振動型接触プローブを用いた表面走査コントローラによる形状計測手法

増井 陽 二*・三好 孝 典**・寺嶋 一 彦**

A Novel Shape Measurement Method Using Bilateral Vibration Touch Probe

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

An entirely novel shape measurement method to obtain 3D shapes is proposed, based on a bilateral vibration touch probe that outputs feedback voltage in accordance with its position. A bilateral vibration touch probe, with high-stiffness, is developed. The proposed probe consists of a piezo-electric device and a thin needle, and generates feedback voltage according to the relative distance from the object. The structure of this probe is simple, so that it is able to withstand high rates of acceleration during the measurement process. The shape measurement is performed in an object of unknown shape and the shape of the object can be found by scanning the object surface. Moreover, a nonlinear synchronous multi-axis control algorithm is proposed in order to scan the surface of arbitrary objects and measure their 3D shape. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated through experiments. When actual width of 1 mm was measured using the proposed nonlinear synchronous multi-axis control, a minimum error of 21.7 μm was obtained.

Key Words: shape measurement, piezo-element, nonlinear control

1. はじめに

ものづくりにおける生産の流れは設計 (CAD: Computer Aided Design), 製造 (CAM: Computer Aided Manufacturing), 検査 (CAT: Computer Aided Testing) から成り立っており, さらなる業務効率化, 製品の品質管理のために, 部品寸法を CAD データに対して正しく評価できる検査工程の重要性が高まっている. 検査工程である寸法検査は三次元形状計測器を用いて行なわれ, 設計データと検査工程で測定されたデータを比較することで良品, 不良品を判断できる.

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, 対象物の表面を検出し, その座標をプロットすることで行なわれる. ここで用いるセンサには, タッチプローブなどを用いる接触式とレーザセンサなどを用いる非接触式に大別できる. 一般に非接触式のセンサ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, 形状の制約という欠点を有する. 一方, 接触式は高精度であるが計測速度が遅く, 特に複数点間の計測に時間を有する. 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.

接触式の手法をさらに分別すると, タッチプローブとして対象物の数点を測定することで寸法を求める手法と, 倣いプローブとして対象物と常に当たり続け測定することで対象物の形状を求める手法が挙げられる. タッチプローブとして利用する場合, 対象物とプローブの接触点を設計データや対象物の測定座標系の位置情報から求めるなどの前処理が必要である. これまでに対象物の 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¹⁾や, 複雑形状においてプローブと対象物の衝突を回避する経路を自動生成する手法²⁾などが提案されているが, 実際に実験を行っていない. また, 表面走査として利用する場合, 前処理の必要はないがプローブの軌跡制御が重要となり, プローブの接触変位を用いて移動方向を決定する表面走査の手法を提案, プローブの開発をしているものが挙げられる^{3)~5)}. これはプローブの提案が主であり, 実際の計測による数値的な検証が行われていない.

そこで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^{6), 7)}. 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おり, 表面走査に用いるプローブとして PZT (チタン酸ジルコン酸鉛 [Pb(Zr,Ti)]) 薄膜を用いた振動形プローブセンサが提案されているが, プローブの特性評価が主で表面走査による計測手法や実験については検証されていない⁸⁾. このほかにも穴の内面計測としてタッ

* 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 January 21, 2009)

チプローブに圧電素子を用いた力センサを提案しており、平面⁹⁾、円直径¹⁰⁾を計測したものが挙げられる。しかし、これらの論文はプローブの特性検証であり、表面走査の計測に活用しているものではない。振動型接触プローブを形状計測に実用化した例として、ローランドディー・ジー・株式会社の PIX-30 がある¹¹⁾。これは測定対象物に振動触覚センサ (R.A.P.S. Roland Active Piezo Sensor) を当て、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、大量点を測定することから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、表面走査の手法の提案を行っている^{6),7)}。ここでの表面走査のコントローラは、線形である PI コントローラと非線形である余弦コントローラの組み合わせたものである。しかし、このコントローラでは線形コントローラの影響により、計測の開始点と終了点を同じにするような対象物の輪郭形状を一周する動作ができない。これにより円形状の対象物形状を表面走査することはできなかった。そこで、本論文では非線形コントローラのみで構成される新たな表面走査の制御コントローラを提案し、従来の問題点を解決することで本手法が形状計測に有効であること示す。

