解説

国際宇宙ステーションにおけるロボット技術

Robotics Technology at International Space Station

上野 浩史* *宇宙航空研究開発機構

Hiroshi Ueno* *Japan Aerospace Exploration Agency

1. 国際宇宙ステーション

1984年に米国レーガン大統領により提唱された国際宇宙ステーション (International Space Station, 以下 ISS) は, 1993年のロシアの参加等により大幅な見直しが必要なくされたが, 1998年のロシアによる基本機能モジュール (ザーリヤ) の打ち上げにより建設が開始された. ISSは地上高度が約400[km]の上空を地球一周約90分間の速度にて飛行中で, これまでに延べ80回以上のソユーズロケットおよびスペースシャトルによる物資補給やロボットアームによる組立が行われた. 現在, 若田宇宙飛行士をはじめ3名のクルーが交代で滞在し, 今夏には6名が滞在できるように拡張される. 完成予定の2010年にはサッカー場と同程度の約110[m]×74[m]の広さ, 約420[t]の質量を有する宇宙空間の巨大設備となる (図1) [2].

3度に分割して打ち上げる日本の実験モジュール (Japanese Experiment Module, JEM) “きぼう” はスペースシャトルにてすでに船内保管室および船内実験室がそれぞれ2008年3月と6月とに打ち上げられ, ロボットアームによりISSへ連結された. 3便目の船外実験プラットフォーム (Exposed Facility, EF)・船外パレット (ELM-ES) は2009年6月に打ち上げ予定である. “きぼう”にはEFへ実験装置を取り付けるための独自のロボットアームが搭載されている (図2) [1]. 以下, ISSで活躍するロボットアームおよびロボットアームによる組立技術について概説する.

2. Space Station Remote Manipulator System

ISSで最も活躍しているロボットアームはカナダアーム2 (Space Station Remote Manipulator System, SSRMS) である (図3). 2001年4月に打ち上げられたSSRMSは肘関節を対称とする全7自由度から構成される, 全長17[m]・重量1.5[t]のマニピュレータである [3]. その両端にはラッチ式エンドエフェクタ (Latching End Effector, LEE) が

Courtesy of NASA

図1 Photo of ISS after Flight 1J

図2 Japanese experiment module “Kibo”

(C) MacDonald Dettwiler

Courtesy of MDA

図3 Space station remote manipulator system

装備され, グラップルフィクスチャ (Power Data Grapple Fixture, PDGF) と呼ばれる把持台座を有する対象を把持し, スペースシャトルの質量を手で扱える. PDGFを交互につかんで, 尺取り虫のように基部を入れ替えながら歩行することもできる. SSRMSはISSの組立や修理作業

原稿受付 2009年3月27日

キーワード: Space Station, Remote Manipulator, Kibo, On-orbit Assembly

*〒305-8505 つくば市千現 2-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

において、ペイロードの移設や船外活動（Extra-Vehicular Activity, EVA）を行うクルーの足場として利用される。

SSRMS の操作は主に船内のクルーによって実施され、地上ではテレメトリおよび画像のリアルタイムによる監視を行う。クルーは操作手順に従い、事前にプログラムされた軌道に追従させる自動操作と、並進と回転とを操縦桿により指示するマニュアル操作とを切り替えながら運用する。ペイロードの結合作業等のクリティカルな運用の際には監視を強化するため 2 名のクルーが操作を実施する。SSRMS の特徴は定型的な歩行動作の際にはクルーを介さずに地上操作員が遠隔にて自動操作できることである。

3. Shuttle Remote Manipulator System

カナダアーム（Shuttle Remote Manipulator System, SRMS）はスペースシャトルの左舷に取り付けられたロボットアームであり、1981 年よりフライトされ続けている。6 自由度を有する全長 15.2 [m]・質量 410 [kg] のロボットアームであり、スペースシャトルの船内より主にマニュアルにて操作される（図 4）。

スペースシャトルの右舷には先端にレーザセンサとカメラを搭載した全長 15 [m] のセンサ付検査用延長ブーム（Orbiter Boom Sensor System, OBSS）が“コロンビア号”の事故以降の 2005 年より搭載されている。OBSS と SRMS とを連結することにより、全長 30 [m] の長大アームを軌道上にて構成し、スペースシャトルの背面タイルの亀裂破損の検査を実施している（図 5）。

Courtesy of CSA

図 4 Shuttle remote manipulator system

Courtesy of NASA

図 5 Photo of orbiter boom sensor system

4. JEM Remote Manipulator System

“きぼう”ロボットアーム（JEM Remote Manipulator System, JEMRMS）は船内のクルーにより船外実験の支援作業を遂行するマニピュレータとして、1990 年に基本設計が開始され、1997 年にはフライト品の製作に着手した。JEMRMS は、船外の実験装置を把持し空間上の任意の位置へハンドリング可能な 6 自由度を有する全長 10 [m]・質量 780 [kg] の親アーム（Main Arm, MA, 図 6）と、並進・回転操作用の 2 種の操縦桿およびテレビモニタ・アーム制御装置等を組み込んだ操作卓（図 7）とから構成される [4]。操縦桿は他のロボットアームと共通化し、クルーへの操作負担を軽減した。

JEMRMS の先端には SRMS と同じ設計のエンドエフェクタ（End Effector, EE）が装備され、他のロボットアームとの共通品となる FRGF（Flight Releasable Grapple Fixture）を把持できる。JEMRMS は質量 7 [t] 以下の実験装置を把持した状態で、安定にハンドリング操作できる。

JEMRMS は船内実験室に組み込まれて、2008 年 6 月に Flight 1J にて打ち上げ後、折り畳まれた JEMRMS を軌道上にて展開し、運用が開始できる運用待機姿勢へと操作した [6]。さらに、2009 年 1 月までに JEMRMS のチェックアウト運用を段階的に完了させ、すでに EVA 支援等に活用するとともに、Flight 2J/A に搭載される実験装置を移設する本格的運用の準備を整えた（図 8）。

JEMRMS は他のロボットアームにない安全性を確保す

図 6 JEMRMS main arm

図 7 JEMRMS console

1: Approach Config 2: 1 Pos@EE Camera
3: Coarse Pos@EE Camera 4: Capture Pos@EE Camera

図8 Photo of JEMRMS grapple during checkout

るための措置が施されている。その機能は、JEMRMSの周辺の対象物に対して一定距離以下に接近できないソフト的な壁を設け、周辺環境との不測の接触・衝突を回避できる機能である。一方、実験装置の結合や着脱等、衝突が不可避の箇所では接触しても壊れない衝突許容設計を採用した。

JEMRMSのもう一つの特徴はアーム先端の視覚装置を用いた測距機能により、実験装置を結合箇所へ位置決めできることである。クルーがテレビモニタに投影された視覚ターゲットマーカの画像を見ながら、マーカの特徴点を画面にて指示することにより、位置補正量を自動算出する。視覚装置によるフィードバック情報を自動的に制御系に取り込んだ最初の実用軌道上ロボットアームである。

5. ISS 保守作業のためのロボットアーム

上記3体のロボットアームは、主にISSの組立作業に利用される。一方で、それ以外にも修理・交換等を中心とする保守作業に使用されるマニピュレータがある。“デクスター”(Special Purpose Dexterous Manipulator, SPDM)は、人間の上半身のような形をした重量1.7[t]・腕長3.5[m]の双腕ロボットであり、Flight 1J/Aにて打ち上げられ、SSRMSの先端に取り付けて使用される(図9)。SPDMはEVAの代替えとして、これまでEVAにて実施していたISSのバッテリー交換等の複雑な作業に使用される。

JEMRMSの先端には、精細作業を実施する子アーム(Small Fine Arm, SFA)を取り付けることができる。SFAは“きぼう”EFのバス機器の交換作業や実験支援等のより高精度の作業を担う。SFAはエレクトロニクス、ブーム、関節機構部、手先カメラおよびツールと呼ばれるエンドエフェクタで構成される全長2.2[m]・重量190[kg]の6自由度のマニピュレータであり、力制御を行うためにツール取付部に力・トルクセンサを備えている(表1)。SFAは船内機器としてHTV試験機(2009年9月予定)により打ち上げ、“きぼう”エアロックを利用して船外に搬出し、JEMRMSに連結され、EF上の保管装置に設置される。

上記以外にも打ち上げを待つESA(欧州宇宙機関)が開

Courtesy of NASA

図9 Dextre: Special purpose dexterous manipulator

表1 JEMRMS specification

Main Arm (MA)	Degrees of Freedom	: 6DOF (Y-P-P-P-Y-R)
	Length / Weight	: 10m / 780kg
	Handling Payload	: Max. 7000kg, 20,000kg ² , φ4.5m x 6m
	Positioning Accuracy	: ±50mm / ±1°
	Tip Speed	: Less than 60mm/sec (with P/L of 600kg or less) Less than 30mm/sec (with P/L of 3000kg or less) Less than 20mm/sec (with P/L of 7000kg or less)
	Max. Tip Force Emergency Stop Distance	: More than 30N, 60Nm(Bending), 90Nm(Torsion) : Less than 300mm
Small Fine Arm (SFA)	Degrees of Freedom	: 6DOF (R-P-P-P-Y-R)
	Length / Weight	: 2.2m / 190kg
	Handling Payload	: Max. 80kg, 30kgm ² , φ0.8m x 0.6m (compliance control)
	Positioning Accuracy	: ±10mm / ±1°
	Tip Speed	: Less than 50mm/sec (with P/L of 80kg or less) Less than 25mm/sec (with P/L of 300kg or less)
	Max. Tip Force Emergency Stop Distance	: More than 30N, 4.5Nm(Bending), 6Nm(Torsion) : Less than 100mm

