

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04008

研究課題名（和文）適応型セミアクティブ動吸振器を用いた再生びり振動抑制技術の開発

研究課題名（英文）Development of chatter suppression method using adaptive semi active tuned mass damper

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：低剛性被削材をエンドミル加工する際に問題となる再生びり振動の抑制対策の1つとして動吸振器の利用がある。本研究は、任意の工具回転数で再生びり振動の発生限界となる切込み深さを最大化する動吸振器の最適設計パラメータを導出した。従来の再生びり振動に対する動吸振器の最適設計法と比較して、本研究で導出した最適パラメータに調整した動吸振器を用いた場合、高回転数域で特に再生びり振動発生限界を大きく向上できること、動吸振器の減衰比を小さくしても再生びり振動の抑制効果が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の再生びり振動に対する動吸振器の最適設計法は、定点理論に準拠した動吸振器のパラメータ調整が一般的である。これに対して、本研究は、動吸振器の固有振動数を調整し、再生びり振動の発生要因となる時間遅れ量を変更することで、再生びり振動発生限界切込み深さを最大化できることを明らかにした。本研究で求めたパラメータで設計した動吸振器を適用することで、切削加工時の再生びり振動をより効率的に抑制することができ、さらなる加工効率の向上に寄与できると期待される。また、本研究で得られた動吸振器の設計法は、再生びり振動以外の時間遅れに起因する自励振動の抑制対策にも応用可能であるため、波及効果がある。

研究成果の概要（英文）：The application of a tuned mass damper is one of the countermeasures against chatter in end milling process of a low rigidity workpiece. This study derives the optimal design parameters of the tuned mass damper which maximizes the critical depth of cut at onset of chatter at each spindle speed. Compared with the conventional optimal design method of tuned mass dampers for chatter, it is clarified that the critical depth of cut can be greatly improved in the high spindle speed range in case of the application of the tuned mass damper tuned to the optimal parameters derived in the proposed method. Furthermore, the chatter suppression effect can be obtained even when the damping ratio of the tuned mass damper is smaller than the optimum damping ratio derived by the conventional tuned mass damper optimum design method.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：自励振動 再生びり振動 セミアクティブ動吸振器 エンドミル加工

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ジェットタービンの翼や薄肉円筒形状のファンケースなど、低剛性被削材をエンドミル加工する際に生じる再生びり振動を抑制するために、被削材形状に応じて被削材を支持する治具を取り付け、剛性を高める対策が行われている。しかし、被削材形状に応じた多数の支持点を持つ複雑な治具の製作やその治具の着脱に時間とコストを要する。これに対して、固定治具の支持を最小限にして、被削材に動吸振器を取り付けて再生びり振動の抑制を試みる研究が近年国内外で数多く行われている。再生びり振動の発生限界となる切込み深さは、主振動系の周波数応答の実部の逆数に比例するため、この周波数応答の実部の極値を最小化するように定点理論に準拠して動吸振器パラメータを最適値に調整する方法が提案され、再生びり振動の発生限界となる切込み深さの下限値を向上できることが明らかにされている。しかし、この従来の動吸振器の最適設計法では、高回転数領域において再生びり振動発生限界線図の極大値の大きさが、動吸振器取り付け前より低下する場合がある。動吸振器を適切に設計して、所望の回転数で再生びり振動の発生限界となる切込み深さを最大化することができれば、さらなる加工効率の向上が実現できると考えられる。

2. 研究の目的

再生びり振動を引き起す要因の時間遅れ量は、工具回転数とびり振動数の積となるため、動吸振器のパラメータによって系の固有振動数(びり振動数)すなわち時間遅れ量に変化し、再生びり振動の発生限界となる切込み深さが最大となる回転数も変化する。そこで本研究では、工具回転数ごとに動吸振器のパラメータを適切に調整して、再生びり振動発生限界切込み深さを最大化する動吸振器のパラメータを求める。また、動吸振器の固有振動数を任意に調整可能なセミアクティブ動吸振器を用いて任意の回転数で常に発生限界切込み深さを最大化するように動吸振器を適宜調整し、広い回転数領域で大幅な発生限界向上を実現することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 再生びり振動の発生限界切込み深さを最大化する動吸振器パラメータの導出

図1に示す1自由度系の低剛性被削材モデルに動吸振器を1個取り付けた2自由度集中質量系モデルを用いて、動吸振器の固有振動数、減衰比、工具回転数をパラメータとして数値解析を行い、再生びり振動の発生限界切込み深さを算出し、工具回転数ごとに再生びり振動の発生限界となる切込み深さが最大となる動吸振器の固有振動数と減衰比の関係を調査した。数値解析を実施して求めた動吸振器の最適パラメータに調整した動吸振器および従来の定点理論に準拠した最適パラメータに調整した動吸振器をそれぞれ取り付けたときの再生びり振動の発生限界線図を比較した。

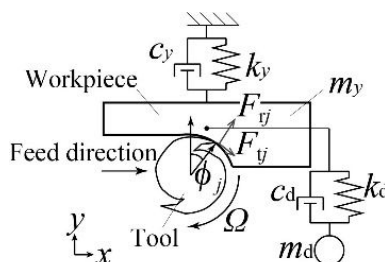


図1 解析モデル

(2) 加工試験による再生びり振動抑制効果の検証

図2に示すように平行板ばねを介して被削材を取り付けることで低剛性被削材を模擬し、この被削材を2枚刃のエンドミルを用いて上向き削り加工を行った。動吸振器は、先端に質量をもつ片持ちはりで構成し、被削材を保持する治具に取り付けた。動吸振器の固有振動数は、はりの長さを変えることで調整し、動吸振器の減衰比は、治具と動吸振器の間に合成ゴムシートを挟み、ゴムの厚さを変更することで調整した。また、圧電素子を用いて負性容量回路を構築した固有振動数可変機構を持つ片持ちはり動吸振器を制作した。

加工試験では、被削材の直下の固定治具と動吸振器である片持ちはりの先端部に加速度計を取り付け、軸方向切込み深さを変えて加工試験を行い、再生びり振動の発生の有無および被削材の振動振幅を比較した。

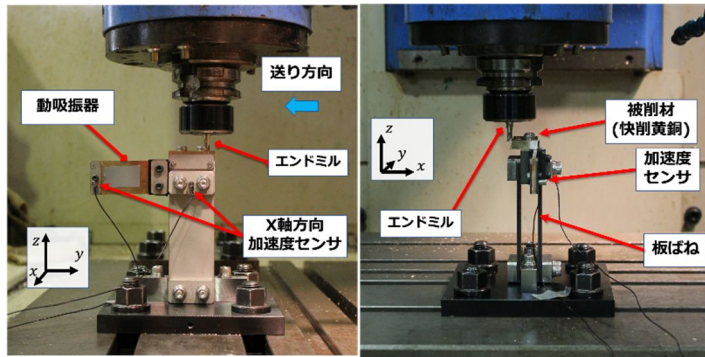


図 2 実験装置

4. 研究成果

(1) 再生びり振動の発生限界切込み深さを最大化する動吸振器パラメータの導出

動吸振器の固有振動数と減衰比をパラメータとして、各回転数において再生びり振動の発生限界切込み深さが最大となる動吸振器の固有振動数と減衰比の組み合わせを計算した。図 3 は、数値解析で算出した動吸振器無しと有りの再生びり振動発生限界線図を比較した図である。なお、主系の減衰比は 0.5%、主系に対する動吸振器の質量比は 10%としたときの計算結果を代表例として示す。横軸は工具回転振動数をびり振動数で除した無次元回転数、縦軸は軸方向切込み深さを切削剛性と被削材の剛性を用いて無次元化した無次元切込み深さを表し、プロットよりも大きな切込み深さで再生びり振動が発生することを表す。比較のため、動吸振器有りの結果は、従来の定点理論に準拠した方法で求まる最適パラメータに調整した動吸振器を取り付けたときの結果（従来法）と比較した。図 3 から、動吸振器無しの発生限界線図（図 3：灰色線）と比較すると、従来法（図 3：黒線）で調整した動吸振器と提案法で調整した動吸振器（図 3：赤散布図）いずれも発生限界が大きく向上することを確認した。次に、動吸振器有りの発生限界線図を比較すると、低回転数領域では、従来法の発生限界線図と提案法の発生限界線図はほぼ一致しているが、高回転数領域では提案法の発生限界の方がさらに向上することを明らかにした。

図 4、図 5 は、各回転数において主系の固有振動数に対する動吸振器の最適固有振動数比と動吸振器の最適減衰比をそれぞれ示す。各図の横実線は従来法で求まる動吸振器の最適固有振動数比と最適減衰比を示す。図 4 から、低回転数領域では、従来法の最適固有振動数比とほぼ一致していること、高回転数領域では提案法の最適固有振動数比は回転数によって変動することを明らかにした。図 5 から、従来法の動吸振器の最適減衰比と比較して、提案法の動吸振器の最適減衰比は小さくなる傾向になることを明らかにした。動吸振器の質量比を変更した場合も動吸振器の最適減衰比が小さくなる傾向であることを確認した。

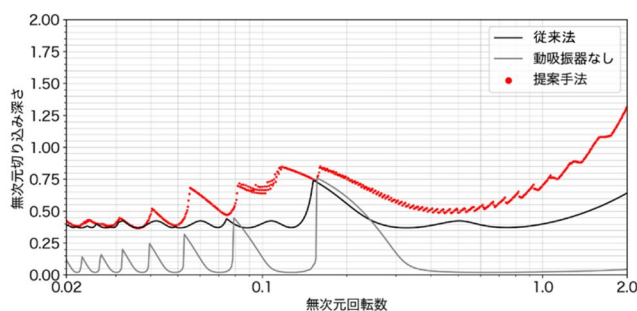


図 3 再生びり振動発生限界線図の比較

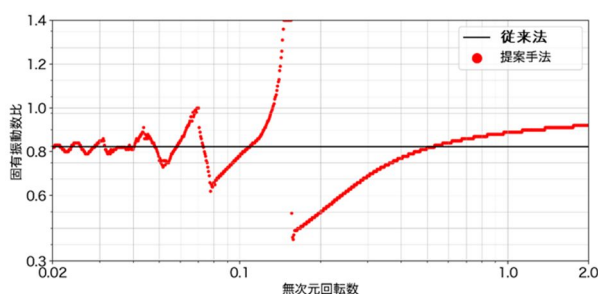


図 4 動吸振器の最適固有振動数比

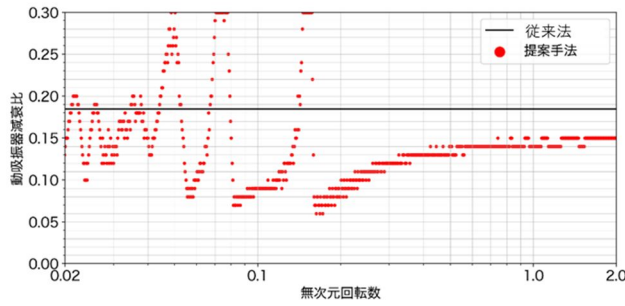


図 5 動吸振器の最適減衰比

(2) 加工試験による再生びり振動抑制効果の検証

数値解析で求めた、再生びり振動の発生限界切込み深さを最大化するパラメータに調整した動吸振器を取り付けたときの再生びり振動抑制効果を検証するために図 2 に示す装置を用いて加工試験を行った。図 6 は、動吸振器を取り付けていないときの加工試験で求めた再生びり振動発生限界線図(赤散布図)を示す。比較のため、数値解析で求めた動吸振器を取り付けていないときの発生限界線図(青散布図)もプロットする。図 6 から、実験と数値解析で求めた発生限界が概ね一致することを確認した。

