

第 18 章 「きぼう」 ロボットアームの開発成果

1. 序論

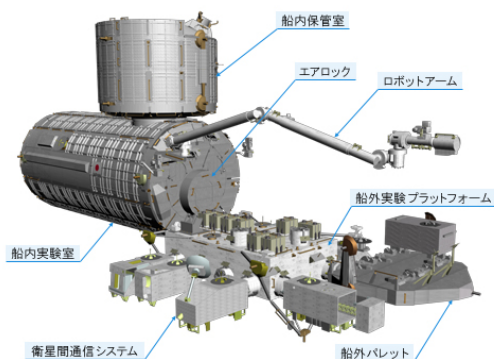
国際宇宙ステーションに取付けられた「きぼう」ロボットアームは主な作業としてペイロードの船外実験プラットフォームへの取付け・交換を実施する。1990 年に基本設計を開始したロボットアームは、2008 年にスペースシャトルのフライト STS-123 と STS-124 で親アームとロボットアーム操作卓が打上げられ、打上げ時の親アームの荷重を支えていた保持解放機構から軌道上で解放され、無事展開した。その後軌道上初期チェックアウトを実施しアーム各部の機能の確認を行った。2009 年 7 月にスペースシャトルのフライト STS-127 で ICS-EF (Inter-orbit Communication System Exposed Facility)、SEDA-AP (Space Environment Data Acquisition Attached Payload) と MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) の 3 ペイロードが打上げられ、親アームで船外実験プラットフォームに成功裏に取付けられた。

およそ 20 年に亘るロボットアーム開発の中で制御、構造・機構、熱、ソフトウェア、地上試験、操作性、安全性、保全性等の分野で成果が得られた。それらの成果について、軌道上での運用状況も含め報告する。

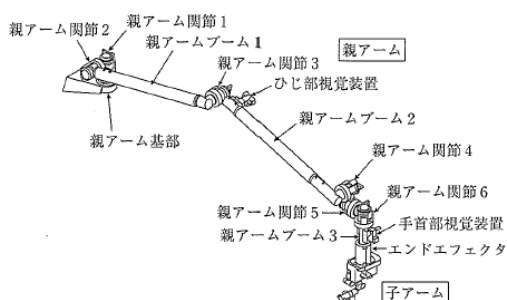
2. 構成・諸元

「きぼう」(全体構成を第 1 図に示す) のロボットアームは第 2 図に示すように、ペイ

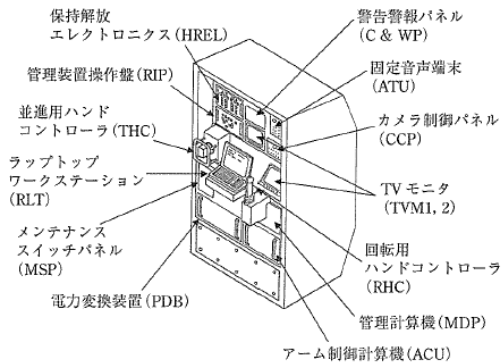
ロードと「きぼう」の要素のハンドリングを行う親アームと船外実験プラットフォームの ORU (Orbital Replacement Unit) 交換等の精密作業を行う子アームから構成される。宇宙飛行士は船内実験室に設置された第 3 図に示すロボットアーム操作卓からアームの操作を行う。



第 1 図 「きぼう」全体構成



第 2 図 親アームと子アーム



第 3 図 ロボットアーム操作卓構成

親アームは 6 自由度のマニピュレータであり、伸展状態の長さは約 10m、質量は約 780kg である。アーム先端の最大速度は質量 600kg 以下のペイロード把持時、並進 60mm/s、回転 2.5deg/s である。

