



計測融合型加工システムによる工具刃先運動の 転写率の測定*

河野大輔** 松原 厚*** 小池雄介** 山路伊和夫***

Measurement of the Copying Rate of Tool Edge Motions by Using a Measurement-Fused Machining System

Daisuke KONO, Atsushi MATSUBARA, Yusuke KOIKE and Iwao YAMAJI

This study investigates the copying rate of tool motions to workpiece profiles. A machining system is developed to measure tool motions and workpiece profiles during machining processes. Tool motions are measured with a laser displacement sensor and an artifact. Workpiece profiles are measured by scanning type on-machine measurement. Sinusoidal profiles with various amplitudes are machined with a diamond tool to compare tool motions and workpiece profiles. The experimental result shows that the commanded motions and vibrations are copied on workpiece profiles. The ratios between the amplitudes of motions and profiles are calculated in the frequency domain to identify the copying rate. It is verified that the commanded motions are almost perfectly copied under the amplitudes of from 0.5 μm to 4 μm and the developed system is able to identify the copying rate under the amplitudes of from 0.5 μm to 1 μm .

Key words: tool motion, workpiece profile, on-machine measurement, copying rate, measurement-fused machining system

1. 緒 言

近年、光学部品や精密金型の切削加工分野において、数 10～数 100 μm サイズの微細なテクスチャをサブミクロンオーダの形状精度で加工することへの要望が高まっている。このようなテクスチャを加工する方法として、目標加工形状に合わせてダイヤモンド工具を成形し、刃先形状を工作物に転写する加工法がよく用いられる。しかし、ダイヤモンド工具の成形は難しく、時間とコストがかかる。

この問題を解決する方法として、汎用工具に微小な切り込み運動を与えて刃先運動を工作物に転写する加工法がある。この方法では、刃先運動の転写特性が形状精度に影響を与える。工具形状の転写現象に関しては、超硬工具を用いた旋削加工において工具切れ刃あらかの転写性を調査した例や¹⁾、ダイヤモンド工具を用いた溝加工において、溝深さやバリの発生について調査した例がある²³⁾。また、エンドミル加工において、エンドミルの変位と転写形状をミクロンオーダで比較した例が報告されている⁴⁵⁾。しかし、刃先運動の転写現象をサブミクロンオーダで調査することは難しい。これは、刃先運動には指令した運動の他に、機械要素の幾何的誤差や振動などに起因する運動誤差が含まれるからである。したがって、調査のためには刃先運動と工作物形状を加工中に測定することができるシステムが必要である。

形状測定機においては、測定中に機械の運動を測定することで測定値から機械の運動誤差の影響を取り除く方法が研究・実用化されている⁶⁷⁾。これらの方法では機械に設置したアーティファクトを用いてプローブの運動計測を行っている。この方法を加工機に応用し、テーブル運動の真直度の測定と補正を行った例がある⁸⁾。

また、加工機上で工作物の形状測定を行う機上計測に関しても数多くの研究が行われている⁹⁾。これらの研究には大きく分けて、変位計や触針式のプローブなどを用いて工作物表面を走査する方法と¹⁰¹¹⁾、干渉計などを用いて加工機を運動させずに測定する方法がある¹²⁾。前者の方法では加工機の運動誤差と工作物の形状を分離することができない。この問題を解決する方法として、清野らは工作物上の2点の変位と1点の傾斜角を測定する混合法を提案している¹³⁾。これらの方法は刃先運動、工作物形状のそれぞれを測定する場合には有効である。しかし、刃先の運動誤差を考慮して転写現象を調査するためには、工作物形状と加工中の刃先運動を関連付けて測定・比較しなければならない。

本研究では、サブミクロンオーダで工具刃先運動の転写現象を調査するために、走査型の機上計測とアーティファクトを用いた運動計測を組み合わせた加工システムを開発する。機上計測の結果に含まれる加工機の運動誤差は、運動計測の結果を用いて測定結果から除去される。本論文では、開発したシステムにおいて、ダイヤモンド工具を用いた正弦波形状のシェーパ加工を行い、工具刃先運動と工作物形状とをミクロン～サブミクロンオーダで比較して、転写率の測定を行う。

