

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289132

研究課題名(和文)自動車エンジンの作動境界領域における動的制御による効率極限化に関する研究

研究課題名(英文)Efficiency Optimization of Automotive Engines by Dynamical Control of Near Boundary

研究代表者

申 鉄龍 (SHEN, Tielong)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：70245794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：エンジンは混合気を燃焼させることによって燃料のエネルギーを機械動力に変換するが、変換効率は点火時期や燃焼過程に大きく影響されるので、電子制御の進化に伴って燃料噴射量や点火時期などのリアルタイム制御によって燃焼品質を向上させ、効率向上が可能になった。しかし、これら変数の操作範囲は制限されており、一般的に最適操作点は境界付近にある。本研究は、境界領域における動的制御による効率最大化制御手法を開発することを目的としたものである。具体的には実験に基づいて境界モデリング手法を確立し、動的システム論から境界近辺の極値存在性を示し、学習や確率制御の視点から動的制御アルゴリズムを構築して実験検証結果を示した。

研究成果の概要(英文)：For combustion engines, efficiency of the energy transformation is strongly depending on the ignition-timing and the combustion profile in cylinder of engines. Recently, the progress of ECU enables us to improve the efficiency by real-time controlling the fuel injection, ignition-timing etc. However, these actuations are limited to a range and the most efficient set-point is near by the boundary. To avoid abnormal combustion, the actuations are normally pre-calibrated with sufficient margin. This research aimed at control methodology for efficiency maximization by dynamical control near by the boundary. First, the behavior of boundary is experimentally investigated. Then, from the view of system control, the existence of extreme is proven and design approaches to construct the control algorithm are developed using extremal learning and stochastic control theory. Furthermore, the proposed control design methods are validated based on gasoline engine test bench.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 エンジン パワートレイン制御

1. 研究開始当初の背景

内燃機関であるエンジンは気筒内で燃料と空気の混合気を燃焼させることによって化石燃料のエネルギーを機械動力に変換する装置であるが、その変換効率は点火時期や燃焼過程に大きく影響される。量産エンジンでは点火時期や燃料噴射量、バルブタイミング、EGR 率など操作変数を事前に適合したマップに基づいて決定し、フィードフォワードを基本とした制御を行うので、実際の操作環境やエンジン自身の経年変化、負荷変化によって常に最適な状態で運転することは保証できない。しかし、エンジン電子制御装置の急速な進化に伴ってこれらの操作変数をリアルタイムで制御することが可能になったにもかかわらず、リアルタイム制御による効率最適化に関する研究は十分ではなかった。主な原因の一つとして制御工学、制御理論分野におけるエンジン制御に対する関心が十分ではないことが挙げられるが、一般的に効率を最大化する操作点は操作範囲の境界付近にあるため、その制御アルゴリズムの開発は容易ではない。

一方、環境問題への関心が高まっている中、自動車の燃費と排気規制がますます厳しくなり、自動車動力系の高効率化のための技術革新が期待され、エンジンの電子制御を駆使した高度な制御技術への関心が高まっていた。本研究の提案者は過去に二期にわたって自動車エンジンの過渡制御に関する科研費基盤研究Bを担当しており、アドバンストなシステム制御によるエンジン効率の向上が可能性であると確信していた。特に過去の量産エンジンでは実現できなかった境界領域の活用によるエンジン効率の極限化技術の開発が必然であり、その可能性を十分認識していた。また、提案者の研究室には、産学連携によって日本の大学には整備が難しいとされているエンジン過渡制御実験ベンチが整備されており、それをベースに ECU 制御アルゴリズムの確実な実験検証を実施することによって、内燃機関の制御に関するサイエンス的研究成果を産業基盤技術の発展に寄与できると確信し、本研究課題を立ち上げた。

2. 研究の目的

本研究は、エンジンの境界領域付近における動的制御による効率最大化を実現するための制御手法を開発することを目的としたものである。具体的には、フルスケールのエンジンテストベンチを用いて制御対象であるエンジンの特性を把握し、特に境界領域における挙動をモデリング化する手法を確立し、動的システム解析論から操作変数の境界付近における最適化のための極値存在性を明らかにし、極値学習や確率制御の視点からリアルタイムの動的制御アルゴリズムを構築し、エンジンのリアルタイム制御手法の体系化を目指す。また、提案する制御手法に対して、実験検証結果を示すことによって、研

