光プローブの自律走査と平面データムの内蔵を特徴とする表面凹凸形状測定機

柳　和久*　　黒蔵　忠**　　根本　賢太郎**

Development of a profiling instrument with reference plane insensitive to surrounding conditions
A study on surface topography measurement using spot-type optical probes on the market

YANAGI Kazuhisa,　KUROZO Tadashi　and　NEMOTO Kentaro

抄録

面領域を走査する座標系として直交座標に加えて極座標の実用性を追求し、光プローブ変位計の異常値補正と最適なサンプリング条件を導出するためのソフトウェア開発に力点を置いた。

1　緒言

工業製品の高機能化・高性能化に伴って，機械加工部品の図面指示による要求項目は多様化し，また数ナノメートルという高い精度が要求されるようになっている．このような超高精度で部品の幾何特性仕様を検測するためには，恒温室のように測定環境が整った場所に設置された大掛かりな防振設備付の高価で特殊な光学式測定機を使用する必要が生じる．

本研究では，簡単な構造でも外乱の影響を受けにくく，多様な測定要求項目に対応できる，高精度な非接触ポイントセンサ相対走査型の表面凹凸形状測定機の開発を目的とした．

2　測定原理

本研究で開発した測定機の構造を図１に示す．被測定表面を倣う用のセンサとして被接触ポイント型変位計を門型コラム上にあるＺステージに取付けている．被測定物をテーブルの上に置き，直交座標系の *X-Y* ステージを水平方向に移動させることで，面領域の表面凹凸形状測定が行える．

＊長岡技術科学大学　工学部　機械系　教授
＊＊長岡技術科学大学大学院　工学研究科

この時ステージの移動に伴って，テーブルには運動誤差が生じる．そこで，テーブル背面に平面データムを内蔵させることにより測定の基準面を作成する．その基準面と直交し，非接触ポイント型変位計の測定軸が通る基準法線上に静電容量変位計を設置し，下方から基準面の測定軸（Ｚ 軸）方向変位をリアルタイムで測定するようにした．この計測データは，テーブルのＺ軸方向運動誤差に相当する．

上方で測定された被測定表面の凹凸形状データから下方で計測されたテーブルの運動誤差データを差引くことにより，簡素なステージを使用しても，テーブルの運動誤差を含まない高精度な表面凹凸形状データが得られる．

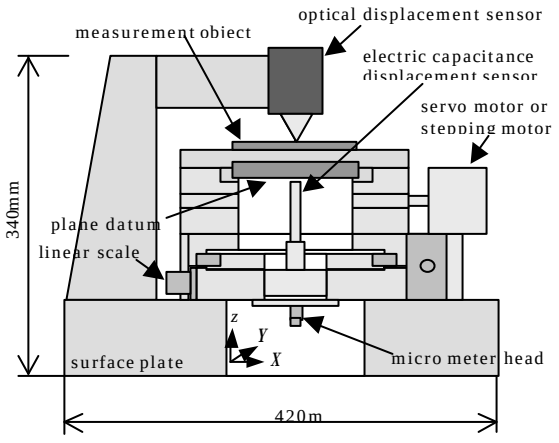


図１　測定機の構造

3　測定機の仕様及び特徴

開発した測定機のステージ部の仕様を表１に示す．X-Y 各ステージは，ステッピングモータ（オリエンタルモータ製：励磁最大静止トルク 0.3Nm，2W）あるいはサーボモータ（山洋電機製：最大ストールトルク 0.264Nm 以上，30W）を用いて駆動する．送り機構には，ボールネジ（KSS 製：リード 1mm，ネジ径φ8mm）とクロスローラガイド（日本ベアリング製：スライドウェイ，ストローク 90mm）を用い，さらに，リニアスケール（HEIDENHAIN 製：測定長 50mm，分解能 0.2μm，又は CANON 製：測定長 100mm，分解能 0.1μm）を取付けて，(x,y)座標を検出する．非接触ポイント型変位計を取付ける Z ステージ（中央精機製：ストローク 50mm）により変位計ヘッド-被測定表面間が変位計の作動距離となるように調節する．また，ステージ内部に取付ける静電容量変位計（フォトニクス製：プローブ径φ4mm，測定範囲 50μm，分解能 5nm）は，マイクロメータヘッド（ミツトヨ製：ストローク 6mm）によって，プローブ-平面データム間が 50μm 以内になるように調節する．

測定機の全体構成は図２に示すようになっている．ステッピングモータの場合はモーションコントローラ（メレック製），サーボモータの場合は I/O ボード（インターフェース製）を用いて制御する．

上下両変位計の出力信号は，AD ボード（ナショナルインスツルメンツ製：分解能 16bit，最高サンプリング周波数 200kHz）により取り込み，パソコン（DOS/V，CPU 800MHz，RAM 128MB，Windows2000）上で実行されている測定プログラム（Borland C++ Builder4 で作成）を用いて補正データを作成した上でファイルに保存する．リニアスケールのパルス信号はモーションコントローラのパルスカウンタ機能を用いて読み取っており，これによりフィードバック位置決め制御が可能である．

表１ 測定機の仕様

Dimensions of external form (D×W×H)	420×420×340mm
Movable area (X×Y×Z)	35×35×120mm
Resolution of location (that of linear scale)	0.1μm
Running parallelism	5μm
Orthogonality error between X and Y	3μm

本測定機の特徴は，市販されている様々な種類の変位計を，冶具を介して取り付け可能なことである．平面度測定用にはスポット径の大きいものを，逆に表面粗さ測定用にはスポット径の小さいものをというように測定用途に合わせて，変位計を選定することができる．また，本測定機はテーブルの運動誤差を常時計測しているので，X-Y ステージ可動領域内の送り精度データを予め用意しておく必要がなく，測定方式もこのデータに合わせた送り運動によるものでなければならないという制限を受けない．したがって，本測定機ではテーブルを水平面内で任意の方向に走査させながら測定することができるという特徴を持っている．

さらに，本測定機のコラムには，熱膨張率の低いグラナイト（大菱計器製作所加工）を使用しており，上下両変位計間の距離が，気温変動の影響を受けて変化することを極力抑えるようにしている．外部から振動が加わった場合に備えて，定盤の下には除振ゴム（昭和電線製）を敷き，振動を減衰させる．この働きにより減衰しても残る低周波振動は，測定機全体が上下に揺れているとみなせ，上データから下データを差引くという測定原理により補正される．

また，気圧や空気対流等が変化すると，変位計の出力信号が変動する．変位計が異常信号を出力する機能を持っている場合は，それを常時監視するようにし，異常と認識されたサンプリング点について，データの取り直しや近傍数点の測定データから推定するというような柔軟な測定方法に対応することも可能である．そのような意味で外乱の影響を軽減できる拡張性に富んだ測定機であると言える．

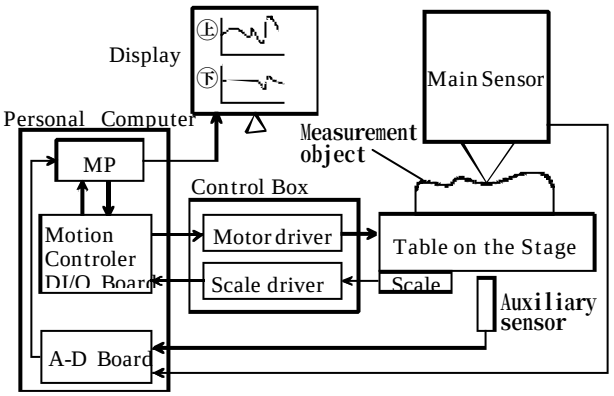


図２　測定機全体の構成

4　平面データムと静電容量変位計

平面データムとして使用する参照平板としては，フラットプレート（ツガミプレシジョン製：□50㎜×10㎜，材質 SK-5，ラッピング仕上げ），オプティカルフラット（オハラ製：□50㎜×10㎜，材質 クリアセラム，クロム蒸着）を使用している．このうち，フラットプレートについて，白色光干渉計（Cannon 販売 Zygo GPI）で測定した場合の形状誤差を図３に，また，表面粗さ測定機（小坂研究所製：ET-30HK，触針先端半径 0.5μm）で測定した場合の粗さ曲線を図４に示す．

