エンドミルびびり加工面模様の二次元離散フーリエ変換を用いた
画像処理に基づく状態推定方法の検討尾崎 信利^{*1}, 松井 翔太^{*2}, 廣垣 俊樹^{*3}, 青山 栄一^{*3}State estimation based on image processing of chatter mark on end-milled surface
by two-dimensional discrete Fourier transformNobutoshi OZAKI^{*1}, Shota MATSUI^{*2}, Toshiki HIROGAKI^{*3} and Eiichi AOYAMA^{*3}^{*1,*2} Graduate School at Doshisha University

1-3 Tatara-Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University

1-3 Tatara-Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

Received: 22 July 2019; Revised: 6 September 2019; Accepted: 8 October 2019

Abstract

In this report, we propose a method to analyze the frequency and phase difference of self-excited vibration during cutting by using image analysis for the photographed image of the machined surface by end milling. It is widely known that, when chatter vibration occurs during cutting, periodic patterns, called chatter marks appear on the machined surface. In previous studies, the periodicity of chattering was judged by visual observation, but this reading operation was difficult, and advanced skills were required to obtain stable results. In this study, the periodicity of the chatter mark is analyzed from the frequency spectrum of a two-dimensional discrete Fourier transform. Image analysis of chatter marks by Fourier transform facilitates the evaluation of the periodicity from the entire image data, so it enables very robust frequency analysis compared to conventional methods. The machined surface images necessary for chatter mark analysis were acquired using a commercially available digital camera and machine tool. To verify the effectiveness of the proposed method, chattering vibration generated during side cutting with the end mill was estimated and compared by the image analysis of the chatter mark and vibration analysis with a displacement sensor. The values of both analysis results are close, and it is found that the proposed method is an effective method for chatter vibration analysis.

Keywords : Chatter vibration, Chatter mark, End mill, Vibration control, Image analysis, Two-dimensional Fourier transform, Camera calibration

1. 緒 言

切削加工におけるびびり振動は仕上げ面性状の劣化, 工具の破損などを引き起こすため, 生産力の低下を招く重要な問題として広く認識されている(鈴木, 2010). 特に自ら励振力を生み出して振動を起こす自励びびり振動は大きな振動に成長するため問題となりやすい(Guillem and Joaquim, 2011). 多くの切削様式では回転運動と送り動作を組み合わせるため, 一度加工した仕上げ面を再び加工する. したがって, ほとんどの切削加工では, 切削中の振動によって生じた加工面の起伏が1回転後の切削断面積を変動させる, 再生効果に起因した自励びびり振動が生じる可能性がある(田中他, 1996). 再生効果に関しては多くの研究がなされており, 安定限界線図による安定切削幅を求める方法でびびり振動を回避できるといわれている(Kovacic, 1998). しかし, 安定限界線図を同定しても主軸温度, 工具系の摩耗や振れ, 被削材の剛性など常に変化するパラメータ(Deshpande and Fofana,

No.19-00292 [DOI:10.1299/transjsme.19-00292], J-STAGE Advance Publication date : 18 October, 2019

^{*1} 学生員, 同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程 (〒610-0394 京都府京田辺市多田羅都谷 1-3)^{*2} 学生員, 同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程^{*3} 正員, 同志社大学理工学部

E-mail of corresponding author: ctwc0562@gmail.com

2001) によって、誤差が生じてしまい厳密な安定条件が得られない場合がある (Kim et al., 2007)。

びびり振動が発生すると、加工面にはびびり模様と呼ばれる周期的な切削痕が発生する (土井, 加藤, 1953), (金子他, 1984)。そこで先行研究 (廣垣, 2017) では、エンドミル加工面におけるびびり模様の周期性と工具直径および主軸回転数に基づいたびびり振動に関する情報を推定する手法、さらに得られた振動情報から、びびり振動を抑制できる適切な主軸回転数を現場で容易かつ効率的に探索する手法を提案し、一定の有効性を示した。しかしながら、先行研究では、びびり模様の周期性は縞の頂点間の距離を撮影画像から目視によって読み取ることによって解析していたため、縞の頂点の判別が難しく、びびり模様から周期性を安定して読み取るには高度な熟練が必要であった。これを解決するためにコンピュータによる画像解析を用いて、二値化など画像の輝度値からびびり模様が示す縞の頂点の解析を試みたが、加工面にはびびり模様以外にも様々な要因によって起伏が生じるため、びびり模様が示す縞間隔の頂点のみを十分な精度で検出できないことが問題となっていた。そこで本報では、びびり模様が持つ周期性を、単に縞間隔から推定するのではなく、びびり模様の撮影画像を 2 次元離散フーリエ変換することで解析する手法を提案する。2 次元離散フーリエ変換によるびびり模様の画像解析は、画像データ全体から周期性を解析できるため、頂点同士の間隔のみを計測する従来の手法に比べ、ロバスト性の高い周波数解析が可能であると考えられる。本報では、エンドミル切削時に生じたびびり振動の情報を、提案する加工面びびり模様の画像解析と変位センサを用いた工具ホルダ部の振動解析によって推定し比較することで、提案手法の推定精度を検証した。その結果、提案手法は切削中の実びびり振動現象を解析する手法として有効であることが判明したため結果を報告する。

2. 加工面画像を用いたびびり振動情報の解析

2・1 先行研究の問題点と二次元離散フーリエ変換の導入

切削加工における加工面の起伏は、再生効果で知られるように、切削時の加工面および工具刃先の相対距離と密接な関係にある。また、びびり振動が生じると図 1-(a) のようなびびり模様と呼ばれる周期的な模様が加工面に生じる (金子他, 1984) ことが広く知られている。これらから、先行研究ではねじれ刃を有するエンドミル加工でびびり模様が示す周期性を基にびびり振動情報を解析する手法を提案 (廣垣他, 2017) してきた。このびびり模様の周期性は、縞が示す頂点を目測によって判別し、頂点同士の間隔 (図 1-(a) の縦間隔 g , 横 (工具送り方向) 間隔 e) から推定していた。しかし、切削加工面の断面曲線には、図 1-(b) のようにびびり模様以外にも微細な凹凸やうねりが混在することが知られている (吉田, 2013)。このため、びびり模様の縞が示す頂点を目測によって判別するのが難しく、計測者が縞間隔を安定して読み取るには高度な熟練が必要であった。また、加工面画像の二値化処理など、コンピュータの画像解析によって縞の頂点の検出を試みたが、加工面のうねりの影響により頂点の高さが一定でないため、びびり模様が示す縞の頂点のみを検出するのは困難であった。また、撮影画像には表面の光沢や照明の当たり方によってできる明暗の偏りなどが表れることも頂点の誤検出の要因となっていた。そこで本報では、画像中に存在する縞模様の周期性を自動検出する手法として、2 次元離散フーリエ変換の導入を検討する。2 次元離散フーリエ変換は、画像全体から周波数解析をおこなうため、縞の頂点間距離のみを用いてびびり模様の周期性を推定する従来の解析方法に比べ、非常にロバスト性の高い周波数解析が期待できる。

(a) Chatter mark analysis method used in prior research.

