

# 精密切削加工の高効率化に関する研究

振動型 3 次元接触センサの開発  
西嶋隆、飯田佳弘、今井智彦

## Study on a Technology to Enlarge the Efficiency of Precision Machining Processes A 3D Touch Sensor Using Ultrasonic Vibration Takashi Nishijima, Yoshihiro Iida and Tomohiko Imai

本研究では NC 工作機械の機上に設置し、工作機械の工具位置を計測するための 3 次元接触センサを開発する。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、構造が簡素で軽便であり、繰り返し検出位置精度の高いセンサを開発することを目標とする。本報告では、研究の背景を述べた後、提案する振動型接触センサの接触検出原理、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、及びセンサの特性把握を行った結果について報告する。

### 1. はじめに

近年、精密切削加工における高精度化が進展する中、工場内の温度変化や工作機械から発生する熱に起因する主軸の熱変位や、工具破損による加工精度の低下が無視できない問題となってきた。このような機械の熱変位や工具破損が発生した状況では、工作機械の読みに対して実際の工具位置が異なるため、結果として加工ミスが発生し、生産効率を下げることになる。特に精密な仕上げ加工では、ワークに対する工具位置を正確に把握して、適切な工具位置補正を行う必要性が高い。

上述のような工具位置の把握は生産ロットが小さい程重要といえる。例えば、大ロット生産であれば、加工しながら（加工後の寸法をチェックして）加工量を修正していく方法がとれる。しかし近年では、多品種少量生産が多く、歩留まりのよい生産のためには、工具位置計測は重要性を増す。

このような工作機械の熱変位の問題に対して、現状では熱変位をキャンセルするシステムを搭載した高性能な工作機械が知られている。しかし一般的には、最新鋭の設備を手軽に導入していくことは難しく、既存の工作機械に設置できるセンサシステムが望まれる。これに応じた、既存の工作機械に設置するタイプのものとしては、工具測長や工具破損を検出するセンサが知られており、これにより工具位置補正を行う。

上述のタイプのセンサは、大別して非接触式又は接触式があり、非接触型はレーザ光や CCD カメラによる画像処理を用い、接触式は接点の通電式、歪ゲージ式、光学式等が知られている。これらのセンサによる工具位置の測定方法の多くは、センサが工具先端を感知した際に検出信号を工作機械側へ送出し、その瞬間における工作機械の読みをメモリに記憶する方式となっている。

このようなセンサにおいても、光学式は比較的高価であり、接触式は 1 軸方向の接触検出センサ以外は比較的高価である。

本研究では、安価で簡単に製作でき、取り扱いが軽便

なセンサを開発することを考慮し、接触式のセンサ開発を行うこととした。具体的には、圧電素子からの超音波で加振した振動体を用いたセンサであり、工具等の接触により振動体の状態が変化することを検知することで接触を判定する。性能としては、低接触圧でサブマイクロメートル程度の繰り返し検出位置の精度を目標とした。

本年度は、昨年度のセンサ試作の知見をもとに、新たな接触センサとセンサ回路を開発し、センサの振動特性について把握した。

### 2. センサシステム開発

本年度は昨年度のセンサ開発<sup>1)</sup>の知見を踏まえ、新たなセンサシステムを開発した。主な事項は以下のとおりである。

センサ本体においては、

1. 昨年に比べて、外径を 60mm から 40mm へと小型化した。
  2. 円環形状の圧電素子を用い、プローブ軸との連結を、接着剤による接合から、樹脂ネジによる締結に変更して、プローブの剛性を高めた。
  3. 着座機構の V 溝を深くし、より安定な機構とした。また、センサ回路の開発として、
  4. 周波数自動調整機能、過電流検出機能を設けた圧電素子加振回路を設計・試作した。
  5. 振動検出用回路を設計・試作した。
  6. 4 及び 5 の回路を統合する制御器を設計・試作した。
- 以下、試作したセンサ本体とセンサ回路について記す。

#### 2. 1 振動型 3 次元接触センサ

##### 2. 1. 1 センサの構造

図 1 にセンサ構造の断面図を示す。プローブ軸の軸中心にはネジ溝を設け、ホルダーに対しネジ締結している。圧電素子は円環形状であり、プローブ軸に対して樹脂ネジを介して締結している。プローブ軸とホルダーは SUS 材を使用し、圧電素子は RC-140F (MKT TAISEI) を使用した。

