



# 環境変動や乗り心地を考慮した車両の自動運転に関する研究

吉本, 達也

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2016-09-25

(Date of Publication)

2018-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6740号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006740>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名 \_\_\_\_\_ 吉本 達也 \_\_\_\_\_

専 攻 \_\_\_\_\_ 機械工学専攻 \_\_\_\_\_

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

### 環境変動や乗り心地を考慮した車両の自動運転に関する研究

指導教員 \_\_\_\_\_ 横小路 泰義 \_\_\_\_\_

本論文は、農業用車両や乗用車の自動運転に関して、環境変動や乗り心地を考慮した車両制御手法、経路生成法に関する研究について述べたものである。

現在、日本をはじめとして農業労働力の減少や高齢化が社会問題となっている。また、自動車の交通事故も世界的規模で増加しており、大きな社会問題となっている。これらを解決する手段として、農業用車両や乗用車の自動運転が注目されている。すでに多くの民間企業や研究機関が盛んに研究を行っているが、実用化に向けて多くの課題が残っており、未だに普及はしていない。

第1章では、農業用や乗用を対象とした自動走行車の研究背景及び未解決の課題について述べた。実用化に向けての課題の一つとして、環境に存在する不確定な外乱に対してロバストな車両制御手法が確立されていないことが挙げられる。例えば、農作業を行う圃場は不整地であるため路面の凹凸が多く存在する。また、乗用車が走行する環境にも橋の継ぎ目や轍、風など、車両の制御に対して悪影響を与える外乱が多く存在する。これらの外乱は最悪の場合、車両を不安定な状態に陥れてしまい、重大な事故を招く可能性がある。したがって、走行環境に存在する様々な外乱に対して、ロバストな車両制御を行うことが必要である。また、乗用車の自動運転に関しては追従性のみならず乗り心地が重要なファクターであり、追従性と乗員の乗り心地の両立が必要である。さらに、乗用車の自動運転の場合は、周辺に走行している車両が存在する状況が頻繁に生じるため、自車両の安定性だけでなく、周辺車両との衝突を防ぐという意味での安全性を担保しなければならない。このように、自動運転においては車両の運動制御のみならず、周辺車両などの環境変動を考慮した上での走行経路生成が重要な課題である。これらの課題を解決することを目的として研究を行うこととした。

第2章では、農薬散布や作物の情報収集、作物の収穫を目的とした自動走行車の速度制御設計法を提案した。農地には路面の凹凸や傾斜などの外乱が存在するだけでなく、農薬散布や作物の積載による重量変動が生じる。そこで、外乱に対してロバストな  $H_{\infty}$  制御を基にし、重量変動に応じて制御ゲインを可変にしたゲインスケジュールド  $H_{\infty}$  制御を速度制御に適用した。また、さらなる精度向上のために積分補正や重力補正を組み合わせた制御手法を提案し、実際に凹凸の多い果樹園や牧草地で実機実験を行なうことにより手法の有効性を検証した。

果樹園での実験結果より、 $H_{\infty}$  制御に対するゲインスケジュールド  $H_{\infty}$  制御の優位性が確認され、積分補正や重力補正による精度の向上も確認することができ、これらの手法を併用することで、路面に傾斜や凹凸が存在する実際の果樹園で、牽引の有無に関わらず高精度な速度制御を実現することができた。さらに、より過酷な条件の果樹園を想定した牧

草地においても実機実験を行い、大きな凹凸があり傾斜の大きい(最大約 12(deg)) 路面においても、直線経路の走行においては十分な精度で走行できることが確認された。

第3章では、乗用自動走行車に関する乗り心地を考慮したアダプティブクルーズコントロールシステムの構築について述べた。従来のシステムは先行車に減速しながら追いつく際に、人間の操作とは異なる挙動を生じさせ、乗員に違和感を与えていた。そこで、まず熟練ドライバーによる減速行動のデータを取得し、熟練ドライバーの減速行動を再現可能な手法を提案した。熟練ドライバーによる走行データを解析した結果、ドライバーは減速開始後と減速終了前に滑らかに減速度を変化させ、なおかつ減速中は減速度を一定に保つということが明らかになった。また、減速中に先行車の速度が変動する場合は、先行車の速度に対して逐次減速度を変更するのではなく、一定の減速度を保った後、減速度を緩める段階で相対距離と相対速度を調整していることが確認された。

以上で抽出したドライバー特性に基づいた目標値の生成方法、及び目標値への追従制御を目的とした車両のモデル化と制御則の導出を行った。提案手法の有効性をシミュレーションと仮想先行車を用いた実車実験によって評価した結果、先行車追いつき時の減速制御において、提案手法を用いることでドライバー特性を再現でき、滑らかな減速追いつき制御が可能であることが確認された。

第4章では、乗用自動走行車に関する乗り心地と追従性を考慮した操舵制御系の設計法を提案した。自動運転システムの中で操舵制御は重要な役割を担っており、現在までに様々な自動車の操舵制御手法が提案されているが、乗り心地と追従性を両立する手法は未だ確立されていない。

一般的に乗り心地は加速度や加速度の微分であるジャークとの相関があるといわれており、加速度やジャークを低減するためには制御ゲインを小さく設定する必要がある。しかし、制御ゲインを小さく設定した場合、制御性能の悪化により追従性が低下する。つまり、乗り心地と追従性にはトレードオフが存在する。本論文ではこのトレードオフを解消するために、多少の誤差が許容できる道路中心近傍では乗り心地を重視してフィードバックゲインを小さく、車線を逸脱する危険性が高い状況、つまり道路中心からの偏差が大きい場合には誤差抑制を重視してフィードバックゲインを大きくするような手法として、エネルギーITS推進事業による成果であるトラックの操舵制御を乗用車に応用し、さらに制御誤差に対して非線形重みを導入する手法を提案した。また、シミュレーションと実車実験では実環境を想定した仮想外乱を印加して、外乱が存在する場合でも乗り心地と追従性の両立が可能であることを確認した。

第5章では、乗用自動走行車のレーンチェンジ経路生成法について述べた。実環境において目標経路を生成する際は道路などの静的環境だけでなく、周辺を走行する車両などの動的環境を考慮しなければならない。特にレーンチェンジでは自車が走行するレーンと異なる速度の車両が走行しているレーンにレーンチェンジを行う場合があり、横方向だけの運動を考えるのではなく、縦方向の運動も同時に考えなければならないため、より難しい問題となる。

本論文では、平面運動に時間軸を考慮した三次元空間上で経路を生成することにより、周辺車両の不確実性を考慮可能なレーンチェンジ手法を提案した。また、周辺車両との安全余裕だけでなく、最適化計算により乗員の乗り心地を同時に考慮することが可能である。周辺車両が存在する環境を再現可能なシミュレーションソフトを用いて、提案手法の有効性を確認した。その結果、レーンチェンジ経路を複数の多項式で制約することにより、リアルタイム性を有し、なおかつ人間の運転操作特性に近いレーンチェンジ経路生成が可能であることが確認された。さらに、周辺車両の速度に変動がある場合に、比較手法と比べて安全性を損なうことなく、加速度とジャークを低減し、乗り心地の向上が可能であることが確認された。

最後に第6章では、第1章から第5章までの主要な内容をまとめて、本論文の総括とした。

|          |                             |     |        |
|----------|-----------------------------|-----|--------|
| 氏名       | 吉本 達也                       |     |        |
| 論文<br>題目 | 環境変動や乗り心地を考慮した車両の自動運転に関する研究 |     |        |
| 審査<br>委員 | 区分                          | 職名  | 氏名     |
|          | 主査                          | 教授  | 横小路 泰義 |
|          | 副査                          | 教授  | 白瀬 敬一  |
|          | 副査                          | 教授  | 玉置 久   |
|          | 副査                          | 准教授 | 田崎 勇一  |
|          | 副査                          |     |        |

要 旨

本論文は、農業用車両や乗用車の自動運転に関して、環境変動や乗り心地を考慮した車両制御手法、経路生成法に関する研究について述べたものである。現在、日本をはじめとして農業労働力の減少や高齢化が社会問題となっている。また、自動車の交通事故も世界的規模で増加しており、大きな社会問題となっている。これらを解決する手段として、農業用車両や乗用車の自動運転が注目されている。すでに多くの民間企業や研究機関が盛んに研究を行っているが、実用化に向けて多くの課題が残っており、未だに普及はしていない。そこで本論文では、農業用車両や乗用車の自動運転の実用化に向けての課題の一つである環境の不確定要因に対するロバスト性や乗り心地を損なわない自動運転のための制御システムの構築に関する研究を行っている。

第1章では、農業用や乗用を対象とした自動走行車の研究背景及び未解決の課題について述べている。実用化に向けての課題の一つとして、環境に存在する不確定な外乱に対してロバストな車両制御手法が確立されていないことが挙げられる。例えば、農作業を行う圃場は不整地であるため路面の凹凸が多く存在する。また、乗用車が走行する環境にも橋の継ぎ目や轍、風など、車両の制御に対して悪影響を与える外乱が多く存在する。これらの外乱は最悪の場合、車両を不安定な状態に陥れてしまい、重大な事故を招く可能性がある。したがって、走行環境に存在する不確定な外乱に対して、ロバストな車両制御を行うことが必要である。

また、乗用車の自動運転に関しては追従性のみならず乗り心地が重要なファクターであり、追従性と乗員の乗り心地の両立が必要である。さらに、乗用車の自動運転の場合は、周辺に走行している車両が存在する状況が頻繁に生じるため、自車両の安定性だけでなく、周辺車両との衝突を防ぐという意味での安全性を担保しなければならない。このように、乗用車の自動運転においては車両の運動制御のみならず、不確定な周辺環境を考慮した上での走行経路生成を乗り心地を損なわずに行うことが重要な課題である。本章では、以降の章でこれらの課題を解決することを目的として行った研究項目を示している。

第2章では、農業散布や作物の情報収集、作物の収穫を目的とした自動走行車の速度制御設計法を提案している。農地には路面の凹凸や傾斜などの外乱が存在するだけでなく、農業散布や作物の積載による重量変動が生じる。そこで、外乱に対してロバストな  $H_{\infty}$  制御を基にし、重量変動に応じて制御ゲインを可変にしたゲインスケジュールド  $H_{\infty}$  制御を速度制御に適用している。また、さらなる精度向上のために積分補正や重力補正を組み合わせた制御手法を提案し、実際に凹凸の多い果樹園や牧草地で実験実験を行なうことにより手法の有効性を検証している。

果樹園での実験結果より、 $H_{\infty}$  制御に対するゲインスケジュールド  $H_{\infty}$  制御の優位性が確認され、積分補正や重力補正による精度の向上も確認できており、これらの手法を併用することで、路面に傾斜や凹凸が存在する実際の果樹園で、牽引の有無に関わらず高精度な速度制御が実現できている。さらに、より過酷な条件の果樹園を想定した牧草地においても実験実験を行い、大きな凹凸があり傾斜の大きい(最大約12[deg])路面においても、直線経路の走行においては十分な精度で走行できることが確認されている。

第3章では、乗用自動走行車に関する乗り心地を考慮したアダプティブクルーズコントロールシステムの構築について述べている。従来のシステムは先行車に減速しながら追いつく際に、人間の操作とは異なる挙動を生じさせ、乗員に違和感を与えていた。そこで、まず熟練ドライバーによる減速行動のデータを取得し、熟練ドライバーの減速行動を再現可能な手法を提案している。熟練ドライバーによる走行データを解析した結果、ドライバーは減速開始後と減速終了前に滑らかに減速度を変化させ、なおかつ減速中は減速度を

|          |  |     |        |
|----------|--|-----|--------|
| 氏名       | 吉本 達也  |     |        |
| 論文<br>題目 | 一定に保つということが明らかになった。また、減速中に先行車の速度が変動する場合は、先行車の速度に対して逐次減速度を変更するのではなく、一定の減速度を保った後、減速度を緩める段階で相対距離と相対速度を調整していることが確認された。 |     |        |
| 審査<br>委員 | 区分   | 職名  | 氏名     |
|          | 主査   | 教授  | 横小路 泰義 |
|          | 副査   | 教授  | 白瀬 敬一  |
|          | 副査   | 教授  | 玉置 久   |
|          | 副査   | 准教授 | 田崎 勇一  |
|          | 副査   |     |        |

第4章では、乗用自動走行車に関する乗り心地と追従性を考慮した操舵制御系の設計法を提案している。自動運転システムの中で操舵制御は重要な役割を担っており、現在までに様々な自動車の操舵制御手法が提案されているが、乗り心地と追従性を両立する手法は未だ確立されていない。

一般的に乗り心地は加速度やジャークとの相関があるといわれており、加速度やジャークを低減するためには制御ゲインを小さく設定する必要がある。しかし、制御ゲインを小さく設定した場合、制御性能の悪化により追従性が低下してしまう。つまり、乗り心地と追従性にはトレードオフの関係が存在する。本論文ではこのトレードオフを解消するために、多少の誤差が許容できる道路中心近傍では乗り心地を重視してフィードバックゲインを小さく、誤差が車線を逸脱するほど大きく危険性が高い状況、つまり道路中心からの偏差がある値よりも大きい場合には誤差抑制を重視してフィードバックゲインを大きくするような手法として、エネルギーITS推進事業による成果であるトラックの操舵制御を乗用車に応用し、さらに制御誤差に対して非線形重みを導入する手法を提案している。また、シミュレーションと実車実験では実環境を想定した仮想外乱を印加して、外乱が存在する場合でも乗り心地と追従性の両立が可能であることを確認している。

第5章では、乗用自動走行車のレーンチェンジ経路生成法について述べている。実環境において目標経路を生成する際は道路などの静的環境だけでなく、周辺を走行する車両などの動的環境を考慮しなければならない。特にレーンチェンジでは自車が走行するレーンと異なる速度の車両が走行しているレーンにレーンチェンジを行う場合があり、横方向だけの運動を考えるのではなく、縦方向の運動も同時に考えなければならぬため、より難しい問題となる。

本論文では、平面運動に時間軸を考慮した三次元空間上で経路を生成することにより、周辺車両の不確定性を考慮可能なレーンチェンジ手法を提案している。また、周辺車両との安全余裕だけでなく、最適化計算により乗員の乗り心地を同時に考慮することが可能であることを示している。そして提案手法の有効性を、周辺車両が存在する環境を再現可能なシミュレーションソフトを用いて確認している。その結果、レーンチェンジ経路を複数の多項式で制約することにより、リアルタイム性を有し、なおかつ人間の運転操作特性に近いレーンチェンジ経路生成が可能であることが確認されている。さらに、周辺車両の速度に変動がある場合に、比較手法と比べて安全性を損なうことなく、加速度とジャークを低減し、乗り心地の向上が可能であることも確認されている。

最後に第6章では、第1章から第5章までの主要な内容をまとめてあり、本論文の総括をしている。

以上のように、本研究は、農業用車両や乗用車の自動運転に関して、環境変動や乗り心地を考慮した車両制御手法、経路生成法に関する研究について述べたものであり、車両の自動運転に関する研究について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された学位論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の吉本達也は博士(工学)の学位を得る資格があると認める。