

令和元年6月14日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05856

研究課題名(和文)被削材強制加振による時間遅れ量変動を利用した再生びり振動抑制法の開発

研究課題名(英文) Development of regenerative chatter vibration control method using time delay variation by workpiece excitation

研究代表者

中野 寛 (NAKANO, YUTAKA)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：70433068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、エンドミル加工中に加工精度の低下、工具摩耗や破損など様々な問題を生じる再生びり振動の新たな抑制対策を提案することである。具体的には、被削材を加振し、切削加工中の切れ刃と被削材間の相対速度を変動させ、切れ刃通過周期間の時間遅れ量を周期変動させることで、時間遅れに起因して発生する再生びり振動の抑制を試みた。まず、被削材加振によって時間遅れ量変動する遅延微分方程式系の安定解析を行ない、抑制効果の高い加振条件を明らかにした。次に、切れ刃の接線方向速度を変動させて時間遅れ変動切削を実現する加振ステージを設計、製作し、切削加工実験を行い、再生びり振動の抑制効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、被削材を高周波で加振し、切れ刃と被削材の相対速度を変動させることで、従来の回転数変動切削法では不可能であった非常に高い時間遅れ変動周波数(約120Hz)でも再生びり振動を効果が得られることを明らかにした。機械部品の加工品質や加工効率低下の要因の1つである再生びり振動の新たな抑制技術を提供することで、製品の高付加価値化や低コスト化に寄与できると考える。

研究成果の概要(英文)：The present study is to propose a countermeasure against regenerative chatter that causes various problems such as reduction of machining accuracy, tool wear and breakage during milling process. We consider that a periodic time delay fluctuation by exciting a workpiece in tangential direction of a cutting edge in synchronization with the tool rotation can control regenerative chatter. First, the excitation condition with a high regenerative chatter suppression effect was derived by performing the stability analysis of the delay oscillator with time periodic delay. Next, the active workpiece holder to achieve a time-delayed fluctuation cutting by varying the tangential velocity of the cutting edge was developed. And then, the suppression effect of regenerative chatter was confirmed by performing the cutting test using the developed the active workpiece holder.

研究分野：工学

キーワード：自励振動 びり振動 エンドミル加工 被削材強制加振

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

タービン翼や薄肉筐体部品など剛性の低い材料を切削加工する際、再生びり振動が発生すると、加工精度の低下や工具の破損などを生じるため問題となる。切り込み量を減らして加工することで、再生びり振動の発生を回避できるが、加工効率が低下する。再生びり振動抑制対策として、加工する材料(被削材)に動吸振器を取り付け、減衰を付加することで再生びり振動の発生限界となる切込み深さを向上する方法がある。動吸振器のパラメータを適切に設定することで、大きな発生限界向上が期待できるが、加工経路に干渉しないように動吸振器を取り付ける必要があり、また、加工が進むにつれて被削材の剛性が低下するため、振動数に応じて動吸振器の固有振動数を調整する必要がある。一方、切削中に主軸回転数を周期的に変動させることで、再生びり振動の発生要因となる時間遅れ量を変動させて、振動を抑制する加工法がある。再生びり振動の発生限界線図を予測し、回転数の変動幅と変動周波数を適切に調整することで、再生びり振動の発生限界となる切込み深さを向上できる。しかし、回転数変動切削は、高速回転域での再生びり振動抑制効果は低いことが知られている。回転数の変動周波数は、主軸の動特性によって数 Hz 以下に限定されており、より高い変動周波数における再生びり振動抑制効果については明らかになっていない。そこで本研究では、回転数を変動させるのではなく、被削材を2方向に強制加振し、切削点における工具切れ刃と被削材の接線方向の相対速度を変動させることで、主軸回転速度を変えないこと、時間遅れ量を高周波で変動させて再生びり振動を抑制する対策を提案した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、切削中に被削材を強制加振して時間遅れ量を変動させるシステムを構築し、実験及び解析を行なって、従来の回転数変動切削よりも高い変動周波数で時間遅れ量を変動させたときの再生びり振動抑制効果を検証することである。実験と解析を行い、再生びり振動の発生限界となる切込み深さを最大にする最適な時間遅れ量変動条件(変動周波数や変動振幅)を明らかにする。具体的には、研究期間内に以下のことを明らかにする。

(1) 時間遅れ量の変動を考慮した遅延微分方程式系の解析モデルを構築し、安定解析および数値シミュレーションを行ない、再生びり振動の発生限界となる切込み深さを最大にする時間遅れ量変動周波数や変動振幅を明らかにする。

(2) 被削材の送り方向とその直交方向の2方向を工具の回転と同期して加振し、切れ刃の接線方向相対速度を変動させる加振装置を製作し、解析で求めた最適な時間遅れ量変動周波数や変動振幅で加振しながら切削加工実験を行ない、再生びり振動の抑制効果を実験で検証する。

3. 研究の方法

(1) 被削材加振による時間遅れ量変動切削モデルの構築と数値解析

図1に示すように、工具の回転に同期して被削材を2方向に加振し、切削中の切れ刃の接線方向相対速度を変動させるモデルを考えた。加振時の切れ刃回転角の変動量と加振振幅、加振周波数の関係式を導出し、被削材2方向加振時の時間遅れ変動量の近似式を求めた。

次に、工具主軸系の剛性が被削材より十分高い場合を考え、図2に示す1自由度被削材振動モデルに被削材加振によって時間遅れ量変動するときの切削力を考慮した。被削材2方向加振によって、切れ刃回転角の変動を考慮して導出した加振振幅と加振周波数の関係式で表された周期的に時間遅れ項が変動する遅延微分方程式で表される運動方程式を導出した。

次に、時間遅れ量が周期的に変動する遅延微分方程式系の安定解析を行ない、加振時と非加

振時のびり振動発生限界線図を比較した．具体的には，切削周期と加振周期の最小公倍数となる周期間で時間を離散化し，時間遅れ項や工具回転に伴い時間変動する切削力の方向係数を近似して，1 周期間の状態遷移行列の特性乗数を近似的に求める semi-discretization 法を用いて，被削材強制加振時の安定判別を行ない，再生びり振動発生限界線図を導出し，再生びり振動発生限界切込み深さを最大にする時間遅れ変動周波数および変動振幅を求めた．また，周期変動する時間遅れ量を有する遅延微分方程式で表される運動方程式を直接数値積分し，再生びり振動が発生する条件（主軸回転数と軸方向切込み深さ）において，接線方向加振時と非加振時の時刻歴応答を求め，両者の定常振幅の RMS 値を比較し，振幅低減率を求めた．

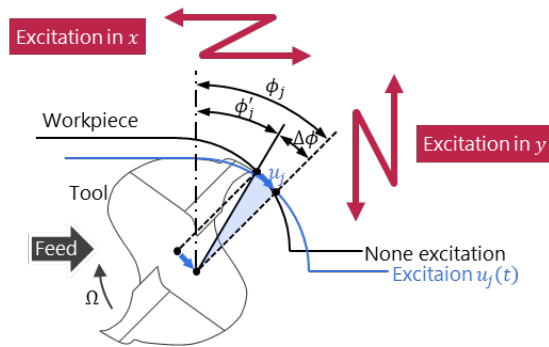


図1 回転同期した被削材加振時の回転角

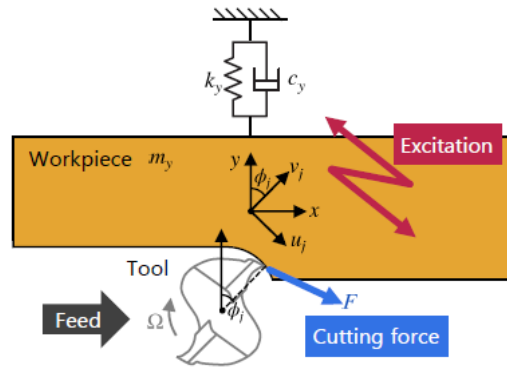


図2 解析モデル

(2) 被削材加振ステージの設計・製作

被削材を強制加振するために，図3に示すような加振ステージを設計・制作した．被削材はステージ中央部に取り付け，この中央部はx方向とy方向に弾性ヒンジを利用して支持されており，x方向とy方向に独立して変位できる構造となっている．加振変位はx方向とy方向にそれぞれ2個ずつ配置された積層型ピエゾアクチュエータで与える．次に，工具の回転に同期して切れ刃接線方向に加振するために，図4に示すようにレーザーセンサを用いて工具の回転角を検出し，切れ刃の切込み開始に同期してx方向とy方向の加振振幅を変動させて加振することで，切れ刃と被削材の接線方向相対速度を変動させるシステムを実現した．

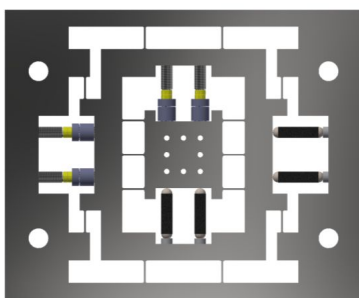


図3 被削材加振ステージ

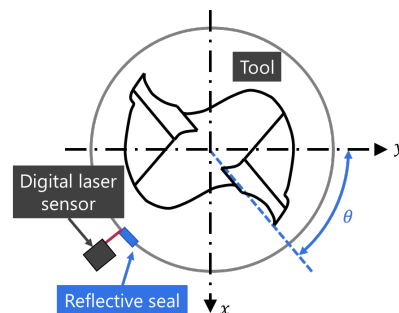


図4 ツールホルダ溝部と切れ刃の位置

(3) 時間遅れ量変動切削による再生びり振動抑制効果の検証

図5に示すように加振ステージ中央部に平行板バネを介して快削黄銅の被削材を取り付け，2枚刃のエンドミルを用いて上向き削りの側面加工を行った．被削材の直下と加振ステージにそれぞれ加速度計を取り付け，切削の途中から切れ刃接線方向に加振したときの被削材の振動振幅を測定することで，再生びり振動発生中の振幅低減率を検証した．

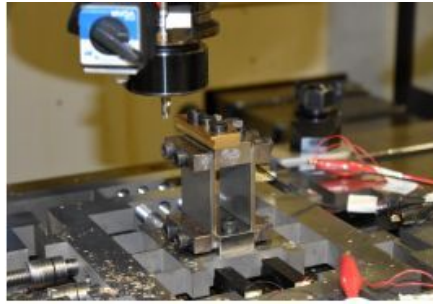


図 5 切削試験

4. 研究成果

(1) 再生びり振動低減効果のある加振条件の検証

semi-discretization 法を用いて、被削材加振時の安定解析を行い、再生びり振動抑制効果の高い、加振振動数と加振振幅の関係を調べた結果を図 6 に示す。図 6 の横軸は、加振振動数を切れ刃通過周波数で割った振動数比、縦軸は加振振幅を再生びり振動の 1 波長で割った加振振幅比、カラーコンターの数値は非加振時と加振時の再生びり振動の発生限界となる軸方向切込み深さの比を示す。図 6 から、抑制効果が得られる加振振動数は切れ刃通過周波数の整数倍となるときであり、また、加振振幅を大きくすると抑制効果が高いことを明らかにした。

図 7 は、運動方程式を数値積分し、被削材加振時と非加振時(図 7 中の黒の棒グラフ)の時刻歴波形の定常振幅の RMS 値を比較した結果である。加振振動数を切れ刃通過周波数と等しい振動数(63Hz)に固定して、加振振幅を変更した結果、加振振幅を $5\mu\text{m}$ としたとき、再生びり振動発生後も非加振時の振幅の RMS 値と比較して約 50%程度振幅低減効果があることを確認した。

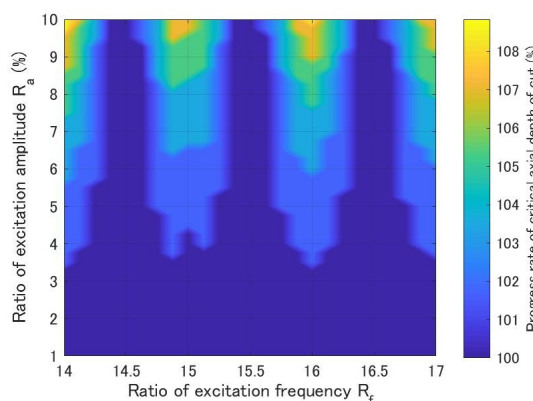


図 6 再生びり振動抑制効果の高い加振振動数と加振振幅の関係

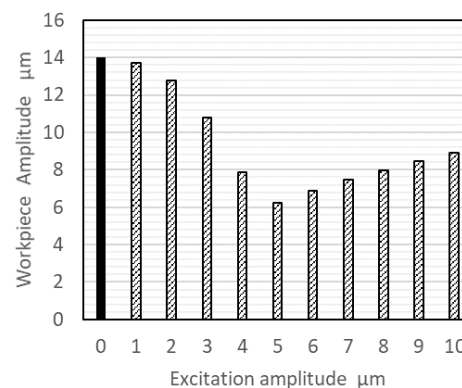


図 7 加振振幅に対するびり振動低減効果

(2) 切削加工時の被削材強制加振による再生びり振動抑制効果の検証

図 8 は、再生びり振動発生時に工具回転に同期して被削材を 2 方向加振した際の被削材の振動変位を測定した結果である。0~9s までは加振せず、9s 以降に加振を行っている。図 8 より、加振前に発生していた再生びり振動は、加振することで x 方向と y 方向の振動変位はともに低減していることを確認した。実験と解析の結果、従来の回転数変動切削における回転数変動周波数(1Hz 程度)に対して、非常に高い時間遅れ変動周波数(約 120Hz)でも再生びり振動抑制効果が得られることを明らかにした。

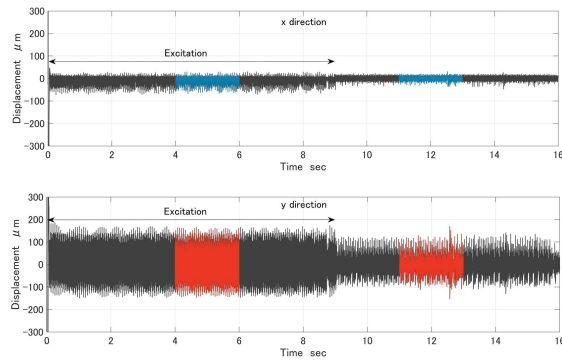


図 8 被削材加振時と非加振時の被削材の振動変位

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Nakano Yutaka, De Silva Amal Dilanka, Takahara Hiroki, Akiyama Yu, Countermeasure against regenerative and forced chatter of flexible workpieces in milling process using bi-directional excitation, Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 査読有, Vol.35 No.1,2018, pp.10-19.

〔学会発表〕(計 2 件)

Yutaka Nakano, Amal Dilanka De Silva, Hiroki Takahara, Countermeasure against regenerative and forced chatter of flexible workpieces in milling process using a two directional excitation, The 17th Asian Pacific Vibration Conference, 2017.

Yutaka Nakano, Hiroki Takahara, Yu Akiyama, The effect of time delay variation induced by workpiece excitation on regenerative chatter in milling, 24th International Congress on Sound and Vibration, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年：
 国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。