2. 計測融合型の加工システム

2.1 転写率測定のための機能

転写率の測定を行うため、本システムには工作物形状の機上計測機能と運動計測機能をもたせる。機上計測は工作物形状を加工中の運動と関連付けて測定するために必要である。しかし、機上計測の結果には、加工機の運動誤差が含まれる。一方、刃先運動にも加工機の運動誤差が含まれる。

この問題を解決するために、加工・機上計測中は常に加工機の運動計測を行う。機上計測に含まれる誤差は、機上計測における運動計測の結果を用いて補正する。サブミクロンオーダで運動計測を行うために、高分解能の変位計とアーティファクトを用いる。本システムでは、運動と形状の測定における2つの

* 原稿受付 平成 20 年 6 月 25 日

** 学生会員 京都大学大学院 (京都府京都市左京区吉田本町)

*** 正 会 員 京都大学大学院

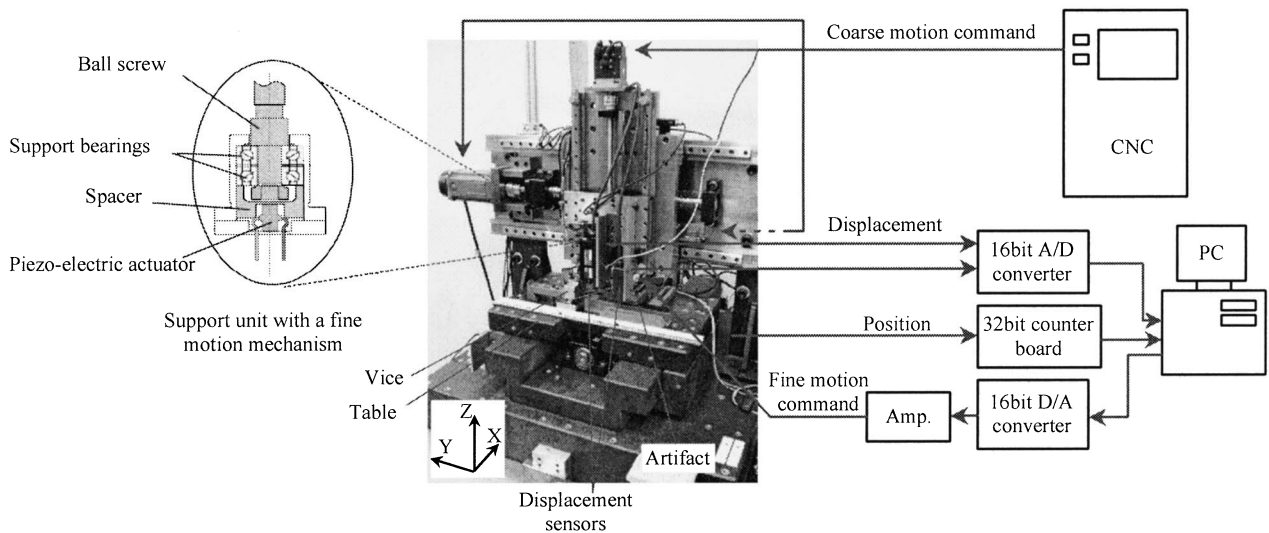


Fig.1 Schematic diagram of the developed system

Table 1 Major specifications of the machine tool

Axis	X	Y	Z
Travel	230 mm	220 mm	200 mm (Coarse) 5 μ m (Fine)
Max. feedrate	10000 mm/min		
Drive type	Ball screw		Ball screw (Coarse)+ Piezo drive (Fine)
Lead of ball screw	10 mm	10 mm	5 mm
Guide way	Aerostatic	Rolling (ball)	
Control type	Full closed	Semi closed	Semi-closed (Coarse) + Piezo control (Fine)
Resolution	500 nm	500 nm	300 nm (Coarse) 10 nm (Fine)

