ファジィ回帰モデルによる最適研削条件の設定*

金 建 会^{*1}, 稲 崎 一 郎^{*2}Establishment of Optimum Grinding Conditions Utilizing
the Fuzzy Regression Model

Gun-hoi KIM and Ichiro INASAKI

This paper describes an expert system for grinding operations in order to establish the optimum grinding conditions, which satisfy the maximum removal rates, considering the constraints of grinding power, workpiece burn, chatter vibration, and surface roughness. Specialized knowledge of the grinding operations is acquired from the actual operation database. Coefficients in the experimental equations are obtained through the fuzzy regression model based on fuzzy set theory, and are stored in the actual operation database. The developed system is capable of determining the optimum grinding conditions, taking into account some problems, and practical examples of implementation are described.

Key Words: Grinding Expert System, Optimum Grinding Condition, Fuzzy Regression Model, Fuzzy Grade, Actual Operation Database

1. 緒 言

研削加工は高品質・高精度な加工を達成する上で有効な加工法である。しかし、要求される加工仕様を満足するような条件の設定と研削中に生ずるトラブルの対策を行なうことは非常に難しい。なぜなら、研削加工プロセスは数多くのパラメータによって構成されている上に、各パラメータの影響が定量的に十分には明らかにされていないためである。従って、現場では熟練者の経験や技能に多く依存しているのが実状である。

1970年以後、最適研削条件の設定に関する問題を定量的に解く試みがいくつかなされてきた⁽¹⁾⁻⁽²⁾。しかし、これらは通常の回帰分析を利用するデータの取り扱いが主であるため、研削加工のようにデータに標準偏差が大きい場合には実際の条件設定にあたって、問題が残る。このような問題には、ファジィ集合⁽³⁾に基づくファジィ回帰モデル⁽⁴⁾を用い、標準偏差の大きい研削データと研削加工システムの曖昧さをファジィ集合として取り扱うことによって、ある程度対応できると考えられる。

本研究では、円筒ブランチ研削を対象とし、要求される加工精度の達成とトラブルの回避を含め、ユーザが最適研削条件の設定ができる研削加工用エキスパートシステムをエンジニアリングワークステーション上に開発した。その中で、説明的知識を定量的に解析することを可

能とするため、実加工データベースを構成した。このデータベースは、ファジィ回帰モデルを基本としており、ユーザの意志決定にある程度の自由度を持たせるようにした。本報では、特に実加工データベースの構成と条件設定の手順について述べる。

2. 実加工データベースの構成

数多くの情報提供機能を持つ加工データファイルを作成しておけば、原理的には最適研削条件の設定が可能となる。しかし、このような目的に対して従来の回帰分析は必ずしも有効でない。なぜなら、研削加工はデータの標準偏差が大きく、各パラメータの相互関係も曖昧な場合が多いからである。

従って、本システムでは、研削プロセスの曖昧さと標準偏差の大きい研削データに対応させるためにファジィ回帰モデルを適用し、求められた定数と係数を実加工データベースに蓄積、利用するように設計した。

2・1 実加工データベースの構造 実加工データベースには、研削試験より得られたデータを研削条件によって細かく分類し、フレーム知識として格納した。例えば図1のように、研削結果フレームと研削条件設定に要する各知識フレームとの間を結んだ関連フレーム(Related class)とエンティティフレーム(Entity class)によって、研削データを管理するようにした。

研削条件フレーム(Grinding condition)のクラスは粗研削条件(Rough grinding)と精研削条件(Fine grinding)のサブクラスに分類されている。その下に工作物周速度、切り

