

スターダストプログラム 「宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発」 成果報告

委託事業者：GITAI Japan株式会社

令和6年6月28日

第29回衛星開発・実証小委員会

1. 研究の背景・目的

- 衛星の寿命延長（修理・推進力付与）等のための「軌道上サービス」は、今後、世界的に需要が拡大する可能性があり、諸外国でも検討が進められている。
- 宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術はその中核をなす要素技術であり、我が国が培ってきた遠隔・自律制御技術による強みを活かすことが期待される分野。また、アルテミス計画に伴う月面での探査・拠点建設活動や、地上技術としての波及も期待される。
- 各国とも、自律制御での船外実証等を含めた技術確立には至っておらず、我が国が世界に先んじて確立していくことで、国際標準の主導や、国際競争において重要な地位を占めていくことが必要。

【技術開発項目】

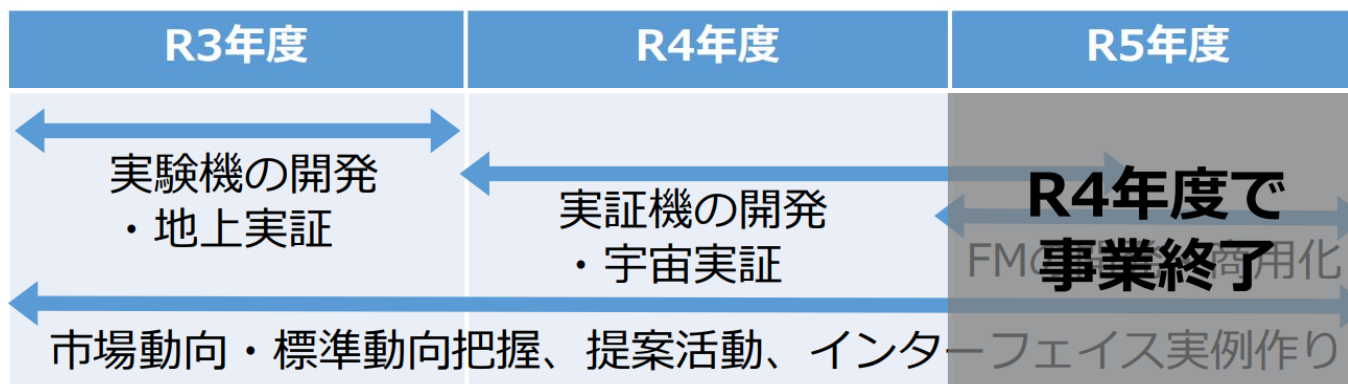
本プロジェクトでは、複数種類の複雑な作業を自律的に遂行できる宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術を開発する。当該技術には以下の要素技術を含む。

- ① 複数の複雑な作業を遂行可能な自由度及び手先位置精度を持つロボットアーム・ハンド技術
- ② 低性能な宇宙用計算機上で、精密な認識・位置推定を踏まえたリアルタイムでのモーションプランニングを可能とする自律制御技術
- ③ 複数の複雑な作業に対応するため、ロボット手先の転換を可能とするインターフェイス技術

2. 実施項目

令和3年度に地上実証を実施し、令和4年度から実証機を開発、令和5年度に宇宙実証を行う計画。スターダストプログラムの委託事業としては令和4年度で終了。

委託事業終了後の事業者による宇宙実証の取組み状況については後述の通り。



R3年度

- ・汎用作業ロボットアーム・ハンドの用件定義、試作、地上実証
- ・高度かつ低負荷な自律制御技術の開発、試作
- ・ロボット手先の変換を可能とするインターフェイス技術の開発、試作

R4年度

- ・汎用作業ロボットアーム・ハンドの宇宙環境対応モデルの開発、環境試験
- ・高度かつ低負荷な自律制御技術の宇宙環境対応モデルの開発、環境試験
- ・ロボット手先の変換を可能とするインターフェイス技術の宇宙環境対応モデルの開発、環境試験

3. 実施結果（サマリ）

① 汎用作業ロボットアーム・ハンド技術

宇宙空間で汎用的な作業が可能なロボットアームおよびハンドの宇宙曝露環境対応モデルを開発/製造/試験し、宇宙環境に対応しうることを確認した。（右下に仕様を示す。）

② 高度かつ低負荷な自律制御技術

高度かつ低負荷な自律制御技術を宇宙ロボットで実現するため、COTS品を利用した高性能・高信頼冗長計算機選定とそれに基づいた計算機システムの構築、環境耐性の確認を行い、宇宙環境に対応しうることを確認した。

③ ロボット手先の変換を可能とするインタフェース技術

宇宙環境で動作可能なハンドを含むインタフェースおよびそこに組み込まれたカメラシステムを開発し、また、ツールチェンジャとして、スクレュードライバーツールを開発し、宇宙曝露環境対応モデルを用いた地上での実証を完了した。

④ 世界の技術トレンド調査

米国政府機関やその機関から選定された企業と密にネットワークを回り、動向調査を実施した。その結果、海外においても軌道上サービス技術の軸は、本事業の目的である衛星の寿命延長（修理・推進力付与）等のための「汎用性」であり、かつ、実用性の観点で「迅速かつ安価な開発」が求められていると結論づけた。

基本性能	自由度数	7 DOFs
	重量	40kg
	寸法	1.5m (エアロックのサイズ制約による)
	消費電力	60W (待機時) 200W (最大)
センサ	6軸力センサ	Fx Fy Fz ±1,000N Mx My Mz ±50Nm
環境試験	温度	-40~80 °C (保管) -20~60 °C (動作)
	真空	1.0*10 ⁽⁻⁵⁾ Pa
	放射線 (SEE)	OCP回路等の実装
	放射線 (TID)	50krad (地球低軌道で15年の寿命)

4. 実施結果（詳細）

R3年度実施分

- 4.1 汎用作業ロボットアーム・ハンドの要件定義、試作、地上実証
- 4.2 高度かつ低負荷な自律制御技術の開発、試作
- 4.3 ロボット手先の変換を可能とするインタフェース技術の開発、試作

R4年度実施分

- 4.4 汎用作業ロボットアーム・ハンドの宇宙環境対応モデルの開発、環境試験
- 4.5 高度かつ低負荷な自律制御技術の宇宙環境対応モデルの開発、環境試験
- 4.6 ロボット手先の変換を可能とするインタフェース技術の宇宙環境対応モデルの開発、環境試験

4. 実施結果（詳細）

4.1 汎用作業ロボットアーム・ハンドの要件定義、試作、地上実証

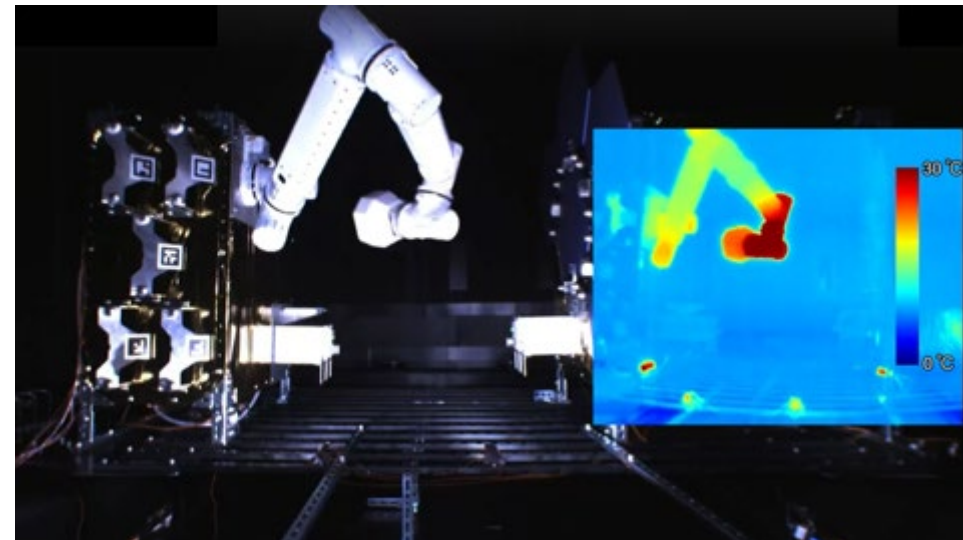
軌道上サービスでロボットに期待される多種多様な作業に対応できるように、以下のアプローチによってロボットアームを設計、開発した。

- 1) 冗長自由度など設計マージンを持たせる。
- 2) コンポーネントのモジュール化を行う。
- 3) 地上での作業性能実証を行う。

これらを踏まえてロボットアームに求められる要件を下表のとおり定めた。

基本性能	自由度数	7 DOFs
	重量	40kg
	寸法	1.5m (エアロックのサイズ制約による)
消費電力		60W (待機時)
		200W (最大)
センサ	6軸力センサ	Fx Fy Fz ±1,000N Mx My Mz ±50Nm
環境試験	温度	-40~80 °C (保管) -20~60 °C (動作)
	真空	1.0*10 ⁻⁵ Pa
	放射線 (SEE)	OCP回路等の実装
	放射線 (TID)	50krad (地球低軌道で15年の寿命)

