

氏 名 柏岡 秀哉

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2393 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 Point Cloud Based Optical Navigation for Distant Small Body
Exploration

論文審査委員 主 査 津田 雄一
JAXA 宇宙科学研究所 教授
澤井 秀次郎
宇宙科学専攻 教授
吉川 真
宇宙科学専攻 准教授
佐伯 孝尚
宇宙科学専攻 教授
伊与田 健敏
創価大学 理工学部 准教授

博士論文の要旨

氏 名 柏岡 秀哉

論文題目 Point Cloud Based Optical Navigation for Distant Small Body Exploration

小惑星探査機はやぶさのサンプルリターンを契機に、遠方小天体探査への注目が非常に高まっている。こうした深宇宙探査ミッションにおいて、探査機のナビゲーションは非常に重要な技術である。遠方に位置する小天体への接近や着陸を行うミッションにおいて、目的地点へ高精度に着陸を行うためには、探査機の位置を正確に把握し、目的地へ辿り着くように誘導・制御を行わなければならない。先行研究において、事前に地上で用意した画像を探査機にアップロードし、オンボードでのナビゲーションを行う手法や地上局を介した探査機の位置推定・位置制御手法が提案されている。しかし、オンボードでの位置推定手法は、推定精度が事前に用意する画像の精度に依存することやオンボード画像処理への計算負荷から、限られた範囲での適用にとどまっている。また、地上局を介した手法は、探査機はやぶさ2で成功を収めているが、このナビゲーションは、地上局での人間の高いパターン認識能力と着陸直前の人工マーカを用いたオンボード推定によって成立している。この手法をリュウグウよりも遠い天体に対して適用するためには、通信遅延時間の観点から地上局で行われた人間による照合をオンボードで実施しなければならない。しかしながら、人間の高いパターン認識能力を汎用的に再現する照合手法は未だ確立されていない。一方で、地上局で行われた照合は、小惑星の大きさが画像内で数ピクセルから画像を埋め尽くすほどに変化する広い範囲で実施されたが、その手法の大部分は非常に疎な点群と撮像画像の輪郭の照合によるものであった。そこで、本研究は対象小天体の形状が疎な点群情報として既知であると仮定し、疎な点群をベースとしたヒューリスティックな照合手法を低負荷かつ高速処理可能な自己位置推定アルゴリズムとして構築し、探査機のナビゲーションに適用する。特に、本論文では点群ベースのナビゲーション手法として、輪郭に注目した手法と点群と画像を直接照合する手法の2つの手法を提案する。

本論文は全7章で構成されており、2章では点群をベースとしたナビゲーション手法のコンセプトとナビゲーションに用いる座標系や点群の定義を示す。提案する2つの手法の詳細はそれぞれ3章と5章に示す。4章では3章で提案した手法を様々な形状の小天体へ適用するため、点群を用いて補間手法を拡張した手法について示す。6章では、3章と5章で示した手法を探査機はやぶさ2のタッチダウン運用時のフライトデータに対して適用し、人が行ったナビゲーションとの精度比較を通じて、点群ベースのナビゲーション手法の実用性についての検討を示す。最後に、7章では本論文の成果についてまとめる。

本論文が各章で提案する点群ベースの手法についての要旨を示す。3章では、小天体の輪郭に注目し、疎な点群から輪郭を再現し照合に用いる手法を提案する。この手法は撮像画像の中で影の領域や日向と影の曖昧な境界に投影されている点群を人が評価する際の意図的に評価から外すアルゴリズムを点群に紐付いた1ビットの情報をを用いて模擬する。加えて、点群と撮像画像の照合計算において、小天体の輝度変化率にと影の情報に注目した符

号化処理によって画像をビット情報に変換し、相関値計算のアルゴリズムを構築する。これにより、小天体から輪郭の抽出と画像の符号化を同時に行い、かつ、FPGAによる相関値計算の高速処理を実現する。

4章では、点群の投影時に計算する距離情報を用いた点群の補間手法を提案する。3章の手法では単純な小天体の外形の輪郭にのみ注目していたが、ここで提案する補間手法により小惑星の外形の輪郭に加えて、内側に形成される輪郭を用いた照合処理が可能となる。これにより、小惑星自身が光を遮り表面上に複雑な影を形成するような双子小天体やイトカワといった複雑な形状を有する小天体に対しても、点群をベースとした輪郭の照合を適用し精度良く位置推定を行うことが可能となる。

5章では、点と画像の照合において補間処理を用いることなく実施する手法を提案する。これは、人間が点群と画像を照合する際に、点群が撮像画像中のオブジェクト上にうまく充填されるように、点群の拡大縮小や平行移動を行うことをベースとしている。この提案手法は、ハフ変換を用いて点群の投影画像と撮像画像をそれぞれ、ある点から小天体の輪郭までの角度と角度ごとの距離のパラメータ空間に投影する。このとき、撮像画像は投影中心の画像を固定する。一方で点群画像の投影中心は点群画像内を走査し複数のパラメータ群を作成する。そのため、撮像画像から得られる一連のパラメータに対して、点群から得られる一連のパラメータは複数生成される。その後、パラメータ空間上で角度ごとに撮像画像のパラメータと点群画像のパラメータ群の一致率を評価し、その最も一致率の高い値を用いて画像上での拡大縮小と平行移動のパラメータを推定する。この手法は補間処理を用いずに点と画像の評価を実施するため、3章で述べた手法よりもより少ない点数で照合を行うことができ、かつ、かつ、照合処理に必要な計算コストも少なくなる。

