

宇宙ロボット／ランデブ・ドッキング用視覚センサ

小田光茂¹⁾、稲場典康¹⁾

軌道上の人工衛星への補給・保守、並びに宇宙ステーションのような大型宇宙構造物の組立には衛星同士のランデブ・ドッキングやロボットによる操作が不可欠である。このような作業を行うに当たり、「宇宙のロボットビジョン」は自動ロボットのセンサ、あるいは有人作業の支援機能として、作業の効率化・自動化並びに高度化に大きく貢献する。

軌道運動による太陽、地球との位置関係の変化に伴い、軌道上衛星の照明環境は、時々刻々大きく変化し、また宇宙での放射線や大きな温度変化等の制約から使用できるハードウェアには大きな制約がある。このような制約のもとで、高い信頼性を要求される「宇宙のロボットビジョン」の本分野での実例と今後の展望について概説する。

Vision Sensors for Space Rendezvous docking and Manipulation

Mitsushige Oda and Noriyasu Inaba

Space systems tend to be larger and more complicated to cope with growing space mission's requirements. On-orbit servicing technologies of rendezvous, docking and assembling are mandatory to complete large space systems using multiple launch. Robot vision technologies are used in on-orbit servicing tasks in space in order to improve performance and efficiency of the tasks. Examples of space robot vision in this area, that work with high reliability and fidelity in a severe space environment are introduced with a perspective of future needs in this paper.

1. はじめに

地表観測、通信、測位ならびに基礎科学研究等の目的を達成するための人工衛星等の宇宙システムは、同種の目的達成のために構築される地上システムとの競争の中、時代とともに大規模化、複雑化してきている。

建設中の国際宇宙ステーションでは、スペースシャトルを利用した50回にも及ぶ打上げ、軌道上ドッキング及び組立作業が必要になる。また、大規模、高価になってゆく大型人工衛星に対し、軌道上で燃料等の補給や搭載電子機器の換装により効率的に技術進歩に対応したミッションの長寿命化・高度化を行う計画も内外で多数構想されている（例えば[1],[2]）。

軌道上を毎秒数 km の速度で飛行する人工衛星に対し、補給・結合用の衛星を打ち上げ、接近結合させる作業は、地上レーダ等の地上のセンサ、ロケット／人工衛星が持つ搭載系の種々センサを情報源とし、地上運用者とロケット／人工衛星の自律機能の連携・役割分担のもと行われる。

上記、軌道上でのランデブ・ドッキングや組立・機器交換の作業には、ロボットビジョンが利用されており、今後更に高度な要求へ対応するための技術が必要となると考えられる。照明環境や使用できるハードウェア制限等の諸制約の中で、高価で容易に代替えの利かない宇宙システム

1) 宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

を対象とすることから、「宇宙のロボットビジョン」には一般に地上システム以上に高い信頼性が要求される。

2. 宇宙環境の特殊性

2. 1 照明環境

地球周回の低軌道上では、大気散乱の無い太陽の直接光と地球反射のアルベド光が混在し、照度は $10^3 \sim 10^5$ [lx]のオーダーで変化する(図.1)。また、軌道運動に伴う日陰も存在する。低軌道の衛星は凡そ1時間半で地球を一周することから、太陽位置が地上より15倍ほど速く変わる。以上、総じて軌道上の照明環境は地上の屋外より条件が悪い。

また、人工衛星の表面を覆う断熱材は反射率の高い金属膜あるいは模様の無い白色布であり、これらがゆったりと衛星表面を覆っており、主照明となる太陽方向が時々刻々変化することと相まって、種々の3次元形状認識や運動同定の手法に必要となる特徴点の安定的な識別・追尾が困難である(図.2)。

一方、日陰中は許される電力リソースの範囲で適切な照明が使えれば、良好な視覚環境を与えることが可能であり、後述のとおり実利用ではこれを積極的に利用しているケースもある。

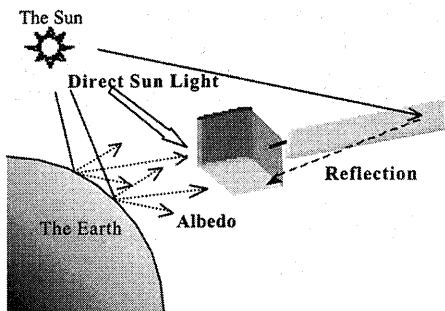


図.1 軌道上照明条件

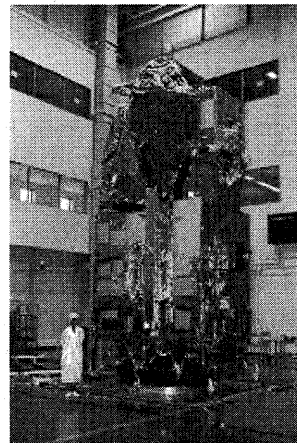


図.2 人工衛星の例(「かけはし」)

