

平成 21 年 5 月 19 日現在

| |
|---|
| 研究種目：基盤研究 (C) |
| 研究期間：2007～2008 |
| 課題番号：19560242 |
| 研究課題名 (和文) 分岐解析と最適化に基づく非線形制御系の解析的検証手法と車両運動制御系への応用 |
| 研究課題名 (英文) Analytical Clearance Method for Nonlinear Control Systems Based on Bifurcation Analysis/Optimization and Its Application to Vehicle Control System |
| 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：本研究の目的は、非線形制御系にも適用可能な実用的かつ信頼性のある机上検証手法を開発し、車両運動制御系への応用例からその有効性を示すことである。従来研究が不十分であった制御系の検証（性能保証）問題を取り扱い、非線形系を対象として分岐解析を用いた新しい検証手法を開発する点が本研究の特徴である。研究の結果、非平衡状態を等価平衡状態と見なして分岐解析を行う新たな検証手法が開発され、車両運動制御系への適用からその有効性が確認された。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2008年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |

研究分野：車両運動制御

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御、分岐解析、最悪入力、制御系評価

1. 研究開始当初の背景

各種の制御系を実システムに搭載する際には安全性を保証する目的から、運用前に十分な検証を行い制御系の性能、特に安定性について確認しておくことが重要である。制御系の検証プロセスは制御系全体の設計プロセスの後半に位置し、シミュレーションなどによる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ついて想定されるシステムパラメタの変動、入力パタンの変化などに対する安定性・追従性などの制御性能を保証することである。従来

はシステムパラメタの範囲を適当なグリッドに分割し、各グリッドにおいて予め規定されたテスト入力に対するシミュレーションを行って制御系の性能を評価する「グリッド法」と呼ばれる方法が用いられてきた。しかし、この方法は多くの条件で計算しなければならぬため非常に手間がかかると同時に、すべての条件の組み合わせをシミュレーションによって検証することは実際問題としては不可能であることから、結果の信頼性に問題がある。特に非線形システムの安定性は動作点や入力の大きさによって大きく変わるため、非線形制御系に対しても適用可能な、

より効率的かつ信頼性のある机上検証手法が必要とされている。

戦闘機の飛行制御系設計においては広い運動領域における制御系の性能保証限界を明らかにするため、制御系の机上検証を **flight clearance** と称し、制御系設計の重要な1段階として位置づけている。ヨーロッパではフランス、ドイツ、イギリスなど7カ国の研究機関によって構成された研究グループの重要な研究課題として **flight clearance** のための新しい手法の検討が進められている。しかし、このグループで検討されている手法は線形モデルに基づく構造化特異値解析、 μ 解析、 v ギャップメトリック解析、多項式ベース解析などであり、非線形システムに対する机上検証手法は十分には検討されていない。また、これらの方法ではパラメータ変動に対する評価のみを行い、入力パターンは予め定めた規定入力を用いることになっているので、入力の変化に対する性能の保証が不十分である。

2. 研究の目的

本研究は上記のような背景のもと、非線形制御系にも適用可能な効率的かつ信頼性のある机上検証手法を開発し、具体的な応用例からその有用性を示すことを目的とする。具体的な目標はつぎのとおりである。

(1) 非線形制御系に適用可能な机上検証手法の開発：近年研究が進んでいる非線形システムに対する分岐解析と、研究代表者が開発してきた最悪入力による非線形制御系評価手法を組み合わせ、効率的かつ信頼性のある机上検証手法を新たに開発する。この方法により制御系にとって最も危険なシステムパラメータと入力パターンが求められ、性能を保證できるシステムパラメータの組み合わせと入力の範囲を明らかにできる。

(2) 具体的な非線形システムへの提案手法の応用 提案手法を車両運動制御系の評価に適用し、具体的なシステムの検証に対する有効性を示す。車両運動制御系（四輪操舵制御、ブレーキトルク制御、サスペンション制御など）の不具合は直接人命に関わることから、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。この問題に提案手法を応用して最も危険な条件を特定することにより、車両安全性の向上に寄与する。

3. 研究の方法

制御系の検証は、入力を一定と見なした平衡状態における静的な性能保証と、入力が時間とともに変動する場合の動的な性能保証に分けることができる。静的な性能保証は非線形系に対する分岐解析を応用し、動的な性能保証は研究代表者が提案している最悪入力による方法を適用する。

(1) 分岐解析による車両の安定性検討

システムに対する入力を分岐パラメータと見なした分岐解析により、静的な平衡状態の安定性を検討する。分岐解析には一般の **continuation method** を用いる。前後運動、横運動、ヨー回転、ロール回転、4輪の回転を考慮した8自由度車両モデルを用い、前輪舵角を分岐パラメータ見なした分岐解析から車両の安定性を検討する。このとき、同一の速度で異なる車両の安定性を比較するためには、速度を一定値に拘束しながら分岐解析を行う手法が必要とされる。本研究ではこのような拘束条件がついた場合に適用できる新しい分岐解析手法として、**Constrained Bifurcation and Continuation Method (CBCM)** と呼ぶ手法を開発し、これを用いて解析を行った。

(2) 分岐解析の拡張

本研究で応用の対象としている車両運動においては、加減速によってその安定性が変化することは経験的によく知られている。しかし、加減速状態は分岐解析の対象である平衡状態とならないため、平衡点の性質を検討する通常分岐解析手法をそのまま適用することはできない。そこで本研究では、加減速時に発生する慣性力（見かけの力）に等しい仮想的な外力を仮定し、加減速状態を擬似的に平衡状態と見なす等価平衡状態法 (**Equivalent Equilibrium State Method : EESM**) を提案した。これは定常状態に対する分岐解析を非定常状態にも適用可能なように拡張し、応用範囲を拡大するものである。

以上の **CBCM** および **EESM** により、入力が一定であれば、平衡状態はもとより加減速を伴う非平衡状態であっても、これを等価平衡状態入力見なすことによって安定性の検証が可能となる。

(3) 等価平衡点まわりの安定領域

非線形システムでは安定な平衡点の近傍に安定領域が存在することが知られている。この安定領域の大きさは制御系の一つの性能指標となるが、一般にこの安定領域は n 次元状態空間内の部分空間となるため、これを正確に求めることは非常に難しい。そこで、本研究では、システムの特性を代表する2つの状態変数からなる超平面内で安定領域を求める手法を用い、制御系検証の一指標とすることを提案する。また、前述のように **EESM** によって非平衡状態も等価な平衡状態と見なすことにより、加減速時の安定領域も求めることが可能となる。

(4) 制御系の検証

以上の方法を、後輪操舵制御系 (**Four Wheel Steer: 4WS**) と左右輪の前後力差によってモーメントを制御する直接ヨーモーメント制御 (**direct Yaw moment Control: DYC**) を装備した車両の性能検証に適用した。

(5) 最悪入力による制御系の検証

入力が時間とともに変化する動的運動状態における制御系の性能を検証するため、最悪入力法を適用する。最悪入力とは、指定された入力の上下限内でシステムを最も不安定な状態に陥れるような入力である。このような最悪入力に対して制御系の性能が保証できれば、その入力上下限内のどのような入力に対しても性能が保証できることになる。

解析的に最悪入力を求めることは非常に簡単なシステムに対してしか実現できない。そこで、数値的な最適化手法を応用し、非常に複雑なシステムでも最悪入力を求める手法を開発した。この手法は一般に「直接法」と呼ばれる最適制御計算手法を用いたものであり、離散化した入力を最適化パラメタと見なして数値シミュレーションにより評価関数を計算し、これを用いて非線形計画法により最悪入力を求めるものである。この方法の特徴は、非常に複雑なシステムでも適用可能な点、大規模な数値計算手法が確立し、多くの計算パッケージが存在する非線形計画法を用いる点などである。

4. 研究成果

(1) 分岐解析による車両の安定性検討

CBCM による車両の安定性解析の結果を図 1 に示す。横軸が入力である前輪舵角、縦軸は車両の代表的な状態量である横速度とヨーレートである。各舵角において、CBCM により速度は 30m/s 一定に維持されている。図中の実線は安定な平衡点を示す。この図から全ての舵角に対して平衡点は安定であることがわかる。

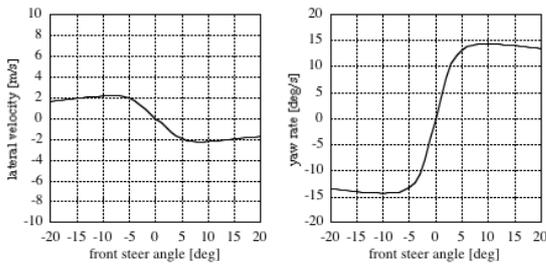


図 1 車両モデルの分岐線図

(2) 減速状態の分岐解析

図 2 は同じ速度で減速度を 0.3G としたときの分岐線図である。図中の破線は不安定な平衡点を表す。直進状態のゼロから舵角を増加させていくと、舵角 2.4 度で安定平衡点が一旦消滅し、5.2 度で再び安定平衡点が現れる。図中のアミかけ部は安定な平衡点が存在しない舵角の範囲を表す。この範囲の舵角では安定な定常円旋回が不可能であることがわかる。また、舵角 2.4 度では Fold 分岐と呼ばれる分岐が発生している。図 3 は減速度が 0.4G となったときの分岐線図である。減速度

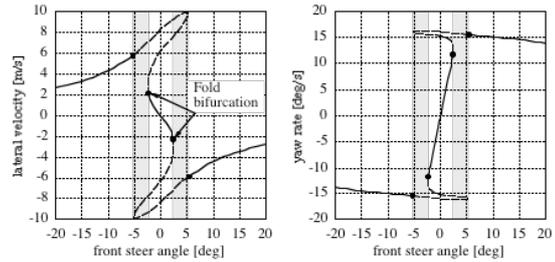


図 2 車両の分岐線図 (-0.3G 減速状態)

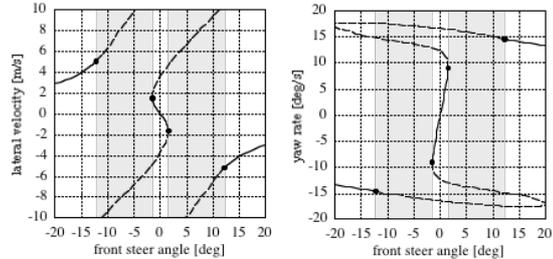


図 3 車両の分岐線図 (-0.4G 減速状態)

が増すに従って、不安定平衡点の存在範囲が広がり、安定して定常円旋回のできる領域が狭くなる。

(3) 等価平衡点まわりの安定領域

等価な安定平衡点まわりの安定領域を図 4, 5 に示す。

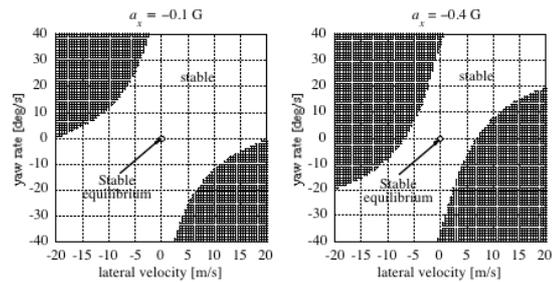


図 4 安定領域 (舵角 0, 減速度変化)

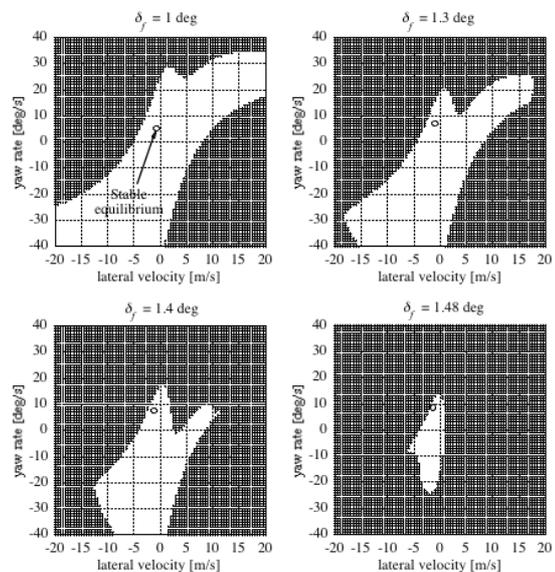


図 5 安定領域 (減速度 0.4G, 舵角変化)

このように舵角の変化，減速度の変化によって安定領域が大きく変化することを明らかにすることができた。

(4) 制御系の検証

4WS, DYC の効果を CBCM と EESM によって検討した結果を図 6, 図 7 に示す。

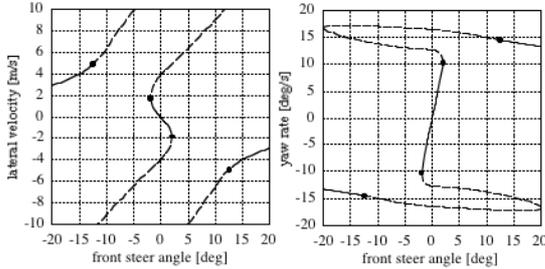


図 6 4WS の分岐線図 (減速度 0.4G)

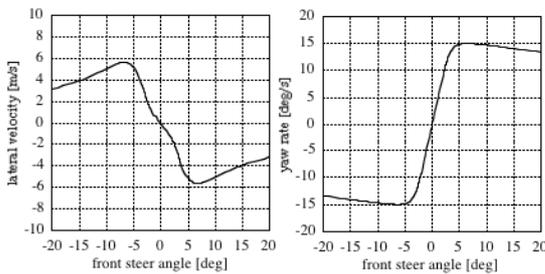
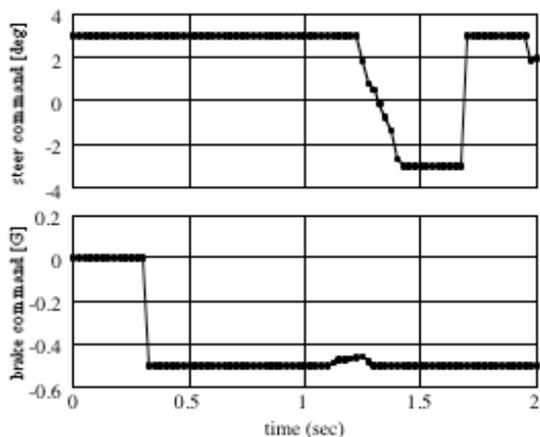


図 7 DYC の分岐線図 (減速度 0.4G)

図 6 から減速度が高い領域では，4WS は安定性向上にあまり効果がないことがわかる。これに対して図 7 の DYC は全舵角の範囲で安定性を維持しており，制御効果が高い。これらの結果は限界領域における DYC の有効性を定量的に示すものである。

(5) 最悪入力による制御系の検証

最悪操舵入力・ブレーキ入力の一例を図 8 に示す。



この例は舵角 ± 5 度，減速度 0.5G の範囲で，2 秒以内に横すべり角を最大にする操舵角とブレーキ入力を求めたものである。このとき終端時刻における横すべり角は 38 度であった。この結果から，舵角 ± 5 度，減速度 0.5G

の範囲でどのような入力を加えても，横すべり角は 38 度以下になることを保証できることになる。

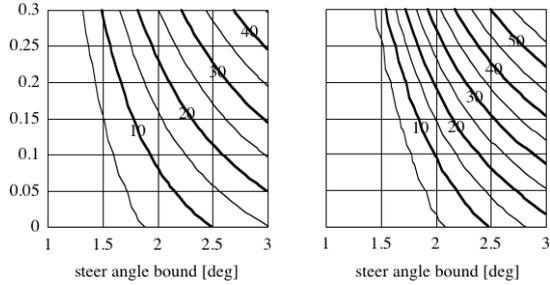


図 9 最悪入力による性能保証範囲

図 9 は横軸に舵角入力の上限，縦軸に減速度の上限を取って，最悪入力を加えたときの最大横すべり角を等高線で表したものである。左は制御なしの車両，右は 4WS の結果である。横すべり角 5 度以下を保証できる舵角入力と減速度の領域は 4WS の方が広い。しかし，横すべり角が 30 度以上の限界領域では，逆に 4WS の性能保証範囲が狭く，安定性を悪化させていることがわかる。この結果は，限界領域における 4WS の弱点を表している。

以上，(1) から (5) の結果は，本研究で開発した拘束条件付き分岐解析法 (CBCM)，等価平衡状態法 (EESM)，最悪入力評価法が制御系の机上検証において，きわめて有効であることを示している。

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 2 件)

- ① Horiuchi, S., Okada, K., and Nohtomi, S., Analysis of Accelerating and Braking Stability Using Constrained Bifurcation and Continuation Methods, Vehicle System Dynamics, Vol. 46, Supplement, 585–597, 2008 (査読あり)
- ② Okada, K., Nohtomi, S. and Horiuchi, S., Effects of Structure/Controller Simultaneous Optimization on Improvements in Vehicle Stability and Handling, Review of Automotive Engineering, Vol. 29, No. 4, 663-671, 2008 (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 長嶺拓也，堀内伸一郎，品質工学的アプローチによる車両運動制御系設計，日本機械学会第 17 回交通・物流部門大会，川崎，2008 年 12 月 10 日
- ② Okada, K., Nohtomi, S. and Horiuchi, S., Assessment of Chassis Control Systems

Using Constrained Bifurcation and Continuation Method, 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Kobe, Japan, October, 7, 2008.

- ③長嶺拓也, 堀内伸一郎, 品質工学的アプローチによる車両運動制御系設計, 2007年度自動車技術会関東支部学術研究講演会, 東京, 2008年3月6日
- ④Horiuchi, S., Okada, K., and Nohtomi, S., Analysis of Braking Stability Using Constrained Bifurcation and Continuation Methods, International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD) Symposium, Berkeley, CA, USA, August, 16, 2007.
- ⑤Kiyota, O. and Horiuchi, S., Application of Bifurcation Analysis to the Lateral Dynamics of Road Vehicles, 4th Pacific Asia Conference on Mechanical Engineering, Philippines, August, 29, 2007.

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

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし