

技術

5 ロボット技術で宇宙を拓く



西田 信一郎
NISHIDA Shin-ichiro

鳥取大学大学院工学研究科/機械宇宙工学専攻/教授
前独立行政法人 宇宙航空研究開発機構/研究開発本部未踏技術研究センター/ロボティクス研究グループ長

米国をはじめ各国で進められている宇宙開発。この作業は真空・放射線・温度変化など非常に厳しい環境下で実施されている。このような環境下でこそロボットの技術が役に立つ。宇宙ではどのようなロボット技術が使われているのかを探りたい。

活躍する宇宙ロボット

地球周回軌道上や月・惑星面などの宇宙環境は、真空、放射線、温度変化、打上ロケットからの振動など、非常に厳しい環境である。このような環境で天体や地球の観測、探査などにロボットが活躍している。また、宇宙飛行士のリスクを極力低減するため、宇宙飛行士の作業を支援・代替するロボットの研究開発も進められている。このような宇宙ロボットの技術課題は、レスキューロボットや建設ロボットなどの地上のロボットとの共通部分も多い。本稿では、宇宙ロボットのミッションや必要な要素技術につき紹介する。

● 地球周回軌道上の宇宙ロボット

米国のスペースシャトルのマニピュレータSRMS (Shuttle Remote Manipulator System)は、約40年間、スペースシャトルでの衛星放出/回収、点検、衛

星修理時の宇宙飛行士の支援などに活用された。我が国では、1997年から2年間、技術試験衛星VII型(ETS-VII)で遠隔操作や高度な制御を適用した作業実験が成功裏に実施された¹⁾。また、国際宇宙ステーションでは、SSRMS(Space Station Remote Manipulator System)や我が国が開発し2008年より稼働している日本実験モジュール「きぼう」のロボットアームJEMRMS(JEM Remote Manipulator System)(図1)が活躍している。

「きぼう」には曝露実験台があり、様々な実験機器が取り付けられ、実験が実施されている。実験装置が2012年にH-IIB 3号機により打上げられ、このとり3号によって「きぼう」へ運ばれた「有人宇宙活動支援ロボット実証実験(REX-J)」(図2)では、4本のテザー(紐)と伸展式ロボットアームを用いて移動する技術や要素の特性取得の実験などが約8カ月に亘って実



図1 「きぼう」のロボットアームJEMRMS © JAXA, NASA



図2 有人宇宙活動支援ロボット実証実験(REX-J) © JAXA



図3 米国の火星探査ロボット「キュリオシティ」 © JPL/NASA

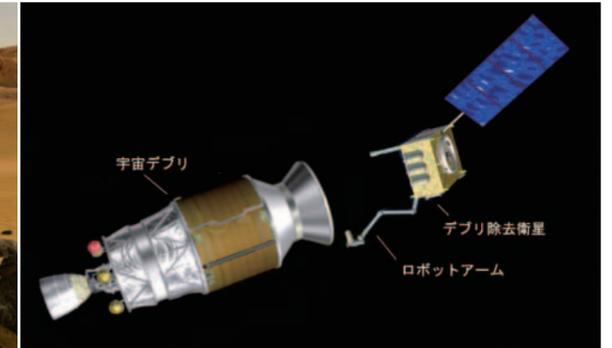


図4 宇宙ロボット衛星による宇宙デブリの除去

施され、2013年5月に予定していた全ての実験や追加の発展実験を成功裏に完了した。

● 月・惑星面上の宇宙ロボット

スピリッツ、オポチュニティという米国の火星探査ロボットが火星面を各々10km以上も走行して探査を行い、2012年には、さらに大型の探査ロボットであるキュリオシティ(図3)が火星表面に送り込まれ、活動している。無人探査や有人探査の準備段階には、天体の表面を移動して探査活動や拠点構築活動を行うロボットが必須である。

宇宙ロボットのミッション概要

宇宙ロボットの主要な適用対象として、次のミッションが挙げられる。

- a. 有人宇宙活動支援
- b. 宇宙デブリ除去
- c. 軌道上組立
- d. 月・惑星探査

以下では、これらのミッションの内容を紹介する。

● 有人宇宙活動支援

国際宇宙ステーションなどの有人宇宙機では、軌道上で実験や実験装置・宇宙機の保守や機器の交換、修理などが宇宙飛行士により行われている。事例としては、スペースシャトルによるハッブル宇宙望遠鏡の保守・修理ミッションがある。有人宇宙活動には危険を伴うため、宇宙ロボットによる宇宙飛行士の支援や代替により、このような作業を行えば、安全でコスト面でも有利となる。

● 宇宙デブリ除去

過去に打ち上げられた人工衛星やロケット上段の残滓や破片などの宇宙デブリ(宇宙ゴミ)が、地上から観測できる10cm以上のサイズのものだけでも1万6千個以上も地球周回軌道上にある。宇宙デブリは、相互の衝突により加速度的に数が増えていく状況にあるという解析結果が各宇宙機関から出てお

り、宇宙デブリとの衝突が今後の宇宙開発の脅威となっている。大型の宇宙デブリを特に混み合った軌道高度から100個程度除去するだけでも、この状況が改善すると解析されており、宇宙ロボット衛星により宇宙デブリに制動装置を取付けて減速させて大気圏再突入で燃え尽きさせるアクティブな除去の検討が進められている²⁾(図4)。宇宙デブリは予め捕獲されることを想定していない非協力的なターゲットであり、捕獲のためのマーカや取っ手を持っていない。このため、宇宙デブリの捕獲は、外形などを頼りに画像計測などで運動や姿勢を計測し、ランデブ飛行とロボットアームで実施する高度な作業であり、計測・制御の技術課題となっている。

● 軌道上組立

例えば、宇宙電波望遠鏡で深宇宙からの電波を高い信号/雑音比で捉えて高い分解能での観測を行うためには、十分に大きな反射鏡の開口径と高い鏡面精度が必要とされる。ロケットの衛星搭載部の直径の制約により、軌道上に打ち上げられる搭載物の大きさは直径4m程度までである。その概ね2倍より大きな直径の反射鏡は、展開式としても構成が難しいため、軌道上で組み立てる必要がある。このような軌道上組立の対象として、宇宙ステーションや長距離航行用の有人探査船、大型宇宙望遠鏡、宇宙電波望遠鏡、太陽光発電衛星などが検討されている。高精度の大型建造物の構築には、宇宙ロボットを用いた軌道上組立の適用が有望である³⁾。また、組立後の点検・保守には、REX-Jのようなテザーや伸展式アームを用いた移動ロボットも有望と考えられる。

● 月・惑星探査

各国宇宙機関の国際協働での探査の検討が進められており、当面の目標ゴールは火星の有人探査に設定されている。火星は、表面が地球と同様な岩石質の地球型惑星であり、大きさも地球に近いので、その構成と進化が明らかになれば、地球の進化を探る

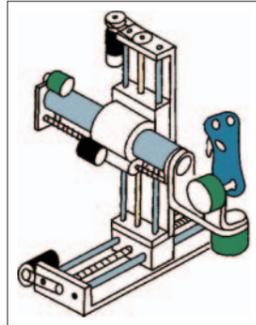


図5 直交座標型異構造マスターム

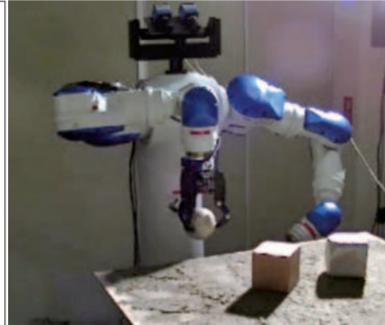


図6 部分自律化した高度遠隔操作による非定形物採取

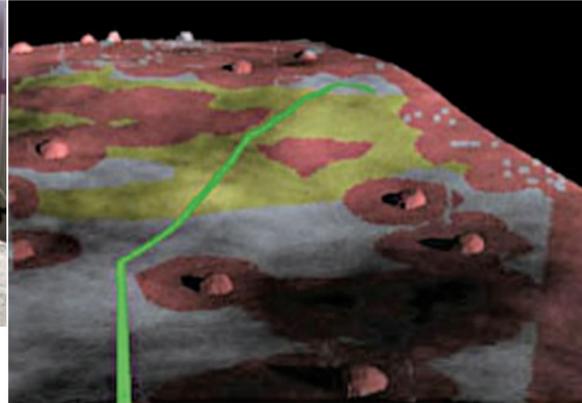


図7 ローバ経路の自動生成系の出力例 © JAXA

上でも有効な知見が得られる。また、火星に生命の痕跡が見つけられる可能性もある。このような火星探査では、水が関与した堆積岩や地層の探査が重要な対象となり、移動ロボットによる採取・分析が重要なミッションとなる。

宇宙ロボットの要素技術

● 宇宙環境対応技術

軌道上で軌道上サービスや宇宙デブリの捕獲、構造物組立などを行うロボットでは、宇宙で働く機器として以下のような共通的な課題がある⁴⁾。

- ロケット搭載のための収納性、軽量化
- 耐環境性(振動、高真空、放射線、広い温度変化)
- 力学環境の違い(無重力、月・惑星重力)
- 安全性(修理困難、不慮放出の防止)
- 地上からの遠隔操作(情報制約、通信時間)

● 遠隔操作・制御技術

マニピュレーション技術

遠隔操作や自動作業の位置ずれの吸収や宇宙デブリなどの運動物体捕獲時の衝撃吸収の方法としてロボットへの力制御の適用が有効である⁵⁾。力制御の高い応答性を得るためには、関節内部にトルクセンサを組み込み、センサとアクチュエータのコロケーションを図ることが重要である。

操作技術

宇宙ロボットの地上からの遠隔操作は、ロボットの動作軌道、サブタスクなどの自動動作コマンド列の送出行われるのが基本である。しかし、非定型作業や想定外の作業などのためにジョイスティックなどの操作器を用いたマニュアル操作モードも用意される。力帰還型のマスタスレーブ方式の研究開発も行われ、操作者の疲労軽減のため、速度指令を基本としつつ、並進3軸、姿勢3軸ごとに力帰還型マスタスレーブに切り替え可能な制御方式や異構造マスタ(図5)も開

発され、良好な操作性が確認された。また、非定型作業をサブタスク単位で部分自律・自動化する高度な遠隔操作系の研究・開発が進められている⁵⁾(図6)。月・惑星表面の走行制御は、ローバ(探査車)から一定周期で前方の月・惑星面地形計測データをダウンロードし、この情報を基に地上で詳細な月・惑星面の3次元マップを生成し、最適な動作経路を算出するいわゆるSLAM方式が基本である。ローバ経路の自動生成系の出力例を図7に示す^{6) 7)}。

作業技術

軌道上組立や宇宙ステーションでの作業では、作業の場をある程度事前にコーディネートし、ロボット作業を定型化することが可能である。一方、月・惑星探査ロボットは、ロボットアームで岩石の採取や機器の組立・設置などを行なうため、非定型作業への対応性や汎用性が求められる。このようなロボットアームには、ETS-VIIやJEMRMSで培われた機構や操作・制御技術および、その後の研究成果が有効に活用できる。特に遠隔操作や自動制御、力制御、画像フィードバック制御などの技術が有効に活用できる。

軌道上作業を着実にを行うためには、サービス対象衛星に予め捕獲用の取っ手やマーカ(図8)、機器の着脱機構などを備えておくことが望ましい。このような宇宙ロボット用インタフェースの標準化により、一つのロボット衛星で多くの衛星を効率的に軌道上サービスすることも可能となる。

有人支援ロボットでは、人間用の標準インタフェースをロボットが扱うことが求められるが、人間用の標準インタフェースは、必ずしもロボット作業には適していない。しかし、僅かな変更によりロボットにも扱いやすくなる場合が多々あり、検討が進められている。

軌道上での組立作業においては、組立途中の構造



図8 サービス対象衛星に備えておく捕獲用マーカ



図9 金属製弾性車輪 © JAXA

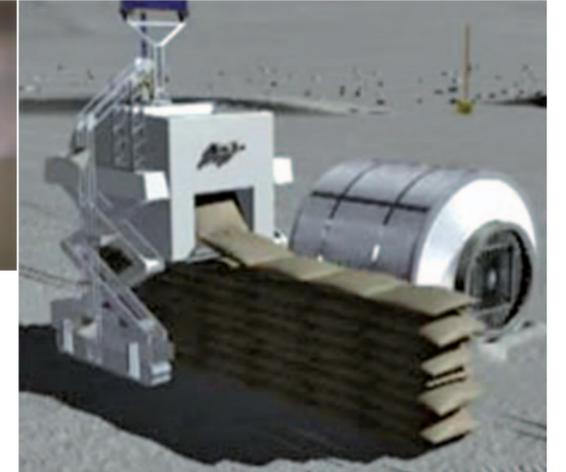


図10 土嚢壁を構築するロボット © JAXA

物上をロボットが移動して広い作業領域を確保して組立を行うことが効率的である。ロボットが構造物上を移動するためには、電源・信号をロボットに供給するためのコネクタ付き取っ手などの機能要素を組立構造物に付加し、エンドエフェクタ(ロボットアームの先端)はこれを把持しながら移動する形態が採られる。

● 移動技術

自己位置同定技術

月面では、地球周回GPS衛星電波による自己位置の割り出しは困難である。走行系のアクチュエータの回転情報に基づく自己位置同定は、レゴリス(微粒子の多い表土)上の走行では滑りによる誤差を生じるため、それだけでは十分でない。そこで、ローバから月面地形を計測し、常に地形を基準として自己位置の変化を求めることが必須である。ローバに対する地形計測のセンサとしては、レーザレンジファインダとステレオ画像センサが有望である。

走行技術

月などの天体表面は、レゴリスが数m以上積もっており、走行は容易ではない。特にレゴリスの積もった斜面の走行は、これまでの火星探査ローバで用いられている剛な車輪では最下点の高い接地面圧の箇所においてレゴリスを掘り込む状態に陥りやすく、走行不能に陥る恐れが少なくない。このようなレゴリスが積った天体表面の移動には、走行系の接地面圧を均一に低く設定し、走行機構によりレゴリスを適度に締め固めつつ走行する方式が有効であり、弾性車輪機構と無限軌道(クローラ)方式の中間的な方式であるライトクローラ機構や金属製弾性車輪の研究・開発が進められている⁸⁾(図9)。

● その他の技術

レゴリス土嚢壁構築ロボット

月・惑星面での強い放射線や着陸ロケット噴射により飛散する碎石からの防御、断熱のため、レゴリスで土嚢壁を構築するロボットの研究開発が行われ

た。このようなロボットは地上の土木作業にも有効であると考えられる⁹⁾(図10)。

投擲ロボット

月面の山岳地帯など地形の険しい所で、観測装置の設置や岩石採取を行う方式として、投擲型のロボットの研究開発が実施されている。ワイヤーの張力制御により、高い位置精度での着地が可能である¹⁰⁾。

相互技術交流

無人の宇宙ロボットは、修理が出来ないため、高い信頼性や耐環境性が確保される。そして、遠隔操作や自動で各種作業や不整地走行を着実に行うことが要求される。このため、宇宙ロボットの技術は、建設ロボット、農林業ロボット、災害対策ロボット、原子炉点検ロボット、海洋ロボットなどと多くの共通技術で構成される。従って、これらの相互技術交流が、宇宙ロボットおよび地上ロボットの発展に寄与すると考えられる。

<参考文献>

- 西田, 稲垣, 土井, 内堀:「ETS-VIIロボット実験システム」, 日本ロボット学会誌 Vol.17 No.8, pp.10-14, 1999
- 西田, 吉川:「関節力覚制御アームによる衛星捕獲」, 日本航空宇宙学会論文集 Vol.53, No.613, pp.81-88, 2005
- 西田, 吉川:「大型反射鏡の軌道上組立」, 第47回宇宙科学技術連合講演会, 3E11, 2003
- 西田, 川島:「宇宙用ロボットの搭載系技術」, 日本ロボット学会誌Vol.14 No.7, pp.13-16, 1996
- 西田, 加藤:「宇宙ロボット非定型作業の自動化」, 日本ロボット学会学術講演会, 2012
- 黒川, 西田:「月惑星ローバのLRFによる障害物検知及び地形計測」, 第52回宇宙科学技術連合講演会, 2107, 2008
- 西田, 若林:「月面ローバの操作制御システム」, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 2011
- 西田:「月・惑星探査のミッションとその手法や技術」, 日本電気学会誌Vol.131, No.14, pp.213-219, 2011
- D. Inoue, Y. Yanagihara, H. Ueno, S. Nishida: "Model Tests of Regolith Packaging mechanism", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.6, pp.1023-1030, 2012
- H. Arisumi, M. Otsuki, S. Nishida: "Launching Penetrator by Casting manipulator System", IROS2012, pp.5052-5058, 2012