

解 説

鉄道車両の車輪滑走防止のためのスライディングモード制御*

山崎 大生**

* 平成 20 年 4 月 28 日原稿受付

** 武蔵工業大学工学部機械工学科，〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

1. はじめに

本稿では，スライディングモード制御理論を鉄道車両の車輪・レール間のスリップ比制御へ応用した場合における効果について述べる．雨天時などのレール湿潤環境において，短編成列車は後方車両での粘着力が期待できず，制動距離が長くなってしまふ等の問題点があった¹⁾．また鉄道の空気ブレーキシステムには，空気圧の圧縮性や圧力制御弁の ON-OFF 動作など強い非線形性が存在し，ブレーキ力によって発生する粘着力のスリップ比特性も非線形性を有する¹⁾²⁾．さらに，ブレーキ摩擦材の摩擦係数にも変動があり，これら非線形特性やパラメータ変動に対してモデルベース制御系を設計するため，筆者らは粘着力のモデル化¹⁾と，非線形性を考慮した空気ブレーキシステムのモデル化を行ってきた²⁾．そしてこれらのモデルを基に，スライディングモード制御理論³⁾⁴⁾を鉄道の滑走制御に適用することを検討してきた⁵⁾．

一方，自動車では，非線形ロバスト制御の一つであるスライディングモード制御理論に基づく ABS の研究⁶⁾がなされているが，ブレーキ性能に関する実験結果については明確に示されていないかった．また実験結果に関する報告は，ブレーキ性能のばらつきに関するデータや考察が示されていないかった⁷⁾．

本稿では，これらの課題に対し，実物大試験機を用いた制御実験を行なった結果と，提案する制御の優位性について述べる．

2. 制御系設計

鉄道ではすべてのスリップ比に対する粘着力のモデル化がなされていないかったため，近年までモデルベースによる滑走制御系設計が困難であったと考えられる．

本研究で扱う制御対象を図 1 に示す．鉄道車両の滑走制御は車輪ロックを防ぎ，かつ制動距離を短くすることであり，そのためには粘着力が最大となるスリップ比となるようにブレーキ圧力を制御すればよい．すなわち，粘着力が最大となる目標スリップ比と車体速度から決定される目標車輪速度に追従するサーボ系の設計問題に帰着できる．

ブレーキ時の 1 輪軸の運動方程式と，空気ブレーキと圧力制御弁に関する動特性の定式化を行った．実験に用いた滑走防止用圧力制御弁²⁾は，ブレーキシリンダ管より圧縮空気を供給され，滑走が生じた場合にブレーキシリンダ圧力を調節して滑走を防止するバルブで，ON-OFF 信号で駆動される．一方，スライディングモード制御の制御入力値は連続値である．特に圧力制御弁への入力信号に対する非線形ゲインは空気圧システムが有するパラメータ変動が生じ，これに対してロバストな制御系を設計する．ここで，入力信号をバルブ断面積の変化として整理すると，スライディングモード制御の入力信号は，連続値で取り扱うことができ，ロバスト性の証明に便利であり，制御行列におけるパラメータ変動として扱えるようになる．

車輪速度の微分値を状態変数に取り，システム行列および外乱がマッチング条件を満たすように設計すれば，ロバスト安定の証明が容易で，理論的に説得力の高い ABS が実現可能である．しかし，鉄道車両は速度センサの分解能が低く，速度の微分値の精度，必要なバルブ動作を防ぐための移動係数処理による位相遅れの問題等がある．そこで本研究では車輪速度微分値ではなくブレーキシリンダ圧力を状態変数に取った．また，粘着力¹⁾をスリップ比に対して線形化を行なったノミナルモデルによって制御系を設計した．

鉄道のブレーキブロック時の摩擦係数には速度依存性があり、さらにその温度変化や摩擦面における水などの介在によって摩擦計数の変動が生じる。これらの非線形性やパラメータ変動に対して優れたロバスト性を有する制御系の設計を行えば、粘着力がピークを維持することによってブレーキ性能の向上が期待できることから、本研究では、スライディングモード制御理論によって滑走制御系を設計した。

本研究では制御系の状態変数は、目標車輪速度の誤差、目標車輪速度の誤差積分値、ブレーキシリンダ圧力の3つとした。車輪軸の運動方程式を粘着力がピークとなる近傍で線形化した状態方程式に関し、以下の切換関数を考える。

$$\sigma = Sx \quad (1)$$

状態方程式において、システム行列の変動と外乱がマッチング条件^{3),5),6)}を満足しないため、本研究で設計した制御系の不変性は確保されない。そこでシステム行列の変動と外乱による影響に対し、非線形制御入力項で補償する制御系を設計した。この非線形制御項には、自由階層法である加速率到達則を用いた。この到達則は、システムの状態を超平面に短時間で到達させる、優れたロバスト性を有する、制御入力のエネルギーが少ない、チャタリングを防ぐなどの利点がある。提案する制御系の概念図は図2のようになる。

式(1)で示される切換超平面 S は、安定余裕を指定する設計法を用いる。最適制御の重み係数と同様に任意の重み係数行列を与えて、リカッチ方程式の解を用いて切換面を設計する。

マッチング条件を満たさない制御対象の不確かさに対して、ロバストな制御系が構成できるための条件は、リアプノフ関数の候補の微分が負であることが条件である。本研究もマッチング条件を満足しない制御系である。そこで、制御系のリアプノフ関数の候補を定め、システム行列と、制御行列それぞれの変動を含めた状態方程式を新たに定義し、適切な座標変換を行なった上でマッチング条件の検討を行った。その結果、モデルのパラメータ変動と外乱に対して不変になっていることともに、スライディングモードの存在条件について検討を行い、マッチング条件を満足しない場合においても安定なスライディングモード制御を実現出来ることを明らかにした。

図3に示す実物大試験機を用いて、提案する制御実験を実施し、車輪速度は目標車輪速度に良好に追従することを確認した。実験結果を図4に示す。ブレーキシリンダ圧力を高い値に維持できることも実験的に明らかにした。実験結果から得た減速ブレーキ距離によると、スライディングモード制御は従来の制御則比べてブレーキ距離が短くなることが示された。また、ブレーキ距離のばらつきを表す標準偏差も約60~85%改善された。したがって、スライディングモード制御を採用すれば、ブレーキ距離の平均値、最大値ともに短く、ブレーキ距離のばらつきが大幅に改善される効果が期待できる。

3. おわりに

本稿では実物大試験機を用いた鉄道向けの滑走制御試験を行い、スライディングモード制御理論に基づき設計した滑走制御と、従来の制御の性能比較について述べた。スライディングモード制御は従来の制御と比較して安定して高いブレーキ性能を有することが示された。今後、実用化に向けた実車試験でのフィールドデータが重要となる。

なお、本研究の座標変換に関するご指導を頂いた、財団法人鉄道総合技術研究所軌道管理研究室 神山雅子主任研究員に感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 山崎大生, 永井正夫, 鎌田崇義, 鉄道車両における滑走制御のための粘着力モデルに関する研究(ビームモデルを用いた検討), 日本機械学会論文集 (C) Vol.70, No.696, (2004), pp.2407/2412.
- 2) 山崎大生, CAEを用いた鉄道車両の空圧ブレーキの研究開発, フルードパワーシステム, 35-3, (2004), pp.169/172.
- 3) 野波健蔵, 田宏奇, スライディングモード制御, コロナ社 (1999).
- 4) V. I. Utkin, J. Guldner and J. Shi, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, Taylor & Francis (1999).
- 5) 山崎大生, スライディングモード制御理論に基づいた鉄道車両の滑走制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.37, No.3, (2006), pp.36/42.

- 6) 横山誠, 岩田義明, 片寄真二, 今村政道, 新部誠, スライディングモード制御によるアンチロックブレーキシステム, 日本機械学会論文集(C), Vol.63, No.611,(1997),pp.2302/2307.
- 7) Wu, M., and Shih, M., “Hydraulic anti-lock brake control using the hybrid sliding-mode pulse width modulation pressure control method”, Proc Instn Mech Engrs, Vol.215 Part I, (2001),pp.177/187.
- 8) 山崎大生, 狩野泰, 鎌田崇義, 永井正夫, 木村哲也, 鉄道車両の車輪滑走防止のためのスライディングモード制御(実物大試験機を用いた制御実験), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.37, No.6,(2006),pp.73/79.

著者紹介



やまさき ひろお
山崎 大生 君

1992 年東京農工大学工学部卒業。同年財団法人鉄道総合技術研究所入社。2005 年東京農工大学大学院工学教育部機械システム工学専攻修了。2008 年 4 月武蔵工業大学工学部准教授, 現在に至る。非線形ロバスト制御やオブザーバの車両工学への応用, 摩擦力や空気圧ブレーキのモデル化の研究などに従事。日本フルードパワーシステム学会, 日本機械学会の会員。博士(工学)。

E-mail : hyama@sc.musashi-tech.ac.jp

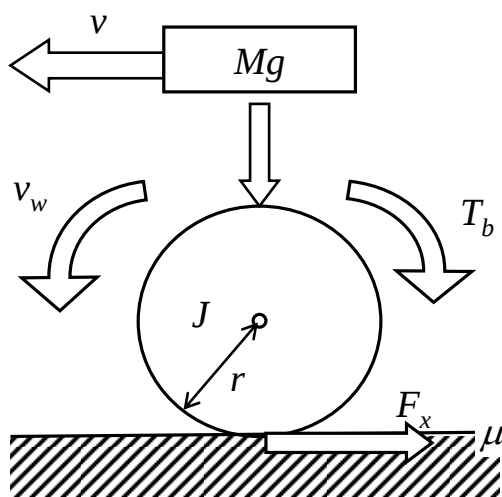


図 1 制御対象のモデル

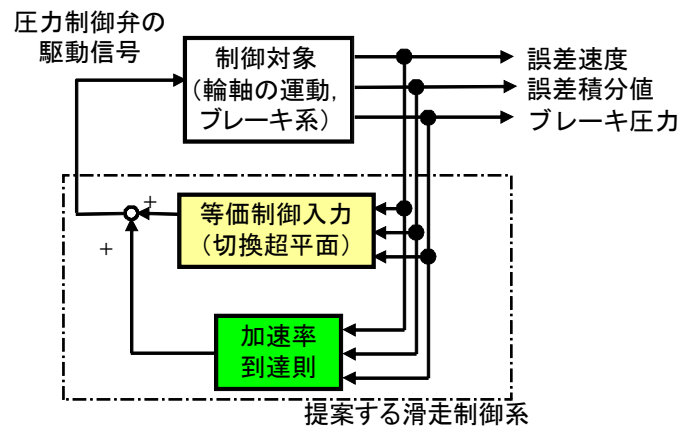


図2 スライディングモード制御による滑走制御系の概念図

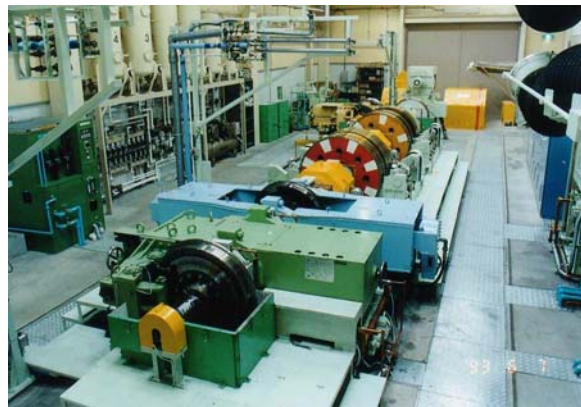
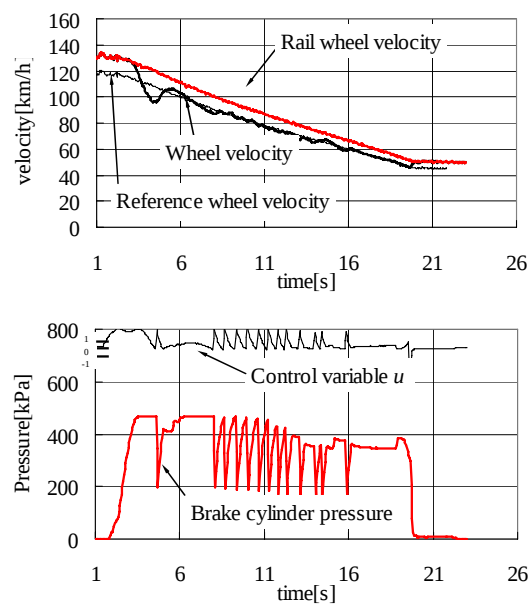


図3 制御実験に用いた実物大試験機

図4 提案する制御の実験結果
(車輪速度は目標値に良好に追従している)