

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289325

研究課題名(和文) 強摂動環境を積極的に利用した探査工学 アストロダイナミクスへの学際的アプローチ

研究課題名(英文) Interdisciplinary Approach to Engineering of Space Exploration under Strongly Perturbed Environment

研究代表者

津田 雄一 (Tsuda, Yuichi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：50370101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星や彗星等の小天体まわりの軌道は、太陽光圧・重力ポテンシャル・太陽潮汐力等の強い摂動を受けるため、強摂動軌道は小天体探査を計画する際に欠かせない工学課題である。本研究は、深宇宙探査で世界的な成果を上げたはやぶさ・IKAROSの運用データを用い、摂動を積極的に利用する軌道設計・誘導・航法手法の体系的な案出・解析を行った。代表的な成果として、摂動を介した姿勢と軌道の相互作用を利用した新姿勢制御法、能動加速を1回許容することで格段に運用性・安定性のよくなる小天体周回軌道設計法、小天体相対画像航法のためのデータベースの開発等について、近い将来実ミッションに適用可能なレベルで実現する目処を得た。

研究成果の概要(英文)：Strongly perturbed orbit subject to the solar radiation pressure, gravity potential and solar tidal force is an important problem for planning small body exploration. This research has newly derived several orbit design methodology, guidance and navigation theories which take full advantage of such perturbation effect from the flight data of two Japanese deep space missions, Hayabusa and Ikaros. The typical achievement includes (1) new attitude stabilization method utilizing attitude-orbit dynamics coupling, (2) stable and operationally-practical delta-V assisted periodic orbit around small bodies and (3) database software development for small body-relative image-based navigation, and so on. These accomplishments are ready to be applied to near future practical small body exploration missions.

研究分野：宇宙工学

キーワード：誘導 航法 制御

1. 研究開始当初の背景

2010 年は、以下の 2 つの観点で我が国の深宇宙探査にとってエポックメイキングな年であった。第一に、6 月 13 日に小惑星探査機「はやぶさ」が数々の困難を乗り越え地球へ帰還したこと。とかくはやぶさの直面した困難に注目が行きがちであるが、小天体表面に降り立ち、あるいは上空に長期滞在した運用実績は、ち密な誘導航法制御運用の結果であり、その実績は世界的に他に類を見ない工学的な運用データの宝庫である。

第二に、5 月 21 日に我が国が打ち上げた世界初のソーラーセイル実証機 IKAROS により、「ソーラーセイル」技術が世界的に注目を浴び、ソーラーセイルの実ミッションへの利用が現実問題として認識されるようになった。言うまでもなく、我が国はソーラーセイルの実運用データを持っている唯一の国であり、将来の新しい宇宙探査方式の一翼を担う技術として世界をリードしていける分野を保有したことになる。

この 2 つの探査技術の共通点に、「強摂動環境」がある。はやぶさは、小惑星滞在中、小天体の微小重力、太陽潮汐力、太陽光圧の力が拮抗する場での運用を遂行した。IKAROS は、太陽光圧を擾乱ではなく推進力および姿勢制御トルクとして活用する技術を実現化した。その過程で、両ミッションは摂動環境下での数々の実用的かつ新規性の高い誘導航法制御技術を発表してきた。このような強摂動下での運用技術は、深宇宙探査の可能性を広げるものであり（特にアストロダイナミクスの観点で）昨今世界的にも注目を集めている。そして、我が国は、強摂動環境下での実運用実績をはやぶさ・IKAROS において、現に保有している。

2. 研究の目的

本研究では、この優位性を最大限活用し、実績を持つことでしか成し得ない研究を目指す。はやぶさ・IKAROS は、各々個別に成果を上げたミッションであるが、ここではその両者の成果を「強摂動軌道」に着目して融合し、次のような 2 つの新しい観点で研究を実施する。

(1) 強摂動下での軌道設計・誘導・航法技術の確立

(1-a) 強摂動下での探査機の姿勢・軌道運動のカップリングを利用した誘導・航法技術

(1-b) 強摂動を積極的に利用した小天体周回軌道

(2) 強摂動をキーワードとしたアストロダイナミクス課題の体系化と研究素地の醸成

上記の成果は、単に学術成果を目指すのみならず、我が国の現行ないし近い将来の宇宙探査ミッションに積極的に採用を提案、ないし提案に足る実用性のある成果として提示していく。

3. 研究の方法

当研究の手法上の特徴は、はやぶさ・IKAROS・はやぶさ 2 のフライトデータからアストロダイナミクスの観点で興味深い事象を抽出し取り扱うこと、アストロダイナミクスを専門とする研究者の集う研究会を通じて、学術価値が高くかつ実用的な課題の抽出を行うこと、解決された課題は現行ないし近い将来の探査ミッションへ成果を提示すること、である。

前述(1-a)については、太陽光圧、小惑星重力ポテンシャル、太陽潮汐力等が拮抗する力学場における軌道設計手法、誘導航法技術の検討を行う。はやぶさ・IKAROS で保有しているフライトデータをもとに、太陽光圧や小天体重力の姿勢・軌道に及ぼす影響を評価する。さらに評価結果の対照として基礎物理に限りなく忠実な定式化に基づく数値モデルおよびそのモデルの特質を失わない効果的な縮退解析モデルを導出することで、個別ミッションの知見を汎化した技術体系に転化することを目指す。

(1-b)については、今後の小天体探査のフレキシビリティ拡大を目指して我が国実現例のない小天体周回運用の実現性について検討する。

(2)については、現状は小天体近傍運用のフライトデータはデータ種別ごとに散在している（例：画像、姿勢、ハウスキーピングデータ etc）のが実情であり、体系的な解析を行うために、航法の観点で整理しなおしたデータベースの構築をまず行う。その上で、小天体着陸や周回運用に必要な小惑星相対航法技術の検討を行う。このデータベースは汎用性を旨とし、小天体相対航法の研究プラットフォームとしてアストロダイナミクス研究者が実フライトデータを簡易に取り扱える環境の構築を目指す。

4. 研究成果

上述(1-a)、(1-b)、(2)の別に成果を以下に記述する。

(1-a-1) 太陽光圧と軌道運動のカップリングを利用した無燃料姿勢維持の実現

はやぶさ、IKAROS のフライトデータを活用することにより（図 1）、いかなる複雑形状の宇宙機でも取り扱うことのできる、太陽光圧・内部角運動量・軌道運動のカップリングを表現する支配方程式を導いた。これにより、従来擾乱としかみなされなかった太陽光圧を、能動的な姿勢制御に使う手法を考案した。特に当研究では、はやぶさ・IKAROS のようなスピン姿勢時の太陽光圧による姿勢安定化のみならず、三軸静止姿勢時にも適用可能な理論拡張に主眼を置いて、研究を実施した。結果として得られた解析モデルは、あらゆる形態の探査機を高々 9 つのパラメータで表現できる簡潔な式となっており、かつ実用上十分な精度を有するものである。本結果は、はやぶさ 2 プロジェクトにて採用され、総計約 200 日におよぶ無燃料太陽指向制御を実現し

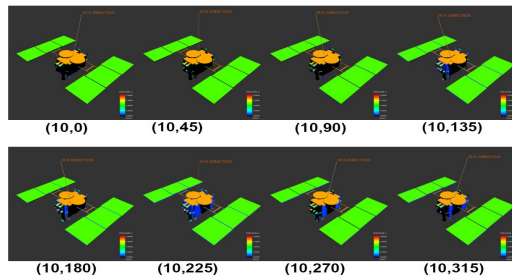


図 1：宇宙機の太陽光圧有限要素解析例
(括弧内は太陽光入射方位)

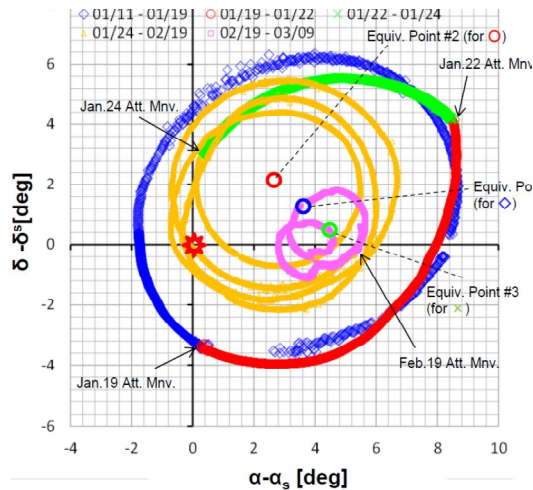


図 2：はやぶさ 2 の“楕円渦巻き”運動を活用した長期間無燃料太陽指向(太陽指向軸方向ベクトルの履歴, 原点=太陽方向, 2016年1-3月の実績)

