粗微動連動制御機構による表面粗さ測定に関する研究*

— 装置の構成と 2, 3 の測定結果 —

熊田毅史** 三井公之*** 中嶋和雄† 生田目英幸†

Study on a Stylus Profiling Instrument Based on a Fine and Coarse Dual-Servo Mechanism
— Measuring Principle and a Few Measurement Results —

Takeshi KUMADA, Kimiyuki MITSUI, Kazuo NAKAJIMA and Hideyuki NAMATAME

Stylus instruments are recognized as highly reliable and practical devices for surface roughness measurement. Up to now, these instruments have been capable of satisfying on-going needs of the industrial fields, though noticeable drawbacks such as the restriction of measuring speed due to natural frequency of the stylus, and damage on the measured surface caused by high contact pressures. Future requirements such as the analysis of micro-parts imply the need for improvement in such instruments. In this paper a new stylus instrument which has a totally different construction concept; namely, a fine and coarse mechanism control system has been proposed. At first the measuring principal of this instrument, in this paper referred to as the Dual-Servo Stylus Profiler is described. Then the validity of the contact stylus is first clarified, followed by experimental results that prove validity of the device itself as a stylus profiler. Reliable surface profile measurement results proved the validity of the dual-servo profiler as a stylus instrument for measuring surface roughness.

Key words: measurement, surface roughness, stylus method, fine and coarse mechanism, dual-servo control

1. はじめに

工業製品の高機能化が進む中で、高精度の表面形状計測の重要性が高まってきている。また、微細加工技術の進展に伴い微細な部品の形状・寸法の計測技術の開発も強く要請されるようになってきている。

表面形状の高精度測定のために、光干渉法¹⁾、光触針法^{2,3)}などの光学的測定法や STM, AFM といった原子レベルでの測定を可能とする装置の実用化も達成された。しかし、生産現場などで最も一般的に広く使用されているのは触針式表面粗さ計である。触針式表面粗さ計は、高精度で、取扱いが容易といった長所を備える反面、触針圧が大きい場合には測定表面に傷を付ける心配があること、一方、触針圧を小さくすると測定系の固有振動数が低くなるために測定速度を低くせざるを得ないこと等の難点も持つ。特に、高精度の測定装置では、外部からの振動による触針の飛びや、空気の流れにより測定が影響されるなどの問題が生じ、整った測定環境の中での使用に限定される。また、触針式粗さ計をベースとした表面形状測定機では、高さ方向の測定範囲を大きく取るためには、触針部の機構が大型となり、触針圧の上昇を招くことになる。

このために、著者の一人らは、nm レベルの表面粗さ測定から、比較的粗さの値の大きい機械加工面の測定、さらにはマイクロマシン用部品の形状・寸法測定に利用しうる高さ方向の測定範囲の広いデュアルサーボ式 STM の開発を試み、その内容について既に報告している⁴⁾。しかし、STM では測定対象が導電性の材質に限られることが難点となっていた。これを解決するためには、接触式粗さ測定法にデュアルサーボ式 STM と同様の制御方式を導入し、低い触針圧での表面形状測定を実現することが考えられる。圧電素子により駆動される微小測定力

探針による表面粗さ測定の試みについての報告⁵⁾が見られるが、圧電素子の変位が小さいために、特に高さ方向の測定範囲は狭い。

このような観点から、本研究では触針位置の制御による新しい表面粗さ測定方式である粗微動連動制御式表面粗さ測定装置の開発を試みた。本研究では、片持ちばりを用いた触針式プローブの構成と基本特性、測定系の周波数応答などの特性について述べた後、試作装置によって得た種々の表面粗さ測定結果について報告する。

2. 測定原理と装置構成

粗微動連動制御式表面粗さ測定装置の構成を図 1 に示す。装置は触針式プローブ、微動機構、粗動機構、制御回路、測定試料送り装置からなる。微動機構には最大変位量 15 μm の積層型圧電素子を用い、粗動機構に取り付けられている。また、微動機構には図 2 に示す触針プローブを取り付けている。粗動機構は、弾性ヒンジよりなる平行ばねを 2 段直列に結合したものを⁶⁾、圧電素子の変位を拡大して、最大 60 μm の変位を得ることができる。

触針式プローブの構成を図 2 に示す。片持ちばりのたわみを測定するために静電容量型変位計を組み込んでおり、質量は約 20 g である。片持ちばりは、アルミニウム合金製で長さ 30 mm、厚さ 1 mm、幅 3 mm である。片持ちばりの先端部には半径約 1 μm のダイヤモンド触針を持つスタイラスを取り付けている。

試料測定時には、触針が試料にふれたときのはりのたわみを静電容量型変位計で測定し、たわみ量が常に一定になるよう触針プローブの位置を粗微動連動制御機構により制御し、その時の粗動機構と微動機構の変位の和により表面形状が求められることになる。粗動機構の変位は平行ばねの横に取り付けた静電容量型変位計あるいは電気マイクロメータにより測定するが、微動機構の変位は直接測定できないため、微動機構に用いているのと同じ圧電素子を直列に接続し、その変位を静電容量型

* 原稿受付 平成 9 年 4 月 4 日

** 正 会 員 山武ハネウエル(株)生産本部(藤沢市川名 1-12-2)

*** 正 会 員 慶應義塾大学理工学部(横浜市港北区日吉 3-14-1)

† (株)東京精密生産本部八王子工場(八王子市石川町 2968-2)

Fig. 1 Layout of the stylus profiling instrument

Fig. 2 Diagram of the capacitance-based stylus probe

変位計でモニターすることにより求める。

制御系のブロック線図を図3に示す。図から明らかなように、目標値を二つ持つ二重のサーボ制御を行っている。信号の流れを以下に説明する。

触針式プローブの片持ちはりのたわみ量は電圧値に変換され、目標値 $R1$ との差が積分器1を経て微動機構用圧電素子駆動用ドライブアンプに入力される。ドライブアンプの出力電圧に応じて微動機構が変位し、触針式プローブの位置が変化する。積分器1の出力は分岐して目標値 $R2$ との差が積分器2、圧電素子駆動用ドライブアンプを経て、粗動機構が変位する。粗動機構と微動機構の変位が加算されてフィードバックされる。図3の入力は測定表面の形状に対応している。

目標値 $R1$ は触針式プローブのはりのたわみを一定値に制御するための参照値に相当し、触針プローブの触針圧を規定するもので、この値が測定器の性能として重要な意味を持つことに

Fig. 3 Block diagram of dual servo control system

Fig. 4 Characteristic curve of the stylus probe

なる。目標値 $R2$ は、微動機構の変位量がその最大変位量 $15 \mu\text{m}$ の半分である $7.5 \mu\text{m}$ を常に維持するように粗動機構を制御するように設定される。

積分器1,2の時定数により制御系の周波数特性が決定される。微動機構は振幅は小さいが高い周波数成分の測定を、粗動機構は振幅は大きい低い周波数成分の測定を分担して行うことになり、両者の協調動作により、広い高さ方向の測定範囲が得られる。

3. 触針式プローブならびに測定装置の特性

初めに、触針式プローブの片持ちはりのたわみ量とプローブに組み込んだ静電容量型変位計の出力との関係を調べた結果を図4に示す。

次に触針式プローブの分解能を測定した。触針を圧電素子により微小変位させ、そのときの圧電素子の変位を静電容量型変位計により求めるのと同時に、触針式プローブに組み込んだ静電容量型変位計の出力信号を記録した結果を図5に示す。このとき、圧電素子を 7 Hz の矩形波状信号により励振している。

触針が振幅 400 nm で振動しているのに対応して、触針式プローブの出力には同様の矩形波状出力が確認できる。しかし、はりの変位を測定する静電容量型変位計には雑音成分が重畳していることから、分解能は約 300 nm 程度と考えられる。また、触針式プローブ出力の時間的な変化を調べるため、触針位置を一定にした状態で測定を行った結果が図6である。2000秒間に最大で 100 mV の出力変化があり、これを変位に換算すると約 600 nm に相当する。測定は恒温室内で行われていないので、装置各部の熱的な変位も影響した結果となっているが、表面形状測定は比較的短時間のうちに行われるために、長い周期での変動が測定結果に与える影響は小さいものと考えている。

図7は触針式プローブの周波数応答特性を示したものである。ゲイン特性には 250 Hz , 400 Hz 付近でやや乱れが認められるものの、 500 Hz 程度まではほぼ一定値を保っているものと

Upper: output of capacitance sensor of the stylus probe
Lower: displacement of the stylus

Fig. 5 Resolution of the stylus probe

Fig. 6 Stability of the stylus probe

Fig. 7 Frequency response of the stylus probe

見ることができる。

なお、測定時における触針を支持する片持ちはりのたわみ量の目標値は $3\text{ }\mu\text{m}$ としている。このときの触針の接触力は、片

Fig. 8 Closed loop frequency response of the dual-servo control system

持ちはりの材質より計算すると約 6 mN である。測定力を 1.5 mN 程度まで低減しても測定が可能であることを確認しているが、ここでは若干余裕を持った値に設定している。

図8は、FFTアナライザのサーボ解析機能を利用して求めた測定装置の閉ループ周波数特性である。系への入力、触針式プローブの触針を圧電素子により正弦波状に振動させることにより与え、粗動機構と微動機構の変位の和を出力として、正弦波の振動数を掃引することにより閉ループの特性を求めている。この際、加振用圧電素子の振動振幅を $0.1\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ の間で変えて数回実験を行った結果、閉ループ周波数特性はほとんど同一であったので、ここでは振幅 $1\text{ }\mu\text{m}$ の場合のものを図8に示した。67 Hz 近辺に小さなピークと、234 Hz にピークが現れている。67 Hz の小さなピークは粗微動連動制御系によって形成される二次遅れ系の共振点であり、234 Hz のピークは粗動機構に用いている平行ばねの固有振動数による共振点である。

4. 表面粗さ測定結果

本試作装置による表面形状の測定結果を以下に述べる。測定時の試料の送り速度は 0.03 mm/s である。また、測定時にはアナログ式の高域遮断フィルターならびに測定波形の記録に用いたFFTアナライザのアンチエイリアシングフィルターは使用していない。なお、使用した触針式表面粗さ計は、サーフコム1400 A 型（東京精密製）で、触針半径は $5\text{ }\mu\text{m}$ である。

4.1 表面粗さ計校正用標準片の測定

触針式表面粗さ計の校正に用いる粗さ標準片を測定した。図9(a), (b)に、本測定装置によって求めた測定結果と、触針式表面粗さ計で測定した結果とを示す。両測定結果はほぼ一致しており、本測定装置の有効性を示す結果となっている。また、図9(c)に示した測定中における触針式プローブの出力信号には、雑音成分が重畳してはいるものの、一定レベルの値を示しており、片持ちはりのたわみ量が一定値に保たれていること、すなわち測定力が一定になるように制御されていることがわかる。

4.2 旋削加工面の測定

本測定装置によるアルミニウム合金丸棒の旋削加工面の測定結果を図10に示す。本測定装置と市販の触針式表面粗さ計と

Fig. 9 Surface profile of standard specimen for calibration

Fig. 10 Surface profile of turned workpiece

による測定結果の比較により、波形の振幅、形状を含めて両者はほぼ一致している。

4.3 フライス加工面の測定

図 11 はアルミニウム合金板をフライス加工した表面の測定結果である。両測定法による結果はほぼ一致していると見られるが、本測定法により求めた波形には、より高い周波数成分が含まれている。これは、高域遮断フィルターを一切使用していないことと、既に述べているように本測定装置の触針プローブ

Fig. 11 Surface profile of milled workpiece

Fig. 12 Surface profile of the grooved workpiece

の出力には雑音成分が含まれていることの影響が現れたものと考えている。

図 12 は同じくアルミニウム合金板に、フライス加工で浅い溝加工を行った部分を測定した結果である。溝の深さなどの大きな形状が良く一致していることに加え、溝内部の細かい表面形状の特徴をも良くとらえているものといえる。また、微動系の最大ストロークである $15\text{ }\mu\text{m}$ をはるかに越える最大 $50\text{ }\mu\text{m}$ に近い段差の測定を可能としており、粗微動連動制御による測定範囲の拡大の有効性が示されたものと考えている。

5. ま と め

触針に作用する測定力を制御する方式による新しい触針式表

面粗さ測定装置の実現を目的として、本研究では粗微動連動制御式表面粗さ測定装置の開発を試み、片持ちはりを用いた触針式プローブの構成と基本特性、測定系の周波数応答などの特性、ならびに種々の表面粗さ測定結果について述べた。

主な結果を以下にまとめる。

- (1) 粗微動連動制御に用いる触針式プローブを考案し、その有効性を確認した。
- (2) 試作した粗微動連動制御式表面粗さ計により種々の加工面の表面形状測定を行い、従来の触針式粗さ計によった測定結果と比較することにより本測定装置の有効性を示した。

一方、触針式プローブの出力に重畳する雑音成分、ならびに触針の接触力の低減を図ること、制御系の周波数応答特性を改善して、測定速度を高めることなどが今後の研究課題として残された。

終わりに、本研究を進めるに当たり協力された(株)東京精密生産本部八王子工場メトロロジーグループ副参事小田切延之氏には、ここに深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) G. E. Sommargren : Optical Heterodyne Profilometry, Appl. Opt., **20**, 4, (1981) 610.
- 2) 小沢則光ほか：非接触光学式微細形状測定ヘッド (HIPOSS-1) ——超精密測定技術の研究, 精密工学会誌, **52**, 12 (1986) 2080.
- 3) 三井公之ほか：高感度非接触粗さ計の開発, 精密工学会誌, **53**, 2 (1987) 328.
- 4) 中村明信, 三井公之, 後藤崇之：デュアルサーボ式 STM の開発, 精密工学会誌, **62**, 6 (1996) 850.
- 5) L. P. Howard and S. T. Smith : Long Range Constant Force Profiling for Measurement of Engineering Surfaces, Rev. Sci. Instrum., **63**, 10, (1992) 4289.
- 6) 津田展宏ほか：大ストローク STM, 精密工学会誌, **55**, 1 (1989) 146.