

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05711

研究課題名(和文)加工面形状計測に基づくエンドミル切削抵抗のモデルベース実時間推定手法の開発

研究課題名(英文) Development of cutting force estimation method with simulation model based on measuring of workpiece surface

研究代表者

金子 順一 (KANEKO, Jun'ichi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80375584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：エンドミル加工における切削抵抗の予測において必要となる幾何形状情報としては、工具経路のほかに加工対象物の初期形状があげられる。本研究では、従来、事前の幾何シミュレーションにおいて、CDモデルとして導出し、与えられてきたこの加工対象物の初期形状を、光切断法による非接触計測手段によって測定する手法を提案する。開発手法では工具切れ刃による除去領域を、取得点群と工具位置から高速に推定する。本手法により、鋳造および金属積層造形によって形成された素材計上に対する仕上げ加工において、切削抵抗の予測を工作機械上で高精度に実施することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：Estimation of instantaneous cutting force in machining process requires several kinds of geometric information. These consist mainly of cutter locations in tool path and initial shape of stock workpiece. Conventionally, the initial shape of workpiece for cutting force simulation has been generated as CAD model from computer simulation. In this research, we propose a new method to measure the initial shape of the workpiece with non-contact measuring process by light cutting method. In the proposed method, for each cutter location, removal area by cutting edge is estimated from the measured point cloud data. By applying the proposed method, it is possible to estimate the cutting force on machine tool in the finishing process for stock shape of workpiece formed by casting and additive manufacturing.

研究分野：切削加工

キーワード：切削加工 切削抵抗 加工シミュレーション 形状計測 エンドミル加工

### 1. 研究開始当初の背景

エンドミル加工の事前予測手法の実用化では、切削抵抗予測に必要とされる幾何情報を事前に準備する手法が課題となっている。計算機による事前予測においては、工具切れ刃による加工対象物の除去領域の形状推定を行うため、加工途中の対象物の形状情報の生成が必要となる。しかしながら加工対象物の形状が既知でない鋳物製品の加工や、同時5軸制御加工に代表される複雑な形状創成においては、幾何形状モデルの作成や更新に長い作業時間や膨大な記録メモリが必須とされる。そのため、切削抵抗の予測/推定機能を有し、問題発生前に加工条件を変更可能なNCコントローラはいまだ実用化されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、加工対象物の表面形状を工具の通過直前に計測し、この結果から工具切れ刃の加工対象物に対する除去の状態を推定して工具に作用する切削抵抗を推定する新しい切削抵抗推定手法の開発を行う。具体的には、以下の2つの研究課題に取り組み、これらの手法を用いることにより、幾何シミュレーションによる加工対象物形状の事前推定や切削動力計による監視を行うことなしに、高効率切削条件下での加工を安全に実施可能な知能化NCコントローラの開発と実証実験を行う。

(1) 非接触手段による回転工具と加工対象物との除去領域の実時間推定手法の開発  
回転工具の切れ刃が現在、および一定の時間後のある瞬間に通過する加工面形状を離散点群の集合として計測し、これより除去領域を高速に推定する手法の開発を行う。

(2) 工具に作用する切削三分力の実時間予測と、これによる高効率加工コントローラの開発

先の過程で推定された除去領域の形状を参照して、工具に作用する切削抵抗を逐次予測するシステムを開発する。予測結果の切削三分力をもとに、CNCコントローラ内部で工具送り速度の自動変更を実施し、過大切削抵抗作用による工具破損の防止、および工具弾性変形による刃先通過位置のズレで生じる加工誤差の低減、を実現する機能を実装する。

### 3. 研究の方法

具体的な研究方法として、以下に示す順序で機能を開発し、実証実験を行う。

- (1) 研究代表者らが先行研究で開発に成功した切削抵抗モデルパラメータの高速な取得技術と工具通過直前の加工面断面形状の測定手段を連携させ、一定時間後に工具が通過した瞬間の除去領域の形状を推定するシステム

を開発する。

- (2) 推定された除去領域の形状情報をもとに、研究代表者らが過去の研究で開発した高速な切削抵抗予測システムを用いて切削抵抗予測を実施し、等高線加工、斜面加工等の様々な状況において推定結果と切削動力計を用いた計測結果との一致を検証する。
- (3) 工具通過後の加工対象物の表面形状を同様に測定し、工具弾性変形による加工誤差の検出と、これをキャンセルする工具送り値変更・工具位置指令値の算出アルゴリズムを開発し、切削実験によって補正の効果を検証する。

### 4. 研究成果

前述の課題に対し、以下の成果を得た。

(1) の成果では、工作機械主軸に取り付けたラインレーザ光源を用いて、3軸制御加工機を対象とした加工面断面形状取得を行うシステムを開発した。本システムでは、CPUおよびGPUによる並列計算処理をラインレーザの反射位置を推定する画像処理アルゴリズムに導入し、1撮影位置あたり約32msec以内に三次元点群の再構成を行い、立体形状を推定することを可能とした。

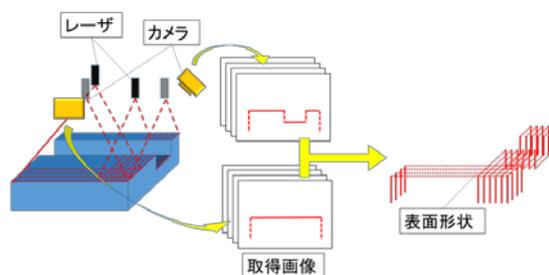


図1 二次元ラインレーザによる形状推定

開発したシステムは、以下の3つの段階から構成されており、主に (a) 撮影画像上でのレーザー光の反射中心位置の導出と、(b) 撮影時の工作機械各軸の座標取得、および(c) カメラの視界座標系での二次元座標から工作機械座標系での三次元座標への変換からなる。

(a) の撮影画像におけるレーザー反射光中心の導出では、直交する二つのカメラから得られた画像について、レーザー光の反射強度を参照してその中心部の座標を図3のように特定する。本研究では、1280×960の解像度で得られた2枚の画像に対して、撮影とレーザー反射光中心の導出を約34.16msecごとを実施することを可能としている。

(b) の工作機械各軸の座標取得では、図4に示すようにOKK製マシニングセンタMV4 II-0Uを対象として、CNCコントローラから直接ハイスピードシリアル通信(HSS

B)によって直進3軸および回転2軸の状態を取得するシステムを開発した。本システムでは、約4.9msec以内の状態取得が可能となっている。

(c)の工作機械座標系上における点群座標導出では、(a)および(b)の情報を用いて、取得した平面座標に対して、工作機械座標系上での三次元点群の再構成を実施している。これらの処理では、約2000点弱の計測点群の座標値をおよそ18.6msecごとに導出して点群情報として追加することができる。

これらの処理を複数スレッドでの交互に処理し、GPUを用いた画像処理と組み合わせることによって、30fpsでレーザー反射光の撮影を行った場合でも、32.7msec以内に1撮影箇所における点群を加工面断面形状として取得し、リアルタイムに形状情報を更新することが可能となった。

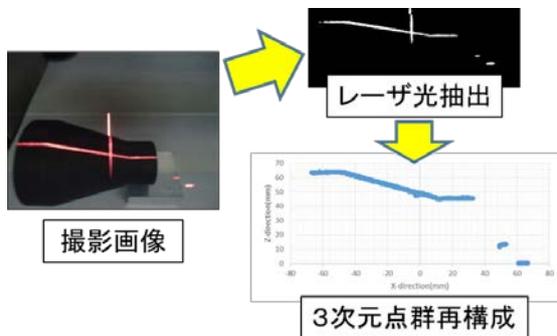


図2 画像処理による3次元点群再構成

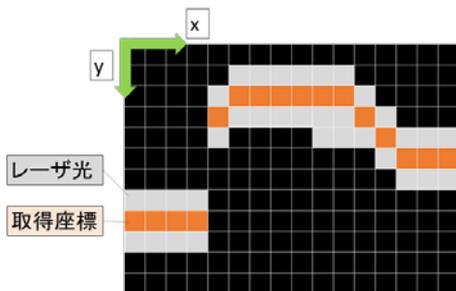


図3 反射光強度を参照した取得位置の特定

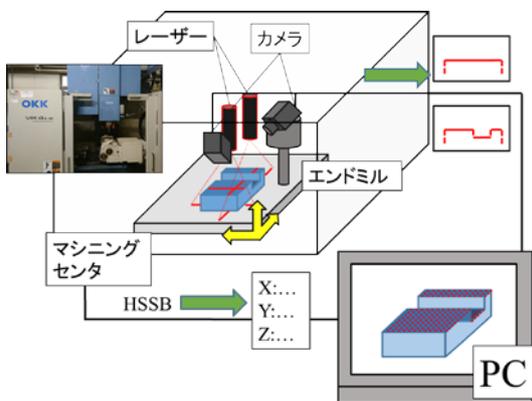


図4 ハイスピードシリアルバス通信による工作機械各軸位置の取得

また、実証実験においては、研究開始時に対象としていた鋳物形状に加え、積層造形後に高い硬度を有する熱硬化層を切削によって除去する必要のあるワイヤーク積層造形手法を対象とした計測を行った。図5はその計測結果の例を示す。計測結果から、 $\pm 1.0\text{mm}$ 程度の誤差でワークの積層面形状を取得することが可能となっており、仕上げ加工時の過大切削力作用を予測するのに十分な計測制度を実現することが可能であることが確認できた。

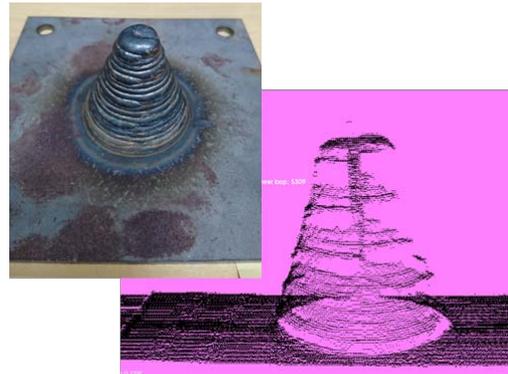


図5 積層造形物の形状測定結果

(2)の成果では、切削前に工具運動によって機内に把持された加工対象物の形状を測定し、そこから溝加工時の工具切り込み深さおよび工具干渉角度を、取得した点群から平面を推定して導出し、切削シミュレーションによって工具一回転分の切削抵抗を導出することに成功した。また、これを切削実験結果と比較し、結果がよく一致することを確認した。

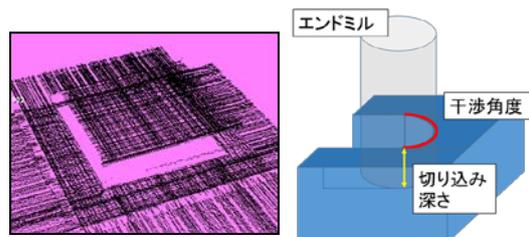
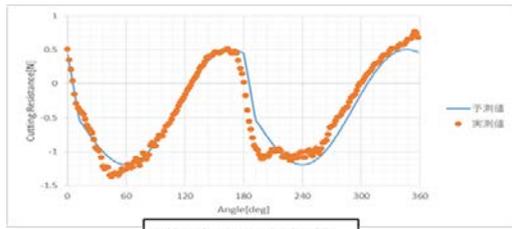
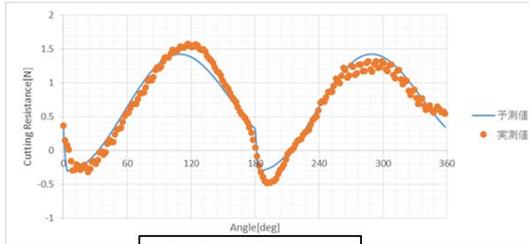


図6 エンドミル溝加工における素材形状計測結果例

(3)の成果では、FANUC社のCNCコントローラの有する外部通信機能と連携し、OKK社製マシニングセンタの各軸のXYZBC座標を逐次取得してこれをもとに画像処理から得られた主軸座標系上での三次元点群座標をワーク座標系に変換し、ワーク座標系上での加工対象物の概略形状を取得することを可能とした。一方で、工具弾性変形による加工誤差の検出、および工具送り値変更および工具位置指令値の算出アルゴリズムについては開発が途上であり、今後、検証実験の実施が必要と考えられる。



X軸方向切削抵抗



Y軸方向切削抵抗

図7 溝加工時の切り込み深さおよび工具干渉角度の推定による除去領域導出と切削抵抗予測結果の実験結果との比較

#### 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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. エンドミル切削における切削領域推定技術の開発、小黒凌輔、堀尾健一郎、金子順一、2017年度日本機械学会年次大会(2017)

2. エンドミル加工における除去領域推定技術の開発、竹内航、堀尾健一郎、金子順一、山崎次男、第23回精密工学会 学生会員卒業研究発表講演会(2016)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

研究内容 [工作機械の主軸運動および除去領域のオンマシン測定/推定技術の開発]

<http://kousaku.mech.saitama-u.ac.jp/contents.html>

エンドミル切削における切削領域推定技術の開発

<http://kousaku.mech.saitama-u.ac.jp/koguro2017.pdf>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

金子 順一 (KANEKO, Jun'ichi)  
埼玉大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号：80375584

##### (2) 研究分担者

小島 一恭 (KOJIMA, Kazuyuki)  
埼玉大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：60361391

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )