

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760292
 研究課題名 (和文) 状態依存型リカッチ方程式による横滑りを考慮した車両の位置・姿勢制御に関する研究
 研究課題名 (英文) Vehicle Position and Attitude Control By State Dependent Riccati Equation with Consideration for Skidding
 研究代表者
 池田 裕一 (IKEDA YUICHI)
 信州大学・工学部・助教
 研究者番号：80435396

研究成果の概要 (和文)：本研究では、車両の操縦性と安定性の向上を目指し、車両の横滑り、および車両運動とタイヤ力の非線形性を考慮した操舵・駆動系の統合化制御系の設計を目的とし、非線形システムの実時間制御手法の 1 つである状態依存型リカッチ方程式に基づいたアクティブ操舵制御、モデルマッチング制御、およびスライディングモード制御手法を提案した。数値シミュレーションにより、提案した制御手法により車両運動の安定性が向上することを確認した。

研究成果の概要 (英文)：In this research, we consider the integrated control system design of vehicle with consideration for skidding and nonlinearity of the vehicle motion and tire force, and propose active steering control, model matching control and sliding mode control method based on state dependent Riccati equation that is one of the real time control method for nonlinear system. The effectiveness of proposed control method is verified by numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	0	1,600,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	510,000	3,810,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御工学, 機械力学・制御, 非線形制御, 車両, 状態依存型リカッチ方程式

1. 研究開始当初の背景

(1)自動車に対する要求において、操縦性・安定性は最も重要であり、近年の自動車の電子制御技術の発展にともない、前輪・後輪操舵

角の制御を行う四輪操舵システム、四輪のブレーキ力・駆動力を配分する配分制御、ABS やTCSなどの研究・開発が行われている。最近では、操舵系と駆動系を1つのシステムと

して統合し制御する統合制御の研究が操縦性・安全性のさらなる向上を目的として行われている。

(2) 操縦性・安定性において、車輪の横滑りを考慮することは重要である。自動車の制御では、車輪の横滑りを陽に考慮した研究が多く行われている。これらの研究では、制御システム設計に用いる自動車の数学モデルは、車両速度を一定、急激に大きな操舵を行わない、車両左右方向の速度はその前後方向の速度よりも小さいという仮定から、平衡点近傍で線形化したモデルを用いている。しかし、大きな加減速や操舵を行う場合には、車両運動の非線形性が強くなり、また、横滑りが大きくなると車両の旋回や制駆動に関連するタイヤ力は飽和する特性を有しているため、このような場合には、従来研究の手法を適用することが出来ない。

(3) 車輪の横滑りの動特性、および車両運動とタイヤ力の非線形性を考慮し、操舵系と駆動系を統合化し同時に制御を行うことにより、操縦性・安定性を向上させることができると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、横滑りを考慮した車両の位置・姿勢制御を考え、操舵系と駆動系を統合化した制御システムの構築を目的とする。対象とする車両モデルとしては、前輪駆動車を採用する。これは、現在の自動車の多くは前輪駆動型であるためである。また、車両のモデリングにおいては、より実際の車両に近づけるため、操舵系と駆動系の機械的な機構を考慮する。

(2) つぎに、操舵系と駆動系を統合した制御システムの構築を行う。横滑りおよびタイヤ力等の非線形性を考慮した場合の車両の運動は強い非線形性を有する非線形システムであるため、制御器を設計するのは容易ではない。

(3) 近年、非線形性の強いシステムに対して、計算機の性能の向上と数値計算法の進歩により、非線形最適制御問題を実時間で解きフィードバック制御を行う制御方法が提案されている。この代表的な手法として、非線形モデル予測制御 (NMPC) と状態依存型リカッチ方程式に基づいた手法 (SDRE 法) が知られている。横滑り考慮した車両の制御においては、NMPC を適用した研究がある。しかし、NMPC は有限区間の非線形最適制御問題を解くために、ある程度の計算量はやむを得ず、車両のような応答の速い、すなわち制御周期の短いメカニカルシステムに適用することは難しい。一方、SDRE 法は非線形モデルを状態依存型の状態方程式で表現し、制御周期ごとに最適制御問題を解くことでフィードバックゲインを更新し、非線形システムの安定化を行う手法である。この手法は、各制御周期で解くべき最適制御問題がよく知られた線形システムの最適レギュレータ問題となり、フィードバックゲインはリカッチ方程式を解くことで得られる。また、リカッチ方程式の高速解法は様々なものが提案されている。本研究では、SDRE 法に基づいて操舵系と駆動系を統合化した制御システムを構築し、その性能を検証するための実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 車両の横滑り、および車両運動とタイヤ力の非線形性を考慮した車両の運動方程式をラグランジュの運動方程式などに基づいて導出する。

(2) 導出した車両モデルを用いて、SDRE 法に基づいて制御システムを構築する。本研究では、SDRE 法が実時間制御であるという特徴を用いて、制御入力や操舵角・車両姿勢角度の拘束条件を満たす評価関数の設計を行う。また、最適性の他に外乱抑制性能をもつよう

な多目的制御，および構築した制御システムの安定性解析も行う．そして，構築した制御システムを数値シミュレーションにより検証する．

(3) 理論的研究と並行して，構築した制御システムの実証を行うための実験装置を新たに購入・製作し，構築した制御システムの実験的検証を行う．本研究では，DCサーボモータ（エンコーダ付）により駆動を，RCサーボモータにより駆動を行う．車両の姿勢角度はジャイロセンサ，車体の位置は操舵角と車両姿勢角を用いて幾何学的に算出する．タイヤの回転角度はロータリエンコーダにより計測する．また，車両の位置・姿勢角度やDCサーボモータへの制御信号はH8マイコンと無線LAN・PCカードを計算機と車両に搭載し無線で行う．

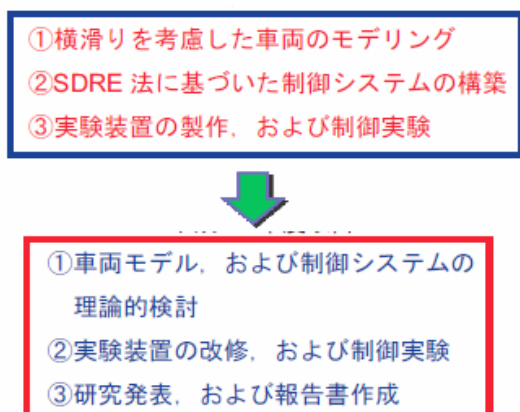


図1：研究方法

4. 研究成果

(1) 車両の旋回と制駆動に関連するタイヤ力は飽和特性を有し，タイヤに横力・制駆動力の両方が作用している場合，これらは横滑り・縦滑りの両方の関数となることが知られている．本研究では，タイヤ力が横滑り・縦滑りの関数として記述できる Magic Formula 関数近似タイヤモデル（図2）を用いて，前輪操舵・後輪駆動の車両モデルを構築した（図3）．

