

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686021

研究課題名(和文) 周波数帯分離型位置-力ハイブリッド制御による能動安定化切削加工法の開発

研究課題名(英文) Stable Cutting Method by Band-separated Position-Force Hybrid Control

## 研究代表者

柿沼 康弘 (Kakinuma, Yasuhiro)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：70407146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：工具と工作物間の相互作用により生じるびびり振動の回避を目的とした、周波数領域での位置-力ハイブリッド制御による、能動的な異常加工回避技術の開発を行った。サーボ情報のみから切削力を計測できる外乱オブザーバと、計測した切削力をフィードバックすることで実現する高応答のセンサレス力制御により、びびり周波域のみを力制御して切削加工を安定化する技術を提案した。びびり振動周波数領域に対して常に零力制御、それ以外の周波数領域では位置制御することで、工具軌跡を維持しながら、びびり振動を抑制できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Suppression of chatter vibration is needed to enhance the machined surface quality and expand tool life. In this study, a new conceptually active approach for chatter suppression in machining is proposed. The hybrid control method developed by applying the sensor-less force control with the disturbance observer enables to simultaneously and independently control position trajectory and band-limited forces. It is introduced to the carriage of the prototype desktop turning machine and the ability to suppress chatter is evaluated by end-face cutting tests. The result shows that actively controlling a band-limited force around a detected vibration frequency leads to avoidance of chatter.

研究分野：生産工学

キーワード：工作機械 びびり振動 加工監視 ハイブリッド制御 切削

### 1. 研究開始当初の背景

工具と工作物間の相互作用により生じるびびり振動は、機械加工における異常状態であり加工面品位を維持するために何らかの対策が必要となる。エンドミル加工などの断続切削を含めた切削加工に対応した詳細なびびり振動モデルに関する研究が国内外で活発に展開されており、新たな理論モデルや加工条件との関連が明らかにされてきている。びびり振動が生じた際に理論モデルに基づき安定加工条件を探索する機能を搭載した日本初の加工機も登場し、世界的にも注目を集めている。一方で、びびり振動モデルによる安定加工領域の決定手法は、解析に基づく開ループ的(受動的)な方法で、能動的にびびり振動抑制を行うものではない。つまり、インパルス応答法などにより、工具系の動特性を解析し、この動特性を含めた切削モデルに基づき安定限界線図(工具回転数と切込み量の関係)を求めて、各々の安定加工条件を決定する手法である。工作機械の動特性は一定であることが前提条件であることから、理論モデルが実モデルと完全に一致しないことや工具状態の時間変化が含まれていないことにより、安定と判断された加工条件でびびり振動が発生する場合がある。そのため、加工状態に応じてびびり振動回避を能動的に行う技術を開発できれば、加工の安定化に大きく貢献すると期待される。

このような背景のもと、研究代表者は、加工状態を監視して能動的なびびり振動回避を実現するために、サーボ情報からびびり振動を検出する技術ならびにセンサなしで切削力を制御する技術開発に取り組んできた。以下にこれまでに得られた成果を示す。

(i) 外部センサや測定機器を用いず、サーボ情報のみで自励・強制びびり振動の検知および判別成功

(ii) 付加的な力センサを一切用いない切削力制御技術を開発

一般的に、工作機械の運動制御は生産性や形状創成の点から位置制御が必要不可欠である。位置と力は相互干渉することから、これまでに力制御を切削加工に応用した研究はほとんどない。一方で、研究代表者は位置と力の両者を支配する加速度ベースの制御系に関する研究に取り組んできた。制御する周波数帯域を切り分ければ、時間領域において位置と力を同時に制御することが可能になると考えた。びびり周波数を特定できれば、その周波数領域のみ切削力制御を行い、直流成分を含むその他の帯域を位置制御することで、びびり振動を実時間で能動的に抑制する新たな加工技術が実現できると考えた。

### 2. 研究の目的

工具と工作物間の相互作用により生じるびびり振動の回避を目的とした、周波数領域での位置・力ハイブリッド制御による、能動的な異常加工回避技術の開発を行った。サー

ボ情報のみで切削力を推定する外乱オブザーバと、推定切削力をフィードバックすることで実現するセンサレス力制御により、びびり周波数を含む帯域を力制御して切削加工を安定化する技術を提案した。外乱オブザーバにより検知したびびり振動周波数領域に対して零力制御を施し、それ以外の周波数領域では位置制御することで、位置追従性は維持しながらびびり振動を回避する技術を確認する。以下に具体的な研究項目について示す。