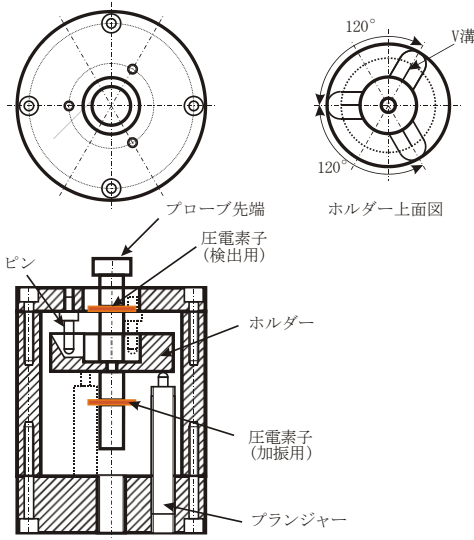


図1 センサ構造

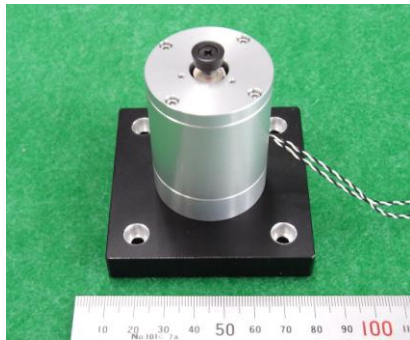


図2 試作した接触センサ

同図右上に示すように、ホルダーの上面は120度間隔に3つのV溝を設けている。ホルダーは3本のプランジャーによって同図の上方向に持ち上げられ、センサ筐体内部の上面に設置した3本のピンがホルダーのV溝の壁に接触することで、ホルダーが位置決めされる。プローブ軸は両端が自由端であり、ホルダーの支持部が固定される。プローブ先端は円形のTACとした。

本試作ではプローブ軸に対し、圧電素子とホルダーは樹脂ネジを介して挟み込む構造とし、プローブ軸全体の剛性が高くなるようにした。剛性を高くすることで、接触時のプローブ軸の撓みが減少することから、高い繰り返し検出位置精度が得られると考えられる。図2には試作したセンサの写真を示す。

### 2. 1. 1 センサの原理

図3に、プローブ軸の縦波の振動モードの模式図を示す。同図中に示した波線は縦波の変位について示している。プローブの両端とホルダーの支持部分の境界条件から、加振する周波数に応じて同図のような定在波が励起され、プローブ先端に振幅を与えることができると考えられる。機械的な共振状態において、プローブ先端に空気と異なる物体が接触すれば、境界条件の変化や振動減

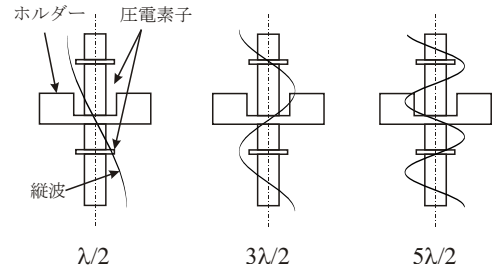


図3 振動モードの模式図

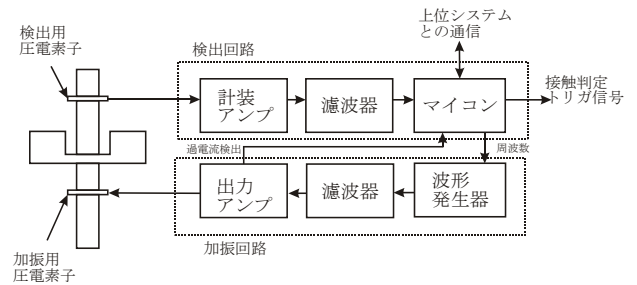


図4 回路ブロック図

衰の変化により、定在波の振幅や位相に変化が発生する。この変化を振動検出用の圧電素子で検出して物体の接触を検知する。

本センサは、圧電素子の特性とプローブ形状等の負荷に依存する共振周波数にしたがって、適切な周波数で加振する必要がある。ここで、機械的な共振周波数  $f$  は、縦波の速度  $c$ 、縦波の波長を  $\lambda$  とすれば、

$$f = c / \lambda \tag{1}$$

振動検出用の圧電素子の設置場所については、プローブ軸の振動応力振幅 ( $\tau_{max}$ ) は節に表れることから、節近辺に取り付けると信号が大きく取れると考えられる。

$\tau_{max}$  は、

$$\tau_{max} = \rho c u \omega \tag{2}$$

で表される。ここで、 $\rho$  は振動体の密度、 $c$  は振動体中の音速、 $u$  は振幅変位、 $\omega$  は角速度である。

同様な圧電素子を利用した接触センサとして、共振周波数で加振する圧電素子の電圧と電流の位相変化を検出し、接触を検知する方式のものが知られている<sup>2)</sup>が、本センサは振動検出用の圧電素子をプローブ軸上に加振用圧電素子と離れた場所に設置することで、振動の状態変化を検知する方法としている。試作では加振用と振動検出用の圧電素子を各1つとしているが、プローブ長を長くしたい場合等、振動減衰が大きい場合には、それぞれを複数設置する設計も考えられる。

