

ハイアスペクト形状の精密座標測定を可能とする回転振動型 ハイアスペクトタッチプローブの開発

西嶋 隆、田中 泰斗、今井 智彦

A high-aspect ratio shape ultrasonic vibration touch probe for a coordinate measurement of high-aspect shape objects

Takashi Nishijima, Taito Tanaka and Tomohiko Imai

本研究では、機上計測や三次元測定機において使用するハイアスペクト形状のタッチプローブの開発を行った。現用のタッチプローブは非常に細長い形状のラインナップが少ないため、深い細溝や細穴の測定ニーズに対応することが困難となっている。当所では本課題について、圧電素子による超音波振動で共振するプローブを用いたハイアスペクト形状のタッチプローブを提案している。平成 24 年度はプローブ水平方向の接触感度を向上させるために、プローブ先端が円周運動するモードを利用したタッチプローブを試作した。本年度はハイアスペクト化を進め、先端径 1mm、プローブ軸径 0.7mm、長さ 50mm の非常に細長い形状のタッチプローブを試作し、プローブ軸方向の接触検出位置の繰り返し精度 (2 σ) が 0.2 μ m 以下、水平方向は 1.3 μ m 以下の結果を得た。

1. はじめに

近年の型彫り型放電加工技術の進展に伴い、深い細溝や細穴の加工が可能となってきたことから、金型製造等において細溝や細穴の精密座標測定の要望がある。しかしながら、現用の接触式タッチプローブは先端径が 1mm 程度以下の物については、プローブ長さが数十 mm 程度のハイアスペクト形状の物はほとんど市販されていない。

この課題に対し当所では、圧電素子による超音波振動を用いたハイアスペクトタッチプローブの開発を行っている¹⁾。平成 23 年度には、プローブ軸方向の縦波を利用するタイプのもの、平成 24 年度にはプローブの水平方向の接触感度を高めることを目的としたプローブ先端を円運動させるタイプの回転振動型プローブを提案し、先端径 1mm、プローブ軸径 0.7mm、プローブ長さ 37.5mm のハイアスペクトタッチプローブを試作した。

本年度は、回転振動型のタッチプローブの更なるハイアスペクト化を図り、先端径 1mm、プローブ軸直径 0.7mm、プローブ長さ約 50mm のハイアスペクトタッチプローブを試作した。

本報告では、提案するハイアスペクト形状の回転振動型タッチプローブについて、有限要素法による振動モード解析及びその検証実験によって得られた、プローブの共振周波数とモード形状について示す。試作機の開発に関しては、プローブ本体とセンサ回路の概要を示す。また、試作したプローブについて、プローブ先端が自由な状態と接触状態における振動検出用圧電素子のアドミタンスと位相を測定した結果をもとに、本タッチプローブの接触検出原理について述べる。最後に試作機の接触検出位置の一方方向繰り返し精度の評価とリングゲージ内径を測定した結果について報告する。

2. 振動モード解析

2. 1 解析条件

プローブ先端に円周運動を発生させる条件を調べるため、有限要素法によるモード解析を行った。解析用ソフトウェアは Femtet (ムラタソフトウェア) を使用し、圧電解析の調和解析機能を用いた。加振周波数は 1kHz ~ 100kHz の範囲を 100Hz ステップとし、圧電素子の印加電圧の片振幅を 5V、要素数は 3 万程度の条件で行った。図 1 に、プローブの振動体部分の有限要素モデルを示す。プローブの振動体には、リング形状の加振用圧電素子と振動検出用圧電素子を設置した。解析モデルの物性値は試作機と同様とし、プローブ軸、バックリング、ホルダは SUS304、プローブ軸は超硬とし、圧電素子の給電用電極は黄銅、圧電素子は富士セラミックス製の C-6 材とした。加振用と振動検出用圧電素子の電極は、リング形状の圧電素子を円周方向に 4 分割した構造としている。詳細は前報告²⁾を参照されたい。

2. 2 解析結果

プローブ先端の水平方向変位と加振用圧電素子の加振周波数の関係の解析結果を図 2 に示す。解析した周波数範囲において、プローブ先端の振動変位が増大する周波数が複数あることが示され、例えば、7.6kHz、26.4kHz、33.1kHz において共振する。図 3 にこれらの周波数にお

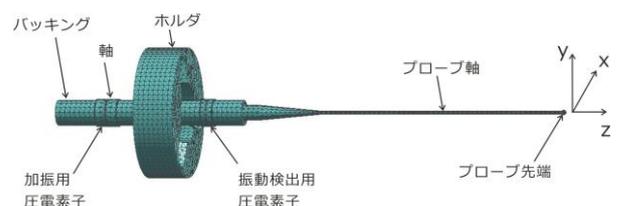


図 1 プローブの振動体の有限要素モデル

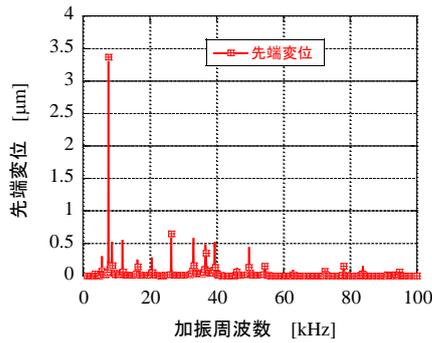


図2 解析結果 (加振周波数と先端の水平方向変位の関係)

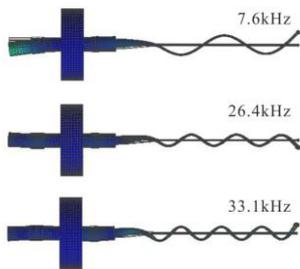


図3 解析結果 (モード形状)

けるモード形状を示す。この解析から 7.6kHz よりさらに低い周波数域に低次のモードがあると考えられる。

さらに低次のモードについては低周波数域を解析することにより把握可能と考えられるが、本プローブでは可聴域を避けるために 20kHz ~ 40kHz 程度の振動モードを利用することとした。

3. 試作

3. 1 プローブ本体

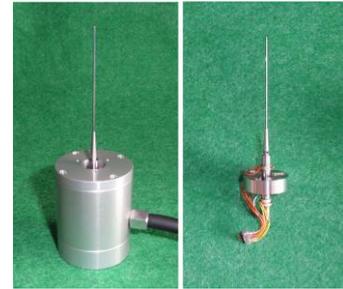
試作したセンサ全体とプローブの振動体部分の写真を図4に示す。プローブの振動体は本体の内部に収められており、振動体のホルダ部分で一意的な位置に固定されている。プローブ形状は先端径 1.0mm、プローブ軸径 0.7mm、プローブ長さ 50mm とした。

3. 2 センサ回路

汎用電子デバイスやマイコンを用いて、センサ回路を試作した。センサ回路は、主にプローブを励振するための加振部、プローブの共振を検出する共振検出部、接触を検出するための接触検出部からなる。また、パソコンと Bluetooth を用いて通信し、センサ回路のパラメータ設定、動作命令、モニタリングをする機能を設けた。センサ回路の概要図を図5に示す。

加振部は DC~100kHz 程度の範囲を 1Hz の周波数分解能で周波数スイープや一定周波数での加振を行う。出力電圧範囲±10V、出力電流範囲±0.3A である。

