

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 research and 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おり、大型反射鏡の軌道上組立ミッションの検討を実施し、さらに組立に適した構造・機構の検討・試作も実施した。

2. 研究概要

平成16年度は、以下の項目について研究を行った。

- (i) μ -LabSat での軌道上実験：月トラッキング実験の実施および評価解析
- (ii) 次期宇宙ロボットアームの開発：トルク制御関節、エンドエフェクタ、汎用高精細ハンド
- (iii) ビジョンシステム：ステレオ ICP 運動計測の高速化、輪郭三角法運動計測手法の3軸化
- (iv) ロボット制御タスク：高度力覚制御試験・評価、自律リカバリ系検討、上位遠隔指令系試作
- (v) 自律組立ミッション研究：電波望遠鏡反射鏡組立の検討・実験装置製作、3次元カラーマーク開発

3. μ -LabSatでの軌道上実験（月トラッキング姿勢制御実験）⁽¹⁾

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日に後期運用段階の実験として「月トラッキング姿勢制御実験」(Fig.1) 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 (Fig.2) 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。

a. 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

b. 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での姿勢制御

μ -LabSatの三軸姿勢制御モードでは、モーメンタムホイール (Z軸) が大きな角運動量を持つため、モーメン

タム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(X, Z軸)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。月は画像の中でFig.3のような経路をたどり、約80秒で画面の中心に収まり、通常は3個以上必要なホイールが2個しか使用できない条件下でも、高速に姿勢マヌーバ制御が可能であることを示した(経路に示す数値は制御開始からの秒数を示し、赤丸は画像中心を示す)。また、実験と条件を合わせた数値シミュレーションによる解析結果をFig.3に示す。衛星搭載ソフトウェアは、東京大学の実験(2003年5月実施)のソフトウェアをベースにして、当グループが姿勢制御部の開発を行った。

本実験は、3軸姿勢制御衛星の信頼性向上やホイール数を削減した小型衛星の機能向上に役立つものであると共に、宇宙ロボットなどが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。

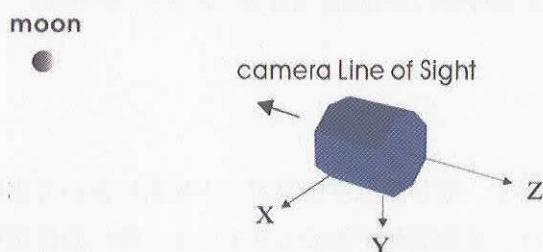


Fig.1 Moon tracking experiment

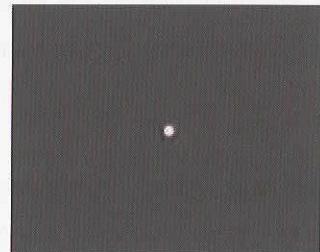


Fig.2 A moon image on the flight experiment

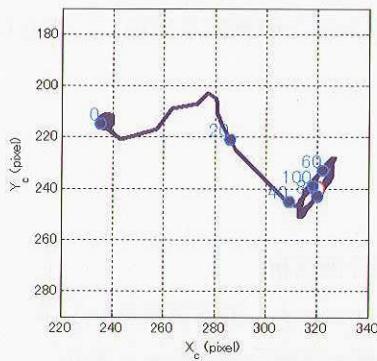


Fig.3 Locus of target position in camera image

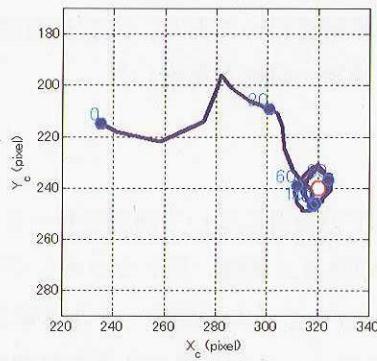


Fig.4 Locus of target position(simulation)

4. 次期宇宙ロボットアームの開発

これまでの宇宙ロボットアームでは、力制御の応答性・適用範囲、エンドエフェクタの耐荷重性、汎用作業対応、軽量化に大きな課題があった。そこで、これらの課題を解決する次期宇宙ロボットアームの研究・開発を進めており、平成16年度は、前年度までに試作した各部分の試作機の詳細な試験・評価を実施した。

4.1 トルク制御関節の試験・評価⁽²⁾

平成15年度に試作した関節インピーダンス制御を適用する関節の第2次試作機(Fig.5)の試験・評価を実施した。この関節は、新規の高剛性トルクセンサ、低抵抗ケーブルラップ機構を適用し、極力コンパクトに構成されている。関節インピーダンス制御および関節仮想デブス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。

平成15年度までに試作した組立作業および工具交換に用いられる次期標準エンドエフェクタ（Fig.6）の詳細な特性測定および小型2次元アームを用いた挿入試験を実施した（Fig.7）。許容アライメント誤差、保持性能、耐荷重性などの試験の結果、いずれの仕様項目も十分に満足する結果が得られた。