子アームも 6 自由度のマニピュレータであり、伸展状態の長さは約 2m、質量は約 180kg で、第 4 図に示すように運用時には親アームの先端に把持される。アーム先端の最大速度は、質量 80kg 以下のペイロード把持時、並進 50mm/s、回転 7.5deg/s 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。また、安全上の要求から、ロボットアーム操作卓のコンポーネントが故障した場合にでも、そのバックアップとして親アームのオペレーションが行なえるように、第 5 図に示すような BDS (Backup Drive System) がロボットアームの構成品として搭載されている。軌道上での操作卓周りの様子を第 6 図に示す。

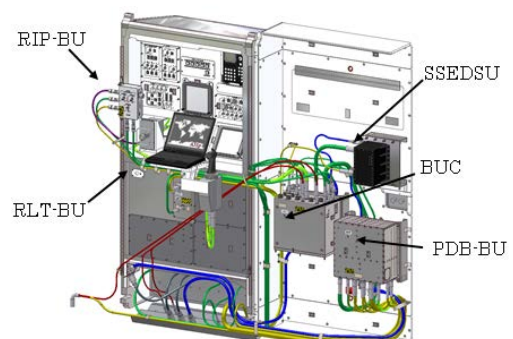
3. 開発成果

有人宇宙ロボットとして「きぼう」のロボットアームの開発成果を宇宙ロボットに共

通するものと、有人宇宙ロボット特有のものの観点から以下に紹介する。



第 4 図 親アームに把持される子アーム



第 5 図 BDS



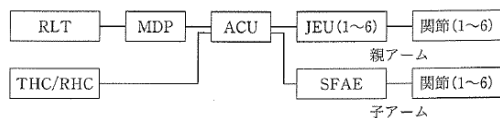
第 6 図 軌道上でのロボットアーム操作卓

3.1 宇宙ロボットに共通する開発成果

(1) 柔軟なマニピュレータの制御設計の実証

親アームの関節は、DC ブラシレスモータ、不思議遊星歯車を用いた減速機、モータ軸角度計測用レゾルバ（制御用センサ）と、冗長系を有する減速機出力軸角度計測用光学式エンコーダ（モニタ用センサ）から構成される。主として関節の減速機に起因するねじり剛性と大きな慣性モーメントのため、柔軟なマニピュレータとしての設計上の考慮が必要となる。

各関節の角度と角速度は、各関節に搭載されている関節制御エレクトロニクス（JEU : Joint Electronics Unit）により制御される。管理計算機（MDP : Management Data Processor）からの指令に従いアーム制御計算機（ACU : Arm Control Unit）は、アーム先端軌道と逆キネマティクスを計算し、各関節の指令値を JEU に送信する。制御系統図を第 7 図に示す。



第 7 図 制御系統図

JEU 角度制御系の設計フェーズの解析では、関節のねじり剛性を含む 2 自由度線形モデルで実施し、安定性と制御バンド幅及びゲイン余有と位相余有が目標値を満足していることを確認した。その後、JEU と ACU の制御系を含む多自由度非線形モデルで、関節の非線形性、ブームの柔軟性と各関節の統合を考慮した詳細な動解析を実施し、制御系の成立性を確認した。

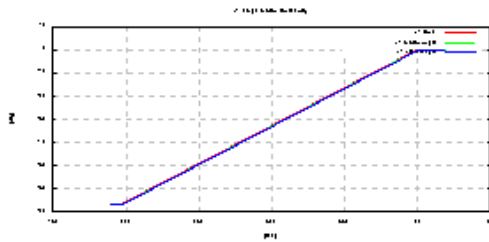
地上において、親アームを軌道上コンフィギュレーションで動作させるのは、重力の影響により困難である。その為、第 8 図に示すように、地上試験では親アームを重力の影響を補償する空気ベアリングで浮上させた治具で支持し、定盤上で二次元動作をさせ機能性能試験を実施した。その結果を用いて、親アームの数学モデルの評価を実施した。地上試験で確認できない軌道上での三次元動作は、試験結果を反映させた数学モデルを用いた解析で検証した。



