宇宙用ロボット*

内山 隆**

Space Robot / Takashi UCHIYAMA

Key words: space robot, telerobotics, space manipulator, teleoperation, supervisory control

1. はじめに

近い将来の人類の宇宙活動はどのように展開していくであろうか。現在実用化されている、気象・通信・放送などの衛星のほかに、長期の宇宙実験を行う宇宙ステーション、観測などの各種プラットフォーム、さらには軌道間輸送機、宇宙工場など半恒久的な大型施設、いわゆる「宇宙インフラストラクチャ」の整備が進むであろう。さらに、これらをベースとして、月・惑星の探査や恒久的基地の構想も検討されている。

このような宇宙活動の進展に伴って、軌道上や惑星上での組立・補給・保全などの各種の作業が増大することになる。しかし、これらの作業をすべて宇宙飛行士が遂行するのは、安全性・作業時間・コストなどの点で極めて困難である。そこで、危険で制約の多い有人作業を代替できる自律性の高い宇宙用ロボットの開発が期待されている。

現在、宇宙用ロボットとして実用化されているものは、ご存知の通り米国のスペースシャトルに搭載されたリモートマニピュレータが唯一の例である。このシャトルマニピュレータは1984年の太陽観測衛星(Solar Maximum)の捕獲・修理から、昨年(1990年)の長期間宇宙曝露装置(LDEF)の回収など、数多くのミッションでその有用性を実証している。

宇宙用ロボットの次の活躍の場は、1990年代後半から建設が開始される予定の国際宇宙ステーションとなろう。現在、アメリカ、カナダ、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)、日本などで、船外や船内の活動を支援する多様な宇宙用ロボットの開発が計画されている。ま

た、各種プラットフォーム・宇宙工場・宇宙探査などにも宇宙用ロボットの活用が期待されている。

このような背景から、1990年代は21世紀の宇宙インフラストラクチャの構築や運用において、基盤技術の一つに位置づけられる宇宙用ロボットの技術確立とその活躍の場を拡大する極めて重要な時代と言える。さらに、この次世代宇宙用ロボットは宇宙空間を自由飛行し、はるかな遠隔地から制御して作業を実行し、固定する足場が無いことや通信遅れなど、地上の産業用ロボットとは異なる多くの課題を有している。宇宙分野・ロボット分野の双方の研究者にとって魅力あるテーマであり、耐環境技術も含めた体系的な研究開発が不可欠となる。

ここでは、次世代の宇宙用ロボットの各国における開発計画、技術課題と展望について述べる。

2. なぜ宇宙ロボットか

宇宙活動の進展に伴い、宇宙用ロボットの実用化が強く望まれている背景として、次の点が挙げられる。

(1) 衛星から宇宙機へ

姿勢制御の燃料が無くなると寿命が尽きるこれまでの使い捨て型の衛星から、燃料を補給して再使用するプラットフォーム型の宇宙機の開発が計画されている。このため、燃料補給・部品交換など維持・補修の軌道上作業が増大する。

(2) 宇宙活動の場の拡大

国際宇宙ステーションは低軌道(高度約500 km)に建設されるが、これをベースとして共軌道プラットフォームや有人支援プラットフォームなどへの展開が計画されている。さらに、静止軌道(高度約36 000 km)のプラットフォームや月・惑星での活動も具体的な検討が進められている。このため、大型構造物を低

* 原稿受付 平成3年4月3日

** 正会員 (株)富士通研究所 (川崎市中原区上小田中1015)

図1 シャトルマニピュレータの構成（米国：NASA）

軌道で組み立てて静止軌道に運搬したり、軌道間での物資の移送、月・惑星への中継基地としての利用など多様な軌道上サービスが必要となる。

（3）有人活動の制約

将来、宇宙活動の質的および量的拡大が予想されるが、特に船外作業などでは作業時間の制約、安全性、活動範囲の制限などにより、対応可能な軌道上作業の範囲はかなり限られたものとなる。また船内作業においても、生理的影響や定期的交代を考慮する必要がある。このため、時間や場所に制約されず作業を遂行できる自律性の高い宇宙用ロボットが望まれる。

（4）宇宙環境利用

現在、宇宙ステーションでの実施が計画されている、材料製造・科学観測・生命科学などの宇宙環境利用の実験も、将来は恒久的な施設である宇宙工場や宇宙天文台で実用化が図られることになる。これには、加工、材料・製造品の輸送、液体ヘリウムの充てんなど運用コストの低減が重要なファクタとなり、ロボット化や自動化が求められることになる。

（5）国際的な貢献

今日、地上の産業用ロボットや自動化技術は、我が国の最も得意とする技術分野であり、これを宇宙分野に展開していくことで、国際的な宇宙開発に貢献できる可能性は大きい。

3. 宇宙用ロボットの発展形態

3.1 シャトル・リモートマニピュレータ（SRMS）

スペースシャトルに搭載されたマニピュレータは、

図2 シャトルマニピュレータと宇宙飛行士によるトラス組立

オペレータが直視できる状況でマニピュレータと接続したハンドコントローラを用いて操縦する遠隔操作を基本としたロボットである。図1にSRMSの構成を示す。また、このマニピュレータの長さは約15mと大型で微細な作業には人間の支援が必要であり、図2に協調してトラスを組み立てる作業を試行した例を示す。これは、人間がエンドエフェクタとして働いている例であるが、安全性という観点からは好ましいものとは言えないであろう。

3.2 宇宙用ロボットの世代

遠隔操作を基本としたリモートマニピュレータを第1世代とすると、空間移動を特徴的な運用モードとす

表1 宇宙用ロボットの発展の形態

		第1世代	第2世代	第3世代
ロボットの形態		遠隔制御ロボット	部分自律ロボット	高度自律ロボット
主要技術		・マスタスレーブ制御 ・プログラム制御	・スーパバイザリ制御 ・センサフィードバック	・AI技術 ・センサフュージョン
作業環境		・宇宙ステーション上	・低軌道～静止軌道上 ・与圧モジュール内	・月/惑星上
作業内容		・ORU 交換 ・宇宙機のパーシング ・物資の移送	・宇宙機の組立 ・保守, 点検, 修理 ・燃料補給 ・宇宙実験自動化	・サンプルリターン ・基地建设
計画・応用	固定型	・JEMRMS (NASDA) ・HERA (ESA) ・FTS (NASA)	・テレサイエンスロボット ・宇宙工場	
	トラス移動型	・MSS (Canada)	・宇宙プラットフォーム用ロボット	
	空間移動型		・OSV (NASDA)	・月面探査ロボット ・惑星探査ロボット

JEMRMS : Japanese Experiment Module Remote Manipulator System, HERA : Hermes Robot Arm, FTS : Flight Telerobotic Servicer, MSS : Mobile Servicing System, OSV : Orbital Servicing Vehicle

る10年後の実用を目指した宇宙用ロボットは、第2世代に位置づけられる。この第2世代のロボットでは、自律制御と遠隔制御を融合させた部分自律化、すなわちテレロボティクス概念が骨格の技術となる。さらに、月や惑星での活動をねらいとした第3世代ロボットでは、人間による支援が困難なことから高度な自律性が求められる。表1に、各世代のロボットの主要技術、作業内容、計画例などをまとめて示す。

4. 宇宙用ロボットの開発計画

以下に、具体的な検討が進められている宇宙用ロボットの例について示す。

(1) FTS (Flight Telerobotic Servicer : NASA)

FTSはアメリカが宇宙ステーションなどの組立への応用をねらいとして開発を進めている宇宙用ロボットで、SRMSの先端に取り付けられて運用される。2本の7自由度の腕と固着用の脚を持ち、高さが約2mのロボットで、図3にその外形を示す。1989年6月よりマーチン・マリエッタ社により詳細設計が進められている。シャトルを利用して、1993年に開発用のテストフライト (DTF-1) を実施することが計画されている。

図3 FTSの構成 (米国: NASA)

(2) MSS (Mobile Servicing System : カナダ)

カナダはSRMSを開発した実績を有しており、これを発展させたMSSの開発を進めている。約17mのアームを持ち国際宇宙ステーションのトラス上を移動できるMSC (Mobile Servicing Center) と、このアームの先端に取り付けられる器用な2本の腕を持つSPDM (Special Purpose Dexterous Manipulator) より構成される。スパー社が開発を担当しており、図4にMSSの構成を示す。

(3) MTF (Man Tended Free Flyer : ESA)

ヨーロッパの13か国で構成されたヨーロッパ宇宙機関 (ESA) では、国際宇宙ステーション計画の一環として、通常は無人で運用され90

日ごとに人が訪れて補給・回収を行う実験施設の開発が計画されている。無人で実験装置を運用するため、図5に示すようなガイドレール上を移動する船内作業ロボットの活用が計画されている。ドルニエ社が検討を進めている。

(4) HERA (Hermes Robot Arm : ESA)

ESAでは、ヨーロッパ版スペースシャトル (Hermes) とこれに搭載するマニピュレータであるHERAの開発を計画しており、全長11.2mで20tの可搬能力を持つ。前述のMTFFにドッキングして

図4 MSSの構成(カナダ)

図5 MTFFの概念(ESA)

図6 HERAの計画(ESA)

機器交換などのサービスを行う。フォッカー社(オランダ)とマトラ社(フランス)が開発を担当し、1997年のフライトモデルの完成を目指している。図6に構成を示す。

(5) JEMRMS (Japanese Experiment Module Remote Manipulator System: 宇宙開発事業団(NASDA))

日本も国際宇宙ステーション計画に参加し、これに結合される日本実験モジュール(JEM)の開発に着

図7 JEMの構成(日本:NASDA)

図8 軌道上作業機(OSV)の概念(日本:NASDA)

手した。このJEMでの実験装置や補給部の交換などの作業を行うマニピュレータ(JEMRMS)の開発が進められている。全長約10mの親アームと約2mの子アームから構成される。図7に構成を示す。

(6) OSV (Orbital Servicing Vehicle: 宇宙開発事業団)

自律性の向上をねらいとした空間移動型の第2世代宇宙用ロボットとして、軌道上作業機(OSV)の概念検討が進められており、これを図8に示す。また、このOSVに備えた技術開発を行うことを目的として、技術試験衛星を用いたフライトロボット実験の構想も検討されている。

5. 宇宙用ロボットのシステム概念

次世代宇宙用ロボットのシステム構成を考える場合に、MITのT. Sheridan教授の提唱したスーパーバイザリコントロールの概念が参考となる。図9にこれを拡張した宇宙用ロボットの機能構成の案を示す。

これは、オペレータ側のLocal loopと、実行側の

HRI: Human Robot Interface

図9 次世代宇宙用ロボットの機能構成

Remote loopから構成され、通信システムにより結合される。Local loopでは、プランニングシステム、シミュレーションシステム、ワールドモデル、ヒューマン・ロボットインタフェース(HRI)などがその構成要素となる。Remote loopでは、ロボットアーム、センサ、協調制御などが構成要素である。通信遅れや環境の変化などの監視には、HRIを介してシミュレーションとオペレータとの予測ループを形成することができ、実行側(軌道上)ではロボットとセンサとのフィードバックループを形成することで適応的に動作することが可能となる。

第2世代の部分自律制御では、軌道上でのセンサ情報処理の高度化を図ることで、Remote loopの自律性を次第に高めていくことが重要な戦略となる。これは、時間遅れなどの制約に対する根本的な対応策と言える。

6. 宇宙用ロボットの開発課題

宇宙ロボットは、従来の地上の産業用ロボットと比較すると使う環境や運用法において大きく異なり、いくつかの技術課題を有している。以下に、システム概念の具体化に必要な特徴的な要素技術と、筆者のグループにおける研究開発例について述べる。

(1) 遠隔制御

次世代の宇宙ロボットでは、宇宙空間を無人で自由に航行し、遠く離れた地上や宇宙ステーションからの指令によりミッションを遂行することが求められる。このため遠隔地のオペレータにロボットが作業する環境の情報(視覚・力覚など)をリアルに呈示する技術や使いやすいマスタ操作器などの高度なヒューマン・ロボットインタフェース機能が重要となる。また、自律機能と遠隔操作をいかに融合させるかも重要な課題である。図10に視覚と力感覚がフィードバックされ

るマスタスレーブロボットの操作例を示す。

(2) 自由空間での動的制御

宇宙空間に浮遊するロボットは、地上と異なり固定できる足場が存在しない。このため手や足を動かすとその反作用で本体が反対方向に運動する。また、物体を把持すると系の動特性が変化し同一の移動指令でも軌跡は異なったものとなる。このため、地上と同じ制御では対象物のピックアップ・プレイスが不可能である。これには、系の運動量と角運動量の保存を考慮したパスの生成や、衛星本体への干渉を出来るだけ少なくする最適化パスの生成が必要となる。図

11に本体が回転しながらも手先を直線的に移動して対象物を捕捉するロボットの動作シミュレーションの例を示す。

(3) 多腕協調制御

宇宙ロボットの主要な役割に、従来は有人で行っていた船外作業の代替がある。宇宙環境では、地上の工場のように各種の周辺機器を用意したり環境を整備することが困難なため、人間に近い柔軟で高機能なロ

図10 バイラテラル・マスタスレーブロボットの操作例

図11 動的制御による浮遊物体の捕捉

図12 多腕協調制御のシミュレーション例

ロボットが求められる。このため、対象物へ固着して姿勢を安定させる脚や作業用の両手など、多腕を統合した協調制御が必要となる。図12に2本の脚でトラスに本体を固定し、2本の腕でビームを組み付ける協調作業のシミュレーションの例を示す。

(4) 通信の時間遅れ

ロボットと地上または宇宙ステーション間との通信は、静止軌道上のデータ中継衛星を経由することになり、最低でも $0.5 \times n$ 秒 (n は中継の回数) の時間遅れが生ずる。例えば宇宙ステーションの場合、地上での中継も必要なことから、4秒以上の遅れが予想される。さらに火星の場合には、最悪で40分の通信遅れが生ずる。このような場合には、リアルタイムのテレオペレーションは極めて困難となる。これに対処する本質的な方策は、軌道上で対象物の3次元計測（視覚・力覚など）を行い、センサフィードバックによる自律制御を実現していくことであろう。

(5) 地上試験技術

宇宙の環境を地上で再現することは極めて困難である。特に、宇宙用ロボットに求められる微小重力下での空間的運動を検証することは、大きな課題となっている。これには、機能を限定した検証や、評価目的に応じたシミュレーションを組み合わせることで対処することとなる。

図13に、一定張力に制御されたワイヤでアームをつり、重力をキャンセルして宇宙ロボットの運動を模擬する装置の開発例を示す（都立科学技術大学と共同）。この装置は、ダイレクトドライブによる6自由度の2腕を有し、ワイヤの吊り位置の制御も必要ことから、合計36自由度の制御を行っている。

(6) 耐環境性

宇宙用ロボットは、宇宙での様々な厳しい環境要因に耐えられる特性が求められる。例えば、微小重力、放射線、真空、熱サイクル（日射と日陰）、打上げの

図13 つり機構による3次元の無重力模擬実験装置

衝撃、宇宙塵との衝突などである。なお、地上の原子力用ロボットでも耐放射線性が求められるが、宇宙ロボットではこれらが複合要因として課せられる点に技術的困難さがある。

7. 展 望

今後の宇宙インフラストラクチャの構築・運用における宇宙ロボットの必要性、内外の宇宙ロボット開発の計画、宇宙ロボットの開発課題などについて概説した。宇宙環境の利用拡大を目的に、再使用を前提とした宇宙機や衛星が増加するにつれて軌道上でのサービスが質・量ともに増大することが予想される。このような環境は、ロボットを最も有効に活用でき、かつ支援技術として不可欠となる場面であろう。また、現在実施されつつある材料などの宇宙実験が、やがて宇宙工場での製造に発展した段階では、やはりコストは重要なファクタとなることが予想される。このような極限環境下の工場では、宇宙用ロボット技術が重要な役割を果たすことになるであろう。さらに、21世紀の前半では、地球にはない月の資源（例えばクリーンな核融合の燃料となる三重ヘリウム）の開発や、火星の無人探査などにも宇宙ロボット技術が期待されることになるだろう。

これまで、我が国では有人宇宙技術の蓄積が乏しいことから、得意とするロボット、半導体、コンピュータ、通信、自動化などの技術をこの分野に spin-in して、国際的な宇宙開発に貢献していくことは重要なテーマであろう。