ウェーブレット解析を用いたフライス加工のモニタリング*

川合忠雄^{*1}, 太田 博^{*1}
野々山 昭紀^{*2}, 近藤 英二^{*3}Application of Wavelet Analysis to Monitoring
of Cutting Conditions in MillingTadao KAWAI, Hiroshi OTA,
Akinori NONOYAMA and Eiji KONDO

Wavelet analysis consists of a versatile collection of tools for analysis and manipulation of signals such as sound and images, as well as more general digital data sets. In this field, wavelet theory seems to be an efficient alternative to Fourier analysis that suffers from a lack of localization of the analyzing function. In particular, this new method enables engineers to process nonstationary signals in an appropriate way. In this study we apply wavelet analysis to monitoring of cutting conditions in milling. We monitor dynamic cutting torque, surface roughness and intermittent sound of cutting, and analyze intermittent sound of cutting by wavelet analysis and the pattern matching technique. Finally we demonstrate that our proposed technique provides a reliable detection of tool breakage in milling.

Key Words: Pattern Recognition, Machine Tool, Information Processing and Signal Analysis, Milling, Wavelet Analysis, Monitoring of Cutting Conditions, Tool Breakage

1. まえがき

近年、ウェーブレット解析という新しい信号処理手法が開発され、その応用に関する研究が多方面で行われはじめた。ウェーブレット解析は、最初、石油探査の分野における波形整形を目的として生まれたが、その後、数学者の手により基礎付けが精力的に行われて急速に進歩してきた。現在では音響信号処理、画像処理、乱流の解析、数値計算などの広い分野で応用例が増えてきている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。この解析手法は、マザーウェーブレットを核とする積分変換であるために、信号に含まれる周期性(周波数成分)の時間変化を求めることに優れており、フーリエ解析よりも非定常信号の解析に向いている。

一方、人間は回転機械、自動車などの様々な機械が発生する各種の音の時間による変化を聞き分けることにより、機械の状態や故障を判断している。著者らは

これまで動的トルクから異常を検知するための研究を行い、トルク波形のパターンを解析することにより工具に発生するチッピングを検知する方法を提案してきた⁽⁴⁾。

本研究では、フライス加工において発生する断続音(以下、切削音と示す)を聞き分けて工具に異常(チッピングなど)が発生したことを検知することを目的とした。このために、(1)ウェーブレット解析の手法を適用し、正常な場合と異常が発生した場合の特徴を求め、(2)得られた結果をDP(Dynamic Programming)マッチング法などにより定量化し、(3)工具の摩耗の様子をよく表す切削後の被削材表面の粗さとの比較を行うことにより、異常の発生を検知することが可能であることを確認した。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概要を示す。実験では、工具(エンドミル)に加わるトルクと切削音の音圧変化および切削後の被削材の表面粗さを測定した。工具に加わるトルクは、試作したトルク計を用いて測定した⁽⁴⁾。表

* 平成5年10月4日 第71期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成6年5月12日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} アイシン精機(株) (〒448 刈谷市朝日町2-1)。

^{*3} 正員、豊田工業高等専門学校 (〒471 豊田市栄生町2-1)。

面粗さの測定にはミットヨ製の表面粗さ計（サーフテスト201）を用いた。切削音は、切削点と同じ水平面上で切削点から20cmの距離に設置したリオン製のマイクロホン（UC-25型）を用いて測定した。マイクロホンは指向性および雑音の影響を軽減するために切削点の方へ向けた。切削音の測定は、周囲の雑音が十分低い状態で、切削開始後十分に時間が経過して切り込み深さが一定となつてから、0.05msのサンプリング間隔で3.75s間行つた。切削音と被削材の表面粗さを対応付けるために、表面粗さ（被削材の中心線平均粗さ R_a ）はトルク、切削音のデータを取り込んだときの場所で測定した。

実験には三菱材料製エンドミル

図1 実験装置の概要

図2 正常な切削時の特性

(a) トルク (b) 切削音
(c) (d) (e) ウェーブレット変換
($\Omega = 1250\text{rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$, $N=1$)

(TSMR252S25, 工具の半径 $r = 12.5\text{mm}$), チップ (MPMW070308, 材種UTi20T) を用いたが、実験条件が単純となるように一枚の切れ刃のみで、軟鋼板(厚さ2mm, 長さ80mm, S45C)を切込み深さ $a=1\text{mm}$ で切削した。

3. データ処理の方法

図2 (a) (b)はそれぞれ、正常な工具を使用したときの切削トルク T および切削音の音圧 P の時間変化を示し、図3 (a) (b)はチッピングした工具を用いて切削したときのトルクおよび音圧の時間変化を示す。図3 (a)に示す切削トルクは図2 (a)に示すものと大きさおよび波形が異なっている。著者らはこれまでに、この波形の違いをD Pマッチングを用いて定量化することにより、工具にチッピングが発生したことを検知できる手法を示した⁽⁴⁾。

一方、図2 (b)と図3 (b)の切削音には明確な違いが認められない。熟練した作業者は、フライス加工時に発生する音の音色や強さの時間変化から工具の欠損を認識するものと考えられる。著者らはまず、発生する音の周波数成分（音色）をFFT解析の手法を用いて求めた。図4 (a) (b)には、切削時（図中の実線）および空転時（図中の破線）において発生する音をFFT解析した一例を示した。これらの図において切削時には800, 1300, 2600Hz近辺にピークが見られるものの、FFT

図3 異常な切削時の特性

(a) トルク (b) 切削音
(c) (d) (e) ウェーブレット変換
($\Omega = 1250\text{rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$, $N=61$)

解析では、(1)解析の対象とする区間の取り方によって各周波数成分の大きさが著しく異なる、(2)区間内で平均した周波数成分の大きさしか求められないために音色の時間変化を知ることができない等のために図2(b)と図3(b)の違いを区別することは困難であった。

図5(a)(b)には図2(b)および図3(b)の切削音をウェーブレット解析した結果を示す。本研究では次式に示すガウス型のウェーブレット関数を用いた。

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}}(e^{j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}})$$

$$(W_\psi f)(\tau, a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,\tau}(t)dt$$

図5(a)(b)では、縦軸に示した周波数成分の大きさを濃淡で示し(図の右上に示すチャートを参照)、それが時間の経過とともにどのように変化するかを表している。図5(a)では、 $t=10, 60, 110\text{ms}$ において切削が行われ、500から5000Hzにわたる周波数成分を持つ切削音が発生している。

図5(b)のウェーブレット解析の結果は図5(a)とは異なり、 $t=40, 90, 140\text{ms}$ で切削が行われたときに、 $f=160, 625\text{Hz}$ あたりに強い成分を持つ切削音が発生している。実験に用いたフライス盤の振動モードおよび固有振動数をインパルスハンマーを用いた加振実験によって求めたところ、主軸頭のたわみ振動〔固有振動

数 $f=160\text{Hz}$ 〕および主軸のたわみ振動〔 $f=860\text{Hz}$ (一次モード), 2500Hz (二次モード)〕の生じやすいことがわかった。ただし、図5に用いたウェーブレット関数は正規直交基底を持つために図5(b)において860Hzの成分は625Hzおよび1250Hzの中に含まれている。

この結果に基づき、図2(b)の切削音をウェーブレット解析し、上記の3つの周波数成分について得られた結果を図2(c)(d)(e)に示す。図3(c)(d)(e)は図3(b)の切削音を解析した結果である。

図2(a)(b)(c)(d)(e)より次のことがわかる。

- (1)切削音は、切削力または切削トルクによって、切削終了直後(工具が被削材から離れた直後)に引き起こされる。
- (2)このとき主軸のたわみ振動により860, 2500Hzの音が

図4 切削音のFFT変換

(a) 正常時($N=1$) (b) 異常時($N=61$)
($\Omega = 1250\text{rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$)

図5(a) 正常な切削時のウェーブレット変換
($\Omega = 1250\text{rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$, $N=1$)

図5(b) 異常な切削時のウェーブレット変換
($\Omega = 1250\text{rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$, $N=61$)

強く励起される。

(3) 主軸頭の振動成分(160Hz)はほとんど励起されていない。

さらに、図2(c)(d)(e)と図3(c)(d)(e)の比較より次のことがわかる。

(4) 図3(c)では主軸頭の振動(160Hz)が励起されている。

(5) 図2(d)(e)の正常なときの波形(860, 2500Hz)は、図3(d)(e)のチッピングが発生したときの波形と形と大きさが著しく異なる。

他の切削条件においても実験を行い種々の観点から検討したところ、発生する音は、次に述べるように切削トルクの波形(形、大きさおよび作用時間)と主軸頭、主軸の振動の周期との関係によって決まることがわかった。ここで、固有振動数 $f=160, 860, 2500\text{Hz}$ に対する周期 $T=1/f$ はそれぞれ $T_1=6.25\text{ms}$ 、 $T_2=1.2\text{ms}$ 、 $T_3=0.4\text{ms}$ であり、1回の切削時間 T_a は工具の回転数 $\Omega=1250\text{rpm}$ 、切込み深さ $a=1\text{mm}$ のときに約 $T_a=3.5\text{ms}$ である。

(a) T_1 に対して T_a は約 $1/2$ となるので作用時間約 3.5ms の切削力によって主軸頭の振動は引き起こされ、その大きさは切削力が大きくなるほど大きくなると考えられる。図3(a)におけるトルクは、図2(a)のトルクに対して大きさが約2倍、作用時間が約1.3倍となっているので欠損した工具で切削した場合には図3(c)に示す $f=160\text{Hz}$ の強い音が生じている。本研究では、工具の欠損を検知するために $f=160\text{Hz}$ の成分についてそのピークの値を求め、それがあるしきい値 σ_0 を越える確率を求

めた。しきい値 σ_0 は切削条件に応じて決めた。(なお、 $f=160\text{Hz}$ の変化のパターンは周波数が低いために正常な場合とチッピングが発生した場合でほとんど差がなかった。このためD Pマッチングによる処理は行わなかった。)

(b) T_2 および T_3 に対して T_a は数周期分となるので、 $f=860, 2500\text{Hz}$ の主軸の振動は、切り込みまたは工具が被削材から離れるときの切削力の急激な変化の影響を受けやすい。切り込みまたは工具が被削材から離れるときの切削力の変化は工具の欠損による影響を受けやすいために、工具の欠損によって主軸の振動およびそれに伴う切削音が強く影響を受け、切削音の変化のパターンやその大きさ等が変化すると考えられる。ここでは、 $f=860, 2500\text{Hz}$ の各周波数のスペクトルの時間変化のパターンを定量化するために次に示す(1)~(3)の手順でD Pマッチングを行った。

(1) 新しい工具を使用したとき($N=1$)に得られる $f=860, 2500\text{Hz}$ のスペクトルの時間変化からその1周期分を切り出してテンプレートとする。

(2) テンプレートとその他の切削の1周期分のスペクトルの時間変化をD Pマッチングによって比較し、類似度を求める。

(3) 得られた類似度がしきい値 σ_1 よりも大きな値をとる確率を求める。ここで、しきい値 σ_1 は、新しい工具を用いて切削したときに得られる類似度の分布から平均値と標準偏差を求め、 $\sigma_1=\text{平均値}+\text{標準偏差}\times 3$ として求めた。

4. 実験結果および考察

図6 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 1250\text{ rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$ (ピーク値)

図7 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 1250\text{ rpm}$, $d_0 = 75\text{mm/min}$ (類似度)

実験では、被削材 (S45C, 厚さ2mm, 長さ80mm) をテーブルに固定して、長さ80mmの辺の全長を N 回切削した。 N 回の切削の後、被削材の表面粗さを測定し、それを3章で述べた処理によって得られる結果と比較した。

図6は、パターンのピーク値が σ_0 よりも大きくなる確率を切削回数 N に対して示した。 $\times$ 印付きの一点鎖線は $f=160\text{Hz}$ に対する結果であり、 $\blacktriangle$ 印付きの破線は $f=860\text{Hz}$ 、 $\blacksquare$ 印付きの点線は $f=2500\text{Hz}$ に対するものである。比較のために、図6には被削材の中心線平均粗さ Ra を $\bullet$ 印付きの実線で示した。 $f=860\text{Hz}$ に対するピーク値は、チッピングが発生した $N=18$ のときに大きくなっているが、その他のデータでは、チッピングが発生するときとピーク値から求めた確率が大きくなるときのあいだに明確な対応関係は見られない。

図7にはパターン類似度が σ_1 よりも大きくなる確率を切削回数 N に対して示した。 $\blacktriangle$ 印付きの破線は $f=860\text{Hz}$ 、 $\blacksquare$ 印付きの点線は $f=2500\text{Hz}$ に対するものである。 $N=18$ のときに被削材の表面粗さおよび類似度が σ_0 よりも大きくなる確率がともに急激に大きくなっている。観察によれば、このとき工具にチッピングが発生し、被削材の表面が急に粗くなったことを確認できた。以上のことから、類似度があるしきい値を越える確率が急に大きくなるときに工具にチッピングが発生したと考えられる。しかし、工具の破損は、チッピング(刃先が欠ける)、磨滅(刃先が丸くなる)の繰り返しによって進行するので、一度チッピングが発生した後の大きな類似度の現れる確率および表面粗さは切削回数 N の増加に対して不規則な変動を繰り返す。

切削条件の異なる場合にもチッピングの発生を検知することが可能であるかどうかを検討するために、次の図8(a)(b)(c)および図9(a)(b)(c)に示す3つの条件での実験を行った。図8(a)(b)(c)はピーク値についての結果であり、図9(a)(b)(c)は類似度についての結果である。

図8(a)の場合には、ピーク値から求めた確率がチッピングが発生して表面粗さが悪くなるとき($N=20$)に急激に大きくなり、ピーク値の変化からチッピングの発生を検知することが可能であるが、図8(b)(c)の条件では、ピーク値から求めた確率が急に大きくなるときとチッピングが発生するときとの対応は必ずしも明確ではなく、ピーク値からチッピングの発生を検知することは困難である。

図9(a)では類似度から求めた確率がチッピングが発生して表面粗さが悪くなるとき($N=20$)に急激に大き

くなり、類似度の変化からチッピングの発生を検知することが可能である。図9(b)(c)では、 $f=2500\text{Hz}$ に対する類似度の変化からチッピングの発生を検知するこ

図8(a) 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 1250 \text{ rpm}$, $d_0 = 48\text{mm/min}$ (ピーク値)

図8(b) 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 800 \text{ rpm}$, $d_0 = 48\text{mm/min}$ (ピーク値)

図8(c) 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 550 \text{ rpm}$, $d_0 = 30\text{mm/min}$ (ピーク値)

とは困難であるが、 $f=860\text{Hz}$ に対するDPマッチングから検知することが可能となっている。

なお、実験では、工具の回転数が低くなるほどチップングの検知が困難となる傾向が見られた。その理由としては、(1)測定時間が一定(3.75秒間)であるために、回転数が低いほどその間に工具の切削する回数が少なくなり、処理の対象となるデータが少なくなればばらつきが大きくなる、(2)切削力、切削トルクの変化がゆっくりになるためにフライス盤に励起される振動が小さくなって正常な場合と異常が発生した場合の判別が困難になる等が考えられる。これらの点は今後の課題として検討していきたい。

5. まとめ

本論文では、ウェーブレット解析とDPマッチングの手法等を用いて工具に発生するチップングの検出を目指し、以下の結論を得た。

1. 工具のチップングによってフライス盤の主軸および主軸頭の振動の振幅および振幅の時間変化のパターンも変化して、これらの振動に伴う切削音も変化する。
2. ウェーブレット解析を用いると切削音の時間変化のパターンを振動数毎に分離して求めることが可能となる。
3. DPマッチングによって、正常な工具を用いた時の切削音のパターンとチップングした工具を用いた時の切削音のパターンを定量的に評価することが可能となる。
4. ウェーブレット解析とDPマッチングを組み合わせることにより、工具に発生するチップングを検知することが可能となる。

文 献

- (1)特集”ウェーブレット”，数理科学，1992-12
- (2)山口，守本，計測と制御，Vol. 31, 1992-8, p. 879.
- (3)特集”ウェーブレット変換を応用する”，エレクトロニクス，1993-5
- (4)川合，太田，丹羽，近藤，”パターンマッチングを用いたフライス加工のモニタリング（第1報）”，日本機械学会論文集，Vol. 60, No. 573 (1994-5), p. 146.

図9 (a) 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 1250 \text{ rpm}$, $d_0 = 48 \text{ mm/min}$ (類似度)

図9 (b) 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 800 \text{ rpm}$, $d_0 = 48 \text{ mm/min}$ (類似度)

図9 (c) 表面粗さと確率分布の切削回数による変化
 $\Omega = 550 \text{ rpm}$, $d_0 = 30 \text{ mm/min}$ (類似度)