

論文の内容の要旨

論文題目 深宇宙における光学情報を用いた宇宙機の自律軌道決定について

氏 名 川端 洋輔

本論文は、深宇宙探査機の光学情報を用いた自律軌道決定に関する研究であり、特に惑星間航行時での観測対象の選択方法に着目し、提案手法の有用性および本手法を適用した自律軌道決定の可否を明らかにするものである。

現状では、一般的に宇宙空間において深宇宙探査機は地球との電波交信に基づく位置推定によって航行（電波航法）している。この電波航法は、古くから利用されており、高い軌道決定精度と信頼性をあわせ持つが、深宇宙機が地上局から非常に遠距離に位置しているためにいくつかの問題がある。それは、電波強度の減衰や宇宙機の送信機出力の制限、観測量の観測性の悪さなどである。超長距離から発信された強度の弱い電波を地上で受信するために大きなアンテナを用いる必要がある。しかし、そのような深宇宙機を運用するための大型アンテナは日本国内では、長野県の臼田宇宙空間観測所にある64mアンテナと鹿児島県の内之浦宇宙空間観測所にある34mアンテナの2つのみであり、現状、その数は少ない。後者については、電波航法で用いる電波により得られる情報は、電波の往復時間による測距（Range：レンジ）と距離変化率（Range Rate：レンジレート）であることが原因である。これらの観測量は1次元的な情報であり、アンテナ指向方向と直交する方向の観測感度が非常に悪くなる。そのため、3次元空間での深宇宙探査機の位置・速度を決定しづらくなるが、地球の自転を利用することでその弱点をカバーしている。つまり、地球は自転速度が比較的速く大きな半径を持った回転体であり、地球の自転と地上局の位置を加味すると距離変化率（いわゆるドップラーデータ）が地球赤道面方向の2次元的なデータとして得られるのである。最終的に3次元的な深宇宙探査機の軌道は統計的に求められるが、地球の自転の効果を利用しているがために比較的長い運用時間が必要となり、避けられない運用コストが発生する。

一方、近年、超小型深宇宙探査機に注目が集まっている。これは、「短期開発による打ち上げ頻度向上」、「製造コストの大幅な低減」やそれに伴う「挑戦的なミッションへの取り組みやすさ」のためである。

しかし、そのような超小型深宇宙探査機にも避けることのできない問題点がある。それは、前述した大型アンテナの問題や軌道決定のための運用時間である。前者は深宇宙という距離に起因する問題であり、後者は電波の観測性に関する問題である。そのため、電波航法を用いる限り避けることのできない問題となる。このようなことから、小型探査機は製造コストを大幅に低減できるが、その運用に関する負担・コストは従来のものと大差ない。また、超小型深宇宙探査機によるミッションが活発化するようになると、大型アンテナや運用負担・コストに関する問題はより深刻化することが懸念される。

以上のような理由から地上局とは切り離された探査機の自律的な判断が重要となる。運用負担の低減や信頼性の向上の観点からテレコマ運用に関する自律化は高度化しているため、本研究では特に自律的な軌道決定に着目する。従来の自律軌道決定に関する研究は、様々なアプローチが取られており、目標天体近傍での電波や光学情報を用いての画像処理やアルゴリズム、観測量を組み合わせての軌道決定の向上に関するものが多い。電波情報を用いるものは、パルサーと呼ばれる電波を放射する中性子星を用いるものや複数の探査機間での電波による相互観測によるものなどがある。しかし、前者については微弱な電波を検知するための大型アンテナを搭載する必要があるが、小型探査機への適用は難しい。後者に関しては、不均一な加速度場を利用する手法であるがゆえに領域が限定されており、適用範囲が狭い。そこで本研究では、多くの探査機に適用でき、適用範囲が広い光学航法カメラを用いた惑星間航行時での自律軌道決定を扱う。このような光学情報を用いた自律軌道決定についても、ある限定的な領域での評価や単純に近傍の天体を観測したものも多く、その観測対象の選択に関するものはほとんどない。

光学自律軌道決定では、探査機から見た太陽、観測対象の位置および観測対象の実視等級が時々刻々と変化する複雑な状況下でどのように観測対象を取捨選択すればよいかが本質的に重要であり、解決されていない問題の1つである。そこで、本論文では、膨大な観測対象候補（太陽系の天体）に対し、計算負荷の高い従来の共分散解析を用いることなく、軌道決定精度を効率的に向上できる観測対象の取捨選択手法を導出することを目的としている。

本論文では、2つの方法を提案しており、1つは観測対象として惑星と小惑星を統一的に扱い、対象のもつ軌道情報の誤差および明るさを考慮に入れた上で幾何学的な位置関係から自律軌道決定で期待される誤差楕円体最大主軸を最小化するような観測対象を取捨選択する簡易観測天体選択手法である。本手法は幾何学的な位置関係のみを利用するために解析時間を大幅に削減することができ、ミッション期間全体に渡って最適な観測対象を手早く算出することを可能とし、その手法の有用性を火星遷移軌道と地球同期軌道を用いて具体的に示した。また、もう一方の手法は、簡易観測天体選択手法と同様に幾何学的な位置関係を用いる手法であるが、光学情報による誤差楕円体を共分散解析を用いずに手早く算出し、ある特定方向の軌道決定精度を向上させるような観測対象の

選択を可能とする．これを，高速誤差共分散推算手法とし，具体的に地上局からのアンテナに対する軌道決定精度を向上させる観測対象の選定例および非観測期間で拡大する誤差を低減するような観測対象の選定例をもってその有用性を明らかにした．

以上の成果は，将来必要不可欠である深宇宙探査機の自律軌道決定に対して大きな足がかりとなることが期待される．そして，自律軌道決定を前提としたこれまでにない深宇宙探査機のミッションデザイン等，その応用の幅は広く，将来の自律航法のあり方に一石を投じるものである．