工作機械加工特性を考慮した自律型作業設計*

松 村 隆** 関 口 洋 明*** 白 井 英 治**

Autonomous Operation Planning with Evaluating Machine Tool Characteristics

Takashi MATSUMURA, Hiroaki SEKIGUCHI and Eiji USUI

Machine tool characteristics such as machine vibration and stiffness have a large influence on cutting processes. Cutting processes, therefore, are dependent on machine tool characteristics as well as the characteristics of cutting tool and workpiece. This paper describes autonomous operation planning that can optimize cutting operation with evaluating machine tool characteristics. Machine tool characteristics that have an effect on tool wear and surface finish are evaluated by adaptive prediction. Adaptive prediction, which can predict cutting processes by analysis and neural network, evaluates the characteristics with the parameters used for the predictions. Adaptive prediction is carried out exclusively on two machine tools, and then it enables us to recognize the difference of machine tool characteristics. Autonomous operation planning with adaptive prediction allows us to determine optimum cutting conditions for each machine tool. This leads to the reasonable usage of machine tool in shop floor. It is shown that machining scheduling with autonomous operation planning is efficient in the assignment of six jobs to two machine tools.

Key words: machine tool, operation planning, scheduling, tool wear, surface finish

1. ま え が き

一般に機械加工では工具、被削材、切削条件が同じであっても、工作機械によって切削状態が異なることが知られている^{1)~3)}。したがって種々の作業に対して効率的に加工を行うためには、工作機械の特性を考慮した切削条件や工具の選定が重要となる。この場合工作機械の特性としては、動力や運動精度などの機械仕様だけでなく、機械の剛性や振動特性などの切削状態に影響を及ぼす因子についても考えなければならない。さらにこれらの特性は、たとえ同じ工作機械であっても使用年月やそれまでに実施した作業履歴によって異なる。したがって一つの作業に対し、ある工作機械上で最適な切削条件が、他の工作機械上でも最適であるとは限らない。そこで各々の工作機械を効率良く運用するために、工作機械の構造や使用経歴などが切削状態に対して及ぼす影響を具体的なデータとして示す必要がある。しかしながら現在のところ、各切削条件に対しこれら进行评估するための簡便で有効な手法はなく、同一作業条件で各工作機械上で切削試験を実施し、その結果を比較するといった断片的な評価にとどまっている。そのため作業設計に関し、これまでに数多くの研究成果が報告されているものの⁴⁾⁵⁾、工作機械の違いが最適切削条件に及ぼす影響を考慮したものではなく、これがそれらの実用化を妨げているものと思われる。

本研究は工作機械の剛性や振動特性などを直接評価するのではなく、二、三の切削状態から工作機械の特性を把握し、これを作業設計やスケジューリングに利用するものである。本報では工作機械が切削状態に及ぼす影響を工作機械加工特性として、これを考慮できる自律型作業設計⁶⁾について論じる。この自律型作業設計では工具、被削材、工作機械の加工特性を適応予測によって獲得する。ここでは、対象とする作業を外周長手旋削作業に限定し、2台のNC旋盤上で得られた幾つかの加工事例データに対して別々に適応予測を行い、これにより工作機械

の加工特性の違いが識別できることを示す。ついでこれらの結果に基づいて作業設計を実施し、同一の作業でも工作機械によって最適切削条件が異なることを示す。最後に自律型作業設計を簡単なスケジューリング問題に適用し、工作機械の違いを考慮することの有効性を示す。

