

(続紙 1 )

京都大学	博士 ( 工 学 )	氏名	金 田 さ や か
論文題目	Research on Localization and Guidance for Space Rovers on Small Planetary Bodies (小天体探査ロボットのための位置同定と誘導に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>小惑星や彗星を含む小天体は、太陽系の誕生やその形成過程に関する情報を保持していると期待され、小天体探査の学術的意義は極めて大きい。天体表面の詳細な調査には、自律移動機能を有する惑星探査ローバが有効であるが、火星や月ローバと比較して、小惑星探査ローバはサイズが小さく、積載可能なペイロードにも厳しい制約があることから、既存の位置同定手法を適用することは困難である。また、既存の車輪型移動は小天体の微小重力下では機能しないため、小天体探査ローバはホップ型移動とする必要がある。ホップ型移動は車輪型移動に比べて、移動に関する不確実性が大きく、既存の誘導手法を適用することは困難である。</p> <p>以上の背景のもと、本論文では、小天体上のローバの位置同定を実現する手法を提案し、不確実性の多いホップ型ローバを誘導するためのモデルの提案を行なっている。</p> <p>第1章は緒言であり、本研究の背景および目的と、本論文の構成について述べている。</p> <p>第2章では、ローバ位置を逐次的に推定するための手法について述べている。ここで提案している手法は、GPSと同様に電波の伝播時間の測定値に基づく位置同定手法であるが、複数の伝播源の存在や伝播源と受信機での時計同期を前提とするのではなく、電波源とローバ間の往復の伝播時間を繰り返し測定することにより、単一の電波源のみで、かつローバ上に同期用の時計を搭載することなしに、ローバ位置を精度よく推定することができる。本提案手法では、Kalmanフィルタの適用による逐次推定を実現しており、ローバが直径1km未満の小惑星上に存在することを想定した数値実験により、メートルオーダーの推定精度を実現することを実証している。さらに数値実験により、天体の自転運動および電波源として用いる母船位置に関する不確かさが存在する場合の、位置同定精度への影響についても解析しており、天体の自転軸方向に関して、1度のずれに対して、ローバの推定位置に数メートル程度の誤差が生じることを明らかにしている。</p> <p>第3章では、前章での感度解析の結果を受けて、ローバ位置に加え、小天体の自転運動パラメータを同時推定するための手法について述べている。ここでは、推定問題を最適化問題として捉え、観測値に関する推定誤差から定義した評価関数の値を最小化する状態量を求める問題として定式化している。ローバが小惑星上に存在すると想定した数値実験により、通常の勾配法に基づく最適化では、推定の収束までに膨大な繰り返し計算が必要になることを明らかにしている。これは、評価関数の各状態変数に関する感度が大きく異なることから、最適化のための探索が限定領域のみで行なわれることに起因する。本論文では、この問題を克服するべく、勾配法に基づく最小値探索を、感度のオーダーが同等な変数ごとに3段階に分割して多段階最小化する手法を提案しており、良好な結果を得ている。</p>			

第4章では、前章での最適化問題における求解をより改善するための手法として、評価関数の微分計算が不要な最適化手法について提案している。前章で提案した最適化手法では、すべての関数が微分可能であることを必要としていたが、これは実験式や不連続な関数を含むシステムの場合に適用が不可能となる。そこで、微分計算が不要な最適化手法として、Powellの共役方向法に基づく最適化法を提案している。本手法では、微分計算を行う代わりに共役方向の探索に膨大な繰り返し計算が必要となることから、計算量削減のために、感度方向を考慮して適切に選択した一部のデータのみから推定を行う手法を提案している。ローバが小惑星上に存在することを想定した数値実験、および距離計測機を利用した実験により、提案手法により得られる推定精度と必要となる計算時間について明らかにしている。

第5章では、不確かさを内包するホップ型移動によるローバを誘導するためのモデルについて提案を行なっている。既存の車輪型移動のローバと異なり、ホップ型ローバでは地面との接触状態や凹凸の違いにより、その運動は大きく変化する。このため、ホップ運動の結果を高い精度で予測することは困難であり、その誘導には、さまざまな不確かさをどの程度まで許容して行なうかの判断が求められる。一般にオペレータは、誘導に関する複数の評価基準を有することになるが、これらの基準は多くの場合トレードオフ構造を呈し、オペレータは、探査ミッションのフェーズに応じて、複数の評価基準の優先順位を適切に設定しなければならない。本論文では、このようなオペレータの探査ローバの誘導に関する決定過程を多目的意思決定問題として定式化している。複数の評価基準の優先順位をオペレータの多目的間の選好関係として抽出し、この選好関係に基づいた多目的最適化問題を解くことで、オペレータの誘導戦略に則って、運動予測に不確かさを内包するホップ型ローバを目標状態に誘導するためのシステムの提案を行なっている。提案システムを小惑星上のホップ型ローバに適用した数値実験により、提案システムによる誘導の有効性を検証している。

第6章は本論文の結論であり、得られた成果について要約している。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、小天体上のローバの位置同定を往復伝播時間の測定値より求める手法の確立、およびこのようなローバを誘導するオペレータとの協調作業の実現を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 電波の往復伝播時間を測定することにより、小天体上のローバ位置を推定する手法を確立した。その推定結果には小天体の自転運動の不確かさが大きく影響することを示し、その影響を定量的に明らかにした。
2. ローバ位置の高精度な推定のために、小天体の自転運動パラメータとローバ位置の同時推定問題を最適化問題として定式化し、勾配法による解法を与えた。その際、状態変数により誤差評価関数に与える影響が大きく異なることが原因となって解の探索効率が悪化することを示し、探索方向を適切に分解する多段階最適化により、この問題を解決できることを明らかにした。
3. 一般に小天体は球の形状を呈しないことから、その重力場は複雑となる。さらに、太陽や木星などの重力の影響も無視できないことから、母船の軌道を支配する運動方程式は単純な数式として表すことは難しく、システムモデルの微分可能性が保証されない。この問題を克服すべく、2.の最適化問題を微分計算なしで解く方法を示した。これにより、母船の軌道方程式としてケプラー方程式のような単純なものに限らず、観測データ、実験式、IF文などの数値的構文を含む関数をも直接取り扱うことが可能となり、適用範囲が大幅に拡張された最適化問題の解法の提案を行なった。
4. 提案したローバ位置同定法の感度方向を明らかにし、推定精度を表す指標として一様性指標を定義し、その有効性を数値実験により明らかにした。
5. 3.の方法は観測データ数の増加により推定精度は向上するが、必要な計算量が大きく増加し、実用に耐えなくなる。そこで、提案した一様性指標を保つ観測データを選択的に用いることにより、推定精度を大きく劣化させることなく、大幅に計算量を削減することができることを示した。
6. 平坦でなく複雑な地形を有する小天体上をホップ移動するローバの誘導問題を不確実環境下におけるローバ・オペレータの協調制御問題として定式化し、オペレータとローバ間で多目的間の選好関係を共有することによる制御システムを提案し、その有効性を数値実験により確認した。

以上のように、本論文は、既存手法が適用不可能であった小天体上のローバの位置を高い精度で推定する手法を確立し、不確実性が大きいホップ移動を考慮した誘導方法の提案とその有効性を評価しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年6月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。