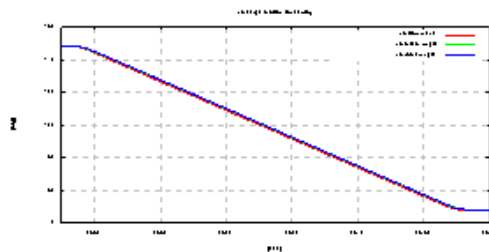
第 8 図 定盤上での
試験コンフィギュレーション

軌道上での初期展開運用とその後の軌道上チェックアウトで親アームは正常に動作したことから、柔軟マニピュレータの制御設計について、開発における検証も含めて確立したことを実証することができた。

なお、第 9 図、第 10 図に初期展開時の関節の駆動結果を示す。



第 9 図 初期展開時の関節駆動（肩 Yaw）



第 10 図 初期展開時の関節駆動（肘関節）

（2）宇宙ロボット用関節の実証

親アームの関節は軽量・高剛性でガタの小さい機構・構造となっていて、真空環境で動作させるため機構部には二硫化モリブデン焼成被膜による固体潤滑が施されている。

寿命試験により関節は要求値の 2 倍の寿命を有することが確認されている。関節は単体の機器レベルと親アームに組み込んだシステムレベルの地上試験で検証された。軌道上での初期展開運用とその後の軌道上チェックアウトで親アームは正常に動作しており、宇宙ロボット用関節の軌道上での実証がなされている。なお、寿命については、今後の軌道上運用で評価される。

（3）CFRP ブームの実証

伸展時の長さ約 10m で位置決め性能要求が厳しい親アームの構造設計では、軽量・高剛性で軌道上での熱変形を小さくするため 3 本のブームのうち、長い 2 本に炭素繊維強

化複合材（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics）のチューブを採用した。CFRP ブームは単体と親アームに組み込んだシステムレベルの地上試験で検証された。

無事に打上げの荷重に耐え、親アームの軌道上での動作は正常であり、CFRP ブームを用いた構造設計の妥当性が軌道上で実証された。

軌道上で展開した親アームの様子を第 11 図に示す。



第 11 図 軌道上での親アーム

（4）熱制御の実証

厳しい軌道上の熱環境に耐えるために、親アームの放熱面には銀蒸着テフロンが、断熱面には MLI（Multi-Layer Insulation）が装着されている。また、保温のために冗長系のヒータが実装されている。

熱設計は、熱平衡試験で評価した熱数学モデルを用いた熱解析で検証されている。親アームも軌道上に設置され 3 年以上が経過しているが、熱制御設計の妥当性は既の実証されており、親アーム各部の温度は各機器の許容温度範囲に保たれている。

3.2 有人宇宙ロボット特有の開発成果

(1) 操作性設計の実証

宇宙飛行士が操作・モニタするコンソールの機器の配置は、宇宙ステーションの標準に従い設計し、モックアップを製作して操作性の評価を実施した。宇宙飛行士の訓練を効率化するために、シャトルのロボットアーム（SRMS：Shuttle Remote Manipulator System）と宇宙ステーションのロボットアーム（SSRMS：Space Station Remote Manipulator System）との操作の共通化が要望された。機器レベルの共通化として、エンドエフェクタは SRMS エンドエフェクタをベースに宇宙ステーション用に変更した機器を、並進用／回転用ハンドコントローラ、ラップトップワークステーション(RLT)、警告警報パネルと固定音声端末は宇宙ステーションの共通品を使用している。操作の共通化の為、RLT に表示する画面の内容・形式、アームの制御モード、操作上使用する座標系の定義等、NASA 側と設計の調整を実施した。

地上試験での操作性評価の総仕上げとして第 12 図と第 13 図に示すように、HIL（Human-in-the-Loop）試験を実施し、操作性の評価を実施した。HIL 試験は宇宙飛行士がロボットアームのフライトハードウェアを定盤上で二次元動作させることにより実施した。

