

論文の内容の要旨

氏名：伊 澤 正 樹

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：非線形車両運動方程式の線形化手法および筋骨格数理モデルを用いた自動車のロールフィールの定量化に関する研究

近年、自動車の普及により我々の生活は豊かに変わり社会生活を営む上で自動車は必要不可欠なものとなった。日本では1世帯当たりの普及台数が1996年には1.0台を超え自動車は誰でも望めば所有できる対象となり、それに伴いユーザーが自動車に求めている条件も変化している。日本の最新の調査では「運転のし易さ」に次いで「乗り心地の良さ」「安全性・安心感」「燃費の良さ」「スタイル・デザイン」であり、ユーザーが性能の良い車はもちろん運転に対する快適性を求めていることが分かる。また最近の自動車業界を取り巻く状況はCASE（Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric Drive）と呼ばれるIT業界をも巻き込んだ4つの大きな技術革新の流れが同時進行で起きている。CASE進化の中で電動化（Electric Drive）に関してはインホイールモータへの発展性も含めて4輪独立駆動制御などが考えられ電動モータを用いたきめ細かな車両運動性能設計のニーズが出てくると考えられる。また、自動運転（Autonomous）に関してはレーンキープなどのステア制御、前車自動追従などの駆動制動制御はもとより緊急回避時などはステア、ブレーキ、サスペンションによる3軸協調制御など新たな車両運動性能の設計ニーズが高まると予想できる。また自動運転車両は基本的にはパーソナルユースとして様々な道路環境に対応してレーンキープ、加速減速、コーナリングなど複雑な走行が要求されるためオートパイロットによる車両姿勢制御性能が直接的に乗員の感じる車両フィールの良し悪しに影響を与える。人の運転操作が不要となる分乗員の感じる車両フィールの良し悪しは自動車メーカーの対他競争力強化と差別化のための新たな源泉となり官能指標を定量化して評価する効率的な性能設計手法のニーズが従来にも増して高まると考えられる。これらの背景から本論文では機械としての自動車性能を解析・評価する新たな手法として多自由度非線形運動方程式の線形化により操縦安定性と乗り心地性能を一元的に扱うことが可能なモデルの導出と線形解析手法の提案、およびマンーマシン系ツールとして見た自動車の官能指標である走行フィールを定量化し解析・評価する手法の提案の二つを平行研究した結果のまとめである。以下にそれぞれの概要を説明する。

多自由度非線形運動方程式の線形化手法

従来から車両の操縦安定性は横加速度が小さい線形近似領域では平面2自由度モデルを基本に必要なに応じてロール挙動との連成を考慮できるヨー、横速度、ロール運動のメカニズム解析手法が提案されている（樋口他，2002）、（酒井他，2005）、（皆川，2007）、（藤岡，山本，2010）、（山本，藤岡，2015）。さらに旋回中の加減速を含む運動は準定常状態の概念を導入した解析手法（Abe, 1986）あるいは重心点スリップ角を基準としたヨーモーメントで安定性を判定する手法（芝端他，1993）など解析解算の代替手法も提案・実用化されている。また乗り心地性能を解析する場合は単純な上下の1輪2自由度モデルあるいは4輪ロール・ピッチ・バウンスモデルによる複合振動の解析手法が紹介されている（巨，1966）。これらの線形簡易モデルは、構造が簡単で手計算でも解析的な見通しが立て易いため車両設計の初期段階における簡易的解析手法として現在でも多用されているが、ばね、ダンパー要素によるサスペンション機能を介在させたロール、ピッチ、バウンス、ヨー運動を一元的に扱うことができない欠点がある。車両運動性能を精密に解析するためには少なくとも、ばね上6自由度、4か所のばね下1自由度および操舵系自由度をサスペンション特性も含めて考慮する必要がある。この問題を解析するためには、通常は剛体の多自由度非線形運動方程式を解く必要があるが、一般には非線形運動方程式の解析解は得られないため線形解析のように見通しの良い解析結果は得られない欠点がある。本論文ではこの点を改善する目的で多自由度非線形運動方程式をテイラー展開の手法により線形化した。同時に非線形タイヤモデル（Magic Formula）で計算される横力をスリップ角で偏微分し線形化した。その結果従来の操縦安定性解析で用いられる平面2自由度モデルでは解析できないヨーレイトなどの平面運動とロールレイトなどのばね上運動の連成解析など車両全体を一元的に解析することが可能となった。

