

RoboCup JapanOpen 2026 @Space Challenge における 宇宙 AI ロボットベンチマークの設計と実施

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

This paper presents the RoboCup JapanOpen @Space Challenge, a competition-based benchmark for intelligent space robotics motivated by ISS operational needs. The first competition used JAXA's free-flying robot Int-Ball2 and its open-source Gazebo simulator, requiring teams to perform autonomous object search through the same interface used in actual operations. We report the competition design, first-year results, technical bottlenecks, and a roadmap toward deployment in the space environment.

1. はじめに

大規模言語モデル (LLM) や視覚言語モデル (VLM), ロボット基盤モデル (VLA) 等の AI 技術の登場により, 自律的に行動する知能ロボティクス技術が急速に発展している. 宇宙分野においても, 宇宙開発の主体が国家主導から民間事業者へと拡大する中, 今後は, 環境や目的の変化に対応可能な, より汎用的かつ柔軟な自律ロボットシステムが必要になると考えられる.

一方で, 宇宙分野におけるロボティクス技術の活用は, 通信遅延, 限られた計算資源, 高い安全性・信頼性要求といった制約により, 現在も古典的な制御手法や限定的な自律機能が中心である. また, これまでの宇宙ミッションの多くは, このような制約もあり, 事前に定義された環境, 対象, 運用手順に基づいて設計されてきた. そのため, 汎用的かつ柔軟な自律システムを前提とした新たなミッション構想や運用概念は, いまだ十分に具体化されていない.

このような状況に対して, 宇宙における知能ロボティクス技術を実運用へ接続していくためには, 宇宙環境での実証に先立ち, 自律機能の有効性や限界を継続的かつ再現可能に評価できる共通基盤が重要となる.

地上の知能ロボティクス分野では, 技術やデータセットのオープン化, およびベンチマーク環境の整備を通じて, 研究成果の比較, 継承, 改善が進められてきた. その一例として, 競技形式による AI 技術のベンチマーク構築と発展を目的とした競技会である RoboCup[1] が挙げられる. RoboCup は, 未だ実現していない技術・タスク遂行を目標に, Soccer, Rescue, @Home, Industrial など, 様々なドメインにおける知能ロボティクスのベンチマークを定義するとともに, アカデミアや事業者を中心とした研究コミュニティおよび開発エコシステムの形成に寄与し, 知能ロボティクス研究の発展に貢献してきた.

宇宙ロボティクス分野においても, JAXA と NASA が教育目的で開催した「きぼうロボットプログラミング競技会 (Kibo-RPC) [2]」や, NASA の「Space Robotics Challenge (SRC) [3]」など, 競技形式による取り組みが行われてきた. 一方で, Kibo-RPC は既に実現できている技術・タスクで学生を主な対象とした教育的取り組みであり, SRC は特定の宇宙探査シナリオに基づく技術開発型チャレンジとしての性格が強い.

地上の知能ロボティクス分野で発展してきた技術を宇宙での知能ロボティクス研究の加速へとつなげた



図1 @Space Challenge での地上技術の宇宙応用

めには, 宇宙分野においても, 研究者を主体とした継続的なベンチマーク環境を整備し, 研究コミュニティ全体で利用可能な共通基盤を構築することが求められる.

そこで, 宇宙における知能ロボティクスのベンチマーク環境を整備し, 研究コミュニティおよび開発エコシステムの形成を促す共通基盤の構築を目的として, ロボカップ日本委員会を中心に, RoboCup JapanOpen @Space Challenge を設計した [4, 5, 6]. @Space Challenge では, 宇宙ロボットに求められる認識, 判断, 移動, 操作, 対話等の要素技術を統合した AI システムを評価対象とし, 実運用ニーズに基づくタスクを競技化することで, 地上の知能ロボティクス技術の宇宙応用や技術の比較, 蓄積, 発展を促すことを目指す (図 1).

第 1 回競技では, 国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟で運用されている JAXA の船内ドローン Int-Ball2[7] を基盤とし, 有人環境における汎用支援タスクを対象とした競技会を実施した. ISS 船内のような有人宇宙環境は, 人との協調, 環境変動, 作業内容の多様性を含むため, 汎用 AI ロボットシステムの評価対象として適している. また, Int-Ball2 は, 既に軌道上で運用実績を有する Free-Flying ロボットであり, ユーザープログラミング機能を通じて外部利用者による技術実証が可能なプラットフォームでもある. 今回は実際に地上検証 [8] で使用されており, JAXA でオープンソース化した, Int-Ball2 のフライトソフトウェアと Gazebo シミュレータ [9] を共通評価プラットフォームとして採用した.

本稿では, RoboCup JapanOpen @Space Challenge の設計思想, 競技課題, 評価方法, および第 1 回競技の実施結果について述べる. また, 競技を通じて得ら

れた知見をもとに、地上知能ロボティクス技術の宇宙適用の可能性や課題を整理する。さらに、宇宙 AI ロボティクスにおけるベンチマーク形成、オープンな研究コミュニティの構築、および将来的な軌道上実証・実運用への接続可能性について議論する。

2. @Space Challenge 設計思想

RoboCup JapanOpen @Space Challenge は、宇宙環境における知能ロボティクスの開発・評価を目的とした競技として、RoboCup[1] および生活空間を対象とした RoboCup@Home[10, 11] の知見を踏まえ、宇宙運用における条件を反映した競技を設計した。本競技は、各要素技術を統合した自律システムとして、実運用ニーズに基づくタスク遂行を評価する。単に、地上ロボット競技を宇宙環境に置き換えるものではなく、安全性、実運用との接続性、継続的な評価可能性、参加者間の比較可能性、および将来的な宇宙環境での実証の可能性を考慮した宇宙における知能ロボティクスのベンチマーク構築を目指す。この考え方に基づき、以下の設計コンセプトを定めた。

第一に、宇宙運用に対する物理的忠実性を重視する。例えば、微小重力環境では、ロボットが構造物に把持または接触していない限り Free-Flying 状態となり、地上移動ロボットとは異なる運動特性を示す。そのため、宇宙特有の物理的な挙動などを評価環境に反映することが重要である。

第二に、実運用を想定した自律性を重視する。宇宙環境では、通信制約や宇宙飛行士のワークロードなどにより、リアルタイムの人間介入が困難な場合がある。そのため、本競技では、実際のミッションで想定されるインターフェースを通じてタスク指示を与え、実行するまでの一連の過程を自律的に遂行することを求める。

第三に、ベンチマーキングフレームワークの拡張可能性を確保する。宇宙ロボットに求められる能力は多岐にわたるため、単一の固定タスクに閉じるのではなく、技術成熟度に応じて評価対象を段階的に拡張できる構成とする。将来的には、より複雑タスクや、宇宙環境での実証へと発展させることを目指す。

第四に、多様な研究アプローチの比較可能性を確保する。競技におけるロボット API と採点基準を除き、アルゴリズムや実装方法は可能な限り規定せず、各参加者が研究背景に基づく自律スタックを自由に構築できる設計とする。これにより、共通の評価環境のもとで、異なる手法の性能や特徴を比較可能にする。

最後に、本競技は、宇宙ロボティクスと地上ロボティクスを接続する学際的な研究基盤として機能することを目指す。地上の知能ロボティクス分野で蓄積された知見を宇宙ドメインへ展開するとともに、宇宙固有の課題を共有する場を提供することで、宇宙における知能ロボティクス研究の発展を促進する。

3. 競技プラットフォームとタスク設計

第 1 回競技では、国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」日本実験棟で運用されている JAXA の船内ロボット Int-Ball2[7] を基盤とし、有人支援を対象とした競技を実施した。Int-Ball2 は、図 2 に示すように、8 基の小型プロペラにより、3 自由度の位置・姿勢の制御

を可能としている。正面に撮影用のメインカメラ、側面に自己位置推定用のステレオカメラを搭載している。競技プラットフォームには、実際の Int-Ball2 で用いられているフライトソフトウェアと、地上試験で用いられている Gazebo シミュレータ [9] を共通の評価環境とする。参加チームは、ISS の運用で用いられている地上支援装置 GSE (Ground Support Equipment) を介してユーザプログラムを実行し、実機と同一のインタフェースで Int-Ball2 を制御する。競技結果は自動採点プログラムにより評価し、公平かつ再現性の高い比較を実現する。

ここで、図 3 に、競技概要を示す。本競技では、宇宙飛行士の限られた作業時間の効率化を目的として、実験機器や設備の探索と状態確認の代替を想定したタスクを設定した。ロボットは自然言語によるタスク指示に従って、ドッキングステーションから自律的に出発し、船内に滞在する宇宙飛行士を回避しながら目的地へ移動する。目的地では指示された対象物を探索し、所定の条件を満たす画像の取得後、ドッキングステーションへ帰還する。本タスクでは、微小重力環境における自律移動、障害物回避、物体認識、物体探索、タスクプランニング・管理、安全性を重点的に評価する。

