光学部品用金型加工向け超精密 5 軸加工機の開発*

— 基本性能の評価と工作物加工結果の評価 —

廣瀬智博** 上 芳啓*** 清水龍人*** 薮谷 誠† 森本喜隆††

Development of Ultra-Precision 5-Axis Machine Tool for Optical Mold
- Evaluation of Basic Performance and Machined Workpiece -

Tomohiro HIROSE, Yoshihiro KAMI, Tatsuhito SHIMIZU, Makoto YABUYA and Yoshitaka MORIMOTO

Ultra-precision machine tools for fabricating optical lens and lens molds require highly accurate positioning. However, one concern is that, depending on the workpiece size, fly-cutting using conventional machine tools can often require a large amount of time. To solve this problem, we have developed an ultra-precision 5-axis machine tool, and evaluated its processing performance during free-form, high-speed surface machining of a workpiece with high-precision contour control. We successfully demonstrated a non-rotational cutting process that resulted in a surface roughness of within 2 nm and a form accuracy of within 0.1 μm . The processing time was less than half that required by a conventional fly-cutting process. The performance of the machine tool and the results of an evaluation of the machined mold are reported in this paper.

Key words: ultra-precision, hydrostatic slide, air spindle, lens mold, free-form surface, non-rotational cutting

1. 緒 言

超精密加工機は、高い形状精度を必要とする光学部品や光学部品の金型の加工を目的として研究開発がなされてきた^{1)~3)}。加工用途は、DVDをはじめとする光ディスクのピックアップレンズやデジタルカメラ等に代表される軸対称非球面レンズ、レーザープリンタの $f\theta$ レンズに代表される自由曲面レンズの金型加工が主流であったが、近年の超精密加工機に対する要求は変化しつつある。カメラレンズ用途では、スマートフォンに代表されるタブレット端末の普及により、レンズは小型化と形状の高精度化が進んでいる。これらの光学部品用の金型にも、レンズ形状の高精度化に伴い、高い形状精度と表面粗さが要求されており、超精密加工機の高精度化がさらに要求されている。

一方、自由曲面形状の高精度加工の要求も増えてきている。これまでの、 $f\theta$ レンズなどの主断面に対して副断面の幅が小さい自由曲面の金型加工が多かったが、近年では、プロジェクト用ミラーレンズの他、自動車用のヘッドアップディスプレイやヘッドライトの金型加工など、大型の金型加工も増えてきている。これらの中には、数年前まではマシニングセンタで加工検討がなされていたものもあるが、金型の形状精度の向上と、表面粗さの向上に対する要求から、超精密加工機による加工が検討されている。

従来の自由曲面形状の加工方法は、フライカットによる切削加工が行われていたが、回転刃による断続切削であるため送り速度は $F=100\text{mm/min}$ 程度に限定され、要求精度を達成するためには多くの加工時間を要した。例えば、幅 100mm、高さ 5mm 程度の $f\theta$ レンズ用金型をピックアップ 20 μm 、工具半径 5mm に

てフライカットで加工すると、4 時間以上要する。この手法では、工作物の大型化に伴い加工時間の長時間化が懸念される。この場合、室温の変化による加工機や治工具類の熱変形が加工結果に与える影響も懸念されるため自由曲面加工の高速化が必要とされている。

そこで、本研究では多軸同期制御と加工速度 $F=1000\text{mm/min}$ を超える高速・高精度な位置決め性能を有し、金型の形状精度が $p\text{-}v$ 値 0.1 μm 以下となる加工を実現する超精密加工機の開発を行ってきた。従来の超精密加工機は、旋削加工を想定した送り速度 $F=1\sim10\text{mm/min}$ での位置決め精度を重視し、駆動源にボールねじ駆動や油静圧ねじ等を用いた研究がされてきた⁴⁾⁵⁾。これらの超精密加工機では、高い機械精度を得るために空気静圧軸受や平行に並べた 2 本の V 型の案内溝ところがり案内とを組み合わせた V-V ころがり案内などテーブルの案内機構に特長を持つものが多い⁶⁾⁷⁾。一方、近年の工作機械では制御装置の高速化により高速駆動が容易になりニアモータ駆動を採用することが増えてきている⁸⁾。