変位計の感度比（動特性も含む）が転写率の測定結果に影響を与える。そこで、これらの特性差を小さくするため、運動計測と機上計測で同じ測定原理の変位計を用いる。

2.2 全体構造と送り系

図1に、本研究で開発したシステムの構成を示す。加工機は直交3軸の送りで構成され、運動と工作物形状の測定のために、2つのレーザ変位計とアーティファクト（オプティカルフラット）を搭載している。送り系には各軸とも高精度ボールねじ+サーボモータ送りを用いている。案内については、X軸は空気静圧案内を用い、Y、Z軸は転がり案内を用いている。X、Y、Z軸は商用CNCを用いて制御されている。

微小な切り込み制御を行うために、Z軸には圧電素子を用いた微動機構を搭載している。この微動機構では、ボールねじ送りで粗動送りを行い、圧電素子でボールねじのサポートベアリングの予圧を変化させる機構により工具位置を微動させる¹⁴⁾。Z軸テーブル位置を分解能10 nmのリニアエンコーダで検出して、CNCとは別のPCを用いて微動制御を行う¹⁵⁾。微動位置決めストロークは5 μ m、位置決め精度の測定結果は両方向位置決めの繰り返し性で0.1 μ mである。XY平面上での位置と微動制御を同期させるために、分解能10 nmのリニアエンコーダを用いてX、Y軸の位置を測定している。表1に加工機の主な仕様を示す。

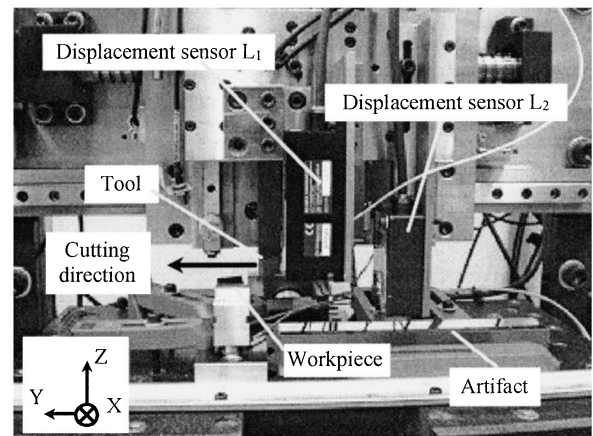


Fig.2 Experimental setup

2.3 計測システムと計測手順

図2に実験のセットアップを示す。本システムでは、Y方向にシェーパ加工を行う場合の刃先運動と工作物形状を測定・比較する。工具はシャンクを用いて刃物台上に設置し、工作物はバイスを用いてテーブル上に設置する。機上計測のためにレーザ変位計L₁（形状測定センサ）を設置している。また、工具刃先と形状測定センサの運動を測定するために、レーザ変位計L₂（運動測定センサ）とオプティカルフラットを設置している。変位計の測定値は、Z軸の微動制御に用いているPCに保存される。また、加工開始点の位置を求めるために、工具には力センサを設置している。

L₁、L₂には同じメーカー製の三角測量型の変位計を用いている。どちらの変位計も分解能は10 nm、測定帯域は50 kHzであり、測定範囲はそれぞれ ± 0.8 mm（形状測定センサ）、 ± 1 mm（運動測定センサ）である。L₂に対するL₁の感度比を調べるために実験を行った。微動機構に正弦波状の指令を与えてZ軸を微小運動させ、Z軸テーブルに設置したL₁とL₂を用いて、X軸テーブル上のオプティカルフラットに対する相対変位を同時に測定した。2つの変位計が同じ運動による変位を測定していることになるため、変位計の出力比が両変位計の感度比となる。加工・計測におけるY軸の運動の影響も考慮するために、測定はY軸の駆動中に行っ

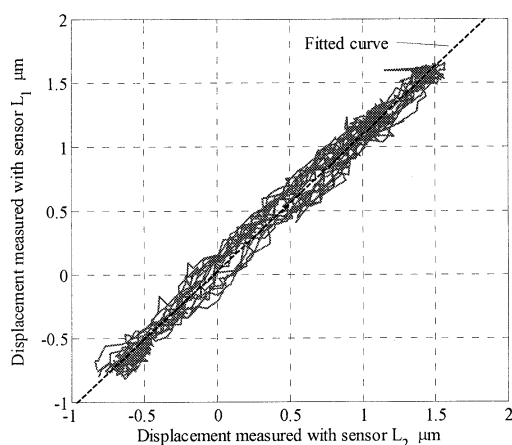


Fig.3 Comparison of displacements measured with sensor L_1 and L_2

た。実験では、Y 軸送り速度：3000 mm/min，微小運動の振幅：2 μm ，微小運動の周波数：5～100 Hz，測定回数：5 回とした。本論文での振幅とは全振幅を意味する。図 3 に L_1 と L_2 の出力をそれぞれ縦軸・横軸にプロットした結果を示す。両者の関係は線形であるが、出力比 (L_1/L_2) はわずかに 1 より大きいことがわかる。最小 2 乗法を用いて出力比を求めたところ 1.07 となり、標準偏差は 0.09 μm となった。

図 4 に工具パスと加工計測のプロセスを示す。実験では図 4 (a) に示すように、加工が終了した地点からさらに切削送りを延長して機上計測を行う。図 4 (b), (c) に示すように、加工中と機上計測中は運動測定センサを用いて刃先・形状測定センサの運動を測定する。

本システムでは、形状測定センサの測定点と工具刃先の位置関係が重要である。Z 方向の位置の差は、Y 方向の運動のみで形状測定を行えるように調整されている。Y 方向の位置の差は、加工開始点と測定開始点の位置の差から求める。X 方向の位置の差が切削ラインの幅と比較して十分小さい場合、同じ切削ラインにおいて運動と形状を測定・比較することができる。しかし、実際にこのような調整を行うことは困難であるため、異なる切削ラインにおける運動と形状を比較する。

2.4 転写率

本論文では、波長 λ の周期成分に関する転写率 $R(\lambda)$ を次式のように定義する。

$$R(\lambda) = \sqrt{\frac{P_p(\lambda)}{P_m(\lambda)}} \quad (1)$$

ここで、 $P_p(\lambda)$ と $P_m(\lambda)$ は、工作物形状と刃先運動のパワースペクトルをそれぞれ表す。 $P_p(\lambda)$ と $P_m(\lambda)$ は工作物形状と刃先運動の測定値をフーリエ変換して求める。

転写率が 1 である場合は、刃先運動が完全に工作物に転写されたことを意味する。一般的には、工具の変形や工作物の弾性回復などにより設定切り込み量に対して実切り込み量が小さくなるが、構成刃先やむしれなどが発生すると設定切り込み量に対して実切り込み量が大きくなると考えられる。本論文では、転写率が 1 に近いと考えられる単結晶ダイヤモンド工具による切削を用いて計測システムの検証を行う。

2.5 角度偏差の影響

本システムでは運動測定センサの測定値に、Y 軸の運動にともなう A 軸方向の角度偏差 $E_A(y)$ と Z 軸の微動にともなう A

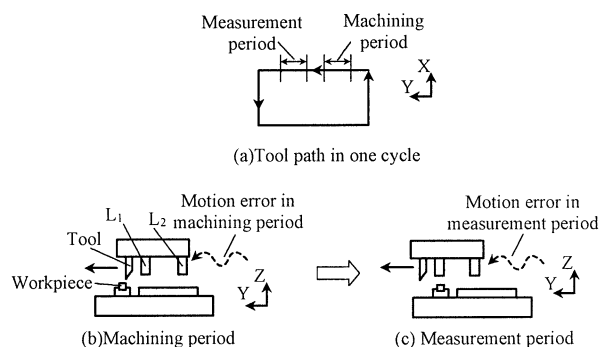


Fig.4 Procedure of machining and measurement

Table 2 Experimental conditions

Cutting tool	Nose radius	0.2 mm
	Rake angle	0°
	Relief angle	7°
Workpiece		Electroless Plated Nickel
Feedrate		3000 mm/min
Pick feed		50 μm
Depth of cut		7 μm
Sinusoidal profile	Amplitude	4, 3.5, 3, 2, 1, 0.5, 0.1 μm
	Wavelength	11.5 mm
Wavelength threshold $\lambda_{\min}$		0.1 mm