2. 自律型作業設計

自律型作業設計は、各工作機械ごとに作業設計を実施することを前提とし、図1に示す適応予測によって切削状態を予測しながら、与えられた作業の生産性や経済性等を評価して、最適な切削作業を計画する設計戦略である。適応予測では、切削理論に基づく解析アルゴリズムと、加工事例を学習したニューラルネットワーク⁷⁾によって切削状態を予測する。予測には、工具や被削材の加工特性値や、切削状態と各切削諸量との関係を与えるネットワークの結合係数などが必要である。これらの基礎データは、予測した切削状態が実作業で得られたものと一致するように、予測誤差を最小化し獲得される。得られた基礎データは、その作業の工具、被削材、工作機械の加工特性を含んだものであり、一度これらが得られれば、関連する多くの作業の切削状態を予測できる。さらに加工事例データが得られるたびに適応予測を繰り返すことにより、予測精度が向上する。また最新の加工事例データについて適応予測を行い、基礎データを更新することで、年々向上する工具の耐損傷特性と被削材の被削性、使用経歴に応じて変化する工作機械の加工特性に適応した予測ができる。自律型作業設計では加工事例データさえあれば、このような基礎データの適応が自律的に行われ、加工を実施する時点で最も適切な作業を計画できるのである。

図2は以後の議論で扱う適応予測における予測システムであり、工具摩耗として逃げ面摩耗と境界摩耗を、仕上げ面粗さとして最大高さ粗さを予測する。ただし被削材と工具の剛性は十分とし、びびり振動等による仕上げ面の悪化については考慮しないものとする。

* 原稿受付 平成7年8月30日

** 正会員 東京電機大学工学部 (東京都千代田区神田錦町2-2)

*** 正会員 セイコー精機(株) (習志野市屋敷4-3-1)

Fig. 1 Adaptive prediction

2.1 工具逃げ面摩耗の適応予測

切削時間 T に対する工具逃げ面摩耗幅 $V_B(T)$ は、工具摩耗速度 dV_B/dT とともに以下の式で予測される⁸⁾。

$$V_B(T) = V_{B0} + \int_0^T (dV_B/dT) dT \quad (1)$$

$$dV_B/dT = C \cdot V \cdot \sigma_f \exp(-\lambda / \theta_f) / \tan \gamma_s \quad (2)$$

ただし V は切削速度、 γ_s は逃げ角である。 σ_f と θ_f は摩耗痕上の垂直応力と温度であり、これらは切削力と切削温度の解析計算より得る。 C と λ は摩耗特性定数、 V_{B0} は初期逃げ面摩耗補正量であり、適応予測では次式の摩耗速度と摩耗幅の2乗誤差を最小化して得ることができる⁹⁾。

$$E_1 = \sum_{i=1}^m \left\{ \left(\frac{dV_B}{dT} \right)_{\text{prac},i} - C \cdot \sigma_{f,i} \cdot \exp \left(-\frac{\lambda}{\theta_{f,i}} \right) \cdot \frac{V}{\tan \gamma_s} \right\}^2 \quad (3)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^m \left\{ V_{B,\text{prac},i} - \left(V_{B0} + \int_0^{T_i} \left(\frac{dV_B}{dT} \right)_i dT \right) \right\}^2 \quad (4)$$

ただし添え字 prac,i は i 番目の実際の値を示す。

この予測手法では、式(2)により任意の切削条件と工具形状に対して摩耗速度を予測できるため、定数 C と λ は被削材と工具の組合せについて獲得される。一方初期逃げ面摩耗は、切削条件、工具、被削材によって異なり、またそれらの関係を数理モ

デルで表現できないため、得られた補正量 V_{B0} をニューラルネットワークに学習させる。ネットワークは、被削材と工具材質の組合せごとに構成し、切削条件と工具形状の入力に対し、初期摩耗補正量 V_{B0} を出力する。

2.2 仕上げ面粗さ、境界摩耗の適応予測

仕上げ面粗さと境界摩耗については、理論に基づいた解析的な予測ができないため、ニューラルネットワークによってこれらを予測する⁸⁾。すなわち実施しようとする作業での仕上げ面粗さや境界摩耗を、過去に得られた類似の作業や切削状態から連想する。予測にはネットワークにおける各ユニット間の結合係数が必要であり、これらをバックプロパゲーション法⁷⁾によって学習する。この予測法は学習のための事例データが少ない場合には有効ではないが、ある程度の事例を学習することにより精度の良い予測ができる。

仕上げ面粗さ予測のニューラルネットワークに入力する情報とその代表値を以下に示す。

- ①切削速度
- ②工具と被削材の溶着性：すくい面に付着する鋼の量として、同一の切削条件で切削した工具と被削材の組合せに対し、EPMAの線分析で測定したFe-K α の強度で評価する。
- ③切りくずの不連続性：せん断ひずみの増加に伴い、切りくずが流れ型からせん断型に変化することを考慮し、切りくずのせん断ひずみで評価する。ただし切りくずのせん断ひずみは、切削力予測で得られる有効せん断角、有効すくい角から計算できる。
- ④構成刃先の生成：構成刃先の生成は、切れ刃近傍の温度と関係があるため、刃先から切削厚さまでのすくい面温度の平均値で評価する。
- ⑤逃げ面摩耗幅：被削材と逃げ面の接触による仕上げ面の荒れを、前項で予測される逃げ面摩耗幅で評価する。
- ⑥理論仕上げ面粗さ R_{th} ：Šolajaによって提案された式¹⁰⁾を次式で近似して評価する。

$$R_{th} = f^2 / 8R + (V_S - V_B') \tan \gamma_b \quad (f < 2R \sin C_e) \quad (5)$$

Fig. 2 Prediction of tool wear and surface roughness

Table 1 Machine tool data

		Lathe A	Lathe B
Maximum size			
Machining diameter	mm	φ180	φ210
Machining length	mm	280	600
Spindle			
Power	kW	AC5.5	AC7.5
Revolution	rpm	112-4500	20-3600
Weight	kgf	2300	3200
Age	years	3	9

Fig. 3 Flank wear predicted after adaptation
Cutting conditions: material cut, 0.45% carbon steel; tool, carbide P20(-5,-5,5,5,15,15,0.8); cutting speed, 200m/min; depth of cut, 1.0mm; feed rate, 0.2mm/rev; lubrication, dry.

ただし f は送り, R , γ_b , C_e はそれぞれ工具のノーズ半径, 前切れ刃の逃げ角と切れ刃角, V_s と V'_b は前切れ刃の境界摩耗と逃げ面摩耗の大きさである。ただし逃げ面摩耗幅 V'_b は横切れ刃のそれと等しいと仮定し, 前項の予測値を利用する。一方境界摩耗については, 別のニューラルネットワークによって予測する⁸⁾。ネットワークは, 被削材と工具材質との組合せごとに構成し, 入力に切削条件, 工具形状, 時刻 T における境界摩耗 $V_s(T)$ とし, 出力はその時刻 T での境界摩耗速度 (dV_s/dT) とする。したがって時刻 $T+dT$ での境界摩耗 $V_s(T+dT)$ は以下の式で計算し, その結果を時刻 $T+dT$ 後の予測に利用する。

$$V_s(T+dT) = V_s(T) + (dV_s/dT) \cdot dT \quad (6)$$

以上のように仕上げ面粗さは, 工具の逃げ面摩耗と境界摩耗の予測値に基づいて時間的推移を予測することができるため, 後述のように仕上げ面粗さの悪化によって工具交換をしなければならない場合も評価できる。

3. 適応予測による工作機械加工特性の評価

工作機械の違いによる加工特性の影響を調べるために, 同一の被削材と工具の組合せに対し, 表1の2台のNC旋盤上で得られた実加工データについて適応予測を行う。ここでは切削速度は[100m/min, 300m/min], 送りは[0.10mm/rev, 0.20mm/rev]の範囲で, 6条件の加工データについて適応予測を実施した。適応予測は各旋盤で独立に行い, 前述の摩耗特性定数と, 初期摩耗補正量, 境界摩耗, 仕上げ面粗さのネットワークの結合係数を得る。したがって得られた基礎データは, 各工作機械上で加工した結果に適応しているから, 工作機械の加工特性を陰に含んだものとなる。

2台の旋盤で得られた逃げ面摩耗過程の一例を図3に示す。

(a) Lathe A

(b) Lathe B

Fig. 4 Initial wear offset adapted
Cutting conditions are same as in Fig. 3, where cutting speed and feed rate are variable.

