

画像を用いた高精度軌道上物体追尾の実現にむけた 対象物軌跡予測の実現

名城大学 理工学部 交通機械工学科

宮田 喜久子

1. はじめに

近年,特に宇宙分野において,高速移動物体の高精度追尾制御技術の必要性は高まっている.有意な相対速度制御を行わず探査機自身は元々の軌道周回運動を維持しながらも小天体の近隣を通過しながら対象天体の情報を観測するフライバイ探査¹⁾やスペースデブリの軌道上・地上からの観測²⁾など,観測機器との相対位置・速度パラメータを事前に高精度に把握することが難しい軌道上物体を継続的かつ誤差なく観測するための技術が求められている.本研究では,光学観測機器の利用を想定し,対象物の時系列での取得画像データに軌道力学による運動拘束条件を適用することにより適切に処理し対象物の予測軌道を生成,その情報とアクチュエータの特性を用いて高精度追尾を実現しやすい制御目標パラメータを設定し従来よりも高精度な目標物追尾制御要求を達成するシステム構築を目指す.その検討の一部を報告する.

2. 高速移動物体追尾と課題

本研究では,小惑星フライバイ探査とスペースデブリの地上からの光学望遠鏡での観測という2つの事例を高速移動物体の追尾問題として定義し,対象物軌跡予測を試行する.

宇宙機が対象天体の近傍を通過しながら観測する手法をフライバイ探査という.1986年のハレー彗星探査にはじまり数多くの小天体探査に採用されている手法であり,画像の取得が主要ミッションの1つとなることが多い.高品質な画像取得には分解能の確保と長時間露光に耐える追尾安定性が求められる.一般に取得画像の分解能は望遠鏡の大きさに比例し対象物との相対距離に反比例する.しかし近年,宇宙機の小型化に伴い観測機器も小型化する傾向がみられる.小型化によって低下する品質を担保するには最接近距離の短縮・相対速度の増加が必要となり,追尾精度と安定性に対する要求はさらに厳しくなる.このような高精度追尾制御要求に対応するためには,軌道上において自律的に探査機自身が対象物との相対パラメータを推定し,目標物追尾軌道を生成,追尾する機能が重要となってくる.

スペースデブリの地上からの光学望遠鏡での観測に対しても,自律的な目標物抽出および追尾は重要な要素となる.新規スペースデブリの発生抑制のためには,衝突可能性の高いスペースデブリの効率的な除去や,将来的な分布の予測などが必要となってくる.スペースデブリの除去の確実な実施には,対象物の運動状態を正確に把握することが望ましい.また,将来的な分布の予測に対しても,継続的な観測で詳細に対象物体の運動履歴を得ることは有益である.低軌道に存在する物体は,地上局との相対速度が比較的大きく軌道予測の誤差が対象物の取得画像品質へと与える影響も大きいいため正確な追尾によって観測時間を確保する利点も高い.

これらの追尾問題には,撮影画像からの対象物の検知,検知やデータ転送に要する時刻遅延,対象物の軌跡予測の不確実性,センサ・アクチュエータ特性の不確実性,制御性能に関する不確実性,環境変動の影響など多くの不確実性を含む誤差要因が絡んでおり,要求目標精度を達

成するための方針を構築しにくい。本研究では、これらの想定される課題について画像を用いた対象物の軌跡予測という点に焦点をあて、実利用を視野に入れた形での対応策を検討する。

3. 全体システム概要

本研究で最終的に構築を目指す制御システムの構成図を図 1 に示す。光学センサ、駆動系、計算機から構成される。光学センサにて取得された画像はまず計算機に送信される。計算機内の画像処理部では、センサや撮影環境起因の既知の誤差などを補正する 1 次処理を実施後、画像から目標物を抽出しその中心座標を算出する。算出された目標物の中心座標は誘導則を検討するブロックに引き渡される。誘導則検討ブロックでは目標物とシステムの間の相対関係を表す状態量を推定するブロック、軌跡予測ブロックを経て追尾目標値生成ブロックによって追尾目標値が生成される。生成された追尾目標値と現在の状態量、駆動系の状態量などが制御則のブロックに送られ、駆動系への指令が生成される。今回の検討は主に、想定手法の有効性評価と適用可能範囲に対して数値シミュレーションを通じた検討を実施することとし、構成図に基づいた数値シミュレータを構築、各種検討を実施した。構築に際しては、適用先のシステム的环境条件等によって採用可能なハードウェアの構成要素の特性・性能は変化するため、対応するブロックの切り替えや置き換えなどで多くのシステムに対応することを目指した。

対象物の光学センサ内での対象物中心座標の真値は、先行研究によるモデルに基づいて生成した。小惑星フライバイ問題については小惑星と宇宙機の相対運動を Kawaguchi³⁾らによる 2 次元平面モデルを前提としモデル化し、Ariu⁴⁾らによって定義された座標系を用いて生成した。また、地上からのスペースデブリ光学観測問題については九州大学ペガサス天体観測室⁵⁾から国際宇宙ステーション由来の低軌道デブリを観測すると仮定した問題を設定し、観測軌道データ⁶⁾および軌道計算ツール⁷⁾を用いて相対運動履歴を生成し、その情報に光学系の情報を適用することにより生成した。

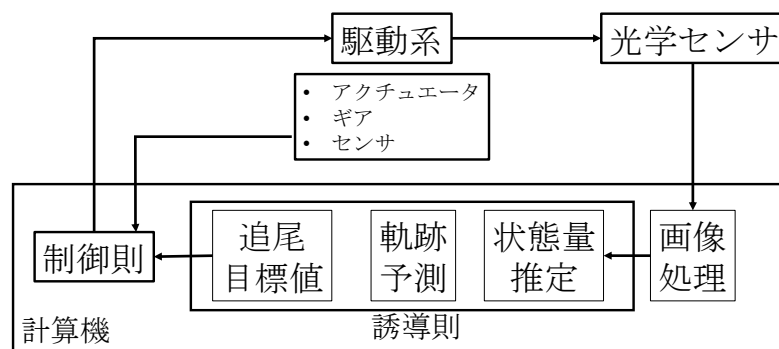


図 1. 全体制御システム概要

4. 取得画像からの目標物抽出に関わる課題のモデル化に向けた検討

本研究では、取得画像からの目標物座標抽出を特に重要な課題と設定し、現実的な不確実性を数値シミュレータに組み込むためにハードウェア構築を含めた検討を実施した。

小惑星フライバイ問題に対しては、実験的なアプローチから特性理解を深めることを目的として図 2 に示す小惑星と光学センサ部を模擬する試験系を構築した。試験系は模擬小惑星を制御するリニアアクチュエータとその駆動システム、光学センサと視野軸制御系を模擬する小型可視カメラと回転台から成る。今回は特に取得画像から抽出した対象物の中心座標が実際の対象物中心座標と異なるケースの発生条件や誤差傾向、画像処理時間に伴う時刻遅れの影響について検討した。前者は、小惑星と太陽、宇宙機の相対関係や小惑星の形状などから画像面内の対象物の輝度中心と実際の幾何中心の間に誤差が発生するとされるものであり、小惑星との相対距離が近くなるとより顕著になると想定される。例として光の入射状態に起因する中心ずれの検討について実際の実験結果と共に紹介する。模擬小惑星の位置と回転台の角度を理想的な追尾制御が実現した際の状態と一致するように制御し、常に撮影画像の中心に模擬小惑星の幾何中心が映るように設定した環境下で、小惑星への光の入射方向の影響を取得した。図 3 は画面右側面から光が入射した際の撮影画像を 2 値化し、その輝度中心を赤点で表示したものである。幾何中心とは異なる点に対象物中心座標として抽出されており、特性を整理することによって数値シミュレータにモデルとして組み込むことを目指した。



図 2. 小惑星追尾模擬画像取得装置



図 3. 対象物座標抽出例

スペースデブリ光学観測における対象物座標抽出においては、正確な軌道決定が完了していない未知スペースデブリを対象物と想定した。その条件下で対象物抽出に伴う時刻遅れを特に重要な誤差要因として抽出し、追尾対象デブリの抽出および各種画像処理の効率化に伴う検討を実施した。対象物抽出の検討に用いる模擬画像の生成に際しては、九州大学ペガサス天体観測室で実際に静止軌道のデブリを撮影した光学観測画像情報を利用した。光学センサ素子自体の特性補正シーケンスの自動化や既知の恒星の効率的な排除方法などの検討も実施した。既知の恒星の排除に関しては、恒星位置情報を用いて天球上の位置を同定する既存のソフトウェア⁸⁾の情報を活用した恒星排除、時系列で取得されたセンサ特性補正後の光学画像データの特徴点を抽出・追尾するパターンマッチングを実現し恒星排除を実現する手法などを検討した。

5. 対象物軌跡予測手法改良に向けた検討

取得情報が光学画像のみである場合, 対象物の大きさが不明で相対位置速度情報に誤差があると, 3次元での正確な相対位置・速度の推定を行うことは困難である. 本研究では時系列で取得された光学センサ画像から抽出したセンサ視線方向と対象物方向の誤差ベクトルに軌道運動による制約を考慮することで対象物の運動を推定する Ariu⁴⁾らによって提案された手法の改良検討に取り組んだ. 具体的には, 想定される取得画像の特性を考慮して抽出値に対する共分散を推定し, 対象物の存在領域を定義したうえでの対象物軌跡の予測を試行した.

6. 数値シミュレーションによる検討

小惑星フライバイ問題に対し, 各種パラメータの不確実性が相対運動パラメータ変動, 時刻遅れ, 取得画像中心ずれの影響を数値シミュレーションで検討した結果を示す. 基本状態としては, 相対速度 20 km/s, 最接近距離 200 km, 画像ノイズ 0.1pixel という条件での検討を実施した.

① 相対運動パラメータ変動

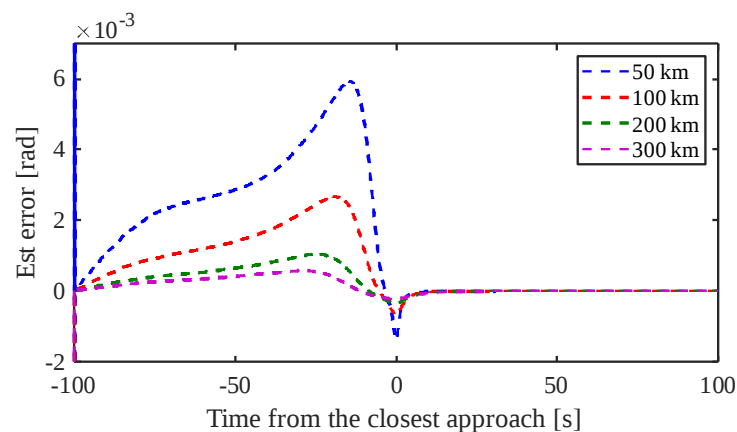


図 4. 最接近距離変動による推定誤差変動

図 4 に相対運動パラメータ変動の影響を考慮した際の推定誤差をまとめたものを示す. 幾何学的に考えた際の傾向と一致し, 数値シミュレータが適切に構築できていることと問題設定の正当性が確認できた.

② 時刻遅れの影響

図 5 に時刻遅れの影響を検討した際の推定誤差の時系列データを示す. 時刻遅れと推定誤差の関係は比例関係では考慮できず, 特定の遅れから急に誤差への影響が大きくなるケースが発生することも分かった. また固定誤差よりも変動成分が生じる誤差のほうが推定への影響は大きくなることも確認された. 誤差成分を正確に測定するハードウェアの必要性及び要求精度の目安を得ることができた.

