

氏 名 大平 元希

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2394 号

学位授与の日付 2023 年 3 月 24 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 遠方小天体探査のための自然地形および人工ランドマークを
活用した天体相対航法

論文審査委員 主 査 津田 雄一
JAXA 宇宙科学研究所 教授
吉川 真
宇宙科学専攻 准教授
坂井 真一郎
宇宙科学専攻 教授
竹内 央
宇宙科学専攻 教授
福田 盛介
JAXA 宇宙科学研究所 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 大平 元希

論文題目 遠方小天体探査のための
自然地形および人工ランドマークを活用した天体相対航法

本論文では、遠方小天体を含めた様々な小天体探査へ適用可能な、自然地形と人工ランドマークを活用した天体相対航法手法を提案する。

小惑星などの小天体の探査には大きな意義があり、様々なミッションが計画されている。今後はより遠方の小天体への着陸探査が求められる。特に小天体への着陸では、探査機の小天体相対位置推定が重要である。小天体を対象とした位置推定には特有の課題がある。1つ目はピンポイント着陸に必要な高精度推定である。2つ目は様々な小天体環境に適用可能なロバスト性である。小天体表面の詳細な地形環境を地球から観測することは困難であり、不確かさに適応可能な手法が求められる。3つ目は探査機上での自律的なリアルタイム処理である。特に地球から遠く離れている小天体では、地球との通信を介して探査機を制御する際の運用の時定数が、小天体近傍における探査機の運動の時定数に対して許容できない程度に大きくなる。したがって、探査機上でのリアルタイムな高速処理が求められる。4つ目はリソース制約下への適用性である。放射線耐性や電力制約の影響で、地球用と比較して性能が劣る宇宙用計算機の下で、これらの課題に対処する必要がある。これらの課題は、小惑星帯以遠の遠方小天体探査においてより顕著になる。このような背景もあり、小惑星帯以遠の遠方小天体へのピンポイント直接着陸を実現した例は未だにない。

このような中、様々な研究が行われてきた。小惑星探査機はやぶさ2やOSIRIS-RExの手法は、計画位置上の参照地形情報と実際の地形情報を比較することで位置を推定する地形相対航法に基づいている。はやぶさ2の場合、計画位置から投影された小天体点群モデルおよび岩などの自然ランドマークを、実際の撮影画像とオペレータが地上で比較する。この手法はリアルタイム処理が必要な遠方小天体には適用できない。OSIRIS-RExの場合、レンダリングによって生成された自然ランドマーク周辺の参照画像と実際の撮影画像を、プレートマッチングを用いて探査機上で自動比較する。しかし、一般的なレンダリングとプレートマッチングには膨大な計算量を要するため、より重力が大きく、高速処理が求められる遠方小天体には適さない。また、はやぶさ2では、再帰性反射を用いた人工的なターゲットマーカを用いた航法も実証された。はやぶさ2ではターゲットマーカを1つしか使用しないため、画像から検出された2次元マーカ位置と、高精細地形モデルとレーザ高度計による高度計測を組み合わせることで、表面地形環境に対してロバストな3次元位置推定を実現していた。しかし、重力が大きく、高精細地形モデルを作成するための十分な事前観測が困難な遠方小天体にはこの方法は適さない。

そこで本論文では、遠方小天体を含めた様々な天体へ適用可能な、自由度の高い、高精度・高速位置推定を提案し、従来手法では困難であった小天体へのピンポイント着陸を可能にする。

2章では、ベクトル符号相関法を用いた地形相対航法に基づいた位置推定手法を提案する。まず、遠方小天体探査に要求される高速処理のために、FPGAでの高速並列処理が可能な、離散化輝度勾配を用いたベクトル符号相関法をテンプレートマッチングの相関値計算に活用した。さらに、ベクトル符号相関法を天体相対航法へ適用するために、高度ごとに様々な手法と組み合わせた。高高度では、簡易的なリアルタイムレンダリングで形状モデルから参照画像を生成し、天体の外形も含めたマッチングによって実際の画像と比較することで、探査機3次元位置を推定する。外形が見えなくなる低高度では、オフラインレンダリングで生成した参照画像と実際の画像を、複数の微小領域画像のマッチングで比較する。さらに、レンダリング時の参照画像・形状モデル間の複数微小領域の2次元・3次元対応関係を探査機に事前に登録しておくことで、リアルタイムにカメラの投影モデルを推定し、2次元平面上の変換に制約されない高精度な探査機3次元位置を実現している。このように、高度ごとにベクトル符号相関法と様々な手法を組み合わせることで、遠方小天体における厳しいリソース制約下でもFPGAで高速高精度位置推定が可能な手法を実現した。これは従来の手法では困難である。

3章では、はやぶさ2とリュウグウに基づいたシミュレーションによって、提案手法の位置推定精度と処理時間を評価した。この結果、数ピクセル以下の位置推定精度・数秒程度の処理時間を実現した。この精度は、はやぶさ2で使用されている手法と同程度以上の精度である。さらに、はやぶさ2のフライトデータを用いて高高度での提案手法を評価することで、実ミッション環境へ適用可能であることを明らかにした。

しかし、自然地形を活用した地形相対航法ベースの提案手法は、低高度において高精細形状モデルを必要とする。高分解能カメラ・LIDAR搭載が難しく、比較的重力が大きい場合は、低高度での観測による高精細形状モデルの作成が困難である。そこで、疎な点群情報として観測可能である人工ランドマークに着目した。まず4章では、はやぶさ2のターゲットマーカの問題点を解消するために、再帰性反射による2次元マーカ位置検出に加え、電波送受信による探査機・マーカ間の距離測定機能を搭載したマーカを提案した。電波の活用によって、マーカ3次元観測と符号化通信による識別が可能となる。まず、マーカの小天体上での位置(マーカ地図)が推定されていると仮定し、複数マーカの2次元位置や測距を用いたリアルタイム探査機位置推定手法を提案した。しかし、マーカ数が増加するほど、事前のマーカ地図推定が困難となる。そこで、複数マーカの2次元位置と測距を組み合わせた、マーカ地図と探査機位置のリアルタイム同時推定手法を提案した。この手法では、測距値とマーカ2次元位置の対応関係が未知であるという本研究特有の課題に対し、尤度とダイナミクスに基づいた独自の観測量対応関係推定手法をFastSLAMに組み込むことで、リアルタイム3次元高精度位置推定を実現した。形状モデルやマーカ地図などの事前情報を必要としないため、遠方小天体探査との相性もよい。

そして、はやぶさ2とリュウグウに基づいた位置推定シミュレーションで提案手法を評価することで、マーカ観測の外れ値やダイナミクスモデルの誤差に対してロバストな、初期位置推定誤差程度の位置推定精度・数秒程度の処理時間を実現した。

本論文で提案した手法は、遠方小天体を中心に様々な小天体へ適用可能である。自然地形を活用した手法は、形状モデル作成が可能な微小重力天体に特に適している。重力が大きい場合でも、豊富な燃料や高分解能カメラ・LIDARを搭載可能な場合は適用可能であ

る。また、使用可能な高度が形状モデル解像度で制限される。一方で、人工ランドマークを活用した手法は、マーカを事前に配置するための燃料的な余裕があれば、幅広い小天体へ適用可能である。しかし、マーカの投下地点や数によって、提案手法を使用可能な軌道と着陸地点が制限される。このように、本論文で提案した手法は、様々な地球小天体間距離・重力・地形環境・探査機特性に適用可能であり、これまでは困難であった遠方小天体を含めた様々な小天体への高自由度ピンポイント着陸を実現することで、新たな工学的・理学的成果の創出に貢献することができる。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 大平 元希

