

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560111

研究課題名(和文) ゴム切削における切りくず分離過程のインプロセス観察を基にした加工誤差のモデル化

研究課題名(英文) Modelling of machining error in elastomer end-milling based on in-process observation of end-milling processes

研究代表者

寺本 孝司 (TERAMOTO, Koji)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40252605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、柔軟弾性体の小ロット加工に適用可能な切削加工モデルの系統的な構築に関する研究を行った。まず、単純形状に対する切削実験を基にしたモデル同定フェーズと、同定したモデルを用いて多様な形状に対する推定を行う推定フェーズからなる枠組みを提案した。そして、提案した枠組みの実現に必要な、柔軟弾性体のインプロセス計測を基にしたモデル化技術に関して検討した。具体的には、切削力および工作物変形の同期計測技術を確立するとともに、工作物変形モデルに含まれるパラメータの同定方法の提案とその妥当性の検証を行った。そして、実装したシステムを用いた実験の結果、提案手法によりモデル同定が行えることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a systematic construction of process models for elastomer end-milling which are applicable to small-lot production of elastomeric parts. A framework for process identification and process estimation is introduced. In order to implement the proposed framework, model identification methods for an instantaneous cutting force model and a dynamic workpiece deformation model are investigated. A response surface method and dynamic FEA (Finite element Analysis) are applied to identify the dynamic property of elastomeric workpiece. From the comparison between the measured deformation and estimated deformation, it becomes clear that the proposed method can estimate machining process appropriately.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：柔軟弾性体 切削加工 動的モデル パラメータ同定

### 1. 研究開始当初の背景

ゴム製品に代表される柔軟弾性体は様々な用途に用いられており、これまでは金型を用いた量産加工により製作されてきた。しかしながら、多様な用途へのカスタマイズが必要な製品や開発段階での試作などにおいて、柔軟弾性体の高精度な小ロット加工の実現が求められている。その方法として、近年、エンドミル加工の適用について検討が進められている。しかしながら、以下にあげる問題点があり普及にはいたっていない。

- 柔軟弾性体の低い剛性と大きな変形能により、過大な加工誤差が問題となることが多い。
- 多くの研究は実験的な検討が中心であり、形状と材質の多様性への対応が困難である。

このような問題点への対応として、柔軟弾性体の加工プロセスを有限要素法により精緻にモデル化する試みも行われているが、粘弾性特性や温度依存性など決定すべきパラメータが多数あり、多様な加工対象への適用は困難であると考えられる。

ゴム切削における加工誤差の要因としては、工作物の大域的な変形に起因する誤差と切りくず分離課程に起因する誤差が考えられることから、本研究では、それぞれの誤差要因に対する経験的なモデル化を行いその誤差を総合することで加工誤差をモデル化するという着想を得た。さらに、経験的なモデルに含まれるモデルパラメータについて、単純形状に対する予備加工実験を基に同定することで、多様な形状に対して適用可能な加工誤差モデルの利用が可能となると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、予備実験によって得られるデータを基にした加工誤差モデルの系統的な導出のための基盤として、以下の2点を目的として研究を進めた。

- (1) 予備実験における安定的かつ簡便なデータ計測手法の確立
- (2) 加工誤差の大きな要因である加工中の工作物変形モデルの同定手法の確立

### 3. 研究の方法

本研究では、(1) 予備実験における計測を志向した加工中の工作物変形と切削力の同期計測装置を開発し、(2) 予備実験によって得られた工作物変形と切削力から、応答局面法と有限要素解析技術を併用することで、柔軟弾性体の動的変形モデルに含まれる物理パラメータの同定手法を構築すること、について検討を行った。

#### (1) 加工中の工作物形状と切削力の同時計測装置の開発

通常、エンドミル加工では数千~1万 rpm 程度の工具回転数で切削を行う。このような

高速現象における工作物変位の計測手法は十分には確立していない。そこで、本研究では、高速度カメラによる画像記録と画像処理による特徴点追跡技術を用いることにより加工中の工作物変位の計測を行う。そして、録画可能な時間に制限のある高速度カメラの起動時間を切削力の計測情報と同時に記録することにより、工作物変位と切削力の同期計測を行う。試作した計測装置の構成図を図1に示す。