4.3 汎用高精細ハンドの特性取得

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（Fig.8）につき、平成15年度に実施したトルクセンサ、触覚センサ、原点センサを付加改良の特性取得を実施した。

5. ビジョンシステムの研究

5.1 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⁽⁴⁾

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、Fig.9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Fig.10に示す。Fig.11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. 3次元点群分布のKurtosisと分散を活用した、点群に対する計測信頼性指標の活用

- b. 時系列画像情報の活用による3次元モデルマッチング整合率の向上
- c. 様々なアルゴリズムの併用によるステレオマッチング誤差点群の除去
- d. 粗密探索、相關演算の再帰化によるステレオマッチングの高速化

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の準リアルタイムのソフトウェアを開発した。姿勢運動を行う衛星模型に対し時系列画像を取得し、推定アルゴリズムの処理を行うことによってFig.12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可能などを示した。



Fig.5 Prototype joint for next space robot arm

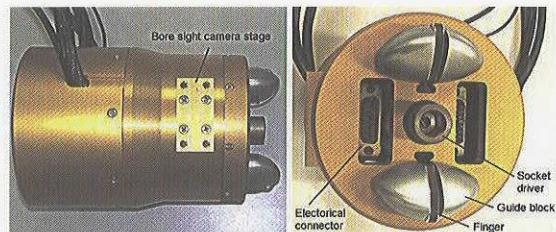


Fig.6 Prototype of end-effector

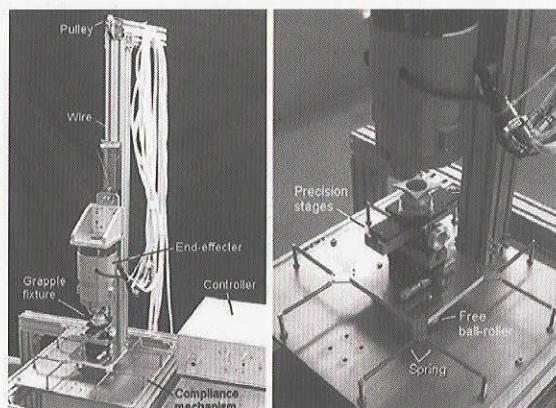


Fig.7 Testing configuration of end-effector



Fig.8 Precision hand

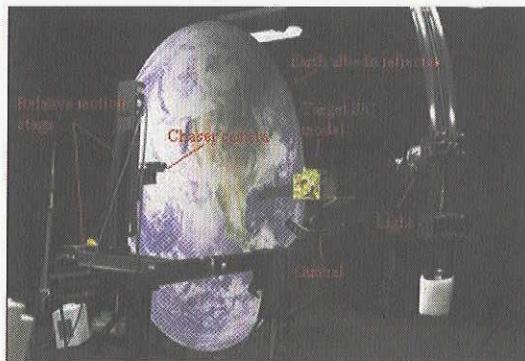


Fig.9 On-orbit visual environment simulator

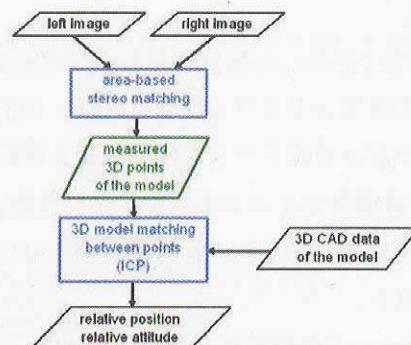


Fig.10 Stereo vision and 3 D model matching

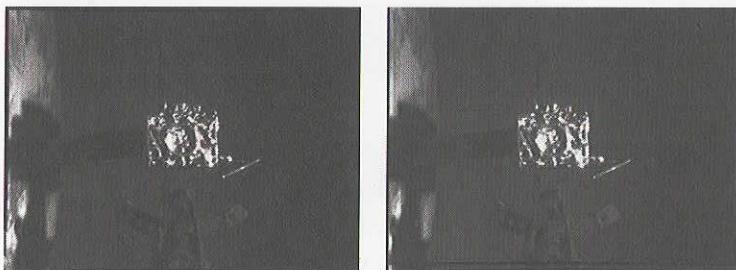


Fig.11 Left camera image (left), right camera image (middle), measured 3D points of the satellite model(right)

