

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420058

研究課題名(和文)小径ボールエンドミル加工での工具のたわみと摩耗による加工誤差のリアルタイム補正

研究課題名(英文)Real Time Compensation of Machining Error Caused by Tool Deflection and Tool Wear during Ball-End-Milling Process

研究代表者

近藤 英二 (KONDO, EIJI)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：10183352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：小径ボールエンドミル工具を用いた金型的高速エンドミル加工の加工精度(形状精度)の向上を目的とし、加工中の切削抵抗から工具先端の振動変位と工具摩耗量を推定し、得られた工具先端の振動変位と工具摩耗量の推定値から加工誤差をリアルタイムで補正するシステムを開発した。本研究では、基礎実験として静的切削抵抗を用いたボールエンドミル工具切れ刃の逃げ面摩耗の推定、エンドミル工具の先端位置での振動特性(コンプライアンス)を用いた動的切削抵抗による工具先端の振動変位(加工誤差)の推定を行った。また推定された加工誤差をリアルタイムで補正するシステムを構築し、機能を確認した。

研究成果の概要(英文)：The use of a long, small-diameter ball end mill degrades the machining accuracy of the metal mold because of deflection of end mill at the cutting point. Machining error due to tool deflection and tool wear is a serious obstacle to processing the precision machining parts. The purpose of this study is to propose a means of compensating for machining errors caused by the vibration and the tool wear of an end mill at the cutting point. In cutting tests, static cutting forces during machining with worn ball end mill were measured. Furthermore, dynamic cutting forces during machining at higher speed were also measured, and the machining error was measured after cutting tests. It was found that tool wear good relation with static cutting force, and the machining error estimated from the vibration displacement calculated from dynamic cutting force using the frequency-response function obtained from impact testing showed a good agreement with the height of the machined surface.

研究分野：切削加工学

キーワード：エンドミル加工 加工誤差補正 工具たわみ 工具摩耗 切削抵抗 工具振動特性

1. 研究開始当初の背景

金型は工業製品を安く大量生産するために欠くことのできない工具であるが、タイムリーに製品を市場に投入するため、製品の開発期間は急速に短くなっており、金型に対しても加工能率の向上（納期の短縮）が極めて重要になっている。一般に複雑な形状をした精密金型は放電加工によって作られてきたが、高速切削加工が実用化され、マシニングセンタを用いるエンドミル加工によって作られるようになった。しかしながら、金型の深リブ溝、深隅部や微小部分についてはエンドミル工具を細長くする必要があるので、工具のたわみやびびり振動が発生しやすく、また工具摩耗も生じるため、小径ボールエンドミルを用いた高精度加工は困難である¹⁾。

小径ボールエンドミル加工は、さらなる加工精度の向上を目指して工具の高剛性化が試みられているが、十分な加工精度は得られていない²⁾。CAMを用いた加工シミュレーションにより、エンドミル工具のたわみによる加工誤差を予測し、予めNCプログラムを修正する方法などが提案されているが³⁾、小径ボールエンドミル加工では切込みが小さく、切れ刃稜の丸みや工具摩耗の切削抵抗への影響は無視できないため、高精度の加工誤差の予測は困難である。一方、予め切削距離とボールエンドミル工具切れ刃の逃げ面摩耗幅との関係を求め、切削距離に対して補正を行う方法が提案されているが、予備実験により逃げ面摩耗幅を求める式のパラメータを求めておく必要があるなど⁴⁾、一般的な切削加工の現場への適用は困難であり、実用化が可能な加工誤差の補正方法の確立が求められている。

<参考文献>

1) 加瀬 究・他, 金型曲面のボールエンドミル加工における誤差, (第1報) 工具摩耗, 工具剛性に起因する加工誤差, 型技術, Vol. 11, No. 8, (1996), pp. 46-47.

2) 赤松猛史・他, 金型深彫り加工用小径ボールエンドミルの開発, 2005年度精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, (2005-9), pp. 1191-1192.

3) 成田浩久・他, 予測シミュレータを利用したボールエンドミル加工のトライレス化の試み (第1報, 加工工程予測システムの開発), 日本機械学会論文集, C編, 71巻, 712号, (2005-12), pp. 3622-3629.

