

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560250

研究課題名（和文）可制御領域の比較に基づく非線形制御系の机上検証手法とその車両運動制御系への応用

研究課題名（英文）A desktop validation method for nonlinear control systems based on the comparison of controllability region and its application to vehicle control systems

研究代表者 堀内 伸一郎 (HORIUCHI SHINICHIRO)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30181522

研究成果の概要（和文）：可制御領域の比較に基づいて非線形制御系の性能を机上で検証するため新しい手法を開発した。可制御領域が大きいほど、制御性能がよいと見ることができるので、本手法により可制御領域の大きさを比較することによって各種制御系の性能を統一的に検証することができる。可制御領域の境界決定問題を位相面上の距離最大化問題として定式化し、非線形最適制御の数値解法を応用して解くアルゴリズムを提案した。開発した手法を車両運動制御系の検証に応用し、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：A new desktop validation method for nonlinear control systems based on the comparison of controllability region is developed. This method makes it possible to validate different types of control systems in a unified manner because larger controllability region indicates better control performance. The problem to determine the boundary of the controllability region is formulated as a maximization problem of a state norm on a phase plane and solved by using a numerical method of optimal control problem. The method is applied to the validation of vehicle chassis control systems. The result shows the effectiveness of the proposed method for the validation of nonlinear control systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：制御系検証，車両運動制御，最適化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、人工物はますます高機能化・複雑化する傾向にある。このような人工物を正確に機能させるためには高度な制御系が必須であり、制御系の性能、特に安全性にかかわる安定性・追従性を運用開始前に机上で十分に検証しておくことが望まれている。

制御系の検証は、図1に示す一般的な制御系設計プロセスの後半に位置し、シミュレーションなどの机上検証と実機検証に分けることができる。机上検証の目的は、設計された制御系に対し、想定されるシステムパラメタの変動および入力パタンの変化に対して、安

定性、追従性などの制御性能を保証することである。制御系の机上検証問題は、実システムの運用に際しては制御系設計問題と同等、あるいは設計問題以上に重要であるにも関わらず、十分な研究がなされておらず、現場的な経験とシミュレーションに頼っているのが現状である。

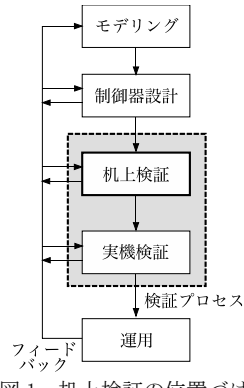


図1 机上検証の位置づけ

このような制御系の

検証問題は、次のような特徴をもつ自動車の場合、さらに重要となる。

- 1) 人間を乗せて走るため、制御系の安全性は人間の生命安全に直接影響する。
- 2) 操舵制御、駆動力・制動力制御など高度なシャシー制御が実車に搭載されるようになってきた。
- 3) すべての運動は非線形な飽和特性をもつタイヤ力に依存するため、全体として非線形系となる。

従来、自動車の運動制御系の検証は主として実験的手法に頼っており、さまざまな条件で膨大な実験を繰り返すことが必要であった。このような実験に要する時間と費用などを削減するため、信頼できる机上検証手法が望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究では以下の3点を具体的な目標とした。

【目標 1. 非線形系に適用可能な実用的机上検討手法の開発】システムの可制御領域の大きさを制御系の性能指標として利用する検証方法を開発する。可制御領域が大きいほど状態変数の大きな変化まで許容して制御可能であることを意味し、性能保証の良い指標となる。従来、非線形システムに対する可制御領域の計算法は複雑なシステムへの適用が難しく、実システムに適用可能な方法は提案されていない。本研究では新たな可制御領域の計算法を開発し、これにより与えられた入力範囲内でシステムが可制御となる状態空間の部分空間、すなわち性能を保証できる領域を明らかにすることができる。

【目標 2. 車両運動制御系への提案手法の適用】提案手法を車両運動制御系（操舵制御系、駆動力制御系、制動力制御系など）の評価に適用し、具体的なシステムの検証に対する有効性を示す。車両制御系の性能保証は人命に直接関わるため、従来は実車を用いた数多くの実験的検証が必要であった。提案手法によって机上検討を行えば、実車による検証実験を大幅に削減することができるとともに、車両安全性の向上に寄与できる。

【目標 3. 他の検証手法と提案手法の融合およびその有効性の検討】研究代表者が平成19・20年度に科研費で実施した研究では、分岐解析と最悪入力による制御系の検証手法を提案し、その有効性を明らかにした。この方法と本研究の手法を融合させれば、性能が保証できる状態変数の範囲、入力の範囲、パラメタ変動の範囲をすべて明らかにできる。さらに、この融合手法を種々の制御系の評価に適用し、その有用性を確認する。

## 3. 研究の方法

### (1) 初期段階の検討

#### ①最適制御問題としての定式化

制御系の安定領域は図2(a)のように安定平衡点へ収束する自律システム  $\dot{x} = f(x)$  の初期値の集合として定義される。

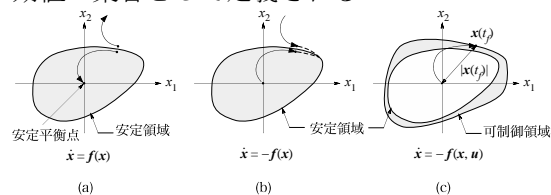


図2 可制御領域

軌道逆転法は図2(b)のように安定平衡点から原システムに対する逆時間システム  $\dot{x} = -f(x)$  を解くことにより安定領域を求めようとする方法であるが、本研究ではこの考え方を非自律システム  $\dot{x} = f(x, u)$  に拡張し、図2(c)のように安定平衡点から逆時間システムを解き、終端時刻における状態  $x(t_f)$  のノルムを最大とするような最適入力  $u_{opt}(t)$  を与えられた入力範囲  $u \in U$  で求めることにより、順時間システムの可制御領域を求められるとの着想を得たことにより実施した。この方法は極めて汎用的な可制御領域計算手法となる可能性をもつこと期待されたが、stiffなシステムに対しては高精度の逆時間積分は困難であることがわかった。そこで、順時間システムの初期値  $x(0)$  のノルムを最大化する最適制御問題として定式化し直した。

#### ②最適化アルゴリズム

次に、最適制御問題を解く最適化あるアルゴリズムについて検討した。本研究は上述のように最適制御理論に基づいて可制御領域を数値的に求めることが一つのポイントであるため、確実に最適制御入力を求める最適化手法が重要となる。制御入力を離散化し、関数空間における最適制御問題を数値空間におけるパラメタ最適化問題に変換して数値計画法を適用して最適入力を求める。ここで、大域的最適解を求めるアルゴリズムとしてマルコフ連鎖モンテカルロ法の応用やDIRECTと呼ばれる最適化アルゴリズムの適用を検討した。しかし、これらのアルゴリズムは最適化変数が多くなると収束が悪くなり、実際的な問題への適用は困難であるこ

とがわかった．そこで，種々検討の結果逐次2次計画法と Multi-start technique を組み合わせた最適化手法を用いることに決定した．

### ③可制御領域計算アルゴリズム

可制御領域の計算には ray-gridding method と呼ばれる方法を応用した．この方法は図3のように安定平衡点（原点）から放射状のグリッドを作成し，この放射線上で安定平衡点に到達可能な最大の初期値を探索するものである．

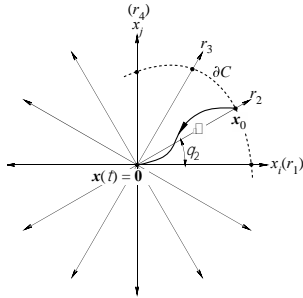


図3 ray-gridding method

各放射線上で得られた初期値を結ぶことによって，可制御領域の境界を求めることができる．

### (2) 車両運動制御方式の検証

従来の車両運動制御系の性能確認では，制御方式の性能と制御系の性能とを区別して取り扱っていなかった．ここで，制御方式とはどのような制御入力を用いるかということであり，例えば前輪操舵では前輪舵角のみが制御入力，四輪操舵では前輪舵角に加え後輪舵角が制御入力，四輪トルク制御では各輪の駆動・制動トルクが制御入力となる．これに対し，制御系の性能とは与えられた制御方式の中でフィードバックあるいはフィードフォワード制御器がどれだけ制御目標を達成できたかを意味する．ある制御系の性能が不十分であったとき，それが制御器の設計に問題があり制御方式の性能を十分には発揮できなかったのか，そもそも制御方式の限界によって満足な性能が得られなかったのかを区別して検討することは重要であるが，従来はこれを明確に意識して検討された例は少なかった．

本研究では前輪操舵，前輪操舵+後輪操舵（四輪操舵），前輪操舵+四輪トルク制御の3種類の制御方式の効果を，可制御領域の大きさで評価することを試みた．評価に用いた車両モデルは前後，左右の並進運動，鉛直軸周りのヨー回転運動，ロール軸周りの回転運動，各タイヤの回転を考慮したものである．タイヤモデルは前後力と横力の干渉，鉛直荷重に対する横力・前後力依存性，大スリップ状態における摩擦係数の低下，キャンバスタストなどを考慮している．また，タイヤの横力・前後力遅れを1次遅れとしてモデルで近似している．

## 4. 研究成果

提案する手法で3種類の制御方式の性能を比較した．

### (1) 前輪操舵方式の可制御領域

図4は前輪操舵方式のヨーレート-横速度位相面上における可制御領域を示している．この図は，前輪舵角の最大値を5度，安定平衡点への到達時間上限を1秒としたときのものである．すなわち，車両が1秒以内に5度以下の前輪舵角を最適に操舵したときに安定状態に復帰できるヨーレートと横速度の範囲を示している．この図に示すように，提案した計算方法を用いることにより，複雑な非線形システムの可制御領域を求められることが明らかになった．図中の矢印は可制御の境界から安定平衡点に遷移する際の軌道を示している．(a)，(b)，(c)の各軌道に対する制御入力を図5に示す．この図に示すように，与えられた入力の範囲内で最適な前輪舵角が求められていることがわかる．

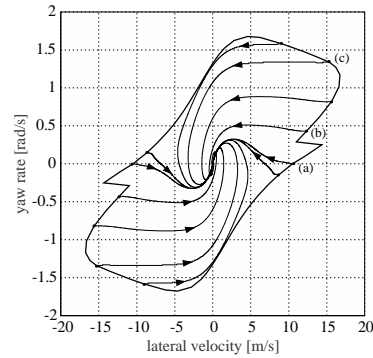


図4 前輪操舵方式の可制御領域

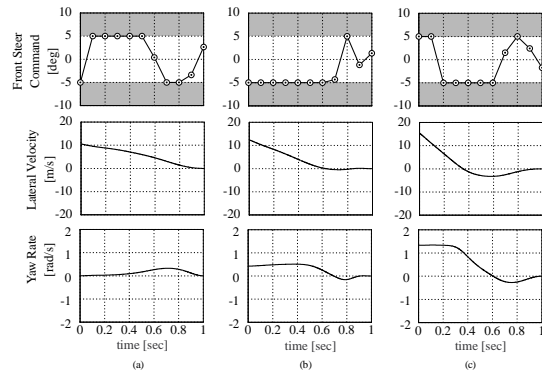


図5 制御入力（前輪舵角）と状態量

### (2) 前輪操舵方式における舵角の影響

図6は前輪操舵方式において，舵角の許容範囲を変化させたときの可制御領域を比較したものである．この図からわかるように，前輪舵角の許容範囲を大きくすると，可制御領域は広がるが，その効果はヨーレート-横速度位相面上の第1，第3象限で顕著であり，第2，第4象限では大きな効果は見られない．この結果は，ヨーレートと横速度が異符号を

とるような領域（車両がスピン状態に陥ったような状況）では、たとえ舵角を大きくとっても可制御領域を拡大する効果が期待できないことを意味する。

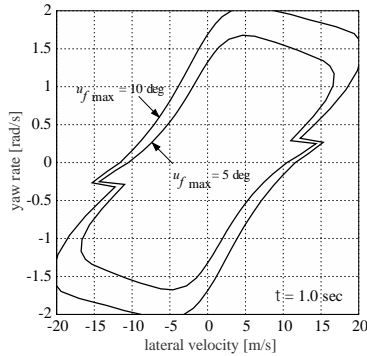


図 6 舵角の許容範囲が可制御領域に与える影響

(3) 前輪操舵方式における到達時間の影響

図 7 は安定平衡点に到達するまでの時間上限を 3 種類にとって、それぞれの可制御領域を比較したものである。到達時間の上限を大きくすると可制御領域は広がるが、その影響はやはりヨーレート-横速度位相面上の第 1, 第 3 象限で顕著であり、第 2, 第 4 象限ではその効果は少ない。このことは、車両がヨーレート-横速度位相面上で第 2, 第 4 象限にあるとき、すなわちスピン状態に陥ったときは、時間をかけても安定状態には戻れないことを意味する。

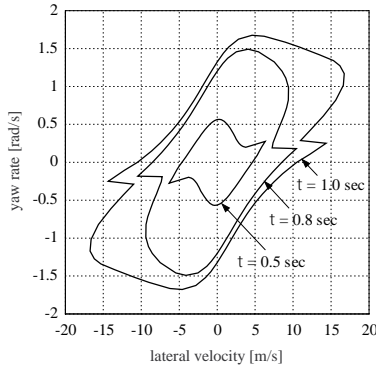


図 7 到達時間が可制御領域に与える影響

(4) 前輪操舵 + 後輪操舵の効果

図 8 は前輪に加えて後輪も操舵する四輪操舵方式の可制御領域を示している。ここでは前輪の最大許容舵角を 5 度、到達時間 1 秒として、後輪舵角の最大許容舵角を変化させて可制御領域の変化を見ている。この図からわかるように、後輪舵角の制御を加えても第 2, 第 4 象限の可制御領域は全く拡大しないことがわかる。このことは、車両がタイヤ力の限界領域でスピン状態のような危険な状態に陥ったとき、後輪を操舵しても安定性の回復に対し効果的ではないことを示している。これは第 2, 第 4 象限ではタイヤ横力が飽和し、後輪舵角を増加させても、横力を増加させら

れないためであると考えられる。

この結果は線形領域では操縦性向上に有効である四輪操舵が、非線形領域の安定性向上には効果がないことを示すものである。

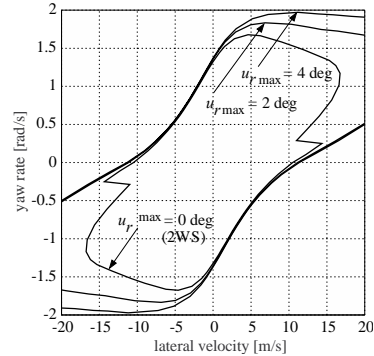


図 8 四輪操舵方式の可制御領域

(5) 前輪操舵 + 四輪トルク制御の効果

図 9 は前輪操舵に加えて四輪のトルクを制御する前輪操舵 + 四輪トルク制御の可制御領域を示している。(4) と同様に、前輪の最大許容舵角を 5 度、到達時間 1 秒としている。車両に発生する最大の許容減速度に相当するトルクを変化させ、可制御領域の変化を見た。その結果、図 9 のように前輪操舵 + 四輪トルク制御はヨーレート-横速度位相面で第 1, 第 3 象限だけではなく、第 2, 第 4 象限においても可制御領域を拡大する効果があることがわかった。この結果は非線形領域における車両運動制御方式として、後輪操舵より四輪トルク制御の方が効果的であることを示している。またこの結果は、どのように優れた四輪操舵制御系を設計しても、四輪トルク制御系の性能には及ばないことを理論的に示すものである。

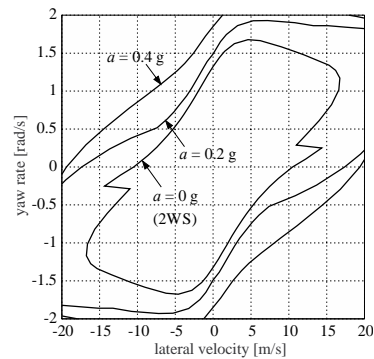


図 9 前輪操舵 + 四輪トルク制御の可制御領域

(6) 結論

本研究では非線形制御系の性能を机上で検証する新しい手法の開発を目的として、可制御領域の大きさによって制御方式の性能を評価する方法を提案した。また、最適制御の数値解法に基づく可制御領域の計算アルゴリズムを開発し、これを車両運動制御方式の評価に適用した。その結果、四輪操舵方式

の限界と、四輪トルク制御の有効性を理論的に示すことができた。ここで開発した手法は車両運動制御系だけではなく、広く一般的な非線形制御系の性能評価に適用可能である。

この方法を研究代表者が従来から提案して来た最悪入力に基づく制御系の検証方法、分岐解析に基づく制御系の検証方法などと併用することにより、安定性を保証できる入力の範囲、状態量の範囲、パラメタの範囲などを明らかにできる。

#### 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7件)

① Horiuchi, S., Evaluation of Chassis Control Method Through Optimization Based Controllability Region Computation, Vehicle System Dynamics, 査読あり, 掲載決定

② Horiuchi, S., Evaluation of Chassis Control Method Through Optimization Based Controllability Region Computation, Proc. 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 査読あり, CD-ROM, August, 2011.

③ 堀内伸一郎, 非線形領域における車両の安定性と運動特性の解析法, 機械の研究, 査読なし, 第62巻, 9号, 856-864. 2010.

④ Horiuchi, S., Okada, K., and Nohtomi, S., Model-based Validation Procedure for the Certification of Advanced Chassis Control Systems, Vehicle System Dynamics, 査読あり, Vol. 48, Suppl., 393-409, 2010.

⑤ Yoshino, M. and Horiuchi, S., Brake Assistance System Based on Driver's Behavioral Estimation, Proc. 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 査読なし, CD-ROM, August, 2010.

⑥ Horiuchi, S., Okada, K., and Nohtomi, S., Simulation-Based verification and Validation Procedure for the Certification of Advanced Chassis Control Systems, 21st International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 査読あり, CD-ROM, August, 2009.

⑦ Nagamine, T. and Horiuchi, S., A Method of Robust Control System Design Based on Quality Engineering and Its Application, Proc. of the 7th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA'09), 査読なし, CD-ROM, December,

2009.

[学会発表] (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.cst.nihon-u.ac.jp/studies/horiuchi/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

堀内 伸一郎(HORIUCHI SHINICHIRO)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30181522

(2)研究分担者

なし