* 平成4年4月1日 第69期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成4年7月23日。

^{*1} 正員、應応義塾大学大学院。

^{*2} 正員、應応義塾大学理工学部(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

図1 実加工データベースの構造

込み深さ、砥石周速度等がインスタンスとして構成されている。これらの条件は、拘束条件である研削動力、研削温度、研削びり、仕上面粗さを考慮して選択される。

このように、研削条件設定に要する知識は本システムでは階層的構造を持つフレームとなっている。

2・2 ファジィ回帰モデルの導入 ファジィ回帰モデル⁽⁴⁾では、曖昧さを持つ定数と係数によって入出力データを関係づけることが可能で、条件設定に幅を持たせることができる。このため、使用者がデータの信頼性を考慮に入れて条件設定ができる。

本研究では、ファジィ回帰モデルを用いて、得られた入出力データの曖昧さを反映した定数と係数を持つファジィ線形関数を求め、実加工データベースのデータファイルとして利用することにした。

ファジィ線形回帰モデルでは、線形モデルと実際のデータとの不整合性は線形関数の定数と係数の曖昧さに依存しているとみなしている。すなわち、ファジィ線形関数を

$$Y_i = A_0 + A_1 x_{i1} + \dots + A_n x_{in} \quad i=0, \dots, M \quad (1)$$

と表したときに、 A_0 は定数を意味し、 A_i は対称なファジィ $(\alpha_i, c_i)_L$ の係数を意味する。定数と係数 A_i はファジィ数であり、そのメンバシップ関数を対称三角形とすると

$$\mu_{A_i}(a_i) = \max\{1 - |a_i - \alpha_i| / c_i, 0\} \quad i=0, \dots, n \quad (2)$$

となる。 $c_i=0$ のときは、ファジィ定数と係数 A_i は通常の係数 α_i と一致する。ここで、ファジィ定数と係数 A_i は $A_i = (\alpha_i, c_i)$ とする。但し、 α_i はファジィ定数と係数 A_i の中心値を表し、 c_i は幅を表す。

ファジィ線形回帰モデルの決定は、ファジィモデルの曖昧さを表す定数と係数の幅を、ある拘束条件のもとに最小にするファジィ定数と係数 $A = (\alpha, c)$ を求めることに帰着される。すなわち、ファジィグレード k が与えられ

た場合の線形計画問題になる。つまり、

$$\min S = C_0 + \dots + C_n \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_i &\leq \alpha' x_i + (1-k) c_i |x_{ij}| \\ -y_i &\leq -\alpha' x_i + (1-k) c_i |x_{ij}| \\ c_i &\geq 0, i=0, \dots, N; j=0, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

として表せる。ここで、 y_i は推定データの従属変数、 x_i は独立変数であり、 t は転置を表す。

図2 ファジィ回帰モデルによって求めた仕上げ面粗さの回帰式

図2は加工物速度0.16m/sに対してファジィ回帰モデルによって求めた仕上げ面粗さ回帰式である。図2のように、工作物周速度と切込み深さの定数と係数の中心値と幅を求めて加工条件設定に利用する。

図3は通常の回帰分析とファジィ回帰モデルとの推定区間を比較したものである。独立変数の中央値 m を0.5, 2, 4, 6とし、従属変数の標準偏差 σ を1.85として、正規乱数を発生させ、データ数(自由度) $n=60$ までランダムデータを作って数値計算より求めたものである。図3の(a)は通常の回帰方法で信頼区間を t -分布によって求めたものであり、(b)はファジィ線形回帰モデルによって求めた推定区間である。通常の回帰分析では、区間推定において独立変数の区間値に関わらず、同じ幅の推定値として設定され、また、図中のA,B部分のようなデータは外される。しかしファジィ回帰モデルは、大きな標準偏差のあるデータに対しても効率よく対応できるばかりでなく、A,B部分のような離れたデータも考慮される。

2・3 ファジィグレードについて ファジィグレード k は評価関数(式3)と拘束条件(式4)に影響を及ぼす。すなわち、 k の設定($0 \leq k < 1$)によって加工条件が大きく異なってくる。図4はファジィグレードと推定区間 S (式3)との関係を表したものである。ファジィグレード k が低いレベルではファジィ回帰モデルの推定区間 S は小さいが、 k が大きくなると推定区間は指数関

