

## 宇宙作業システムの研究

Research and Development of Space Servicing Systems

宇宙先進技術研究グループ (Advanced Space Technology Research Group)

宇宙作業システム サブグループ (Space Servicing Systems Sub-group)

西田信一郎、上村平八郎、照井冬人、若林幸子

Shin-ichiro Nishida, Heihachiro Kamimura, Fuyuto Terui and Sachiko Wakabayashi

### Abstract

With the manipulator flight demonstration (MFD), the engineering test satellite VII, our country is preceded in space robot technology, and technical development will be furthered towards the promising onboard servicing or the on-orbit assembly in the future. Non-contacting sensing technology such as motion and a position / attitude using image-processing technology, the autonomous control technology of spacecraft and space robot, mechanism technology are important. This research is studying the missions plan of an onboard servicing and an on-orbit assembly, while performing these advanced technology development.

### 1. はじめに

マニピュレータ飛行実証 (MFD)、技術試験衛星 VII 型などで、我が国は宇宙ロボット技術において先行しており、将来的に有望な軌道上サービスや軌道上組立に向け、技術開発が進められている。特に画像処理技術を用いた運動・位置／姿勢などの非接触センシング技術やロボットや宇宙機の自律制御技術、機構技術などが重要である。本研究では、これらの基盤的な先端技術開発を行うと共に、軌道上サービス、軌道上組立のミッションプランの検討を行っている。例えば、大型反射鏡の軌道上組立ミッションや組立に適した構造・機構の検討・試作も実施している。

### 2. $\mu$ -LabSat を用いた軌道上実験

軌道上サービスにおける対象の運動計測に必要な画像処理技術や接近飛行・姿勢制御に必要な非線形系の制御技術につき、 $\mu$ -LabSat および搭載されている micro-OLiVe 実験装置 (NICT) を使用して軌道上実験を成功裏に実施した。

#### 2.1 ターゲット放出実験

##### (1) 実験

2003 年 3 月 14 日に  $\mu$ -LabSat を用いて実施した NAL ターゲット放出実験の実験データの処理・評価解析を実施した。実験は、MLI を模擬したカプトンフィルム貼付と着色を施したターゲット (直径 10 cm) を地球に向けて放出し、様々な明るさ、色、パターンからなる地球背景の画像から、搭載計算機での画像処理により放出されたターゲットを検出するもの (図 1) であり、日照状態から僅かな照り返し光が当たった状況まで確実に抽出、トラッキングすることができた。

画像計測で衛星の MLI を抽出することにより、衛星の検出を容易にするだけでなく、ステレオ処理、ICP の前処理として用いることにより、処理に要する計算負荷を軽減することが可能である。

##### (2) テンプレートマッチングによる運動推定

CG を用いてテクスチャ、照明環境も模擬して画像処理用のテンプレートを各姿勢角について作成し、最も良いマッチングが得られる姿勢を探索・補間することにより、軌道上実験時のターゲットの姿勢・距離の推定を行った。

焦点を始点とし画像センサー上のターゲットを構成するピクセルを終点とするベクトル群を考え、これらのベクトル群を回転させることでターゲットを画像中心に移動させ、CG で生成したテンプレートと比較する、という手法で解析した。(図 2) その結果、処理の途中に手動による操作を入れることなく、完全自動で 1 軸回りの姿勢運動が求められた。(図 3)



図1 ターゲット放出実験画像でのカラー抽出の有効性

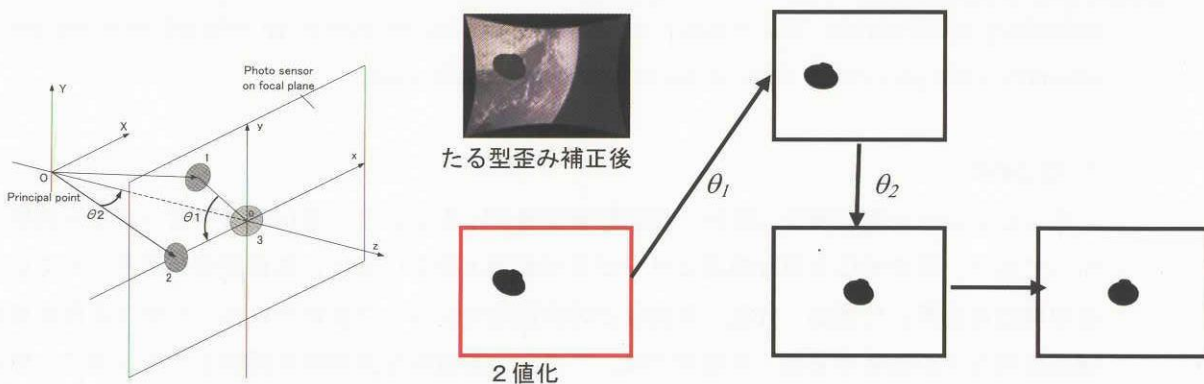


図2 ターゲット画像のテンプレートマッチング用の形状補正変換処理

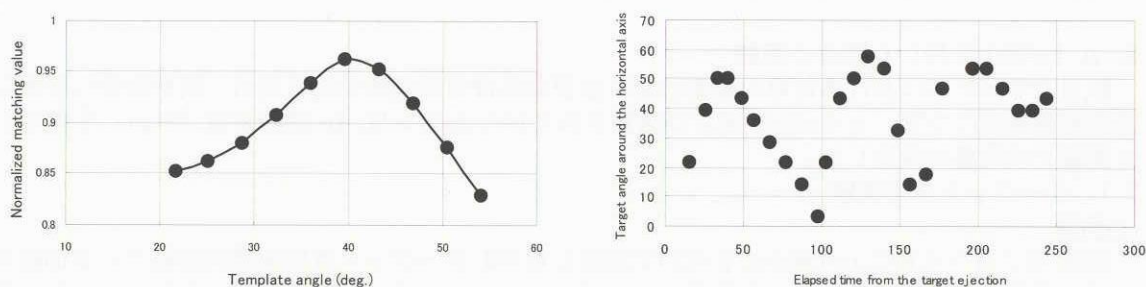


図3 テンプレートマッチングによるターゲット姿勢推定・評価

## 2.2 月トラッキング制御実験

2003年度までにソフトウェアや地上試験などの実験の準備を進め、2004年4月7日に「月トラッキング制御実験」を実施した。これは深宇宙の暗黒背景に月だけが搭載カメラに写るような状況（図4）で、搭載計算機上のソフトウェアによって自律的に以下の処理を行う実験である。

- カメラ画像内の月を画像処理によって認識し方向を抽出
- 月を指向して2ホイールによるスライディングモード制御姿勢制御

月は画像の中で図Cのような経路をたどり、約60秒で画面の中心に収った（図5）。

$\mu$ -LabSatの三軸姿勢制御モードでは、モーメントムホイールが大きな角速度を持って回転し、大き



な角運動量を持つため、モーメントホイールの回転軸に直行する軸（X,Y軸）回りの自在な姿勢変更を2つのホイールで実現するのは通常の制御では不可能である。月トラッキング制御実験は、スライディングモード制御を応用することでこの姿勢制御を可能にしたものであり、このような姿勢制御をリアルタイムのフィードバックによって軌道上で実証したのは、この実験が世界初である。

衛星搭載ソフトウェアに関しては、昨年5月に実施された東京大学の実験の際に用いられたソフトウェアをベースにして、当グループが姿勢制御系の開発を行った。なお、実験前の地上試験、搭載ソフトの書き換えにおいて、NICT（独立行政法人 情報通信研究機構）の多大なご協力を頂いた。

本実験は、宇宙ロボットなどが機能を失って漂う人工衛星に推進剤の補充や修理などを行ったり、修理の見込みの無いスペースデブリとなった機能不全衛星を投棄する作業を行うための前段階として、これらに自律的にアプローチ・捕獲するために搭載されたカメラで取得した画像を位置・姿勢制御へのフィードバック情報とする「画像フィードバック制御技術」などにつながるものである。



