

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360186

研究課題名(和文) 環境・省エネ自動車エンジンのモデルベース過渡応答制御手法に関する総合的研究

研究課題名(英文) Development of Model-based Control Methods of Automotive Engines for Energy Saving and Emission Reduction

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) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は自動車エンジンのための環境対策と省エネルギー化課題を動的システム制御の視点から挑戦したものである。本研究では、自動車エンジンマネジメント技術では難問とされてきたエンジン運転の過渡期における性能改善を目的とし、様々な運転モード間の過渡期におけるエンジンの挙動を数学モデル化し、エンジンの非線形性、確率性、バラツキなどの不確かさに着目した、トルク生成と燃焼の最適化を実現するためのモデルベースの制御手法を開発した。提案された制御手法については、実車搭載用ガソリンエンジンにおける実験検証結果を与えることによって、内燃機関の動的制御理論を確立するだけでなく、自動車産業基盤技術の創出に貢献した。

研究成果の概要(英文)：This research challenges the energy saving and emission reduction issues for the automotive engines from the view of dynamical system control. Mainly, the research focused on the transient operating modes which are challenging problem in the current engine management technology. Modeling methodology for the transient behavior between the operating modes is provided and based on the models control law design methods are presented that target on the optimization of torque generation and combustion under the nonlinear and the stochastic uncertainties in the engines. For all the proposed control strategies, experimental results are given that conducted on a production car-used gasoline engine.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論 エンジン制御 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、熱力学や流体、機械工学等複合領域と関連する動的なシステムであるが、その運転状態のマネジメント手法としては、いままで熱工学の見地から定常運転に着目した制御パラメータの適合が主流で、システム制御理論からのアプローチから動的な挙動をより精度よく制御することによって、トルク生成やエミッション性能の改善を図る試みは少なく、エンジン制御技術開発現場においても動的システム制御の見地を生かすことは一般的ではなかった。しかしながら、近年電子制御技術の飛躍的な発展と自動車エンジン排気規制の強化を背景に、エンジン制御技術開発のアドバンスト制御理論への期待が高まってきた。本研究は、このような背景のもとに、動的制御理論の視点から自動車エンジンの性能向上の課題に挑戦することを目的に提案され、立ち上げられた研究である。

2. 研究の目的

環境対策と省エネルギー化は自動車技術の重要な課題であるが、動力源としてエンジンを搭載する自動車の環境・省エネ性能はエンジンの性能に大きく左右される。特に、内燃機関であるエンジンは、環境対策と省エネルギー化のためにさまざまな運転モードの切り替えが必要になるが、その切り替え時の過渡期における応答特性の改善はエンジン制御に対して大きな挑戦課題である。例えば、燃料カットと再始動、直噴とポート噴射の切り替え、冷間始動、ハイブリット車ではモータとの協調のための頻繁な切り替えや加減速時でも高精度の空燃比やトルクの制御が要求されるが、これらの過渡期においては、単純なフィードバック制御や定常状態を対象に適合したマップ制御だけでは、制御性能改善に限界がある。

本研究は、ガソリンエンジンのさまざまなモードにおける過渡応答のモデリング方法を構築するとともに、過渡特性の革新的な改善を目的とする制御手法を開発し、フルスケールのガソリンエンジンにおいて、実験検証結果を与えることによって、エンジン制御の基礎理論とエンジン制御系 MDB (Model-based Design) のための基盤技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の特徴は、実験と理論解析に基づいてエンジンのさまざまな過渡操作モードにおける振る舞いのメカニズムを解明し、モデル化すると同時に、モデルに基づく制御系設計理論を体系的に構築することによってエミッションと省エネ性能の革新的な改善を目指すことと、同類システムのための制御理論手法の一般化を図ることである。この目的を達成するために、確実な実験による現象把握と、個別モードに対する最適性能を目指

す制御手法を追求し、その共通性を抽出してエンジン特性を十分考慮した過渡制御手法の体系化を図る研究手法を採用した。

具体的には、三段階に分けて実施され、各段階においては、それぞれ以下の項目を中心に研究が行われた。実機実験によるエンジン挙動の把握。制御目的を意識したモデリング。過渡制御アルゴリズム構築。