数的に大きくなる。図中の α はファジィ回帰モデルの推定区間の中心値であり、 S_0 はファジィグレード $k=0$ であるときの推定区間の幅を表す。

図3 通常回帰モデルとファジィ回帰モデルの推定区間比較

このようにファジィグレードによって設定される研削条件が大きく左右されるので、 k の設定においては、データの質とデータの数を考慮しなければならない。

図4 ファジィグレードが設定区間 S に及ぼす影響

図5はファジィ回帰モデルを利用する際に使われるファジィグレード k の設定値を求めるため、データの数とデータの質(標準偏差の大きさ)に対するシミュレーションを行なったものである。シミュレーション方法は図3の場合と同じ方法で、データの数(自由度) $n=5, 10, 20, 40, 60$ に対して求めたものである。図5のように標準偏差(σ_{Rmax})によって推定区間の増加率は、データの標準偏差とデータの数によって異なる。標準偏差(σ_{Rmax})が1.2以下、1.2~1.5、1.5以上によって推定区間幅の増加率が

大きく異なる。なお、データ数によってもファジィ回帰モデルによって求めた推定区間の幅が異なる。従って、設定される研削条件は図4で説明したようにファジィグレード k によって大きく左右されるので、条件設定に当たってはデータの質(標準偏差)と数を考慮しなければならない。これらを考慮してファジィグレード k の設定値を通常の95%信頼区間で当て嵌まるような推定区間に比較してまとめたのが図6である。

図5 データ数及び標準偏差と推定区間 Y の関係

図6に示したようにファジィグレードの設定値は、通常は $k=0.55$ 以下で十分であり、標準偏差 σ_{Rmax} が1.2以下ならばファジィグレード k は0~0.55、標準偏差 σ_{Rmax} が1.2~1.5の範囲ならばファジィグレード k は0~0.5、標準偏差 σ_{Rmax} が1.5以上ならばファジィグレード k は0~0.2が目安となる。そしてデータ数が50個以上ならばデータの質には関わらず、 $k=0$ としても構わないと思われる。

なお、本研究で対象とした研削加工条件範囲での粗さデータの標準偏差も本シミュレーションで用いた0.5~2.4以内であることを確認した。

図6 データ数及び標準偏差とファジィグレードの推奨値

3. 最適研削条件の設定方法

本研究では、加工物材質、要求仕上面粗さが与えられたとき、研削焼けやびびりを回避するという拘束条件の下で、仕上げ面粗さを満足しながら、加工能率を最大にする粗研削条件、精研削条件及び各工程での取り代の設定を支援するシステムの構築を行なった。

最適研削条件の初期設定は実加工データベースより行なわれる。最適条件設定の流れは図7のように、まず、実加工データベース(AODB)を探索し、要求される前件部がマッチングすれば、それらの条件を取り出して設定する。

図7 最適研削条件の設定流れ

しかし、前件部とのマッチングができない場合には、既存知識ベース(GKB)⁽⁵⁾を用いて条件の設定をする。既存知識ベースは、条件設定に当たって必要となる知識を諸論文と専門書より獲得し、本システムで定義されたsend関数によって当該フレームにメッセージを送るという手続き型のLISP関数とルール知識の形でフレームとして納められているデータベースである。本システムの手続き関数の形式は、

(send 当該フレーム名 メソッド名 メッセージ)
となる。

最適研削条件の設定に用いるファジィ回帰モデルでは、拘束条件を線形化しなければならない。従って、使われるデータを対数化してファジィ回帰モデルを作り、その定数と係数を加工条件の設定に利用することにした。

3・1 拘束条件モデル 研削動力モデルは、研削盤にはそれぞれ許容最大動力の制限があり、その拘束条件の内では加工作業を行なわなければならない。特に、粗研削においては、加工能率を最大にするため、許容最大