ロールフィールの定量評価手法

運転の快適性の向上には路面から受ける車両振動の低減、走行音の低減に加え、旋回時におけるドライ

バーが感じるロールフィールの改善が重要である。ここで車体振動および走行音の低減に関しては、振動理論的なアプローチにより、走行中の音(noise)は防振材等を適所に用いて減少させる技術がある。また車体振動については路面から伝わる上下振動を制御する技術 (Karnopp et al., 1974) が既に量産技術として適用されている。一方でロールフィールに関してはドライバーの操舵操作による車両の旋回に付随してロール挙動が起ることからドライバーは操舵感と一体に官能値としてロールフィールの良し悪しを強く感じるようになる。このため従来から多くのロールフィール研究がおこなわれてきた。車両の物理特性と官能評価の関連付けとしてロールレイトとピッチレイトの位相と官能評価を関連付けた研究 (田尾他, 2016), また更に生体指標を介在させて車両物理値と乗員の表層筋の筋電位あるいは脳波とロールフィールの官能評価との関連付け等によるものがある (吉岡他, 2017)。このように車両物理値と生体指標と官能評価の三者を関連付けロールフィールの客観評価を試みる取り組みが行われてきたが筋電あるいは脳波などの生体指標とロールフィールの官能評価が直接的に関連していることを示すことは難しく統計的处理による関連付けを行うのが現状だと思われる。そこで本論文では介護現場、スポーツ等の負担軽減解析などに実績のある筋骨格数理モデルを用いた筋負担定量化技術を走行中の車両を操作するドライバーの負担解析に適用しロールフィールの定量化を行った。一般的に、スポーツ等の運動時における筋肉や関節への負担度の定量化に関する研究では、モーションキャプチャを用いた 3 次元筋骨格モデルによる筋骨格解析が用いられている (渡辺他, 2018)。しかし、自動車の乗り心地に関しては、ドライビングシミュレーター乗車時のドライバーの筋骨格解析は行われているものの (尾林他, 2010) 実走行中の車両ではあまり行われていないのが現状である。そこで本研究では、自動車走行時のドライバーの運転姿勢をモーションキャプチャで撮影することで 3 次元筋骨格モデルを作成し、従来からの研究でも行われている解析手法である時間軸上における駆動トルクの変化と筋活性度の解析から筋肉と関節の負担度を定量的に解析する。これらの解析結果を用いて、実走行中の車両でのドライバーの身体へかかる負担を定量化しサスペンションの減衰特性違いが走行中の車両を操作するドライバーが感じるロールフィールの違いに与える影響を定量的に比較し考察した。

サスペンションの減衰力を用いた車両姿勢制御の検討

ロールフィールの定量化研究の結果を念頭に多自由度非線形運動方程式の線形化による解析として車両姿勢を比較的簡単に変更できるサスペンションダンパーに着目し、ダンパー特性が旋回中の車両のヨー応答、ロール姿勢に与える影響を調べた。円旋回中に路面からロールを励起する外乱を受けた際のヨー応答は操舵によるヨー応答とは異なり減衰特性の影響を強く受けることがわかり、操舵時のロールフィールに好適な減衰特性と路面外乱に対応するヨー応答を適切に抑えるそれぞれ異なる減衰特性の設定値があることが示唆された。ヨー応答、ロール応答の伝達関数の根とゼロとの関係を解析し操舵入力、路面入力双方の入力に対して最適なヨー応答およびロール姿勢となる減衰特性の設計手法を検討した。

まとめ

(1) ばね上 6 自由度、ばね下系、操舵系を含む多自由度非線形運動方程式を線形化することでサスペンションのばね特性、減衰特性を明示的に考慮可能な状態空間モデルを導出し車両の平面運動と上下運動を統一的に取り扱うことが可能となった。その結果車両設計の初期段階からフルビークルモデルに対し操縦安定性、乗り心地性の車両運動解析を固有値解析、周波数応答など線形解析手法を用いて詳細に検討できるようになった。

(2) モーションキャプチャシステムを実走行中の自動車に用いることで、運転時のドライバーの筋骨格数理モデルを構築することができた。これを用いて自動車のサスペンション減衰違いによる車両特性 (sport mode / comfort mode) 差でのドライバーの首回りの筋負担解析を行った結果から、運転操作としては sport mode のほうが体を一定の姿勢に保ちやすく運転しやすいことが確認できた。これは従来から行われている駆動トルクの時間軸データの変化を用いて、自動車の乗り心地の官能評価と物理値を定量的に関連付け出来たと考えられる。また、運転しやすい車両には適正なロール姿勢があることも推察される。

計算機の能力はこれからも向上し計算コストは低下し続けると予想できる。本論文で提案した多自由度非線形運動方程式の線形化手法と線形解析手法および筋骨格数理モデルを用いたロールフィールの定量化手法は単独での使用はもとよりシミュレーションでの両者の連成計算により最適ロールフィールを実現するロール姿勢制御則の検討、およびその結果を利用し可変ダンパー等を搭載する車両に適用して実走による筋骨格数理モデルを用いた解析・評価へ展開する MBD 開発への発展が期待できる。これらの数理情報工学的アプローチの動機付けに基づき今後も継続研究していく予定である。