

博士學位論文

内容の要旨
および
審査結果の要旨

第39編

令和3年度

神奈川工科大学

は し が き

本編は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条によるインターネットの利用により公表を目的として、令和3年度内に本学において博士の学位を授与した者の、論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は、学位規則第4条第1項（いわゆる課程博士）によるもの、乙は、同規則同条第2項（いわゆる論文博士）によるものであることを示す。

< 目 次 >

甲第44号	勝山 悦生	駆動系の電動化時代における車両6自由度運動統合制御の研究 1
-------	-------	------------------------------	---------

氏名(本籍)	勝山 悦生 (石川県)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲第 44 号
学位授与日	令和 4 年 3 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻名	工学研究科 機械システム工学専攻
学位論文題目	駆動系の電動化時代における車両 6 自由度運動統合制御の研究
論文審査委員	(主査) 山門 誠 教授 河原崎 徳之 教授 佐藤 智明 教授 クライソ・トロンムチャイ 教授 堀内 伸一郎 特任教授 (日本大学)

内容の要旨

自動車の内燃機関が電気モータに置き換わろうとしている。電気モータは正負のトルクを高応答、高精度に制御できるほか、小型設計も容易なため、複数のモータを各輪に配置して駆動力配分制御を行うことも可能である。一方、駆動力配分制御の研究自体は電動化前の時代から盛んに行われており、各輪のタイヤ負荷率を均等化する配分制御によりタイヤ限界域の運動性能を向上させる狙いのものが多く見られる。限界域の性能向上に研究が集中しているのは、左右駆動力配分は原理的にその領域においてヨーモーメントを効果的に発生できることがその理由の一つであるが、その他にも、従来の制御装置の多くに用いられていた多板クラッチやブレーキ等の摩耗耐久性への配慮が必要だったこともある。そのため、作動頻度を低減するべく制御領域を絞らざるを得なかった。しかし、今後、左右輪に独立したモータを搭載する車両が登場すると状況は一変し、そのような制約に縛られず駆動力配分が可能となるため、普段使用する常用域における運動性能の向上に注目が集まることは必至である。

しかしながら、常用域における駆動力配分制御の適用は容易ではない。タイヤ限界域においては、車両のスピン等の破綻を避けることが最優先事項であり、平面運動における操縦安定性のみを考慮した制御設計で問題なかったが、常用域においては、平面運動に加えロールやピッチ等のばね上の微小な動きも大切な設計要素である。平面運動だけを考慮した駆動力配分制御を適用すると、各輪で発生するサスペンション反力が車体を上下させるため、意図せぬロールやピッチ挙動が生じてしまう。さらにはステアやサスペンション等の制御装置も加わると、狙い通りの車両 6 自由度運動の制御設計は困難を極める。これまでにそのような力の連成を考慮した統合制御法は存在せず、今後、電動化が進むにつれて多くの研究者らがこの課題に直面することは避けられない。駆動用モータを含む任意の制御装置の組

み合わせにおいて目標運動を実現するために、如何に適切に各制御装置に対して指令を行うか、筆者はそこに焦点をあて、電動化時代に向けた車両 6 自由度運動統合制御を研究テーマとして取り組んだ。

本研究では、従来の制御設計法を根本から見直し、次の手順で制御指令する構造を提案している。まずは、ドライバ入力に対して狙いとする車両運動を設定し、次にそれを実現するための車両重心 6 分力を時々刻々と演算する。そして、その重心 6 分力を発生させるために必要なタイヤ力を求めるという流れである。しかし、それを実現するには三つの大きな課題があった。一つ目は、タイヤ力は各輪の前後力、横力、上下力と考えると 12 分力あり、要求された重心 6 分力を実現する解は一意に定まらないこと。二つ目は、タイヤの前後力、横力に対しばね上には慣性力やサスペンション反力が働くため、それらを考慮しなければならないこと、三つめは、搭載する制御装置が限られる場合、タイヤ 12 分力のうちの一部しか制御できないことである。それらの課題を克服するために、次に示す方法を考案した。

まずはタイヤ 12 分力のそれぞれについて、車両重心点に働く力及びモーメントとのつり合い式を立て、重心 6 分力を 6 行 12 列の係数行列とタイヤ 12 分力ベクトルの積で表現した。ここでラグランジュの未定乗数法を用いることで、すべての力の連成が考慮された、出力を最小化する解が求められるが、それを解く前に、そのタイヤ 12 分力ベクトルの前後力、横力を各輪荷重の平方根で正規化する処理を割り込ませることで、狙いの車両 6 自由度運動を実現しつつ、さらに各輪のタイヤ負荷率の均等化が可能となることを示した。そして、タイヤ 12 分力のうちの一部が制御できない場合については、前記係数行列の不要な列を削除した上で求解する方法を取った。このとき、係数行列の列数が、行数と同じか下回る場合については、逆行列あるいは最小二乗法を用いることで、適切な解が求められることを示した。

以上、本研究において、力が複雑に連成する駆動力アクチュエータを含むどのような制御装置の組み合わせの車両においても、目標 6 自由度運動を設定するだけで、それを実現する、あるいは目標との誤差を最小化する解を、反復演算することなく代数的に求められるモデルベース統合制御法の構築に至った。この提案制御法を“Generalized Distribution Policy”，略して“GDP”と呼ぶ。GDP は、複数のアクチュエータに対し適切に統合制御できるだけでなく、制御装置の少ない低自由度制御車両に対しても 6 自由度運動を指令できることが最大の特徴であり、例えば、駆動モータのみを搭載する車両に対し、平面運動だけでなくロールやピッチ運動にも制御指令するという革新的な使い方が可能となる。制御装置の数や種類によらず適用できる本制御は、開発効率の飛躍的向上にも貢献でき、今後の電動化時代に向けての基盤技術となり得る。

審査経過の要旨

1. 審査の経過

- (1) 令和3年10月18日(月)、機械システム工学専攻博士後期課程勝山 悦生君より、指導教員山門 誠に対し学位請求論文が提出され、多少の手直しをした後、10月27日(水)機械システム工学専攻会議を実施し、予備審査の開始が承認され、直ちに予備審査に当たる教員に配布された。
- (2) 令和3年11月23日(火)午前9時30分から11時5分までC5号館204室(デザインスタジオ)で予備審査会を実施した。本請求論文は基本的にその独創性、有用性、信頼性、完成度から判断して、本審査に十分耐えうるものであるという結論に至った。ただし、審査委員から指摘のあった点に関し、論文中において修正やさらに詳しく親切に記述するなどの追加を行うようにとの指示があり、そちらについては、修正後各論文審査委員に展開し、指導教員が確認した時点で予備審査を終了として本審査受理の可否に向けた機械システム工学専攻会議への起案を実施してよい旨が確認された。
- (3) 令和3年11月29日(月)、上記指摘にもとづいて改善された学位請求論文が各論文審査委員、指導教員に提出され、予備審査終了が確認されたので、同日、本審査受理の可否について機械システム工学専攻会議へ起案された。
- (4) 令和3年12月1日(水)機械システム工学専攻会議における論文受理の可否投票の結果、論文受理を決定した。
- (5) 令和4年1月21日(金)研究科委員会において提出論文の受理を決定し、研究科長より上記5名がその審査委員として指名された。
- (6) 令和4年2月19日(土)午後2時00分から3時45分まで、K1棟メディアホールで公聴会・最終試験を実施した(聴講者は学外を含む40名強)。
- (7) 令和4年2月19日(土)午後3時50分から午後4時15分審査委員全員により最終試験(学力の確認・外国語)は審査過程や、公聴会での受け応え、英語による5篇の国際会議における論文の発表とProceedingsの提出がそれに代わるものとしてよい旨確認したうえで、その能力が博士(工学)として十分である(合格)と判定した。
- (8) 令和4年2月22日(火)機械システム工学専攻会議に於いて学位授与を可とした。

2. 審査結果

自動車の内燃機関が電気モータに置き換わろうとしている。電気モータは正負のトルクを高応答、高精度に制御できるほか、小型設計も容易なため、複数のモータを各輪に配置して駆動力配分制御を行うことも可能である。駆動力配分制御の研究自体は古くから行われており、操舵を伴う車両運動に関しては、タイヤ負荷率を均等化する駆動力配分等により、限界性能を向上させる研究が多く見られる。限界域の性能向上に研究が集中しているのは、左右駆動力配分は原理的にその領域においてヨーモーメントを効果的に発生できることがその理由の一つであるが、制御装置側の制約も関係して。従来の制御装置の多くは多板クラッチやブレーキが用いられていたことから、応答性や制御精度に劣るだけでなく、摩耗耐久性への配慮も必要だった。そのため、作動頻度を低減するべく、制御領域を絞らざるを得なかった。しかし、今後、左右輪に独立したモータを搭載する車両が登場すると状況は一変し、それらの制約に縛られず駆動力配分が可能となるため、普段使用する常用域における運動性能の向上に注目が集まることは必至である。

しかしながら、常用域における駆動力配分制御の適用は容易ではない。タイヤ限界域においては、車両のスピン等の破綻を避けることが最優先事項であり、平面運動における操縦安定性のみを考慮した制御設計で問題なかったが、常用域においては、平面運動に加えロールやピッチ等のばね上の微小な動きも大切な設計要素である。平面運動だけを考慮した駆動力配分制御を適用すると、各輪位置で発生するサスペンション反力が車体を上下させるため、意図せぬロールやピッチ挙動が生じてしまい、ドライバの感覚に合致した良い車両運動が実現できない。さらにはステアやサスペンション等の制御装置も加わると、狙い通りの車両 6 自由度運動の制御設計は困難を極める。現時点で有効な統合制御法は存在せず、今後、電動化が進むにつれて多くの研究者がこの課題に直面することは避けられない。駆動モータを含む任意の制御装置の組み合わせで、如何に適切な運動制御指令ができるかが今後の焦点となるはずであり、筆者は電動化時代に向けた車両 6 自由度運動統合制御の研究をテーマに取り組んだ。

本研究では、従来の制御設計法を根本から見直し、次の手順で制御指令する構造を提案する。まずは、ドライバ入力に対して狙いとする車両運動を設定し、次にそれを実現するための車両重心 6 分力を時々刻々と演算する。そして、その重心 6 分力を発生させるためのタイヤ力を求めるという手順である。しかし、それを実現するには三つの大きな課題があった。一つ目は、タイヤ力は各輪の前後力、横力、上下力と考えると 12 分力あり、要求された重心 6 分力を実現する解は一意に定まらないこと。二つ目は、タイヤの前後力、横力に対しばね上には慣性力やサスペンション反力が働くため、それらを考慮しなければならないこと、三つめは、搭載する制御装置に限られる場合、タイヤ 12 分力のうちの一部しか制御できないことである。それらの課題を克服するために、次に示す方法を考案した。

まずはタイヤ 12 分力のそれぞれについて、車両重心点に働く力、及びモーメントとの等式を立て、重心 6 分力を 6 行 12 列の係数行列とタイヤ 12 分力ベクトルの積で表現した。これをラグランジュの未定乗数法を用いることで、力の連成問題は解決され、出力を最小化する解が求められるが、それを解く前に、そのタイヤ 12 分力ベクトルの前後力、横力を各輪荷重の平方根で正規化する処理を割り込ませることで、狙いの車両 6 自由度運動を実現しつつ、さらに各輪のタイヤ負荷率の均等化が可能となることを示した。そして、タイヤ 12 分力のうちの一部が制御できない場合については、前記係数行列の不要な列を削除した上で求解する方法を取った。このとき、係数行列の列数が、行数と同じか下回る場合については、逆行列あるいは最小二乗法を用いることで、適切な解が求められることを示した。

以上、本研究において、力が複雑に連成する駆動力アクチュエータを含むどのような制御装置の組み合わせの車両においても、目標 6 自由度運動を設定するだけで、それを実現する、あるいは目標との誤差を最小化する解を、反復演算することなく求められるモデルベース統合制御法の構築に至った。この提案制御法を“Generalized Distribution Policy”，略して“GDP”と呼ぶ。GDP は、複数のアクチュエータに対し適切に統合制御できるだけでなく、制御装置の少ない低自由度制御車両に対しても 6 自由度運動を指令できることが最大の特徴であり、例えば、駆動モータのみを搭載する車両に対し、平面運動だけでなくロールやピッチ運動にも制御指令するという革新的な使い方が可能となる。制御デバイス数によらず、すべての電動車両に適用できる本制御は、開発効率の飛躍的向上にも貢献でき、今後の電動化時代に向けての基盤技術となり得る。

かくして、提出された論文は、その独創性、有用性、信頼性、完成度から判断して学位論文に値するものであり、また公刊論文及び国際会議における発表論文の内容等から見て、申請者の学力と外国語の能力が十分にあると判断された。

よって申請者は博士（工学）の学位に値するものとの結論に達した。