

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 1 日現在

機関番号：33917

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560960

研究課題名(和文) 楕円制限3体問題と楕円軌道上のフォーメーションの総合的研究

研究課題名(英文) Elliptic-restricted three-body problem and formation flying along an eccentric orbit

研究代表者

市川 朗 (Ichikawa, Akira)

南山大学・情報理工学部・教授

研究者番号：00115437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、地球・月・人工衛星の制限3体問題における小ハロー軌道の生成と維持およびハロー軌道近傍のフォーメーションフライトのためのフィードバック制御系設計法を提案した。また、地球周回楕円軌道上のフォーメーションフライトに関しては、連続時間制御、インパルス制御、パルス制御の低燃費フィードバック設計法を提案した。さらに、自由度を高めるためフォーメーションの軌道生成と維持に関する制御系設計法も提案した。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have proposed a design method of feedback control systems for the generation and maintenance of small halo orbits near a Lagrangian point and for formation flying in the vicinity of a halo orbit in the Earth-moon-satellite three-body system. We have also shown how to design feedback controls with low fuel consumption for formation flying along an eccentric orbit in the cases of continuous control, impulse control and pulse control. To allow for the flexibility of the reference orbit, we have proposed active formation flying where the reference orbit is generated by an exogenous system and is maintained by feedback controls.

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：制限3体問題 ラグランジュ点 ハロー軌道 楕円軌道 フォーメーションフライト パルス制御 インパルス制御 フィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

- (1) 円軌道上のフォーメーションフライト
円軌道上の主衛星とその近傍の従衛星の相対運動方程式 (HCW 方程式) は周期解をもつ。軌道面内の形状は楕円であり、軌道面外の運動は単振動となる。この周期解に関するフォーメーション形成の研究が多数の研究者により行われている。主な研究は以下のとおりである。
最終時間固定の場合の燃料最小インパルス制御
最終時間自由の場合の燃料最小インパルス制御、パルス制御
漸近的フォーメーション形成のための低燃費フィードバック設計法 (連続時間、インパルス、パルス)
- (2) 楕円軌道上のフォーメーションフライト
楕円軌道上の相対運動方程式 (TH 方程式) も周期解をもつが、HCW 方程式の周期解が、離心率により歪み複雑な形状となる。その周期解に関するフォーメーション形成の主な研究は以下のとおりである。
最終時間固定の場合の燃料最小インパルス制御
連続時間制御によるフィードバックの設計法
- (3) 2 天体 1 宇宙機の円制限 3 体問題
2 天体の運動を円運動と仮定した場合の、宇宙機の運動に関する主な研究は以下のとおりである。
ラグランジュ点近傍の周期解、特に天体に隠れないハロー軌道の生成
ハロー軌道の維持制御
ハロー軌道近傍維持制御
ラグランジュ点近傍の小ハロー軌道生成と維持制御

この中の研究代表者の成果として、(1)- 、(2)- などがあげられる。さらに HCW 方程式および TH 方程式では、状態 (軌道) 移行に必要な制御入力の 2 乗積分は制御時間とともに 0 に近づけられる性質 (NCVE) があることも示した。この性質を利用してフィードバックの設計法を提案した。

一方、TH 方程式の周期解は、独立変数を時間から真近点離角に変換して求められており、実時間の制御には不便である。また、周期解から周期解への移行に必要な最小燃料なども求められていない。さらに、フィードバックによる軌道移行の場合、低燃費フィードバックの設計法に関する研究はあまり進んでいない。特にインパルス・パルス制御の場合の研究はほとんどない。TH 方程式の周期解は HCW 方程式の周期解の楕円が徐々に歪んだ形状となっており、ミッション遂行上必ずしも適しているとは言えない。

一方、地球・月・宇宙機の円制限 3 体問題では、月の裏側の L2 点として知られるラグランジュ点は将来の宇宙港の候補であり、その近傍のハロー軌道は、地球と月の裏側との通信に便利とされている。ハロー軌道上の宇宙機は、自由運動のため燃料を必要としないが、その形状や周期は自由に選ぶことはできない。ラグランジュ点近傍では、天体の観測、地球との通信、宇宙港での待機などの目的のためハロー軌道より小さい軌道の生成と維持が必要となる。円制限 3 体問題では、2 天体の運動は円運動と仮定し、宇宙機の運動方程式を求めている。しかし、実際の運動は楕円運動である。この場合のラグランジュ点およびハロー軌道に関する研究はあまりなされていない。また、制限 3 体問題の第 2 天体の質量を 0 に近づけると運動方程式は、地球周回衛星の相対運動方程式に一致する。この点を考慮した研究も報告されていない。

2. 研究の目的

制限 3 体問題の極限が 2 機の衛星の相対運動方程式になることから、楕円制限 3 体問題と楕円軌道上のフォーメーションフライトを総合的に研究することを目的とする。具体的には以下の研究を行う。

