

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05876

研究課題名(和文) 微分ゲーム理論を応用した非線形制御系の解析的検証手法の開発とその応用

研究課題名(英文) Development of an analytical validation method for nonlinear control systems based on the differential game theory 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：入力やパラメタの変動，外乱などに対する非線形制御系の性能を保証するための解析的手法を開発し，その有効性を車両運動制御系への適用によって検証した．微分ゲーム理論に基づき，システムを最も不安定な状態に陥れる最悪入力に対する制御器の挙動によってシステムの性能を保証する方法を開発した．この方法が車両の4輪トルクコントローラの性能保証に適用された．その結果，どのような入力に加えられても横すべり角の最大値をある値以下に保証できる入力の範囲を理論的に決定することができた．

研究成果の概要(英文)：A method to ensure the performance of nonlinear control systems against variations of input commands, system parameters, and disturbances is developed and applied to a vehicle chassis control system. Based on the differential game theory, the method to validate the control system performance by the action of the controller to the worst-case input that makes the system most unstable. This method is applied to the four-wheel torque controller of a road vehicle. The results show that the method can determine the upper and lower bound of inputs in which the sideslip angle keeps lower value than some specified value for any inputs within the boundary.

研究分野：車両運動制御

キーワード：制御系検証 車両運動制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 制御系の性能保証

経済産業省から発表された「平成 26 年度経済産業政策の重点」によると、新たなフロンティア「戦略 4 分野」に資源を集中投入すべきであることが謳われており、4 分野の 1 つに「安全・便利な次世代インフラの構築」が挙げられている。具体的にはヒト・モノが安全・快適に移動することのできる安全運転システムや自動走行システムの開発が重要とされている。このような安全性重視の基本政策に対し、工学的側面において重要な課題は人工物の安全性保証である。前述の自動走行システムはもとより、ますます複雑化する人工物の性能を十分に発揮させるためには高度な制御システムが不可欠であり、このような制御システムが動作環境や制御対象の変動、入力の変化に対しても確実に動作できる条件を明らかにし、システムの安定性・制御性を保証しなければならない。

(2) 制御系の検証プロセス

制御系の検証プロセスは図 1 に示すように机上検証と実機検証に大別でき、机上検証は制御系設計と実機検証の中間に位置する。

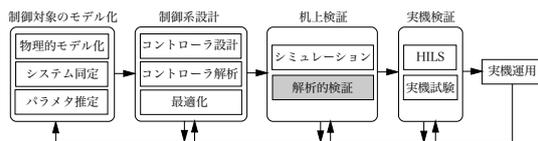


図 1: 制御系開発における検証プロセスの位置づけ

その目的はすべての入力条件・運用環境と制御対象パラメータの変動に対し実機試験が安全に実施できることを確認すると同時に、時間とコストのかかる実機検証の工数を削減することである。従来は制御対象と制御器のモデルを用いたシミュレーションによる検証が主として行われていたが、シミュレーションはある特定の条件における「特殊解」が得られるのみで、すべての条件における性能を確認することは不可能であり、より信頼性の高い机上検証手法の開発が必要である。このような制御系の机上検証問題は安全性が最も重要な要件となる実システムの開発においては制御系設計以上に重要な問題であるにもかかわらず、従来は十分な研究が行われてこなかった。

(3) 車両運動制御系の性能保証

近年の車両（自動車）には横すべり防止制御、アクティブ前輪操舵、四輪操舵、直接ヨーモーメント制御など各種の電子的シャシ制御系が組み込まれており、安全性・操縦性の向上に大きな役割を果たしている。これら制御系の性能を検証するためにさまざまな走行条件における多くの実車試験が必要である。しかし、このような実車実験は多大な費用と時間を要する上、実験では全ての走行条件における性能を検証することは理論的に不可能である。より信頼性の高い解析的な制御系検証方法が望まれている。

2. 研究の目的

以上のような背景の下、本研究の目標は以下の 3 点である。

【1. 非線形制御系にも適用可能な新しい解析的手法の開発】 微分ゲーム理論に基づく制御系の新しい解析的検証方法を開発する。この方法は数値的な最適化手法を用いてシステムを最も不安定な状態に陥れるシステムパラメータと入力、外乱などを求め、このような最悪状態における制御系の性能を検証するものである。システムパラメータ、入力および想定される外乱の変動範囲内における最悪パラメータ・最悪入力・最悪外乱を数値的に求め、このような状態でも制御系の性能が保証できれば、変動範囲内のあらゆるパラメータ・入力・外乱に対して性能を保証できることになる。このような方法は数値的な最適化手法に基づくので、システムの線形・非線形にかかわらず適用できる点が大きな特徴である。

【2. 開発手法の実験的な制御系検証への適用】 開発した検証手法を実験的な制御系に適用し、その有用性を示す。ここでは実験的な制御系の例として、「経済産業政策の重点」でも取り上げられている車両の安全運転システムを考える。車両制御システムの性能は人命に直接かわるため、従来は実車を用いた実験的検証が必要であったが、提案手法により実車を用いた検証実験を大幅に削減できるとともに、実験が困難な条件における検討も可能となる。

【3. 従来の解析的検証手法との比較検討】 研究代表者が従来から開発してきた解析的検証手法と本手法を比較検討し、開発手法の実用性・信頼性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 微分ゲーム理論に基づく制御系の性能保証

上述のように、本研究では微分ゲーム理論に基づく制御系の解析的的性能保証方法を提案する。微分ゲームとは力学系において各プレイヤーがそれぞれの評価関数を最適化しようとする戦略を求めるものであり

- ・1 プレイヤ問題
- ・複数プレイヤー問題

に大別できる。本研究では図 2 のようプレイヤー 1 を入力コマンド、プレイヤー 2 をシステムパラメータ、プレイヤー 3 を外乱、プレイヤー 4 をコントローラとみなし、プレイヤー 1 から 3 はシステムをできるだけ不安定な状態に陥れるような戦略を取り、プレイヤー 4 はシステムを安定な状態に保とうとする。

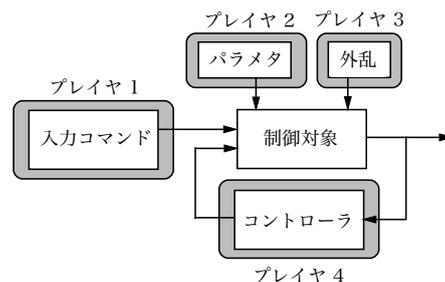


図 2: 微分ゲーム理論に基づく制御系の性能保証

プレイヤー 1 から 3 が戦略をとり得る範囲、すなわち入力コマンド、パラメタ変動、外乱の上下限を与え、この範囲内の戦略にも拘らず、プレイヤー 4 がシステムの性能を維持することができれば、計算範囲内のあらゆる制御コマンド、パラメタ変動、外乱に対して制御系の性能が理論的に保証できることになる。

(2) 数値計算手法

微分ゲーム問題は最適制御問題として定式化でき、興味深い応用例も多いが実際的な非線形システムについて解かれた例は少ない。その一つの理由は等式・不等式拘束条件を含んだ非線形の最適化問題に対し、数値解を得るための効率的なアルゴリズムがなかったことによると思われる。特に本研究ではプレイヤー 1, 3 の戦略はコマンド・外乱を表す時間とともに変化する関数、プレイヤー 2, 4 の戦略は時間に関係しないパラメタ(システムパラメタ、コントローラパラメタ)で記述されるため、時間関数と時間に関係しないパラメタを同時に最適化することが必要となる。このような問題の数値解法を種々検討した結果、「直接法」と呼ばれる数値的最適化手法が最も有効であると判断された。この方法では連続的な時間関数を等間隔でサンプリングした離散的な値で置き換え、適当な補間を用いてシステムの状態方程式を解くことにより、評価関数、不等式拘束条件、等式拘束条件が全て離散化されたパラメタの非線形関数として表現される。従って、これら離散化された時間関数と時間に関係しないシステムパラメタは同じように扱うことができ、逐次 2 次計画法などの非線形数値最適手法によって解くことができる。

また、このような複雑な最適化問題では解が局所最適解に捕えられ、本来の最適解が得られない可能性が高まる。各種の大域的最適化手法が適用可能であるが、ここでは最適解の推定値(初期値)を複数のランダムな初期値から最適化を行う multi-start 法を用いた。

(3) 車両運動制御系への応用

① 車両モデル 図 3 は検証に用いた車両モデルを示している。

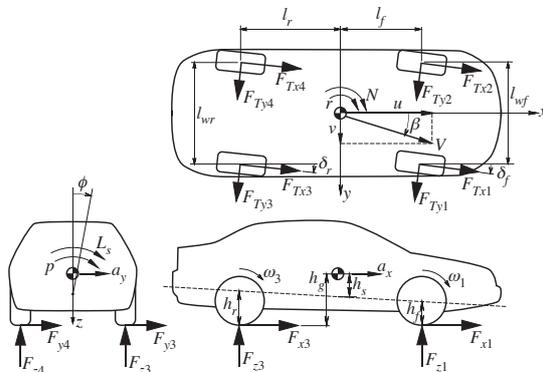


図 3: 車両モデル

このモデルは前後・左右・ヨー・ロールおよび 4 輪の回転、前後・横加速度に伴うタイヤ鉛直荷重の変化を考慮した現実的なものであり、タイヤ

の前後力と左右力の相互干渉、タイヤ力発生に関する遅れを考慮している。

② 制御系設計 シヤシ制御の例として簡単な分岐コントローラを用いた。分岐コントローラはパラメタ変化に対する平衡点の分岐特性を望ましいものになるように、分岐パラメタの関数として入力を制御するものである。上記の車両モデルの前輪舵角入力に対するヨーレイトの分岐線図を図 4 に示す。

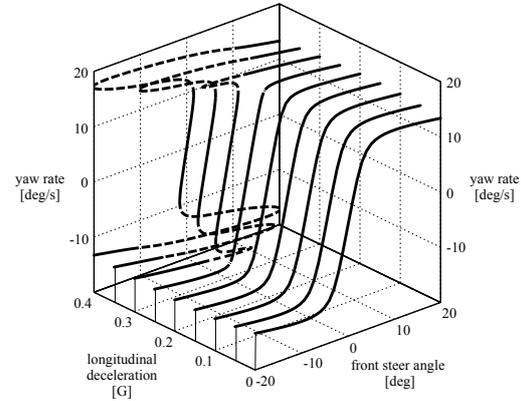


図 4: 車両モデルのヨーレイト分岐特性

この図で実線は安定な平衡点、破線は不安定な平衡点を示す。この図からわかるように、前後減速度がゼロの場合、前輪舵角 ± 20 度の間は安定な平衡点が存在し、定常円旋回が可能であるが、減速度が大きくなるにしたがって不安定な平衡点の領域が広がり、減速度 0.4 G ではほぼ舵角 0 度の近傍しか安定な円旋回ができない。

図 5 は目標とする規範ヨーレイトの分岐線図であり、全ての減速度において前輪舵角 ± 20 度の範囲に安定な平衡点が存在し、定常円旋回ができることを制御目標とする。

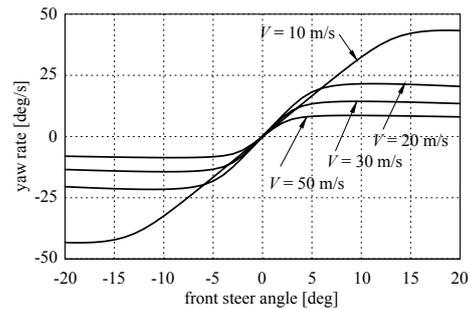


図 5: 制御目標とする規範ヨーレイトの分岐特性

この制御目標を達成するため、規範ヨーレイトと実際のヨーレイトとの差と各タイヤの鉛直荷重に応じて各タイヤのトルクを制御するコントローラを設計した。

③ 最悪入力の計算 まず 1 プレイヤ問題として、入力コマンドの時間関数の最適化を行った。車両の運動状態は横すべり角が大きくなると不安定になることから、終端時刻における横すべり角を最大化するような最悪前輪舵角コマンドと最悪ブレーキコマンドを 3-(2) で述べたように最適制御の数値的解法である直接法を用いて求めた。

時間関数の離散化は 0 から 3 秒を 40 等分、車両の初期状態は車速 30m/s における直進走行状態とした。

4. 研究成果

(1) 制御なし車両に対する最悪入力

図 6 は制御なしの車両に対し、前輪舵角 δ_f の最大値を ± 1 deg、ブレーキコマンドによる最大減速度 δ_b を 0.05G とした場合の最悪入力に対する横すべり角とタイヤ力の利用率 η を示している。タイヤ力利用率は

$$\eta = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\mu F_z}$$

のように定義され、タイヤが発生できる最大の摩擦力 μF_z に対する前後力 F_x ・横力 F_y の合力の割合を示す。タイヤ力利用率が 1 になると、タイヤ力が最大値に達し、さらなるタイヤ力を発生させる余裕がゼロになることを意味する。図 6 から最悪舵角は最大舵角で左右に切り返し、最悪ブレーキは終端時刻の直前に最大減速を行っていることがわかる。この車両の固有振動数はほぼ舵角入力の切り返し周波数に一致している。このことは最悪入力が車両の固有振動数に一致した舵角の切り返しによって共振を発生させ、横すべり角の振幅を徐々に大きくして終端時刻における横すべり角を最大化しようとしているものと解釈できる。しかし、終端時刻における横すべり角は 1.02 度であり、車両が不安定化するまでには至っていない。すなわち、前輪舵角 ± 1 deg、減速度を 0.05G までの範囲ではどのような入力を加えても車両を不安定化させることはできないことが保証される。また、タイヤ力利用率は最大でも 0.3 程度で、まだ十分に余裕がある状態であることがわかる。

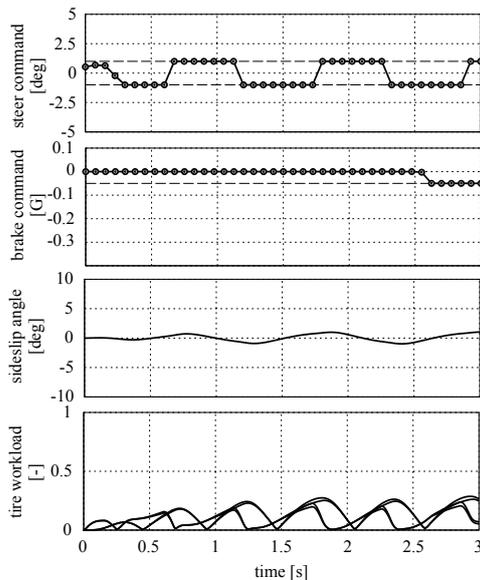


図 6: 最悪コマンドと横すべり角応答:制御なし
($\delta_{fmax} = 1$ deg, $\delta_{bmax} = 0.05G$)

図 7 は前輪舵角の最大値を ± 4 deg、ブレーキコマンドによる最大減速度 δ_b を 0.3G とした場合の最悪入力に対する横すべり角応答とタイヤ力利

用率を示している。図 6 とは異なり、周期的な操舵は行われず、ブレーキはほぼ全時間にわたって最大値を維持している。その結果、横すべり角は急激に増大し、不安定な状態に陥っている。また、タイヤ力利用率は急激に 1 に近づき、タイヤ力の余裕がほぼゼロであることを示している。

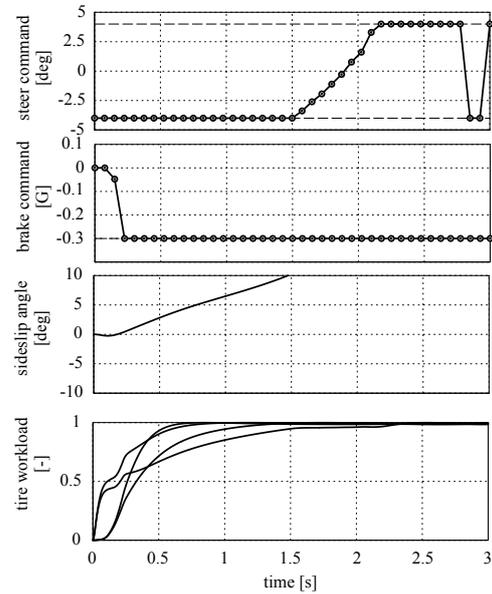


図 7: 最悪コマンドと横すべり角応答:制御なし
($\delta_{fmax} = 4$ deg, $\delta_{bmax} = 0.3G$)

(2) 制御あり車両に対する最悪入力

最悪入力に対して、3-(3)-②で設計した 4 輪トルクコントローラの効果を検討する。

図 8 は制御あり車両に対し、前輪舵角 δ_f の最大値を ± 1 deg、ブレーキコマンドによる最大減速度 δ_b を 0.05G とした場合の結果である。

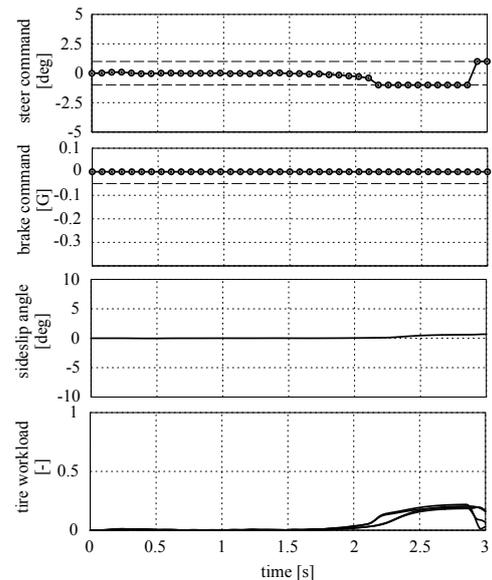


図 8: 最悪コマンドと横すべり角応答:制御あり
($\delta_{fmax} = 1$ deg, $\delta_{bmax} = 0.05G$)

