

氏名（本籍）	て つか いっ せい 手塚 一成（兵庫県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 1182 号
学位授与の日付	2024 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Safety Assist Control via Zeroing Control Barrier Function (零化制御バリア関数を用いた安全アシスト 制御に関する研究)

論文審査委員 (主査) 教授 中村 文一
嘱託教授 堀 洋一 教授 星 伸一
教授 牛島 健夫 教授 西山 裕之

論文内容の要旨

近年、自動車に自動ブレーキ装置の搭載が義務化されたことから、人間の操作を支援するヒューマンアシスト制御は一層注目を集めている。一方、上記技術は、試行錯誤的な開発側面から開発コストが高いことや操作性や乗り心地を阻害する突然の介入が問題視されている。また、自動ブレーキ装置は正式に「衝突被害軽減ブレーキ」と称され、操作車両の理論的安全性を保証するものではない。

制御システムの理論的安全性を保証するため、近年の非線形制御理論では、制御バリア関数を用いた制御法が世界的に活発に提案されている。ある集合内にシステムの初期状態があるとき、どれだけ時間が経過してもその集合内にとどまり続ける集合を不変集合と呼ぶが、制御バリア関数から制御システムの状態がとどまり続けるべき安全集合を不変集合にする制御入力を設計することができる。制御バリア関数には大きく分けて逆数制御バリア関数と零化制御バリア関数 (Zeroing Control Barrier Function) の 2 系統が存在する。安全集合境界で値が無限大に発散する逆数制御バリア関数は、危険集合内で定義されないことから、計測誤差やモデル化誤差に弱く、扱える制御問題が限定的である。そこで本研究では、境界で値が 0 になり危険集合内でも定義できる零化制御バリア関数に着目する。零化制御バリア関数はその特長から逆数制御バリア関数よりも幅広い制御問題に適用でき、世界的に主に用いられている制御概念である。しかし、世界的に用いられている零化制御バリア

ア関数の定義には、人間の操作を前提としたシステムの安全性を保証できないことや入力
の連続性が担保されないことなど数学的に議論が不十分な点が数々存在する。

そこで、本研究では、人間の操作入力の介入を前提としたシステムが分類される非自律
システムの理論的安全性を保証するための安全アシスト制御法を提案する。本論文は、状
態制約問題を大きく二つに分けて議論する。まず、壁との衝突回避問題といった時不変の
状態制約問題、次に、移動障害物との衝突回避問題といった時変の状態制約問題を考える。

時不変の状態制約問題に関して、先行研究で与えられた零化制御バリア関数の諸問題を
解決するため、本研究では厳密零化制御バリア関数と呼ばれる新たな零化制御バリア関数
の定義を与える。次に、厳密零化制御バリア関数を用いた安全アシスト制御法を提案し、提
案法が非自律システムの理論的安全性を保証することを証明する。また、厳密零化制御バ
リア関数を用いることで、制御モデルを表す常微分方程式の解が有限発散時間をもたない
ことや相対次数によらないアシスト制御入力の連続性が保証されることを示す。更に、提
案法が最小限の介入により非自律システムの安全性を保証することを示す。理論的安全性
に加えて、連続性と最適性を備える提案法は、突然の介入を防ぐことができることから、乗
り心地や操作性を阻害しないヒューマンアシスト制御に適した手法であるといえる。最後
に、自動車の減速性能など、現実のシステムは入力制約を有することを考慮し、入力制約付
きシステムに対する制御バリア関数の設計法および安全アシスト制御法を提案する。

時変の状態制約問題に関しては、厳密零化制御バリア関数を用いた提案法を拡張し、時
変制御バリア関数を用いた安全アシスト制御法を提案する。また、提案法は、厳密零化制
御バリア関数を用いた手法の特長を保持したうえで、時変の状態制約問題に適用可能な制
御法であることを明らかにする。次に、移動障害物の速度が一般に未知であることなどを考
慮し、外乱下や未知環境下にあるシステムの安全性を保証できる安全アシスト制御法につ
いても提案する。従来法は、未知環境下にあるシステムに対して、状態の有界性を保証でき
る一方で安全性が保障されないなどの問題があったが、本手法ではこれを解決する。

第1章「Introduction」では、自律システムに対して盛んに実施されている近年の制御バ
リア関数に関する研究動向を踏まえて、本研究の目的および概要について述べる。また、既
存の研究が非自律システムの安全性を保証できない点などを指摘し、本研究の貢献を明確
にする。

第2章「Preliminaries」では、本論文で用いる数学的な用語とその定義や性質、および集
合の不変性に関する基礎定理など、提案法がシステムの安全性を保証することを示すう
えで重要となる基礎的事項を紹介する。

第3章「Safety Assist Control via Zeroing Control Barrier Function」では、時不変の状
態制約問題について議論する。第3章前編では、厳密零化制御バリア関数を用いた非自律
システムのための安全アシスト制御法を提案する。後編では、入力制約付きシステムに有
効な制御バリア関数の設計法および安全アシスト制御法を提案する。提案法の有効性はそ
れぞれコンピュータシミュレーションを通して確認する。

第4章「Safety Assist Control via Time-varying Control Barrier Function」では、時変
の状態制約問題について議論する。第4章前編では、厳密零化制御バリア関数を用いた手

法に基づき、時変制御バリア関数を用いた安全アシスト制御法を提案する。後編では、入力外乱下や未知環境下にあるシステムに有効な安全アシスト制御法を提案する。提案法の有効性はコンピュータシミュレーションおよび電動車いすを用いた実機実験を通して確認する。

第5章「Conclusion」では、本論文の主要な研究成果をまとめる。また、本論文では取り扱うことができなかった今後の研究課題と展望について述べる。

論文審査の結果の要旨

本論文では、電気電子情報工学および関連分野について審査を行った。幅広い専門分野から論文内容を審査するため、電気電子情報工学専攻、数理学専攻、経営システム工学専攻の審査員5名で審査委員会を組織し、公聴会を含む計3回の審査を通じて厳格な審査を行った。審査では、論文に関連する専門分野（電気電子情報工学）及び外国語（英語）について計3回の口頭試問及び書類審査を行い、学位（博士）授与に値する学力を有していることを確認している。第1回審査では、学位論文の内容に関するプレゼンテーションを行い、審査員が論文に関連する専門分野（電気電子情報工学）に対する質疑応答を中心とした口頭試問を行った。また、主論文を構成する論文が英文学術論文誌3報、英文レフェリー付きプロシーディング1報に掲載されていることを書面審査により確認した。さらに、英文学術論文誌3報、英文レフェリー付きプロシーディング1報、国際会議プレゼンテーション4件により国際化に対応する研究者としての能力を書面審査により確認した。第2回審査では、第1回審査の際に提示された課題に対する回答と、博士論文の修正点を中心としたプレゼンテーション及び、口頭試問を行った。第3回審査では、博士論文公聴会を実施し、最終審査を行った。

本論文は全5章で構成される。第1章「Introduction」では、自律システムに対して盛んに実施されている近年の制御バリア関数に関する研究動向を踏まえ、本研究の目的および概要について述べられている。また、既存の研究が非自律システムの安全性を保証できない点などを指摘し、本研究の貢献が明確にされている。第2章「Preliminaries」では、本論文で用いる数学的な用語とその定義や性質、および集合の不変性に関する基礎定理など、提案法がシステムの安全性を保証することを示すうえで重要となる基礎的事項が紹介されている。第3章「Safety Assist Control via Zeroing Control Barrier Function」では、時不変の状態制約問題について議論されている。第3章の前半では、厳密零化制御バリア関数を用いた非自律システムのための安全アシスト制御法が提案されている。後半は、入力制約付きシステムに有効な制御バリア関数の設計法および安全アシスト制御法が提案されている。提案法の有効性はそれぞれコンピュータシミュレーションを通して示されている。第4章「Safety Assist Control via Time-varying Control

Barrier Function」では、時変の状態制約問題について議論されている。第4章前半では、厳密零化制御バリア関数を用いた手法に基づいた、時変制御バリア関数を用いた安全アシスト制御法が提案されている。後半は、入力外乱下や未知環境下にあるシステムに有効な安全アシスト制御法が提案されている。また、提案法の有効性がコンピュータシミュレーションおよび電動車いすを用いた実機実験を通して確認された。第5章「Conclusion」では、本論文の主要な研究成果がまとめられている。また、本論文では取り扱うことができなかった今後の研究課題と展望について述べられている。

近年、移動体に対する安全性が社会問題となっている中、制御工学ではシステムの安全性を保障するために、制御バリア関数が注目を集めている。本論文では、これまでに得られていなかった、人間の操作など未来の入力がわからない非自律システムに対して適用可能な制御バリア関数である、厳密零化制御バリア関数の定義を与え、システムの安全性を保障するための安全アシスト制御法を新たに開発したことは、学術的に高く評価できる。また、移動障害物に対応可能な時変制御バリア関数を用いた安全アシスト制御法も開発し、提案法の有効性を電動車いすによる実機実験により示したことは、電気電子情報工学分野において学術的に高い価値を示している。

以上より、本論文は電気電子情報工学における新たな知見を与えるものであるため、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。