

Design and Control of Spacecraft Motion in Circular Restricted Three-Body Problem

秋山, 祐貴

<https://doi.org/10.15017/1931914>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 秋山 祐貴

論 文 名 : Design and Control of Spacecraft Motion in
Circular Restricted Three-Body Problem
(円制限三体問題における宇宙機の運動の設計と制御)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、将来的な三体問題ベースの宇宙ミッションの設計・実行のために、より一般的な入力を含めた複雑な三体問題における、①システムチックな軌道設計手法の開発と②軌道や姿勢の制御則の構築について詳しく調査したものである。

まず第3章において、三体問題における特徴的な軌道である平衡点まわりの周期軌道と準周期軌道をシステムチックに設計する手法を中心多様体理論に基づき構築した。さらに、この設計理論を、**Differential correction** 法と呼ばれる数値計算手法と組み合わせることで、周期軌道のみを設計する手法へと改良した。第3章において設計された手法は、どちらも中心多様体の逐次近似手法を用いて三体問題の中心多様体そのものを求めるため、従来の周期軌道や準周期軌道設計手法において必要であった精度の良い初期推定値や複雑な代数計算を必要とせず、比較的簡単に高精度な周期軌道や準周期軌道を求めることが可能である。構築された設計理論を用いて数値シミュレーションをし、周期軌道や準周期軌道がシステムチックに設計可能であることを示した。

次に第4章において、三体問題における系を、入力を含めた系へと拡張し、そのときに存在する人工的な軌道とその利点について調査した。特に、宇宙機の状態量の0次と1次のオーダーのフィードバック入力を仮定し、そのときの人工的な周期軌道とそれに付随する不変多様体について解析した。第3章において構築された設計理論を、入力を含めた系へと適用できるように拡張し、さまざまな種類の人工的な周期軌道を求めた。さらに、それらに付随する人工的な不変多様体を求め、それらの利用方法について検討した。状態量の0次のオーダーの入力を用いる場合、人工的な周期軌道と人工的な多様体はもとの周期軌道と多様体に対してわずかな入力であっても位置が大きくずれることが明らかになった。これにより、0次のオーダーの入力によって、宇宙ミッションにおける軌道の選択肢を増やすことが可能であることが示唆された。一方、1次のオーダーの入力を用いる場合、人工的な周期軌道や多様体の形状はもとの周期軌道や多様体とあまり変わらないが、軌道の周期や多様体上の遷移時間が大きく異なることが明らかになった。そのため、1次のオーダーの入力を用いることで宇宙ミッションにおける時間的な制約を緩和できる可能性が示唆された。

第5章では、三体問題における宇宙機の軌道保持や編隊飛行を実現する制御則を非線形系に対する出力レギュレーション理論を用いて構築した。まず、主衛星の目標軌道がフーリエ級数近似によって与えられていると仮定し、その目標軌道を生成する外部システムと呼ばれる数学モデルを構築した。次に、その数学モデルを用いて出力レギュレーション問題を解き、軌道保持を実現する制御則を構築した。さらに、主衛星からみた副衛星の相対的な目標位置に関する外部システムを構築し、主衛星の目標軌道に関する外部システムと組み合わせることで、編隊飛行を実現する制御則を導出

した．通常，非線形系に対する出力レギュレーション問題は偏微分方程式を含むため，陽に解くことは難しいが，本章で導出された制御則はすべて解析的な形で求められている．これは目標軌道がフーリエ級数近似で与えられたことにより，外部システムが線形な形で構築されたためである．導出された制御則の有用性を数値シミュレーションによって検証し，さらに制御則の特性について議論した．まず，軌道保持のための制御則は，目標軌道が自然に存在しかつフーリエ級数の近似オーダーが十分大きいとき，軌道保持に必要な制御コストを非常に小さくできることが明らかになった．さらに，位相パラメータと呼ばれる設計パラメータを目標軌道のフーリエ級数表現に導入することで，適切な位相パラメータを用いた場合，目標軌道への収束までに必要な制御コストを著しく低減可能であることも明らかになった．さらに，編隊飛行のための制御則は相対的な目標軌道がフーリエ級数で表されているため，複雑な編隊飛行においても制御器内のパラメータを適宜変更することで，同一の制御則を用いることが可能であることも示された．

そして第6章では，宇宙機の軌道と姿勢を同時に制御する手法を非線形系に対する出力レギュレーション問題を用いて導出した．まず，宇宙機の軌道運動と姿勢運動が連成した系を三体問題で一般に用いられる回転座標系において都合が良い表現で定式化した．次に，目標の状態量をフーリエ級数で表現し，外部システムを設計した．その後，出力レギュレーション問題を適用することで，所望の軌道運動と姿勢運動が同時に実現される制御則を導出した．この制御則にはフィードバックゲインが含まれており，フィードバックゲインが定数の場合閉ループ系での軌道運動と姿勢運動の極を独立に決めることができない．そこで，状態量に依存したフィードバックゲインを考えることで，閉ループ系における極を軌道運動と姿勢運動に分離して設計可能であることを示した．宇宙機を特定の周期軌道上で特定の姿勢運動を実現する数値シミュレーションをし，導出された制御則の有用性を検証した．

以上の内容を第7章においてまとめた．論文の前半において，従来の軌道設計手法の欠点を持たない入力を含む系においても適用可能な軌道設計手法を構築した．さらに論文の後半において，どのような系や目標状態に対しても適用可能な汎用性の高い制御則を構築した．