(1) 外乱オブザーバを用いたセンサレス異常振動検知技術の高性能化

(2) 特定の周波数域では力制御、その他の周波数域では位置制御する、周波数分離型位置・力ハイブリッド制御手法の開発とびびり振動抑制

### 3. 研究の方法

(1) センサレス異常振動検知技術の高性能化

工作機械の駆動要素であるリニアモータ駆動ステージ、ボールねじ駆動ステージ、高速スピンドルにおけるセンサレス切削力/トルク推定技術の開発に取り組んだ。サーボの入出力情報から外乱オブザーバを応用することで切削力ならびにトルクを推定する。一例として図1にボールねじ駆動ステージにおける切削力推定システムの構成を示す。推定した切削力をフーリエ変換することでびびり振動などの異常振動を検知できるが、測定帯域が広がるにつれて、多くの測定データが必要になり検知に遅れが生じてしまう。そこで高周波域で窓幅が狭くなるウェーブレット変換と、デジタルフィルタ技術を適用した異常振動検知システムを開発して、検知の高応答性を図る。

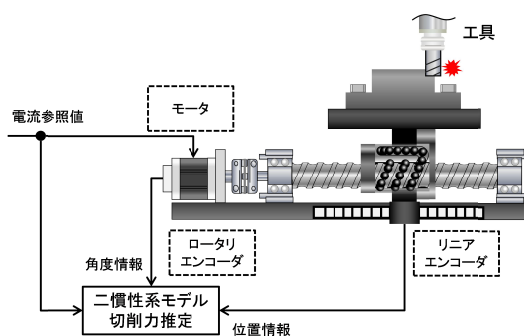


図1 ボールねじ駆動ステージにおける切削力推定

(2) 周波数分離型位置・力ハイブリッド制御によるびびり振動抑制技術の開発

ある周波数帯のみをセンサレス力制御する制御器と、それ以外の周波数帯域を位置制御する制御器を加速度次元で統合することで、特定の周波数のみ力制御を行う制御系を実現する。これによりびびり周波数領域のみに力制御系を適用できるようになり、びびり振動による力変動を抑えるように制御することで振動抑制が可能になる。高精度加工機

に提案手法を実装して、旋削試験によりその有効性を明らかにした。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 センサレスびり振動検知

リニアモータ駆動ステージはダイレクトドライブであることから1慣性系モデルを適用した切削力推定を行い、ボールねじ駆動系においては回転から並進機構への伝達があることから2慣性系モデルを適用して切削力推定手法を開発した。一方で高速スピンドルでは、電流情報とホール素子の情報を用いたセンサレス切削トルク推定手法を開発した。

本研究では、3軸のボールねじ駆動の立形マシニングセンタに切削力推定技術を実装して、欠損工具によるドリル加工中の異常振動検知を行った。X軸方向に生じた推定切削力をウェーブレット変換して周波数解析した結果を図2に示す。欠損のない工具では異常振動が生じていないのに対して、欠損工具の場合、150Hzの異常振動が発生していること実時間検知できた。このように、推定切削力をウェーブレット変換により周波数解析することで計算負荷の低い異常振動検知が可能となることがわかった。

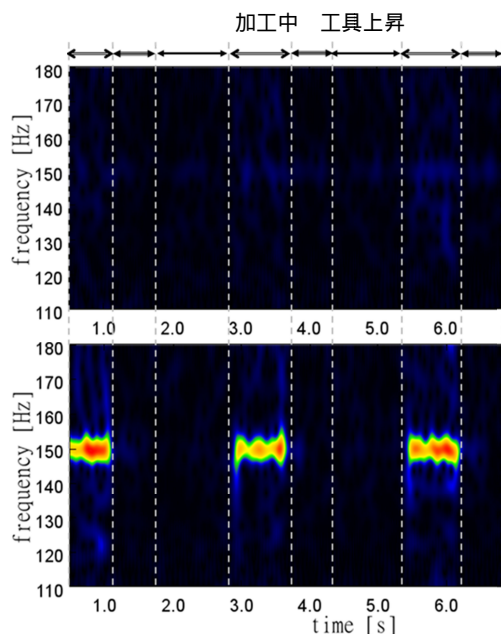


図2 ドリル加工時に生じた推定切削力(X方向成分)のウェーブレット変換による異常振動検知結果:(上)欠損のない工具での加工結果 (下)欠損工具での加工結果

##### 4.2 周波数分離型位置 力ハイブリッド制御手法の開発とびり振動抑制

###### (1) 周波数分離型位置 力ハイブリッド制御系設計

外乱オブザーバを用いた加速度制御

加速度は位置と力の双方に支配的な物理量である。そのため、位置と力の同時制御を達成するためには、加速度をベースとして制御系を考える必要がある。加速度制御系は外

乱オブザーバによる外乱除去技術を組み込むことで実現できる。推定外乱力に等価な補償電流を加えることで、公称値に従った運動をする理想的な送り駆動系となる。このようにして、外乱オブザーバを組み込み設計されたプラント側の加速度制御ユニットが、提案する位置制御と力制御を統合するためのベースとなる。図3に外乱オブザーバを用いた加速度制御ユニットを示す。

