

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560276

研究課題名(和文) 非線形制御系の安全性確保に向けた新しい解析的検証手法の開発とその展開

研究課題名(英文) Development of an analytical validation method for ensuring safety of nonlinear control systems and its application

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：非線形制御系の安全性向上に向け、制御性能を解析的に評価するための手法を開発し、その有効性を車両運動制御系評価への適用によって検証した。特に、「制御方式」と「制御アルゴリズム」の性能を区別して評価する点が本研究の特徴である。可制御領域の大きさを評価指標とした開発手法により、車両の4輪操舵制御方式と直接ヨーモーメント制御方式に対する制御アルゴリズムの性能を評価した。その結果、これらの制御アルゴリズムが制御方式の性能を十分には引き出してはいないことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Toward an improvement in safety of nonlinear control systems, a method that can analytically evaluate the performance of nonlinear control systems is developed and its effectiveness is validated through the application of the method to the evaluation of vehicle chassis control systems. The feature of this study is that the developed method distinguishes the performances of "control method" and "control algorithm". Performances of two control algorithms to a four-wheel steering control method and a direct-yaw-moment control method are evaluated by the developed method that uses a size of a controllability region as an evaluation index. The results show that two control algorithms cannot exploit full potential of the four-wheel steering control method and direct-yaw-moment control method.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：制御系評価 車両運動制御

1. 研究開始当初の背景

第2期科学技術基本計画には、21世紀初頭に我が国が目指すべき国の一つの姿として、「安心・安全で質の高い生活のできる国」が掲げられている。この基本計画の実現に対し、工学的側面において解決すべき重要な問題として人工物の安全性確保が挙げられる。ますます複雑化する人工物を正確に機能させるためには高度な制御系が必要となり、このような制御系がいかなる状況でも安全に動作するかどうかを事前に検証しておくことは、システムの実際の運用の側面から極めて重要である。

制御系の検証プロセスは図1に示すように、制御系設計の後半に位置し、机上検証と実機検証に大別できる。机上検証の目的は、入力パターン・システムパラメタ・外部環境の想定される変化に対する制御系の安全性を検討し、コストと時間のかかる実機検証をできるだけ削減することにある。

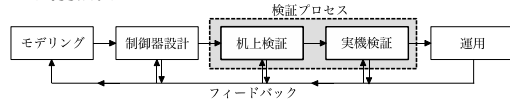


図1 制御系設計における検証プロセス

制御系の机上検証問題は、安全性が絶対的な要件となる実システムにおいては制御系設計問題以上に重要であるにもかかわらず、従来はほとんどがシミュレーションによる検討のみであった。シミュレーションではある特定の初期条件と特定の入力に対する応答のみを調べるので、設定した条件以外の状況における制御系の性能は保証されない。したがって、より信頼性のある検証方法が必要とされるが、このような研究はほとんど行われてこなかった。研究代表者はいち早くこの問題の重要性に気づき、2004年から継続して科研費による制御系の解析的検証手法の研究を行ってきた。最近になって制御システム研究者の間でも解析的検証手法の研究が注目を集めつつあり、2010年12月にアトランタで開催されたCDC(Conference on Decision and Control)ではVerification of Control Systems(制御系の検証)と題するワークショップが企画された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点である。

【1. 非線形制御系の性能保証にも適用可能な新しい解析的検証手法の開発】 従来、システムのロバスト性を評価する目安として H_{∞} ノルムなどが用いられてきたが、このような指標は非線形系には適用できない。実際的な非線形制御系に適用可能な新たな解析的検証法を開発する。特に本研究においては、従来の制御系評価では区別されていなかった「制御方式」と「制御アルゴリズム」の性能を区別して評価できる手法の開発を目的とする。ここで、制御方式とは図2(a)に示すように、制御対象に対してどの入力チャンネル

