

小惑星Ryugu近傍における「はやぶさ2」の軌道解析について

池田 人, 三桝 裕也 (宇宙航空研究開発機構), 菊地 翔太, 大木 優介 (東京大学大学院), はやぶさ2アストロダイナミクスサイエンスチーム

○ 周回運用の検討

【周回運用への挑戦】

- 小惑星周回運用は、はやぶさ2初号機で実施していない、誘導航法上の新しい挑戦
- 重力推定・光学観測の観点で、低高度の繰り返し飛行は極めて有用
- 小惑星滞在期間は1.5年。自転軸や天体ジオメトリの関係で、イベント実施時期に制約がある。
- ノミナルのHP高度は20kmであるが、燃料の制約上、ミッションフェーズ期間の50% (=9か月)は、高度40kmを維持せざるを得ない状態である。

そこで、燃料を節約しつつ低高度観測を行うために、ミッション後半での周回運用の可能性を検討する。

ミッションフェーズの運用計画例(自転軸=Muller Model)

GM: Global Mapping, LA: Low Altitude Operation, MN1/MN2: MINERVAII Deployment, MS: MASCOT Lander Deployment, TD1/TD2/TD3: Touch Down Operation, SC: SCI Cratering Operation, HP: HP Return After SCI Operation, CR: Crater Search Operation.

【ΔVによる人工的な周回軌道】

小惑星周回の微小重力環境下では、相対的に外乱が強く、特に太陽光圧により軌道運動が乱される。このような環境下で達成できる自然な周回軌道は、軌道の幾何関係の自由度が低く、はやぶさ2の機器配置等の制約から実用に適さない。

そこで、本研究では1周ごとにΔVを与えることで周期性を持たせる人工的な周回軌道を考案している。

人工的な周回軌道は右図のような2種類に大別される。

渡瀬型

ハート型

このような人工的な周回軌道は下記の特徴を有する。

- 軌道設計の自由度が高い
- 軌道設計がシンプルなので運用性が高い
- 必要なΔVが小さい(1周あたりおよそ10cm/s以下)
- 軌道力学理論の上で新たなタイプの軌道である

周回運用に必要なΔVについては、右図に示す通り、同程度の高度でのホバリングのΔVより大幅に小さい。また、HP(高度20km)でのホバリングとほぼ同レベルである。

このような周回軌道を用いれば、HP維持運用と比較して、同レベルの燃料消費で低高度繰り返し観測を実現可能。

【周回軌道の設計】

はやぶさ2ミッションに適用可能な軌道として、下記の条件でΔVによる人工的な周回軌道を設計している。

- 日陰を経験しない
- 高度3~5km程度
- 地球指向の状態で、ONC-W1(広角カメラ)による広範囲の観測性がある(本セッション右上の図を参照)
- HP直下のsub-Earth上の点を通る

→HPからの降下による投入が容易となり、かつONC-W1などの画角の小さい機器で観測可能となる

以上の条件で、設計した周回軌道の一例が下図である。

周回軌道の例(周期: 2.9 days, ΔV: 2.9 cm/s)

x軸が太陽から小惑星へ方向、z軸が小惑星公転軌道面に垂直な方向、y軸方向が右手系をなす方向。

周回軌道上からの画像上での小惑星の見え方をシミュレーションした解析結果

撮像間隔: 100 min
撮像時間: 13 hr
観測機器: ONC-W1 (画角60deg)

【多面体重力モデルを用いた解析】

本研究では、多面体重力モデルを用いた宇宙機の軌道運動の解析を進めている。本解析を通じて、周回運用に関する下記の2つの観点での評価を行う。

- 重力高次項の効果が周回運用の精度に与える影響(工学的な成り立ち評価)
- 軌道決定に基づく重力高次項の推定精度(理論的な有用性評価)

下図のような仮想的なリュウグウの多面体モデルを用いると、小惑星周回の重力場を数値的に計算することができ、今後はこの重力モデルに基づいた詳細な解析を実施する予定である。

左図はリュウグウの多面体モデルの一例(色は高度に対応)を表し、右図は表面での重力加速度を示す。

○ 小惑星の安定周回軌道解の拡張

【小惑星周回について】

- 周回運用は、消費燃料削減、および重力場推定や光学観測の観点で有用である。

【ターミネーター軌道】

- 太陽輻射圧が支配的な強振動の環境下で安定な周回軌道として代表的なものは、ターミネーター軌道である。
- しかし、ターミネーター軌道は軌道面が常に太陽方向に直交していなければならず、軌道設計の自由度が低い。さらに、軌道面が夜側にあるので、光学観測が制約される。

【グリッドサーチ】

- そこでグリッドサーチによって、周回軌道解の範囲を拡張する。

グリッドサーチ手法

ターミネーター軌道

グリッドサーチのパラメータ

- z_0 : 軌道サイズ
- λ_0 : 昇交点赤経

軌道伝搬時間: 474 day (Ryuguの1周期)

【黄道面内での解空間】

右図はグリッドサーチにおける、XY平面(Hill座標)と最初に交わる点のプロット。等高線は、軌道維持できた時間を示す。解空間は、長期安定領域と不安定領域に別れる。

- 不安定領域の軌道は数日で小惑星に衝突する軌道を示す。
- 安定領域の軌道は、軌道面が振動的であるが、軌道伝搬版を続けても小惑星に衝突しない。軌道は閉じていない準周期的な軌道であり、本研究ではこの軌道を準周期ターミネーター軌道と呼ぶ。

【準周期ターミネーター軌道】

これまでのターミネーター軌道は、準周期ターミネーター軌道解群の特別なケースであることが示された。

- 安定領域は右図のように広がりを持った領域に存在するので、準周期ターミネーター軌道は軌道設計の自由度を高められる。
- 準周期ターミネーター軌道のXY平面の軌道からわかるように、周回時間の約半分の時間、宇宙機が太陽側を通るので、光学観測の観測性も向上させられる。

準周期ターミネーター軌道

周回数	2	184
軌道維持時間	10.4 day	474 day
衝突可否	衝突する	衝突しない

軌道例

【準周期ターミネーター軌道の存在範囲を示す境界線】

- 太陽輻射圧を摂動関数として定式化し、ラグランジュの惑星方程式を求解することで、軌道要素の時間遷移を求めることができる。
- 近点距離の最小値がちょうど小惑星半径と一致したときが、小惑星への衝突可否の境目となるので、離心率の時間遷移から解空間の境界線の解析解を求めることができる。
- 安定領域の境界線の解析解は、数値解と非常によく一致している。
- 解析解によりあらゆる重力定数、太陽輻射圧に対して安定領域を求めることが可能である。Ryuguの重力定数のMaximum, Nominal, Minimum値に対する境界線を示す。
- 重力定数に対する相対的な太陽輻射圧の強さを示す無次元定数 β による境界線も示す。また、 $\beta \rightarrow \infty$ としたときの境界線の近似解は、 $y = \pm\sqrt{2x+1}$ と極めてシンプルな式で表せる。

境界線の解析解

$$\alpha[1 - \cos(\delta + \psi)] = 1$$

$$\cos \delta = \sin^2 \psi \sin \lambda_0 - \cos^2 \psi$$

α : 軌道長半径
 λ_0 : 初期昇交点赤経
 ψ : 太陽光圧の強さ(定数)

左式を満たす α, λ_0 をプロット

境界線の近似解析解

$$y = \pm\sqrt{2x+1}$$

Ryuguの重力定数に対する境界線

種々の重力定数・太陽光圧に対する境界線と、教条の近似解

○ 多質点モデルによる小惑星重力の影響評価

【多質点重力モデル】

小惑星固定座標系における運動方程式

$$\ddot{x} = -2n\dot{x} + n^2 x + g_x$$

$$\ddot{y} = -2n\dot{y} + n^2 y + g_y$$

$$\ddot{z} = g_z$$

但し $g = -\frac{GM_1}{r_1^3}(r-r_1) - \frac{GM_2}{r_2^3}(r-r_2) - \dots - \frac{GM_N}{r_N^3}(r-r_N)$

Nominal GM = 32[m³/s²]

上式に従って描いた、Radial方向速度: -10cm/s (最終降下フェーズ想定)とした場合の1質点モデルの加速度マップ(左)と、2質点モデルの加速度マップ(右)は2質点の場合だと、1質点ではなかった加速度場の偏りが観れる

◆1質点モデル: GM=32 [m³/s²]

◆2質点モデル: GM1=GM2=16 [m³/s²]

【降下シミュレーション】

- 重力が単質点という想定でGCP-NAV降下を開始した場合に、質点数が異なる場合に、最終到達点までの距離がどの程度変わるかを評価した

◆HP座標系における目標点のズレ

小惑星固定座標系での目標点

	①	②	③	④
2質点	54.7m	-46.7m	54.7m	-46.7m
3質点	3.8m	24.2m	-1.4m	-17.4m
4質点	14.4m	14.4m	14.4m	14.4m
5質点	2.5m	10.1m	3.0m	-3.8m

2質点モデルで表現されるような重力場の場合、1質点からの重力場の差が大きく質点モデルだけの評価では誘導精度評価として不十分な可能性がある

イトカワ (Itokawa) エロス (Eros)

2質点で表現されるような重力場

【小惑星近傍における運動への影響】

◆2質点モデルにおける降下速度の違いによる水平方向位置への影響

降下速度が速い方が重力の影響をより大きく受け、水平位置のズレが大きくなること分かる

- 降下速度: 0.1m/s
- 降下速度: 0.05m/s
- 降下速度: 0.01m/s

◆HP座標系における2質点モデルの重力変動の式

この式を元に、HP系における重力の力のかけ方、探索機の振る舞いを紐解いてみる

$$\ddot{z} = -\frac{GM_1}{r_{31}^3}(x_3-x_1) - \frac{GM_2}{r_{32}^3}(x_3-x_2) = -\frac{GM_1}{r_{31}^3}(x_3-r_1 \cos \alpha) - \frac{GM_2}{r_{32}^3}(x_3+r_2 \cos \alpha)$$

2質点が同じ重力の大きさで、 $r_1+r_2=500m$ と仮定する場合、2質点のHPの点における、重力のかけ方は、以下の図のように周期的に±を繰り返す

このように重力加速度の大きさや方向が時々刻々と変化する場合は、元々z軸上にある探査機のX軸方向の動きは右図に示す通り、発散することなく、周期的に重心位置を追随するような動きとなる。この振れ幅は探査機の距離が重心に近いほど大きい

○ 小惑星近傍における力学環境の評価

【力学環境の評価】

定義

$$z^* = \{r = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \Omega_z(r) = 0\}$$

$$h^* = \{r = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \Omega_h(r) = 0\}$$

ここで、 h はcylindrical radius

$$zh^* = \{r = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \Omega_z(r) = 0 \text{ and } \Omega_h(r) = 0\}$$

h^* と z^* の交点を意味する

図: z^* , h^* , zh^* , Ridge line, Equilibrium points, Barrier of potential の関係

小惑星Benuの計算例

小惑星Ryuguの計算例