Title
論文題目 遠方小天体探査のための自然地形および人工ランドマークを活用した天体相対航法

本論文は、遠方小天体を含めた様々な小天体探査へ適用可能な、自然地形と人工ランドマークを活用した天体相対航法手法を提案するものである。従来の小天体着陸では、画像照合のような不確実性の高い処理を地上の管制員が実施することで地上と機上を含めた閉ループ系を構成する方式や、事前の綿密な地形調査に基づく地形モデル作成と高リソースな機上画像生成機能に依拠したオンボード画像航法方式などが行われてきた。しかし特に地球から遠く離れた小天体では、確保可能な熱・電力リソースが小さい、通信伝搬遅延が大きい、探査対象となる天体サイズが概して大きいなどの理由から、低リソースなリアルタイム画像航法でないと対処できないと考えられる。本研究はその点を解決する航法アーキテクチャおよびアルゴリズムを論じている。

論文は、6章で構成される。

第1章は、はやぶさ2、OSRIS-REx, Hera, SLIM等の従来ミッションの実例を引きながら、遠方小天体相対航法の特徴と課題を整理している。その上で、課題への解決策として、天体表面の不確かさや探査機リソースに応じて、自然地形ないし人工ランドマーク（ターゲットマーカ）を航法標識として活用したオンボード航法技術の検討を行うことを述べている。

第2章では、地形相対航法と自然地形に基づいた位置推定手法を複数提案している。これらは小天体表面の濃淡模様と予め準備したテンプレート画像を比較することで、特徴点や顕著な自然ランドマークの存在に依存せずに高精度に位置を推定する手法である。ベクトル符号相関法・複数微小領域や外形を含めたテンプレートマッチング・透視投影変換推定などを組み合わせることで、厳しいリソース制約下でもFPGAで高速高精度位置推定が可能な手法を定式化している。さらにFPGA実装のための仕様を整理している。

第3章は、第2章を受けて、数値計算およびFPGA回路とはやぶさ2ミッションの実データを用いた実験を実施し、その有効性を明らかにした。特に、処理時間、精度の観点ではやぶさ2ミッションの地上処理が介在する航法手法と同程度の性能を、オンボードリアルタイム処理で達成可能であることを実証的に示している。

第4章では、特徴地形に乏しい、あるいは高精細な地形情報を得難い状況を想定し、ターゲットマーカを用いた手法を複数提案している。まず、ターゲットマーカを複数地面に配置し、幾何拘束を考慮したマーカ識別とカメラの透視投影変換推定によって、複数のマーカ2次元位置からリアルタイムに探査機位置を推定する手法を構築した。次に、探査機・マーカ間測距が可能なアクティブマーカシステムを仮定し、複数マーカの測距を活用したオフラインマーカ地図推定手法とリアルタイム探査機位置推定手法を提案した。さら

に、これらの画像と測距によるマーカ観測を組み合わせることで、FastSLAMをベースとしたマーカ地図と探査機位置のリアルタイム同時推定手法を構築している。画像に映る複数のターゲットマーカ輝点と測距観測量の対応関係は自明ではないため、幾何拘束を考慮した組み合わせ探索問題を解く必要があるが、独自の尤度指標とパーティクルフィルタによる効率的な解法を案出している。

第5章は、第4章の定式化に基づき人工ランドマークを用いた航法の数値評価を実施している。探査機のみならず航法標識の位置同定も同時に実施することが可能なことも数値実験により示し、また本アルゴリズムの特性と限界性能を明らかにしている。

第6章は、本論文の結論であり、本論文の貢献をまとめ、研究の発展性について議論している。

以上要するに、本論文は、従来の比較的地球に近い小天体探査で活用された天体相対航法が守備範囲外とするような、様々な地球小天体間距離・小天体重力・小天体表面環境において天体相対航法を実現するために、自然地形やターゲットマーカの航法標識へ活用した機上リアルタイム処理の可能な天体相対航法手法を提案し、有効性を示したものであり、太陽系探査の発展とともに求められている探査機の自律性、未踏天体への可到達性の観点で実用的な寄与がある研究成果である。

以上により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。