本研究で開発した超精密加工機は、直動軸 3 軸にニアモータ駆動と油静圧案内を組み合わせ、さらに回転 2 軸を加えた 5 軸構成とした。この機械では、加工負荷に耐える高いテーブル剛性を維持しつつ従来機をはるかに凌ぐ加工速度で金型の高精度加工を実現し、かつその性能を長期に渡り維持することを目指している。

ここでは、加工点近傍における静的な機械精度の評価と、各動作時における位置決め性能の評価方法の検討と評価を行なう。さらに、フライカットに代わる自由曲面形状の加工方法として非回転工具による高速加工を示し、加工時における運動精度および形状精度評価結果について報告する。

2. 超精密 5 軸加工機の概要

2.1 対象とする自由曲面形状

自由曲面とは次の自由曲面多項式で表される主断面方向と副断面方向の横倍率が異なるアナモフィック非球面形状である。

* 原稿受付 平成 25 年 7 月 15 日

** 正 会 員 金沢工業大学大学院
(石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)
(株)不二越 開発事業部 (富山市不二越本町 1-1-1)

*** (株)不二越 開発事業部

† 正 会 員 (株)不二越 開発事業部

†† 正 会 員 金沢工業大学 (石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

$$Z = \frac{C_X X^2 + C_Y Y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_X) C_X^2 X^2 - (1 + K_Y) C_Y^2 Y^2}} + \sum A_{2i} \{ (1 - B_{2i}) X^2 + (1 + B_{2i}) Y^2 \}^i \quad (1)$$

ここで、 Z : 光軸方向の座標[mm], X : 走査方向の座標[mm], Y : 断面方向の座標[mm], K_X, K_Y : 円錐係数, C_X, C_Y : 曲率半径の逆数, A_{2i}, B_{2i} : 非球面係数を表している. 本研究では, NC 制御装置の円弧補間機能を用いず, 微小線分による直線補間機能を用いて自由曲面形状を加工する. 式(1)で表現される形状について超精密加工を行なう工作機械の仕様, 性能について次節で説明する.

2.2 超精密加工機の軸構成

図 1 に開発した超精密 5 軸加工機の構成を示し, 主な仕様を表 1 に示す. 軸構成は直交する 3 軸の直動軸を構成の基本とし, 軸対称非球面加工時に工具旋回軸として使用する B 軸を備えている. 工作物を保持する主軸は, 無限回転機能に加え, 角度割出し制御が可能な C 軸として使用できる. さらに X 軸テーブル上には, 机上計測装置を設置し, 先に示した式(1)に従い工作物の形状測定, 形状誤差解析, 補正加工用の NC プログラムの作成といった一連の工程を工作物の着脱なく機上にて行うことが可能である. また, X-Z 平面における工具の刃先位置調整や Y 方向における工具の位置調整に使用できる顕微鏡を 2 台設置している. これらをグラナイト石定盤上に設置している.

2.2.1 直動軸・回転軸の構造

直動軸の案内面に採用した油静圧案内は, 案内面と移動する軸受の微小な隙間に高圧の潤滑膜が介在する案内機構で, 金属接触が無いことから摩擦も少なく, スティックスリップが発生しない. そのため, ナノメートルオーダーの位置決めが可能になる. また真直度は, 油静圧案内の平均化効果により案内面以上の真直度を得ることができる. 駆動源には速度変動が小さく高速駆動が望めるコアレス型のリニアモータ駆動を採用している. コアレス型モータは, 構造によりコギングトルクを発生しないことが知られている. これを駆動源に採用することにより, 低速送りから高速送りまでの幅広い速度域での精密な位置決めが期待できる. 油静圧案内は, 油温の変化による超精密加工機の変形問題が挙げられるが, 近年は $\pm 0.001^\circ\text{C}$ 以下の油温制御が可能になってきており, この問題を回避している⁹⁾¹⁰⁾.

工具旋回軸の B 軸には, 直動軸と同様に油静圧軸受を用い, ダイレクトドライブ型 AC サーボモータを組み合わせた. 主軸には空気静圧軸受と AC サーボモータを採用し, これら 2 軸とも金属摩擦による精度劣化の無い構造としている.

2.2.2 除振装置の構造

超精密加工機は, 床面の振動が加工点に伝達することを防ぐため振動の少ない場所に設置することが望ましい. 実際には, 幹線道路や鉄道等に隣接する工場では往来する車両の振動が伝達される他, 工場設備から発生する振動が工場の床面を介して加工機に伝達される. そこで, 除振装置を用い工作機械に伝わる外乱振動を除去する. 多くの場合は, 空気ばねを用いて機械本体を支持し, 伝達される振動の低減を行なうパッシブ型の除振装置が用いられる. しかし, パッシブ型除振装置は, テーブルの移動に伴い揺れや姿勢変化をもたらす, 加工に影響を与える.

そこで, この超精密 5 軸加工機にはアクティブ型の除振装置を採用している. この除振装置は, 床振動や機械本体の揺れをセンサにて検出し, 空気ばねに送り込まれる空気量をサーボバルブにて制御することで振動制御を行っている. これにより, より効果的に振動を低減することができ, 高精度な加工が期待でき

る.

2.3 除振性能の確認

除振装置の効果を確認するため, 特許機器(株)製の微振動計測器 MRA-06X を用いて工作機械を設置した床面の振動を入力とし, B 軸テーブル上を応答とする Y 軸方向の伝達特性の測定を行った. 事前評価として, アクティブ制御を行わないパッシブ状態において除振装置の固有振動数の測定を行っており 5.5Hz という結果を得ている. 図 2 にアクティブ状態の伝達特性を示す.

伝達関数の 40~90Hz の範囲に見られる A~C で示したピークのうち, A および B は, コヒーレンス値が高いことから床面の振動が影響していると思われる. 一方, C は A および B と比較してコヒーレンスが低いことから, 機械と同一床面に設置された機械付属の装置から発生する振動が空気配管や油静圧案内の配管を介して B 軸テーブル上に伝わっていると考えられる.

Fig.1 Structure of ultra-precision 5-Axis machine tool

Table1 Specification of developed ultra-precision 5-Axis machine tool

Items		Specifications
Workpiece size		Dia. 200mm(Max.)
X Axis	Bearing, Drive	Hydrostatic slide, Linear Motor
	Stroke	350 mm
	Min. Reference	1 nm(Resolution 0.034nm)
	Max. speed	2000 mm/min
Z Axis	Bearing, Drive	Hydrostatic slide, Linear Motor
	Stroke	300 mm
	Min. Reference	1 nm(Resolution 0.034nm)
	Max. speed	2000 mm/min
Y Axis	Bearing, Drive	Hydrostatic slide, Linear Motor
	Stroke	170 mm
	Min. Reference	1 nm(Resolution 0.034nm)
	Max. speed	2000 mm/min
	Counterweight	Air cylinder
B Axis	Bearing	Hydrostatic slide
	Max. speed	30 min ⁻¹
	Min. Reference	0.0001 degree (Resolution 0.000018 degree)
C Axis	Bearing	Air slide
	Max. speed	1500 min ⁻¹
	Min. Reference	0.0001 degree (Resolution 0.000018 degree)
Machine Size		2335 ^W ×1830 ^D ×2000 ^H
Machine weight		6000kg

図よりアクティブ制御状態において、2Hz から 100Hz の周波数帯域では伝達関数は 0dB 以下に抑えられており、アクティブ除振装置の効果が得られていると言える。

図 3 に工作機械の床面と B 軸テーブル上における Y 軸方向の振動を比較したトリパタイトグラフを示す。パッシブ状態における B 軸上の変位は、固有振動数である 5.5Hz 以降の周波数において、床面の変位に対し B 軸テーブル上の変位が低減していることから除振されていることがわかる。しかし固有振動数付近の 2~8Hz の範囲では、床面の変位よりも B 軸上の変位が大きく、除振装置によって加振されている。一方、アクティブ制御の状態では、測定を行った 2Hz 以降のすべての周波数において床面の変位よりも B 軸上の変位が抑えられている。この時

Fig.2 Transfer function with active control by vibration isolation unit

Fig.3 Comparison of table vibration and floor vibration

の B 軸上の振動は、微細加工の振動環境指針¹⁾として利用される振動評価曲線(VC: クラス A~E)において、もっとも厳しいとされる振動クラスの VC-E 基準に抑えられている。このことから、アクティブ除振装置により加工点に伝わる外部振動を抑制できていることが分かる。

2.4 静的性能の確認

超精密加工機の評価として油静圧案内の真直度のデータを図 4 に示す。測定はテーブル上に設置したガラス製の直定規に静電容量型変位計を対向させて距離の変化を測定した。ここでは、加工点付近における X 軸の X-Z 平面におけるテーブル変位測定結果を示している。テーブルを案内面の前端より一定の速度で移動させ、ストローク端にて反転動作を行なった際のデータである。この結果、真直度は 0.05μm/100mm となった。転がり案内の場合も同程度の真直度を得ることができるが、案内面の摩耗による真直度の劣化が避けられない。油静圧案内は、図に示すように、テーブルの送り方向を反転させても往路と同様の挙動を示すことから、反転動作時においても姿勢変化が少ないことが期待できる。

次に、X、Y、Z 軸の各軸におけるステップ送りの挙動測定結果を図 5(a)~(c)に示す。ステップ送りの測定は、B 軸テーブル上

Fig.4 Straightness of X-axis with a reversal operation

Fig.5 (a) Measured X-axis position with 2nm step feeds

Fig.5 (b) Measured Y-axis position with 2nm step feeds

Fig.5 (c) Measured Z-axis position with 2nm step feeds

に設置した測定目標に対して、C 軸上に固定した静電容量型変位計を用い距離の変化を測定することで、各軸の移動量を測定している。図 5(a)~(c)に示したステップ送りの結果には、変動が見られるが 2nm の階段状の動作が確認できる。リニアモータを駆動源に用いた場合においても、油静圧ねじを使用した場合と同様に指令に対して概ね正確に動作していることが分かる。

3. 位置決め性能の評価

3.1 位置決め性能評価システムの構成

ステップ送りの測定結果から、超精密加工機は指令に対して、十分な位置決め性能を有していることが確認されたので、超精密加工機における各軸に対する位置決め性能および動作性能評価は、テーブルの位置偏差量を測定することにより行なう。図 6 に位置決めと動作性能評価システムを行う直動軸の構造を示し、直動軸、リニアスケールおよび制御装置の関係を示す。ここでスライドベースは、構造を説明するために部分断面図としている。

テーブルの位置検出にはレーザスケールを採用し、軸受近傍にてテーブル位置を検出している。このレーザスケールの格子ピッチは $0.55\mu\text{m}$ で信号波長は $0.14\mu\text{m}$ である。これを 4096 通倍することで最終的な分解能を 34pm と設定している。この信号を制御装置(NACHI Nucleus PNC-XP)に取り込み、位置制御を行なっている。この制御装置では、各軸の指令座標、検出座標、指令速度を記録できるほか、指令座標と検出座標の差を位置偏差として表示・記録できる。これにより、テーブル上に位置偏差を評価するための位置測定装置を新たに設置する必要が無く、加工中においても動作の評価が可能である。最小指令単位が 1nm であるのに対し、位置検出分解能が 34pm であることから、位置偏差を利用した位置決めの評価を行なうのに十分な分解能を持っている。

3.2 各送り動作における動作性能の評価

位置偏差の評価は、旋削による軸対称非球面形状の加工を想定した低速送りと非回転工具による自由曲面形状の加工を想定した高速送りの 2 種類の送り動作時とする。図 7(a)は旋削加工を想定し、X 軸に $F=1\text{mm/min}$ の送りを与えた時の位置偏差の測定結果である。これは、主軸回転速度 1000min^{-1} 、工具半径 0.5mm において理論表面粗さ $Rz0.25\text{nm}$ となる条件を想定している。このときの位置偏差は、全振幅で 4nm となっている。次に図 7(b)に非回転工具による加工を想定した $F=2000\text{mm/min}$ の送りを与えた時の位置偏差を示す。これは加工機を最大送り速度で動作

させた結果である。このときの位置偏差は全振幅で 9nm となった。いずれの結果においても偏差量に突起状の乱れが無いことを確認した。目標とする形状精度は p-v 値 $0.1\mu\text{m}$ であることから、いずれの結果においても加工結果に影響の無い位置偏差となっている。

次に非回転工具による金型の加工において、凹凸形状を持つ自由曲面形状の加工動作を想定した評価を行う。軸の加減速を伴う動作の評価としてオシレーション動作時における位置偏差の変動を確認した。図 8 には、Z 軸に対して全振幅 100mm、周期約 19 秒の正弦波状の位置指令を与えた時の位置指令、速度指令と位置偏差の関係を示す。これは、X-Z 平面において、半径 50mm の円運動の送り速度が $F=1000\text{mm/min}$ となる条件である。図より位置偏差には全振幅が約 40nm の周期的なうねりが確認されるが、突起状の偏差は確認されない。加工において全振幅 40nm の位置偏差は、工作物の形状精度に影響を与えらるが、位置偏差に再現性があることから、補正加工による形状の修正が可能となる。以上のことより、旋削による軸対称非球面

Fig.7 (a) Position error at slow speed feed rate ($F=1\text{mm/min}$)

Fig.7 (b) Position error at high speed feed rate ($F=2000\text{mm/min}$)

Fig.6 Position control system with logging function of position detection

Fig.8 Position error during oscillation motion

加工と非回転工具による自由曲面形状の加工の両方において必要とされる動作性能が得られていることが確認された。

4. 工作物加工結果による加工性能評価

工作物として C3604 削削黄銅に無電解ニッケルメッキを施し、非回転工具により幅 50mm 高さ 25mm、曲率半径 50mm の球面の加工評価を行なう。この加工では、X、Z、B 軸の同期制御を使用した球面の加工である。加工形状は、式(1)に示した自由曲面形状式に $C_x=C_z=1/50$, $K_x=K_z=1$, $A_x=B_x=0$ として算出している。工具配置と加工動作を図 9(a)に示す。工作物は、C 軸に設置されたチャックに固定され、X 軸にて工具に切削送りを与える。このとき工具すくい面は拡大図に示すように X 軸方向に向けて設置しており、凸形状に合わせて Z 軸の位置を制御し切込みを与える。また、加工時に工具のすくい角が工作物に対して一定となるように B 軸により工具台の旋回・割出し動作を行ない、Y 軸にてピックフィードを行なう。この加工では C 軸の回転機能は使用しない。この非回転工具による球面加工の場合、X 軸と B 軸は一定方向への送りとなるのに対し、Z 軸は加工形状に合わせて送り方向が反転する。この反転動作時に Z 軸の姿勢が変化すると、輪郭制御に誤差が生じ、工作物に段差や傷が生じる。球状の工作物を非回転工具による加工を行うことにより、テーブルの姿勢の安定性及び動作性能の評価を間接的に行なうことができる。

