

# 論文の内容の要旨

論文題目 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  
氏名 田中秀幸

地球周回軌道上の宇宙システムは、気象観測、通信、測位等、我々の生活に不可欠な社会インフラである。今後、この宇宙システムが持続可能な発展をするためには、構造物の組立・再構成やメンテナンス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。

産業用ロボットの分野では、こうした作業環境の構造化が古くから行なわれており、単純繰り返し能力しかないロボットでもその実用価値を高めることに成功している。現在の宇宙システムにおいても、これと類似した構造化が行なわれている。しかし、従来の構造化は、定型的な動作の「確実性」を高めるものであるが、定型外の状況に対応する「柔軟性」の実現をサポートするものとはいえない。

今後、宇宙ロボットの自律性を高め、作業状況や周囲の環境変化に柔軟に対応できるようにするためには、対象や環境の状態推定・モデル化、その場での行動生成等、「ロボットの知能化」を促進するような作業支援の枠組みが必要になると考えられる。

そこで本論文では、宇宙ロボットの知能化・自律化を促進するための作業環境構造化と、その環境を活用するロボット要素技術について研究することを目的とした。

従来の宇宙作業環境では、構造化とロボット技術開発が独立で行なわれており、より柔軟なタスク実行をサポートするような作業環境設計は為されてこなかった。これに対し本研究では、構造化とロボット要素技術を効果的に組み合わせることで、ロボットタスクを簡易化し、システム全体としてロボットの知能化を図る。そして、このアプローチを精密マニピュレーション、姿勢運動推定、環境モデリング等、宇宙ロボットの重要な技術分野に適用した。

はじめに、システムの物理的構造化と、それを利用した精密組立支援および精密マニピュレーション技術の研究として、「再構成型衛星の構造化設計と精密組立」をサブテーマとした。ここではまず、自律ロボットの利用のために構造化された宇宙システムとして、再構成型宇宙システム(Reconfigurable Space System:RSS)という概念を提案した。RSSは、これまでの重厚長大、使い捨て型の宇宙システムを変革し、宇宙において再生・循環利用を実現するための概念である。次に、このRSSの概念を具現化するものとして、再構成可能なセル型衛星(Cellular Satellite:CellSat)の設計と開発を行なった。CellSatは、衛星の構成要素を部品レベルまで細分化してセルとし、それを組み合わせて作る究極のモジュール衛星である。軌道上ロボットによる自律組立を支援するためのロボットフレンドリーな設計を随所に施すとともに、宇宙環境で重要な軽量・コンパクト性を実現した。そして、セルの構造モデル、マニピュレータに装着するエンドエフェクタ、CellSat用の作業台システムのプロトタイプをそれぞれ開発した。次に、このCellSatをロボットが組み立てるための自律精密組立技術を開発した。ここでは、セル結合機構の設計とマニピュレーション技術を適切に組み合わせることにより、精密作業におけるロボットの自律性・ロバスト性の向上を図った。とくに、精密作業で問題となるスタック(行き詰まり)状態に対し、部品同士の接触で生じる反力の大きさを能動センシングで測定し、それを最小とする山登り探索によって克服する手法を提案した(Reaction-based Grope for Breakthrough method:RGB法)。ここでは、制御の不確実性を吸収することで精密作業の確実性を高める作業支援と、複雑な接触状態を反力値によって抽象化することで、作業状態の判別を簡易化する知能化支援の双方を実現した。CellSat組立実験により、CellSatの構造化設計と精密組立技術の有効性を実証した。

次に、構造化による観測の支援と、定性的な観測情報を利用した推定技術の研究として、「RFID(Radio Frequency Identification)を用いた衛星の姿勢運動推定」をサブテーマとした。従来の姿勢運動推定は画像による定量的かつ詳細な観測データを利用するものが多かったが、厳しい光環境の影響を受けやすかった。これに対し本研究では、よりノイズの影響を受けにくい定性的かつ粗い観測データによって姿勢運動推定を行なう手法を開発した。ここでは、「対象物体のどの領域(側面)がこちらから見えるか?」という観測情報を利用する。対象物体表面をN個の領域に分け、観測者から見える領域に1、見えない領域に0を与えることで、観測データとしてN次元のバイナリベクトルを得る。このような粗い定性的観測データのシーケンスを用い、Particle Filterによって姿勢運動を推定する技術を開発した。観測を支援するために、各領域の一つずつのRFIDタグを付け、これらをRFIDリーダーで観測するというシステムの構造化を行なった。これは軽量、低コストに実現でき、光の影響も受けないため宇宙環境に適した構造化の実現である。シミュレーションにより、抽象的な観測データからでも実世界の姿勢運動を高精度に推定可能であり、また本手法がオクルージョンに対してロバストであることが示された。

また、構造化による観測支援と、それを利用した環境認識、および知識を活用した作業支援の研究として、「視覚IDタグを用いた環境認識と作業支援」をサブテーマとした。視覚IDタグは、単眼カメラによって位置・姿勢およびIDを取得可能な二次元マーカである。光条件に対するロバスト性が特長であり、宇宙環境での利用に適している。本研究では、まず、視覚IDタグを活用することで環境の3次元モデルを簡単に作成する手法を開発した。ここでは、環境や物体に複数の視覚IDタグを貼り付け、それをカメラで観測することで局所的なタグ間の相対位置関係データを得る。これらを統合して全体のタグ位置を復元する最適計算手法を導出した。また、各タグが物体の接平面の一部であることに着目し、複数タグの情報から、論理演算によって多面体を生成するアルゴリズムを開発した。本手法により、自己位置未知、事前知識なしの宇宙ロボットが簡単にその場の環境の3次元形状モデルを作成することが可能になる。形状モデル作成実験により、本手法の有効性を実証した。

次に、この視覚IDタグを活用してロボットによる物体操作を支援するシステムのプロトタイプを構築した。ここでは、タグの提供するIDと位置・姿勢情報を基盤とし、形状モデルと操作知識を階層的に付加する。これにより、ロボットは作業環境のタグを認識するだけで、物体認識と操作知識をその場で行なえるようになる。また、形状モデルを読み込んでシミュレーションによる動作計画も可能となり、宇宙環境における安全なタスク実行に活用できる。本システムの有用性を、マニピュレータを用いた実験により示した。

本研究の結論は以下の通りである。まず、精密組立、姿勢運動推定、環境認識、動作計画等、宇宙ロボットの重要な技術分野において、作業環境の構造化とロボット要素技術を組み合わせることでロボットの知能化を促進し、タスクに対する自律性・ロバスト性を向上させる手法を開発した。また、その有効性を実証した。その要点は次の二点である。1.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供した。2.物理的構造化・情動的構造化の連携と、それに適合したロボット技術という組み合わせでシステム全体を捉え、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た。また、開発したロボット技術はいずれも、構造化された世界を扱う汎用的な枠組みを提供するものである。そのため、本研究の成果は宇宙ロボットのみならず、地上のサービスロボット分野等への応用も期待できる。