

超音波振動を用いた三次元接触センサに関する研究（第1報）

西嶋 隆、田中 泰斗

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

Takashi Nishijima and Taito Tanaka

本研究では、機上計測等において使用することを旨とした高アスペクト比な形状の3次元接触センサ（タッチプローブ）の開発を行う。機上計測やCMMで利用される接触センサは一般的にアスペクト比が低いいため、深い細溝や細穴の測定ニーズがあるにも関わらず、それを測定することが困難となっている。本研究では、圧電素子による超音波振動で共振したプローブを用いた高アスペクト比の形状の3次元接触センサを開発する。本報では、高アスペクト比の3次元接触センサについて、有限要素法による振動解析と試作したセンサの振動特性実験からセンサの振動モードを明らかにし、各振動モードを用いた場合の繰り返し精度を測定した結果について報告する。

1. はじめに

岐阜県の県内総生産のうち製造業の占める割合は27%(H20)であり、製造業は県内産業の主力であるといえる。しかしながら、近年の円高やアジア地域の低労働コストを背景に、製造業の空洞化などが懸念されており、県内製造業は更なる生産効率の向上に迫られている。

生産効率の向上に際して、生産工程の集約化が進み、今後もその流れが進むであろうと考えられる。そのひとつに機上計測が挙げられる。機上計測を行うことで、加工と計測の工程が集約される。高精度な寸法・幾何公差が要求される場合は、別の精密測定工程は必要であるといえるが、少なくとも機上計測により、次工程に流れる不良品は減少し、更にワークを計測工程後にもう一度加工機へ戻す段取りが減少する分、工程の集約のみならず加工精度の向上にも効果が期待できる。

県内製造業においても、機上計測が進む現場は見受けられ、機上計測において広く用いられる接触センサに対する下記の要望を得ている。

- ・操作ミスによるセンサの折損事故時に発生するセンサ本体の故障軽減が必要
- ・深い細溝の寸法を測れる高アスペクト比のセンサが必要

筆者らは、上記の1項目に対して、圧電素子による振動を利用したプローブ関連の先行研究¹⁾²⁾を参考に、センサ先端に過負荷がかかった場合においても、センサ内部に大きなダメージを受けにくいシンプルな構造の振動型3次元接触センサの開発を行った³⁾。

本報では2項目の課題に注目する。現在市販されている接触センサはアスペクト比が高い接触子を有するセンサが非常に少ないのが現状であり、これは接触子が高アスペクト比となると、著しく剛性が低下して高い繰り返し精度を得ることが困難となるからであると考えられる。なお、高アスペクト比の接触子も市販されているが、軸方向以外の測定精度は保証されないなどの使用上の制約

が多いのが現状となっている。

本報では、従来研究で開発した超音波振動を利用した接触センサの原理を用い、センサの軸方向の複数の振動モードに注目して、高アスペクト比の接触子を有する接触センサ開発の可能性について検討した。

2. センサの構造

2.1 全体構造

図1にセンサ全体の写真を示す。センサ筐体部分は、従来研究で開発したものと同様であり、外径40mm、高さ52mmである。図2に全体構造の概要図を示す。筐体内部には、プローブ・軸ホルダ・圧電素子・接触子を連結した振動体があり、振動体はホルダ部分で3本のプランジヤのパネで押され、ホルダ上面の3つのV溝が3本のピンで接触して着座する。

本センサは、加振用圧電素子により振動体を軸方向に加振して先端に振動変位を励起し、接触の検出は振動検出用の圧電素子の出力(位相及び振幅)の変化から得る。

2.2 接触子

図3に、本研究で用いた高アスペクト比の接触子（プローブ先端）の寸法を示す。比較のために従来研究で用いた接触子の寸法を併記する。用いたプローブはミットヨ MS2-1R37 の仕様であり、先端球のルビーの直径は1mm、先端軸の直径は0.7mm、長さは37.5mmである。



図1 センサの写真

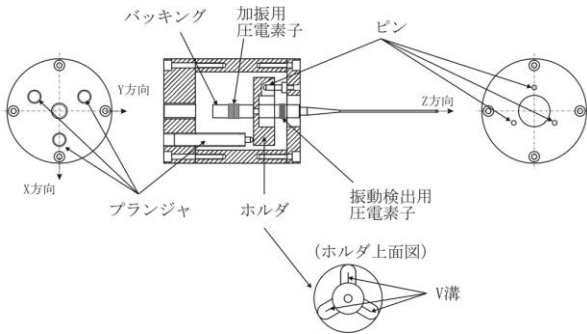


図2 構造の概要図

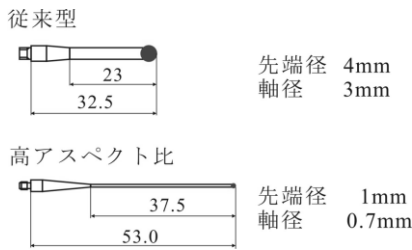


図3 プローブ先端の比較

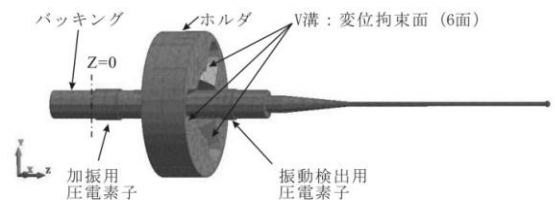


図4 解析モデル

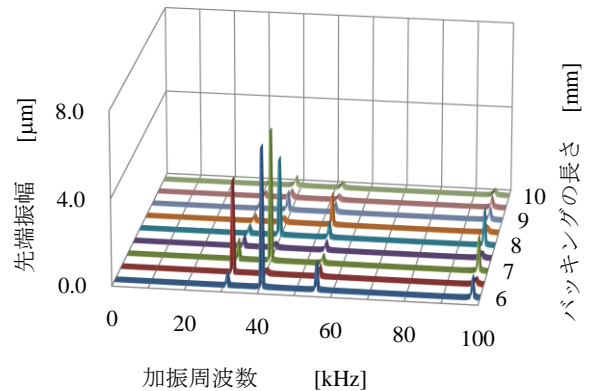


図5 先端振幅-周波数の関係

2. 3 圧電素子

加振用と振動検出用に用いた圧電素子は、富士セラミックス製 C6 材であり、外径 5.5mm、内径 3.5mm、厚さはそれぞれ 2mm、1mm であり、これらを 2 枚重ね合わせて使用した。圧素子間や圧電素子とプローブ軸間には、給電を兼ねた厚さ 0.2mm の黄銅製ワッシャを挟み、密着性を高めるために、加速度ピックアップ取り付け用のグリスを塗布した上でネジ締結した。なお、振動方向は軸方向である。

3. 振動解析

3. 1 解析事項と解析条件

センサの振動体となるプローブ軸・ホルダ・圧電素子・接触子の軸方向の共振周波数や振動モードを把握するために、有限要素法による解析を行った。解析ソフトウェアは Femtet (ムラタソフトウェア(株)製) を使用した。

解析では、接触子先端の軸方向最大変位と加振周波数との関係を調べた。この解析では、加振周波数は 1kHz から 100kHz まで 0.5 kHz ステップとし、またプローブ軸の終端部分のバックシング (図2参照) について、バックシング長さを 6mm から 10mm まで 0.5mm ステップで変化した条件で解析した。バックシングの長さはセンサ構造上変更が容易であり、接触子の振動変位や共振周波数を変化させることができると考えられる。また振動モードを把握するため、振動体の軸中心要素の軸方向変位と位相 (加振電圧との位相差) の関係を調べた。

その他の解析条件として、材質は実物に従い、ホルダとプローブ軸は SUS304、接触子のφ0.7 の部分は超硬、圧電素子は富士セラミックスの C6 材の定数を用いた。

有限要素法の解析モデルを図4に示す。座標系の Z 方

向はプローブ軸方向であり、プローブ軸中心を X、Y 原点とし、加振用圧電素子側のバックシングの端面を Z の原点とした。振動体の変位拘束面は、ホルダ上面の V 溝面 (6面) とした。

