

Optimal Trajectory Design and Control for Low-Thrust Spacecraft in Multi-Body Dynamics

香山, 裕樹

<https://hdl.handle.net/2324/4475133>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 香山 裕樹

論 文 名 : Optimal Trajectory Design and Control for Low-Thrust Spacecraft in Multi-Body Dynamics

(多体力学における低推力宇宙機の最適軌道設計と制御)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、低推力推進を用いた宇宙機が複数の天体の重力を受ける多体問題を考慮した運動において、消費エネルギーを最小化させるための最適な制御方法（第3～4章）と消費燃料を最小化させるための最適な軌道設計方法（第5～8章）について述べたものである。

第3章では、地球との二体問題をダイナミクスとし月から月へ再会合するための軌道に誤差が加わった時の体系的な制御方法について述べている。本研究では、**Attractive set** と呼ばれる最小エネルギー制御量を示す楕円型等高線を用い、消費エネルギーが最小となる誤差ベクトルの方向を幾何学的に導出する。数値シミュレーションでは、線形二次レギュレータの重みや月会合時における参照軌道の変化に対する **Attractive set** の形状の変化について議論した。また、スイングバイ条件を満たさない連続月スイングバイのための参照軌道に対して、スイングバイ条件を満たす中で軌道修正量が最小エネルギーとなる解を **Attractive set** を用いて導出した。

第4章では、円制限三体問題におけるラグランジュ点周りの異なる2つの周期軌道にそれぞれ付随する不変多様体間の遷移における最小エネルギー制御手法を提案した。本手法はまず非線形な運動方程式をラグランジュ点周りの時不変線形システムまたは周期軌道周りの時変線形システムと非線形システムに分離する。その後、線形システムについては線形二次レギュレータを用いて、非線形システムは目標の不変多様体と遷移軌道の誤差フィードバックによって制御する。数値シミュレーションの結果、適切に制御が行われていることに加え、最適軌道の力学的性質が明らかになった。さらに、制御における消費エネルギーを最小化するための周期軌道上の出発点について力学的な観点から考察した。

第5章では、円制限三体問題でのラグランジュ点近傍や周期軌道近傍の線形なダイナミクスにおいて消費燃料を最小化させるための最適化手法と最適軌道の力学的な性質について、数値的なアプローチから議論している。最適化手法として制御入力の L^1 ノルムを最小化させるスパース最適制御を用いており、不安定性を持つダイナミクスに対しても数値的発散を防ぐ計算手法を提案し、安定して最適軌道を導出することに成功している。さらに、得られた最適軌道をシステムの固有構造である不安定・安定・中心成分に分けた多様体座標系に写し、複数の数値計算結果に共通する最適構造を明確化した。

第6章では、第5章で構築されたスパース最適制御を用いて、宇宙機がラグランジュ点周りの周期軌道上に留まるための新たな **Station-Keeping** の手法を構築した。スパース最適制御は、離散化された状態方程式を満たす拘束条件のもと L^1 ノルム最小解を導出するため、通常は連続的な順時間の軌道伝播では所望の終端状態へ遷移することはできない。そこで、スパース最適制御によって求められた最適軌道周りの時変線形システムを考え、そこに線形二次レギュレータによる状態フィー

ドバック制御を適用するハイブリッド制御を提案した。数値シミュレーションの結果、ハイブリッド制御によって周期軌道から発散せずに留まることが確認できた。さらに線形二次レギュレータのみの制御と比較した結果、ハイブリッド制御の方が少ない消費燃料で制御できることが示された。

第7章では、スパース最適制御が円制限三体問題での非線形なダイナミクスに対して L^1 ノルム最小解を導出できるかが初めて検証された。スパース最適制御は凸最適化に落とし込むことで解かれるため、通常は凸集合である線形な拘束条件に対してのみ適用される。そこで、参照軌道を更新しながら連続的にスパース最適制御を解くことで非線形性を満たす解を求める逐次凸化のアルゴリズムを導入した。数値シミュレーションでは、太陽-地球系のラグランジュ点 L_1 と L_2 周りの周期軌道間の遷移に適用され、不安定性を持つダイナミクスに対してもロバストに非線形性を満たす L^1 ノルム最小解を導出できることが確認された。

第8章では、凸最適化問題の一種である二次錐計画問題として第7章で導入された逐次凸最適化を、月近傍の不安定性が強く非線形性が高い領域での消費燃料最小化に適用した。非線形性が高い領域では、低推力推進のような小さな推力で最適化することは困難である。そのため、スラストレベルを段階的に減らしていく **Thrust continuation** 法と逐次凸化を組み合わせた手法を提案した。本手法は、円制限三体問題のハロー軌道から月近傍の軌道である **NRHO** への遷移に適用され、低い推力レベルで消費燃料最小解を導出することに成功した。また、実際の天体暦を使用したモデルにおいて同様の最適化手法を適用し汎用性の高さを示した。さらに、円制限三体問題において逐次凸最適化を構成する変数の値を変化させた時に消費燃料や計算時間がどのように変化するかを網羅的に調査した。また、第6章で提案されたハイブリッド制御を取り入れ、少ない軌道修正量で順時間伝播できることが示された。

以上の内容を結論として第9章にまとめた。また、同章には本論文の研究に残された課題や今後の発展内容について明示している。

〔作成要領〕

1. 用紙はA4判上質紙を使用すること。
2. 原則として、文字サイズ10.5ポイントとする。
3. 左右2センチ，上下2.5センチ程度をあげ，ページ数は記入しないこと。
4. 要旨は2,000字程度にまとめること。
(英文の場合は，2ページ以内にまとめること。)
5. 図表・図式等は随意に使用のこと。
6. ワードプロ浄書すること（手書きする場合は楷書体）。
この様式で提出された書類は，「九州大学博士学位論文内容の要旨及び審査結果の要旨」
の原稿として写真印刷するので，鮮明な原稿をクリップ止めで提出すること。