

国際宇宙ステーション日本実験棟 「きぼう」ロボットアーム

土 井 忍

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に取り付けられたロボットアームは、2008年6月に打ち上げられた後、軌道上の初期チェックアウトを経て、2009年7月に全天X線観測装置(MAXI)を「きぼう」の船外実験プラットフォームへ取り付け、日本初の実用宇宙ロボットとして実運用を開始した。その後、2009年9月に宇宙ステーション補給機(HTV)1号機で打ち上げられた船外実験装置を含め、5体の装置の取り付けを完了した。

これらの運用実績が評価され、第4回ロボット大賞の公共・フロンティア部門「優秀賞」及び「日本科学未来館館長賞」を受賞した。

本稿では、「きぼう」ロボットアームの運用実績及び宇宙ロボットアームの特徴、運用実績や課題、現在の取り組みについて紹介する。

キーワード：国際宇宙ステーション、日本実験棟「きぼう」、「きぼう」ロボットアーム、軌道上運用、ロボット大賞

1. はじめに

図-1に示す国際宇宙ステーションは、米国、ロシア、欧州、カナダ及び日本の世界16カ国が参加する国際プロジェクトであり、1998年に軌道上建設を開始し、現在も運用を続けている。



図-1 国際宇宙ステーションの概要

日本が提供する実験棟「きぼう」は、図-2に示すように主に5つの構成要素からなり、3回のフライトに分けてスペースシャトルで打ち上げられた。船内保管庫は、2008年3月(フライト1J/A)、土井宇宙飛行士によりスペースシャトルロボットアームを使って組み立てが行われた。「きぼう」ロボットアームは船内実験室と共に、宇宙ステーションロボットアームを使い、2008年6月(フライト1J)に星出宇宙飛行士により組み立てが行われた。「きぼう」の最終要素

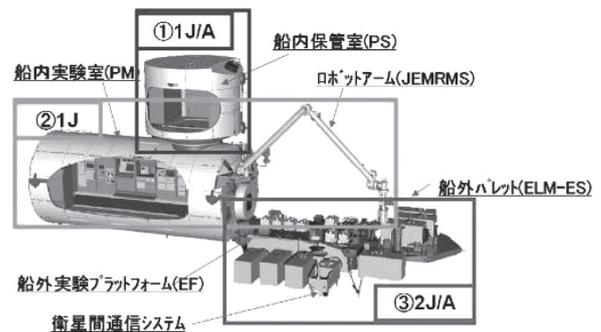


図-2 「きぼう」の構成要素

である船外実験プラットフォーム及び船外パレットは、これら2つのアームを使うことにより、2009年7月(フライト2J/A)、若田宇宙飛行士を中心に組み立てが行われた。

「きぼう」ロボットアームは、フライト1Jの後、1年間に亘って段階的に軌道上チェックアウトを行い、フライト2J/Aにおいて2つの船外実験装置と衛星間通信システム(以下、「ペイロード」と呼ぶ。)を、船外パレットから船外実験プラットフォームへ移設した。また、2009年9月に宇宙ステーション補給機(HTV)(通称、こうのとり)1号機により打ち上げられたペイロード2体の船外実験プラットフォームへの移設を行った。

「きぼう」ロボットアームは、厳しい環境下である宇宙空間で、フライト2J/A及びHTV1フライトにおいて、合計5台の実験装置の移設に成功し、幅広い要

素技術が統合されたロボット技術が評価され、第4回ロボット大賞の公共・フロンティア部門「優秀賞」及び「日本科学未来館館長賞」を受賞した。

本稿では、「きぼう」ロボットアームの運用実績及び宇宙ロボットアームの特徴、運用実績や課題、現在の取り組みについて紹介する。

2. 「きぼう」ロボットアームの特徴

図-3に示す「きぼう」ロボットアームは、基部を船内実験室の左舷エンドコーンに固定した長さ約10m、質量780kgの6自由度（YPPPYR型）アームであり、ブーム、関節機構部、関節エレクトロニクス、エンドエフェクタ、肘部及び手首部視覚装置（TVカメラ、雲台、照明）で構成される。

