振動型接触プローブを用いた特徴点計測による高速寸法測定システムの開発

増井 陽 二*・三好 孝 典**・寺嶋 一 彦**

A Novel High-speed Dimensional Inspection Method by the Measurement of Characteristic Points Using Bilateral Vibration Touch Probe

Yoji MASUI*, Takanori MIYOSHI** and Kazuhiko TERASHIMA**

In this paper, a novel method to realize high-speed dimensional inspection of 3D shapes is proposed, by means of a bilateral vibration touch probe that outputs feedback voltage in accordance with its position. Dimensional inspection can be performed by both of measuring several characteristic points, and of interpolating by least square method. A method of measuring the specified several characteristic points is used for shortening the measurement time, where it is assumed that rough positions of the characteristic point are provided. A new method using the bilateral vibration touch probe for dimensional inspection is proposed, and the effectiveness of the proposed method is demonstrated by experiments.

Key Words: dimensional inspection, piezo-element, high-speed measurement

1. はじめに

近年、製造品の小型化、高精度化が進むに伴い、製造品の寸法・部品精度を CAD データに対して正しく評価できる計測技術の向上が必要となっている。これは計測結果と設計データを比較することで製造品を評価できるためである。高精度化に対応する計測技術の開発は盛んに行なわれているが、さらに大量生産品への対応も求められている。しかし従来は三次元測定器を用いて安価な量産製品に対して全数検査を行ない、寸法などの品質管理を徹底させることはほぼ不可能であった。そこで著者らは、量産ラインに適応可能な三次元形状測定器の開発を目指し、研究を行なっている。

三次元測定は、測定対象とセンサを相対的に移動させながら、対象の表面をセンサによって検出し、その座標をプロットすることで行なう。ここで用いられるセンサには、タッチプローブなどを用いた接触式とレーザーセンサなどを用いた非接触式に大別できる。非接触式は計測速度に優れるが、乱反射や光線の逃げなどにより対象物の色や光沢、形状に制約が生じるという欠点があった。一方、一般に接触式は高精度で

あるものの計測速度が遅く、特に複数点間の計測に時間を要するなどの欠点があった。これはセンサの構造上大きな加速度でプローブを移動できないことに由来する。さらに接触式はタッチプローブと倣いプローブに分けることができる。タッチプローブとは目標の数点を測定するもので、主に既知形状の対象物の測定や人間が手で計測する場合に利用される。倣いプローブとは表面走査、つまり常に対象物に接触させて表面を走査するように測定するもので、主に未知形状の対象物の自動測定や対象物形状を綿密に測定する場合に利用される。従来のタッチプローブ式の研究としては、対象物とプローブがプローブ先端以外で接触しないように経路を自動生成するもの^{1),2)}、プローブ先端と対象物の衝突を回避する経路の最適化³⁾、CAD データをベースにタッチプローブの計測点までの移動軌跡を制御する手法⁴⁾などが挙げられる。また、非接触式のカメラと接触式プローブの組み合わせによる計測を行ない、高精度化を図る手法⁵⁾がある。しかし、これらはアルゴリズムの有効性、システムの有効性は示されているが、計測時間や誤差に関して明確に示されていなかった。また株式会社ミットヨは接触式として LEGEX 12128⁶⁾を開発しており、最大速度 200 mm/s、最大加速度は 1000 mm/s²である。このほかにも耐加速度に優れたインライン対応・横形 CNC 三次元測定機 MACH806⁶⁾があり、こちらは従来の接触式に比べ高加速度で駆動可能であり、3 軸複合で最大速度 1800 mm/s (1 軸あたり 1039 mm/s) が、最大加速度 1.8G (=17.64 m/s²)、つまり 1 軸あたりおよそ 1.039G (=10.18 m/s²) で駆動可能である。この計測機は表面粗さのプローブとタッチプローブがそれぞれ別に用意されているもので、用途に応じてプローブを付け替える必要がある。

* 豊橋技術科学大学工学研究科 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

** 豊橋技術科学大学工学部 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

* Department of Electronic and Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi

** Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi

(Received September 16, 2008)

(Revised December 25, 2008)

さて、MACH806⁶⁾を除く従来の接触式の高加速度にて移動できない欠点を補うため、著者らは圧電振動板を利用した振動型接触プローブを提案している^{7),8)}。本プローブは構造が単純で剛性が高く、測定形状や色を選ばないものである。圧電振動板とは、厚み方向に分極された圧電セラミックス薄板(ピエゾ素子)と薄い金属板を貼り合わせた簡単な構造のものである。ピエゾ素子を用いた計測プローブはいくつか研究されている。表面走査に用いるプローブとしてPZT薄膜を用いた振動形プローブセンサを提案し特性評価したものや⁹⁾、タッチプローブに圧電素子を用いた力センサを提案し、平面¹⁰⁾、円直径¹¹⁾を計測したものなどが挙げられる。しかし、これらはプローブの特性検証が主であり、短時間計測を行なうための研究には至っていない。振動型接触プローブを形状計測に実用化した代表的な例としては、ローランドディー・ジー・株式会社のPIX-30がある¹²⁾。これは測定対象物に振動触覚センサ(R.A.P.S. Roland Active Piezo Sensor)をあて、振動の有無を判別することで対象物の存在する位置を測定するものである。当該製品ではタッチプローブ方式で計測を行ない、センサの移動位置をメッシュ状に区切りメッシュ交点ごとにセンサの振れを判定するため、時間を要するという問題があった。

著者らによって振動型接触プローブに関して、これまでに、プローブの特性調査、高加速度移動が可能であることの検証、および表面走査の制御手法の提案を行なっている^{7),8),13),14)}。高加速度で駆動できることから、短時間で機械制約の速度に達することが可能となり、接触位置までの移動時間を短縮できるため高速寸法計測が可能である。また、本プローブは表面走査、タッチプローブのどちらにでも対応可能である。しかし、振動型接触プローブが高加速度で駆動できることを示したものの、高加速度を利用した高速寸法計測について示していなかった。そこで、本論文では短時間で対象物の寸法を測れるシステムの提案を行ない、本システムが寸法計測に対して有効であることを示す。なお、表面走査の制御手法^{8),13),14)}は未知、既知形状を問わず対象物表面に常に接触し続け形状を明らかにすることを目的としているのに対して、本論文は既知形状である対象物の寸法を測定して設計仕様に対する誤差を明らかにすることが目的である。つまり、著者らの研究で明らかにしている未知対象物の形状測定技術に加え、本論文ではタッチプローブとしての測定技術を確立する。このことから1つのプローブで高速寸法計測を行ない、かつ未知形状も測定できる計測システムの開発を実現させることを目的とする。

2. 計測システムの構成

計測システムと計測部分の拡大図をFig. 1に示す。本実験機はX軸、Y軸、Z軸の3軸にリニアモータが配置されており、最高速度1m/s、最高加速度9.8m/s²で駆動可能である。これは先に示したMACH806と同等の性能を示す。また、各軸の移動量はリニアエンコーダにより計測され、エン

Fig. 1 Illustration of measuring machine

Table 1 Specifications of measuring machine

Size	W:1000 D:1200 H:1750 [mm]
Total mass	500 [kg]
Movable area	X:400 Y:750 Z:250 [mm]
Mass	X:50 Y:100 Z:25 [kg]
Motor	YASKAWA electric Iron core linear motor
Rated thrust	X:400 Y:800 Z:160 [N]
Servo amplifier	YASKAWA electric PWM control system
Encoder	HEIDENHAIN Incremental linear encoder Output : 1 [Vpp] / 20 [μ m]
Resolution	78.125 [nm]
Max. velocity	1 [m/s]
Max. acceleration	9.8 [m/s ²]

コーダ分解能は78.125nmである。各軸モータの詳細な仕様についてはTable 1に示す。このシステムにおける各軸のモータは速度制御で指令されている。3軸駆動装置の先端に圧電振動板を用いた振動型接触プローブを取り付けることで計測システムが構成される。本計測システムをFig. 1下図の計測部分の拡大図に示す。プローブを対象物の数点に接触させるように制御することで高速計測を行なうシステムであるが、その原理については次節で述べる。