軸方向の角度偏差 $E_A(z)$ の影響が含まれる。 $E_A(y)$ に関しては、Y 軸テーブルの中央を回転中心として最大で 0.4 秒程度存在し、波長 10 mm の周期成分が含まれることを確認した。刃先と運動測定センサの Y 方向の距離は約 90 mm，形状測定センサと運動測定センサの距離は約 60 mm であり、これらの距離を用いて角度を変位に換算すると、それぞれ約 0.17 μm ，約 0.12 μm となる。

$E_A(z)$ に関しては、Y 軸の駆動中に振幅 3 μm ，周波数 5～20 Hz の条件で Z 軸の微動機構を駆動し、工具・運動測定センサとほぼ同様の場所に設置した 2 つの変位計を用いてテーブルに対する変位を測定した。その結果、Y 軸の駆動範囲 50 mm において、2 つの変位の差が 0.6 μm 以下であった。

3. 加工計測実験

開発したシステムを用いて、転写率を測定できるか検証するために加工計測実験を行う。

3.1 実験方法

実験では単結晶ダイヤモンド工具を用いて無電解ニッケルを加工する。Z 軸の微動機構に指令を与えて様々な振幅の正弦波形状を加工し、加工中の刃先運動と加工後の工作物形状を測定・比較する。工作物形状は機上計測と表面粗さ測定機を用いて測定し、以下ではそれぞれの測定値を機上測定形状、粗さ計測定形状と呼ぶ。測定値をフーリエ変換し、式 (1) を用いて転写率を求める。1 波長内に複数の測定点を設けて測定誤差を低減するために、波長が $\lambda_{\min}$ より長い周期成分について解析を行う。

表 2 に実験条件を示す。加工と機上計測における送り速度は同様に 3000 mm/min とした。微動制御の制御周期：10 kHz，サンプリング周波数：5 kHz とし、1 波長内に 10 点以上の測定点が含まれるように $\lambda_{\min}$ ：0.1 mm とした。また、機上計測では 5 回、表面粗さ測定機を用いた測定では 3 回測定を行った。

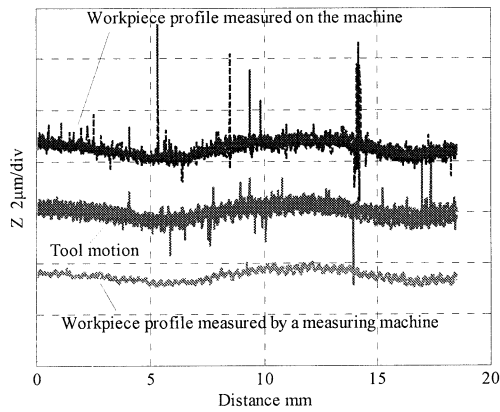


Fig.5 Comparison of tool motions and workpiece profiles with the commanded amplitude of $0.5\ \mu\text{m}$

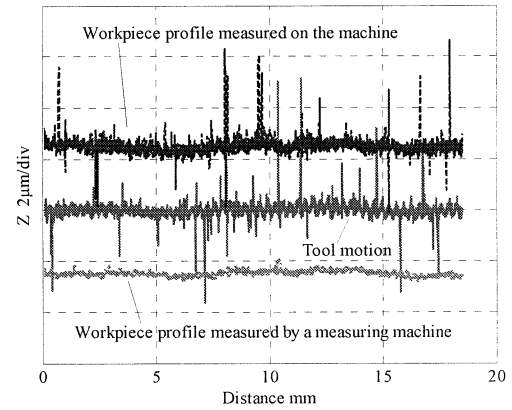


Fig.7 Comparison of tool motions and workpiece profiles with the commanded amplitude of $0.1\ \mu\text{m}$

