

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04361

研究課題名（和文）適応制御系の省エネルギー効果の理論的解明と実験検証

研究課題名（英文）The effectiveness of adaptive control for energy saving and its experimental verification

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地球環境・省資源問題の重要性が指摘され、幅広い分野での学術研究が期待されている。適応制御法は制御器パラメータの調整機構を有し、産業機械の制御性能向上を目的とした応用が期待されているが、本研究では、この省エネルギー効果に関する検討を行った。適応制御系における制御器パラメータの調整機構により制御入力の変動を抑制しつつ目標動作への追従性能を向上できることが分かり、この結果として省エネルギー効果が得られることを確認した。新たな被覆動作計画法および単純適応制御法を提案し、目標動作への追従性能および省エネルギー効果を得ることができ、有効性を実験的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本国内において産業機械分野のモータ消費電力量は全分野の5割以上を占めており、また、日本の産業機械生産額は大きな世界シェアを維持していることなどから、有効な省エネルギー化技術を国内において提案・実用化できれば、地球規模での環境・省資源問題に大きく貢献できる。本研究において、適応制御系における制御器パラメータの調整機構により制御入力の変動を抑制し、省エネルギー効果が得られることを確認し、学術的意義を有する。また、ソフトウェアの変更により省エネルギー化が可能な本研究成果を市販の産業機械に応用することで、社会的にも貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：Diverse studies for earth environmental and resource shortage problems are widely expected. Adaptive control, which has an online parameter adjustment mechanism, has been studied for improving the control performance of industrial machinery for decades. This study deals with its effectiveness for energy saving. The parameter adjustment mechanism can reduce not only tracking error but also control input variance, which contributes to energy saving. New designs for coverage motion planning and simple adaptive control are presented, and their effectiveness is shown experimentally.

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：省エネルギー化 産業機械 適応制御

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球環境・省資源問題の重要性が指摘され、幅広い分野での学術研究が期待されている。例えば、日本国内において産業機械分野のモータ消費電力量は全分野の5割以上を占めており、また、日本の産業機械生産額は大きな世界シェアを維持していることなどから、有効な省エネルギー化技術を国内において提案・実用化できれば、地球規模での環境・省資源問題に大きく貢献できる。

適応制御法は制御器パラメータの調整機構を有し、例えば産業機械の制御性能向上を目的とした応用が期待されている。報告者は研究開始当初、適応制御により制御性能を維持したまま、7%程度の省エネルギー効果が得られることを統計的に確認していた。この理由の解明と実験検証が必要と考えた。

### 2. 研究の目的

適応制御法は制御器パラメータの調整機構を有し、例えば産業機械の制御性能向上を目的とした応用が期待されている。一方で、世界中の工場で昼夜を問わず利用される産業機械においては、環境・省資源問題のために省エネルギー化も重要な課題である。本研究では、適応制御法による省エネルギー効果について解明することを目的とした。さらに、省エネルギー効果を向上できる適応制御系の構成法を提案する。環境・省資源問題への貢献のために、産業機械を対象とした実験検証を実施し、有効性・実用性を示す。

### 3. 研究の方法

まず、1パラメータのみを調整する制御系を対象に省エネルギー効果について基礎的な理論検討を行い、知見を得た。つぎに、複数パラメータを調整する方法について検討した。動作時の加々速度を抑制することにより省エネルギー化が実現できると考え、これを考慮した動作軌道生成法を提案後、実験により有効性を確認した。この内容と並行して、単純適応制御系の設計法を提案し、既存の方法との比較実験において目標動作への追従誤差を約10%低減できた。

さらに、上記で提案した方法を産業機械の領域被覆計画に応用する手法を提案し、実験により既存の加々速度制限を考慮した方法に比べ、動作時間を約14%抑えつつ、エネルギー消費を約4%低減できることを確認した。追従誤差についても、約15%低減できた。図1に本研究で検証に用いたX-Yテーブル装置を、図2に動作時間と消費エネルギーについてパレート最適な領域被覆動作軌道の生成例を示す。図3は、最短時間、時間とエネルギーについてパレート最適、エネルギー最適な動作速度軌道の生成例であり、このような調整が可能となった。

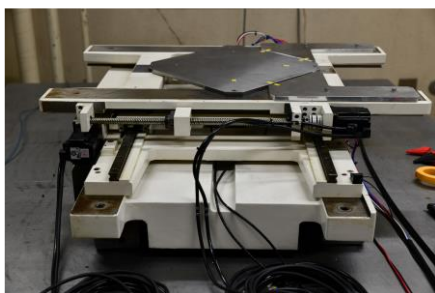


図1 X-Y テーブル装置

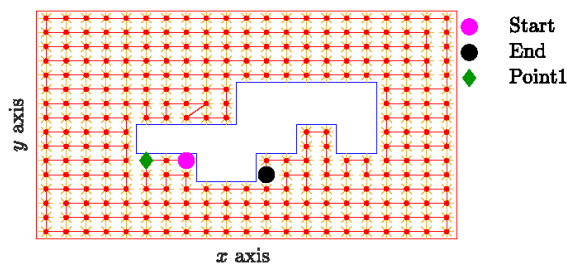


図2 生成された領域被覆経路

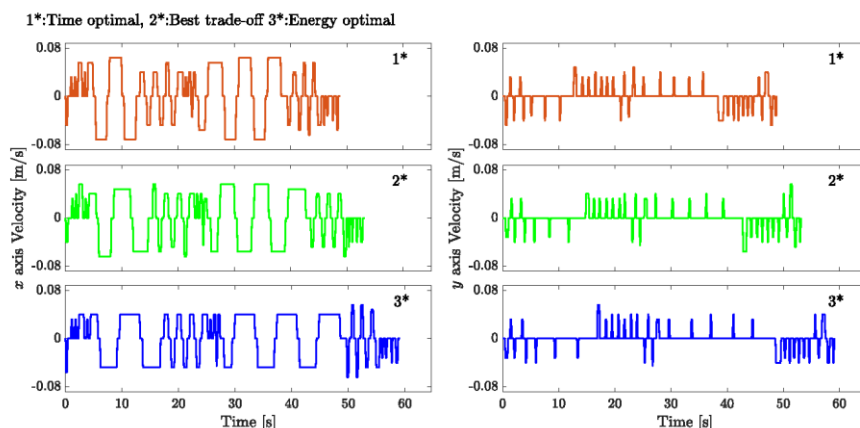


図3 最短時間、時間とエネルギーについてパレート最適、エネルギー最適な動作軌道

また、前年度提案した単純適応制御系の設計法を高次の拡張誤差信号を用いる方法に展開後、実験検証を行い、前年度の方法と同程度の位置追従性能において比較した結果、消費エネルギーを約8%低減できた。図4は既存の並列フィードフォワード補償器(PFC: Parallel Feedforward Compensation), 報告者のグループが提案した既存法(AOS-v-a: Augmented Output Signal-velocity-acceleration), 今回の提案法(Proposed)において、追従誤差低減を目標とした制御実験での性能比較結果である。10回の試行において提案法が安定的に性能向上できている。図5は、追従誤差が同程度になるように制御器を調整した場合の消費エネルギーの比較実験結果である。提案法の安定的な省エネルギー化が確認できる。

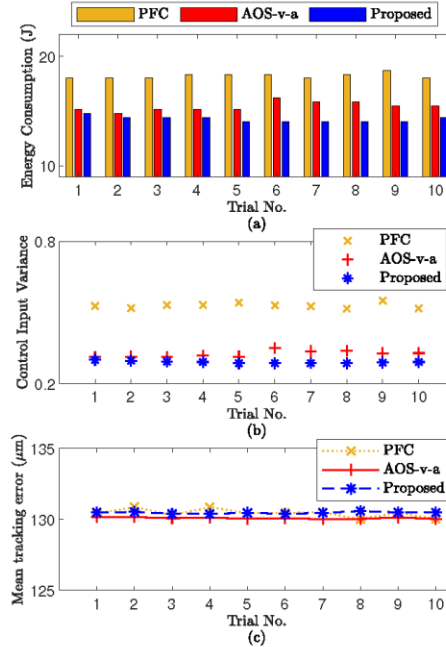
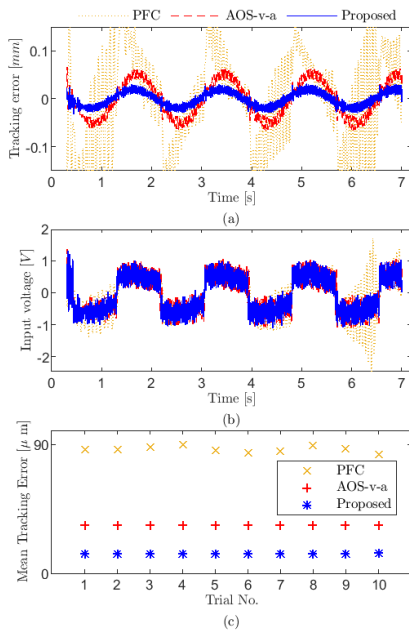


図4 追従誤差低減を目標とした比較

図5 追従誤差が同程度のときのエネルギー比較

最後に、上記の単純適応制御系において外乱の影響を考慮し、既存のロバスト制御法との統合について検討した。実験検証を行い、前年度までに提案してきた方法に対して約5.5%位置追従性能を向上できた。しかしながら、消費エネルギーは約13.5%上昇し、両者のトレードオフを裏付ける結果となった。

#### 4. 研究成果

適応制御系では、制御器パラメータの調整機構により制御入力の変動を抑制しつつ目標動作への追従性能を向上できることが分かり、この結果として省エネルギー効果が得られることを確認した。新たな被覆動作計画法および単純適応制御法を提案し、目標動作への追従性能および省エネルギー効果を得ることができ、有効性を実験的に確認した。

本研究成果を以下の学術論文などで公表した。

Haryson Johanés Nyobuya, et al., Simple adaptive contouring control for feed drive systems using jerk-based augmented output signal, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(9-10) 4985-5001, 2024

Haryson Johanés Nyobuya, et al., Simple adaptive control for industrial feed drive systems using a jerk-based augmented output signal, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(7-8) 3613-3626, 2023

Haryson Johanés Nyobuya, et al., Enhanced Motion Accuracy in Industrial Feed Drive Systems Using Simple Adaptive Control with a Jerk-Based Augmented Signal, *22nd IFAC World Congress*, 9906-9911, 2023

Mathias Sebastian Halinga, et al., Energy-Optimal Coverage Motion Trajectory Generation for Industrial Machines, *22nd IFAC World Congress*, 9452-9457, 2023

Mathias Sebastian Halinga, et al., Generation and experimental verification of time and energy optimal coverage motion for industrial machines using a modified S-curve trajectory, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(7-8) 3593-3605, 2023

Mathias Sebastian Halinga, et al., Time and energy optimal trajectory generation for coverage motion in industrial machines, *ISA Transactions*, 735-745, 2023

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nyobuya Haryson Johanes, Halinga Mathias Sebastian, Uchiyama Naoki	4. 巻 130
2. 論文標題 Simple adaptive contouring control for feed drive systems using jerk-based augmented output signal	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 4985 ~ 5001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-024-12987-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nyobuya Haryson Johanes, Halinga Mathias Sebastian, Uchiyama Naoki	4. 巻 128
2. 論文標題 Simple adaptive control for industrial feed drive systems using a jerk-based augmented output signal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3613 ~ 3626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-023-12059-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Halinga Mathias Sebastian, Nshama Enock William, Schafle Tobias Rainer, Uchiyama Naoki	4. 巻 138
2. 論文標題 Time and energy optimal trajectory generation for coverage motion in industrial machines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISA Transactions	6. 最初と最後の頁 735 ~ 745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isatra.2023.03.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Halinga Mathias Sebastian, Nyobuya Haryson Johanes, Uchiyama Naoki	4. 巻 125
2. 論文標題 Generation and experimental verification of time and energy optimal coverage motion for industrial machines using a modified S-curve trajectory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3593 ~ 3605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-023-10912-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Paing Min Set, Nshama Enock William, Uchiyama Naoki	4. 巻 9
2. 論文標題 A Kinematically Constrained Reparameterization Approach to Optimal Time and Jerk Motion of Industrial Machines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 97843 ~ 97854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3095847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nshama Enock William, Msukwa Mathew Renny, Uchiyama Naoki	4. 巻 9
2. 論文標題 A Trade-off Between Energy Saving and Cycle Time Reduction by Pareto Optimal Corner Smoothing in Industrial Feed Drive Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 23579 ~ 23594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/access.2021.3056755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Mathias Sebastian Halinga, Haryson Johaness Nyobuya, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Generation of Time and Energy Optimal Coverage Motion for Industrial Machines Using a Modified S-Curve Trajectory
3. 学会等名 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mathias Sebastian Halinga, Haryson Johaness Nyobuya, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Energy-Optimal Coverage Motion Trajectory Generation for Industrial Machines
3. 学会等名 IFAC World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haryson Johanes Nyobuya, Mathias Sebastian Halinga, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Enhanced Motion Accuracy in Industrial Feed Drive Systems Using Simple Adaptive Control with a Jerk-Based Augmented Signal
3. 学会等名 IFAC World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Towards the automation of outdoor industrial machines; cranes, excavators and mobile robots
3. 学会等名 The 5th International Conference on Applied Science and Technology 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Sato, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Simple Adaptive Control Using Augmented Output Signal with Acceleration for Industrial Feed Drive Systems
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Case studies on control system design for industries in Japan
3. 学会等名 International Virtual Workshop on Intelligent Mechatronic System Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shogo Harada, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Robust Simple Adaptive Control with Augmented Output Signal and Friction Compensation for Industrial Feed Drive Systems
3. 学会等名 IEEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関