共振検出部では振動検出用圧電素子の出力を RMS-DC 変換後、マイコンの AD コンバータでサンプリングする。共振周波数の検出は、センサ起動時に加振周波数



(左) センサ全体 (右) 振動体

図4 試作機の写真

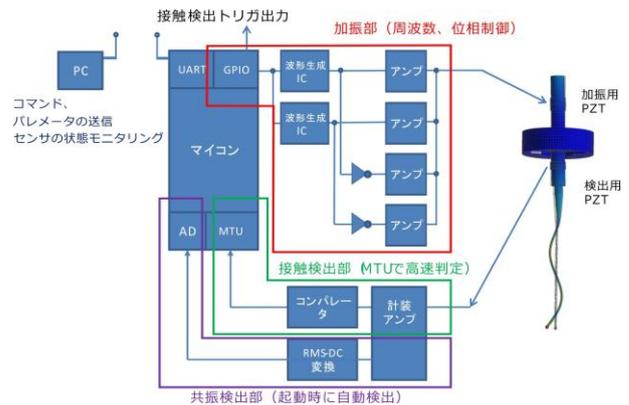


図5 センサ回路の概要図

を掃引し、ピークを得ることにより自動設定する。

接触検出部では、加振電圧信号と検出用圧電素子の出力電圧の位相差を閾値と比較し、その結果に応じて接触のトリガ信号を出力する。

3. 3 モニタ用ソフトウェア

センサ回路の動作命令や加振周波数等の動作パラメータの設定を外部のパソコンから操作するソフトを Microsoft visual c#にて試作した。同ソフトはプローブの共振周波数の検出時における、周波数と振動検出用圧電素子の出力実効値をグラフ表示やデータ保存の機能も設け、各種のプローブの共振特性の比較を容易にした。

4. 検証

4. 1 振動モードの検証

試作したプローブを用いて、解析結果に対する検証実験を行った。検証実験では加振周波数とプローブ先端の振動変位 (軸水平方向) の関係を測定した。プローブ先端の軸水平方向の振動変位は、ヘテロダイン方式レーザ変位計 (ST-3761 岩通計測) を用い、3 方向 (図1の x-y 面における 0°、45°、90° 方向) から測定し、その平均値を用いた。加振周波数は 50Hz ステップで DC~100kHz の範囲で測定した。結果を図6に示す。同図には、振動検出用圧電素子の出力電圧の実効値 (AD 変換値) も示す。

同図より、プローブ先端の水平方向の振幅はおおよそ、8kHz、27kHz、32kHz 近辺にピークがあり、解析で示された、7.6kHz、26.4kHz、33.1kHz のモードに対応すると考えられる。振動検出用圧電素子の出力は、8kHz 近辺より 27kHz、32kHz 近辺において増大した。これは圧電素子の位置とモード形状に依存すると考えられる。

次に、8kHz、27kHz、32kHz 近辺でのモード形状をヘテロダイン方式レーザ変位計にて測定した。測定方法は、プローブ先端から根本に向かって2mm ピッチでプロ

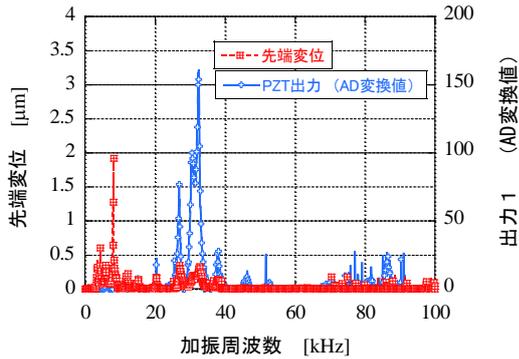
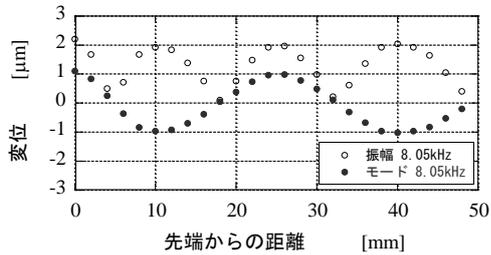
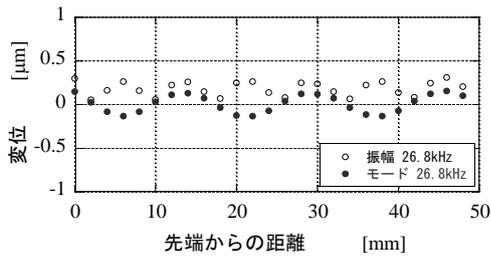


