

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03900

研究課題名(和文) 機上計測と工具の機上成形機能を兼ね備えた超精密自律型工作機械の開発

研究課題名(英文) Development of an autonomous ultra-precision machine tool having functions of on-machine measurement and tool shaping

研究代表者

中本 圭一 (NAKAMOTO, Keiichi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90379339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：多軸制御による機上計測によって得られた加工形状と、レーザ顕微鏡による測定結果を比較した。また、機上計測で得られた加工形状から、修正加工用のNCプログラムを生成し、修正加工前後で同じ測定経路により加工面全体を測定したところ、形状誤差が大幅に低減していることが分かり、提案した多軸制御による機上計測と修正加工の有効性を確認した。並行して、硬脆材料を成形材としてダイヤモンド工具の刃先を意図的に摩耗させる適切な工具成形条件を調査した。さらに、回転テーブル上にジグを介して取り付けられたダイヤモンド工具を、成形材に対する角度を変化させながら成形材方向へ送ることで、円弧状切れ刃を生成した。

研究成果の概要(英文)：The shapes to be machined shift to more complicated curved surface such as a non-axisymmetric and non-spherical shape. In order to realize on-machine scanning measurement by multi-axis control, the machining error is estimated and the machined shape is compared with the measurement result obtained with a confocal microscope. NC program is also modified to compensate the estimated machining error to improve machining accuracy of micro complicated shapes. Moreover, in order to confirm the possibility of on-machine shaping of diamond cutting tools, sapphire, cemented carbide and quartz crystal are firstly adopted as workpiece material. From the experimental result, stable tool wear is observed along the cutting edge in quartz crystal cutting. Shaping conditions are also investigated to speed up the wear of diamond cutting tool. As a result, it is found that a circular edge is created by the suitable motion of diamond cutting tool based on the proposed on-machine shaping.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：超精密切削加工 機上計測 ダイヤモンド工具 精密部品加工

1. 研究開始当初の背景

工業製品の小型化・高集積化に伴い、マイクロ・ナノメートルオーダーの高機能な三次元形状を創成できる超精密切削加工の重要性が増している。そこで研究代表者らは、人工心臓用マイクロインデューサなどの微小かつ複雑な形状を創成するため、これまでに工程設計や工具経路生成に取り組んできた。しかしながら、測定後にワークを精度良く元の位置へ取り付けることは困難なため、加工形状と目標形状に差異があった場合でも修正加工は断念していた。この課題を解決して超精密切削加工を高精度化するには、ワークの取外し・取付けを必要としない機上計測により、加工形状をインプロセスでフィードバックして修正加工することが不可欠である。

超精密切削加工において機上計測を試みた例は既に幾つか報告されているが、分解能の制約や散乱光の影響を避けるため、光学式ではなく接触式測定機が主に用いられている。しかし、測定プローブやカンチレバーの姿勢を、ワーク測定面に対してほぼ一定に保つことができる、レンズ金型や比較的単純な形状を対象としてきた。今後、製品の小型化・高機能化に伴い、微小かつ複雑な形状の機械部品が増加することが見込まれることから、これらの加工形状も機上で定量的に評価することが望まれる。

加工形状に影響を及ぼす誤差要因としては、一般に工作機械、工具、周辺環境や制御ソフトウェアなどが挙げられるが、多軸制御の超精密切削加工では、工具セッティング時の位置合わせ誤差が支配的になる。この誤差は、ナノメートル単位の加工機の分解能と比べると桁違いに大きく、各制御軸に数 μm 程度存在しており、加工時の制御軸数が増えるのに伴い累積して工具軌跡の精度悪化につながる。一方、NC プログラムでは理想的にセッティングされた工具の位置を前提にしているため、大きな加工誤差が発生している。

2. 研究の目的

金型や極少量の部品加工において、所望の形状が得られなかったワークは、再度加工して形状を修正するのが効率的である。しかし、対象が微細な超精密切削加工では、測定するためのワークの取外しや修正加工のための加工機への取付けなどで生じる誤差が、加工精度と比べて大きくなる。このため、工作機械自身が加工形状を機上で定量的に評価するとともに、必要に応じて修正加工することが有効になる。また、この機上計測を応用して、工具を理想的な位置に成形できれば、精度悪化の主要因である工具の位置合わせ誤差を根本的に解消できる。そこで本研究では、自身が工具を成形して加工形状も保証する、究極の超精密自律型工作機械の開発を目的とし、加工形状の高精度化だけでなく、セッティングや測定を含む総加工時間の短縮を目指す。