4) 香山 仁・他, ボールエンドミルの摩耗推定と高精度曲面加工への応用, 精密工学会誌, Vol. 67, No. 9 (2001-9), pp. 1427-1431.

2. 研究の目的

小径ボールエンドミル工具を用いた金型の高速度エンドミル加工の加工精度（形状精度）の向上を目的とし、小径ボールエンドミル工具による加工中の動的切削抵抗から工具先端の振動変位と工具摩耗量を推定し、得られた工具先端の振動変位と工具摩耗量の推定

値から加工誤差をリアルタイムで補正するシステムを開発する。

3. 研究の方法

本研究では、基礎実験として切削抵抗を用いたボールエンドミル工具切れ刃の逃げ面摩耗の推定、エンドミル工具の先端位置での振動特性を用いた動的切削抵抗による工具先端の振動変位（加工誤差）の推定を行った。また推定された加工誤差をリアルタイムで補正するシステムを構築し、機能を確認した。

4. 研究成果

A. 切削抵抗を用いたボールエンドミル工具切れ刃の逃げ面摩耗の推定

実験装置の概略図を図1に示す。切削実験にはマシニングセンタを用い、下向き切削を行った。被削材は厚さ25 mmの炭素鋼を使用し、効率よく切削抵抗と加工誤差との関係を得るため、鉛直方向に対して被削材を5°傾け、軸方向へのピックフィードを一定とし、軸方向の工具位置を変化させることによって、工具半径方向の切込み深さを直線的に増加させるようにした。切削抵抗の測定では、圧電型切削動力計を使用し、それぞれ図1に示される切削抵抗 F_x , F_y , F_z を測定した。実験条件を表1に示す。また、実験後の被削材をコントラーサーにより加工面の断面形状を測定し、加工誤差を求めた。

表1 実験条件

Workpiece	Material	S50C Carbon steel		
Tool	Type	Ball-End-Mill		
	Diameter mm	6		
	Number of teeth	2		
Spindle speed N rpm		1000		
Feed rate f mm/min		20	40	60
Pick feed P_f mm		0.5		
Type of cut		Down milling		
Radial depth of cut R mm		0-2.45		

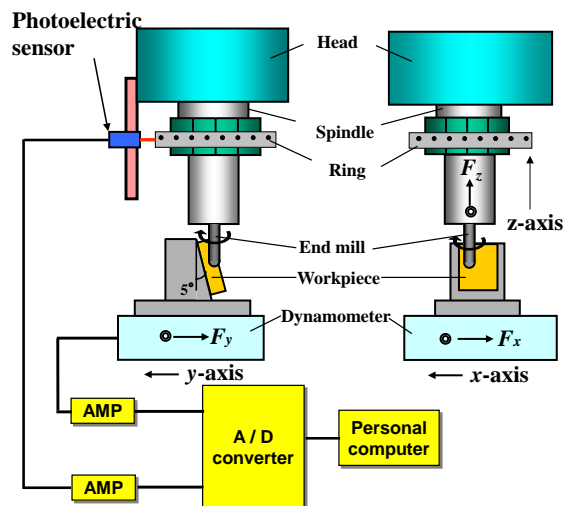


図1 実験装置

図2はボールエンドミルによる下向き削りの切削状態を工具の断面で見たときの概念図で、図中の角度 ϕ は、一つの外周刃が被削材に接触した瞬間を基準とした工具の回転角である。また、外周刃が切削を始めてから工具の中心軸と外周刃を結んだ線が仕上げ面に垂直になるまでの工具の回転角を ϕ_0 とすれば、 ϕ_0 は次式で与えられる。

