりやすさを評価するのに使われ有意義な成果が得られている⁷⁾。一般に同一設備、

同一作業者の場合工作機械やチャッキング等に関するパラメータはほぼ一定と考えられるので、解析的知識によって得られた理論値を補正するための代表値として作業者は被削材形状をとることが多い。被削材形状のうち、最も理論値に近い典型例と最も理論値から離れた、誤差最大の典型例との両典型例間の被削材形状特徴差をもとにして、両者の中間にある一般形状被削材の理論値誤差を推定する。両端の誤差は経験的、実験的に押さえられているため両者の中間の値が大きく狂うことは少ない。本報告では代表値および理論値誤差を判断する経験的な知識をファジィ推論でモデル化した。経験的に理論値誤差が判明している状況に現状がどれくらいの割合で類似しているのか、すなわち典型例に対する類似度の算出にファジィ推論を用いる。典型例を基本型と考え、各基本型ごとにファジィルールを作成した。ファジィルールは入力ファジィ変数と、対応する出力ファジィ変数を各ルール共通としてFORTRANで記述している。If-then形式で表されるファジィルールの条件部には各基本型の形状の特徴を表す項目を、また結論部には各基本型の類似度を設定する。条件部、及び結論部のメンバーシップ関数はそれぞれ5つのファジィ変数によって表した。条件部のメンバーシップ関数は形状の特徴を表す項目ごとに台集合の範囲を決定し、その範囲を5つの三角型ファジィ変数に機械的に分割することにし、結論部では類似度が0.0～1.0の範囲をとるようにした。適用したすべてのルールを総合判断して結論部のメンバーシップ関数を決定する。次式によって結論部のメンバーシップ関数の関心を計算して出力値が求められる。

$$\bar{u} = \int \mu_B(u) u du / \int \mu_B(u) du \quad (2)$$

他の基本型に対する類似度も同様に算出する。以上から、フレーム表現とファジィ推論の融合についてまとめる。まずびり限界算出知識フレームが起動し、予測値を算出する過程で、代表値スロットの呼び出しが行われたとき、ファジィ推論部へ移って類似度を計算する。計算された類似度を再びフレーム内に返し、予測値を算出する。適合するルールから結論部のメンバーシップ関数を決定する場合、各ルールで得られた適合度でメンバーシップ関数を縮小する方法があるが、本研究では結論部のメンバーシップ関数を適合度の高さにカットし、台形で表す方法を用いた。縮小する方法は出力値がなめらかに変化するという利点はあるが、システムが複雑になる。本研究ではシステムを可能な限り簡便に構築することを考えたため後者の方式を採用した。本研究に限れば両方式に大きな差はみられな

Fig.4 Prediction system of the limit of chatter vibration on two dimensional cutting

かった。

知識の概念単位を「作業設計に役立つ予測値を算出するための処理」という観点から本システム構成を示すと図4の破線枠の中になる。

4. ファジィ推論メンバーシップ関数の自動修正

ファジィ推論のメンバーシップ関数の決定には任意性があり、システムの一意性を損ねるため、本システムでは前述したように各基本型のメンバーシップ関数を実験値から機械的に決定することにした。それゆえ、予測を重ねることによって、メンバーシップ関数をより適したものに自動修正する機能を持つ学習システムを考えた。図5に格納庫法³⁾に基づいて開発した学習システムの概念を示す。学習部は予測値と実測値とを比較し、その誤差が大きい場合(失敗時)に起動してメンバーシップ関数の自動修正を行う。格納庫には学習過程における最善のメンバーシップ関数と成功回数を保存しておく。したがって学習システムの実行により格納庫の内容は更新されていく。学習に用いるサンプルデータは前もって行われる予備実験の結果を用いるか、実際の現場で得られる予測値と実測値を用いる。システムでは、まずあらかじめ機械的に決定したメンバーシップ関数をプログラム内に格納しておく。次いで学習を行うサンプルデータを選択し、その予測値を算出した後実測値と予測値との差あるいは比を求める。この時、誤差が例えば $\pm 10\%$ 以内で成功の場合はメンバーシップ関数は適切であるとみなし修正は行わない。 $\pm 10\%$ を越える失敗の場合にのみメンバーシップ関数の修正を行う。成功の場合はメンバーシップ関数とともに成功回数を記録し、その成功回数が格納庫に保存

Fig.5 Conception of learning system

されているメンバーシップ関数の成功回数より多くなった場合に新たにメンバーシップ関数を保存する。保存されている成功回数の方が多い場合にはメンバーシップ関数は更新されない。学習方法にはファジール自体を変更する方法も考えられるが、本研究ではメンバーシップ関数のみを修正する方法をとった。この理由は、当初「経験的知識によって推定される代表値」を熟練作業員から獲得してあれば、経験知識に予測値と実測値との間でルールを変更するほど大きな誤差が生ずることは少ないと考えたためである。むしろ絶対値の局所的な整合性を取る細かい修正が必要であろう。なおメンバーシップ関数の修正方法は、(a)平行移動、(b)底辺の長さを変える対称移動、(c)辺の長さを変える非対称移動が考えられるが、本システムでは簡単のため、(a)、(b)を下記の修正規則に従って行った。なおプログラム言語としては、全体のフレーム表現にPROLOGを、ファジィ推論部にはFORTRANを用いた。

修正規則

(a) 平行移動

誤差が -10% 以下、 10% 以上の場合を調べ、各タイプごとに条件部メンバーシップ関数を修正量 d_1 だけ移動する。

(b) 対称移動

ファジィ入力値とファジィ台集合の中間値の大小関係を調べ、各タイプごとに条件部メンバーシップ関数を修正量 d_2 だけ広げる(狭める)。

5. びびりの絶対安定境界の予測システム

5. 1 予測システムの略

旋削時に発生する再生びびり振動は、精度、切削能

Work: length 140-280 mm, diameter 30-60 mm

Cutting conditions: same as Fig. 2

Fig. 6 Classification of shape of workpiece

率、工具寿命などに悪影響を及ぼすため、多くの解析や実験的研究がなされている³⁾。主軸系やチャッキング特性、被削材系などの振動特性を精密に測定して安定限界を求める手法¹¹⁾もあるが、多品種少量生産や旋削加工中に被削材形状が大きく変化する場合にはこれらの測定は困難な場合が多く、手軽に再生びり振動の安定限界を予測する方法が現場では望まれている。本報告で対象とした旋削は、7-3黄銅の中実丸棒チャックワークで、溝入れ用の工具を使用した2次元旋削である。解析知識としては、式(1)を用いた、誤差補正の代表値は被削材形状としている。さて被削材形状が異なると理論値を補正する割合が異なる。藤村らによれば剛性は3つの基本型に分類される¹²⁾。グループテクノロジーの分類を参考に図6中の被削材の寸法を変えた14種類の被削材において実験を行った。その結果、びりりも同様に図6に示す3つの基本型に分類できることが分かった。同図で縦軸はびりり限界の実測値と理論値の比(誤差割合)、横軸は被削材の固有振動数を示す。Aタイプは主軸系に対して質量が付加的と考えられるもの、Bタイプはチャック部の直径が大きく剛性の高いもの、Cタイプは質量が被削材の先端部に集中しており典型的な1自由度系と考えられるものである。また一般形状の被削材は、これら3つの基本型の複合型として表現できる。

そこで、これを熟練者の経験知識とみなすことによって、図4の太線に示す再生びりりの安定限界を予測するシステムが構築された。誤差割合は各基本型ごとに固有に定まる値となる。一般形状の被削材のびりり限界は、振動パラメータ m , k , c の実測値を式(1)に代入して理論値を算出した後に、被削材形状が各基本型にどれくらいの割合で類似しているか(類似度)を式(2)のファジィ推論¹¹⁾で求め、誤差割合と類似度から式(3)により補正量を求める。そしてこの補正量を

Quantity of modification

$d_1 = (\text{boundary of fuzzy set})/24$

$d_2 = (\text{boundary of fuzzy set})/48$

Fig. 7 Effect of learning system

先の理論値に乘じた式(4)より予測値を算出する。本予測システムの動きはフレームのデーモンを起動することによって自動的に行われる。

$$Z = \frac{(W_A Z_A + W_B Z_B + W_C Z_C)}{W_A + W_B + W_C} \quad (3)$$

$$B^* = B \times Z \quad (4)$$

ただし W_i , Z_i は各々基本型 i への類似度と誤差割合、 Z は補正量、 B^* は予測値である。

5. 2 実験結果

式(1)で用いる振動パラメータ m , k , c の実測は、前述したように切削位置を加振したときの力と応答をデータレコーダにとった後、フーリエ変換器に入力し、周波数伝達関数を求めて算出した。加振にはインパルスハンマを、また応答検出には非接触変位計を用いた。被削材の振動方向は、実切削によるびりり振動発生中に x 方向と y 方向にセッティングした変位計のデータからびりり振動のリサージュ図形を求めて同定した。また理論値算出に用いる入力パラメータの値は、解析知識を使用する際に端末から入力するようにした。誤差割合は代表値に対応して求めた実測値と理論値との比から最小二乗法を用いて算出し、あらかじめフレーム内に登録しておく。ファジィ推論に用いる諸入力システム立ち上げ時に設定しておくものとした。なお類似度の算出に用いた特徴量は重心位置、直径両端比、全長、体積、チャック部の直径等である。

