

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 26 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560119

研究課題名（和文）

輪郭制御による 5 軸工作機械の省エネルギー化

研究課題名（英文）

Energy Saving for Five-Axis Machine Tools by Contouring Control

研究代表者

内山 直樹（UCHIYAMA NAOKI）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10273327

研究成果の概要（和文）：

地球環境問題が深刻化しており、世界中の工場で昼夜を問わず利用されている工作機械においても、有効な省エネルギー化技術が望まれている。本研究では、工作機械制御への有効性が確認されている輪郭制御法を、5 軸工作機械を対象とした方法に拡張し、省エネルギー効果ならびに制御性能の検証を行うことを主な目的とする。提案法を応用した加工実験の結果、輪郭精度を維持しつつ、約 28% の省電力化を達成した。

研究成果の概要（英文）：

Because machine tools are widely used day and night all over the world, not only high-speed and high-precision control but also consumed energy saving is required. This study considers a contouring controller design to reduce consumed energy for five-axis machine tools. Experimental results of machining demonstrate the effectiveness of the proposed controller, which reduces consumed electrical energy by about 28 %

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：工作機械

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球環境問題が深刻化しており、世界中の工場で昼夜を問わず利用されている工作機械においても、有効な省エネルギー化技術が望まれている。ソフトウェアの変更のみよる省エネルギー化技術は現状の装置に応用できる可能性が高く、特に有用である。

(2) 5 軸工作機械は段取り替えが少なく工具寿命や仕上げ面を向上する等の利点を有し、近年需要が拡大しているため、有効な省エネルギー制御法の提案は重要な課題であると考える。

## 2. 研究の目的

(1) 申請者はこれまで工作機械の一輪郭制御法を提案し、この省エネルギー効果を実験的に確認した。本研究ではこの方法を5軸工作機械を対象とした方法を拡張し、実験により省エネルギー効果・制御性能の検証を行う。

(2) 多軸工作機械では、負荷の大きな駆動軸において複数のアクチュエータを用いた同期制御が行われている。この同期制御系との併用を考慮した輪郭制御法を提案する。直動軸および回転軸の同期制御を含めた輪郭制御系を設計し、省エネルギー効果・同期精度・輪郭精度の検証を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 複数のアクチュエータで負荷の大きな軸を駆動するための同期制御法およびこれを併用する5軸工作機械の輪郭制御法を提案する。

(2) 市販のCNC工作機械では任意の制御則の実装が困難であるため、提案する輪郭制御法が応用可能な5軸工作機械装置を製作する。また近年では、ギア等動力伝達要素のバックラッシュや弾性変形および機械的損失のないリニアモータやDDモータが工作機械に利用されるようになっており、この場合には工作物の質量変動や切削力等の負荷変動を考慮した制御法が必要とされる。本研究で製作する装置もリニアモータとDDモータにより構成する。

(3) 提案する輪郭制御法を用いて工作機械の駆動実験および加工実験を行い、省エネルギー効果・制御性能を既存の方法と比較検証する。

## 4. 研究成果

(1) 複数のアクチュエータで負荷の大きな軸を駆動するための同期制御法およびこれを併用する5軸工作機械の輪郭制御法を提案した。

(2) 任意の制御則が実装可能な5軸工作機械装置(図1)を構築した。

(3) 本研究で提案する輪郭制御法を5軸工作機械装置(図1)に適用し、省エネルギー効果を検証した。制御器は、制御系の閉ループ特性が2次遅れとなるように設計した。制御器のゲインは、この閉ループ系の制御帯域をもとに、応答が振動的とならないよう設定した。この制御器を用いて表1の制御帯域の条件のもとで実験を行った。(c1)は各軸独立制御、(c2)と(c3)は既存の輪郭制御、(c4)は提案法による輪郭制御である。 $\omega$ は制御帯域、

添え字  $x, y, z, a, c$  は図1の各駆動軸を、 $t, n, b$  は工具先端位置の移動軌跡の接線、法線、従法線方向を意味している。

消費電力量の測定時間は1分間、各条件で5回ずつ測定し平均を求めた。

図2に、輪郭誤差の時間推移を示す。(c3)では接線方向の帯域を小さくしたことで輪郭誤差が大きくなっているが、(c4)では輪郭誤差が(c1)(c2)と同様に抑えられている。

図3, 4より、制御帯域を小さくした場合に制御入力の高周波成分が抑制されていることがわかる。図5に、各実験での消費電力量のまとめを示す。図6は、各条件での平均電力量を示したものである。

提案法により、輪郭精度を維持しつつ消費電力量を10%以上低減できている。また、加工実験を行った結果、約28%の省電力化が確認された。

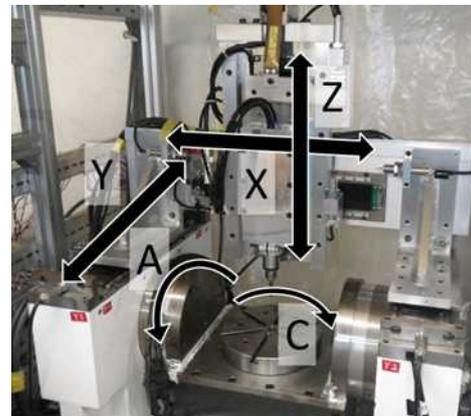
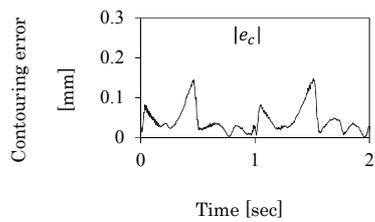


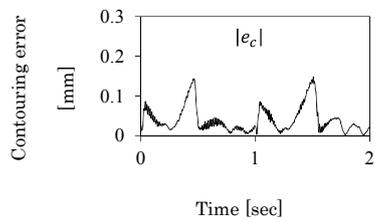
図1 構築した5軸工作機械

表1 実験条件 (rad/s)

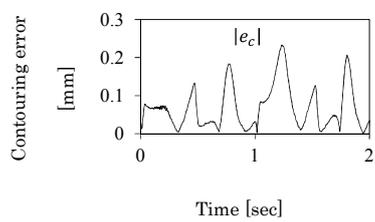
	(c1)	(c2)	(c3)	(c4)
$\omega_x$	140	/		
$\omega_y$	140			
$\omega_z$	140			
$\omega_t$	/		140	30
$\omega_n$	/		140	
$\omega_b$	/		140	
$\omega_a$	140			
$\omega_c$	120			



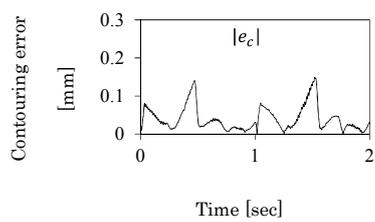
(a) (c1)



(b) (c2)



(c) (c3)



(d) (c4)

図2 輪郭誤差

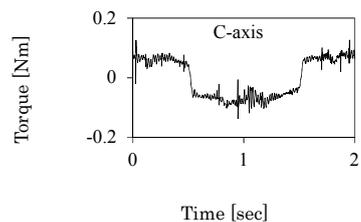
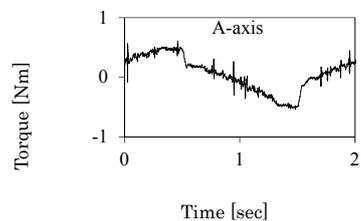
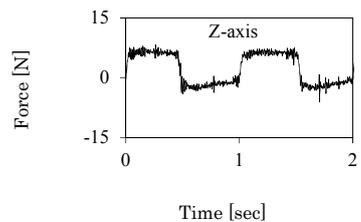
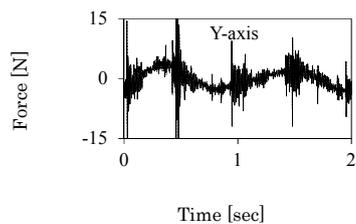
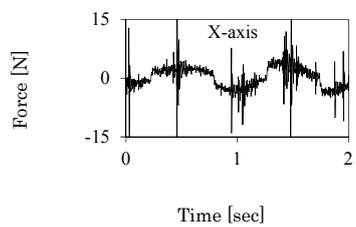
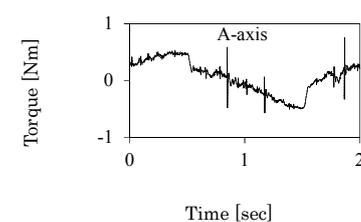
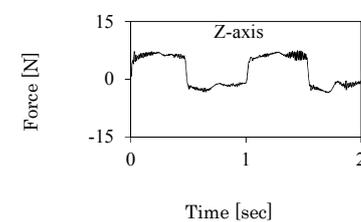
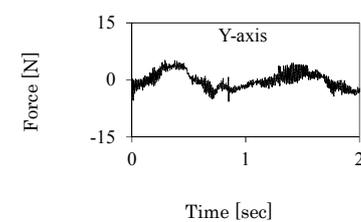
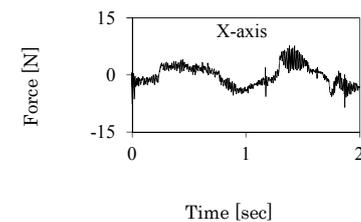