(b) Image of cross section curve including chatter mark.

Fig. 1 Chatter mark and method to analyze it used in previous studies. The periodicity indicated by the chatter mark was analyzed from the vertical and horizontal intervals of the stripes. Determining the striped vertices from the image was difficult and did not yield stable results.

2・2 エンドミル側面切削における加工面の起伏と工具振動の関係

図 2 に底刃が被削材と接触しないエンドミル側面切削の模式図を示す。ただし S [min^{-1}] は主軸回転数, f [mm/tooth] は一刀あたりの工具送り量, D [mm] はエンドミルの外径, Z [-] はエンドミルの刃数, θ [rad] はエンドミルのねじれ角である。エンドミル側面切削では, 工具刃先がまず被削材の下端に切込み, 工具刃先と被削材の接触点 (以下, 加工点) をエンドミルのねじれによって上昇させることで, 被削材の下端から上端を順次切削していく。この切削過程を工具送りによって工具全体を移動させながら繰り返しているため, 加工点は図 2 の ξ 軸を速度 V [mm/s] で移動していることがわかる。このため, 切削時に加工点で図 2 の z 方向に振動が生じると, その振動は ξ 軸に沿って加工面の起伏に転写される。したがって, 加工面の起伏を ξ 軸に沿って読み取ることで, 切削時に生じた加工点振動の時系列データが得られると考えられる。ただし, ある刃の加工面の大部分は次の刃によって除去されるため, 被削材に加工面として残るのは図 3 に示す僅かな領域 L_0 のみ (以下, 残留領域) である。また, 加工面の起伏から読み取れる加工点の振動情報は振動の周期性である。次に工具軸方向から見た工具軌跡を考えると, エンドミル加工は刃先を回転させながら, 工具送りによって工具全体を移動させているため, 工具刃先はトロコイド曲線を描く。この軌跡の内, 図 3 に示す残留領域 L_0 のみが加工面に残されるため, 一刀エンドミルのダウンカットの場合, 切削時に生じた振動は図 4 のように, 不連続に加工面の起伏に転写されることがわかる。以上より図 5 のように加工面から読み取れる時系列データは, ある刃の加工プロセスについては連続的であるが, 別の刃による加工プロセスとの関係は不連続であることがわかる。すなわち, 加工面から得られる振動の時系列データは断続的である。ただし, 一刀あたりの工具送り量 f ごとに加工面から時系列データを読み取ることで, 一刀ごとの時系列データであれば加工面から読み取ることができると考えられる。切削時の振動が再生びり振動であった場合, 振動 (周波数 f_c [Hz]) は一刀の切削ごとに位相差が生じるため, 図 6 のように一刀の切削パスごとの時系列データを読み取り, その振動の位相差を求めることでびり振動の位相差 ε [rad] を計算できると考えられる。本研究の提案手法は図 2 の z 方向に切れ刃が振動し, その振動が加工面に転写される必要があるが, 逆にその関係が成立すれば振動モードや周波数には影響されないものと考えられる。

Fig. 2 Model drawing of side cutting with end mill. As the contact point between the cutting edge of the tool and the workpiece is raised by the tool twist while moving the tool by the tool feed, the locus of the contact point is on the ξ axis.

Fig. 4 Vibration information recorded as irregularities on the processed surface. The vibration data is fragmentary because the recorded vibration information is only part of the vibration that actually occurred.

Fig. 3 Area left on the processed surface. Most of the surface cut into a blade is removed by the next blade, leaving only a small area on the lower side.

Fig. 5 Relationship between continuity of time series data and reading position. The time series data read from the ξ_A axis and ξ_B axis are continuous. However, the time series data of the ξ_C axis are discontinuous with respect to those of the ξ_A and ξ_B axes.

Fig. 6 Relationship between time series data and vibration phase shift. By reading time series data from the processed surface for each tool feed amount f_t , vibration data for each blade and its phase shift ε can be obtained.

2・3 2次元離散フーリエ変換を用いたびり模様の解析とそのS/N比の改善方法

図2のように加工面の角に原点を設定した加工面上の座標 x, y [mm]と、加工点が被削材下端の残留領域 L_0 に切り込んだ時刻を0sとした切削時間 t [s]は、図2の関係から、パラメータ ξ を用いて次式で表せることがわかる。

$$x = \eta + \xi \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = \xi \sin \alpha \quad (2)$$

$$t = \xi / V \quad (3)$$

ただし、 η [mm]は工具刃先が被削材下端の残留領域 L_0 に切り込んだ位置である。これらの式から、 η を固定し、パラメータ ξ を少しずつ増加させながら、式(1)、(2)で計算される座標の加工面起伏を読み取り、式(3)で計算される切削時間へプロットすることである刃の切削時に生じた振動の時系列データが得られる。この読み取り作業を、 η を一刃あたりの送り量 f_t だけ増加させながら繰り返すことで、加工点振動についての2次元離散データ $s[t, i]$ が得られる。ただし、変数 i は f_t ごとに読み取られる時系列データの順番を示す。この2次元離散データについて次式で定義された2次元離散フーリエ変換をおこない、2次元周波数スペクトル $S[\tau, i]$ を得る。なお、2次元離散フーリエ変換は縞模様(2次元の周期性)を解析する手法であり、1次元フーリエ変換と同様に周波数スペクトルの絶対値から信号に含まれる周波数の成分比を求めることができる(図7)。

$$S[\tau, i] = \sum_{t=0}^{N_t-1} \sum_{i=0}^{N_i-1} (s[t, i] - \mu_s) e^{-2\pi j \left(\frac{\tau}{N_t} t + \frac{i}{N_i} i \right)} \quad (4)$$

ただし、 N_t , N_i は $s[t, i]$ のデータ点数、 μ_s は $s[t, i]$ の平均値である。式(4)では、周波数スペクトルの直流成分を抑えるために、平均値からの偏差を用いた。周波数スペクトル $S[\tau, i]$ の τ 軸は $s[t, i]$ の t 軸に対応しているため、切削時に生じた振動の周波数を示す。ここで i 軸の解釈について考える。再生びり振動が生じたとき、振動には一刃の切削ごとに位相差が生じている。ある刃の振動データに対する振動の位相差は一刃の切削パスを跨ぐごとに蓄積されるが、位相差が 2π に達すると同じ位相の振動となる。これはびり模様が図1-(a)に示すように工具送り方向に対しても周期的となっていることから確認できる。したがって、 $n(=N_i/i)$ 刃の切削パスごとに振動データが同じ位相を繰り返している場合、位相差 ε は次式から求められることがわかる。

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{n} = \frac{2\pi i}{N_i} \quad (5)$$

よって, t 軸は式(5)によってびびり振動の位相差 ε へ変換できる.

