

令和元年6月17日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04243

研究課題名（和文）次世代切削加工技術のための革新的モデルベースプロセスモニタリング

研究課題名（英文）A novel model-based process monitoring for next-generation cutting technology

研究代表者

鈴木 教和（Suzuki, Norikazu）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00359754

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：切削加工プロセスにおける新しいモデルベースモニタリング技術を提案し、従来技術では実現しえなかった高度な次世代知能化技術の確立に挑戦する。提案手法では、切削加工プロセスの理論的解析技術と工作機械の状態計測・推定技術に基づき、加工システムの評価指標である“切削プロセスパラメータ”と機械構造の“動特性パラメータ”を自動同定する新しい解析的手法を開発する。基礎的なミリングプロセスに対応した解析モデルを開発するとともに、加工実験を通じて提案手法の検証を行い、人の手を必要とせずに工具寿命や加工精度、プロセス安定性を自動推定する次世代知能化技術への発展を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法は、理論モデルに基づき工作機械の内部情報からモデルのパラメータ同定を行う従来に無い独創的な手法である。工作機械に組み込むことで、自動化が困難であった工具摩耗や加工精度の推定も可能となるなど、高度な知能化技術に援用することも可能となる。スマートファクトリーを志向する製造業や工作機械の市場において我が国の画期的な競争力向上に寄与することが期待でき、世界に先駆けて我が国が取り組むべき研究課題の一つである。

研究成果の概要（英文）：A novel model-based monitoring technology in cutting process is proposed to establish advanced next-generation intelligence technology. In the proposed method, based on theoretical analysis technology of cutting process and measurement / estimation technology of machine tools, a new identification of cutting process parameters and dynamics parameters is automatically made. These parameters are evaluation indices of the machining system. Developed analysis models representing the basic milling process were verified through a series of cutting experiments. Using only the internal information of the CNC, without human manual operations, the parameters are identified. With the identified parameters, tool life and processing accuracy are evaluated. The developed technology is also useful to develop next-generation intelligence technology that automatically estimates process stability.

研究分野：生産加工

キーワード：工作機械 切削加工 プロセスモニタリング

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

### 1. 研究開始当初の背景

欧州で Industrie 4.0 (第4次産業革命) の概念が提案されて以来, IoT 活用等により収集された情報を知的に利用する次世代ものづくり体系の整備が急速に進められている. 世界中でスマートファクトリーを志向した戦略的な取り組みが始まった今, 我が国においても世界最高水準の次世代切削加工技術を世界に先駆けて実現しなければ, 日本の製造業に将来はないといっても過言ではない. 切削加工の分野においては, 様々なセンサを利用する IoT を志向した加工技術・工作機械技術の開発が進められている. 例えば, 振動センサから検出される異常振動の情報を利用し, 異常現象を自動回避する先進技術などが, 一般の加工現場でも利用されつつある. 一方で, センサの単純活用によるプロセスモニタリングには限界があり, 革新的な効果を得るのは容易ではないことが明らかになってきている. 例えば, 単に加工中の振動を計測するだけでは, 工具摩耗や伝達特性などの生産管理上で重要となる情報を得ることができない. このため, 結局は, インパルス応答法などによる機械構造の動剛性計測や, 切削力測定による比切削抵抗の分析などをマニュアル作業で行い, これらの情報を解析して統合的にプロセスの最適化を実施する方法が利用される. これらの作業には, 作業者の高度な知識と熟練作業を要する. さらに, 高価な計測器類も必要となることから, 一般に広く普及するには至っておらず, 結果的に, 作業者の経験と勘に頼らざるをえないのが実情である.

### 2. 研究の目的

従来を凌駕する次世代型の切削加工技術を実現するには, センサの単純利用では得られない“質の高い情報”を抽出する高度な理論に基づいた知能化技術が必要になる. そこで本研究では, 切削理論とオブザーバ技術を積極的に活用することにより, モデルベースの手法で高度なプロセスモニタリングを実現する新手法を提案し, 切削加工技術の知能化を実現するための基礎理論の確立を目指す. 提案手法では, 切削加工プロセスの理論的解析技術と工作機械の状態計測・推定技術に基づき, 加工システムの評価指標である“切削プロセスパラメータ”と機械構造の“動特性パラメータ”を自動同定する. ここでは, 基礎的なミリングプロセスに対応した解析モデルを開発するとともに, 加工実験を通じて提案手法の検証を行い, できるだけ CNC 内部情報を利用する. 人の手を必要とせずに工具寿命や加工精度, プロセス安定性を自動推定する次世代知能化技術への発展を目指す.

### 3. 研究の方法

本研究では, まず, 切削プロセスと機械構造の動剛性の理論モデルに基づいて, モデルのパラメータを同定する新しいプロセスモニタリング技術を開発する. その後, 加工検証を通じて, 課題の抽出を行い, 提案手法の実行可能性を評価する. 以下に研究の方法を記述する.

#### (1) 時間領域切削プロセスモデルと高精度外乱力推定モデルの開発

切削断面積や接触幅の影響を考慮した機械的モデルと, 物理現象を取り入れた解析的モデルを混合した切削力モデルを新たに開発する. 本モデルにおいては, 刃先の幾何形状や材料の硬度, 逃げ面摩耗などの情報を反映する. そして, モデルの定式化に基づき, 切削現象の解析ソフトウェア(時間領域シミュレータ)の開発を行う.

さらに, 工作機械の送り系モデルを活用した外乱オブザーバを構築する. 本研究では, 構成の単純な超精密加工機を対象とした1慣性モデル, およびボールねじを用いる駆動系を想定した多慣性系オブザーバモデルについて検討を行う. これにより, 広い周波数帯域で高精度な外乱力推定を実現するオブザーバ技術の開発を行う.

#### (2) 各種パラメータ同定および加工結果推定のアルゴリズム開発と基礎的な実験検証

推定切削力と推定外乱力の関係を定式化し, 逆解析を行うことで関係式を満たす各パラメータを自動同定する解析アルゴリズムを考案する. さらに, 同定した各パラメータから工具摩耗を推定するモデルについて検討を行う. また, 推定切削力に対する機械構造の応答から, 結果的な加工精度や仕上げ面性状を推定するモデルについて検討を行う.

さらに, 実際の工作機械を用いて, 提案モデルの検証を行う. まずは, 単純な送り系を用いて, 単純な加工評価から検討を始めるため, 超精密加工機を利用してミリングによる基礎的な検証実験を行う. その後, 汎用マシニングセンタを用いた検証実験を実施して, 提案手法の実行可能性を確認する.

#### (3) 安定・高能率プロセス条件の推定技術の開発および包括的な実験検証と総合的評価

提案手法により求めた切削プロセスパラメータと動特性パラメータから, びり振動の解析モデルを用いて安定性解析を実施し, 安定かつ高能率となるプロセス条件を推定するソフトウェアを開発する. さらに, 加工実験を通じて推定の妥当性を確認するとともに, 知能化技術としての応用について検討を行う. 同時に, (人為作業による)従来手法との比較を行うことで, 提案手法の有効性, 実用性および問題点について包括的な検討を行う.

### 4. 研究成果

### (1) 時間領域切削プロセスモデルと高精度外乱力推定モデルの開発 (図1)

機械構造の振動変位とその再生効果を考慮した解析モデルとして、切削断面の動的変動成分と切れ刃接触長さ成分に比例する機械的モデル (Mechanistic model) を開発した。また、加工の物理モデルを含む、解析的モデル (Analytical model) と機械的モデルを混合した高度な切削モデルを新たに検討した。本プロセスモデルの定式化を行い、解析ソフトウェア (時間領域シミュレータ) を開発して、その動作を確認した。

また、工作機械の送り系において、移動体および回転体に入力される推力と位置情報などから、単純な慣性系モデルを用いて外乱力を推定する外乱オブザーバを開発した。さらに、単純な超精密加工機を用い、外乱力推定が可能な周波数領域などの基本特性について評価を行った。加えて、ボールねじを用いる駆動系を想定し、多慣性系におけるオブザーバのモデル化を行った。同時に、エンコーダ以外のセンサを併用した外乱力推定についても検討を行った。検討の結果、汎用的な工作機械 (マシニングセンタ) においては、外部センサを併用することで、広周波数帯域で比較的精度の高い外乱力推定を実現し得ることを確認した。

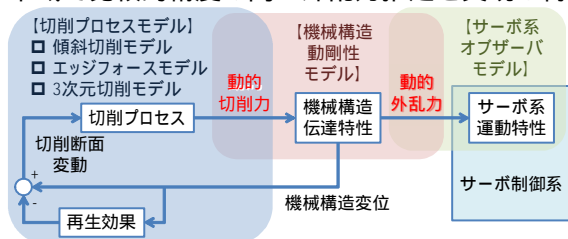


図1 開発モデルの概要

### (2) 各種パラメータ同定および加工結果推定のアルゴリズム開発と基礎的な実験検証

機械構造の動剛性と加工プロセスを考慮した動的切削プロセスをモデル化し、その運動方程式を考慮した時間領域シミュレータを開発した。これを用いて推定した外乱力と、(1)で開発した外乱オブザーバにより推定した外乱力を比較し、各パラメータを自動同定する解析アルゴリズムを開発した。さらに、同定した各パラメータ (エッジフォース係数、せん断強さなど) から工具摩耗を推定するモデルについて検討を行った。また、推定切削力に対する機械構造の応答から、加工精度と仕上げ面性状を推定するモデルを開発した。

さらに、超精密加工機を用いたミリング実験を実施し、提案手法によりパラメータを同定し得ることを確認した。同定したパラメータは、従来法により切削実験やハンマリング試験によって得られる値と近いことを確認した。加えて、提案手法により得られたパラメータより推定したびり振動の安定限界は、従来手法よりも推定精度が高いことを確認した (図2)。また、ボールねじ駆動による汎用的な工作機械を用いて、提案モデルの検証を行った結果、切削力の推定精度は必ずしも高くない場合があるが、パラメータの同定精度は高いことを確認した。

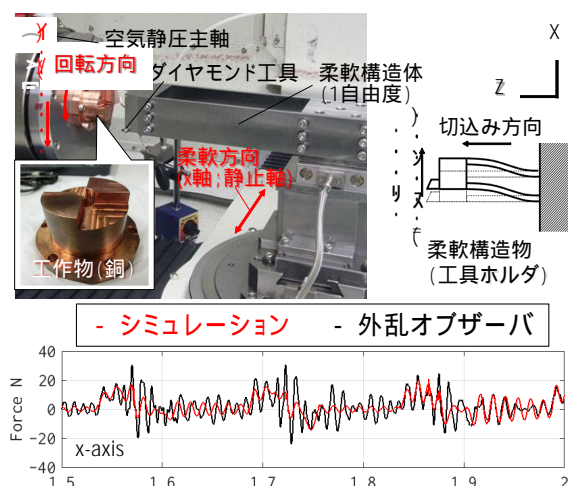


図2 検証実験の外観と切削力シミュレーションの比較

### (3) 安定・高能率プロセス条件の推定技術の開発および包括的な実験検証と総合的評価

(1)(2)で開発した、機械構造の動剛性と加工プロセスを考慮した動的切削プロセスをモデル化した時間領域シミュレータを拡張し、不等ピッチ・リードエンドミルを考慮したシミュレーションソフトを開発した。さらに、スクエアエンドミルによる任意の2次元的な工具経路を与えた加工に対応可能なシミュレータを開発した。開発技術により、振動を考慮して形成される加工面形状を推定することが可能となった。検証実験を通じて開発技術の評価を行い、適切なパラメータを設定することで、プロセスの安定性と加工結果を精度よく推定し得ることを確認した。

また、不等ピッチ・リード工具を用いた検証実験を通じて、開発技術により安定・高能率加工条件を精度よく推定し得ることを確認した。さらに、従来の周波数領域で実施される安定限界解析と比較すると、プロセスの非線形性を考慮した時間領域シミュレーションの方が高い推定精度を示すことを確認した(図3)。特に、振動振幅が小さい条件においては、プロセスダンピングの影響を考慮して精度が向上することを確認した。一方で、振動振幅が大きい条件では、解析モデルにおける近似が成立せずに推定精度が低下することを確認した。このため、大振幅を近似しないモデル化とこれを実装した高速計算アルゴリズムの開発が今後の課題であることが明らかとなった。

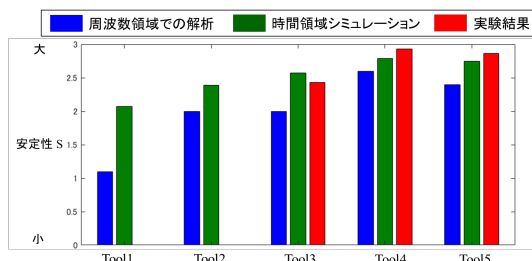


図3 びびり振動推定の結果の比較

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

S. Yamato, T. Okuma, K. Nakanishi, J. Tachibana, N. Suzuki, Y. Kakinuma, Chatter suppression in parallel turning assisted with tool swing motion provided by feed system, International Journal of Automation Technology, 査読あり, Vol.13, No.1, pp.80-91, (2019)

S. Sakata, T. Kadota, Y. Yamada, K. Nakanishi, H. Yoshioka, N. Suzuki, Y. Kakinuma, Chatter Avoidance in Parallel Turning With Unequal Pitch Angle Using Observer-Based Cutting Force Estimation, J. Manuf. Sci. Eng. ASME, 査読あり, 140(4), 044501 (Feb 14, 2018)

S. Yamato, Y. Yamada, K. Nakanishi, N. Suzuki, H. Yoshioka, Y. Kakinuma, Integrated In-process Chatter Monitoring and Automatic Suppression with Adaptive Pitch Control in Parallel Turning, Advances in Manufacturing, 査読あり, September 2018, Volume 6, Issue 3, pp 291-300

### 〔学会発表〕(計12件)

N. Suzuki, Y. Kato, E. Shamoto, Y. Naiki, Y. Takagi, DEVELOPMENT OF A SPRT MILLING TECHNOLOGY FOR NI-BASED SUPER ALLOY, Proceedings of 2018 International Symposium on Flexible Automation, ISFA2018-S074 (Kanazawa, Japan, 15 - 19 July, 2018)

K. Takahei, T. Fujita, R. Ikeda, N. Suzuki, S. Ohno, E. Shamoto, Simulation-based Concurrent Identification of Milling Process and Mechanical Dynamics with Sensor-integrated Multi-inertial System Disturbance Observer, Proceedings of the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (Hiroshima, Japan, November 13-17, 2017)

N. Suzuki, R. Ikeda, E. Shamoto, Primitive study on model-based process identification by utilizing force estimation techniques, Proceedings of the ASME 2016 International manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2016, MSEC2016-8872, (June 27-July 1, 2016 Blacksburg, Virginia, USA)

### 〔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)研究分担者

研究分担者氏名：社本 英二

ローマ字氏名：Shamoto Eiji

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：20216146

(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。