発した6自由度のロボットアーム ERA (European Robot Arm) がある。EVAクルーより直接遠隔操縦できる特徴を有する。

6. 船外実験プラットフォームの組立とロボット技術

“きぼう”の第3便目となるFlight 2J/Aでは、EFおよびELM-ES、実験装置3体が打ち上げられ、SSRMSとSRMSとによりEFとELM-ESが、JEMRMSにより実験装置3体が、それぞれISSへ取り付けられる。

EFはシャトルのカーゴベイからSSRMSにより取り出され、SRMSへ一時引き渡される。その後、SSRMSが歩行動作を行い、SRMSから再度EFを受け取り、SSRMSによりEFの取り付けを実施する。SRMSへの一時引き渡しは、SSRMSの基部を変更し動作範囲を変更するために実施する。当初はSSRMSがEFを把持して、トラス上のレール移動により基部位置を変更する予定であったが、時間短縮、トラス移動中の電力喪失時のリスク回避のため、本方式で行うこととなった(図10)。

EFを船内実験室に結合する機構はEFBM (EF Berthing Mechanism) である。EFBMは4本の捕獲機構によりEFを引き込みながら結合面間を一致させる。当初は、EVAにより捕獲範囲にあることを確認する計画であったが、カメラを用いて船内クルーにより捕獲機構の動作開始確認(Ready to Latch, RTL)を行うことに変更した。そのため、2008年11月に、EFBM周辺のマーキングおよび接触挙動を模擬した地上シミュレータ(図11)を用いて、若田宇宙飛行

1: Handoff from SSRMS 2: Handoff to SSRMS
3: EF Berthing by SSRMS 4: JEMRMS EE Camera View

図 10 EF assembly sequences

Courtesy of NASA

図 11 Graphics simulator

士を含む実際に軌道上で操作するクルーにより評価を実施し、船内クルーで結合作業の RTL が実施できる目処を得た。JEMRMS は先端カメラ視野が RTL に有効であるため、結合面を天頂方向から視認できる姿勢に移動し、EVA に代わって視野を提供することとした。

ELM-ES を EF に結合する機構は EEU (Equipment Exchange Unit) である。RTL 確認後に EEU により ELM-ES を引き込み、結合面を一致させる EEU 動作の最中は、SSRMS は EEU の動きに従動するリンプにする。しかし、SSRMS あるいは ISS システムに異常が発生すると、SSRMS は安全化のためにブレーキが作動し、EEU に従動できなくなる。

SSRMS ブレーキと結合機構との間の引き合い状態は Force Fighting と呼ばれ、結合時の主要課題の一つである。最悪 FRGF 等の構造強度が弱い箇所が破壊する可能性がある。ELM-ES の結合の際には、同事象が発生した場合、EEU の動作をソフト的に停止する処置を行う。JEMRMS による実験装置の結合中には、関節ブレーキを意図的に滑らせるディスクブレーキを採用したため、Force Fighting が発生しない。なお、結合動作時の強度評価には結合機構の接触挙動とロボットアーム挙動とを連結した動的シミュレーションを行う [5]。

7. ま と め

ISS で運用されているロボットアームおよびロボットアームによる軌道上組立技術の特徴について概説した。ロボットによる組立技術は、将来の大型構造物組立や月面基地建設に必要な重要技術であると考えられる。本ロボット技術の習得が将来ミッション創出のキー技術として貢献することを期待したい。

参 考 文 献

- [1] JAXA ホームページ: <http://www.jaxa.jp>
- [2] NASA ホームページ: <http://www.nasa.gov>
- [3] R. McGregor, et al.: "Flight 6A: Deployment and Checkout of the Space Station Remote Manipulator System (SSRMS)," Proc. of the 6th Int'l Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, 2001.
- [4] 土井 他: "連載解説国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の全貌 (6) ロボットアーム", 日本航空宇宙学会誌, vol.50, no.576, 2002.
- [5] H. Ueno, et al.: "Berthing Load Analysis between Space Manipulator and Berthing Mechanism during On-orbit Assembly Operation," Proc. of the 9th Int'l Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, 2008.
- [6] 上野 他: "きぼう組立とロボットアーム展開の成果概要", 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2008.

上野浩史 (Hiroshi Ueno)

1988 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年清水建設(株)入社。宇宙・建設ロボット等の研究・開発に従事。1989~1991 年カーネギーメロン大学客員研究員。1999 年宇宙開発事業団(現 JAXA)入社。宇宙ロボット研究に従事後、2005 年より「きぼう」ロボットアーム・結合機構の開発・運用に従事、現在に至る。1992 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。2007 年 PMP (Project Management Professional) 取得。(日本ロボット学会正会員)