$$\phi_0 = \cos^{-1}(1-t/r) \quad (1)$$

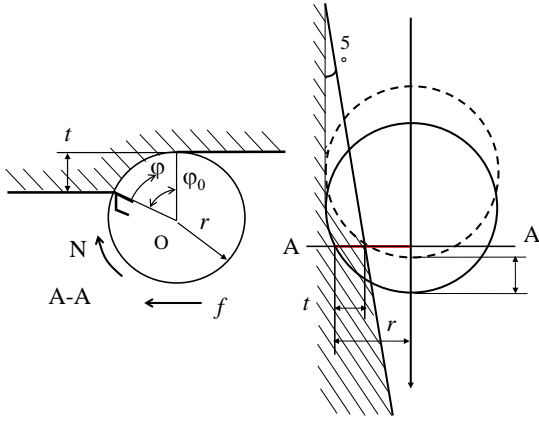


図2 ボールエンドミル加工の概念図

図3は切込み深さが0.29 mm, 1.03 mm, 1.72 mm, 2.4 mmにおける工具2回転分の切削抵抗 F_y で、一刃毎に増減している。3段目に示した l_{max} は外周刃が切削を始めてから離れるまでの工具の移動量で、切込み深さの増加に対し l_{max} も増加する。また l は一つの外周刃が被削材に接触し始めてから ϕ だけ回転する間の工具の移動距離であり、次式で与えられる。

$$l(\phi) = \phi \cdot f / (2\pi) \quad (2)$$

従って、図中の F_{ly} は外周刃が被削材に接触し始めてから ϕ 回転したときの垂直分力になる。

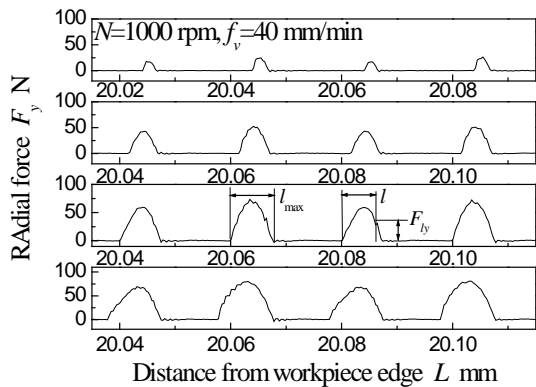


図3 切削の進行に対する切削抵抗 F_y



図4 工具逃げ面の摩耗

図4は切削実験で用いた摩耗したエンドミル工具で、逃げ面の摩耗幅は約80 μm であった。図5は、切込み深さの増加に伴う切削抵抗の最大値である。摩耗した工具の切削抵抗の最大値は、摩耗がない場合に比べ、切込み深さが0.5 mm以上で明らかに大きくなっており、新しい工具との切削抵抗の差により、エンドミル工具の逃げ面の摩耗を推定できると考えられる。

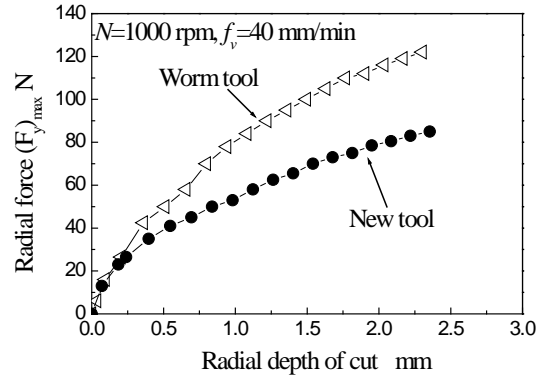


図5 切込み深さに対する切削抵抗の最大値

図6は、図3で示した、工具切れ刃が被削材と接触している間の工具の移動距離（接触回転角） l_{max} である。図2で示したように、切込み深さの増加に伴って接触移動距離は増加するが、工具逃げ面が摩耗した場合、接触移動距離（工具の接触回転角）は大きくなっている。従って、切削条件から幾何学的に得られる接触移動距離（工具の接触回転角）の計算値と実測値との差から、工具逃げ面の摩耗幅が推定できるものと考えられる。

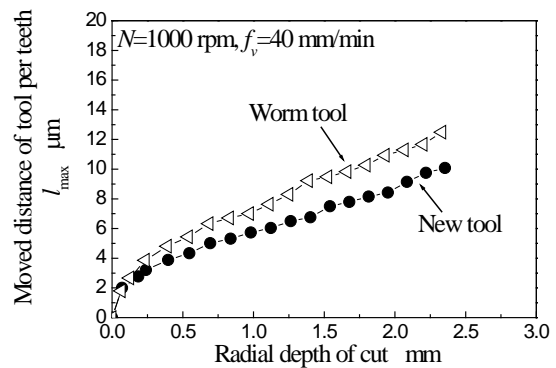


図6 切込みに対する移動距離（接触回転角）

B. エンドミル工具の先端位置での振動特性を用いた動的切削抵抗による工具先端の振動変位（加工誤差）の推定

動的切削抵抗による工具先端の振動変位（加工誤差）の推定精度は、エンドミル工具系の振動特性、特に固有振動数が大きく影響する。エンドミル工具の先端位置でのモーダル質量（等価集中質量）は100 g程度であり、数g程度の加速度センサでも振動特性の測定値に影響するため、振動変位の測定にはレーザー変位計を用いた。