6章では、本論文が提案してきた点群ベースのナビゲーション手法を探査機はやぶさ2のタッチダウン運用で得たフライトデータに適用し、自然天体への適用性を検討する。はやぶさ2は小惑星リュウグウに二度のタッチダウンに成功しているが、本論文は二度目のタッチダウンのフライトデータを用いる。その理由は、はやぶさ2の着陸軌道は機器制約から太陽と小惑星の直線上に探査機が配置されるため影ができにくい。しかし、二度目のタッチダウン運用の降下軌道は一度目の降下軌道に比べてこの直線上から外れているため小惑星表面に影が生成されやすい。そのため、本提案手法による評価する点群の選択が機能しているかを効果的に評価することが可能と考えられる。本提案手法による推定結果とははやぶさ2チームが実施した推定結果を比較することで、提案手法の実用性について検討を行う。

最後に、7章にこれまで述べてきた点群による探査機の自己位置推定手法についての成果をまとめる。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 柏岡 秀哉

Title
論文題目 Point Cloud Based Optical Navigation for Distant Small Body Exploration

本論文は、小天体に対する接近・着陸のための画像照合航法において、従来採用されていたような画像テンプレートマッチングに基づく方式とは異なり、面情報を持たない点群によって構成された天体モデルと照合することにより、宇宙機に搭載可能な低リソースの航法アルゴリズムを提案するものである。点群情報に制約して航法アルゴリズムを実現することが当論文の新規性の高い点である。はやぶさ2や OSIRIS-REx ミッションのような地球近傍小惑星を超えて、遠方天体への探査を行う場合や、より大きな小天体を探査する際には、自律性や低リソース性の優れた天体相対航法が求められるが、本研究はそこへの実用的な道筋を提示するものである。

論文は7章から構成される。

第1章では、小天体近傍運用に必要とされる航法の特徴と課題を抽出し、遠方天体探査では自律性と低リソース性が重要であると主張している。その上で、はやぶさ2ミッションで採用されていた、地上管制員による手動の点群ベース航法を参考にして、自律性、リアルタイム性、低リソース性を具備した点群モデルベースの航法アルゴリズムの可能性を提示している。

第2章では、本論文の議論に必要な座標系や点群モデルの定義等を整理している。

第3章では、小天体の輪郭に注目し、疎な点群から輪郭を再現し照合に用いる手法を提案している。この手法は、搭載ハードウェア (FPGA) 回路との相性の良いベクトル符号相関法をベースとし、天体の陰影境界などの照合にとって不都合な曖昧な領域を照合から省くなどの工夫を施したものである。これにより、小天体から輪郭の抽出と画像の符号化を同時に行い、かつ、FPGAによる相関値計算の高速処理を実現した。

第4章は、点群モデルに各点の距離情報を加味することで、より複雑な形状の天体への対応を試みている。前章の手法では単純な小天体の外形の輪郭にのみ注目していたが、ここで提案する補間手法により小惑星の外形の輪郭に加えて、凹地形等により内側に形成される輪郭を用いた照合処理が可能となる。これにより、小惑星自身が光を遮り表面上に複雑な影を形成するようなバイナリ天体やイトカワといった複雑な形状を有する小天体に対しても、点群をベースとした輪郭の照合を適用し精度良く位置推定を行うことが可能となることを示している。

第5章は、第3章と対比する形で、より人間の画像認識に近いヒューリスティックな手法を提案している。この手法は点群を補間処理等を用いて画像化することが不要である。ハフ変換を用いて点群の投影画像と撮像画像をそれぞれ、ある点から小天体の輪郭までの角度と角度ごとの距離のパラメータ空間に射影することで、点群と取得画像を直接照合することを実現している。この手法は補間処理を用いずに点と画像の評価を実施するため、

3 章で述べた手法よりもより大幅に少ない点数で照合を行うことができ、かつ照合処理に必要な計算コストも少なくなる。

第 6 章では、本論文が提案してきた 2 つの点群ベースの航法アルゴリズムをはやぶさ 2 ミッションのタッチダウン運用で得たフライトデータに適用し、実環境への適用性を評価している。その結果、小惑星に陰影がある状況下でも期待通りの精度で航法プロセスが動作していること、区間によっては手動で実施した航法結果よりも一貫性の高い航法演算結果が得られていることなどを示した。また、2 つの手法の適用性の差異についても明らかにしている。

第 7 章は結論であり、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、遠方小天体探査で必要とされる自律性、低リソース性、リアルタイム性を具備する目的として、画像航法の対照モデルを点群情報に制約した航法アルゴリズムを提案しその有効性を示したものであり、太陽系探査の今後の大きな方向性の一つである遠方天体探査や、より大きな小天体を探査の実現性に貢献する研究成果である。

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。