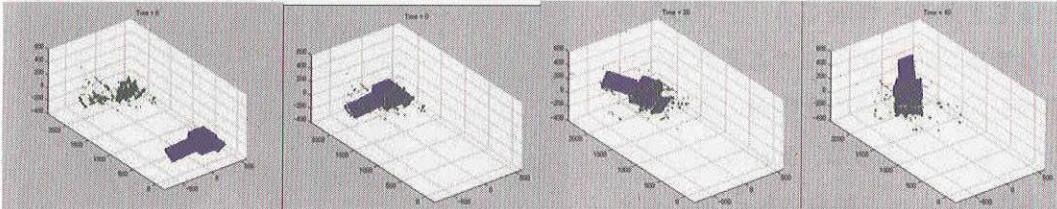


Fig.12 ICP using a time series of images (green : measured points、blue : aligned model points)

4.2 輪郭三角法による運動計測手法開発⁽⁵⁾

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できる。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）上にあるため、容易に探索・対応づけができる。従って、輪郭を構成す点列（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る、少ない演算量で確実な3次元位置計測処理ができる。（Fig.13）

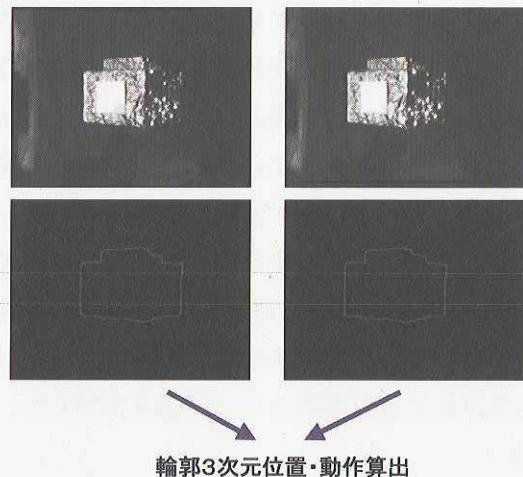


Fig.13 Motion measurement by Stereo contour tracking method
輪郭3次元位置・動作算出

この様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。今年度は、試作ソフトウェアの3次元対応化改修を実施し、機能確認、計測を行い、良好な結果を得た。

4.3 位置姿勢計測用カラーマーク開発⁽⁶⁾

大型反射鏡などの軌道上組立作業では、ロボットが移動する構造物が大きく、ハンドルする要素も大きいため、熱ひずみや結合部のアライメント誤差などに起因する相対的な位置・姿勢誤差が問題となる。組立作業のように予めコーディネートされた対象に対するロボットの位置決め作業では、対象物の取っ手部や位置決めの必要な箇所にマーカを設けて画像計測の指標として、画像フィードバック制御や遠隔操作の位置決めに用いることができる。本研究では、この様な用途で軌道上環境において抽出の確実性や計測精度の高いマークおよび画像処理手法の開発を進めている。

今回開発したカラーマーク（Fig.14）は、3次元形状を有し、3種類の異なる色の円形マークから構成される。円形マークの色は均等色空間座標上で極力離れて位置する色を選定した。また、地球背景やその写り込みに配慮して青色の使用は避けた。これにより、適正露光値を中心として±2EVの輝度範囲で正確な色抽出が可能となった。

軌道上光線環境を模擬した光学環境シミュレータでの実験により、想定される距離レンジ（30～60cm）でエンドエフェクタの把持における許容誤差を十分に下回る計測誤差で姿勢を測定することが可能であることを確認した。（Fig.15, Fig.16）また、実際の軌道上での使用にあたってはレンズフォーカシング機構の付加は期待できず、焦点位置が固定されるため、デフォーカスした距離レンジにおいても機能することが求められるが、十分実用に耐える計測誤差に収まることを確認した。（Fig.17）

5. ロボット制御タスク体系化の研究 5.1 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判定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

