

宇宙インフラストラクチャー技術の研究

軌道上自律移動ロボット技術の実験研究

Experiment research on autonomous movement robot technology on orbit

システム誘導技術グループ

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

上野 浩史, 小田 光茂, 稲葉 一幸, 巳谷 真司

Hiroshi Ueno, Mitsushige Oda, Kazuyuki Inaba, Shinji Mitani

Abstract

The locomotion on space structures is one of important technologies needed for future space activities such as assembly or maintenance of space systems. The walking robot on the structures has safety nature over a free-flying robot and advantages of the additional infrastructure over a fixed manipulator on mobile platform. In this paper, the four-legged robot that is capable of the walking on the space structures is discussed in terms of the potential missions and its technologies. The ground based experimental model has been build and has performed the autonomous stepping by using tip visual feedback adjustment. In addition, I carried out effectiveness evaluation of the vibration estimate algorithm that, MIT(Massachusetts Institute of Technology) and JAXA developed.

1. はじめに

国際宇宙ステーション(ISS)には、日本を含む3ヶ国・機関から5種のロボットが設置される。逐次建設されるISSでは、ISS上の様々な箇所で行われる組立・保守や補給・交換等の作業を遂行するため、移動台車上に設置された大型のマニピュレータを宇宙飛行士の足場として利用し、あらゆる箇所にアクセスできるシステム設計になっている。

一方、大型構造物の周辺へアクセスする方式には上記マニピュレータ型の他にも、歩行型や飛行型がある。構造物の規模や形状、あるいは想定するミッションによって、適切な方式が選択されるが、一般的には、歩行型は飛行型に対して衝突安全性に優れ、また移動台車とマニピュレータ型との組み合わせ型に対して、構造物へ追加設備が少ないメリットがあると考えられる。

本研究では、大型構造物上を移動する方式として、歩行型に着目し、安定して無重力空間を移動できる移動ロボットシステムを開発することを目指している。また、宇宙太陽発電システム等、大型構造物上の歩行および組立には、ロボットと相互作用する構造物の変形や動きを知る必要がある。その同定手段として米国のマサチューセッツ工科大学と宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発した振動推定アルゴリズムの有効性評価を実施した。

2. 研究の概要

(1) 移動ロボットシステムの研究

安定して無重力空間を移動できる移動ロボットシステムを開発することを目指している。移動時の安定性・安全性に優れた4足歩行ロボットを取り上げ、4足歩行ロボットの想定ミッション、技術課題について整理し、技術検証のための地上実験モデルの試作、試作モデルを用いた自動歩行実験を実施した。

(2) 大型構造物組立ロボットの研究

自律的に軌道上での大型宇宙構造物の歩行および組立には、構造物の変形や動きを認識する必要がある。その同定手段としてレンジファインダを用いて振動する宇宙構造物の形状や動き、モーダル係数・周波数・ダンピング係数等を推定する手法の研究をしている。宇宙空間での柔軟構造物を模擬できるテストベッドを構築し、アルゴリズムの有効性評価等を実施した。

3. 成果の概要

(1) 移動ロボットシステムの研究

(a) 想定ミッションと技術課題

歩行型の移動ロボットは固定型マニピュレータや飛行型ロボットを補完できる特性を有する。特に、移動距離が遠く様々な方向に移動する可能性があり、移動先でも精細作業等高度な作業が必要な場合に優位になると考えられる。歩行型ロボットが活躍できるミッション候補として、以下のようないなミッションが想定される。

- ・ 宇宙ステーション外壁点検用自律ロボット
- ・ 軌道上実験プラットフォーム上実験装置搬送作業ロボット
- ・ 宇宙太陽発電システムの建設・保守用移動ロボット

宇宙ステーションの外壁点検用自律ロボットは、宇宙デブリ等の衝突の痕跡等を外壁の近傍から画像により計測するシステムである。宇宙ステーションの与圧モジュールの外壁には、宇宙飛行士が移動できるようにハンドレールが取り付けられている。これらのハンドレールを歩行ロボットが伝い歩きすることにより、与圧モジュールの外壁の周辺を移動することができる。ハンドレールは棒状形状で滑りの危険性があるため、ハンドレールを常時3ヶ所にて把持しながら、安全に移動する4足歩行が望ましいと思われる。また、ハンドレールの間隔は宇宙飛行士の移動軌跡から決まることから、移動ロボットは人と同程度の大きさになると考えられる。

軌道上実験プラットフォーム上実験装置搬送作業ロボットは軌道上プラットフォームで実施する小型の実験装置の搬送・取り付け・取り外しのためのロボットである。プラットフォーム上にくまなく配置される実験装置の周辺を実験装置に衝突せずに搬送する必要がある。また、搬送・移動先で小型実験装置の取り付け等の精細作業が求められる。

宇宙太陽発電システムの建設・保守用移動ロボットには、経済性を確保するために徹底的に軽量化された柔軟な構造物上を迅速に移動することが求められる。また、構造物が面上に広がる構造形状を有することから、1方向のみならず、様々な方向に移動する必要があると考えられる。

上記想定ミッションでは、以下の技術が必要になると考えられる。

① 目標に向かって移動する技術

移動目標を指定すると、ロボットの特性、環境制約条件を考慮して目標までの軌道を生成するアルゴリズムが求められる。

② 揺れる足元に追従・補正し、正確・精密に歩く技術

太陽発電システムの柔軟構造物の揺れに追従するため、あるいは、外壁点検時のハンドレール固定足の支持誤差による移動足の位置誤差を補正するため、足先の位置・姿勢誤差への追従・補正が必要である。

③ 柔らかく壊れやすい足元でも、やさしく歩く技術

構造物に負担をかけずに壊さず移動するためには、移動に必須な慣性力以外の反力を構造物に伝えにくくする歩容が求められる。各足が有する冗長自由度を利用する等して、反力を低減化することが求められる。

④ 大型構造建設の経済性確保のため、素早く移動技術

移動する機構のアクチュエータ制約内でできるだけ素早く移動するには、移動する足の慣性特性を低減化する等の工夫が必要になる。

⑤ 物に衝突せず構造物から離れず注意深く歩く技術

周辺対象物との衝突、構造物からの浮遊は、移動の際に最優先で守らなければならない機能である。常時3足が把持・支持状態にある4足ロボットは、安全性・安定性が高く、構造物からの浮遊を防止できる。

⑥ 地上運用、通信リソース削減のための自律歩行技術

運用性の向上・通信容量の削減から自律的に歩行することが望まれる。移動ロボット単体だけでなく、軌道上設備を含めて自律性を高めることが重要である。

⑦ 長時間運用に適した電源と高効率な歩行技術

周辺対象物への負担を低減するため、電源リソースは移動ロボット自身に搭載することが望ましい。また、高いエネルギー効率を有するアクチュエータ選択およびその歩容の選定も必要である。

上記のような技術課題を克服するために、地上実験用プラットフォームとし、4足歩行ロボットの地上実験モデルを試作した。4足歩行ロボットの構成を図1、写真を図2に示す。外形は約 $\phi 1.5\text{m} \times 0.2\text{m}$ (展開時)、 $\phi 0.4\text{m} \times 0.5\text{m}$ (収納時)で、重量は約15kg程度である。

4足(脚)はすべて同一の設計で、各7自由度の関節を有する。各関節には関節コントローラが配置され、中央部の計算機から各関節の位置制御コマンドがシリアル通信(CAN)により送信され、足全体が制御される。各足先には構造物と結合するための電磁アクチュエータおよび位置誤差を計測するためのカメラが搭載されている。現状ではカメラ映像はRFで送信されロボットの周辺に配置された画像計測処理装置によって位置計測が行われている。

