

ロボット競技を通じた宇宙船内人協調ロボティクス技術の展望

○西下 敦青（JAXA） 池田 勇輝（JAXA） 本田 瑛彦（JAXA） 萩原 良信（創価大学）
岡田 浩之（東京情報デザイン専門職大学）

RoboCup has presented common challenges for autonomous robotics and promoted the development of human-robot cooperation technologies, including service robots. Expectations are growing for intravehicular robots that support crew activities. However, the robots are still used mainly for limited tasks such as photography support, and integrated cooperation technologies combining perception, mobility, dialogue, and safety remain immature. This paper discusses prospects for accumulating technologies and exploring applications through spacecraft robot competitions, focusing on RoboCup JapanOpen @Space Challenge, newly established in FY2026.

1. 緒言

国際宇宙ステーション（ISS）をはじめとする低軌道上の有人拠点では、実験運用、船内点検、記録、物品管理、地上管制との情報共有など、多様な船内作業が継続的に実施されている。近年は、これらの作業をロボティクス技術を活用して支援する取り組みが各国で進められている。船内環境におけるロボット支援の対象は広範囲に及ぶと考えられており、ISS きぼう日本実験棟（JEM）のクルータスク分析では、実験準備、物品搬送、撮影、点検、情報提示などが船内ロボットによる支援対象として整理されている [1]。これらの支援を実現するためには、単一の要素技術だけでなく、センシング、認識、計画、制御を含む自律移動技術、ロボット自身や周囲環境の状態監視、クルーおよび地上管制との相互通信を統合したロボットシステムを実現する必要がある。また更なる発展として、単にクルー作業を代替するのではなく、同じ閉鎖環境でクルーと生活を共にし、必要な情報提示や確認対話などを通じて、クルーの認知的・運用的負荷を低減する、コンパニオンロボティクスの需要が存在する。ロボットが作業状況を自律的に把握し、クルーと協調することによってタスクを遂行することができれば、作業支援の幅が格段に広がると期待される。しかしながら、現在の船内ロボットの利用は撮影支援や対話実証など、クルー作業の代替を目的としたものが主であり、クルーの作業文脈に応じて継続的に支援する統合的な人協調ロボティクス技術は発展途上である。

地上のロボティクス分野において、RoboCup は自律ロボットに共通する課題を競技として提示し、研究開発の方向性を共有する場として機能してきた。特にサービスロボット競技では、人との対話、生活環境での移動、物体認識、タスク実行などを統合的に扱うことで、個別技術の性能向上だけでなく、実環境で動作するシステムとしての技術蓄積を促してきた。このようなロボット競技の枠組みは、研究者間で課題設定や評価基準を共有し、継続的に技術を比較・改善するための有効な基盤である。そこで、この枠組みを宇宙船内ロボット分野にも導入することで、個別の実証事例に留まりがちなクルー支援技術を、共通課題のもとで継続的に蓄積・比較できる可能性に着目する。

本稿では、宇宙船内における人協調ロボティクス技術の発展に対するロボット競技の役割について展望する。第一に、ISS/JEM におけるクルー支援ニーズと現

在の船内ロボット活用事例を整理し、宇宙船内コンパニオンロボティクスに必要な技術課題を抽出する。第二に、地上サービスロボット競技で蓄積されてきた人協調ロボティクス技術を紹介し、それらが宇宙船内クルー支援にどのように対応しうるかを整理する。第三に、2026 年度にロボカップ日本委員会により新設された RoboCup JapanOpen @Space Challenge を題材として、地上競技による反復的な比較・改善に適した技術領域と、対象機体・運用条件を定めた実機試験または軌道上実証が必要な技術領域を分類し、今後の競技設計における人協調・コンパニオン性評価の方向性を示す。

2. 宇宙船内クルー支援ロボットの現状と課題

まず初めに、宇宙船内クルー支援ロボットの適用対象として検討されてきた作業領域と、現時点で十分な支援が実現していない作業領域を整理する。Yamaguchi らは、2017 年 9 月から 2021 年 4 月までに JAXA が JEM で実施した ISS 船内タスク 1961 件、合計 48,570 分のクルータイムを対象に、クルータスクの分類を行った [1]。その結果、クルータイムのうち、システムペイロードの取り付け取り外しや交換、構成変更などに関わる作業が 40%、物品探索・搬送および試験の準備・片付けが 25%、船内撮影およびセンサデータ収集が 14% を占めていた。本結果が示すように、クルータスクの大部分は実験そのものではなく、実験や運用を成立させるための反復的な周辺作業であり、ロボットによる支援対象を考えるうえで重要な領域であると考えられる。

これまで、船内ロボットによるクルー作業支援については様々な検討が行われ、実際に開発・運用された。JAXA の Int-Ball2 は、地上から遠隔操作することで JEM 船内を移動することができるカメラロボットであり、実験作業の撮影や地上からの状況確認を目的として開発された [2]。Int-Ball2 は、クルーがカメラを設置・保持する負担を低減するという明確な撮影支援タスクに絞って設計されており、定常運用の中で実際に活用されている。また、DLR や Airbus によって開発された CIMON は、音声入出力インターフェース、ディスプレイによる情報提示、移動機能を備えた AI ベースのクルー支援ロボットとして開発され、手順支援や心理的支援を含む人とのインタラクションを想定している [3]。CIMON は、物流、撮影、点検、物理操作を継続的

に代替するようなロボットではないが、船内で人と対話するロボットの可能性を示したという観点で意義がある。Yamaguchi らは、CIMON と Int-Ball2 を連携させる ICHIBAN 実証において、ISS 船内で 2 機の宇宙ロボットが協調動作したこと、および音声操作によって船内ロボットの移動を指示する実証を行ったことを報告している [4]。これは、撮影支援ロボットと対話型ロボットを組み合わせたクルー支援の事例であり、宇宙船内における人協調ロボティクス、特に音声を介したロボット移動操作の実証例として重要である。マニピュレーション作業の観点での実証例としては NASA の Robonaut 2 が挙げられる。Robonaut 2 は人型の上半身と器用なマニピュレータを備え、宇宙飛行士と同じ工具やインタフェースを扱うことを目指して ISS に導入された [5]。ISS 船内の操作対象としては多様な機器、ケーブル、柔軟物、収納袋があり、これらの物理操作をロボタストに実行することは難しい課題である。ISS 上では、タスクボード操作、工具把持、浮遊物体の捕捉などの基礎的な実証を行い、人型ロボットによる船内作業代替の可能性を示した。しかし、脚部追加作業の際に電源系トラブルが発生したことで地球へ帰還しており、その後 ISS に再び打ち上げられることはなく、初期チェックアウトの先の本格的な技術実証はできていない。

以上を整理すると、撮影タスクについては実際にクルー支援が行われている事例があるものの、その他の物品探索・搬送、試料交換、装置再構成、清掃、報告支援などは、クルータイムの中で無視できない割合を占めるにもかかわらず、ロボットによる継続的な支援は十分に実現されていない。さらに、ロボットがクルー作業を単独で代替するだけでなく、クルーと協調しながら一つのタスクを遂行する運用についても、今後の発展が求められる。これらは技術的にも高度であり、試行回数を十分に確保して技術成熟度を高めていくことが望ましいが、一方で、軌道上で実証できる機会は限られる。そのため、毎回の検証を軌道上実証に依存するのではなく、地上で反復的に試行しながら技術課題を比較・改善できる枠組みがあると有用である。

3. RoboCup による人協調ロボティクス技術の蓄積

自律移動型ロボットを対象とした世界的な大会である RoboCup は、単なる競技ではなく、非構造化に近い環境でロボットを比較・改善するためのベンチマークとして機能してきた実績がある [6]。例えば、RoboCup@Home は、家庭環境におけるサービスロボットの実現を目標として 2006 年に開始された競技であり、ロボットが人と同じ空間で移動し、対話し、物体を認識・操作し、複数のサブシステムを統合してタスクを遂行する能力を評価してきた。同競技では、屋内ナビゲーション、人物追従、物体認識、音声対話、モバイルマニピュレーションなどが継続的に試験され、ROS を中心とするソフトウェア基盤、RGB-D センサを用いた認識、深層学習に基づく物体・人物認識、タスク計画などが実システムとして統合されてきた。近年では、RoboCup@Home のチーム報告において、音声指示理解、タスク計画、認識、移動、操作を一つのロボットシステムとして動作させることの

重要性が示されている [7]。また、2024 年の競技では、オープン語彙の物体セグメンテーションや基盤モデルを用いた自然言語理解・計画が導入され、未知物体や柔軟な指示への対応も進みつつある [8]。

これらの技術蓄積は、宇宙船内クルー支援と多くの対応関係を持つ。たとえば、RoboCup@Home における物体認識や探索は、船内での機材・工具・実験用品の探索や確認に対応する。音声対話や自然言語理解は、クルーが手を離せない状況での手順確認、記録指示、地上管制との情報共有を支援しうる。屋内ナビゲーションや人物追従は、船内の巡回、撮影位置への移動、クルーとの衝突回避といった機能に対応する。モバイルマニピュレーションは、物品搬送、準備・片付け、簡単な保守作業の代替に発展しうる。2 章で述べたように、ISS/JEM のクルータスクには、実験準備、物品搬送、撮影、点検、情報提示など、クルーの作業文脈を理解しながら認識、移動、対話、操作を組み合わせて支援すべき補助作業が多く含まれる。この点で、地上サービスロボット競技で扱われてきた人協調タスクには、宇宙船内におけるクルー支援と親和性の高い技術が多く含まれている。

一方で、地上で培われた技術を宇宙船内へ転用するためには、ISS のような閉鎖的な微小重力環境に固有の制約を考慮する必要がある。微小重力環境では、ロボットの移動方式、物体操作時に発生する反力、浮遊物体の運動などが地上とは大きく異なる。地上の車輪移動ロボットで成熟した SLAM や経路計画は、環境認識やタスク計画の考え方としては転用しやすい。しかし、推進系、ドッキング、位置保持、安全停止を含む運動制御については、宇宙船内ロボットに固有の検証が必要である。また、船内では安全性に対する要求が高く、ロボットはクルーの作業動線や避難経路を妨げず、周辺の装置を壊さないような安全設計が求められる。さらに、ロボットの運用そのものがクルーによる準備、監視、復旧作業を頻繁に必要とする場合には、クルータイム削減という本来の導入目的と矛盾することになる。また、通信遅延や地上支援の制約を考えると、単なる遠隔操作ではなく、適切な水準での自律的な動作も求められる。

以上より、RoboCup@Home などの地上ロボット競技で蓄積されてきた技術は、宇宙船内クルー支援ロボットの基盤技術として有用である。一方で、これらの技術を本格的に宇宙応用へ展開するためには、宇宙船内環境での運用という特殊性を評価に組み込んだ、新たな技術蓄積の枠組みが必要である。

4. RoboCup JapanOpen @Space Challenge を通じた宇宙船内アプリケーションへの展開

近年、宇宙分野における人協調ロボティクス技術の発展をロボット競技を通じて促進する新たな取り組みとして、RoboCup JapanOpen @Space Challenge が新設された [9]。第 1 回の競技は 2026 年 4 月に実施され、ISS 船内ロボット Int-Ball2 を想定した Gazebo シミュレータを用いて、宇宙ステーション船内を自律的に点検・確認するミッションが設定された。具体的には図 1 に示すように、ドッキングステーションから指定位置までの自律移動、クルーのような浮遊物体を障害物に見立てた

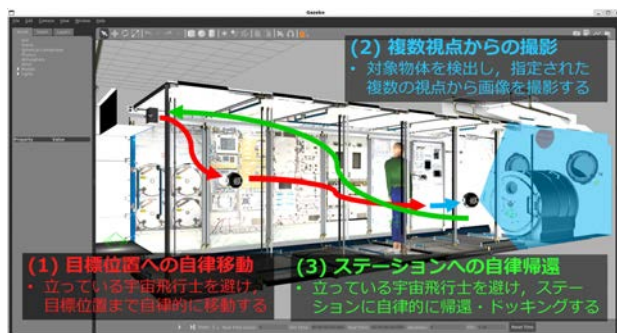


図1 RoboCup JapanOpen @Space Challenge 第1回大会の競技タスク概要

回避、対象物体の撮影、ドッキングステーションへの自律帰還といった一連のタスクが競技課題として設定された。第1回競技で用いられた Int-Ball2 の Gazebo シミュレータは、JEM 船内のマップが組み込まれており、また Int-Ball2 のダイナミクスや船内気流といった外乱が模擬されている。また、地上支援装置を含む運用ツールも組み込まれており、Int-Ball2 の実際の運用に近い条件下で競技を行うことができる。宇宙ロボットでは軌道上での試行錯誤が容易ではないため、シミュレータは地上で反復的に検証を行うための重要な手段である。実際に第1回競技では、指定地点への移動、障害物回避、対象物撮影、帰還・ドッキングという一連のミッションをシミュレータ上で実施することにより、宇宙船内アプリケーションを想定した競技が成立することが確認された。

第1回競技を通じて、宇宙船内人協調ロボティクスのうち、地上ロボット競技によって技術蓄積しやすい領域と、実環境での検証が不可欠な領域を切り分けて議論する必要性が明確になった。地上ロボット競技を通じて技術蓄積を進めやすいのは、宇宙船内の個別の物理条件を完全に再現しなくても、宇宙適用に向けた設計やアルゴリズムの改善を進められる機能であると考えられる。具体的には、ミッションを複数の状態に分解して実行するタスク計画、撮影対象を検出して視点を調整する認識・誘導機能、障害物や進入禁止領域を考慮した経路計画、異常時に停止・帰還・再計画を選択するリカバリ処理などである。これらの技術は、推進系や接触条件の詳細に強く依存するというよりも、作業手順、センサ入力、自己位置、目標位置、障害物配置、成功条件をどのように扱うかに依存する。そのため、共通シミュレータ上で条件を変えながら反復的に試行することで、宇宙船内アプリケーションに転用しやすいロバストな自律機能として成熟させやすい。撮影支援のように「所定の位置へ移動し、対象を確認し、記録を取得し、安全に待機状態へ戻る」という作業手順を明確化できるタスクは、このような技術蓄積に向いている。

一方で、宇宙船内の実環境への依存が支配的な技術は、シミュレータ競技のみで妥当性を評価することが難しい。実環境では、推進系の個体差やカメラ特性などの機体システムに起因する不確実性に加え、照明条件やクルーの予測しにくい動作など、外部環境に由来する不確かさが存在する。これらを Int-Ball2 シミュレータ上で

厳密に再現することは難しく、シミュレータ上で高い性能を示した手法が、軌道上でも同等に機能するとは限らない。たとえば、推進系の詳細設計、接触を伴うドッキング機構、熱・電力・通信を含む機体システムの成立性、実センサの画質や照明条件に対する性能は、競技を通じた比較だけでは十分に判断できない可能性がある。このような技術は、共通競技課題として抽象化して扱うよりも、対象とする機体、ミッション条件、運用環境を具体的に定めたいうで、従来の宇宙開発プロセスに基づく解析、地上試験、軌道上実証によって検証する必要がある。

以上の議論を踏まえて、地上競技を通じた技術蓄積に適した領域と、対象機体や実環境を定めて別途検証すべき領域を表1に整理する。本表は、宇宙ロボット競技の中で扱うべき技術を単に列挙するのではなく、宇宙船内クルー支援に必要な技術のうち、どの部分が地上競技による反復的な比較・改善に向いているかを記載したものである。宇宙転用が比較的容易と考えられるのは、物体認識、音声対話、タスク計画、状態提示など、センサ情報とソフトウェア処理を中心とする技術である。これらは船内特有の機材名や手順書に適應する必要はあるものの、地上の模擬環境でも多くを検証できる。一方、移動、位置保持、操作、搬送のうち、推進系の実特性、接触時の反力、対象物や機体の機械設計に強く依存する部分は、シミュレータ競技のみでは評価できる範囲が限られる。これらは競技課題として抽象化できる部分を含むものの、最終的な妥当性は、対象機体と運用条件を定めた地上試験や軌道上実証によって確認する必要がある。ただし、これは地上競技が物理システムに関する技術蓄積に寄与できないことを意味しない。第1回競技はシミュレーション環境で実施されたが、今後、実機を用いた競技へ拡張できれば、センサ特性、機体応答、ユーザインタフェース、運用手順などを含めて、軌道上実環境との乖離を一部低減できる可能性がある。宇宙船内の人協調ロボティクスにおいても、音声指示、状態提示、クルー動線を考慮した移動、模擬機材に対する簡易操作など、地上かつ実機で検証可能な範囲を競技課題として設計する余地がある。

このように、RoboCup JapanOpen @Space Challenge は、すべての宇宙船内ロボット技術を地上で完成させる場ではなく、共通条件で比較できる統合タスクを明確化し、競技を通じて技術蓄積すべき領域と、個別の宇宙機開発として検証すべき領域を整理する場として位置づけられる。したがって本ロボット競技は、認識、対話、計画、ユーザインタフェース、安全確認、タスク統合といった地上検証可能な技術のTRL向上に寄与すると考えられる。さらに、クルータイム削減という応用目標を競技評価に組み込むことで、単なる技術性能ではなく、実際に船内作業を支援・代替する価値を持つアプリケーションの探索にもつながる。

5. 結論と将来展望

本稿では、宇宙船内クルー支援ロボットの現状と課題を整理し、RoboCup に代表されるロボット競技を通じた技術蓄積を、宇宙船内人協調ロボティクスへ展開する可能性について述べた。宇宙ステーションにおいて、クルーと協調した作業遂行などを継続的に支援する技術は発展途上にあり、地上で反復的に試行しながら技術蓄積

表 1 ロボット競技を通じて技術蓄積が可能な領域の分類

技術要素	船内クルー支援での用途	競技を通じて蓄積される技術	別途検証が必要な残課題
物体・環境認識	機材, 工具, 実験用品, 表示器の確認	船内機材や表示状態を認識し, 必要な視点を選んで確認・記録するアルゴリズム	実センサの画質, 照明条件, 反射, 遮蔽に対する性能確認
音声対話	手順確認, 記録指示理解	指示を理解し, 作業状態や失敗理由をクルーへ伝える対話設計	船内騒音, 通信遅延, クルーの個人差を含む運用環境での確認
タスク計画・リカバリ	実験準備, 点検, 撮影, 報告の手順支援	作業手順を状態遷移として実行し, 未達成時に停止・帰還・再計画を選択する管理機能	実際の運用規則, 地上管制との役割分担, クルー判断を含む手順妥当性
移動・位置保持	巡回, 撮影位置への移動, 障害物回避	進入禁止領域や浮遊障害物を考慮し, 目的位置まで安全に移動する経路計画	推進系の実特性, 微小重力下の位置保持, 機体応答, 接触時の安全性
操作・搬送	物品搬送, 準備・片付け, 簡単な保守支援	模擬機材を対象とした作業順序決定, 受け渡し, 簡易操作の統合手順	反力, 固定方法, 対象物の質量特性, 機構設計に依存する成立性
意図理解・状況説明	曖昧な依頼への対応, 作業影響の確認, 不確実性を含む報告	曖昧な指示を解釈し, 必要に応じて確認質問を行い, 判断根拠や不確実性を説明する対話・報告機能	クルーの信頼形成, 説明粒度の妥当性, 実運用での心理的・認知的負荷への影響評価
安全・運用設計	クルー作業を妨げない支援, 運用負荷低減	緊急停止, 状態提示, クルー介入要求などを含む人協調運用の設計	有人宇宙システムとしての安全要求, 故障時運用, 実ミッションでの許容性

を行っていくことが有用である。

地上サービスロボット競技は、人との対話、物体認識、屋内移動、タスク計画、システム統合を共通課題として扱い、技術を継続的に比較・改善する場として機能してきた。これらの技術には、船内での機材探索、手順確認、撮影支援、点検、記録支援など、宇宙船内クルー支援と親和性の高い要素が多く含まれる。ただし、宇宙船内では微小重力、浮遊移動、接触時の反力、安全運用、限られたクルータイムといった制約が加わるため、地上サービスロボットの課題をそのまま移植するだけでは不十分である。

RoboCup JapanOpen @Space Challenge は、宇宙船内アプリケーションを想定したロボット競技を継続的に実施することで、宇宙船内人協調ロボティクスの技術蓄積を促進することを目指している。第 1 回競技を通じて、地上ロボット競技によって技術蓄積を進めやすい領域と、個別の宇宙機開発として検証すべき領域を区別して議論する必要性も明らかになった。特に、認識、対話、タスク計画、状態提示、安全確認、タスク統合といった技術は、船内環境を模擬した地上競技を通じて反復的に比較・改善する意義が大きい。一方で、推進系の実特性、接触を伴う機構、実センサ条件へのロバスト性など、実環境への依存が大きい技術については、対象機体とミッション条件を定めた解析、地上試験、軌道上実証によって妥当性を確認する必要がある。

第 2 回以降の競技では、このような技術をコンパニオンロボティクスの観点から統合的に評価するタスクも検討されている。例えば、クルーから実験前に必要な器具の保管状態を確認し、事前準備が必要そうな場合は知らせてほしい、といった曖昧性を含む指示を受けたロボットが、必要に応じて対象物や判断基準に関する確認質問を行い、器具の状態を確認したうえで結果をクルーに説明するようなタスクが考えられる。このような課題は、単なる移動や撮影の成否だけでなく、曖昧な自然言語指示の解釈、確認対話、状況に応じた安全判断、根拠と不確実性を含む報告、クルー作業を妨げない振る舞いを評価できるため、宇宙船内コンパニオンロボットに必要な能力を競技化するのに向いている。RoboCup JapanOpen @Space Challenge の活動を今後も継続していくことで、地上サービスロボット研究と宇宙実証の間をつなぐ継続的な技術蓄積の場となり、宇宙船内における人協調ロボティクスの実用化に向けた議論と技術開発が進むことが期待される。

参 考 文 献

[1] S. P. Yamaguchi, R. Itakura and T. Inagaki: "ISS/JEM crew-task analysis to support astronauts with intra-vehicular robotics," Proc. of 32nd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), Busan, Korea, 2023.

[2] S. P. Yamaguchi et al.: "Int-Ball2: ISS JEM Internal Camera Robot with Increased Degree of Autonomy - Design and Initial Checkout," Proc. of 2024 International Conference on Space Robotics (iSpaRo), Luxembourg, 2024.

[3] T. Eisenberg et al.: "CIMON – A mobile artificial intelligent crew mate for the ISS," Proc. of 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 October 2018.

[4] S. P. Yamaguchi et al.: "ICHIBAN – Int-Ball2 and CIMON Hovering Intelligences Building first AI Network in the ISS," Proc. of 76th International Astronautical Congress (IAC), Sydney, Australia, 2025.

[5] M. A. Diftler et al.: "Robonaut 2 - The first humanoid robot in space," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011.

[6] M. Matamoros et al.: "RoboCup@Home: Summarizing achievements in over eleven years of competition," Proc. of IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, Torres Vedras, Portugal, 2018.

[7] R. Shah et al.: "Solving service robot tasks: UT Austin Villa@ Home 2019 team report." arXiv preprint arXiv:1909.06529, 2019.

[8] R. Memmesheimer, et al.: "RoboCup@ Home 2024 OPL winner NimbRo: Anthropomorphic service robots using foundation models for perception and planning," Robot World Cup. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 515-527.

[9] 萩原 良信 他: "RoboCup JapanOpen @Space Challenge の構想 - ISS 船内を模倣した自律ロボット競技の提案 -, " 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, 11I-03, 2025.