図7に実験装置の概略図を示す。また表2に実験条件を示す。切削実験では、エンドミル工具系の振動特性を用いて動的切削抵抗から工具系の振動変位を推定する方法の有効性を検証するため、動的切削抵抗だけでなく、切削中の振動変位も同時に計測した。図8は、本研究で行ったエンドミル加工による加工面の創成機構の概念図で、エンドミルの切れ刃が加工面に垂直になった時の刃先が加工面を創成すると仮定している。従って、本研究で提案する加工誤差の推定では、切れ刃の位置の把握が必要である。そこで、実験装置では、切れ刃の回転位置を同定するため、主軸端に取付けたロータリーエンコーダから1[pulse/rev]と512[pulse/rev]の2つの信号を取り出し、図8で示したように1[pulse/rev]の信号との相対位置角度で切れ刃の方向を同定した。また切削実験では、主軸回転速度 N を1500から7450 rpmまで直線的に増加させ、動的切削抵抗、エンドミル

表2 実験条件

	Material	Brass(JIS C3713)	
Tool	Type	Straight fluted end-mill	
	Diameter mm	12	
	Number of teeth	1	
Spindle speed N rpm	1500-7450		
Feed rate f mm/rev	0.05	0.1	
Axial depth of cut mm	4	2	
Radial depth of cut mm	3		
Type of cut	Down milling		

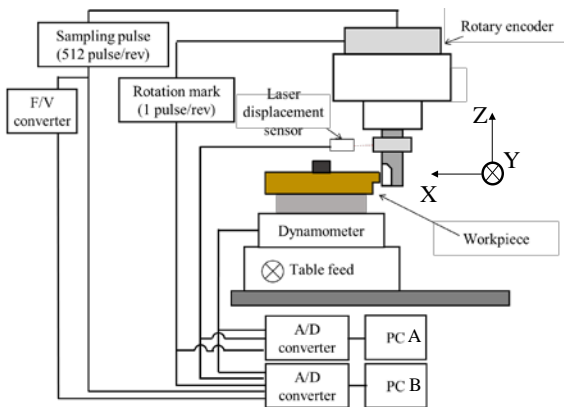


図7 実験装置の概略図

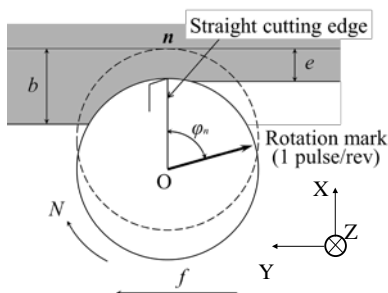


図8 切削加工面の創成機構

工具の振動変位、主軸回転速度の信号、および1[pulse/rev]の信号を512[pulse/rev]の信号に同期させ、図7で示したパーソナルコンピュータ[PC B]で測定した。

切削実験では、主軸が回転しているときのエンドミル工具系の振動特性を動的切削抵抗と工具の振動変位から求めるため、サンプリング時間を100 msで一定とし、動的切削抵抗と工具の振動変位の信号、1[pulse/rev]の信号をパーソナルコンピュータ[PC A]で同時に測定した。図9は、表2で工具送り速度を0.05 mm/revとしたときの測定結果であり、工具送りと直角なX方向の動的切削抵抗 F_{xm} の振幅は、主軸回転速度の増加に対し、ほぼ一定になっているが、X軸方向の振動変位は増加する傾向が見られる。

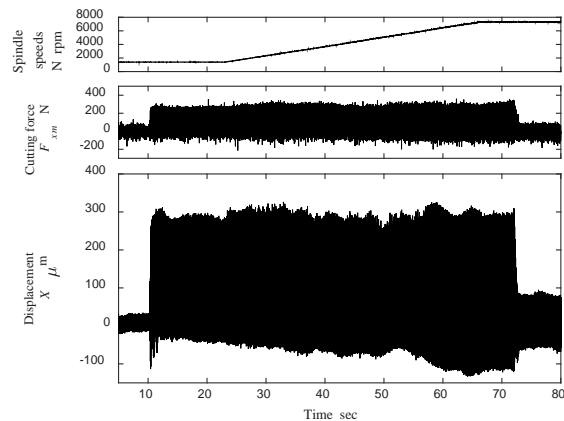


図9 主軸回転速度の増加に対する動的切削抵抗とエンドミル工具の振動変位

図10は、工具送り速度0.05 mm/revの切削実験で得られたX軸方向のエンドミル工具系のコンプライアンス $G(\omega)$ であり、図9に示した動的切削抵抗 $F_{xm}(t)$ とエンドミル工具の振動変位 $X(t)$ をフーリエ変換(FFT)して得られるコンプライアンス $G_m(\omega)$ に切削動力計の動特性 $G_d(\omega)$ を乗じて求めた。得られたコンプライアンスは図中に黒い線で示した。図中の赤い曲線は、工具送り速度0.1 mm/revの切削実験で得られたコンプライアンスであり、0.05 mm/revで得られたコンプライアンスと比較し、1500 Hz以上の高周波領域を除

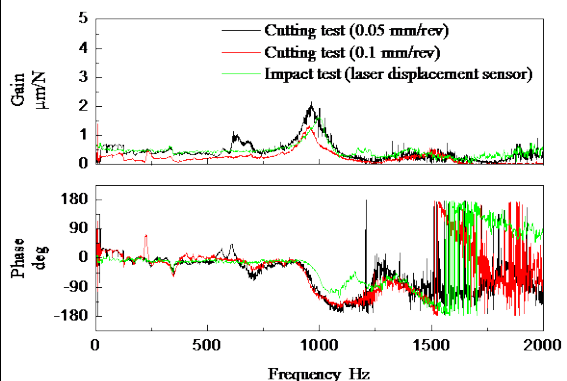


図10 エンドミル工具系のコンプライアンス

けば、ゲインはやや小さいものの、固有振動数と位相の特性はほぼ同じであった。また緑の線は、打撃試験で得られた振動特性（コンプライアンス）であり、切削実験で得られた振動特性に対し、全体的な傾向はほぼ一致しているが、固有振動数は約 50 Hz 高く、また 1000 Hz 以上での位相差に差が見られた。

図 10 に示したエンドミル工具系のコンプライアンスを用い、図 7 のパーソナルコンピュータ [PC B] により、一定角度間隔（514 pulse/rev）で測定した動的切削抵抗からエンドミル工具の振動変位を推定するためには、動的切削抵抗の測定値を一定時間間隔の測定値と見なしてフーリエ変換（FFT）する必要がある。そこで、本研究では、パーソナルコンピュータ [PC B] による測定値を 8 回転分毎（4096 個）にフーリエ変換（FFT）し、その間は主軸回転速度を一定と見なした。この間に主軸回転速度は変化するが、割合は最大でも約 3% であった。

図 11 は工具送り速度 0.05 mm/rev の場合の動的切削抵抗とエンドミル工具の振動変位の推定値であり、比較のために実測値も示してある。図 11 の上段の図は、図 7 で示した主軸 1 回転毎のエンコーダパルス信号である。中段の図は動的切削抵抗で、実測値は黒い線、推定値は赤い線で示してある。ここで、動的切削抵抗の推定値 $F_x(t)$ は、動的切削抵抗の測定値 $F_{xm}(t)$ のフーリエ変換 $F_{xm}(\omega)$ を式(3)により補正し、得られた $F_x(\omega)$ を逆フーリエ変換して求めた。ここで、 $G_d(\omega)$ は切削動力計の動特性である。得られた推定値 $F_x(t)$ は、切削動力計の動特性による振動成分がほぼなくなっており、赤い線が実際の動的切削抵抗であると推定される。