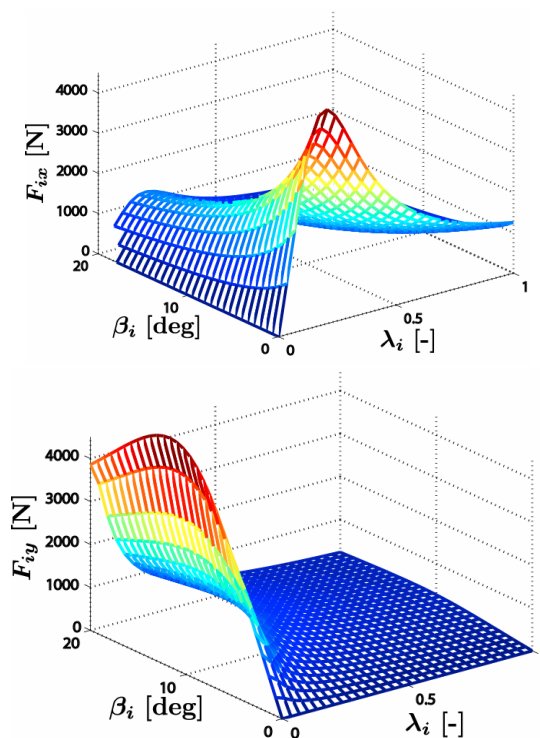


図2：Magic Formula タイヤモデル

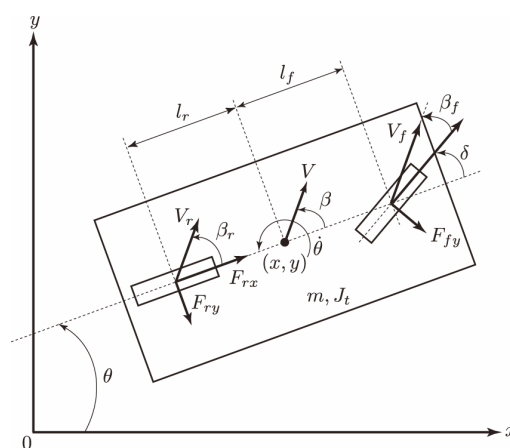


図3：前輪操舵・後輪駆動の車両モデル

(2) 構築した車両モデルから，三角関数の性質などを利用し状態依存型係数表現を導出し，この状態依存型係数表現に状態依存型リカッチ方程式を用いる制御方法を提案した．この結果を用いて，規範モデルからの出力に車両のヨーレート（角速度）を追従させるアクティブ前輪操舵制御手法を提案した．シングルレーンチェンジの数値シミュレーションにより，圧雪などの低摩擦路面においてもドライバの操舵操作による不安定状態を安定化できることを確認した（図4）．

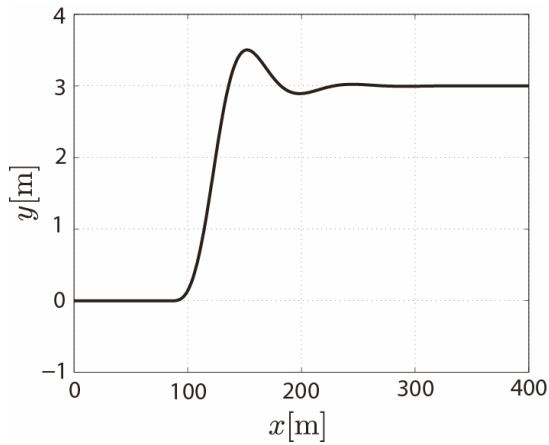


図4: (2)のシングルレーンチェンジのシミュレーション結果

(3) (2)の結果に基づいて、前輪操舵・後輪駆動の車両に対して、目標の一定姿勢角度と車両速度に追従する操舵・駆動の統合制御手法を提案した。数値シミュレーションにより、路面状況によらず車両の姿勢角度と速度が目標値に追従することを確認した(図5)。

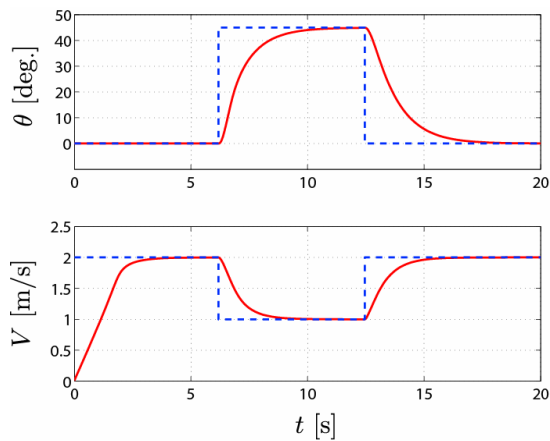


図5: (3)のシミュレーション結果

(4) (3)では目標値を一定としたが、実際の車両制御において目標値は時間とともに変化し、また、目標値はある規範モデルからの出力を用いることが多い。そこで、(2)の結果を制御系に規範モデルを含み、車両の姿勢角度と速度を規範モデルの出力に追従させるモデルマッチング制御に拡張した。提案手法の有効性を確認するため数値シミュレーションを行い、低摩擦路面においても大きな姿勢・速度変化に追従できること、路面状況の変化に対してある程度のロバスト性を有することを確認した(図6)。なお、制御対象となる車両は、前輪操舵・前輪駆動など他の操舵・駆動方式の車両への適用も考え、前後輪操舵・前後輪駆動とした(図7)。

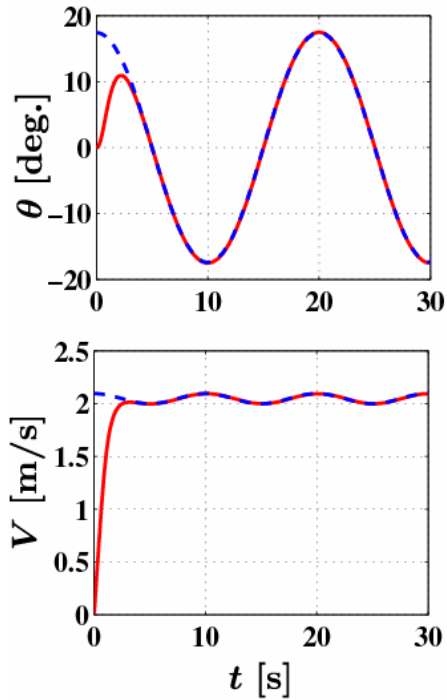


図6: (4)のシミュレーション結果(破線が目標値)

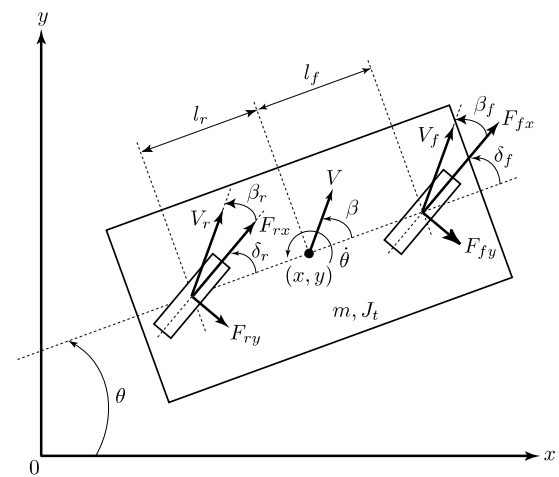


図7: 前後輪操舵・前後輪駆動の車両モデル

(5) (4)では、場合によっては車体とタイヤの速度差が大きくなり、タイヤの前後方向のすべりが大きくなってしまったことがあった。このときステアリング動作を行うと旋回を行うのに十分な横力が得られない。そこで、(4)の結果に基づいて、タイヤの前後方向のすべりを制御する操舵・駆動統合制御手法を提案した。数値シミュレーションにより、大きな操舵と加減速を同時に行う場合でも、タイヤの前後方向のすべりを適切な値に制御することで、安定な車両運動が行えることを確認した(図8)。