振動型接触プローブについて説明する。本振動型接触プローブは圧電振動板に針が固着されており、振動板の駆動電極に交流電圧を印加すると圧電効果により振動板が微小振動する。このとき針も微小振動を行ない、その振幅は針先端で1 μ m以下である。一方、帰還電極からは振動板の振動に応じて帰還電圧が出力され、この振動は針の振動に依存する。つまりプローブの針が対象物と接触した場合、針の振動が変化するためプローブの出力も変化する。これより針の振動を変化させる対象物との接触位置を帰還電圧の変化から求めることができる。

本振動型接触プローブは接触量と帰還電圧に線形の関係性を有する⁸⁾。この関係はFig. 2に示す実験によって測定される。すなわちプローブを対象物に向かって1軸方向のみ移動

Fig. 2 Measurement procedure of the relationship between displacement and feedback voltage

Fig. 3 Relationship between displacement and feedback voltage

させ、プローブの接触した量と帰還電圧を測定するものである。また帰還電圧は各接触量での平均値（データ数 10000, サンプルタイム $50\mu\text{s}$ ）を測定している。Fig. 2(i) の位置 (a) は非接触状態であり、非接触状態からプローブを対象物に近づけ Fig. 2(i) の位置 (b) の接触状態を測定する。Fig. 2(i) の位置 (b) の接触状態からさらに対象物に接触させた状態が Fig. 2(i) の位置 (c) である。このとき Fig. 2(ii) に示すように対象物を $\theta=45\text{ deg}$ 傾けて測定した結果を Fig. 3 に示す。帰還電圧は対象物とプローブが接触していないと Fig. 3 の (a) のように最大値を返し、接触量が $29.2\mu\text{m}$ を超えると Fig. 3 の (c) のように最小値を返す。Fig. 3 の (a) と Fig. 3 の (c) の間の Fig. 3 の (b) では接触量に応じた帰還電圧を近似的に線形出力する。接触量と帰還電圧の関係を V は帰還電圧、 D は接触量として、最小二乗法で求めると以下の式となる。

$$V = \begin{cases} 3.60 & (D < 0) \\ -0.0548D + 3.60 & (0 \leq D \leq 29.2) \\ 2.00 & (29.2 < D) \end{cases} \quad (1)$$

これよりプローブの帰還電圧とエンコーダの位置情報から対象物の測定が可能となる。本論文では対象物の傾き $\theta=45\text{ deg}$ のみを示しているが、ほかの角度でも計測可能である。

つぎに振動型接触プローブの加速度に対する特性を示す。対象物と接触した状態 (Fig. 2(i) の位置 (b), Fig. 3 の (b)) から対象物に離れる方向 (Fig. 2(i) の位置 (a), Fig. 3 の (a)) に駆動させた実験の結果を Fig. 4 に示す。このときの加速

Fig. 4 Feedback voltage of two axis movement

度の制約値は $\pm 9.8\text{ m/s}^2$ 、速度の制約値は $\pm 0.4\text{ m/s}$ としている。グラフは上から X 軸の位置、Y 軸の位置、X 軸の速度、Y 軸の速度、X 軸の加速度、Y 軸の加速度、帰還電圧の順である。また位置、帰還電圧は単純移動平均（サンプルタイム 1 ms 、平均回数 8 回）を行なったものであり、速度、加速度は単純移動平均を行なった位置の微分によって求めている。0.1s から X 軸、Y 軸にそれぞれ加速、減速、等速させている。この動作中に帰還電圧の出力が最大値以下になっているのは、0.1s までの接触状態のみであり、1 軸のみを一定加速度 ($\pm 9.8\text{ m/s}^2$) で駆動させた場合 (0.18s~0.23s, 0.25s~0.29s, 0.37s~0.4s) でも、2 軸それぞれを一定加速度 ($\pm 9.8\text{ m/s}^2$) で駆動させた場合 (0.1s~0.16s, 0.23s~0.25s, 0.33s~0.37s) でも帰還電圧が変化しないことが確認できる。これより本プローブは 9.8 m/s^2 までの加速度の影響を受けずに計測可能である。