$$F_x(\omega) = F_{xm}(\omega) / G_d(\omega) \quad (3)$$

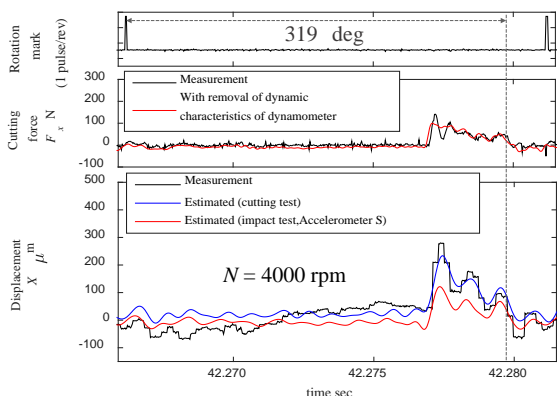


図 11 エンドミル工具の振動変位の推定

図 11 の下段の図は、主軸回転速度 4000 rpm でのエンドミル工具の振動変位の振動変位であり、実測値は黒い線、推定値は青と赤の線で示してある。図中の青い線は、図 10 で示した工具送り速度 0.5 mm/rev の切削実験で得られたエンドミル工具系の振動特性（コンプライアンス） $G(\omega)$ を用い、式(4)で得られた振動変位のスペクトル $X(\omega)$ を逆フーリ

エ変換して求めた振動変位 $X(t)$ であり、黒い線で示した切削中の振動変位とほぼ一致している。また赤い線は、打撃試験で得られたエンドミル工具系の振動特性（コンプライアンス）を用いて推定したエンドミル工具系の振動変位で、切削時の振動振幅の変化の傾向は実測値とほぼ同じであるが、変位は大きく異なった。

$$X(\omega) = G(\omega)F_x(\omega) \quad (4)$$

図 12 は、上段の図に示したように、主軸回転速度を 1500~7450rpm まで連続的に増加させたときの動的切削抵抗とエンドミル工具の振動変位であり、エンドミル工具の切れ刃の方向が加工面に垂直になった時の値、つまり加工誤差を創成するときの値である。横軸は切削長さで、比較のため、加工面形状（高さ）の実測値が緑の線で示してある。中段の図で示した切削長さに対する動的切削抵抗の変化の傾向は、下段に緑の線で示した加工面形状（高さ）の傾向と大きく異なっているが、下段の赤い線で示した、打撃試験で得られたエンドミル工具系の振動特性（コンプライアンス）を用いた振動変位の推定値の切削長さに対する変化の傾向は、緑の線で示した加工面形状（高さ）の傾向とほぼ一致しており、本研究で提案した方法による加工誤差の推定方法が有効であることを示している。一方、下段の青い線で示した、切削実験で得られたエンドミル工具系の振動特性（コンプライアンス）を用いて得られた加工誤差の推定値の変化の傾向は、エンドミル工具の振動変位の実測値から推定した加工誤差の推定値とほぼ一致している。これは、本研究で行った、一定角度間隔の動的切削抵抗のデータをフーリエ変換してスペクトルを求め、得られた振動変位のスペクトルを逆フーリエ変換して振動変位を求める手順が有効であることを示している。しかし、振動変位の実測値による加工誤差の推定値の変化の傾向と加工面の誤差の実測値の変化の傾向は異なっており、原因として外乱による振動変位の測定誤差が大きかったと推定される。

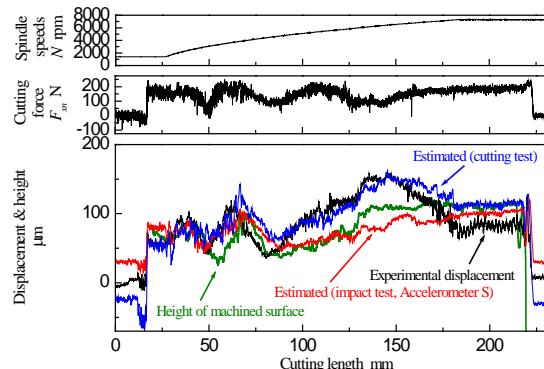


図 12 動的切削抵抗による加工誤差の推定

C. リアルタイム加工誤差補正システム

図 13 は、打撃試験により予め求めたエンドミル工具系の振動特性（コンプライアンス）を用い、切削動力計で測定した動的切削抵抗

からエンドミル工具系の振動変位，つまり加工誤差を推定して補正するシステムである．加工誤差の補正量は，制御用のパーソナルコンピュータからマシニングセンタの制御装置にイーサネットを介して送信した．