では、必要な実験プログラムの構築からデータ計測まですべて上智大学のガソリンエンジン制御実験設備において完成された。

においては、空燃比、トルク出力、ノッキング、気筒間・サイクル間のバラツキなどに着目したモデルを構築した。においては、最適制御、確率制御及びロジカルシステム論など多様な理論手法を活用し、エンジン過渡特性と気筒間・サイクル間のバラツキ抑制制御アルゴリズムを構築し、実機実験による検証結果を与えた。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、エンジンの過渡特性の数学モデル化とそのモデルに基づくエンジン制御手法の体系化を実現したことである。エンジンモデリング手法としては、まず、エンジンの加減速や負荷変化時の過渡的挙動を動的システムとして捉え、動的モデルによるその挙動の表現手法を確立した。具体的には、エンジンの出力トルク、回転速度、空燃費などのモデリング手法を示し、そのモデルの制御系設計への能動的利用手法を提案した。つぎに、燃焼の確率的不確かさに着目し、サイクル毎、気筒毎のバラツキをサイクル毎の遷移モデルに反映させ、そのモデリングに基づく燃焼品質のバラツキ抑制方法を示した。

エンジン過渡制御手法としては、以下の制御目的に適する制御アルゴリズムを構築し、実験検証結果を示した。モデル予測制御によるトルク制御と速度制御；非線形適応制御による空燃比制御；燃料パス切り換え時の燃料補償制御；アイドルストップ・スタートのための速度スタートアップ制御；気筒間のバラツキに着目した気筒毎燃料補正学習制御；周期時変モデルを活用した気筒毎空燃比制御；サイクル毎残留ガス遷移に着目した燃料補正制御；残留ガス割合の確率分布の抑制制御；最尤推定に基づくノック発生確率制御；気筒内ピーク圧力位置の確率分散抑制制御；

これらのモデリング手法とそれに基づくエンジン制御アルゴリズムの構築方法は、内燃機関であるエンジンを動的システム論的アプローチから効率改善の可能性を検証実験と伴って示した結果となり、今後エンジンの特性に適した、確率的かつ非線形的不確かさを意識した動的制御系設計論として確立していくことになる。

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 16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 Transactions on Control Systems Technology, Vol.22, No.3, PP,896-910, 2014 (査読有)
- [2] Chaoqing Wang, Tielong Shen and Haibo Ji, Common quadratic Lyapunov function for two classes of special switched linear systems, IEICE Transaction On Information and System, Vol.E97-D, No.2, pp.175-183, 2014 (査読有)
- [3] Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Guokai Xu and Junichi Kako, Wall-wetting model based method for air-fuel ratio transient control in gasoline engines with dual injection system, International Journal of Automotive Technology, Vol.14, No.6, pp.867-873, 2013 (査読有)
- [4] Yinhua Liu and Tielong Shen, Periodic time-varying model-based predictive control of air-fuel ratio in gasoline engines under individual fuel injection, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.5, pp.309-315, 2013 (査読有)
- [5] Jun Yang, Tielong Shen, Xiaohong Jiao, Air-fuel ratio control with stochastic L_2 disturbance attenuation in gasoline engines, Journal Control Theory Application, Vol.11, No.4, pp.586-591, 2013 (査読有)
- [6] Lin He, Tielong Shen, Liangyao Yu and Jian Song, A model predictive control-based torque demand management strategy for parallel hybrid powertrains, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.62, No.3, pp.1041-1052,2013 (査読有)
- [7] Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Feedback Stabilization for a Class of Discontinuous Systems Driven by Integrator, Journal Control Theory Application, Vol.11, No.2, pp.263-274, 2013 (査読有)
- [8] Yinhua Liu and Tielong Shen, Periodic time-varying model-based predictive control with input constraints for air-fuel ratio control in IC engines, International Journal of Powertrains, Vol.2, No.4, pp.383-401, 2013 (査読有)
- [9] 武藤康彦, 原智啓, 時変離散時間多変数系に対する極配置とオブザーバーに対する一考察, 電気学会論文集 C, Vol.132-5, pp.201-206,2012 (査読有)
- [10] Yinhua Liu and Tielong Shen, Modeling and experimental validation of air-fuel ratio under individual cylinder fuel injection in gasoline engines, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.1, No.3, pp.155-163, 2012 (査読有)
- [11] Po Li, Tielong Shen and Dichen Liu, Idle speed performance improvement via torque balancing control in ignition-event scale for SI engines with multi-cylinder, International Journal of Engine Research, Vol.13, No.1, pp.65-76, 2012 (査読有)
- [12] Munan Hong, Tielong Shen, Mingguo Ouyang and Junichi Kako, Nonlinear Torque Observers design for spark ignition engines with different intake air measurement sensors, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.19, No.1, pp.229-237, 2011 (査読有)
- [13] Kai Zheng, Tielong Shen and Yu Yao, Stationary set analysis for PD controlled mechanical systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.19, No.5, pp.1236-1244, 2011 (査読有)

- [14] Munan Hong, Minggao Ouyang and Tielong Shen, Torque-based optimal vehicle speed control, International Journal of Automotive Technology, Vol.12, No.1, pp.45-49, 2011 (査読有)
- [15] 張 江燕、申 鉄龍、大畠 明、加古 純一, モデルベースエンジン始動速度制御手法, 自動車技術会論集、Vol.42, No.5, pp.1131-1137, 2011 (査読有)
- [16] 武藤 康彦, 線形時変系に対する極配置とオブザーバーに関する一考察, 電気学会論文集, Vol.131, pp.840-846, 2011 (査読有)
- 〔学会発表〕(計 33 件)
- [1] Fei Li, Mingxin Kang, Tielong Shen, Xiaohong Jiao, Receding Horizon Optimization-based Speed Tracking Control of Gasoline Engines, 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟, 11 月 12 日, 2013
- [2] 康 銘シン, 高谷 和磨, 申 鉄龍, Engine-in-the-Loop型HEVパワートレインシミュレーションの構築, 自動車技術会秋季学術講演会, 10 月 23 日, 2013
- [3] Yuhu Wu and Tielong Shen, A logical dynamical systems approach to modeling and control of residual gas fraction in IC engines, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Sep.4-7, Tokyo, pp.485-490, 2013
- [4] Kota Sata, Junichi Kako, Jun, Yang, Akira Ohata and Tielong Shen, Effect of transient residual gas fraction for gasoline engines, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Sep.4-7, Tokyo, pp.584-589, 2013
- [5] Jun Yang, Kota Sata, Junichi Kako, Akira Ohata and Tielong Shen, Statistical model and control of residual gas mass in gasoline engines, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Sep.4-7, Tokyo, pp.590-595, 2013
- [6] Mingxin Kang and Tielong Shen, A torque demand strategy of IC engines for fuel consumption improvement using traffic information, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Sep.4-7, Tokyo, pp.690-695, 2013
- [7] Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Junichi Kako and Guokai Xu, Model-based Starting Transient Speed Control Scheme for Automotive Engines, the 10th IEEE ICCA, Jun. 12-14, Hangzhou, pp.592-597, 2013
- [8] Yanan Zhao, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, Air-fuel ratio transient control design for gasoline engines based on individual cylinder air charge estimation, The 17th Asia-Pacific Automotive Engineering Conference, April 1-3, Bangkok, SAE 2013-01-0102, 2013
- [9] [12] Xiaohong Jiao, Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Lyapunov-based design approach to adaptive positioning control of electronic throttle valve, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, Nov. 17-18, 2012
- [10] Mingxin Kang and Tielong Shen, Modeling and control design of engine-dynamometer for engine -in- the-loop simulation system applications, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, Nov. 17-18, 2012
- [11] Yinhua Liu and Tielong Shen, Periodic time-varying model-based predictive control of air-fuel ratio for gasoline engines under individual fuel injection, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, Nov. 17-18, 2012
- [12] Yanan Zhao, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, Model for individual cylinder air charge estimation and its application to air-fuel ratio transient control, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, Nov. 17-18, 2012

- [13] Xiaohong Jiao and Tielong Shen, PID control with adaptive feedback compensation for electric throttle, IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling (ECOSM12), Paris, Oct. 23-25, pp.299-304, 2012
- [14] Xiaohong Jiao, Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Nonlinear adaptive air-fuel ratio control scheme for gasoline engines with port injection, The 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'12), Sep.9-12, Seoul, 2012
- [15] Jun Yang, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, Markovian modeling of residual gas fraction and its application to stochastic air-fuel ratio control of SI engines, the 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'12), Seoul, Sep.9-12, 2012
- [16] Yinhuo Liu and Tielong Shen, Modeling and experimental validation of air-fuel ratio under individual cylinder fuel injection in port-injection engines, the 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Aug.22-24, Seoul, pp.252-256, 2012
- [17] Tielong Shen and Jiangyan Zhang, SICE benchmark problem of engine control and a challenging result, the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 608, Beijing, 2012
- [18] Chaoqing Wang, Tielong Shen, Haibo Ji and Kunihiko Hikiri, A coordinated braking torque control scheme for hybrid duty trucks with gear shifting, Proceedings of American Control Conference, June 27-29, Montreal, pp.485-490, 2012
- [19] Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Generalized Filippov solution in stability analysis and stabilization of piecewise continuous time-delay systems, 10th IFAC Workshop on Time Delay Systems, June22-24, Boston, 2012
- [20] Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Akira Ohata and Junichi Kako, Experimental Validation of SICE Benchmark Problem: Starting Speed Control for Gasoline Engines, SICE 12th Annual Conference on Control Systems, March 14-16, Nara, P0163, 2012
- [21] 原 智啓、申 鉄龍、武藤 康彦, 未知オフセット学習機能を持つ周期時変オバザーバとその多気筒エンジンにおける応用, SICE 第12回制御部門大会、奈良、Mar. 14-16, P0158, 2012.
- [22] Tomohiro Hara, Tielong Shen and Yasuhiko Mutoh, Iterative learning-based air-fuel control of gasoline engines with unknown off-set, IEEE International Conference 'Intelligent Systems', Sofia, Bulgaria, Sep. 6-8, Vol. I, pp.304-309, 2011 (Best Paper Award)
- [23] Jiangyan Zhang and Tielong Shen, State feedback stabilization of a class of discontinuous systems, Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Control & Automation, Santiago, Chile, Dec. 19-21, pp.716-721, 2011
- [24] Hiroki Toshitani, Tielong Shen and Jiangyan Zhang, A model-based air-fuel ratio control scheme for gasoline engines under fuel injection path changing, 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference, Oct.8-10, Chennai, SAE2011-28-0059, 2011 (Best Presentation Award)
- [25] Po Li and Tielong Shen, Individual air-fuel ratio balancing control for multi-cylinder SI engines: modeling and validation, Proceedings of the 18th World Congress the IFAC, Aug.28-Sep.2, Milano, pp.2214-2219, 2011

- [26] Tielong Shen and Jiangyan Zhang, Model and control of gasoline engines, Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, Yantai, pp.6133-6138, 2011
- [27] Suga Tomohiko, Tielong Shen, Yuanzhang Sun and Jian Xu, Modeling and control of a benchmark micro grid with vehicle-to-grid smart connection, Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, Yantai, pp.6121-6126, 2011
- [28] Po Li and Tielong Shen, Overlap model based unknown offset-free MPC scheme for torque balancing control in multi-cylinder SI engines, Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, Yantai, China, Jul. 22-24, pp.6239-6244, 2011
- [29] Xiaohong Jiao and Tielong Shen, Lyapunov-design of adaptive air-fuel ratio control for gasoline engines based on mean-value model, Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, Yantai, pp.6146-6150, 2011
- [30] Yinhua Liu, Tielong Shen, Kota Sata and Kenji Suzuki, Modeling of individual cylinder air-fuel ratio for IC engines with multi-cylinders, Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, Yantai, pp.6151-6156, 2011
- [31] 張 江燕、申 鉄龍、大島 明、加古 純一, モデルベースエンジン始動速度制御手法, 自動車技術会春季学術講演会, 横浜, 5月20日, No.85-11, 2011
- [32] 利谷 洸貴、劉 銀華、申 鉄龍, 可変動弁機構によるV型エンジンのバンク間トルクばらつき抑制制御手法, 自動車技術会秋季学術講演会, 札幌, Oct.12, No.13-20115802, 2011
- [33] 小林 史明、申 鉄龍、肥喜里 邦彦, ハイブリッドトラックの発進時における燃費性能を考慮したトルク分配と AMT

制御手法, 自動車技術会秋季学術講演会, 10月12日, 札幌, No.215-20115780, 2011

〔図書〕(計 1件)

- [1] 申鉄龍、大島明、自動車エンジンのモデリングと制御、コロナ社、p.209, 2011

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・准教授
研究者番号: 20206494