図4 画像上の月の初期位置（地上系表示）

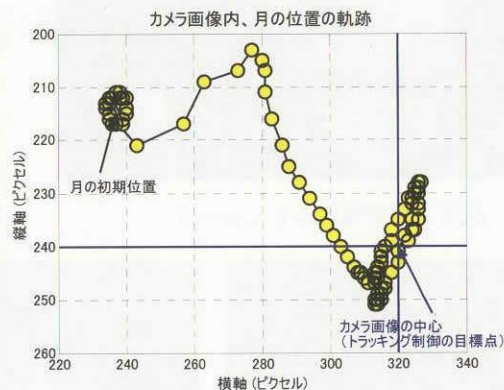


図5 姿勢制御による月の画像上軌跡

### 3. 汎用高精細ハンド 3.1 ハンド改良試作

汎用エンドエフェクタとしての

3本指構造の小型高精細ハンド機構にカトルクセンサ、触覚センサ、原点センサを付加した小型ハンド装置の改良を実施した。触覚センサには、面圧センサを用い、指の先端形状にフィットした構成を実現した。小型高精細ハンド機構を図6に示す。3.2 ハンド操作デバイス検討

人間が長時間の操作に堪えることができるハンド操作デバイスの検討を行っており、要求項目の抽出を実施した。



図6 高精細ハンド機構

## 4. ビジョンシステムの研究

### 4.1 ステレオマッチング/ICPによるターゲット衛星の運動・姿勢推定

軌道上で故障した衛星を除去・修理する「デブリ回収機」と呼ばれるような宇宙機の開発における要素技術の一つである「画像情報を用いた機能不全衛星の運動推定技術」の検討のために、図7のような、太陽からの直接光と地球のアルベドの両者によって照らされるMLIなどの金属光沢を持つ素材で包まれている故障衛星の画像を模擬的に生成するシミュレータを整備している。

このシミュレータで取得した3軸姿勢運動を行う衛星模型のステレオ画像を処理し、その結果として得られる3次元点群データと衛星の形状データから得られる点群との間のマッチングによって相対位



置・姿勢を推定する手法を採用し、点群間の3次元モデルマッチングの一般的な手法の一つとして提案されているICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを適用した。推定手法の概要を図8に示す。図9は、ステレオ画像と、その結果の模型形状の3次元点群の一例である。

a. 時系列画像情報活用によるマッチング整合率の向上

b. ステレオマッチングにビニング画像粗探索による領域抽出機能の追加

などのアルゴリズムの改良を実施し、この推定アルゴリズムを姿勢運動を行う衛星模型の時系列画像に対して適用することによって図10に示すように3Dモデルマッチングに成功し、衛星模型の姿勢運動が推定できた。これにより、ステレオマッチングの信頼性向上と処理高速化の効果を確認した。