図 14 は切削中の動的切削抵抗を測定して加工誤差を推定し，パーソナルコンピュータからマシニングセンタに補正量を送信してテーブルの位置を加工誤差分だけ移動させ，加工誤差をリアルタイムで補正するための手順である．

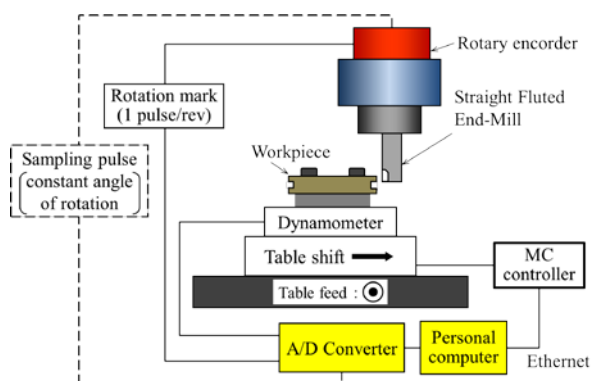


図 13 リアルタイム加工誤差補正システム

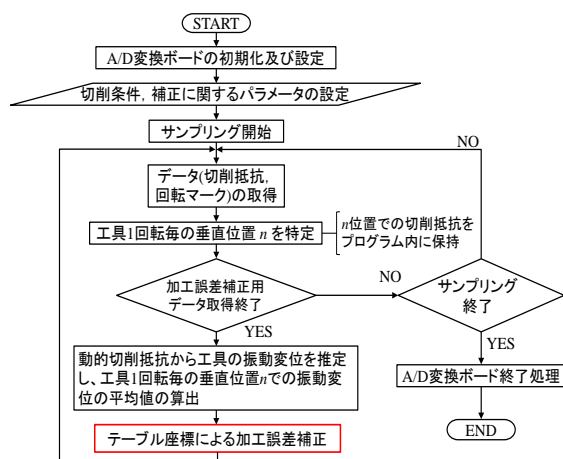


図 14 加工誤差のリアルタイム補正の手順

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

1) K. Shimana, E. Kondo, H. Karashima, M. Nakao and S. Yamashita, An improved approach to real-time compensation of machining error caused by deflection of end mill, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.10, No.2, (2016-5), Paper No.16-00087, 査読有.

2) K. Shimana, E. Kondo, S. Yamashita, Y. Kawano and N. Kawagoishi, Estimation of Machining Error in Ball-End Milling of Hemispherical Surface Based on Measured

Cutting Force, Advanced Materials Research, Vol. 1017, Trans Tech Publications, (2014-9), pp. 692-695, 査読有.

[学会発表] (計 5件)

1) K. Shimana, E. Kondo, T. Chifu, Y. Nishimura and M. Nakao, Real-Time Estimation of Machining Error Caused by Vibrations of End Mill, Procedia CIRP, 7th HPC2016CIRP Conference on High Performance Cutting, (2016-5), Chemnitz (Germany).

2) 千布 匠・近藤英二，エンドミル工具系の振動に起因する加工誤差の推定，2015年度精密工学会九州支部飯塚地方講演会講演論文集 (2015-12)，pp. 31-32，九州工業大学情報工学部 (福岡県飯塚市)．

3) K. Shimana, E. Kondo, H. Karashima, M. Nakao and S. Yamashita, An improved approach to real-time compensation of machining error caused by deflection of end mill, Proc. the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2015-10), D43 (1707), 京都リサーチパーク (京都府京都市)．

4) K. Shimana, E. Kondo, S. Sakoda, S. Yamashita and Y. Kawano, Estimation of Machining Error using Indirect Methods in Ball-End Milling for Inclined Surface, Proceedings of the 15th international Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, (2015-6), pp. 331-332, Leuven (Belgium).

5) E. Kondo, H. Karashima, M. Nakao, K. Shimana, An Improved Approach to Real-Time Compensation of Machining Error Caused by Deflection of Two-Flute End Mill at Cutting Point, Proc. the 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2013-11), pp. 18-23, ホテル松島大観荘(宮城県宮城郡松島町)．

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 英二 (KONDO, Eiji) (鹿児島大学・理工学域工学系・教授)

研究者番号：10183352

(2) 連携研究者

島名 賢児 (SHIMANA, Kenji) (鹿児島工業高専・電子制御工学科・教授)

研究者番号：90353359