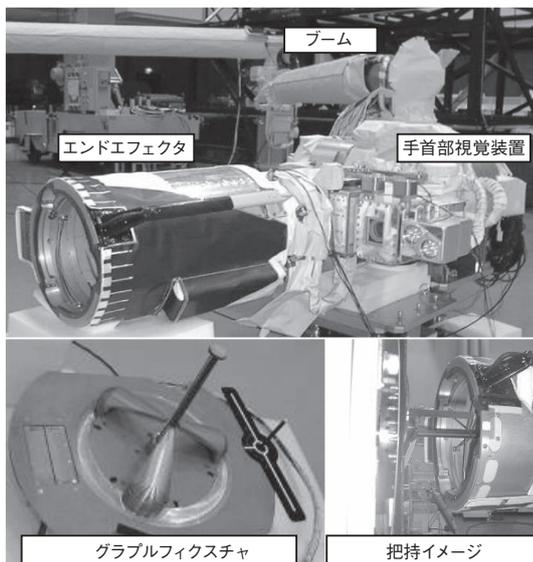


図-3 「きぼう」ロボットアームの概要

手首関節と肘関節、及び肘関節と肩関節との間には、それぞれ3.9mの線膨脹係数が小さく、高剛性の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を採用したパイプ構造のブームで結合している。

各関節機構部は、3極8相のDCブラシレスモータ、バックラッシュが小さく減速比の高い不思議遊星歯車による減速機及びトルク変動範囲の小さいセラミック性のディスクブレーキにより構成されている。

また、それぞれの関節には関節エレクトロニクスを配置し、上位計算機であるアーム制御計算機からの角度指令コマンドを受け、関節ごとに角度制御・角速度・電流制御を行っている。関節の制御にはモータ軸に配置したレゾルバを用いているが、アーム駆動の安全監視のため、出力軸にエンコーダを冗長で配置し、関節エレクトロニクスだけでなく、アーム制御計算機及び

その上位にある「きぼう」ロボットアームの管制制御を司る管理計算機を含めた3階層の計算機で3つのセンサ信号のクロスチェックを行っている。

手先に相当するエンドエフェクタはペイロード把持インタフェース共通化のため、スペースシャトルロボットアームのエンドエフェクタをベースに、宇宙ステーション用として長寿命化の改良を加えたものを採用している。エンドエフェクタは、図-3に示すように3本のスネアワイヤが把持対象となるグラブルフィクスチャのロッドに巻きつき、引き込む。

「きぼう」ロボットアームは、「きぼう」船内実験室内に設置された操縦卓（図-4）から軌道上の宇宙飛行士が遠隔で操作を行う。操縦卓には、システム全体の管制機能を司る管理計算機及びアーム制御を行うアーム制御計算機が搭載されている。また、宇宙飛行士が操作するためのマン・マシン・インタフェースを有し、並進用・回転用のハンドコントローラや船外カメラを操作するカメラ制御パネル、船外カメラの状況を確認するためのテレビモニタ、更にはシステムの状態監視や指示コマンドを発行するためのラップトップを備えている。



図-4 「きぼう」ロボットアーム操縦卓の外観

3. 「きぼう」ロボットアームの運用実績

(1) フライト1J（2008年6月）

「きぼう」ロボットアームは、図-5に示すように、「きぼう」船内実験室のエンドコーンに保持解放装置と呼ばれる拘束機構により拘束された状態で、スペースシャトルにより打ち上げられた。船内実験室構造の最小板厚は4.8mmであり、スペースシャトルの高度上昇に伴う差圧変化により膨張するため、「きぼう」ロボットアームの基部に相対的な変位をもたらす。このような与圧変形により強制変形荷重を解放できるよ

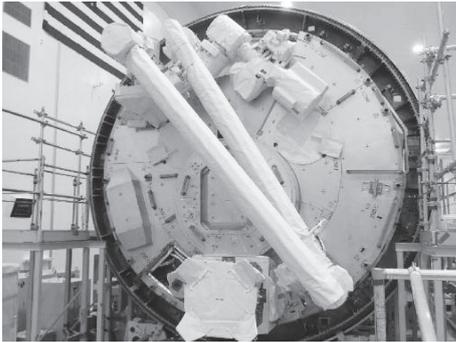


図-5 「きぼう」ロボットアームの打上姿勢

うストレスリリーフ機構を持たせ、拘束自由度の最適化を図っている。

スペースシャトルにより打ち上げられた船内実験室を宇宙ステーションに取り付けた後、この保持解放装置を解放し、一関節ずつ段階的に駆動して、軌道上の保存姿勢まで移行した。

