

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560131

研究課題名(和文) 輪郭制御と単純な動作軌道を用いた工作機械の省エネルギー化

研究課題名(英文) Energy saving of machine tool systems using contouring control and simple motion trajectories

研究代表者

内山 直樹(Uchiyama, Naoki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10273327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：環境・エネルギー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。稼働中の装置に応用するためにソフトウェアの変更のみによる省エネルギー化手法が期待される。本研究では工作機械の基本的な動作である輪郭追従動作と位置決め動作を対象に省エネルギー化を実現するための制御法を提案し，実験的に有効性を検証した。制御性能を低下させることなく，消費電力量を大きく低減できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Machine tool systems are widely used in manufacturing factories around the clock all over the world, and therefore not only high-speed and high-precision operation but also reduced energy consumption is required from the view point of earth environmental and energy shortage problems. This study considers a software approach for energy saving that may be implemented in industrial systems currently in use. Controller designs for contouring motion and point-to-point motion for machine tool systems were proposed, and their effectiveness was verified experimentally. The proposed controllers were able to successfully reduce energy consumption while maintaining the control performance.

研究分野：システム工学 制御工学 メカトロニクス

キーワード：工作機械 省エネルギー化 輪郭制御 位置決め制御 ロバスト制御

### 1. 研究開始当初の背景

環境・エネルギー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。日本の工作機械メカにおいても、待機時の消費電力を低減する方法や、モータサーボシステムの電気回路部品を低消費電力のものに置き換えるなどの方法が近年開発されている。日本の工作機械生産額は大きな世界シェアを有するため、国内外で稼働中に装置に直ちに応用可能な省エネルギー化技術の提案が望まれる。

工作機械のハードウェアを改良する方法では稼働中の工作機械への応用が困難であるため、制御法(ソフトウェア)の変更による省エネルギー技術が必要と考える。すなわち、稼働中の機械動作の変更により省エネルギー化が実現できれば、地球規模での環境・エネルギー問題に大きく貢献できる。

工作機械に一般的に用いられている基本動作として、つぎの2つがあげられる。一つは所望の加工形状を実現するための輪郭追従動作であり、目標動作軌道への完全な追従を目的とする。もう一つは、加工終了後の初期位置への復帰や、工作物のローダに用いられる位置決め動作であり、終点位置のみが重要なため、途中の動作には台形速度軌道やS字加減速軌道などの基本的な軌道が用いられる。

報告者はこれまで工作機械の一輪郭制御法を提案し、送り駆動系の位置制御性能の向上を確認したが、この時の制御実験において、軌道追従性能を維持しつつ駆動モータの消費電力を大きく低減できる可能性があることを確認している。

また、位置決め動作においても、加速時間等を変更することにより大きな省エネルギー効果が得られる可能性があり、検証が期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、背景で述べた輪郭追従動作および位置決め動作の双方に対して、制御ソフトウェアの改良による省エネルギー化のための諸性質を明らかにし、実験検証することを目的とする。

輪郭追従動作については、報告者らが提案してきた省エネルギー効果を有する輪郭制御法の性質を解析、工作物の負荷変動ならびに摩擦・切削力外乱を考慮したロバスト制御法に拡張し、加工実験において効果検証することを目的とする。

また、位置決め動作において、多くの工作機械の早送り動作に利用される台形速度軌道やS字加減速軌道を対象に、消費電力と加減速時間の関係を明らかにし、省エネルギー化のために有用な方法を検討する。さらに、実際の工作機械装置において、有効性を確認する。

### 3. 研究の方法

輪郭制御において、報告者の提案する方法に主要なロバスト制御法である可変構造型制御、適応制御法等を応用する方法を検討し、安定性、省エネルギー効果などを解析する。また、研究室保有の工作機械装置、送り駆動装置において、目標輪郭軌道への追従性能、省電力効果を実験的に検証する。さらに、加工実験を実施し、実用性を調べる。

位置決め動作においては、広く用いられている台形速度軌道、S字加減速軌道において消費エネルギーを予測する方法ならびに省エネルギー化に有効な諸性質を調べる。また、高速位置決め動作時には残留振動抑制も必要になるが、このために有効な性質を明らかにする。実際の産業機械装置において残留振動および消費電力を計測し、提案法の有効性を確認する。

### 4. 研究成果

平成24年度は輪郭追従動作について研究を実施し、報告者がこれまで提案してきた輪郭制御法を、工作物の負荷変動ならびに摩擦・切削力外乱を考慮したロバスト制御法に拡張した。つぎに報告者が保有している工作機械装置に提案法を応用し、省エネルギー効果を検証した。また、省エネルギー制御やロバスト制御に伴う運動精度の低下が懸念されるため、これを確認した。

本研究では、主要なロバスト制御法であるスライディングモード制御法を応用したが、一般的な方法と異なり、線形ではなく非線形のすべり面を輪郭制御法に用いることを提案した。図1は2軸送り駆動系装置各軸の消費電力を計測した結果であるが、線形すべり面(LSS)と非線形すべり面(NLSS)で同程度の追従性能を実現し、10回の繰り返し実験を行った結果、いずれの場合にも非線形すべり面を用いた場合に消費電力を大きく低減でき、効果の再現性を確認した。運動精度を低下させることなく、平均では20%以上の省エネルギー効果を実現できた。

平成25年度は位置決め動作について研究を実施した。位置決め動作では、一般に台形速度軌道やS字加減速軌道が用いられているが、本研究では、これらの動作において消費されるエネルギーを解析的に導出した。また、消費エネルギーを最小化する加減速時間など動作軌道の設定に有用な性質を導いた。さらに、実際の工作機械装置において有効性を検証し、上記の理論的性質と実験結果の整合を確認した。

図2は実際の工作機械装置の台形速度軌道による早送り動作において、移動距離と移動時間を変えずに、加速時間(減速時間に同じ)のみを変えて消費電力を予測(実線)し、実験での計測結果(×印)と比較したものであるが、両者はよく一致することが確認された。また、最適な加減速時間を用いることに

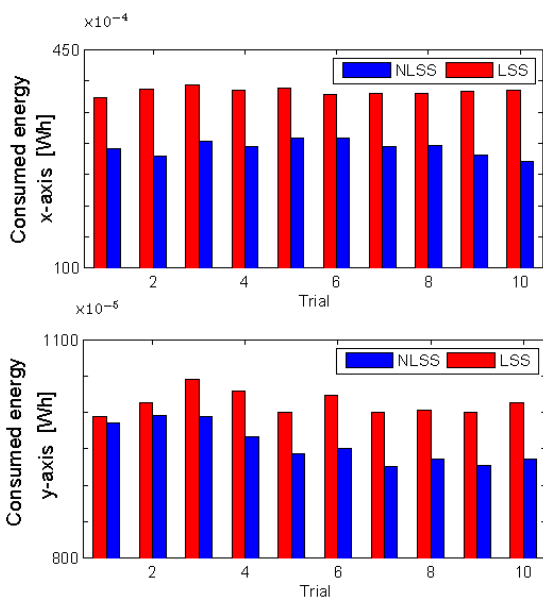


図1 線形すべり面 (LSS) と非線形すべり面 (NLSS) を用いた場合の消費電力の比較

より、消費電力量を出荷時設定に比べて30%以上低減できる場合があることが確認された。

なお、本研究で導出した消費エネルギーが最小となる加減速時間で駆動した場合に、残留振動振幅が増大する可能性がある。本研究では、残留振動を抑制する動作軌道が複数存在することを利用し、この中から消費エネルギーが最も小さい軌道を選択する手法についても提案を行った。

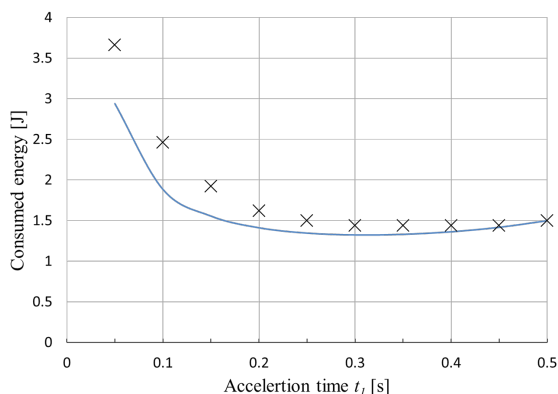


図2 台形速度軌道における消費電力の予測結果 (実線) と実験での計測結果 (×印) の比較

平成26年度は、平成25年度に提案した位置決め動作モードに用いられるS字加減速動作軌道の生成法についての研究を進展させ、加速区間の速度軌道が1次および2次関数で表される場合を対象に、消費エネルギーを解析的に導出した。また、消費エネルギーを最小化する加減速時間など動作軌道の設定に有用な性質を導いた。さらに、実際の工作機械に応用し、理論と実験結果の整合を

確認した。電力計により実際に消費電力を計測した結果、本研究で導出した最適な加減速時間を用いることにより、出荷時の設定と比較して消費電力量を25%程度低減できた。

輪郭制御については、図3のようにロバスト制御法 (Robust) に加え、ロバスト適応制御法 (RA) の応用実験を試みた。研究室で保有する工作機械での切削加工に応用し輪郭精度と消費電力量を計測した結果、報告者が提案してきた方法 (Normal) に比較して、輪郭誤差は双方で60%程度低減した。消費電力量については、適応制御法の応用により、ロバスト制御法と同程度の輪郭精度を維持しながら約10%低減できた。

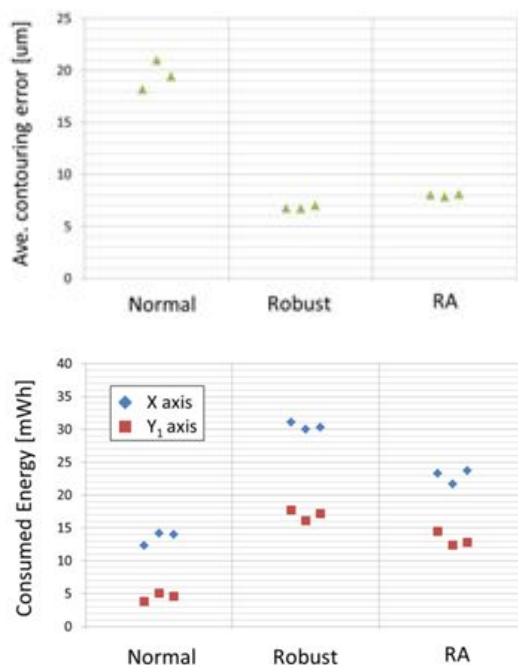


図3 既存の輪郭制御とロバスト制御・ロバスト的制御との輪郭精度および消費電力の比較 (3回の実験結果)

## 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 5件)

[1] A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Reduction of electrical energy consumed by feed drive systems using sliding-mode control with a non-linear sliding surface, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 6, pp. 2875-2882, 2013

[2] A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Estimation of tool orientation contour errors for five-axis machining, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, Vol. 29, No. 5, pp. 271-277, 2013

[3] A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Energy saving in feed drive systems using sliding-mode based contouring control with a non-linear sliding surface, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 2, pp. 572-579, 2014

[4] Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Kazushige Haneda, Residual vibration suppression using simple motion trajectory for mechanical systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 8, No.3, pp. 195-200, 2015

[5] Naoki Uchiyama, Yuki Ogawa, A El Khalick M., Shigenori Sano, Energy Saving in Five-Axis Machine Tools Using Synchronous and Contouring Control and Verification by Machining Experiment, IEEE Transactions on Industrial Electronics (Accepted)

〔学会発表〕(計 8件)

[1] A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Reduction of Control Input Variance of Feed Drive Systems Using Sliding-Mode Control with Nonlinear Sliding Surface, IEEE International Conference on Mechatronics, 2013年02月27日~2013年03月01日, Vicenza, Italy, pp. 821-825

[2] Naoki Uchiyama, Yuki Ogawa, A. El Khalick M., Shigenori Sano, Kazuo Yamazaki, Energy Saving Control in Five-Axis Machine Tools Using Contouring Control, European Control Conference, 2013年07月17日~2013年07月19日, Zurich, Switzerland, pp. 797-802

[3] Koichi Goto, Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Energy saving in point-to-point control of industrial machines using a simple motion trajectory, SICE Annual Conference 2013, 2013年09月14日~2013年09月17日, Nagoya Japan, pp. 1945-1948

[4] Ba Dinh Bui, Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Friction compensation in contouring control for biaxial feed drive systems and experimental verification, 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, JSME,

2013年11月07日~2013年11月08日, Matsushima, Miyagi, Japan, pp. 547-552

[5] A. El Khalick M., Naoki Uchiyama, Shigenori Sano, Sliding mode contouring controller with a nonlinear sliding surface and a disturbance observer for five-axis machining tasks, 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, JSME, 2013, 2013年11月07日~2013年11月08日, Matsushima, Miyagi, Japan, pp. 531-536

[6] Naoki Uchiyama, Energy saving in machine tools using contouring control, CIRP 2013 General Assembly Part2 Scientific Technical Committee "M (Machines)" (招待講演), The International Academy for Production Engineering, 2013年08月18日~2013年08月24日, August 2013, Hotel Bella Sky, Copenhagen, Denmark

[7] Naoki Uchiyama, Yuta Honda, Shigenori Sano, Residual vibration suppression and energy saving in industrial machines using a trapezoidal velocity profile, 2014 American Control Conference, 2014年06月04日~2014年06月06日, Portland, Oregon, USA, pp. 323-328

[8] Naoki Uchiyama, Koichi Goto, Shigenori Sano, Analysis of Energy Consumption in Fundamental Motion of Industrial Machines and Experimental Verification, 2015 American Control Conference, 2015年07月01日~2015年07月03日 Chicago, USA (Accepted)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

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・教授

研究者番号: 10273327

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし