

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成24年 5月24日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760114

研究課題名（和文）送り駆動系の運動特性を考慮した高精度輪郭制御のための工具経路生成法

研究課題名（英文）Study on Tool Path Generation Based on Motion Characteristics of Feed Drive Systems for High-precision Contour Movements

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、実際の数値制御工作機械の送り駆動系をモデル化し、送り駆動系の運動誤差を考慮して加工面をシミュレーションするための方法を開発した。送り駆動系の運動誤差が加工面に及ぼす影響について、実験とシミュレーションの両面から検討したところ、同じ運動誤差が生じていても工具経路によって加工面に及ぼす影響が異なることが明らかとなり、工作機械の運動特性を考慮した知能化 CAM システムの実現に向けた重要な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to provide a way to generate a tool path which considering the motion characteristics of feed drive systems. In order to achieve the purpose, this study focused onto the relationships between the motion characteristics of feed drive systems and machined surface. The relationships are investigated through both of actual cutting tests and its simulations. As the results of the investigations, it is clarified that the influence of the motion errors onto the machined surface depends on the tool path, even though the same motion errors exist.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,200,000	4,420,000

研究分野：位置決め，工作機械，運動制御

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：数値制御工作機械，送り駆動系，運動誤差，加工面，工具経路

1. 研究開始当初の背景

数値制御工作機械で所望の形状を加工する場合、そのための工具経路を一意に決めることはできない。幾何学的にはどのような工具経路でも同一の形状が創成されるはずであるが、実際には、各軸を駆動する送り駆動系の運動特性の影響により、加工結果には差異が生じる。この主な原因として、軸の運動方向が反転する際の摩擦力変化による影響や、軸間の同期精度の問題がある。

現状では、CAM オペレータが経験的に工具経路を設定して NC プログラムを作成して

おり、加工現場では試し削りを繰り返しながら送り速度や制御装置のパラメータの微調整が行われる。そのため、機械の性能を最大限に発揮できる工具経路の生成は難しく、さらに現場でも機械を占有して調整が行われるため、生産効率の悪化を招いている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、送り駆動系の運動誤差が加工結果に及ぼす影響を評価し、送り駆動系の運動特性を CAM による工具経路生成に反映させる手段を提供することにある。

3. 研究の方法

(1) 研究の概要

本研究の概要を図1を使って説明する。CAMソフトウェアを使って実際の加工を行うためのNCプログラムを作成し、それを数値制御装置に入力することで実際の加工試験を行う。そのとき、数値制御装置から各軸の送り駆動系に入力される位置指令をサンプリングし、これを別途構築した各軸送り駆動系の数学モデルに入力することで、各軸の送り駆動系の運動をシミュレーションする。これにより、実際の加工試験と全く同じ位置指令の条件でシミュレーションを行うことができる。

各軸の運動のシミュレーション結果から工具先端の運動軌跡を計算し、さらにそこから加工面形状を計算する。そのシミュレーション結果と実際の加工結果とを比較することで、開発するシミュレーション方法の有効性を確認するとともに、送り駆動系の運動誤差が加工面に及ぼす影響について検討する。

(2) 実験方法

本研究では、3軸制御によるボールエンドミル加工の一例として、図2に示すような半球形状の加工を行った。このとき、工具経路の違いにより生じる影響を検討するため、X軸方向に沿った双方向送りと一方向送りの2通りの工具経路で加工を行った。加工条件を表1に示す。

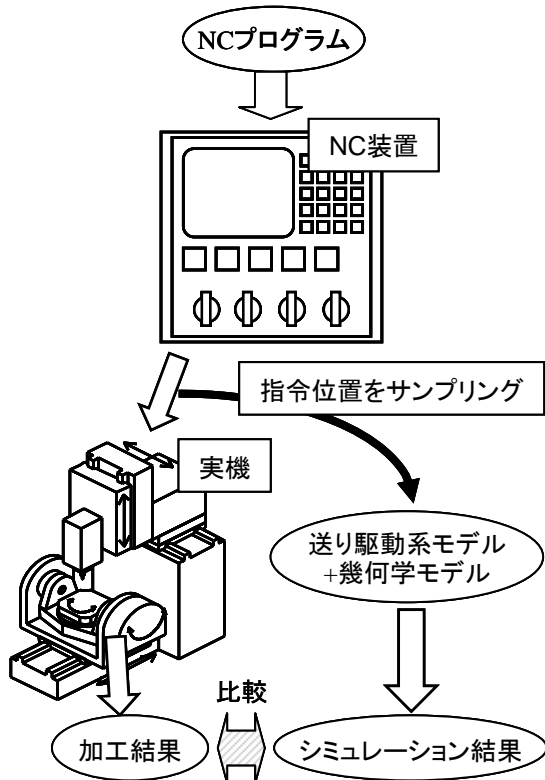
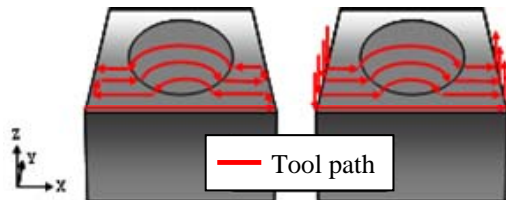


図1 研究の概要

表1 加工条件

Tool shape	Ball end mill
Tool diameter	6 mm
Number of flute	2
Workpiece	Aluminum (A5052P)
Feed speed	2000 mm/min
Radial depth of cut	0.05 mm
Axial depth of cut	0.3 mm
Spindle speed	20000 rpm

図3(a)に示すように、立て形マシニングセンタを使って実加工試験を行うとともに、実加工試験と同じ運動を行ったときのZX平面内における機械の運動誤差を、図3(b)に示すようにグリッドエンコーダ(2次元変位計)を用いて測定する。さらに、図4(a)に示す形状測定器を用いて加工後の形状を測定する



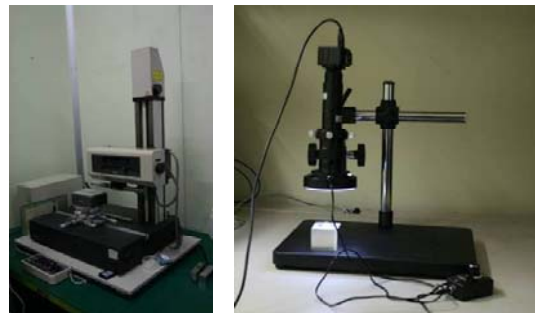
(a) 双方向送り (b) 一方向送り

図2 加工形状と工具経路



(a) 実加工試験 (b) 運動誤差の測定

図3 実加工試験と運動誤差の測定



(a) 輪郭形状の測定 (b) 加工面の観察

図4 輪郭形状の測定と加工面の観察

とともに、図 4(b)に示すマイクロスコープを用いて加工面を観察した。

(3) シミュレーション方法

本研究では、図 5 に示す方法で運動誤差を考慮した加工面のシミュレーションを行った。実加工試験と同じ条件でシミュレーションを行うために、実加工試験に使用した工作機械の制御装置から加工動作中に各送り軸へ指令される位置指令を取得し、各送り軸を駆動する送り駆動系の数学モデルに入力することで、加工中の機械の運動軌跡をシミュレーションする。さらに、運動軌跡のシミュレーション結果と工具形状とから、仕上げ加工面の形状をシミュレーションする。

本研究で開発した送り駆動系の数学モデルを図 6(a)および(b)に示す。本研究で使用した工作機械では、X軸は1本のボールねじ、Y軸およびZ軸はそれぞれ2本のボールねじで駆動されている。図 6(a)はX軸送り駆動系の数学モデルであり、モータおよびボールねじの慣性モーメント、剛性および被駆動体の質量と、各部の摩擦が考慮されている。

図 6(b)は、Y軸およびZ軸駆動機構の数学モデルを示しており、両方のモータおよびボールねじの慣性モーメントおよび剛性、被駆動体の質量および慣性モーメントと、各部の摩擦が考慮されている。

図 6(c)はXY平面で円運動を行ったときの円弧軌跡の測定結果とそのシミュレーション結果との比較である。図によると、象限切替部で生じる段差状の軌跡誤差を含めて、開発した数学モデルにより実機の挙動を表現できていることがわかる。図 6の結果はXY平面内のものであるが、ZX平面内の運動でも同様に実機の挙動をシミュレーションできることを確認している。

この運動軌跡のシミュレーション結果は工具中心の軌跡を表しているため、仕上げ加工面の形状とは異なる。仕上げ加工面の形状

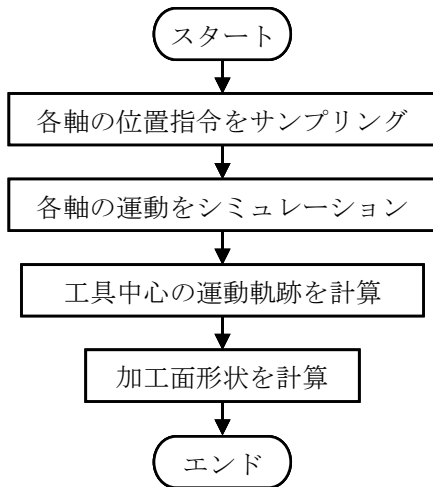
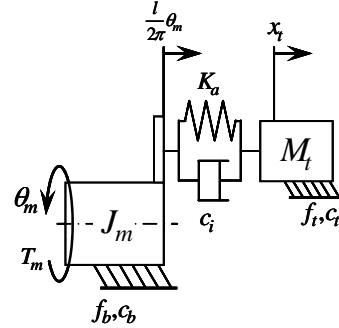


図5 シミュレーションの流れ

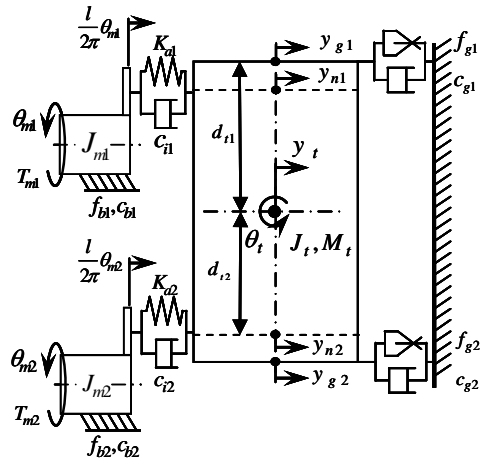
は、図 7 に示すように、運動軌跡のシミュレーション結果と工具形状とから工具外形の包絡面として計算する。

4. 研究成果

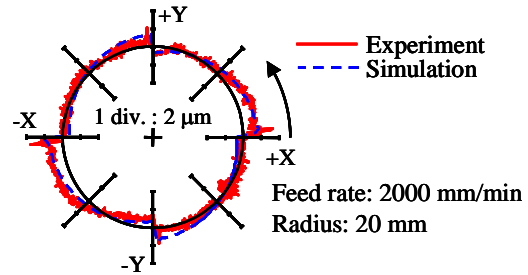
一方向加工による加工試験結果とそのシミュレーション結果を図 8 に示す。図(a)は



