

# ISS 船内ロボット Int-Ball2 による技術実証と RoboCup@Space への展開

～宇宙飛行士の作業支援および船内業務の自動化・自律化に向けて～

○池田 勇輝 (JAXA) 萩原 良信 (創価大学) 西下 敦青 (JAXA) 山口 正光 ピョトル (JAXA)  
岡田 浩之 (東京情報デザイン専門職大学) 大塚 聡子 (JAXA) 山本 竜也 (JAXA)

JAXA では、ISS 船内での宇宙飛行士の作業支援や船内業務の自動化・自律化を目的に、Free Flyer 型ロボット Int-Ball2 やその Gazebo シミュレータを開発し、技術実証を進めている。本稿では、これまでの成果や課題を整理すると共に、ロボカップ日本委員会が検討中の RoboCup@Space 競技への展開に向けた取り組みに対する期待について述べる。その上で、地上と宇宙における技術的相違や地上ロボットとの連携可能性を通じて、本取り組みの意義と展望を述べる。

## 1. はじめに

国際宇宙ステーション (ISS) 船内で作業する宇宙飛行士は、科学実験をはじめ、設備の保守・点検、物資管理、記録撮影、地上との連携、健康管理など多岐にわたる作業を担っている。これらに必要なリソースは貴重かつ限られており、各作業の効率化や支援が重要な課題である [1]。中でも、地上との連携に必要な撮影や機材設置といった準備作業は、全体の約 15 % を占め、無視できない負担となっている。

こうした背景のもと、JAXA では、宇宙飛行士の撮影作業を代替・支援する自律飛行型カメラロボットの Int-Ball(初号機) を 2017 年に打ち上げ、ISS 船内での軌道上実証を行った [2]。Int-Ball(初号機) は、球形の小型ドローンで、地上からの遠隔操作によって船内を移動しながらの撮影を可能にした。一方で、ISS 船内の気流への対抗推力の不足や、マーカー依存の航法、手動での充電が必要といった後継機に反映すべき課題が抽出された。

これらを踏まえ、後継機となる Int-Ball2(図 1) では、撮影作業の完全自律化を目指し、推力性能や自律飛行能力の強化、自動ドッキング・充電が可能なドッキングステーションの開発などの改良を行った [3, 4]。また、ソフトウェアは、ロボット開発のためのフレームワークである ROS(Robot Operating System) を基盤として構築し、ユーザが任意に実装したプログラムの動作を可能とする技術実証プラットフォームとしての機能も担える設計とした。

また、このような宇宙ステーション船内ロボットを用いた取り組みの一つに、JAXA が NASA と協力して教育を目的に開催した「きぼうロボットプログラミング競技会 (Kibo-RPC)」がある。この競技は、教育的意義に加え、軌道上ロボットの社会的受容性の向上や研究コミュニティの形成にも寄与している。

その上で、宇宙ロボット技術の発展と将来のサービスロボット普及を見据えた新たな取り組みとして、ロボカップ日本委員会は Int-Ball2 を活用した競技「RoboCup@Space」の開催に向けた検討を進めている [5]。これは地上の RoboCup 競技の宇宙版と位置づけられ、ISS 船内という特殊環境における自律型ロボット技術の促進と国際的な連携を目的としている。Kibo-RPC が学生を対象とした教育目的の競技であるのに対

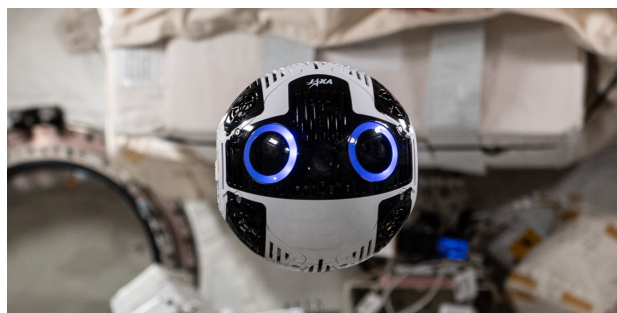


図 1 ISS 船内での Int-Ball2 (Image by JAXA/NASA)



図 2 Int-Ball2 のハードウェア構成

し、RoboCup@Space は研究者を主体とした、研究ベンチマークおよび技術交流を促進するための共通基盤の構築を目的とした競技としたいと考えている。

本稿では、Int-Ball2 のシステム概要と地上・軌道上での技術実証を紹介し、将来の宇宙ステーションで必要とされる技術や、RoboCup@Space 競技への期待について述べる。そして、最後に地上と宇宙における技術的相違を通じて、本取り組みの意義と展望を述べる。

## 2. Int-Ball2 の概要と軌道上実証

Int-Ball2 は、ISS 船内で宇宙飛行士と共存しながら自律飛行し、撮影業務を代行する球形ロボットである。ここで、Int-Ball2 の主要な機体諸元を表 1 に示す。

本章では、Int-Ball2 の機体構成とシステム概要に加え、技術実証プラットフォームの概要、地上での検証方法、および ISS における軌道上実証の成果について順に述べる。

### 2.1 Int-Ball2 の概要

Int-Ball2 は、図 2 に示すように、おおそ球形の外装を持ち、8 基の小型プロペラが空間的に対称な位置

に配置された、ドローンのような構成をしている。この構成により、3自由度の位置 (X, Y, Z) および3自由度の姿勢 (ロール, ピッチ, ヨー) の制御が可能となり、特に無重力環境下での自由な移動を実現している [6].

この際、ISS 船内では換気ファンによる気流が常に存在するため、静止状態を維持するにはこの外力への対応が必要となる。Int-Ball2 は、こうした環境下でもホバリング制御により任意の位置と姿勢を保持し、安定した撮影を行うことができる。

また、機体内部には、撮影用カメラ、航法用ステレオカメラ、IMU(慣性計測装置)などを搭載している。ステレオ画像の特徴を用いた Visual SLAM と IMU のデータを統合することで、6 自由度の自己位置推定を行い、マーカ等に依存せず JEM 船内を自律的に移動できる [7].

さらに、Int-Ball2 は、自律的に専用のドッキングステーションへ接近し、背面の給電端子に対して、磁石と機械的ガイドによる独自機構で結合し、自動で充電を行うことができる [8].

その他にも、カメラ画像のリアルタイムダウンリンク、LED によるインジケータ (表示器) 機能、把持・衝突検知によるプロペラの停止・その場でのホバリング機能などを備える。地上の運用管制員は、GUI ベースの GSE(Ground Support Equipment) を通じて指令送信や状態監視が可能である。これらの技術により、Int-Ball2 は自律的な撮影支援を実現している。

2.2 技術実証プラットフォーム

Int-Ball2 は、自律的な撮影だけでなく、ユーザが実装したプログラムを動作させる技術実証プラットフォームとしての機能も備えている [9]. この機能は、ROS(ROS 1 Melodic) をベースとして、フライトソフトウェアの一部を置き換えることで実現しており、各種センサや機能へ容易にアクセスできる環境を提供する。

ユーザのプログラムは、Docker コンテナ内で実行される構成で、ベースとなる OS 環境を変化させずに多様な技術実証を可能にしている。これらは、地上からの操作でソフトウェアの起動・停止を一元管理している。

さらに、Int-Ball2 側面の USB ポートからハードウェアの追加も可能である。

2.3 地上検証

宇宙開発では、地上で宇宙という特殊環境をどれだけ再現できるかが重要である。JAXA では、軌道上での安全かつ確実な動作を保証するために、図 3 に示すような複数の地上検証手法を整備・活用してきた [10].

まず、図 3(a) に示す Gazebo ベースのシミュレータでは、Int-Ball2 の物理特性および ISS 船内の環境を模擬しつつ、実機と同様の ROS ベースのフライトソフトウェアや地上局用 GUI(GSE) が実行可能なシミュレーション環境を構築した [10]. このシミュレータには、質量特性や、衝突判定といった基本物理モデルに加え、各プロペラの推力模擬、HILL 方程式による ISS と Int-Ball の相対運動の模擬、ISS の姿勢変動の模擬、ISS 日本実験棟船内の気流の模擬、ドッキングステーションで用いているの磁力の模擬など、多様な要素をプラグインとして実装しており、軌道上環境に近いシミュレー

表 1 Int-Ball2 の主要諸元と機能概要

項目	内容
外形寸法	直径約 20[cm] の球状
質量	約 3.3[kg]
推進方式	小型プロペラ 8 基 (オクトコプタ型)
センサ	撮影用カメラ、航法用ステレオカメラ、IMU、マイクロホン等
出力素子	LED
コンピュータ	Jetson TX2
OS	Ubuntu 18.04
ROS	ROS Melodic (Docker を介した ROS 2 Humble の動作実績あり)
通信	無線 LAN(Wi-Fi) によるリアルタイム映像伝送・テレメトリ
電源	リチウムイオンバッテリー (自動ドッキング・充電)

ションが可能である。なお、本シミュレータは JAXA の GitHub 上で公開されており、誰でも使用可能となっている [11].

次に、図 3(b) に示す空気浮上定盤を用いた試験では、機体の下部から圧縮空気を噴出させることで床との摩擦を大幅に低減し、2 次元平面上における擬似的な無重力環境を実現している [10]. Gazebo 上での動作確認に続き、実機固有の遅延やセンサノイズを含む、より実際の環境に近い条件下での動作確認を実施した。

さらに、図 3(c) に示す HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation) では、ロボットアームによって飛行シミュレーション結果の位置・姿勢を再現し、これに FT センサで計測した Int-Ball2 の推力に基づいた力・トルクをフィードバックすることで、無重力環境下での 3 次元挙動を再現している [10, 12]. これにより、空気浮上定盤では再現できない 3 次元空間での動作確認を実施した。

2.4 軌道上実証

Int-Ball2 は、2023 年 6 月に ISS へ打ち上げられ、各機能のチェックアウトを経て定常運用に移行した。チェックアウトでは、電源、通信、各装置の動作確認に始まり、航法誘導制御や、自動ドッキング機能、衝突・把持の検知などのオフノミナル時の機能確認も実施した。

また、技術実証プラットフォームの機能検証も実施した [13]. ここでは、外部ユーザのプログラムによる動作や、OS に依存しない柔軟な実行環境での動作を確認した。これにより、多様なユーザが自作のアプリケーションを Int-Ball2 上で実行することが可能になる。

この際、表 1 に示す通り、Int-Ball2 の基盤 OS は Ubuntu 18.04、ROS は Melodic とやや旧式の構成である。これは、開発当時の検証環境や Jetson ハードウェアとの整合性を考慮したものである。一方で、軌道上実証プラットフォームの機能検証においては、Docker を用いることで、Ubuntu 22.04 上の ROS 2 Humble からの動作も確認している。このように、OS に依存しない柔軟かつ拡張性の高いアプリケーションの実行環境を実現している。

これらの実証を通じて、撮影作業の完全自律化という目標に近づくとともに、技術実証プラットフォームとしての機能性が確認され、将来の宇宙ステーション



船内ロボットに向けた基盤技術としての可能性を示している。

### 3. RoboCup@Space への期待

Int-Ball2 を活用した新たな取り組みとして、ロボカップ日本委員会では、ISS 船内でのロボット競技「RoboCup@Space」の開催に向けた検討を進めている[5]。この競技は、地上で行われている RoboCup(サッカー、レスキュー、@Home など)を宇宙環境に拡張し、宇宙ロボット技術の発展と技術者コミュニティの拡大を目的としている。

RoboCup は、画像認識、行動計画、協調学習など多分野にまたがる研究を動的な実環境下の課題を通じて促進してきた。多くの競技は「まだ実現されていない技術的課題」に挑戦することを主眼としており、研究開発の方向性にも影響を与えている。RoboCup@Space においても、こうした姿勢を継承し、宇宙ロボティクス分野への波及が期待される。

本章では、第 2 章での Int-Ball2 の機能を踏まえ、RoboCup@Space の競技で期待される拡張機能と、Int-Ball2 を用いた競技実施における技術課題について述べる。

#### 3.1 RoboCup@Space 競技で期待される拡張機能

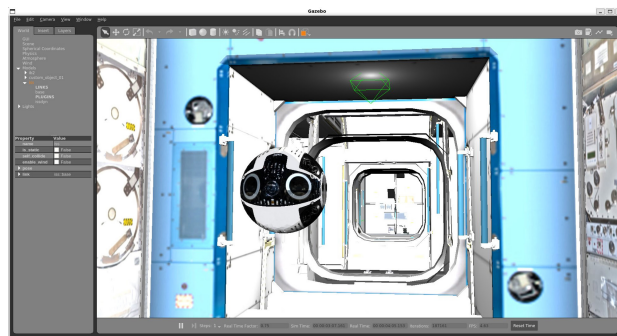
ISS は 2030 年の退役が予定されており、それに伴って民間企業による宇宙ステーションの構想が進展している。このような状況においては、宇宙旅行や商業活動といった新たな利用ニーズが想定され、ロボットに求められる役割も、ISS での研究支援から生活支援・運用自動化へと広がっていくと考えられる。RoboCup@Space 競技を行う上では、このような将来の宇宙活動を見据えた機能拡張の検討と実装を促す実践的な開発の場として機能することが期待される。

まず、宇宙ステーション船内は、人が活動する生活空間でもあり、周囲環境(実験ラック等の物品・機材は位置)が時々刻々と変化する。そのため、ロボットには事前地図に含まれない静的・動的障害物を認識し、それらに対しても柔軟に対応できる自律移動機能が求められる。RoboCup@Space においても、そのような移動計画・回避機能の実装は重要な評価対象となり得る。

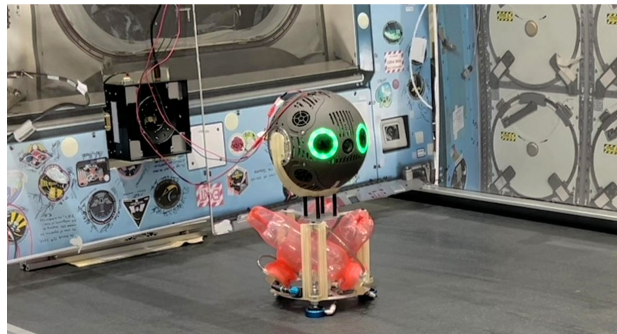
また、宇宙飛行士や宇宙旅行者と自然に協働するためには、音声認識による対話や、画像認識を用いた人物・対象物の認識と追従、画像中のシーン理解に基づく状況把握、さらに視線を固定した状態での姿勢制御などが有効である。RoboCup@Space でこうしたタスクを設けることで、実環境に近い条件下で人とのインタラクション技術のデモンストレーションが可能となると考える。

さらに、閉鎖空間である宇宙ステーションでは、装置の異常や環境変化をロボットが早期に検知・報告できることが、安全性の確保に直結する。この観点からも、RoboCup@Space でのロボット活用が、実運用に向けた機能開発へと繋がることが期待される。

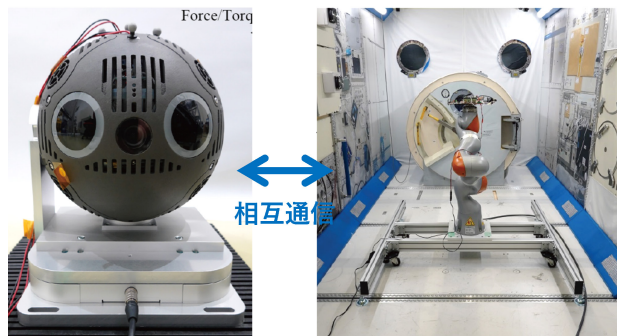
このように、RoboCup@Space は、実環境を想定した条件下での自律技術の開発・デモンストレーションの場としての活用が期待される。特に、Int-Ball2 のように既に軌道上実績のある機体を活用することで、競



(a) Gazeboシミュレータ



(b) 空気浮上定盤試験



(c) HILS試験

図 3 Int-Ball2 の地上試験

技で得られた成果を運用や今後の設計・改良に寄与することが考えられる。

#### 3.2 Int-Ball2 を用いた競技実施における技術課題

RoboCup@Space の開催にあたっては、競技の円滑な実施と評価に向けた技術的検討が必要である。

宇宙ロボットの開発においては、実環境で動かすハードルが高いため、原則として実宇宙環境での試験ではなく、シミュレータや地上での模擬試験を基本とした開発が行われる。特に、3.1 節のような「人とロボットのインタラクションを含むシナリオ」においては、仮想空間内における人間の行動を適切に模擬・再現する仕組みが重要である。その点で、VR ベースの人間協調型ロボットシミュレータである SIGVerse[14] は有力な参考事例となる。SIGVerse は、VR を介して仮想空間における人とロボットのインタラクションを再現可能で、RoboCup@Home や World Robot Summit(WRS) において、シミュレーション競技プラットフォームとして活用された実績がある。これらの競技では、自動採点機能も導入されており、定量的な評価が可能である。

また、将来的に Int-Ball2 の実機を用いて軌道上で競技を行う場合には、安全性と確実性を確保するための

段階的な地上試験が不可欠である。この際、2.3節で述べたように、まずGazeboシミュレータ上で各種ソフトウェアの動作確認を行う。そこで動作が確認された後に、地上試験用のハードウェア (GM: Ground Model) 上での実行を通じて、実機搭載用コンピュータにおける計算負荷や、センサ入出力の実挙動を含めた動作確認を進める。こうした段階的な試験を通じて、十分な安全性と信頼性を確認後、最終的に軌道上での動作にも繋げられる可能性がある。

このように、Int-Ball2を活用したRoboCup@Space競技の実現には、技術的な確認が必要となるが、これらの技術課題に対する検討は、宇宙ロボットの安全な社会実装と実運用への布石ともなりうる。

#### 4. 地上と宇宙における技術的相違

RoboCup@Spaceで想定しているInt-Ball2のようなロボットは、RoboCup@Homeで扱っている家庭環境でのサービスロボットと多くの共通点を有している。いずれも人間と共存する環境で生活や作業を支援することが目的であり、音声対話や協調動作など共通する発展技術が挙げられそうである。このため、RoboCup@Spaceは地上技術の宇宙応用を実践的に試す場としても有意義であると考えられ、将来の宇宙利用に向けた具体的事例創出が期待される。

一方で、宇宙という特殊環境に起因する相違点も多い。最大の違いは重力であると考ええる。ISS船内は無重力(微小重力)下であるため、Int-Ball2のようなロボットは浮遊しながら移動する。この際、6自由度の慣性を考慮した制御が必要となる。Int-Ball2では、これらの制御機能が軌道上で実証されているためクリアされている。

また、宇宙ロボットの開発はシミュレータや地上での模擬試験を通じて進められるため、開発環境と実環境との間に生じる差異が課題となる。例えば、ISS特有の物体や照明条件に対応した画像認識などでは、専用のデータセットを用いて学習やファインチューニングが必要となるが、実環境のデータ取得は地上ほど容易ではない。そのため、シミュレーションから実環境への適応技術の重要性が高くなっていく。

加えて、宇宙では地上以上に安全性が求められる。ISSは完全な閉鎖空間であり、トラブル時の避難手段が限られるため、人命の安全が最優先となる。Int-Ball2などの宇宙ステーション船内ロボットは、安全性を考慮して、衝突やバッテリーの発火等のリスクを低減した設計がなされている。

もう一つ重要な点は、人的リソースの価値が地上と全く異なる点である。不具合や想定外の動作を起こした際に、地上では人を頼ることが出来るが、宇宙での宇宙飛行士の作業時間は貴重であり、また将来の商業ステーションでは無人運用も視野に入っているため、人の手を当てにしすぎたロボティクス設計・大会運用設計は現実的ではない。

このように、宇宙船内ロボットは地上と共通する技術課題を抱えつつも、環境に応じた特有の要件も多い。RoboCup@Spaceは、こうした共通点と相違点を踏まえ、宇宙と地上双方のロボット技術の発展を促す実践の場として期待される。

#### 5. まとめ

本稿では、ISS船内における宇宙飛行士の作業支援を目的に開発された自律飛行型ロボットであるInt-Ball2について、そのシステム概要や地上・軌道上での技術実証の成果を紹介し、さらにその技術を活用した新たな試みである「RoboCup@Space」への期待や、競技実施における技術課題等について述べた。

また、宇宙ステーション船内におけるロボットは、人間と共存する空間でロボットが生活や作業の支援を目的としていることから、地上のロボットにも共通する技術があり、地上のロボット技術を宇宙分野へ応用するための実践的な開発の場としても重要である。

さらに、RoboCup@Spaceのような試みは、技術実証の場であると同時に、人材育成と国際的な技術連携を促進する役割が必要であろうと著者らは考えている。宇宙開発が民間へと拡大し、宇宙利用の多様化が進む中で、本取り組みが次世代の宇宙サービスロボット技術の中核を担う存在となることを期待する。

#### 参 考 文 献

- [1] S. P. Yamaguchi, *et al.*, “ISS/JEM crew-task analysis to support astronauts with intra-vehicular robotics“, *RO-MAN*, 2023.
- [2] S. Mitani, *et al.*, “Int-Ball: Crew-Supportive Autonomous Mobile Camera Robot on ISS/JEM“, *AeroConf*, 2019.
- [3] S. P. Yamaguchi, *et al.*, “Int-Ball2: ISS JEM Internal Camera Robot with Increased Degree of Autonomy – Design and Initial Checkout“, *iSpaRo*, 2024.
- [4] D. Hirano, *et al.*, “Int-Ball2: On-Orbit Demonstration of Autonomous Intravehicular Flight and Docking for Image Capturing and Recharging“, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2024.
- [5] 萩原 良信 他, “RoboCup JapanOpen @Space Challenge の構想“, *RSJ*, 2025.
- [6] S. Mitani, *et al.*, “Int-Ball2: Compact High-torque Propulsion System Actively Utilizes Propeller Air Drag Polarity“, *Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics*, 2023.
- [7] T. Nishishita, *et al.*, “GNC Design and Orbital Performance Evaluation of ISS Onboard Autonomous Free-Flying Robot Int-Ball2“, *IROS*, 2024.
- [8] K. Watanabe, *et al.*, “Magnetic Docking Mechanism for Free-flying Space Robots with Spherical Surfaces“, *ICRA*, 2020.
- [9] 山本 竜也 他, “新型 ISS 船内自律飛行型カメラロボット (Int-Ball2) の軌道上実証プラットフォーム活用について“, *RSJ*, 2023.
- [10] T. Nishishita, *et al.*, “Complementary Ground Testing Method for Autonomous Flight System of Space Free-Flying Robot“, *AeroConf*, 2024.
- [11] JAXA, “int-ball2\_simulator“, [https://github.com/jaxa/int-ball2\\_simulator](https://github.com/jaxa/int-ball2_simulator) 参照 2025 年 7 月 2 日.
- [12] D. Hirano, *et al.*, “Hardware-in-the-Loop Simulator with Low-Thrust Actuator for Free-Flying Robot’s Omni-Directional Control“, *ICRA*, 2023.
- [13] JAXA, “宇宙で活躍する自律カメラロボット「Int-Ball2」、新たな機能拡張プラットフォームを軌道上で実証完了“, <https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/news/detail/004741.html> 参照 2025 年 7 月 10 日.
- [14] T. Inamura, *et al.*, “SIGVerse: A Cloud-Based VR Platform for Research on Multimodal Human-Robot Interaction“, *rontiers in Robotics and AI*, 2021.