究成果の産業基盤技術への寄与を図る。

3. 研究の方法

本研究を達成するための研究方法の特徴は、フルスケールのエンジン制御実験ベンチにおける実験と理論解析に基づいて、エンジンの境界領域における振舞いのメカニズムを解明し、数学手法によるモデル化を実現すると同時に、そのモデルに基づいた効率最適化制御手法の開発を行うことと、モデルによる記述が困難な場合には、モデルフリーの学習、極値探索アルゴリズムを開発することを両立させ、確実な実験検証をもって提案する制御手法の一般化を図ることである。

研究は以下のように段階に分けて実施された。まず、検証把握のための実験段階では、6気筒の量産ガソリンエンジンを用いて境界領域における運転実験を行い、制御変数として選択した入力と熱効率や燃焼効率などへの影響を検証し、特にノック確立の領域ごとの変化を把握し、モデル化を行った。つぎに、リアルタイム制御に向けたモデル化を行い、境界領域の拘束の下、効率向上のための制御手法を考案し、実験検証を行った。そして、非正常燃焼確率を閾値とするリアルタイム境界判定アルゴリズムを構築し、リアルタイム制御則と融合して境界領域における制御手法を確立し、統括的な実験検証を行うことによって研究成果の客観性の保証を図った。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、エンジンシステムの操作変数の境界領域の有効活用に着目したエンジンリアルタイム制御則を解析的に設計する手法を示し、実験によってその有効性を示したことである。提案した制御手法の核心は、リアルタイムで非正常燃焼の確率を学習し、統計的に判断することによって、リアルタイム性を持つ境界領域を制御系に組み込むことによって、境界領域における安定な操作が可能になり、境界領域のオンライン判定機能を持つモデルベースまたはモデルフリーの制御手法を提案したことである。開発したモデリングと制御アルゴリズムは以下のとおりである。

点火時期、燃料噴射量やWVTの操作範囲をノックと失火確率閾値を用いて判定するリアルタイム境界判別アルゴリズム。

筒内圧センサを用いてリアルタイムの燃焼品質評価手法を開発し、気筒内の状態遷移モデルを提案した。

燃焼位相の統計制御アルゴリズム。

境界領域におけるノック発生確率抑制制御アルゴリズム。

トルク出力最大化のための点火時期学習制御アルゴリズム。

燃焼品質保証のための残留ガス割合のバラツキ抑制制御アルゴリズム。

これらの制御アルゴリズムは、本研究で目指した境界領域活用による効率最大化制御手

法の要素技術として、その統括融合による制御手法設計理論の体系化が実現でき、ガソリンエンジンの制御手法として一般化されることになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 28 件)