参照平板表面の形状誤差は，30nm 以下となっている．参照平板表面に存在する粗さ成分の最大断面高さ *Rt* は 0.2μm 程度であることが分かる．ここで，粗さ曲線を求めるに際し，λc=250μm の Gaussian ハイパスフィルタを使用した．しかし，静電容量変位計を用いた場合，プローブ径に比べて極端に小さいこのような短波長成分は検出されないと考えられる．

次に静電容量変位計の被測定表面波長の伝達特性について述べる．波長が既知である正弦波の被測定表面を，静電容量変位計と輪郭形状測定機（東京精密製：Surfcom3000A，触針先端半径 2μm）の両方で測定し，触針式で得られた振幅を 1 として，静電容量変位計で得られた振幅を相対比として求めた．結果を図５に示す．なお，静電容量変位計はプローブ径φ6mm のものと合わせて 2 種類使用して実験を行った．プローブ径がφ4mm の静電容量変位計の場合において，被測定表面の波長が 0.4mm 以下では，振幅伝達率が 5%程度となっている．したがって図４に示したような短波長成分の影響はほとんど受けないと言える．

また，静電容量変位計の応答周波数特性を図６に示す．この結果は，ファンクションジェネレータを用いて圧電素子に正弦波状の振幅を与え，静電容量変位計でその変位を測定して得られた振幅の大きさの割合を求めたものである．周波数が 100Hz を上回ると振幅伝達率が低下していることが分かる．このことから，有効な運動誤差補正周波数帯域は約 100Hz 以下であると言える．すなわち，走査速度を 1mm/s と設定して測定を行う場合は，本測定機により測定可能な最小波長は 10μm 程度であると言える．

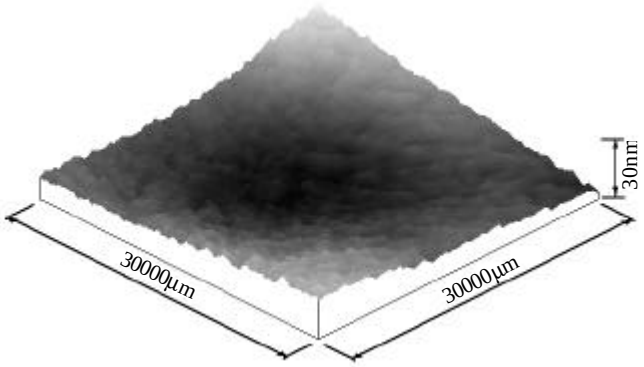


図３　参照平板の形状誤差

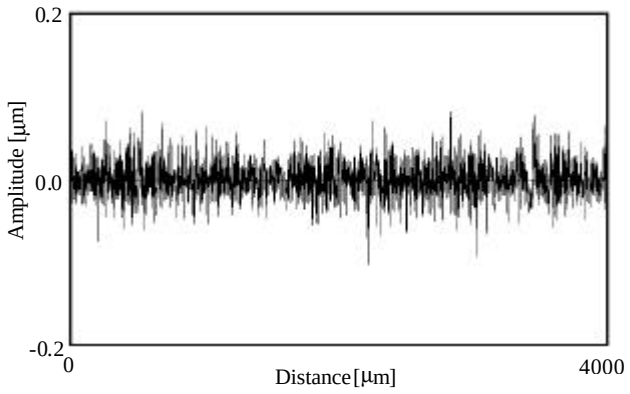


図４　参照平板の粗さ曲線

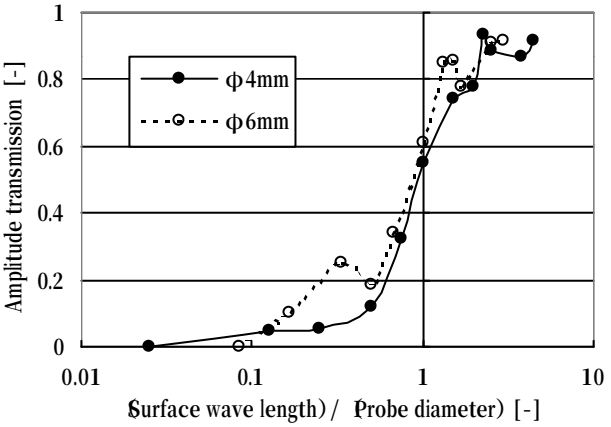


図５　表面波長の振幅伝達特性

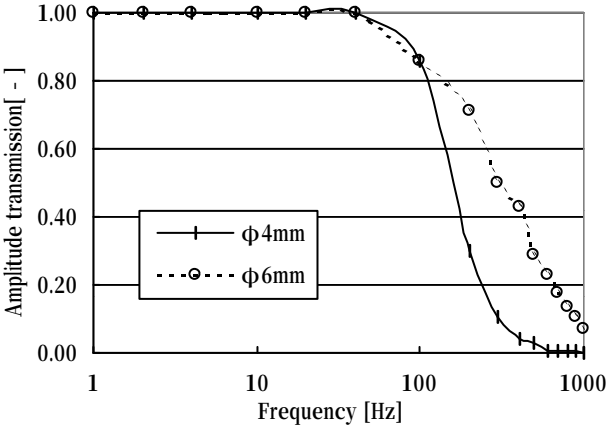


図６　機械的振動周波数の振幅伝達特性

5　測定方法の提案とソフトウェア

本測定機の特徴として前述したとおり，本測定機はラスタスキャン方式以外の測定方式による測定が可能である．したがって，被測定物表面の幾何公差や表面性状を測定する際に，測定要求項目に合わせた柔軟な離散量子化を試みられる．

本論文では，サンプリング点を長方格子状に配置した場合に限定して述べる．被測定面上の全サンプリング点を測定するには，そのサンプリング点を時系列順につなぐ必要がある．従来，これをラスタスキャン方式により実現していた．本研究では，この方式に加えて，表２に示すような２つの測定経路を追加して検討を行った．

新測定経路に対応できるような測定アルゴリズムとして次のような工夫を測定プログラムに施した．従来測定データは輪郭曲線の集合であるとみなし，測定プログラムは輪郭曲線１本１本のサブルーチンから構成されていると考えられる．本プログラムでは，全サンプリング点を独立に取り扱い，全サンプリング点の時系列順 x-y 座標データを作成し，その測定経路データに従って測定する方法を用いた．この流れを表したフローチャートを図７に示す．

得られた測定データは，時系列の１次元配列から x-y 面領域の 2 次元配列に並べ替えて，従来どおりのデータ構造（輪郭曲線データを測定本数分並べたもの）で保存した．ファイル形式は，国際標準となりつつある UDF 形式(拡張子 sdf)を採用している．

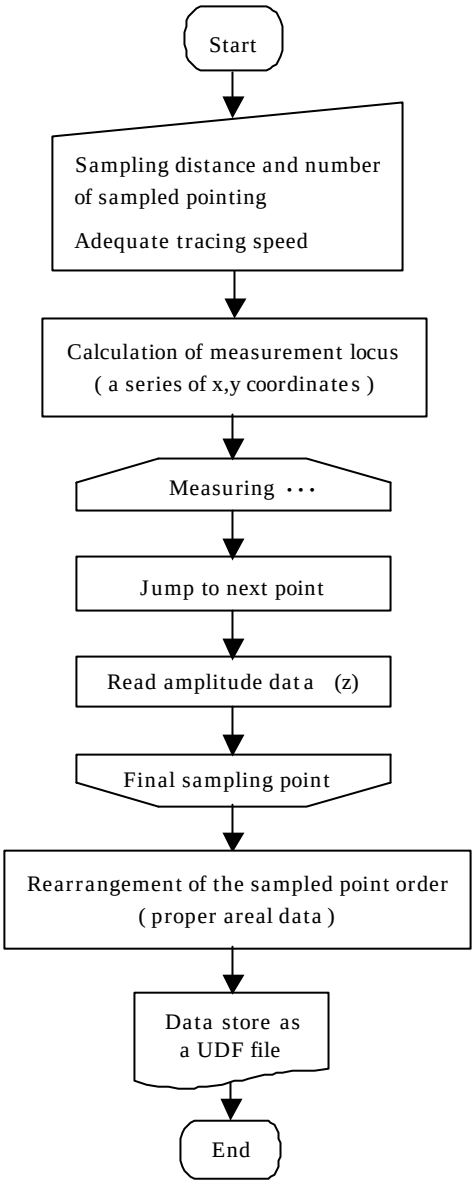
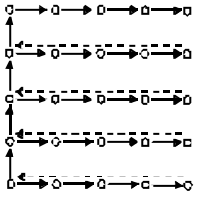
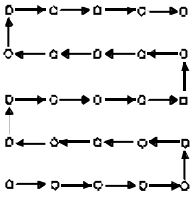
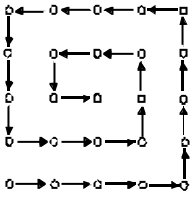
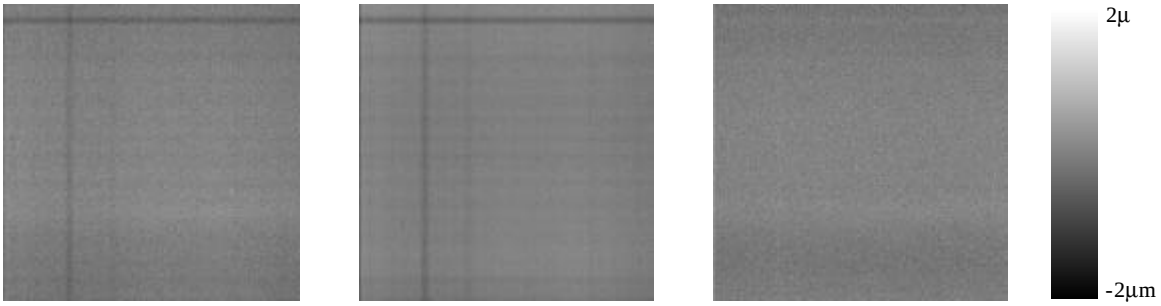


図７ 計測フローチャート

表２ 測定経路の比較

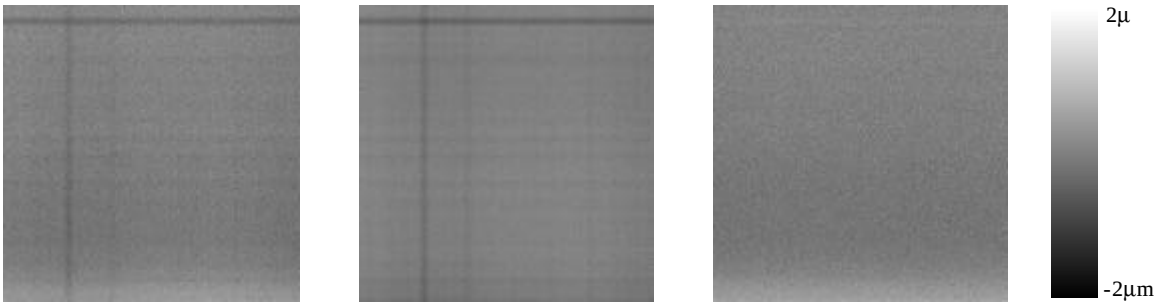
	Conventional scanning method	Novel tracing method
Measurement locus	 Raster scanning method	 Round trip tracing method  Modified spiral tracing method
Features	(advantage) Mechanical motion error can be systematic in each profile (disadvantage) Unnecessary return traces are included	(advantage) Any measurement locus can be set to comply with a request (advantage) Measurement time is markedly shorter than the conventional scanning method (disadvantage) An auxilary sensor is needed

6　基本的性能の検証



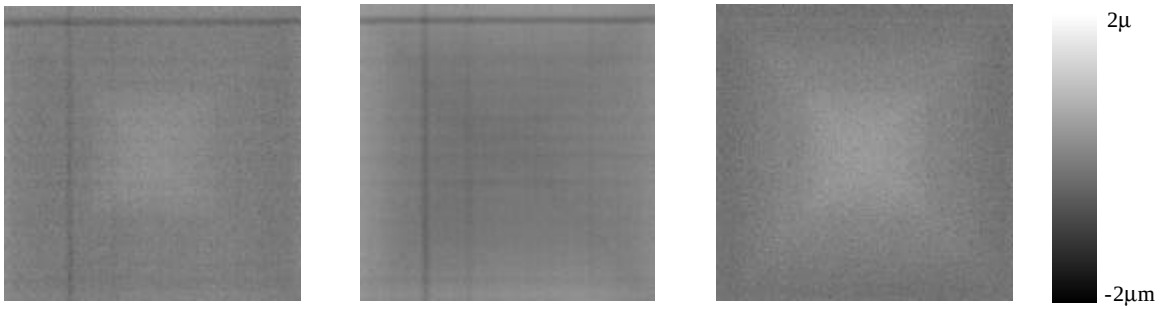
(a)　表面凹凸形状データ　　(b)　運動誤差データ　　(c)　補正後

図８　ラスタスキャン方式の測定結果



(a)　表面凹凸形状データ　　(b)　運動誤差データ　　(c)　補正後

図９　往復トレース方式の測定結果



(a)　表面凹凸形状データ　　(b)　運動誤差データ　　(c)　補正後

図 10　渦巻きトレース方式の測定結果

本測定機の運動誤差補正に関する基本的な性能を図８～図 10 に示す．各図（a）が上側で得られた被測定表面凹凸形状データであり，（b）が下側で得られた運動誤差データであり，（c）が上データから下データを差し引いた補正後のデータである．被測定表面には参照平板と同等の鏡面仕上げ面を使用し，測定方向特性が等方的であると考えられる静電容量変位計を上下に用いて測定を行った．測定条件は，サンプリング間隔 30μm，測定領域 15mm×15mm，走査速度 1mm/s とした．

柔軟な測定経路として設定した 3 つのどの経路について見ても，上データ及び下データには同一個所に溝状の運動誤差が生じていることが分かる．また，運動誤差補正後のデータを見れば，溝状の運動誤差が除去されていることが分かる．

7　まとめ

外乱の影響，特に運動誤差や機械的振動により生じる測定誤差を軽減し，任意の測定経路を設定することが可能な表面凹凸形状測定機が開発できた．

8 参考文献

1) ISO/DTR 16611：Geometrical product specification (GPS) - Extraction (2002)

2) ISO 1101： Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location, and run-out

3) JIS B 0601：**製品の幾何特性仕様**(GPS)－**表面性状**:**輪郭曲線方式－用語,定義及び表面性状パラメータ**（Ref. ISO 4287）

4) JIS B 0633：**製品の幾何特性仕様**(GPS)－**表面性状**:**輪郭曲線方式－表面性状評価の方式及び手順**
ISO 4288 ： Geometrical Product Specifications (GPS)－Surface texture：Profile method－Rules and procedures for the assessment of surface texture

5) JIS B 0651：**製品の幾何特性仕様**(GPS)－**表面性状**:**輪郭曲線方式－触針式表面粗さ測定機の特性**
ISO 3274 ： Geometrical Product Specifications (GPS) － Surface texture ： Profile method-Nominalcharacteristics of contact (stylus) instruments

6) JIS B 0632：**製品の幾何特性仕様**(GPS)－**表面性状**:**輪郭曲線方式－位相補償フィルタの特性**
ISO 11562 ： Geometrical Product Specifications(GPS) － Surface texture ： Profile method－
Metrological characterization of phase correct filter

7) JIS **ハンドブック** 46 **機械計測**（2002，**日本規格協会**）p483－732