タスク指示は、ロボットに自然言語で与えられる。ロボットは、その指示を理解し、自身のスキルセットと組み合わせてタスクプランニングと一連のタスクを自律的に実行する必要がある。これにより、低レベルの制御や既知のタスクだけでなく、汎用性を持った自律システムとしての性能を評価する。

競技環境には、宇宙飛行士が滞在しており、ロボットは宇宙飛行士を避けて移動する必要がある。難易度調整のため、人数および配置が異なる 3 種類のステージを設定し、ステージが進むにつれて難易度と得点が高くなるようにした。各チームはこれらのステージに対して 2 回のトライアルを行う。不正防止の観点から、各ステージの配置はトライアルごとに変更し、競技開始まで非公開とした。ただし、配置条件は全チームで共通とした。競技得点は、各ステージにおける 2 回のトライアルのうち最良値を採用し、その合計点により評価した。また、ISS 船内で求められる安全性を考慮し、宇宙飛行士との安全距離を維持して移動できた場合には加点を与える。この際、減点はできたタスクの評価ができなくなることから行わないものとしている。

撮影対象の物体には、既知と未知の双方を含める。既知物体には PC やテーブルなどの一般的な物体に加え、エアロックや CTB (Cargo Transfer Bag) など ISS 特有の物体を含める。これらは学習済みの一般的な画像認識モデルや VLM では認識が容易でない場合があり、宇宙環境に特化した認識能力の評価に有用である。特に CTB は、番号やラベルによる個体識別を必要としており、物体認識に加えて文字認識能力も求められる。これらは事前に情報が公開される。ただし、限定された環境への過度なチューニングを防ぐために、事前に情報を公開しない未知物体を導入し、汎用的な認識・タスク遂行能力を評価する。

これらの一連の競技環境、タスク仕様、サンプルプログラム、評価手法はオープンソースとして公開している [12]。これにより、参加チームは共通環境で事前検



図2 Int-Ball2のハードウェア構成

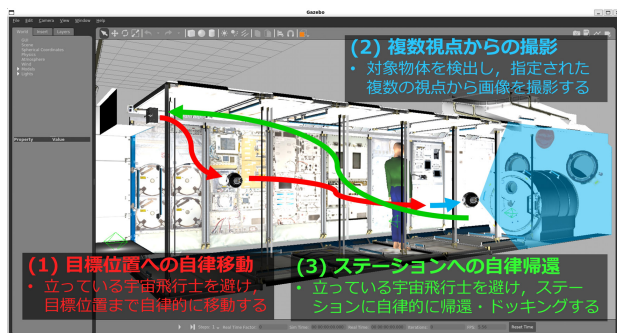


図3 @Space Challengeの競技概要



図4 @Space Challengeの競技の様子

証を行えるだけでなく、競技後も研究成果の再現、改良、比較が可能となる。このようなオープンな競技基盤は、宇宙AIロボティクス分野における研究コミュニティの形成と継続的なベンチマークの発展に寄与する。これらの詳細なソースやルール、配点は、公式Webサイトに掲載している[6]。

4. 第1回@Space Challenge 競技結果

@Space Challengeの第1回競技会を、RoboCup Japan Open 2026で実施した。ここで、図4に競技の様子を示す。図4左側が自動採点システムの結果で、中央が実際の競技画面、右下がGSEとなっている。参加者は、主に大学、大学院生を中心としたチームが参加した。多くのチームはRoboCup@Homeへの参加経験を有し、認識、判断、移動、対話を含む自律システムに関する技術を蓄積していた。一方で、宇宙関連研究室からの参加もあり、さらに最終参加には至らなかったものの、宇宙ロボット研究室や宇宙開発企業・スタートアップから仮登録や問い合わせが寄せられ、宇宙ロ

ボティクス分野における新たな研究コミュニティ形成への関心が確認された。

第1回@Space Challengeの競技結果を表1に示す。競技結果では、基本機能の実装にとどまったチームと、認識、判断、移動、撮影、報告等の複数機能を統合したチームとの差が明確に現れた。特に、高難度のステージ3で得点差が拡大した。また、トライアル間で同じ条件での厳密な比較はできないものの、同一チーム内でもトライアル間で得点変動したことから、統合システムの安定性および再現性の重要性が示された。さらに、多くのチームでトライアル2の得点が向上し、本競技が改善と学習を促す枠組みとして機能し得ることも示唆された。

