

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2008 ～ 2009
 課題番号： 20760083
 研究課題名(和文) びびり振動を自動回避する次世代工作機械の開発
 研究課題名(英文) Development of next generation machine tool to enable automatic chatter avoidance

研究代表者
 鈴木 教和 (SUZUKI NORIKAZU)
 名古屋大学・大学院工学研究科・講師
 研究者番号：00359754

研究成果の概要(和文)：高度な知識や作業を必要とせずびびり振動の回避を実現する手法の提案と、これを実行する次世代工作機械の実現可能性について検討を行った。提案手法では、加工中に計測される信号を利用してびびり振動の種類を判別し、強制型/再生型が生じにくい条件の予測を行う。これを繰り返すことでシステムティックにびびり振動を回避する条件の推定と最適化を行う。さまざまな条件で検討を行った結果、提案手法により、従来の安定限界推定手法などと比較してより精度良く、かつ容易に安定な条件を予測/最適化し得ることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Practical chatter avoidance method for milling is proposed, and the feasibility of development of the next generation machine tools, which is equipped with the automatic chatter avoidance functions, are discussed. In the proposed method, the chatter types are distinguished by measured chatter vibration while machining, then, the suitable chatter avoidance condition is estimated. Consequently, the cutting condition can be improved and optimized by iterating this step. Meanwhile, proposed method do not need either measuring transfer function or sophistication and skills to calculate stability/allowable limits in chatter vibrations, which are required in the conventional methods. It was confirmed that the suitable chatter avoidance conditions can be predicted and optimized by the proposed method.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2008 年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2009 年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：びびり振動, 切削加工, 安定限界, 自励振動, エンドミル加工

1. 研究開始当初の背景 | な基盤技術の一つである。これを実現する工作機械の業界において、日本は長年世界のト
- 切削加工はものづくりにおいて最も重要

ップの座を維持しており、これが日本の強みであるものづくりを根本から支えている。言葉を変えれば、トップレベルの工作機械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。その工作機械技術において、最も重要であるにもかかわらず解決が困難であるため残されてきた課題として、びびり振動の問題が挙げられる。半世紀以上にわたって国内外で多くの研究が行われてきているが、現象が極めて複雑であるためこれをシステムティックに回避/抑制する実用的な手法は未だ考案されていない。このため、日本が世界に先駆けて解決しなければならない最重要課題のひとつとして残されている。

従来のびびり振動の研究としては、大きな振動が発生し特に問題となりやすい再生型びびり振動を対象としたものが多く、その基礎的な発生メカニズムについてはすでに明らかにされている。そして、機械構造の伝達特性の測定に基づいて安定限界解析を行うことにより、再生型びびり振動の発生しにくい主軸回転数条件を予測することが可能であり、安定条件を模索するのにこの解析手法を利用することができる。しかし、この方法は解析精度がさほど高くないのに加え、測定機器を適切に使用して高精度に伝達関数を求め、測定結果に基づいて再生型びびり振動の安定限界解析を行い得る高度な知識を持った作業者が必要となるという問題がある。また、エンドミル加工では力外乱型の強制型びびり振動もよく発生するため、再生型と強制型を両方同時に回避する条件を予測する必要があるが、この方法は強制型を考慮しないため誤った対処を導くことがある。このように、従来手法は実用性が低いため実際に利用されることは少なく、一般には試行錯誤的に安定条件を探索し、うまくいかないときにはびびり振動の発生しにくい低速/浅切込み条件を選択せざるを得なく、著しい生産効率の低下を招いてしまうことが多い。

2. 研究の目的

本研究では、高価な設備や作業者の知識を必要とせずシステムティックにびびり振動の回避を実現する手法の提案と、これを実行する次世代工作機械の実現可能性について検討を行うことを目的とする。これを実現するため、本研究ではびびり振動における以下の特徴に着目する。