本報で提案する加工面の起伏から切削時に生じたびびり振動の周波数と位相差を求める手法を下記にまとめる. 切削時にびびり振動が発生した際, びびり振動は加工面の起伏に明確に転写されることが予想される. このびびり振動によってできた模様から式(1)~(3)によって 2 次元離散データを作成し, 式(4)によって 2 次元離散フーリエ変換をおこなうことで, 2 次元周波数スペクトルを得る. 得られた周波数スペクトルは図 8 のようにびびり振動数 f_c , 位相差 ε でピークを示すと考えられる. そのため周波数スペクトルに現れたピークがどの周波数, どの位相差で表れているかを調べることで, びびり振動の振動数 f_c , 位相差 ε を求めることができると考えられる.

以上の方法によって加工面のびびり模様からびびり振動情報を求めることができる. ただし, 実際の加工面には切削加工面の粗さやうねりをはじめとした誤差要因が多く含まれている. そこで本研究では図 9 のようにびびり模様から時系列データを読み取る位置を少しずつ (図 9 中の offset 量) ずらし, 複数の 2 次元離散データ $s_p[t, i]$ ($p=1, 2, \dots, N$) を作成した. 複数の 2 次元離散データ $s_p[t, i]$ をそれぞれフーリエ変換し, 得られた周波数スペクトル $S_p[\tau, i]$ の平均を次式によって求めることで, S/N 比の改善を試みた.

$$\overline{|S[\tau, i]|} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N |S_p[\tau, i]| \quad (6)$$

本報ではこの平均化された周波数スペクトル $\overline{|S[\tau, i]|}$ をびびり振動解析に用いた. また, 少ないデータ点数でも周波数分解能を維持するためにゼロパディングと呼ばれる処理を導入した. ゼロパディング処理は解析データに 0 を加えることで解析上の周波数分解能を向上させる方法として知られている (木村他, 2014).

Fig. 7 Overview of two-dimensional discrete Fourier transform. When an image with a periodic pattern like stripes is analyzed, peaks appear in the frequency spectrum $|S[f_x, f_y]|$ with the period indicated by the stripes.

Fig. 8 Example of frequency spectrum $|S[\tau, i]|$ obtained from two-dimensional discrete data $s[t, i]$. The chatter mark included in the two-dimensional data $s[t, i]$ has strong periodicity as shown in Fig. 1, so it is expected to show a peak in the frequency spectrum $|S[\tau, i]|$.

Fig. 9 Reading method for two-dimensional discrete data used in this report. By shifting the reading position gradually, several two-dimensional data can be obtained from one processed surface image.

2・4 工作機械の送り運動を活用した画像解析による加工面画像の合成

エンドミル加工面の起伏を測定、解析することでびびり振動現象の解析に重要な周波数、位相差を求められることを前節で示した。加工面の起伏は種々の機上計測器を用いることでマシンバイスから被削材を取り外すことなく測定できるが、これらの測定器はいずれも高価である。そこで、本報ではデジタルカメラを用いて加工面を撮影し、撮影画像の輝度値から加工面の起伏を推定した。図10にびびり模様の画像を、輝度値を z 座標として3次元グラフで表現した例を示す。画像の輝度値からは、加工面起伏の高さ（図2の z 座標）を厳密に測定することはできないが、加工面にできた模様の周期性であれば解析可能であると考えられる。本報では上記の測定器の代替として工作機械と市販のデジタルカメラを利用した、撮影画像の実寸を求めるとともに、複数の画像から視野の広い1枚の画像を合成する下記の手法を加工面起伏の観察に用いた。

カメラを用いて、ある物体の寸法を測定するには、測定対象物に設定された座標 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ （以下、ワーク座標系）と、撮影された画像の座標 $[u, v]^T$ （以下、画像座標系）の対応関係を求める必要がある。この対応関係は、カメラの座標校正をおこなうことで求められるが、校正器を用いてカメラ校正をおこなう場合、校正器に設定された座標系 $[X_c, Y_c, Z_c]^T$ （以下、校正器座標系）とワーク座標系 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ を一致させる必要があり、これには校正器を高い寸法精度で作成、設置しなければならない。そこで本報では、校正器とワーク座標系には初めからずれが生じているものとし、工作機械の送り運動を用いて、このずれを補正した。ただし、工作機械の運動精度は十分高いものとし、工作機械の座標系とワーク座標系は一致していると仮定した。平面の校正器を撮影し、校正器上の特徴点が画像座標でどこに写っているかの対応関係（図11）を求めることでホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_c$ が得られる。これにより、校正器平面上の任意の点を画像座標系にホモグラフィ変換することができる。ただし、このとき Z_c 座標は考慮していない。次にワーク-画像座標系のホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_w$ を求めるために、工作機械のテーブルに平面の校正器と被削材、主軸にデジタルカメラを取り付け、カメラを工作機械の送り運動によって図12のように移動させながら各位置で撮影をおこなった。図12では、座標原点が校正器と一致する座標系 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ と原点がカメラの送り運動に追従する座標系 $[X'_w, Y'_w, Z'_w]^T$ の2つのワーク座標系を定義した。この2つの座標系は図12における画像(0)においては全く一致する。区間Cの各撮影位置における校正器原点に注目すると、図12に示すようにカメラの姿勢および Z'_w 座標は一定であり、 X'_w, Y'_w 座標は送り運動によって一定間隔で移動しているため、各撮影位置の校正器原点を特徴点とした、座標系 $[X'_w, Y'_w, Z'_w]^T$ に沿った平面の校正器が得られることがわかる。したがって、各撮影画像における校正器原点の座標と各撮影位置の移動量の対応関係から、ワーク-画像座標系のホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_w$ が求められる。以上の方法から、それぞれのホモグラフィ行列を求めることで、各画像(i)の任意の点で次式が成り立つことがわかる。

$$[u \ v \ 1]^T = s_w \mathbf{H}_w [X_w - \Delta x_0^{(i)} \ Y_w - \Delta y_0^{(i)} \ 1]^T = s_c \mathbf{H}_c [X_c \ Y_c \ 1]^T \quad (7)$$

ただし、 s_w, s_c は倍率を示すスカラー量である。ここで、 $\mathbf{H}_c^{(i)}$ は撮影画像の枚数だけ得られるが、 $\mathbf{H}_w$ は1つしか得られないことに注意されたい。また、校正器座標系のワーク座標系に対するずれは次式によって補正できる。

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \end{bmatrix} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} \quad \left(\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{xx} & w_{xy} \\ w_{yx} & w_{yy} \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{W}$ は 2×2 の補正係数行列であり、校正器座標 $[X_c, Y_c]^T = [1, 0]^T, [0, 1]^T$ のときのワーク座標 $[X_w, Y_w]^T$ を式(7)からそれぞれ求めることで決定できる。すなわち次式が成り立つ。

$$[w_{xx} \ w_{yx} \ 1]^T = (s_c/s_w) \mathbf{H}_w^{-1} \mathbf{H}_c^{(i)} [1 \ 0 \ 1]^T + [\Delta x_0^{(i)} \ \Delta y_0^{(i)} \ 0]^T \quad (9)$$

$$[w_{xy} \ w_{yy} \ 1]^T = (s_c/s_w) \mathbf{H}_w^{-1} \mathbf{H}_c^{(i)} [0 \ 1 \ 1]^T + [\Delta x_0^{(i)} \ \Delta y_0^{(i)} \ 0]^T \quad (10)$$

式(9), (10)から補正係数行列 $\mathbf{W}$ の各成分を求めることで、式(8)から校正器座標系をワーク座標系へ補正することができる。式(9), (10)は各画像(i)で成り立つが、補正係数行列 $\mathbf{W}$ は一定であるため、本報ではすべての校正器-画像座標系のホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_c^{(i)}$ から補正係数行列 $\mathbf{W}$ を算出し、その平均を取った。

Fig. 10 Chatter mark image displayed in three dimensions (3D). The roughness of the machined surface is estimated from the brightness value of the image.

Fig. 11 Example of camera calibration method. Take a photograph of the calibrator and use the feature points to establish correspondence between the coordinate system of the photo and the coordinate system set of the calibrator.

Fig. 12 Panorama image creation using NC table and digital camera. In section C, take images of the shifted calibrator. This enables the deviation between the coordinate system set in the calibrator and the machine tool to be corrected. In section W, take images of the shifted the processed surface. The coordinate system of each this image can be transformed to the that of the machine tool. This makes it possible to unify the coordinate system and synthesize one high-quality.

上記によって、校正器座標をワーク座標へ補正することで、各画像に写る校正器からワーク-画像座標系のホモグラフィ行列 $H_w^{(i)}$ が求められる。この複数のホモグラフィ行列 $H_w^{(i)}$ から、Zhang によって考案された手法 (Zhang, 1998) (以下、Zhang のカメラ校正) によってカメラの各パラメータ A , $[R|t]^{(i)}$ を推定することで次式により校正器が写っている画像 (区間 C) の任意の点で Z_w 座標を考慮したワーク-画像座標系の変換が可能となる。

$$[u \ v \ 1]^T = s_w' A [R|t]^{(i)} [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T \quad (11)$$

ただし、行列 A は内部パラメータと呼ばれるカメラ固有のパラメータ、行列 $[R|t]^{(i)}$ は外部パラメータと呼ばれ、各画像撮影時のワーク座標系の原点に対するカメラの姿勢 (R : 向きを示す回転行列, t : 平行移動量) を示している。また、図 12 に示す撮影条件の場合、パラメータ A , R はほぼ一定であるため、カメラの位置 t がわかれば、校正器が写らない区間 W の画像でも式(11)による座標変換が可能となる。図 12 の画像(0)の撮影位置からワーク座標系において $[\Delta x_0^{(w)}, \Delta y_0^{(w)}, \Delta z_0^{(w)}]^T$ だけカメラを移動させたときのカメラ位置 $t^{(w)}$ は次式から求められる。

$$t^{(w)} = t^{(0)} - R \begin{bmatrix} \Delta x_0^{(w)} \\ \Delta y_0^{(w)} \\ \Delta z_0^{(w)} \end{bmatrix} \left(\because R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + t^{(0)} = R \begin{bmatrix} X_w + \Delta x_0^{(w)} \\ Y_w + \Delta y_0^{(w)} \\ Z_w + \Delta z_0^{(w)} \end{bmatrix} + t^{(w)} \right) \quad (12)$$

以上により、任意の撮影位置でのカメラパラメータの推定が可能になり、式(11)の座標変換を用いて、画像に写る加工面の実寸の計測が可能となる。ただし、画像座標系は 2 次元であるのに対し、ワーク座標系は 3 次元であるため、座標変換をおこなうには、ワーク座標系の 1 つが既知である必要がある。本報では、撮影前に被削材の突き出し量 (図 12 の l_w) をノギスによって測定し、カメラの座標変換精度に比べ加工面起伏は十分小さいと仮定することで、区間 W における Z_w 座標を常に l_w と置いた。座標変換を用いることで、各画像の座標系 (縮尺) をワーク座標系へ統一することができる。これによって、複数の画像をつなぎ合わせる事が可能となり、視野の広い 1 つの画像データに合成することができる。なお、複数の画像が重なった領域を合成する際は、各画素値の平均をとった。これにより、光沢や照明の当て方によってできる画像の明暗の偏りを均一にでき、加工面にできる模様が示す周期性の解析精度を向上させることができると考える。

3. 実験装置および実験方法

3・1 実験装置

工作機械は Accumill 4000 (DMG 森精機株式会社製), 工具ホルダは MEGACHUCK-BBT30-MEGA-10N-120 (大昭和精機株式会社製) を用いた. またエンドミルは WXL-2D-DE-8, WXL-2D-DE-10 (オーエスジー株式会社製) の 2 種類を使用した. 使用したエンドミルはいずれも 2 枚刃スクエアエンドミルである. 加工面画像の撮影には LG-1 (オリンパス株式会社製) を取り付けた Tough TG-5 (オリンパス株式会社製) を用いた. 撮影時に使用したカメラの諸元を表 1 に示す. なお, Tough TG-5 はマクロ撮影が可能な市販のデジタルカメラであり, LG-1 は近距離の撮影物を全方向から照らすことのできる照明アタッチメントである. カメラ校正用の校正器にはコンピュータソフトを用いて作成・印刷したサークルグリッド (図 13) を使用した. 校正器マーカの色には, 誤検出を防ぐため周囲に無い彩度の高い色を採用した.

3・2 切削実験

切削実験の概要を図 14 に示す. 矩形の被削材を側面切削することでびびり振動を発生させ, その際の z 方向の工具ホルダの変位を渦電流型変位計, 切削抵抗を工作機械のテーブルに取り付けられた動力計 (日本キスラー株式会社製 9272) で測定した. 実験時の切削条件は表 2 に示す. 実験 1 では工具に WXL-2D-DE-8 (工具径 $D = 8$ [mm]), 実験 2 では WXL-2D-DE-10 (工具径 $D = 10$ [mm]) を使用した. また実験 3 は実験 1 と同じ切削条件から主軸回転数を変えて, びびり振動を抑えた切削をおこなった. なお, 工具突き出し量は 32 mm に統一した. さらに, 実験 3 では切削前に図 15 に示すような静剛性試験をおこなった. エンドミル刃先に被削材をテーブル送りによって押し当てたときの変位を工作機械の指令値, 負荷を動力計によって測定した. 図 15 に示すように実際の切削に近い状態で測定するために, 被削材の中央あたりで工具刃先が被削材に接触するように工具の角度を調節した.