ルを用いて制御を行うかを表し、制御アルゴリズムとは、与えられた入力チャンネルに対してどのような制御則を用いて制御を行うかを意味する。

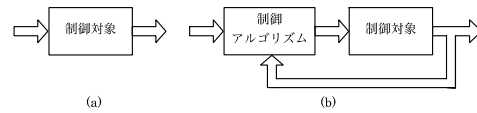


図2 制御方式(a)と制御アルゴリズム(b)

当然のことながら、両者を区別して評価すれば「制御アルゴリズムの性能 \leq 制御方式の性能」となる。このように従来はその区別が曖昧であった2つの性能の限界を理論的に明らかにできる手法を開発する。

【2. 検証手法の実際の非線形制御系への応用1】 実際的な非線形制御系として、自動車のシャシ制御系を対象とし、開発した解析的検証方法を応用して、その有効性を検証する。シャシ制御系には前輪操舵、前後輪操舵、左右輪の制駆動力差による直接ヨーモーメントなど各種の入力チャンネルを用いた制御があり、それらの入力チャンネルの違いによる制御方式の性能を制御アルゴリズムの性能と区別して評価する。

【3. 検証手法の実際の非線形制御系への応用2】 提案手法の特徴を生かし、上記2の制御方式の性能に対して、代表的な制御アルゴリズムの性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) 初期段階の検討

区間解析法を用いた手法の検討

新たなアプローチとして、上限と下限をもつ「区間」の演算である区間解析を制御系の性能保証に適用し、性能が保証できるシステムパラメタの変動範囲を区間解析の逆問題として求めることを検討した。求められたシステムパラメタの許容変動範囲であれば、どのようなパラメタ変動でも制御システムの性能が保証できることになる。

まず、区間解析の逆問題を解くアルゴリズムの開発およびその制御系検証への具体的な適用方法を検討した。一般に逆問題は順問題を繰り返し解くことによって解くことができることに着目し、一種のbisection methodによって許容できるパラメタの範囲を徐々に絞っていくアルゴリズムを考案した。この方法を線形制御システムに対する簡単な例題に適用した。線形システムの安定性はその固有値で決定されることから、固有値が安定な範囲内で変動することを保証できるパラメタの範囲を、考案したアルゴリズムで求めた。その結果、計算効率の面では問題があるものの、考案したアルゴリズムで区間解析の逆問題を解くことができ、パラメタが変動する線形システムの性能保証に適用できることがわかった。

さらに、この手法を非線形システムに適用

すべく、非線形システムの安定性保証に用いられるリアプノフ関数に着目し、アルゴリズムの改良を行った。しかし bisection method による順問題の繰り返し解法は、パラメタ数が多い非線形システムに対しては計算時間の面で問題があることがわかった。すなわち、逆問題を解いて解を得るまでに必要な計算時間が、パラメタの数に対して指数関数的に長くなり、実用性に欠けるという問題である。

また、この手法を非線形システムのリアプノフ関数に適用すると計算時間とは別の問題があることも明らかになった。すなわち、リアプノフ関数は安定性の必要条件ではあるが、必要十分条件ではないことに起因し、求めたパラメタの許容変動範囲がかなり保守的になって正確な評価が難しいという問題である。

可制御領域を用いた手法の検討

区間解析に基づく方法には上記のような問題点があることが明らかになったので、これに代わる解析的な制御系の性能保証方法を種々検討した。その結果、システムの逆時間軌道計算にもとづく可制御領域法を用いることが最も適当であると判断された。可制御領域とは、制約条件を満たす入力によって有限時間内 t_f に安定な平衡点へ到達することができる初期状態の集合である。可制御領域の内部から出発する運動は理論的に安定な平衡点に到達できることが保証されるので、可制御領域が大きいほど性能保証できる範囲が広いことになる。可制御領域の境界を求める問題を、最適な制御入力 $u(t)$ 、 $0 \leq t \leq t_f$ を求める一種の非線形最適制御問題としてつぎのように定式化した。

状態方程式： $\dot{x} = -f(x, u)$ (逆時間システム)
 終端拘束： $x(t_f) = O$ (終端時刻で原点に到達)
 入力不等式拘束： $u_L \leq u \leq u_U$ (入力の上下限)
 評価関数： $f = |x(t_f)|$ (終端時刻における状態量のノルム)