(a) Lathe A

(b) Lathe B

Fig. 5 Flank wear predicted at 10 minutes cutting
Cutting conditions are same as in Fig. 3, where cutting speed and feed rate are variable.

○●は基礎データの適応に用いた測定結果であり, 工具や被削材の組合せが同じであっても, 工作機械の違いが逃げ面摩耗に及ぼす影響が大きいことがわかる。実線は適応した基礎データを用い, 同条件について予測した切削状態である。適応予測によってその違いを明確に示すことができ, 工作機械加工特性を精度良く評価できていることがわかる。

図4は適応した基礎データを用い, 各切削条件について予測した初期摩耗補正量の等値線であり, 図5は10分切削後の逃げ面摩耗幅である。両者を比較するとここで使用した工作機械の違いは, 初期摩耗に対して顕著に現れていることがわかる。また図5より旋盤Bでは旋盤Aに比べ, 低速度領域で逃げ面摩耗幅が小さいものの, 高速度領域では切削速度の増加に対して摩耗の増加が顕著になっていることがわかる。

図6, 図7は境界摩耗と仕上げ面粗さの時間的変化の一例を示したものである。なおネットワークの学習データは, 境界摩耗については各旋盤とも2508データであり, 仕上げ面粗さでは, 旋盤Aについて712データ, 旋盤Bについて658データである。加工データは1条件の切削過程で各時刻ごとに得られるため, 少ない条件でも学習に要する教師データ数は多く, 十分な学習を行うことにより, 精度の良い予測が可能となる。ただし多くの教師データを短時間で学習するために, バックプロパゲーション法の高速化を図っている¹¹⁾。これらの結果より, 境界摩耗や仕上げ面粗さに対する工作機械の影響は, 逃げ面摩耗過程に対するものより小さいが, 適応予測によって得られた基礎データが, このような小さな差異についても十分に識別できていることがわかる。図8, 図9は10分切削後の各切削条件に対する境界摩耗と仕上げ面粗さの関係である。これより全体的に旋盤Aの境界摩耗や仕上げ面粗さは, 旋盤Bのそれらより大きいことがわかる。以上のように幾つかの切削条件について適応予測を行えば, 工作機械の加工特性を各切削条件に対して定量的に評価でき, これにより切削状態に対する工作機械の影響

Fig. 6 Grooving wear predicted after adaptation
Cutting conditions are same as in Fig. 3.

Fig. 7 Surface roughness predicted after adaptation
Cutting conditions are same as in Fig. 3.

(a) Lathe A

(b) Lathe B

Fig. 8 Grooving wear predicted at 10 minutes cutting
Cutting conditions are same as in Fig. 3, where cutting speed and feed rate are variable.

(a) Lathe A

(b) Lathe B

Fig. 9 Surface roughness predicted at 10 minutes cutting
Cutting conditions are same as in Fig. 3, where cutting speed and feed rate are variable.

を考慮した最適切削条件の決定が可能となる。

4. 最適切削条件に対する工作機械加工特性の影響

ここでは N_w 個の円筒形状部品の外周長手旋削作業で、加工費用最小となる切削速度と送りを決定する場合を例とし、工作機械の違いによって最適切削条件が異なることを示す。なお想定している作業では、以下の拘束があるとする。

- ①工作物は外周長手方向に1パスで加工するものとし、切込みは一定とする。
- ②全製品を加工するまで、最初に決めた切削条件と工具寿命は変更できない。
- ③この加工作業のためにNC旋盤のタレットに装着できる工具の本数は T_{set} と限られている。
- ④工具逃げ面摩耗幅と仕上げ面粗さについて、許容最大値 V_{Bmax} 、 $(R_{max})_{max}$ が与えられている。

作業設計では各切削条件に対して、図2の予測システムによって1製品あたりの実切削時間 T_c ごとに逃げ面摩耗幅と仕上げ面粗さを予測し、どちらか一方でも許容値を超えた時を工具寿命とする。簡単のため加工費用は、実切削と工具および被削材の着脱の作業準備に対する経常費・労務費と、工具費の和とする。したがって1本の工具で N 個の製品を加工する場合、加工費用 $E_c(N)$ は以下の式で表せる。

$$E_c(N) = C_r \cdot N \cdot T_c + C_r \cdot T_i + C_r \cdot N \cdot T_w + C_t \quad (7)$$

ただし C_r は単位時間あたりの経常費・労務費、 C_t は工具費、 T_i はタレットインデックスとNCプログラムの工具番号変更に必要な時間、 T_w は工作物着脱に必要な時間である。1本の工具が工具寿命までに N_p 個の製品を作るとすれば、全製品 N_w 個を加工するために必要な工具数 T_{num} は、次式で計算される。

$$T_{num} = \begin{cases} N_w / N_p & (N_w = k \cdot N_p) \\ (\text{int})(N_w / N_p) + 1 & (N_w \neq k \cdot N_p) \end{cases} \quad (8)$$

ただし $(\text{int})(\dots)$ は $(\dots)$ の整数部をとる演算子で、 k は整数である。したがって全製品の加工費用 E_{all} は次式で計算される。

$$\begin{cases} E_{all} = (\text{int})(N_w / N_p) \cdot E_c(N_p) \\ \quad + E_c(N'_p) + C_r \cdot (T_{num} / T_{set}) \cdot T_d \\ N'_p = N_w - (\text{int})(N_w / N_p) \cdot N_p \end{cases} \quad (9)$$

ただし T_d は T_{set} 個の工具を着脱し、工具補正値を測定してNCのメモリーに登録する時間である。

各旋盤に対し、適応予測で得られる切削状態に基づいて計算された加工コストと切削条件の関係を図10に示す。ただし①は加工費用最小となる最適切削条件である。両者を比較すると等値線が異なっており、工作機械の違いが最適切削条件に影響していることがわかる。このような差異は設計条件によって変わるが、この結果について言えば、工作機械の仕上げ面粗さに対する影響の違いによるところが大きいと考えられる。既に図9で示したように、仕上げ面粗さは旋盤Aの方が旋盤Bより悪い。したがって最適化に際し、旋盤Aの方が仕上げ面粗さに対する補償効果が大きく、旋盤Bに比べ高切削速度、低送りでの仕上げ面粗さにとって有利な条件となっている。

5. 工作機械加工特性を考慮したスケジューリング

前節で示したように、たとえ同一作業であっても、使用する工作機械によって最適な切削条件が異なるから、これによって加工時間や加工費用が変わる。このことを考慮しながらスケジューリングを行えば、効率的なスケジュールを得ることがで

(a) Lathe A (b) Lathe B

Fig. 10 Effect of machine tool characteristics on machining cost
Planning conditions: running cost (C_r), ¥100/min; tool price (C_t), ¥500/edge; time for tool index (T_i), 1min; time for tool mounting (T_m), 5min; time for work setting (T_w), 1min; number of positions assigned to tools on the turret (T_{set}), 3; number of products (N_p), 300; workpiece length, 50.0mm; workpiece diameter, 50.0mm; tolerable maximum flank wear, 0.14mm; tolerable maximum surface roughness, 14 μ m. Cutting conditions are same as in Fig. 3, where cutting speed and feed rate are variable.

きる。例として2台のNC旋盤に対し、表2の6つのジョブを総処理時間 F_{max} を最小とするように割り当てる場合を示す。ここでは各ジョブの最適切削条件が、ジョブが割り当てられる工作機械の加工特性に依存するとした場合と、そうでない場合とで、それらの総加工費用を比較する。なおジョブの処理順序に対する拘束はなく、ジョブはLPTルールに従い、加工時間が大きいジョブを優先的に処理するように順序付けられる。スケジュールは、6つのジョブが2台の旋盤に割り当てられることのできるすべての組合せについて F_{max} を計算し、これを最小とするものを採用した。図11(a)は、各ジョブを、それらが割り当てられる工作機械上の加工特性に基づいて、加工費用最小となるような切削条件で加工した時の結果である。これに対して(b), (c)は、各ジョブの最適切削条件が各工作機械の加工特性によらず同じ条件であるとして考えた場合の結果である。(b)は全ジョブが旋盤Aの加工特性に基づいた最適切削条件で加工される場合のスケジュールであり、(c)は旋盤Bの加工特性に基づいた条件での結果である。これらの結果では各工作機械に割り当てられるジョブが異なり、工作機械の加工特性がスケジューリングに対して影響していることがわかる。また(b), (c)に比べて(a)は総処理時間とともに加工費用が最小であり、効率的なスケジュールが得られている。以上の結果より、スケジューリングにおいて工作機械の加工特性を考慮した作業設計を利用すれば、効率的なスケジュールを作成できることわかる。

