十字形薄板ばねの振動を利用した加振式タッチプローブの試作検討*

松岡 浩 仁**

賀 勢 晋 司**

日 野 原 慎***

Development of a Resonance-Based Touch Probe Structured with 2 Parallel Cross-shaped Thin Leaf Springs

Hirohito MATSUOKA, Shinji KASEI and Makoto HINOHARA

In this study, a resonance based touch trigger probe that detects a contact with lower measuring force is developed. The touch trigger probe is consisted of 2 parallel thin cross-shaped leaf springs and a piezoelectric actuator. The fundamental concepts and analysis by FEM are described. From the analysis, when the probe vibrates at the frequency of the 5th natural mode, the probe is considered to oscillate like an inverted pendulum with the center of oscillation being near the tip of the stylus. If a contact has been made when the probe is in the condition of natural vibration, the waveform is changed. Thus a contact can be detected by catching the change of waveform. A prototype is constructed and tested. According to the results of experiments, the measuring force is smaller than $50 \mu\text{N}$, and the repeatability could be smaller than 500 nm . Meanwhile, because the trajectory of the tip of the stylus remains still unknown, further analytic investigation is needed and it will lead to the optimum design.

Key words: resonance, touch trigger probe, piezoelectric actuator, natural mode of vibration, measuring force

1. 緒 言

三次元物体の形状測定において CMM は欠かせない測定装置であり、その測定精度は一般的には数 μm 以下と高精度である。そのような CMM にあって、測定座標を決定するタッチプローブは、特別なものを除き 1970 年代に開発された、3 個の鋼球またはピンと 3 個の V 溝等を組み合わせ、電気式接点を組み込んだタイプのもので、構造が簡単であることやフリーストロークが大きいことなどの特徴を持つ¹⁾が、測定力が測定方向に依存する²⁾ことや、着座位置にばらつきが生じる³⁾ことを欠点として持ち、新しいタイプのタッチプローブが求められている⁴⁾。

このような要求に対し、石川らは圧電素子とスタイラスからなるプローブを考案、試作し高い繰り返し精度と小さな方向依存性を実現している⁵⁾。また高増らは吸気パイプ先端にボールを吸着させるという新しい方式を考案し、測定圧 1 mN 以下、繰り返し精度 $2 \mu\text{m}$ 以下という性能を実現している⁶⁾。これらのほか圧電アクチュエータ薄膜を用いたもの⁷⁾や超音波を用いるもの⁸⁾、薄板の変形を工学的に検出する方法⁹⁾など多くの方法が検討されつつある。

本研究も、方向依存性がなく低い測定圧での高精度な測定を実現するタッチプローブの開発を目的とする。これまで、薄板はりを加振して接触による振動変化を検出するタッチプローブについての検討を行ってきた。その結果接触力 $100 \mu\text{N}$ 以下での接触検出のばらつき $1 \mu\text{m}$ 以下という性能を得たが、接触検出のばらつきは楕円状に分布しており $0.3 \mu\text{m}$ から $0.9 \mu\text{m}$ という明らかな方向性を持つものであった¹⁰⁾。それは、はりの形状が I 字型であるために剛性に方向性が存在することが主な原因であると思われた。そこで、本研究では十字型の薄板ばねによ

Fig.1 Structure of probe

り支持された振動系を持つ、加振型のタッチプローブについて試作、検討している。接触検出感度と検出位置のばらつきに関する実験ではそれぞれ数十 μN および 500 nm 以下という結果が得られた。本報では実験結果および FEM による解析結果を示し、本プローブの可能性について検討する。

2. 十字薄板ばね構造タッチプローブ

2.1 プローブの構造

図 1 に試作検討したプローブの概観を示す。2 枚の十字形薄板ばねの層構造をしており、上側の中心に加振用の圧電アクチュエータを、下側の中心に測定子を取り付けている。板ばねは上下共にりん青銅板で、厚さは 0.25 mm である。なお、圧電アクチュエータのサイズは $5 \times 5 \times 8 (\text{H}) \text{ mm}$ また接触子はてこ式ダイヤルゲージの接触子で先端球直径 2 mm 、長さ 18.5 mm (先端球含む) である。振動は上側の板ばねの 1 腕に貼付したひずみゲージで観察する。

*原稿受付 平成 13 年 7 月 16 日

**正 会 員 信州大学工学部 (長野市若里 4-17-1)

***信州大学大学院 (現、日本精工; 東京都品川区大崎 1-6-3)

Fig. 2 Natural mode shape

Fig.3 Form of vibration of each arm

圧電アクチュエータに正弦波状の駆動信号を印加して振幅 $5 \mu\text{m}$ 程度で振動させ、これにより二次的に下層の測定子を振動させる。プローブが振動状態にあるとき、測定子先端に何らかの接触が生じると全体の振動状態にも変化が生じ、その変化を捉えることにより接触が検出できるものと思われる。

2.2 振動解析

図2は図1のプローブをモデル化し、FEMにより振動の解析を行った例で、1次モード(a)、2次モード(b)、3,4次モード(c)および5,6次モード(d)を示す。振動の周波数はそれぞれ 162.43Hz 、 189.75Hz 、 250.03Hz そして 417.35Hz である。なお、薄いグレーで示したのが静止状態、濃い色で示したのが変形し

た状態である。両端固定はりにおける基本振動が本プローブの1次および2次モードで発生し、両端固定はりの2次振動が本プローブの3,4次および5,6次モードで発生する。本プローブの1,2次モードでは下または上部板ばねが両端固定の基本モードで振動するために、測定子先端は測定子の軸方向に大きく変位する。これに対し、3,4次および5,6次のモードは下部または上部板ばねの中央が節となる振動である。3,4次では下部板ばねが、両端固定の2次モードで振動するために、測定子は、板ばねの中心を振動の中心とした円弧振動となる。また5,6次モードでは上部板ばねが両端固定の2次モードの振動となる。この結果、測定子先端付近のある1点を中心とする倒立振り状の円弧状振動を引き起こしていると考えられる。下部板ばねの上部板ばね

に対する取り付け位置や測定子の長さによっては測定子の振動は異なると推定されることから、FEM の解析をもとにこれらを適切に設計すれば、プローブ先端の軸直角平面内の動きを抑え、プローブ先端を中心にごくわずかな回転振動をする振動系が得られると思われる。本実験では、各モードにおいて感度や安定性を試験した結果、最も安定した性能が得られるものとして 5 次および 6 次のモードを採用した。

図 3 は本研究で試作したプローブの、下側のはりの中央部付近の変位を非接触変位計で測定した例で、このときの加振周波数は 450Hz である。加振周波数を徐々に上げていき、ひずみゲージ出力が最大となり最も安定した振動を示す点を求めた。参考のために、ひずみゲージ出力を同時に示す。変位計出力は、ひずみゲージを貼り付けた側のはりと、それに対向するはりの変位変動はちょうど逆位相であり、それに直交するはりはほとんど変位していないことがわかる。このことより、プローブの実際の振動状態は、5, 6 次モードが支配的であると思われる。なお、本プローブの最適な設計のためにも測定子先端の振動状態のより正確な解析と把握が必要であり、今後の課題である。次に図 4 はプローブ軸直角平面内の接触についてのプローブのばね定数で、FEM を用いて計算したものである。この結果から、この面内の接触に対しては方向性を持たないことが分かる。

Fig. 4 Lateral deflection dependence on direction

Fig. 5 Experimental apparatus

3. 接触検出時の接触力

実験装置を図 5 に示す。被接触物を固定し、プローブを x-y ステージに設置して、ステージを手動で移動させて接触させる。なお、ステージの変位検出分解能は、 $0.24 \mu\text{m/bit}$ である。また、ステージの運動精度は、x 軸、y 軸それぞれストローク 100mm および 50mm に対する真直度が $2 \mu\text{m}$ および $3 \mu\text{m}$ である。

被接触物として薄板ばねにひずみゲージを張り付けて製作した接触力センサを取り付け、接触検出時の接触力を測定する。図 6 に接触力検出のためのセンサを示す。りん青銅の薄板にひずみゲージを張り付けただけの簡単な構造であるが、(b) のキャリブレーション結果が示すとおり数十 μN 程度の測定は可能である。このセンサを所定の位置に取り付け、プローブを接触させ、そのときのプローブ移動量、接触力およびプローブ振幅実効値の変化例を図 7 に示す。図 3 において、ひずみゲージを貼り付け腕のほうからの接触を 0° として、 90° 毎の方向からの接触に伴う実効値の変化を示す。センサの剛性が低いために、接触後の出力は不安定であるが、およそ接触力 $50 \mu\text{N}$ 程度で振幅実効値には有意な変化が認められる。従って、振幅実効値に注目し、定常状態に対して一定の割合だけ変化する点により数十 μN の接触力での接触検出が可能になるとと思われる。

4. 接触検出位置のばらつき実験結果および考察

4.1 接 触 検 出

接触を検出するにあたり、振幅変化の検出は次のように行う。ひずみゲージ出力を、加振周波数に中心周波数を合わせたバンドパスフィルタを通して整形し、さらに RMS-DC コンバータを用いて実効値に変換する。実際の振動には様々な要因により振幅に若干の揺れがあり、実効値出力にも影響があるために、ハイパスフィルタを通すことにより急激な、明らかな変動成分のみを取り出す。そしてコンパレータ回路により基準レベルとの比較を行い、基準値を超える変動が生じた時 CPU に対し割り

Fig. 6 Load cell for measuring force

込みを発生させる。基準値の決定は、 $50 \mu\text{N}$ の接触力に充分対応できるように、非接触時の 80% 程度とする。

4.2 接触検出位置のばらつき

はじめに鋼製ブロックの研削面への接触を行い、接触検出感度についての実験的検討を行う。任意に定めた原点位置よりプローブを手動で移動させ、接触を検出するまでの移動距離を測定する。ステージの x 軸、y 軸方向と、プローブの取り付け角度を 45° 回転させての両軸方向からの接触で計 8 方向からの接触とする。また各方向 20 回の測定を行い、その移動距離についての標準偏差をもって評価する。図 8 にその結果を示す。 135° 方向で $0.7 \mu\text{m}$ 程度となっているが、その他ではおおむね $0.3 \mu\text{m}$ 程度のばらつきを示している。 135° 方向についても別な実験では $0.28 \mu\text{m}$ 程度の結果が得られており、プローブ自身の問題ではないと思われる。また図 9 は(a)に示すような 45° の角度の傾斜面への接触についてまとめたもので、この場合およそ $0.4 \mu\text{m}$ であった。接触面に傾きがない場合 (図 7) と比較すると

Fig.7 Measuring force

若干劣るが、ステージの変位検出分解能程度のばらつきであり、これはプローブの本質的なものではないと思われる。

次にブロックからリングゲージ（呼び径 2.5mm ，真円度 $0.3\mu\text{m}$ ）に置き換えて同様な実験を行った。穴部のほぼ中心を原点としてプローブを手動で移動させ、接触を検知したときのプローブ中心座標を記録した。その結果から最小自乗法により平均円を求めた例を図 10 に示す。プロットは平均円に対する偏差を 5 倍してある。点線は検出座標値から最小自乗法により求めた平均円である。このとき平均円に対する各測定点の偏差の標準偏差は $0.5\mu\text{m}$ 程度である。また、この結果より得られた真円度は $2.8\mu\text{m}$ である。表 1 に示す通り他 4 回の測定結果も同様である。ステージの運動精度や変位測定精度、さらにはプローブ先端球の真球度などが正確に考慮されていないため、真円度測定の結果としては信頼性に欠けるが、これらの精度を上げれば 3 次元座標測定器のプローブとして適用できるものと思われる。また、この結果より、水平面内の測定に対する不感量は全方位にわたってほぼ一定していると考えられる。

本方式では圧電アクチュエータにより加振するために、使用時間に従って発熱し、プローブ本体に変形をもたらす。そこで、加振開始後 10 分、30 分そして 120 分後にリングゲージの測定実験を行った。それぞれの場合の平均円に対する偏差の標準偏差および平均円半径を表 2 に示す。温度変化についてのデータは得られていないが、この程度の時間加振を続けても測定には影響がないことが分かる。しかしながら、測定器内部に熱源が存在すること自体望ましくないとのため、圧電アクチュエータによらない加振方法について検討する必要がある。

Fig.8 Dependence on touch direction

Fig.9 Contact to inclined surface

Table 1 Measurements of ring gauge

Experiment No	Radius of mean circle μm	Roundness μm	Standard deviation μm
1	241.4	2.8	0.5
2	241.9	2.2	0.6
3	240.8	3.5	0.8
4	242.2	3.2	0.7
5	242.6	2.4	0.6

Table 2 Influence of operating time

Operating time min.	Radius of mean circle μm	Roundness μm	Standard deviation μm
10	242.2	3.2	0.6
30	242.1	2.1	0.4
120	242.0	2.7	0.6

4.3 微動ステージを用いた実験

以上は手動による操作であったが、これでは接近速度などを安定化できず、誤差要因となると考えられるため、鋼製ブロックを圧電アクチュエータ駆動の精密微動ステージ(piezosystem jena 社,PXY100NV)上に取り付け、固定したプローブに被接触面を接近させた。このときステージは、三角波の信号により駆動し一定量距離の接近と後退を繰り返す。接触の速度はおおよそ $100\mu\text{m/s}$ である。接触によって発生する割り込み信号を受けて微動ステージの移動量をサンプリングし記録するものとし、ひずみゲージを貼り付けた側からの接近を 0° として、反時計回りに 45° ずつ角度を変えながら 8 方向について行った。各方向 20 回の繰り返し接近実験を行い、そのときの移動量の標準偏差を図 11 に示す。このように最大でも $0.3\mu\text{m}$ 程度のばらつきで、図 8 と比較して大幅に小さくなっている。しかし、この大きさは変位検出の分解能程度の大きさであるため厳密にばらつきがどの程度かを把握することはできない。したがって、変位検出の分解能を上げた、より詳細な検討が必要である。

5. 結 言

- 1) 二層の薄板ばねからなる加振形タッチプローブを考案し、試作した。
- 2) タッチプローブは、上層の薄板ばねに共振数端数において振幅数 μm の振動を加え、測定子が接合された下層の薄板ばねを二次的に振動させる方式で、数値解析の結果適切な振動周波数では、プローブ先端を振動の中心とする、倒立振り子の振動であることが分かった。
- 3) 圧電駆動のステージを用いた接触検出実験の結果、接触位置のばらつきは方向によらず $0.3\mu\text{m}$ 以下と、安定していることが分かった。
- 4) 接触は $50\mu\text{N}$ 以下程度の接触力で検出可能であることが分かった。
- 5) リングゲージの測定より、水平面内の測定に関して不感量はほぼ一定していることが明らかになった。
- 6) 現時点ではスタイラス先端の運動が不明である。これは精度に大きく影響するため、最適な設計を行うためにも解析的な検討が必要である。また、圧電アクチュエータを加振に用いる場合発熱が問題となると思われる。他の加振方法についての検討が必要である。

Fig. 10 Example of measurement of ring gage
Case of experimental no. 1

Fig.11 Dependence on touch direction using piezoelectric actuator stage

参 考 文 献

- 1) 広瀬藤司：三次元位置センサプローブ，日本機械学会誌，82，731（1979）1130.
- 2) 大矢 誠：タッチトリガプローブの精度に関する研究，日本機械学会論文集(C 編)，59，563（1993）2086.
- 3) 日高和彦ほか：6 点接触型着座機構の着座位置のばらつき，1997 年度精密工学会春季大会講演論文集，（1997）363
- 4) 三輪憲治ほか：三次元測定機の運動性能，精密工学会誌，82，8，（1986）1296.
- 5) 石川修弘ほか：三次元測定機用タッチ信号プローブのセンサ機構の開発，精密工学会誌，66，2（2000）304.
- 6) 高増潔ほか：吸気型プローブの開発(第 1 報)，精密工学会誌，64，8（1998）1153
- 7) 例えば神田岳文ほか：圧電アクチュエータ薄膜を用いた加振形接触センサ，1997 年度精密工学会春季大会講演論文集，（1997）755
- 8) 例えば西沖暢久ほか：十字型超音波タッチセンサの検出特性，1999 年度精密工学会秋季大会講演論文集，（1999）626.
- 9) 花岡健一ほか：小物部品測定用三次元測定機の開発，1997 年度精密工学会春季講演論文集，（1997）787.
- 10) 賀勢晋司ほか：薄板ばねの振動を利用した微小接触力タッチプローブの試作検討，1999 年度精密工学会秋季大会講演論文集，627