(a) X軸送り駆動機構の数学モデル



(b) Y軸およびZ軸送り駆動機構の数学モデル



(c) 円弧軌跡の比較

図6 運動軌跡のシミュレーション方法

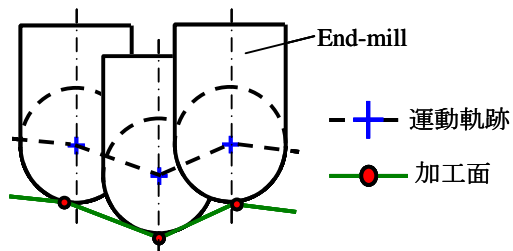


図7 加工面形状のシミュレーション方法

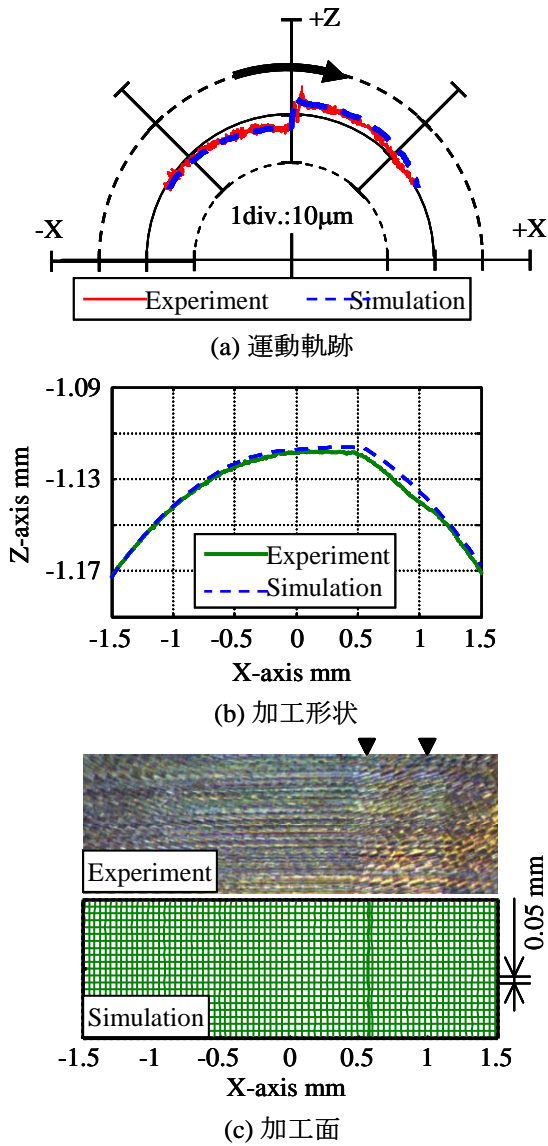


図8 一方向加工による加工結果

運動軌跡であり、半径方向の誤差を拡大表示している。図(a)をみると球の頂点付近で段差状の軌跡誤差が生じており、これは主に駆動機構の弾性変形によるものである。図(b)の加工形状をみると、0~1 mm の範囲で円弧とのずれが生じており、図(c)の加工面をみると、変曲点である 0.5 mm 付近で加工面が乱れて傷のように見える。実験結果では加えて 1 mm 付近にも加工面の乱れがあり、これは、図(b)からわかるように、シミュレーション結果では生じていない変曲点が存在するためである。

図9は双方向加工による加工試験結果とそのシミュレーション結果である。図(b)の加工形状をみると、図8(b)でみられるような円弧とのずれがない。これは、図9(a)からわかるように、双方向加工では左右の軌跡が対象となり、X 0 mm を境に、右側はCCW 送り時の軌跡、左側はCW 送り時の軌跡のみによっ

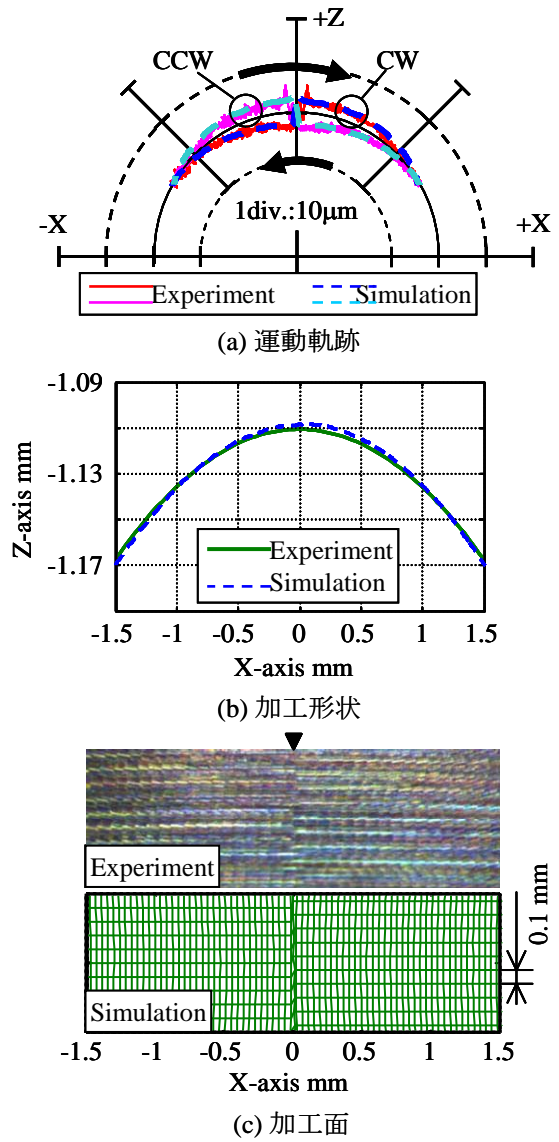


図9 双方向加工による加工結果

て加工面が創成されたためである。図9(c)の加工面をみると、実験結果とシミュレーション結果の両方で X 0 mm を境にカッターマークの位相がずれており、隣のカッターマークとの間隔がピックフィード量の倍の 0.1 mm となっている。

本研究により、送り駆動系の運動誤差により仕上げ加工面に生ずる加工痕を適切に予測するための方法を開発できた。また、同じ運動誤差が生じていても工具経路の違いにより仕上げ加工面に及ぼす影響が異なることが、実験とシミュレーションの両面から確認された。

本研究により開発されたシミュレーション方法により、試し削りを行わずに事前に加工面に生じうる不具合を予測できるほか、不具合が生じた場合の原因の究明についてもシステムチックに行うことが可能となる。さらに本研究の成果を発展させることで、

工作機械の運動特性を考慮した知能化 CAM システムの実現が可能になると考えられる。

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 6 件)

(1) Ryuta SATO: Mathematical Model of CNC Rotary Table Driven by Worm Gear, International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics, Vol. 2, No. 4, 査読有, (2012), pp. 27-40.

<http://www.igi-global.com/article/mathematical-model-cnc-rotary-table/74808>

(2) Kentaro NISHIO, Ryuta SATO and Keiichi SHIRASE: Influence of Motion Error of Feed Drive Systems on Machined Surface, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol. 6, No. 6, (2012), pp. 781-791.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamdsm/6/6/6_781/_pdf

(3) 佐藤隆太, 谷山裕紀, 堤正臣: ウォームギヤと平歯車を用いた回転軸駆動機構の数学モデル, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 78, No. 8, (2012), pp. 683-688.

(4) Ryuta SATO: Development of a Feed Drive Simulator, Key Engineering Materials, Vol. 516, 査読有, (2012), pp. 154-159.

<http://www.scientific.net/KEM.516.154>

(5) Ryuta SATO: Generation Mechanism of Quadrant Glitches and Its Compensation of Feed Drive Systems for NC Machine Tools, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 6, No. 2, (2012), pp. 154-162.

<http://www.fujipress.jp/IJAT/>

(6) Ryuta SATO and Masaomi TSUTSUMI: Dynamic Synchronous Accuracy of Translational and Rotary Axes, International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 査読有, Vol. 4, No. 3-4, (2011), pp. 201-219.

[学会発表] (計 7 件)

(1) 佐藤友樹: 送り駆動系の運動誤差を考慮したボールエンドミルによる仕上げ加工面の解析, 第 20 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会, 2013 年 3 月 13 日, 東京.

(2) 西尾健太郎: 同時 5 軸制御による円すい台加工面の解析, 日本機械学会第 9 回生産加工・工作機械部門講演会, 2012 年 10 月 28 日, 秋田.

(3) 佐藤友樹: ボールエンドミル 5 軸加工による仕上げ加工面のシミュレーション, 2012 年度精密工学会秋季大会学生研究発表会, 2012 年 9 月 14 日, 北九州.

(4) Ryuta SATO: Influence of Motion Error of Feed Drive Systems on Machined Surface, 2012 MTTRF Annual Meeting, 2012 年 7 月 25 日, 伊賀.

(5) Ryuta SATO: Motion Control Techniques for Synchronous Motions of Translational and Rotary Axes, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, 2012 年 6 月 5 日, チューリッヒ (スイス).

(6) Kentaro NISHIO: Influence of Motion Error of Feed Drive Systems on Machined Surface, The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2011 年 11 月 9 日, 大宮 (日本).

(7) 西尾健太郎: エンドミル側面加工による仕上げ加工面と同時 2 軸制御時の軌跡誤差との関係, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2011 年 9 月 20 日, 金沢.

[その他]

(1) ホームページ等

http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new_index.html

(2) 日本機械学会生産加工・工作機械部門優秀講演論文表彰

西尾健太郎, 佐藤隆太, 白瀬敬一: Influence of Motion Error of Feed Drive Systems on Machined Surface, 2011 年 11 月 9 日.

(3) 工作機械技術振興財団 工作機械技術振興賞(奨励賞)

西尾健太郎, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 送り駆動系の運動誤差が加工面に及ぼす影響, 2011 年 6 月 14 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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