

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420038

研究課題名(和文)高精度機上形状計測とモデルベース誤差分析を融合した精度保証型切削加工

研究課題名(英文) Research on accuracy assured machining by combining on-machine shape measurement and model-based error analysis.

研究代表者

寺本 孝司 (TERAMOTO, Koji)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：40252605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、精度保証加工を実現するための枠組みの検討と、必要となる要素技術について検討を行った。まず、機上計測に関する従来研究の調査を行ない、精度保証加工を実現するうえでの課題として、1)高速な形状計測、2)加工不良が発生した際の原因推定技術、の2点があることを明らかにした。まず、高速な機上形状計測有効であると期待されるラインレーザー変位計の高精度化に関する検討を行った。また、加工誤差要因の推定についても、工作物把持などの力学的要因と位置決め誤差などの幾何学的要因を中心にした誤差要因の推定について、基礎となるシミュレーション技術の開発を行い提案する枠組みが実現可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to investigate a framework and basic technologies to achieve accuracy assured machining (AAM). High-speed on-machine shape measurement and estimation of error source are two important problems. For the shape measurement, a method to improve the line-laser displacement sensor has been investigated. An adaptive calibration method which utilize measurement of known shapes has been developed. For the semi-flat shape workpiece, proposed method can improve the measurement accuracy. Concerning the error source estimation, fundamental simulation methods for geometric error and mechanical error have been developed and experimentally evaluated. Except the some cases, estimation of each error factor is possible. Therefore, it can be said that basic method to decompose measured machining error into combination of prepared error sources is feasible. Based on the methods above mentioned, the feasibility of the proposed AAM framework has been confirmed.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：精度保証加工 加工モニタリング 機上形状計測 加工誤差分析

1. 研究開始当初の背景

個人化生産に代表される小ロット加工への注目と、製品不良に対する対応が困難になってきたことに起因する個々の部品に対する精度保証に関する要求が高まっていた。以前から、機上計測を基にしたクローズドループ加工に関する研究は報告されてきたが、以下の2点で課題を有していた。

- 機上計測に用いる計測装置が高価なうえ、計測速度が遅く計測時間を多大に要してしまい、工作機械の稼働率を下げってしまう。
- 機上計測によって得られた加工誤差に対して、どのような補正加工を行うのかについて明確な指針がなく、アドホックな補正が行われてきた。

2. 研究の目的

本研究課題は、加工精度を保証可能な切削加工ステーションの実現を目的とする。具体的には、図1に示すように、1)多様な物理現象を考慮した作業設計、2)実加工監視、3)加工途中もしくは加工直後でのオンマシンでの形状計測、4)加工誤差のモデルベース分析、の4つの機能を閉じたループ構成とすることにより修正加工を含む工作物の精度保証の実現を図る。特に、ラインレーザ変位計を用いた高速高精度形状計測システムと多相加工シミュレーション技術をもとにしたモデルベース誤差分析システムの開発を行い、切削加工における精度保証手法の基盤技術を確立することを目的として研究を進めた。

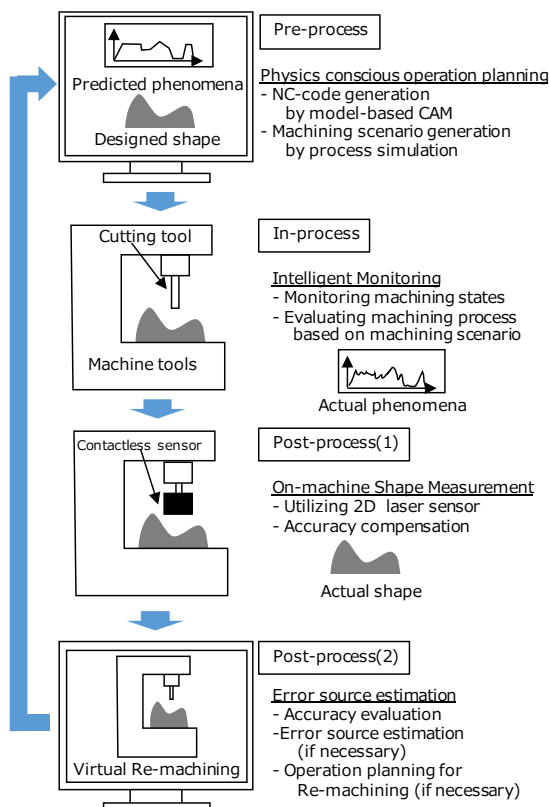


図1. 精度保証加工の枠組み

3. 研究の方法

本研究の実施にあたって、図1に示す枠組みを構成する、(1)機上形状計測技術の高速高精度化、(2)インプロセスモニタリング技術の高度化、(3)加工誤差要因推定手法の検討、の3つの基盤技術について検討を行った。それぞれの具体的な方法について、以下に示す。

(1) 機上形状計測技術の高速高精度化

形状計測の高速化が期待されるラインレーザ変位計を用いた機上計測の高精度化について検討した。ラインレーザ変位計を用いた機上計測においては、工作機械運動誤差の補正とラインレーザ変位計単体の計測精度向上という2つの課題がある。本研究では、ラインレーザ変位計単体の計測精度向上について検討した。具体的には、形状が既知の参照形状の計測結果を用いてセットアップごとにラインレーザ変位計の較正を行ない測定値を補正する補正関数を構成する。この補正関数を用いて、未知形状の計測結果の補正を行うことで測定精度の向上が可能かどうか検証した。

(2) インプロセスモニタリング技術の高度化

これまでに、切削力や工作物温度の計測などさまざまなモニタリング手法が提案されている。近年、局所的な計測情報と事前の加工シミュレーションを併用することで高精度かつ詳細な工作物状態を推定する手法について、研究代表者を含む複数の研究グループから提案されている。これらの手法を適用するには局所計測位置の選定が極めて重要であるにもかかわらず、十分な検討がなされてこなかった。例えば、加工中の工作物温度の計測については依然として熱電対を用いた点計測しか行えないのが現状である。現実的な適用を考えると限られた計測点を配置するための指針が存在していないことが問題であった。そこで、モニタリング機能における計測点を評価する指標を提案し、その妥当性について検討した。

(3) 加工誤差要因推定手法の検討

これまでの機上計測の大きな課題である補正加工戦略の立案に不可欠な誤差要因の推定について検討を行った。具体的には、工作物把持による工作物の変位・変形、位置決め誤差、工作物形状誤差、といった幾何学的・力学的な誤差要因の定量化とシミュレーションとの比較を行い、誤差要因の推定が可能かどうか検討した。

4. 研究成果

(1) 機上形状計測技術の高速高精度化

切削加工による仕上げ加工において、平面仕上げは基礎となる加工である。そこで、提案するラインレーザ変位計の高精度化の例として、平面の計測を例に検討した。具体的には、平面度と厚みが保証されているゲージ

ブロックを用いて、ラインレーザ変位計の較正を行ない、計測結果の補正を試みた。ラインレーザ変位計の計測誤差はセンサと計測対象物の距離により変動することが、これまでに報告されている。そこで、距離による誤差と段差をもつ計測対象物を計測した際の計測誤差を評価するため、平面形状をもった計測対象物をジュラルミン板の上に設置し、Z ステージの高さを変えて計測を行い、それぞれの計測値と理想形状を比較した。理想形状に対応する計測対象物には高さ $5 \pm 0.0005\text{mm}$ のゲージブロックを用いた。計測値への統計的処理が有効であると考えられることから、以下の手順で計測値の特性を整理した。

- (1) ゲージブロック表面の計測値を抽出
- (2) 抽出した計測値より最小二乗法を用いて平面の傾きを算出
- (3) 得られた平面の傾きを補正
- (4) 補正後のゲージブロック表面高さとしてステージ高さの平均値を記録
- (5) ラインレーザ変位計と対象物の計測距離ごとに計測誤差を算出
- (6) 未知形状を計測した際に、計測値に対して(5)で求めた計測誤差を補正

以上の手順を検証するために、図2のような実験装置を用いて、変位計と対象物の計測距離と誤差の関係を整理した(図3)。計測対象物であるゲージブロックの高さに比例して計測誤差が大きくなり、テーブルの高さに反比例して計測誤差が小さくなることを確認できた。

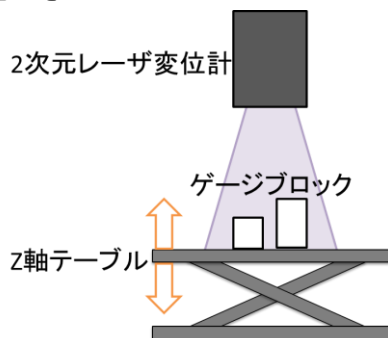


図2. 計測実験の概要

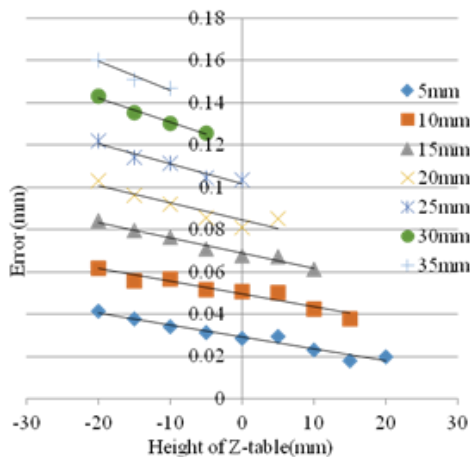


図3. ブロック高さとしてテーブル位置を変化させたときの計測誤差

ゲージブロックの高さとテーブルの位置により計測誤差が生じることが確認できたので、計測誤差を目的変数、ゲージブロックの高さとテーブルの位置を説明変数として、重回帰分析を行い、補正式を導出した。導出した補正式を用いて、未知形状の計測を行った。比較のため、3次元形状計測器・高精度デジタルマイクロメータの計測値を比較して、補正値が妥当であるか検証する。比較対象は10mmのゲージブロックの精度保障されていない高さ不明の面とする。デジタルマイクロメータでの計測は隅4か所と中心付近の計5か所を3回ずつ計測したときの平均値をとった。2次元レーザ変位計の計測値・補正値と3次元形状計測器・デジタルマイクロメータの計測値を図4に示す。図4に示すとおり、提案手法により計測精度の向上が図られることが判った。今後は、傾斜面を含む3次元形状の評価が必要となる。

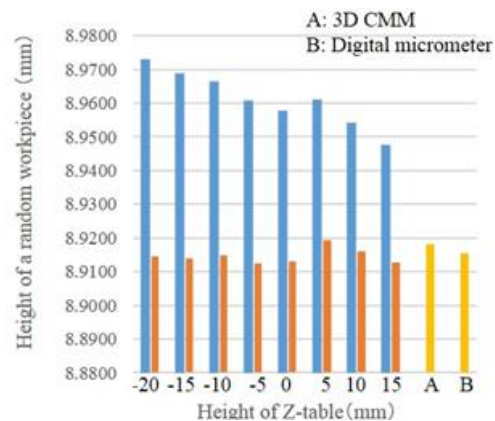


図4. 計測結果の比較

(2) インプロセスモニタリング技術の高度化
局所的な計測における計測位置の評価尺度として、計測可能性と変化への敏感さを導入して評価式を提案した。提案した評価式をもとにした計測点の選定は、工具経路や加工領域の変化に適応して計測位置を算出可能であることが明らかになった。

(3) 加工誤差要因推定手法の検討

本研究で提案する加工誤差推定手法は、事前に想定される誤差要因の重ねあわせとして加工誤差を解釈するというものである。そのためには、適切な誤差予測が不可欠である。これまでに切削力に起因する工具-工作機械形の変形誤差については多くの研究がなされていることから、工作物把持の加工誤差への影響評価について検討した。工作物把持の影響と切削力による影響の評価が可能となれば、振動を除く力学的な誤差についての評価が概ね可能となると考えられる。

具体的には、異なる把持方法による削り出し加工実験を行い、加工途中での加工表面と加工後の工作物の寸法計測を行った。具体的には、ケミカルウッド製工作物に対して、マシンバイス把持とクランプ把持の2種類の把

持方法で、直径 6mm、長さ 60mm の円柱の削り出し加工を行った。

マシンバイスとクランプの把持力は、まず、想定される切削力をもとに、同程度の安定性を実現しうる把持力を算出した。そして、マシンバイスとクランプのそれぞれについて、締め付けトルクと工作物への作用力の関係を同定した。同定した関係をもとにして、締め付けトルクを管理することで算出した把持力を実現した。

削り出し加工の具体的な手順としては、まず面出し加工を行った工作物をそれぞれの方法で把持する前後で、その表面形状を計測し把持による影響を調べた。そして、工作物加工後に把持を外す前後でも加工対象形状の計測を行った。なお、加工条件は表 1 に示すとおり両者で同一の加工条件とした。ポケット加工した空間を、石膏を主体としたサポート材で充填したのち、同様の加工を裏面にも施して円柱の削り出しを行った。そして、出来上がった円柱の直径を、精密マイクロメータを用いて計測して評価した。

表 1 削りだし加工時の加工条件

| 使用工具 | 削り方法 | 回転数 | 送り速度 | 切り込み | 加工幅 |
|-----------|-------|-------|----------|------|------|
| | | [rpm] | [mm/min] | [mm] | [mm] |
| フラットエンドミル | 荒削り | 10000 | 700 | 1 | 2 |
| | 仕上げ削り | 10000 | 350 | 1 | 1 |
| ボールエンドミル | 荒削り① | 10000 | 700 | 1 | 0.2 |
| | 荒削り② | 10000 | 700 | 1 | 0.1 |
| | 仕上げ削り | 10000 | 350 | 1 | 0.05 |