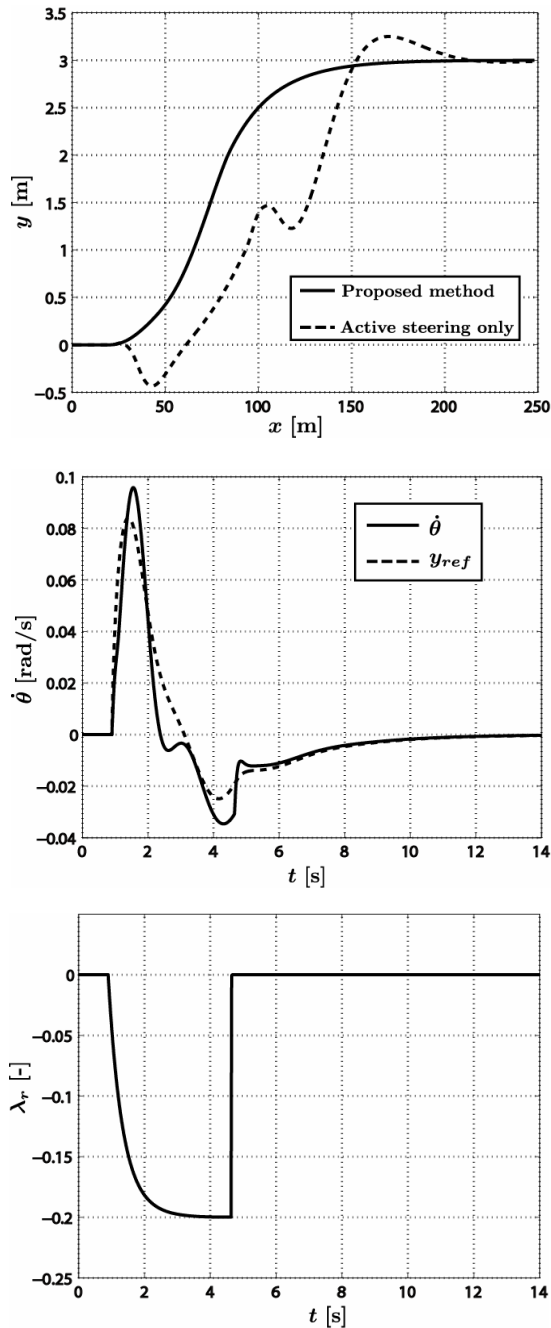
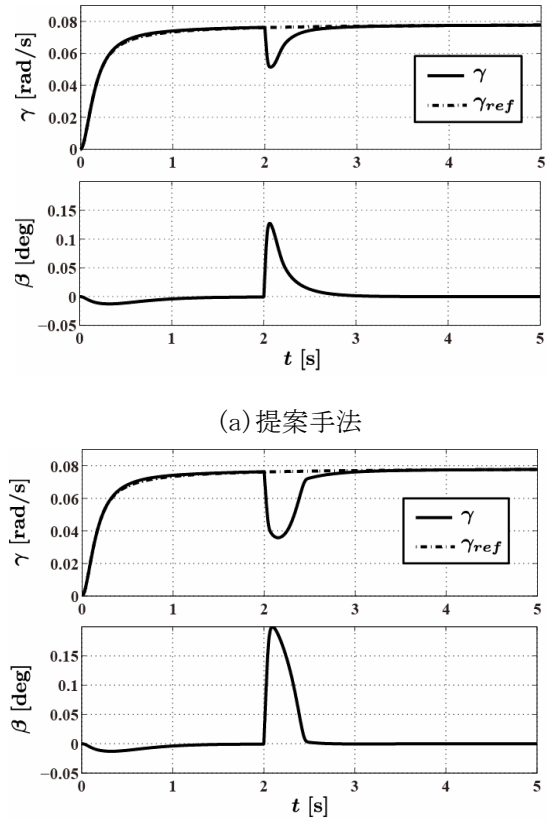


図 8 : (5) のシミュレーション結果

(6)(1)~(5)で導出した制御則は実時間制御に基づいているため、外乱などに対するロバスト性はシミュレーションにより確認するしかなかった。そこで、ロバスト制御手法の1つであるスライディングモード制御の切換関数の設計に状態依存型リカッチ方程式を用いた制御手法を提案した。これにより、システムの不確さに対して理論的な結果に基づいて評価できるようになった。また、超平面が状態に依存して変化するため、従来手法よりもロバスト性が向上することを数値シミュレーションにより確認した(図9)。さらに、実験検証を行うために実験機の作成を行

った。今後は、導出した制御則による制御系の安定性の証明、および実機実験による検証を行う予定である。



(a) 提案手法

(b) 従来手法

図 9 : (6) のシミュレーション結果

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)

[学会発表] (計 5 件)

①池田裕一, スライディングモード制御による車両のアクティブ操舵-状態依存型リカッチ方程式を用いた切換関数の設計, 第 10 回制御部門大会, 2010. 3. 17, 熊本

②池田裕一, 状態依存型リカッチ方程式による四輪車両の操舵・駆動統合制御, 計測自動制御学会 中部支部シンポジウム2009, 2009. 10. 30, 長野

③池田裕一, 状態依存型リカッチ方程式による四輪操舵・駆動車両の制御, 第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2009. 9. 4, 福岡

④池田裕一，状態依存型リカッチ方程式による横滑りを考慮した車両の制御，第9回制御部門大会，2009.3.4，広島

⑤池田裕一，中川翔太，状態依存型リカッチ方程式による車両のアクティブ操舵制御，第41回計測自動制御学会北海道支部学術講演会，2009.2.26，北海道

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 裕一 (IKEDA YUICHI)

信州大学・工学部・助教

研究者番号：80435396