三次元表面凹凸測定機における試料表面 姿勢制御に関する研究*

塚 田 忠 夫** 加 藤 勝 男*** 趙 南 圭†

A Study of Control for Compensating Specimen Surface Orientation
in Three-Dimensional Surface Roughness Measuring Instrument

Tadao TSUKADA, Katsuo KATO and Nahmgyoo CHO

When we measure three-dimensional surface roughness, higher skill is demanded to locate the specimen surface within a range of profilometer. From this need, the authors developed the three-dimensional profilometer to measure micro irregularities of surface by applying a commercial stylus profilometer. The developed system was controlled automatically the orientation of specimen table by the micro-computer. This computer calculates the inclinations of table in X- and Y-directions and the height to keep the diamond stylus in a measuring range. The height was corrected in an accuracy of $0.1\mu\text{m}$ and the inclination of table in about $0.02\mu\text{m/mm}$.

Key words: three-dimensional measurement, profilometer, surface roughness, irregularity, automatic measurement, measuring instrument

1. 結 言

加工表面の微細な凹凸や形状を三次元的に計測し、その性質を把握する研究が多く報告されるようになってきた^{1)~3)}。しかしながら、例えば触針式三次元粗さ測定機により表面微細形状を測定するような場合、測定レンジ内に試料表面を設定することは容易ではなく、多くの時間が準備に費やされている¹⁾。そのために、精密に加工された平面データムを基準として測定する方法⁴⁾や、スタイラスの高さ方向位置を調整しながら測定し、測定されたデータに対してスタイラスの高さ方向調整量を補正する方法⁵⁾などが試みられてきた。本報は、汎用の表面粗さ測定機を利用し、測定レンジの中に入るように、あらかじめ低い縦倍率で測定されたデータを用いて、測定機の測定レンジ内に試料表面を自動的に設定する三次元表面粗さ測定システムの開発について報告する。

2. 測定システムの構造

2.1 表面凹凸の測定方法

できる限り簡便な測定システムにするために、スタイラスを直線駆動して表面凹凸を測定する汎用の表面粗さ計を応用する。表面凹凸の三次元データは、図1に示すように平面試料の表面上でスタイラスをラスカスキャンさせて測定するようにする。

測定データは、コンピュータで処理されることを考え、図1のようにX,Y方向任意間隔 Δx , Δy のマトリックスの交点で任意のデータ数 N_x , N_y の離散化データを得るようにする。また、試料のリロケーションのニーズにも対応できるように、試料セッティングテーブルとスタイラスの相対位置関係が把握できる工夫も加える。

2.2 測定システムの構造

上述した測定が行えるように開発した測定システムの概略を図2に、その制御の流れを図3に示す。図1に示すX方向のスタイラスの移動は、汎用の表面粗さ計のスタイラス駆動機構(小坂研究所; SE-30C)を利用して行う。このスタイラス駆動部の真直度は、公称 $0.2\mu\text{m}/100\text{mm}$ である。Y方向の移動は、静圧空気軸受の直動形テーブル(NSK; GLS005B150, 真直度 $0.1\mu\text{m}/50$

* 原稿受付 平成3年9月26日

** 正 会 員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 正 会 員 日本たばこ産業(株)たばこ中央研究所(横浜市緑区梅が丘6-2)

† 学生会員 東京工業大学工学部大学院

mm) をステッピングモータとマイクロメータヘッドにより、 $0.07\mu\text{m/p}$ の送り量で駆動する。図4にその機構を示す。X, Y方向の位置は、空気圧プランジャ形デジタルプローブ (HEIDENHAIN; MT25, 最小パルス間

Fig.1 Raster scan of stylus on a surface

隔 $0.1\mu\text{m}$) によって検出する。このプローブを用いることにより、空気圧を与える前の状態、すなわちプランジャが戻っている位置を原点として、スタイラスの位置を把握することができる。例えば、図2において試料テーブルの P_1 を基準とするスタイラスの相対位置は、 P_1 点からの位置が分かっている位置にスタイラスを置いて、X, Y方向のデジタルプローブの出力を読みとることにより得られる。この相対位置の精度に関するデジタルプローブの原点復帰の再現性は、50回の試行の結果、標準偏差で $0.05\mu\text{m}$ であった。デジタルプローブからの出力は、図1に示す測定開始命令やデータのサンプリング指令 (最小サンプリング間隔 $0.1\mu\text{m}$) に用いる。なお、本システムにおける X-Y 平面上の測定可能範囲は $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ である。

スタイラスの高さ方向移動及び位置決めは、図2の粗・微動送りステージにより行う。いずれもステッピングモータと送りねじにより駆動するが、粗駆動はスタイラスを上下方向に大きく移動させる場合に使用する。また、微動機構は、図5に示すように粗動ステージに取り付けられ、 $0.1\mu\text{m/p}$ で位置決めを行う。垂

①Coarse feed motor in Z-axis ②Fine feed motor ③Fine feed screw and gear ④Drive unit in X-axis ⑤Digital scale ⑥Stylus ⑦Column guide for coarse feed ⑧Coarse feed stage ⑨Fine feed stage ⑩Screw of Y-axis ⑪Motor of Y-axis ⑫Screw and gears to correct table inclination ⑬Air slide ⑭Specimen table

Fig.2 Outline of the three-dimensional measuring system

Fig.3 Control flow of the system

Fig.4 Driving mechanism of the table in Y-direction

直方向の位置は、上記の方法と同様のデジタルプローブにより検出する。この微動機構の歯車列には、バックラッシュを少なくするために、小歯車を大歯車の半径方向に板ばねで押しつける構造とした。なお、微動送りを行うときは、粗動テーブルをエアシリンダによりコラムガイドにロックし、測定機の剛性を高めるよ

Fig.5 Mechanism of the fine feed in Z-axis

Fig.6 Control points to correct the table inclination

うにした。

2.3 試料テーブルの姿勢制御機構

測定試料面は上述したX, Y駆動機構によって形成される平面に対して平行になるように、試料テーブルの姿勢を制御する必要がある。そのために、図6に示すように、試料テーブルを $P_1 \sim P_3$ の3点で支え、そのうちの2点 P_1, P_2 をそれぞれ独立に上下動させることによってテーブル面の傾斜を補正する。

P_3 点は鋼球によって支持され、 P_1, P_2 点の上下動は、ステッピングモータの回転を減速歯車を介してマイクロメータヘッドに伝え、 $0.1 \mu\text{m/p}$ で行う。この場合、モータの正逆回転を確実に伝えるために、歯車のバックラッシュを極力少なくする必要がある。 P_1, P_2 点の駆動機構で採用したバックラッシュを抑える構造は、図5

Fig.7 Vertical displacement of table at the point P_1 driven by stepping motor

と同じものである。図7は、図6の P_1 点の位置で、ステッピングモータを正逆回転させて測定したテーブルの上下方向の変位である。バックラッシュの影響を受けずに与えたパルス通り上下の変位をしていることが分かる。

3. 試料テーブル姿勢制御のアルゴリズム

試料テーブルの傾斜やスタイラスの高さ位置の補正は、あらかじめ測定したデータにより行う。このデータを得るための縦倍率は、測定長 L （一般には、 $L=0.8 \sim 3\text{mm}$ 程度）にわたって測定レンジ内に入るように設定しなければならない。そのために、図3のように測定中に測定レンジを超えた場合には測定を中止し、縦倍率を変更して測定し直すように、CRT表示する。また、制御量は次の処理をして決める。

図1のように、 X 方向のサンプリング間隔を ΔX 、測定データの数 N_X 、高さデータを z_1 とおき、 X 方向の試料テーブルの傾斜 η_X と測定開始点における断面曲線の平均線の位置 δ_X を、最小二乗法により求める。同様に、添字 X を Y に置き換えた Y 方向の η_Y 、 δ_Y は、図2の試料テーブルを Y 方向に移動させながらデータ z_1 を測定し、 η_Y と δ_Y を得る。これらはいずれも X 、 Y 方向1ラインの測定データから求める。

テーブルの姿勢制御は次のように行う。まず、 X 方向のテーブルの傾斜補正は、制御時間が短くなるように P_1, P_2 点の上下制御量 T_{X1}, T_{X2} を等量逆方向とし

$$T_{X1} = \eta_X L_X / 2, \quad T_{X2} = -\eta_X L_X / 2 \quad (1)$$

で行う。 L_X は図6に示す支点間の距離である。 Y 方向に対する制御量は、添字 X を Y に置き換えて、次のようになる。

$$T_{Y1} = T_{Y2} = \eta_Y L_Y \quad (2)$$

本研究では、前述したように試料テーブルとスタイラスの相対位置が把握できるので、 P_1 点に対する測定開始点の X, Y 方向の位置を x_0, y_0 とおけば、図2の微動軸によるスタイラスの高さ方向の制御量は、 X 方向制御時に T_{FX} 、 Y 方向制御時に T_{FY} として

$$\begin{aligned} T_{FX} &= -\{\delta_X + \eta_X (L_X / 2 - x_0)\} \\ T_{FY} &= -\{\delta_Y + \eta_Y (L_Y - y_0)\} \end{aligned} \quad (3)$$

4. 実験結果

4.1 制御用データの測定倍率

本研究では、各軸の制御量はあらかじめ測定した試料表面のデータから求めるので、測定長 L にわたってデータは測定レンジ内にあるように縦倍率を設定しておく必要がある。

図8は、オプティカルフラットを試料とし、傾斜補正の原理は理解しているが試料セッティング操作には熟練していない数人の被験者に、マニュアルで試料をテーブルにセッティングさせたときのセッティング誤差（傾斜）の実験結果を示す。測定開始時にスタイラスを測定レンジのほぼ中央に設定することにすれば、図8の結果から、測定機の縦倍率は約 $\pm 30 \mu\text{m}/\text{mm}$ を許容できるようにする必要がある。測定長を $L=3\text{mm}$ とすれば、必要とする測定レンジは、 $\pm 90 \mu\text{m}$ に表面凹凸の最大振幅とある程度の余裕を加えた値となる。ここでは、必要とする測定レンジを $\pm 100 \mu\text{m}$ とし、断面曲線が記録紙の有効記録幅 60mm に十分入ることを目標に、縦倍率として200倍を選択することにした。

4.2 試料面姿勢補正結果

図9は、ラップ加工された鋼製試料を用い、縦倍率200倍、サンプリング間隔 $1 \mu\text{m}$ 、測定長約 3mm の条件で

Fig.8 Inclination of specimen surface corrected by manual operation

(a) Measured data in 200 magnifications

(b) After control in 200 magnifications

(c) Profile of (b) in 20000 magnifications

Fig.9 Measured data before and after control

Fig.10 Inclination corrected by using the data in 5000 magnifications after the control of Fig.9(b)

測定し、そのデータによって制御を行った結果である。図9(a)は、試料をマニュアルでテーブルに設定したときの測定データであり、図9(b)は測定データから制御量を導き制御した後の測定データである。図9(c)は図9(b)の状態を、20000倍で測定し直して表示した断面曲線である。測定機の測定分解能の制約などから、低倍率のデータによって高倍率を必要とする試料面を測定レンジ内に設定することは難しいことが分かる。したがって、高倍率で測定する細かい凹凸をもつ試料

Table 1 Inclination of specimen surface before and after control

No.	Ra μm	Inclination(absolute values) μm/mm					
		Original data		After 1st control		After 2nd control	
		η_x	η_y	η_x	η_y	η_x	η_y
O1	0.06	9.9	10.0	0.10	0.08	0.002	0.010
G1	0.11	9.9	9.9	0.10	0.03	0.007	0.012
G2	0.35	10.0	9.9	0.05	0.15	0.006	0.015
G3	0.15	9.8	10.0	0.11	0.09	0.011	0.017
L1	0.12	10.0	10.0	0.09	0.10	0.001	0.001
L2	0.05	9.9	10.0	0.06	0.06	0.013	0.003
L3	0.02	9.9	9.9	0.07	0.09	0.003	0.009

Note 1) Symbols of specimen No.: O;Optical flat, G;Ground surface, L:Lapped surface.

Note 2) Magnifications:200 for 1st control, 5000 for 2nd control.

に対しては、低倍率データによる制御の後、より高い倍率に変えて試料面を測定し直し、再度制御を行って測定レンジ内に試料表面を設定するようにする。図10は、図9(b)の状態の試料面を倍率5000倍で測定し、そのデータによって制御した結果である。傾斜及び高さ方向の位置が十分な精度で制御されていることが分かる。

表1は、いくつかの試料についての η_x , η_y の実験結果である。実験の範囲では、第1回目の制御でいずれも $0.15 \mu\text{m/mm}$ 以下の傾斜に補正することができている。このデータを基に、第1回目の補正で測定できる表面凹凸の大きさについて検討する。本研究で用いた汎用の粗さ計では、記録されるプロファイルが記録紙の幅60mmに対して10~20mm程度に収まるように選択することが経験上から推奨されている⁵⁾。この推奨値に従うことにし、測定開始位置でスタイラスを測定レンジのほぼ中央にセッティングするものとすれば、測定長 L の表面凹凸の平均線は、余裕をみて約10mm以内に入っていればよいことになる。縦倍率を M 倍、測定長 L とすれば、XまたはY方向のみの測定では

$$M \leq 30/\eta L \quad (4)$$

となる。ここで、 η は η_x または η_y である。表1から $\eta \approx 0.15 \mu\text{m/mm}$, $L=3\text{mm}$ とすれば、非常に滑らかな面に対して1回の制御により可能な縦倍率は $M \leq 66000$ となる。X,Y方向同じ条件で三次元的に測定する場合は、Y方向もX方向と同様に考えられるので、式(4)において L を $2L$ とみなして、上記条件に対し約30000倍となる。これ以上の縦倍率を必要とする試料では、縦倍率を高くして補正を繰り返す必要がある。第2回目の補