2. 2 通信の時間遅れ

衛星と地上を結ぶ通信回線は貴重なリソースである。従って、軌道上の衛星と地上運用室間との通信の容量には大きな制約がある。また、静止軌道のデータ中継衛星を使用した場合、電波の空間伝搬や介在する計算機間の通信プロトコルのため、5～7秒の一巡の遅延時間を生じることから、高度な画像処理を地上で行い、これを搭載系に指示する閉ループ制御では、高い制御帯域の確保が不可能となる。従って、モデル化が困難な外乱が作用する浮遊体の捕獲・操作等動的タスクの遂行のためには、浮遊体の状態を搭載系で検出し、フィードバックを行う制御系が不可欠である。

2. 3 ハードウェアに対する制約

ムーアの法則に象徴されるとおり長足の進歩を遂げる地上の電子部品に対し、宇宙用部品は耐放射線性能及び、広い動作温度を保证するための開発・検証が必要であるため、搭載計算機の計算能力並び、記憶装置の容量は地上に比べ1世代、2世代遅れたものとなる。

後述の技術試験衛星Ⅶ型(1997年打上げ)に使用された搭載計算機の能力は凡そ1 Mips、2002年に打ち上げられた「つばさ」に搭載された安定動作を必ずしも保証しない「実験用計算機」でも43Mips程度である。地上系との機能分担のもと、限られた能力の搭載系計算機に適切な機能を割り当てることが求められる。

3. 技術試験衛星Ⅶ型

宇宙用ロボットビジョンの実例として、1997年に打ち上げられたランデブ・ドッキング及び宇宙ロボットの技術実証を目的とした技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ。愛称「おりひめ・ひこぼし」図.)での利用例を以下に記す。

ETS-Ⅶは2トンのチェイサと0.4トンのターゲットの2衛星から構成される。自動ランデ

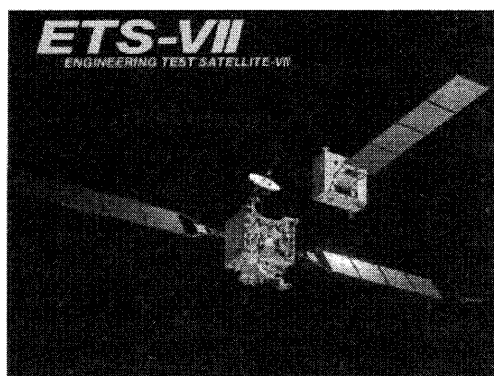


図.3 技術試験衛星Ⅶ型

ブ・ドッキング実験は両衛星を軌道上で分離し、再び自動結合をさせることで行った。一方、宇宙ロボット実験ではチェイサに搭載された全長2m、6自由度のロボットアームを自動並びに地上からの遠隔操作により動作させ、各種組立操作ならびにターゲットの補作・操作等を行った。チェイサには4種6台の白黒CCDカメラが搭載されており。実験の地上モニタに供される他、アームの手先カメラの画像は搭載計算機に入力、画像処理の後アーム制御に利用することが可能である[3]。

3. 1 ランデブ用視覚センサ

ETS-Ⅶのランデブ・ドッキング実験は、軌道上で両衛星を最大約15kmまで離れた状態から、下表のとおり距離に応じた航法センサを利用し、接近、結合を行った[4]。

表.1 ランデブ・ドッキング用センサ

相対距離	使用主センサ
～500m	G P S 受信機
600m～10m	ランデブレーダ
10m～ドッキング	近傍センサ

表.1 中の 10m へドッキングの最終接近フェーズで使用する「近傍センサ」は約 100 個の赤色 LED でターゲット衛星上に搭載した立体マーカを照射し、その反射像を CCD で撮像、処理することで相対位置・姿勢を計測する。LED 及び CCD からなる近傍センサヘッド及びターゲット上の立体マーカを図.4 に示す。

LED は計測周期 (500msec) 毎にパルス照射し、CCD 部はこれに同期し、反射光をフィルタで透過した後 LED オン及びオフ時の画像を撮像する。周囲照明の影響を緩和するため、上記 2 画像の差分画像を作成の後、これを適正閾値で 2 値化し、マーカ円の中心を抽出しこれらの位置関係より相対位置・姿勢を計測している。

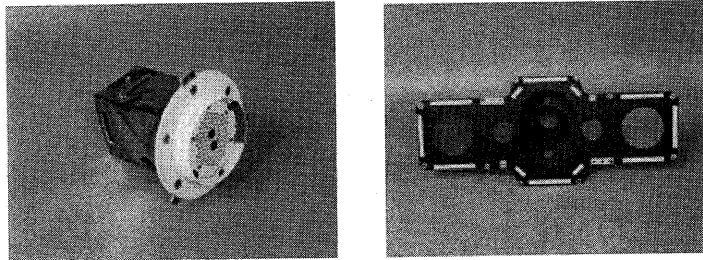


図.4 近傍センサヘッドと立体マーカ

2m 以近の領域では姿勢誤差 0.2 度、位置誤差は光軸方向 5 mm、光軸直行方向で 1mm での計測が可能である。

3. 2 ロボット作業用視覚センサ

①位置決め精度向上のためのビジョン

ロボット実験では衛星表面に取り付けられた、電気ユニットの交換や、トラス構造物の組立が行われた (図.5)。把持に際するロボットアームの精密位置決めのために、図.6 に示す様な黒色背景に 3 つの円を立体的に配置した視覚マーカを用い、これを地上あるいは搭載で処理することにより微調整のための移動位置・姿勢量を計測、これに基づく微調整を行う手法を用いた。計測原理は、積極照明並びに差分画像を用いない点を除いて近傍センサで用いたものと同じである。

位置誤差 3 mm (光軸方向)、1mm (光軸直行方向) 並びに角度誤差 1deg の計測が可能である。

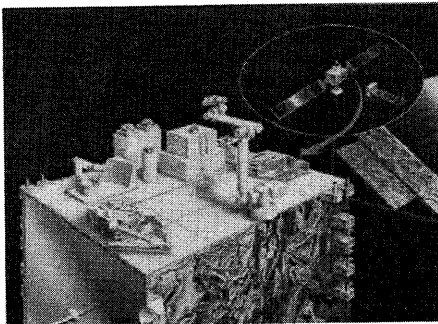


図.5 ロボット実験全系

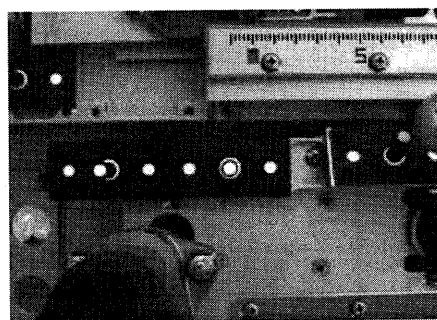


図.6 精密位置決め用 3 点画像マーカ

②ビジュアルサーボ

画像処理結果を搭載系で連続的に処理しアーム制御に取り込むビジュアルサーボも実験的に開発し図.7に示すとおり、浮遊するターゲット衛星を捕獲する実験に用いた[5]。

1Mipsの搭載計算機でターゲット上の把持ハンドルに設置した2円の画像マーカを2Hzで処理、追尾接近することにより浮遊衛星の捕獲に成功した(図.8)。ダイナミックに変化する照明環境の中、与えられた計算機的能力で確実な画像処理が行える様以下2点に配慮した。

- 図.9に、カメラへ太陽光が直接入射した場合の画像例を示す。この様なケースでは適正な画像処理が不可能となるため、衛星軌道位置、太陽位置並びに衛星形状を考慮した照明環境解析を行い、ビジュアルサーボ実施時に画像処理の能力を超える照明環境が発生しない様作業計画・スケジュールを設計した。
- 安全なタスク実行を担保するため、マーカ検出失敗や計測結果に疑義が認められる場合には追尾を停止し、アームを安全位置に待避させる機能を設けた。

