

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05724

研究課題名(和文) 高度バーチャルファクトリの実現に向けた加工結果と消費エネルギー予測技術の開発

研究課題名(英文) Development of a Prediction Technology for Machined Results and Energy Consumption to Realize Advanced Virtual Factories

研究代表者

佐藤 隆太 (SATO, RYUTA)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60376861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、工作機械の送り駆動系の運動誤差と幾何誤差を考慮して加工形状と加工面とを予測する方法とモータのトルクと回転速度とから消費エネルギーを予測する方法とが確立されたほか、工作機械の構造振動と送り駆動系および主軸駆動系の特性を表現可能な数学モデルを構築し、これとボクセルモデルによる切削力と加工結果のシミュレーション技術を連成させることに成功した。様々な運動誤差が加工面に及ぼす影響、運動中の消費電力およびエネルギー、および切削加工中の工作機械の挙動に起因する切削力変動を開発したシミュレーション技術によりの確に表現できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：Simulation technologies for NC machine tools to realize advanced virtual factories are developed in this study. They are, a simulation technology to predict the influence of dynamic and geometrical error sources onto the machined workpieces, a simulation method for the energy consumption during the motions, and a coupled simulation technology between the dynamic machine tool behaviors and cutting forces. Those technologies can be integrated as a virtual machining center. Actual machining and measurement tests are carried out to evaluate the developed simulation technologies. It is confirmed that the developed virtual machining center can predict the behaviors of actual machine tools. It is expected that the developed virtual machining center can be an effective tool to optimize the machine tool design, cutting conditions, and production processes.

研究分野：数値制御工作機械

キーワード：工作機械 シミュレーション 送り駆動系 運動誤差 幾何誤差 振動 切削力

1. 研究開始当初の背景

計算機上の仮想工場である「バーチャルファクトリ」を構築して、工場で起こり得る問題を事前にシミュレーションして解決してしまう取組みが世界的に行われている。これにより、実際の工場で生産を中断して問題解決を行う必要がなくなり、生産に直接寄与しない時間およびエネルギーを大幅に削減することが可能となる。さらに、製品の設計段階でその生産までをシミュレーションし、生産段階で起こり得る問題点や生産に要するエネルギーを事前に予測して製品の設計に反映させる取組みも進められようとしている。

現在検討が進められているバーチャルファクトリでは、個別の工作機械それぞれについて詳細なモデル化がなされているわけではなく、あくまで工場全体の最適な工程設計や幾何学的な部品形状に対する加工の可否の判断に留まっている。これは、バーチャルファクトリの検討が主に工程設計やCAD/CAMといった上流工程に携わる技術者および研究者によって行われてきたためであると考えられる。

実際の生産現場では、工作機械の運動誤差や加工現象に起因した製品不良が起こることが多く、そのような問題が起こると試験加工を繰り返して試行錯誤的に問題を解決することが一般的であり、生産に直接寄与していないという意味で、むだな時間とエネルギーが費やされている。真に有効なバーチャルファクトリを実現するためには、個別の工作機械において起こり得る問題や消費エネルギーについても詳細にモデル化し、それによるシミュレーション結果を加工工程や製品設計に反映できるようにする必要がある。

申請者らは、数値制御工作機械における形状創成プロセスをモデル化してシミュレーションを行うことで、加工される部品の形状精度や面品位についての的確に予測できることを、世界に先駆けて明らかにしてきた。そのなかで、運動誤差が存在しても工具経路の設計次第で良好な加工面を得られることなどを明らかにし、シミュレーション結果を用いて事前に加工方法の検討を行うことの有効性が示された。その研究の基盤になっているのは、工作機械の送り軸を駆動する直進および回転送り駆動系の詳細な運動シミュレーション技術と、工作機械がもつ幾何学的な誤差的的確なモデル化技術である。

あわせて、申請者らは、工作機械の消費エネルギーについても詳細な調査およびモデル化を進めており、駆動系の消費電力に影響を及ぼす因子の解明や消費エネルギー推定モデルの構築を進めてきた。それらの研究により、送り速度や負荷により送り軸の消費エネルギーは大きく影響を受けることや、軸ごとの消費エネルギーの違いに起因して、同じ形状を加工する場合でも工具経路を変えるだけで加工に要する消費エネルギーは大きく変化することが明らかにされた。ここからも、シミュ