制御なし車両とは異なり、舵角コマンドは 2 秒までほぼゼロであり、最後の 1 秒間で最大・最小に切り替えているが、トルクコントローラの効果によ

って終端の横すべり角は 0.64 度と、制御なし車両の 62%まで減少している。

図 9 は前輪舵角 δ_f の最大値を ± 4 deg, ブレーキコマンドによる最大減速度 δ_b を 0.3G とした場合の結果である。同じ条件で制御なしの図 7 と比較すると、同じコマンド入力の上下限にも関わらず、トルクコントローラの効果により、終端における横すべり角は 3.14 度にしかならず、車両が不安定化することを防いでいる。また、タイヤ力利用率は 1 に達しておらず、まだ余力があることを示している。この結果は、前輪舵角 ± 4 deg, 減速度を 0.3G までの範囲ではいかなる入力コマンドを加えても、トルクコントローラが車両の横すべり角を 3.14 度以下に抑えることができることを理論的に保証するものである。

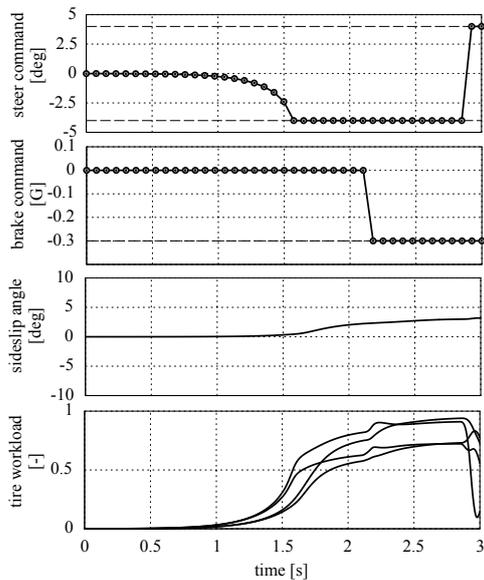


図 9: 最悪コマンドと横すべり角応答: 制御あり
($\delta_{fmax} = 4 \text{ deg}, \delta_{bmax} = 0.3G$)

(3) 性能保証範囲の等高線プロット

以上のような最悪入力コマンドに対する終端時刻における横すべり角は、入力コマンドの上下限によって変化する。そこで、入力コマンドの上下限を変化させ、それに対する終端横すべり角の関係を求めた。

図 10 は制御なし車両について、横軸に前輪舵角の最大値、縦軸に最大減速度を取り、最悪入力に対する終端時刻の横すべり角を等高線で表したものである。最大舵角と最大減速度が大きくなる右上の領域では横すべり角の終端値が 40 度を超えるような不安定な状態に陥る。図中の A 点は終端横すべり角が 2 度であるが、同じ最大減速度でも舵角を大きくとることを許すと a の方向に移動し、終端横すべり角が大きくなる。また、舵角の最大値が変わらなくとも、最大減速度を大きく取ると b の方向に移動し、終端横すべり角が 2 度を超える。

図 11 は制御あり車両に対する横すべり角の等高線プロットである。制御あり車両では舵角の最大値を 5 度にとっても終端の横すべり角は 4 度程

度である。この図から、どのような制御コマンドに対しても、終端時刻における横すべり角をある値以下にすることを保証できる前輪舵角と減速度の範囲を定めることができる。

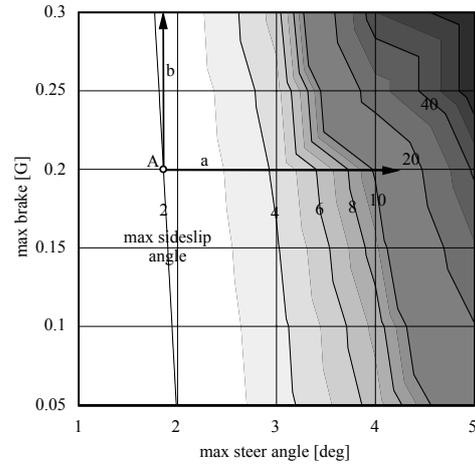


図 10: 入力コマンドに対する横すべり角: 制御なし

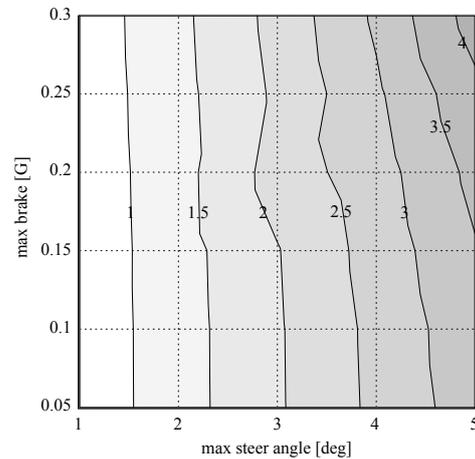


図 11: 入力コマンドに対する横すべり角: 制御あり

(4) 他の手法との比較

図 12 は以前開発した分岐解析に基づく性能保証法の一例を示している。

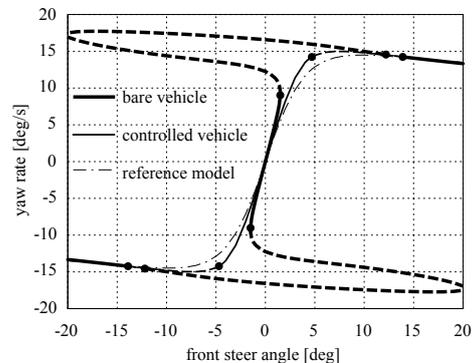


図 12: 分岐解析による性能保証

この図は前輪舵角に対する平衡点のヨーレイトを示したもので、実線は安定な平衡点、破線は不安定な平衡点を示す。制御なしの車両は舵角が約 2 度を超えると安定な平衡点が存在せず、定常円旋回ができない。制御ありの車両は、規

範モデルのヨーレイトに近い安定平衡点の実現できていることがわかる。このような分岐解析に基づく方法は、平衡点の特性だけに着目しているが、微分ゲームの考え方に基づく最適化による性能保証方法は、動的な操舵に考慮することができる点の特徴である。

(5) 結論

以上の結果は以下のようにまとめられる。

- ① 微分ゲームの考え方に基づく制御系の性能検証法を提案した。
- ② 最悪入力・最悪パラメタの数値計算法について、直接法の適用を検討し、妥当な解が得られることを確認した。
- ③ 提案する手法を車両運動制御系に適用し、理論的に性能を保証できる入力の範囲を示すことができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 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, 自動車技術, 査読無(依頼原稿), Vol. 70, No. 12, 14-19, 2016.
- ② 堀内伸一郎, ドライバモデル構築の基礎, 自動車技術, 査読無(依頼原稿) Vol. 70, No. 4, 72-77, 2016.
- ③ 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.

[学会発表] (計6件)

- ① 石井昂瑠, 堀内伸一郎, 接近離間状態評価指標を用いた緊急時におけるドライバの制動反応時間推定, 日本機械学会第26回交通・物流部門大会, 2017.
- ② 山田大貴, 堀内伸一郎, 操舵応答の確率的ロバスト性を考慮した車両操縦安定性の多目的最適化と最適解の特性, 第61回日本大学理工学部学術講演会, K6-17, 2017.
- ③ Yamada, H. and Horiuchi, S., Multi Objective Optimization of Vehicle Handling Performances Taking into Account of Vehicle Parameter Uncertainty and Driver's Subjective Rating, Proc. of 6th Pacific Asia Conference on Mechanical Engineering, 2017.
- ④ 山田大貴, 堀内伸一郎, ドライバの主観的評価を考慮した車両操縦安定性の多目的最適化—バッテリー搭載位置が操縦安定性に及ぼす影響, 日本機械学会第25回交通・物流部門大会, 2016.
- ⑤ 山田大貴, 堀内伸一郎, ドライバの主観的評価を考慮した車両操縦安定性の多目的最適化, 第60回日本大学理工学部学術講演会, K6-28, 2016.
- ⑥ Horiuchi, S., Evaluation of Chassis Control Algorithms Using Controllability Region

Analysis, Proc. 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, USB memory, 2015.

[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