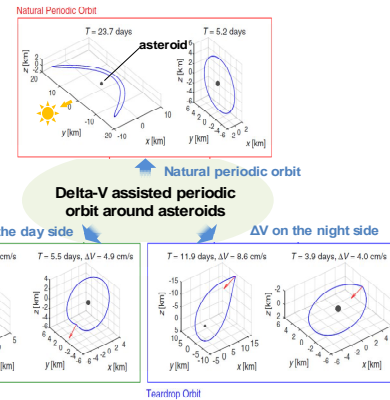
(図 2), 燃料節約・姿勢制御装置の長寿命化・深宇宙航法精度の向上に貢献した。また, 当研究の学術価値が認められ, 研究代表者らは H29 年度市村学術賞貢献賞を受賞した。[2,3,5,8,14]

(1-a-2) 太陽光圧・重力ポテンシャルによる姿勢軌道カップリングを積極利用した小天体周りの周回軌道設計

従来太陽光圧と質点として的小天体重力を加味した小天体周回軌道の検討は先行研究として存在した。当研究では, それに加えて小惑星重力ポテンシャル(J2 項等)を追加考慮した。これらの擾乱は並進力としては軌道摂動, 回転力としては擾乱トルク(傾斜トルク)として作用する。この姿勢=軌道カップリングダイナミクスを統合的に捉えることで, 姿勢・軌道ともに周期性を実現できる周回軌道の実現性を検討した。結果として, 先行研究に比してより広範囲で周回軌道を実現する可能性を示すことができた。[12]

(1-b) 強摂動を積極的に利用した小天体周りの準周期軌道の実現

小天体周りの周回軌道解は, 特定のジオメトリでのみ安定的に存在することが知られている(i.e. 軌道面が公転面に対して直交し太陽正対したターミネーター軌道)。このジオメトリ制約を克服し, 軌道設計の自由度を高めるために, 当研究では能動的な加速



Typical Pseudo Periodic Orbit Design around Asteroid

図 3：1 周回あたり 1 回の軌道制御を許容する周期軌道解

(ΔV) を 1 周期あたり 1 度だけ許容した周期軌道設計(準周期軌道)の検討を実施した(図 3)。本手法により, 従来の自然な周期軌道に比して周期解の成立範囲が飛躍的に広がり, かつ現実の軌道誘導航法の観点で実用に適した安定性・運用性を有する軌道を作れることを明らかにした。[1,4,6,7,15]

(2-1) 画像航法データベースソフトおよび航法解析ソフトウェアの開発

従来の探査ミッションデータは, データ種別ごとに独立なデータ形式で個別に保存されていた。画像航法に関する技術検討を行う場合, 撮像画像, 姿勢, 探査機状態, 地上局での電波計測データ等の情報を統合的に取り扱うことが必須である。そこで, それらの航法解析に必要な情報を統合的に取り扱うプラットフォームとなるデータベースおよび可視化ソフトウェアを当研究にて開発した。これにより, 小天体の 3 次元形状モデル, 相対航法画像, それらに付随するアンシラリーデータを用いて, 複数画像間の相関関係を構造化し管理する環境を整えることができた。また, 相関関係を画像間マッチングするアルゴリズムの開発も実施した。この成果により, 後段のデータベースを利用した小天体近傍航法誘導に関する研究を効率的に創出する環境が整った。

(2-2) 画像航法データを利用した小天体相対航法に関する研究群

当研究活動では, アストロダイナミクスの研究会を定期的開催し, 新規課題の抽出と深掘り, 成果創出を行ってきた。特に上述の画像航法データを用いることで, 効率的に成果を挙げることができた。以下にその例を示す(詳細は成果論文リストを参照されたい。)[9,10,11,13]

- ・地形画像間自動マッチング手法の開発
- ・小天体上にクレータを生成した場合のイジェクタ軌道の解析
- ・母機からの小天体周回軌道への投入手法と安定軌道の成立性
- ・LIDAR / 画像の相関情報を用いた小天体相対航法の高精度化

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

- [1] Kikuchi, S., Howell, K.C., Tsuda, Y., Kawaguchi, J., Orbit-attitude coupled motion around small bodies: Sun-synchronous orbits with Sun-tracking attitude motion, Acta Astronautica, Vol.140, pp.34-48, 2017, doi: 10.1016/j.actaastro.2017.07.043
- [2] Tsuda, Y., Ono, G., Saiki, T., Mimasu, Y., Ogawa, N., Terui, F., Solar Radiation Pressure-Assisted Fuel-Free Sun Tracking and Its Application to Hayabusa2, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.54(6), pp.1284-1293, 2017, doi: 10.2514/1.A33799
- [3] Matsumoto, J., Ono, G., Chujo, T., Akatsuka, K., Tsuda, Y., FEM-based High-fidelity Solar Radiation Pressure Analysis, Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.60(5), pp.276-283, 2017, doi: 10.2322/tjsass.60.276
- [4] Kikuchi, S., Tsuda, Y., Kawaguchi, J., Delta-V Assisted Periodic Orbits Around Small Bodies, Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol.40(1), pp.150-163, 2017, doi: 10.2514/1.G000696
- [5] Ono, G., Tsuda, Y., et.al., Generalized Attitude Model for Momentum-Biased Solar Sail Spacecraft, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 39(3), pp. 1491-1500, 2016, doi: 10.2514/1.G001750
- [6] Kikuchi, S., Tsuda, Y., Kawaguchi, J., Stabilization Strategy of Delta-V Assisted Periodic Orbits around Asteroids Based on an Augmented Monodromy Matrix, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol.14, pp. Pd_85-Pd_94, 2016.
- [7] Giancotti, M., Campagnola, S., Tsuda, Y., Kawaguchi, J., Families of periodic orbits in Hill's problem with solar radiation pressure: application to Hayabusa2, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Vol.120(3), pp.269-286, 2014, doi: 10.1007/s10569-014-9564-5

〔学会発表〕(計32件)

- [8] Tsuda, Y., Ono, G., Generalized Attitude Dynamics Model for Angular Momentum Stabilized Sail, 4th International Solar Sail Symposium, Kyoto, Japan, 2017.
- [9] Soldini, S., Tsuda, Y., Assessing the Hazard Posed by Ryugu Ejecta Dynamics on Hayabusa2 Spacecraft, Joint Conference:

31th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS)/26th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD2017), Matsuyama, Japan, 2017.

- [10] Ishida, H., Tsuda, Y., Range Measurement based Localization between Mothership and Lander Considering Asteroid Shape Using Particle Filter, Joint Conference: 31th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS)/26th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD2017), Matsuyama, Japan, 2017.
- [11] Tsuda, Y., Stochastic Event-Robust Deoptimization Technique for Low Thrust Trajectory Design, 2017 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Stevenson WA, USA, 2017.
- [12] Kikuchi, S., Howell, K. C., Tsuda, Y., Kawaguchi, J., Orbit-attitude Coupled Motion around Small Bodies: Sun-synchronous Orbits with Sun-tracking Attitude Motion, 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, 2016.
- [13] Saiki, T., Imamura, H., Mimasu, Y., Tsuda, Y., Study on Impact Experiment of Hayabusa2 Mission, 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Napa, USA, 2016.
- [14] Tsuda, Y., Ono, G., Akatsuka, K., Saiki, T., Mimasu, Y., Ogawa, N., Terui, F., Generalized Attitude Model for Momentum-Biased Solar Sail Spacecraft, AAS Astrodynamics Specialist Conference, Vail, USA, 2015.
- [15] Kikuchi, S., Tsuda, Y., Quasi-periodic Orbit Design around an Asteroid Using an Impulsive Delta-V, 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada, 2014.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

第 50 回市村学術賞貢献賞受賞
「ソーラーセイル技術を用いた無燃料姿勢
制御の実現」
[http://www.sgkz.or.jp/prize/science/50/
document_05.html](http://www.sgkz.or.jp/prize/science/50/document_05.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田 雄一 (TSUDA, Yuichi)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
准教授
研究者番号：50370101

(2) 研究分担者

佐伯 孝尚 (SAIKI, Takanao)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
助教
研究者番号：10415903

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()