

精密切削加工の高効率化に関する研究 (第2報)

振動型 3次元接触センサの開発

西嶋 隆

Study on a technology to enlarge the efficiency of precision machining processes (2nd report)

A 3D touch sensor using ultrasonic vibration

Takashi Nishijima

本研究では NC 工作機械において、工作機械の工具位置やワーク寸法の机上計測を行うための三次元接触センサ（タッチプローブ）を開発する。本センサ開発では圧電素子による超音波で加振したプローブを用いることで、構造が簡素であり、繰り返し検出位置精度が高く低接触圧で検出可能なセンサを開発することを目指している。本報告では、本年度試作した振動型接触センサについて、接触検出原理、試作したセンサ本体とセンサ回路からなるセンサシステムの概要、及びセンサの繰り返し精度及び、接触検出時の測定力を把握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 24.3%は製造業によるものであり(H20)、そのうち輸送用機械、一般機械、電気機械によるものが 40%以上を占めている。これら県内の機械金属関連の製造業は関連企業からの受注生産を請け負う中小企業が主力となっている。

近年、受注生産を請け負う中小企業では高精度な機械加工や小ロット生産が求められ、加工寸法の不良による歩留りの低下は大きな問題となっている。そのため、加工寸法の不良を防ぐための工具位置の補正技術や机上計測技術（ワークの寸法を工作機械上で計測する技術）の必要性が増してきている。このような加工工程における正確な工具位置の原点出し及びワーク寸法の机上計測には、前者にはツールセッター等が用いられ、後者にはタッチプローブ等のセンサが用いられる。

本研究では、ツールセッターやタッチプローブの機能を持つ、簡単な構造で軽便な接触センサの開発を行った。平成 20 年度は、ツールセッターのような形状の接触センサを試作したが¹⁾、本年度は県内企業から要望を取り入れ、タッチプローブの形状をしたセンサの試作を行った。

本センサは振動体を用いた接触センサであり、接触を判定する際の接触力を小さくすることで、タッチプローブに特有のおむすび型の誤差を低減し、繰り返し精度を高めることを目指した。

特徴としては、電気導通式ではないため、先端に絶縁体（ルビー球等）を用いることができ、切粉の磁化によるプローブへの付着防止や、絶縁体のワークへの対応が可能であることが考えられる。なお、本センサは近年のスキニングプローブやレーザ方式²⁾のように連続的かつ高速にワークの輪郭を取得することは不可能であるが、本開発では実用において一般的であり、軽便であることからタッチプローブ式とした。

本報告では、第2節に振動型接触センサの構造につい

て説明し、センサの接触検出原理について、FEM を用いたプローブの振動解析に基づいて述べる。第3節に試作したセンサ本体と接触判定をおこなうセンサ回路の構成について述べる。第4節に試作したセンサの振動特性を把握した実験結果について述べる。第5節に本センサの接触判定に関する繰り返し精度及び測定力に関する実験について述べ、第6節にまとめを述べる。

2. 振動型接触センサ

2. 1 センサの構造

図1にセンサ本体とセンサ回路、図2にセンサ本体の構造を示す。図2に示すように、筒型のセンサ筐体内に、ホルダに連結したプローブ軸がある。ホルダは、下側から3本のプランジヤで押し上げられており、ホルダ上面の3本の V 溝に筐体内部の上面に設けた3本のピンがはまり込む構造で位置決めしている。

プローブ軸には加振用と振動検出用の圧電素子を設けた。加振用及び振動検出用の圧電素子には、それぞれ RC-140 及び RC-140F（株）MKT タイセー）を用い、2枚重ねて軸に対してネジ締結した。

加振用圧電素子には2枚の圧電素子の接触面と軸側に交番電位を与えることで、プローブ軸方向（Z 軸方向）の縦振動を励起する。振動検出用圧電素子は Z 軸方向



図1 センサの写真

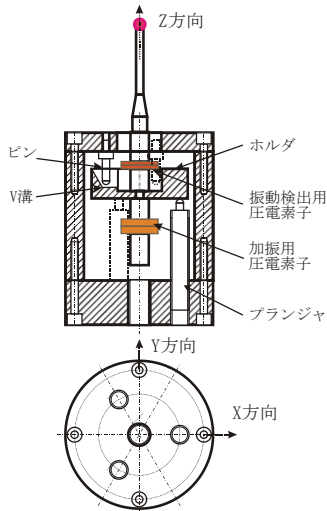


図2 センサの構造

の応力を検出する。プローブ先端は、φ4mm のルビー球を用いた。

2. 2センサの原理

加振用の圧電素子に適切な周波数の正弦波電圧を印可し、プローブ軸の軸方向の共振を得る。このような状態においては、プローブ先端の振幅や受信用圧電素子の出力電圧が大きく得られることになる。共振した状態において、プローブ先端に物が接触する前と後では、検出用圧電素子の電圧振幅が変化するとともに、検出用圧電素子の電圧と加振用圧電素子の電圧の位相差も変化する。本センサはこの振幅及び位相差の変化を検出することで接触を判定する。

図3は試作したセンサのモデルを用いた FEM による調和解析の結果ある。同図は 33kHz と 43kHz における振動モードであり、圧電素子の印可電圧位相(0 度)に対して 0 度と 180 度の Z 軸方向変位のコンター図(赤色が画面上方向、青が画面下方向の変位)を示す。

解析によれば 33kHz で加振した時は、ホルダの凹部分の撓みによりプローブ軸全体が上下運動する振動モードとなり、43kHz の時は、軸の根本から先端まで半波長(縦波)で伸縮する振動モードになる。このように印可する周波数に依存した複数の振動モードが存在する。なお、プローブ軸の形状が変わった場合では、また異なった周波数となると考えられる。したがって本センサでは、構造の設計段階ではおおよその共振周波数を見積もり、実際には 10kHz から 60kHz 程度の周波数の正弦波を掃引し、受信用圧電素子から出力される電圧振幅と振幅の変化率が大きい周波数を検出し、印可電圧の周波数を決定する方式をとる。

