

インプロセス計測による微細溝の制御加工

矢澤孝哲*・田邊真也**・服部陽介***・扇谷保彦*・小島龍広†

Controlled microgrooving by in-process measurement

by

Takanori YAZAWA*, Shinya TANABE**, Yousuke HATTORI** Yasuhiko OGIYA*
and Tatsuhiko KOJIMA†

Producing micro texture on surface, it's possible to give various characteristics of functions. In the case of micro grooving using a diamond cutting tool, form accuracy is determined by the so-called copy principle, where a copy is made of the accuracy of the machine tool. In this report, we try improvement of grooving accuracy on an ordinary machine tool by in-process measurement and control, though it is important to improve the accuracy and stiffness of machine tool and the machining conditions. In this study, with aim of accuracy improvement, this method is applied to micro grooving using single crystal diamond tool on an ordinary machine tool. First, we propose micro grooving without environmental control and ultra-precision machine tool by CCRS. Second, in-process measurement and control unit, which is composed of micro tool servo, optical gap sensor, control computer and attachment jig for reference surface and workpiece, are designed and manufactured. Third, characteristics of control system are evaluated. Finally, this unit and system were applied to an ordinary lateral milling machine without NC control and a profile grinder with NC control, and grooving surfaces are compared with and without in-process control.

Key words: Micro grooving, In-process measurement, In-process control

1. 緒言

表面に微細な溝やディンプルといった凹凸を加工することで、機能を付与することができる。しかし、これら微細凹凸の3次元形状およびパターン(以下、テクスチャ形状と呼ぶ)と表面機能の相関関係は難しく、表面機能創製のための微細加工および装置に関する研究が行われている^{1)~6)}。本論文では、微細凹凸による表面機能設計のための「テクスチャ形状と表面機能の相関把握」を最終ターゲットとし、所望の3次元

形状を有する微細溝の加工を対象としている。この微細溝は、回折格子⁷⁾、マイクロフレネルレンズ、導光板、プリズムシート、リブレット⁸⁾⁹⁾等への利用や、HDD回転体の動圧軸受け、萌芽細胞の成長方向制御に効果があると報告されている。現在、微細溝の加工は①半導体プロセスに類したプロセス加工②それ以外の加工に分類することができる。①は、半導体素子の発展からその応用技術として発展し、2.5次元までの比較的

平成20年6月30日受理

* 機械システム工学科 (Department of Mechanical System Engineering)

** 生産科学研究科機械システム工学専攻 (Department of Mechanical System Engineering)

*** 教育研究支援部 (Department of)

単純な形状加工の量産加工を得意としている。しかし、加工形状を直接管理できず微細な3次元形状を得ることは難しい、多品種・少量生産にも不向きである、といった問題点がある。

一方②は、工具形状を転写して加工するため、3次元の微細形状を加工するのが容易であり、量産にはレプリカプロセス(樹脂成形)で、少量生産にはダイレクト加工で、容易に対応できる。

この加工方法はさらに機械加工(研削加工、切削加工)と塑性加工^{10)~12)}に分類できるが、研削加工では砥石の高精度成形が難しく加工できる微細溝形状や寸法に制限が多いこと、塑性加工では微細溝周辺部の盛り上がりなど工具転写精度が劣化しやすいことから、本研究では、比較的自由的な形状や寸法の微細溝を高精度に加工できる切削加工を選択した。

切削加工による微細溝加工は、回転工具を用いるミーリング³⁾と、総型工具を走査させるシェーピング⁶⁾とに分類できる。どちらの加工法も「超精密切削」と呼ばれ、加工精度は工作機械の母性原理に依存するため、工作機械各要素自体の高精度化のみならず、運動精度、組立精度、その精度保障のための環境(温湿度、振動等)管理が非常に厳しくなり、装置の大型化やコスト面で大きな問題となっている。以上の状況を鑑み本研究では、シェーピング加工による微細溝加工に対し、超精密切削に用いるには加工精度が不十分な汎用工作機械上に、単結晶ダイヤモンド工具を取り付けた微小切込み装置とインプロセス計測を行うためのセンサを一体化して設置し、インプロセス計測制御加工¹³⁾¹⁴⁾を行い、工作機械が本来持つ加工精度以上の精度で加工することを目的とする。

