

氏 名 Triwanto SIMANJUNTAK

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1490 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Design of Loose Spacecraft Formation Flying around  
Halo Orbits

論文審査委員 主 査 准教授 坂井 真一郎  
准教授 吉川 真  
准教授 川勝 康弘  
教授 市川 朗 南山大学  
教授 山田 克彦 名古屋大学

## 論文内容の要旨

Two spacecraft or more are assumed to be in a state of loose formation flying around a collinear Lagrangian point in the Sun-Earth Circular Restricted Three-Body Problem (CR3BP) system. The orbit reference of choice for the leader is a Halo orbit and the followers are assumed to follow nearby and be constrained either geometrically or in size. This type of formation could be useful in the future for constructing space ports, space telescopes, astronomical spacecraft requiring sun shields and with greater numbers, spacecraft swarm missions. A unique feature of this type of formations, unlike precise formations, loose formations is geared heavily towards saving fuel consumptions rather than accuracy in size or in shape. The formations are envisaged to exclude the divergent and the convergent modes from the relative motions.

The formation design method is constructed by firstly seeking the local coordinate system from the monodromy matrix through extraction of the independent bases which span the space of a halo orbit. A halo orbit reference can be found numerically with sufficient accuracy by using differential correction method. Carrying analysis on the monodromy matrix reveals that the eigenvalues equal with one has algebraic multiplicity of two but its geometric multiplicity is only one. This makes the monodromy matrix is defective hence its original eigenvectors are not fully suitable to be the bases of the formations. By simple observation, the properties of the monodromy matrix ( $M$ ) can be predicted. From the periodicity of halo orbits, it can be seen that the matrix's determinant must be equal to one. The monodromy matrix shows maps of the initial state vectors ( $X_0$ ) to the final state ( $X_T$ ) after one period ( $T$ ). Moreover, its flow map from the initial to final time is unknown, as is the analytical expression of the state transition matrix. However, we can devise an approximation of the fundamental set solutions, if we can establish the bases of the monodromy matrix. This can be achieved by analyzing the independent state vectors that span the space of the matrix. The monodromy matrix of a halo orbit has six eigenvalues ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$  and  $\lambda_6$ ) that can be grouped into three pairs. The first pair ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) has a self-product of one, the second pair ( $\lambda_3, \lambda_4$ ) is a complex conjugate with a magnitude of one and the third pair ( $\lambda_5, \lambda_6$ ) is real with a magnitude of one.

The first pair represents stable ( $e_1$ ) and unstable ( $e_2$ ) manifolds, so if the initials are set in the direction of this pair's eigenvectors, the shape and magnitude of the formation will be radically changed, making it unsuitable for establishing a loosely kept formation within one period. This is because the eigenvalue of one has only one eigenvector ( $e_5 = e_6$ ), so that algebraic multiplicity is two but geometric multiplicity is one, which means that the monodromy matrix is defective.

Inspection of the four other eigenvalues reveals that two modifications are needed to their eigenvectors in order to construct bases for the formation design. Firstly, the eigenvectors ( $e_3, e_4$ ) of the complex pair eigenvalues are linearly combined to form two real vectors,  $e_{rotsum}=(e_3 + e_4)/2$  and  $e_{rotdiff}=(e_3-e_4)/2i$ . Secondly, a generalized eigenvector representing the change of energy is introduced by finding a generalized eigenvector that perpendicular to  $e_6$ , in the nullspace to overcome the defectiveness. The monodromy matrix does not, however, give any other useful information. However it gives very important information that in order to nullify the diverging and converging motions, we just need to confine the relative motion inside the periodic subspaces only.

Since the size of the formation discussed is significantly smaller than that of the halo orbit, the formation design method can fundamentally be stated as a process of linearly combining these approximations to achieve the desired

formations. Two types of formations are studied in this thesis, natural loose formations and periodic loose formations with impulsive control. In natural formations there is no artificial acceleration considered, consequently the formation design only relies on the natural dynamics. Two modes of relative motion within natural formations, long-term and short-term motions are identified. In this study, the long-term motion is approximated by deriving a discrete formulation of independent directions based on the eigenvectors of the monodromy matrix, while for the short-term motion, to remedy the lack of analytical expressions for halo orbits, the fundamental set solutions are modeled using Fourier series and additional linear functions. The linear functions represent secular motions within one period. The short-term and the long-term motions can be integrated to form formula for short-term motion at the  $n_{th}$  period. A design example for natural formation is given in this thesis, where short-term oscillation in x-axis successfully suppressed.

The motivation for artificial periodic relative motions is that natural formations only allows limited design space so for more complex missions, the design space can be extended by adding impulsive control and periodically constrained. The use of single, two and three impulses are specially discussed in detail and an example of artificial periodic relative motion with arbitrary initial positions is also given in this thesis to confirm the validity of the design method. In the artificial periodic, the basic idea is to connect positions at the inner and outer points in one period with impulsive control. In doing so, there is increment of  $n$  linear DOF for  $n$  trajectories connected. Additional DOF also arises when the time of connecting points are also considered. Different with the natural formations, DOF of periodic relative motion with impulsive control doesn't depend on the accuracy of the modeling used in the fundamental set solutions (basic motions) hence the full nonlinear bases can be utilized whenever it's required.

## 博士論文の審査結果の要旨

本論文は、ラグランジュ点近傍ハロー軌道における編隊飛行の設計手法を提案したものである。設計対象の編隊飛行は、制限三体系における自由運動をベースとしたもので、位置・速度を時々刻々制御する自在性は失うものの、間欠的かつ少ない制御量で実現できるという特徴があり、本論文では「粗」編隊飛行 (Loose Formation Flying) と命名している。本論文は、力学系理論による運動の解析に基づき、粗編隊飛行の体系的な設計手法を構築したものである。

論文は全5章からなる。第1章の導入に続いて、第2章では力学系理論を用いてハロー軌道まわりの相対運動を分析している。ハロー軌道1周期の間の状態遷移行列、その一般化固有ベクトルを初期状態とする6つの基本運動の性質を分析し、ハロー軌道近傍に留まる運動を構成するためには、そのうちの発散・収束運動を除いた4つの基本運動のみを組み合わせる必要があることを明らかにした。

第3章は、自由運動のみを用いた粗編隊飛行の設計手法を示す、本論文の中心となる章である。まず4つの基本運動をハロー軌道周期ごとの長期運動、周期内の短期運動に分けて時間領域でモデル化し、その線形和としてハロー軌道近傍に留まる任意の自由運動を時間の関数として表現できることを示した。続いて、このモデル化した運動に設計要求を適用することにより、運動を探索する問題を、基本運動の係数を求める代数問題に変換できることを示した。これにより、要求を満足する設計解を代数的な方法で体系的に求める設計手法が確立された。本設計手法の有効性は、具体的な設計例を用いて示されている。

自由運動のみを用いた設計の自然な拡張として、第4章では複数の自由運動をインパルス制御により接続した運動に対象を広げることで、設計自由度を高める方法を示している。まず複数の運動を組み合わせることで得られる自由度と、新たに課せられる制約を整理し、接続する運動の数(あるいは制御回数)と設計自由度の関係を明らかにした。次に、自由運動だけでは解が著しく限定される例として周期運動に着目し、複数の自由運動を組み合わせてそれを実現する場合の設計例を用いて、より広い解空間が得られることを示した。さらに、設計解として得られる制御計画の有効性について非線形モデルを用いたシミュレーションで確認している。最後の第5章では、得られた知見を総括している。

このように、本論文はラグランジュ点近傍ハロー軌道における粗編隊飛行の体系的な設計方法を提案し、その有効性を示したものである。とくに粗編隊飛行への着眼、力学系理論に基づく分析の導入の点で独特な面があり、それが提案された設計手法を独自・新規なものとしている。地球・月系、および太陽・地球系のラグランジュ点は将来の宇宙活動の拠点と目されており、その近傍では多数の宇宙機・施設が運用されることが予想される。そのような場面において、本論文で提案される手法は、多数の宇宙機の運動を効率良く管理する手法として広く活用されうる、有用なものである。

当論文については、5名の審査員(坂井真一郎、山田克彦、市川朗、吉川真、川勝康弘)参加のもと、2012年1月17日に公開発表会および口述試験が行われている。その結果、当論文は独自性・有用性を併せ持ち、博士論文としてふさわしいものであると異論なく判定された。また併せて、論文内容についての要領を得た説明と、質問に対する的確な回答、周辺話題に関わる議論から、出願者が論文内容について十分に理解しているとともに、軌道

るとともに、軌道力学、力学系理論、数値解析技術など、関連する専門分野・基礎分野についての十分な知識を有していると判断された。論文の執筆、および発表は英語でなされており、その内容・様相から、国際的な場において研究に関わる議論をするのに十分な語学力を有すると判断された。また本研究の成果は、国内外の多数の学会において発表されており、さらに学術雑誌にも既に論文1件が掲載されていることが確認された。

以上により、申請された論文は博士論文としてふさわしく、かつ出願者は学位授与にふさわしい知識と学力を有すると認められ、審査委員全員一致で合格と判定した。