

京都大学	博士（工学）	氏名	已谷真司
論文題目	Satisficing Nonlinear Spacecraft Rendezvous Under Control Magnitude and Direction Constraints (制御入力制約を考慮した宇宙機の相対軌道制御)		

(論文内容の要旨)

本論文は、制御入力制約下における2機の宇宙機の相対軌道の最適制御に関して二種類の新しい制御方法を考案し、制御系の設計法を論じた結果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景およびアプローチの概要について論じている。現実の宇宙機の軌道制御問題は、スラスト方向の制限やセンサ視野角および太陽方向など複雑な制約条件を取り扱わなければならないが、制御入力の方向制約を考慮した研究例は殆ど無い。本論文では、制御入力の方向と絶対値に制約がある中で燃料消費を抑えつつ安全に宇宙機の軌道を制御する問題を考え、複雑な制約条件を考慮する新たな二種類の手法を提案している。第一の手法はバリア関数を導入し、開ループ的に最適解を求める方法であり、第二の手法は Satisficing と呼ばれる手法と制御リアプノフ関数 (CLF) を用いることで閉ループ的に安定な準最適解を決定する方法である。

第2章では、二種類の提案手法を論じてゆく上での基本となる非線形最適制御問題の解法について説明している。最適制御問題の解法は、変分原理に基づいたオイラー・ラグランジュ (EL) 方程式を解く方法と、動的計画法に基づいたハミルトン・ヤコビ・ベルマン (HJB) 方程式を解く方法の大きく二つに分かれる。本論文で提案する第一の手法は EL 方程式の近似解を求める方法である。また、HJB 方程式の厳密解である主関数は CLF の一種と見なせるため、後者の解法は第二の提案手法と関連がある。また、両提案手法に共通して適用されるバリア関数の基本的性質について述べ、制御入力の制約条件を考慮し解を求める方法について説明している。

第3章では、制御入力の平滑化手法を用いた相対軌道遷移設計の最適化について論じている。一般に、EL 方程式に基づく方法では、制御入力の L1 ノルムを最小化する最適制御問題を考える場合は、解が Bang-Bang になり数値計算的に解くことが難しい。制御入力の L2 ノルム最小化の最適制御問題の場合も、入力の方向の制約によって同様の問題が起こりうる。Epenoy らはバリア関数を導入することにより、入力の絶対値に制限のある L1 ノルム最小化の問題を滑らかな関数から漸近的に解く方法を軌道最適化問題に応用した。本論文では、絶対値制限のバリア関数と同様に制御入力方向制限のバリア関数を新たに導入し、Epenoy らが求めた平滑化された制御入力を自然に拡張した形で最適制御入力の形を開ループ的に求めることに成功している。また L1 ノルム最小化だけでなく、L2 ノルム最小化の問題に対しても同様のアプローチを適用し、平滑化により二点境界値問題の解法を定式化できることを示している。

第4章以降において、第3章で得られた開ループ的な制御則に対して、より安定性を高めるため、非線形制御の手法の一つである Satisficing 法を適用し、準最適な閉ループ制御則を求めることを検討している。まず第4章では、Satisficing 手法の基本的な性質を、システムが時変系でありかつ二次評価関数を用いる一般的な場合に拡張した形でまとめている。Satisficing 手法では、アフィン系の制御システムに適用することで、ある CLF が与えられたときの、安定な制御入力のクラスを定義できる。