3. センサ回路

3. 1 構成

センサ回路は大別して、プローブを加振するための加振回路と接触の判定を行う振動検出回路で構成している。

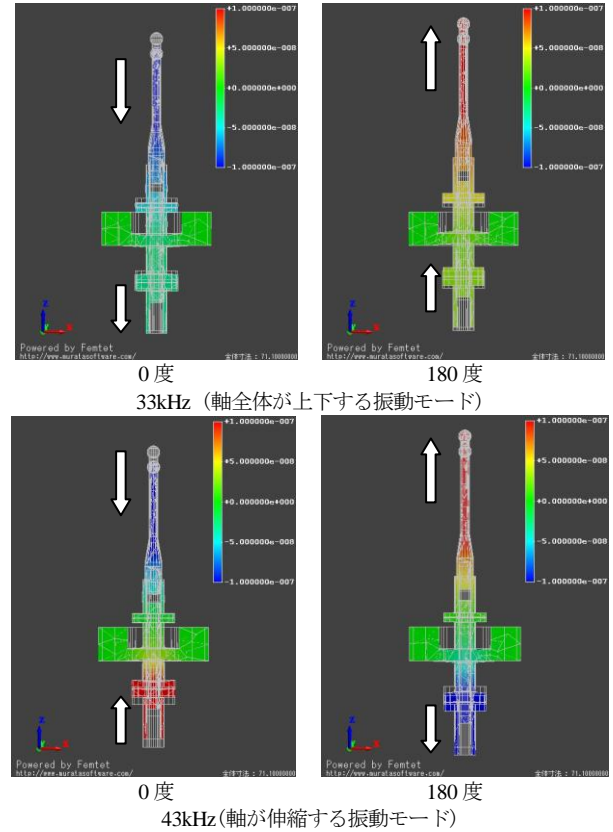


図3 振動モードの例

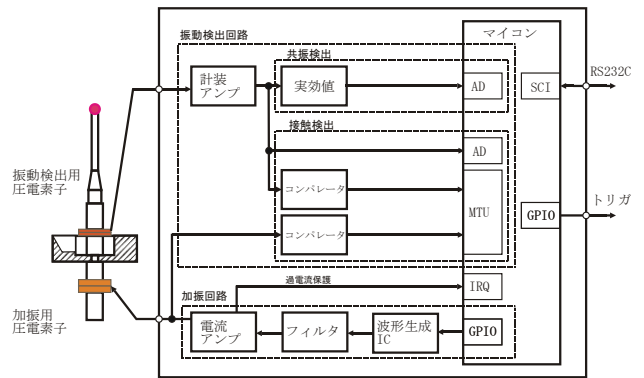


図4 回路構成

表1 主なコマンド

コマンド記号	機能	パラメータ
F+パラメータ	加振周波数指定	加振周波数[Hz]
R+パラメータ	周波数掃引開始	掃引ステップ[Hz]
B+パラメータ	掃引の開始周波数設定	掃引下限「Hz」
E+パラメータ	掃引の終了周波数設定	掃引上限[Hz]
T	接触検出開始	なし
H	加振停止	なし

図4にセンサ回路の構成を示す。センサ回路全体の制御はマイコン (SH7125 ルネサスエレクトロニクス) を用いた。センサ回路は基本的には単体で動作するが、外部機器から各種の設定パラメータや動作コマンドを受けつけることができる。表1に主なコマンドを挙げる。

3. 2 加振回路と振動検出回路

加振回路は、マイコンで制御した波形生成 IC (AD9834 Analog Devices) にて正弦波を生成し、フィルタ、電流アンプを経由して圧電素子に印可する。印可する電圧振幅は 20V_{pp} であり、周波数範囲は DC~約 120kHz である。

振動検出回路は、振動検出用圧電素子の出力を計装アンプで増幅した後3分岐し、原信号と実効値及び、印可電圧との位相差検出に用いる。実効値は共振検出に用い、波形の原信号と位相差はセンサの接触判定に用いる。

本回路におけるプローブ軸の共振検出は、加振回路で周波数掃引を行いながら、振動検出用圧電素子の振幅及び振幅の変化率を検出することで行う。

接触の判定方法は、振動検出用圧電素子の検出電圧及び、検出電圧と加振電圧との位相差の変化量について、それぞれの閾値と逐次比較することで行う。

接触判定の開始時には、振動検出用圧電素子の電圧について、その振幅及び、加振電圧との位相差を複数サンプリングし、それぞれの平均値とノイズレベルをメモリに記録し、接触検出の閾値をその都度計算する。これによりドリフトやノイズの影響を軽減した。

4. センサの振動特性

4. 1 先端振幅と検出用圧電素子出力の測定

試作したセンサの振動特性を把握するために、プローブ先端の振幅と加振周波数の関係を実験によって確認した。実験ではプローブ軸方向の振幅をヘテロダイン方式レーザ変位計 ST3761(岩通計測 (株))にて計測した。併せて、振動検出用圧電素子の出力を計測した。結果を図5に示す。同図は加振周波数に対し、左縦軸はプローブ先端振幅を示し、右縦軸は振動検出用圧電素子の出力実効値の AD 変換値を示す。

この結果から、圧電素子の出力のピークとなる周波数においては、プローブ先端の振幅も大きくなることを確認できる。しかしながら、44kHz 付近のように先端振幅のピークがみられる周波数において圧電素子の出力のピークが明確に現れない箇所も確認できる。また、118kHz 付近では圧電素子の出力が最も大きく出ているが、プローブ先端振幅はそれほど大きくないことが確認できる。

このように、振動検出用圧電素子の出力情報からすべての共振周波数を検出することは困難であるが、複数の振動モードのうち、基本周波数 (低い周波数) のモードにおいてプローブの振幅が大きく得られることから、本センサでは圧電素子の出力のピークや変化が大きい低い

