

低剛性工作物のオンマシン剛性測定システム

京都大学 ○梅津拓真, 河野大輔, 松原厚

Measurement system of workpiece stiffness on the machine tool
Kyoto University Takuma UMEZU, Daisuke KONO and Atsushi MATSUBARA

Stiffness evaluation of low stiffness workpiece is important for reducing vibration during machining. In this research, we developed an on-machine stiffness measurement system for workpieces using piezoelectric elements. It uses a stiffness measuring method that does not require a sensor for displacement measurement at the measuring position on the workpiece. The displacement of the workpiece is estimated from the applied voltage to the piezoelectric element and excitation force using the equivalent mechanical model of piezoelectric actuator. In comparison with the impulse excitation method and conventional piezo excitation method, the measurement accuracy of the developed measuring system was evaluated.

1. 緒言

工作機械での加工プロセスにおいて、工作物の動剛性測定は加工の能率と精度向上のために重要である。特に薄肉形状の低剛性工作物は、加工時の振動のために加工が難しく、工作物の振動特性を十分に考慮した加工条件の設定が求められる。

実験による動剛性測定では、加振装置と加振力を測定する装置に加えて加振対象の加速度、速度、変位のいずれかの応答を測定する装置が必要であり、一般的には加速度計が用いられる場合が多い。例えば航空機のファンケースなどの動剛性測定においては、振動モード特定のために複数の位置に加速度計を取り付けて振動モード解析を行う。しかし、加速度計の取り付け点数の多さから実験のセットアップには多くの時間を要する。また切削時の粗加工、仕上げ加工などの各加工プロセスにおける工作物の厚みの変化に伴って、工作物の振動特性が変化するため、同様の試験を繰り返す必要がある。このため、設置された工作物の動剛性を自動で机上計測するシステムがあれば、これらの課題を解決できると考えられる。

そこで、本研究では加速度、速度、変位の応答を測定しない、工作機械の機上での動剛性測定方法を考える。本論文では、積層型圧電素子を用いた変位推定により変位センサを省略した動剛性測定法である変位センサレスピエゾ加振法(Displacement Sensorless Piezo Excitation for stiffness measurement, 以下 DSPE 法と呼ぶ)を提案する。圧電素子を用いた周波数掃引加振と加速度計を用いた従来の動剛性測定法であるピエゾ加振法(Piezo Excitation method for stiffness measurement, 以下 PE 法と呼ぶ)およびインパクトハンマと加速度計を用いたインパルス加振法による加振実験を同じ工作物を対象に行って結果を比較することで DSPE 法の有効性を検証した。

2. 測定原理

図 1 に DSPE 法及び PE 法の実験のセットアップを示す。工具ホルダを用いて、主軸に加振装置を取り付ける。加振装置は円柱状の器具、圧電素子及び力センサで構成されている。加振対象の工作物には片持ち梁状の炭素鋼薄板を用い、片端を固定用の器具にボルトで固定した。図 2 に工作物と固定用器具の外観を示す。

PE 法では加振装置を用いて加振した工作物の加振力を力センサを用いて測定し、変位を加速度計の測定値の積分値を用いて求め、コンプライアンスを求める。一方 DSPE 法では加振方法および加振力測定方法は PE 法と同じであるが、以下に述べる変位モデルを用いて推定変位を求めることでコンプライアンスを求める。

本研究では低剛性工作物を対象としており、主軸側の剛性が工作物と比較して十分に高く、加振力による加振装置の変位は無視できると仮定する。また加振する工作物には圧電素子で予圧をかけ、圧電素子の先端の変位量と工作物の変位量は等しいとする。

次に、DSPE 法で用いる変位モデルについて述べる。変位推定のために山田らが作成した圧電素子の駆動時の挙動を表す等価機械モデル¹⁾を用いる。図 3 に圧電素子による工作物加振時の圧電素子の変位モデルを示す。点 O は圧電素子の先端部を示し、 $F(t)$ は工作物加振時の点 O にかかる反力、 $x(t)$ は点 O の変位を示す。圧電素子は機械的ばねと電気的ばねを持つとみなすことができ、それぞれのばね定数を k_p 、 k_z で表す。電気エネルギーから力学的エネルギーへの変換係数である電気機械結合係数を θ_p 、圧電素子への印加電圧を $V(t)$ とすると圧電素子の発生力は $\theta_p V(t)$ で表すことができる。点 O における力のつりあい式を次式に示す。