第5章では、Satisficing 手法を用いたランデブー軌道制御計画法について論じている。

京都大学	博士（工学）	氏名	巳谷真司
<p>Satisficing 手法を制御入力に方向制約のあるランデブー問題に関して適用し、準最適な閉ループ制御則を求めることを検討している。ある CLF が与えられたとき、Satisficing 手法により安定な制御入力のクラスを定義できる。制御入力制限の集合との共通集合から制御則を作ることで、入力制約と安定性を同時に満たした制御入力生成が可能である。Satisficing 手法を適用するには、与えられた制御入力集合の範囲で CLF を発見することが必要になる。まず、2 次評価関数に制約条件を考慮した重み行列設定にすることにより、最終軌道遷移中で方向入力の制約を満たす CLF 候補の選定方法を考案している。この場合、途中の軌道遷移領域では、方向入力制約を満たす保証は無い。その部分は、最適制御入力から安定な制御入力の集合である Satisficing 集合の境界に沿う方向の射影で制御入力を求める。入力方向制限が緩く、入力可能集合が Satisficing 集合と共通部分をもつ場合では、制御入力が過大になり過ぎない範囲で、この方法で最適制御からの連続入力が得られる。入力方向制限が厳しいケースでは、システムを安定とする制御入力の集合の中に制約を満たす入力がない場合がある。このような場合、入力をゼロとする不連続な制御則を用いると CLF 候補は一時増大するものの、ある一定条件下で、安定に収束可能になることを数値解析により示している。</p> <p>第 6 章では、バリア関数を適用することで、第 5 章で提案した Satisficing 制御を改善する方法について論じている。第 5 章の方法では、最適制御入力が安定半平面から遠ざかるに従い、制御入力値が過大になる問題があった。改善する方法として、最適制御問題を EL 法で解く際に導入した絶対値制約と方向制約のバリア関数をコスト関数の中に予め導入することにより、Satisficing 集合を、入力制約を考慮した集合に拡張することを考案している。この着想により、利得関数とコスト関数の差を最大にする制御入力を解析的に求めることを可能にしている。入力制約に拘束されない場合は、バリア関数の微小パラメータをゼロに近づけると、この制御入力は入力制約なし時の最適制御入力で収束する。また、入力制約に拘束される場合は、入力制約集合への直交射影となる。この場合、入力絶対値は射影前と比べ小さくなり、安定化集合から一次的に外れる可能性が生じる。しかし、2 次重み行列や、利得関数とコスト関数のバランスを適切に調整することにより、入力方向を大きくする閉ループ行列のモードは順調に減衰するため、再び安定化集合内に入り、その後は入力制約に拘束されることなく安定に収束する。以上の挙動を制御入力空間内で視覚的に作図することにより適切な制御系を設計する方法を考案し、提案する制御則の有効性を非線形のランデブー問題に対して数値解析により示している。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。線形時不変システムとして記述されるターゲット衛星が円軌道上にある場合の円軌道まわりの相対運動を記述するヒル方程式から、時変システムとして記述されるターゲット衛星が楕円軌道上にある場合の相対運動まで制御対象を拡張し、適用方法について論じたが、本論文で提案する手法はアフィン系となる広い軌道制御問題に拡張可能である。</p>			

氏名	巳谷真司
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、制御入力制約下における2機の宇宙機の相対軌道の最適制御に関する研究成果についてまとめられたものである。本論文では、制御入力の方向と絶対値に制約がある中で燃料消費を抑えつつ安全に宇宙機の軌道を制御する問題を考え、複雑な入力制約条件を考慮する新たな手法を二種類提案した。得られた成果は以下の通りである。

1. バリア関数を入力方向制約のペナルティとして評価関数に付加することにより、最適制御問題を解くことを検討した。この結果、ポンドリャーギンの最小原理に基づき、ハミルトニアンを最小化する制御入力の平滑解を初めて解析的に導くことに成功した。この解は、過去の研究で得られている入力の絶対値制約のみを考慮した平滑解の一般化となっている。また、本手法により、燃料消費最小問題、エネルギー最小問題の両方を定式化することに成功した。どちらの問題に対しても、制約を満たす最適制御入力の履歴が得られることを数値解析により示した。
2. 1で得られた開ループ的な制御則に対して、より安定性を高めるため、非線形制御の手法の一つである Satisficing 法を適用し、準最適な閉ループ制御則を求めることを検討した。2次評価関数に制約条件を考慮した重み行列設定にすることにより、最終軌道遷移中で方向入力の制約を満たす制御リアプノフ関数の選定方法を考案した。また、絶対値制約と方向制約のバリア関数を、Satisficing 集合の条件の中に予め導入することにより、厳密に入力制約を満たす安定入力の集合に拡張可能なことを示した。この着想により、利得関数とコスト関数の差を最大にする制御入力を解析的に求めることに成功した。提案手法の安定性を議論するための入力空間内での作図法を考案し、重み関数等のパラメータを適切に選択することにより、時変・非線形システムで記述される宇宙機のランデブー問題において安定な解が得られることを示した。

以上のように本論文は、スラスタ噴射方向などに複雑な制約条件が課される宇宙機の相対軌道の最適制御問題に対して、新たな解法を提案している。本手法は、複数の宇宙機の相対軌道制御に留まらず、支配方程式が時変システムや非線形システムで記述される他の力学系にも広く適用できるものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。