

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 稲場典康

航空宇宙工学修士稲場典康提出の論文は、「階層制御構造を利用した宇宙ロボットによる衛星捕獲技術の実験的研究」と題し、8章と付録からなっている。

宇宙ロボットは軌道上での宇宙構造物の組み立て、宇宙機の修理・廃棄、デブリの除去などを行う重要な基盤技術になると予想される。しかし、宇宙ロボットと地上システム間の通信時間遅れやオンボードコンピュータの計算能力の制約、搭載できるセンサのリソース制約等の厳しい条件により、制御対象の姿勢運動や日照条件のように予測が難しく状況が刻々と変化するような環境条件下で、安全かつ効率的に作業を行うことを保障できるような自律ロボットの制御アーキテクチャを構築することが困難であるのが現状である。

本論文は、その問題に対し、搭載系・地上系を包括した階層的な宇宙ロボット制御構造を構築することで解決を図ることを目的としている。特に、画像フィードバック等に利用するセンサを利用した「直系監視」と、俯瞰的に状況を監視する「傍系監視」による階層的な監視機能を導入し、運用エンベロープを定義してその空間上で「指標特徴量」を管理するという手法で、安全かつ効率的な作業を保障できることを示している。その結果、予測不能な外乱下で位置・姿勢が動的に変化する衛星を、多様に変化する照明環境の中で確実に捕獲する計画・実行・監視システムが構築できることを示し、シミュレーション、ETS-VIを使った軌道上実験および地上実験にてその有効性を実証している。

第1章では、宇宙開発の流れを概観し、衛星捕獲技術の今後の重要性を説明するとともに、関連する技術課題の研究状況、スペースシャトル・アームによる衛星捕獲の現状技術を概観することにより、研究の背景ならびに目標、方向性を整理している。

第2章では、まず衛星捕獲のニーズを被捕獲衛星の種類、運動の状況等によって整理・分類し、衛星捕獲に必要な各サブタスクについて利用可能な要素技術・技法の候補を整理している。ついで、捕獲のための基本シナリオを定式化するとともに、従来の研究で検討が不十分であった搭載系の計算機能力、軌道上照明環境並びに地上との通信遅れ等のシステム制約と監視機能の必要性を考察している。

第3章では、衛星捕獲を安全かつ効率的に遂行するための宇宙ロボットの計画・実行・監視システムの検討がなされている。まず、制御の時定数や緊急度、タスクや対象のモデル化の複雑度等を考慮して、地上系と搭載系の適切な機能分担を行い、両者を包含するシステム内に階層的で多重のループを形成する設計手法が提案されている。次に、上記制御システムの重要機能である監視機能を、タスク実行のための直接制御ループ内センサが行う「直系監視」と、タスク実行の制御に直接的に関与しないセンサが行う「傍系監視」の2種により補完的に実現し、タスクに応じて定められる運用エンベロープによりその作業

を管理する概念を提案した。また、その座標軸には、作業の遂行状態を端的かつ汎用的に表現できるセンサの内部状態量である「指標特徴量」も加えて表現することにより、運用エンベロープを簡潔、かつ少ない更新頻度で正確に記述し、地上系と搭載系の通信量・頻度を低減する手法も提案している。

第4章においては、第3章に記した階層型の制御構造による衛星捕獲システムの一部の構築及び技術確認を目的とし、技術試験衛星VII型(ETS-VII)上での画像フィードバックによる衛星の自動追尾・捕獲実験の結果を記している。

第5章では、特定の視覚マーカを持たず高速の姿勢運動を行う衛星を捕獲するという、より高度な問題を定式化し、特に従来地上系に置かれていた傍系監視のオンボード化の必要性に焦点を当てて実現方法の基礎検討を行っている。

第6章では、前章に記した高度捕獲問題に提案手法を適用するために、まずはサブタスクとしての視覚処理、力覚制御技術の機能向上を検討し、次に傍系監視の搭載化の実現手法として、監視カメラを制御に利用する手先カメラと異なる位置・姿勢に配置し、ターゲットの位置・姿勢を補完的に計測するとともに、先行的計測により急激な照明環境変化を予見する方法を提案している。

第7章においては、第6章に記した高度な捕獲問題を模擬する地上実験システムを構築し、提案手法の検証実験の結果をまとめている。

第8章では、結論として、本研究で明らかにしたこと及び提案手法の限界を要約し、本論文の意義を明確にしている。

付録では、研究の背景となる現状の宇宙空間でのロボット実験の概要と、本文中で使用した式の導出などが説明されている。

以上要するに、本論文は、直系・傍系の階層的監視機能の導入、運用エンベロープの定義などの新しい方法論を導入することで、搭載系・地上系を包括した階層的な宇宙ロボット制御構造を構築する手法を提案し、それによって、軌道上の多様に変化する照明条件下で、かつ搭載系の限られたリソースの中で安全・効率的に衛星を捕獲できるシステムを構築できることを示したものであり、宇宙工学上貢献するところが大きい。

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。