動力で加工を実行するのが望ましい。研削作業条件の中で、砥石とドレッシング条件が決定されていると仮定し、加工条件のパラメータのみを決定する場合を考える。砥石周速度を一定であるとした場合、単位幅当たりの研削動力 P_r' は一般に

$$P_r' = A_{0p} \cdot V_w^{A_{1p}} \cdot h^{A_{2p}}$$

$$A_{ip} = (\alpha_{ip}, c_{ip}), i=0, 1, 2 \dots \dots \dots (5)$$

と表せる。式(5)を対数の形に書き直して、ファジィ線形回帰モデルで表すと

$$\log P_r' = A'_{0p} + A_{1p} \log V_w + A_{2p} \log h$$

$$A'_{0p} = \log A_{0p} \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここで、 V_w は工作物周速度、 h は切込み深さであり、 A_p は研削動力をファジィ回帰モデルで表現する際の定数と係数を表し、 α_p, c_p はその中心値と幅を表す。

仕上げ面粗さに関する研究⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾は古くから数多く行なわれているが、本研究での仕上げ面粗さモデルは、同様に次式を用いた。

$$\log R_{max} = B'_{0s} + B_{1s} \log V_w + B_{2s} \log h$$

$$B'_{0s} = \log B_{0s} \dots \dots \dots (7)$$

となる。ここで、 B_{is} はファジィ回帰モデルの定数と係数を表し、 α_{is}, c_{is} はその中心値と幅を表す。

図8 等仕上げ面粗さ曲線

一方、加工能率を最大にするためには、要求される仕上げ面粗さを満足する粗さ曲線上の加工条件の中で、 h と V_w をできるだけ大きな値に設定する必要がある。円筒ブランチ研削において、仕上面粗さが一定になる加工条件(切込み深さと工作物周速度)をモデル式(7)を用いて求

めると、図8の曲線 R_1, R_2, R_3, R_4 のようになった。しかし図に示してあるように、切込み深さがある限界値を越える(図の点線領域)と、粗さは急激に粗くなって図8は適用できなくなる。加工条件の設定において、この限界を考慮しなければならない。このような結果は小野⁽⁹⁾によっても報告されている。

研削焼けは研削中の工作物表面の最高温度がある一定値を越えると発生すると考えられる。このような考えに基づき、河村⁽¹⁰⁾は研削焼け発生モデル式を提案した。河村が提案した式を研削動力を用いて表現すると、円筒プランジ研削においては、次のようになる。

$$\theta_m = 2.4 \times 10^{-3} R_w \cdot \frac{(K_w)^{0.5}}{k_w} \cdot \frac{P_r}{B} \cdot V_w^{-0.5} \cdot l_c^{-0.5}$$

$$l_c = \sqrt{h \cdot \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right)} \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 θ_m は砥石と工作物の接触面の最高温度、 R_w は工作物への熱の流入割合、 l_c は砥石と工作物との接触長さ、 P_r は研削動力、 k_w は工作物の熱伝導率、 B は研削幅、 K_w は工作物の温度伝導率、 D は砥石直径、 d は工作物直径である。なお、工作物の種類によって研削焼けの発生温度が異なるので、焼けの発生温度を θ_b とすると、焼け発生温度の条件は次のようになる。

$$\theta_b \geq \theta_m \quad \dots \dots \dots (9)$$

同様に研削焼けモデルをファジィ線形回帰モデルで表すと

$$\log \theta_b = D'_{0b} + D_{1b} \log V_w + D_{2b} \log h$$

$$D'_{0b} = \log D_{0b} \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。ここで、 D_{1b} はファジィ回帰モデルの定数と係数を表し、 a_{1b}, c_{1b} はその中心値と幅を表す。