軌道上でのロボットアームの操作性設計の妥当性は、今までの軌道上運用で実証されている。



第 12 図 HIL（Human-in-the-Loop）
試験#1の様子



第 13 図 HIL（Human-in-the-Loop）
試験#2の様子

(2) 保全性

親アームの関節機構部、JEU、エンドエフェクタと視覚装置は ORU 化されており、宇宙飛行士の船外活動（EVA：Extravehicular Activity）により交換することで保全可能な設計となっている。コンソールの各機器も ORU 化されており、宇宙飛行士の船内活動（IVA：Intravehicular Activity）により交換することで、保全可能な設計となっている。

保全性設計は 1G 試験、水中試験等の地上試験で評価されている。幸い、軌道上での保全作業はまだ実施されてはいない。

(3) 安全性設計

ロボットアームは、宇宙ステーションとスペースシャトルの安全要求に従い設計/開発が行なわれた。従って、ロボットアームは、宇宙飛行士の生命を脅かす危険と宇宙ステーションの損失に至る危険に対しては、二重の故障が発生してもそれらを回避できるように設計されている。宇宙ロボット特有の危険としては、アームの衝突と把持ペイロードの不意の放出を考慮した。

安全設計は国内の審査のみでなく NASA の安全審査でも審査が行われ、合格した。

地上試験では、安全性の制御方法を検証するためのデータを取得し、軌道上でも同等のデータを取得することで安全機能の実証を行った。また、今までの軌道上運用で安全性に係る問題は発生していない。

3.3 地上からの遠隔操作技術

(1) 概要

「きぼう」ロボットアームは、元々、地上からの支援なしに軌道上クルーにより自律的に運用できることという要求仕様の元、開発された。

2010 年 3 月に子アームのエアロックから船外への搬出を期に、船外活動なしにエアロックから装置を船外に搬出できる「きぼう」特有の機能が完成し、小型衛星放出ミッションなど、簡易曝露実験のプラットフォームとして「きぼう」ロボットアームを活用するフェーズへ移行している。

「きぼう」ロボットアームを利用するためには、クルータイムの節減が必要不可欠であり、2011 年度から地上からの遠隔操作の技術実証を実施している。

(2) 地上からの遠隔操作技術の特徴

地上からロボットアームを遠隔操作する場合、安全上特に課題となるのが、アーム

駆動に係るコマンド入力 of 安全性と、駆動中のアーム動作の監視である。

アーム駆動に係るコマンド入力の安全性確保

地上からアーム駆動コマンドを入力する場合、OCAS (Operator Commanded Auto Sequence) モードと呼ばれるアーム目標位置姿勢の値及び最大速度などのパラメータを軌道パス毎に随時送信して実行するモードを使用する。

不意のアーム動作や誤ったアーム目標位置姿勢の設定、地上から送信したパラメータの伝送パス上での意図せぬパラメータ化け等のハザードを回避するため、駆動開始には、Ready-Arm-Fire 方式と呼ばれる 3 つの独立したアクションで駆動を許可する方式を採用した。

地上からのコマンドは、以下の 3 つである。

- (1) Target Set
- (2) Confirm
- (3) Proceed

まず、“Ready” に相当する Target Set コマンドでは、目標位置姿勢などのパラメータを含むコマンドを軌道上の管理計算機に送信する。管理計算機は、受領したパラメータをバッファに格納した後、それをテレメトリとして地上に返送する。

地上は、返送されたパラメータが送信したものと同一であることを 2 人以上の地上管制要員でダブルチェックした後、“Arm” に相当する Confirm コマンドを送信する。管理計算機側は、この Confirm コマンドが入力されない限り、次の Proceed コマンドの実行を許可しない。

地上は、この Confirm コマンドの正常実行を確認した後、“fire” に相当する Proceed コマンドを送信する。管理計算機は、この

Proceed コマンドの入力により、バッファに格納したパラメータを重畳し、パラメータ付きコマンドとして、アーム制御計算機にアーム駆動のコマンドを送信、アームが駆動を開始する。