- (1) 楕円制限 3 体問題のラグランジュ点を定義し、線形化運動方程式に基づき小ハロー軌道の生成とその維持を低燃費で行う。近似ハロー軌道の維持制御を低燃費で行う。
- (2) インパルス・パルス入力による楕円軌道上のフォーメーション形成問題において、低燃費のフィードバック設計法を確立する。特に、実時間フィードバック制御の設計を行う。

3. 研究の方法

- (1) 楕円制限 3 体問題のハロー・小ハロー軌道の維持
円制限 3 体問題のハロー軌道維持の低燃費制御、小ハロー軌道の生成法と低燃費維持制御を確立し、楕円制限 3 体問題へ拡張する。
円制限 3 体問題のハロー軌道近傍のフォーメーションフライトを可能とする参照軌道生成と維持制御法を確立し、楕円制限 3 体問題へ拡張する。
- (2) 楕円軌道上のフォーメーション形成のための低燃費フィードバック設計
実時間制御則の設計
インパルス・パルス入力のフィードバック設計
TH 方程式の周期解を用いない柔軟性のあるフォーメーション形成法の提案

4. 研究成果

- (1) 円制限 3 体問題に関する研究成果

ラグランジュ点近傍に小ハロー軌道を生
成し、その軌道を維持する制御法として出力
レギュレーション理論を提案した。燃費と小
ハロー軌道の大きさの関係を数値的に示し、
ミッションに応じて選択できるようにした。

ハロー軌道の初期値は、数値計算により
求めるため、軌道は厳密に周期解とならない。
そのため、ほぼ周期解となる1周期分の軌道
を周期的に拡張してハロー軌道とみなし、そ
の維持を行う連続時間フィードバック則を
提案した。その燃費は、実用的な大きさであ
ること示した。

ハロー軌道上のフォーメーションフライト
の相対軌道生成と維持を小ハロー軌道の
場合と同様、出力レギュレーションにより行
うこと提案し、その燃費が小ハロー軌道の維
持と同程度であることを示した。(以上は学
会発表)

ハロー軌道の維持とハロー軌道上のフォ
ーメーションフライトがインパルス制御で
可能であることを示し、その総速度変化(燃
費)を求めた。(学会発表)

ハロー軌道近傍の参照軌道の生成は、ハロ
ー軌道の状態遷移行列を用いる方法が提案
されているが、本研究で提案された方法は、
その計算を必要としない。さらに、出力レギ
ュレーション理論の適用は本研究が初めて
であり、小ハロー軌道の制御にも共通して使
用できる方法である。角周波数を自由に変更
できることも利点である。この方法は、軌道
修正や局所的な軌道変更などにも適用でき
る。

(2) 楕円制限3体問題に関する研究成果

楕円制限3体問題の運動方程式は平衡点
を持たないが、これを楕円軌道の動径で正規
化すると円制限3体問題のラグランジュ点が
平衡点になることを示した。

上の正規化方程式を用いて小ハロー軌道
の生成と維持を行うことにより、円制限3体
問題と同程度に燃費が下げられることを示
した。

同様に正規化方程式を用いて円制限3体
問題のハロー軌道維持およびその近傍での
フォーメーションフライトを提案した。この
場合も、燃費が円制限3体問題と同程度にな
ることを示した。(以上学会発表)

一般に、制限3体問題における離心率の影
響は、円制限3体問題の摂動として扱われ、
楕円制限問題の運動方程式を用いる研究は
多くない。この研究では、この運動方程式を
直接扱うことにより、小ハロー軌道、ハロー
軌道の制御法を提案し、離心率の影響を調べ
ることができることを示した。太陽・惑星およ
び地球・月などの3体問題では、離心率があ
まり大きくないので、円制限3体問題の制御
法が、有効であることを示した。この方法の
特徴は、参照軌道の生成が容易なことである。

(3) 円軌道上のフォーメーションフライト

に関する研究成果

推力の最大値や燃料消費量に制限がある
場合のフィードバック設計法を提案した。
(学会発表)

出力フィードバックによるフォーメーシ
ョンフライトが、状態フィードバックと同様
に可能であることを示した。(学会発表)

通常のフォーメーションフライトおよび
任意の周期軌道へのアクティブフォーメー
ションがパルス制御で可能であることを示
し、総速度変化量を数値的に示した。(学会
発表)

軌道面内運動の制御は、進行方向の1入
力に限定しても2入力の場合と同等に可能
であることを示した。(雑誌論文)

アクティブフォーメーションをインパル
ス入力によるフィードバックで行う場合の
最適インパルス時刻を求めた。2インパルス
による軌道面内運動の場合、フィードバック
ゲインを小さくとるとオープンループ最適
制御のインパルス位置に近づくことが分か
った。(学会発表)

実用性の観点から、推力、燃料の制限下で
の制御法や出力フィードバックによる制御、
任意の生成軌道によるフォーメーションフ
ライト、インパルス・パルスによる制御およ
び2入力による制御の研究を行い、その可能
性を数値シミュレーションにより示した。

(4) 楕円軌道上のフォーメーションフライトに関する研究成果

TH方程式の周期解は形状が一定でなくフ
ォーメーションの参照軌道として用いる場
合、その選択が困難である。周期軌道をその
大きさと衛星の位置を示すパラメータで表
現し、軌道が作図できることを示した。この
パラメータ化により軌道が容易にイメージ
でき、望ましい軌道の設計が可能となった。
(雑誌論文)

TH方程式の周期解の周期は、主衛星の楕
円軌道の周期と同一であり、短時間のミッシ
ョンには不都合となる。連続時間制御により、
任意の周期をもつ楕円軌道や円軌道へのア
クティブフォーメーションが可能であるこ
とを示した。(雑誌論文)

通常のフォーメーションフライトがパル
ス制御で可能であることを示し、総速度変化
の小さいフィードバックの設計法を示した。

アクティブフォーメーションをパルス入
力で行う場合、離散時間周期系の出力レギ
ュレーション理論が必要となる。そのため、そ
の一般理論を確立した。

上の出力レギュレーション理論をもちい
て、4パルス、8パルスによるアクティブフ
ォーメーションの総速度変化を求めた。さら
に軌道角周波数などのパラメータと総速度
変化の関係を明らかにした。(以上学会発表
)

楕円軌道上の相対運動方程式は、軌道の動
径、真近点離角を含む周期系となるため制御

系設計が難しい。この研究では、参照軌道の生成を容易にするため TH 方程式の周期解の作図法を提案した。さらに、周期解を実時間の軌道に変換し実用的な制御ができるようにした。また、参照軌道の自由度を確保するために、アクティブフォーメーションを初めて提案した。インパルス・パルス制御の場合には、それを可能とするための離散時間周期系の理論を確立した。今後の研究として、パルス数の制御性能、パルス時間の選択法などがあげられる。

最後に、楕円制限3体問題と楕円軌道上のフォーメーションフライトの研究を総合的に行った利点を以下にあげる。TH 方程式が楕円制限3体問題の運動方程式の極限であるので、TH 方程式に用いた種々の制御設計法を楕円制限3体問題に適用できた。動径で正規化した方程式によりラグランジュ点を定義すること、出力レギュレーション理論を適用すること、インパルス/パルス制御法の適用などである。また、TH 方程式の離心率が0.3程度までは、HCW 方程式の制御法が有効であることから、楕円制限3体問題に円制限3体問題の制御が有効であると判断し、数値シミュレーションで確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Mai Bando, Akira Ichikawa, In-plane motion control of Hill-Clohessy-Wiltshire equations by single input, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 査読有 Vol.36, 2013, 1512-1521, DOI: 10.2514/1.57197

Mai Bando, Akira Ichikawa, Active formation flying along an elliptic orbit, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 査読有 Vol.36, 2013, 324-332 DOI: 10.2514/1.57703

Mai Bando, Akira Ichikawa, Graphical generation of periodic orbits of Tschauner-Hempel equations, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 査読有 Vol.35, 2012, 1002-1007 DOI: 10.2514/1.56326

[学会発表](計 9 件)

Mai Bando, Akira Ichikawa, Optimal selection of impulse times for formation flying, 2nd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems, 2014.3.25, Rome, Italy

Mai Bando, Akira Ichikawa, Active formation along a circular orbit by pulse control, 2013 SICE Annual Conference, 2013.9.17, Nagoya

Mai Bando, Akira Ichikawa, Formation flying along an

eccentric orbit by pulse control, 2013 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2013.8.13 Hilton Head Island, USA

Mai Bando, Akira Ichikawa, Formation flying near the libration points in the elliptic restricted three-body problem, 5th International Conference on Spacecraft Formation Flying Missions and Technologies, 2013.5.30 Munich, Germany

Mai Bando, Akira Ichikawa, Formation flying near the libration points by pulse control, SICE 第13回制御部門大会, 2013.3.8, 福岡

Mai Bando, Akira Ichikawa, Formation flying near the libration points by impulse control, 23rd AAS/AIAA Space Flight Mechanics, 2013.2.13 Hawaii, USA

Mai Bando, Akira Ichikawa, Formation flying by output Feedback controllers, 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics, 2012.10.30 Pasadena, USA

Mai Bando, Akira Ichikawa, Periodic orbits and formation flying near the libration points, 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics, 2012.10.30 Pasadena, USA

Mai Bando, Akira Ichikawa, Formation flying along a circular orbit with control constraints, 21st AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2011.8.2 Toronto, Canada

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 朗 (ICHIKAWA, Akira)
南山大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 00115437

(2) 研究協力者

坂東 麻衣 (BANDO, Mai)
九州大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40512041