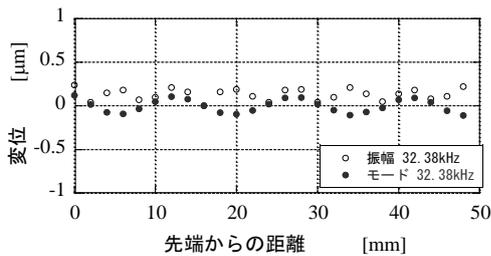
図6 加振周波数と先端変位及び振動検出用圧電素子の出力の関係



(a) 8.05kHz



(b) 26.80kHz



(c) 32.38kHz

図7 振幅の測定結果とモード形状

ブの軸水平方向の振幅を計測しモード形状を得た。加振周波数は、振幅が大きく得られる 8.05kHz、26.80kHz、32.38kHz とした。

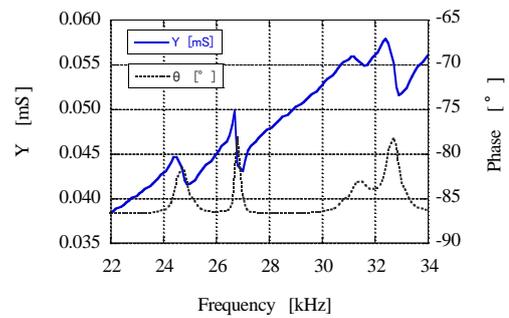
結果を図7に示す。同図には、計測した振幅及び、振幅値から振動の節と腹の位置を考慮して得たモードを併せて示す。モード形状の測定結果においても、解析結果と形状がほぼ一致する結果が得られ、解析結果の有効性が示された。

4. 2 圧電素子のアドミッタンスと位相の測定

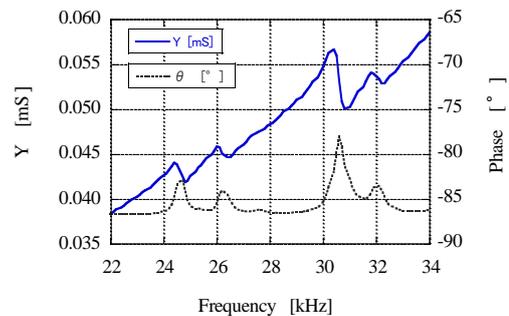
本タッチプローブの接触検出原理は、プローブ先端が自由な状態から接触状態となる際に振動体の共振周波数が変化することを利用している。本センサ回路では、先端が自由な状態における共振周波数で励振し、加振電圧と振動検出用圧電素子の出力電圧の位相差をモニタリングし、位相差の変動を検出することで接触判定を行う。

ここでは位相の変動を把握するために、試作したプローブを用いて振動検出用圧電素子の4分割した1つの電極とグランド(筐体)間のアドミッタンスと位相をインピーダンスアナライザ(IM3570 日置電機)を用いて測定した。

結果を図8に示す。接触前(先端自由)の図8(a)から、振動体の共振周波数として主に、27kHz、32.5kHz 近辺に確認できる。この時の共振時の位相はどちらの周波数においても、約-80°程度である。接触状態では図8(b)に示すように27kHz、32.5kHzでは約-85°へと変化することが確認できる。実際には本センサは、リング形状の振動検出用圧電素子の円周方向に4分割した電極を設け、対向する電極の差動出力を得ているため、この



