

宇宙インフラストラクチャー技術の研究
Research on Space Infrastructures

複数ロボットによる大型柔軟構造物の協調輸送作業に関する研究
Research on Transportation of Large Flexible Structures by Cooperative Free-Flying Robots

システム誘導技術グループ 石島義之, 上野浩史, 小田光茂

Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group

Mitsushige Oda, Hiroshi Ueno and Yoshiyuki Ishijima

Abstract

In the future missions, very large-scaled structures, such as solar power plant system(SSPS), will be several kilometers across its largest dimension and be composed of extremely flexible structural modules. Such structures can only be assembled in-orbit and teams of cooperative robots is essential for on-orbit assembly. This report addresses the problems of planning and control of the transportation of large and highly flexible structures by free-flying robots. An approach is proposed where the robots use their thrusters to control the “rigid body” motion of the robot-structure system being transported and their manipulators to control and damp out vibration in the structure induced by the thruster firings. A modal active damping control law is developed, which uses measurements of the structure state provided by free-flying sensing robots. Simulation results show that this approach is effective in transporting the structure into its desired position. This report is a part of the results of the collaboration study between JAXA and MIT(Massachusetts Institute of Technology) in FY16.

1. はじめに

将来の宇宙インフラ構築の中で、太陽発電衛星(SSPS)に代表される“超”大型構造物の組立ミッションが具体的に検討されてきているが、数 km にも及ぶスケールや構造物柔軟性からみても組立・維持作業に関するクリティカルな技術課題は多岐に渡る^[1]。そのような組立ミッションにおいて、機動性の高い宇宙ロボットによる自律的な作業は不可欠である。本研究では、将来宇宙ロボットによる活動が有効であるこのような大型構造物の組立作業の中で、クリティカルな技術の1つである大型柔軟構造物の軌道上ロボットによる輸送に関する研究を行った。スラスタ及びマニピュレータを搭載した複数ロボットによる協調輸送を前提とし、スラスタによる系剛体運動モード制御と及びマニピュレータによる制振を分離した制御則を設計し、輸送シミュレーションにより制御則の有効性を確認した。なお、本研究は、マサチューセッツ工科大学(MIT)宇宙探査ロボット研究室との共同研究の成果の一部であり、平成16年6月～平成17年6月までの総合技術研究本部在外研究員成果としてまとめたものである。

2. 研究の概要

FY16はSSPSを想定した大型構造物の組立ミッションについて以下の研究を実施した。

(1) 大型柔軟構造物の軌道上組立シナリオと技術課題の具体化

国際宇宙ステーション(ISS)の規模を越える“超”大型柔軟構造物の組立においては、従来の小さな要素毎の宇宙飛行士による組立では効率が非常に悪いとともに危険を伴い限界が

ある。そこで、軌道上複数ロボットによる効率的な組立シナリオを設定するとともに、クリティカルな技術課題について問題の具体化を行った。

(2) 大型柔軟構造物の輸送問題の定義、モデル化、制御系設計

大型柔軟構造物組立ミッションの中のクリティカルな技術課題の1つである、軌道上ロボットによる輸送 (Transportation) を研究テーマとして選定し、前提条件及び制約条件を明確にした。それを踏まえて、柔軟構造物及び軌道上ロボットのモデル化を行うとともに、構造物輸送の制御則を設計した。制御則では、スラスタによる剛体運動モード制御と及びマニピュレータによる制振を分離し、消費推葉低減と制振特性向上を両立させた。2次元の輸送シミュレーションにより制御則の有効性について検証した。

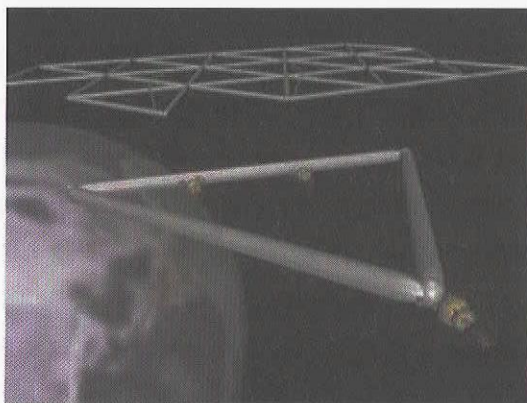
(3) 地上実験システムによるアルゴリズム実証計画検討

上記で提案した制御則を実証する地上実験システムについて検討を行い、実験コンフィギュレーションを具体化した。

3. 成果の概要

(1) 大型柔軟構造物の軌道上組立シナリオと技術課題の具体化

ここでは、軌道上での複数ロボットを想定した構造物組立のシナリオを設定した。まず、打ち上げロケットにより構成要素を目標の近傍の軌道上に打ち上げた後に、構成要素をある程度の大きさの構造物に組み上げる。その後、軌道上ロボットによるモジュールの輸送を行い (Transportation)、最終的にはメインの構造物に搭載されたマニピュレータロボットにより目的の場所に組み込まれる (Assembly) [2]。



(a) Transportation



(b) Assembly

Fig.1 Transportation and assembly tasks

ここで示した構造物の輸送 (Transportation) と組立 (Assembly) は、重要なクリティカル技術課題であり、両者に共通した重要な課題は、ロボットによる軌道上作業に特有の様々な制約 (例えば、ロボット・構造物の質量特性、構造物振動の低固有振動数と低減衰率、制御系と構造物振動の干渉、センサ情報の帯域制約、マニピュレータ可動範囲、On/Off スラスタ制御帯域制約、etc) を考慮した制御アルゴリズムの確立である。本研究では、その中で、大型柔軟構造物の輸送に関する研究をテーマとして設定した。

(2) 大型柔軟構造物の輸送問題の定義、モデル化、制御系設計^[3]

まず、全体の協調作業のフレームワークを Fig.2 に整理する。大きく分けると、輸送を行うロボットと構造物のパラメータ推定とその情報提供を行うロボット (Observer Robot) がある。輸送を行うロボットにはスラスタが搭載され、マニピュレータで構造物を把持している。このような輸送問題に対する制御系を設計する上で、考慮すべき重要な点は以下である。

- i) スラスタ消費推薬量の低減
- ii) アクチュエータ (スラスタ・マニピュレータ) 及びセンサ (画像センサ・加速度計) 制約

スラスタは、通常の衛星用を想定すると On/Off 制御になり、推力をパルス状にしか制御できない。さらに、その制約下で、推薬消費量を最小にしようとするステップ状の推力パターンが最適となり、そのままそのパターンを適用して輸送しようとする柔軟構造物の振動を励起してしまい問題である。しかし、実際には前述の通りロボットはマニピュレータを介して柔軟構造物を把持しているので、マニピュレータで作用力を制御できればスラスタによるパルス状の推力が入力されたとしても、緩やかに力を伝えることで振動を励起することなく構造物を輸送することが可能となる。また、Observer Robot による振動モード係数推定結果^[4]を利用することで制振性能を向上させることが可能である。輸送する柔軟構造物は、1次元の free-free の柔軟梁と仮定して、センサ帯域の制約を考慮して7次までの振動モードまで考慮する。また、軌道上ロボットは梁の両端をマニピュレータにより把持するとともに、On/Off スラスタを搭載しロボット及び梁を含めた全体の系の位置・速度及び姿勢 (剛体モード運動) を制御する。Fig.3 には、設計した制御則のブロック図を示す。提案する制御系は2つのループからなり、アウターループは、全体の系 (ロボット+構造物) の剛体運動モードを On/Off スラスタにより制御し、インナーループでマニピュレータの作用力を制御する。マニピュレータの作用力は、マニピュレータの joint spaces (=マニピュレータ関節角から一意に決まる量) とその速度、及び振動のモード係数のフィードバック信号としている。フィードバックゲインの計算には、ロボットの相対的な動きと振動に関する線形化された運動方程式に基づき、LQR (Linear Quadratic Regulator) を適用した。ゲイン設定の際には、制御系の帯域やマニピュレータの可動範囲、制振特性等を考慮する。

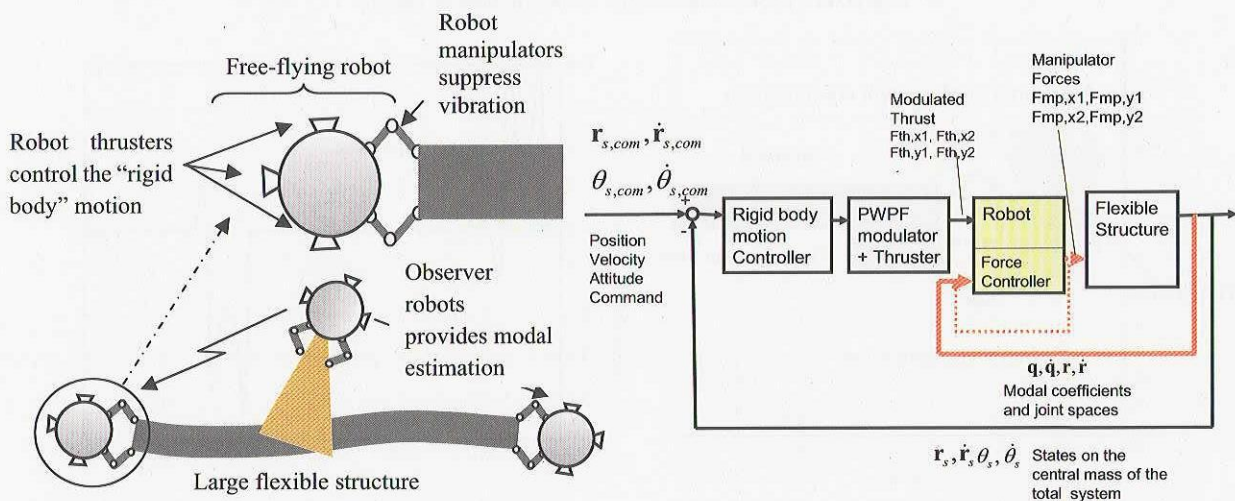


Fig.2 Concept of the cooperative transportation Fig.3 “Decoupled controller” block diagram

シミュレーションで使用したパラメータを Table 1 に示すとともに、Fig.4 から 7 には、回転を含む 2 次元輸送に関するシミュレーション結果を示す。構造物の重量は 600kg、ロボットの重量は 100kg、スラスト推力は 20N を仮定している。On/Off スラストによる剛体運動制御では振動特性を考慮していない推奨消費量最小のパターンを適用しているが、ロボットマニピュレータにより制振が行われスムーズに構造物が輸送されることを確認した。

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Values
Flexible Module	Mass m_b :600kg, Length L : 200m, Inertia I_{zz} : 2×10^6 kg m ² Natural frequencies: 0.20, 0.55, 1.08, 1.78, 2.67, 3.75, 5.02Hz (Seven modes are considered)
Robot	Mass m_r :100kg
Thrusters	Thrust F_{max} : ± 20 N or 0 N (X_G, Y_G direction) Minimum ON/OFF time : 50msec Response delay : 50msec
Manipulators	Length : 1m + 1m (2-DOF)

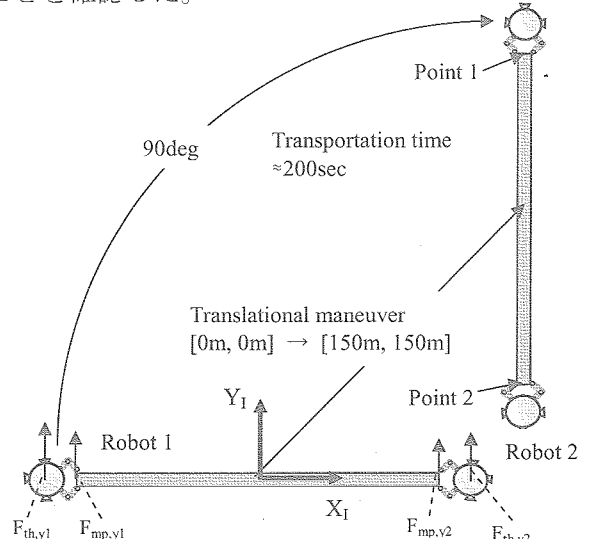


Fig.4 2-D flexible structure transportation

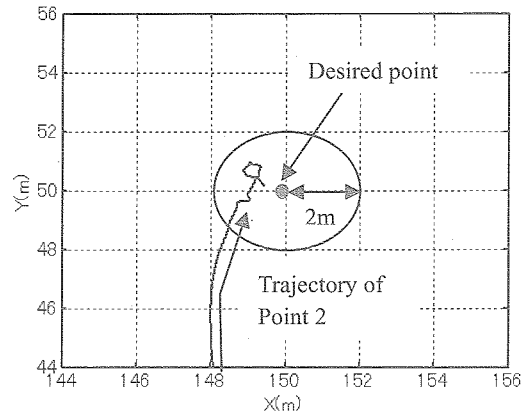
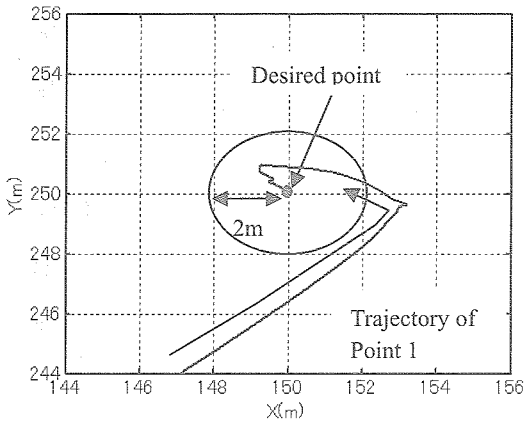


Fig.5 Trajectories of the ends of the module

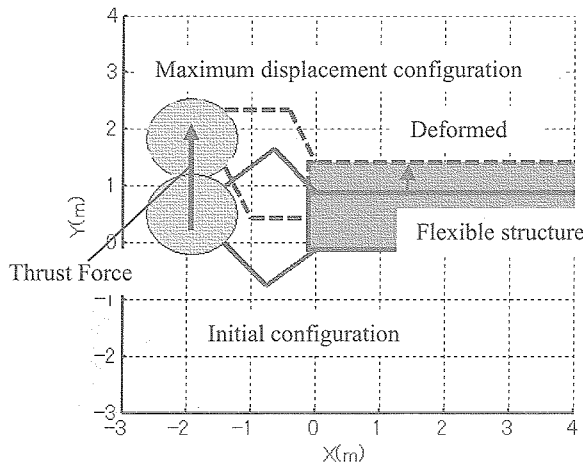


Fig.6 Motion of the robot during acceleration

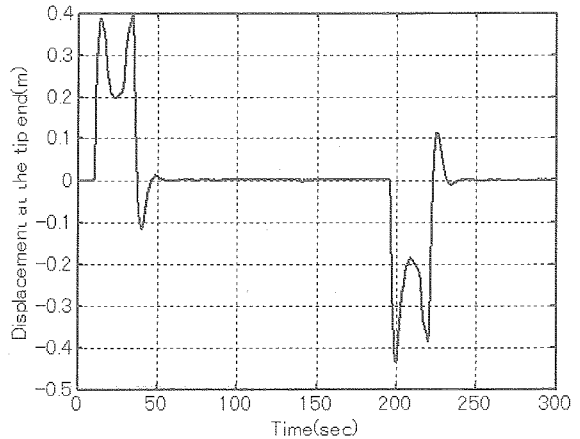


Fig.7 Displacement at the end of the module

(3) 地上実験システムによるアルゴリズム実証計画検討

(2) で検討した制御則を実証する地上実験システムについて検討した。Fig.8 に地上実験システムで使用する精密定盤を示す。大きさ 1.2m×2.4m 程度でテーブル脚の空気圧を調整することによりテーブルの水平調整を行うことが可能である。このテーブル上に、空気浮上式の複数ロボットシステムを構築して平面内の自由運動を模擬する。さらに、柔軟構造物（スチール製、厚さ 1mm 以下、長さ約 1.2m）とそれらの両端にマニピュレータを介して2つのロボットが結合される。ロボットにはコールドガスジェットが搭載され、輸送作業を行う。また、画像センサあるいはレーザーレンジファインダ等の外部センサ（Fig.2 の Observer Robot に相当）を設置して、このセンサ情報と、柔軟構造物に取り付けられた加速度計及びマニピュレータ・柔軟構造物間の力・トルクセンサ情報を外部計算機に取り込んで、柔軟構造物の振動モード係数を推定する。推定された振動モード係数はワイヤレス通信システムにより、輸送を行う2つのロボットに提供され、アクティブな制振に利用される。全体の系の位置及び速度は、画像センサシステム（外部設置及びロボット搭載）の情報を利用して推定する。Fig.9 には、実験システムのコンフィギュレーションを示す。柔軟構造物のパラメータ（厚さ、長さ、重量）等を検討するとともに、必要となるセンサ（力センサ、加速度計、画像センサ等）・アクチュエータ（モーター、コールドガスジェット）の調査を行った。現在、共同研究の一環で実験システム構築及び実証実験を MIT 側で進めている。

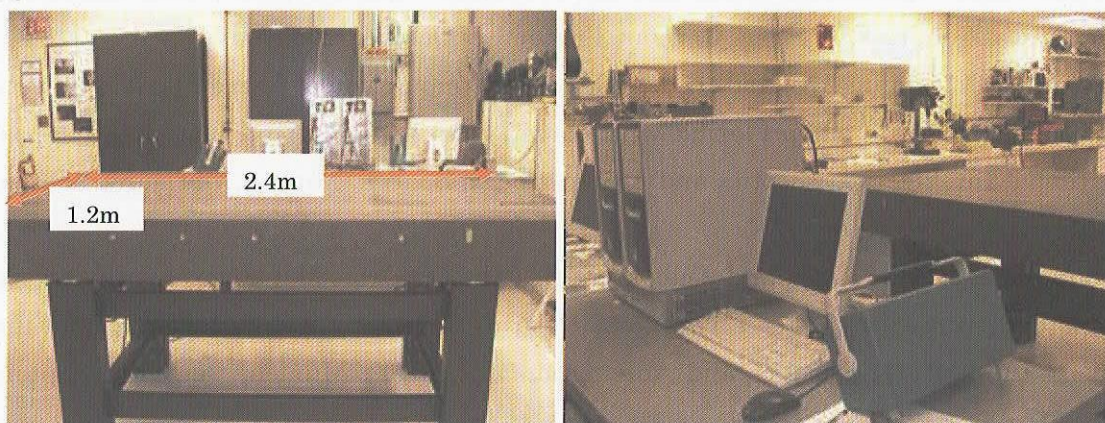


Fig.8 Granite table for the experiment

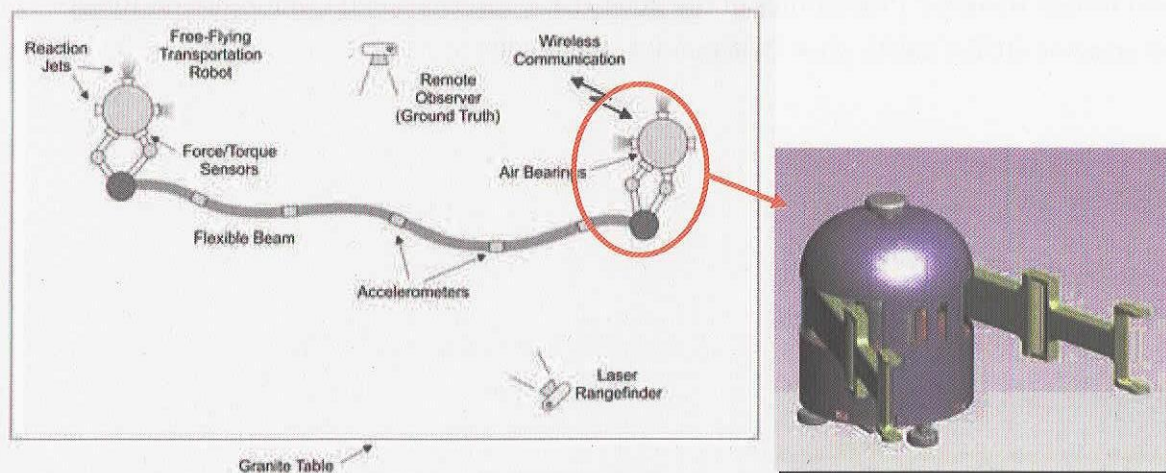


Fig.9 Transportation experiment configuration

4. まとめ

大型柔軟構造物の軌道上ロボットによる組立作業についてクリティカル技術の1つである、複数ロボットによる輸送作業について検討を行った。輸送構造物の振動抑制、センサ・アクチュエータ特性、軌道・姿勢制御を考慮したシミュレーションモデルを構築するとともに、これらを実現する制御則の設計を行い妥当性を確認した。提案した制御則は、ロボットスラスタによる輸送中にロボットマニピュレータを制振に利用する全く新しい試みであり、今後の軌道上ロボットによる柔軟構造物のハンドリングに活用できるものと期待している。今後も、大型柔軟構造物の複数ロボットによる協調組立作業について制御則検討結果を整理するとともに、地上実験システムによるアルゴリズム実証を並行して進める予定である。

【謝辞】本研究は、JAXA システム誘導技術とマサチューセッツ工科大学 (MIT) 機械工学科宇宙探査ロボット研究室との共同研究の一環として実施したものであり、本研究に対し有益な助言を頂きました Steven Dubowsky 教授、Dimitrios Tzeranis 氏に感謝いたします。

【参考文献】

- [1] Oda, M., and Mori, M., "Stepwise Development of SSPS; JAXA's Current Study Status of the 1GW Class Operational SSPS and Its Precursor", IAC-03-R.3.03, 54th International Astronautical Congress, Bremen, German, September-October, 2003
- [2] Tzeranis, D., Ishijima, Y., and Dubowsky, S., "Manipulation of Large Flexible Structures by Space Robots Mounted on Flexible Structures", 8th i-SAIRAS (International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space), Munich, Germany, September 2005
- [3] Ishijima, Y., Tzeranis, D., and Dubowsky, S., "The On-Orbit Maneuvering of Large Space Flexible Structures using Free-Flying Robots", 8th i-SAIRAS (International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space), Munich, Germany, September 2005
- [4] Lichter, M.D. and S. Dubowsky, "State, Shape, and Parameter Estimation of Space Objects from Range Images." Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), New Orleans, LA, April 2004