図 5 に示した計測位置で、加工した円柱の直径を、精密マイクロメータを用いて計測した。計測結果と理想形状からの誤差の大きさを図 6 と図 7 にそれぞれ示す。マシンバイス把持の最大誤差は $85.2\mu\text{m}$ 、クランプ把持の最大誤差は $40.9\mu\text{m}$ であることがわかる。また、計測位置ごとの寸法のばらつきも、クランプ把持による加工のほうが小さく、加工精度が高いといえる。これは、クランプによる把持およびマシンバイスによる把持における変形量が、加工誤差に大きく影響していることを示唆している。

これらの誤差傾向は、安定な接触面を有する工作物ではおおむね有限要素解析による誤差傾向と整合しており、解析で得られる誤差要因の重みつき重ね合わせとして加工誤差を解釈することが可能であることを示唆している。

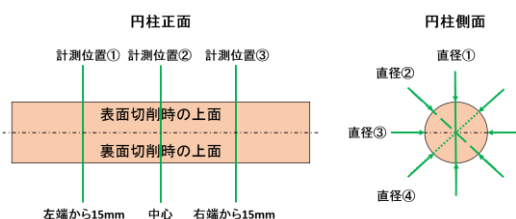


図 5. 円柱の計測位置

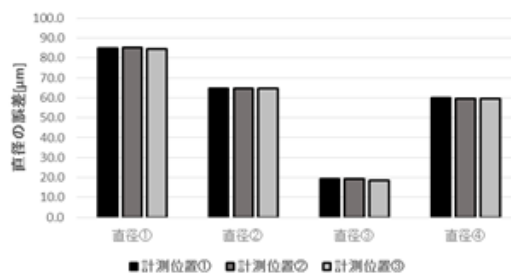


図 6. マシンバイス加工の計測結果

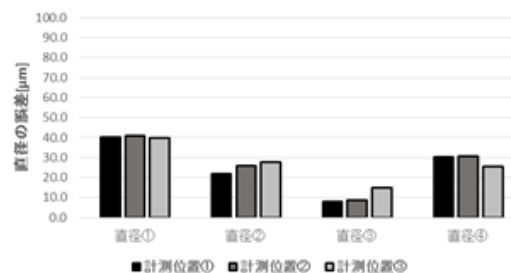


図 7. クランプ把持加工の計測結果

(4) まとめ

本研究では、精度保証加工を実現するための枠組みの検討と、必要となる要素技術について検討を行った。ラインレーザ変位計の精度改善が限定的であるうえ、誤差要因の推定については、十分な検証が行えていないものの、提案する枠組み自体は技術的には構築が可能であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① [Koji TERAMOTO](#), Dongjin WU, Kentaro OTA and Ryota HAYASHI, A framework of accuracy assured machining for smart manufacturing, *Memoirs of the Muroran Institute of Technology*, Vol. 65, pp. 35-39 (2016. 3), 査読有。

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① [Koji TERAMOTO](#), Dongjin WU and Kentaro OTA, Accuracy assured machining by combining intelligent monitoring and on-machine shape measurement, *Joint Symposium on Mechanical - Industrial Engineering, and Robotics 2015 (MIER2015)*, p. 13 (2015. 5-29-30), Muroran, Japan, 査読有
- ② Kentaro OTA, [Koji TERAMOTO](#), and Ryota HAYASHI, Study of rapid on-machine shape measurement for accuracy assured machining, *The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, A03, (2015. 10. 18-22), Kyoto, Japan, 査読有

- ③ Dngjin WU and Koji TERAMOTO, A Proposal of Selection Method for Temperature Measurement in End-Milling, 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), B206-8170 (2016. 11), Shizuoka, Japan, 査読有
- ④ WU ZEJIAN, 荒木 拓磨, 寺本 孝司, 柔軟弾性体エンドミル加工における加工誤差の統計的モデリング, 2016 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 35-36 B03 (2016. 8. 27, 旭川市大雪クリスタルホール), 査読無
- ⑤ 古川 大樹, 寺本 孝司, 精度保証加工のための加工誤差要因の推定に関する研究 (工作物把持による加工誤差への影響評価), 日本機械学会 第 11 回 生産加工・工作機械部門講演会, pp. 145-146 (2016. 10. 22-23, 名古屋大学), 査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺本 孝司 (TERAMOTO, Koji)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：4 0 2 5 2 6 0 5