この最適制御問題は制御入力を離散化し、パラメタ最適化問題として解く「直接法」という最適制御問題が解法によって数値的に解くことができる。

簡単な例題への適用

上記の可制御領域計算法を2つの簡単な例題に適用して、その有効性を検討した。

【例題1】 不安定2次線形系の原点まわりの可制御領域を考える[1]。このシステムは不安定であるが、可制御なので入力に拘束がなければ可制御領域は状態空間全体となる。しかし入力に不等式拘束がある場合、可制御領域は状態空間の部分集合になる。入力に対する不等式拘束を

$$|u(t)| \leq 1$$

として、で述べた方法により最適制御問題を解き、 $t_f = 1, 3, 5$ [s] に対する可制御領域を求めた。その結果を図3に示す。図中には参考文献[1]に示されている可制御領域の理論値も示している。この図から $t_f = 5$ [s] の場合、本手法によって求めた可制御領域は理論

値をよく近似していることが確認できる。また、到達時間が短いほど可制御領域は小さくなっていることがわかる。

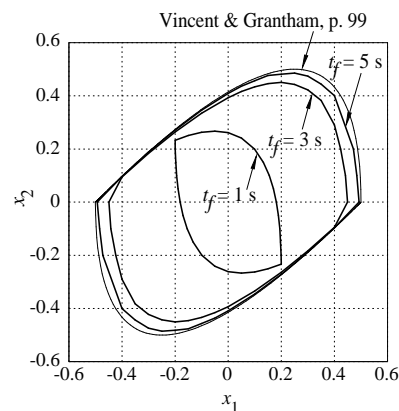


図3 2次系の可制御領域

【例題2】 3次系の原点に関する可到達領域を考える[2]。入力に対する不等式拘束は前の例題と同じとして、3次元可到達領域の $x_1 - x_2$ 平面への射影を求める。結果を図4に示す。本手法により $t_f = 5$ [s] として計算した可到達領域は理論値をよく近似していることが確認できる。

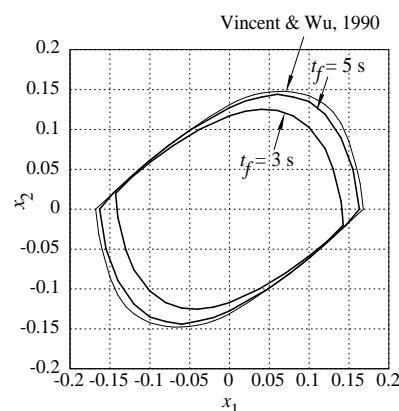


図4 3次系の可到達領域

以上の例題から本手法によって可制御領域を求められることがわかった。例題では線形システムを取り上げたが、本手法は数値的最適化に基づく手法であるため、線形・非線形に関係なく広い範囲のシステムに適用可能である。

(2) 車両運動制御系への適用

開発したシステムの逆時間軌道最適化に基づく可制御領域の計算法を車両運動制御系の性能検証に応用する。研究の目的で述べたように、本研究では制御方式の性能と制御アルゴリズムの性能を区別して評価する点が特徴である。そこで、制御方式として

- 1) 通常の前輪操舵方式 (2WS)
- 2) 前後輪操舵方式 (4WS)
- 3) 左右輪の制駆動力差による直接ヨーモーメント制御方式 (DYC)

を取り上げ、可制御領域の計算により、その制御限界を明らかにする。DYC に関しては、前輪のみ、後輪のみ、前輪と後輪の左右制駆動力差を用いる方式をそれぞれ f-DYC, r-DYC, fr-DYC と呼び、それぞれの特性を比較する。

つぎに、4WS 方式と DYC 方式に対する代表的制御アルゴリズムの性能を検討する。4WS 方式に対する制御アルゴリズムとして最も単純な前輪舵角比例後輪操舵を、DYC 方式の制御アルゴリズムとして横すべり角ゼロ化制御を取り上げ、その制御限界を可制御領域の大きさによって検討する。