研削びりりの発生限界モデルは、研削びりりに関する研究も多く行なわれているが、その中でも稲崎ら⁽¹¹⁾は実用的なびりり発生限界式を提案した。提案された式は、

$$V_w = K \cdot B^{p-1} \cdot h^{p/2}$$

$$K = C_1 / C_2 \cdot K_m \cdot V_g \cdot \{(C_1 \cdot \omega_0 \cdot R_g) / (K_m \cdot V_g)\}^p$$

$$R_g = (D \cdot d / (D+d)) \quad \dots \dots \dots (11)$$

であり、工作物速度 V_w が上記の値以上になるとびりり振動が発生する。式(11)において、 K_m は機械系の等価剛性、 ω_0 は機械系の固有角振動数、定数 C_1, C_2 と指数 p は実験的に求められ、一般的に $p \geq 1$ である。

式(11)で与えられた研削びりり安定限界を他の拘束条件式モデルと同じ形式で表現するため、同様にファジィ線形回帰モデルで表すと

$$\log B = E'_{0c} + E_{1c} \log V_w + E_{2c} \log h$$

$$E'_{0c} = \log E_{0c} \quad \dots \dots \dots (12)$$

となる。ここで、 E_{1c} はファジィ回帰モデルの定数と係数

を表し、 a_{1c}, c_{1c} はその中心値と幅を表す。

3・2 取り代の設定 研削時間は粗研削工程と精研削工程の取り代の配分によって大きく左右される。本システムでは、与えられた総取り代の中で、研削時間を短くするために粗研削工程の取り代をできるだけ大きく設定し、精研削工程では、要求された仕上げ面粗さを満足するような研削条件で加工するようにした。従って、与えられた要求仕上げ面粗さを $R_{max}(U)$ 、粗研削工程の切込み深さを h_R 、粗研削での取り代を R_r 、精研削での取り代を R_f 、与えられた工作物の半径を R_w 、目標とする工作物の仕上げ半径を R_s とすると次のような各工程での取り代の設定が可能となる。

$$R_{max}(U) \leq h_R \text{ の場合,}$$

$$R_r = R_{r,w} - R_s - R_f \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$R_f = h_R \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$R_{max}(U) > h_R \text{ の場合,}$$

$$R_r = R_{r,w} - R_s \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$R_f = 0 \quad \dots \dots \dots (16)$$

3・3 最適研削条件の設定方法 実加工データベースを用いて最適研削条件を設定するためには、3.1節の拘束条件をファジィ回帰モデルで計算し、その定数と係数を求めなければならない。表1は条件設定に用いる拘束条件の定数と係数を示したものである。

表1 ファジィ回帰モデルによって求めた拘束条件の定数と係数

Experimental Conditions:						
Wheel=WA60ImV; Workpiece=SUJ2						
Wheel velocity, $V_g=31.6$ m/s						
Dressing lead, $f_d=0.2$ mm/rev						
Dressing depth of cut, $t_d=0.02$ mm						
Wheel width, $B=38$ mm; Lubricant: Soluble type						
Grinding power						
Fuzzy Grade (k)	A0p		A1p		A2p	
	Center	Width	Center	Width	Center	Width
0						
0.2	1.74	0.38	0.10	0.01	0.36	0.04
0.5		0.76		0.013		0.05
				0.02		0.08
Surface roughness						
Fuzzy Grade (k)	B0s		B1s		B2s	
	Center	Width	Center	Width	Center	Width
0						
0.2	0.78	0.32	0.14	0.01	0.34	0.03
0.5		0.64		0.013		0.04
				0.02		0.06
Grinding temperature						
Fuzzy Grade (k)	D0b		D1b		D2b	
	Center	Width	Center	Width	Center	Width
0						
0.2	2.29	0.83	0.37	0.07	0.62	0.11
0.5		1.65		0.08		0.14
				0.13		0.21
Chatter vibration						
Fuzzy Grade (k)	E0c		E1c		E2c	
	Center	Width	Center	Width	Center	Width
0						
0.2	1.54	0.23	0.43	0.03	0.38	0.02
0.5		0.46		0.04		0.03
				0.06		0.04