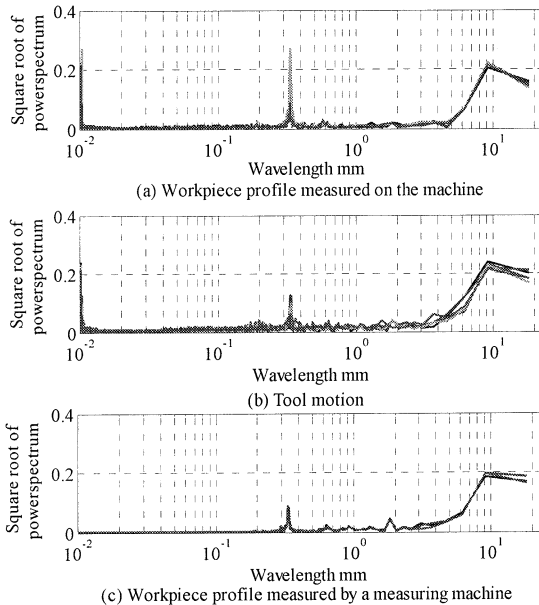


Fig.6 Powerspectrums of tool motions and workpiece profiles with the commanded amplitude of $0.5\ \mu\text{m}$

3.2 実験結果

図5, 6に, 正弦波の指令振幅を $0.5\ \mu\text{m}$ とした場合の, 刃先運動と工作物形状の測定値とそのパワースペクトルの平方根をそれぞれ示す。図5に示す刃先運動には, ①波長約 $11\ \text{mm}$, 振幅約 $0.5\ \mu\text{m}$ の周期変動と, ②波長約 $0.3\ \text{mm}$, 振幅 $0.5\ \mu\text{m}$ の周期変動, ③大きさ $0.5\sim 4\ \mu\text{m}$ の突起状の変動が確認できる。

波長約 $11\ \text{mm}$ の周期変動の波長, 振幅は Z 軸に与えた刃先運動の指令と対応する。また, この変動は図5に示す機上測定形状と粗さ計測定形状においても確認できる。さらに, 図6(a), (b), (c)に示すどの結果においても, 波長が $10\ \text{mm}$ である付近にピークが見られる。以上より, 指令した刃先運動が工作物に転写されているといえる。

波長約 $0.3\ \text{mm}$ の周期変動は図5に示す機上測定形状と粗さ計測定形状において確認しがたいが, 図6(b), (c)では波長が $0.3\ \text{mm}$ である付近にピークが見られる。この波長 λ と送り速度 v を用いて周波数 $f = v/(\lambda \times 60)$ を計算すると, 約 167Hz となる。実験モード解析により, この加工機において 163Hz 付近に Y 軸のたわみモードが存在することがわかっているため, 加工機の振動が転写されているといえる。

突起状の変動は図5に示す機上測定形状には確認できるが,

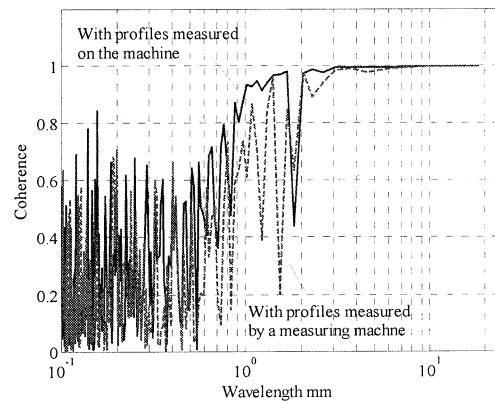


Fig.8 Comparison of the coherences between tool motions and workpiece profiles with the commanded amplitude of $4\ \mu\text{m}$

粗さ計測定形状においては確認できない。よって, これはレーザ変位計のノイズであると考えられる。

図7に指令振幅を $0.1\ \mu\text{m}$ とした場合の, 刃先運動と工作物形状を測定した結果を示す。図5と図7を比較すると, 波長約 $0.3\ \text{mm}$ の周期変動はどちらの結果においてもほぼ同様に転写されていることがわかる。この変動に関しては, 指令振幅を $4, 3.5, 3, 2, 1\ \mu\text{m}$ とした結果においても同様の結果が確認できた。しかし, 図7では波長約 $11\ \text{mm}$ の周期変動の確認が難しい。

3.3 転写率の計算

図8, 9に, 指令振幅を $4, 0.1\ \mu\text{m}$ とした場合の, 刃先運動と粗さ計測定形状, 及び刃先運動と機上測定形状のコヒーレンスを求めた結果をそれぞれ示す。図8に示すどちらの結果においても, 波長が $2\ \text{mm}$ 以上である領域ではコヒーレンスがほぼ 1 であるが, 波長が $2\ \text{mm}$ より短い領域ではコヒーレンスが減少していることがわかる。よって, 指令した刃先運動に関しては転写率を求めることができるが, 加工機の振動に関しては転写率を求めることが困難であるといえる。また, 波長が $0.5\sim 2\ \text{mm}$ である領域で, 機上測定形状を用いた結果の方が, 粗さ計測定形状を用いた結果よりもコヒーレンスが高いことがわかる。これは機上計測と運動計測における測定器の特性差が小さいためである。

図8と図9を比較すると, 図9では波長が $4\ \text{mm}$ より短い領域でコヒーレンスが減少していることがわかる。また, 波長が $4\ \text{mm}$ 以上の領域であってもコヒーレンスは 0.9 程度である。これは指令振幅が小さいためである。

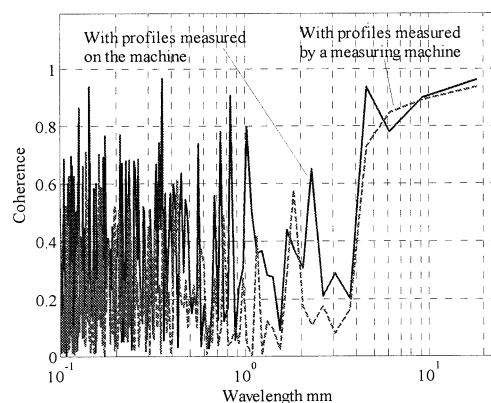


Fig.9 Comparison of the coherences between tool motions and workpiece profiles with the commanded amplitude of 0.1 μm

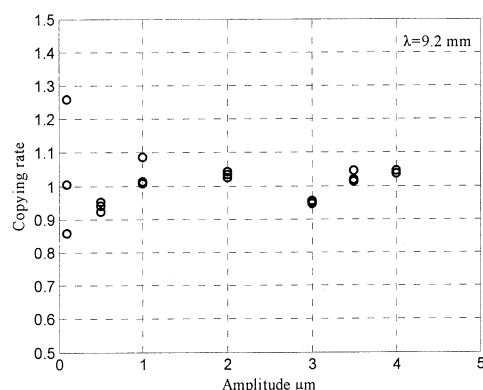


Fig.10 Relationship between amplitude and copying rate with workpiece profiles measured by a measuring machine

図 10 に、波長約 10 mm の周期成分について、刃先運動と粗さ計測定形状から転写率を求めた結果を示す。指令振幅を 0.5~4 μm とした場合は、転写率が 1 ± 0.1 の範囲内であることがわかる。また、指令振幅を 0.1 μm とした場合は、他の指令振幅での結果と比較して転写率のばらつきが大きいことがわかる。これは刃先運動の再現性が 0.5 μm 程度であるためである。

図 11 に、刃先運動と机上測定形状から転写率を求めた結果を示す。ただし、結果は 2.3 節で調べた変位計の出力比を用いて補正している。指令振幅を 0.5~1 μm とした場合は、転写率が 1 ± 0.1 の範囲内であることがわかる。しかし、指令振幅を 2 μm 以上とした場合は、指令振幅の増加にともなって転写率が 1 より小さく測定されている。粗さ計測定形状から求めた結果では 1 に近い転写率が、このように小さく測定される原因は机上形状測定における測定誤差によるものと考えられる。特に、加工表面性状のレーザ測定への影響が考えられるが、現時点では明確にわかっていない。また、指令振幅を 0.1 μm とした場合は、転写率のばらつきが大きくなるが、これは変位計自体の測定誤差の影響が大きくなるためと考えられる。

4. 結 言

シェーパ加工において、刃先運動と工作物形状を加工中に測定することができるシステムを開発した。システムを用いた加工計測実験により、転写率の測定を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 走査型の机上計測とアーティファクトを用いた運動計測を組み合わせた加工計測融合型の加工システム

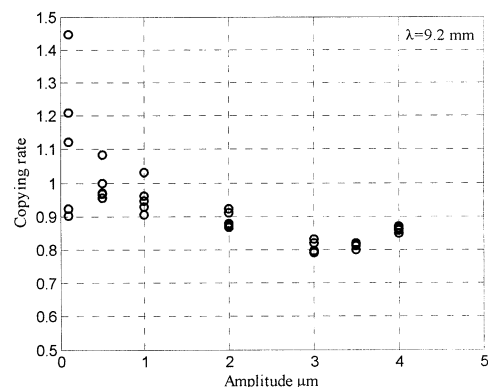


Fig.11 Relationship between amplitude and copying rate with workpiece profiles measured on the machine

を開発した。

- (2) 振幅 0.5~4 μm 、波長 11.5 mm の正弦波形状の加工において、工作物形状の測定に表面粗さ測定機を用いた場合の転写率は、ほぼ 1 となった。つまり、指令した刃先運動はほぼ完全に工作物に転写された。
- (3) 工作物形状の測定に机上に設置したレーザ変位計を用いた場合、正弦波形状加工の指令振幅 0.5~1 μm では、転写率は 1 ± 0.1 の範囲内であったが、指令振幅 2 μm 以上では指令振幅の増加にともなって転写率が 1 より小さく測定された。これは机上形状測定における測定誤差の影響と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 森 昌幹, 久米原宏之: 工具切れ刃あらしの加工面への転写性, 精密機械, **40**, 8 (1974) 633.
- 2) 小泉達洋, 今泉健一, 榊田正美, 矢沢孝哲: 微細溝加工の転写精度 (1) —円錐および角錐ダイヤモンド工具によるグルーピング—, 日本機械学会北陸信越支部第 41 期総会・講演論文集, 富山, (2004) 227.
- 3) 今泉健一, 小泉達洋, 榊田正美: 微細溝加工の転写精度 (2) —ダイヤモンド工具を用いたフライカッティング—, 日本機械学会北陸信越支部第 41 期総会・講演論文集, 富山, (2004) 229.
- 4) 藤井義也, 岩部洋育, 鈴木雅晴: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係 (第 1 報) —加工誤差生成機構—, 精密機械, **43**, 7 (1977) 807.
- 5) 岩部洋育, 藤井義也: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係 (第 2 報) —底面の加工誤差生成機構—, 精密工学会誌, **54**, 5 (1988) 136.
- 6) J.B.Bryan and D.L.Carter: Design of a new error-corrected co-ordinate measuring machine, Precision Engineering, **1**, 3 (1979) 125.
- 7) 吉住恵一, 久保圭司, 竹内博之, 半田宏治, 葛西孝昭: ナノメートルを測る原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機, 精密工学会誌, **68**, 3 (2002) 361.
- 8) 小泉 晋: 超精密機械工学, 前田印刷株式会社, (1995) 146.
- 9) M. Shiraiishi: Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes—Part 2: In-process techniques for workpieces, Precision Engineering, **11**, 1 (1989) 27.
- 10) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 梶 章宏, 喜田義宏, 垣野義昭: 自由曲面のポイント計測に適したレーザスタイラスの机上走査制御, 精密工学会誌, **69**, (2003) 1423.
- 11) 鈴木 弘, 新野康生, 遠山退三, 平野 稔, 難波義治: オンマシン計測による斜入射 X 線ミラーの超精密研削, 精密工学会誌, **61**, 9 (1995) 1285.
- 12) 野村 俊: 加工机上における大鏡面の干渉測定技術, 精密工学会誌, **58**, 5 (1992) 75.
- 13) 清野 慧, 高 偉, 鎌田 治: 鏡面形状のオン・マシン測定に関する研究, 精密工学会誌, **58**, 2 (1992) 247.
- 14) A. Matsubara, T. Fujita, D. Kono, N. Tanaka and Y. Watanabe: Nano Positioning Drive with Piezoelectric Actuator Integrated into Support Bearing Unit of Ball Screw, 35th International MATADOR Conference, National Taiwan University, Taipei, (2007) 323.
- 15) D.Kono, A. Matsubara, I.Yamaji and T. Fujita: High-precision machining by measurement and compensation of motion error, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **48**, 10 (2008) 1103.