- 主軸回転数の整数倍が共振周波数と一致する条件では切り取り厚さに変動が生じにくく、再生型びびり振動が発生しにくい。
 - 強制型びびり振動における振動周波数は主軸回転数の整数倍に同期するのにに対し、再生型びびり振動では同期しない。
- これらの特徴に基づき、加工中に計測される

びびり振動の測定信号を利用することで、びびり振動の種類を判別と、強制型/再生型が発生しにくい主軸回転数の予測を行い、システムティックにびびり振動を回避するシステムの実現を目指す。

3. 研究の方法

上述したように、びびり振動はその発生メカニズムから自励型と強制型に分類することができ、これを抑制/回避するには、各々のメカニズムに対応した適切な対処が必要となる。提案手法ではまず、びびり振動の種類を判別を行い、その種類に対応した適切な主軸回転数条件を予測し、回避を実行する。これを繰り返すことにより適切な条件をシステムティックに最適化するシステムの開発を目指す。

具体的には、まず、振動センサを用いて加工中に発生するびびり振動を計測する。その計測信号からびびり振動の発生を検知した場合には、その振動周波数と主軸回転数を比較することにより、びびり振動の種類を判別を行う。次に、計測されたびびり振動の周波数から強制型/再生型が発生しにくい条件を予測して変更を行うことにより検出されたタイプのびびり振動を回避する。また、その際に再生型と強制型が両方発生する場合には、それぞれの種類のびびり振動が検出された条件の履歴に基づいて、補正を繰り返すことにより最適化を行う。さらに、工具の刃数や半径方向切込みなどの加工条件の影響についても検討を要すると考えられるため、これを考慮した最適化を行う。

なお、研究によって明らかになった課題や結果などを考慮した上で、当初の研究計画に対して適宜修正を加えて検討を行った。具体的な検討内容を以下に示す。

(1) 基本アルゴリズムの検証と課題の抽出
予備検討により提案手法が有効であることをすでに確認しているが、本手法が有効な範囲と課題を明確にするためにはケーススタディが不足している。そこで、工具が振動する場合と被削材が振動する場合に分けて、加工条件や被削材・工具形状など各パラメータの影響について評価実験を行い、回避アルゴリズムの検証と課題の抽出を行う。

(2) びびり振動回避システムの検討

上記の検証結果に基づき、回避アルゴリズムを実現する回避システムの検討を行う。まず、適切な振動検出方法の検討として、加速度計やマイクロフォンなど、およびそれらの取り付け位置の影響などについて検討を行い、振動検出方法の最適化を行う。さらに、検出信号を取り込んでフーリエ変換を行い、回避アルゴリズムに基づいて最適な条件を予測し、作業者に提示して工作機械の条件を適切に変更する回避システムを開発する。

(3) びびり振動回避アルゴリズムの高度化
再生型および強制型びびり振動は、例えば、切込み送りなどの加工条件や刃数やねじれなどの工具条件に依存して、安定限界や振動限界が特徴的に変化すると考えられる。この特徴を明らかにすることにより、回避アルゴリズムをさらに高度化して最適回転数の予測精度の向上や最適な条件に到達するまでの繰り返し回数の低減を図ることが可能であると考えられる。そこで、従来の再生型びびり振動における解析手法や、申請者が独自に考案した強制型びびり振動の解析手法に基づき各条件の影響を定量化およびモデル化して、これに基づいて適切な条件を予測するアルゴリズムの検討を行う。そして、基本的なびびり振動回避システムにそのアルゴリズムを加えることによって高度化した新しいびびり振動回避システムの開発を行う。

(4) 総合的な応用性の検証・評価

以上で述べた検討は、主に等ピッチスクエアエンドミルを利用することを前提としているが、実際にびびり振動が問題となるプロセスはそれだけではない。ここでは、不等ピッチ工具やポーリング工具を用いる場合に対する応用を考える。具体的には、各プロセスに対応する解析モデルを定式化し、安定限界推定シミュレータを開発する。そして、これらのプロセスに対して提案手法が有効であるか検討を行う。