実際の加工は、図 9(b)に示す工具経路にて、切削送り $F=1000\text{mm/min}$ 、切込み深さ $5\mu\text{m}$ 、ピックフィード $50\mu\text{m}$ にて粗加工を 2 回行なった後、切込み深さ $2\mu\text{m}$ 、ピックフィード $10\mu\text{m}$ で仕上げ加工を 1 回行なっている。粗加工及び仕上げ加工時の工具には、工具先端半径 3mm の(株)アライドマテリアル製単結

Fig.9 (a) Tool Layout of spherical surface with non-rotational cutting tool

Fig.9 (b) Tool path for spherical surface with non-rotational cutting tool

晶ダイヤモンドバイトを使用した。このときの X、Z、B 軸の位置、送り速度、位置偏差の測定結果をそれぞれ図 10(a)~(c)に示す。図 10(c)に示す位置偏差は、動作開始直後及び停止時に X 軸、Z 軸において変動が発生しているが、ここは助走区間であり幅 50mm の実加工範囲では、位置偏差は 10nm 以下に抑えられている。また、図 10(b)に示す送り速度では、Z 軸の送り速度が工作物の凸形状に合わせて変化しており、送り速度が 0mm/min になった 3 秒付近にて Z 軸の送り方向が反転していることを示す。このときの図 10(c)の位置偏差の値に変化は見られない。

加工した工作物は Panasonic 社製超高精度三次元測定機 UA3P 及び ZYGO 社製レーザ干渉計 GPI にて形状測定を行ない、ZYGO 社製面粗さ測定機 New View にて表面粗さ測定を行った。図 11 に工作物の形状測定結果を示す。UA3P による形状精度の測定結果は、設計値に対して p-v 値 $0.08\mu\text{m}$ となった。次に ZYGO GPI による形状精度の評価を図 12 に示す。工作物が凸形状である場合、測定器の性能により評価範囲は頭頂部の $\phi 13\text{mm}$ の領域に限定される。そこで、治具を用いて工作物を 0° , 17° の 2 段階に設定して測定を行なった。これにより、図 9(b)に示す工作物中央部の A 部と外周部の B 部の 2 ヶ所を測定できる。2 つの測定結

Fig.10 (a) Measured position of 3-axis behavior during spherical surface with non-rotational cutting process

Fig.10 (b) Measured feed rate during the spherical surface with non-rotational cutting process

Fig.10 (c) Measured position error during the spherical surface with non-rotational cutting process

果には、形状に同様の傾向が見られる。測定原器自身の形状誤差が含まれているためと思われるが、中央部および外周部の形状精度は A 部が p-v 値 $0.08\mu\text{m}$ 、外周部を測定した B 部が $0.06\mu\text{m}$ となり、形状精度 p-v 値 $0.1\mu\text{m}$ 以下の工作物を得た。図 13 に工作物の中央部幅 0.35mm 、高さ 0.25mm における表面粗さを、図 14 にこの範囲におけるピックフィード方向の表面粗さの測定結果を示す。表面粗さは $Ra1.9\text{nm}$ となり、光学金型の表面粗さとして問題の無いことを確認した。これらの結果より、非回転工具による加工によって光学部品用自由曲面形状金型に対する切削が可能であることが検証された。

このときの加工時間は粗加工が 9 時間、仕上げ加工が 13.5 時間、総加工時間が 22.5 時間であった。同寸法の工作物をフライカットにて加工する場合、回転切れ刃による断続切削であるため、切削速度は $F=100\text{mm/min}$ に制限される。また、戻り動作も従来の機械では $F=300\text{mm/min}$ に制限されていたため、ピックフィード及び粗加工および仕上げ加工の数を同一にした場合、粗加工に 13.6 時間、仕上げ加工には 34 時間を要し、合計で 47.6 時間を要する計算となる。自由曲面加工における加工の効率化には、非回転工具による加工が有効であることが明らかになった。

