



H. Sawano

ナノ加工による金型の高精度化に関する研究

澤野 宏*

1. 緒言

高度情報化社会の到来に伴い、情報通信、エレクトロニクス、メカトロニクス分野を中心に各種製品の高性能化への要求が一段と高まっている。その結果、光学素子のような精密部品にはナノメートルオーダーの形状精度が要求されている。これらの部品を製作するために用いる金型は製品の品質やコストを決める重要な要素であり、金型の高精度化、低コスト化が求められている。

金型加工の高精度化、高能率化を実現する有用な方法として超精密切削加工があげられる。近年、加工の微細化、高精度化により、切削加工は新たなマイクロ・ナノ超精密切削加工へと展開しており^{1),2)}、ナノメートルオーダーの加工精度を持つ金型の製作が実現可能であると考えられる。

一方、超精密切削加工により、金型の高精度化、低コスト化を実現するためには、以下の課題を解決する必要がある。

1) 広い加工領域と高い加工精度を同時に実現する超精密切削加工システムの実現

これまで、ナノメートルオーダーの加工要求を達成するために開発された切削加工システムは、基本的に狭い加工領域を対象としており、広い加工領域とナノメートルオーダーの加工精度を同時に実現する切削加工システムは少ない。しかしながら、今後の金型部品の高性能化に対応するためには、100mm オーダーの加工領域に対してナノメートルオーダーの加工精度で加工可能な超精密切削加工システムが必要である。

2) 超精密切削加工におけるインプロセス加工状態認識技術の確立

加工の高精度化、高能率化を達成するためには、加工状態をインプロセスで認識する技術が必要不可欠である。一般的な切削加工を対象としたインプロセスでの加工状態認識技術として、センサフュージョンを適用した研究例などがあげられる^{3),4)}。一方で、超精密切削加工を対象とした加工状態認識の研究は少ない。

超精密切削加工では一般的な切削加工と比較して、切削力や切削熱など加工状態を認識するのに有用な物理量の変化が小さく、さらに複数の熱的および動的挙動が複雑に

相互作用をおよぼすため、正確な加工状態の認識が困難である。したがって、超精密切削加工において加工状態認識技術を確立するためには、加工に関わる熱的および動的挙動を効果的に認識する方法が必要である。

3) 超精密切削加工におけるオンマシン形状計測技術の実現

加工品質の向上のためには加工後の形状計測と所望の形状が得られなかった際の修正加工が必須である。しかしながら、加工後、一度工作物を加工システムから取り外して計測システムで計測をおこなうという従来の方法では、修正加工をおこなう際に工作物を加工システムに再度設置する必要があり、取り付け誤差の原因となる。そのため、超精密切削加工の高精度化、低コスト化のためには、超精密切削加工システム上で形状計測が可能なオンマシン形状計測技術が必要不可欠である。

本研究では、まず、誤差発生要因を排除することによって、100mm オーダーの加工領域とナノメートルオーダーの加工精度を同時に実現可能な新しい設計概念に基づく超精密切削加工システムを開発する。次に、超精密切削加工におけるインプロセス加工状態認識技術を確立するため、加工状態が工具を通じてエアスピンドルにおける熱的および動的挙動を引き起こすことに着目し、状態因子ネットワークを用いてエアスピンドルの駆動状態から加工状態を推定する状態認識方法を提案する。また、光学プローブを用いたオンマシン形状計測システムを開発する。具体的には、計測試料までの距離検出方法として非点収差法を用い、試料表面の微小な凹凸によって生じる反射むらを低減する手法を提案することで、非接触で高精度な形状計測が可能な形状計測システムを実現する。

さらに、開発した加工システムを用いて実際に加工実験をおこない、本研究の金型の精度向上に対する有用性を検証する。

2. 広域ナノパターンジェネレータ

2.1 広域ナノパターンジェネレータの概要

本研究で提案する広域ナノパターンジェネレータの構造概念を図1に示す。XY テーブルシステムは空気静圧

* 明治大学理工学部機械工学科 専任講師

軸受およびボイスコイルモータ (VCM) により、非接触状態で支持・駆動される。さらに、Z 軸位置決めシステムは空気静圧軸受および VCM による非接触支持・駆動に加え、真空シリンダ方式による重力補償機構により、非接触で重力の影響を補償している。以上の構成により、完全非接触での 3 軸支持・駆動が可能であり、接触面の摩擦に起因する非線形要素を排除することが可能である。また、熱的・力学的安定性を付与するため、主要構造に比剛性が高く低熱膨張であるセラミックスを適用すると共に、各要素を軸対称になるように配置して熱変形および不要な構造振動を低減している。さらに、これらの構造体は恒温エンクロージャ内に設置し、アクティブ除振システムを用いて支持し、周辺環境からシステムへの外乱の伝達を抑制している。

