地球周回軌道における衛星群を 保守する宇宙ロボット

Space Robot Maintaining Satellite Constellation in Earth Orbit

1 はじめに

21世紀には、グローバルで高品質の移動通信や、高分解能で絶え間ない地球観測などのため、低地球軌道で多数の衛星を群にしてネットワーク利用するシステムが期待されている。この場合、宇宙のごみ（宇宙デブリ）を増やすことなく、かつ、頑健なインフラストラクチャとすることが望まれる。その解決策の一つとして、ロボットにより衛星群を保守したり、不要となった衛星を投棄処理して軌道を保全する構造を有する「宇宙環境保全型衛星システム」が考えられる。本稿ではこのようなシステムを実現するための技術について展望する。

2 地球周回軌道の衛星群と宇宙デブリ

低地球軌道（LEO：Low Earth Orbit）の通信衛星は、通信遅れが少ないこと、通信パワーの減衰が少ないため違和感のない音声通信、移動性や携帯性に優れた通信を提供するものとして注目されている。IT革命が進むと、地上と宇宙に相補的な高品質の情報通信スーパーハイウエーが求められることは疑いない。また、リモートセンシング分野においても、低高度からのネットワーク型地球観測は高分解能と高頻度観測をもたらすため、資源探査から環境モニタリングへと利用範囲を広げ、将来は生活情報などのパーソナルな利用まで進むことが予測される。

このようにLEOは21世紀の情報インフラストラクチャの場として期待されるが、エリアを広くカバーするため、衛星を分散配置して用いることになる。Internet-in-the-Skyを旗印に、光ファイバと同様なブロードバンド通信を地球規模で実現すべく計画中のTeledesicでは12の軌道面にそれぞれ24機の衛星を配置した288機のコンステレーション（星座）となる⁽¹⁾。しかし、LEOではデブリが急増しており、衝突頻度の増大や衝突によるデブリの再生産が懸念されている。これまでの宇宙活動で打ち上げられた10cm以上の物体は23 000個にのぼり、現在も7 500個以上が軌道上に存在している。このうち、わずか6%が運用されている衛星で、50%は使用済みの衛星、廃棄物、ロケットの残骸があり、残りの44%は軌道上での分裂・破砕により生じたも

町田 和雄
Kazuo MACHIDA

- ◎1945年8月生まれ
1970年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了、同年電子技術総合研究所
- ◎研究・専門テーマは宇宙ロボティクス、宇宙工学
- ◎電子技術総合研究所主任研究官
(〒305-8568 つくば市梅園1-1-4/
E-mail: machida@etl.go.jp)

のと言われている⁽²⁾。デブリの速度は数km/sで細片でも衛星に損傷を与える。デブリによる事故やニアミスは既に数件報告されており、宇宙環境は保護すべき段階にきている⁽³⁾。

将来においては、衛星群を用いたインフラは宇宙環境保護と両立させ構築、運用することが望まれる。その解決策の一つとして、故障した衛星を捕まえ、保守、延命したり、使用不能となった衛星を軌道から排除し貴重な軌道リソースを確保する機能を有した、宇宙環境保全型衛星システム⁽⁴⁾が考えられる(図1参照)。このようなシステムを実現するには、ロボット化された軌道保全作業機による衛星群の捕獲、診断、保守、軌道外投棄などの技術が必要となる。

3 故障した衛星を捕まえる

故障した衛星の捕獲に初めて成功したのは1984年のSolar Max 救出ミッションである。姿勢制御系が故障した太陽活動観測衛星 Solar Maxをシャトルのアームで捕まえ、クルーが船外作業で修理し、再使用した画期的なできごとである。以来、静止軌道の投入に失敗し漂流していた衛星Westar-6, Palapa B-2, Intelsat-IVなどの捕獲がクルーにより行われ、再使用に成功している。Solar Maxは240M\$, 救出ミッション費用は54M\$といわれる。これらの成功は軌道上サービスが将来ビジネスになる可能性を示唆している。

故障した衛星の無人での捕獲実績はない。このミッションは訓練したクルーにとっても容易でないことが上記の報告からわかる。シナリオどおりいかず、戦略を練り直してようやく成功している。このような問題解決能力をロボットに求めるには無理がある。まず、ロボットで捕まえやすい衛星構造とすることが必要である。特に把持フィクスチャやマークは、宇宙環境保全型衛星では前提となる。さらに、非常用の電源、通信系、姿勢保持系などを加えたレスキューパッケージを取り付け、本体が故障しても捕獲協力性を保つアイディアも通信総合研究所(CRL)を中心に検討されている。