レーション結果を用いて事前に製品形状や加工方法(工具経路)を最適化できることの可能性が示されている。

一方、切削加工中の主軸および送り駆動系における消費エネルギーは、切削力の大きさだけではなく、そのときの主軸回転数、送り速度、切れ刃通過周波数および切削力波形による影響をうけることがわかっており、これには主軸および送り駆動系の周波数応答特性が関係していると考えられたため、そのことをシミュレーションにより検証することを試みたが、成功には至らなかった。そのことの原因として、切削力のシミュレーションと駆動系のシミュレーションとを別々に実施したことが挙げられる。

すなわち、図1にそのイメージを示すように、切削力は主軸および送り駆動系に対する外乱として作用し、この外乱により主軸回転数や送り速度が変動する。その結果、切削速度や切込み量が変化するので、切削力自体も変化してしまう。このような相互作用がこれまで考慮されていなかったため、切削加工中の挙動や消費エネルギーを正しく表現することができなかった。よって、真に有効なバーチャルファクトリを構築するためには、主軸および送り駆動系の運動と切削力との間の連成シミュレーションを行う必要があるとの結論に達した。

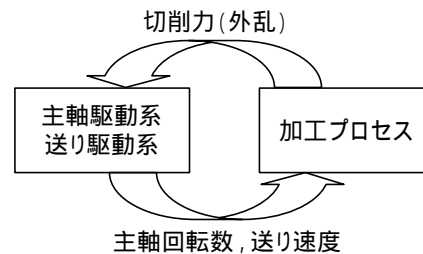


図1 主軸回転及び送り運動と切削力との間の相互作用のイメージ

同じ研究室に所属しており本研究の連携研究者である白瀬教授は、これまでに、形状のボクセルモデルを用いた切削形状や切削力のシミュレーションについて取組み、形状と切削力の同時シミュレーション技術を確立している。そこで、その切削力シミュレーション技術と主軸および送り駆動系の運動シミュレーション技術とを組み合わせることで、形状精度、面品位、および加工に要するエネルギーを的確に予測するためのシミュレーション方法を確立できると考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、工場における生産設備の中核を占める数値制御工作機械について、加工される部品の形状精度、面品位、および加工に要するエネルギーを事前に予測するためのシミュレーション方法を確立し、世界に先駆けた高度なバーチャルファクトリの実現に寄与することである。

3. 研究の方法

(1) 工作機械の運動誤差を考慮した加工形状シミュレーション

工作機械の運動誤差を考慮した加工形状シミュレーション方法の概要を図2に示す。この方法では、工作機械の各送り軸の動的な運動特性と、軸間の直角度や回転軸中心位置のオフセットといった幾何誤差が考慮されている。各軸の運動のシミュレーション結果から幾何誤差を考慮した座標変換によって工具-工作物間の相対位置と姿勢とを計算し、そこから工具形状を考慮して加工形状を計算する。さらに、光線の状況や加工面の反射特性を考慮してその結果を表示する。

実際に加工を行ってその加工形状の測定と加工面の観察とを行い、シミュレーション結果と比較することで、開発された方法の有効性を検証した。

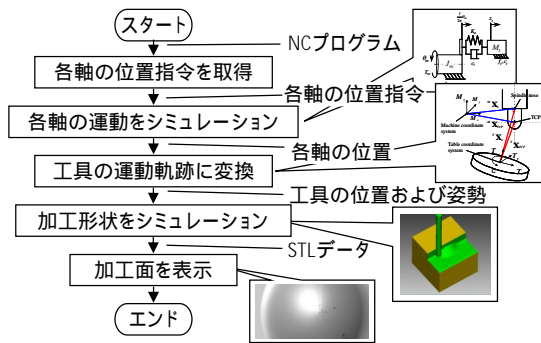


図2 工作機械の運動誤差を考慮した加工形状シミュレーション方法の概要

(2) 消費電力のシミュレーション

運動中の消費電力は、各軸の送り駆動系のモータのトルクと回転速度のシミュレーション結果から計算した。工作機械の消費電力は、各軸の消費電力の合計として表現できる。実際に運動中の消費電力を測定し、シミュレーション結果と比較することで、開発された方法の有効性を検証した。