本研究で開発した広域ナノパターンジェネレータを図 2 に示す^{5),6)}。XY テーブルの駆動要素に VCM (微動機構) とリニアモータ (粗動機構) を組合せた粗微動機構を用いることにより、180mm の駆動範囲と 1nm の位置決め分解能を同時に実現している^{7),8)}。開発したシステムの仕様を表 1 に示す。

表 1 広域ナノパターンジェネレータの仕様

ストローク (X, Y)	180mm
ストローク (Z)	70mm
位置決め分解能 (X, Y, Z)	1nm
最大速度 (X, Y)	250mm/s
最大速度 (Z)	150mm/s
スピンドル最高回転数	60,000rpm

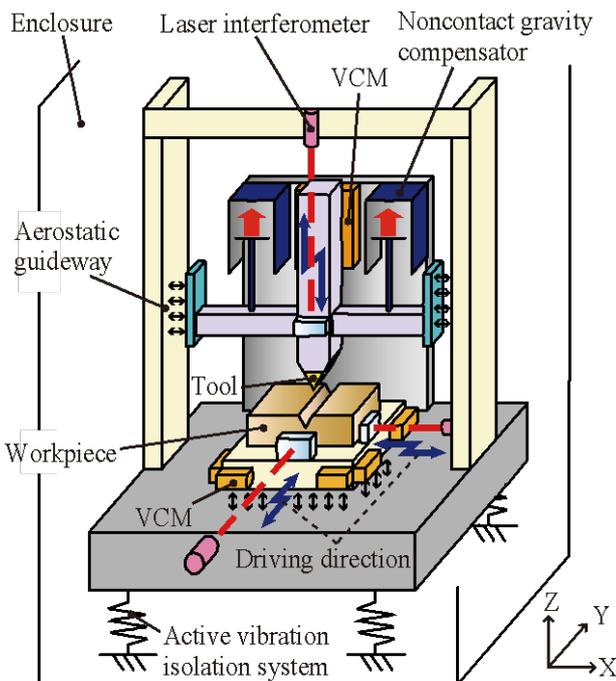
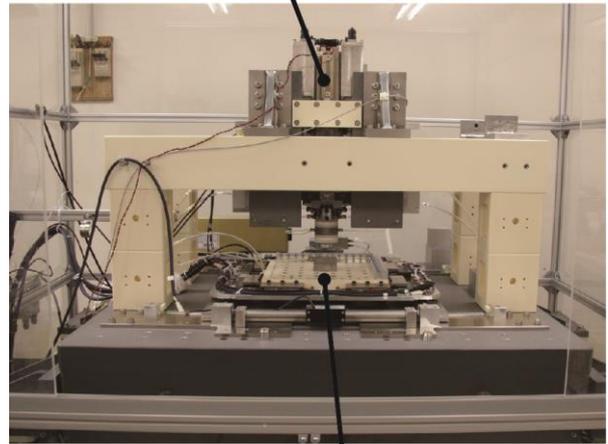


図 1 広域ナノパターンジェネレータの構造概念

Vertical nano-motion system



XY planar nano-motion table system

図 2 広域ナノパターンジェネレータ

2.2 広域ナノパターンジェネレータの位置決め性能

本研究で開発した広域ナノパターンジェネレータの位置決め性能を評価するため、3 軸同時制御状態において 1nm の微小ステップ駆動をおこなった。その結果、図 3 に示すように各軸とも明確な 1nm のステップが確認でき、開発したシステムが 1nm の位置決め分解能を持つことを確認した。

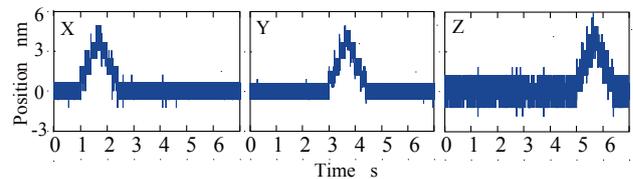


図 3 1 nm ステップ駆動結果

3. エアスピンドルの状態因子ネットワークを用いた加工状態認識^{9),10)}

3.1 状態因子ネットワークを用いた加工状態認識

超精密切削加工では、切削力や切削熱など加工状態を認識するのに有用な物理量の変化が小さく、加工状態の認識が困難である。これに対して、複数のセンサ情報を統合して必要な情報を得るセンサフュージョンが加工状態の認識に有用である。しかしながら、切削加工では複数の熱的および動的挙動が複雑に相互作用をおよぼすため、効果的にセンサフュージョンを適用するためには、加工に関わる熱的および動的挙動の相互作用を効果的に解析する必要がある。本研究では状態因子ネットワークを用いて加工状態を推定する状態認識方法を提案した。状態認識の手順を以下に示す¹⁰⁾。

- 1) 熱的および動的挙動に関する因子の抽出
- 2) 因子間の関係の数学的な解析
- 3) 状態因子ネットワークの構築
- 4) 状態認識に有用なセンサ情報の選択

3.2 エアスピンドルの状態因子ネットワーク

エアスピンドルは超精密切削加工システムに広く用いられており、重要な構成要素のひとつである。加工において生じる加工状態の変化は工具を通じてエアスピンドルにおける熱的および動的挙動を引き起こす。そこで、本研究ではエアスピンドルにおける熱的および動的挙動を解析し、状態因子ネットワークを構築することにより、超精密切削加工における加工状態認識技術を確立する。

図4にエアスピンドルの状態因子を示す。エアスピンドルは空気静圧軸受およびエアタービンにより非接触で支持、駆動される。エアスピンドルにおける熱的および動的挙動は相互に作用を及ぼし、ナノメートルオーダの運動精度および生産性に対して重要な役割を果たす。

この熱的および動的挙動の相互作用について解析を加え、エアスピンドルの状態因子ネットワークを構築した。構築した状態因子ネットワークを図5に示す。

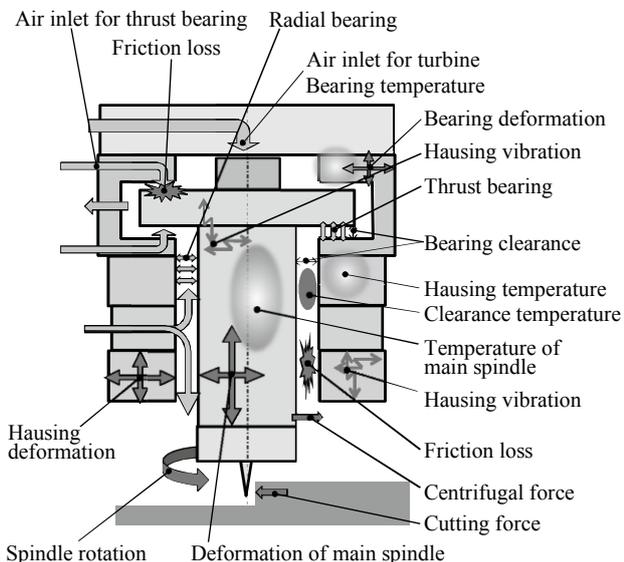


図4 エアスピンドルの状態因子

3.3 工具摩耗の検出

加工精度に直接大きな影響をおよぼす工具摩耗の検出は超精密切削加工における重要な課題の一つである。工具摩耗は切削力に影響をおよぼすことから、力センサにより摩耗の検出は可能である。しかしながら、この検出方法はセンサの設置やコストの問題から実用的ではない。一方、図5に示す状態因子ネットワークより、ハウジング振動、スピンドルのエラーモーション (NRRO) およびスピンドルの回転速度から切削力の推定が可能である。

そこで、摩耗した工具を用いて超精密切削加工実験をおこない、新品の工具を用いた場合と各状態量を比較した。図6に摩耗した工具を用いた場合の各状態量の変化率を示す。工具の摩耗に伴う切削力の増加がハウジング振動およびNRROの増加、ならびにスピンドルの回転速度の減少を引き起こしており、これらの状態量の取得により工具摩耗の検出が可能であることを示した。

