

超音波振動を用いた三次元接触センサに関する研究 (第2報)

西嶋 隆、西村 太志、今井 智彦

A high-aspect-ratio touch probe using ultrasonic vibration (II)

Takashi Nishijima, Futoshi Nishimura and Tomohiko Imai

本研究では、深い細溝や細穴の精密座標測定を可能とする非常に細長い形状の三次元接触センサ（ハイアスペクトタッチプローブ）の開発を行う。昨年度はプローブの縦波の共振を利用する方式により、先端径 1mm、プローブ軸径 0.7mm、測定長さ 37mm の形状のハイアスペクトタッチプローブを開発したが、プローブ軸水平方向の接触検出位置の繰り返し精度に課題が残った。本年度は新たに、プローブ先端に回転する振動を生成する方式のハイアスペクトタッチプローブを開発し、プローブ軸水平方向の接触検出位置の繰り返し精度の向上を図った。評価実験をしたところ、試作したプローブにおいてプローブ軸方向の一方向繰り返し精度 (2σ) は $0.11\mu\text{m}$ 、プローブ軸水平方向の一方向繰り返し精度 (2σ) は $0.75\mu\text{m}$ が得られた。また、本プローブを画像測定機のヘッドに取り付け、内径 30mm のリングゲージを内径測定したところ 29.9984mm の測定結果を得ることができた。

1. はじめに

近年、放電加工機等により、比較的高精度な深彫り加工が可能となってきたことから、加工された深い細溝や細穴の寸法や形状に対する精密座標測定のニーズが生じている。精密座標測定は、主に接触式プローブを用いた機上測定や三次元測定機にて行われているが、測定対象である細溝や細穴の奥に入れることが可能なハイアスペクトタッチプローブはあまり提供されていない。

接触式以外の測定方式として、レーザ光を用いた光切断法による測定も知られているが、測定精度は接触式には及ばないのが普通であり、マイクロメートルオーダの精密測定には接触式が主流となっている。

本研究では、高い感度で接触を検出する振動プローブの先行研究¹⁾を参考に、機上測定や三次元測定機で用いる非常に細長いタッチプローブの開発を目指している。

昨年度においては、プローブ軸方向の縦波の共振を利用する（以降、縦波型とよぶ）タッチプローブを開発した²⁾。試作した縦波型タッチプローブの形状は、先端径 1mm、軸径 0.7mm、測定長さ 37mm と非常に細長い形状であり、接触検出位置の繰り返し精度 (2σ) はプローブ軸方向で約 $0.4\mu\text{m}$ と現用の普通形状のタッチプローブに劣らない性能が得られたが、プローブ軸水平方向では約 $8.0\mu\text{m}$ となり、プローブ軸水平方向の精度の向上が課題として残された。

本年度は、上述の課題に対し、プローブ軸水平方向の接触検出の感度を高める方法として、プローブ先端がプローブ軸水平方向に円周運動する振動を生成する方式（以降、回転振動型とよぶ）のハイアスペクトタッチプローブを開発した。本報では、この回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの概要、振動モード解析、解析の検証及び試作機の実験、評価について報告する。

2. 回転振動型ハイアスペクトタッチプローブ

2. 1 概要

図1に回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの振動体部分の概要図を示す。プローブ軸にはリング状の圧電素子二個を一組とした加振用と振動検出用の圧電素子をねじで締結する。圧電素子の重なり合う面の電極は四分割しており、加振用圧電素子には四相の交流電圧を印加し、適切な周波数においてプローブ先端が同図のように微小な円周運動する振動が発生する。本方式では、このような振動モードを利用し、プローブ軸の水平方向からの接触に対し、プローブが大きく撓む前に敏感に接触を検出する。

2. 2 接触検出の判定方法

図1に示すように、振動検出用圧電素子の電極も加振用と同様に四分割する。振動中は対向する電極間の電位は逆位相となると考えられるため、同図に示すように、これらの差動信号と加振電圧の位相差の変化を検出することで接触の判定を行う。