4. 研究成果

(1) 車両モデル

各制御方式、制御アルゴリズムの基本的な特性を把握するため、図 5 に示すような簡単な 2 輪モデルを用いた。

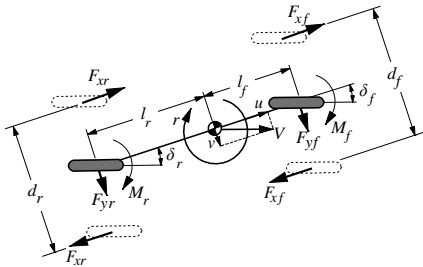


図 5 車両モデル

このモデルはシンプルではあるが、タイヤの横すべり角に対する横力の非線形特性、タイヤの前後力と横力の非線形的な干渉特性を考慮しているため、タイヤ力が限界となる非線形領域における各制御方式および制御アルゴリズムの特性を検討するための基本的な条件を備えている。

(2) 制御方式の比較

通常の 2WS 制御方式を用いた場合と、4WS 制御方式および DYC 制御方式を用いた場合の可制御領域を比較した。すなわち、2WS では可制御領域が最大となるように前輪舵角 $d_f(t)$, $0 \leq t \leq t_f$ のみを最適化する。これに対して 4WS では前輪舵角と後輪舵角を、DYC では前輪舵角と各輪の前後力を最適化する。

図 6 は 2WS と 4WS の可制御領域を示している。この計算では最大許容舵角を 2° とした。この図からわかるように、後輪操舵を加えることによって、第 1 象限と第 3 象限において可制御領域が広がっていることがわかる。しかし、第 2, 第 4 象限では 4WS による可制御領域の拡大効果はほとんど見られない。すなわち、4WS の効果は横速度とヨー角速度が同符号をもつ領域のみで顕著であり、これらが異符号をもつ領域ではほとんど効果がないことを示している。これが 4WS 制御方式の限界性能である。

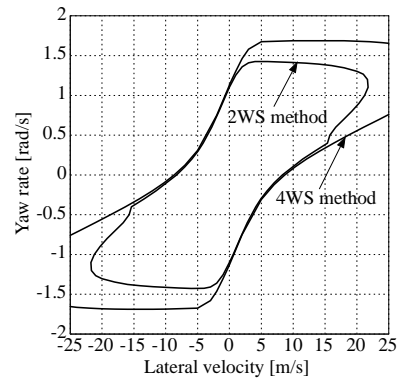


図 6 可制御領域の比較 (2WS 方式と 4WS 方式)

図 7 は DYC において、前輪の左右前後力差でヨーモーメントを制御する f-DYC の可制御領域と 2WS の可制御領域を比較している。この計算では最大許容舵角を 2° 、最大許容前後力を 1 kN とした。4WS の場合と比較して、f-DYC 方式は第 2, 第 4 象限の可制御領域を拡大する効果があることがわかる。

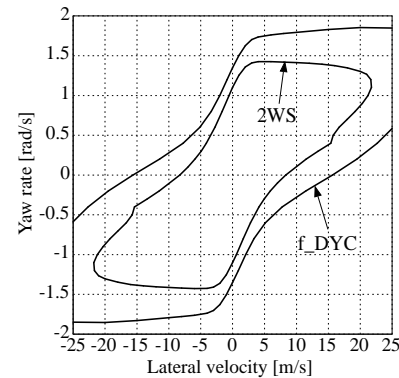


図 7 可制御領域の比較 (2WS 方式と f-DYC 方式)

図 8 は後輪の左右制駆動力差でヨーモーメントを制御する r-DYC 方式の可制御領域と 2WS の可制御領域を比較している。f-DYC の可制御領域と比較して r-DYC 方式は第 2, 第 4 象限における可制御領域拡大効果が小さいことがわかる。これは後輪の方が鉛直荷重が小さく、使用できるトータルのタイヤ力が小さいことに起因するものと考えられる。

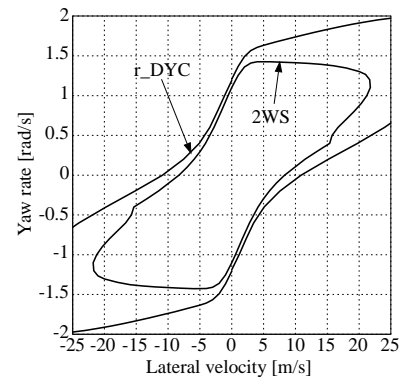


図 8 可制御領域の比較 (2WS 方式と r-DYC 方式)

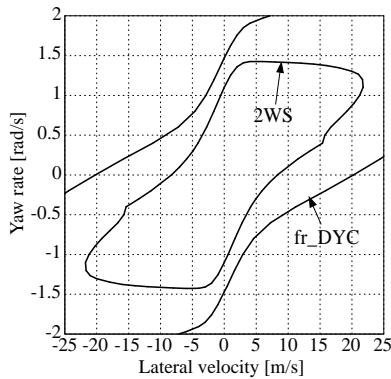


図9 可制御領域の比較 (2WS方式とfr-DYC方式)

図9は前輪と後輪の左右制駆動力差でヨーモーメント制御するfr-DYC方式の可制御領域と2WSの可制御領域を比較している。前輪のみあるいは後輪のみの左右制駆動力差を用いるf-DYC, r-DYC方式と比較して, fr-DYC方式は最も大きな可制御領域拡大効果をもつことが明らかである。

(3) 制御アルゴリズムの比較

まず4WSの制御アルゴリズムとして最も初期に提案された前輪舵角比例後輪操舵制御について検討した。このアルゴリズムでは、後輪舵角 d_r は前輪舵角 d_f に比例してつぎのようにフィードフォワードで制御される。

$$d_r = k d_f \quad (1)$$

4WS制御方式の評価においては d_f と d_r を最適化したが、4WS制御アルゴリズムの評価では、後輪舵角 d_r は式(1)によって制御され、前輪舵角のみを最適化する。

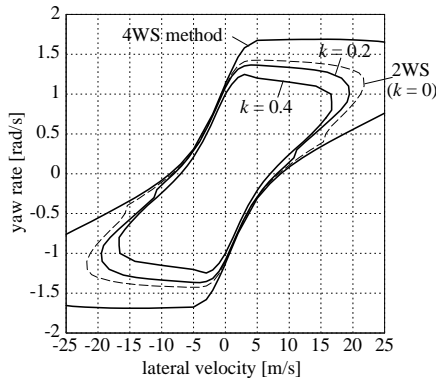


図10 4WS制御方式と4WSアルゴリズムの比較

最大許容舵角を 2° として、前後輪比例ゲイン k を変化させた時の可制御領域を図10に示す。比例ゲインを大きくするほど、可制御領域が狭くなっている。比例ゲインを0.4程度まで大きくすると、ドライバの操縦性に対する評価は向上することが報告されているが、非線形領域における純粋な制御性能のみで見ると、式(1)の制御は通常の2WSより劣ることがわかる。

以上の結果は、前輪舵角比例後輪操舵制御は4WS制御方式の能力を十分には引き出せていないことを示している。前輪舵角比例後輪操舵制御は線形領域における操縦性を改

善する効果はあるが、限界領域における制御性能を向上させるためには、より4WS制御方式の能力を発揮できるような高度な制御アルゴリズムが必要である。

つぎに、DYC制御アルゴリズムの一つとして前輪舵角に比例して左右前輪の前後力差によるヨーモーメント M_f を制御し、車体の定常横すべり角をゼロとする制御アルゴリズムを取りあげ、その性能を検討した。このアルゴリズムはつぎのように表される

$$M_f = k_d d_f \quad (2)$$

ここで

$$k_d = \frac{4l_r K_f K_r - 2l_f K_f m^2}{2(l_f K_f - l_r K_r) + mV^2} \quad (3)$$

である。

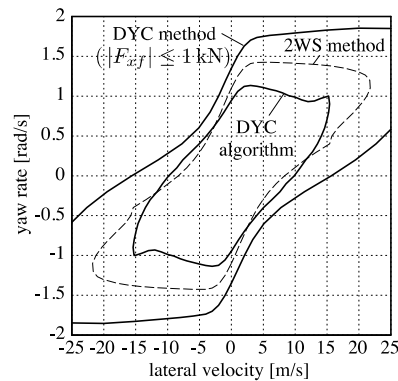


図11 DYC制御アルゴリズムの効果

図11は式(2)、(3)で表されるDYCアルゴリズムの可制御領域を示している。この図からわかるように、このDYCアルゴリズムはDYC制御方式の能力を一部しか引き出していない。式(3)で計算される制御ゲインを用いると、前輪舵角の最大値 2 deg に対して 1.32 kN の前後力を発生させることができる。この前後力はDYC制御方式における前後力の最大値 1 kN より大きい、その制御能力を可制御領域の拡大に対して有効に利用していない。

(4) 結論

以上の結果はつぎのようにまとめられる。

- 1) 4WS制御方式, DYC制御方式とも, 通常の2WS制御方式より可制御領域を拡大する効果がある。
- 2) 可制御領域の拡大効果は4WSよりDYCの方が顕著である。
- 3) DYC制御方式でも, 前輪のみあるいは後輪のみの左右駆動力差を用いるより, 前後輪の制駆動力を協調して使用する方が可制御領域の拡大には効果がある。
- 4) 前輪舵角比例後輪操舵制御アルゴリズムは, 4WS制御方式の可制御領域拡大能力を十分には発揮できない。
- 5) 横すべり角ゼロ化DYCアルゴリズムは, DYC制御方式の可制御領域拡大能力を十分には発揮できない。

<参考文献>

- [1] Vincent, T. L. and Grantham, W. J., Nonlinear and Optimal Control Systems, Ch. 6 (1997), John Wiley & Sons.
- [2] Vincent, T. L. and Wu, Z. Y., Estimating Projections of the Controllable Set, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 13, No. 3 (1990), pp. 572-575.

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)

堀内伸一郎, 可制御領域の解析に基づく車両運動性能の評価(可制御領域の計算アルゴリズムとタイヤ特性が可制御領域に及ぼす影響), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 81, No. 826, 2015, DOI: 10.1299/transjsme.14-00078.

Horiuchi, S., Evaluation of Chassis Control Algorithms Using Controllability Region Analysis, Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics, Graz, Austria, 17-21 August 2015, M. Rosenberger et al. ed., CRC Press, 査読有, 2016, ISBN: 978-1-138-02885-2, eBook ISBN: 978-1-4987-7702-5

Horiuchi, S., Controllability Region Analysis For Simplified Vehicle Dynamics Based on Trajectory Reversing Approach, Proc. of 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, 査読有, Qingdao, China, August, 2013, USB.

Horiuchi, S. and Okada, K., Evaluation of Vehicle Maneuverability to Variations in Mass Center Location and Yaw Inertia Using Controllability Region Analysis, Proc. of 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Seoul, Korea, August, 2012, USB.

Horiuchi, S., Evaluation of Chassis Control Method Through Optimisation-based Controllability Region Computation, Vehicle System Dynamics, 査読有, Volume 50, Supplement 1, 19-31, 2012.

[学会発表](計3件)

Misawa, T. and Horiuchi, S., Design of Variable Gear Ratio Steering for Automotive Vehicles Considering

Braking Operation, Proc. of 5th Pacific Asia Conference on Mechanical Engineering, Manila, Philippines, 28, August, 2012.

Isomura, K. and Horiuchi, S., A New Driving Support System Based on Driving Pattern Classification, Proc. of 5th Pacific Asia Conference on Mechanical Engineering, Manila, Philippines, 28, August, 2012.

Yoshizumi, R. and Horiuchi, S., Experimental Investigation on Steer-by-Wire System Using Micro Electric Vehicle. Proc. of 5th Pacific Asia Conference on Mechanical Engineering, Manila, Philippines, 28, August, 2012.

[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