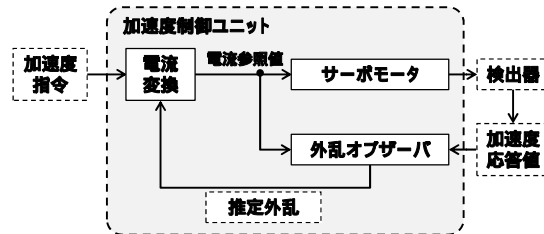


図3 外乱オブザーバを用いた加速度制御ユニット

###### 位置制御コントローラ的设计

最適な位置応答を得るための、加速度制御ベースの位置制御コントローラを設計した(図4)。加速度と位置は2階積分・微分の関係であるので、プラントに指令する加速度から駆動系の位置応答までの伝達特性は2次遅れ系となる。そのため、指令を与えてから応答をするまでに遅れが生じる。そこでゲインを高めて応答を高めようとする、今度はオーバーシュートが生じてしまう。そこで、指令に対して臨界制動となるように位置・速度ゲインを設定し、位置指令から位置応答までの伝達関数が1となるようにフィードフォワードを付した位置制御コントローラを設計した。

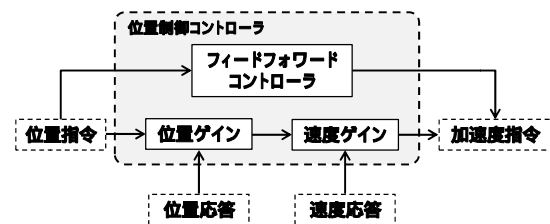


図4 高速度応答を実現する位置制御コントローラ

###### センサレス力制御コントローラ的设计

外乱オブザーバを応用した反力推定オブザーバにより切削力を推定し、コントローラにフィードバックすることで、センサレスで切削力制御が可能となる。ここで、加速度制御ユニットへの入力参照値は、駆動系に与える指令を力から加速度に変換する必要がある。そこでニュートンの第二法則より、力と加速度は比例関係にあるので、変換には比例ゲインのみでよいことが分かる。このようにして、加速度制御をベースにしたセンサレス力制御系を構築した(図5)。

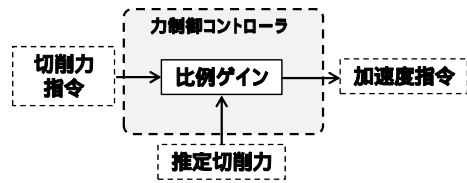


図5 センサレス力制御システム

### 位置/力制御コントローラの統合

一般的に、位置制御は速度制御ベースのコントロールで、力制御は駆動系の推力制御をベースとしたサーボ制御となる。また、バネマス系を考えれば、位置と力は相互に干渉するものである。それ故、同時に位置と力の両者を制御することは不可能である。しかしながら、本研究では加速度制御ベースの位置/力制御システムであるので、加速度次元で両者を統合することが可能となる。ただし、統合する際に干渉が生じないように、周波数帯域を分離する必要がある(図6)。工具軌跡を制御するために、直流成分から遮断周波数までの低域側は位置制御を適用する。一方で遮断周波数から高域は、びびり振動の変動を抑制するために力制御を適用する。または、ある特定の周波数域のみを力制御、それ以外の周波数を位置制御というように、帯域制限フィルタの設定帯域を適切に変更することで、柔軟に制御帯域設定をすることも可能である。設計した位置 力ハイブリッド制御をリアモータ駆動の高精度旋盤に実装し、びびり振動抑制の有効性を旋削試験により評価する。

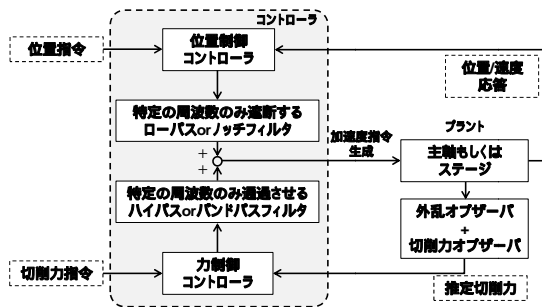


図6 周波数分離型位置 力ハイブリッド制御

### (2) 位置-力ハイブリッド制御手法の評価

まず始めに、提案制御手法による位置と力の同時制御の性能を評価する。図7に示す力制御側の帯域を3-7Hz、それ以外の帯域を位置制御とした。この条件で位置と力それぞれの、指令値から応答値への周波数応答を確認し図に示した。その結果、位置の周波数応答では5Hz周辺のゲインが急激に減少、一方で力の周波数応答は反対に5Hz付近で0となることがわかる。

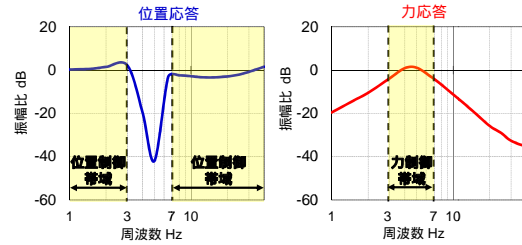


図7 位置と力の指令から応答までの周波数特性

また、ステージを一定速度で送り、そこに力の指令値として5Hzの振動を与えた時の位置と力の時間応答を図8に示した。結果、位置制御は力制御側からの5Hzの力変動の影響をほとんど受けず、また力制御も5Hzの力変動のみを制御できていることがわかる。周波数域を分離して位置と力を制御する提案手法により、帯域を切り分けて位置と力の同時制御が可能であることがわかった。

### (3) びびり振動抑制効果

提案手法によるびびり振動抑制効果を旋削加工の端面切削により確認する。工作物として直径10mmの円柱形状のアルミ材を用意して、工具としてダイヤモンドバイトを準備した。比較のため、従来法である単純位置制御による加工も行う。

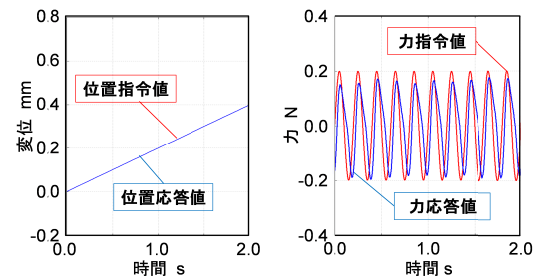


図8 位置と力の時間応答

### 制御法切り替えによる抑制効果検証

外周から3mmまではびびり振動が生じる加工条件で、従来の位置制御を適用した切削を行う。その後、提案した位置 力ハイブリッド制御法に切り替え、びびり振動抑制効果を確認した。その加工後の表面を図9に示す。提案手法に切替えた後は、加工面に生じたびびりマークが消失している。つまり、びびり振動が抑制されていることが確認された。切替え時の位置と切削力の時間応答変化を図10に示した。巨視的には位置応答の変化は見られず、指令値に追従したままであるが、力応答は切替え後に変動が劇的に抑制されていることがわかる。この結果からも、位置追従性を損なうことなく、びびり振動のみが抑制できたことがわかる。従来制御と提案制御の双方の力応答を周波数解析して比較したところ、従来制御で発生していたびびり振動周波数のスペクトルが、提案手法を適用した際には消失していることが確認された(図11)。以上の結果から本研究で提案した周波

数分離型位置-力ハイブリッド制御によるびり振動抑制の有効性が示された。

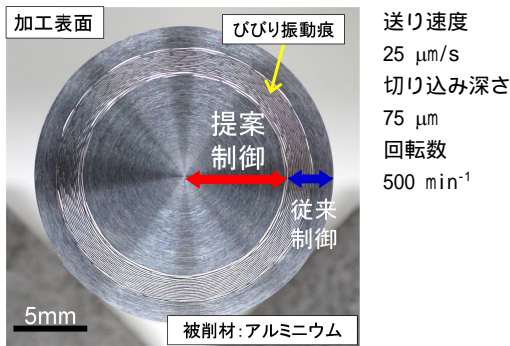


図9 制御切り替えによる加工表面結果比較

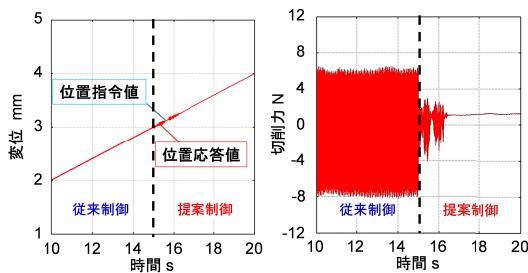


図10 切替え時の応答値の変化の様子

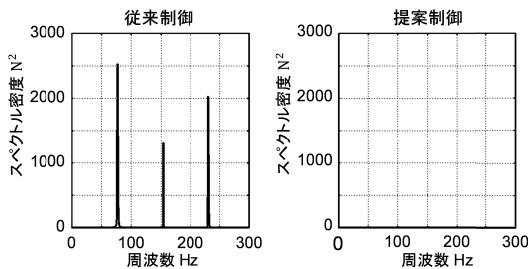


図11 制御切り替えによる加工表面結果比較

### 臨界切り込み深さ比較

上記の結果から、提案制御法によりびり振動が抑制できることがわかった。続いて、従来制御法と比較して、びり振動発生時の臨界切込み量がどの程度増大するのか確認した。図12に示すように、従来の位置制御による旋削では軸方向切り込みが75μmで発生したのに対し、提案制御加工法では140μmまで増大させることができた。

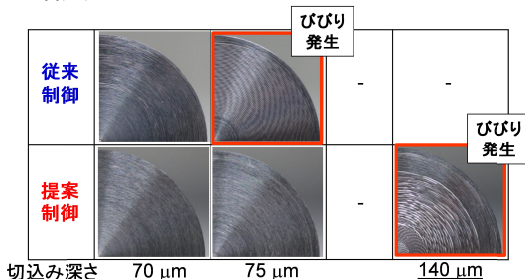


図12 臨界切込み深さの違い

## 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)

Y. Yamada, Y. Kakinuma, T. Ito, J. Fujita, M. Sawazaki, M. Sagara, Sensor-less Cutting Force Estimation in Ball-screw-driven System using Triple-inertia Model, *Advanced Material Research*, 査読有, Vol. 1017, 2014, pp.619-623.

Y. Kakinuma, R. Enomoto, T. Hirano, K. Ohnishi, Active chatter suppression in turning by band-limited force control, *CIRP Annals*, 査読有, Vol.63, No.1, 2014, pp.365-368.

R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, Drill Fracture Detection by Integrating Disturbance Observer and Rotational Digital Filter, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 査読有, Vol. 7, No. 3, 2014, pp. 177-184.

S. Toenissen, R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, F. Klocke, Monitoring of Tool Collision in Drilling by Disturbance Observer, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 査読有, Vol. 7, No. 4, 2014, pp. 274-282.

R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, Sensor-less tool fracture detection applying disturbance observer theory, *Key Engineering Materials*, 査読有, Vol. 523, 2012, pp. 439-444.

〔学会発表〕(計 7 件)

Y. Murakami, R. Koike, Y. Kakinuma, Micro-tool Contact Detection for High-Precision Machine Tools by Disturbance Observer, 15<sup>th</sup> International Conference on Precision Engineering (ICPE2014), 2014年7月25日, 金沢, 日本

Y. Yamada, Y. Kakinuma, Sensor-less Cutting Force Estimation in Ball-screw-driven Stage using Full Closed Control, ISCIE/ASME 2014 International Symposium on Flexible Automation, 2014年7月14日, 淡路, 日本

T. Hirano, Y. Kakinuma, Suppression of Low-frequency Vibration in Precision Turning Processes by Band-limited Force Control, ISCIE/ASME 2014 International Symposium on Flexible Automation, 2014年7月14日, 淡路, 日本

R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, K. Ohnishi, Tool Collision Detection in High-speed Feeding Based on Disturbance Observer, 6<sup>th</sup> CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2014年6月23日, Berkeley, USA

山田雄基, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, フルクローズド制御ボールねじ駆動ステージにおけるセンサレス加工力推定, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013年9月13日, 大阪, 日本

K. Enomoto, Y. Kakinuma, Band-limited Cutting Force Control in Ultra-precision Turning, 13<sup>th</sup> International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 2013年5月29日, Berlin, Germany

R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, Enhancement of sensor-less tool fracture detection method applying rotational digital filter, 3rd CIRP International Conference on Process Machine Interactions (PMI2012), 2012年10月29日, Aichi, Japan

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2件)

名称: 工作機械制御装置, 工作機械制御方法, およびプログラム

発明者: 柿沼康弘, 榎本和人

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2013-242852

出願年月日: 2013年11月25日

国内外の別: 国内

名称: 工作機械制御装置, 工作機械制御方法, およびプログラム

発明者: 柿沼康弘, 山田雄基

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2013-271905

出願年月日: 2013年12月27日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柿沼 康弘 (KAKINUMA YASUHIRO)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 70407146

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし