

論文の内容の要旨

論文題目 自己位置推定と車両運動制御を統合した自動運転バスの制御系設計

氏名 安藤 孝幸

自動運転システムに関する研究の歴史は長いものの、バスを対象とした例はまだ少なく、自動運転バスの実用化に向けた課題や道筋は未だに十分に示されていない。本研究では、交通弱者の移動手段の確保を初めとした様々な社会課題の解決手段として期待できる自動運転バスの実用化に向けて、自己位置推定と車両運動制御を統合した制御系の設計に焦点を当て、重要な研究課題を解決することでその道筋をつける。本研究の目的は以下の通りである。

- 1) 下記の要件を満たす自動運転バスの制御系を設計し、実車実験により各々の有用性を示す
 - 1-1) 自己位置推定において、質量や重心位置等のパラメータ変動を考慮し、車線を逸脱しない精度で推定できていること
 - 1-2) 縦方向制御において、車内事故低減のために加速度を抑制できていること
 - 1-3) 横方向制御において、横変位の現実的な制約条件を満たす安定的かつ収束性の高い車線維持と、精度の高い正着が両立できていること
 - 1-4) 制御系の実用化に必要なセンサ性能およびインフラ情報間隔（磁気マーカ間隔）の仕様を明示できること
- 2) 自己位置推定と車両運動制御を統合した自動運転バスのロバスト安定性やロバスト性

能を定量的に評価し、さらに公道での実証実験を通じてその有効性を示すことで、自動運転バスの制御系について、実用化への目途を付ける

2章では、自己位置推定に用いるセンサの種類および性能について述べたうえで、センサおよび車両パラメータの不確かさを考慮した自己位置推定方法について提案した。その具体的な内容を以下に記す。

本研究の自己位置推定に用いる外界センサは、測定精度、測定間隔、計測遅れ、およびロバスト性の観点から、①RTK (Real-Time Kinematic) -GNSS (Global Navigation Satellite System) /INS (Inertial Navigation System)、②3次元 LiDAR (Light Detection and Ranging)、③磁気ポジショニングシステム (磁気センサと磁気マーカの組み合わせ) の3種類とした。また、自己位置推定の精度に大きな影響を与える横すべり角の推定方法を比較し、二輪モデルを用いた、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサのノイズに影響されにくい方法を選定した。さらに、自己位置推定精度を高めるため、車両の位置やヨー角だけでなく、車両速度のスケールファクタ、ヨーレートのバイアス、および、横すべり角のスケールファクタを状態量に含め、磁気マーカを通過する際 (外界センサやインフラにより絶対座標を取得する際) にこれらのパラメータも同時に更新する手法を提案した。

3章では、地点追従制御、縦断勾配対応、信号予測制御、および ACC (Adaptive Cruise Control) 制御という4種類のパターンに分かれる縦方向制御について、車内事故を防止する観点から、前後加速度の絶対値を低減する設計方法について提案した。その具体的な内容を以下に記す。

縦方向の車両運動や走行抵抗を線形化し、CHR (Chien, Hrones, and Reswick) 法を用いて導出したフィードバックゲイン間の関係式を用いて、閉ループ系の代表根の減衰比が高くなるようフィードバックゲインを決定した。フィードフォワード制御は、目標加速度、目標速度を引数とするマップ制御とし、目標加速度に勾配加速度を足しこむことで縦断勾配に対応した。また、ACC 制御は加速度の絶対値を低減できるような手法を提案し、シミュレーションによりその効果を確認すると同時に、ストリングスタビリティも満たしていることを確認した。

4章では、車線維持精度と直進安定性の両立が求められる車線維持制御、および厳しい正着精度が求められる正着制御に分けて、センサ性能とインフラ情報が自動運転システムに与える影響を考慮しながら、横方向制御の設計方法を提案した。その具体的な内容を以下に記す。

横方向の車両運動を二輪モデルと操舵系の二次遅れ系モデルにより表現し、バスが車線を逸脱しないための制約条件から得られた2つのフィードバックゲイン間の拘束条件を用いることで、車線維持精度を保つことのできる、安定的かつ収束性の高いフィードバック制御を提案した。また、中速域以上では直進安定性が低下する恐れがあるため、6状態量フィードバック制御により減衰比を向上させることを提案し、正着制御では、新たなインフラを設置することなく車載センサのみで正着精度を達成することが可能であるかを検証するため、GNSS/INS と LiDAR を自己位置推定に用いたときの正着精度を実車実験により確かめ、さらに磁気ポジショニングシステム

を用いたときの正着精度と比較することとした。さらに、センサダイナミクスを考慮した根軌跡により、計測遅れが大きくなると閉ループ系の代表根の減衰比が小さくなること、それを考慮してセンサの切り替えをする必要があることがわかった。

5章では、センサ性能とインフラ情報の限界により生じる自己位置推定の不確かさをパラメータの不確かさとして帰結させ、2~4章で提案する自動運転バスの制御系のロバスト安定性およびロバスト性能を評価した。その具体的な内容を以下に記す。

乗車状態による質量・重心位置の不確かさ、および、コーナリング係数の不確かさの見積もりを行い、スモールゲインを用いたロバスト安定性の解析により、車両パラメータが変動しても磁気マーカ間隔が 38.6m より短ければ、制御系はロバスト安定であることがわかった。また、車両総質量が変化したときの、縦方向制御の最大ゲインや極の減衰比の変化は 5%程度と小さく、提案する縦方向制御はロバスト性能があることを確認した。横方向制御については、車両パラメータが変動しても、低速域での 2 状態量フィードバックおよび中速域での 6 状態量フィードバック共に、十分な減衰比が得られるようにフィードバックゲインを設定できることがわかり、同様にロバスト性能を確認した。

6章では、2~4章で提案する方法の妥当性や有効性を、公道での実車実験により実証した。その具体的な内容を以下に記す。

公道での実車実験により、2章で提案した、パラメータ推定を含めた自己位置推定手法を用いることで、それを含まないときより精度の高い自己位置推定を行えることがわかった。また、提案する自己位置推定手法により、右左折のように曲率の大きいところでは、磁気マーカ間隔を 10m 程度、緩やかなカーブでは 20m 程度、直線のように曲率の小さいところでは 30m 程度まで広げられる可能性があることがわかった。次に、交通量の多い“都市部”や勾配変化の大きい“中山間部”での計 2000km 以上に及ぶ公道での実車実験を通して、3章で提案した縦方向制御により、加速度の大きさを車内事故防止の目安となる、0.2G 未満に抑えられることを確認した。さらに、2状態量フィードバック制御+フィードフォワード制御を用いた車線維持制御は、曲率の大きい交差点も含めて、横変位が 0.2m 以内という車線維持精度を満たしていることを確認した。また中速域では、6状態量フィードバック制御と計測遅れの小さいセンサを用いることで、外乱のある中でも、車線維持精度を満たしながら操舵の振動を低減できることがわかった。最後に、自己位置推定に LiDAR または磁気ポジショニングシステムを使用すれば正着精度を達成できることを実車実験により確認し、新たにインフラを設置しない場合は LiDAR、インフラを設置してでも高精度な正着を実現したい場合は磁気ポジショニングシステムを使用するのが望ましいことがわかった。

7章では、提案する“自動運転バスの制御系設計”について、2~6章を踏まえた考察を行った。その具体的な内容を以下に記す。

自動運転バスに用いる自己位置推定センサの測定精度、計測遅れ、および測定間隔（磁気マーカ間隔）についての指標を得た。ここで、測定精度と計測遅れの限界は“センサ性能の限界”、磁気マーカ間隔の限界は“インフラ情報の限界”に相当する。また、縦方向制御においてはセン

サの計測遅れの影響は小さく、横方向制御の 6 状態量フィードバックで使用する 6 つの状態量のうち、特にヨーレートと横速度が、直進安定性への寄与度が大きいことがわかった。

以上より、本研究の結論は以下のようになる。

- 1) 自動運転バスに求められる要求仕様を満たすことのできる、自己位置推定と車両運動制御を統合した制御系設計手法を提案し、実車実験によりその有用性を示した。提案する制御系は下記の要素により構成される。特に、磁気マーカ間隔に代表されるインフラ情報間隔や、要求されるセンサ性能を明示できたことは、本研究の大きな成果である。
 - 1-1) 車両自己位置の推定と同時に、車両速度のスケールファクタ、ヨーレートのバイアス、および、横すべり角のスケールファクタという 3 つのパラメータ推定を行うことで、質量・重心位置の変化に対応する精度の高い自己位置推定方法
 - 1-2) 極配置により設計したフィードバック制御と縦断勾配変化を考慮したフィードフォワード制御、および加速度を低減する ACC 制御からなる縦方向制御
 - 1-3) “6 状態量フィードバック制御および計測遅れの小さいセンサ”による安定的かつ収束性の高い車線維持と、“2 状態量フィードバック制御および測定精度の高いセンサ”による精度の高い正着を両立する横方向制御
 - 1-4) 制御系の実用化に必要なセンサ性能およびインフラ情報間隔（磁気マーカ間隔）
- 2) センサ性能およびインフラ情報の限界により生じる自己位置の不確かさを、パラメータの不確かさに帰結させることで、制御系のロバスト安定性およびロバスト性能を定量的に評価した。また、公道での実証実験を通じて制御系の有効性を示すことで、制御系設計の観点から自動運転バスの実用化に目途を付けることができた