

## 論文の内容の要旨

論文題目 マルチテザーによる遠心力展開型  
柔軟構造物上の移動ロボットの誘導制御

氏 名 サイスッチャリット ポンサトーン

宇宙空間で大面積を必要とする場面が年々増えている。将来の宇宙太陽発電衛星をはじめ、超大型の宇宙アンテナ、発熱が大きい衛星の放熱膜やデブリ掃除膜などはその大規模構造物の代表的な例である。しかし宇宙空間での大規模構造物の建設は、輸送手段、コスト、建設と制御技術、大電力の確保などの様々な課題が残されている。特に輸送コストが一番大きな課題となっている。そのため、高収納率、軽量の展開型構造物が採用される場合がほとんどである。

宇宙空間で大面積を必要とするミッションにおいては、折り畳んで収納された大きな網や膜等を、軌道上でスピンさせて遠心力で展開させる方式が有力である。さらに、網や膜の隅に衛星を配置し、大面積を獲得すると同時に向きや軌道の制御を行う「ふろしき衛星」のアイデアも提案され、観測ロケットでの宇宙空間実験なども実施されている。その応用として、網や膜のいくつかの場所に表が太陽電池、裏がマイクロ波送信機のパネルを配置することで太陽発電衛星やフェイズドアレイアンテナを構成するアイデアも検討されている。

そのようなシステムを実用化するためには、軌道上での建設・保守システムが必要不可欠であると考えられる。軌道上の太陽発電衛星の太陽電池、あるいは宇宙アンテナのアンテナモジュール等をハンドリングするシステムにおいて、作業ロボットが一つの候補としてあり得ると注目されている。しかし、従来の宇宙ロボットの移動手段の多くは、手足による移動、あるいは飛行タイプのものがほとんどであり、ふろしき衛星のような用途に対しては応用することが困難である。また、網構造物上に移動するCRAWLINGタイプのロボットも提案されているが、網とロボットの足の絡み、網形状の変形、移動する速度の遅さ、そしてロボットの位置推定が難しいなどの問題があった。

上記のような問題への解決方法として、端の衛星とつないだ複数のテザーをロボットが手繰ることによって任意の場所に移動する方式を本論文では提案している。テザーを用いることでロボットを任意の位置へ高速移動でき、網の張力が保たれていれば網形状の変形は小さい。さらに、テザーの長さからロボット位置推定が可能であり、燃料不要であるという利点が挙げられる。同様のロボットの移動機構は、ISS上で実験予定のJAXAのREXJ

によって提案されている。REXJは、テザーの端点が固定点でロボットの動作も慣性系でのダイナミクスとみなせるのに対し、「ふろしき衛星」のように回転する柔軟構造プラットフォームは、端の衛星が自由端でありテザーにかけられる張力に制限が加わる点、回転する系でのコリオリ力や遠心力を考慮しないといけない点などから、全く異なったダイナミクスを持っており、それに対応する誘導・制御アルゴリズムが要請される。

本研究は、「ふろしき衛星」を回転させて網や膜を展開するシステム上をテザーを手繰って移動するロボットにおいて、回転系・自由端システムのダイナミクスを新規に定式化、その位置の誘導・制御アルゴリズムを確立することを目的とする。本研究はこのような回転系・自由端システムのダイナミクスと制約条件を定式化し、特定の位置にロボットを誘導しそこに維持する誘導・制御アルゴリズムを提案している。誘導に関しては、数値解法、最大原理、ポテンシャル法、PID制御等を利用した導出を実施し、その性能を比較して、PID法が優れていると結論している。また、定点にロボットの位置を保持するバーシング制御手法、面外の振動を止める制御手法も提案しており、それらを統合して本移動方式のフェジビリティを確認している。

本論文は以下のような流れで構成される。

第1章では、大規模宇宙構造物が必要とされている理由を述べ、軌道上で大面積を確保できる遠心力展開型柔軟性構造物の軌道上構築の自動化の手段の1つとして提案されている作業宇宙ロボットの概念や従来の移動機構とその問題点について言及し、研究目的を明確にしている。

第2章では、宇宙ロボットの移動手段の現状、テザーを移動手段として用いたこれまでの研究について概観し、REXJとの相違点を明らかにしながら「ふろしき衛星」をプラットフォームとする複数テザーを用いたロボットの移動制御システムを提案している。

第3章では、回転系・自由端システムのダイナミクスを定式化し、テザーの柔軟性やダイナミクスを考慮に入れる場合に用いるモデル化手法やテザーの回収・進展メカニズムなどについて述べている。数値シミュレーションで固定端及び自由端システムの動力学特性について比較考察している。

第4章では、誘導問題としてとらえたときの連続低推力システムとの類似性について議論し、「ふろしき衛星」上を移動するロボットの最適制御問題として定式化している。静止系及び回転系における最短時間や消費パワー最小のそれぞれの場合の解軌道を数値解法によって求め、システムパラメータへの感度について考察している。

第5章では、従来の宇宙機との類似性を利用した誘導方法や仮想ポテンシャル法及びPID制御による面内での誘導方法について比較考察し、PID法が優れていると結論している。また、定点にロボットの位置を保持するバーシング制御手法を提案し、数値シミュレーションでその有効性を示している。

第6章では、テザーは弾性体として扱う際、面外方向に微小振動が発生することを理論的に示し、運動エネルギーの観点から既存のセンサーを利用した面外振動の制御手法

を提案している。また、数値シミュレーションで提案手法の有効性を示している。

第7章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。