2. 計測システムの構成

Fig. 1 に本計測システムの実験装置と、プローブと対象物による計測部分の拡大図を示す。本装置は X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 軸にモータを有するシステムから構成され、速度指令にて各軸モータを制御し、各軸の移動量をセンサによって測定できる。この装置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。対象物の計測は、Fig. 1 右図に示すプローブと対象物を常に接触させるようにプローブの位置を制御することで行なわれる。

つぎに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 **Fig. 2** に示すような構造を有する。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

Fig. 1 Illustration of measuring machine

Fig. 2 Bilateral vibration touch probe

Y 方向のみに微小振動を行ない、その振幅は針先端で $1\mu\text{m}$ 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。ピエゾ効果を利用した振動型接触プローブを最も効率よく振動させ、帰還電圧をより大きく出力させるためには、プローブの共振周波数となる正弦波を駆動電圧として与える必要がある。使用したプローブを自由振動させた場合、 2.62kHz に最もゲインの高い共振周波数を有するため、以降はこの値を駆動電圧となる交流電圧の周波数として用いる。

本プローブを計測に利用するには、プローブが対象物と接触したときの帰還電圧の変化を明らかにする必要がある。そこで **Fig. 3** に帰還電圧の変化の測定方法として X 軸と Z 軸の 1 方向から接触させた例をそれぞれ示す。各軸共にプローブを対象物に接触させる方向を正の方向として、プローブと対象物が離れた状態から、プローブを対象物に近づけて接触させたときのプローブの移動量と帰還電圧を測定した。また、入力とは 0V 以上の交流電圧、出力は最小 2V の電圧になるように、圧電振動板の駆動電極と帰還電極にはそれぞれ電子回路を取り付けている。このとき入力波形と出力波形を **Fig. 4** に示す。入力波形はオフセット 400mV 、振幅 230mV の正弦波としている。また電子回路の特性から出力波形は Fig. 4 のように歪んだ形で出力され、Fig. 3 の X 軸のように接触量を変化させると接触量に応じて帰還電圧が減少していることが確認できる。

このときの帰還電圧の平均値 (データ数 10000, サンプリングタイム $50\mu\text{s}$) をプロットした測定結果を **Fig. 5** に示す。Fig. 3 の位置 (a) のようにプローブと対象物が接触していない非接触状態であると帰還電圧は最大値 (Fig. 4 の位置 (a) でのグラフ, Fig. 5 の範囲 (a)) を示しており、つぎに Fig. 3 の位置 (b) のように接触すると帰還電圧は線形的に減少する (Fig. 4 の位置 (b) でのグラフ, Fig. 5 の範囲 (b))。また Fig. 3 の位置 (c) のようにある接触量を超えると帰還電圧は最小値 (Fig. 4 の位置 (c) でのグラフ, Fig. 5 の範囲 (c)) を示す。このとき帰還電圧が減少し始めた位置を原点とする。先の Fig. 3 は X 方向のものであるが、Y 方向でも同様の方法で測定できる。また、Z 方向においても、対象物と接触し

Fig. 3 Measurement of the relationship between displacement and feedback voltage

Fig. 4 The input signal to drive electrode and the output signal from feedback electrode

