中ぐり工具の制振と切削状態の認識に関する研究*

榎 村 幸 辰** 鈴 木 良 昭***

Study on Vibration Control of Boring Tool and Recognition of Cutting State

Yukitatsu Kashimura and Yoshiaki Suzuki

This paper describes a chatter vibration control and a recognition of cutting state in boring operation. A vibration control system consists of piezoelectric sensors, piezoelectric actuators and a controller. The signals of the tool vibration are detected by the piezoelectric sensors and modified into the rectangular waves which are applied to the piezoelectric actuators to drive the tip of a boring tool. A cutting state recognition system which is based on an artificial neural network is also proposed. In this system, power spectrums of the signals detected by piezoelectric sensors are calculated to identify the cutting state. The input data of the artificial neural network are normalized by the maximum value of the power spectrum. The normalized patterns are utilized to identify whether the cutting state is stable or unstable. The vibration control system and the cutting state recognition system have been examined in cutting tests. The test results verify the effectiveness of the proposed systems for practical application.

Key words: boring tool, tool vibration control, piezoelectric actuator, artificial neural network, recognition of cutting state, surface roughness

1. 緒 言

切削加工時に発生するびびり振動は、加工能率を著しく低下させるばかりでなく、工具寿命をも低下させる要因である。特に中ぐり工具は、その長く突き出た形状から工具の剛性が低く、びびり振動が発生しやすい。このため、その抑制方法については数多くの研究が行われている。

たとえば、中ぐり工具の内部にインパクトダンパやダイナミックダンパを付加する設計の検討¹⁾²⁾、高減衰能を有する材料を工具材料に用いる材料の検討³⁾⁴⁾⁵⁾およびサンドイッチはり構造のもつ優れた減衰特性を工具に利用した方法⁶⁾が提案されている。これらの方法は、いずれも工具の内部減衰を利用して、工具の動剛性あるいは減衰特性を向上させる受動的な方法である。

また、中ぐり棒の内部に小型の積層型圧電アクチュエータを組み込み、減衰力を能動的に発生させて工具の動特性の向上を図る方法⁷⁾が提案されている。この方法は工具振動の検出に加速度センサを利用するので、最小加工径が通常の場合よりも大きくなる恐れがある。

本研究では、中ぐり工具に圧電セラミックスアクチュエータを埋め込み、仕上げ加工時の工具振動をリアルタイム制御することによって制振効果を得る方法を提案する。

なお、工具の剛性を損なわないように薄い板状の圧電素子を用い、最小加工径が大きくなるように圧電素子の一部をセンサとして利用できるバイモルフ型アクチュエータを用いた。

さらに、切削状態を認識するシステムを構築し、加工後の表面粗さを予測する方法も検討した。

2. 工具振動制御システム

2. 1 アクチュエータ内蔵工具の形状と構成

圧電セラミックスアクチュエータ／センサを埋め込んだ中ぐり工具を図1に示す。背分力方向(x方向)および主分力方向(y方向)の振動を制御の対象とした。アクチュエータには、長さ30mm、幅10mm、厚さ0.5mmの圧電素子を2方向、計4枚用いた。また、対になる一方の素子の先端5mmをセンサとして使用している。アクチュエータの埋込み方法は、工具を中心電極として2枚の圧電素子の薄板を貼り合わせた工具一体構造である。2枚の素子が印加電圧の波形に応じて一方が伸び、一方が縮むように結線すると、工具刃先に変位を生じさせることができる。また、工具が振動するとセンサ素子がひずみ、電圧を発生する。これを工具振動として検出した。

Fig.1 Boring tool

* 原稿受付 平成7年5月30日

** 正 会 員 東京電機大学理工学部(埼玉県比企郡鳩山町)

*** 正 会 員 (株)日立製作所土浦工場(土浦市神立町603)

2. 2 工具振動制御ユニット

工具振動制御ユニットの構成を図2に示す。アクチュエータの駆動方法は、一定方向に変位を与えるのに適したON/OFF制御とした。切削時の工具振動は工具に埋め込まれた圧電センサによってリアルタイムに検出され、比較器に入力される。センサ出力が一定レベルを越えると、比較器の出力が“L”レベルから“H”レベルに変わり、回路が開かれアクチュエータに電圧が

Fig.2 Tool vibration control unit

印加される。センサ出力が一定レベル以下になると、回路が閉ざされ電圧は印加されなくなる。したがって、工具振動の周波数と同じ矩形波がアクチュエータに印加され、工具振動と逆位相の変位を工具に与えることによって制振効果を得る構成になっている。