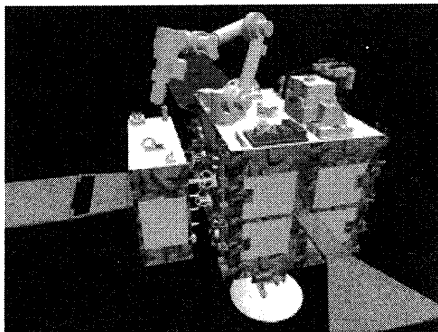


図.7 捕獲実験概要

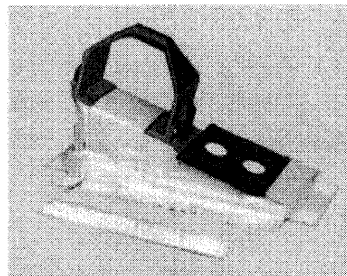


図.8 ターゲット上のハンドルとマーカ

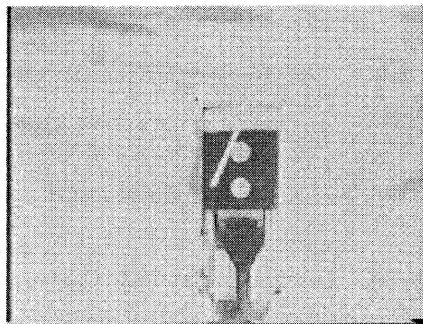


図.9 手先カメラへの直接太陽光の入射

4. 今後の展望

①宇宙ステーション補給機

国際宇宙ステーションへの物資補給のために、日本の H-IIA ロケットに搭載・打ち上げられ、宇宙ステーションへランデブし結合する宇宙ステーション補給機 (HTV) を 2007 年頃の試験機飛行を目標に NASDA で開発中である (図.10)。

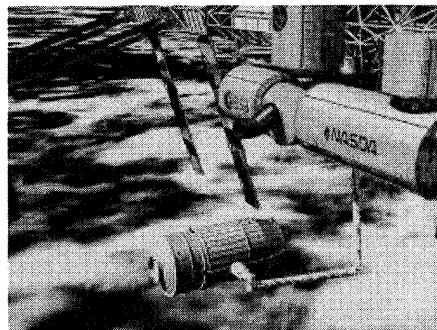
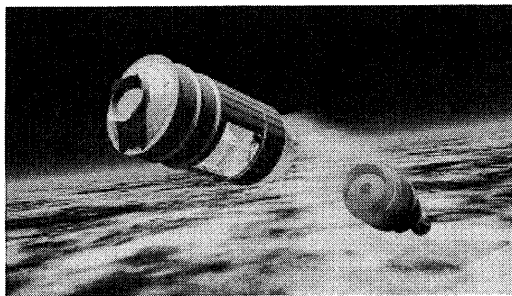


図.10 宇宙ステーション補給機

HTVのランデブは ETS-VIIで開発実証された技術を発展させ、GPS 受信機とレーザレーダを用いて行われる[6]。

②非協力ターゲットへの接近・捕獲

より高度な技術課題への取り組みとして、故障衛星の修理や曳航、軌道上に廃棄されているロケット・人工衛星の残滓の処理等も視野に入れ、特定の視覚マーカを持たずに軌道上で運動を行っているターゲットの位置、姿勢を検出し、接近捕獲する研究が活発に行われて始めている（例えば[7],[8]）。凸凹で鏡面反射する衛星表面、時々刻々変化する太陽方向という条件の中で安定的に特徴点を発見し、追尾する方法が最大の技術課題であると考えられる。

参考文献

- [1] Oda, M.: Mission design of an in-orbit satellite inspection – Feasibility of the in-orbit satellite servicing -, AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 11-14 February 2001, AAS01-224.
- [2] Orbital Express Space Operations Architecture / ASTRO (by DARPA), <http://www.darpa.mil/tto/>
- [3] 小田光茂：ETS-VIIのミッション、日本ロボット学会誌17巻8号(1999)、pp1055-1061.
- [4] 河野 功 他：ETS-VIIランデブ・ドッキング実験の結果、日本航空宇宙学会論文集、50(2002)、pp95-102.
- [5] Inaba, N. and Oda, M.: Automatic Satellite Capture by a Space Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation 22-28. April. 2000, R-0487.
- [6] HTV : http://www.nasda.go.jp/projects/rockets/htv/index_j.html
- [7] Abraham, M., et al: Robust 3D Vision for Autonomous Space Robotic Operations, Proc. Of 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, Quebec, Canada, June 18-22,2001.
- [8] 河野 功、他：非協力ターゲット接近用画像センサの研究、第46回宇宙科学技術連合講演会、2002年10月、2D8.