

## 審査の結果の要旨

氏名 田中 秀幸

修士（工学） 田中秀幸 提出の論文は「自律宇宙ロボットのための作業環境構造化に関する研究」と題し、本文6章と補遺からなっている。

宇宙インフラストラクチャが持続可能な発展をするためには、構造物の組立・再構成や保守等の作業を軌道上で恒常的に行なう必要がある。これらの作業はロボットにより自動化することが望ましいが、高い信頼性が要求される軌道上作業をあらゆる環境下で自律的に実行することは現在のロボット技術では困難である。そこで、作業環境を整備・構造化することでタスクを簡易化し、ロボットによる自律作業を支援するという考え方が不可欠となる。しかし、従来の構造化は、定型的な動作の確実性を高めるものではあるが、定型外の状況に対応する柔軟性や知能化をサポートするものになっていないのが現状である。

本論文ではこの問題を解決するため、従来の「物理的な構造化」に加え、「情動的な構造化」を活用し、ロボットの知能的側面をも支援する枠組を研究している。すなわち、構造化によってタスクのエントロピーを下げ、ロボットによって扱いやすい作業環境を提案するとともに、物理的構造化、情動的構造化およびそれに適合したロボット技術の一体的組み合わせでシステムをとらえ、作業環境の設計およびロボット要素技術の開発を行なっている。具体的には、「宇宙構造物の精密組立」、「衛星の姿勢運動推定」、「環境の3次元モデリングおよび形状モデルを利用した物体操作支援」の技術分野にこの枠組を適用し、その有効性を示している。

第1章は序論であり、宇宙ロボットの軌道上作業環境について現状を概観するとともに、本研究の基本的な動機や方向性を述べ、研究の意義と目的を明らかにしている。

第2章では、作業環境の構造化に関する地上および宇宙の従来技術の内容と特徴をまとめるとともに、その課題を明らかにしている。さらに、本研究で提案する「知能化を支援する構造化」、「物理的構造化・情動的構造化の連携とロボット技術の組み合わせ」、および「タスクエントロピー低減による作業支援」の基本思想を述べている。

第3章から第5章では、上記の基本方針に基づいた作業環境構造化とロボット要素技術開発について述べている。まず第3章では、ロボットの作業システムを物理的に構造化するという観点から、組立・再構成が可能なセル型衛星の概念を提案し、その構造モデルの設計・開発を行っている。次に、このセル型衛星をロボットによって組み立てるために必要な自律精密組立技術の開発を行っている。ここでは、対象物の構造化設計と、それに合わせた能動センシングおよび探索的マニピュレーションの組み合わせによって、不確定環境下でもロボットに精密作業を実行する、「反力に基づく探索マニピュレーション法」を開発し、実験によりその有効性を示している。

第4章では、定性的な観測データを利用することで衛星の姿勢運動推定を行なう手法に

ついて述べている。ここでは、RFID により観測システムを構造化し、対象表面の各領域の可視性という定性的な観測データを取得し推定する方式を提案している。取得した観測値に Particle Filter を適用して対象の姿勢運動を推定することを試み、シミュレーションによりその有効性を示している。このような構造化とロボット要素技術の組み合わせにより、対象物体の状態推定という知能化技術の支援が可能であることを示している。

第 5 章では、視覚 ID タグおよび構造化された情報・知識を活用したロボット作業支援システムについて述べている。まず、単眼カメラにより位置・姿勢、ID を取得できる視覚 ID タグを利用し、環境の 3 次元形状モデルを多面体近似によって簡単に作成する手法を示している。次に、この視覚 ID タグを介して環境を情報的に構造化し、形状モデルや物体操作知識等の情報を活用することで、ロボットによる物体・環境の 3 次元認識からマニピュレーションまでを統合的に支援するシステムが可能であることを実験により示している。

第 6 章は結論であり、本論文で議論した宇宙ロボットのための作業環境構造化に関して得られた知見と成果をまとめ、今後の課題と展望を述べている。

補遺では、タスクエントロピー低減の評価例、セル型衛星の熱解析例、本文中で使用した式の導出、プログラムなどが説明されている。

以上要するに、本論文は、宇宙ロボットの知能化・自律化を目的として、作業環境の物理的構造化と情報的構造化、および、ロボット要素技術との効果的な組み合わせによりタスクエントロピーを低減する枠組みを提案し、精密マニピュレーション、衛星姿勢運動推定、環境モデリングに適用しその有効性を示したものであり、これらの成果は宇宙工学、ロボット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。