中央部には各関節との通信制御計算機の他、コマンドを生成するための管理制御計算機等が搭載されている。また、1時間程度の運用時間を確保できるニッケル水素電源、外界センシングセンサも中央部に搭載されている。

無重力は地上と軌道上で最も異なる環境の一つである。本実験システムでは無重力の模擬に3次元で受動的に動くバランスシステムを採用した。本バランスシステムは鉛直方向には移動ロボ

ットの全体重心付近をエアシリンダにより一定力で吊り上げ、水平方向にはロボットの動きに合わせて受動的に吊り点を動かすことにより、バランスを広範囲に補償するシステムである。吊り点に可動範囲が大きなボールジョイントを用いることにより、回転に対する無重力模擬を高精度に実現できる。受動的なシステムであるので、実験中に重力補償装置が異常になること等の不安定な挙動がない。一方、各足にかかる重力の補償はソフトウェア的に行う。各関節の位置・速度性能を高めることで重力を補償する。

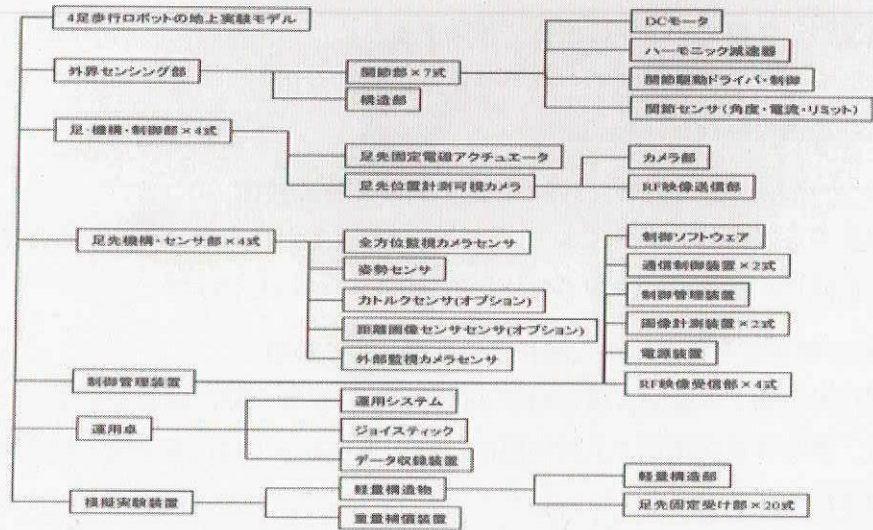


図1 Ground Model of Four Legged Walking Robot

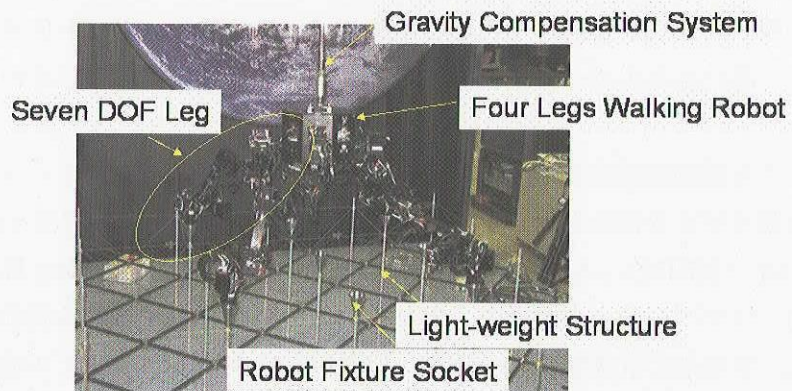


図2 Photo of Four Legged Walking Robot Model

(b) 自動歩行実験

構造物の形状が既知であることから、ステップ（1歩）毎の動作軌道は事前に算出可能な軌道として設計できる。今回の実験の軌道には、構造物やロボット自身との干渉のみを考慮した比較的単純なものを用いた。

制御手法は、与えられた軌道に追従するよう各関節角度に対する PID 制御を行い、外界センサは制御目的には使用しないことを基本とした。しかしながら、足元関節の関節角度誤差が与える足先への影響が大きく、内界センサのみでは、ステップの最終的な位置決め・挿入動作が困難であった。そこで、足先に搭載したビデオカメラの画像計測(図 3)により、ステップ挿入動作への補正および判定を行うことにした。

足先の画像計測結果を画像処理計算機から制御管理計算機にフィードバックすることにより、ステップ動作が確実に実行できることが実験により確認できた。図 4 に画像計測による補正の様子を示す。図 5 には自動歩行実験の全体の様子を示す。



図 3 Tip Camera Image

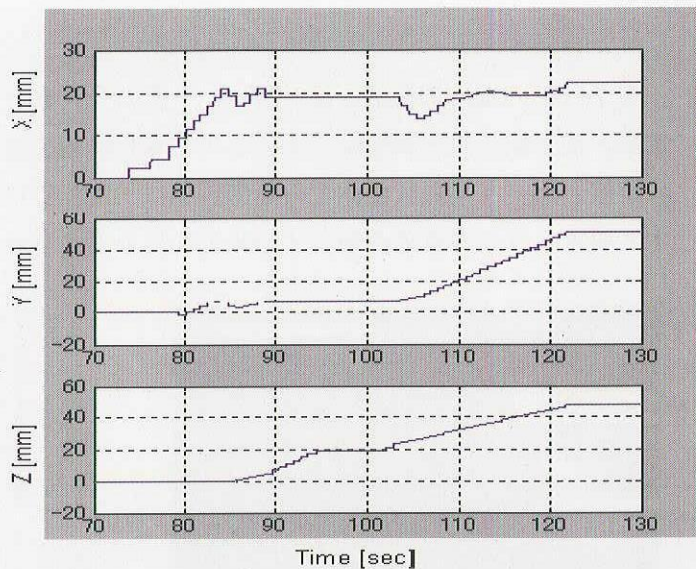


図 4 Example of Tip Insertion by Visual Feedback

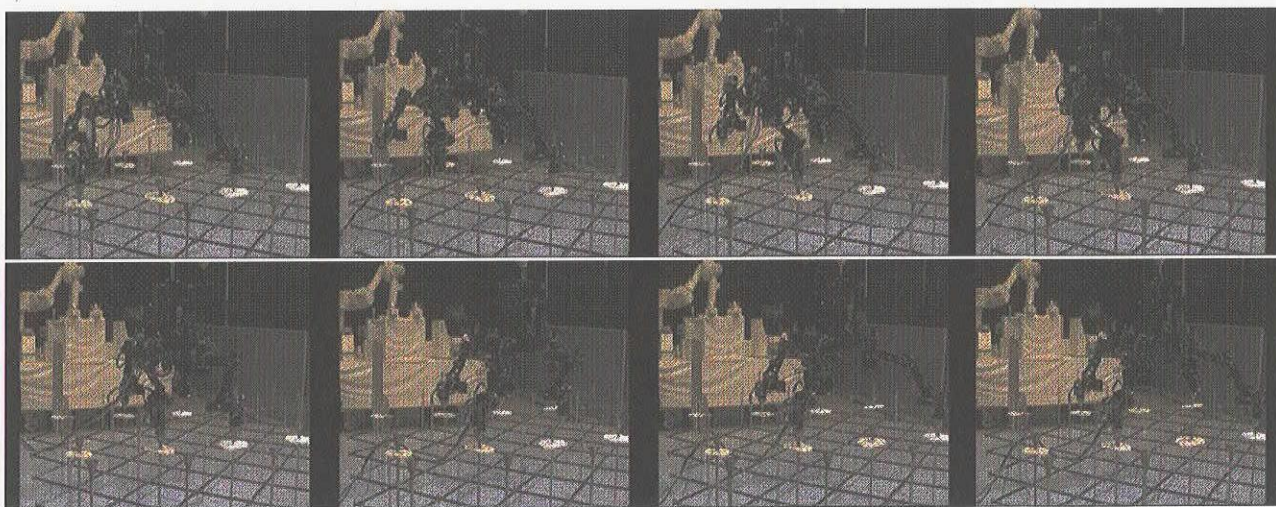


図 5 Example of Autonomous Stepping Experiments

(2) 柔軟構造物歩行技術の研究

振動推定アルゴリズムの有効性評価のため JAXA は太陽電池パドルのような柔軟構造物の動きを模擬することができる、浮上式の柔軟構造物振動試験装置を構築した。空気浮上板の上に複数のエアポンペを搭載し、ポンペからの圧縮空気です浮上する。各ユニット間はアルミ製の梁で連結することにより、最低周波数が 0.04Hz と実際の衛星に近いモードを現出することができる。また、梁の端または中央に加振機を搭載することで、3 次までのモードをプログラム位置制御により作りだすことが可能である。なお、レンジファインダは 3D レーザスキャナを用いて図 6 で示すようにロボットの上に搭載し、構造物の表面を上下にスキャンした。推定した動きや形状が妥当かどうか比較するために構造物の真上から CCD カメラで記録し、構造物上部のマーカ位置を画像処理により地上較正值として用いた。

図 7 は梁の端に加振器を取り付け、一次のモードが定常的に現出するように励振したときの形状推定値と地上較正值と誤差を示す。このとき自由端の振幅が最大 60cm 以上振れたが、図に示すように較正值と比べて梁形状全体での最悪誤差は 10% 程度である。これは、実際の形状をよく推定しており、本アルゴリズムの有効性を示す結果であると考えられる。

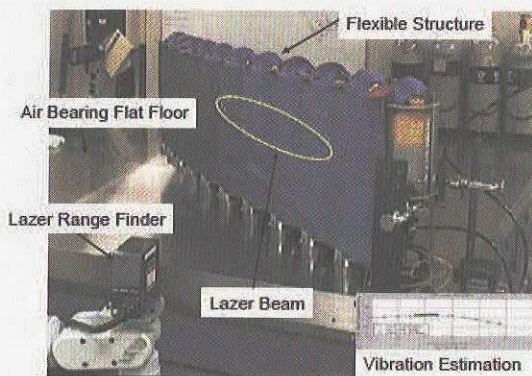


図 6 Vibration estimation experiment

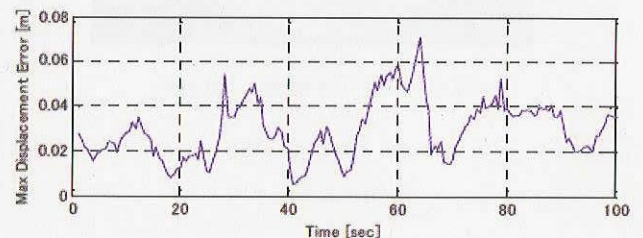


図 7 Vibration estimation error

4. まとめ

軌道上にて従来型のマニピュレータと比較して、飛躍的に作業範囲を拡大できる移動ロボットに関して、歩行ロボットに着目し、想定ミッション、ミッション達成のための課題、課題の検証を行う実験プラットフォーム、課題の一つである精密な位置決め精度のための方策、および実験結果について述べた。また、大型宇宙構造物の組立や歩行に必要である。構造物の動きや変形の推定アルゴリズムの有効性を確認した。

今後は、自動歩行動作自身の改良（高速化、安定化等）に加えて、技術課題に挙げた項目の解決手法の考案および実験による検証を行い、想定ミッションの実現化に向けて研究を進めていきたい。

なお、本実験研究の一部は慶応大学狼研究室と共同で実施した。

参考文献

- [1] 上野浩史 他, 宇宙用4足歩行ロボットの地上実験, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005