アーム動作監視による安全性確保

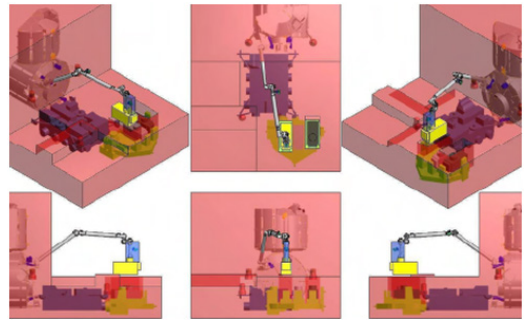
アームが近接運用と呼ばれる構造体に接近した運用をする場合には、衝突許容設計というアプローチを採用している。これは、2fail を想定した暴走時のエネルギーに対して衝突対象ペアが構造上破断に至らないことを証明するアプローチである。従って、接近運用などで暴走した場合にもクルーによる緊急停止などの反応時間が確保できないことから、構造上衝突を許容するものである。

アームを遠方運用と呼ばれる構造体から離れた位置で運用する場合には、衝突対象ペアを特定できないため、2fail を想定した暴走距離に対して十分なクリアランスを確保した軌道設計を行うアプローチを採用している。従って、遠方運用時でも安全機能としてクルーには依存しない設計としている。一方で、2FT を想定した安全設計にはクルーは介在しないものの、クルーによる監視はステーション全体の安全確保のため必要不可欠であり、ハザードレポート上も、アーム動作中は、常に訓練されたクルーが隣接構造等とのクリアランスを監視することを要求している。

地上からアームを操作する場合には、地上管制要員が軌道上クルーが行う監視と同等の監視を行うものの、テレメトリやダウンリンクビデオの時間遅れを考慮すると、クルーと等価なリアルタイム性を確保できない。

このため、第 14 図に示すように、近傍構体及びロボットアームと把持ペイロードをバーチャルな領域で包絡したエンベロープ

をソフトウェアで設定し、お互いのエンベロープの侵入を軌道上の計算機がリアルタイムで監視するという領域チェック機能によりクルー監視を代替している。

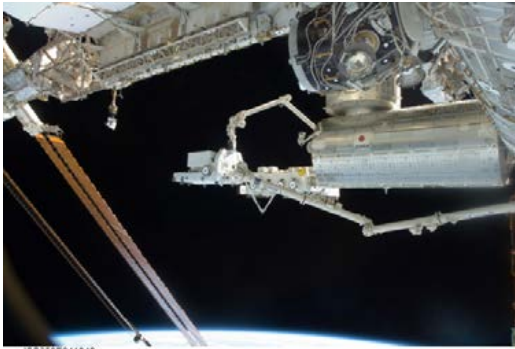


第 14 図 領域チェック機能

この領域チェック機能は、管理計算機とアーム制御計算機が冗長で実施している。また、監視のために使用するアームの関節角度情報も、異なるエンコーダセンサを用いることにより、監視の独立性を確保している。

(3) 地上からの遠隔操作技術の実証

地上からの遠隔操作技術を実証するため、まず 2011 年から 2012 年に 4 回に亘り、親アームの遠隔操作デモンストレーションを実施した。4 回のデモンストレーションでは、単関節動作から、無把持遠方での直線動作、船外実験プロットフォーム上のグラブフイルクチャ把持と段階的に実施し、最終的に、HTV3 ミッションにおいて、曝露キャリアの宇宙ステーションロボットアームへの返送を地上からの遠隔操作で実施することにより成功裏に完了した（第 15 図参照）。



第 15 図 曝露キャリアの SSRMS への返送
(写真は HTV1 のもの)

子アームについても、2012 年度に 2 回に分けて軌道上での実証を行う予定であり、地上からの遠隔操作により、ロボットアーム操作に係るクルータイムを一運用あたり、親アームで約 10 時間、子アームで 17 時間、削減可能となる。