2. 微細溝の制御加工

2.1 基準面参照制御加工法

汎用の工作機械で微細溝を加工する方法として、インプロセス計測を用いた基準面参照制御加工法¹³⁾(以下、CCRS)の使用を提案する。一般に、切削加工において加工精度を決定しているのは工具と工作物との相対位置である。まず、工作機上に取り付けられたジグに基準面を取り付け、工作機本体と基準面および工作物を一体とする。また、工具台には微小切込み工具台(以下、MTS)と非接触光学式変位計(以下、Gap sensor)をAbbeの原理を満たすように一直線上に配置し、一体として保持する。これにより、HIPOSSで計測した基準面までの相対変位は、工具と工作物との相対変位に等しくなる。工具と工作物との相対変位に計測値を目標値としてフィードバックさせ、その相対変位だけ工

具の微小切込み量をMTSに内蔵してある積層圧電素子(以下、PZT)で調整しながら制御加工することで、工具台の誤差運動を補正しながら制御加工することができ、加工精度が向上する。図1にCCRSの原理図を示す。

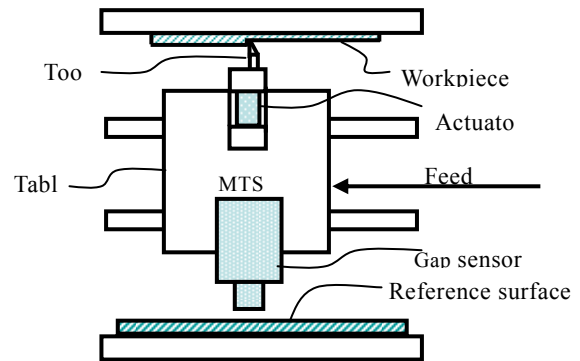


Fig.1 Principle of CCRS

2.3 インプロセス計測・制御加工による補正効果

インプロセス計測・制御加工を用いた本加工法の有効性を検証するために、本項ではシミュレーションによる評価を行う。図2に制御システムのブロック線図を示す。図中、Gap sensorにK-HIPOSSを使用し、MTSとこのK-HIPOSSによる制御ループを形成している。また、詳細は後述するが、MTSに使用しているPZTアクチュエータのヒステリシス補償のため、PZTとHIPOSSからなるループを形成している、このため、K-HIPOSSからPCに入力された目標値とHIPOSSから入力された現在の状態量を元にI-PD制御を行い、PZTの切り込み量を決定している。

シミュレーションは以下の仮定の下に行った

- ①工具と工作物の相対運動が加工面に完全に転写される。
- ②MTSと変位計は同じ動きをする。
- ③MTSは剛性が無限大で、制御量通り変位し、応答周波数は無限大である。
- ④変位計はドリフトがなく、応答周波数は無限大とする。
- ⑤計測結果は全て正弦波で表すことができ、応答性は正弦波に対してのみ確認する。

ここで、シミュレーションにおいては、目標値入力に正弦波を使用して行った。これは、フーリエ展開の原理により一般性がある。

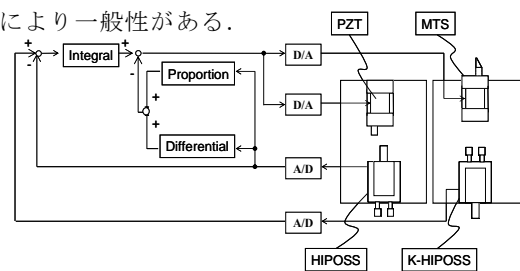


Fig.2 Block diagram of CCRS

シミュレーション結果の波形例を表1と図3に示す．ここで、 λ は誤差波長、 T_s はサンプリング周期である．実際の加工では、誤差波長 λ を特定することはできてもコントロールすることは難しい、そこで、ここでは誤差波形の波長とサンプリング間隔の比(λ/T_s)に対する残留形状誤差率 M (制御時の加工面形状振幅/非制御時の加工面形状振幅)により一般化し、評価した．結果より、 λ/T_s が約15の地点を境に、それ以下では制御により M が増加、以上では減少していることがわかる．これは、誤差運動に対して制御信号がサンプリング周期分遅れて追従しているために発生した目標値と制御信号間の位相差によるものである．したがって、加工に対する要求仕様と工作機械自体の誤差振幅から、十分な補正効果が得られるサンプリング周期を選択する必要がある．





3. 汎用工作機械への適応と加工事例

本章では、通常の加工工場に設置されている汎用工作機械に、CCRS を適用した場合について検討報告する．

3.1 汎用工作機械

本研究では汎用横フライス盤を使用した．仕様を表2に、CCRS の汎用横フライス盤への適用概要を図4に示す．

Table1 Example of sine wave simulation results

	Position	λ/T_s	Image	M
Non-controlled	-	-		1
Controlled	A	5		1.52
	B	20		0.75
	C	200		0.08

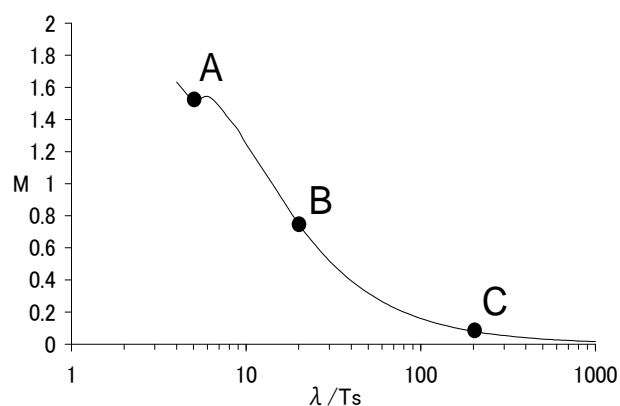


Table2 Specifications of ordinary milling machine

Model name [Ⓐ]		Strong mill [Ⓐ]
Company [Ⓐ]		HOUQA industrial KK [Ⓐ]
Setting date [Ⓐ]		1978,3,31 [Ⓐ]
Feeding dimention [Ⓐ]	X-direction [Ⓐ]	710(mm) [Ⓐ]
	Y-direction [Ⓐ]	300(mm) [Ⓐ]
	Z-direction [Ⓐ]	410(mm) [Ⓐ]

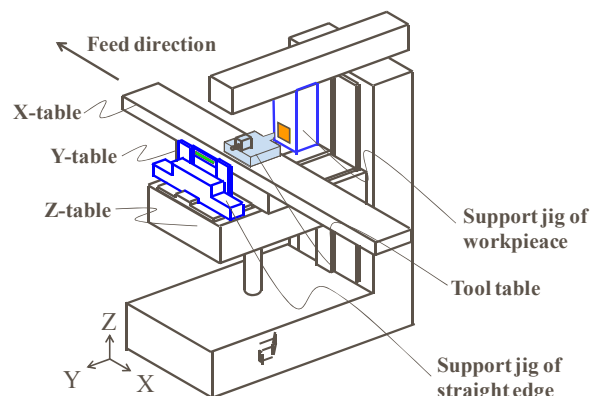


Fig.4 Schema of experimental setup for CCRS on ordinary milling machine

3.2 微小切入装置と制御

微小切入装置 MTS の構造を図5に示す．前述のように、MTS は、MTS に内蔵しているアクチュエータである PZT のヒステリシス特性を解消するために閉ループ制御としている．しかし、PZT の状態量検出による MTS の大型化、工作機械より発生するノイズの影響が問題になるため、本研究では図2に示すように2つの PZT を用いている．ここで、超精密切削において発生する加工力は g 単位と微小であり、加工に使用しない PZT の変位を状態量としても問題がないと考えられる．そこで、別の同様の仕様および条件下にあるもう一方の PZT によって変位量を計測し、それを制御量としてフィードバックループを形成した．

制御方法は I-PD 制御とする．この方法は目標値入力に対しては I 動作、外乱に対しては PD 動作として働くため、目標値入力に対してはオフセットがなく、外乱に対して適当に対応することができる．しかし、PID 制御に比べ目標値入力に対して微分動作が付加されない

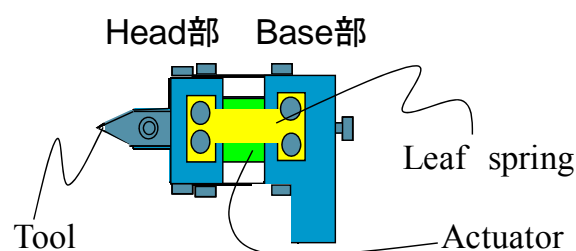


Fig.5 Schema of MTS

め、制御速度が遅くなる。このため、真の追従制御には向いていないが、目標値入力に対してオーバーシュートを抑えるような場合には適している方法である。性能評価結果を図6に示す。