6. 結 論

機械加工において、工作機械の加工特性が切削状態に及ぼす影響は大きく、効率的で信頼性の高い作業を実現するためには、これを考慮した作業設計を行う必要がある。本報ではこのような観点から2台のNC旋盤上で得られた工具摩耗と仕上げ面粗さに対して適応予測を実施し、これに基づいて作業設計とスケジューリングを試みた。以下にその結果を示す。

- (1) 適応予測によって、切削状態に対する工作機械の加工特性を評価し、これに基づいて各工作機械にとって最適切削条件を選定できる。
- (2) 生産ラインにおいて、各ジョブを処理する工作機械の加工特性を考慮しながら切削条件を設定し、これに基づいて

Table 2 Planning conditions

	Job 1	Job 2	Job 3	Job 4	Job 5	Job 6
Workpiece length mm	30.0	30.0	50.0	50.0	70.0	70.0
Workpiece diameter mm	50.0	100.0	50.0	100.0	50.0	100.0
Number of product	600	600	400	850	700	200
Tolerable maximum flank wear mm	0.16	0.12	0.14	0.16	0.14	0.18
Tolerable maximum surface roughness μ m	12.0	14.0	14.0	12.0	12.0	16.0

(a) Each job is machined in the optimum conditions for each machine tool.

(b) All jobs are machined in the optimum conditions for lathe A.

(c) All jobs are machined in the optimum conditions for lathe B.
Fig. 11 Effect of machine tool characteristics on machining scheduling with Gantt chart

スケジューリングを行えば、効率の良いスケジュールを得ることができる。

参 考 文 献

- 1) 沢田雅二: 円筒形機械部品の形状誤差に関する研究, 計量研究所報告, 28 (1979).
- 2) 大野幸彦: 旋削仕上げ面粗さに関する研究, 機械技術研究所報告, 91 (1977).
- 3) 斎藤明德, 堤 正臣, 黄 錦鐘: 仕上げ面の断面曲線による工作機械の性能評価, 日本機械学会論文集(C編), 58, 545 (1992) 277.
- 4) W.W. Gilbert: Economics of Machining, Machining - Theory and Practice, Am. Soc. Metals, (1950) 465.
- 5) R.C. Brewer: On the Economics of the Basic Turning Operation, Trans. ASME, 80, (1958) 1479.
- 6) 松村 隆, 帯川利之, 白樫高洋, 白井英治: 切削加工の自律型作業設計, 精密工学会誌, 59, 10 (1993) 1676.
- 7) D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, and the PDP Research Group: Parallel Distributed Processing, MIT Press, (1986).
- 8) T. Matsumura, T. Obikawa, T. Shirakashi and E. Usui: Autonomous Turning Operation Planning with Predicting Tool Wear and Surface Roughness, Trans. NAMRI/SME, 21, (1993) 359.
- 9) T. Matsumura, T. Obikawa, T. Shirakashi and E. Usui: An Adaptive Prediction of Machining Processes, Proc. ICMT in Asian & Pacific Regions, (1993) 390.
- 10) V. Solaja: Wear of Carbide Tools and Surface Finish Generated in Finish Turning of Steel, Wear, 2, (1958/59) 40.
- 11) T. Matsumura, T. Obikawa, T. Shirakashi and E. Usui: An Adaptive Prediction of Machining Accuracy in Turning Operation, Trans. NAMRI/SME, 22, (1994) 305.