3.4 ロボティクス運用地上システム

(1) 概要

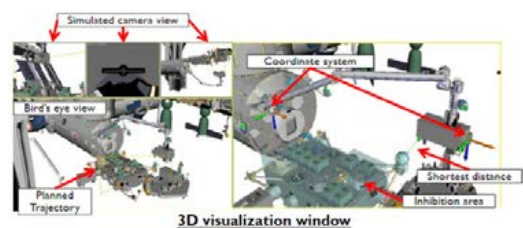
地上からの「きぼう」の運用管制は、筑波宇宙センターにある「きぼう」運用管制システム (JEMOCS) を用いて実施される。JEMOCS のテレメトリ表示は文字データ、トレンドグラフおよびビデオカメラ映像を基本としている。ロボットアームの運用管制には、上記に加えて、ロボットアームの動作姿勢や把持対象となる実験装置と周辺構造とのクリアランス等、ロボットアームの状況把握のための 3 次元グラフィックス表示が有効である。そこで、「きぼう」ロボットアームの運用支援に特化した運用管制システムとして、「きぼう」ロボティクス運用地上監視システム (ROGO: JEM Robotics Operation Ground Observatory) を開発した。ROGO は、ロボットアームを軌道上ク

ルーが運用する際の地上監視に特化され、テレメトリデータ・映像データを受信し、その 3 次元グラフィックス表示と画像処理・計測等を担う。

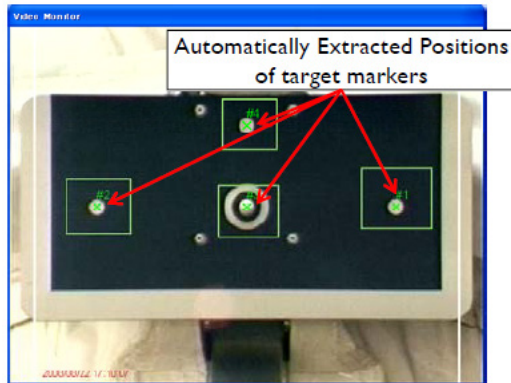
(2) 特徴

ROGO は次の特徴を有する。

- テレメトリに連動した全ロボットアーム (ISS やシャトルアームを含む) とその把持対象、周辺 ISS 形状を仮想視点あるいは ISS に搭載した任意のカメラ視点から 3 次元グラフィックスで表示 (第 16 図参照)
- ダウンリンクされるカメラ映像を用いた視覚ターゲットマーカの画像処理による測距 (第 17 図参照)
- ロボットアームに関するテレメトリとその健全性表示、および、特異点近傍等のアーム運用制約の可視化、アーム振動の有無等の運動状態の推定 (第 18 図参照)
- テレメトリ・ビデオ映像の受信・記録・再生
- 運用管制員と技術支援員の両者が利用

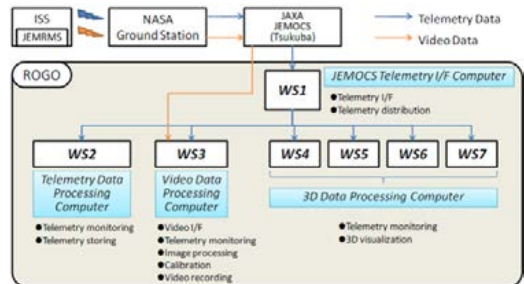


第 16 図 3 次元グラフィックス表示画面

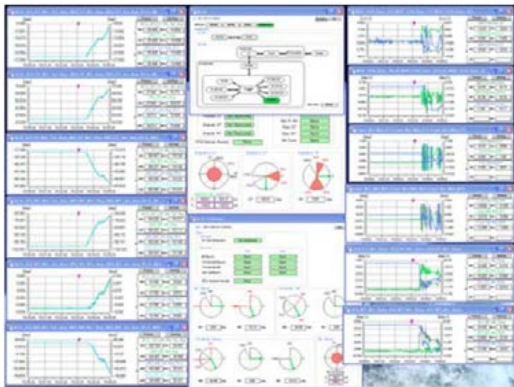


第 17 図 マーカ画像処理計測表示画面

となったどの計算機でも 1 台の待機計算機にて置き換えを可能にした。



第 19 図 ROGO の構成



第 18 図 テレメトリ表示画面

(3) 構成

ROGO は第 19 図に示すように、全 7 台の計算機から構成され、テレメトリの I/F 計算機を除く、すべての計算機で、基本機能としてテレメトリを表示するための機能を有する。アプリケーションソフトウェアには、市販ソフトウェアを採用 (3D Studio MAX (グラフィックス表示系)、LS-GMS (テレメトリ表示系)、Halcon (画像処理系)) し、構想から開発まで 2 年間の短期開発を実現した。また、計算機仕様を統一し、ソフトウェアをパッケージ化することにより、運用中に不調

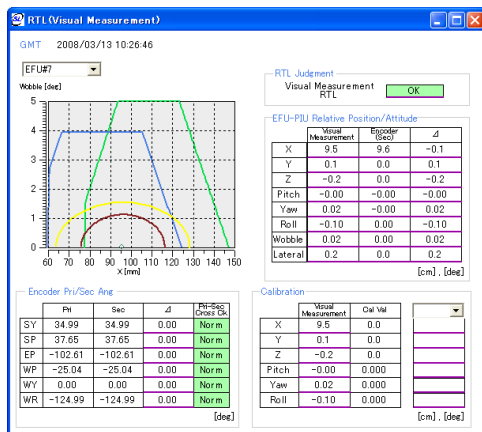
(4) 運用での ROGO 利用成果

実験装置を船外実験プラットフォームに取り付ける際には、ロボットアームによりハンドリングされた実験装置を曝露部結合機構 (EFU) の把持可能領域内に位置決め完了すると、ターゲットマーカを撮像するリストカメラのビデオ映像を利用して、結合領域内にあるかを RTL (Ready To Latch) 判定するための距離計測を行う。第 20 図に示すように、ROGO では姿勢と位置との干渉を考慮した判定基準を採用・可視化し、運用性の向上に寄与した。

また、軌道上での取付誤差等の影響を軌道上カメラでキャリブレーションした結果を ROGO のグラフィックスモデルに反映させ (第 21 図参照)、軌道上画像とダウンリンク映像を一致させ、運用者の負担を軽減した。

(5) まとめ

ROGO はロボットアーム運用や訓練で日常的に利用され、ロボットアームの地上遠隔操作等の新規の運用にも逐次対応し、運用管制員や技術支援員から要望等を取り入れながら、運用性の改善を継続している。

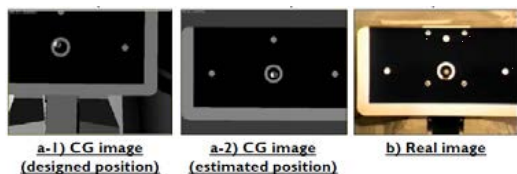


第 20 図 RTL (Ready To Latch) 判定画面

子アームは HTV#1 で 4 分割されて打上げられ、宇宙飛行士により軌道上で組立てられた。2010 年 3 月にエアロックから船外に出て、親アームで把持され、初期チェックアウトを経て、船外実験プラットフォーム上に設置されている子アーム保管装置に取付けられた。

「きぼう」ロボットアームは、日本初の実用宇宙ロボットとして、軌道上で実証された。

また、地上からの遠隔操作を実証することにより、「きぼう」ロボットアームを実験利用のプラットフォームとして活用することが期待されている。



第 21 図 軌道上キャリブレーション結果

4. まとめ

「きぼう」ロボットアームの開発成果を紹介した。今後 2J/A フライト期間中に 3 つのペイロードの船外実験プラットフォームへの取付け作業を行った。この運用の実現により「きぼう」ロボットアームの 2J/A でのミッションが達成された。

その後、親アームは、2009 年 9 月の HTV (H-II Transfer Vehicle) #1 では、SSRMS から曝露パレットを受取り、船外実験プラットフォームに取付けた。その後、曝露パレットに搭載された 2 つのペイロードを船外実験プラットフォームに取付けた。更に廃棄するため、曝露パレットを船外実験プラットフォームから取外し、SSRMS に受け渡した。