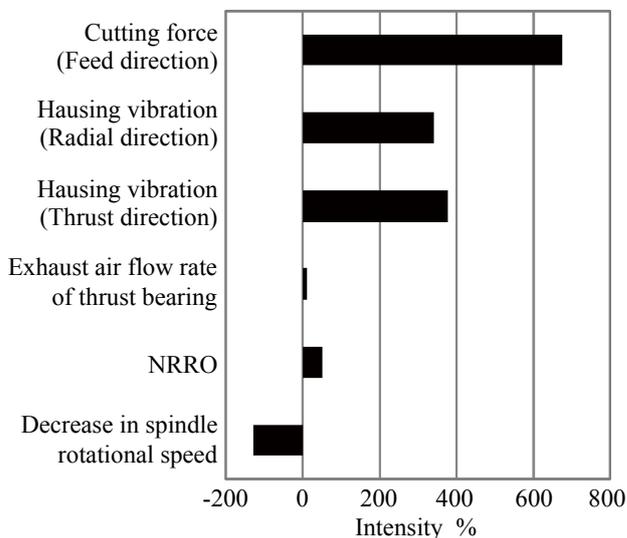


図6 工具摩耗による各状態量の変化率

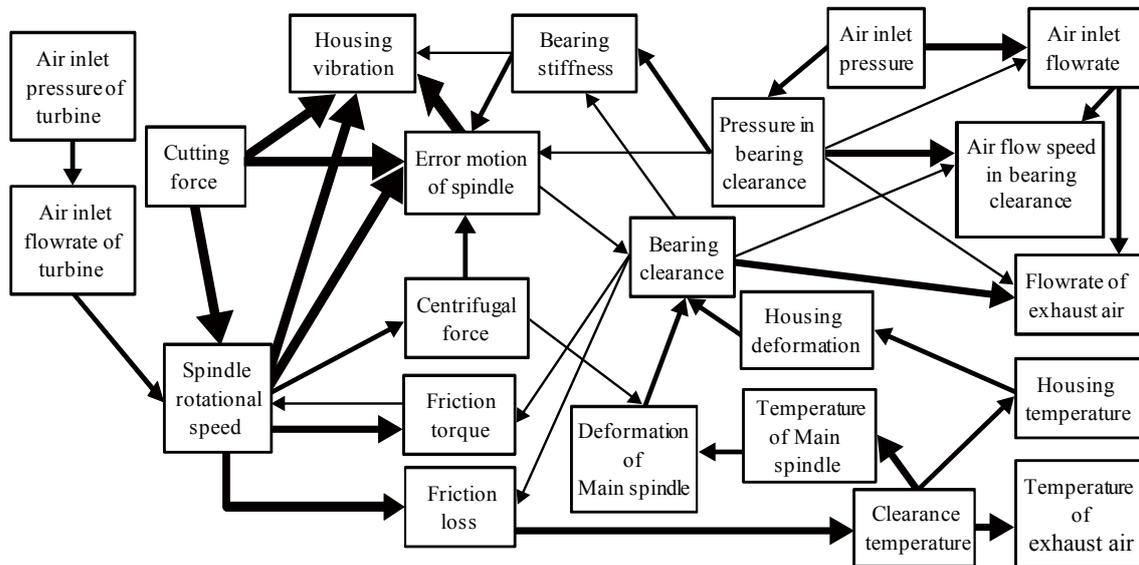


図5 エアスピンドルの状態因子ネットワーク

4. 光プローブを用いたオンマシン形状計測システム^{11), 12)}

4.1 オンマシン形状計測システム概念

オンマシン計測機能を付与した超精密切削加工システムの概念を図7に示す。Z軸上に工具とオンマシン計測用の光学プローブを設置し、Y軸の駆動によって加工と計測の機能を切り替えることができる。計測時には、図8に示すように、光学プローブから得られる計測点までの距離が一定になるようにZ軸を制御しながらXY軸を駆動することにより、工作物の三次元形状を取得する。

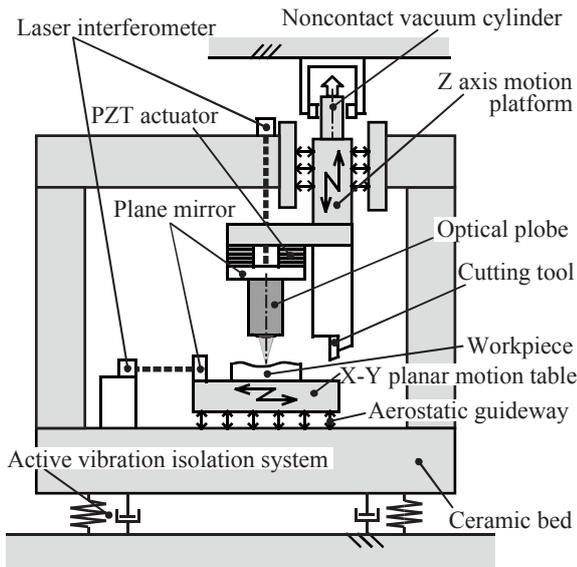


図7 オンマシン計測機能を持つ超精密切削加工システムの概念

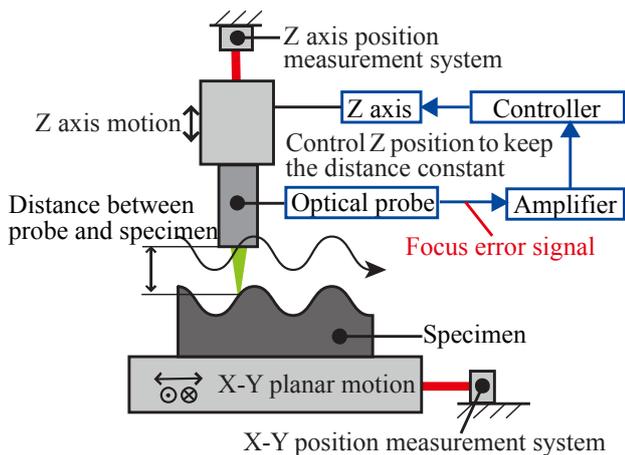


図8 光学プローブを用いた三次元形状計測

4.2 反射むらの補正方法

本研究では、光学プローブとして非点収差法¹³⁾を用いる。非点収差法の計測原理を図9に示す。計測点で反射したレーザ光はシリンドリカルレンズを通して4分割フォトダイオード(QPD)に照射する。このとき、計測点が焦点位置にあるとQPD上のレーザ光のイメージは円になる

のに対し、焦点位置からずれると、レーザ光のイメージは楕円となる。この現象を利用することで計測点までの距離を高精度に検出することが可能となる。

しかしながら、計測試料の面粗さ等の影響により計測点に反射むらが生じると、反射光の形状の変化が生じる。本研究では図10に示すように、反射光の形状の変化を光軸の移動と仮定する。この光軸の移動により出力が変化し、正確な距離の検出が困難となる。

これに対して、本研究では反射むらを補正する機能を付加した光学プローブシステムを提案した。提案するプローブシステムを図11に示す。QPD-Bの出力を用いて光軸の移動の影響を差し引くことにより、反射むらによる光軸の移動が生じた場合でも、高精度な距離の検出が可能となる。

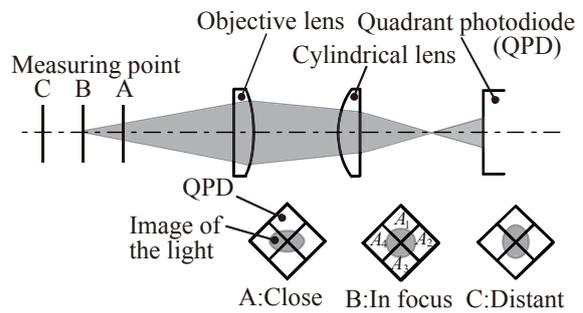


図9 非点収差法

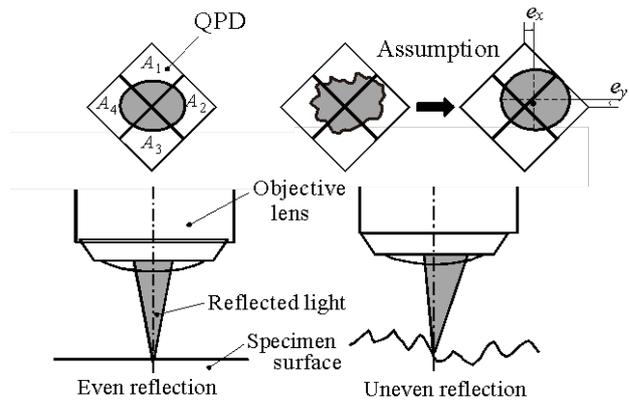


図10 反射むらの影響のモデル

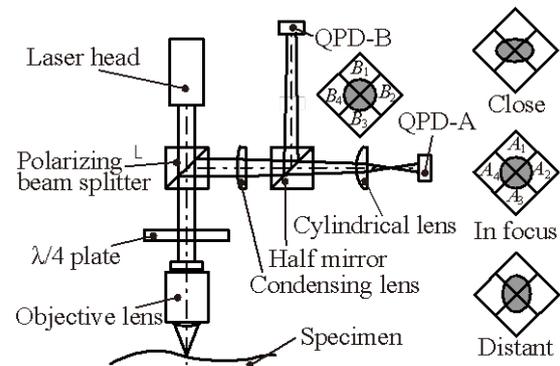


図11 反射むら補正機能を備えた光学プロービングシステム

4.3 光学プローブの計測分解能評価

開発した光学プローブの特性を評価するために、計測分解能の評価をおこなった。開発した光学プローブを第2章で開発した広域ナノパターンジェネレータのZ軸テーブルに搭載し、光学プローブによるフィードバック制御はかけない状態でZ軸に10nmステップ駆動をさせた。Z軸の座標はレーザ干渉計で計測し、光学プローブの出力との比較をおこなった。

図12に示すように、Z位置、光学プローブ出力共に明確な10nmのステップが確認できる。このことから、開発した光学プローブが10nmの計測分解能を持つことを明らかにした。

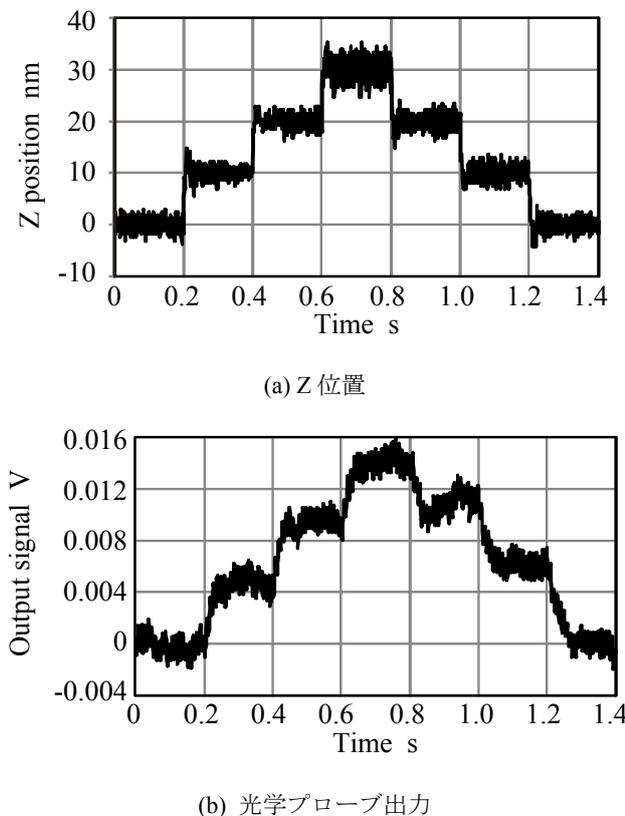


図12 10nmステップ駆動時のZ位置および光学プローブ出力の応答

5. 加工実験

5.1 超平滑面の加工

開発した広域ナノパターンジェネレータを用いて、ダイヤモンド工具によるナノ加工特性評価をおこなった。Ni-Pめっきを工作物として、切りこみ深さ1μmで平面加工をおこなった。加工条件を表2に示す。

AFMによる形状計測結果を図13に示す。図に示すように、本研究で開発した広域ナノパターンジェネレータにより、表面粗さ2.15nm Ra、10.4nm PVの超平滑面を得ることができた。

工作物	Ni-P めっき
工具	単結晶ダイヤモンド ノーズ径 0.4 mm
切りこみ深さ	1 μm
送り量	1 μm
工具送り速度	5 mm/s

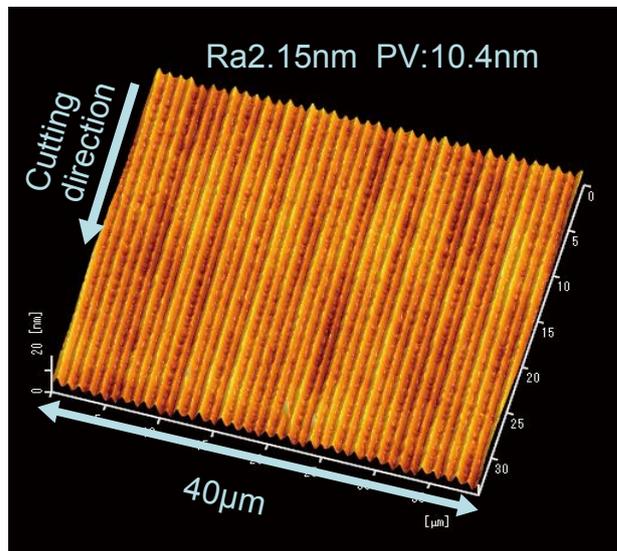


図13 超平滑面の加工結果

5.2 微小段差の加工

Ni-Pめっきを工作物として、幅10μm、高さ20nmの段差加工をおこなった。加工条件として、超平滑面と同様、表2に示す条件を用いた。

AFMによる加工形状の測定結果を図14に示す。図14において、明確な20nmの段差を確認することができる。この結果より、開発したシステムによりナノメートルオーダーの形状創成が可能であることを明らかにした。