(2) 軌道上初期チェックアウト

フライト 1J の後、次に示すフライト 2J/A での実作業に向けて、段階的に軌道上初期チェックアウトを実施した。初期機能確認、ブレーキチェックなどの安全性確認、及びペイロード取り付けに向けた運用デモンストレーションなどを約 1 年に亘り実施した。

(a) ブレーキチェック

軌道上での外乱荷重に対して安定した姿勢を保つためには、関節のブレーキが健全であることが前提となる。打ち上げ時の振動環境によりブレーキ故障が発生していないことを確認するため、「きぼう」ロボットアームをフライト 1J で軌道上の保存姿勢に展開した後に、ブレーキのチェックアウトを実施した。各関節は、ブレーキをかけた状態で駆動するような機能がないため、肩や肘関節などブレーキ確認の対象となる関節にブレーキをかけた状態で手首関節など別の関節をステップ的に動作させ、ブレーキの確認対象となる関節に負荷をかけることにより、ブレーキ機構がダメージを受けていないことを確認した。

(b) Ready-To-Latch (RTL) デモンストレーション

ペイロードを船外実験プラットフォームの結合機構に取り付ける際、締結失敗は最終的には構造破壊に至るリスクがあり、有人施設である国際宇宙ステーションにとっても脅威となる。従って、結合機構による結合動作開始の判定(「Ready To Latch」判定という)は、確実に実施する必要がある、安全上非常に重要な技術テーマである。

「きぼう」ロボットアームでは、結合機構に取り付けられた専用のターゲットを手首カメラで撮像し、画像測

距を行うことにより、結合機構とペイロードの相対距離を算出する方式を結合開始の判定として使用している。

「きぼう」ロボットアームでペイロードを取り付ける船外プラットフォームそのものがフライト 2J/A においてペイロードと共に打ち上げられるため、フライト 2J/A 前に、図-6 に示すように船内保管庫の上方に取り付けられている同一仕様の結合機構を対象に、この画像測距による Ready To Latch 判定技術の軌道上確認を実施した。

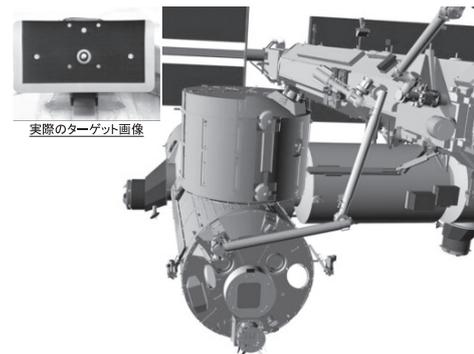


図-6 画像測距デモンストレーション

(3) フライト 2J/A (2009 年 7 月)

フライト 2J/A では、まず、船外実験プラットフォームと実験ペイロードのキャリアである船外パレットを「きぼう」に取り付ける必要がある、これらの取り付けは、宇宙ステーションロボットアームとスペースシャトルにより実施された。「きぼう」ロボットアームは、これらの操作を安全に実施するため、結合操作のクリアランス確認用の画像を提供するための視野支援を行った(図-7 参照)。

これらの「きぼう」の構成要素組立が完了した後、実際にペイロードを移設する前に、図-8 に示すように船外プラットフォームの結合機構に対し、実際に画像測距を行い、結合機構位置のキャリブレーションを実施した。その結果、「きぼう」ロボットアームの基部から一番遠い結合機構の位置・姿勢ずれの推定結果が最大

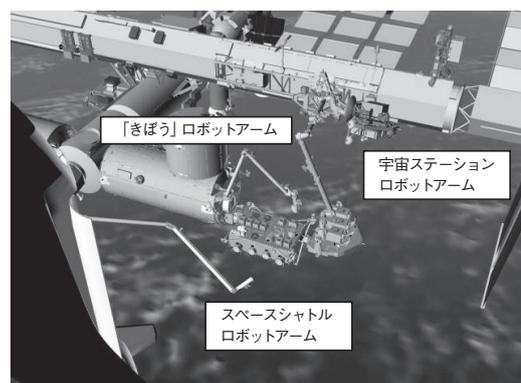
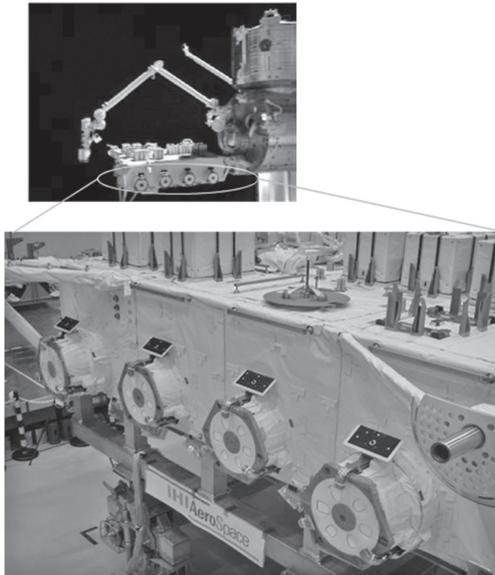


図-7 フライト 2J/A 組立概観図



図一八 ハイロード結合機構とターゲット

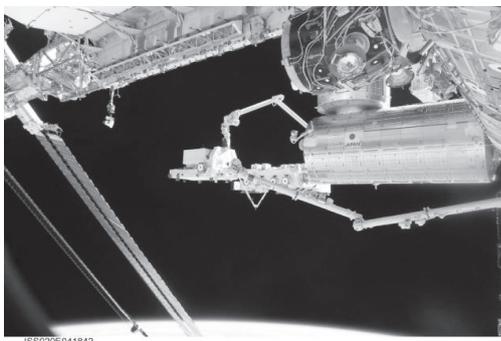
8 cm 程度もあり、事前予測よりも大きい結果となった。

この位置ずれの原因として、「きぼう」ロボットアームの基部が与圧隔壁に取り付けられているため、隔壁の膨張により基部が傾いていることが要因の一つであると推定している。

このずれ量の補正など軌道上クルーの手順書修正を行い、予定していた3体の実験装置の移設を完了した。

(4) HTV1 (2009年9月)

HTV1では、HTVにより打ち上げられた船外パレットを宇宙ステーションロボットアームがHTVから引出した後、それを「きぼう」ロボットアームにハンドオフするロボットアーム間での受け渡し作業を実施した(図一9)。



図一九 船外パレットのハンドオフ (HTV1)

船外パレットで運搬されて2体の実験ペイロードを船外実験プラットフォームへの移設を成功裏に完了し、その後、船外パレットを宇宙ステーションロボットアームに戻す作業を実施した。

現在、船外実験プラットフォームには5体の実験装置

等が設置され、観測や工学データの取得を行っている。

4. 運用技術課題と取り組み

宇宙用ロボットアームの一般的な特徴として、重量比がきわめて大きいことにある。「きぼう」ロボットアームの場合、自重780 kgに対し、可搬質量は7,000 kgであり、約9倍の重量比をもつ。

また、基本的に自重を支える必要がないことから、地上用ロボットアームのように肩関節に行くほど出力トルクを大きくするなどの対応が不要であり、6関節とも同一設計となっている。これにより、関節が故障した場合でも予備品が1式あれば、どの関節にも対応して交換が可能であり、保全作業に有効である。

スペースシャトルによる打上げ可能重量に制約があることから、軽量化が求められる一方、重量物運搬時に不慮に発生する可能性のある緊急停止などにより、把持重量物の慣性力による自己破壊を防ぐため、十分な強度設計も必要となる。

6関節が同一設計であることや、無重量空間での使用を前提として軽量化を図ったロボットアームの実機を地上で検証することも技術課題の一つであった。

以下に、宇宙ロボットアームの特徴故に直面した地上検証での課題及び軌道上での課題について紹介する。

(1) 制御性能に係る地上検証

「きぼう」ロボットアームの制御性能を重力のかかる地上において検証することは困難である。そこで、モータ軸特性、減速機特性、出力軸特性や制御演算、ブーム剛性などのアーム特性や制御特性をモデル化した制御評価用の動特性評価シミュレータの開発を行い、軌道上での制御性能の検証は、シミュレータによる解析により実施した。

本シミュレータの各種パラメータは、各関節やブームの単体試験結果や、図一10に示す2次元定盤上で圧縮空気により浮上させて動作させる特性試験の結果に基づいて、パラメータ同定、精度向上を図った。こ



図一10 2次元定盤での試験風景

の2次元定盤での動特性評価試験では、あらかじめ、浮上装置などの影響をシミュレーションモデルに組み込み、事前解析と試験結果との比較評価を行った上で、シミュレーションモデルから浮上装置などのモデルを削除して、軌道上での各種特性評価（位置決め性能や経路誤差、緊急停止距離解析など）を実施した。

(2) 軌道上荷重に対する安全性評価

先述のとおり運搬時に発生する不慮の緊急停止などにより、関節に対し瞬時にブレーキをかけた場合でも、「きぼう」ロボットアームの構造破壊を起こすことなく安全に停止する必要がある。「きぼう」ロボットアームでは、緊急停止距離 30 cm 以内という要求の範囲内で、ある程度のブレーキのスリップを許容することにより、内部応力を解放する設計アプローチを採用している。

国際宇宙ステーションの軌道上運用では、以下に示すようにロシア宇宙船のドッキングや、軌道変更・姿勢制御などのためのスラスト噴射、船内活動クルーによる運動までもが軌道上荷重としての外乱源となる。

- (a) 宇宙飛行士による船外活動で誘発される荷重
- (b) 宇宙飛行士による船内活動(エクササイズなど)で誘発される荷重
- (c) 姿勢制御・軌道上昇により誘発される荷重
- (d) ロシア宇宙船やスペースシャトル等のドッキング・アンドドッキングにより誘発される荷重

「きぼう」ロボットアームの場合、緊急停止時の関節の滑りを許容するために、他のロボットアームに比べてブレーキの保持トルクが小さく、これらの軌道上荷重に対してクリティカルになるケースがある。例えば、保存姿勢や把持重量物のハンドリング中のパーキング姿勢において、軌道上昇のためのエンジン噴射が実施されても、近傍の構造体に衝突することなく、安全な姿勢を保ち続ける必要がある。もし、大きな姿勢変動が予測される場合には、別の安全な姿勢に移行するか、これらの外乱源となるイベントの実行に対して制約をかける必要がある。

これらの軌道上荷重に対する運用制約の有無を識別する解析評価を行うため、まず宇宙ステーション全体の有限要素モデルを用い、上述のイベントにより発生するフォーシングファンクションを入力とし、「きぼう」ロボットアームの基部に発生する時系列加速度データを出力する。次に、この基部における時系列加速度データを入力として、先述の動特性評価シミュレータを用いて、「きぼう」ロボットアームのブレーキの滑りなど挙動を予測する。

運用制約の一例として、例えばペイロード運搬中についてはリブーストやロシア宇宙船などのドッキング・アンドドッキングを禁止したり、高精度の位置決めが必要な運用フェーズでは、船内での制振機構がない器具を用いた運動を禁止したりしている。

5. 現在の取り組み

(1) 地上からの遠隔操作（グランドコントロール）

HTV1 までの運用では、主に軌道上の宇宙飛行士が船内の操縦卓から「きぼう」ロボットアームの操作を行ってきた。しかし、宇宙の実験棟である国際宇宙ステーションにとって、宇宙飛行士の時間的なりソース（クルータイム）は有限であり貴重である。国際宇宙ステーションの利用促進を図る上で、ロボットアームの操作のようなシステム運用のためのクルータイム節減は必要不可欠である。

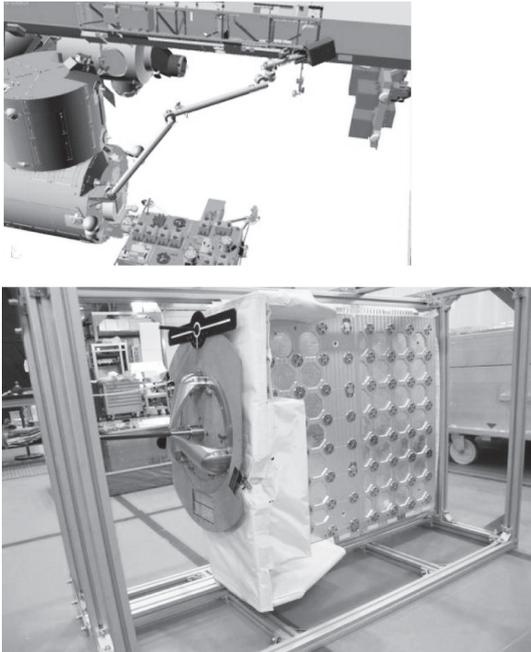
このため、2011 年度に、「きぼう」ロボットアームを地上から遠隔操作するグランドコントロールのデモンストレーションを実施し成功裏に完了した。「きぼう」ロボットアームのグランドコントロールでは、地上～軌道上間の 10 秒近い遅延時間を考慮しても安全に運用を行うため、「きぼう」船外を領域チェックと呼ばれるバーチャルな壁を貼り、アーム制御計算機及び管理制御計算機で独立に衝突を検知する機能を採用している。

2012 年度打上げ予定の HTV3 で輸送される曝露パレットを宇宙ステーションロボットアームに返送する作業を地上からの遠隔操作で実施し、グランドコントロールの実運用を行う予定である。

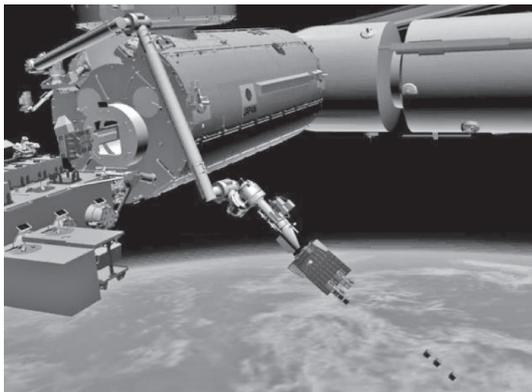
(2) ロボットアームの実験インフラとしての利用

HTV の曝露パレットで輸送されるペイロードは、通常 500 kg 程度あり、開発コストや打上げ機会の制約が大きい。一方で、宇宙実験棟としての利用促進を図るため、「きぼう」ロボットアームを利用した汎用型実験プラットフォームの開発を行っている。「きぼう」には、船内・船外への物資の搬入出を行うためのエアロックを有しているため、船内貨物として打ち上げた実験装置を、エアロックを通じて船外に搬出、「きぼう」ロボットアームの先端で 3～6 か月程度の実験や軌道上実証を行う計画を進めている（図—11 参照）。

2012 年度打上げ予定の HTV3 では、本、汎用型実験プラットフォームとともに、小型衛星放出機構を打上げ、「きぼう」から 10 cm 級の小型衛星を放出する計画を進めている（図—12）。



図一11 「きぼう」ロボットアーム先端での簡易実験
(上段：試験コンフィギュレーションイメージ
下段：汎用型実験プラットフォーム)



図一12 「きぼう」ロボットアームからの小型衛星放出図

(3) 子アームによる運用

HTV1では、船内貨物として子アーム(2.2m, 180kg)も打ち上げている。子アームは、「きぼう」ロボットアームの先端で把持された状態で精細作業を行うために開発した小型精細作業用のロボットアームであり、手先に取り付けた力トルクセンサのフィードバックによる力覚制御機能が特徴である(図一13)。

2013年度以降にHTV4で打ち上げ予定の「たんぽぽ」(有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集)ミッションにおいて、エアロックから船外へ移動させたこの実験装置を、子アームを用いて船外実験プラットフォーム上のハンドホールド(手すり)に取り付ける。この作業は、ロボットアーム用に準備された取付機構ではなく、船外活動を行う宇宙飛行士用の手すりとして使用されるハンドホールドへロボットアームで取り付ける点で初の試みとなる。また、子ア



図一13 子アーム外観図

ムについてもクルータイム節減の観点からグランドコントロールを行うための軌道上デモンストレーションを2012年度から実施する計画である。

6. おわりに

本稿では、日本初の宇宙用の実用ロボットアームとして、「きぼう」ロボットアームの特徴、運用実績や課題、現在の取り組みについて紹介した。

「きぼう」ロボットアームは、これまでのいわゆるクレーン機能として使うだけではなく、日本実験棟として、実験プラットフォームとしての利用にも視野を広げ、さらなる運用・利用を図っているところである。

JCMA

《参考文献》

- 1) 土井 忍, 他: “連携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
- 2) 杉本 隆, 他: “「きぼう」で獲得した友人システム維持機能技術～軌道上荷重に対するロボット運用技術”, 第53回宇宙科学連合会, 2009
- 3) 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.
- 4) H. Morimoto, et al.: “Confirmation Procedure of Manipulator Positioning on Japanese Experiment Module of International Space Station”, Proc. of the 2006 IEICE General Conf., March 2006, Tokyo
- 5) 土井 忍: “きぼうロボットアームの運用技術”, 2009年度秋季大会超精密シンポジウムプログラム.
- 6) K. Suzuki, et al.: “Introduction of the Small Satellite Deployment Opportunity from JEM”, Proc. of 3rd Nano-Satellite Symposium, December 2011, Kitakyusyu, Japan

【筆者紹介】

土井 忍 (とゐ し のぶ)
(独)宇宙航空研究開発機構
有人宇宙環境利用ミッション本部
JEM 運用技術センター
主任開発員