なお、工具が $-x$ 方向および $+y$ 方向に振られるとアクチュエータに負の電圧が印加され、工具刃先に $+x$ 方向および $-y$ 方向の変位が与えられる。

2. 3 工具の動特性

切削におけるびり振動に対する安定性は工具系の動特性に依存するため、インパルス加振法によって工具振動無制御時、制御時の工具のモーダルパラメータを測定した。アクチュエータ内蔵工具の突出量は120mm、加振方向は x 方向、 y 方向の2方向とし、工具振動制御時の印加電圧は x 方向 $-20V$ 、 y 方向 $-15V$ とした。工具のモーダルパラメータを表1に示す。表中の f 、 ζ 、 m 、 c および k はそれぞれ固有振動数、減衰比、質量、減衰係数およびばね定数である。 x 、 y 両方向ともに工具振動を制御することによって減衰比および減衰係数が大きくなり、工具の減衰特性が向上している。また、工具の動コンプライアンスのナイキスト表示を図3に示す。図中の○は工具振動無制御時、●は制御時の動コンプライアンスである。ナイキスト表示における最大負実部 α_{Rmin} は動的比切削抵抗 k_d 、安定限界切削幅 b とすると、

$$\alpha_{Rmin} = -\frac{1}{2k_d b} \quad (1)$$

で与えられる⁹⁾。つまり、最大負実部の大きさがびり振動に対する安定性に大きな意味をもつ。実験の結果、 x 方向における制御時の最大負実部の大きさは無制御時の約41%、 y 方向においては約65%となった。これによって、再生びりが生じない安定限界が拡大すると考えられる。

3. 切削状態認識システム

3. 1 システムの概要

Tobias⁹⁾によると、自励びりの発生原因は工具刃先によって除去される切りくず厚みの変動分によるものであるとしている。工具刃先に作用する切削力の変動分は切りくず厚みの変動

Table 1 Modal parameter

Direction	Modal parameter	Without control	With control
x	f Hz	845.8	841.4
	ζ	0.03278	0.03967
	m kg	1	1
	c N/(m/s)	348.4	419.5
	k MN/m	28.24	27.85
y	f Hz	1014.2	998.2
	ζ	0.05550	0.06315
	m kg	1	1
	c N/(m/s)	707.4	792.1
	k MN/m	40.61	39.34

Fig.3 Nyquist plots of dynamic compliance

Fig.4 Cutting state recognition system

分に比例し、この切削力の変動分の影響によって工具振動が発生する。その振動は工具系の動特性に大きく依存している。

そこで、びり振動の特徴をとらえて切削状態を認識し、切削力の変動から工具刃先の軌跡を描き、表面粗さを予測するシステムも構築した。切削状態認識システムの構成を図4に示す。本システムは切削状態認識部、工具刃先軌跡シミュレーション部および表面粗さシミュレーション部の3部分で構成されている。

3. 2 切削状態の認識

びり振動は工具系の動特性に依存する周波数で発生するため、工具に埋め込んだ圧電センサからの信号のパワースペクトルで切削状態を認識することができる¹⁰⁾。そこで、パターン認識を得意とする学習機能を持ったニューラルネットワーク(Artificial Neural Network; ANN)を用いた切削状態認識システムを構築した。図5にANNの入力値抽出法を示す。切削時に検出される圧電センサからの信号のパワースペクトルを幅広い切

Fig.5 Power spectrum for input to ANN

削条件に対応させるためにその最大値で正規化する。びびり振動の発生の有無にかかわらず圧電センサからの信号のパワースペクトルは最大値を含む160Hzの間に分布する。そこで、最大値を21番目として4Hz間隔で最大値の上下20個ずつ、160Hzの間のデータを抽出する。びびり振動が発生した場合は最大値だけが顕著に検出され、びびり振動が発生しない場合は最大値以外にもピークが見られ、両者の間にはっきりとした特徴が現れるので、これをANNの入力値とした。

図6にANNの構造を示す。切削状態の認識には、3層階層構造のANNを用いた。入力層のユニット数を41、中間層のユニット数を6とし、出力層のユニット数は安定、不安定の2とした。切削状態をびびり振動が発生しない安定切削状態、弱いびびり振動が発生するが切削が行える不安定切削状態1および激しいびびり振動が発生して切削を行うのが困難な不安定切削状態2の3状態に認識する。認識のルールは、x方向、y方向の出力値がいずれも安定の場合は安定切削状態、x方向あるいはy方向の出力値のいずれかが不安定の場合は不安定切削状態1、x方向、y方向の出力値がいずれも不安定の場合は不安定切削状態2とした。ANNの学習では、びびり振動が発生した場合のx方向、y方向のデータ各2個、びびり振動が発生しない場合のx方向2個、y方向1個のデータ計7個を学習データとした。この7個のデータを用いてANNをバックプロパゲーション法で400回学習させ、誤差二乗和が0.00196となったので学習が終了したとみなした。この状態のANNを切削状態の認識に用いた。

3.3 工具刃先軌跡のシミュレーション

図7に工具刃先の軌跡のシミュレーション部の構成を示す。切削時に検出される圧電センサの出力Eを入力すると、Eは切削力の変動分dFに換算される。インパルス加振法によって求めた工具のモーダルパラメータm、c、kを選択することによって、運動方程式

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= dF_x \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= dF_y \end{aligned} \quad (2)$$

の定数が得られる。この運動方程式を直接積分して工具刃先の変動分を求め、工具刃先の軌跡を描く。ただし、工具の動的質量を求めるのは困難なため、描く軌跡は工具の質量を1kgとした。

3.4 表面粗さのシミュレーション

びびり振動が発生すると加工面に悪影響を及ぼす¹¹⁾。加工物

Fig.6 ANN architecture for recognition of cutting stability

Fig.7 Outline of locus simulation system

の円周方向には振動の影響がそのまま現れ、軸方向にはきわめて波長の長いうねりが現れるため、加工面にはびびり痕とよばれる模様が発生する。このうねりを考慮することによって、軸方向の表面粗さを予測するシステムを構築した。うねりの波長は、工作物の1回転ごとに生ずる円周方向の波の位相差が積み重なったものである。切削時の振動の周波数を f_0 、主軸の回転数を N とすると、主軸1回転当たりのできる波の位相のずれ φ は、

$$\varphi = \pm \pi \left(\frac{60}{N} f_0 - n \right) \quad (3)$$

となる。ただし、 n は整数である。したがって、うねりの波長 λ は送り s とすると、次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\varphi|} s \quad (4)$$

びびり振動の振幅を A 、初期位相を ϕ とし、縦軸にうねり Y_1 、横軸に軸方向の距離 X をとると、うねりは次式で表される。

$$Y_1 = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} X + \phi \right) \quad (5)$$

また、ノーズ半径を r 、主軸の回転回数を i とすると、理論表面粗さ Y_2 は、

$$Y_2 = -\sqrt{r^2 - (X - is)^2} \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \frac{2i-1}{2} s < X \leq \frac{2i+1}{2} s, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

で表される。この Y_1 と Y_2 を重ね合わせることによって、表面粗

Fig.8 Setup of cutting test

Table 2 Experimental conditions

Cutting conditions	Depth of cut mm Feed mm/rev Cutting speed m/min	0.05 - 0.30 0.1 - 0.3 90 - 150
Workpiece	Material φD mm	S45C 60 - 75
Tool	Tool length mm Nose radius mm	120 0.4

さのシミュレーションを行うことができる。本システムでは、実切削で得られるうねりと式(5)のうねりを対応させるために予備実験を行い、工具軌跡のx方向の半振幅に0.76を掛けた値を式(5)のAの値とした。

4. 性能評価

試作したアクチュエータ内蔵工具が実切削においてどの程度制振効果を発揮するかを検討するとともに、構築した切削状態認識システムの有効性を検討した。図8に切削実験の概要を示す。中ぐり工具であるが、加工面を観察しやすいように外周切削を行った。表2に実験条件を示す。本研究では、びびり振動の発生限界に影響を及ぼすものとして送りと切削速度を選択し、送りを0.1～0.3mm/rev、切削速度を90～150m/minの範囲で変化させたときの各切込みに対する切削状態を調べた。

4.1 切削状態認識部の評価

各切削速度における切削状態を図9に示す。図中の切削状態を示す円の左側は切削時の音とびびり痕の有無による結果であり、右側は切削状態認識システムの判別結果である。円の左右の仕切りがないものは、両方の結果が一致したことを示している。(a)の工具振動無制御時と(b)の制御時の切削状態を比較すると、本研究で設定した印加電圧の範囲でも工具振動を制御することによって安定に切削できる領域が拡大している。

表3は切削状態認識システムの判別結果である。切削音とびびり痕の有無による結果と不安定切削状態1の判別結果の一致が50%と低い。これは、切削時に検出するパワースペクトルの微妙な変化に構築したシステムが対応できなかったことにあると考えられる。これは、学習データを改良することによって改善できると考えられる。これに対して、安定切削状態と不安定切削状態2の判別結果はよく一致している。

4.2 工具刃先軌跡と表面粗さシミュレーション部の評価

図10は、切削速度150m/min、送り0.1mm/rev、切込み0.075mmの切削条件における工具刃先の軌跡のシミュレーション結果で

Fig.9 Cutting state

Table 3 Test results for recognition of cutting state

Cutting state	Correct number	Data number	Recognition rate %
Stability	46	50	92
Instability 1	4	8	50
Instability 2	17	20	85

ある。(a)が工具振動無制御時、(b)が制御時の結果である。ただし、(i)、(ii)に関してはx方向の結果を示している。(i)の圧電センサの出力電圧を比較しても工具振動を制御することによって工具振動が抑制できることを確認できる。(ii)のANNの入力値は、不安定切削時と安定切削時の特徴をよく表している。(a)の入力値は21番目のデータのみ突出したパターンとなるのに対して、(b)の入力値は21番目の値を頂点としてすそ野が広がるパターンとなっている。(iii)は工具刃先の軌跡のシミュレーション結果である。工具振動を制御することによって、軌跡はx方向、y方向ともに無制御時の約1/10に抑制されている。また、(b)の軌跡がきれいな楕円を描いていないことから、いくつかの周波数成分によって振動していることが確認できる。

図11は表面粗さのシミュレーション結果と加工後の表面粗さ

Cutting conditions : depth of cut 0.075mm,
feed 0.1mm/rev, cutting speed 150m/min

Fig.10 Results of cutting test and locus simulation

の測定結果である。ただし、図11(b)-(i)の表面粗さは、図10(b)-(ii)の周波数成分A、Bから計算した結果である。シミュレーション結果では、工具振動無制御時と制御時の粗さがそれぞれ20.5 μ m、6.2 μ mであった。切削表面の測定結果がそれぞれ約18 μ m、約7 μ mであり、シミュレーション結果とはほぼ一致し、粗さ曲線の形状もよく一致している。

5. 結 言

仕上げ加工を対象とした、中ぐり工具のびびり振動の能動的抑制方法を提案するとともに、切削状態を認識するシステムを構築して実切削に供し、以下の結論が得られた。

- (1) 工具振動と逆位相の変位を工具に与えることによって、びびり振動を抑制する方法を提案した。
- (2) ニューラルネットワークを用いた切削状態を認識するシステムを構築し、構築したシステムによる判別結果は切削音、びびり痕による判別結果とよく一致する。

Fig.11 Surface roughness

- (3) 工具刃先の軌跡の振幅を考慮したうねりと理論表面粗さを重ね合わせることによって、工具振動の制御時と無制御時の表面粗さを予測できることを示した。

参 考 文 献

- 1) 上野 滋ほか：インパクトダンパを用いたボーリングバーの最適設計に関する研究，精密機械，46,12 (1980) 1481.
- 2) 吉村允孝ほか：多自由度ダンパ要素を付加したボーリングバーの防振設計の研究，精密機械，51,2 (1985) 422.
- 3) 竹山秀彦ほか：高減衰材料によるツールホルダの動剛性向上に関する研究，精密機械，48,12 (1982) 1628.
- 4) 北島弘一，田中行雄：防振合金利用の切削工具によるびびり振動の抑制，精密機械，50,5 (1984) 860.
- 5) 北島弘一ほか：防振合金による複合工具シャンクの動剛性向上について，精密工学会誌，53,10 (1987) 1582.
- 6) 碓井雄一，坂田興亜：接着剤サンドイッチはりの振動減衰特性とボーリングバーへの応用，精密工学会誌，52,5 (1986) 838.
- 7) 田中久隆ほか：中ぐり加工における能動的びびり振動の抑制，日本機械学会論文集，59,560 C (1993) 1243.
- 8) J. Tlustý and M. Polacek : The Stability of Machine Tool against Self-Excited Vibration in Machining, Int. Res. Prod. Eng., A. S. M. E. (1963) 465.
- 9) S.A.Tobias (米津 栄，下郷太郎共訳)：工作機械の振動，コロナ社，(1968).
- 10) スカウイタヤウオン サワイ，稲崎一郎：切屑形態，びびり振動，構成刃先の検知による旋削加工の適応制御，システム制御情報学会論文誌，6,12 (1993) 560.
- 11) 杉田忠彰ほか：基礎切削加工学，共立出版，(1984).