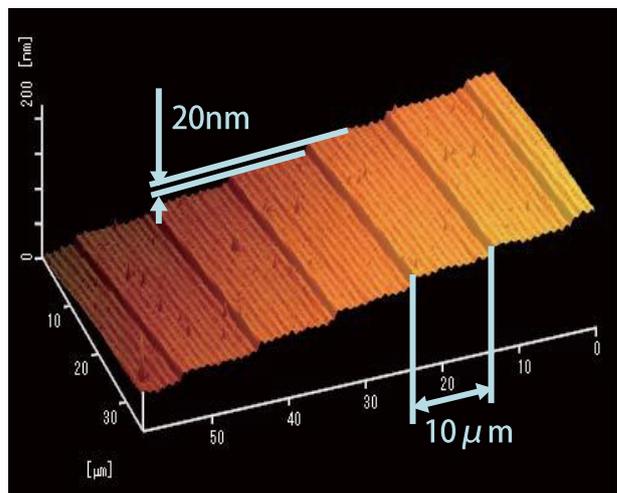


図14 超平滑面の加工結果

5.3 オンマシン形状計測システムを用いた修正加工¹⁴⁾

開発したオンマシン形状計測システムを用いて修正加工実験をおこなった。図 16 の a の曲線に示すように、あらかじめ X_o の領域のみ加工をほどこした黄銅を工作物として用い、この工作物の X_m の領域に対して図 15 に示す方法で修正加工をおこなった。オンマシン形状計測システムを用いて工作物の形状を計測し、計測結果を元に次の加工条件を決定した。3 回の修正加工の結果、図 16 の d の曲線に示すような平滑面を得ることができた。

さらに、オンマシン形状計測システムを用い、図 17 に示す方法で目標深さ $5.000 \mu\text{m}$ の溝加工をおこなった¹⁴⁾。図 18 にオンマシン非接触形状計測機能によって得られた工作物の加工形状を示す。図中の a, b, c, d の各線はそれぞれ、1 回目、2 回目、3 回目および 4 回目の加工後の工作物の形状を表す。加工後、表面形状計測装置 (Taylor Hobson, Form Talysurf PGI820) を用いて加工形状の計測をおこなった。計測の結果得られた溝深さは $5.019 \mu\text{m}$ であり、目標深さからの誤差 $0.019 \mu\text{m}$ の高精度な溝加工を実現した。

以上の結果より、開発したオンマシン形状計測システムを用いることにより、超精密切削加工における加工精度の向上が実現可能であることを確認した。

Determination of cutting conditions by the result measured

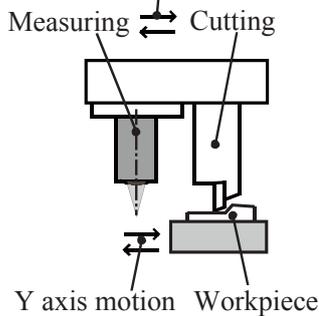


図 15 修正加工の方法

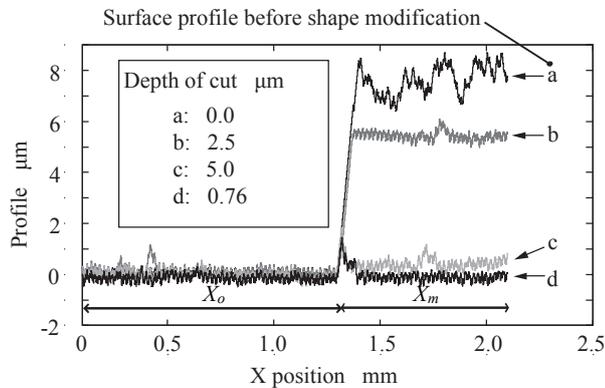


図 16 修正加工結果

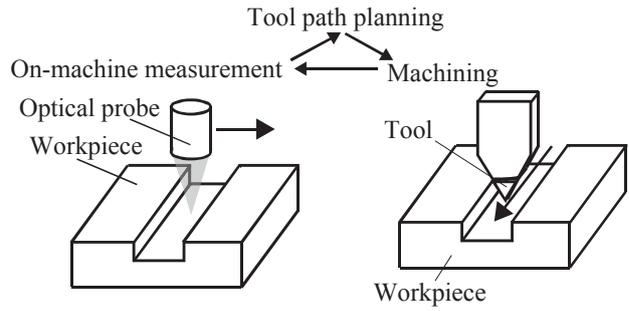


図 17 修正溝加工実験の方法

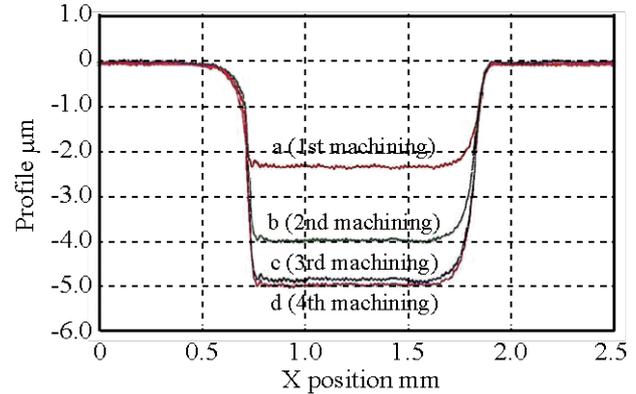


図 18 オンマシン非接触計測機能による溝形状計測結果

6. 結 言

本研究では、高精度かつ低コストな金型の実現を目的として、超精密切削加工の加工精度の向上および加工の高能率化に関する研究をおこなった。

この目的のために、まず、誤差要因を排除することによって、100mm オーダの加工領域とナノメートルオーダの加工精度を同時に実現可能な広域ナノパターンジェネレータの開発をおこない、XYZ の 3 軸について 1 nm の分解能での位置決めが可能であることを確認した。次に、状態因子ネットワークを用いてエアスピンドルの駆動状態から加工状態を推定する状態認識方法を提案し、工具摩耗の検出実験を通して提案する手法が超精密切削における加工状態の認識に有用であることを確認した。また、光学プローブを用いたオンマシン形状計測システムを開発し、開発した光学プローブが 10 nm の計測分解能を持つことを確認した。

さらに、加工実験をおこなった結果、開発した加工システムにより表面粗さ 2.15 nm Ra の超平滑面および高さ 20 nm の段差形状が実現できることを確認した。また、オンマシン形状計測機能を利用した修正加工実験をおこなった結果、高精度な平面および溝形状の加工が実現できることを確認した。

以上の結果より、本研究の成果が金型の高精度化に有効であることを確認した。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの研究助成（平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008014）により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) W. Gao · R.J. Hocken · J.A. Patten · J. Lovingood : Experiments Using a Nano-Machining Instrument for Nano-Cutting Brittle Materials, *Annals of the CIRP*, 49-1 (2000), 439-442.
- 2) D. Dornfeld · S. Min · Y. Takeuchi : Recent Advances in Mechanical Micromachining, *Annals of the CIRP*, 55-2 (2006), 745-768.
- 3) C. Aliustaoglu · H.M. Ertunc · H. Ocak : Tool wear condition monitoring using a sensor fusion model based on fuzzy inference system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (2009), 539-546.
- 4) N. Ghosh · et al. : Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion , *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (2007), 466-479.
- 5) H. Yoshioka · H. Sawano · H. Shinno : A newly developed ultraprecision machining tool “ANGEL”, *Proceedings of the 10th euspen International Conference*, 2 (2010), 239-242.
- 6) H. Sawano · Y. Kurisaki · H. Yoshioka · H. Shinno : A newly developed advanced nano-pattern generator with large work area, *Proceedings of the 14th International Machine Tool Engineers' Conference*, (2010), 70-71.
- 7) Y. Kurisaki · H. Sawano · H. Yoshioka · H. Shinno : A newly developed X-Y planar nano-motion table system with large travel ranges, *Proceedings of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, (2009), 187-190.
- 8) Y. Kurisaki · H. Sawano · H. Yoshioka · H. Shinno : A newly developed X-Y planar nano-motion table system with large travel ranges, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 4-5 (2010), 976-984.
- 9) R. Kobayashi · H. Sawano · H. Yoshioka · H. Shinno : A proposed ultraprecision machining process monitoring using causal network model of air spindle bearing system, *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, 2 (2010), 281-284.
- 10) H. Sawano · R. Kobayashi · H. Yoshioka · H. Shinno : A Proposed Ultraprecision Machining Process Monitoring Method Using Causal Network Model of Air Spindle System, *International Journal of Automation Technology*, 5-3 (2011), 362-368.
- 11) H. Sawano · M. Takahashi · H. Yoshioka · H. Shinno · K. Mitsui : On-machine shape measuring system by means of optical stylus for nano-machining, *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, 2 (2010), 211-214.
- 12) H. Sawano · M. Takahashi · H. Yoshioka · H. Shinno · K. Mitsui : On-Machine Optical Surface Profile Measuring System for Nano-Machining, *International Journal of Automation Technology*, 5-3 (2011), 369-376.
- 13) K. Mitsui : In-process sensors for surface roughness and their applications, *Precision Engineering*, 8-4 (1986), 212-220.
- 14) H. Sawano · H. Yoshioka · H. Shinno : A newly developed nano-pattern generator equipped with an on-machine measuring function, *Proceedings of the 12th euspen International Conference*, 2 (2012), 189-192.