### 2. 2 センサ回路

プローブ先端に大きな振幅を励起するには、機械的な共振周波数で加振することになるが、共振周波数は圧電素子の特性やプローブの長さ等の条件で変動する。そのため、本センサには、加振する周波数を自動設定する「加振回路」が必要となる。また、振動検出用圧電素子



図5 センサ回路とセンサ本体

の信号を処理する「検出回路」を含めたセンサ回路の開発が必要となる。図4は、試作したセンサ回路のブロック図を示す。

センサ回路の制御にはマイコンを用いた。本センサ回路は単体でも動作するが、通信機能を設けてパソコンなどの上位システムから各種設定値の変更や、回路の動作を制御することができる。上位システムから設定可能な項目は、周波数掃引範囲、掃引周波数のステップ単位、サンプリングの平均化数、接触判定の閾値、センサの起動、加振命令とした。センサ回路から上位システムに対しては、センサの動作状態を表す各種ステータスを上位システムの命令に応じて返信する。以下に本センサ回路の加振回路と検出回路について記す。

### 2. 2. 1 加振回路

加振回路の動作は、起動時に加振用圧電素子の周波数を掃引し、振動検出用圧電素子から得られる出力信号の振幅が最大になる周波数を探索する方法とした。

加振回路の正弦波生成はダイレクトデジタルシンセサイザ(AD9834 Analog devices)を用い、発振周波数帯域はDC~約1MHzとした。周波数の掃引はセンサ回路のパワーオン時に開始するが、回路に設けた押しボタン操作や上位システムのコマンドによっても開始することができる。印加電圧の調整は、基板上のトリマで手動調節する方式としており、最大約20V<sub>pp</sub>の振幅を印加できる。なお、出力アンプの回路保護として過電流検出機能を設け、異常時は発振を停止し、上位システムにステータスを送信する。

### 2. 2. 2 検出回路

検出回路は検出用圧電素子の出力を差動増幅し、RMS-DC 回路を経て AD 変換器に取り込む方法で、振幅変動を検出する方式としている。AD 変換の分解能は10ビットである。図5に試作したセンサ回路とセンサ本体の外観を示す。

## 3. 実験と考察

### 3. 1 プローブの特性実験

圧電素子をプローブに組み込んだ状態における特性測定を行った。(今回、加振用と検出用に用いた圧電素子は同一製品で、形状は厚さ1mmの円環である。素子単

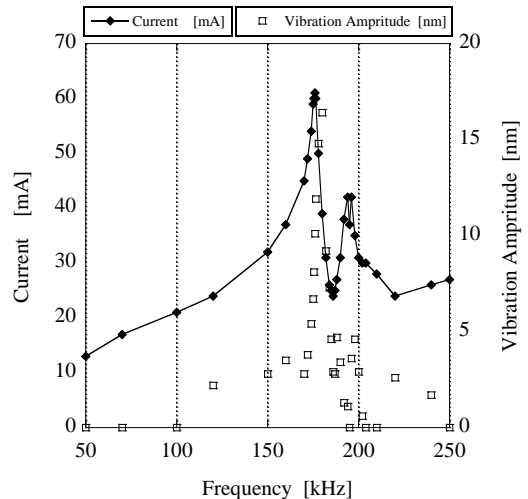


図6 印加電圧の周波数と振幅の関係

体での共振周波数( $f_r$ )は約140kHz、反共振周波数( $f_a$ )は約153kHzである。)

圧電素子を用いたトランスデューサの電気機械的諸定数を求める方法として、インピーダンスアナライザを用いて振動子のアドミタンスループを作図して求める方法が知られているが、今回は共振・反共振法(定電圧法による測定)による方法<sup>3)</sup>で、おおよその $f_r$ と $f_a$ を求めた。測定時の圧電素子への印加電圧は20V<sub>pp</sub>とした。

同時に、物理的な振動を確認するために、プローブ先端の軸方向の振動振幅を計測した。振動振幅の計測はヘテロダイン方式レーザ変位計(ST3761 岩通計測)を用い、その出力をデジタルオシロスコープ(TDS3034B Tektronix)に入力して計測した。両実験の結果を図6に示す。

図6の左縦軸は圧電素子の電流振幅を示す。周波数-電流の関係から、 $f_r$ は約176kHz、 $f_a$ は約186kHzと見積もることができる。

右縦軸は振幅を示しており、数ナノメートルから十数ナノメートルの振幅を確認した。なお、図6にて振動の振幅がゼロと計測されている点は明確な周期性振幅が認められなかったことを示す。同図より180kHzで最大16.4nmの振幅が得られ、機械的な共振周波数は180kHz近傍になると考えられる。なお、この時の縦波の波長は式(1)から約28mmとなる。

また、本プローブにおける $\tau_{max}$ を概算すると、実験より得られた自由端の振動変位 $u=16$  [nm]、SUS材の密度と縦波の速度はそれぞれ、 $\rho=7800$  [kg/m<sup>3</sup>]、 $c=5100$  [m/s]、角速度 $\omega=1.13$  [krad/s]より、式(2)から約736 [kPa]となる。

### 3. 2 センサ回路の実験

前節の結果より、加振回路では上限300kHz程度の範囲で掃引することとした。図7に、試作したセンサ回路を用いた実験結果を示す。本実験では、加振用圧電素子に300Hzから300kHzまでの周波数を200Hzステップ

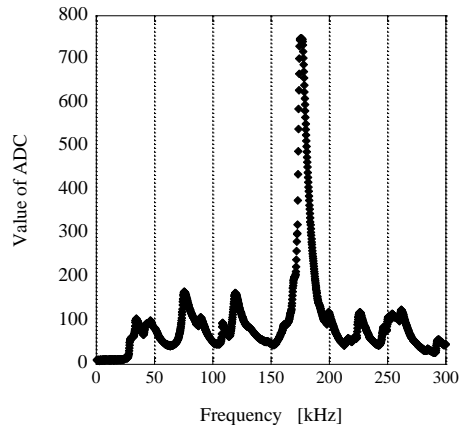


図7 加振周波数と振動検出の出力の一例

で掃引し、そのときの検出回路の出力を記録した。同図横軸は周波数で縦軸は検出回路のAD変換値である。

結果として、検出回路からは比較的複雑な出力が得られた。機械的な共振周波数と考えられる180kHz近辺よりも若干低い176kHz程度で最も出力が大きい、そのほかにも何箇所かのピークが確認できる。これは圧電素子やホルダーの境界や横波の影響などの複数の要因が考えられる。

なお、図7において最大の出力が得られる周波数は圧電素子、プローブ軸のネジ締結トルクやプローブ軸の長さや材質等の条件でも変動することになる。実際に本センサを使用する場合は、センサの起動時に最大の出力が得られる周波数を検出して、その周波数で加振することになる。

本実験から、試作したセンサ回路を用いて、プローブの機械的な振動を励起できる周波数を検出可能であることが明らかとなった。

#### 4. まとめと今後の課題

本年度は、前年度の接触センサ開発を踏まえた、改良型の接触センサを試作した。接触センサのプローブの特性として、共振・反共振法によりプローブの共振周波数と反共振周波数を実験的に求めた。試作したセンサ回路を用いてプローブの機械的な共振周波数を検出できることを確認した。

ここで、今後の開発における課題として何点か挙げる。

①圧電素子を含めたプローブの形状について、3次元的なFEM振動解析等を行うことで、感度よく振動変化を検出可能なプローブ形状を再設計できる。

②センサ回路における検出回路について、接触検出トリガ信号の応答性を上げる必要がある。試作した検出回路では、センサ信号の取り込みから接触の判定までの演算を100 $\mu$ s間隔で処理している。仮に接触速度を1m/minと見積もると、100 $\mu$ sで1.6 $\mu$ m移動することになる。したがって、サブマイクロメートルの繰り返し位置検出を得るためには、接触から接触判定のトリガ信号送出までに10 $\mu$ s程度の時間で処理する必要がある。

③試作した回路はユニバーサル基板で製作しているが、専用回路基板とし小型化すること。

④加振回路の出力アンプは、プローブ・圧電素子に対するインピーダンス整合を行うことが望ましい。

また、接触センサの性能試験として、

⑤X-Y-Z方向からの繰り返し検出位置の精度を計測し、センサの性能を検証すること。

⑥接触判定に必要な接触圧を測定すること。

以上の点を踏まえ、今後も取り組む予定である。

#### 【謝 辞】

本研究を遂行するにあたり、(財)越山科学技術振興財団から研究助成金をいただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 西嶋ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No. 2, pp41-44, 2009
- 2) 特開平6-194113, 公開特許広報
- 3) 中村ら, 超音波, コロナ社

#### Abstract

A simple 3D touch sensor, which generates touch trigger signal to measure the tool position with NC machines, has been developed. In this report, an ultrasonic vibrated 3D touch sensor and its sensor circuit were proposed. The characteristics, such as resonance frequency, of the touch sensor were measured electrically and physically. Finally, it is performed that the prototype sensor circuit can sense the resonance frequency automatically.