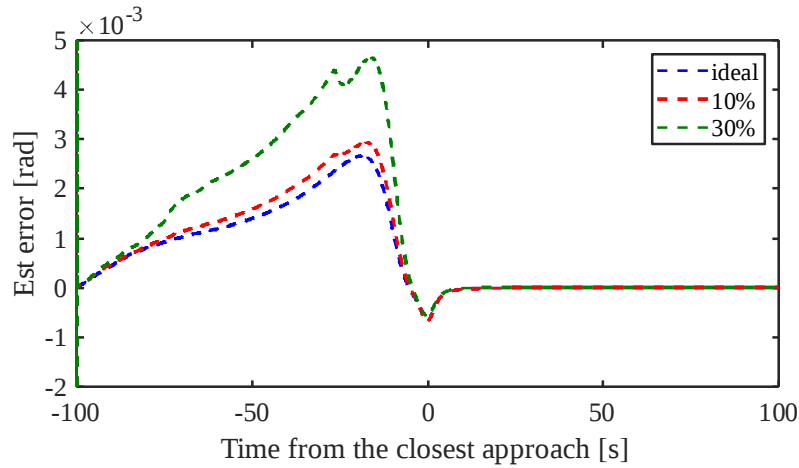


図 5. 時刻遅れによる推定誤差変動

③ 中心ずれの影響

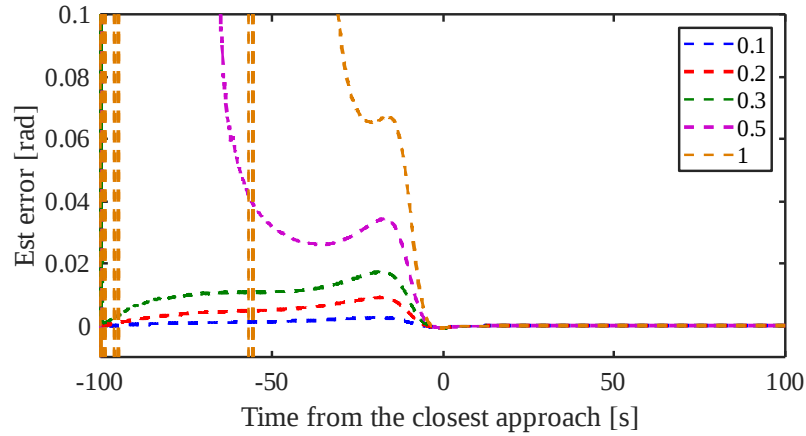


図 6. 中心ずれによる推定誤差変動

中心ずれの影響については、画像ノイズとして模擬する形で検討を実施した。中心ずれの影響は推定の収束に大きく影響することがわかった。また、収束後は影響が低減されることも分かった。よって、事前に中心ずれを予測した値をモデルに組み込む推定則は優位に働く可能性が高いことが確認できた。

このように、提案手法が一定の精度で追尾目標値を生成できることが確認できた。また、適用した手法に対して各種パラメータ変動が与える影響を適切に評価できる環境が構築可能であることが確認された。

7. まとめ

本研究では、画像を用いた高精度軌道上物体追尾の実現にむけた対象物軌跡予測に対する検討を実施した。ハードウェアとしては、小惑星追尾模擬画像取得装置の構築などを含め、個別要素の検討を促進するテストベットの整備を実施した。数値解析環境としては、得られた情報や不確実性の影響を適切に考慮可能な数値シミュレータの開発も完了した。また、これらの情

報を用いて不確実性のあるパラメータが対象物軌跡予測へ与える影響の感度解析を数値的に検討することができた。しかし、影響を低減するための誘導則については改良の余地が存在しており、更なる検討が必要である。今後も、最終的には実機適用を目指し、提案誘導則を実際の制御則と組み合わせる形での追尾性能向上検討や構築したテストベットの用いた実験的な検証などを実施していきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。また、本研究には多くの関連研究者の方々から多大なご支援を頂きました。本学卒業生三輪剛也氏には小惑星追尾模擬画像取得装置製作において貢献をいただきました。九州大学花田俊也教授および関連研究者の方々からは JSPS 科研費 JP20H02355, JP23K20265 の助成を受けて九州大学が撮影したスペースデブリ観測画像の提供をはじめとした各種情報および知見の共有をいただきました。また、福井大学青柳賢英准教授には宇宙機搭載光学センサの特性に関する知見を、名古屋工業大学の関健太准教授をはじめとした研究チームの方々からはアクチュエータモデル化に対する知見の共有をいただきました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1). Comet Interceptor website: <https://www.cometinterceptor.space/> (Accessed 2025/1/30)
- 2). T. Yanagisawa, H. Kurosaki, H. Oda, "Investigation of a Ground-based Optical Observation System for LEO Objects", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 12-ists29, pp.Pr_41-Pr_46 (2014).
- 3). J. Kawaguchi, T. Hashimoto, I. Nakatani, and K. Ninomiya, "Autonomous imaging of phobos and deimos for the planet-b mission", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.18-3, pp.605-610 (1995).
- 4). K. Ariu, T. Inamori, R. Funase, and S. Nakasuka, "A dimensionless relative trajectory estimation algorithm for autonomous imaging of a small astronomical body in a close distance flyby", Advances in Space Research, Vol.58-4, pp.528-540 (2016).
- 5). 奥平清明, 花田俊也, 中島健介, 吉村康広, "ロシア放送衛星 EKRAN2 破砕破片の光学観測とその考察", 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集, JSASS-2023-S031 (2023)
- 6). Space-Track.org: <https://www.space-track.org/> (Accessed 2025/1/30)
- 7). SPICE website: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/index.html> (Accessed 2025/1/30)
- 8). ASTAP, the Astrometric STacking Program website: <https://www.hnsky.org/astap.htm> (Accessed 2025/1/30)