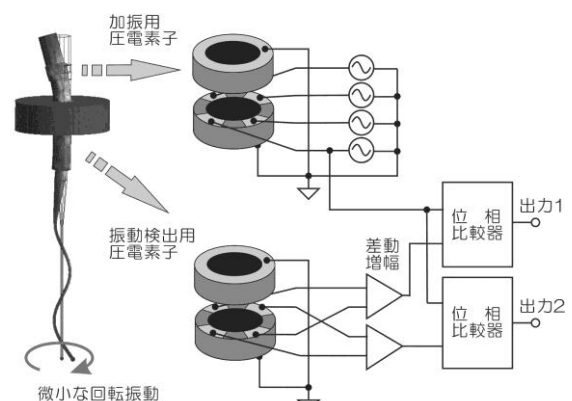


図1 回転振動型タッチプローブの概要図

位相差の変化の検出は、汎用マイコンの多機能タイマを利用し、加振周波数に同期して、位相差の変化が閾値を超えた時に接触と判定する。すなわち、接触判定は加振周波数の周期で逐次実行することにより高速な接触判定を行う。

3. 解析

回転振動型の振動モード及び、加振周波数に対するプローブ先端変位の関係を把握するために、有限要素法による解析を行った。解析ソフトウェアには Femtet (ムラタソフトウェア) を使用し、圧電解析における調和解析の機能を用いた。

解析における材料や圧電素子の物性値は、試作するタッチプローブと同様とした。但し、金属部材の機械的 Q 値は適切に見積もることが困難であったことから本解析では無視 ($1/Q=0$) することとし、減衰は圧電素子部分のみにあることとした。

図 2 に加振周波数とプローブ先端変位 (大きさ) の解析結果を示す。この結果より複数の周波数で先端の変位

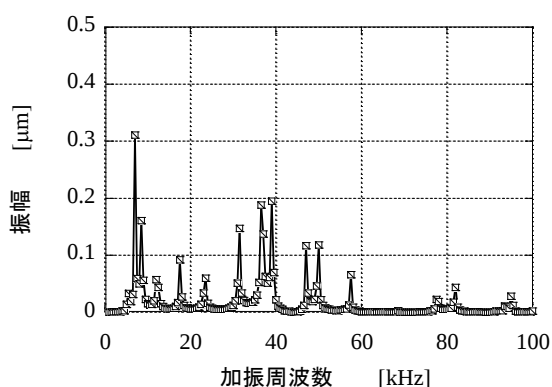


図 2 先端変位と加振周波数の関係 (解析結果)

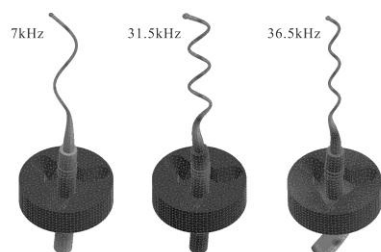


図 3 代表的な振動モード (解析結果)

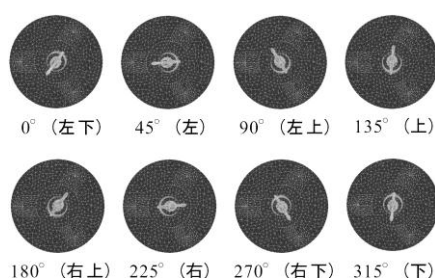


図 4 先端変位の動き (解析結果)

が大きくなることが確認できる。図 3 に例として、振幅が大きく得られる 7kHz、31.5kHz、36.5kHz 時のモードを示す。図 4 に 31.5kHz 時のプローブ先端方向から見た、先端の変位方向と加振電圧位相の関係を示す。これらの結果からプローブ先端は円を描くように回転しながら振動することが確認できる。

4. 解析の検証

4. 1 加振周波数と先端振幅の関係

解析の検証としてプローブの先端変位と加振周波数の関係を調べた。実験では加振周波数を掃引し、ヘテロダイナミクス変位計 ST3761 (岩通計測) を用いてプローブ先端の水平方向の変位を計測した。同時に振動検出用圧電素子の出力 (AD 変換値) を計測した。結果を図 5 に示す。同図から先端の振幅は 7.65kHz、30.6kHz 等で増大し、複数の周波数で振幅が得られることが確認できた。また、圧電素子の出力は最大振幅が得られる 7.65kHz ではピークが認められず、30.6kHz や 37.5kHz にて増加した。なお、これらの周波数では先端の変位も増大することが確認できる。