Fig.11 Verification of stylus positioning in X-direction by cross-correlation function

正によって測定可能な縦倍率は、一方向のみの測定に対しては、表1の結果と式(4)より計算上 $M \leq 580000$ となり、三次元測定では、約290000倍である。汎用の表面粗さ測定機では、縦倍率は段階状に設定されているので、上記の倍率が上限の目安となる。

姿勢制御は、X方向、Y方向の順に行ったが、得られたオプティカルフラット面の姿勢のX、Y方向成分は表1に非常に近いものであった。

4.3 スタイラス位置決めの再現性

例えば、摩耗面の微細形状を、摩耗の進展に伴って試料の同一箇所を何回も測定したい場合、試料のリロケーションに高い精度が要求される。そのための取付けジグなどはここでは検討しないが、このような要求を測定装置の精度の面から考え、スタイラスの位置設定の再現性を相互相関関数から検討する。

いま、不規則な凹凸をもつ試料面を測定して得たデータを $z_1(x_1)$ とおく。 x_1 は、測定開始点からのX方向のサンプリング位置である。X方向の測定を終了した後、再びスタイラスを原点に戻し、この測定操作を繰り返して、 r 回目のデータを $z_r(x_1)$ とおく。この二つのデータによる相互相関関数 $R_{1r}(\tau)$ は、遅れを τ とおいて次式で与えられる。

$$R_{1r}(\tau) = \sum z_1(x_1) z_r(x_1 + \tau) / N \quad (5)$$

ここで、 N はデータ数である。もし R_{1r} が $\tau = \tau_{1r}$ で最大値を示すならば、 r 回目のデータは、1回目のデータに対してX方向に τ_{1r} ずれたことになる。

ラップ加工面に対して得た相互相関関数 $R_{13}(\tau)$ を図11に示すが、 $\tau_{13} = 0.1 \mu\text{m}$ のとき $R_{13}(\tau)$ が最大値となっている。Y方向に対してもXをYに置き換えて、ずれの量 τ_{1r} が得られる。5回の測定結果では、X、Y方向とも $|\tau_{1r}| \leq 0.3 \mu\text{m}$ であった。したがって、スタイ

ラスの位置決めの再現性は約 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 以内であるといえる。

5. 結 言

低倍率であらかじめ測定したデータを基にして、試料表面の姿勢（傾斜と高さ）を補正する装置を備えた測定システムを開発し、以下のような結論を得た。

(1)汎用の測定機をベースとし、高精度化を図るためにバックラッシュの少ない機構を取り入れ、試料面の自動姿勢制御アルゴリズムをもつ三次元表面粗さ測定システムを製作した。

(2)マニュアルによりセッティングできる試料表面の傾斜を実験的に求め、制御用データの測定縦倍率の設定基準を明らかにした。

(3)本研究では、試料面姿勢制御のための測定倍率を200倍とし、それを基にした制御により、 $0.15 \mu\text{m}/\text{mm}$ の傾斜まで補正できることを示した。

(4)高倍率の測定が必要な試料に対しては、上記(3)の補正後、倍率を高くして測定し直し、そのデータによって試料面の姿勢を制御することにより、本研究では $0.02 \mu\text{m}/\text{mm}$ 以下の傾斜に抑えることが可能となった。

(5)本測定システムでは、縦倍率200倍で試料面姿勢の補正を1回行うことにより、測定長3mmの一方向のみの測定に対して約60000倍の縦倍率まで可能であり、縦倍率を5000倍にして2回目の補正を行えば、約500000倍程度の測定が可能であることを示し、三次元測定での倍率は、これらの倍率の半分になるとした。

(6)スタイラスの位置決めの再現性を、繰り返し測定された断面曲線の相互相関関数によって確かめた結果約 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 以内であった。

最後に、本研究は平成2年度文部省科研費（一般研究(B)01460107）により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) T. Tsukada and K. Sasajima: A Three-Dimensional Measuring Technique for Surface Asperities, *Wear*, 71(1981)1.
- 2) E. P. Whitten and D. E. Deckman: Measuring Matching Wear Scars on Balls and Flats, *Surface Topography*, 2, 3(1989)205.
- 3) K. J. Stout, E. J. Davis and P. J. Sullivan: Atlas of Machined Surfaces, Chapman and Hall, (1991).
- 4) A. Bengtsson and A. Rönnerberg: The Absolute Measurement of Running-in, *Wear*, 109(1986)329.
- 5) T. Kanada, T. Kubota and A. Suzuki: A Three-Dimensional Surface Profile Measuring System with a Specimen-Levelling Device, *Measurement Sci. and Tech.*, 2, 3(1991)191.
- 6) 表面粗さ測定器SE-30C取扱説明書, 小坂研究所。