図7に、学習回数による予測成功率の変化を示す。予測成功率とは、学習に用いた被削材総数に対する、予測が成功した被削材総数の割合である。横軸は格納庫のメンバーシップ関数が更新された回数、縦軸は予測成功率を示す。Case 1は実験に用いた被削材すべてを対象とした場合、またCase 2は学習前の誤差が他の

Fig.8 Predictive result of the limit of chatter vibration

被削材に対して極端に大きな被削材を除いた場合の予測成功率を示している。先述したように、誤差が $\pm 10\%$ の範囲内の時に成功であるとみなすため、すべてのものがこの範囲に入り、成功率が常に100%になるという保障はない。しかし、常に学習前より学習後のほうが予測成功率が上昇することから、学習システムの有効性は示される。

図8に本システムを用いて行った一般形状の被削材のびびり限界予測結果の例を示す。基本型の確認および学習に用いたデータは図6に示したような直径変化しない被削材、あるいは2段階に直径が変化した被削材を使用して得られたものである。そこでここでは直径の変化が3段階に変化する被削材形状を例に予測を行った。図で横軸は切削速度、縦軸は切削幅を示している。いずれの被削材においても予測値は理論値よりも実測値に近い値として算出されている。このことより提案した知識表現が経験知識に基づいて解析結果を補正して実測値に近い予測値を自動的に算出していることが分かる。同様の知識処理の多い切削加工の作業設計において本知識表現形式の有用性が示されたとと思われる。

6. 結 論

- (1) 解析知識とこれを補正するための経験知識とを用いて切削加工の作業設計を行う場合の知識表現について、解析知識と経験知識とを融合した単位知識表現の形式を提案した。
- (2) この知識表現を用いるため、フレーム型の知識表現の枠組みを考案し、さらにファジィ推論のメンバーシップ関数の自動修正が可能となるシス

テムを作成した。

- (3) 本知識表現形式を用いて2次元旋削時の再生びびり安定限界予測システムを作成し、具体的にメンバーシップ関数の自動修正機能を確認するとともに、同予測システムから良好な結果が得られることを確認した。

謝 辞

本研究は中央大学大学院生、幾田周君（現NEC）の貢献によるものが大きい。記して感謝の意を表す。なお本研究は昭和62年度文部省科学研究費（一般C63550108）により行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 岩田一明：生産ソフトウェアの知識ベースシステム化，日本機械学会誌，88,795 (1985) 160.
- 2) K.Iwata&Y.Fukuda: Representation of Know-How and Its Application of Machining Reference Surface in Computer Aided Process Planning, Ann. CIRP,35,1, (1986) 321.
- 3) M.Inui&F.Kimura: Representation and Manipulation of Design and Manufacturing Processes by Data Dependency, Proc. IFIP-ICAD2, (1989).
- 4) Y.Ito,H.Shinno&S.Nakanishi: Designer's Thinking Pattern in the Basic Layout Design Procedure of Machine Tools Validity Evaluation of Thinking Block, Ann. CIRP,38,1, (1989) 141.
- 5) 井原 透：切削作業条件の選定における知識工学の利用，精密工学会誌，54,8 (1988) 1435.
- 6) S.Shlaer&S.J.Mellor: Object-Oriented Systems Analysis Modeling the World in Data, Prentice-Hall, New Jersey (1988).
- 7) 宅間正則，矢野章成，樋口誠宏：ファジィアルゴリズムを用いた加工ノウハウの獲得とそのモデル表現，精密工学会誌，55,7 (1989) 1211.
- 8) S.I.Gallant: Automated Generation of Expert Systems for Problems Involving Noise and Redundancy, AAAI Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence, July (1987) 212.
- 9) 丸井悦男，橋本正俊，加藤 仁：旋削バイトの再生びびり振動(第1報，突切り形バイトの場合)，日本機械学会論文集(C編)，55,510 (1989) 261.
- 10) 藤村善雄，安井武司：工作機械と生産システム，共立出版(1985) 30.
- 11) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社 (1988).