

機関番号： 32621  
 研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2008 ～ 2010  
 課題番号： 20560427  
 研究課題名（和文） 滑らかでない系の新しい制御理論構築とパワートレイン高精度制御への応用  
 研究課題名（英文） Nonsmooth Control Theory and Its Applications to High Precision Powertrain Control  
 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

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、静摩擦や切換えなど滑らかでない動特性を持つシステムに対して、安定化や外乱等に対する抑制性能の評価になる L2 ゲイン制御系の設計のための理論を微分方程式の Filippov 解に基づいて構築した。また、その理論を自動車エンジンやハイブリッド動力システムへ応用し、トルク生成と伝達系の高精度制御のための設計手法を開発し、実際の乗用車搭載用エンジンにおける実験検証を与えることによって産業基盤技術の確立に貢献した。

## 研究成果の概要（英文）：

This research focused on a class of nonlinear systems with discontinuities such as static friction and switching phenomenon etc. For the targeted systems, a systematic analysis and synthesis methodology of stabilization and L2-gain control, which usually used to evaluate the disturbance rejection performance, is developed based on the Filippov solution framework for the differential equations. Moreover, the proposed method is applied to the automotive engines and hybrid powertrain systems. Some high precision control problems such as torque generation and power transmission are addressed, and experimental validation conducted on a commercial used engine is provided in order to contribute to the industrial fundamental technology.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

制御系の設計・解析理論の多くは制御対象の数学モデルに基づいて展開されるものが多いが、過去半世紀にわたって発展してきた現代制御理論は、モデルとしている微分方程式が滑らかな関数によって記述されることを前提としてきた。しかし、実システムにおい

て多くの現象は滑らかな関数として表現できない。例えば、機械系における静摩擦や制御動作または対象自身の切換え特性などは滑らかでないシステムで、既存の非線形制御理論では扱いにくい系である。また、内燃機関であるエンジン等では、イベントベースの切換え特性を無視し、平均値特性に注目した滑らかな平均値モデルを用いて近似的にシ

システムの動特性を表現する。このような制御理論開発現状と実際の応用技術における非滑らかさを無視する近似処理とのギャップはより高度な制御性能を目指す技術開発に限界をもたらすことになる。

しかしながら、数学の分野では非滑らかな関数を含む微分方程式が早くから注目され、解の定義から安定性の解析理論まで多くの研究がなされてきたが、その理論成果を制御工学の分野に導入する試みは最近になって始まっている。特に、滑らかでない制御システムの設計理論になると、体系的な手法はまた提案されていない。

一方、過去十年間カーエレクトロニクス技術の飛躍的な発展は、内燃機関であるエンジンや電機モータ等を含む自動車動力システムに高度な制御アルゴリズムを適用することを可能にし、環境・省エネ技術への期待からパワートレイン制御に高精度の仕様が課せられるようになった。しかし、エンジン自身はもちろん、ハイブリットパワートレインのようなシステムにおいては、動力ソースやエネルギー装置間の切り換えや不連続特性は不可欠で、それらを如何に高精度で制御するかが課題になってきている。

本研究は、このような背景のもとで一定の条件を満たす滑らかでないシステムに対して、Filippov 解の体系のもとで、安定化や L2 ゲイン制御系設計のための解析・設計理論を開発し、自動車エンジン・ハイブリットパワートレインの制御問題への応用を目的としたものである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、非滑らかな関数を含む微分方程式によって記述される動的システムに対して、Filippov 解の枠組みを導入し、そのような非滑らかさや不連続性を有するシステムの動特性解析と安定化や外乱抑制制御系設計のための理論手法を開発することである。ただし、制御対象の構造は一定の条件を満たすものとし、その仮定の下で一般論の展開を目指すものとする。さらに、内燃機関エンジンのような制御対象によく見られるむだ時間特性を有する制御対象については、得られた理論結果を非滑らかな汎関数微分方程式に拡張する。

本研究のもう一つの重要な目的は、構築した制御系解析と設計理論を自動車動力システムに適用し、実験による検証結果を与えることである。主に、エンジンの高精度トルク制御問題とハイブリット自動車におけるエアブレーキと電機モータの回生制動間の協調制御問題を扱う。本研究で得られる理論手法を具体的な産業背景を伴う実問題に適用し、産業現場の研究に近い環境で実験検証を与えることによって産業基盤技術の確立

に貢献することを目指す。

## 3. 研究の方法

研究目的に応じて本研究は基礎理論研究と応用研究の二つのフェーズに分けられる。

### (1) 基礎理論研究

まず、対象とするシステムの運動方程式を滑らかでない微分方程式として表現し、その解の定義、解挙動の解析ツールを Filippov の枠組みで構築する。従来の枠組みでは明らかにすることができない状態空間における不連続や滑らかでない超平面上の Filippov 解の挙動解析に焦点を当て、その解挙動と実システムでも見られる静的解集合との関連を明らかにする。

つぎに、切り換え特性を有する制御対象に対して、フィードバックによる安定化補償器と L2 ゲイン制御器の設計問題を解決する。特に従来の枠組みでは対処できなかった直列系に対するリヤプノフ関数と制御則の繰り返し構築問題に着目し、滑らかでない制御則とリヤプノフ関数の一般化微分概念を導入することによってそのようなシステムのための一般論としての設計手法を構築する。

基礎理論研究の最終段階では、得られた成果をむだ時間を含む滑らかでないシステムに拡張する。ここでは右辺が滑らかでない汎関数微分方程式の枠組みを導入し、安定化と L2 ゲイン制御問題の解法を開発する。

### (2) 応用研究

基礎理論研究で開発した制御系の解析と設計手法を自動車の動力システムへ応用し、アドバンスな制御理論によるパワートレイン高精度制御技術の確立に貢献する。具体的には内燃機関であるエンジンのトルク制御問題と、ハイブリット自動車における空気圧ブレーキとモータによる回生制動との協調制御問題を取り扱う。

まず、エンジンは吸気行程から燃焼しトルクを出力するまで、回転速度に依存するむだ時間が存在するし、その過程において離散事象発生と伴ない動特性が変わるので、基本的に滑らかでないシステムである。本研究では、汎関数微分方程式に基づく速度制御系の安定性解析結果を与えると同時に、ギア操作等による負荷切替時の Filippov 安定性を保証する制御機設計手法を開発する。また、この制御手法を冷間始動制御系に応用し、モデルベースの始動速度制御手法を確立する。

つぎに、ハイブリット自動車については、減速時のエアブレーキと電機による回生ブレーキの協調制御問題に着目し、ブレーキトルクの推定アルゴリズムを開発し、それに基づく滑らかでない系のドライバビリティ改善とエネルギー回生効率向上を図る。

提案するエンジン制御手法については、トヨタ自動車株式会社のサポートを受けて構

築したエンジン制御実験環境における実機実験検証結果を与える。ハイブリッド自動車に関する研究については、UDトラック株式会社の支援を受けて、実車スケールのシミュレータを構築し、シミュレーション検証結果を与える。

#### 4. 研究成果

本研究では、右辺不連続な微分方程式と汎関数微分方程式によって記述される動的システムにおいて、不連続な関数項が制御入力とマッチング条件を満たすシステムを対象に、Filippov 解の枠組みの下で、安定性とL2ゲイン特性の判別方法を明らかにし、その条件に基づいて状態フィードバックによる安定化補償器とL2外乱抑制制御器の設計手法を体系的に確立した。また、その得られた理論手法を自動車パワートレインの制御問題に適用し、理論解析と実験検証を伴うアドバンストな高精度制御系設計手法を提案した。具体的な成果は以下のとおりである。

(1) 直列構造を持つ滑らかでない系に対して Filippov 解の安定性解析及び安定化補償器の設計手法を構築した。

(2) 不連続特性を有するラグランジュ系に対して、位置決め制御系の静的解と定常誤差の関係を明らかにし、位置決め精度改善方法を提案した。

(3) Lipschitz 切換え平面を持つ滑らかでない系のスライディング解の解析手法を与え、安定化補償器の設計手法を構築した。

(4) 対象とする非滑らかなシステムに対し、Filippov 解に対応するL2ゲイン解析条件を与え、外乱抑制問題の解法を与えた。

(5) 不連続な特性を有する汎関数微分方程式に対して、Filippov 解の概念を導入し、むだ時間を含む滑らかでない系の安定化とL2ゲイン解析及び制御系設計手法を構築した。

(6) 前項と(1)の設計手法を制御対象が未知パラメータを持つ場合の適応制御問題に拡張した。

(7) 自動車エンジンに対して、小間隔のトルク推定と制御手法を開発し、むだ時間を考慮したモデルに基づいて安定性解析結果を与えると同時に、実験検証結果を与えた。

(8) エンジンの環境変化が急激に起こる始動制御問題にモデルベースの設計手法を提案し、実験検証を行った。

(9) ハイブリッド動力系の制動力伝達特性を解析するためのモデル化を行い、シミュレータを構築した。

(10) ハイブリッドパワートレインにおけるエネルギー回生制動とエアブレーキ、ギア一切換え時の回生効率とドライバビリティを同時に考慮した協調制御手法を提案し、シミュレーションによる検証結果を与えた。