ロボットにより衛星を捕獲する場合、ランデブで接近し、フライアラウンドにより衛星の回りを飛びながら観察して故障状況の把握と捕獲計画を立てる。次に最終接近し、アームによりフィクスチャをトラッキングし把持する。その後、作業機のリカバリ制御と衛星ハンドリングを行う。把持に際しては衛星の回転運動と同期をとることが必要となる場合もある。したがって、衛星捕獲には航法誘導制御、ロボット運動制御、視覚システム、捕捉機構などの高度で総合的な技術が求められる。

ランデブについては技術試験衛星(ETS-VII)でドッキングに至るまでの技術実証が行われている⁽⁵⁾。フライアラウンドでは最適観測計画、実時間画像処理、LOS(line of sight)角制御⁽⁶⁾など宇宙機間の相対運動制御が課題となる。

衛星把持は最もクリティカルな作業である。この際、衛

図1 衛星コンステレーションと軌道保全作業機

星の姿勢安定方式と安定度が問題となる。また、捕捉機構とフィクスチャの工夫は衛星把持の成否を決定する大きなファクタとなる。

正常な3軸安定型衛星に対しては、シャトルのアームで十分な実績がある。このエンドエフェクタはスネア(罠)型になっている。衛星に取り付けた棒状の把持フィクスチャをエンドエフェクタの直径20cmの円筒内にアライメント誤差±15度以内で入れることができれば、罠のケーブルにより絞り込まれ、捕捉される。シャトルアームによる捕獲実績はこの捕捉機構の工夫に負うところが大きい。このアームはクルーにより操縦されているが、把持フィクスチャのマークに対する視覚フィードバック制御により無人化はさしたる困難はないであろう。ETS-VIIでもドッキング機構で囲われた状態ではあるが、ロボットによる捕獲実験が行われている。

姿勢制御機能を喪失したタンブリングしている場合は、その運動の複雑さと、太陽電池パドルなどの突起が障害となり、捕獲は難しくなる。ただし、スラスタが暴走するなどの故障でない限りその運動は緩やかであることや、時間が経つと主な運動成分は最大慣性軸回りになることが期待できる。まずこれらの運動を画像情報から同定する必要がある。対象が破損によりモデルと異なる場合には難しい課題を提起する。次に、運動を把持可能なレンジまで減衰させることが必要である。突く⁽⁷⁾、クッション付きハンドを押しつける⁽⁸⁾などさまざまなアイディアが提案されている。把持可能な運動のレンジは、視覚フィードバックによる腕・作業機の追従制御性能に主として依存する。地上でのエアパッドによる無重力模擬実験では約5 deg/sの回転に対して自律捕捉の実績がある(図2)。このロボットでは、最終接近後、姿勢制御系はオフとし、フィクスチャの3点マークに対するハンドアイの視覚トラッキングで腕制御を

図2 飛行ロボットによる衛星の自律捕捉
(無重力模擬テストベッドでの実験)

図4 インタラクティブな遠隔診断システム

行い、腕の反作用による本体の揺動はレートジャイロにより腕先端の目標値を補償する方法を用い追従性能を高めている⁽⁹⁾。大きな回転運動に対しては、作業機やアーム先端の運動を衛星の回転運動に同期させ、相対運動を相殺して捕捉する方法も研究されている。

スピン安定型では姿勢制御系が正常でも捕獲は難しい。WestarとPalapaではクルーが推進装置を背負い、衛星に飛行接近し、Stingerと呼ばれる2mの捕捉工具をスピン軸のアポジモータのノズルに差込むことを試み、数度の失敗の後、捕まえた。Intelsat IVではシャトルアーム先端に乗ったクルーが捕捉棒を用いて試みたが、接触により回転と並進運動が誘起され失敗し、最終的にはクルーが3人がかりで手をつかんでいる。スピン運動している衛星の捕獲をロボットで行うには、スピン軸に対するアライメント誤差を許容する捕捉工具、把持直前まで接触することなく工具をスピン軸に合わせ挿入する制御、歳差運動を伴う場合はアームの動きを歳差運動に同期させる制御などが重要となる。

衛星を把持すると運動量交換により衝撃力が加わるので、速度減衰制御などこれを和らげる制御が必要となるが、現状技術の応用で対応可能と考えられる。

図3 衛星の音響診断

4 衛星群の保守

4-1 診断ロボット

衛星群を信頼性の高いインフラストラクチャとして用いるには、軌道上での定期診断とそれに基づく保守が望まれる。また、診断は故障した場合の箇所の特定、状態の把握、原因の推定や修理後の確認に重要な役割を果たす。

衛星の診断には、可視画像、三次元形状、熱画像、機械インピーダンス、音響特性などの情報が役立つ。また、アウトガス分析や、機器内部の内視拡大画像も有用であろう。図3にAE信号による衛星診断を模式的に示す。ロボットアームを用いて聴診器のようにプローブをあてがい、回転機構などの劣化や、機器交換での固定の確認などのメカニカルな要素の診断に有効と考えられる⁽¹⁰⁾。宇宙環境でロボットがハンドリングできるこれらの診断センサの開発が望まれる。

衛星の診断には高度な知識と経験が必要なため、図4に示すように、軌道上のロボットと地上の専門家と協調して行うのが適当である。診断の確度を上げるには原理の異なった数種類のセンサで多角的に現象を調べることが有効である⁽¹¹⁾。地上の専門家はロボットを使役しながら多重センサの情報を融合し、推論の確度を上げていく。ロボットを用いた遠隔診断では、センサを任意にポインティング、スキャン、操作したり、作用を与えながら探索して調べることができ、静的な外観検査より詳細で確度の高い診断情報が得られる。また、一般にトラブルシュートでは、コンフィギュレーション変更が原因分離に決定的役割を果たすことが経験されているが、ロボットを用いればこのようなことも可能となる。効率的な診断のためには推論機構や診断プランニングに人工知能的アプローチが望まれる。

診断ロボットの技術は、衛星のみでなく宇宙ステーションや月面基地などの高価な基幹施設の知的監視や、軌道上での故障プロセスの解明による機器開発の高信頼性化につながる技術であり、今後の宇宙ロボットの有望な利用分野と考えられる。この分野の研究は着手されたばかりであるが、ロボットにより「物事を知る」という奥深いテーマを含んでおり、今後の発展が期待される。

図5 ロボットによる軌道上保守対応の小型衛星

4-1 保守ロボット

衛星の故障は予想外の事態であり、故障部位をロボットで直すことは一般に難しい。いくつかのモジュールに分け、その補用品を用意し、交換するのが現実的である。また、衛星の寿命決定要因である推進剤や電池などはモジュール化し、交換により寿命を延ばすことが望まれる。宇宙環境保全型衛星では、交換により故障やリソース補給に対応できるようにモジュール化する。図5にバス、ミッション、ソーラーパネル、アンテナの各モジュールからなる小型衛星の例を示す⁽¹²⁾。ミッションモジュールはパソコンの拡張と同じように、ミッション機器、電池、推進剤などの交換ユニットを主構体であるバスに突きさして構成する。折畳み式の太陽電池パネルやアンテナもバスモジュールに取り付け、展開する。各モジュールにはロボットによる作業が容易なよう、取っ手、マーク、着脱機構などが取り付けられている。

ロボットによる軌道上保守はETS-VIIで装置交換や、多重センサハンドを用いた部品レベルの精密作業実験⁽¹³⁾が行われている。実際の衛星の保守に応用するには、長尺で柔軟な太陽電池パネルやアンテナの取付け・展開、立体形状の衛星への熱ブランケットの装着などのスキルの課題も残されている。また、運用コストの面からは自動化・自律化が重要となる。一方、作業の確実さのため、いくつかの単純なサブタスクの積み重ねで作業が完結するよう衛星構造を含めて工夫することもたいせつである。産業用ロボットで培われた自動化の知恵を取り入れるべきと考える。

衛星の保守と診断は不可分であり、保守ロボット、診断ロボットおよびその周辺ツールを統合したシステムとすることが望まれる。図6にモジュール化小型衛星を対象とした衛星診断・保守プラットフォームの研究モデルの例を示す。ここでは、ロボットが外科手術のようにいくつかの工具とセンサデバイスを使いながら、点検、診断、モデリン

図6 衛星診断・保守プラットフォーム

グ、保守・交換作業、試験などを行うための研究をしている。このようなシステムを発展させると宇宙衛星工場ともいえるべきものとなる。これは将来の太陽発電衛星の建設などにも応用される技術である。

4-2 衛星の投棄

修理不能や寿命が尽きた衛星は、他の宇宙活動に悪影響を与えないよう軌道外に投棄する。軌道高度により廃棄用軌道のガイドラインが策定されている⁽³⁾。低高度衛星では、軌道高度を下げて大気抵抗を受けやすくして早期落下させるデオービットか、高度1700~19900kmの廃棄用軌道へのリオービットとなる。一般に故障した衛星は自力で軌道変換できないため、ロボットによる前処理と作業機によるえい航が必要となる。

軌道変換には多くの推進剤を要するが、ロボットを用いて節約する方法も提案されている。作業機と故障衛星をアームで連結し、スラスタでその中心回りに並進と回転運動を同時に励起し、適切なタイミングで切り放すことにより衛星を軌道外へ投棄するタンブル・オービット・トランスファでは、推進剤が従来に比べ半分以下となることが期待され、研究されている⁽¹⁴⁾。

5 宇宙環境保全システム： 揺りかごから墓場まで

宇宙環境保全には、作業機を有事に打ち上げる方法と、軌道に常駐させる方法が考えられる。前者では不具合状況が事前にわかるので、レスキューの確実性が増す反面、レスキューまでに要する期間や単価の問題がある。後者は、既定の保守作業にしか対応できないことや作業機の寿命の問題があるが、迅速性や1機の作業機で多数の衛星の保守に対応できる利点がある。同一軌道面の衛星数が多くなるほど軌道常駐型が有利となる。

宇宙機器のマイクロ化技術はアメリカを中心に急速に進

図7 衛星のライフサイクルをサポートする宇宙環境保全型システムの概念

んでおり、将来のネットワーク型衛星は原理的に開口径が必要なソーラーパネル、アンテナ以外はドラスティックに小型化されるであろう。このような衛星群は分解して作業機と一緒に打ち上げ、軌道上でロボットで組み立てることにより輸送費を節約できる。軌道上で組立つ衛星は保守も容易となる。また、分解収納できれば、多数の衛星をまとめて軌道外投棄することができる。同一設計の多数の小型衛星の組立、保守、収納は、大部分を定形・繰返し作業とすることができ、ロボットにとって最も得意とするところといえる。このような観点から提案された宇宙環境保全システムの概念を図7に示す⁽¹²⁾。多数の衛星キットとスペアを軌道保全作業機に収納し、打ち上げ、軌道上で組み立て、検査し、軌道に配置する。その後、定期保守や燃料補給などを行い、寿命が尽きた衛星群を回収し軌道外に投棄する。すなわち、軌道保全作業機は同一軌道面に配置された多数の衛星の「揺りかごから墓場まで」を担当する。

6 おわりに

宇宙ロボットの地球周回軌道において期待されるミッションとして、宇宙環境保全型システムをとりあげ、実現のための技術について展望した。この概念自体が新しく、技術的、経済的な成立性については今後の研究を待たなければならないが、宇宙の環境保護をどの程度重視するか国際的コンセンサスが大きなファクタとなる。また、地上産業におけるリサイクルシステムがそうであるように、使い捨て型に対抗しうる低コスト化が実現の鍵となる。

ロボットを用いた軌道保全技術は、宇宙情報ネットワークと宇宙環境保護を両立させられるばかりでなく、宇宙開

発自体の構造を使い捨て型からメンテナンス・リサイクル型へ向かわせる基盤的技術になる可能性があり、その発展が期待される。

(原稿受付 2000年9月7日)

● 文 献 ●

- (1) <http://www.teledesic.com/>
- (2) <http://www.esoc.esa.de/external/mso/debris.html>
- (3) 宇宙開発事業団、スペースデブリ発生防止標準解説書、CRT-98004、(1998)。
- (4) CSPジャパン、軌道上サービス試験機概念検討報告書(平成8年度郵政省委託調査)、(1997)。
- (5) 河野 功・李野正明、ETS-VIIランデブ・ドッキング実験、計測と制御、38-11 (1999)、673-677。
- (6) 山田克彦・吉河章二・吉田憲正・小山 浩、宇宙機間の相対運動の制御、計測自動制御学会論文集、30-10 (1994)、1225-1233。
- (7) 吉河章二・山田克彦、インパルスの繰り返し入力による故障衛星の角運動量制御、第43回宇宙科学技術連合講演会、(1999)。
- (8) 松永三郎・神澤拓也・狼 嘉彰、接触・押し動作を利用した非協力衛星の角運動量減衰制御、日本航空宇宙学会論文集、47-550 (1999)、433-441。
- (9) Machida, K.ほか、Sensor-based Proximity Operation of an Astronaut Reference Flying Robot, *Advanced Robotics*, 9-6 (1995)、653-673。
- (10) 川田正国・岩田敏彰・岩崎 晃・町田和雄、小型衛星駆動部のAE信号の検出、第43回宇宙科学技術連合講演会、99-1A10 (1999)。
- (11) Iwata, T. and Machida, K., Diagnosis of Small Satellites Using Multiple Sensors and a Robot, *2000 AIAA GNC Conf.* A00-37177 (2000)。
- (12) 町田和雄・戸田義継・岩田敏彰・川島教嗣、小型群衛星のための軌道上保全作業システムの研究、第43回宇宙科学技術連合講演会、99-1A9 (1999)。
- (13) 町田和雄、高機能ロボットハンドシステムの宇宙実験、日本ロボット学会誌、17-8 (1999)、1072-1075。
- (14) Sasaki, T. and Yasaka, T., Dynamic Behavior of Tumble Orbit Transfer, 7th Int. Space Conference of Pacific-Basin Societies, *Advances in the Astronautical Sciences*, 96 (1997)。