

## 審査の結果の要旨

氏名 加藤 裕基

加藤裕基提出の本論文は「Capture scheme for rotating space debris based on probabilistic contact mode estimation (確率的接触モード推定に基づく回転するスペースデブリの捕獲スキーム)」と題し、全6章より構成される。

この論文は、スペースデブリ捕獲に必須となる接触状態推定問題についての研究である。持続可能な宇宙開発活動に向けてスペースデブリ（宇宙ゴミ）問題を解決するために、大型スペースデブリを捕獲し、除去する必要がある。この研究では最終目標を大型スペースデブリの除去に据える。

この最終目標を達成するためには、大型スペースデブリを確実に捕捉する必要がある。スペースデブリ捕獲問題は、非協力 (*non-cooperative*) 捕獲問題と位置づけられる。日本においても ETS-VII (きく7号) や HTV (国際宇宙ステーション輸送機こうのとり) に代表されるようなこれまで実施されていたランデブードッキングは協力 (*cooperative*) 捕獲問題として分類され、その場合はドッキング対象 (捕獲ターゲット) がターゲットマーカースとドッキングポートを持っており、生きている衛星であるため制御下にあるので姿勢も安定している。一方で、非協力捕獲問題においては逆にターゲットマーカースもドッキングポートもなく、さらに死んだ衛星やロケット上段の残骸であるため制御下ではなく、世界で誰もこの問題解決ができていない状況である。欧州宇宙機関 (ESA) の研究成果によるとスペースデブリは毎秒数度程度のレートで回転していると報告されている。その上、その回転状態は現状地上から観測できないために軌道投入し数十メートル以内からカメラで観測しなければならない。このような非協力捕獲の問題としては、遠隔操作の時間遅延、宇宙ミッションであるがゆえ限られた計算資源であるなど非常に厳しい状況下で捕獲を遂行しなければならない。特に、90分で太陽が1周する軌道上の厳しい光学環境下で捕獲が一発勝負であるため、カメラによる画像処理による相対位置姿勢計測がいつでも破綻する可能性があり、カメラセンサ単体でセンサ系を組んだ場合には確実な捕獲を目指すには信頼性の観点で大きな問題が残る。

本論文の目的として、確率的接触状態推定を用いることにより回転するスペースデブリを自律的に捕獲する方法を示している。特に、本論文は以下3点をコントリビューションとして示している：

- (1) 計算的に最適化されたモード推定 (Mode estimation) 方法。
- (2) 力・トルクセンサ (Force-torque sensor) に基づく接触モード推定方法(Contact mode estimation)。
- (3) インピーダンス制御を行なった状況下における接触モード推定方法

ここでは、確率的ベイジアンフィルタ (Bayesian filter) の手法が用いられている。より具体的には、実装に適した粒子フィルタ (particle filter) が基礎理論として使用される。一般的にこれらは状態方程式で見られる連続系状態量(continuous state)の推定で用いられることが多いが、ここでは離散的モード (discrete mode) の推定の手段として用いられる。

第 1 に、連続系状態量と離散的モードの両方が探索空間分割され、モードと動き推定のための柔軟な推定スキームを実現する State-segmented particle filter (SSPF) が提案され、宇宙機スラスラの故障モード推定問題に適用された。事前に分割された各空間について、対応する事後分布 (posterior) モデルを独立に構築することによって、粒子数の減少を実現する。Particle filter は粒子(particle)が多く用いられるため一般的に計算量が増大し問題になる事が多いが、この手法は粒子数を大きく減らすことができる。実験シミュレーションにおいては、数十億の故障モードが存在する故障診断を実装している。SSPF を用いた手法は、従来粒子フィルタリング手法と比較して、粒子の 98%の削減を達成した。論文のこの部分は、探索空間を極限まで絞り込む必要がある particle filter 実装の本質を示している。提案された SSPS に見られるように、力学方程式を分割して定義するなど、積極的な空間縮小が不可欠であることが明らかになった。さらに重要なのは、これを行うことによってモード推定の精度も向上させる効果もあるということです。以降の章で言及する接触モード推定については、この知見を利用してさらに発展がなされている。

第 2 に、力・トルクセンサベースの接触モード推定 (Collision-model-based Contact Mode Estimation / CCME) が提案された。スペースデブリを捕らえる宇宙機には、カメラセンサと力・トルクセンサが装備されている。しかしながら、カメラセンサは、前述した理由により捕獲直前に不安定になる可能性が高い。接触モード推定を行うために必要な力・トルクセンサ情報を抽出し、捕獲に必要な十分な推定情報を得るアプローチを取られている。すなわち、一般的な自己位置同定問題に見られるような並進・回転の位置速度の状態量を推定の目的とするのではなく、捕獲のためにロボットの手を閉じるタイミングを決めることを推定の目的としている。それによってカメラセンサより限られた力・トルクセンサの情報量で確実な捕獲に向けての推定を行うことができる。ここで提案されている collision-triggered filter では、最も信頼性が高く不可欠な情報である力・トルクセンサから得られた衝突のタイミングの情報が、粒子フィルタの主要評価 (更新/Update およびリサンプリング/resampling) をトリガするために用いられる。また、衝突現象の予測モデルとしては「Brach のモデル」が用いられている。Brach のモデルは直観的な 3つの衝突特性

パラメータで表現されており、計算量も比較的軽く、粒子フィルタプローチとの親和性が良い。エアベアリング式ロボットシステムを用いた CCME の検証実験では、平均 3.9 ミリ秒および最悪 6.1 ミリ秒の計算処理時間で 100%の成功率を達成されている。(推定時間の要件は衝突後 200 ミリ秒以内である。) また、捕獲に向けた接触以前のカメラセンサによる自己位置推定の精度がこの CCME の初期値になるが、そのときの精度・誤差が CCME の計算リソース (または粒子数) に依存することが検証されている。

第 3 に、チェイサーロボットアームでインピーダンス制御 (impedance control) された状態で接触推定を行なっていて、新規なロバストキャプチャ戦略 (キャプチャステップ) と、「滑り」を検出してフィルタをかける slide-triggered filter が提案されている。先の実験ではロボットアームは固定されていたが、回転する物体の非協力捕獲においては大きな力がかかることが予想されるので、インピーダンス制御を用いた捕獲が求められると考えられる。その際に接触状態推定をかけてみると、インピーダンス制御により衝突時間が長くなり、隣接モードを区別することが厳しくなる。その対処として、前章の「衝突」(collision)に加えて「滑り」(sliding)を検出してフィルタを掛けるアルゴリズムを提案している。この新しい方法は、ロボットアームがインピーダンス制御を行うエアベアリング式ロボットシステム上に実装されており、提案手法を使用した場合には最高の成功率 (100%) で接触状態推定が実施されているが、衝突のみの場合の成功率は 87.9%であった。また、計算リソースは限られており、要件に適合する平均 4.2 ミリ秒および最悪時 8.3 ミリ秒の計算時間でこれら高度の接触状態推定が達成されている。

要約すると、この研究は、カメラセンサとは独立した力・トルクセンサを用いて接触モード推定を行うシステムを提案し、回転するスペースデブリの非協力捕獲のためのロバストな把持手法を確立した。よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。