以上の検討に基づき、システムの改良を積み重ねて本提案手法の完成度向上を目指す。

4. 研究成果

(1) 基本アルゴリズムの検証と課題の抽出

基礎的な評価実験として、被削材の剛性が低い実験装置を試作し、様々な条件で実験を行った結果と解析結果の比較を行った例を図1に示す。

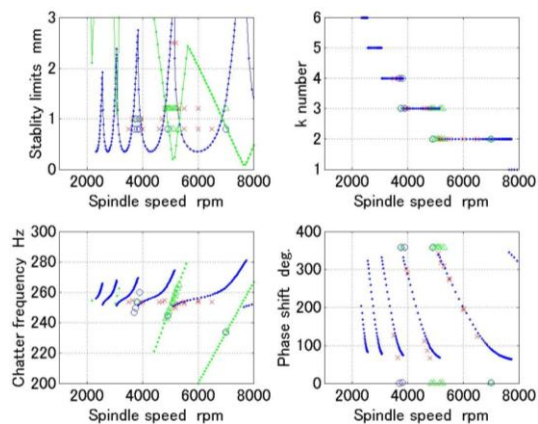


図1 加工実験/解析の結果の比較

図のように解析結果と実験結果は極めて良く一致することが確認でき、提案手法を用いて最適条件を推定し得ることを確認した。ま

た、エンドミル工具の剛性が低い場合に対しても解析は実験と良く一致し、基本的に再生型/強制型を回避する主軸回転数条件を算出できることを確認した。さらに、図のように再生型と強制型の両方が混在する場合、加工中のびびり振動の測定信号からびびり振動の種類を判別し、それぞれの中間的な条件を求めて探索を行う回避アルゴリズムを用いることにより、数回の試行錯誤で適切な条件を探し得ることを確認した。

その一方で、半径方向切込みが浅い場合や、回転数が小さい条件などの一部の条件では、びびり振動の種類が難しいと同時に、回避条件の推定精度が低下してしまい、場合によっては提案手法により最適な条件を推定できないことを確認した。

(2) びびり振動回避システムの検討

加速度計、渦電流変位計およびマイクロフォンを加工機に実装し、加工中に生じるびびり振動の計測を行った。さらに、測定される振動を短時間フーリエ変換することにより、びびり振動を検知しびびり振動の周波数を求められることを確認した。また、緩やかに切込みが変化する加工を行うことにより、安定限界切込みについても同定し得ることを確認した。実際の測定結果の一例を図2に示す。図は、加工中に切込みが増加し、安定限界条件を超えたときに急に加速度と音圧が増加する現象を示している。

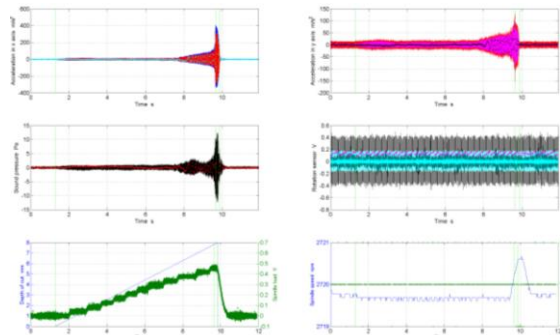


図2 測定された加速度や音圧の例

さらに、ここで求めたびびり振動の情報を用い、基本的には上述のアルゴリズムに基づいて安定な条件を推定し得ることを確認した。ただし、いずれのセンサを用いるかによって感度が異なることから、安定限界に近い条件では判別の結果が異なる場合があることを確認した。

(3) びびり振動回避アルゴリズムの高度化の検討

半径方向切込みや回転数が小さい場合などでびびり振動の種類が難しく、適切な条件の推定が困難となる場合があることに関して、その理由/現象について検討を行った。その結果、従来のモデルにおいて近似を行っている定式化箇所に起因して、誤差が

生じてしまうことを確認した。さらにその現象を正確にモデル化して定式化することにより、びびり振動の種類判別が可能となり、安定条件の推定精度が向上することを確認した。実際に、これをびびり振動回避のアルゴリズムへ実装することにより、提案手法の高精度化を実現し得ることを確認した。

(4) 総合的な応用性の検証・評価

応用的なプロセスとして、不等ピッチ工具や、ボーリング工具を用いる加工プロセスに対する検討を行った。まず、それぞれのプロセスに対応する解析モデルの定式化を行った。その結果、定式化に基づいて安定限界推定が可能であることを確認した。また、ボーリング加工に対しては、開発したアルゴリズムによりびびり振動を適切に回避し得ることを確認した。一方、不等ピッチ工具を用いるプロセスにおいては、モードカップリングの影響が大きい場合には提案手法が有効となるが、そうでない場合には、別の定式化が必要となることが明らかとなった。

以上の検討により、不等ピッチ工具を用いる場合を除いて応用的な条件やプロセスに対しても適用可能であり、提案手法の実用性が高いことを明らかにした。このことから、提案手法を実際の加工機に実装することで、びびり振動のリアルタイム回避が実現可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 鈴木教和；切削加工におけるびびり振動(前編)「初めての精密工学」, 精密工学会誌, 76巻3号, pp.280-284, (2010), [査読有]
- ② 鈴木教和, 井加田勲, 樋野励, 社本英二；強制・自励型びびり振動を回避するエンドミル加工条件の統合的検討, 精密工学会誌, 75巻7号, pp.908-914, (2009), [査読有]
- ③ N. SUZUKI, K. NISHIMURA, E. SHAMOTO, K. YOSHINO; Effect of Cross Transfer Function on Chatter Stability in Plunge Cutting, Proceedings of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, pp. 501-505, (2009), [査読有]
- ④ Yusuke KURATA, Norikazu SUZUKI, Rei HINO, Eiji SHAMOTO; Chatter Suppression in Milling with Anisotropic Tools, Proceedings of the 2009 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp. 547-552, (2009), [査読有]

- ⑤ Norikazu SUZUKI, Yusuke KURATA, Rei HINO, Eiji SHAMOTO; Identification of transfer function of mechanical structure by inverse analysis of regenerative chatter vibration in end milling, Proceedings of the 3rd international CIRP high performance cutting conference, pp.455-463, (2008), [査読有]

[学会発表] (計6件)

- ① 倉田祐輔, 鈴木教和, 社本英二；不等ピッチ工具を用いたボーリング加工の自励びびり振動安定限界, 2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 pp.351-352, (2010.3.16), 埼玉大学
- ② 大塚由佳, 鈴木教和, 社本英二；旋削加工における再生型びびり振動の安定限界解析, 2010年度精密工学会春季大会, 第17回学生会員卒業研究発表講演会講演論文集, pp.69-70 (2010.3.16), 埼玉大学
- ③ 倉田祐輔, S.D. Merdol, Y. Altintas, 鈴木教和, 社本英二；プロセスダンピングを考慮した再生型びびり振動の高精度解析ーびびり振動の逆解析によるプロセスダンピング変数の同定, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 pp.645-646, (2009.9.11), 神戸大学
- ④ 社本英二, 西村浩平, 倉田祐輔, 鈴木教和, 森達也；板材に対する高精度高能率加工を実現する両面同時フライス加工技術の開発ー左右主軸回転数差による再生型びびり振動の抑制ー, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 pp.577-578, (2009.3.12), 中央大学
- ⑤ 鈴木教和, 倉田祐輔, 社本英二；再生型びびり振動の逆解析を利用した伝達関数の同定, 第13回国際工作機械技術者会議論文集 pp.12-13, (2008.11.1), 東京ビックサイト
- ⑥ 倉田祐輔, 鈴木教和, 社本英二；自励型びびり振動における再生効果とモードカップリング, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 pp.295-296, (2008.9.19), 東北大学

[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]

ホームページ等

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・講師

研究者番号：00359754