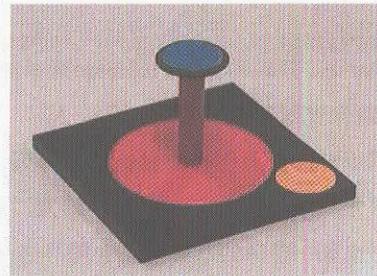


Fig.14 Color marker for on-orbit assembly

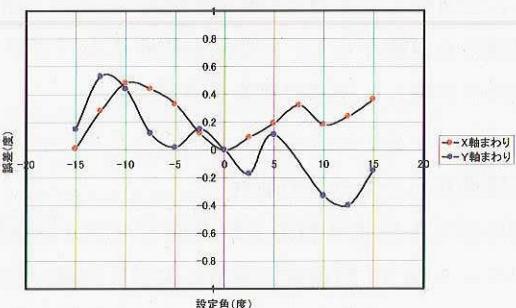


Fig.15 Attitude measurement error around X and Y axes

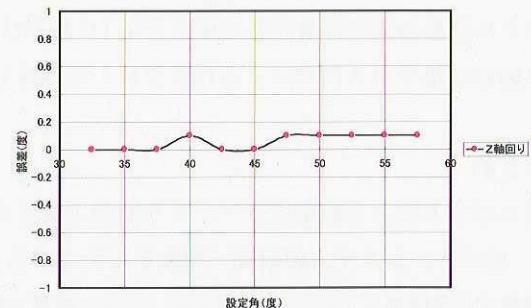


Fig.16 Attitude measurement error around Z axis

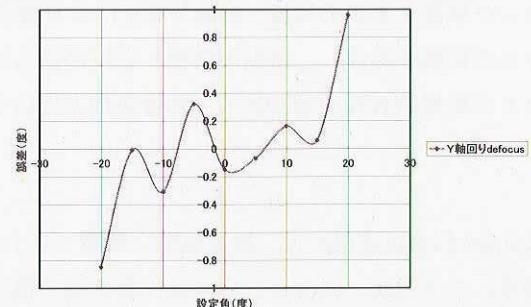


Fig.17 Attitude measurement error around Z axis at defocused distance

対応を選定する。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。

5.2 遠隔操作支援系の試作

宇宙ロボットの遠隔操作において、詳細な指令を逐一出す形態では、操作者の疲労が大きく、操作エラーを生じやすく、所要伝送データ量が膨大になるなどの問題があった。そこで、本研究では、遠隔操作に地上系における自動・自律的な支援系を関与させることにより、操作者の上位のシンプルな指令により高度な作業を実現することを目指として研究・開発を進めている。今年度は、画像処理系を対象として、支援系を組み込んだソフトウェアの試作を実施し、所期の機能を確認した。

6. 自律組立ミッションの研究⁽⁷⁾

宇宙ロボットによる軌道上組立のミッション解析として、スペース VLBI 用電波望遠鏡の大型反射鏡の自律組立を対象として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、次期ロボットアーム試作機を用いた定盤上のパネル要素の結合作業試験の装置(Fig.13)およびソフトウェア製作を実施し、関節アクティブリング制御および関節仮想デプス制御による作業フローを作成した。

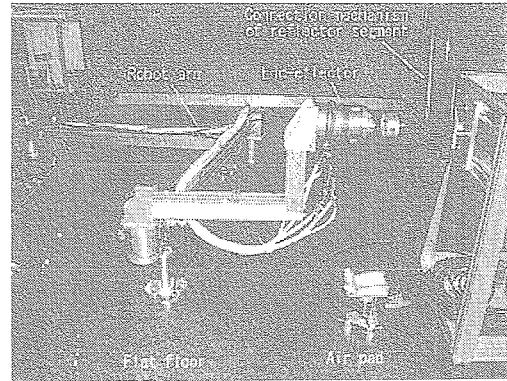


Fig.13 Flat floor testing for reflector assembling

7. まとめ

宇宙ロボットによる軌道上サービスや軌道上組立の実用化に向け、ロボットの制御方式、次期宇宙ロボットH/W、ビジョンシステムの研究・開発を進めている。特にロボットや宇宙機の自律制御技術、対応したセンサや機構のH/W技術、ビジョンシステムによる運動・位置／姿勢などの非接触センシング技術やなどが重要であり、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。平成15年度は、μ-LabSatを用いた月トラッキング軌道上実験の実施・評価・解析により貴重なデータを得た。また、次期宇宙ロボットのH/W試作機やマーカの試験を実施し、所期の特性・性能が得られていることを確認した。また、試験・解析により宇宙ロボットの新規の各種力制御方式、画像処理方式の有効性を確認した。

謝辞

μ-LabSat軌道上実験では、地上試験、搭載ソフトの書き換え等において、NICT（独立行政法人 情報通信研究機構）の木村氏、永井氏、山本氏に多大なご協力を頂いた。また、ロボット制御に関しては、京都大：吉川教授にご指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1]F.Terui, K.Yoshihara et.al: "Visual Feedback Attitude Control Experiment of a Bias Momentum Micro Satellite", ACA2004, 2004
- [2]西田, 吉川：“宇宙用アクティブリングプロボット関節の開発”，日本航空宇宙学会論文誌 第52巻第608号, 2004
- [3]西田, 吉川：“軌道上組立作業ロボット用エンドエフェクタの開発”，日本航空宇宙学会論文誌 第52巻第613号, 2005
- [4]F.Terui, H.Kamimura, S.Nishida: "Quick Motion Estimation of a Large Space Debris Object", ISTS2004, 2004
- [5]西田, 照井, 上村：“輪郭ステレオ処理による捕獲対象の運動計測”，第48回システム制御情報学会講演会, 2004
- [6]H. Kamimura, S. Nishida: "Three Dimensional Color Marker for On-orbit Assembling Using Space Robot", IAC2004, 2004
- [7]S.Nishida, T.Yoshikawa: "Large Reflector Assembly in orbit by a Mobile Space Robot", ISR2004, 2004
- [8]西田, 照井, 上村：“HST延命・保守ミッションの検討”，第48回宇宙科学技術連合講演会, 2004