チームBは両トライアルを通じて最も高い性能を示し、トライアル2では470点を獲得した。同チームは、Int-Ball2正面の単眼カメラ画像にDepth Anything V2[13]を適用して深度を推定し、3次元点群へ変換することで障害物回避を実現した。障害物検出には正面カメラを用い、自己位置推定には側面ステレオカメラを用いることで、自己位置推定に適したオプティカルフローの確保と障害物回避を両立している。単眼カメラより生成した点群を事前構築したISS船内の3Dマップ（OctoMap）と照合し、静的障害物と動的障害物を分類したうえで、デュアルEDTコストを用いた3次元A*経路計画を実行した。静的・動的障害物に異なる重みを与えることで「壁には近づけるが、人からは十分離れる」経路を生成し、高い安全性を実現していた。単眼カメラのみを用いた深度推定と経路計画により、既存AIモデルを宇宙船内ロボットへ応用した好例となった。

チームCも比較的安定した性能を示し、トライアル2では367点を獲得した。同チームは計算リソースの削減を狙い、経路計画を用いず、ステートマシンによるミッション管理と反応的障害物回避を組み合わせた構成を採用した。また、宇宙飛行士の検出にはHSV彩度フィルタを用い、バウンディングボックス高さから距離を推定することで、深層学習等を用いず軽量な処理を実現した。このような計算コストの軽量性を重視した設計であった一方、高難度ステージではチームBとの差が生じ、複雑なタスクにおける統合性能が順位差につながったと考えられる。

また、得点上位のチームBおよびチームCはいずれもRoboCup@Homeへの参加経験を有しており、このことは、地上の智能ロボティクス技術が宇宙システムの性能向上に寄与し得ることを、少なくともシミュレーション環境において示唆している。

チームDおよびチームEは、トライアル1では低得点であったものの、トライアル2では大幅な改善を示した。特にチームDは、トライアル1でGSEからのユーザプログラム起動に失敗して0点となったが、問題を修正しトライアル2では260点を獲得した。この結果は、競技環境への適応やデバッグによって短期間で性能向上が可能であることを示す一方、トライアル間の得点変動は、宇宙ロボットに求められる安定性と再現性の重要性を改めて示した。なお、最終的には全チームが、実際の軌道上運用と同様のシステム構成でユーザプログラムを実行し、Int-Ball2の動作に成功した。

一方、第1回競技を通じて、未知物体への対応、CTB

表 1 第 1 回@Space Challenge 競技結果

チーム番号	トライアル 1				トライアル 2				競技得点	順位
	ステージ 1	ステージ 2	ステージ 3	合計	ステージ 1	ステージ 2	ステージ 3	合計		
チーム A	30/120	110/180	70/200	210/500	30/120	30/180	100/200	160/500	240/500	4
チーム B	80/120	138/180 ●	129/200	347/500	100/120	177/180 ●	193/200 ●	470/500	470/500	1
チーム C	75/120	105/180	40/200	220/500	97/120	130/180 ●	140/200	367/500	367/500	2
チーム D	0/120	0/180	0/200	0/500	80/120	140/180 ●	40/200	260/500	260/500	3
チーム E	10/120	10/180	0/200	20/500	80/120	30/180	130/200	240/500	240/500	4

● は、往路・復路の双方において安全距離を維持したことによる加点が付与された競技を示す。

の ID 識別，自然言語理解，外乱下での安定的な自律移動などの課題も明らかとなった。また，LLM や VLM を安全要求の高い宇宙ロボットへどのように安定して統合するかも重要な課題である。さらに，安全ボーナスを設けていたが，Int-Ball2 が宇宙飛行士や壁面に衝突する事例も確認されており，外乱への耐性，頑健な自己位置推定，正確な障害物検出などを考慮した，より安全性を考慮した評価手法の重要性が示唆された。

これらの結果は，@Space Challenge が宇宙 AI ロボティクスにおける共通ベンチマークとして有効であることを示すとともに，今後の競技設計および研究開発に向けた重要な知見を提供するものである。

5. まとめ

本稿では，宇宙環境における知能ロボティクス技術の継続的評価と研究コミュニティ形成を目的として，RoboCup JapanOpen @Space Challenge を提案し，第 1 回競技を実施した。第 1 回競技では，JAXA の船内ドローン Int-Ball2 およびその Gazebo シミュレータを共通評価プラットフォームとして用い，微小重力環境における自律移動，障害物回避，物体認識，物体探索，タスクプランニング・管理，安全性を重点的に評価するタスクを設定した。その結果，複数の参加チームが実運用に近い GSE 環境上でユーザプログラムを実行し，自律タスクを遂行できることを確認した。また，地上の知能ロボティクス技術を宇宙応用した事例が高い得点を得ていることも確認できた。これは，宇宙ロボットを対象とした競技形式のベンチマークが，地上ロボティクスとの接点ともなり，少なくともシミュレーション環境において成立し得ることを示すものである。

一方で，第 1 回競技を通じて，技術的ボトルネックが抽出された。特に，宇宙特有物体のインスタンス識別・文字情報読み取りを含む認識能力，外乱への耐性，頑健な自己位置推定，安全なシステム設計，システム統合能力，および AI 技術を高い安全要求タスクへ接続する手法である。とりわけ，トライアル間の得点変動が大きかったことは，個別機能の実装以上に統合システムの再現性・安定性が重要であることを示している。一方で，多くのチームがトライアル 2 で得点を向上させたことは，本競技が評価にとどまらず，競技を通じた改善・学習のサイクルを促す枠組みとして機能し得ることを示唆する。競技設計としても，ステージ 1 で広い参加可能性を確保しつつ，ステージ 3 でチーム間の差が明確に現れており，初回として適切な難易度であったと考えられる。

本競技はシミュレータを基盤とするため，運動・センサ・外乱・照明・対象物モデルには実機および軌道上環境との差が残る。競技結果を実運用性能の指標として扱うには，自己位置推定や制御の誤差，認識率，計算負荷などをシミュレータと地上実機試験の間で比較し，Sim-to-real ギャップを定量化する枠組みが必要である。第 1 回のシミュレータ競技を起点として，第 2 回以降は，空気浮上定盤を用いた地上実機試験へと展開し，最終的には軌道上実証および軌道上競技へ発展させる段階的な研究開発プラットフォームとして位置づけている。この連続性は，研究の出口として軌道上実証を見据えられる点において本競技固有の特徴であり，地上で培われた知能ロボティクス技術を，シミュレーション，地上実機試験，軌道上実証へ段階的に接続するための研究開発基盤となり得る。

参 考 文 献

[1] Hiroaki Kitano, *et al.*, “RoboCup: The Robot World Cup Initiative“, *International Conference on Autonomous Agents*, 1997.

[2] JAXA, “Kibo Robot Programming Challenge“, <https://jaxa.krpc.jp/ja> 参照 2026 年 7 月 6 日.

[3] NASA, “NASA Space Robotics Challenge“, <https://techport.nasa.gov/projects/18490> 参照 2026 年 7 月 6 日.

[4] 萩原 良信 他, “RoboCup JapanOpen @Space Challenge の構想“, *RSJ2025*, 2025.

[5] 池田 勇輝 他, “ISS 船内ロボット Int-Ball2 による技術実証と RoboCup@Space への展開“, *RSJ2025*, 2025.

[6] ロボカップ日本委員会, “RoboCup JapanOpen @Space Challenge“, <https://robocupatspacejp.github.io> 参照 2026 年 7 月 6 日.

[7] 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.

[8] T. Nishishita, *et al.*, “Complementary Ground Testing Method for Autonomous Flight System of Space Free-Flying Robot“, *AeroConf*, 2024.

[9] JAXA, “int-ball2.simulator“, https://github.com/jaxa/int-ball2_simulator 参照 2026 年 7 月 6 日.

[10] 大森 隆司 他, “RoboCup@home 生活支援ロボットのベンチマークとしてのロボット競技“, *RSJ2010*, 2010.

[11] 岡田 浩之 他, “ロボカップ@ホーム: 人とロボットの共存を目指して“, *JSAI*, 2010.

[12] RoboCup JapanOpen @Space Challenge 実行委員会, “RoboCup JapanOpen @Space Challenge GitHub“, <https://github.com/RoboCupAtSpaceJP> 参照 2026 年 7 月 6 日.

[13] L. Yang, *et al.*, “Depth Anything V2“, *NeurIPS*, 2024.