4. 2 振動モード

振動モード解析の検証として、プローブ先端から根本に向かって 2mm 間隔でプローブ軸の水平方向の振幅を測定した。測定時の加振周波数は先端振幅が増大する 7.65kHz、30.6kHz とした。結果を図 6、図 7 に示す。同図には各点において計測した振幅及び、その値を半分にして位相を考慮してモード (形状) を示した点をプロットする。これらの結果から解析と同様の波長の振動モード

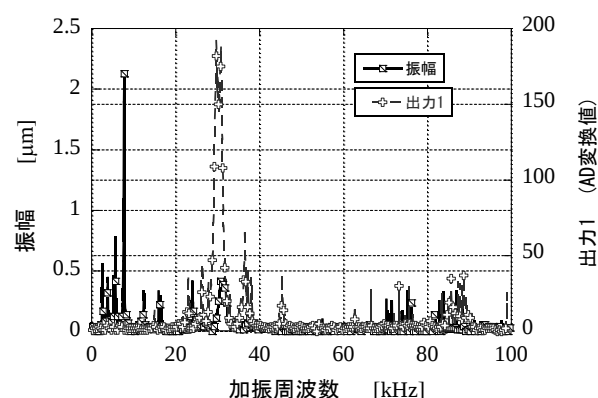


図 5 先端変位・出力 1 の振幅と加振周波数の関係

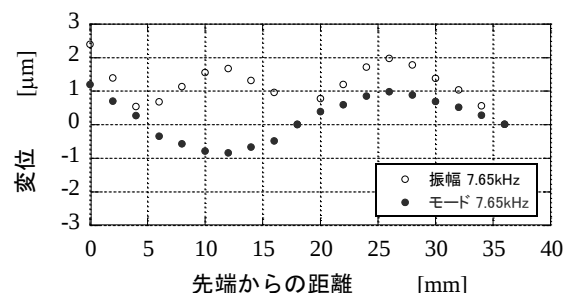


図 6 7.65kHz 時のプローブの振幅とモード

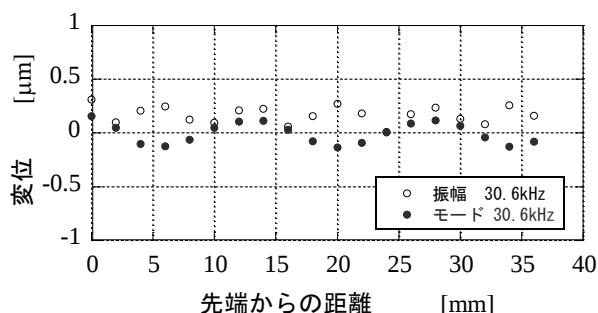


図7 30.6kHz時のプローブの振幅とモード

ドが計測され、解析の有効性が示された。

5. ハイアスペクトタッチプローブの試作

5. 1 本体の試作

試作した回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの構造図を図8に示す。筐体内部に振動体となる部分（プローブ、軸、ホルダ、圧電素子の連結構造）が設置されている。ホルダは片面から3本のプランジャによって押されており、反対面にある3本のV溝と筐体内部にある3本のピンで位置決めされている。

プローブ部分は先端径1mm、軸径0.7mm、測定長さは37mmのハイアスペクト形状とした。圧電素子は内径3.5mm、外形5.5mmのリング形状で加振用には厚さ2mm、振動検出用には厚さ1mmの形状とし、素材は富士セラミックス製のC-6材を用いた。

図9に用いた圧電素子と給電用電極（黄銅 $t=0.2\text{mm}$ ）と軸部分の写真を示す。圧電素子の分割電極はイオンスパッタリングにより金を蒸着した。

組立方法は軸に対してリング状の圧電素子をねじで締結する。なお、締結の際は電極や圧電素子の間に加速度ピックアップ用のグリスを挟んで密着性を高めている。

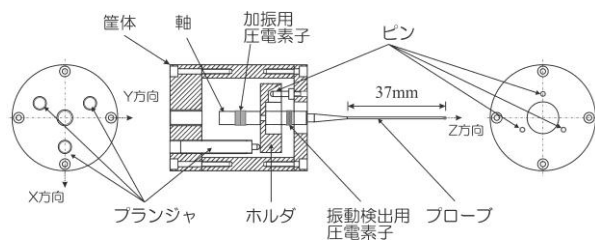


図8 試作機の構造図

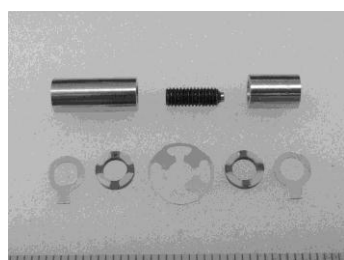


図9 圧電素子と給電用電極と軸

図10にタッチプローブの全体と内部の振動体の写真を示す。

5. 2 センサ回路の試作

センサ回路は、図1に示すように主に圧電素子を加振する4相発振器及び、振動を検出し接触を判定する回路が必要となる。今回は、これらの回路を汎用のマイクロコンピュータや波形発生用の集積回路等を用いて製作した。

本センサではプローブの共振を利用することから、振動検出用圧電素子の出力から共振周波数を検出する機能や、接触判定を加振周波数の周期毎に判定する機能を実装した。

6. 評価実験

6. 1 接触検出位置の一方向繰り返し精度

タッチプローブの接触検出位置に関する、一方向繰り返し精度を評価した。本実験では、タッチプローブを固定しておき、プローブ先端に金属プレートを接触させ、接触判定位置のばらつきを評価する。実験の様子を図11に示す。

金属プレート位置は圧電素子駆動の精密ステージで制御し、試作したタッチプローブから出力される接触判定トリガにて、接触時のステージ位置をヘテロダイン方式レーザ変位計にて計測する。この操作はDSPシステムで構成した実験システムにて自動で行い、手動による測定ばらつきを排除する。

金属プレートをタッチプローブに接触させる方向は、

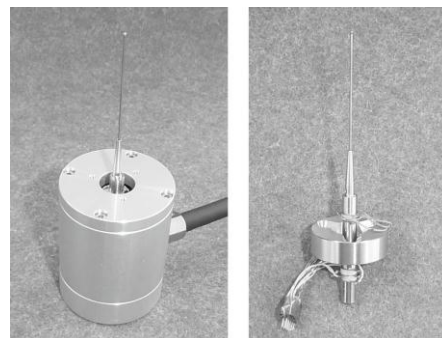


図10 全体と内部の振動体の写真

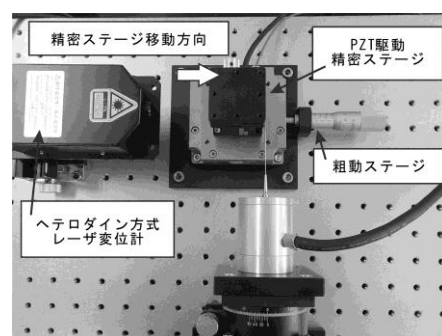


図11 X-Y方向の一方向繰り返し精度の実験の様子

プローブの軸方向（図8中のZ方向）及び、プローブの軸の水平方向（図8中のX-Y方向）とし、水平方向は30°間隔で測定した。金属プレートの接触速度は1mm/sとし、測定回数は各方向から20回行い、 2σ を求めた。なお、加振周波数は圧電素子の出力が最大となる30.6kHzと二番目のピークである37.5kHzで行った。

垂直方向（Z方向）の結果を表1に、水平方向（X-Y方向）の結果を図12に示す。表1より、軸方向の繰り返し精度はサブマイクロメートルオーダーとなり良好な結果が得られた。この方向はプローブの撓みが少ない方向であるためであると考えられる。一方、図12のプローブの水平方向においては、圧電素子の出力がピークとなる30.6kHzにおいては、繰り返し精度(2σ)が最大3.85 μm となり、良好な結果が得られなかったが、37.5kHzの場合は最大0.75 μm と良好な結果が得られた。

6. 2 リングゲージの内径測定

リングゲージ内径（30mm）を試作したハイアスペクトタッチプローブで測定することで、二次元における測定精度について評価した。

測定方法は、画像測定機 QVH3-H606P1L-C（ミットヨ）のヘッドに試作したハイアスペクトタッチプローブを取り付け、最初にリングゲージ内径4点を測定し原点を定める。原点からプローブを極座標系で半径方向に動作させ接触判定位置の座標を画像測定機に表示される座標値から得た。測定方向は30°刻みとし、プローブの接触点付近での移動ステップを0.1 μm として測定した。なお、ここでは37.5kHzのモードを用いて測定した。

図13に、測定データ（プローブ先端半径の補正を行っていない）を示す。同図においてリングゲージ半径は、プローブの半径を補正してないため理論値としては14.5mmである。これに対し本結果は14.5mmより小さい値となった。これはプローブ先端の振幅のためであると考えられる。同図の結果より、プローブ先端径(1mm)を補正して得られる測定結果は29.9984mmとなった。

7. まとめ

本報告では、プローブ軸水平方向の接触検出の感度を高めるために、プローブ先端に円周運動する振動モードを生成させることを提案し、この振動モードの有限要素解析及びその検証実験を行い、提案する振動モードが生成可能であることを示した。

試作した先端径1mm、軸径0.7mm、測定長さ37mmのハイアスペクトタッチプローブにおいて、プローブ軸方向及び水平方向の接触検出位置の一方の繰り返し精度(2σ)はそれぞれ0.11 μm 、0.75 μm が得られた。本プローブを画像測定機のヘッドに取り付け、内径30mmのリングゲージの内径測定を行ったところ、29.9984mmの測定値を得ることができた。

表1 軸方向の一方の繰り返し精度

軸方向の繰り返し精度 2σ	
30.6kHz時	0.22 μm
37.5kHz時	0.11 μm

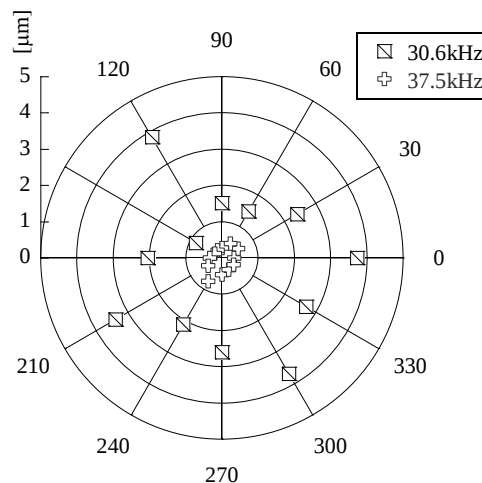


図12 X-Y方向の一方の繰り返し精度

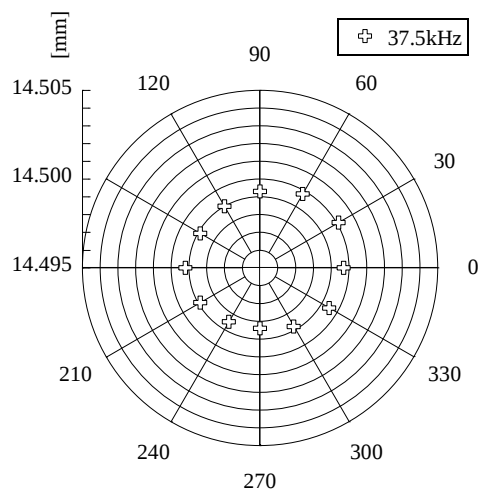


図13 リングゲージ内径測定結果

【謝 辞】

本研究の一部は平成24年度独立行政法人科学技術振興機構 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP【FS】ステージ 探索タイプにて行いました。

【参考文献】

- 1) 例えば, 石津ら, 精密工学会誌 Vol.74, No.3, pp235-238, 2008
- 2) 西嶋ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.5, pp25-28, 2012