$$F(t) = \theta_p V(t) - k_p x(t) \quad (1)$$

式(1)を変形して、変位は次式で求められる。

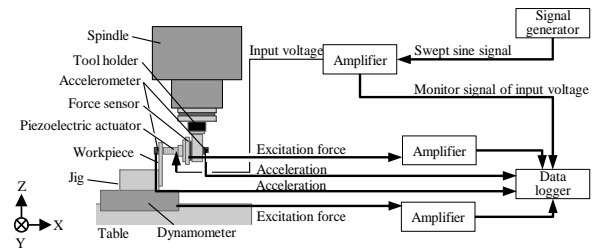


Fig.1 Experimental setup of PE&DSPE method

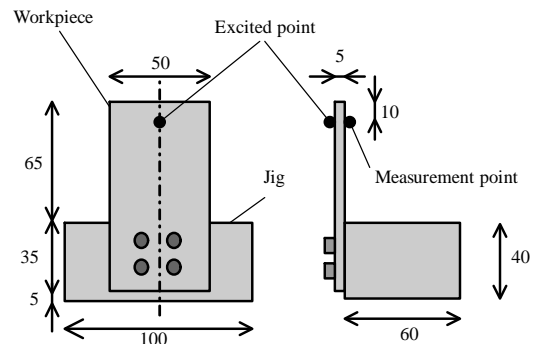


Fig.2 Workpiece and jig used in experiment

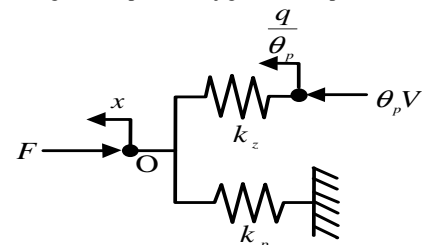


Fig.3 Equivalent mechanical model of piezoelectric actuator

$$x(t) = \frac{1}{k_p} (F(t) - \theta_p V(t)) \quad (2)$$

式(2)より、加振時の圧電素子の加振力と印加電圧値を測定することで工作物の変位を推定する。

3. 測定装置と測定方法

DSPE 法のコンプライアンスの測定精度を検証するため、薄肉工作物の剛性を DSPE 法、PE 法、インパルス加振法を用いて測定し、比較する。

3.1 PE 法

図 1 に示したセットアップを用いて実験を行う。実験では加振装置を用いて図 2 中に示す工作物の自由端部を加振した。加振力は加振装置に取り付けた力センサ (Kistler) を用いて測定した。また、加振装置と工作物の加速度をそれぞれに取り付けた加速度計 (PCB Piezotronics) を用いて測定した。測定した加振力と工作物の加速度から、H1 推定によってアクセルアンスを求め、これを積分してコンプライアンスを求めた。加振装置に取り付けた加速度計は加振装置の振動が工作物に比べ十分に小さいことを確かめるために用いた。

工作物と治具の材質は S50C とした。工作物の固定に用いたボルトの締め付けトルクは 5Nm とし、治具は動力計(Kistler)上に同じくボルトで固定した。なお本研究は切削加工時の動剛性測定を目的としており、別の加工実験における切削力測定用の装置として動力計を配置している。本実験における動力計は加工実験とセットアップを同一にするために配置しており、動力計を用いた加振力測定は行っていない。圧電素子は金属ケース封入型積層圧電アクチュエータ(NEC-TOKIN)を使用した。アクチュエータには、先端が平面のタイプ(平面接触)と、球のタイプ(点接触)の2種類を用いた。

加振では工作機械の送りをを用いて工作物と圧電素子に 120 N の与圧を与えた状態で正弦波状の電圧を印加し、電圧の周波数を 1-1500 Hz の範囲で 30 秒間掃引した。サンプリング周波数は 15 kHz とした。

3.2 DSPE 法

PE 法の実験の試験時に、圧電素子への印加電圧をモニタリング用の信号を用いて測定する。このとき測定された印加電圧と加振力から式(2)を用いて工作物の変位を推定し、加振力と推定変位からコンプライアンスを求めた。

3.3 インパルス加振法

インパクトハンマによる打撃実験を行った。インパクトハンマ内の力センサと PE 法の実験の試験で用いた工作物上の加速度計の応答からコンプライアンスを求めた。インパルス加振実験時の加振点と測定点は PE 法の試験時と同じである。コンプライアンスは FFT アナライザを用いて求めた。インパクトハンマと加速度計の測定感度は 2.2 mV/N, 10.1 mV/m/s² である。本実験での、測定帯域は 1500 Hz, 測定点数は 4096 点とする。測定点での測定結果は 5 回の測定の平均値とした。

4. 実験結果

図 4 に実験で得られたコンプライアンスを示す。また図 5 に図 4 の 750 Hz から 850 Hz の範囲の拡大図を示す。図 5 のマグニチュード線図には各測定法におけるピークの振動数を記した。実験は全て同日に行ったもので、工作物及び治具の固定条件は一定である。

図 5 から、2 種類のアクチュエータどちらの使用時においても、提案する DSPE 法のコンプライアンスは従来の PE 法とほぼ同様である。しかし、固有振動数は平面接触アクチュエータ使用時で約 805 Hz であり、点接触アクチュエータ使用時で 788 Hz であるため、約 17 Hz 異なっている。また、インパルス加振実験時は固有振動数が 796 Hz となり、他のどの結果とも異なっている。これは、ボルト固定された工作物の固定端部の条件が予圧や加振力による影響を受けたためと考えられる。

また、平面接触アクチュエータ使用時は、マグニチュードが点接触アクチュエータ使用時及びインパルス加振実験時より小さくなり、減衰は約 2 倍大きく測定された。これは、アクチュエータと工作物の接触状態によって、減衰が変化するためと考えられる。

変位の推定精度の評価のために、点接触アクチュエータ使用時において、入力に DSPE 法で推定した変位、出力を PE 法において加速度を積分して求めた変位とする周波数応答を図 6 に示す。推定変位が実測変位と完全に一致するとき、マグニチュードは常に 1 となり、位相は 0 度となる。測定した周波数範囲において、加速度計のノイズの影響が小さくなった 200 Hz 以上の周波数域においては、推定変位は測定変位の 97% から 110% の範囲の値を示している。これは平面接触アクチュエータ使用時にも、ほぼ同様の応答を示した。

推定変位の位相は実測変位の位相より常に 10° 程度進んでいる。これは圧電素子の電圧-変位特性におけるヒステリシスの影響と考えられる。圧電素子の変位量は印加電圧にほぼ比例する。本論文においても比例関係を仮定したモデルを用いた。しかし、交流電圧印加時において、電圧昇圧時の素子の変位量に比べ電圧降圧時の素子の変位量は大きくなる傾向にあり、電圧-変位の関係はヒステリシスループを描く^[2]。本実験における周波数掃引時の電圧-変位の関係を調べると、電圧-変位の関係は周波数によらず一定のヒステリシスループを描き、変位の波形に対して電圧の波形がおおよそ一定の位相で進むことが確認された。

● PE method (surface contact) ● DSPE method (surface contact)
 ● PE method (point contact) ● DSPE method (point contact)
 — Impulse excitation method

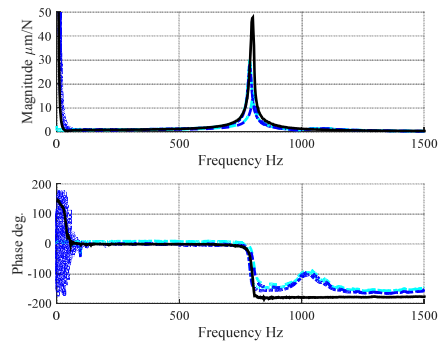


Fig.4 Compliance of workpiece

● PE method (surface contact) ● DSPE method (surface contact)
 ● PE method (point contact) ● DSPE method (point contact)
 — Impulse excitation method

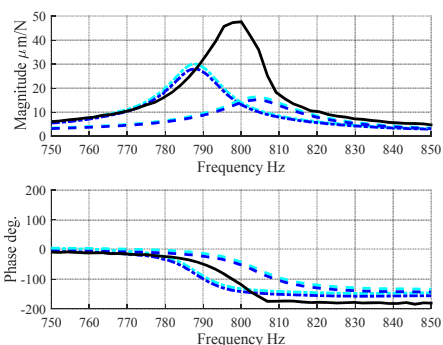


Fig.5 Compliance of workpiece 750Hz to 850Hz

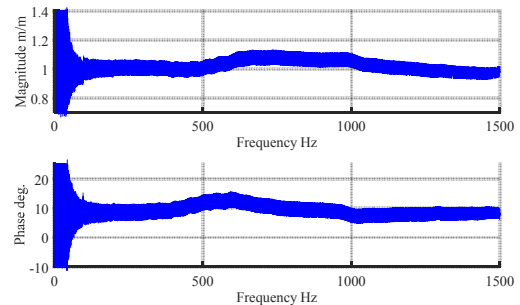


Fig.6 Frequency response of measured displacement to estimated displacement

5. 結言

本論文では、工作機械での加工における、低剛性工作物の機上での動剛性測定法である DSPE 法を提案した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 等価機械モデルを用いて、印加電圧と加振力から圧電素子の変位を推定することができた。
- (2) 200-1500 Hz の領域において、DSPE 法の推定変位の振幅は加速度計を用いて求めた変位の ±10% 以内の値となった。位相は圧電素子のヒステリシスの影響で常に 10 度ほど進んだ値を示した。つまり、DSPE 法では、推定した圧電素子の変位を用いることで従来のピエゾ加振法と同様のコンプライアンスを、変位計測器を用いずに得ることができた。
- (3) 加振装置と工作物の接触状態によって、工作物の減衰の測定結果が変化した。加振装置と工作物が平面で接触する方が、点で接触するよりも減衰が約 2 倍大きく測定された。

参考文献

- [1] Optimum tuning of series and parallel LR circuits for passive vibration suppression using piezoelectric elements
- [2] 江鐘偉, 長南征二, 山本崇, 布出良明, 圧電アクチュエータヒステリシス特性の改善に関する研究, 日本機械学会論文集