3. 2 解析結果

解析結果を図5、図6に示す。図5の横軸は加振周波数、縦軸は接触子先端の軸方向最大変位、奥行きはバックシングの長さを示す。接触子先端の軸方向の振幅が大きく得られている 31.0kHz、39.5kHz、53.5kHz において共振することが示された。なお、今回のバックシング長さの解析条件では共振周波数が若干シフトするが、影響は少ないことが示された。

図6にバックシングの長さ 8mm とした場合の、31.0kHz、39.5kHz、53.5kHz の各共振時のプローブ軸中心の Z 方向の変位及び位相の分布を示す。同図下には、プローブの Z 座標位置を示す模式図を並べて示す。

図6上段の変位を示すグラフより、接触子先端の変位が最も大きく、各振動モードにおける縦波の節となる位置が確認できる。図6下段の位相を示すグラフより、31.0kHz は軸全体が 0° 付近の一定値で振動していることが確認できる。すなわち 31.0kHz では軸全体がホルダの窪み部分をバネ要素として、プローブ軸全体が上下に振動するモードと考えられる。また、39.5kHz では接触子先端とバックシング端面が逆位相となる 1 次モードとなり、53.5kHz では、ホルダ付近とプローブ先端軸付近の 2 か所が節となり、接触子先端とバックシング端面が同位相となる 2 次モードと考えられる。なお、形状が複雑なために 1 次、2 次モードの周波数も整数比とはならない。

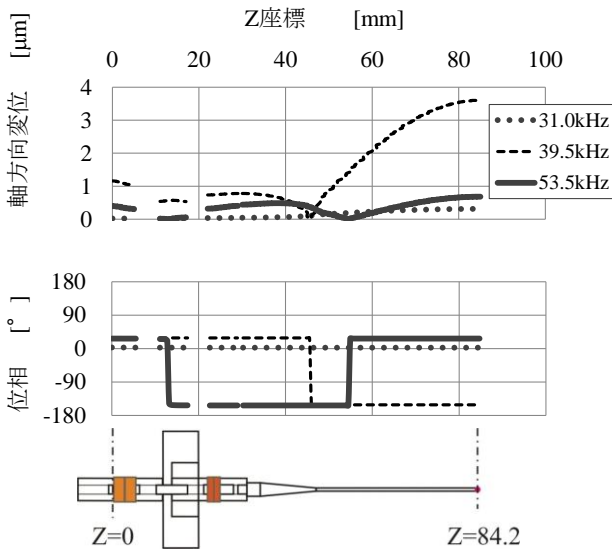


図6 各振動モードにおけるプローブ軸中心のZ方向変位と位相

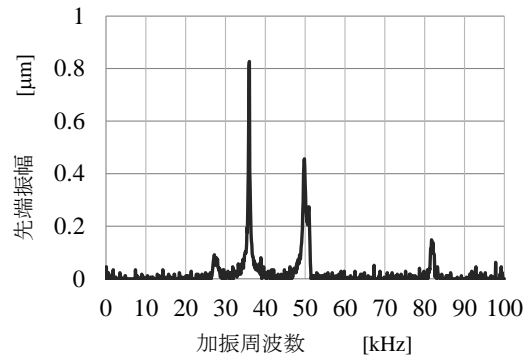


図7 接触子先端変位一周波数の関係

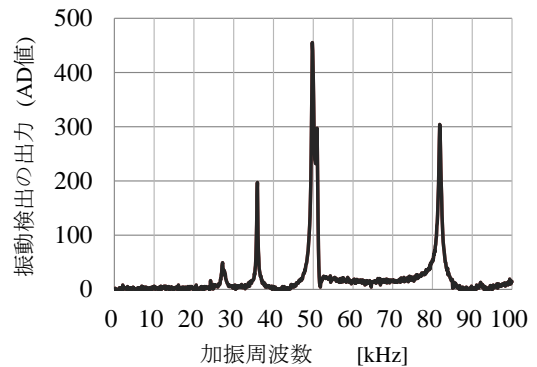


図8 振動検出用圧電素子出力一周波数の関係

4. センサの振動特性の評価実験

4. 1 接触子先端の振幅と位相の測定

試作したセンサを用いて、加振周波数と接触子先端の軸方向変位の関係を実験により確認した。試作機はバックキング長さを8mmとした。

振動変位は、ヘテロダイン方式レーザ変位計ST3761(岩通計測)にて計測した。結果を図7に示す。同図の横軸は加振周波数、縦軸は先端の振幅を示す。

結果より、27kHz、35kHz、50kHz 付近に先端振幅のピークが確認できる。また、それぞれの周波数における振動モードを把握するために、加振電圧の位相を基準として、接触子先端及びバックキング端面の振動変位の位相関係を調べた結果、35kHz は先端とバックキング端面の振動が逆位相、50kHz は同位相で振動していることを確認した。

この結果と FEM 解析の結果より、35kHz では接触子先端とバックキング端面が逆位相となる1次モード、50kHz では接触子先端とバックキング端面が同位相となる2次モードであると考えられる。

各モードの周波数は、解析結果と比べて低くなる結果となったが、これは圧電素子やプローブ軸等の密着が理想的な状態より低く、剛性が低下する影響であると考えられる。

4. 2 振動検出用圧電素子の出力電圧の測定

図8に試作したセンサの振動検出用圧電素子の出力と加振周波数の関係の関係を示す。同図縦軸は圧電素子の出力電圧をRMS-DC変換し、AD変換した値を示す。

各振動モードで出力が得られていることが示されたが、接触子先端変位が最大の35kHz時(1次モード)よりも50kHz時(2次モード)の時の方が、振動検出用圧電素

子の出力が大きくなることわかる。これは振動検出用圧電素子の取り付け位置に依存すると考えられる。

次節の実験では、1次と2次のそれぞれのモードを用いて繰り返し精度を測定する。

5. 繰り返し精度の測定

5. 1 測定方法

接触判定位置の繰り返し精度を測定した。測定ではセンサ軸方向(Z方向)とセンサ軸に対して水平方向(X-Y方向)について調べた。水平方向については、30°間隔で繰り返し精度を測定した。なお、36kHz(1次)と50kHz(2次)のモードについて同じ測定を行った。

測定では、センサ先端に対して精密ステージNS2833-C(ナノコントロール)に載せた金属プレートを1mm/sの速度で接触させる。この時発生するセンサ回路のトリガ信号により、金属プレートの位置をヘテロダイン式レーザ変位計ST3761(岩通計測)で取得した。これにより、接触判定時の金属プレート位置を正確に測定する。なお、測定における精密ステージの制御やセンサ回路のトリガ信号に連動したレーザ変位計のデータ取得は、制御周期は30μ秒と十分高速なDSPシステムで制御し、時間遅れによる誤差を排除した。

5. 2 測定結果

加振周波数36kHz及び50kHz時における、接触検出の

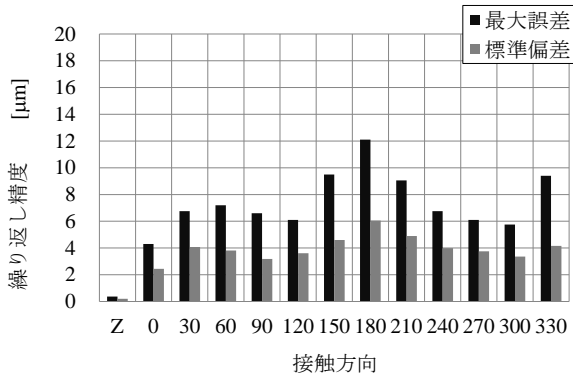


図9 36kHz 時の Z 方向及び X-Y 方向 (30° 刻み) の接触検出の繰り返し精度

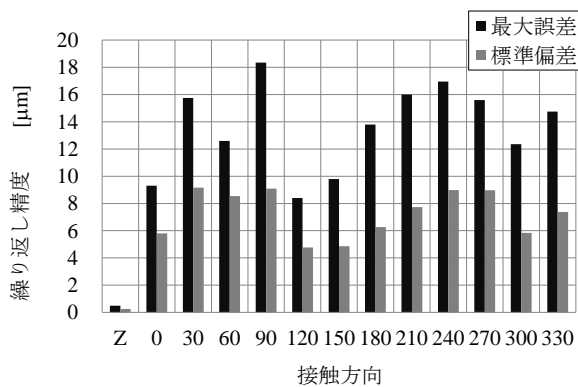


図10 50kHz 時の Z 方向及び X-Y 方向 (30° 刻み) の接触検出の繰り返し精度

繰り返し誤差の測定結果をそれぞれ図9、図10に示す。両図の横軸はセンサに対する接触方向を示し、Z方向とX-Y方向(30°毎)の結果を示す。縦軸は接触判定を20回行った測定結果の最大誤差と標準偏差を示す。なお、最大誤差は検出値の最大値と最小値の差の1/2として表記している。

結果より、Z方向の繰り返し精度は36kHzと50kHzの場合において、それぞれ最大誤差は0.38μm、0.48μm、標準偏差は0.20μm、0.24μmが得られた。

X-Y方向については、最大誤差、標準偏差ともにZ方向と比較して一桁以上大きいオーダとなり、36kHzと50kHzの場合において、それぞれ最大誤差は7.47μm、13.64μm、標準偏差は3.99μm、7.28μmが得られた。

X-Y方向の方向依存性については、接触方向に依存したばらつきが認められた。

振動モード別では、36kHzのモードの方が、50kHzのモードに比べて、最大誤差、標準偏差ともに小さくなる結果が得られた。

5.3 考察

高アスペクト比のプローブについて、縦波の共振モードを利用して接触センサとして機能することが確認できたが、X-Y方向の繰り返し精度はZ方向に対して著しく低下した。これはプローブ先端の撓み ω は、プローブ軸長さをL、直径をDとすれば、 $\omega \propto L^3 \cdot D^{-4}$ の関係があり、本実験の場合、従来のプローブに比べてLが1.63倍、Dが0.23倍となることから、従来研究と比べて約1500倍も撓みが増加することによると考えられる。

Z方向については、実験結果よりマイクロメートルオーダでの測定は可能と考えられる。しかしながら、X-Y方向の繰り返し誤差は十から十数μmであることから、本方式ではX-Y方向のマイクロメートルオーダの測定は困難といえる。

振動モード別にみると、1次モードの場合の方が、繰り返し精度が良い結果が得られた。これは先端振幅が1次モードの方が大きいことや、接触検出を位相変化(加振電圧信号と振動検出信号の二つの正弦波の立ち上がりエッジの時間差)で検出しているため、周波数の低い1次モードの方が、位相変化に対する上記の二つの信号の立ち上がりエッジの時間差が高次のモードに比べて大きいためであると考えられる。

6. まとめと今後の展望

高アスペクト比の形状をした3次元接触センサについて、有限要素法による振動解析と振動特性の評価実験により、センサの振動モードを明らかにした。

センサの二つの振動モードについて、繰り返し精度を測定したところ、Z方向の繰り返し精度は36kHz時と50kHz時においてそれぞれ、最大誤差0.38μm、0.48μm、標準偏差0.20μm、0.24μmが得られた。X-Y方向の繰り返し精度は36kHz時と50kHz時においてそれぞれ、最大誤差7.47μm、13.64μm、標準偏差3.99μm、7.28μmが得られた。繰り返し精度は1次モードの方が良い結果が得られた。

本報告では、プローブ軸方向(縦波)の振動モードを利用して、軸水平方向(X-Y方向)の繰り返し誤差の優れた高アスペクト比のセンサの実現には至らなかったが、今後はこれらの知見を踏まえて、他の振動モードを励起する方式について検討する予定である。

【参考文献】

- 1)山本ら, 精密工学会誌 Vol.67, No.2, pp251-255, 2001
- 2)荒井ら, 2009年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, CD-ROM(G13), 2009
- 3)西嶋隆, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.4, pp17-21, 2011