- [1] Jun Yang, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, Model-based stochastic optimal air-fuel ratio control with residual gas fraction of spark ignition engines, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 22, Issue 3, 2014, pp. 896-910, DOI: 10.1109/TCST.2013.2272832(査読有)
- [2] Jun Yang, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, Stochastic adaptive air-fuel ratio control of spark ignition engines, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 9, Issue 4, 2014, pp 442-447, DOI: 10.1002/tee.21991(査読有).
- [3] Mingxin Kang, and Tielong Shen, Model predictive control of gasoline engines with nonlinear feedback linearized model, Proceedings of the 18th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 17-19 Oct., 2014, pp. 369-374, DOI:10.1109/ICSTCC.2014.6982444 (査読有).
- [4] Mingxin Kang, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, Continuation/GMRES method based nonlinear model predictive control for IC engines, Proceedings of the 19th world congress of IFAC, Cape Town, South Africa, 2014, pp. 5697-5702, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00488(査読有).
- [5] Mingxin Kang, and Tielong Shen, Nonlinear model predictive torque control for IC engines, Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA2014), Shenyang, China, 29 June - 4 July, 2014, pp. 804-809, DOI: 10.1109/WCICA.2014.7052819. (SUPCON Best Paper Award on Industrial Automation, 査読有)
- [6] 申 鉄龍, Mingxin Kang, Madan Kumar, エンジンの過渡応答とサイクリック遷移の制御, 計測と制御, Vol. 53, No. 8, 2014, pp.669-676 (査読有).
- [7] 石 浩雲, 申 鉄龍, ピーク圧力位置の分散境界を考慮した最尤推定法に基づくノック確率制御手法, 自動車技術会論文集 JSAE, 45(4), 2014, pp. 645-650, SAE20144607(査読有).
- [8] Xiaohong Jiao, Tielong Shen, SDP policy iteration-based energy management strategy using traffic information for commuter hybrid electric vehicles. Energies, 2014, Vol.7, No.7, pp. 4648-4675, DOI:10.3390/en 7074648(査読有).
- [9] Xiaohong Jiao, Tielong Shen, An adaptive servo control strategy for automotive electronic throttle and experimental validation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 11, 2014, pp. 6275-6284, DOI: 10.1109/TIE.2014.2311398(査読有)
- [10] Xiaohong Jiao, Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Junichi Kako, Adaptive air-fuel ratio control scheme and its experimental validations for port-injected SI engines, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 29, No.1, pp.41-63, 2015, DOI: 10.1002/acs.2456(査読有).
- [11] Kumar Madan, Tielong Shen, Estimation and feedback control of air-fuel ratio for gasoline engines, Journal of Control Theory and Technology, Vol.13, No. 2, pp. 151-159, 2015, DOI: 10.1007/s11768-015-4148 -9(査読有)
- [12] Mingxin Kang, Fatima Tahir, Tielong Shen, and Toshiyuki Ohtsuka, MPC-based speed tracking control design for spark-ignition engines, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.8, No.3, pp. 201-208, 2015, DOI: 10.9746/jcmsi.8.201(査読有).
- [13] Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Junichi Kako and Riccardo Marino, Design and validation of a model-based starting speed control scheme for spark ignition engine, Asian Journal of Control, Vol.17, No.4, pp. 1255-1266, 2015, DOI: 10.1002/asjc.979(査読有).
- [14] Jixiang Fan, Jiangyan Zhang, Tielong Shen. Map-based power-split strategy design with predictive performance optimization for parallel hybrid electric vehicles, Energies, Vol. 8, pp. 9946-9968, 2015, DOI: 10.3390/en8099946(査読有)
- [15] C. Khajorntraidet, K. Ito and T. Shen, Adaptive Time Delay Compensation for Air-Fuel Ratio Control of a Port Injection SI Engine, Proceedings of the 54th SICE Annual Conference, Hangzhou, China, July

- 27-30, 2015, pp. 1341-1346, DOI: 10.2991/msam-15.2015.30(査読有).
- [16] Jiangyan Zhang, Jinwu Gao and Tielong Shen, Nonlinear adaptive idle speed control design for SI engines, Proceedings of the 54th SICE Annual Conference, Hangzhou, China, July 27-30, 2015, pp. 1583-1586, DOI: 10.1109/SICE.2015.7285450(査読有).
- [17] Jiangyan Zhang, and Tielong Shen, Real-time Fuel Economy Optimization with Nonlinear MPC for PHEVs, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.24, Iss.6, pp. 2167-2175, 2016, DOI: 10.1109/TCST.2016.2517130(査読有).
- [18] Yuhu Wu, Madan Kumar, and Tielong Shen, A stochastic logical system approach to model and optimal control of cyclic variation of residual gas fraction in combustion engine, Applied Thermal Engineering, Vol. 93, pp 251-259, 2016, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.045(査読有).
- [19] Yuhu Wu, and Tielong Shen, Policy Iteration Approach to Control Residual Gas Fraction in IC Engines under the Framework of Stochastic Logical Dynamics, IEEE Transactions on Control Systems Technology, published online. DOI: 10.1109/TCST.2016.2587247(査読有).
- [20] Madan Kumar and Tielong Shen, Cyclic model based generalized predictive control of air-fuel ratio for gasoline engines of 4-stroke combustion engines, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.11, No.1, pp 1-12, 2016, DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0009(査読有).
- [21] 豊田充、申鉄龍, D-最適実験計画に基づくエンジンにおける吸気流量モデルの適合, 日本機械学会論文集(機械力学, 計測, 自動制御), 2016, DOI: 10.1299/transjsme.15-00688(査読有).
- [22] Andreas Thomasson, Haoyun Shi, Tobias Lindell, Lars Eriksson, Tielong Shen, and James C. Peyton Jones, Experimental Validation of a Likelihood-Based Stochastic Knock Controller, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.24, Issue.4, pp 1407-1418, 2016, DOI: 10.1109/TCST.2015.2483566, (査読有).
- [23] Mingxin Kang, Tielong Shen, Receding horizon on-line optimization for torque control of gasoline engines, ISA Transactions, Vol.65, pp. 371-383, 2016, DOI: 10.1016/j.isatra.2016.06.012(査読有).
- [24] Jinwu Gao, Yuhu Wu, Tielong Shen. Comparison Research of Hypothesis Test and Moving Average based Combustion Phase Controllers. ISA Transactions, Vol.65, 2016, pp.504-515, DOI: 10.1016/j.isatra.2016.09.00 (査読有).
- [25] Jinwu Gao, Yuhu Wu, and Tielong Shen, A statistical combustion phase control approach of SI engines. Mechanical Systems & Signal Processing, Vol. 85, 2017, pp.218-235, DOI:10.1016/j.ymsp.2016.08.007, (査読有).
- [26] Jiangyan Zhang, Jinwu Gao and Tielong Shen, Adaptive idling control scheme and its experimental validation for gasoline engines, Science China Information Sciences, Vol. 60, 2017. 2: 022203, DOI: 10.1007/s11432-016-0296-3, (査読有).
- [27] Jinwu Gao, and Tielong Shen. Cylinder Pressure Sensor Based Real-time Combustion Phase Control Approach for SI Engines. IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems. Vol. 12, Issue 2,2017 pp. 244-250, DOI: 10.1002/tee.22371 (査読有).
- [28] Yuhu Wu, and Tielong Shen, Policy Iteration Approach to Control of Residual Gas Fraction in IC Engines under the Framework of Stochastic Logical Dynamics, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 25, Issue 3, 2017, pp.1100-1107, DOI: 10.1109/TCST. 2016.2587247(査読有).
- [学会発表](計26件)
- [1] Madan Kumar, and Tielong Shen, Cycle-to-cycle transient model of 4-stroke combustion engines, SIMULTECH- 2014(Position Paper), Wien(Austria) 28-30 August 2014
- [2] Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Nonlinear MPC-Based Equivalent Consumption Minimization Strategy for Power-Split Hybrid Electrical Vehicles, SICE Annual Conference 2014, Sep. 9-12, Hokkaido University (Sapporo), 2014, pp. 209-212
- [3] Xun Shen, Tielong Shen, Xiaoming Zha, Kunihiko Hikiri, State-of-Charge Estimation of Super-capacitor Using Dual Extended Kalman filter,

- Proceedings of 33rd Chinese Control Conference, Jul. 28-30, Nanjing(China), 2014, pp. 227-232
- [4] Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Nonlinear MPC-based power-assist scheme of internal combustion engines in plug-in hybrid electric vehicles, 2014 European Control Conference, Jun. 24-27, Strasbourg (France), 2014, pp. 1164-1169
- [5] Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Sawada Takano and Kubo Masaaki, Nonlinear MPC-based power management strategy for plug-in parallel hybrid electrical vehicles, Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Jul. 28-30, Nanjing(China), 2014, pp. 280-284.
- [6] Xiaohong Jiao, Tielong Shen and Masakazu Sasaki. Policy iteration algorithm-based energy management with battery lifetime consideration for commute hybrid electric vehicles, Proceedings of EVTeC & APE Japan 2014, Society of Automotive Engineers of Japan, May 22-24, Hotel Pacific(Yokohama), JSAE Paper No. 20144117
- [7] 張江燕, 申鉄龍, MPCに基づくPHEVのためのリアルタイム燃費最適化, 自動車技術会学術講演会春季大会, 5月21日, パシフィコホテル(横浜), 2014.
- [8] 焦 曉紅, 申鉄龍, 統計的トラフィック情報に基づくHEV燃料消費量の確率最適化手法, 自動車技術会学術講演会春季大会, 5月21日, パシフィコホテル(横浜), 2014.
- [9] Mingxin Kang, Yuhu Wu, and Tielong Shen, Logical control approach to fuel efficiency optimization of automotive engines, Proceedings of the SICE Annual Conference, Hokkaido University (Sapporo), Sep. 9-12, 2014. pp. 484-487.
- [10] M. Toyoda, T. Shen, Y. Mutoh, F. Koshino, Case study for stochastic systems: from Pontryagin to receding horizon optimal Control, Proc. of 33rd Chinese Control Conference, Jul. 28-30, Nanjing(China) 2014, pp.5419-5424
- [11] Jiangyan Zhang, Jixiang Fan and Tielong Shen, Optimal torque-split map design with consideration of vehicle dynamics for HEVs, Proceedings of the 2015 JSAE Annual Congress (Spring), Hotel Pacific (Yokohama), May 20-22, 2015, pp. 1351-1355.
- [12] Mingxin Kang, Tielong Shen, Nonlinear model predictive control for engine torque tracking problem, Proceedings of the 2015 JSAE Annual Conference (Spring), Hotel Pacific(Yokohama), May 20-22, 2015, pp. 461-467
- [13] Jinwu Gao, Yuhu Wu, Tielong Shen. Combustion Phase Control of SI Gasoline Engines Using Hypothesis Test. The 4th IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling, Colombu(USA), 2015: 153-158
- [14] Jinwu Gao, Tielong Shen. Feedback Combustion Control with CPS of SI Engines. 2015 IEE-Japan Industry Applications Society Conference, Oita University(Oita), 2015: 11-93-96
- [15] 豊田充, 申鉄龍, 鈴木邦彦, 奥田雄希, 過渡モデル同定のためのリアルタイム最適化によるDoE-Identificationデュアルループイタレーション設計手法, JSAE2015年春季大会学術講演会講演予稿集, パシフィコホテル(横浜), May 20-22, 2015,
- [16] C. Khajorntraidet, Kazuhisa Ito and Tielong Shen, Adaptive Time Delay Compensation for Air-Fuel Ratio Control of a Port Injection SI Engine, Proceedings of the 54th SICE Annual Conference, Hangzhou(China), July 27-30, 2015, pp. 1341-1346.
- [17] Tielong Shen, Applications of Real-time Optimization Algorithm in modeling and Control of Automotive Powertrains, Advanced Control Science and Engineering Forum, Changchun(China), May 28-30, 2015
- [18] Jinwu Gao, Yuhu Wu and Tielong Shen, Real-time Optimization and Control of Combustion Phase of SI Engines Using Statistical Analysis, Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, Chengdu(China), Jul. 27-29, 2016.
- [19] Mingxin Kang, and Tielong Shen, Modeling and optimal control for torque tracking of spark-ignition engines with low pumping loss, Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, Chengdu(China), Jul. 27-29, 2016.
- [20] Yuhu Wu, Ximing Sun, Wei Wang, Tielong Shen, Finite convergence of value iteration algorithm for discounted infinite horizon optimal control of stochastic logical systems. Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, Chengdu(China), Jul. 27-29, 2016.

- [21] Yahui Zhang and Tielong Shen, Stochastic Approximation for Combustion Phase Optimization of SI Gasoline Engines, European Control Conference, Aalborg(Denmark), June 29 - July 1, 2016.
- [22] Yahui Zhang and Tielong Shen, Model based Combustion Phase Optimization in SI Engines: Variational Analysis and Spark Advance Determination, the 8th IFAC International Symposium on Advances in Automotive Control, Vol.49, Iss.11, pp. 679-684, Norrköping(Sweden), June 19-23, 2016.
- [23] Xun Shen and Tielong Shen, Knock Limit Controller based on Exponential Moving Average of Knock Intensity, the 8th IFAC International Symposium on Advances in Automotive Control, Vol.49, Iss.11, pp.691-695, Norrköping(Sweden), June 19-23, 2016.
- [24] Madan Kumar and Tielong Shen, Cylinder Pressure-based NOx Measurement with Cycle-to-cycle Transient Model for Gasoline Engines, the 12th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA 2016), Kathmandu(Nepal), June 1-3, 2016, pp. 353-358
- [25] Mingxin Kang, Mazen Alamir, and Tielong Shen, Nonlinear constrained torque control for gasoline engines, the 10th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2016), California(USA). August 23-25, 2016.
- [26] Yahui Zhang and Tielong Shen, Extremum Seeking Approach based Spark Advance Control of Spark-ignited Gasoline Engines, Proceedings of SICE 2016, Tsukuba University(Tsukuba) 20-23 September, 2016

〔図書〕(計1 件)

- [1] Tielong Shen, Jiangyan Zhang, Xiaohong Jiao, Mingxin Kang, Junichi Kako, Akira Ohata, Transient Control of Gasoline Engines, CRC Press, 2016, p.297 (1-181).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

申 鉄龍 (SHEN Tielong)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号 : 70245794

(2)研究分担者

武藤 康彦 (MUTOH Yasuhiko)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号 : 90146803
鈴木 隆 (SUZUKI Takashi)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号 : 20206494