(a)接触前



(b)接触後

図8 振動検出用圧電素子の位相とアドミッタンス



図9 接触位置検出の一方方向繰り返し精度の測定装置

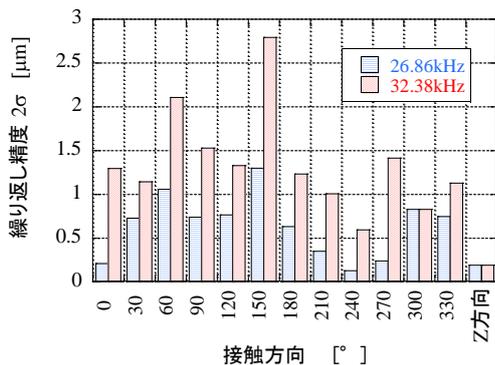


図10 接触位置検出の一方方向繰り返し精度

検証は必ずしもセンサの構成とは同一ではないが、およその接触時の位相変化を確認することができる。

本センサ回路では、このような位相変化を振動周期毎に閾値と比較して接触判定を行う。

5. 評価試験

5.1 接触検出位置の一方方向繰り返し精度

センサに物体が接触する際の検出位置の繰り返し精度を評価するため、図9に示す実験装置を構成した。本実験では、タッチプローブは固定されており、その先端にPZT駆動精密ステージ上に設置した金属プレートが、1mm/sの速度で接触する。この際、タッチプローブの接触検出トリガでヘテロダインレーザ変位計にて金属プレートの位置を取得する。この測定を20回繰り返し評価した。また、タッチプローブをプローブ軸中心に回転させながら30°毎に12方向からの接触を測定することで、プローブ軸水平方向の一方方向繰り返し精度を評価した。併せて、プローブ軸方向(z方向)の接触についても評価した。

本実験では試作したセンサ回路が実験実施時に検出した26.86kHzと32.38kHzのモードで行った。

結果を図10に示す。結果より軸方向の繰り返し精度は0.19μmが得られ、水平方向の接触に関しては、角度によるばらつきが認められたが26.86kHzでは、全方位において1.3μm(2σ)より低い値となり比較的良好な結果が得られた。

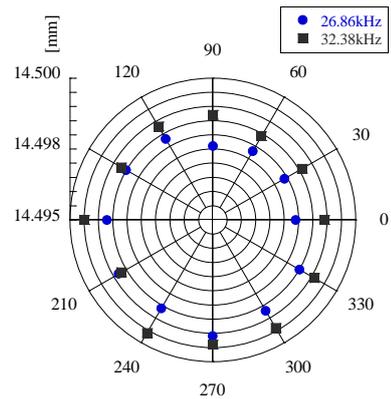


図11 リングゲージ内径測定の結果

5.2 リングゲージ内径測定

試作したタッチプローブを用いてリングゲージの内径(30mm)を測定した。測定方法はタッチプローブの先端を下向きにして画像測定機のヘッドに取り付け、プローブをリングゲージ内径の中心から半径方向に移動させ、接触した位置の座標を記録した。座標値は画像測定機の読みを記録し、接触時は0.1μmステップで接近させた。

結果を図11に示す。同図には26.86kHzと32.38kHzのモードにおける結果を示す。本測定値のプローブ先端の半径分のオフセット(1mm)を補正し、各方向の内径の平均からリングゲージ内径を求めると、26.86kHzと32.38kHzの場合それぞれ、29.9967mm、29.9979mmの結果が得られた。本結果よりμmオーダの測定は困難であるが、10μmオーダの測定には利用可能と考えられる。

6. まとめ

本研究では、深い細溝や細穴等の測定を可能とするハイアスペクト形状のタッチプローブの実現を目指し、プローブ先端が円周運動をする振動モードで動作する超音波振動プローブを試作した。また、解析及び試作機の評価実験により振動モードについて把握した。

先端径1mm、プローブ長さ50mm、プローブ軸径0.7mmのプローブ本体と専用のセンサ回路を試作し、評価試験を行った結果、26.86kHzの振動モードを用いた場合、接触検出位置の一方方向繰り返し精度は1.3μm(プローブ軸水平方向)、0.19μm(プローブ軸方向)が得られ、内径30mmのマスタリングゲージ測定では、29.9967mmの測定結果が得られた。

【謝辞】

本研究は平成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) 西嶋, 超音波テクノ, Vol.25, No.5, pp78-83, 2013
- 2) 西嶋ら, 岐阜県工業研究所研究報告, No.1, pp1-4, 2013