3. 寸法計測手法

寸法計測手法について説明する。本手法には 2 つの条件が必要である。(1) 対象物寸法を演算できる複数の特徴点を規定できる。(2) 測定座標における対象物の特徴点の位置がわ

かっている。また、特徴点の位置は誤差を許容している。これらの条件を元に、特徴点位置を測定するように振動型接触プローブを制御して寸法を求める。

つぎに測定対象物について説明する。対象物の形状は **Fig. 5** に示されるものであり、寸法 120 mm × 88.1 mm が設計仕様である。88.1 mm 側の寸法を求めるには、A, D, E, H を求める必要があり、4 点 (A, D, E, H) が特徴点となる。120 mm 側の寸法を求めるには、B, C, F, G を求める必要があり、4 点 (B, C, F, G) が特徴点となる。つまり 8 点を求めることで対象物の寸法を求めることができ、寸法の演算手法は付録にて示している。8 点の特徴点の測定座標における位置を **Fig. 6** に示す。Fig. 6 にはプローブの初期位置、対象物の特徴点である目標接触位置、また目標接触位置の近くである目標位置近傍を示す。本計測は目標位置近傍まで高速で移動させ、目標接触位置までは接触に適した速度で移動を行ない、接触させる。これを繰り返すことで対象物の特徴点を計測する。つまり Fig. 6 においては、初期位置から目標位置近傍 $\hat{A}$ まで高速で移動、つぎに目標接触位置 A に低速で接触させ、接触後につぎの目標位置近傍 $\hat{B}$ に高速で移動させる。すなわち $\hat{A}$, A, $\hat{B}$, B, ..., $\hat{H}$, H という順で移動させる。

計測システムのブロック線図を **Fig. 7** に示す。コントローラは目標位置に応じて加速度を生成するコントローラと、目標速度に対する PI コントローラによって構成される。 r_p は目標位置、 r_a は目標加速度、 r_v は目標速度、 u_v は指令速度、 P は位置、 V は帰還電圧である。加速度を生成するコント

Fig. 5 The measurement object and characteristic points

Fig. 6 The characteristic points and neighborhood positions

ローラは目標加速度 r_a を生成するもので、目標位置 r_p とエンコーダによって測定される位置 P 、帰還電圧 V の 3 変数によって 2 パターンの加速度を生成する。1 つは目標位置近傍に移動する場合、もう 1 つは目標接触位置に接触する場合である。目標位置近傍に移動する場合は r_p , P を用いて、最大加速度 a_{limit} で加速しながら移動する。目標位置近傍に近づいたときに減速を開始して目標位置近傍に達する。ただし、速度は最大速度 v_{limit} 以上にはならないようにしている。つまり、目標位置近傍に移動するときの加速度コントローラは以下の式である。

$$r_{ai} = \begin{cases} a_{limit} & (P \leq P_f) \\ -a_{limit} & (P > P_f) \\ 0 & (r_{vi} \geq v_{limit}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで P_f は位置の閾値、 r_{vi} は各軸の速度、 r_{ai} は各軸の加速度であり、 i は軸 (X, Y, Z) を表わす。位置の閾値 P_f は r_p と P の初期位置 P_0 によって決まるものであり、 r_p と P_0 の中間位置、または最高速度から減速に必要な距離 $v_{limit}^2 / (2a_{limit})$ のどちらかで表わされる。正方向移動の例を挙げると $P_f = (r_p + P_0) / 2$ 、または $P_f = r_i - v_{limit}^2 / (2a_{limit})$ となる。また、(2) 式は正方向に移動する場合であり、負方向に移動する場合は速度、加速度の符号や不等号を反転させている。この加速度の式は X 軸、Y 軸の移動距離が長い軸に適用される。移動距離の短い軸の加速度は、2 軸の移動距離比 K_s (ここで $-1 \leq K_s \leq 1$) と r_{ai} の積となる。 K_s の例を挙げると、2 軸ともに移動方向が正 (または負) で同じ距離移動する場合は $K_s = 1$ 、1 軸のみの移動の場合は $K_s = 0$ 、2 軸の移動方向の正負が異なる場合は $K_s < 0$ である。つぎに目標接触位置への接触は r_p , P , V を用いる。最大加速度 a_{limit} で加速しながら移動して、帰還電圧が閾値以下になったとき減速を始めるように制御する。つまり、接触時の加速度コントローラは以下の式で表わすものである。

$$r_{ai} = \begin{cases} a_{limit} & (V \geq V_f) \\ -a_{limit} & (V < V_f) \\ 0 & (r_{vi} \geq v_{tmax}) \end{cases} \quad (3)$$

V_f は帰還電圧の閾値、 v_{tmax} は最大接触速度である。また、(3) 式は正方向に対象物が存在する場合であり、負方向に対象物が存在する場合は速度、加速度の符号や不等号を反転させている。ここでは速度に最大接触速度 v_{tmax} を設けることで、帰還電圧は Fig. 3 の (b) の線形領域で計測される。つま

Fig. 7 A block diagram of dimensional inspection system

り最大接触速度は、サンプリングタイム（本論文では1ms）の間に帰還電圧の飽和位置（29.2 μm ）以上に移動しないように定める．例を挙げて説明すると、速度が一定値0.4m/sで接触する場合にはサンプリングタイム間の移動量は400 μm であり、その移動量400 μm が29.2 μm に対して大きいため、帰還電圧がFig.3の(a)からFig.3の(c)と測定される場合がある．このため、接触量を判断できる帰還電圧（Fig.3の(b)）を測定できないことから対象物の寸法を求めることができない．つぎに速度が一定値0.01m/sで接触する場合を考える．サンプリングタイム間の移動量は10 μm であり、その移動量10 μm が29.2 μm に対して小さいため、帰還電圧は必ずFig.3の(a)、Fig.3の(b)、Fig.3の(c)という順で測定される．接触量を判断できる線形領域（Fig.3の(b)）であるため、対象物の寸法を求めることができる．以上から、2つの速度の切り替えによって、プローブが対象物と接触しないときには計測器の速度制御を用いて、接触させるときにはプローブの速度制御によって計測できる．つまり、近傍まで高速で移動することから計測時間を短縮できる．

目標速度 r_v は生成された加速度 a_a から生成され、速度制御は位置 P の微分である速度をフィードバックして、PIコントローラで行なっている．ここでPIコントローラを用いる理由は、一定値の外乱があるシステムでも、定常状態で目標速度に収束させるためである．目標速度 r_v の生成とPIコントローラは以下の式で表わされる．

$$r_{vi} = r_{ai} \frac{1}{s} \quad (4)$$

$$u_{vi} = \left(K_{Pi} + K_{Ii} \frac{1}{s} \right) (r_{vi} - P_i s) \quad (5)$$

K_{Pi} は各軸の比例ゲイン、 K_{Ii} は各軸積分ゲインである．

4. 特徴点計測による寸法測定

提案手法の有効性を示すために、Fig.5の対象物を測定する．ここで初期位置は(0m,0m,-0.038m)であり、また対象物の特徴点位置は既知としており、Table 2に示す．このときの対象物の傾き θ は $\pi/4$ であり、各位置の近傍位置は特徴点位置からY軸方向に5mm離れた位置としている．また、加速度の制約は $a_{limit}=5\text{m/s}^2$ 、最大速度の制約は $v_{limit}=0.25\text{m/s}$ 、最大接触速度の制約は $v_{tmax}=0.015\text{m/s}$ とする．

Fig.8に寸法測定実験を行なった結果を示す．Fig.8は上からX軸の位置、Y軸の位置、Z軸の位置、帰還電圧である．帰還電圧のグラフで帰還電圧が最大値から変化している範囲において対象物と接触しており、その接触点是对象物のA点から順にH点である．このとき接触中のデータ群は帰還電圧が最大値から変化している範囲（Fig.3の(b)、Fig.3の(c)）が対象物と接触している位置である．しかし、対象物との接触量を判断できるのは帰還電圧が最大値と最小値の間の範囲（Fig.3の(b)）のみである．このためFig.3の(b)の線形領域で測定された複数のX軸の位置、Y軸の位置のデータ群を寸法演算に用いる．また、位置のデータ群はつぎに示してい

Table 2 Position of characteristic points

Point	X axis[m]	Y axis[m]	Z axis[m]
A	0.0922	0.03	-0.038
B	0.0851	0.03	-0.038
C	0.03	0.0851	-0.038
D	0.03	0.0922	-0.038
E	0.1078	0.17	-0.018
F	0.1149	0.17	-0.018
G	0.17	0.1149	-0.018
H	0.17	0.1078	-0.018

Fig. 8 Experimental results by dimensional inspection

る補正をされる．

補正はプローブ径と帰還電圧による補正に分けられる^{8),13),14)}．実験結果で示している位置は、プローブの中心位置であり、対象物と接触している点（対象物表面の座標）ではない．そこで振動型接触プローブの接触点におけるプローブ径（今回の実験では半径 $R=100\mu\text{m}$ ）を求めておく．プローブ径の値を用いてX軸は $R\sin(\theta)$ 、Y軸は $R\cos(\theta)$ を対象物に近づけるようにそれぞれの座標に補正する．つぎに帰還電圧による補正であるが、先に示したようにプローブと対象物の接触量によって帰還電圧が発生する．そのため、補正式(1)に帰還電圧を代入することで接触量を求め、求めた接触量を対象物から離す方向に補正する必要がある．帰還電圧による補正を測定点すべてに行なうことによって本来測定すべき対象物表面の座標となり、最小二乗法を用いた寸法演算アルゴリズム（付録参照）によって寸法は求められる．この結果、真値120mm $\times$ 88.1mmに対して、測定結果120.094mm $\times$ 88.076mm、測定誤差0.094mm $\times$ 0.024mmであった．参考にプローブ径と帰還電圧による補正を行わない場合、誤差は幅120mmに対して測定誤差が371 μm 、幅88.1mmに対して測定誤差が253 μm であり、補正の有効性が提示された．また、計測開始の初期位置から終了位置まで4.3sで制御でき、接触点AからHまでの時間は3.4sであっ

た．参考ではあるが，移動軌跡のみに関して株式会社ミツトヨの LEGEX 12128⁶⁾の最高速度，最高加速度を用いて同様のシミュレーションを行ない，移動時間を求めたところ，6.085 s であった．これより，高加速度駆動をさせることで短時間計測が可能となり，120 mm×88.1 mm の大きさの対象物を 3.4 s で計測し，幅 120 mm に対して測定誤差が 94 μm，幅 88.1 mm に対して測定誤差が 24 μm で計測できるシステムの構築ができた．

5. おわりに

本論文にて振動型接触プローブを用いた高速化を目的とした寸法検査の手法を提案した．本手法は 9.8 m/s² までの加速度による制約を受けることなく短時間で高速にすることができ，従来手法に比べ短時間計測が可能である．実験にて 1 軸における加速度およそ 1G (=9.8 m/s²) にて駆動可能であることを示した．また，提案手法を実験機に適用して，120 mm×88.1 mm の寸法の対象物の寸法検査を行ない，その寸法を求めた．本手法は本論文で取り扱った対象物のみでなく，円，楕円など求める対象に適した寸法演算アルゴリズムを用いればほかの対象物の計測も可能である．

謝辞 本研究は文部科学省グローバル COE プログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」の支援を受けた．

参 考 文 献

- 1) S.N. Spitz and A.A.G. Requicha: Accessibility Analysis for Planning of Dimensional Inspection with Coordinate Measuring Machines, IEEE Trans. Robotics and Automation, **15**-4, 714/727 (1999)
- 2) H.-T. Yau and C.-H. Menq: Path Planning for Automated Dimensional Inspection Using Coordinate Measuring Machines, IEEE Trans. Robotics and Automation, **1934/1939** (1991)
- 3) S.N. Spitz and A.A.G. Requicha: Multiple-Goals Path Planning for Coordinate Measuring Machines, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Autom., **2000**-3, 2322/2327 (2000)
- 4) I. Ainsworth, M. Ristic and D. Brujic: CAD-Based Measurement Path Planning for Free-Form Shapes Using Contact Probes, Int. J. Adv. Manuf. Technol., **16**-1, 23/31 (2000)
- 5) T.S. Shen, J. Huang and C.H. Menq: Multiple-Sensor Integration for Rapid and High-Precision Coordinate Metrology, IEEE/ASME Trans. Mechatron., **5**-2, 110/121 (2000)
- 6) 首藤和男：進化する精密計測・測定精密加工のニーズに対応した精密測定機器とその利用，機械技術，**53**-7, 54/57 (2005)
- 7) T. Miyoshi, Y. Masui, K. Enokishima and K. Terashima: 3D Shape Measuring Instruments Using High Stiffness Sensor, 16th IFAC World Congress, We-E18-TO/1 (2005)
- 8) T. Miyoshi, Y. Masui and K. Terashima: Development of high stiffness touch sensor and its application to measuring instruments, Control Engineering Practice, **15**, 851/862 (2007)
- 9) 神田，森田，黒澤，樋口：PZT 薄膜による縦振動子を用いた振動形プローブセンサ，電子情報通信学会技術研究報告（超音波），**99**-132, 21/28 (1999)
- 10) 大内，長田，常田，矢島，渡邊：微振動接触方式による精密形状測定に関する研究，山梨大学地域共同開発研究センター研究成果報告書，**9**, 9/12 (2001)
- 11) 大内，長田，常田，矢島，渡邊：微振動接触方式による精密内径測定に関する研究，山梨大学地域共同開発研究センター研究成果報告書，**10**, 5/8 (2002)
- 12) PIX-30 カタログ：ローランド ディー．ジー．株式会社 (2002)
- 13) Y. Masui, K. Enokishima, T. Miyoshi and K. Terashima: Development of 3D Shape Measurement System Using Bilateral Vibration Touch Probe, SICE Annual Conference 2005, 1549/1553 (2005)
- 14) Y. Masui, T. Miyoshi and K. Terashima: A Novel Method to Measure the Shape of 3D Objects Using Bilateral Vibration Touch Probe by Non-linear Synchronous Controller, The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2272/2277 (2007)

《付 録》

A. 寸法演算アルゴリズム

4 箇所の測定データを元に寸法演算をする手法について説明する．ここで用いるデータは，測定したデータにプローブ径と帰還電圧の補正を行なったものである．Fig. A.1 に測定されたデータを示す．寸法演算を行なう向かい合う直線において，位置 A，位置 B からなる測定データ群をデータ 1，位置 C，位置 D からなる測定データ群をデータ 2 とする．また仮定として，向かい合う直線は平行であるものとする．このとき，これらのデータを用いて最小二乗法を用いた演算アルゴリズムを導出して寸法 d を求める．

データ 1 は m 個のデータを有し，回帰直線は傾き a_1 ，切片 b_1 で構成される．データ 2 は $m+1$ 番目から n 個のデータを有し，回帰直線は傾き a_2 ，切片 b_2 で構成される．それぞれの直線は以下のように表わせる．

$$y_i = a_1 x_i + b_1 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (\text{A.1})$$

$$y_i = a_2 x_i + b_2 \quad (i = m+1, \dots, m+n) \quad (\text{A.2})$$

ここで先の仮定より回帰直線の傾きは $a = a_1 = a_2$ とする．このとき回帰直線と各データの誤差 d は，X 軸，Y 軸からの最短距離とすると以下のものとなる．

$$d_i = \frac{|y_i - ax_i - b_1|}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (\text{A.3})$$

Fig. A.1 Measurement data and measurement points

$$d_i = \frac{|y_i - ax_i - b_2|}{\sqrt{1+a^2}} \quad (\text{A.4})$$

$$(i = m+1, \dots, m+n)$$

誤差の二乗和を S として、 S が最小となる a, b_1, b_2 を求めれば、回帰直線の各パラメータを求めることができる。 S は a, b_1, b_2 の二次関数であるため、それぞれで微分したときに 0 となる a, b_1, b_2 を求めればよい。 $\partial S / \partial b_1 = 0, \partial S / \partial b_2 = 0$ より、

$$b_1 = \frac{\beta_y - a\beta_x}{m} \quad (\text{A.5})$$

$$b_2 = \frac{\gamma_y - a\gamma_x}{n} \quad (\text{A.6})$$

を得る。 $\beta_x, \beta_y, \gamma_x, \gamma_y$ は以下の式である。

$$\beta_x = \sum_{i=1}^m x_i \quad (\text{A.7})$$

$$\beta_y = \sum_{i=1}^m y_i \quad (\text{A.8})$$

$$\gamma_x = \sum_{i=m+1}^{m+n} x_i \quad (\text{A.9})$$

$$\gamma_y = \sum_{i=m+1}^{m+n} y_i \quad (\text{A.10})$$

また、 $\partial S / \partial a$ は以下の式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= a(\alpha_x - \alpha_y) - a(mb_1^2 + nb_2^2) \\ &\quad + 2a(b_1\beta_y + b_2\gamma_y) + (a^2 - 1)\delta \\ &\quad - (a^2 - 1)(b_1\beta_x + b_2\gamma_x) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

$\alpha_x, \alpha_y, \delta$ は以下の式である。

$$\alpha_x = \sum_{i=1}^{m+n} x_i^2 \quad (\text{A.12})$$

$$\alpha_y = \sum_{i=1}^{m+n} y_i^2 \quad (\text{A.13})$$

$$\delta = \sum_{i=1}^{m+n} x_i y_i \quad (\text{A.14})$$

(A.5), (A.6), (A.11) 式を用いて a を求めると

$$a = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\text{A.15})$$

となる。 A, B, C は以下の式である。

$$A = \delta - \frac{\beta_x\beta_y}{m} - \frac{\gamma_x\gamma_y}{n} \quad (\text{A.16})$$

$$B = \alpha_x - \alpha_y + \frac{\beta_y^2}{m} + \frac{\gamma_y^2}{n} - \frac{\beta_x^2}{m} - \frac{\gamma_x^2}{n} \quad (\text{A.17})$$

$$C = -\delta + \frac{\beta_x\beta_y}{m} + \frac{\gamma_x\gamma_y}{n} \quad (\text{A.18})$$

また、寸法 d は 2 つの切片 b_1, b_2 と傾き a を用いることで

$$d = |b_2 - b_1| \frac{1}{\sqrt{1+a^2}} \quad (\text{A.19})$$

と求めることができる。以上より最小二乗法を用いて a, b_1, b_2 を求めることで、寸法 d を求めることができる。

[著者紹介]

増井陽二 (正会員)

2005 年豊橋技術科学大学工学研究科生産システム工学専攻修了。現在、豊橋技術科学大学工学研究科電子・情報工学専攻博士学生。振動型接触プローブを用いた計測・制御の研究に従事。日本機械学会の会員。

三好孝典 (正会員)

1989 年大阪大学工学部電気工学科卒業。ローランド D.G. (株) 勤務。豊橋技術科学大学工学研究科修士課程社会人入学を経て、2006 年同大学助教授。現在に至る。パワーアシスト、遠隔制御などの研究に従事。日本機械学会、IEEE などの会員。博士 (工学)。

寺嶋一彦 (正会員)

1981 年京都大学工学研究科博士後期課程修了。82 年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助手。講師。助教授を経て 94 年教授。現在に至る。91 年～92 年ドイツミュンヘン工科大学客員研究員。システム制御理論とその応用に従事。日本機械学会、システム制御情報学会、日本鋳造工学会、日本ロボット学会、IEEE などの会員。