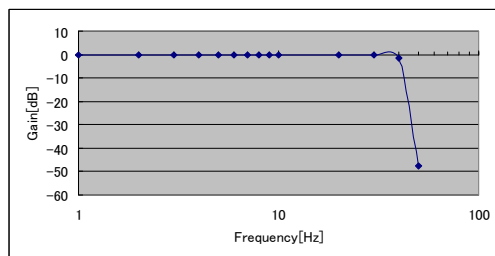
3.3 そのほかの構成要素

変位計には非接触光学式変位計、HIPOSS, K-HIPOSSを使用している。仕様を表3に示す。

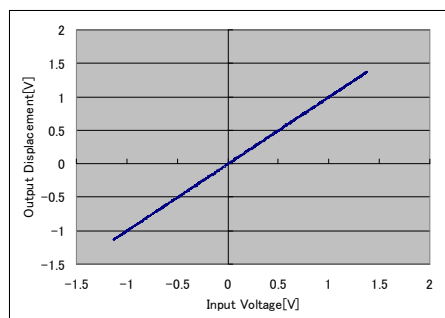
基準面には真直度 63nm 以下(150mm)のストレートエッジを使用した。

3.4 実測データによるシミュレーション

以上の構成要素を用いて、本システムの有効性を確認するために、工作機械を実際の加工条件で動かした際に基準面を変位計が参照して得られた信号を元にシミュレーションを行った。測定条件を表4に、その結果を図7に示す。ここで表面粗さの考慮し、送り速度は、使用した横フライス盤の最大の送り速度で行っている。(a)は非制御、(b)は制御を行った場合の工具運動軌跡であり、加工面形状に相当する。この結果から、非制御ではP-V約11 μm だった誤差運動の幅が制御ではP-V約3 μm に減少しているのがわかる。また、低い空間周波数の誤差成分は制御により補正されているが、図2の結果と同様に高い空間周波数の誤差成分に関しては制御ができていない。サンプリング周波数、送り速度から計算した λ/T_s と、本結果および正弦波シミュレーションにより求めたMの関係を表5に示す。



(a) Frequency response



(b) Relationship between input voltage and displacement

Fig.6 Characteristics of MTS with control

これより、正弦波シミュレーションと本シミュレーション結果が約10%程度に収まっていることがわかる。以上より、2章で行った正弦波シミュレーションの有効性が確認できたとともに、本システムで加工実験を行う場合、サンプリング周波数およびシステムの応答周波数を5kHz以上にする必要があることになる。

3.4 溝加工事例

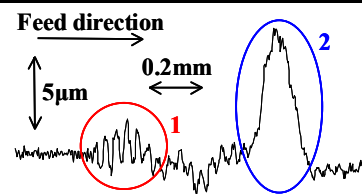
以上に基づき、実際に微細溝加工実験を行った。実験条件を表6に、加工結果を図7に示す。なお、使用した装置の制限から、サンプリング周波数は1kHzである。図7は非制御時と制御時の加工後の溝底形状であり、非制御加工では $R_z=0.382\mu\text{m}$ が、制御加工では $R_z=0.252\mu\text{m}$ となり0.130 μm の改善が見られた。しかし、シミュレーションから予測されたとおり、高い周波数の誤差成分に関しては制御後も残留している。ここで、高い周波数の誤差成分を補正するためには、送り速度を遅くすることが考えられる。本研究で用いたシェービング加工では、送り速度と切削速度が等しくなる。超精密切削加工において、本実験における切削速度の領域では、切削速度が速いほど表面粗さは向上する。したがって、送り速度を遅くすると、運動に起因する誤差を補正できるが、表面粗さが劣化するトレードオフが発生する。このため、現状の装置で今以上の精度を得るためには、高い切削速度を維持しつつ、低送り速度での加工法を考案することが必要である。

Table3 Specifications of HIPOSS and K-HIPOSS

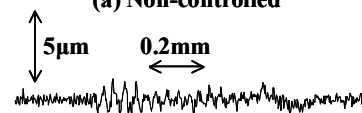
	HIPOSS	K-HIPOSS
Limit of resolution [nm]	0.2	0.3
Dynamic range [μm]	2	5
Response frequency [kHz]	DC~10	DC~10
Working distance [mm]	0.6	8.1
Spot diameter [μm]	1.6	3
Size [mm]	51×38×86	62×45×132

Table 4 Measurement conditions of table motion error

Feed rate [mm/min]	195
sampling rate [kHz]	1



(a) Non-controlled



(b) Controlled

Fig.7 Simulation results with / without control

4. 結言

汎用工作機械にインプロセス計測・制御加工法を適用し、工作機械の精度以上の加工精度で微細溝加工をシェービングにより行うことを目的として、その原理を提案し、シミュレーションおよび加工実験を行った。