表2 最適研削条件の設定方法

Grinding Wheel=WA60ImV; Workpiece=SUJ2 Dressing lead, $f_d=0.2\text{mm/rev}$; Dressing depth of cut, $t_d=0.02\text{mm}$ Lubricant: Soluble type; Wheel width, $B=38\text{mm}$ Permissible maximum power= 3.7kW ; Burning temperature, $\theta_b=500^\circ\text{C}$ Required surface roughness= $5\mu\text{m}$; Fuzzy grade, $k=0.5$		
Objective; Maximize[Material removal rate; $Z'=B \cdot V_w \cdot h/B(\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s})$] h : Depth of cut($\mu\text{m/rev}$), V_w : Workpiece velocity(m/s)		
Subject to;		
	Rough grinding	Fine grinding
Grinding power	$0.44\log h + 0.1\log V_w \leq 0.4$	$0.4\log h + 0.16\log V_w \geq 0.15$
Confidence limit for surface roughness		
Temperature	$0.83\log h + 0.5\log V_w \leq 0.6$	$0.83\log h + 0.5\log V_w \leq 0.6$
Chatter vibration	$0.42\log h + 0.49\log V_w \geq 0.3$	$0.42\log h + 0.49\log V_w \geq 0.3$
Upper depth of cut	$\log h \leq 1.0$	
Surface roughness	$\log h + 1.94\log V_w \leq 2.4$	$\log h + 1.94\log V_w \leq 2.4$

図9は、要求された仕上面粗さを満足しながら加工能率を最大にする精研削条件の切込み深さと工作物周速度の探索結果を示したものである。例えば、要求仕上面粗さが $5\mu\text{m}$ ならば、図9のEGHMが研削条件設定の可能領域となる。その中で仕上げ面粗さを満足しながら加工能率を最大にする h と V_w を探索した結果、初期精研削の最適条件として S_5 ($k=0.5$ の場合)、すなわち、工作物周速度 V_w は 0.14m/s 、切込み深さは $2.1\mu\text{m/rev}$ が設定される。表2は図9に示した要求仕上げ面粗さが $5\mu\text{m}$ であるときに、条件設定をシンプレックス法で求める際の式を示したものである。

4. ファジーグレードを考慮した条件設定例

図10において、加工能率を最大にする粗研削条件の設定で、ファジーグレードを $k=0$ とすると、加工能率は高くなる研削条件 B_1 ($V_w=0.45\text{m/s}$, $h=7.9\mu\text{m/rev}$)に設定されるが、設定に対する信頼度は落ちる。反面、 $k=0.5$ とすると加工能率が落ちる研削条件 B_3 ($V_w=0.36\text{m/s}$, $h=6.4\mu\text{m/rev}$)となるが、設定に対する信頼度は高くなる。例えばデータの標準偏差、 σ_{max} が1.2以下でデータの数、 n が10個以下であれば、図6でファジーグレード $k=0.5$ であるから、最適粗研削条件は B_3 となるが、 σ_{max} が1.5以上で n が20個以上であれば、ファジーグレード $k=0$ で B_1 が設定される。

図9 精研削条件の探索

図10 ファジーグレードによる設定値の変化

図11は粗研削条件と精研削条件を提案したモデルより設定した例である。図11に示したように加工能率はファジィグレードkによって大きく異なる。

なお、表3は 図11に示した同一の条件でファジィ回帰モデルと通常回帰法によって求められた加工条件と加工能率の差を示したものである。加工条件を設定する場合、与られたデータの数と質(標準偏差)を考慮する。今回用いられたデータの数(自由度)は18~30、標準偏差は1.21~2.39であるため、2.3節で提案した図6のファジィグレードを目安とすると、 $k=0.2$ となる。ファジィグレードから設定される加工条件は使われたデータを満たすように考慮するため、従来の回帰モデルの信頼区間95%との比較になる。従って、ファジィ回帰モデルのファジィグレード $k=0.2$ で設定された加工能率と比較すると、ファジィ回帰モデルによって設定された加工能率の方が20~35%程度高いことになる。しかし、この差はデータの質(標準偏差)によって異なる。