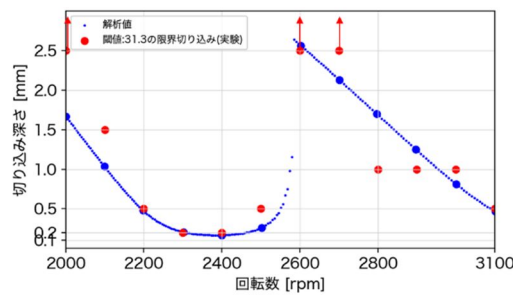


図 6 動吸振器を取り付けていないときの再生びり振動発生限界線図

次に、主軸回転数 2700rpm ~ 3000rpm の回転数範囲における動吸振器を取り付けたときの再生びり振動抑制効果を検証した。数値解析で求めた各回転数における動吸振器の最適固有振動数と最適減衰比を図 7 に示す。比較のために、従来法で求まる動吸振器の最適固有振動数と最適減衰比を図中に横実線でプロットする。図 7 で示した各回転数に対するパラメータ(提案法(赤散布図))に調整した動吸振器を取り付けたときの再生びり振動発生限界線図を図 8 に示す。図中の○は、再生びり振動が発生しなかった切込み深さを示す。図 8 から、実験で使用したす

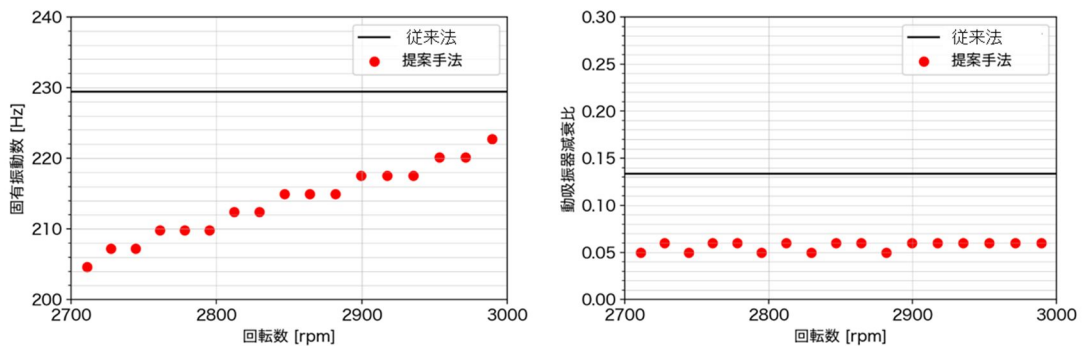


図 7 動吸振器の最適固有振動数比と最適減衰比

すべての回転数，切込み深さで再生びり振動が抑制されることを確認した．図6，図7から，最適減衰比が従来法の半分程度でも，動吸振器を取り付けていないときよりも発生限界切込み深さが5倍以上向上することを確認した．

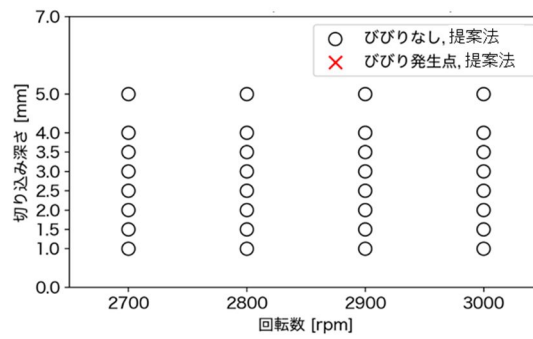


図8 動吸振器有りの再生びり振動発生限界線図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yutaka Nakano, Takumi KOBAYASHI, Hiroki TAKAHARA
2. 発表標題 A Novel Design Concept of Tuned Mass Damper for Chatter in End Milling Process
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------