地上実証については、宇宙航空研究開発機構（JAXA）筑波宇宙センターの8mφスペースチャンバを利用した宇宙環境試験において、宇宙性能と汎用作業性能を確認した。試験は常温熱真空の条件で行い、10⁻²Paまで減圧した。



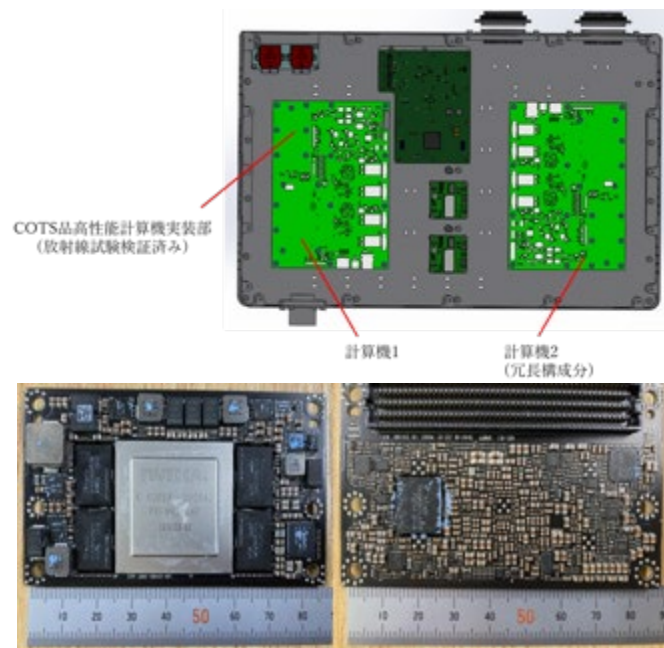
4. 実施結果（詳細）

4.2 高度かつ低負荷な自律制御技術の開発、試作

宇宙用として信頼性の高い計算機は計算性能が低く、ロボットのモーションプランニング（動作計画）や認識処理を実行することは難しい。

そこで、本開発では産業用組み込み計算機は過酷な環境での動作を想定して設計・製造されているため、宇宙用計算機としての転用が可能であろうと考え、自動運転車向けに開発されている高信頼なCOTS組み込み計算機であるNVIDIA社製のJetson TX2iを利用することとした。加えて、この計算機を複数冗長に組み合わせることで信頼性をより高めた計算機システムを構築した。

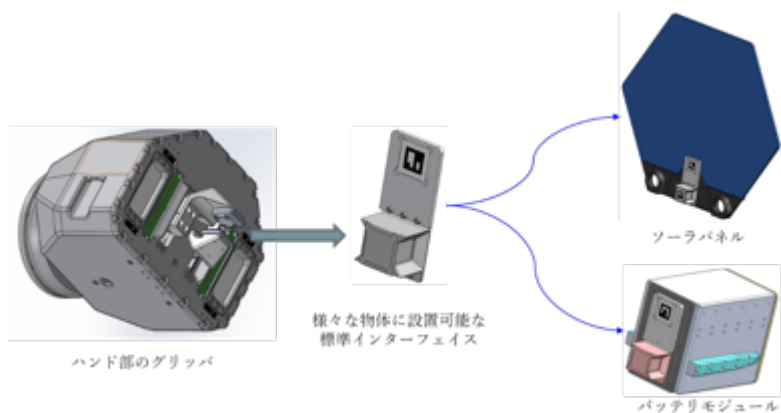
本事業ではこの概念設計を実装することで、信頼性を確保しつつ、比較的安価で性能の良い宇宙ロボット用の冗長計算機システムを開発した。



4.3 ロボット手先の変換を可能とするインターフェース技術の開発、試作

インターフェースの機能のひとつであるロック機構（開閉機構）をハンドに統合することで簡易な構成を実現している。このハンドによって把持されるシンプルなインターフェイスとして、30mm角のマーカを備えた標準インターフェイスを設計した。なお、このインターフェイスは機械的な接続（把持）に特化しており、電気や通信のインターフェイスは備えていない。

ソーラーパネルやバッテリーにこの標準インターフェイスを設置し、ハンドのグリッパによって把持することで作業が可能になる。実際にスペースチャンバにおける統合試験ではこのインターフェイスを用いて汎用的な自律作業を実施した。



4. 実施結果（詳細）

4.4 汎用作業ロボットアーム・ハンドの宇宙環境対応モデルの開発、試験

令和3年度に開発したプロトタイプモデルの耐宇宙環境面での技術成熟化、ISS安全要求への対応など、実際の打上および宇宙空間での運用に特化した設計を各種数値解析およびコンポーネントレベルでの試作を繰り返し進めた。成果として、令和4年度に曝露環境対応モデルであるEMの製造を完了（右下）し、コンポーネントレベルでの環境試験による対宇宙環境評価の完了（左下）、および一部システム試験を完了した。

また、宇宙空間/ISSでの運用時の安全面の要求を設計に反映するため、外注先であるNanoRacks社から安全審査等のコンサルティングを受けつつ、設計レベルでNASAから承認を得た。



4. 実施結果（詳細）

4.5 高度かつ低負荷な自律制御技術の宇宙環境対応モデルの開発、試験

自律制御システム全体の成熟度の向上として、自律制御ソフトウェアの機能向上および、外部インターフェースの設計（ISSや衛星とのIF）、地上システムインターフェースの設計などを実施した。

システムとしてのコンセプトは“Supervised Autonomous Operation”であり、特徴は以下である。これにより、自律性を持ちながらも安全性に配慮したシステムとなっている。

- ロボット制御はすべて軌道上のロボットによる
- 最終的なGO/NOGOは地上オペレーターが実施。

また、ソフトウェアとしての特徴は以下である。

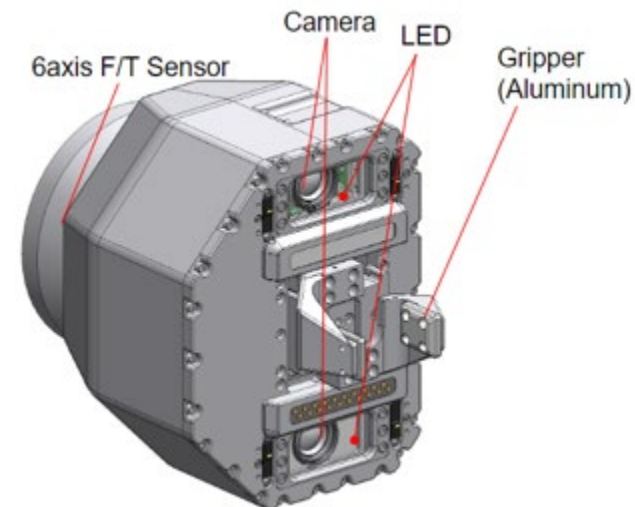
- Fully-redundant pilot & co-pilot computers on orbit
- Ultra low latency video streaming
- Reliable data communication on low-fidelity network
- Real Time logging & diagnostics framework

4.6 ロボット手先の変換を可能とするインターフェース技術の宇宙環境対応モデルの開発、試験

令和3年度は試作モデルとして開発したロボットハンド単体として、振動試験等を実施して、単体としての環境耐性を確認した。一方、ハンドはその単体で動作することはなく、把持する物体やツールチェンジャとインターフェースして機能するものであるため、令和4年度は組み合わせ状態で環境/機能試験を実施することで、技術成熟度の向上を測った。

試験の一例として、ハンドとツールチェンジャが想定される最も大きな温度差において、ハンドとツールチェンジャのIFの結合/分離を繰り返す試験を実施した。この試験において、宇宙環境で懸念される固着/摩耗の影響評価や、ハンドとツールチェンジャの電氣的IF部分の耐久性を評価した。

結果として、既定の環境条件に対して、ハンドによるツールチェンジャの結合ができ、機能を維持できることを確認した。



5. 委託事業終了後の宇宙実証に向けた取り組み状況

- 宇宙実証用モデルは、NASAの安全審査全フェーズを通過し、シグナス補給船（NG-20）に搭載され 2024年1月30日に米国フロリダ州のケープカナベラル空軍基地から打ち上げられた。
- その後、国際宇宙ステーション（ISS）到着後、BishopエアロックからISS船外に搬出され、宇宙曝露環境での実証を開始した。
- 2024年3月19日に、計画していたロボット実証タスクの全てを完遂し、地上における宇宙模擬環境だけではなく、実際の宇宙環境下においてもロボットが正常に稼働し、タスクを遂行できることを確認した。
- 以降は、信頼性確認のための耐久試験を継続しているが、大きな問題も発生しておらず、順調に実績を構築している。