#### 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(査読有)] (計 20 件)

- ① 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, 2010
- ② Maiko Hirano, Tielong Shen and Katsutoshi Tamura, Adaptive Feedback Stabilization for a Class of Cascaded Nonlinear Systems with Discontinuous Connection, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.3, No.5, pp.252-25, 2010
- ③ Jiangyan Zhang and Tielong Shen, L2-gain Analysis and Feedback Design for a Class of Time-delay Systems with Discontinuity, IEE J Transactions on Electronics, Information and Systems, Vo.130, No.11, pp.1960-1967, 2010
- ④ Jiangyan Zhang, Tielong Shen and Riccardo Marino, Model-based Cold-start Speed Control Scheme for Spark Ignition Engines, Control Engineering Practice, Vol.18, No.11 pp.1285-1294, 2010
- ⑤ Jiangyan Zhang, Tielong Shen and Riccardo Marino, Nonlinear speed control scheme and its stability analysis for SI engines, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.3, No.1, pp.43-49, 2010
- ⑥ Po Li, Tielong Shen, Junichi Kako and Dichen Liu, Experimental validation of feedback approaches for in-cylinder pressure balancing in SI engines, International Journal of Modeling, Identification and Control, Vol.9, Nos.1/2, pp.30-36, 2010
- ⑦ Kai Zheng, Tielong Shen, and Yu Yao, New approaching condition for sliding mode control design with a Lipschitz switching surface, Science in China Series F: Information Sciences, Vol.52, No.11, pp.2032-2044, 2009
- ⑧ Kenji Suzuki, Tielong Shen, Junichi Kako and Shozo Yoshida, Individual A/F Estimation and Control with Fuel-Gas Ratio for Multi-cylinder IC Engines,

- IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 9, pp. 4757-4768, 2009
- ⑨ Yao Yu, Kai Zheng, Kemao Ma, and Tielong Shen, Sliding mode control design with a class of piecewise smooth switching surface, International Journal of Modeling, Identification, and Control, Vol. 7, No. 1, pp. 294-302, 2009
- ⑩ Takashi Nakakuki, Tielong Shen and K. Tamura, Adaptive control design for a class of nonsmooth nonlinear systems with matched and linearly parameterized uncertainty, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 19, No. 2, pp. 243-255, 2009
- ⑪ Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Junichi Kako and Shozo Yoshida, Lyapunov-based feedback design and experimental verification of IC engine speed control, International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 659-667, 2009
- ⑫ 申鉄龍, 不連続性を考慮した適応制御系の設計, 計測と制御, Vol. 48, No. 8, pp. 608-614, 2009
- ⑬ Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Stability and feedback design of a class of time-delay systems with discontinuity: functional differential inclusion-based approach, 電気学会論文集 C, Vol. 129, No. 6, pp. 1108-1114, 2009
- ⑭ Kai Zheng, Tielong Shen and Yao Yu, Input constrained positioning control for a class of Euler-lagrange systems with discontinuities, 電気学会論文集 C, Vol. 128, No. 3, pp. 493-498, 2008
- ⑮ Jiangyan Zhang, Tielong Shen and Riccardo Marino, Model-based cold-start speed control design for SI engines, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 47, No. 3, pp. 224-227, 2008
- ⑯ Nakiko Hirano, Tielong Shen and Katsutoshi Tamura, State feedback stabilization of cascaded nonlinear systems with discontinuous connection, Journal of Control Theory and Applications, Vol. 6, No. 1, pp. 45-52, 2008
- ⑰ 鈴木健士, 申鉄龍, 加古純一, 吉田庄三, シングルセンサによる気筒毎空燃比のモデリングと制御, 日本機械学会論文集 C, Vol. 74, No. 739, pp. 90-97, 2008
- ⑱ 申鉄龍, 吉田正武, 自動車エンジンのダイナミクスとモデリング, 計測と制御, Vol. 47, No. 3, pp. 192-197, 2008
- ⑲ Bin He, Tielong Shen, Junichi Kako and Minggao Ouyang, Input observer-based individual cylinder air-fuel ratio control: modeling, design and validation, IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 1057-1065, 2008
- ⑳ Po Li, Kaipei Liu, Tielong Shen and Junichi kako, Torque balancing control in ignition event based scale for multi-cylinder SI engines, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 137-145, 2008
- [学会発表] (計 18 件)
- ① Jiangyan Zhang, Tielong Shen, Akira Ohata and Junichi Kako, SICE benchmark problem of starting speed control of IC engine and a challenging result, Proceedings of the 29th CCC Beijing, Jul. 29-31, 2010, pp. 3590-3594
- ② Kai Zheng, Tielong Shen, Fenghua He, Ming Yang, Nonsmooth Backstepping design for a class of parametric strict-feedback nonlinear systems based on Lipschitz feedback, Proceedings of ACC, Maryland, Jun. 30-Jul. 2, 2010, pp. 6351-6356
- ③ Xiangpeng Yu, Tielong Shen, Gangyan Li and Kunihiko Hikiri, Regenerative braking torque estimation and control approaches for a hybrid electric truck, Proceedings of ACC, Maryland, Jun. 30-Jul. 2, 2010, pp. 5832-5837
- ④ Munan Hong, Minggao Ouyang, Tielong Shen, Jianqiu Li, Model-based PI Feedback Control of Engine Torque, Proceedings of The 8th IEEE International Conference on Control & Automation, Xiamen, Jun. 9-11, 2010
- ⑤ Po Li, Tielong Shen and Dichen Liu, Unknown offset free MPC for Air-Fuel ratio balancing control in multi-cylinder SI engines, Proceedings of The 8th IEEE International Conference on Control & Automation, Xiamen, Jun. 9-11, 2010
- ⑥ Jiangyan Zhang, Tielong Shen and Xiaohong Jiao, L2-gain analysis and feedback design for discontinuous time-delay systems based on

- functional differential inclusion, Proc. of the Joint 48th IEEE CDC-CCC, Shanghai, Dec.16-18, 2009, pp.5114-5119
- ⑦ Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Adaptive feedback design for speed control of gasoline engines with intake-to-power delay, The 7th Asian Control Conference, Hongkong, Aug.27-29, 2009, pp.33-38
- ⑧ Kai Zheng, Tielong Shen and Yu Yao, Sliding mode control design based on new approaching criteria for linear Lipschitz switching surface, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, Aug.18-21, 2009, pp.1447-1452
- ⑨ Munan Hong, Tielong Shen and Minggao Ouyang, Nonlinear observer-based torque control for SI engine, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, Aug.18-21, 2009, pp.4114-4119
- ⑩ Xiangpeng Yu, Tielong Shen, Gangyan Li and Kunihiko Hikiri, Model-based drive shaft torque estimation and control of a hybrid electric vehicle in energy regeneration mode, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, Aug.18-21, 2009, pp.3543-3548
- ⑪ Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Functional differential inclusion-based approach to control of discontinuous nonlinear systems with time delay, Proceedings of the 47th IEEE CDC Mexico, Dec.9-11, 2008 pp.5300-5305
- ⑫ Po Li, Tielong Shen, Kaipei Liu, Junichi Kako and S. Yoshida, Modeling and balancing control for torque generation in combustion event scale for multi-cylinder SI engines, Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Oct.14-17, 2008, pp.1254-1259
- ⑬ Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Feedback stabilization of a class of time-delay systems with discontinuity: a functional differential inclusion-based approach, Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Oct.14-17, 2008, pp.1240-1244
- ⑭ Kai Zheng, Tielong Shen, Yu Yao, Junichi Kako and Shozo Yosida, Load torque analysis based on the integrated model of HPAS systems, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Harbin, Sep.3-5, 2008, pp.1-6
- ⑮ Kai Zheng, Tielong Shen, and Yu Yao, Filippov Solutions on a Lipschitz continuous surface, Proceedings of the 27th CCC, Kunming, Jul.16-18, 2008, pp.577-581
- ⑯ Jiangyan Zhang and Tielong Shen, Feedback design for discontinuous time-delay systems based on functional differential inclusions, Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, Kunming, Jul.16-18, 2008, pp.572-576
- ⑰ Jiangyan Zhang, Tielong Shen and Riccardo Marino, Model-based cold-start speed control design for SI engines, Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control (IFAC), Seoul, Jul.6-11, 2008, pp.1042-1047
- ⑱ Kai Zheng, Tielong Shen, Kunihiko Hikiri, Masakazu Sasaki and Yu Yao, Modeling and control of regenerative braking systems in heavy duty hybrid electric vehicles, SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, Jun.23, 2008, SAE 2008-01-1569

〔図書〕 (計 2 件)

- ① Daizhan Cheng, Xiaoming Hu, and Tielong Shen, Analysis and design of Nonlinear Control Systems, Science Press-Springer, New York, 2010, pp.1-27, pp.379-532
- ② 申鉄龍, ガソリンエンジン制御技術, 新誠一監修, 「要点 カーエレクトロニクス・テクノロジー」工業調査会, 2009, pp.83-91

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

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし