知能化工作機械によるドリル加工に関する研究(第1報)*

— 工具の異常監視と加工能率の向上 —

藤嶋 誠** 垣野義昭*** 松原 厚*** 佐藤智典† 西浦 勲††

Study on Advanced Drilling by Intelligent Machine Tools (1st Report)
— Monitoring of Tool Failure and Improvement of Productivity —

Makoto FUJISHIMA, Yoshiaki KAKINO, Atsusi MATSUBARA, Tomonori SATO and Isao NISHIURA

This paper deals with the two adaptive control functions and their integration for drilling process. One is the feed rate over-ride type adaptive control. In our study this function is also quite effective for the common axial depth applications of high speed drilling of automotive parts. The other function is an automatic pecking which is shown to be a useful method to avoid the tool breakage due to the chip jamming in the case of deep hole drilling. In both cases, the cutting torque and thrust force are monitored through the motor current of the spindle motor and the feed drive servo motor, and additional sensor installation is not necessary to realize adaptive control. The integration of those functions in the whole drilling process has been studied and the intelligent drilling scheme is proposed and tested.

Key words: cutting, control technology, adaptive control, intelligent system

1. 結 言

著者らは現在図1に示すような構造をもった知能化工作機械システムを開発中である。すなわち、通常の電流、速度、位置の制御ループの外側に、加工状態の監視と制御を行うループと加工結果をデータベースに反映させるループをもたせて、学習能力を付与しようとしている¹⁾。

このようなシステムにおいて、加工対象に対して適切な切削条件を与えられるように加工データベースを CNC に内蔵させようとしている。しかし、工作物硬さのばらつきや工具摩耗のような未確定な要因が存在するために、データベースから標準的な加工条件を引き出して加工するだけでは十分でない。

そこでこれらの未確定な変動に対して、適応制御機能を用いて、安全かつ高能率な加工が行えるサブシステムを開発することとした。ここでは、ドリル加工を対象として、送り速度などの加工条件を工具摩耗に応じて変化させ、かつ工具寿命を検出する手法と、深穴加工での切りくずつまりによる工具折損を防止する手法について研究することとした。

切削抵抗を監視して工具寿命を推定するような製品は実用化されている。これは試験切削により標準切削抵抗を求め、それに対して許容値を設定し、許容値以上の切削抵抗になったときに工具寿命と判定するものである。また電流値から求めた切削抵抗をフィルタ処理することにより切削条件の影響を受けずに工具折損を検出する研究²⁾は行われているが、工具摩耗検出においては試験切削と同じ切削条件でなければ摩耗の正確な判定はできないため、適応制御と工具寿命の検出を両立させることができなかった。

また、工作物と工具の組合せによる標準切削抵抗のデータベースを持たないために、ユーザサイドで工具寿命判定の許容値を設定しなければならない煩わしさがあった。

また、深穴加工においては穴深さが深くなるに従って切りくずつまりが発生し、工具を損傷させる恐れもあった。穴の深さが深くなった際の切削抵抗の上昇を検出して送り速度を制御する研究³⁾が行われているが、切りくずつまりを検出したときに、その対策として有効なベッキング動作については研究がされていない。

工具の摩耗が生じた場合や、切りくずがつまった場合に対しては、送り速度を制御するよりも、適応制御中にも工具摩耗の推定を行ったり、切りくずつまりを検出してベッキングを行う方が加工能率が向上する可能性がある。そこで本研究では、切削抵抗検出による適応制御中の工具摩耗の推定、及び深穴加工における切りくずつまりの検出と、ベッキングによるその回避法について述べる。

2. 知能化加工システム

2.1 システム構成

本研究で用いる知能化加工システムの概要を図2に示す。すなわち、高速・高加速度マシニングセンタと PC ベースのオープンアーキテクチャ CNC から構成されたシステムを用いる。

Fig.1 Concept of intelligent machining center

* 原稿受付 平成 12年 1月 31日

** 正 会 員 藤森精機製作所 (大和郡山市北郡山町106番地)

*** 正 会 員 京都大学工学研究科 (京都市左京区吉田本町)

† 正 会 員 三菱電機産業システム研究所 (尼崎市塚口本町8-1-1)

†† 藤森精機製作所

Fig.2 System configuration of intelligent machine tools

Table 1 Specification of machining center

Spindle power	kw	18.5
Spindle speed	min ⁻¹	20000
Spindle bearing material		Ceramic ball+Stainless steel
Spindle diameter	mm	70
Type of spindle taper		7/24 taper, No.40
Maximum feed rate	m/min	60
Feed acceleration	G	1
Stroke X/Y/Z	mm	600×430×460
Servo motor output X/Y/Z	kW	3.5/4.5/4.5
Ball screw diameter/lead	mm	φ36/20
Guide way		Linear roller guide

本機の主な仕様を表1に示す。早送り速度は60m/min、加速度は1G、主軸回転数は20000min⁻¹である。本機にはCNC工作機械が本来備えている内部センサ（電流、速度、位置）以外のセンサは備えていず、前述の目的を内部センサのみで達成しようとしている。

2.2 工具の異常監視と加工能率向上のアルゴリズム

前述の目的を達成するためには、ドリル加工中の切削抵抗（スラスト、トルク）がどのような原因で変動するか⁴⁾を判定し、適切な制御を行う必要がある³⁾。そこで、まず切削抵抗が増大する原因とそれに対する適切な対処法について検討する。

(1) 1回転当たりの送り f (mm/rev)

ドリル1回転当たりの送りが増大すれば、切削抵抗は増大する。使用するドリルに許容される限度以下に切削抵抗の値、すなわち1回転当たりの送りを制限しなければならない。

(2) 工具摩耗

工具摩耗が増大すると切削抵抗が増大する。したがって、摩耗が増大するに従い、切削抵抗が許容値以下になるように1回転当たりの送りを小さくしなければならない。しかし、送りをあまり小さくしすぎると、加工能率と加工された穴の品質が悪くなるので、後述する摩耗係数 W_f が一定値以上になると工具寿命と判定し、工具交換を行う。

(3) 工作物硬さ

工作物硬さは同一ロットにおいても、ある程度ばらつく。このばらつきは特に鋳鉄製の工作物の場合において大きいので、工作物硬さに応じて、送りを変えるなどの特別な対策を行う。これについては、参考文献5)で検討済みであるので参照されたい。

(4) 切りくずつまり

LD (穴深さ/穴径) が5以上の深穴加工においては、切りくずがつまって切削抵抗が急増することがある。このような場合には、ドリルを一度上昇させて、切りくずを排除してから再度加工を行うベッキング動作を行わせる（2.3節参照）。

適応制御のように切削抵抗により送り速度が制御された場合に、工具摩耗による切削抵抗への影響を推定するためには、切削抵抗を数学モデルであらわすと便利である。このための数学モデルとして種々のものが考案されている⁴⁾。ここではスラスト F (N) を、次のような簡単な数学モデルで表す。

$$F = K_f \times (1 + W_f) \times f^{dff} \times D^{dfd} \quad (1)$$

ここで K_f : 工作物と工具の組合せで決まるスラスト定数, W_f : 工具摩耗係数, D (mm): ドリルの直径, dff , dfd : f と D に対する感度係数, f (mm/rev): 1回転当たりの送り。

K_f , dff , と dfd は3.2.1で後述するように切削実験を行ってスラストの測定結果を最小2乗法で近似することにより同定する。

式(1)と同様にこの手法を用いて切削トルクも表すことができる。切削状態のモニタリングに切削スラストを用いるのか切削トルクを用いるかは、(1)から(4)の変化に対してより敏感に変化する方法を選択すれば良い。

スラストはZ軸サーボモータの電流から推定でき、トルクは主軸モータの電流から推定できる。これらの信頼性については参考文献1)を参照されたい。

2.3 自動ベッキングのアルゴリズム

前述のように深穴を加工する場合には、切りくずがつまって、切削抵抗が増大することがある。この状態が続くと、最悪の場合には工具が折損する。

切りくずつまりの対策として現在は次のような手法がとられている。

(1) プログラムによるベッキング

一定長さの切削送り後にドリルを引き戻し、切りくずを排出し再び加工を行う。この手法は確実にコストもかからないが、常にベッキングを行うため、加工能率が低下する。また、工具の摩耗が進行してくると切りくずが切れにくくなり、切りくずつまりが発生しやすくなる。これらの条件を加味して安全サイドにベッキング動作を行う必要がある。

(2) 切削トルク検出によるベッキング

モータ電流があらかじめ設定されたレベルを超えたときに切りくずつまりと判定して、ベッキング動作を行わせる。切りくずつまりを判定するためのレベルの設定が難しいことと、図6で明らかのように切削トルクは1回転当たりの送り量によるトルクの変動を受けるため、適応制御と組合せることができない欠点がある。