このように本システムは、ファジィグレードの導入によってユーザがデータの信頼度を考慮して研削条件の設定を行なえる条件設定方法となっている。

図11 提案したモデルによる条件設定の例

表3 ファジィ回帰モデルと通常回帰法によって求められた加工能率の差

standard deviations, $\sigma_{Rmax}=1.21\sim2.39$ degree of freedom, $n=18\sim30$		k : fuzzy grade, c.i: confidence interval Z : material removal rates per unit grinding width	
Fuzzy regression model		Conventional regression model	
	Rough grinding (h/Vw/Z')	Fine grinding (h/Vw/Z')	
k=0	7.9/0.45/3.56	2.8/0.16/0.45	c.i=50%
k=0.2	7.1/0.43/3.05	2.3/0.14/0.32	c.i=80%
k=0.5	6.4/0.36/2.30	2.1/0.14/0.30	c.i=95%
	Rough grinding (h/Vw/Z')	Fine grinding (h/Vw/Z')	
k=0	8.1/0.41/3.32	2.9/0.16/0.46	
k=0.2	6.2/0.43/2.67	2.0/0.13/0.26	
k=0.5	5.6/0.44/2.45	1.9/0.12/0.23	

5. 結 論

本研究では、研削加工用エキスパートシステムの一部分として最適研削条件設定を行なうための実加工データベースを設計した。

(1) 研削加工システムの曖昧さと研削データのばらつきを考慮し、ファジィ回帰モデルによるデータの収納方法を考案した。

(2) 材料除去能率を最大とする最適研削条件を設定するための、トラブルの回避も含めた条件探索方法を可能にした。

(3) ファジィグレードの導入により、ユーザがデータの信頼度を考慮して研削条件の設定を行なえるようになっているのが本システムの特徴である。

参 考 文 献

- (1) J.Peters, ほか2名, The Proper Selection of Grinding Conditions in Cylindrical Plunge Grinding, CIRP Annals, (1976), pp.387-393
- (2) G.Amitay, ほか2名, Adaptive Control Optimization of Grinding, Trans. ASME, Ser. B, Vol.103, (1981), pp.103-108
- (3) L.A.Zadeh, The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert System, Fuzzy Sets and System, Vol. 11, (1983), pp.199-227
- (4) H.Tanaka, ほか2名, Linear Regression Analysis with Fuzzy Model, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-12, (1982), pp.903-907
- (5) G.Kim, ほか2名, Development of Expert System for Grinding Operations, JSME, Int. Conf., Manufacturing Systems and Environment, Japan, (1990), pp.395-400
- (6) 中山・M.C.Shaw, 研削仕上げ面あらさに関する研究, 日本機械学会(C), Vol.37, No.293, (1971), pp.178-183
- (7) S.M.Pandit, ほか2名, Mathematical Method of a Ground Surface Profile with the Grinding Process as a Feedback System, Wear, Vol.39, (1976), pp.205-217
- (8) 松井, 研削仕上げ面あらさに関する一考察, 精密機械, Vol.41, No.6, (1975), pp.572-577
- (9) 小野, 研削仕上げ, (1962), p.104, 慎書店
- (10) 河村・ほか2名, 研削焼けの基礎的研究, 精密機械, Vol.45, No.1, (1979), pp.83-88
- (11) 稲崎・ほか3名, 円筒プランジ研削におけるびりり発生限界, 精密機械, Vol.46, No.2, (1980), pp.201-206