3・3 撮影実験

切削実験で得られた加工面を 2・4 節の方法によって撮影した. 撮影実験時の様子を図 16 に示す. 加工面は加工後にエアブローを用いて表面に付着した切粉を除去し, 撮影した. また切削実験で用いた動力計にはカメラ校正用の校正器を貼り付ける十分な間隔が無かったため, 被削材はマシンバイスによって切削実験と同じ突き出し量 (図 12 の $l_w = 40.0$ mm) で工作機械のテーブルへ固定した. デジタルカメラはジグを介して主軸側面に縦向きで固定し, 撮影照明には LG-1 を用いた. 図 12 に示す送り運動を 1.000 mm 間隔でおこない (図 12 における隣り合う撮影位置の距離が 1.000 mm となる), カメラのインターバル撮影機能を用いて各位置を撮影した. 得られた複数の撮影画像から 2・4 節の方法によって, 広視野の加工面画像を作成した. ただし, カメラの向き R がほとんど変化しない図 12 の画像だけでは, ホモグラフィ行列から各カメラパラメータを精度よく分解できなかったため同じ撮影設定 (内部パラメータ A が一定) で様々な角度から校正器を撮影した画像を事前に 20 枚用意し, 撮影実験の区間 C で得られた画像に加えて, 各カメラパラメータを求めた. 撮影画像の一例を図 16 の (b)-(d) に示す.

Table 1 Camera specifications.

Image size (Height × width) [pixel]	4000×2672
Shutter speed [s]	1/40
F-number [-]	3.2

Table 2 Cutting conditions.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
Spindle speed S [min^{-1}]	3000	2850	3300
Feed per tooth f_t [mm/tooth]	0.15		
Axial depth of cut A_d [mm]	10		
Radial depth of cut R_d [mm]	1.0		
Diameter of end mill D [mm]	8	10	8
Projection length of end mill l [mm]	32		
Projection length of workpiece l_w [mm]	40		
Helix angle of end mill θ [deg.]	30		
Coolant type	Dry		
Workpiece material	S50C

Fig. 13 Circle grid calibrator used for camera calibration. To prevent false detection of the marker, the color of the marker is set to bright blue, which is not used elsewhere. As the captured image is vertically long, the shape of the calibrator is also vertically long.

Fig. 14 Schematic of cutting experiment. By side cutting a rectangular workpiece, chatter vibration was generated, and the vibration was measured by a displacement sensor. To confirm the robustness of the proposed method, cutting experiments with two types of tools were performed.

Fig. 15 Schematic of static stiffness test. The static rigidity of the tool was measured using the machine tool command value and load when the workpiece was pressed against the cutting edge of the tool by table feed. Furthermore, to measure near the actual cutting, the angle of the tool was adjusted so that the cutting edge of the tool contacted the workpiece around its center.

(a) Positional relationship of each device during the experiment.

(b) An example of an image taken of the calibrator from various angles.

(c) An example of an image taken in section C.

(d) An example of a processed surface image taken in section W.

Fig. 16 (a) State of the photographing experiment. The calibrator and the workpiece were mounted in a mechanical vise and the camera was mounted vertically on the side of the spindle via a jig. (b) and (c) show images used for coordinate calibration, and (d) shows an example of a processed surface image used for a panoramic image.

4. 実験結果および考察

4・1 変位センサによる工具振動の解析

図 17 に切削実験 1 によって得られた実加工中の工具ホルダ変位の時系列データの一部を示す。変位の波形には切削時（刃先が被削材に接触中）、非切削時（刃先が空転中）が切削周期で表れており、エンドミルの断続切削をよく表していることがわかる。また断続切削によるたわみとは別に、切削時に高い周期で振動が見られ、切削時にびびり振動が生じていたことが確認できる。エンドミルによる断続切削は振動条件が時間変化するため、加工時の振動は非定常となることが予想される。そのため、図 17 に示す振動データから、後述する振動条件が比較的一定の切削時のみを抜き出し、フーリエ変換による周波数解析をおこなった。得られた切削実験 1 の周波数スペクトルを図 18 に示す。なお、周波数解析には式(4)のように平均値からの偏差を用いた。また、データ点数は、周波数分解能が 10 Hz になるように、ゼロパディング処理によって 2560 点に拡張した。周波数スペクトルに 1 つの大きなピークが表れていることが見て取れる。本報で用いた切削条件では工具ホルダが支配的に振動すること、その自由振動時の固有振動数は約 900 Hz であることが先行研究（廣垣他，2017）で確認されており、非切削時の振動数と一致した。切削時の周波数スペクトルである図 18 は 990 Hz でピークを示していたことから、切削時に生じたびびり振動の振動数はおよそ 1000 Hz であると考えられる。なお、工具を丸棒の片持ち梁とモデル化して、固有振動数を概算したところ、曲げ 1 次固有振動数はおよそ 6900 Hz となったが、本報でも図 17, 18 に示すように 1000 Hz 付近のびびり振動が支配的であったため、1000 Hz 付近の振動に注目して解析をおこなった。同様に変位センサの波形から判断した切削時のみの周波数解析を全域に遂行した結果を図 19 に示す。また切削実験 2 についても同様の処理をおこなった。ただし、変位の時系列データの波形から切削時を判定し、データ切り出す処理は手作業でおこなったため、切削時の周波数解析は一定間隔ごとにおこなった。また、実験 2 の切削では、びびり振動は前半であり生じておらず、時系列データにはびびり振動を示す波形が見られなかったため、解析範囲はびびり振動が生じ始めた図 19 の 2 s 以降とした。図 19 から時間変化によるびびり振動数の変動はあまりなく、加工中に生じていたびびり振動の振動数は概ね一定であったことがわかる。

Fig. 17 Part of time-series data of tool holder displacement obtained by Exp. 1. The displacement waveform represents intermittent cutting with the end mill. Moreover, chatter vibration occurred during cutting.

Fig. 18 Frequency spectrum of vibration during cutting in Exp. 1. One large peak is observed in the frequency spectrum. Previous studies have shown this peak represents chatter oscillations.

(a) Exp. 1

(b) Exp. 2

Fig. 19 Time series data of the displacement sensor and chatter frequency in each experiment. Chatter frequency does not considerably fluctuate with time. It was found out that the frequency of frequent vibrations that occurred during processing was constant. However, in the first half of Exp. 2, significant chatter vibrations did not occur.

4・2 工作機械のテーブル位置情報を用いた画像合成

撮影実験では、図 12 の区間 C で 15 枚、区間 W で 50 枚、カメラパラメータの推定精度を向上させるために事前に撮影した 20 枚の画像が得られた。区間 C の画像と事前に撮影した画像から、2・4 節で示した方法によって区間 W で撮影した加工面画像を合成した。なお、事前に撮影した画像の校正器座標系は、区間 C で求めた補正係数行列 $\mathbf{W}$ によって補正した。区間 W の各画像を 1 ピクセルごとに式(11)で座標 $[X_w, Y_w]^T$ に変換し、座標系を $[u, v]^T = [0.01X_w, 0.01Y_w]^T$ と設定して新たに作成した画像へ転写した結果を図 20 に示す。図 20 から合成画像にはゆがみや不連続な箇所がなく、複数の画像を精度よく合成できていることがわかる。また、図 16-(d)に示す元の画像と比べると光沢などが抑えられ、照明条件の影響を低減できていることも図 20 から見て取れる。図 20 から加工面にはびびり模様がはっきりと表れていることが見て取れる。ただし、4・1 節で述べたように切削実験 2 の切削では、びびり振動は前半であり生じていないことが加工面からも確認できる。また、本報では手軽、安価な手法を重視し、加工面画像から加工面の起伏を推定したが、レーザ顕微鏡等の 3 次元測定器を用いれば、より微細な加工面起伏の測定が可能となると考える。

被削材の縦幅をマイクロメータによって手作業で測定した値と、図 20 に示す画像のピクセル値から測定した値を比較した結果を表 3 に示す。なお、どちらの計測も 5 箇所の寸法を測定し、その平均値を取った。本報の撮影実験から測定した値はマイクロメータと概ね一致していることがわかる。2・4 節で示した手法のびびり振動数の測定精度（理論分解能） Δf_c は加工面の寸法測定精度と切削条件に依存し、次式で計算できる。

$$\Delta f_c = \frac{V}{g} - \frac{V}{g + \Delta g} = \frac{V\Delta g}{g(g + \Delta g)} \quad (13)$$

ただし、 g は図 1 に示す、加工面にできたびびり模様の縦間隔である。表 3 に示すマイクロメータと撮影画像の測定値の最大差から、本報で用いた画像の寸法測定精度 Δg は 0.02 mm 程度であると考えられる。また、切削実験 1 で生じたびびり模様の縦間隔 g は 2.00 mm 程度であった。これらの結果を基に式(13)を用いると実験 1 で生じたびびり振動数の分解能 Δf_c は 11 Hz となった。なお、実験 2 のびびり振動数の分解能 Δf_c は 10 Hz であった。以上の結果から、工作機械の送り運動と市販のデジタルカメラを用いた撮影方法は、現場でも容易に視野の広い、かつ実寸の加工面画像が得られることがわかった。

Table 3 Comparison of values obtained by manual measurement and proposed automatic measurement.

Experiment	Measured value by micrometer [mm]	Measured value by composite image [mm]
Exp. 1	10.06	10.05
Exp. 2	10.07	10.09

(a) Processed surface obtained by Exp. 1.

(b) Processed surface obtained by Exp. 2.

Fig. 20 Result of combining multiple images by the method described in Section 2. 4. The composite image has few distortions and discontinuities, and multiple images can be combined accurately. In addition, compared to the original image, it can be seen that gloss and the like are suppressed and the influence of the illumination conditions can be alleviated. The chatter mark appears clearly, except in the first half of the processing of Exp. 2.

4・3 加工面に現れる模様の発生メカニズム

図 21 に加工面の拡大図を示す. 加工面にはびり模様とは別に工具送り方向に沿った横線が生じていることが図 21 から見て取れる. 後述の理由から, この工具送り方向に沿った線を切削面積変動線と呼ぶこととする. この切削面積変動線の発生原因を考察する. 図 22 に切削実験 3 によって得られた加工面画像を示す. 図 22 から切削面積変動線はびり模様の有無に関係なく, 加工面に生じていることが見て取れる. 次にエンドミルによる側面切削の切削モデルを図 23 に示す. エンドミルの刃が同時に切り込んでいる領域の面積 (以下, 切削面積) は図 23-(b), (c) では一定であるが, 図 23-(d), (e) では点 B が被削材の端に達し, 図 23-(b), (c) に比べ小さくなることがわかる. 切削面積が減少すると切削抵抗および工具たわみも減少するため, 図 23-(d), (e) の半径方向切込みは, 図 23-(b), (c) よりも深くなると考える. なお, 切込み始めである図 23-(a) の切削面積も図 23-(b), (c) に比べ小さいことがわかるが, 図 3 に示すように被削材に加工面として残るのは僅かな領域 L_0 のみであるため, 大部分が加工面から除去されていると考える. 以上から, 切削面積変動線は, それまで一定であった切削条件が, 被削材の境界条件によって変化を始めた痕跡であると考えられる.

Fig. 21 Enlarged view of a part of the chatter mark shown in Fig. 20-(a). Apart from the chatter mark on the processed surface, there is a horizontal line along the tool feed direction. In addition, it can be seen that undulation occurs in the chatter mark near the fluctuation line of the cutting amount.

Fig. 22 Processed surface image obtained by cutting Exp. 3. Boundaries along the tool feed direction and axial direction were observed on the machining surface. Two boundaries were measured from the image transferred to this world coordinate. The boundary along the tool feed direction appeared at 4.37 mm and the axial boundary appeared at 2.65 mm. These two lines indicate that the cutting conditions, which had been constant until their appearance, had begun to change according to the boundary conditions of the workpiece.

Fig. 23 Cutting model of side cutting by the end mill. The cross-sectional cutting area of the end mill is constant in (b) and (c); however, in (d) and (e), it can be seen that point B reaches the end of the workpiece and is smaller than that in (b) and (c). The area of (a), which is at the beginning of cutting, is also smaller than that of (b) and (c). However as shown in Fig. 3, only a small area around L_0 remains on the workpiece. Most of the cut trace in (a) are removed from the processed surface.

図 24 に示す幾何学モデルを用いて、図 23 に示す切削状況がどの位置、時間で発生しているかを予想する。図 23-(a), (d) に示す切削状況では、工具たわみが時間とともに変化するため厳密な残留領域および切削終了位置を求めるのが難しい。そのため、本報では図 24 に示すようにエンドミルの最下点を残留領域、切削終了位置として近似した。図 23-(a) に示す切削状況、すなわち被削材下端でエンドミル刃先が図 24 の切削開始角度 θ_{begin} [rad] から終了角度 θ_{end} [rad] に達するのにかかる時間 t_{begin} [s] は次式で表せる。

$$t_{\text{begin}} = \frac{60}{2\pi S} (\theta_{\text{end}} - \theta_{\text{begin}}) \approx \frac{60}{2\pi S} \cos^{-1} \frac{D - 2R'_d}{D} \quad (14)$$

ただし、 R'_d [mm] は図 23-(b), (c) に示す切削状況における工具たわみを考慮した半径方向切込み量である。図 23-(c) に示すように、点 B が被削材の上端に達し、切削面積が減少を始める加工面の位置は点 A と被削材上端の距離が図 23 の l_{AB} [mm] となったときである。 l_{AB} は次式で計算できる (大塚他, 2001)。また、この位置は切削面積変動線の発生位置と一致すると考えられる。

$$l_{AB} \approx \frac{D}{2 \tan \theta} \cos^{-1} \frac{D - 2R'_d}{D} \quad (15)$$

図 23-(d) のように切削面積が減少を始め、一刃の切削が終わるまでの時間 t_{end} [s] は t_{begin} と一致する。これは式(15)を図 2 の V_s で割ることで確認できる。図 23-(b), (c) に示すように切削面積が一定の領域 l_s [mm] は、図 23 からわかるように軸方向切込み量 A_d [mm] から l_{AB} を引いた値となる。また、切削面積が一定の切削時間 t_{mid} [s] は l_s を図 2 の V_s で割ることで得られる。なお、4・1 節で述べた振動条件が比較的一定の区間はこの切削時間 t_{mid} を指す。図 23-(e) に示すように点 B が被削材の左端に達し、切削面積が減少し始める領域は図 24 の関係から次式となる。なお、図 23-(e) は一刃の切削時に境界条件が変化することが無いため、切削終了位置を一刃あたりの工具送り量 f_t を用いて近似した。

$$a = \frac{\sqrt{D^2 - (D - 2R'_d)^2}}{2} + \frac{f_t}{2} \quad (16)$$

図 25 に実験 3 の切削時に図 14 に示す z 方向にかかった負荷 (以下、半径方向負荷)、図 26 に静剛性試験の結果を示す。図 23-(b), (c) 切削時の半径方向負荷を推定し、静剛性試験の結果から半径方向切込み量 R'_d を求めたところ、 $R'_d = 0.78$ [mm] となった。ただし、静剛性試験における工具刃先と被削材の接触点での接触変形は、工具ホルダおよび工具の曲げたわみに比べ十分小さいものと仮定して評価している。この R'_d の値から求めた加工面に現れる模様の各パラメータは $l_{AB} = 4.40$ [mm]、 $a = 2.45$ [mm] となり、図 22 に示す画像から測定した値と概ね一致していた。さらに実験 3 の切削時における 1 刃分の半径方向負荷と、 R'_d を基に上記の方法で求めた各切削時間を図 27 に示す。図 27 から上記の各パラメータが半径方向負荷の波形に対しても概ね一致していることがわかる。以上の結果から図 23, 24 に示す切削状況のモデルは妥当であると考えられる。

Fig. 24 Geometrical relationships in the cutting model. R'_d is the Radial depth of the cut considering the tool deflection in the cutting condition shown in Fig. 23-(b), (c). In the cutting condition shown in Fig. 23-(a), (d), it is difficult to determine the exact remaining area because tool deflection changes with time. Therefore, the lowest point of the end mill is approximated as the residual area.

Fig. 25 Load applied in the z direction shown in Fig. 14 during cutting in Exp. 3 (hereinafter called radial load). The radial load in section t_{mid} was always approximately 430 Hz.

Fig. 26 Tool deflection predicted from static rigidity test results and cutting force. The tool deflection predicted from cutting resistance is 0.22 mm.

Fig. 27 Radial load in Exp. 3 and time of each cutting situation predicted from cutting conditions. It can be seen that the calculated cutting times and the waveforms of the radial load roughly match.

4・4 びびり模様の解析

図 20 に示す加工面画像から 2・3 節で示したびびり模様解析によってびびり振動情報を求めた。4・3 節で示したように切削面積が一定、すなわち切削条件が安定している加工面領域は、図 24 の l_s が示す領域である。また、切削面積変動線の上方でびびり模様にうねりが生じていることが図 21 から見て取れる。2 次元離散フーリエ変換はうねりを含む縞模様から近似した縞（2 次元の正弦波）を解析するが、縞模様のうねりが激しいと周期性が目立たなくなり解析精度が低下すると考えられる。したがって、びびり模様の解析範囲は図 20 の加工面画像の下半分に限定した。本報では、まず切削実験 1 のびびり模様について解析した。解析範囲を図 28-(a)の領域に限定し、図 20-(a)の画像から作成した 2 次元離散データ $s_p[t, i]$ の一例を図 28-(b)に示す。工具送り方向の解析範囲は幅を広くすると、加工面から取得する時系列データが増え、誤差要因の影響が少ない結果が得られる反面、時間変化に鈍くなり、幅を狭くするとその逆の性質を持つトレードオフの関係を持つ。本報では工具送り方向と軸方向の解析範囲を一致させた。図 28-(b)から、2 次元離散データ $s[t, i]$ でもびびり模様の周期性が維持されていることがわかる。図 28-(a)に示す領域に対し、2・3 節で示した 2 次元離散フーリエ変換をおこなった。得られた 2 次元周波数スペクトル $|S[\tau, i]|$ を図 29 に示す。なおデータ点数は、周波数分解能が 10 Hz、位相差の分解能が 0.5 deg. になるように、ゼロパディング処理によって拡張した。また、図 9 に示す offset 量は 0.01 mm とした。切削実験 1 の工具送り量 f は 0.15 mm/tooth であるため、15 個の周波数スペクトル $S_p[\tau, i]$ の平均値を取っている。周波数スペクトルには 2 つの大きなピークが見られた。ただし、図 29 のピーク P' はピーク P のちょうど 2 倍の周波数、位相差で表れていたことから、ピーク P の高調波であると考えた。図 29 のピーク P がどのような縞を示しているかを確かめるために、ピーク P 以外の周波数スペクトルの成分を 0 にし、逆 2 次元離散フーリエ変換をおこなうことで再現した画像を図 30 に示す。図 30 からピーク P はびびり模様の縞を表していることが確かめられる。以上の処理によってびびり模様が示す周波数スペクトルのピークを確認し、そのピークが表れる位置からびびり振動情報を解析した。変位センサを解析することで得られたびびり振動数と比較するため、解析範囲を 0.5 mm ずらしながら、加工面全域（図 24 に示す領域 a を除く）を解析し周波数スペクトルのピークからびびり振動の振動数 f_b 、位相差 ε を求めた結果を図 31 に示す。なお、グラフでは加工面の位置を工具送り速度から切削時間に換算している。切削実験 1 の変位センサと加工面画像から解析したびびり振動数の相対誤差は平均で 2.8%、最大でも 4.0% と高い精度で一致していた。また、切削実験 2 の変位センサと加工面画像から解析したびびり振動数の相対誤差は平均で 2.2%、最大で 3.7% であった。位相差 ε は切削実験 1 の平均が -64.3 deg.、実験 2 の平均が -96.5 deg. であった。

図 1 に示す画像の縦横間隔 g, e を目視の手作業で読み取った場合には、センサから検出された振動数との差は平均で 5%、最大 30% 程度のばらつきが生じることが判明（廣垣他, 2017）している。その場合でもびびり振動の抑制のための安定ポケットの探索が可能であった。それに対し、提案する自動検出の手法はさらにびびり振動数の逆解析の手法としての精度の向上が確認でき、今後の現場での安定ポケット探索のための能率向上に向けた応用が期待できるものと考えられる。

(a) Area used for chatter vibration analysis (unit : [mm])

(b) An example of $s[t, i]$ read from the area shown in (a).

Fig. 28 Example of analysis of frequent patterns obtained in Exp. 1. The analysis range in the tool axis direction was limited to 5.0 mm from the lower end. The analysis range of the tool feed direction was the same as that of the axial direction. The periodicity of the chatter was maintained at $s[t, i]$.

Fig. 29 Frequency spectrum obtained from the processed surface image of Exp. 1. The frequency spectrum that took the average of the absolute value of the spectrum $S[\tau, i]$ obtained by Fourier-transform of each of the 15 data elements $s[t, i]$ is illustrated. Two large peaks were seen.

Fig. 30 Image created by setting the components of the frequency spectrum other than the peak to be examined to 0 and performing an inverse 2D discrete Fourier transform. Peak P was formed by the chatter mark, and peak P' is considered to be a harmonic of peak P .

(a) Exp. 1

(b) Exp. 2

Fig. 31 Graph comparing the chatter vibration information obtained from the image analysis of the chatter mark and the vibration analysis of the displacement sensor. The relative error of Exp. 1 is 2.8 % on average and 4.0 % at maximum, and the relative error of Exp. 2 after 2 s was 2.2 % on average and 3.7 % at maximum.

5. 結 言

本報は、従来の手法では現場環境下で撮影された画像に対して安定した結果を得られなかったびびり模様の周波数解析に、2次元離散フーリエ変換による画像解析を導入することで、従来の手法に比べ、ロバスト性の高い自動検出手法を提案した。結果は次のとおりである。

1. 2次元離散フーリエ変換によるびびり模様の解析は、切削加工面の粗さやうねりなどが混在するびびり模様から、びびり模様が示す周期性を精度良く自動検出手法として、有効であることが判明した。
2. 市販のデジタルカメラと工作機械の送り運動を用いた画像合成で、現場でも容易にびびり振動の解析に十分な、視野の広い加工面画像が得られることがわかった。
3. 2次元離散フーリエ変換を応用したびびり模様解析は、実加工中における変位センサの振動解析の結果とよく一致しており、エンドミル加工時におけるびびり振動の状態推定手法となる可能性を示すことができた。

文 献

- 土井静雄, 加藤仁, 旋削主軸に原因するびびりの発生(第3報), 日本機械学会論文集, Vol. 20, No. 90 (1953), pp. 61-65.
- Deshpande, N. and Fofana, M. S., Nonlinear regenerative chatter in turning, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 17 (2001), pp. 107-112.
- Guillem, Q. and Joaquim, C., Chatter in machining processes: A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50 (2011), pp. 363-376.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 塩田亮祐, 青谷凱斗, エンドミル加工面のびびり振動模様に基づく現象の逆解析と安定ポケットの探索方法, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 848 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00362.
- 金子亨, 佐藤壽芳, 谷泰弘, 大堀真敬, 旋削時自励振動と被削面の振動こんについて, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 50, No. 454 (1984), pp. 961-969.
- Kim, S. J., Lee, H. U. and Cho, D. W., Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47 (2007), pp. 1827-1838.
- 木村雪秀, 久代育生, 後藤武志, 国弘洋司, 多重正弦波舵角入力による車両運動の周波数応答解析の一考察, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No.6 (2014), pp.1035-1040.
- Kovacic, I., The chatter vibrations in metal cutting - theoretical approach, Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 5 (1998), pp. 581-593.
- 大塚裕俊, 垣野義昭, 松原厚, 中川平三郎, 廣垣俊樹, 焼入鋼のエンドミル加工に関する研究(第2報), 精密工学会誌, Vol. 67 No. 8 (2001), pp. 1294-1298.
- 鈴木教和, 切削加工におけるびびり振動, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 3 (2010), pp. 280-284, 404-408.
- 田中久隆, 小幡文雄, 足森雅己, 松原十三生, エンドミル加工の再生びびり振動に関する研究(第1報), 精密工学会誌, Vol. 62, No. 8 (1996), pp. 1136-1140.
- 吉田一郎, 表面粗さ -その2 ちょっとレアな表面性状パラメータの活用方法-, 精密工学会誌, Vol.79, No.5(2013), pp.405-409.
- Zhang, Z., A flexible new technique for camera calibration, Microsoft Research, Microsoft Corporation, One Microsoft Way Redmond, WA 98052, Technical Report MSR-TR-98-71 (1998)(last updated 2008).

References

- Doi, S. and Kato, S., On the cause of chatter vibration of main spindle of lathe(third report), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 20, No. 90 (1953), pp. 61-65(in Japanese).
- Deshpande, N. and Fofana, M. S., Nonlinear regenerative chatter in turning, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 17 (2001), pp. 107-112.
- Guillem, Q. and Joaquim, C., Chatter in machining processes: A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50 (2011), pp. 363-376.
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Shiota, Y. and Aotani, K., Control method of chatter vibration based on inverse analysis of end milling chatter mark, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.83, No.848 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00362.

- Kaneko, T., Sato, H., Tani, Y. and O-hori, M., Sensakuzizireisindou to hisakumen no sindoukonntuite, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 50, No. 454 (1984), pp. 961-969 (in Japanese).
- Kim, S. J., Lee, H. U. and Cho, D. W., Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47 (2007), pp. 1827-1838.
- Kimura, Y., Kushi, I., Goto, T. and Kunihiro, Y., Consideration of Vehicle Frequency Response Analysis with Multiple Sinusoidal Steering Input, Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 45, No.6 (2014), pp.1035-1040 (in Japanese).
- Kovacic, I., The chatter vibrations in metal cutting - theoretical approach, Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 5 (1998), pp. 581-593.
- Ohtsuka, H., Kakino, Y., Matsubara, A., Nakagawa, H. and Hirogaki, T., A study on end milling of hardened steel (2nd report), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 67, No. 8 (2001), pp. 1294-1298 (in Japanese).
- Suzuki, N., Chatter vibration in processing, Transactions of the JSPE, Vol. 76, No. 3 (2010), pp. 280-284, 404-408 (in Japanese).
- Tanaka, H., Oba, H., Asimori, M. and Matsubara, J., Research of chatter vibration in end-mill processing (The 1st news), Transactions of the JSPE, Vol. 62, No. 8 (1996), pp. 1136-1140 (in Japanese).
- Yoshida, I., Surface roughness -Part 2, how to use and clues of the surface texture parameters-, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.79, No.5(2013), pp.405-409 (in Japanese).
- Zhang, Z., A flexible new technique for camera calibration, Microsoft Research, Microsoft Corporation, One Microsoft Way Redmond, WA 98052, Technical Report MSR-TR-98-71 (1998) (last updated 2008).