

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289015

研究課題名(和文) びびり振動の安定限界向上を実現する不等ピッチ・リードエンドミルの形状設計

研究課題名(英文) Cutter design of irregular pitch / variable helix end mills to increase chatter stability in cutting

研究代表者

鈴木 教和 (Suzuki, Norikazu)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00359754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：切削加工では、再生効果によってびびり振動が発生することが知られている。再生効果は不等ピッチ工具や不等リード工具を用いて抑制することができるが、効果的に抑制するには適切設計が必要となる。本研究では、ロバストな再生効果抑制を実現するエンドミルの新しい設計法を提案する。まず、複数モードの同時抑制を実現する設計理論を定式化する。この際、再生効果の定量化指標“再生数”を提案する。再生数を利用して、任意の周波数領域で平均再生数を最小化する不等ピッチ・リード工具設計理論を考案し、びびり振動周波数や主軸回転数の変化に対してロバストな再生効果の抑制を実現する。エンドミル加工実験を通じて提案手法の検証を行う。

研究成果の概要(英文)：It is known that regenerative effect, which causes self-excited chatter vibration, can be suppressed by utilizing irregular pitch / variable helix tools. In order to suppress the regenerative effect sufficiently, a suitable combination of pitch angles needs to be designed. The present study proposes a design method of end mills, which ensures robust suppression of regeneration. Firstly, irregular pitch design for simultaneous suppression of multi-mode regenerations is formulated. In order to quantify the regenerative effect, a parameter named “Regeneration Factor (RF)” is proposed. Minimizing the mean value of the RF within certain frequency range, suppression frequencies are aligned in the proposed method, resulting in robust suppression of regeneration regardless of chatter frequency and/or spindle speed. The design method is extended for variable helix tools. The effect of the proposed method on chatter suppression is verified through a series of experimental investigations.

研究分野：生産加工

キーワード：切削加工 エンドミル びびり振動 再生効果 ロバスト設計

1. 研究開始当初の背景

切削加工はものづくりにおいて最も重要な基盤技術の一つである。日本はこの技術分野で長年世界をリードしており、これが日本のものづくりを根本から支えている。言葉を裏返すと、世界最高水準の切削加工技術を維持できなければ日本の製造業の将来はないといっても過言ではない。その切削加工技術において、解決が困難であるとして残されてきた課題に、“びびり振動”の問題が挙げられる。生産性に大きな制約を与えてしまうため、びびり振動の解決に対する需要は極めて大きく、世界中で活発に研究が行われている。びびり振動はメカニズムが複雑であり、その理解は極めて難しいが、従来の研究によってびびり振動の基礎的な安定限界解析理論が徐々に確立されており、最近では、解析支援ソフトウェアやびびり振動を自動回避する工作機械なども市販され、安定加工条件を利用するシステムティックな対策法が徐々に浸透しつつある。

一方、最近では航空機用タービンブレードなどの難加工形状に対する需要が急増しており、上述した手法だけでは全く対応できないケースが急増している。このような場合に、びびり振動を効果的に回避する応用手法として、不等ピッチ・リードエンドミルを用いる方法が知られている。これらの工具では、切れ刃の形状を意図的に等間隔に配列しないように設計する。適切に形状を設計して用いることで、びびり振動の原因となる再生効果を打ち消すことが可能となり、びびり振動の安定限界を飛躍的に向上して、高い生産効率と高品位な加工面を両立することができる。しかし、安定性を効果的に向上するには、振動系の動特性に応じた工具形状と加工条件の最適化が同時に必要となる。現状では、実用的な設計手法が確立されていないため、生産の現場ではトライアンドエラーによって形状が決定されており、極めて無駄が多い。このため、びびり振動の効率的な抑制・回避を実現する、不等ピッチ・リードエンドミルの最適設計理論の確立が望まれている。

2. 研究の目的

エンドミル加工において、複数の振動モードに対して同時に自励びびり振動を抑制することのできる新しい不等ピッチ/リードエンドミルの設計手法を提案する。これにより、従来技術に対して飛躍的にびびり振動に対する安定限界を向上し得る、画期的なびびり振動抑制技術の確立に挑戦する。提案手法では、びびり振動の発生メカニズムに基づき、自励びびり振動を引き起こす原因となる再生効果の定量化指標“再生数”を定式化する。この“再生数”に基づいて、再生効果の影響をゼロもしくは最小化することで安定性を向上する工具形状の新しい最適設計手法を開発する。エンドミル加工実験を通じて提案手法の検証を行い、新しいびびり振動抑制技

術の実現を目指す。

3. 研究の方法

提案手法を実現するには、様々な動特性の状態や加工条件を考慮した多角的な検討が必要となる。特に、“マルチ再生効果”の同時抑制、システムの変化に対するロバスト設計、モードカップリングへの対応などについての考慮が重要であると考えられる。それぞれの項目に対して、“再生数”を利用した最適工具形状を求めるための設計指針について検討を行う。また、本手法の有効性を検証するには、精度の高い安定限界解析モデルを用いた検証が必要不可欠である。そこで、不等ピッチ・リードエンドミルを用いた加工プロセスに対するびびり振動安定限界解析手法を開発する。実験による検証においては、まず伝達関数評価が容易で高精度な解析が可能な基礎的な評価実験装置を用いた検証から開始し、最終的に解析の難しい主軸構造のびびり振動などを対象とした検証実験を検討する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、再生効果の定量化指標“再生数 RF”の定式化を行った。再生数は、各切れ刃において生じる再生振動を表す複素ベクトルの和で表される。再生数がゼロとなる時、図1に示されるように再生効果が完全に打ち消されていることを意味する。この値は、提案する定式化に基づいて容易に算出することが可能であり、切削プロセスにおける再生振動の影響を定量的に取り扱うことができる。すなわち、工具形状の最適設計の指針として利用することが可能となる。この考え方を利用し、以降に示す研究を実施した。

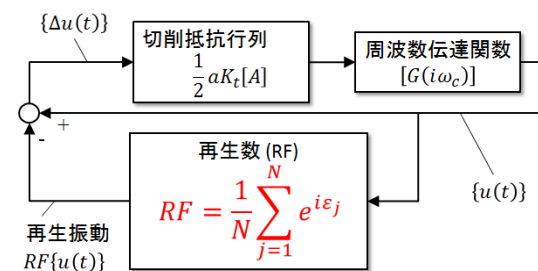


図1 切削プロセスのブロック線図と再生数

(2) 従来研究において、不等ピッチエンドミルを用いた場合に簡易的なびびり振動の安定限界解析を実現する手法を開発されている。この解析手法はエンドミル加工における断続性を無視した Zero-order-solution という手法に基づいており、半径方向切込みが浅い条件などの解析において複数の周波数成分を持つびびり振動が同時に生じる現象を考慮できない問題があった。そこで、Multi-frequency-solution と呼ばれる高精度な手法に基づく新しい解析手法を新たに開発した。さらに、本モデルを拡張して、不等リードエンドミルを用いる場合にも対応

可能な解析モデルを開発した。一方で、従来手法の延長として周波数領域において定式化する手法は複雑であり、計算ミスを引き起こしやすいという欠点が明らかとなった。そこで、本概念を発展させ、Semidiscrete time domain solution と呼ばれる、新しい解法に基づく安定性解析モデルを開発した。不等ピッチエンドミルを用いる切削プロセスを対象とした安定限界解析の事例を図2に示す。開発した解析モデルによる結果は、従来のZero-order-solutionよりも高精度な解析結果を与えるとともに、安定限界以外の条件に対する安定性指標を与える可能性があることを確認した。

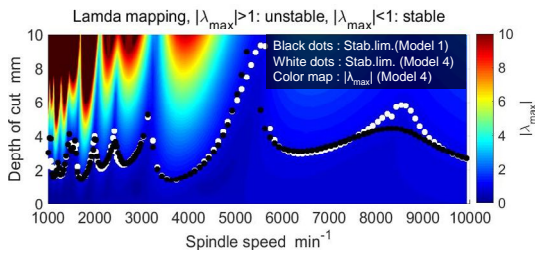


図2 不等ピッチエンドミルを用いる切削プロセスの安定限界解析の比較

(3) マシニングセンタを使用する場合には、主軸系の低い剛性に起因してびびり振動が生じることが多く、一般に2~3つの振動モード(エンドミル本体、ホルダ、主軸本体の振動モード)がそれぞれびびり振動に関与することが多い。そこで、複数の振動モードに対して再生効果を打ち消す切れ刃角の設計手法を検討した。

再生振動を打ち消すには、対となる切れ刃の組合せで再生振動の位相が反転するようにピッチ角を設計すれば良く、1つのモードを打ち消すには2枚の切れ刃があればよい。2つのモードを打ち消すには4枚刃が必要で、対となる切れ刃の組合せを2種類考え、それぞれの対で2種類の振動モードを打ち消すようにピッチ角を設計する必要がある。この考え方を拡張し、 h 個のモードを打ち消すピッチ角の定式化に成功した。さらに、打ち消しモードの周波数を適切に分散させることにより、任意の周波数領域において平均的な再生数が最も小さくなるように設計する、工具形状設計理論を提案した。図3の計算事例でも示すように、同じ4枚刃の工具でも、従来の考え方に基づく設計手法(Tool2)では、単一の打ち消し周波数付近のみで再生数が低下する。これに対し、提案手法(Tool3)では、打ち消し周波数が分散するため、広い周波数範囲で再生数が低下し、その結果平均的な再生数が減少することが分かる。

また、主軸回転数やびびり振動周波数、および軸方向切込みの変化に対して、安定して再生数を低減可能な新しい工具設計手法を考案した。図4に示すように、提案手法では各条件の変化に依らず再生数をきわめて小さ

く保つことが可能となることが分かる。これは、再生振動の抑制にきわめて有効である。

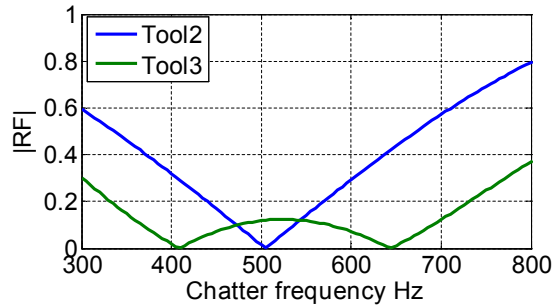


図3 従来工具(Tool2)と開発工具(Tool3)におけるびびり周波数と再生数の関係

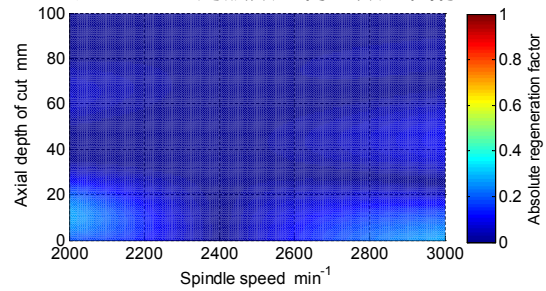


図4 不等リードエンドミルを用いる切削プロセスにおける各種条件と再生数の関係

(4) びびり振動の検証実験は意外に難しいため、なるべく単純な動特性を有する機械構造による単純な加工評価から検討するのが望ましい。そこで、図5に示す単純な平行板バネ構造を有する被削材固定治具構造等を開発し、これらを用いて基礎的な検証を行った。

検証実験の結果を図6に示す。上段は等ピッチエンドミルを用いた場合の安定限界解析の結果と実験結果を示している。中段には、従来手法に基づく不等ピッチエンドミル、下段には提案手法に基づく不等ピッチエンドミルによる解析・実験結果を示す。図から、等ピッチエンドミルの場合に安定性が最も安定性が低く、提案手法ではロバストで高い安定性の実現に成功していることが分かる。

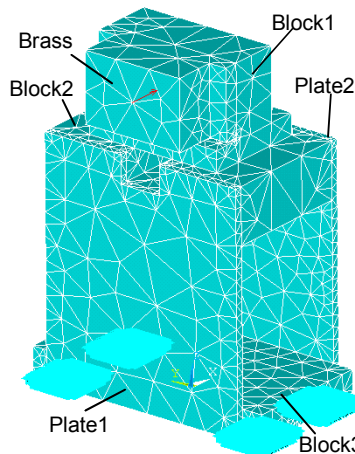


図5 開発した平行板バネ構造の被削材固定治具

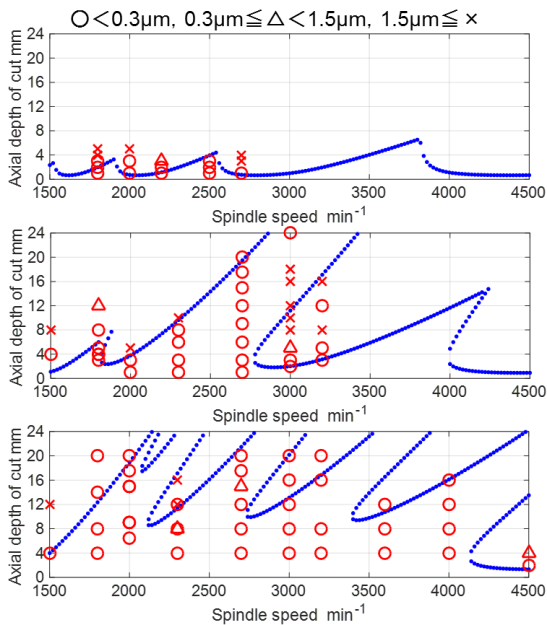


図6 等ピッチ(上),従来不等ピッチ(中),提案不等ピッチ(下)における安定限界解析および実験結果の比較

以上で述べた考え方は不等リードエンドミルに対しても拡張可能であり,実験検証を通じて,提案手法が極めて有効であることを確認している.さらに,これらの検討結果を応用して,従来にない新しい形状を有するエンドミルの最適設計手法を考案し,再生効果をきわめて強烈に抑制できることを確認した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

N. Suzuki, R. Ishiguro, T. Kojima, Design of irregular pitch end mills to attain robust suppression of regenerative chatter, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 査読有, Vol.65/1, 2016, in press

E. Shamoto, T. Mori, B. Sencer, N. Suzuki, R. Hino, Suppression of regenerative chatter vibration in multiple milling utilizing speed difference method - Analysis of double-sided milling and its generalization to multiple milling operations, Precision Engineering, 査読有, Vol.37/3, 2013, pp. 580-589
T. Kojima, N. Suzuki, et al., A Novel Design Method of Variable Helix Cutters to Attain Robust Regeneration Suppression, Procedia CIRP, 査読有, Vol.8, 2013, pp.362-366.

〔学会発表〕(計9件)

石黒力也,鈴木教和,社本英二,不等リードエンドミルを用いた切削プロセス

の Semidiscrete time domain solution, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2016.3.15, pp.651-652, 東京理科大学(千葉県)

N. SUZUKI, et al., Estimation of transfer function of flexible mechanical structures by utilizing cutting force model and observer technique, Proc. the 8th Int. Conf. on Leading Edge Manuf. in 21st Century, (2015) CD-ROM, (Oct. 18-22, 2015, LEM21 in Kyoto, Japan)

石黒力也,鈴木教和,他,ロバストなびり振動抑制を実現する工具設計理論の実験的検証,日本機械学会 2015 年度年次大会 講演論文集, 2015.9.14, s1330102 (pp-1-5), 北海道大学(北海道)

鈴木 教和,渡邊 涼,西村 浩平,社本英二,切削加工におけるびり振動を抑制するための柔軟構造の動剛性設計,第15回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 講演論文集, 2014.12.17, pp.2407-2409, 東京ビッグサイト(東京都)

T. KOJIMA, N. SUZUKI, et al., Multi-Frequency Solution for Chatter Stability Analysis in Low Immersion End Milling with Irregular Pitch / Variable Helix Cutters, Proc. the 15th Int. Conf. on Prec. Eng. (ICPE2014), pp.603-604, (2014) (July 23-25, Kanazawa, Ishikawa, Japan)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 教和(SUZUKI, Norikazu)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00359754

(2)研究分担者

社本 英二(SHAMOTO, Eiji)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20216146

樋野 励(Hino, Rei)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授
研究者番号: 80273762
(平成26年度まで)