Fig. 5 Relationship between displacement and feedback voltage

ていないときに帰還電圧は最大値を示し、接触量に比例して帰還電圧は減少し、一定量を超えると最小値を示す。これらの図においてプローブが対象物に向かう方向を正の方向としている。この帰還電圧と位置の関係の回帰直線は以下のように表わすことができる。

$$V_x = \begin{cases} 3.60 & (D_x < 0) \\ -0.032D_x + 3.60 & (0 \leq D_x \leq 50) \\ 2.00 & (50 < D_x) \end{cases} \quad (1)$$

$$V_y = \begin{cases} 3.60 & (D_y < 0) \\ -0.107D_y + 3.60 & (0 \leq D_y \leq 15) \\ 2.00 & (15 < D_y) \end{cases} \quad (2)$$

$$V_z = \begin{cases} 3.60 & (D_z < 0.73) \\ -1.28D_z + 3.92 & (0.25 \leq D_z \leq 1.5) \\ 2.00 & (1.5 < D_z) \end{cases} \quad (3)$$

ここで V_i は帰還電圧, D_i は接触量, i は X, Y, Z の各軸を示す。帰還電圧が線形的に変化する範囲においてプローブと対象物の位置関係を把握することができ、これより本プローブを用いて計測を行なうことが可能である。また、プローブの測定分解能は、回帰直線の傾きの逆数と AD 変換器の分解能の積となり、本稿では X:0.019 μ m, Y:0.0057 μ m, Z:0.0048 μ m である。

3. 表面走査コントローラ

表面走査の概念図を説明する。**Fig. 6** に示すように YZ 平面对象物とプローブが位置する。対象物は角度 θ_0 で傾いており、時計回りを正としている。またプローブとリファレンス軌跡の最短距離を l とする。リファレンス軌跡は帰還電圧の目標値から求められ接触量を表わす線である。Y 軸方向のみの接触例で説明すると、目標値を 2.8V と定めたとき、目標となる接触量は 7.5 μ m となる。つまり、目標軌跡は対象物表面から内部に 7.5 μ m 平行移動したものとなる。また対象物表面は Fig. 5 の 0 μ m の位置である。このときリファレンス軌跡が対象物内部に存在するが、図における接触を示す表記である。実際にはプローブ先端が対象物の内部に入り込むことは無く、Fig. 3 左図のようにプローブの形が微小に歪みプローブ先端は対象物表面に位置する。つまり、対象物とプローブの接触量を求められる Fig. 5 の範囲 (b) を用いることで表面走査が可能となる。このときプローブの動作は常に $l=0$ で、プローブの進行方向 ϕ が対象物の形状の角度 θ_0 に追従して移動を続けることを望まれる。ここでプローブの進行方向は 2 軸の速度 u_y, u_z による角度であり、 $\phi = \tan^{-1}(u_z/u_y)$ である。

表面走査のシステムは **Fig. 7** に示すブロック線図によって構成される。ここで r は帰還電圧のリファレンス, V は帰還電圧, e は偏差, U は指令速度, P はプローブの位置である。このブロック線図におけるプローブは位置に対して帰還電圧を出力するプローブの式 (1), (2), (3) と同様のものでは

Fig. 6 Outline of the scanning

Fig. 7 Block diagram of the scanning

り、これより帰還電圧はプローブの位置を示す値である。つまり、このシステムはコントローラによって指令速度を生成し、位置と等価な意味をもつ帰還電圧をフィードバックすることで目標位置・軌跡に追従させるようにプラントを制御するものである。2軸による表面走査を考えると、リファレンスは $r \in \mathcal{R}^{1 \times 1}$ 、帰還電圧は $V \in \mathcal{R}^{1 \times 1}$ 、偏差は $e \in \mathcal{R}^{1 \times 1}$ 、指令速度は $U \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ 、プローブの位置は $P \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ である。ここで $\mathcal{R}^{2 \times 1}$ 、 $\mathcal{R}^{1 \times 1}$ は各変数の次元を表わしており、Y 軸、Z 軸での例を示すと、 $\mathcal{R}^{1 \times 1}$ の変数 r 、 V 、 e はスカラー、 $\mathcal{R}^{2 \times 1}$ の変数 U 、 P は、 $U = [u_y \ u_z]^T$ 、 $P = [y \ z]^T$ となる。このリファレンスは帰還電圧の目標値であり、さらに Fig. 6 に示す対象物表面の形状のリファレンス軌跡を表わすものである。また、リファレンス値は最大値と最小値の中間値（ここでは 2.8V）としている。表面走査という常にプローブが動き続ける動作を行なうには、帰還電圧を目標値に収束させることで対象物形状を追従するようにコントローラを設計しなければならない。帰還電圧 V というスカラー値を目標値に追従させることで2軸の指令速度 U というベクトル値を生成させることが必要である。また、位置の増加に対して帰還電圧の出力は減少するため、偏差の定義を $e = V - r$ としている。

これまでに提案されている PI コントローラと余弦コントローラの組み合わせる制御コントローラ⁶⁾は以下の式で表わすものである。

$$\begin{cases} u_z = k_{pz}e + k_{iz} \int_0^t k_{iy}edt \\ u_y = v_{max} \cos\left(k_{py}e + \int_0^t k_{iy}edt\right) \end{cases} \quad (4)$$

ここで u_y 、 u_z は Y 軸、Z 軸への指令速度、 k_{pz} は Z 軸の比例ゲイン、 k_{iz} は Z 軸の積分ゲイン、 k_{py} は Y 軸の比例ゲイン、 k_{iy} は Y 軸の積分ゲイン、 v_{max} は Y 軸の最大速度である。

このコントローラの基本概念は定常状態 $e=0$ のとき積分器が一定値に収束することで成り立ち、コントローラは指令速度 $u_y = v_{max} \cos(\int k_{iy}edt)$ 、 $u_z = k_{iz} \int k_{iy}edt$ を各軸に指令する。制御コントローラの各パラメータを $v_{max} = 0.6$ 、 $k_{pz} = 0.2$ 、 $k_{py} = \pi/6$ 、 $k_{iy} = 12\pi$ 、 $k_{iz} = 864\pi$ 、 $r=2.8$ と定める。積分器 $\int k_{iy}edt$ の値を $-\pi$ から π としたとき、Fig. 8(a) に $\int k_{iy}edt$ と指令速度 u_y の関係を中段に、 $\int k_{iy}edt$ と指令速度 u_z の関係を最下段に、 u_y 、 u_z の組み合わせを最上段に示す。また図中には定常状態 $e=0$ のときだけでなく、帰還電圧が最大値、最小値のときの $e = \pm 0.8$ の場合の過渡状態の指令速度の値も示す。この図から本コントローラで生成できる指令速度およびその組み合わせの制限を確認できる。

Fig. 8 Speed of two axes by the controller output

本コントローラは Y 軸、Z 軸の正方向に対象物が設置されていることを想定されている。また Z 軸には対象物を設置する平面が存在しているため、対象物形状を一周する動作が不要である。しかし、対象物形状を一周して計測する場合は、定常状態、過渡状態にかかわらず、本コントローラではプローブの進行方向 ϕ は π (または $-\pi$)、つまり $u_y = -v_{max}$ 、 $u_z = 0$ という方向に移動できない。このことから移動方向に制約を有するため、対象物形状によっては計測ができない。

そこで新たに正弦関数、余弦関数の組み合わせによる制御コントローラを提案する。以下に示すものである。

$$\begin{cases} u_z = v_{zmax} \sin(\phi) \\ u_y = v_{ymax} \cos(\phi) \\ \phi = k_p e + \int_0^t k_i edt \end{cases} \quad (5)$$

ここで k_p は比例ゲイン、 k_i は積分ゲイン、 v_{zmax} は Z 軸の

最大速度, $v_{y\max}$ は Y 軸の最大速度である. このとき ϕ はプローブの進行方向であり, PI コントローラによって決定される. 制御コントローラの各パラメータを $v_{y\max}=0.5\text{mm/s}$, $v_{z\max}=0.5\text{mm/s}$, $k_p=20\pi$, $k_i=33\pi$, $r=2.8$ と定める. PI コントローラ; $k_p e + \int k_i e dt$ の値が $-\pi$ から π の範囲の場合, Fig. 8(b) に $k_p e + \int k_i e dt$ と指令速度 u_y の関係を中段に, $k_p e + \int k_i e dt$ と指令速度 u_z の関係を最下段に, u_y , u_z の組み合わせを最上段に示す. Fig. 8(b) より, u_y , u_z の組み合わせからプローブの進行方向 ϕ は $-\pi$ から π の全方向に移動できる. これより移動方向の制約をもたず, 対象物形状に関係なく計測が可能である.

本コントローラの基本概念は ϕ が θ_0 に追従することである. つまり対象物の傾き θ_0 とプローブの進行方向 ϕ が一致することで対象物の形状に追従して動作を行ない, このときの帰還電圧 V の値から対象物表面の位置を求めることで形状計測が行なわれる. この安定性については付録にて示している. また従来コントローラは4つのゲイン k_{pz} , k_{iz} , k_{py} , k_{iy} による目標角度 θ_0 への応答を考えなければならないが, 本コントローラでは2つのゲイン k_p , k_i による応答性を検討することでゲインチューニングが可能である. これより本コントローラを用いて, 角形状や円形状の対象物の計測を行なう.

4. 表面走査コントローラによる形状計測

基準寸法をもつブロックゲージを用いた表面走査実験を行ない, 提案アルゴリズムの有効性を確認する. 提案手法は対象物の形状に依存しないことから, 測定対象物としては長方形断面となる角形状対象物や円断面となる円形状の対象物を測定して, 提案手法の有効性を示す.

4.1 角形状対象物の表面走査実験

YZ 軸を用いて Y 方向に 1mm の幅をもつ角形状対象物を測定する. Fig. 9 の基準ゲージを例に表面走査にて生じる挙動を示す. この図において対象物の形状, プローブの形状, 表面走査におけるプローブ先端軌跡を示す. 本システムで計測されるプローブ位置はプローブ先端の位置である. Fig. 9 の垂直面にプローブが位置する場合, プローブ先端の軌跡はプローブ先端形状も含むため, ブロックゲージ外側の軌跡を描くこととなる. また, プローブ先端形状については $10\mu\text{m}$ の分解能である光学顕微鏡を用いて測定している. つぎに水平面を考えると対象物の傾きは $\theta_0=0$ であり, プローブ先端形状の影響は受けない.

Fig. 10 に実験結果を示す. Fig. 10 において上から YZ 平面におけるプローブの軌跡, 帰還電圧, Y 軸におけるプローブ位置, Z 軸におけるプローブ位置, プローブの進行方向の角度である. 描写範囲は基準ゲージの Z 軸の最小位置から 0.2mm の範囲であり, プローブの進行方向は移動軌跡を元に求めたものである. 0.75s までは左側の垂直面を表面走査しているデータである. プローブの進行方向の角度がおおよそ -90deg であることから左垂直面の計測をしている. 0.75s か

Fig. 9 Trajectory of the probe and shape of object (YZ plane)

Fig. 10 Experimental results of square shape object ($v_{y\max}=0.6\text{mm/s}$, $v_{z\max}=0.3\text{mm/s}$, $k_p=\pi/4$, $k_i=5\pi$, $r=2.8$)

ら 2.2s までは, プローブの進行方向が 0deg であることから, 水平面を計測している. 2.2s からはプローブの進行方向の角度がおおよそ 90deg であることから, 右側の垂直面を計測している. これより帰還電圧を制御することで表面走査が可能であることを確認できた. 帰還電圧が一定値に収束しないことが, 形状計測にとって問題でないことをつぎの帰還電圧による補正に関して説明する.

本計測において測定対象物の形状を求める際には, 測定したデータを元に2つの補正を行なっている. 1つ目はプローブ先端形状の補正であり, 先に原因を述べたように本形状計測システムにおいてプローブ先端形状が影響して Fig. 9 のよ

うにプローブ軌跡は外側に広がる．このため外に広がったプローブ軌跡から Fig.9 のプローブ径を補正することで本来の対象物形状が求められる．プローブ径は対象物上面からの Z 軸の位置に関する関数としてあらかじめ求められている．つまり，実験のデータの Y 軸，Z 軸の位置データを元に，Z 軸位置からプローブ先端形状による外に広がった形状を元に戻すように補正を行なう．2つ目は帰還電圧による補正であり，先に示した帰還電圧と接触量の関係式 (1)，(2)，(3) を用いて，帰還電圧の値からプローブと対象物の接触量を求め，測定データにその値を加える．つまり帰還電圧が最大値と最小値の間であれば，帰還電圧からプローブと対象物の接触量を求めることができる．これより，帰還電圧が一定値に収束しなくても，帰還電圧による補正には問題が無く，対象物の形状を求めることが可能である．このプローブ先端形状と帰還電圧による接触量の 2 つの補正を行なうことで，対象物の形状データは求められる．

この測定結果で Z 軸の位置が -0.8mm から -0.9mm の範囲における Y 軸と Z 軸の補正した位置データを用いて，最小二乗法にて幅を演算した結果真値 1mm に対して，幅 1.0217mm ，すなわち誤差 $21.7\mu\text{m}$ を得た．これより本コントローラにて長方形断面形状の表面走査が可能であり，対象物の寸法を求めることができる．

4.2 円形状対象物の表面走査実験

XY 軸を用いて直径 1mm の円形状対象物（ピンゲージ）を測定する．先に示したコントローラは YZ 軸に関して記述しているが，ここでは同様のコントローラを XY 軸に適用する．ここでの対象物の角度 θ は対象物形状の接線の角度である．

Fig. 11 に XY 平面における補正後の軌跡と真値の形状を，Fig. 12 に帰還電圧，X 軸の位置，Y 軸の位置，対象物の半径，プローブ位置から求めた対象物の角度，プローブの進行方向の角度を示す．この図においては反時計回りを角度の正の方向としている．この計測においても測定結果に対象物とプローブ先端形状を含んだ結果が得られるが，先と同様にプローブ径と帰還電圧による補正を用いる．また XY 平面ではプローブの形状は一定値の直径であるため一定値拡大した形状で計測されるが，ここでは補正後の結果を示しており，プローブの進行方向の角度は補正後の XY 平面におけるプローブの軌跡を元に求めている．実験結果の軌跡から帰還電圧の制御で円対象物の測定が可能であることが確認できた．ここで帰還電圧は一定値に収束していないが，先の角形状対象物と同様に補正を行なっているため，収束しないことは形状計測に影響を与えない．また，X 方向と Y 方向の接触によって形状に違いがみられるが，これはプローブの帰還電圧の出力特性が X 軸方向と Y 軸方向で異なることが原因である．つまり，接触量の補正式が接触方向にも依存することから，補正式による誤差が生じていると考えている．実験結果の半径データの最小二乗法により，真値が $500\mu\text{m}$ に対して，半径が $489.1\mu\text{m}$ ，真円度に対する精度は $22.6\mu\text{m}$ ，誤差 $10.9\mu\text{m}$ を得た．これより円断面形状の対象物を表面走査可能であり，

Fig. 11 Experimental result of circular shape object in XY plane

Fig. 12 Experimental results of circular shape object ($v_{x\max}=0.5\text{mm/s}$, $v_{y\max}=0.5\text{mm/s}$, $k_p=20\pi$, $k_i=33\pi$, $r=2.8$)

対象物の寸法を計測可能である。

5. おわりに

本稿にて振動型接触プローブの接触による帰還電圧の変化を示し、また正弦関数と余弦関数を組み合わせた非線形コントローラによる表面走査の手法を提案した。本手法は対象物形状に制限を設けることなく測定ができ、PIゲインのチューニングによって形状計測が可能である。また、提案手法を実験機に適用して、本手法による長方形断面形状と円断面形状の表面走査を行ない、その寸法を求めた。測定結果を向上させるには、プローブ先端形状の測定をより高分解能な装置で計測すればよりよい測定結果を得られると推測できる。

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) 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)
- 2) 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)
- 3) 中村, 森田, 安孫子: 直交座標測定系による三次元微いプローブの開発 (第1報 測定システムの設計と静特性), 設計工学, **33**-4, 107/112 (1998)
- 4) 中村哲夫: 直交座標測定系による三次元微いプローブの開発 (第2報 プローブ測定系の誤差補正とその評価), 設計工学, **34**-3, 99/106 (1999)
- 5) 中村, 杉田, 三輪: 直交座標測定系による三次元微いプローブの開発 (第3報 プローブ測定系の動的特性評価), 設計工学, **34**-4, 109/115 (1999)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) PIX-30 カタログ: ローランド ディー・ジー 株式会社 (2002)

《付 録》

A. 安定性

対象物の傾き θ_0 が一定のとき、プローブの進行方向が対象物の傾きに収束することを示す。制御コントローラは以下のものである。

$$\begin{cases} u_y = v_{ymax} \cos(\phi) \\ u_z = v_{zmax} \sin(\phi) \\ \phi = k_p e + \int_0^t k_i e dt \end{cases} \quad (A.1)$$

u_y, u_z は Y 軸, Z 軸の速度, v_{ymax}, v_{zmax} は Y 軸, Z 軸の最大速度, ϕ は進行方向の角度, k_p は比例ゲイン, k_i は積分ゲインである。ここでは簡易化のために $v_{max} = v_{ymax} = v_{zmax}$ と置く。また, k_p, k_i は正の値である。モータ, プローブからの応答は以下の式である。

$$\begin{cases} y = u_y / s \\ z = u_z / s \\ V = k_V l \\ l = -\sin \theta_0 y + \cos \theta_0 z \end{cases} \quad (A.2)$$

y, z は Y 軸, Z 軸の位置であり, V はプローブの帰還電圧である。プローブの帰還電圧は対象物からの垂直距離 l と帰還電圧の係数 k_V で表わされる。また, k_V は負の値である。

このシステムを対象物の傾き θ_0 で座標変換を行なうと以下の式を得る。

$$\begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_y \\ \hat{u}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

$\hat{y}, \hat{z}$ は座標変換後の位置, $\hat{u}_y, \hat{u}_z$ は座標変換後の速度である。座標変換後の速度, 帰還電圧は以下で表わすことができる。

$$\begin{cases} \hat{u}_y = v_{max} \cos(\phi - \theta_0) \\ \hat{u}_z = v_{max} \sin(\phi - \theta_0) \\ \hat{y} = \hat{u}_y / s \\ \hat{z} = \hat{u}_z / s \\ V = k_V \hat{z} \end{cases} \quad (A.5)$$

ここで帰還電圧は $\hat{z}$ に依存するものであり, $\hat{y}$ は安定性に関係しないため, $\hat{y}$ に関しては安定性の式から除く。(A.1)~(A.5) 式と Fig.7 の偏差から, 安定性に関する式を導く。

$$\begin{cases} \hat{u}_z = v_{max} \sin(\hat{\phi}) \\ V = k_V \frac{1}{s} v_{max} \sin(\hat{\phi}) \\ e = V - r \\ \phi = k_p e + k_i \frac{1}{s} e \\ \hat{\phi} = \phi - \theta_0 \end{cases} \quad (A.6)$$

r は帰還電圧のリファレンス, k_p は比例ゲイン, k_i は積分ゲイン, v_{max} は最大速度, k_V は帰還電圧係数である。 $r = 0$ として,

$$\dot{\hat{\phi}} = k_p k_V \frac{1}{s} v_{max} \sin(\hat{\phi}) + k_i k_V \frac{1}{s^2} v_{max} \sin(\hat{\phi}) - \theta_0 \quad (\text{A.7})$$

を得る. $\hat{\phi}$ の 1 階微分, 2 階微分を行ない, 以下の式を得る.

$$\begin{cases} \dot{\hat{\phi}} = k_p k_V v_{max} \sin(\hat{\phi}) + k_i k_V \frac{1}{s} v_{max} \sin(\hat{\phi}) \\ \ddot{\hat{\phi}} - k_p k_V v_{max} \dot{\hat{\phi}} \cos(\hat{\phi}) - k_i k_V v_{max} \sin(\hat{\phi}) = 0 \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

ここで $x_1 = \hat{\phi}$ として, さらに $\hat{\phi}$ を 2 階微分した数式を以下のように置く.

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + h(x_1) \dot{x}_1 + g(x_1) = 0 \\ h(x_1) = -k_p k_V v_{max} \cos(x_1) \\ g(x_1) = -k_i k_V v_{max} \sin(x_1) \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

また, $\dot{x}_2 = -g(x_1)$ と定義すると, $\hat{\phi}$ の 1 階微分した式は次式となる.

$$\dot{x}_1 = x_2 + k_p k_V v_{max} \sin(x_1) \quad (\text{A.10})$$

リアプノフ関数 V を以下のように選ぶ.

$$V = \frac{x_2^2}{2} + \int_0^{x_1} g(\zeta) d\zeta \quad (\text{A.11})$$

このリアプノフ関数における積分部分は $\int_0^{x_1} g(\zeta) d\zeta = -k_i k_V v_{max} (1 - \cos x_1)$ であるので $\int_0^{x_1} g(\zeta) d\zeta \geq 0$ であり, V は半正定関数となる. つぎに (A.11) 式を微分して求めた $\dot{V}$ は (A.9), (A.10) 式を用いることで

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_2 \dot{x}_2 + \dot{x}_1 g(x_1) \\ &= -g(x_1) x_2 + (x_2 + k_p k_V v_{max} \sin(x_1)) g(x_1) \\ &= -k_p k_i k_V^2 v_{max}^2 \sin^2(x_1) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

であり, k_p, k_i が正の値のときに, $\dot{V}$ は半負定関数となる. 上記のリアプノフ関数から $\dot{V}=0$ とする $\hat{\phi}$ の平衡点は $n\pi$ (n は $-\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$) であることがわかる. さらに分別すると平衡点は $\hat{\phi}=(2n+1)\pi$ (n は $-\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$) と $\hat{\phi}=2n\pi$ (n は $-\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$) が考えられ, 2つの現象に関して物理的挙動を考える. $\hat{\phi}=2n\pi$ のときは, $\hat{u}_y = v_{max}$, $\hat{u}_z = 0$ で対象物の形状に安定して追従している. つぎに $\hat{\phi}=(2n+1)\pi$ のときは, $\hat{u}_y = -v_{max}$, $\hat{u}_z = 0$ で対象物の形状に追従して動作している. $\hat{\phi}=(2n+1)\pi$ の動作にて考えると, 平衡点 $\hat{\phi}=(2n+1)\pi$ からずれると, 対象物の形状に追従するように $\hat{\phi}=2n\pi$ の安定点に収束する. つまり提案コントローラは $\hat{\phi}=2n\pi$ に収束するものであり, 安定に形状計測が可能である.

[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. 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, 日本鑄造工学会, 日本ロボット学会, IEEE などの会員.