びびり振動発生限界の検出 (第1報)*

——検出のソフトウェア——

中 沢 弘** 三好 由記博*** 繁 村 一 義***

Method of Detecting Onsets of Chatter Vibrations (1st Report)

——Software for Detecting——

Hiromu NAKAZAWA, Yukihiro MIYOSHI, Kazuyoshi SHIGEMURA

This paper deals with the development of the simple and practical algorithms for exactly detecting onsets of chatter vibrations in process. The algorithms in this study, which judgements of onsets of chatter vibrations are based on detecting periodic components in signals such as sound or acceleration, are not influenced very much by changes of cutting conditions and its computation can be done in a short time, consequently they are successful for detecting chatter vibrations in process. By applying the algorithms to signals recorded in turning operations, following results were obtained. (1) Onsets of chatter vibrations can be detected from sound signals in cutting S 45 C and the correct results are obtained independently of changes of cutting conditions. (2) Acceleration signals are not suitable for the algorithms. (3) Applications of the algorithms to cases of machining of cast iron have hazard of yielding noticeable error in the judgement.

1. 緒 言

工作機械の自動化が進む中で、びびり振動の発生をインプロセスで自動的に検出する手法、装置の開発が強く望まれている。今までに加速度信号のレベルを用いてびびり振動の発生点を判定する方法¹⁾も検討されているが切削条件の変化の影響を受けやすい。本研究の手法によりびびり振動の発生をインプロセス検知すれば自動化を目指す工作機械を限界条件いっぱいまで効率的に使用することが可能となる。そのほかにびびり振動に関する様々な研究に本手法を応用すれば、実際のびびり振動開始点を簡単かつ正確に知ることができる。

本研究は切削中に発せられる騒音等の信号からびびり振動の発生をインプロセスで正確に検出する簡単かつ実用的な手法を確立しようとするものであり、最終的にはハードウェアシステムの開発までを目指している。本報ではびびり振動の発生を簡単に検出する2通りのアルゴリズムを考案し、旋削における様々な切削条件でその手法の適用性を検討して、その結果を報告する。

2. びびり振動発生検出アルゴリズム

2.1 びびり振動発生検出方法

* 原稿受付 昭和54年1月26日、昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月16日)にて発表。

** 正 会 員 早稲田大学理工学部(東京都新宿区大久保3-4-1)

*** 学生会員 早稲田大学大学院

本研究は工作機械および切削過程をブラックボックスと考え、予備知識なしでびびり振動の発生を正確にインプロセス検出しようとするものである。したがって、びびり振動の発生を判定する根拠は作業条件の変化に影響されにくいような信号の性質の変化に基づくものがよい。

本研究では、びびり振動が発生すればある特定の周波数成分が信号中に強く現れてくるという周知の事実を利用して、びびり振動の発生を検知するアルゴリズムを組み立てる。したがってびびり振動の発生を検知する問題は信号中の周期成分の発生を検知する問題に置き換えられ、本研究ではその具体的方法として以下の二つの方法を考案し検討した。

(1) ピーク値の出現間隔による方法

(2) 評価関数による方法

以下において上記二つの方法それぞれについて詳説する。なおパワースペクトルを利用する方法も考えられるが、計算結果のパターン認識を含めた処理速度の点においてインプロセス手法としては不適当であり、除外した。

2.2 ピーク値の出現間隔による方法

この方法は信号中のピーク点の間隔がほぼ一定になった時点を周期成分の発生点すなわちびびり振動の発生点として判定する方法である。図1(a)にはその検出原理を、図1(b)には判定の計算過程のメインフローチャートを示す。以下図1(a),(b)により手法の詳細を説明する。

(a) ピーク値の出現間隔による周期成分の検出原理

(b) ピーク値の出現間隔による方法のメインフローチャート

図1 ピーク値の出現間隔による方法

1) 前処理: 切削中の信号(騒音または加速度) z_t の正の部分 z_t^+ のみを2乗して $(z_t^+)^2$ (図1(a)では実線の曲線)とし, 負の部分(図1(a)では点線の曲線)は切り捨てる. このような前処理により後続する演算が高速化され, SN比も向上する.

2) ピーク点の検出とピーク間隔の計算: ピーク点は信号が増加傾向から減少傾向へ変わる点として定義し, 前処理において切り捨てられなかった部分のみから検出する. 第 n 番目のピーク間隔 D_n は, このようにして検出された連続する二つのピーク点間の時間差として計算する.

3) 周期成分の判定: 上記2)のステージで検出した n 番目のピーク間隔 D_n が, ある許容割合 $Q\%$ で示される条件

$$1 - \frac{Q}{100} \leq \frac{D_n}{D_{n-1}} \leq 1 + \frac{Q}{100} \quad (1)$$

を満足する時, その波を同一の周期成分とみなし, そのような周期成分が連続して N 回現れた時点でびびり振動発生と判定する.

2.3 評価関数による方法

サンプリングレート S_0 (Hz) での離散データを z_i とし, 適当なデータ数を M とするとき, タイムラグ l の評価関数 $F(l)$ を次のように定義する.

$$F(l) = \frac{1}{M-l} \sum_{i=1}^{M-l} (z_{i+l} - z_i)^2 \quad (2)$$

図2 実験装置およびデータ処理装置

信号 z_t がほぼ周期的であれば, l/S_0 がほぼ周期に一致した時に評価関数 $F(l)$ はゼロに近い値をとることから周期成分の発生を検出できると考えられる.

実際の計算においては, ある区間(データ長 T (s)) から計算した評価関数 $F(l)$ の最大値(例えば図5の点A)の $P\%$ を許容レベル X とし, $F(l)$ がある特定のタイムラグ l において

$$F(l) \leq X \quad (3)$$

を満足した時に, その区間内において強い周期成分が存在し, びびり振動が発生していると判定する.

3. 実験方法

実際の切削実験から得られる騒音信号と加速度信号に対して上記二つの手法を適用し, その有効性を検討する. 実験装置およびデータ処理装置の概略図を図2に, 実験における切削条件を表1にそれぞれ示す.

実験は旋盤を用いて行い, スローウェイバイト下部先端の圧電型加速度ピックアップにより加速度を, 被削材上方300mmに設置したマイクにより切削中の騒音をそれぞれ検出して, 増幅器を介した後にデータレコーダに記録する. 次に各々のデータをサンプリングして計算機に入力し, びびり振動発生点の判定の計算を行った.

なお判定結果の精度を検討するための真のびびり開始点は, 振動の発生が確実に確認できる仕上面上のびびりマークの開始点を採用した.

なお被削材は連続形切りくずの出るS45Cと不連続形切りくずの出るFC20を用いた.

表1 切削条件

項 目	切 削 条 件
切削速度 V (m/min)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220
送り f (mm/rev)	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25
マンドレルつき出し L (mm)	110, 120, 140, 160
被削材材質	S 45 C, FC 20
バイト形状	横切れ刃角 45° , 上すくい角 0°
チップ	P 20 相当, ノーズ半径 0.4 mm

表2 計算条件

手 法	項 目	計 算 条 件
ピーク値の出現間隔による方法	許容割合 Q (%)	5, 10, 15, 20, 25, 30
	ピーク間隔の回数 N	3, 4, 5
評価関数による方法	許容レベルの割合 P (%)	5, 10, 15, 20, 25, 30
	データ長 T (s)	0.02, 0.03, 0.04, 0.05
サンプリングレート S_0 (kHz)		10

図3 騒音信号

4. 解析方法および解析結果

4.1 解析方法

実際のデータを解析して本手法の有効性を検討するとともに、各手法で必要となる許容割合 $Q\%$ 等の判定条件値の現実的な値について検討する。解析に際して、各計算条件は表2に示すようなものを用いた。

4.2 検知の可能性の確認

図3には、テーパ状の円板の切削での騒音信号の例を、図4にはびびり振動発生前後の区間1, 2の騒音信号より得られたピーク間隔 D_n の変化をそれぞれ示す。図3に記したびびり開始点は被削材のびびりマークから判定したものであり、びびり振動が発生した後のピーク間隔 D_n は、びびり振動が発生する前に比べてほぼ一定になることが多く、判定条件を適当に選べばピーク値の出現間隔による方法を用いてびびり振動の発生を検出できることがわかる。図5には図3の区間3, 4で計算した評価関数を無次元化して示してある。図5より明らかなように、びびり振動が発生している区間4から計算した $F(I)$ 値はびびり振動が発生していない区間3から計算した $F(I)$ 値に比べて変化が大きく、評価関数による方法を用いてもびびり振動の発生を検知できることがわかる。なお5 ms 以下の周期成分がある場合には、評価関数の性質上5~10 ms 間の計算に、その整数倍の周期成分として現れるので、5 ms 以下の計算は省略してある。

4.3 計算条件の検討と信号の選択

まず切削速度 $V=160$ m/min で被削材が S 45 C の場

図4 ピーク値間隔の変化

合を例にとり解析を行って判定のための計算条件について検討する。この場合、被削材のびびりマークから定めた真のびびり開始点は切削開始より 2.37 s 後であった。ピーク値の出現間隔による方法を用い、計算条件の①許容割合 $Q\%$ と②ピーク間隔の回数 N を様々に変化させたときのびびり開始点の判定結果を図6に示す。また同じく評価関数による方法を用い、①データ長 T (s)、②許容レベルの割合 $P\%$ を変化させたときの判定結果を図7に示す。図6, 7から明らかなように両手法の場合とも騒音を用いてはほぼうまく判定がなされているが、加速度信号を用いると判定値が真のびびり開始点よりも相当に早くなってしまうことがわかる。切削開始後 1.5~1.8 s のびびり振動が発生していない区間と、2.5~2.8 s の完全にびびり振動が成長してしまっている区間とで騒音

(a) 区間3での評価関数

(b) 区間4での評価関数

図5 評価関数の変化

図6 ピーク値の出現間隔による方法を用いた
びびり振動発生点の判定結果

信号と加速度信号のパワースペクトル $G(f)$ を計算すると図8,9のようになり, 加速度ではうまくびびり開始点を判定できない理由が次のように説明される. 図8より明らかなように, びびり振動が発生する前の騒音信号は広帯域ノイズであり, びびり振動が発生すると狭帯域の強いピークが現れ, この場合はうまく判定がなされる.

図7 評価関数を用いたびびり振動発生点の判定結果

ところが図9より明らかなように加速度の場合はびびり振動が発生する前においてすでにびびり振動以外のバイトの振動が周期成分として現れてしまい, ソフトウェアはその周期成分を検知するため, 判定結果が早くなってしまう. バイトの振動が強く現れるのは加速度ピックアップがバイトに取付けられているためであり, このことは旋盤の構造上やむをえないことであるから, 結果として加速度信号に本手法を適用してびびり振動の発生を検出することはできないと考えられる.

図6,7の騒音信号での判定結果(白のプロット)に注目すると, ピーク値の出現間隔による方法(図6)では許容割合 $Q\%$ を $10 \leq Q \leq 20\%$ の範囲に, ピーク間隔の回数 N を4または5回にとるべきことがわかり, 評価関数による方法ではデータ長 T は少なくとも $0.02 \leq T \leq 0.05$ s の範囲にとり, 許容レベルの割合 $P\%$ を $10 \leq P \leq 20\%$ の範囲にとるべきことがわかる.

4.4 適用性

計算条件を, ピーク値の出現間隔による方法では $Q=10\%$, $N=4$ 回, 評価関数による方法では $P=15\%$, $T=0.03$ s とそれぞれ固定し, 種々の切削条件の場合の騒音信号に対して本手法を適用して, その適用性を検討する.

被削材が S45C の場合において, 切削速度が変化した場合のびびり開始点の判定結果を図10に, 送りを変化した場合の判定結果を図11に, さらに種々のびびり振動数の場合における適用性を調べるために, マンドレルのつき出し長さを変化させた場合の判定結果と, 騒音のパワースペクトルより求めたびびり振動数を図12にそれぞれ示す. 図10,11,12より明らかなように種々切削条

図8 騒音のパワースペクトル

図9 加速度のパワースペクトル

中において両手法ともほぼ実用的なびりり開始点の判定結果を与えており、少なくとも被削材材種が一定で、切削条件の範囲が今回の実験程度のものであれば、計算条件を固定したまま本研究の手法を使い、びりり振動の発生点を判定できることがわかる。

図10 種々の切削速度におけるびりり開始点の判定結果

図11 種々の送りにおけるびりり開始点の判定結果

被削材がFC 20の場合において、切削速度が変化した場合、送りが変化した場合の判定結果をそれぞれ図13、図14に示す。S45Cの場合と違い、不連続形切りくずの出るFC20の場合は判定結果が大きな誤差をもつ可能性が強く、ピーク値の出現間隔による方法を用いた場合で特にその傾向が強い。評価関数による方法は0.03s間のデータの平均的な性質をもとに判定しているのに対して、ピーク値の出現間隔による方法は高々4個程度のピーク値間隔をもとに判定していることを考慮すれば、FC材においてうまく判定がなされない理由が次のように推論される。FC材の切削中のびりり振動が発生していない時点に発生する騒音信号は、一定振動数のまま持

図 12 種々のマンドレルつき出し長さにおける
びびり開始点の判定結果

続する周期成分は含んでいないが、きわめて短い時間だけ持続する周期成分が存在し、その周期成分が様々な周波数をもって時々あるいは頻繁に出現する。そのためピーク値の出現間隔による方法では、その短い周期成分をびびり振動と誤認して正しい判定ができない。評価関数による方法の場合は、その短い周期成分がどの程度持続するかにより誤認する場合としない場合とがある。いずれにしろ FC 材のびびり振動には本研究の手法を適用することはできない。

なお大型計算機を使った場合の処理速度は両手法ともデータ長 1s に対して 0.2~0.6 s であったが、本研究の最終目的がマイクロコンピュータを使ったシステムの開発であることから、積の演算を含む評価関数による方法は処理時間が長く、インプロセス手法としてはピーク値の出現間隔による方法が適切であると考えられる。

5. 結 論

びびり振動の発生点をインプロセスで検出する手法を開発するためにそのアルゴリズムを作成し、実際の切削中の信号を使ってその適用性を検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) ピーク値の出現間隔による方法、評価関数による方法を連続形切りくずの出る S45C 材の切削中の騒音信号に適用して、びびり振動の発生点を検知できる。
- (2) 本研究の手法を旋削中の工具の加速度信号に適用してもびびり振動の発生を検知できない。

図 13 種々の切削速度におけるびびり開始点の判定結果

図 14 種々の送りにおけるびびり開始点の判定結果

- (3) 不連続形切りくずの出る FC 材の切削には本手法を適用できない。

最後に、本研究の遂行にあたり終始暖かいご支援をさいました本学稲田重男教授および実験を手伝ってくれた原和也、彦坂直史両君に心より感謝します。

文 献

- 1) Dynamic Performance Test for Lathes, Final Report MTIRA, (1971) Appendix I.