(3) 工作機械の挙動と切削力の連成シミュレーション

本研究によって実現された工作機械の動

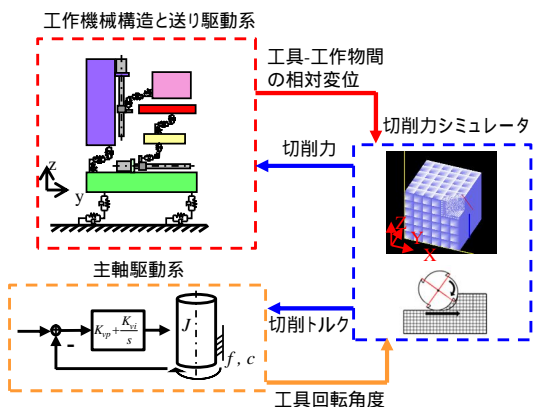


図3 工作機械の挙動と切削力の連成シミュレーション方法の概要

的な挙動と切削力との連成シミュレーション方法の概要を図3に示す。この方法では、工作機械の各送り駆動系の特性、工作機械本体構造の振動特性、および主軸駆動系の特性が考慮されている。それらを統合することでシミュレーションされた工具と工作物との間の相対位置および姿勢と工具回転角度とから、各工具切れ刃の工作物に対する位置を計算できる。その結果を別途開発されたボクセルモデルに基づく切削力シミュレータに入力し、切削力と加工形状とをシミュレーションする。切削力シミュレータによって計算された切削力の各方向の成分と切削トルクとを、工作機械構造モデルの主軸およびワークテーブルに対して外乱として印加することで、工作機械の挙動と切削力との間の連成シミュレーションを実現した。

実際に加工試験を行ってそのときの切削力、各送り駆動系モータのトルクおよび回転速度、主軸モータのトルクおよび回転速度を測定し、それらのシミュレーション結果と比較することで、開発された方法の有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 工作機械の運動誤差を考慮した加工形状シミュレーション

工作機械の運動誤差が加工形状に及ぼす影響の例を図4と図5に示す。これは、半球形状上部をボールエンドミルを使って同時5軸制御加工を行った場合の結果であり、図4が実際の加工結果、図5がそのシミュレーション結果である。回転軸に存在する幾何誤差一つである回転中心位置のオフセットを故意に生じさせた状態で実加工試験とそのシミュレーションとを行っており、オフセットの向きをY方向に与えた場合とZ方向に与えた場合の2通りの検証を行っている。

図4によると、回転軸の中心位置がY方向にオフセットしている場合にのみ加工面上にへこみが生じており、これは、加工時の工具経路とオフセットの方向との関係に起因するものである。そのシミュレーション結果である図5をみると、図4の実験結果と同じ現象が現れており、回転軸の幾何誤差による影響を正確にシミュレーションできていることがわかる。

幾何誤差による影響のほかにも、各軸を駆動する送り駆動系の挙動に起因する影響についても正確に予測可能であることがわかっており、開発された方法を使って実際の加工結果を事前に予測できることが示されたほか、加工形状に影響を及ぼしている誤差要因を特定することも可能となり、実際に、ISO規格に提案されているS形状加工試験における影響因子の特定に活用された。また、本技術を応用して、工作物の机上計測結果に基づく回転軸に存在する幾何誤差の同定が可能であることも示されている。

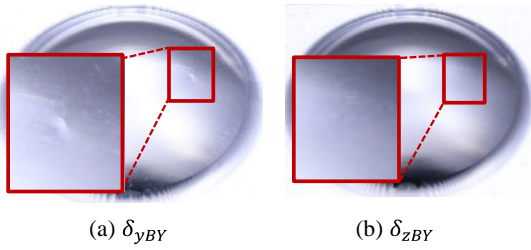


図 4 回転軸の幾何誤差が加工面に及ぼす影響（実験結果）

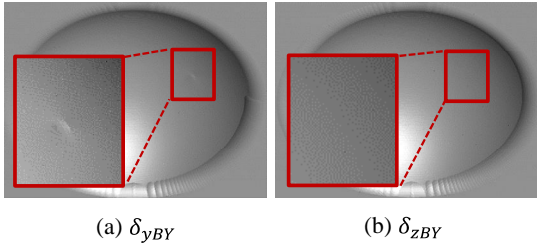


図 5 回転軸の幾何誤差が加工面に及ぼす影響（シミュレーション結果）

(2) 消費電力のシミュレーション

運動中の消費電力の測定結果とそのシミュレーション結果の例を図6に示す。図からわかるように、本研究で開発された方法によって運動中の消費電力波形を正確に表現することが可能である。

この技術を用いて、工具経路を変えることで加工に要するエネルギーを低減可能であることが示されたほか、同時5軸制御加工においてテーブル上の工作物設置位置を変更することでも消費エネルギーを削減できることが示された。

本研究によって実現された消費電力のシミュレーション技術を用いることで、生産設備全体の消費エネルギーの予測も可能になり、その結果に基づいて工作機械や生産設備全体の消費エネルギーを低減するための方法を検討することも可能になる。

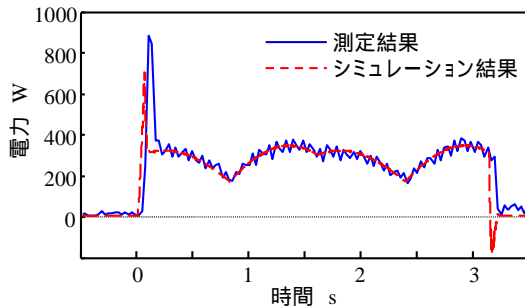
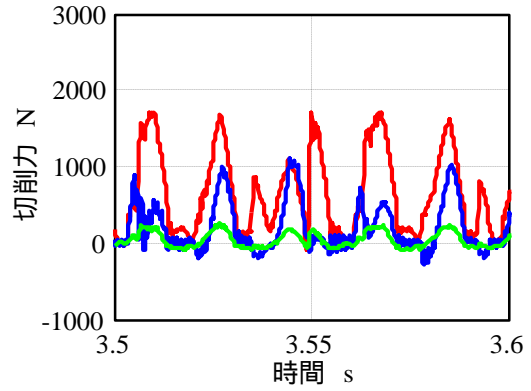


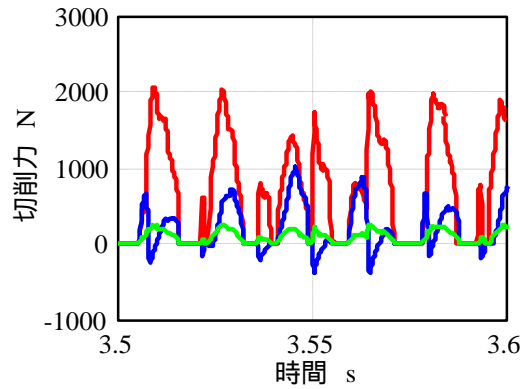
図 6 運動中の消費電力波形

(3) 工作機械の挙動と切削力の連成シミュレーション

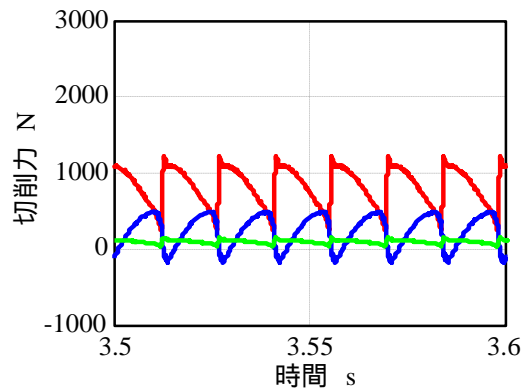
本研究によって実現された工作機械の挙動と切削力の連成シミュレーション技術を用いて、フライス加工中の切削力波形を解析した事例を図7に示す。



(a) 実験結果



(b) シミュレーション結果
(連成シミュレーション)



(c) シミュレーション結果
(切削力シミュレーションのみ)

図 7 工作機械の挙動が切削力波形に及ぼす影響の解析結果の例

図7(a)は実加工試験を行い、そのときの切削力を切削動力計によって測定した結果であり、図7(b)は実加工と同じ条件でのシミュレーションを行った結果である。また、工作機械の挙動による影響を明らかにするため、故意に工作機械の特性を考慮せず切削力だけのシミュレーションを行った結果を図7(c)に示す。

図7の結果をみると、本研究によって実現

された連成シミュレーション技術を用いることで、実際の加工中に生じている切削力の変動を的確に表現できていることがわかる、練成シミュレーションを行っていない図7(c)の結果は実験結果と大きく異なっており、工作機械の挙動が切削力波形に大きな影響を及ぼしていることが確認された。

この連成シミュレーション技術は本研究によって世界で始めて実現されたものであり、本技術に基づいて加工中の異常な振動の原因を明らかにしてその対策を検討することが可能になるほか、加工能率をより高めるための工作機械構造や制御方法の開発へ利用も可能である。

本研究で開発された一連のシミュレーション技術を統合したものは、実際の工作機械において加工中に生じている様々な現象を表現でき、「バーチャルマシニングセンタ」と呼べるものとなる。これを用いれば、加工される部品の形状精度、面品位、および加工に要するエネルギーを事前に予測することが可能であり、世界に先駆けた高度なバーチャルファクトリの実現に寄与できる。

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11件)

SATO, Ryuta, SHIRASE, Keiichi, IHARA Yukitoshi, Influence of NC Program Quality and Geometric Errors of Rotary Axes on S-shaped Machining Test Accuracy, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 査読あり, Vol.2, No.2, 2018, jmpp-272272.
DOI: 10.3390/jmpp2020021

SATO, Ryuta, SHIRASE, Keiichi, Geometric Error Compensation of 5-axis Machining Center based on On-machine Workpiece Measurement, International Journal of Automation Technology, 査読あり, Vol.12, No.2, 2018, 230-237

SATO, Ryuta, SHIRASE, Keiichi, HAYASHI, Akio, Energy Consumption of Feed Drive Systems Based on Workpiece Setting Position in Five-axis Machining Center, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 査読あり, Vol.140, No.2, 2018, No.021009

野口 晋,西田 勇,佐藤 隆太,白瀬 敬二,切削加工のボクセルシミュレータを用いた工作機械の動的挙動と切削力の時間領域連成シミュレーション,日本機械学会論文集,査読あり,Vol.83, No.856, 2017, No.17-00254
DOI: 10.1299/transjsme.17-00254

佐藤 隆太,仮想5軸制御マシニングセンタ,機械の研究,依頼原稿,Vol.69, No.7, 2017, 577-584

NISHIGUCHI, Tadahiro, HASEGAWA, Shogo, SATO, Ryuta, SHIRASE, Keiichi, Evaluation Method for Behavior of Rotary Axis around Motion Direction Changing, International Journal of Automation Technology, 査読あり, Vol.11, No.2, 2017, 171-178

HASEGAWA, Shogo, SATO, Ryuta, SHIRASE, Keiichi, Influence of Geometric and Dynamic Synchronous Errors onto Machined Surface in 5-axis Machining Center, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読あり, Vol.10, No.5, 2016, No.16-00133
DOI: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0071

佐藤隆太,NC工作機械の運動誤差を考慮した加工面シミュレーション技術,依頼原稿,Vol.83, No.3, 2017, 204-209

SATO, Ryuta, TASHIRO, Gen, SHIRASE, Keiichi, Analysis of the Coupled Vibration Between Feed Drive Systems and Machine Tool Structure, International Journal of Automation Technology, 査読あり, Vol.9, No.6, 2015

[学会発表](計12件)

NOGUCHI, Shin, Coupled Simulation between Machine Tool Behavior and Cutting Force using Voxel Simulator, the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2017

SATO, Ryuta, Energy Consumption of Feed-drive Systems that Depends on the Workpiece-setting Position in a Five-axis Machining Center, ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2017

野口 晋,ボクセルモデルを用いた切削力シミュレータによる工作機械の動的挙動と切削力の時間領域連成シミュレーション,2017年度精密工学会秋季大会学術講演会,2017

佐藤 隆太,同時5軸制御によるS字形加工精度 NCプログラムのトレランスと幾何誤差の影響,2017年度精密工学会秋季大会学術講演会,2017

HASEGAWA, Shogo, Synchronous Motion of Translational and Rotary Axes to Evaluate the Behavior of Rotary Axis, ASME 2016 International Symposium on Flexible Automation, 2016

野口 晋, エンドミル加工における工作機械駆動系の挙動と切削力の時間領域連成シミュレーション, 2016

SATO, Ryuta, Geometric Error Compensation of Five-axis Machining Centers based on On-machine Workpiece Measurement, 16th International Conference on Precision Engineering, 2016

野口 晋, 工作機械駆動系と切削力の時間領域連成シミュレーション, 第23回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会, 2016

HASEGAWA, Shogo, Influence of Geometric and Dynamic Synchronous Errors onto Machined Surface in 5-axis Machining Center, the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015

長谷川 正悟, 5軸制御マシニングセンタ回転軸の運動方向反転挙動の評価, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016

〔その他〕

ホームページ等

http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new_index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 隆太 (SATO, Ryuta)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60376861

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

白瀬 敬一 (SHIRASE, Keiichi)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80171049

(4) 研究協力者

西田 勇 (NISHIDA, Isamu)
井原 之敏 (IHARA, Yukitoshi)
林 晃生 (HAYASHI, Akio)
野口 晋 (NOGUCHI, Shin)
西口 直浩 (NISHIGUCHI, Tadahiro)
長谷川 正悟 (HASEGAWA, Shogo)