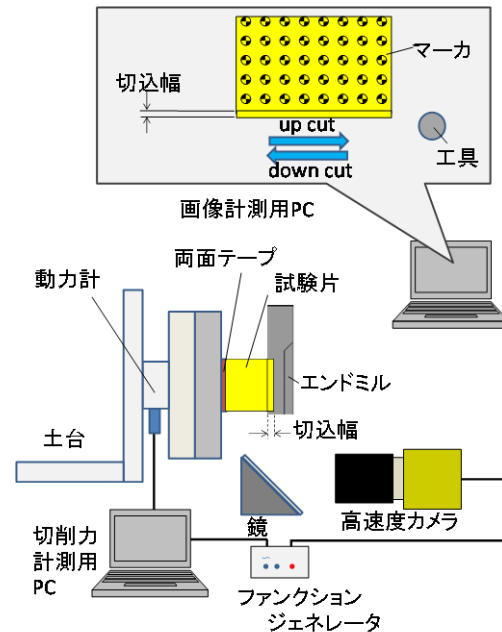


図1 同期計測装置の構成

#### (2) 動的変形モデルのパラメータ同定

本研究では、工作物の変形推定を実現する手法として、図2に示すようなモデル同定手法を想定している。これは、単純形状工作物を用いた予備実験により得られるデータに基づいたモデルパラメータの同定を行うものであり、実験により計測した加工中の工作物変形および切削力から、工作物変形の推定に必要なヤング率と減衰特性の同定を行う。さらに、加工条件と切削力の計測結果から、切削力モデルのパラメータ同定も行う。そして、同定されたモデルを用いて現実の多様な工作物形状の加工状況における工作物変形の予測を行うというものである。以下では、工作物モデルのパラメータ推定を、加工中の工作物の変形挙動と切削力の計測結果をもとに行う。ここでは、提案手法によるヤング率と減衰係数の同定の概要と同定結果について示す。

まず、(1) で開発した装置により直刃エンドミルを用いた準二次元エンドミル加工を行い、加工中の工作物変形および加工中の切削力を測定する。今回の実験では、工作物として、硬度90°のウレタンゴムを用い、鏡を介した工具回転軸方向からの画像として高速度カメラを用いて加工中の様子を録画

した。それと同時に加工時の切削力を工作物把持具の下に設置した切削動力計により測定した。撮影した加工中の画像と加工前の画像との比較結果を基に、事前に行った画像と実寸法の較正情報を参照して、加工位置近傍の工作物表面における変位情報を算出した。工作物の変形推定には、動的有限要素法による非定常変形解析を行うので、被削材に固有な物理パラメータ（剛性と減衰係数）が必要となる。本研究では、得られた変位情報と一致する変形挙動を示す物理パラメータを、応答局面法を用いて推定する。

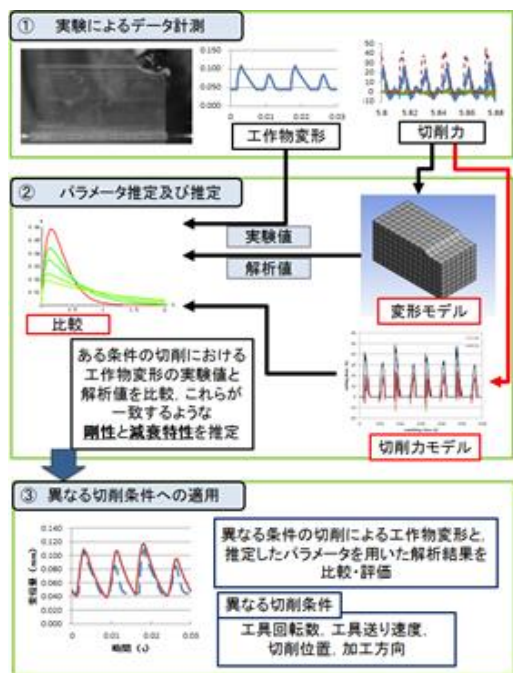


図2 動的変形モデル推定の流れ

表1 同期計測における加工条件

回転数 [rpm]	1000,2000,3000,4000
送り [mm/tooth]	0.0125, 0.025
切込み深さ [mm]	10
切込み幅 [mm]	1
切削位置 (図3)	①序盤, ②中盤, ③終盤

#### 4. 研究成果

##### (1) 工作物変位と切削力の同期計測結果

同期計測に関する実験は、工作物として硬度 90 度のウレタンゴムを 10mm×10mm×20mm の寸法に切り出したものを金属製の土台に接着して動力計に固定した。使用した工具は、φ6mm の 2 枚刃直刃エンドミルであり、ダウンカットでの実験を行った。加工条件を表 1 に示す。

なお、高速度カメラによる画像計測は 0.5 秒から 1 秒程度が限界であることから、画像計測を図 3 に示す 3 ヶ所で行った。なお、切削力はすべての加工時間を通して計測した。

同期計測実験に得られた結果の例を図 4 および図 5 に示す。図 4 は、2000rpm 一刃当

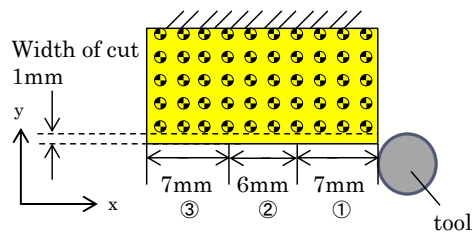


図3 画像計測位置

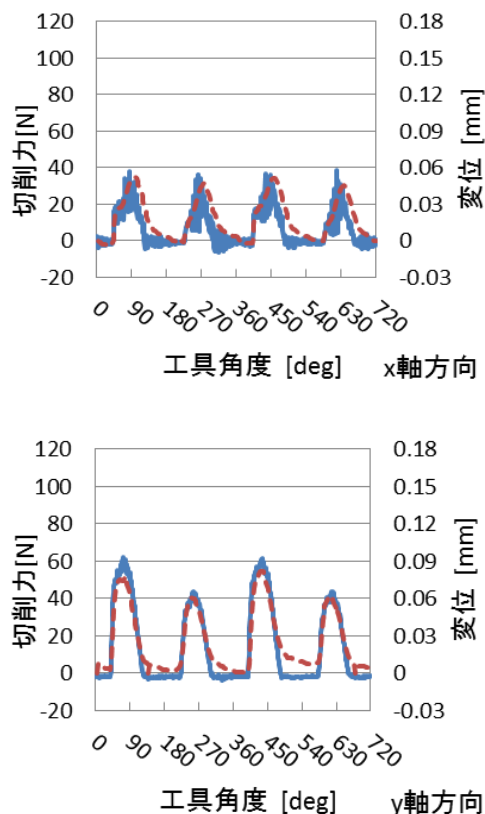


図4 切削力と工作物変位の計測結果

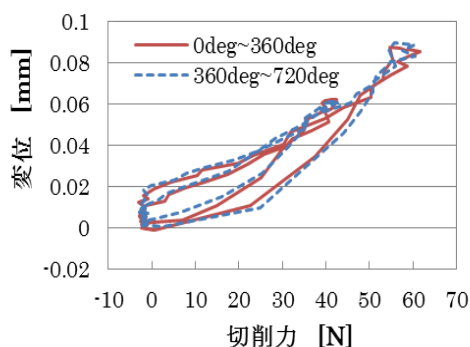


図5 切削力と工作物変位の関係

りの送り 0.025mm/tooth での切削位置②での結果を工具進行方向 (X 方向) および加工誤差方向 (Y 方向) の切削力と工作物変位の計測結果であり、図 4 は Y 方向の切削力と変位の関係をプロットした結果である。これらの結果から、同期計測が適切に行われていることが明らかとなった。

## (2) 動的変形モデルのパラメータ同定

パラメータ同定の妥当性の検証のために表1の条件の中で、工具回転数 4000rpm, 送り 0.0125mm/tooth の測定結果を用いた。なお、画像計測は 4000fps で行った。