3. 研究の方法

(1) 複雑形状の機上計測と修正加工

本研究で用いる超精密切削加工機 FANUC ROBO nano Ui は、X、Y、Z の並進 3 軸と、B、C 軸の回転 2 軸で同時 5 軸制御が可能であり、分解能は並進軸が 1 nm、回転軸が 10^{-5} deg である。また、B 軸テーブル上に A 軸回転ユニットを付加すれば同時 6 軸制御も可能になる。接触式測定機は、同じく分解能 1 nm の FANUC ナノチェッカを用い、機上計測時には、図 1 のようにスピンドル、あるいは A 軸回転ユニットと並べて B 軸回転テーブルに設置する。目標形状に対する加工形状の偏差に応じてプローブが軸方向に前後し、その変位を加工機の各軸の座標と同期させて記録する。

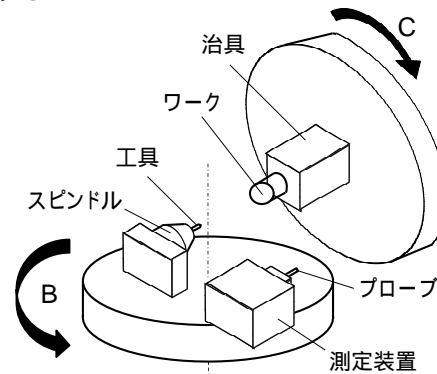


図 1 機上計測時の機械構成

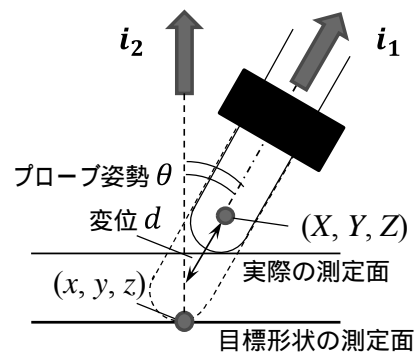


図 2 測定点とプローブ中心座標

本研究の機上計測では、目標形状の CAD モデルを参照して測定経路を生成し、測定されたプローブの変位から加工誤差を算出する。図 2 から明らかなように、プローブ姿勢 θ が大きくなれば、計画した測定点から実際の測定点が大きく外れる。また、プローブを測定面へ押し付ける法線方向の分力も変動するため、回転工具の工具経路とは逆に、できる限り測定対象箇所の法線方向とプローブ軸ベクトルが一致するように測定経路を生成する。

単純形状のワーク表面を走査する場合であれば、プローブの軸ベクトルを法線方向と一致させることは難しくないが、複雑形状ではプローブとワークの不適切な干渉を防ぐために姿勢を変化させる必要がある。この課題は、複雑形状の超精密切削加工における工

具姿勢と同様であり、連携研究者と協力しながらこれまでに培った多軸制御の工具経路生成に関する知見を活かすことで解決する。

一方、機上計測における測定時間は非加工時間でもあり、測定に長時間割くことは高価な加工機を効率的に使用しているとは言えない。そこで、加工形状の中で工具の位置決め誤差などが影響を与えやすい特徴的な領域（形状の一部）について形状創成関数を用いて解析する。この結果を基に、加工誤差が大きくなることが予想される領域のみを対象とすれば測定時間を大幅に短縮できる。

さらに、機上計測で得られた測定結果から加工誤差を算出して、目標形状への修正加工を行えるようにする。このときの工具経路は、目標形状に対して偏差のある領域のみを加工するものであるが、生じた加工誤差を打ち消すように生成する。

(2) ダイヤモンド工具の機上成形

工具を機上で理想的な位置に成形できれば、そもそも位置合わせ誤差が生じない。そこで、超精密切削加工で広く用いられる単結晶ダイヤモンド工具を対象に機上成形の実現に取り組む。工具成形材料としては、まずサファイアと超硬合金を試すが、これは研究代表者が、サファイア基板にダイヤモンド工具で微細構造を付与した際に著しい工具摩耗が観察されたためである。サファイアには幾つかの結晶面が存在し、それぞれ異方性もあるが、図3に示す脆性破壊が始まる臨界切込みは全般的に極めて小さい。そこで、チップングを生じさせることなく漸次的に摩耗させるため、各面で臨界切込みを調査し、延性破面で工具を成形する。

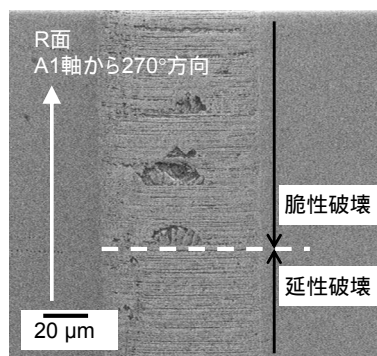


図3 サファイアの臨界切込み

最終的に、円弧状の切れ刃や、加工対象に適した任意の工具形状の成形を目指す。円弧状の切れ刃をもつダイヤモンドバイトは曲面加工で頻りに用いられ、その円弧の半径は工具経路生成時に重要となるため厳密に管理する必要がある。そこで、マイクロスコブで工具成形の過程を観察しながら成形条件を最適化し、機上計測を活用して成形後の工具形状と位置を保証するようにする。これにより、補正に相当な時間を要する工具の位置合わせ誤差を解消でき、加工準備の労力を大幅に低減することができる。

4. 研究成果

(1) 複雑形状の機上計測と修正加工

多軸制御による機上計測によって得られた加工形状と、レーザ顕微鏡による測定結果を比較した。目標形状は、球面半径 12 mm のレンズ金型を模した形状で、最大の傾斜角は 15°である。ボールエンドミルを用いた多軸制御による仕上げ加工を行い、同心円状の工具経路で工具姿勢が目標とする加工面の法線方向から常に 20°傾くように設定した。機上計測では、プローブの姿勢が常にワークの法線方向と一致するように設定し、球面中央の断面曲線を取得した。なお、使用したレーザ顕微鏡は KEYENCE VK-X100、最小分解能は 5 nm である。

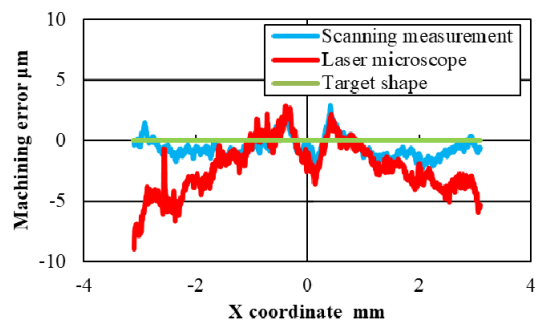


図4 機上計測で得られた加工形状の比較

測定された球面レンズの加工形状と目標形状からの法線方向の寸法差を形状誤差として図4に示す。傾斜の小さい球面レンズの中央付近において、機上計測の測定結果はレーザ顕微鏡の測定結果とよく一致していることがわかる。一方で傾斜の大きい球面の外周部では最大で約 8 μm の差が生じた。この原因は主にプローブのセッティング誤差であり、図1に示したように本研究では工具と計測機を同じ回転テーブルに併設するため、プローブ制御点と回転テーブル中心が大きく離れ、回転中心に対するプローブ制御点の位置出し誤差が B 軸の回転に伴って測定精度に大きな影響を与えている。一方、多軸制御による機上計測では、B 軸の回転角が -15° から 15° の限定された範囲において、3 次元加工形状の形状誤差を正確に検出することができ、測定結果に基づく形状誤差の修正加工は可能と考えられる。

そこで、多軸制御による機上計測により得られた加工形状から、修正加工のための NC プログラムを生成することとした。超精密加工においては、様々な要因の組合せで形状誤差を引き起こすため、全ての誤差要因を特定し、補正することは極めて困難である。このため本研究では、工具をプローブ軸方向に変位量だけ移動させることによって加工形状を目標形状へ近づける。

同じ測定経路で加工面全体を再び走査させて、修正加工前後で形状誤差を比較したところ、修正加工後の加工面ではプローブ変位が全体的に減少した。また図5に示すように曲面中心を通る断面曲線を比較したところ、

形状誤差が球面中央部で 30 μm , 球面外周部では 10 μm 低減されていることがわかり, 提案した多軸制御による機上計測と修正加工の有効性が確認できた.

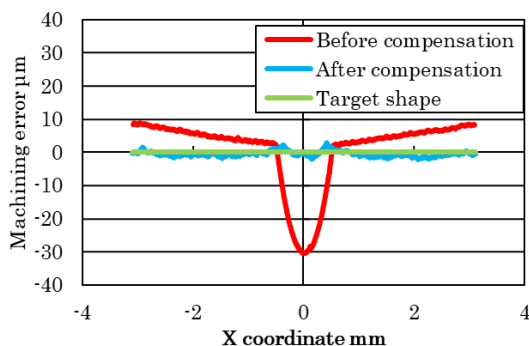


図5 修正加工による加工形状の補正

(2) ダイヤモンド工具の機上成形

工具の再セッティングにおける誤差の発生や再研磨する手間を解消するためには, 工具を加工機に取り付けたまま任意の位置で研磨, 成形する機上成形が有効である. そこでまず, サファイア, SiO_2 (人工水晶) などの硬脆材料を切削加工してダイヤモンド工具の刃先を意図的に摩耗させる機上成形において, 適切な工具成形条件を調査した.

ノーズ半径 0.5 mm の単結晶ダイヤモンド工具を使用した. すくい角は 0° , 逃げ角は 10° , すくい面と逃げ面の結晶方位は $\{100\}$ である. 先端角が 150° の剣先工具を成形することを想定すると, 工具を 15° 傾けた状態で溝加工したときには, 刃先後退量が 17 μm になるまで工具を摩耗させる必要がある. このため, 成形材を加工機の旋盤機能により回転させ, 目標の切削距離に達するまで, 徐々に深くなるように円形溝を端面旋削し, 切れ刃を摩耗させた.

成形材としてはサファイア, 超硬合金, SiO_2 を調査し, 異方性材料であるサファイアは切削方向による臨界切込み深さの差異が小さい C 面を使用することとした. この結果, SiO_2 では他の材料に比べてチップングを抑制しつつ安定した工具摩耗が生じさせられることが分かった. また, SiO_2 を成形材とした際に, 切削速度 800 mm/min で, 所要時間あたりの刃先後退量を増加させ, チップングを抑えつつ短時間で工具を摩耗させられることを確認した.

さらに, B 軸回転テーブル上にジグを介して取り付けた工具を, 成形材に対する角度が $0 \sim 30^\circ$ の範囲で変化するように Z 軸(成形材)方向へ送っていくことで, 円弧状切れ刃を生成した. 切削距離は, 刃先の各位置で 250 μm となるよう設定し, 摩耗によって切れ刃を 3 μm 後退させることを目標とした. 成形後の切れ刃の様子を図 6 に示す. 元の円弧状切れ刃からほぼ目標通りの刃先後退が生じていることが確認できた.

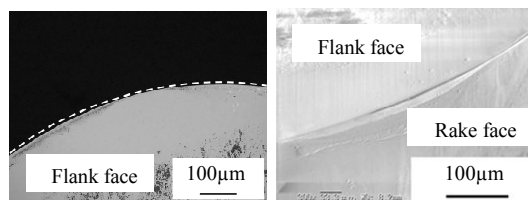


図6 円弧状切れ刃の機上成形例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

田中匠太郎, 馬場慎之佑, 中本圭一, 竹内芳美, 多軸制御超精密切削加工の高能率化に向けたセッティング誤差補正手法の開発, 精密工学会誌, 査読有, 82 巻, 8 号, 2016, pp.758-763.

S. Baba, K. Nakamoto, Y. Takeuchi, Multi-Axis Control Ultraprecision Machining Based on Tool Setting Errors Compensation, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 10, No. 1, 2016, pp.114-120.

〔学会発表〕(計 13 件)

R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi, A Study on Automatic Compensation of Workpiece Setting Errors in Ultraprecision Machining, The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN), 2017.

K. Nakamoto, S. Baba, Y. Takeuchi, Automatic Tool Setting Errors Compensation in Ultraprecision Machining, The 16th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), 2016.

T. Tamura, K. Nakamoto, Y. Takeuchi, A Study on Decision of Probe Attitude for On-machine Measurement, The 6th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN), 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本 圭一 (NAKAMOTO, Keiichi)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 90379339

(2) 研究分担者

笹原 弘之 (SASAHARA, Hiroyuki)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 00205882

(3) 連携研究者

竹内 芳美 (TAKEUCHI, Yoshimi)
中部大学・工学部・教授
研究者番号: 50107546