

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究(B)（一般）
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17H03158
 研究課題名（和文）任意の空間分解能と時間分解能で連成解析を行うための切削加工シミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of virtual machining simulator for coupled simulation in variable spatial and time resolutions

研究代表者
 白瀬 敬一（Shirase, Keiichi）
 神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：80171049
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では多目的・多用途に利用可能なエンドミル加工の切削力シミュレータを開発した。静的切削力のシミュレーションでは、工具の弾性変形を考慮して切削力シミュレータを開発した。弾性変形の大きさによって切削力が増減するという関係を考慮することが非常に難しい。こうして計算される工具の弾性変形から求めた加工面形状の予測結果は実験結果とよく一致した。動的切削力と工作機械動特性との連成シミュレーションでは、工作機械の動特性シミュレータと動的切削力シミュレータを統合した連成シミュレータを開発した。シミュレーション結果は非定常の切削現象をよく再現していて、この成果をまとめた論文が日本機械学会の論文賞に選ばれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、エンドミル加工の加工現象を理解するために多目的・多用途に利用可能な切削力シミュレータを開発した点にある。加工現象の静的な解析から動的な解析まで広範囲の用途や目的に利用できるようになり、これまで研究例がなかった動的切削力と工作機械動特性との連成シミュレーションを実現してその有効性を示した意義は大きい。
 社会的意義は、我が国のものづくりを支える生産技術の情報化・知能化において、仮想生産あるいはヴァーチャルマニュファクチャリングを実効性のあるものとする高度な加工シミュレーション技術を提供した点にある。ドイツが提唱するインダストリー4.0が目指す新産業革命の実現に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a cutting force simulator for end milling operation that can be used for multiple purposes and objectives was developed. For static cutting force simulation, a cutting force simulator considering elastic deformation of the tool was developed. It is very difficult to consider the relationship that the cutting force increases or decreases depending on the magnitude of elastic deformation. The predicted machined surface shape obtained from the calculated elastic deformation of the tool has good agreement with the experimental machined surface shape. For the time domain coupled simulation of dynamic cutting force and machine tool dynamics, a coupled simulator that integrates a machine tool dynamics simulator and a dynamic cutting force simulator was developed. The simulation results well reproduced the unsteady cutting phenomenon, and the paper summarizing the results was awarded as the outstanding paper of the Japan Society of Mechanical Engineers.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：切削力シミュレーション エンドミル加工 工作機械 連成シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

新産業革命インダストリー4.0 が注目される以前からハードウェア主体の生産技術の高度化・自動化は、ソフトウェア主体の生産技術の情報化・知能化へと移行しており、仮想生産あるいはヴァーチャルマニュファクチャリングを実効性のあるものとするには高度なシミュレーション技術が必要とされている。

加工現象を理解する目的で加工中の切削力を予測するシミュレーションの研究は古くから行われてきたが、以下に挙げる問題点が依然として残されている。

- 工具切れ刃の形状が数式で定義されていて、多様な工具切れ刃形状に対応できない。
- 工具と被削材間の剛性や減衰係数が未知で、工具振動の影響を考慮した動的切削力シミュレーションが難しい。
- 空間分解能と計算時間とのトレードオフで、表面粗さを予測するような加工面創成シミュレーションが難しい。
- 動的切削力と工具切れ刃の軌跡に影響を与える工作機械の動特性との連成シミュレーションの例がない。

2. 研究の目的

本研究では任意の空間分解能と時間分解能で多目的・多用途に利用可能な切削力シミュレータを開発して、以下に示す高度なシミュレーションを実現する。

- ① 多様な工具切れ刃形状に対応できる静的切削力シミュレーション
- ② 工具振動の影響を考慮した動的切削力シミュレーション
- ③ 動的切削力シミュレーションに基づく加工面創成シミュレーション
- ④ 動的切削力と工作機械動特性との連成シミュレーション

従来の切削力シミュレータは目的や用途に応じて使い分けるが、ここで開発する切削力シミュレータは静的な解析から動的な解析まで広範囲の用途や目的に利用できるようになる。さらに、これまでに研究例がなかった連成シミュレーションに取り組む点が独創的である。

仮想生産あるいはヴァーチャルマニュファクチャリングを実効性のあるものとするために必須となるシミュレーションツールの開発により、インダストリー4.0 が目指す新産業革命の達成に貢献する。

3. 研究の方法

研究代表者の白瀬は、被削材をボクセルモデルで表現してエンドミル加工中の加工形状の変化と切削力が可視化できるヴァーチャルマシニングシミュレータを開発してきた。このシミュレータを拡張し、ボクセルサイズの大小を変更することで任意の空間分解能に、解析を行う時間間隔を変更することで任意の時間分解能にそれぞれ対応できる、多用途・多目的に利用可能な切削力シミュレータを開発する。図1に示すように、空間分解能と時間分解能を小さくして動的な解析ができるようになると、加工面に現れるカッターマークや表面粗さ、加工中の振動現象が解析できるようになる。

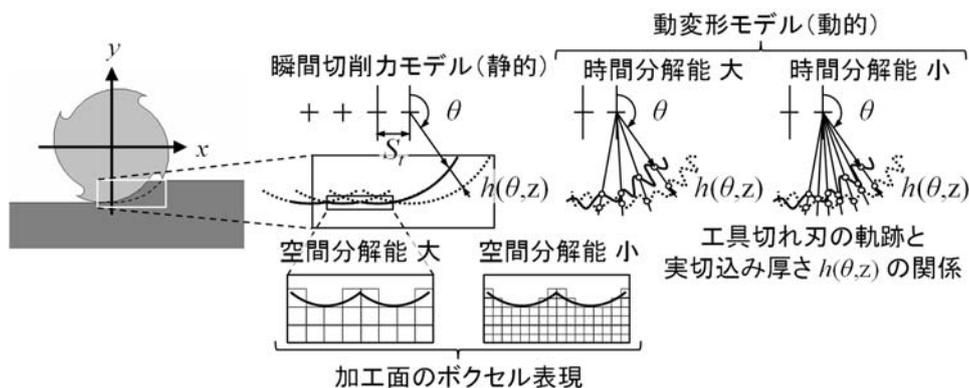


図1 任意の空間分解能と時間分解能で多目的・多用途に利用可能な切削力シミュレータ

4. 研究成果

(1) 切削力シミュレータの改良

図2に示すように、開発する切削力シミュレータが多様な工具切れ刃形状に対応できるように、切れ刃形状を数式によらず点群で表現するように改良した。スクエアエンドミルやボールエンドミルだけではなく、ラジラスエンドミルやテーパエンドミルのような多様な工具切れ刃形状が定義できるようになった。さらに、動的な解析に対応できるように、工具1刃送り量ごとの解析から任意の工具微小回転量ごとの解析ができるように改良した。こうした改良で、加工中の工具姿勢の変化や工具の変形、工具の振動を考慮した切削力シミュレーションが実現可能となった。

	解析間隔	工具形状	適応範囲
改良前	工具1刃送り量ごとの解析	円柱や球で表現できる形状	工具1刃送り量ごとの定常な加工 工具は剛体
改良後	工具微小回転量ごとの解析	工具切れ刃を点群で表現 工具形状に制約がない	加工状況の変化に対応 工具姿勢の変化 工具の変形 振動

図2 改良前と改良後の切削力シミュレータの比較

(2) 工具系の弾性変形を考慮した切削力シミュレータの開発

従来の切削力シミュレータは、工具は剛体（変形しない）という前提で静的な切削力を予測している。また、工具1刃当たりの送り量で除去される切削領域を基に実切込み厚さを検出していた。そこで図2に示したように工具切れ刃を点群で表現し、工具の微小回転量ごとに工具切れ刃の軌跡を追跡して加工中の工具の弾性変形および工具把持部の変形（工具系の弾性変形）を考慮して実切込み厚さを計算できるように改良した。このシミュレータでは、①弾性変形が増加すると実切込み厚さが減少する、②実切込み厚さが減少すると切削力が減少する、③切削力が減少すると工具系の弾性変形が減少する、④工具系の弾性変形が減少すると実切込み厚さが増加する、⑤実切込み厚さが増加すると切削力が増加する、⑥切削力が増加すると工具系の弾性変形が増加する、という切削力と工具系の弾性変形が矛盾なく均衡するように計算を行う必要がある。この一連の計算を工具の微小回転量ごと（微小時間間隔ごと）に繰り返して工具切れ刃の軌跡を追跡すると、図3に示すような加工面形状と加工誤差を予測することができる。シミュレーション結果は概ね測定結果と一致しており、定常部では加工誤差の最大値が600 μm程度になることがわかる。

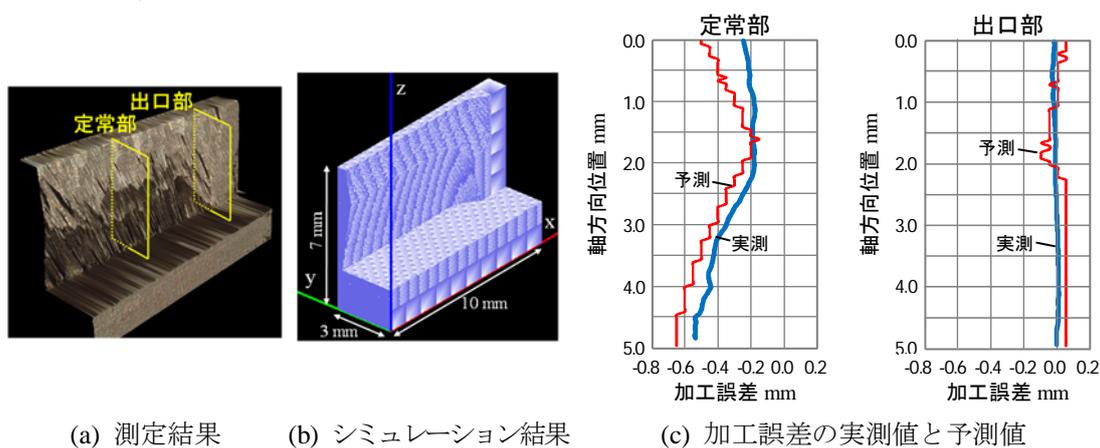


図3 加工面形状と加工誤差

(3) 加工誤差のシミュレーション結果に基づいた加工誤差補正

(2) で示した加工面形状と加工誤差のシミュレーション結果を用いて、加工誤差の補正実験を行ってその効果を検証した。図3に示した定常部の加工誤差は軸方向位置2mm付近で最小となっていて、工具位置を修正するだけでは十分な誤差補正効果が得られない。このため工具姿勢も修正して加工誤差を補正する。この場合、シミュレーション結果から工具位置と工具姿勢の修正量を決定するだけでは不十分で、①工具位置と工具姿勢を修正すると実切込み量が増加する、②実切込み量が増加すると切削力が増加する、③切削力が増加する工具系の弾性変形が増加する、④工具系の弾性変形が増加すると加工誤差が増加する、⑤加工誤差が増加すると工具位置と工具姿勢の修正量が増加する、という工具位置と工具姿勢の修正量と加工誤差が矛盾なく均衡するように計算を行う必要がある。また、定常部と出口部のように加

工する場所によって加工誤差が変化するので、加工する場所ごと（工具の微小移動量ごと）に上記の計算を行って工具位置と工具姿勢の修正量を決定する。5軸加工用のNCプログラムは、図4に示すように計算した工具位置と工具姿勢の修正量に基づいて工具指令位置と工具指令姿勢を補正して作成した。

通常のNCプログラムで加工した加工面の加工誤差（補正前）と、加工誤差を補正するために工具位置と工具姿勢を補正した5軸加工用のNCプログラムで加工した加工面の加工誤差（補正後）を図5に示す。この結果から加工誤差が非常に効果的に補正できることがわかる。

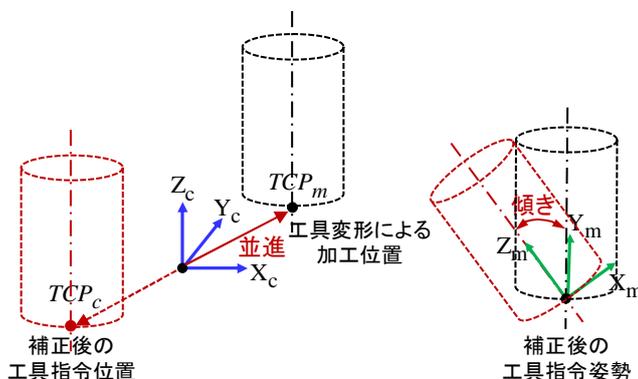
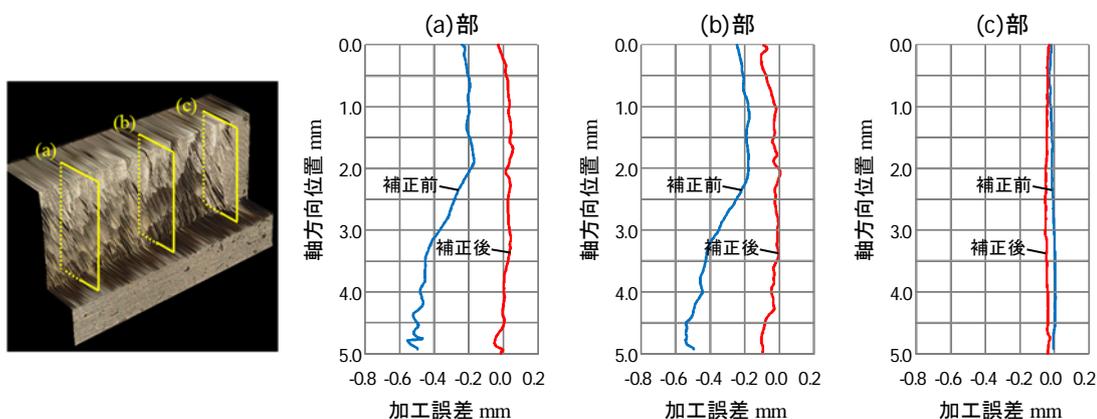


図4 加工誤差補正のための工具位置および工具姿勢の修正



(a) 補正後の加工面

(b) 補正前と補正後の加工誤差の比較

図5 加工誤差のシミュレーション結果に基づいた加工誤差補正

(4) 動的切削力と工作機械動特性との連成シミュレーション

従来の切削力シミュレータは、工具と工作物の関係だけをモデル化して切削力を予測しているが、加工中の切削力は工作機械の構造や送り駆動系、主軸駆動系に作用する。その結果、工作機械は振動し、工具の送り速度や主軸の回転数が変動するので、こうした相互作用を考慮できる連成シミュレーションの技術が必要となる。そこで図6に示すように、動的解析ができる切削力モデルと、工作機械と送り駆動系の動特性が表現できる工作機械モデル、主軸駆動系の動特性が表現できる主軸駆動系モデルを統合して連成シミュレーションを行った。この連成シミュレーションはこれまでに研究例がなかった。

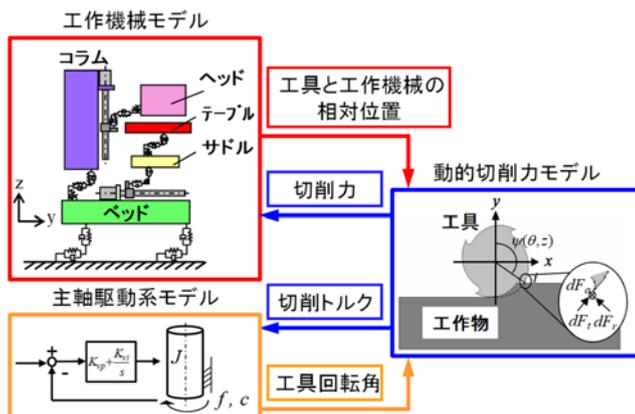


図6 工作機械の動特性モデルと切削力モデルを統合した連成シミュレーション

連成シミュレーションでは、①切削力モデルで切削トルクと切削力の計算、②工作機械モデルで工具と工作物の相対位置の計算、さらに、主軸駆動系モデルで工具回転角の計算、①と②を微小時間間隔で交互に繰り返して工具切れ刃軌跡の計算を行う。これにより、切削力が工具の動的な運動に影響を与え、工具の動的な運動が切削力に影響を与えるという連成効果を考慮した切削力の計算が可能になる。切削力の測定結果と連成シミュレーションの結果、工作機械や主軸駆動系の動特性を考慮しない切削力シミュレーションの結果を図7に比較して示す。この結果は重切削条件で加工した例であるが、従来の切削力シミュレーションでは再現できない切削力波形の乱れが、連成シミュレーションでは再現できていることがわかる。この研究成果をまとめた論文が日本機械学会の論文賞に選ばれた。

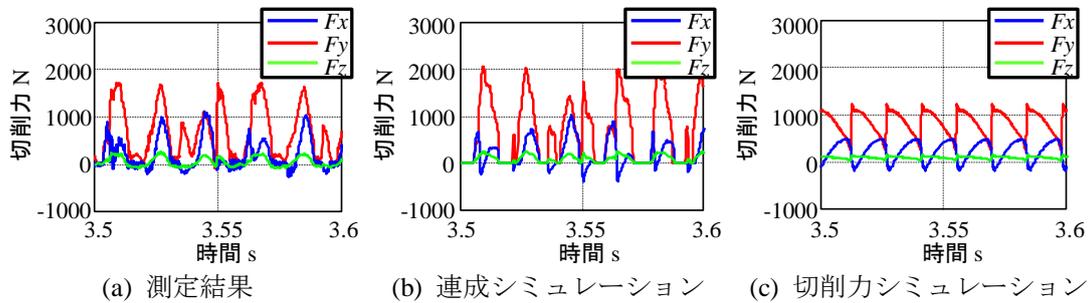
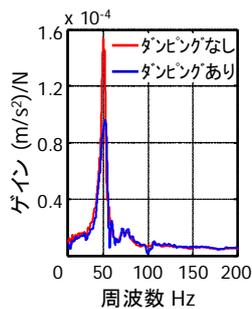


図7 従来の切削力シミュレーションと連成シミュレーションとの比較

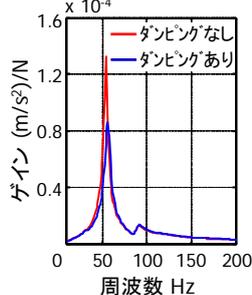
(5) 工具と工作物の接触剛性とプロセスダンピングを考慮した切削力シミュレーション

加工中は工具の逃げ面と工作物の接触によりプロセスダンピングと呼ばれる現象が生じることが知られている。接触剛性も発生するため、工作機械全体の振動特性に影響を及ぼすと考えられる。工作機械の周波数特性の評価ではインパルスハンマを使用した加振試験がよく行われるが、加工中のインパルスハンマによる加振試験は危険を伴うため、工作機械のテーブル駆動モータのトルク指令に外乱トルクを印加する加振方法を新たに考案して、工具切れ刃と工作物との接触が工作機械の周波数特性に及ぼす影響を定量的に評価した。

測定された加速度波形から求めた周波数特性を図8(a)に示す。図によると切削加工中(ダンピングあり)は、非切削時(ダンピングなし)と比べて振動振幅が減少している。また、固有振動数も約2Hz上昇している。この実験で得られた接触剛性とプロセスダンピングの係数を用いてシミュレーションを行い、求めた周波数特性を図8(b)に示す。また、接触剛性とプロセスダンピングの影響を考慮した工作機械の振動と切削力との連成シミュレーションを行った。図9(a)の測定結果と図9(b)の接触剛性とプロセスダンピングを考慮したシミュレーション結果とはよく似た波形となっている。比較のため、接触剛性とプロセスダンピングを考慮しない場合のシミュレーション結果を図9(c)に示す。この場合は切削力波形が大きく乱れてびびり振動が発生していることが確認できた。

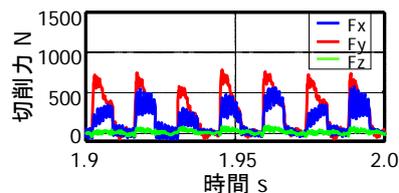


(a) 実験結果

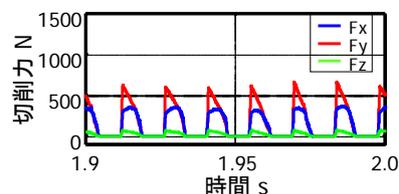


(b) シミュレーション結果

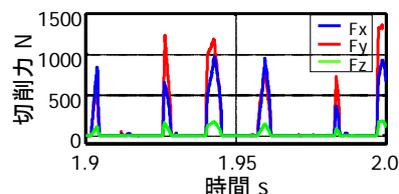
図8 工作機械の周波数応答



(a) 測定結果



(b) シミュレーション結果 (ダンピングあり)



(c) シミュレーション結果 (ダンピングなし)

図9 接触剛性とプロセスダンピングを考慮した切削力シミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一	4. 巻 84
2. 論文標題 ボクセルモデルを用いた切削シミュレーションにおける微小時間および微小空間解析の高速処理手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 175-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.2493/jjspe.84.175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 西田 勇, 奥村龍馬, 佐藤隆太, 白瀬敬一	4. 巻 49
2. 論文標題 工具切れ刃形状および被削材形状のボクセルモデルによるラジラスエンドミルの切削力シミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 107-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.11351/jsaeronbun.49.107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 西田 勇, 奥村龍馬, 佐藤隆太, 白瀬敬一	4. 巻 84
2. 論文標題 工具系の弾性変形を考慮したボクセルモデルによるエンドミル加工シミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 572-577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.2493/jjspe.84.572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 西田 勇, 白瀬敬一	4. 巻 85
2. 論文標題 工具系の弾性変形に起因する加工誤差の予測結果に基づく加工誤差補正	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 91-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.2493/jjspe.85.91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 野口 晋, 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一	4. 巻 83
2. 論文標題 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連成シミュレーション	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00254	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一	4. 巻 84
2. 論文標題 ボクセルモデルを用いた切削シミュレーションにおける微小時間および微小空間解析の高速処理手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 175-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Isamu Nishida, Ryuma Okumura, Ryuta Sato, Keiichi Shirase	4. 巻 140
2. 論文標題 Cutting Force Simulation in Minute Time Resolution for Ball End Milling Under Various Tool Posture	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.115/1.4038499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Isamu Nishida, Takaya Nakamura, Ryuta Sato, Keiichi Shirase
2. 発表標題 Voxel based cutting force simulation of ball end milling considering cutting edge around ceter web
3. 学会等名 ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Isamu Nishida, Ryuma Okumura, Ryuta Sato, Keiichi Shirase
2. 発表標題 Cutting Force and Finish Surface Simulation of End Milling Operation in Consideration of Static Tool Deflection by Using Voxel Model
3. 学会等名 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西田 勇, 白瀬敬一
2. 発表標題 エンドミル加工における工具系の弾性変形の予測結果に基づく加工誤差補正法
3. 学会等名 2018年精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤隆太, 野口 晋, 白瀬敬一
2. 発表標題 案内面とボールねじの非線形摩擦特性を考慮したNC工作機械の振動特性シミュレーション
3. 学会等名 2019年精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isamu Nishida, Ryuma Okumura, Ryuta Sato, Keiichi Shirase
2. 発表標題 Cutting force prediction of ball end milling based on fully voxel representation of cutting edge and instantaneous workpiece shape
3. 学会等名 ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shin NOGUCHI, Ryuta SATO, Isamu NISHIDA, Keiichi SHIRASE
2. 発表標題 Coupled Simulation between Machine Tool Behavior and Cutting Force using Voxel Simulator
3. 学会等名 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in the 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野口 晋, 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥村龍馬, 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一
2. 発表標題 工具の静変形を考慮したエンドミル加工の切削加工シミュレーション
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村貴也, 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一
2. 発表標題 ボールエンドミル先端部の切削抵抗を考慮した切削力シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会関西支部関西学生会学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 切削シミュレーション方法および装置	発明者 西田 勇, 白瀬敬一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2017-196099	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

生産工学研究室 http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new_index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西田 勇 (Nishida Isamu) (40776556)	神戸大学・工学研究科・助教 (14501)	
研究分担者	佐藤 隆太 (Sato Ryuta) (60376861)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	