5. 結 言

超精密 5 軸加工機を開発し、基本性能の評価と工作物加工結果の評価を行ない以下の結果を得た。

- (1) 往復動作時における真直度を測定し、反転動作時においても直定規と静電容量型変位計の検出距離に変化が無く、テーブルの姿勢変化が無いことを確認した。
- (2) 直動軸のステップ送り測定を実施し、ナノメートルオーダーでの位置決めが可能であることを確認した。
- (3) アクティブ除振装置の性能評価を行い、 2Hz から 100Hz の範囲において除振装置の効果を確認した。
- (4) 油静圧案内を使用した超精密加工機において、位置偏差を利用した輪郭制御の性能評価が可能であることを確認した。
- (5) 旋削加工および非回転工具による加工を想定した 2 種類の送り速度において、ともに輪郭制御の位置偏差が実加工に影響の無い範囲であることを確認した。また非回転工具による高速加工を想定した反転動作を伴うオシレーション動作においても、位置偏差のうねりはあるが突起状の位置偏差が発生しないことをから高精度な加工が可能であること確認した。
- (6) 工作物の加工による性能評価により形状精度の p-v 値 $0.08\mu\text{m}$ が得られ、目標とした $0.1\mu\text{m}$ 以下の性能目標を達成し、加工性能に問題の無いことを確認した。
- (7) 光学金型用途の自由曲面加工の超精密加工方法として非回転工具による加工を示し、従来のフライカットに対して半分以下の時間で加工が可能であることを示した。

今後の予定として、他の形状の高精度加工の要求に対し、高速・高精度の加工方法の検討、および加工結果の検証を行う。

参 考 文 献

- 1) 荻谷誠：超精密加工機およびその要素技術の今後について、精密工学会誌, **75**, 1 (2009) 126
- 2) 薄木雅雄、荻谷誠：超精密非球面加工機について、精密工学会誌, **55**, 6 (1989) 967
- 3) 越後敬介、荻谷誠、上芳啓：超精密加工機による光学部品・光学部品用金型の加工、2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集
- 4) P. Sriyotha: Capstans or Lead Screws? Proc. ASPE 1992 Ann. Meeting, (1992)

Fig.11 Cross-sectional profile of workpiece (Panasonic UA3P)

Fig.12 Surface profile after machined workpiece (ZYGO GPI)

Fig.13 Surface roughness of machined workpiece (ZYGO New View)

Fig.14 Sectional roughness of machined workpiece (ZYGO New View)

- 116.
- 5) H. Mizumoto et al. : An Angstrom-positioning System Using a Twist-roller Friction Drive, Prec. Eng., **17**, 1, (1995) 57
- 6) 河合知彦, 蛭原健三, 山本明: リニアモータ駆動の超精密 5 軸ナノ加工機, 精密工学会誌, **72**, 4 (2006) 435
- 7) 田中克敏, 福田将彦, 覚張勝治, 鈴木清, 植松哲太郎: 超精密加工機の高精度化の研究, 砥粒加工学会誌, **51**, 9 (2007) 482, Technology Vol.55, 1, (2006) 381.
- 8) 例えば, D. H. Youden: Development of 5-Axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine CIRP Annals – Manufacturing
- 9) 鈴木秀幸, 浦野好市, 久米原宏之: 超精密工作機械向け高精度液温制御装置の開発, 精密工学会誌, **75**, 5 (2009) 639
- 10) 鈴木秀幸, 浦野好市, 久米原宏之, 楠本一臣: 静圧作動油に起因する超精密工作機械の熱変形抑制, 精密工学会誌, **75**, 9 (2009) 1106.
- 11) 横田明則: 環境振動評価に関する国際規格, 騒音制御, **24**, 6 (2007), 370