図6に示すような切削中の工作物形状を模した工作物モデルを加工位置ごとに設定し、それを固定する両面テープの二種類の要素のヤング率と $\beta$ 減衰を推定の対象とする。境界条件としてモデル底面および二つの要素の接着面を固定し、図中に示した荷重負荷面に対して計測された切削力を時刻歴荷重として定義する。その結果として算出される切削位置近傍のY軸方向変位を工作物モデルの変位出力とする。そして、実験で計測した同一位置におけるY軸方向変位と比較する。パラメータ同定には、応答曲面法を基にした最適化を用いて、工作物モデルの変位出力と実験で計測された変位が近くなるように、工作物モデルに含まれる、柔軟弾性体のヤング率  $E_w$  および $\beta$ 減衰  $c_w$ , 両面テープのヤング率  $E_s$  および $\beta$ 減衰  $c_s$  の4つのパラメータを同定する。パラメータ同定における評価基準としては、工作物モデルによって算出される変位出力の最大値と最小値が、計測された変形の最大値、最小値と一致することとした。

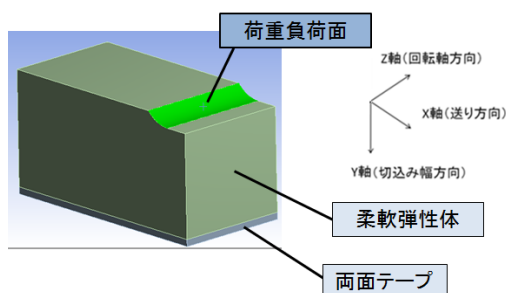


図6 工作物モデルの例

切削位置が序盤①のときのデータを基に同定されたパラメータを用いて、中盤および終盤を含む3ヶ所での工作物変位の推定を行った。序盤①でのY方向の変位推定結果と計測結果の比較を図7に示す。また、工作物変形の解析値と実際の変形の最大値を比較した結果を図8に示す。工作物位置が異なることによる剛性の変化に対応してある程度の変形推定が行えていることがわかる。提案した手法により、限定的な条件についてはあるが柔軟弾性体の切削における工作物の変形挙動を説明する物理パラメータを推定できることを示唆している。しかしながら、終盤③では推定誤差が大きく、圧縮変形が解放される過程でのヒステリシスや温度の影響などより詳細な検討が必要となる可能性がある。ただし、加工面を創成している瞬間の変形の差は小さくなっていることから、加工誤差の評価には提案したモデルでも一定の効果が期待できると考えられる。

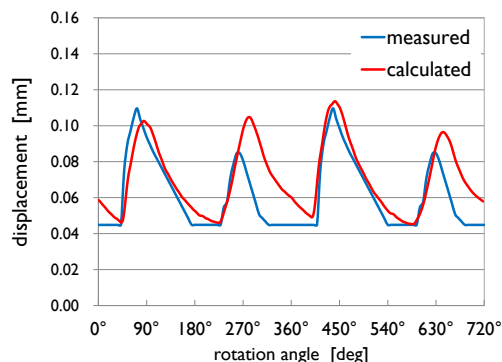


図7 工作物変位の比較 (序盤①)

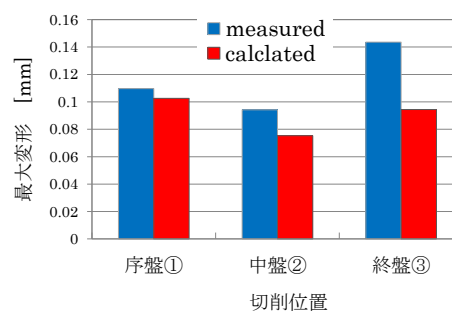


図8 最大変位の比較

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Koji TERAMOTO and Kazuhisa YABUKI, Experimental investigation of machining error in elastomer endmilling, *Memoirs of the Muroran Institute of Technology*, Vol.62, 2013, pp.55-58, 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① Koji Teramoto, Takahiro Kunishima and Yutaro Furuya, Analysis of cutting force in elastomer endmilling, 15th International Conference on Precision Engineering (ICPE2014), will be presented (2014.07), 石川県 ホテル日航金沢, 査読有
- ② Koji TERAMOTO, Shohei KUDO and Yuichiro FURUYA, In-process Observation of Workpiece Deformation in Elastomer Endmilling, The 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 宮城県 ホテル松島大観荘, pp.259-262(2013.11.7-8), 査読有
- ③ 寺本孝司, 柔軟弾性体のエンドミル加工プロセスの複合モデリング, 2012年度 精密工学会春季大会講演論文集, CD-ROM B78 (2012.3.14~16, 首都大学東京), 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・准教授

研究者番号: 40252605