図7 軌道上光学環境シミュレータ

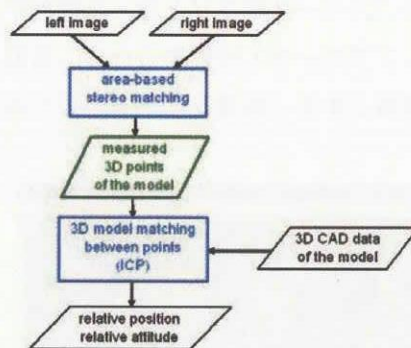


図8 ステレオ視と3Dモデルマッチング

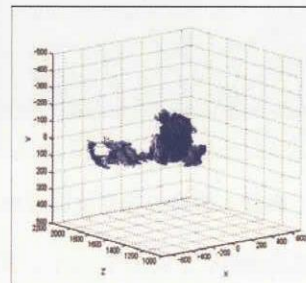
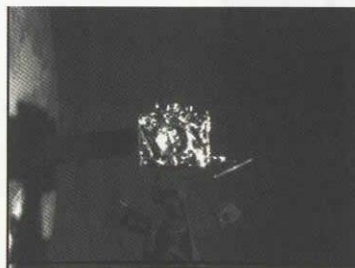
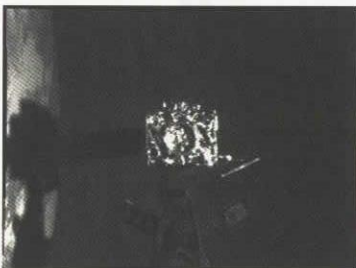


図9 左目画像(左)、右目画像(中)、ステレオ視より得られる3次元点群(右)

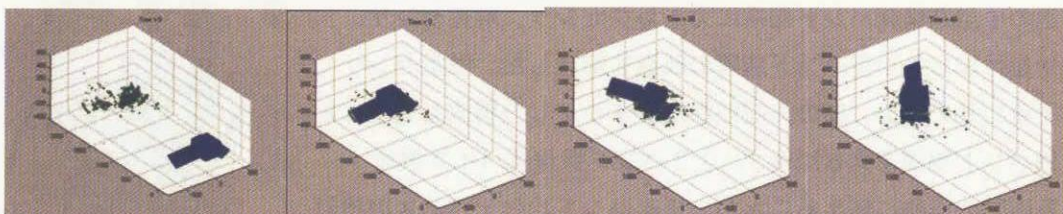


図10 時系列画像を用いたICPによる3Dモデルマッチング(緑:計測点群、青:モデル点群)

#### 4.2 輪郭三角法による運動計測手法の開発

回転運動している非協力な対象衛星につき、ステレオカメラ画像を用いて運動を計測する方法として、演算量の少ない手法として、対象の輪郭の3次元位置計測とその時間変化により算出する方法の開発を進めている。

対象物の輪郭は、画像上でエッジ抽出処理や膨張/収縮処理により容易に抽出することが出来る。2台のカメラを光軸が平行或いは輻輳角を設定して同一平面上に配置すると、良く知られているように左右のカメラ画像上の同一対象点が同一水平ライン(エピポーラ線)にあるため、容易に探索・対応づけが出来る。従って、輪郭を構成する点列(以後:輪郭点)を特徴点とすれば、容易に抽出でき、容易に左右画像でのステレオ対応付けができ、少ない演算量で確実な3次元位置計測処理ができる。(図11)



このような輪郭ステレオ計測の特徴を活用して新規に「ステレオ輪郭追従法」を考案した。本方式は、輪郭を構成する点列の3次元位置をステレオ計測し、その時間変化から対象の運動を計測する手法である。試作ソフトウェアにより機能確認、実験計測を行い、良好な結果を得た。

## 5. ロボット制御タスク体系化の研究 5.1

### 関節アクティブリンプ制御関節試作・試験

平成14年度に新規開発した関節アクティブリンプ制御を適用する関節の第2次試作を実施した。新規の高剛性トルクセンサ(図12)、低抵抗ケーブルラップ機構(図13)を適用し、極力コンパクトに構成した。関節アクティブリンプ制御を適用して動作させることにより良好な特性を確認した。

### 5.2 リカバリフローの検討

宇宙ロボット作業において、作業途中に異常が生じた時の自律的リカバリフローの検討を実施している。リカバリの手段をリストアップし、状況に応じて対応手段にダイナミックにプライオリティを設定して対応を選定するものである。効率の良い自律制御系を構成するためには、本検討のようなリカバリ機能が不可欠である。

## 6. 軌道上自律組立の研究

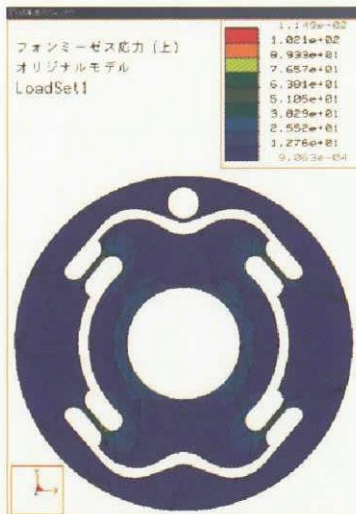


図12 高剛性トルクセンサ

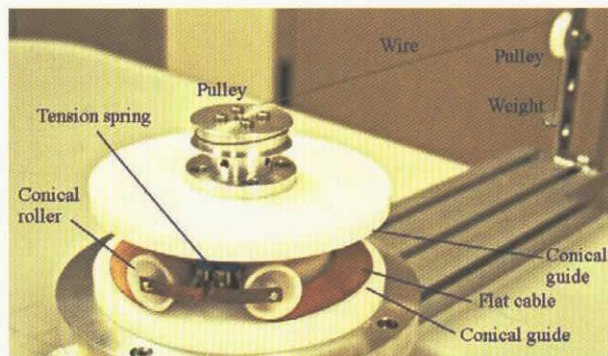


図13 低抵抗トルクケーブルラップ機構

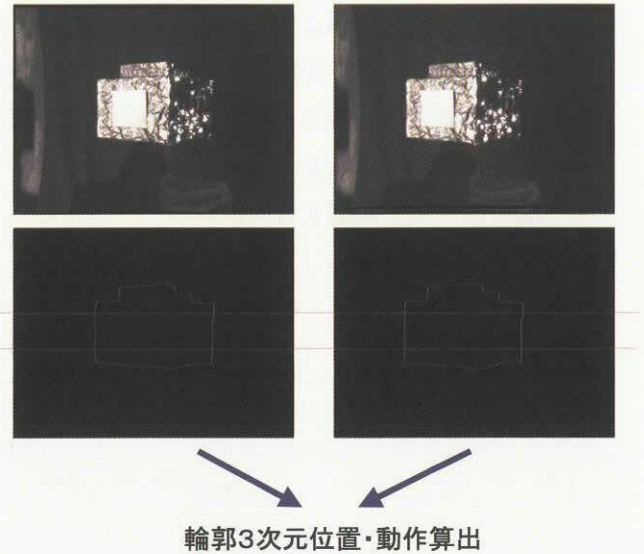


図11 ステレオ輪郭追従法による運動計測

宇宙ロボットによる大型反射鏡の自律組立の研究(萌芽研究)と連携して、軌道上での単機衛星上での宇宙ロボットによる組立技術の研究を実施している。反射鏡要素の連結機構の試作を行い、高剛性での連結、電気コネクタの結合、対応するエンドエフェクタ、制御方式の目処が立った。

## 7. まとめ

将来的に有望な軌道上サービスや軌道上組立に向け、技術開発が進められている。特に画像処理技術を用いた運動・位置／姿勢などの非接触センシング技術やロボットや宇宙機の自律制御技術、機構技術などが重要であり、本研究では、これらの基盤的な先端技術開発を進めている。特に平成15年度は、 $\mu$ -LabSat を用いた軌道上実験2件の評価・解析により貴重なデータが得られた。また、宇宙ロボットの新規制御方式の開発を行った。

## 参考文献

- [1] H. Kamimura, S. Kawamoto, S. Nishida et.al: "Detection and Motion Estimation of Small Target Using Color Image Processing", ISTS2004
- [2] F. Terui, K. Yoshihara et.al: "Visual Feedback Attitude Control Experiment of a Bias Momentum Micro Satellite", ACA2004, 2004
- [3] F. Terui, H. Kamimura, S. Nishida: "Quick Motion Estimation of a Large Space Debris Object", ISTS2004, 2004
- [4] 西田, 吉川: "宇宙ロボット用トルセンサ内蔵関節の試作", 第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002
- [5] S. Nishida, T. Yoshikawa: "Large Reflector Assembly in orbit by a Mobile Space Robot", ISR2004, 2004