- (1) 正弦波シミュレーションにより本提案の加工法の有効性を確認し、サンプリング周期と誤差波長の関係を見出した。
- (2) 実際に測定したデータに基づいたシミュレーションにより、正弦波シミュレーションの有効性を確認した。
- (3) 装置を試作し、その装置により加工実験を行った結果、 R_z で $0.130\mu\text{m}$ の改善が確認できた。

以上より、本システムの有効性を確認すると共に、今後は、現状の装置でより高精度加工を実現するために、高い切削速度を維持しつつ、低送り速度での加工法を考案することが必要である。

謝辞：卒業生の長岡智治君、川上康一君、保田大地君に多大なる協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 太田稔, 高嶋和彦, 上原義, 榊田正美, 矢澤孝哲, 斎藤博: マイクロ・ナノフォーミング装置の開発, 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p385-386, 2006
- 2) 太田稔, 高嶋和彦, 上原義貴, 榊田正美, 矢澤孝哲; マイクロ・ナノフォーミング技術の開発(第2報) 高出力型マイクロ・ナノフォーミング装置の開発, 2007年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集, pp.895-896, 2007
- 3) 矢澤孝哲, 榊田正美, 石橋成海, 東海林幸一, 横山和宏; 球状ディンプルテクスチャの精密自公転ミールリングの研究(第1報) - 自公転ミールリング機構の開発 -, 精密工学会誌, Vol.73, No.9, pp.1030-1034, 2007
- 4) 黒沼聡, 榊田正美, 矢澤孝哲; ディンプル形成装置の試作とテクスチャ形成, 2001年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p162, 2001
- 5) 赤澤晴樹, 榊田正美, 矢澤孝哲; サブミクロンギャップを流れる流体の流れ特性, 2004年精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, p151-152, 2004
- 6) 前田真児, 竹内芳美, 沢田潔, 河合知彦, 佐田登志夫; 非回転工具を用いた超精密マイクロ溝の創成, 精密工学会誌, 66巻9号, 2000, pp1456-1460
- 7) 沢田潔, 河合知彦, 竹内芳美, 佐田登志夫: 超精密マ

イクロ溝加工の研究(V形状格子溝の製作), 日本機械学会論文集(C編), 64-627(1998)4440

8倉野重光; 航走体の流体抵抗と自己放射雑音レベルを同時に低減する船殻用多層構造材料及びその方法, 特許第3772216号, 2004

9) Hoyt, J.W., Drag ; Reduction by Polymers and Surfactants, AIAA Progress an Astronautics and Aeronautics vol.123 (1990), 413-432.

10) T.YAZAWA, M.MASUDA, N.ISHIBASHI, N.TAKAI; Form Accuracy in Multi Grooving Using Burnishing Tool, Advances in Abrasive Technology III 2000, pp587-591

11) 森弘樹, 榊田正美, 矢澤孝哲, 小泉達洋; 微小球状工具により形成されたディンプル/溝の形状精度, 2002年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p381, 2002

12) 小泉達洋, 今泉健一, 榊田正美, 矢澤孝哲; 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ビング, 日本機械学会北陸信越支部第41期総会・講演会講演論文集, p277-278

13) 矢澤孝哲, 山崎俊文, 河野嗣男: インプロセス計測加工精度補償の研究(第7報)-非制御中心部の制御加工と全体面への展開-, 精密工学会誌, 64巻11号, 1998, pp.1689-1693

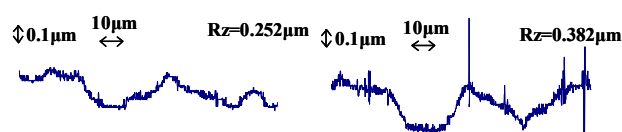
14) 矢澤孝哲, 河野嗣男, 宇田豊, 大野直弘: インプロセス計測加工精度補償の研究(第6報)-正面切削における制御開始位置の影響と変位計配置位置の影響-, 精密工学会誌, 64巻12号, 1998, pp.1806-1810

Table5 Composition of simulation results sine wave on measurements

Position	λ / T_s	M	
		Sine wave	Measurement
1	100	0.75	0.65
2	20	0.21	0.19

Table6 Experimental condions

Feed rate [mm/min]	800
Depth of cut [μm]	3
Lubricant	Dry
Material	Brass
Measurement equipment	Laser microscope (KEYENCE VK-8550)



(a) Controlled cutting (b) Non-controlled cutting

Fig.8 Results of grooving with / without control