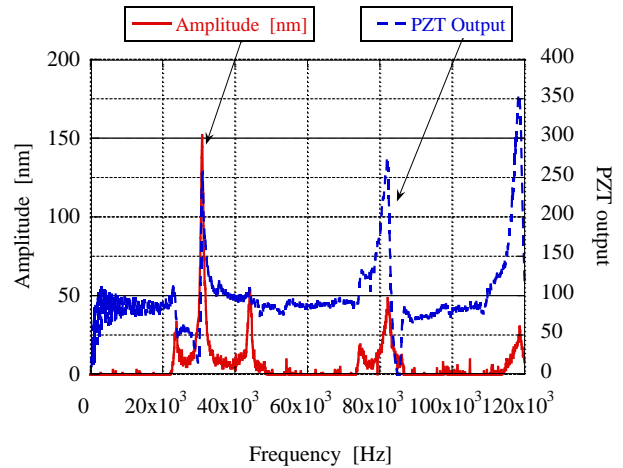


図5 先端振幅—周波数の関係

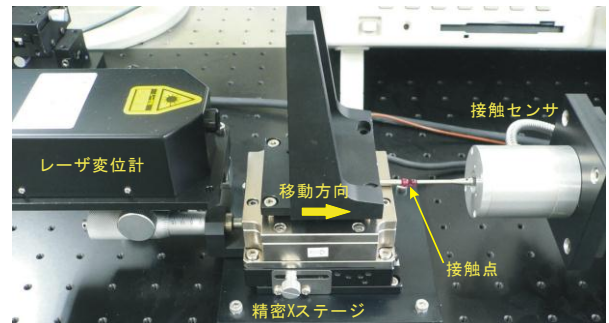


図6 実験装置

表2 振動モード

周波数[kHz]	23.7	30.7	43.7	82.4
先端の位相[°]	144	-69	97	72
反対側の位相[°]	20	82	90	-155
先端と反対側の位相差[°]	125	209	7	145
変位方向	同一	同一	逆	同一
振動モード	一体で振動	一体で振動	半波長	1 波長

周波数を検出し、その周波数で加振する方式をとる。本結果では、約 31kHz で最大の振幅と変化率が得られ Q 値は約 32 となった。

4. 2 振動モード

各振動モードを把握する実験を行った。実験では、振幅の大きい各周波数において、プローブ先端の軸方向変位を印可電圧と同期させて測定し、次にプローブの反対側の振幅変位も同様に印可電圧に同期させて測定した。すなわち、印可電圧に対する先端及び反対側の変位の位相を調べることで、2. 2 節で示したような、軸全体が上下振動するモードや縦振動で伸縮するモードなどの振動モードを把握した。

表2に各周波数でのプローブ先端と反対側の印可電圧

に対する位相差と変位方向について示す。表中の変位方向とは、先端と根本の変位の位相差が 0° を中心に $\pm 90^\circ$ の範囲を「逆」、 180° を中心に $\pm 90^\circ$ の範囲を「同一」と表記している。

2. 2節で示したように、 30.7kHz では、プローブ軸が一体となって上下振動し、 43.7kHz では、軸の全長が縦波の半波長の振動モードとなっていると考えられる。また、 82.4kHz では、先端と根本が同一方向に振動していることと、 43.7kHz の半波長の約 2 倍の周波数であることから、プローブ軸の全長が 1 波長の縦波のモードであると考えられる。

5. 実験及び考察

5. 1 繰り返し精度の測定

接触判定位置の繰り返し精度の評価実験を行った。実験に用いた装置の写真を図 6 に示す。同図はプローブの Z 軸（軸方向）方向の測定を行っている様子である。写真に示すように、プローブ先端のルビー球に対して、精密ステージ（NS2833-C（株）ナノコントロール）に取り付けたプローブ先端のルビー球を接触させる。精密ステージの移動量はヘテロダイン式レーザ変位計（ST3761 岩通計測）で計測し、接触検出センサのトリガ信号（接触判定信号）が出力された時のレーザ変位計の読みを記録する。

実験装置における精密ステージの移動制御やトリガ信号に連動したレーザ変位計のデータ取得は、MATLAB + Simulink 及び DSP システムを用いた実験環境を構築し、自動で行った。DSP システムの制御周期は $30\mu\text{s}$ である。

実験では、プローブの Z 軸方向（軸方向）及び、軸に垂直な X 方向と Y 方向からの接触について、接触速度を $100\mu\text{m/s}$ 、 $860\mu\text{m/s}$ 、 $5300\mu\text{m/s}$ の条件で 30 回の接触を繰り返して計測した。結果を図 7 に示す。

図 7 の結果は Z、X、Y 軸それぞれの場合において、 $100\mu\text{m/s}$ の接触速度で測定した接触検出位置の平均値をゼロとし、この平均値からの偏差を縦軸に表示している。

本センサは Z 軸方向（軸長さ方向）の縦振動を励起しているため Z 軸方向における接触検出位置の繰り返し精度が最も良い結果となり、X 軸方向、Y 軸方向においても約 $1\mu\text{m}$ 以内の誤差に収まる結果が得られた。表 3 に測定結果をまとめる。なお、表中の最大誤差は、ばらつきの最大値と最小値の差の半分として表記している。

5. 2 測定力の測定

接触判定時の接触力を測定した。測定には繰り返し精度を測定した DSP 制御の実験装置を用い、X ステージ上に微小荷重用ロードセル（LTS-50GA（株）共和電業）を取り付け、ロードセルの先端に接触センサを接触させる方法とし、接触時のトリガ信号に同期してロードセルの荷重を取得した。

接触させる方向は、繰り返し試験と同様にプローブ軸

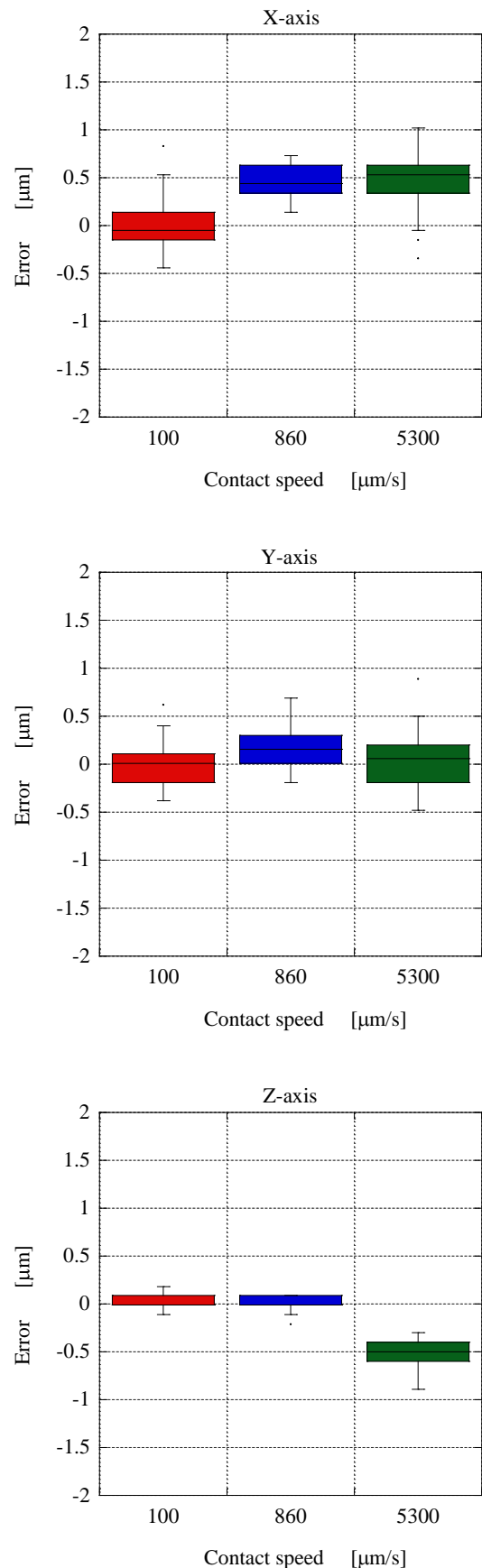


図 7 繰り返し精度

表3 接触検出位置の繰り返し精度 測定結果

測定条件		繰り返し精度[μm]	
接触方向	接触速度[μm]	最大誤差	標準偏差
X	100	0.63	0.26
	860	0.29	0.16
	5300	0.68	0.31
Y	100	0.50	0.25
	860	0.44	0.18
	5300	0.68	0.30
Z	100	0.15	0.07
	860	0.15	0.07
	5300	0.29	0.15

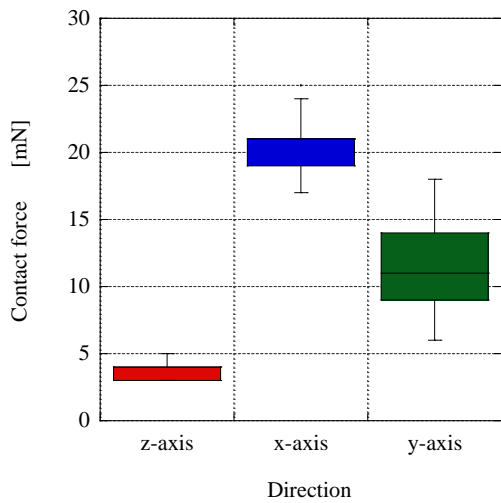


図8 測定力

表4 接触力 測定結果

測定条件	接触力[mN]		
	平均値	誤差	標準偏差
X	20.3	4	1.9
Y	11.6	6	2.9
Z	3.8	5	0.6

方向の Z 軸及び、軸垂直方向の X、Y 軸について測定した。測定回数はそれぞれの方向について 30 回行い、接触速度は 860μm/s とした。結果を図 8 に示す。

結果より、Z 軸方向は数 mN 程度の接触力で接触判定していることが確認できる。X、Y 軸方向に関しては、Z 軸に対して数倍大きな力が必要となり、ばらつきも増加する結果となった。表 4 に結果をまとめる。

5. 3 考察

タッチプローブは、測定力によるプローブ軸の撓みを考慮すると測定力は小さくかつ、接触方向 (X、Y、Z 方向) に依存しないことが要求される。

実験結果に基づいて X、Y 軸方向の接触力によるプロ

ーブ軸の撓み量を概算すると、プローブ軸の形状として直径 2mm、長さ 30mm、ヤング率を 200GPa の片持ち梁とした場合、先端荷重 20mN の接触力で撓みは約 1.1μm となる。したがって、本実験 5. 1 の繰り返し精度の測定では、各軸方向での接触判定の繰り返し精度は 1μm 内に収まる程度であるが、X、Y 軸方向は測定力によるプローブの撓みが含まれていることを留意する必要がある。なお、プローブ軸に超鋼やセラミックス等の素材を用いた場合は撓みが軽減するが、よりアスペクト比の高い (細長い形状) プローブを用いる場合には、撓みが急激に増えることを考慮する必要がある。

6. まとめ

圧電素子の超音波振動利用した接触センサを開発した。本報告では、接触センサの原理について FEM による振動解析の結果に基づいて述べた。

試作したセンサ本体とセンサ回路を用いて、プローブの振動計測を行い、FEM の解析結果と照らし合わせて、振動モードを明らかにした。また、試作したセンサ回路により、加振周波数を掃引し、プローブの共振を検出することが出来ることを確認した。

実験では、接触検出位置の繰り返し精度 (接触速度 5.3mm/s) として、X、Y、Z 軸方向でそれぞれ 0.68μm、0.68μm、0.29μm の最大誤差となり、標準偏差は X、Y、Z 軸方向でそれぞれ 0.31μm、0.30μm、0.15μm が得られた。接触力は X、Y、Z 軸方向でそれぞれ 20.3mN、11.6mN、3.8mN となり、標準偏差は 1.9mN、2.9mN、0.6mN が得られた。今後は、本研究結果を踏まえて、開発ニーズのあるアスペクト比の高い、高精度なタッチプローブの開発を行う予定である。

【謝 辞】

本研究開発で使用した電気試験機器一式を購入するにあたり、財団法人 JKA (旧:財団法人日本自転車振興会) の補助を受けましたことを報告します。

【参考文献】

- 1) 西嶋ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告, No.3 (2010), p39
- 2) 村岡, 月刊素形材, No.5, Vol.51 (2010), p27