(3) 特殊な工具ホルダを用いる方法

切削トルクが検出可能なホルダを用いて、ある一定レベルを超えたときにホルダから出力される信号によりベッキングを行わせる。この方法は特殊なホルダを必要とするのでコスト高につくことと、適応制御を同時に行えない問題がある。

そこで、本研究では(2)の方法を改良した図3に示す方法を用いる。すなわち、穴の入口の切削トルクと切削中の切削トルクの差が一定以上になった時点でZ軸の引抜き動作に移る自動ベッキング機能を作動させる。穴の入口の切削トルクはドリル加工中に切削トルクを検出して食いつきから刃先が完全に入るまでの時間経過後、もしくは切削トルクが安定した時のトルクを捕らえて標

Fig.3 Automatic pecking cycle

準値 T_0 とする。次に標準値にある倍率 α （例えば 1.5 倍）を掛けてペッキングレベル値 αT_0 とする。切削トルクがペッキングレベル値を超えたときに Z 軸の引き戻し動作を行い切りくずを排除する。

このようにすると切削送り量や工具の摩耗状態によって穴の入口のトルクが変化しても常に最適なペッキングレベル値の設定が可能になる。また工具の摩耗検出は 2.2 節に述べたアルゴリズムを用いるが、切りくずつまりによる工具摩耗検出誤差の発生を防ぐために検出方法と検出時間を変えている。すなわち切りくずつまりが発生すると図 12 に示すように切削トルクが急激に上昇する。一方工具摩耗による切削負荷の上昇は緩やかである。これを利用して切りくずつまりの検出時間を工具摩耗の検出時間よりも短い時間に設定することにより、両方のレベルが近い場合にも検出誤差の発生を防ぐことができる。また工具摩耗の検出は比較的切りくずつまりの影響を受け難い切削スラストを用いている。

このアルゴリズムを用いることで下記のように、加工能率が高く安全な加工が行える。

- (1) 穴の入口の切削トルクと切削中のトルクを比較して切りくずつまりの判定を行っているため、工作物、工具、切削条件に依存せず、システムが切りくずつまりのしきい値を自動決定することが可能である。
- (2) 切りくずがつまったときだけペッキングを行うため加工能率が低下しない。

3. データベース構築用実験

3.1 実験装置と方法

データベース構築用に用いる実験装置は表 1 に示した立形マシニングセンタに加えて、主として電流値による切削抵抗の検定に用いる目的で圧電素子を用いた高感度の工具動力計をテーブル上に設置している。高速・高能率加工を目指しているので、工具として直径 8.5mm、先端角 140° 、ねじれ角 30° 、シンニング付きの (Al, Ti) N コーティングされた超硬ドリルを用い、自動車部品の被削材として、一般によく用いられる鋳鉄 FC250、アルミニウム ADC12 および炭素鋼 S50C を用いる。ドリルの摩耗は CCD カメラを用いて拡大撮影を行い工具の摩耗幅を測定した。

加工する穴深さ L は、 $L/D=3$ とするため 25.5mm の止まり穴を標準とした。切削速度は 100m/min を標準とし、1 回転当たりの送りは 0.2~0.4mm/rev と変化させる。クーラントはソリュブルタイプのものを用い、内部給油方式で圧力は 7MPa である。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 切削抵抗推定用数学モデル

新品工具を用いて鋳鉄 FC250 を切削した時 ($W_f=0$) に Z 軸送りモータの電流値を用いて測定された切削抵抗（スラスト）と 1 回転当たりの送りの関係を図 4 に示す。

Fig.4 Relation between feed and thrust at drilling with new tool (Workpiece : FC250, Tool : $\phi 8.5$ (Al, Ti) N coated sintered carbide, Cutting speed: 100, 125, 150, 175m/min)

ここで簡単にするために式 (1) を式 (2) に書きかえる。

$$F = KI \times f^{dff} \quad (N) \quad (2)$$

測定値に対して式 (2) をあてはめ、最小 2 乗法を用いて処理したところ、 $KI=3285$ 、 $dff=0.730$ となった。用いた材料については、切削速度を変えても切削スラストは変化しなかった。これより 1 回転当たりの送り f とスラスト F の関係は、次のようになる。

$$F = 3285 \times f^{0.73} \quad (3)$$

このようにして得られた炭素鋼 S50C、鋳鉄 FC250、アルミニウム合金 ADC12 を切削した場合の 1 回転当たりの送りと切削抵抗（スラスト、トルク）の関係を図 5、図 6 に示す。これは実験した切削速度について得られた値を、最小 2 乗法を用いて 1 回

Fig.5 Relation between feed and thrust at drilling with new tool (Tool : $\phi 8.5$ (Al, Ti) N coated sintered carbide, Workpiece: FC250, Cutting speed: 100, 125, 150, 175m/min Workpiece: ADC12, Cutting speed: 300, 350, 400, 450, 500m/min Workpiece: S50C, Cutting speed: 70, 85, 100, 115, 130m/min)

Fig.6 Relation between feed and torque at drilling with new tool (Cutting conditions : same as shown in Fig.5)

Fig.7 Total thrust and additional thrust due tool wear
(Workpiece: FC250, Tool: $\Phi 8.5$ (Al, Ti) N coated sintered carbide, Cutting speed: 100m/min)

転当たりの送りと、切削スラストもしくは切削トルクの関係式を求めたものである。図 5, 図 6 のように切削力と送り量の関係を利用し、工具と被削材の組合せごとに数学モデル化することにより、切削力が推定できる。これを用いて適応制御の初期送り量の決定や次穴の送り量の決定⁴⁾と、次章に述べるように適応制御中の工具摩耗量の推定を行うことができる。

3.2.2 工具摩耗

摩耗がある程度生じているドリル（外周コーナ部摩耗幅 $V_c = 0.3\text{mm}$ ）を用いて種々の送りで加工を行い、工具摩耗係数 W_f が一定になるかどうかの検証を行った。すなわち、ある程度摩耗が進行した工具で切削した時のスラスト F と、 F から新品工具での実験式(3)で求めたスラスト力 F_{new} を減じた F_i を求めた結果を図 7 に示す。同図においてスラストは、1 回転当たりの送り量が順次 $f=0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4\text{mm/rev}$ と変化させた 5 穴加工分を示している。

摩耗によるスラスト増加分 F_i より摩耗係数 W_f を次の式(4)を用いて推定する。この W_f は等しい 1 回転当たりの送り量における新品工具による切削スラスト力 F_{new} と摩耗した工具による切削スラスト増加分 F_i との比であり、 W_f には 1 回転当たりの送りによって変化する成分が含まれていない。

$$W_f = (F - F_{new}) / F_{new} = F_i / F_{new} \quad (4)$$

図 7 から式(4)を用いて推定した摩耗係数 W_f を図 8 に示す。送り量は図の左から 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4mm/rev と変化している。 W_f への 1 回転当たり切削送り f の影響がほとんど現れていない。

Fig.8 Tool wear coefficient at various feed
(Cutting conditions: same as shown in Fig.7)

このようにして求めた摩耗係数 W_f を使用することで、適応制御により切削送り量に変化しても同じ尺度で工具摩耗の推定が可能であることが分かった。

4. ケーススタディ

4.1 工具摩耗の推定

3.2.2 項で述べた方法により工具摩耗がどの程度正確に推定できるかを調べるためのケーススタディを行った。使用した工具は $\phi 8.5\text{mm}$ の (Al, Ti) N コーティングされた超硬ドリルで、工作物は鋳鉄 FC250 である。送りは 0.3mm/rev で一定とし、切削速度は 100m/min として、深さ 25.5mm の穴を多数加工した。クーラントはソリュブルタイプのものを用い、内部給油方式で、圧力は 7MPa である。

加工した穴数と測定された工具摩耗係数 W_f の関係を図 9 に示す。細い実線で示した W_f にはかなりの変動が認められるが、これは工作物として用いた鋳鉄 FC250 製の材料の硬さの変動 ($\text{HB} = 198 \sim 245$ と 20%以上の範囲で変動) によって生じたものであり、太い実線で示したように 10 穴程度の W_f を平均化することによりフィルタをかければ工作物硬さの変動の影響がほぼ取り除ける。また 2000 個の穴を加工して摩耗した工具の写真を図 10 に示す。加工した穴数と外周コーナ部摩耗幅 V_c を CCD カメラで観測し、測定した結果（実線で示す）と工具摩耗係数 W_f （点で示す）をまとめて図 11 に示す。外周コーナ部摩耗幅 V_c と工具摩耗係数 W_f はほぼ同じような変化を示していることがわかる。2000 穴加工後の状態でドリルの摩耗幅 $V_c = 0.3\text{mm}$ に達しており、この時 $W_f = 0.17$ になった。4000 穴加工後には $V_c = 0.45\text{mm}$ 、 $W_f = 0.24$ となった。

Fig.9 Tool wear coefficient change
(Workpiece: FC250, Tool: $\phi 8.5$ (Al, Ti) N coated sintered carbide, Cutting speed: 100m/min, Feed: 0.3mm/min)

Fig.10 Tool wear at the corner of outer blade
(Cutting conditions: same as shown in Fig.9)

Fig. 11 Tool wear value change
(Cutting conditions : same as shown in Fig.9)

Fig. 12 Torque change at the drilling of deep hole
(Workpiece: S50C, Tool: $\phi 9$ HSS, Cutting speed: 30m/min,
Feed: 0.15mm/rev)

4.2 自動ペッキング

本ケーススタディに使用した工具は直径 9mm, 先端角 118° , ねじれ角 32° の高速度鋼製ドリルで, 工作物は炭素鋼 S50C, 穴深さは 50mm ($L/D=5.5$) の止まり穴である. 送りは 0.15mm/rev とし, 切削速度は 30m/min とした. 切削中のトルクは主軸モータ電流から推定した.

切りくずがつまっても加工を続行した場合に測定された切削抵抗 (トルク) の変化の一例を図 12 に示す. この状態では工具に 15Nm という過大なトルクがかかり, 工具折損にいたる危険性が高い. これと同じ条件下で 2.3 に示したアルゴリズムを用いて自動

ペッキングを行った場合に測定された切削抵抗 (トルク) の一例を図 13 に示す. この場合, 穴の入口での切削トルク (標準値) を 5Nm, ペッキング動作に移る切削トルクしきい値 (ペッキングレベル値) を 6.25Nm に設定している. すなわちこの場合には $\alpha=1.25$ に設定し, トルク検出回路には瞬間的な負荷変動やノイズによる誤動作を防ぐために 70ms の一次遅れフィルタを挿入している. 本実験条件の場合は $\alpha=1.25$ とすると, この例に示したように切りくずの詰まりによる工具折損は生じず加工能率も確保できた.

図 13 においては生じた最大トルクは 8Nm という安全な範囲に押さえられている. また, 切りくずがより詰まりやすい L/D が 9 までのときにも同様にペッキングレベルを $\alpha=1.25$ に設定することで, 同様の効果を得ることができ, このアルゴリズムを用いることにより, 切りくずの詰まりやすい S50C 鋼と高速度鋼ドリルの組合せによる深穴加工も能率的かつ安全に行えた.

Fig. 13 Torque change at the automatic pecking cycle
(Cutting conditions : same as shown in Fig. 12)

5. 結 論

内部センサのみを使用する知能化工作機械を用いて, ドリル加工の際の工具の異常検出と加工能率の向上に関する研究を行った結果, 次の結論が得られた.

- (1) 式(1)～(4)で定義される数学モデルと送りモータの電流値で推定した切削抵抗 (スラスト) を用いることにより, 工作物材料と送り変動する条件化においても, 被削材に铸铁 FC250 を用いたケーススタディにおいて工具摩耗量とスラストから推定した摩耗係数の推移は近似しており, 工具摩耗を検出できる可能性のあることが分かった.
- (2) 主軸モータの電流値で観測した穴の入口と切削中の切削トルクを比較し, 2.3 節に示したアルゴリズムを用いることにより, 切りくずの詰まりを検出し, 自動ペッキングを行わせることができた.
- (3) 適応制御と工具寿命監視機能及び自動ペッキング機能を備えることにより, より安全で効率の良い加工が可能となった.

最後にこの研究は INC (Intelligent Numerical Control) 研究会の活動の一環として行われたものであることを記させていただきます.

参 考 文 献

- (1) Y.Kakino, et. al.: High Speed and High Productive Drilling by Intelligent Machine Tools, Proc. 1998 Japan-U.S.A. Symp. on Flexible Automation, 1 (1998) 285.
- (2) Y.Altintas : Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 114, Nov. (1992) 386.
- (3) R.J.Furness et al.: Feed, Speed, and Torque Controllers for Drilling, Trans. ASME, J. Eng. Industry., 118, Feb. (1996) 2.
- (4) 例えば ツールエンジニア編集部編: 穴加工用工具のすべて, (株) 大河出版(1991), 12.
- (5) 佐藤智典, 垣野義昭, 松原厚, 藤嶋誠, 西浦勲: 知能化工作機械によるドリル加工制御に関する研究 (第1報) -ドリル加工における切削条件の決定法- 精密工学会誌 66, 8 (2000) 1274.