図3 既存の方法(c1)による制御入力



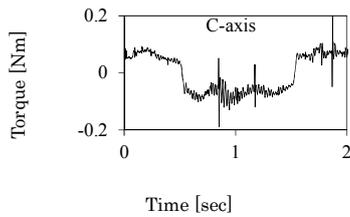


図4 提案法(c4)による制御入力

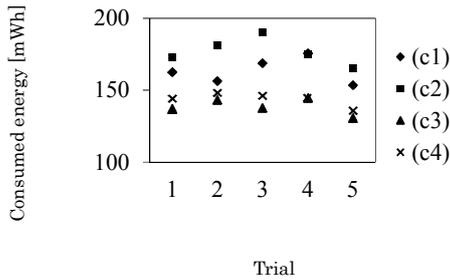


図5 各試行における消費電力量

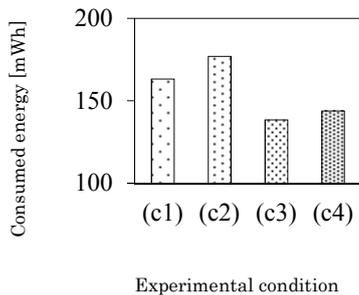


図6 消費電力量の平均値の比較

## 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3件)

(1) Naoki Uchiyama, Yuki Ogawa, Shigenori Sano, Energy Saving for Gantry-Type Feed Drives by Synchronous and Contouring Control, International Journal of Automation Technology, 査読有, 6-3, 2012, pp. 363-368

(2) A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Discrete-Time Model Predictive Contouring Control for Biaxial Feed Drive Systems and

Experimental Verification Mechatronics, 21-6, 査読有, 2011, pp. 918-926

(3) A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Contouring Controller Design Based on Iterative Contour Error Estimation for Three-Dimensional Machining, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 査読有, 27-4, 2011, pp. 802-807

[学会発表] (計4件)

(1) 小河裕樹, A. El Khalick M., 内山直樹, 佐野滋則, 輪郭制御による5軸工作機械の省エネルギー化, 日本機械学会 東海支部第61期総会・講演会, 名古屋, 2012年3月15-16日, 115

(2) Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Feed drive control considering multi-axis coupling effects and extension to contouring control, The 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Lisbon, Portugal, 査読有, 2011年7月26-29日, pp. 269 - 273

(3) 小河裕樹, 内山直樹, 佐野滋則, 工作機械送り駆動系の輪郭制御による省エネルギー効果の実験的検証, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 岡山, 2011年5月27-29日, 1A1-F01

(4) Naoki Uchiyama, Takaya Nakamura, Shigenori Sano, Synchronous and Contouring Control for Gantry-Type Feed Drive Systems, 2010 XIX International Conference on Electrical Machines, Rome, Italy, 査読有, 2010年9月6-8日, RF-011681

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内山直樹 (UCHIYAMA NAOKI)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・  
准教授  
研究者番号: 10273327

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: