

Low-Energy Trajectory Design Leveraging Sequences of Lobe Dynamics

平岩, 尚樹

<https://hdl.handle.net/2324/7363787>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 平岩 尚樹

論文名 : Low-Energy Trajectory Design Leveraging Sequences
of Lobe Dynamics
(ローブ力学の列を用いた低エネルギー軌道設計)

区 分 : 甲

論文内容の要旨

本論文は、力学系理論による宇宙機の軌道設計手法をより発展させるため、複雑な力学的構造を体系的に組み合わせられる軌道設計手法について述べたものである。この目的のため、lobe dynamics にもとづく軌道設計手法を構築し（第 3 章）、構築した軌道設計手法を用いて地球一月遷移軌道の設計に取り組み（第 4 章）、遷移軌道を最適化するための低推力凸最適化手法の構築を行う（第 5 章）。

第 3 章では、さまざまな周期軌道の多様体に関連する lobe dynamics の力学的構造を組み合わせで遷移軌道を設計する方法論について述べている。遷移可能な経路をグラフにより簡略に示すことで、lobe dynamics の最適な組み合わせを探索し、lobe に含まれるカオス的な軌道を繋ぎ合わせて遷移軌道を設計する。この手法は、カオスを含むハミルトニアン力学系のポアンカレマップの最も単純な例である標準写像において構築された。Effective lobe という概念を導入することにより、lobe dynamics のうち特に軌道設計に有用な遷移構造を取り出すことができ、また lobe dynamics の構造を網羅的に特定する困難さを和らげることができる。その後、地球一月系の円制限三体問題における軌道設計においても、近点ポアンカレマップを用いることで本設計手法が有用であることが実証された。離散系の標準写像とは異なり、円制限三体問題においてはポアンカレマップ間の実際の遷移軌道の設計も重要である。グラフ上の最適経路から最適遷移軌道を構築する際には、targeting という手法を導入し、小さな修正マニューバによる遷移誤差の修正を織り込むことで、グラフの構造を保ったまま実際の遷移軌道をうまく構築できることが示された。

第 4 章では、第 3 章における軌道設計手法を地球低軌道から月低軌道への遷移軌道の設計問題へと応用し、低エネルギー遷移軌道における lobe dynamics の役割について述べている。本研究で提案する lobe dynamics にもとづく軌道設計手法をより具体的なミッションシナリオに応用することで、提案手法の有用性を具体的に示す。円制限三体問題で設計した軌道をもとに制限四体問題における遷移軌道を multiple shooting による最適化により求めることで先行研究の結果との比較が可能となり、本研究の手法で今回の遷移問題におけるパレート解の 1 つを特定できることが示されている。また、円制限三体問題で設計した遷移軌道の解析を行い、lobe dynamics と類似の概念 (weak stability boundary) と比較しながら、lobe dynamics のもつ役割について議論している。Lobe dynamics は制限三体問題における共鳴構造の遷移を追跡できる点に特色があり、遷移軌道の設計に用いるのが適していることが示唆された。

第 5 章では、設計した遷移軌道を低推力遷移軌道へと変換して燃料消費を下げるために、最適化手法を構築する。近年計算コストが比較的小さく非線形最適化問題への応用もできることから注目

を集めている凸最適化問題をもとに、より良い初期予想解を探索するためにビームサーチの枠組みを取り入れている。出発軌道から到着軌道への遷移を考える際、あらかじめ選んでおいた軌道の断片をうまく組み合わせることで最適遷移問題の初期値を作り、低推力遷移軌道を設計することを考える。このときに、必要な軌道の断片の数と断片の組み合わせを効率よく探索するため、ビームサーチという木探索アルゴリズムの1つを採用している。ヒューリスティクスな手法であり大域的に最適な初期予想解を構築できる保証はないが、局所的に燃料消費の小さい経路を選びながら遷移軌道を伸ばしていくことで、探索範囲をある程度小さく絞り計算コストを大きく削減することができる。構築した最適化の枠組みは、地球一月系の L2 点まわりのハロー軌道間の遷移軌道の設計を通してその有用性を実証した。ハロー軌道のファミリー構造にもとづき、出発ハロー軌道と到着ハロー軌道の間にあるハロー軌道をどのように初期予想解の取り入れるのがよいかをビームサーチにもとづき決定した。探索範囲をある程度絞れば燃料消費の小さい解を十分発見できることが明らかとなり、ビームサーチの有用性が示された。得られた最適遷移軌道では、低推力の制約を満たしていることも確認されている。ビームサーチを行う過程でいくつもの局所最適解を発見することになるが、これにより燃料消費と遷移時間のバランスを見ながらより良い遷移軌道を選択することができるようになる。第 3～4 章で構築した軌道設計手法とこの軌道最適化手法の融合については、今後の課題である。

以上の内容を結論として第 6 章にまとめた。また、今後の発展のために必要な要素についても簡潔に示している。