

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289018

研究課題名(和文) 切削力のリアルタイムシミュレーションとセンサレスモニタリングによる切削状態制御

研究課題名(英文) Milling Process Control Based on In-process Predicted and Measured Milling Forces or Torques

研究代表者

白瀬 敬一 (Shirase, Keiichi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80171049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：シミュレーションで逐次に予測される切削トルクに応じて工具送り速度を修正する適応制御(加工プロセス制御)の成果を学術論文として発表した。切削力シミュレーションでは、対象をボールエンドミルのみならず、フルノーズエンドミルにも拡張することができた。また、シミュレーションで推定される切削トルクと、主軸モータのトルク信号から検出できる切削トルクを定量的に比較して、加工状態や切削条件の変化に関わらず工具摩耗や工具欠損を検出することができる知的モニタリングにも成功した。さらに、素材形状と製品形状から加工順序を決定するフライス加工用工程設計の試作システムが完成した。

研究成果の概要(英文)：Adaptive control of tool feed speed based on the predicted cutting torque can be achieved for an example of milling process control. This fruitful result is published as a journal paper. In milling force simulation, it can be applied for not only ball-nose end mill but also bull-nose end mill. Also, an intelligent monitoring to detect tool wear and tool breakage effectively based on the difference between predicted and measured cutting torque. In this monitoring, the change of cutting conditions can be considered based on the predicted cutting torque. Additionally, a prototype of process planning of milling operation to decide machining region and sequence automatically from both raw material shape and product shape is developed.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：工作機械 自律加工 適応制御 シミュレーション モニタリング

1. 研究開始当初の背景

数値制御工作機械の知能化は当該分野の大きなテーマである。しかし、現状の数値制御工作機械では予め作成された加工用プログラムで機械の動作が指令され、切削状態の変化や異常に対応して加工プロセスを制御することができない。ところが、国内外を問わず従来の研究は、『数値制御工作機械は加工用プログラムで指令するもの』という常識に縛られ、“工作機械が自ら意思決定を行いながら加工する”，すなわち“切削状態の変化に応じて加工プロセスを制御”するという発想の知能化は全く実施されていない。

2. 研究の目的

研究代表者は、機械の動作を加工用プログラムで指令する従来方式とは異なり、加工形状のCADモデルをマスタモデルとして、機械の動作を実時間で計算しながら逐次指令する、仮想加工という革新的な指令方式を実用化してきた。仮想加工による指令方式では、切削力のモニタリング結果をフィードバックして加工プロセスを制御することができることから、仮想加工の機能に、工程設計(工具姿勢計画)、工具モーション制御、切削力モニタリング、切削力シミュレーション、加工プロセス制御の機能を統合して、切削状態の変化に柔軟に対応可能なインテリジェント数値制御工作機械(図1)を開発する。

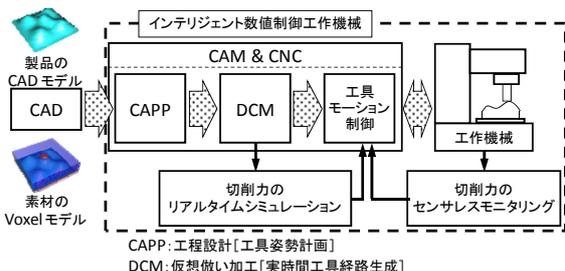


図1 開発するインテリジェント数値制御工作機械

3. 研究の方法

研究代表者と研究分担者が協力し、それぞれが得意とする以下の研究課題に取り組み、それぞれの研究成果を統合して研究の目的を達成する。

- (1) ボクセルモデルを利用した加工形状シミュレーションと仮想加工(実時間工具経路生成)との連携による工具モーションの自律制御
- (2) 切削力のセンサレスモニタリングとモニタリング結果をフィードバックする加工プロセス制御(適応制御)
- (3) 仮想加工における工具姿勢計画及び切削力のリアルタイムシミュレータの開発

加工とともに変化する加工形状を工作機械が把握できるようにボクセルモデルを利用した加工形状シミュレータを開発する。また、素材のボクセルモデル表現、ボクセルの属性情報を利用した工具経路生成および工具モーション制御アルゴリズムを考案する。例えば図2に示すように、素材をボクセルモデルで表現し、加工部位に応じた工具送り速度や工具姿勢をボクセルの属性情報として設定する。工具送り速度の場合は、最終加工面近

傍では遅く、最終加工面から離れると速く設定しておく、加工中の工具位置に応じて送り速度を制御することができる。また、工具姿勢の場合は、最終加工面近傍では法線方向に、最終加工面から離れると初期姿勢(0度)に設定しておく、加工中の工具位置に応じて工具姿勢を制御することができる。特に、工具送り速度や工具姿勢が加工中に急変することがないことに注目し、これらの指令値が徐々に変化する状態を拡散現象と捉えれば、拡散方程式を用いて加工除去領域全体のボクセルの属性値を自動的に設定することができる。

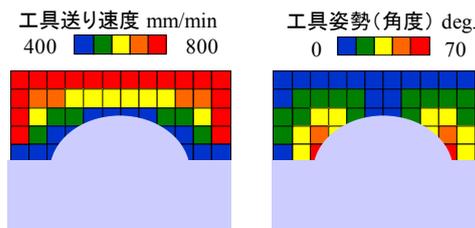


図2 ボクセル属性情報を参照した工具モーション制御

サーボアンプから出力されるアナログモニタ機能を使い、切削状態のリアルタイムモニタリングシステムを開発する。このシステムには、切削力のモニタリング機能とシミュレーション機能とを組み込む。切削状態のリアルタイムモニタリングシステムの構成は図3に示すとおりで、実時間で推定される切削力と測定される切削力を常に比較して切削状態の正常/異常を判定する。推定される切削力を判定基準にする本手法は、世界でも例がない新しい試みである。同時に、切削力シミュレーションの結果をフィードバックする適応制御の有効性を検証する。

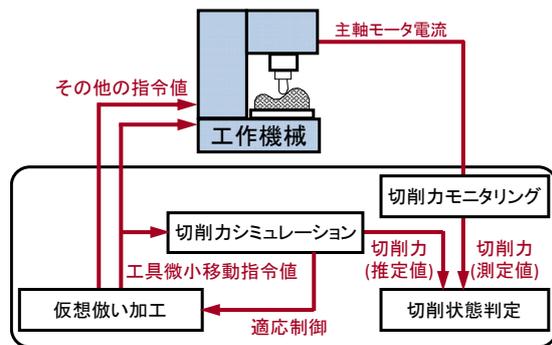


図3 切削状態のモニタリングと適応制御

加工中、リアルタイムに多軸制御による荒加工、中仕上げ加工における干渉判定と切削力シミュレーションを実施する計算アルゴリズムの開発を行う。具体的には、工具位置指令値(工具の3次元空間位置)に対して高い精度で工具半径方向の切込み深さを推定するための加工対象物形状評価手法と、これを用いた切削力リアルタイム予測システム、工具干渉検出システムの開発を行う。システムの開発に際しては幾何演算を超並列計算機(GPU:グラフィック処理専用プロセッサ)で実施することにより、加工と平行した実時間シミュレーション(シミュレーション1サイクルが数値制御装置の指令間隔16ms以内)の達成を目指す。

4. 研究の成果

ここでは紙面の都合で、①ボクセルモデルを利用した切削力シミュレーション、②切削力シミュレーションの結果をフィードバックする適応制御の成果について報告する。

4.1 ボクセルモデルを利用した切削力シミュレーション

エンドミルの切削力シミュレーションには、瞬間切削力モデルが広く用いられている。これは、モデルが簡単で切削力を比較的短時間で計算ができるためであるが、切れ刃と被削材の幾何学的な関係を数式で表現して実切込み厚さを計算するために、加工形状の変化が複雑で切れ刃と被削材の接触状況が非一様になると切削力の推定が難しい。この問題を解消するために、被削材のボクセルモデルを用いることで切れ刃の実切込み厚さを計算する方法を開発した。この方法では、被削材の形状変化が複雑になって切れ刃と被削材の接触状況が非一様になっても切れ刃の実切込み厚さが求められ切削力が推定できる。

ボクセルモデルによる加工形状シミュレーションの実行例を図4に示す。被削材をボクセルモデルで表現しておき、エンドミルが通過した領域のボクセルを除去することで加工形状の変化を逐次シミュレーションすることができる。

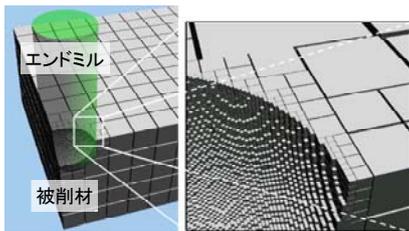


図4 ボクセルモデルによる加工形状シミュレーション

このとき、工具1刃当たりの送り量で除去されるボクセルを用いて、工具の回転とともに変化する実切込み厚さを計算している。図5に示すように切れ刃が通過するボクセルの個数とボクセル1辺の積から x, y 方向成分の $h_x(\theta, z)$ 、 $h_y(\theta, z)$ が計算でき、実切込み厚さ $h(\theta, z)$ を求めることができる。

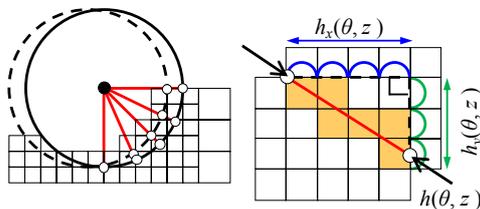


図5 実切込み厚さの計算

この方法で実切込み厚さを求める利点は、被削材の形状変化が複雑になって局所的に実切込み厚さが変動しても求められることにあり、より実用的な切削力シミュレーションが可能となる。ボクセルモデルによる切削力シミュレーションの実行例を図6に示す。被削材の加工形状シミュレーション結果が左側に表示されている。このシミュレーションで検出される実切込み厚さから計算される工具1回転および10回転分の切削力シミュレーションの結果が右側に表示されている。

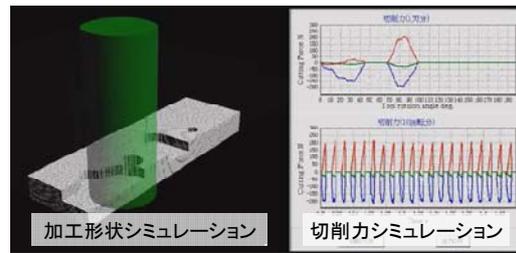


図6 ボクセルモデルによる切削力シミュレーション

この切削力シミュレーションの有効性を検証するために図7に示すような溝と穴を有する被削材を用いてエンドミルの加工実験を行った。切削力の測定結果と推定結果の比較を図8に示す。これは図7に示した試験片のA点からB点の間の溝を工具が通過する際の切削力である。この結果から切削力の測定結果と推定結果がよく一致していることがわかる。

また、図7に示した試験片のB点からC点の間の穴を工具が通過する際の切削力の比較を図9に示す。図9では切削力波形の詳細も示しているが、工具切れ刃が穴を通過する際に切削力がゼロとなる区間でも測定結果と推定結果がよく一致しており、加工状況が複雑に変化する切削力のシミュレーションに非常に有効であることが分かった。

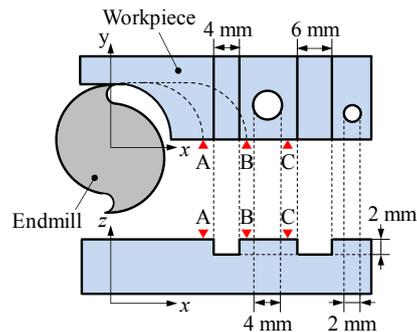
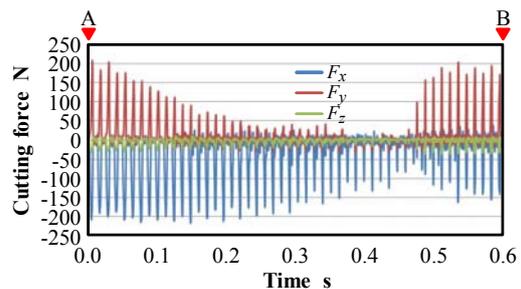
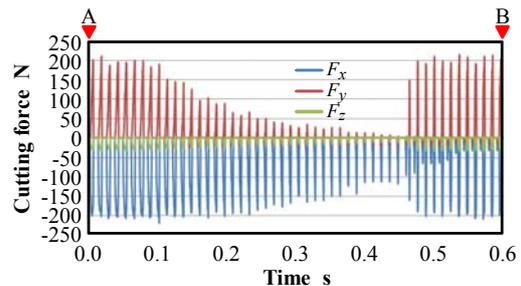


図7 検証実験のための溝と穴を有する被削材

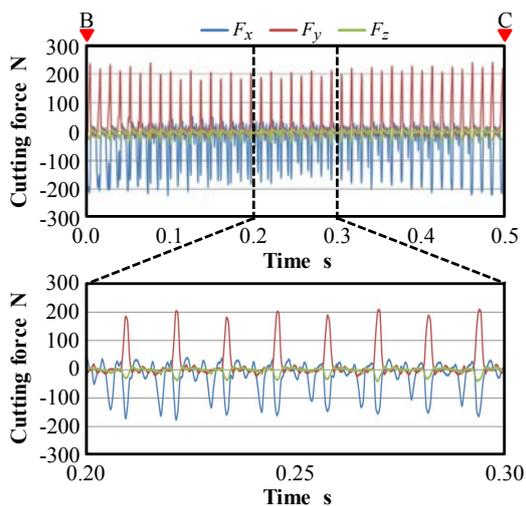


(a) 測定結果

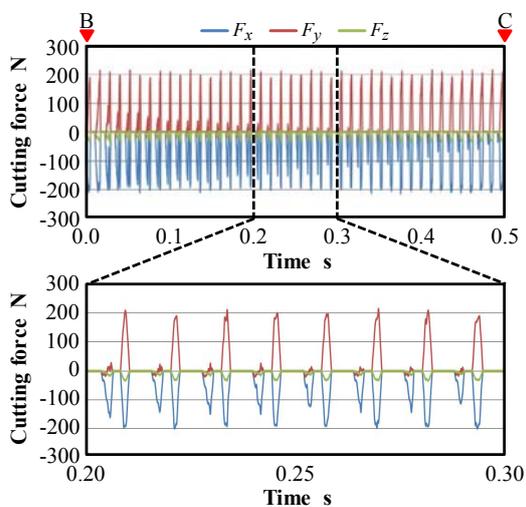


(b) 推定結果

図8 溝を通過するエンドミル加工の切削力



(a) 測定結果



(b) 推定結果

図9 穴を通過するエンドミル加工の切削力

4.2 切削力シミュレーションの結果をフィードバックする適応制御

既存の機械加工では加工を行うために事前に切削条件と工具経路を決定し、予め NC プログラムを作成する必要がある。また、加工トラブルが発生しても加工中に NC プログラムを変更することができず、加工トラブルが発生しないように入念に NC プログラムを作成する必要がある。しかし、研究代表者らが開発した仮想倣い加工 (Digital Copy Milling) システムは、事前に用意された NC プログラムによる指令ではなく、加工中に工具経路を実時間で生成して逐次指令する方式である。このため予め NC プログラムを作成する必要がなく、加工中に切削条件や工具経路を柔軟に変更できるという特徴がある。この特徴を活かして切削力シミュレーションで予測される切削負荷に応じ行う適応制御を実現した。

開発した適応制御の概略図を図 10 に示す。切削力の適応制御という場合、通常は測定した切削力をフィードバックするが、現状では切削力を検出するセンサを工作機械に設置することが困難で、センサレスのモニタリング法でも検出できる切削力の精度と分解能が不十分なため、測定した切削

力による適応制御が実現できていない。この問題を解消するために、ここでは予測した切削力をフィードバックして、切削力に応じた工具送り速度で仮想倣い加工システムが工具経路を生成して工作機械に逐次指令する。

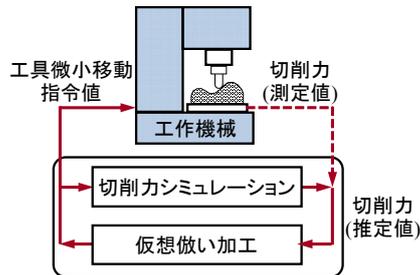


図 10 予測した切削力をフィードバックする適応制御

図 11 に適応制御による加工実験を行っている実行画面を示す。実行画面の左上に加工形状シミュレーション、右上に仮想倣い加工システムで加工中に実時間で計算される工具経路、実行画面の下段に加工中に予測される切削力と切削トルク、予測された切削トルクに基づいて決定された工具送り速度の指令値が表示されている。

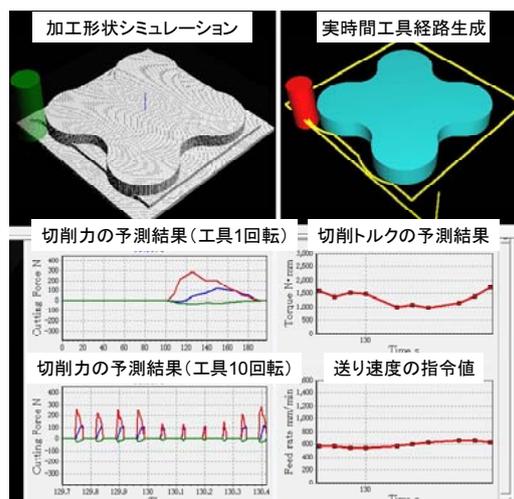


図 11 適応制御実験の実行画面

被削材の初期形状は、 $80 \times 80 \times 6$ mm の直方体で、工具経路 5 周を等高線加工の 1 段 (2 mm) として、これを 3 段 (6 mm) 加工した。適応制御を行わない場合は工具送り速度を 600 mm/min で一定とし、適応制御を行う場合は、加工開始時の工具送り速度を 600 mm/min として、切削トルクの目標値が 1.1 ~ 1.4 N/m となるように 300 ~ 600 mm/min の範囲で増減した。工具経路 5 周で 3 段の加工を終えるのに要した時間は、適応制御を行った場合は 6 分 31 秒となり、適応制御を行わなかった場合の 8 分 42 秒に対して 25% の短縮となった。

ここで、適応制御を行った場合の工具経路 1 周目と 3 周目の切削トルクと工具送り速度の変化の詳細を図 12 に示す。工具経路は図 12(a) に示すとおりで、1 周目の I-J 間での結果を図 12(b) に、3 周目の K-L 間での結果を図 12(c) にそれぞれ示す。実験結果から、切削トルクの予測結果は測定結果と概ね一致しており、切削トルクの予測結果を適応制御に使用することの妥当性が示された。

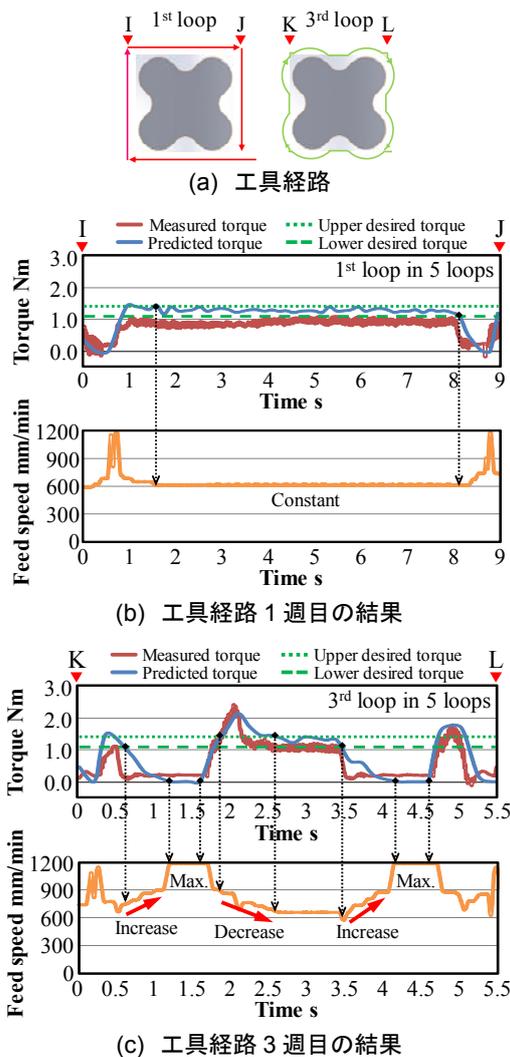


図 12 適応制御実験における切削トルクの測定結果および推定結果と工具送り速度の変化

また、1 週目の I-J 間では、加工の始まりと終わりの過渡状態を除くと切削トルクの予測結果が目標値の上限と下限の範囲内にあり、工具送り速度が一定に保たれていることが分かる。一方、3 週目の K-L 間では、切削トルクの予測結果がゼロから目標値の上限を超えるまで変化していて、工具送り速度は切削トルクの増減に呼応するように制御されていることが分かる。本実験では工具送り速度の上限を 1200 mm/min に設定したので、切削トルクがゼロと予測される箇所では工具送り速度が上限値に制御されている。切削トルクがゼロから徐々に大きくなる個所では工具送り速度は減速するが、切削トルクが目標値の上限に達しても工具送り速度の減速が不十分なために、その直後の切削トルクが目標値の上限を超える結果となった。本実験では、工具送り速度が急変しないように加速と減速を緩やかに行っているが、目標値の上限に達した場合は工具送り速度の減速を急峻にする、あるいは切削トルクを予測してから工具送り速度を制御するまでに時間遅れを設けて、この時間遅れの間工具送り速度を減速する、などのアルゴリズムの工夫が必要である。

4.3 まとめ

本研究では、被削材をボクセルモデルで表現し

て実切込み厚さを離散的に計算する切削力シミュレータを開発した。さらに、切削力シミュレータで予測される切削トルクを適応制御（工具送り速度の制御）に反映させることを提案し、加工実験でその有効性を検証した。

- (1) ボクセルモデルで表現した被削材から実切込み厚さを離散的に計算する提案方法が妥当で、加工状況が複雑に変化する切削力のシミュレーションに非常に有効であることが分かった。
- (2) 切削力シミュレータと加工中に工具経路を実時間で生成して逐次指令する仮想加工システムと連携させることで、切削トルクの予測結果に応じて工具送り速度を増減する適応制御を実現した。
- (3) 加工実験を行って提案した適応制御の有効性を検証し、加工時間の短縮ができることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文（計 7 件）〕

1. Tomokazu Kobayashi, Toshihiko Hirooka, Atsushi Hakotani, Ryuta Sato, Keiichi Shirase; Tool Motion Control Referring to Voxel Information of Removal Volume Voxel Model to Achieve Autonomous Milling Operation, International Journal of Automation Technology, Vol.8, No.6, pp.792-800, (2014)
2. Niccolò GROSSI, Antonio SCIPPA, Lorenzo SALLESE, Ryuta SATO and Gianni CAMPATELLI: Spindle Speed Ramp-up Test: A Novel Experimental Approach for Chatter Stability Detection, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.89, pp.221-230, (2015)
3. Ryuta SATO, Gen TASHIRO and Keiichi SHIRASE: Analysis of the Coupled Vibration between Feed Drive Systems and Machine Tool Structure, International Journal of Automation Technology, Vol.9, No.6, pp.689-697, (2015)
4. 林晃生, 柏木洋慶, 佐藤隆太, 白瀬敬一: エンドミル外周刃加工における数値制御工作機械駆動系の消費エネルギー, 精密工学会誌, Vol.81, No.5, pp.429-434, (2015)
5. 長谷川輝人, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 被削材のボクセルモデルを用いたエンドミルの切削力シミュレーションと切削力の予測結果に基づく適応制御, 精密工学会誌, 82 巻, 5 号, pp.467-472, (2016)
6. 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 加工制約条件を考慮したエンドミル加工用工程設計支援システムの提案, システム制御情報学会論文誌, 30 巻, 3 号, pp.81-86, (2017)
7. Kento WATANABE, Jun'ichi KANEKO and Kenichiro HORIO: Development of Tool Collision Avoidance Method Adapted to Uncut Workpiece Shape, International Journal of Automation Technology, Vol.11, No.2, pp.235-241, (2017)

〔学会発表〕（計 16 件）

1. 長谷川輝人, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 被削材のボ

- クセルモデルを用いたエンドミル加工の切削力シミュレーションー第2報:切削力の予測結果に基づく適応制御ー, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, F38, pp.379-380, (2015)
2. 枝川祐希, 佐藤隆太, 白瀬敬一: エンドミル加工時の主軸モータトルクに及ぼす自励びり振動の影響, 日本機械学会 2015 年度年次大会, S1310202, (2015)
 3. Jun'ichi KANEKO, Kenichiro HORIO: Process Planning of NC Machining based on Parallel Processing with GPGPU, International Symposium on Ultraprecision Engineering and Nanotechnology, pp.28-31, (2015) (招待講演)
 4. 枝川祐希, 佐藤隆太, 白瀬敬一: エンドミル加工時の主軸モータトルクに及ぼす自励びり振動の影響, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, S1310202, (2015)
 5. Keiichi SHIRASE: CAM-CNC integration for innovative intelligent machine tool, Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21 Century, A01, (2015) (Keynote speech)
 6. Jun'ichi KANEKO, Kenichiro HORIO: Tool posture planning method to control direction of instantaneous cutting force in multi-axis controlled machining based on fast simulation system, Proc. of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, A37, (2015)
 7. 金子順一: 工作機械の高速高精度化に対応した工具経路・工程評価技術, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.735-736, (2016) (招待講演)
 8. 金子順一: 形状処理ライブラリと幾何シミュレーションに基づく数値制御経路計画, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.105-106, (2016) (招待講演)
 9. 奥村龍馬, 西田 勇, 白瀬敬一, 佐藤隆太: 被削材のボクセル表現によるボールエンドミル加工の切削力推定, 2016 年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 16D, pp.32-33, (2016)
 10. Isamu Nishida, Ryuta Sato, Keiichi Shirase, Process Planning System of 5-axis Machining Center Considering Constraint Condition, Proc. of 2016 International Symposium on Flexible Automation, pp.360-363, (2016)
 11. 立川宗治, 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 切削トルクの予測結果の比較に基づく加工異常検出システムの提案, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, A03, pp.7-8, (2016)
 12. 野口 晋, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 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, 日本機械学会第 11 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, pp.203-204, (2016)
 13. 渡邊健人, 金子順一, 堀尾健一郎: 削り残し形状に対応した工具の干渉回避手法の開発, 日本機械学会 第 11 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, pp.77-78, (2016)
 14. 西田 勇, 奥村龍馬, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 被削材のボクセルモデルによるボールエンドミルの工具姿勢変化を考慮した 5 軸加工の切削力シミュレーション, 型技術ワークショップ 2016 in なにわ 講演論文集, A-2, pp.46-47, (2016)
 15. 渡邊健人, 金子順一, 堀尾健一郎: 被削物の削り残し形状を考慮可能な工具姿勢の高速計画手法の開発, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.413-414, (2017)
 16. 立川宗治, 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一: エンドミル加工における切削トルクの予測結果の定量比較に基づく加工異常検出, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2017 講演論文集, pp.87-88, (2017)
- [図書] (計 0 件)
該当なし
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 3 件)
- 名称: 切削力適応制御法及び切削力適応制御システム
発明者: 白瀬敬一, 長谷川輝人
番号: 特願 2015-039719
出願年月日: 2015 年 2 月 28 日
- 名称: 工程設計支援システム, および, 工程設計支援方法
発明者: 西田 勇, 白瀬敬一
番号: 特願 2016-114701
出願年月日: 2016 年 6 月 8 日
- 名称: 加工事例を参照するエンドミル加工の工具経路自動生成システム
発明者: 西田 勇, 白瀬敬一
番号: 特願 2016-243789
出願年月日: 2016 年 12 月 15 日
- [その他]
- 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻
コンピュータ統合生産工学研究室
http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new_index.html
- 埼玉大学大学院理工学研究科
機械工作研究室
<http://kousaku.mech.saitama-u.ac.jp>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
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
- (2) 研究分担者
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
- 金子 順一 (KANEKO, Jun'ichi)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 80375584