

軌道上曝露実験支援ロボティクスに関する研究

Robotics Supports for Experiments Utilizing Space Exposed Environment by Space Robotic Arms

総合技術研究本部 誘導・制御技術グループ
Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group
Institute of Aerospace Technology

澤田弘崇, 小田光茂
Hirotaka Sawada, Mitsushige Oda

Abstract : This paper deals with a robotics support of dexterous robot arms, which is supposed to substitute for extravehicular activity (EVA) of astronauts. We focus substitutional supports for space exposed experiments, and we set up an experimental test-bed for evaluation experiment on ground.

In this paper, we report results of evaluation experiments, for example, a small connector handling, and harness tracking or chasing experiments.

1. はじめに

軌道上で建設が続けられている国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験モジュール (JEM: きぼう) および、その構成機器である船外実験プラットフォーム (JEM-EF), ロボットアーム (JEMRMS) の打ち上げが来年/再来年と計画されている。EF は宇宙曝露環境を利用した日本独自の実験プラットフォームで、科学実験だけでなく、工学実験や教育のための利用など様々なユーザーによる実験が期待されている。現在、JEM では JEMRMS 以外のロボットの利用は正式には決定されていないが、我々は宇宙飛行士支援や、宇宙飛行士の代わりに曝露環境で作業をする支援ロボットの第2期利用以降での軌道上実証を目指している。

これらロボティクスによる宇宙飛行士支援/代替作業は ISS などの軌道上プラットフォーム上だけでなく、将来は軌道上サービスや惑星探査にも応用できる技術であり、様々な形態・方式が提案され研究がなされている。今後、ISS 等を利用した軌道上曝露実験は、JEM 標準実験ペイロードのような大型実験装置だけではなく、数 10cm 程度の小規模な実験に対する需要が増えると予想している。このため我々は支援/代替作業の中でも特に精細作業と呼ばれるロボットアーム手先の精細な位置・力制御を必要とする作業に着目し、地上のテストベッドを用いて検証および実験を行っている。

本稿では、この代替作業の中で具体的な例として浮遊防止のためのテザーの把持/着脱、コネクタの把持/挿抜作業をロボットアーム手先に搭載されたカメラと力覚センサを用いて実現することを検討し、地上実験テストベッドにて実証した結果について報告する。

2. 研究および開発の概要

2.1. 軌道上曝露実験支援の検討

今後の宇宙開発で予想される宇宙ロボティクス利用形態について検討し、その中で軌道上での曝露実験支援を宇宙飛行士の代替で行うためのロボティクス支援システムについて具体例を提案した。

2.2. 地上実験テストベッドシステムの製作

我々が提案するロボティクス支援システムの要素技術を地上で検証実験するためのテストベッドを構築した。

2.3. テストベッド性能評価実験

2.2で制作したテストベッドの性能評価実験として、手先位置の精細移動操作を実施し、操作精度を測定した。

2.4. 小型対象物検知およびハンドリング

2.4.1. アルゴリズム検討

我々の提案するロボティクスによる軌道上曝露実験支援の具体例として、電源/通信などのリソースラインの結合操作を挙げ、その操作に必要なハーネス検知/追従、コネクタ把持/挿入方法についてアルゴリズムを検討し、手先カメラの画像フィードバックと FT センサの力フィードバックを合わせたアルゴリズムを提案した。ここでは汎用的なコネクタである USB コネクタのハンドリングおよび挿入を例として検討し、以下を前提とした。USB コネクタおよびハーネスは地上で汎用的に用いられている物と同型とし、コネクタにはロボットハンドでハンドリングするための把持部がついている。また、ハーネス部には手先カメラで認識するための赤いカラーマーカーが一定間隔でマーキングされており、コネクタ/ソケットには相対関係を計測するための3点マーカーが固定されている。

2.4.2. アルゴリズム検証実験

2.4.1で検討したアルゴリズムの有効性を実証するために、テストベッドを用いて検証実験を行った。検証実験ではまずアルゴリズムのみを検証するために、汎用マニピュレータ PA10 の手先にテストベッドで用いるカメラと FT センサを搭載したハンドを装着し、ハーネス検知からコネクタ挿入までの一連の操作を実験により実証した。実際のテストベッドへの実装は今後の予定である。

3.成果の概要

3.1. 軌道上暴露実験支援の検討

宇宙飛行士と一緒に、もしくは代わりにロボットが軌道上での暴露実験を支援するためには、宇宙飛行士と同等かそれ以上の精細な作業を行える必要がある。このためには人間の手のようにある範囲内に納まる物であれば対象物の形状によらず把持することができ、目標の位置まで微細な位置／力制御ができる技術が重要である。また、軌道上でロボットによる暴露実験支援を行う場合には宇宙飛行士への負担を最小限にするために、地上から遠隔操作できるということも重要であるが、どちらにせよ時間遅れなどの問題があるためある程度自律的にタスクを達成することができ、安全もロボット自身かもしくはシステム内で自律的に監視し危険回避できることが理想である。

Fig1に示す図はJEM-EFを利用してこれらの自律作業／監視を実現し、ロボティクス支援のみで暴露実験を行うためのシステム検討をしたイメージ図である。

我々の提案するシステムは、精細作業可能な複数の小型ロボットアームがプラットフォーム上で暴露実験装置の運搬／設置／操作／資料取替などの作業を行い、プラットフォーム全体を監視するもモニタカメラやアーム自身が持つカメラやFTセンサなどを組み合わせて自律的に作業や安全を監視することで、クルーリソースを最小限にすることができるシステムである。

このロボットシステムを実現するためには、(1)安全監視方法（アーム搭載カメラおよび外部監視カメラ、外界センサなどによる協調監視技術）、(2)地上から遠隔運用、自律運用技術、(3)各ロボットの自己位置／姿勢同定技術、(4)不確定対象物のハンドリング技術、など様々な解決すべき技術課題があり、将来は宇宙構造物の建設／メンテナンス、惑星探査ロボットなどに直接応用できることが可能であると考えている。

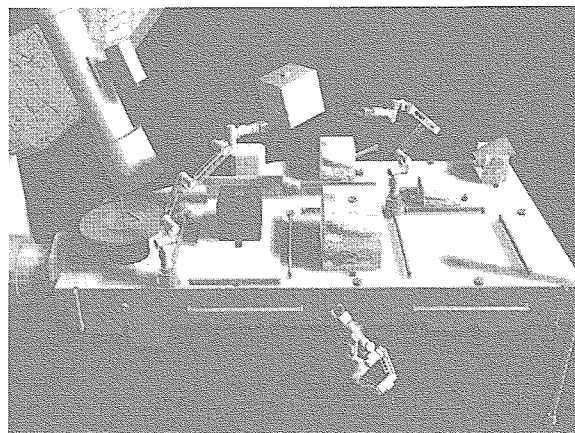


Fig1 Overview of Exposed Experiments Support Robotics

3.2. 地上実験テストベッドシステムの製作

3.1.で検討したロボットシステムの要素技術を地上で検証および評価するための実験テストベッドを製作した。概観をFig2に示す。主な構成機器は、ロボットアーム2本、ハンドレール・模擬ペイロードなどの環境模擬機器、外部監視カメラ、模擬実験装置、手先カメラ・レーザーセンサなど各種測定機器、制御計算機およびエア型の重力キャンセラである。アームは7自由度で関節配置は根元からRoll-Yaw-Pitch-Pitch-Pitch-Yaw-Rollとなっている。これはSSRMSと同じ自由度配置になっており、人間の手と同じ動きができるため軌道上で宇宙飛行士の代わりに作業させるためには作業計画や緊急時の作業変更等を直感的に考えることができるため有効である。アームの全長は約1.2m(根元ハンド除く)であり、重量はエンドエフェクタ(E.E.)を含めても10kg以下と非常に軽量に作られている。

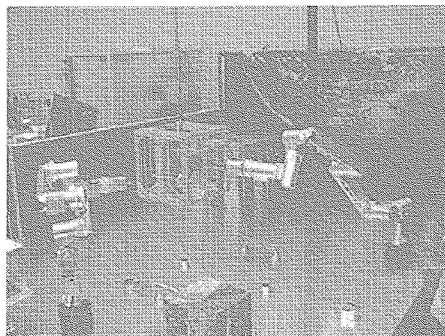


Fig2 Overview of Robot Test-bed

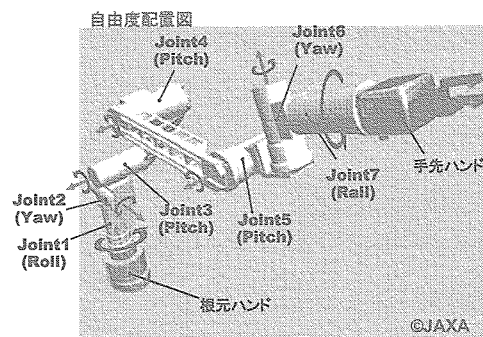


Fig3 DOF of Dexterous Robot Arm

EEはFig4に示すように開閉式の2指ハンドの先端に爪を3本固定し、手先カメラと、手首の位置に6軸のカトルクセンサ(FIS)が搭載されている。また、アームの制御はメインのコンピュータによって各関節に組み込まれたモータドライバを介して分散型に行う。外界センサとしては、Fig5に示すように外部監視カメラ、長距離レーザー変位センサ（分解能0.5mm）および近距離レーザー変位センサ（分解能25μm）構成されている。

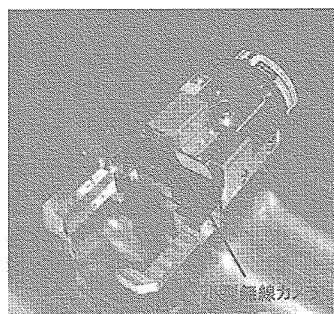


Fig4 End-Effector

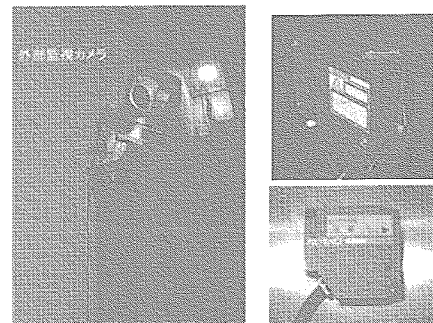


Fig5 Monitor Camera and Laser Sensor

3.3. テストベッド性能評価実験

制作したテストベッドの性能評価実験の例として、Fig6に示すようなある基準姿勢において手先の位置を微小変位させた場合の位置制御精度について計測した。微小変位操作の方法は基準姿勢からX,Y,Z各方向に1mmずつ10mm併進移動させた。このときの移動速度を1mm/secと0.5mm/secの2通りで実験し、指令した位置とレーザー変位センサによって計測された初期位置からの相対位置変位を計測して比較した。

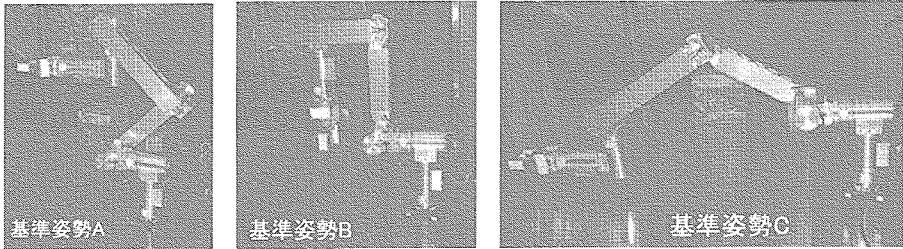


Fig.6 Initial Postures of Micro-Translation Experiment

各基準姿勢の実験結果を Table1にまとめる。この値は移動中の経路誤差を含まず、目標位置での平均誤差である。地上実験であるため、重力の影響を受け、基準姿勢と動作方向によって誤差の大きさが異なり、経路誤差が一番大きくなったのはアームを縮めて手先を根元付近にもってきた基準姿勢 Bにおいて Y方向に動かした場合、最大で1mmを超えている。しかしながら移動後の目標位置での誤差は十分問題ない値であると考えられる。傾向としては0.5deg/secでゆっくり動かした場合の方が、位置誤差が小さくなっている。

今回は関節への指令値を計算する際に設計図面ベースでの寸法を用いたため、組み立て精度による寸法誤差が手先位置誤差の大きな原因と考えることができる。それらを考慮すると約0.1mmの誤差は十分小さい値であると考えられ、我々の目指す精細作業のための位置制御精度は十分に達成できていると見なすことができる。

Table 1 Experimental Result

基準姿勢	A		B		C	
移動速度[mm/s]	1	0.5	1	0.5	1	0.5
X平均偏差[mm]	0.18	0.15	0.06	0.04	0.09	0.08
Y平均偏差[mm]	0.04	0.09	0.17	0.13	0.4	0.13
Z平均偏差[mm]	0.18	0.08	0.11	0.12	0.11	0.18

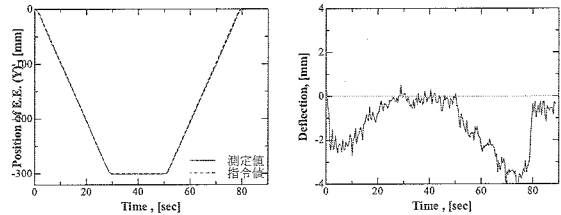


Fig.7 Translation Experiment (Y axis)

次に微小変位ではなく比較的長い距離を直線移動させた場合の実験結果例について示す。Fig7に示すグラフは基準姿勢 Aから Y方向に-10mm/secで-300mmまで直線移動させた場合の Y方向の誤差である。移動中の経路誤差が行きで約2mm、帰りで最大約4mmと大きくなっているが、これはアームやアームが固定されているベースの剛性などの影響が大きいのと考えられる。目標位置では誤差が数百μmと微小変位実験と同様、十分な精度が出ているといえる。

3.4. 小型対象物検知およびハンドリング

3.4.1. 挿入アルゴリズム検討

本テストベッドのロボットアームは7DOFの冗長自由度のため、実際の作業では手先に速度指令を与え、分解速度制御によってアームを操作した。画像フィードバックと力フィードバックを用いてUSBコネクタをソケットに挿入するためのアルゴリズムについて示す。

まず、手先カメラによってソケットとの相対位置/姿勢を計測し、目標位置/姿勢 r_d を決定する。現在位置/姿勢 r より、手先への速度指令

$$v_d = v_{lim} \frac{r_d - r}{\|r_d - r\|} \tag{1}$$

を決定する。

次に操作力リミット F_{liml} を設定し、この操作力を超えないように手先指令にフィードバックをかける。

Fig7に示すように、手先に力が加わった場合には、その力を軽減する方向に速度補正を行う。速度補正項 v'_{d1} は2次関数で記述式(2)のようにする。

$$v'_{d1} = (2F_{liml}^{-1}F - 1)^2 \quad \text{if } (F_i \geq 1/2F_{liml}) \tag{2}$$

ただし、補正によって速度リミットを超えないように

$$v'_{d1} = -2v_{lim} \quad \text{if } (v'_{d1} \leq -2v_{lim}) \tag{3}$$

とし、手先の速度指令に足し合わせる。

$$v_d += v'_{d1} \tag{4}$$

ここで、操作力のリミットは実際に人間がUSBコネクタを挿入する場合の力プロファイルを取得し、それを基に併進挿入方向 20N、垂直方向 2N、回転方向は 1Nm とそれぞれ設定した。上記の速度補正によって、負荷がリミット値を超えた場合には速度が逆転し、前述した人間の挿入時のように手先を左右に動かしながら挿入という操作を実現することができる。

しかしながら、USBコネクタのように挿入時のクリアランスが非常に厳しい場合、Fig9のようにソケット入り口付近の壁に接触し手先に負荷がかかると、その負荷を軽減する方向に手先の位置姿勢を補正するため、補正によって挿入可能なクリアランスから外れてしまい挿入が失敗する可能性がある。

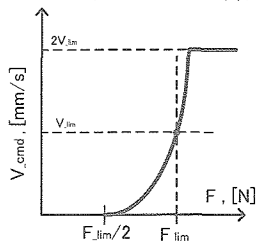


Fig.8 Velocity Control with Force Feed-Back

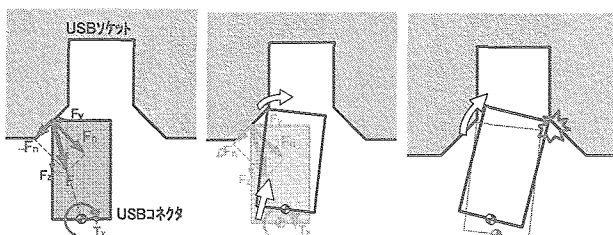


Fig.9 Force Feed-Back of Connector Insertion

そこで、手先に力がかかった場合には、ただ力を軽減しようとするだけでなく、力の加わり方によって手先の位置をしながらソケットの挿入口を検索するという操作を追加する。

コネクタの挿入方向(z)に関してリミットを超える力がかかった場合、その時刻とを t_0 とすると振幅 A だけ z 方向に引き戻すという操作を加える。また、このときに z 軸以外の併進方向に関しては負荷と同方向に位置補正(Position Adjustment: PA)を加える。

$$v'_z = A \sin(\omega(t - t_0)) \quad \text{if } t - t_0 \leq 2\pi / \omega$$

$$v_{zd} + = v'_z$$

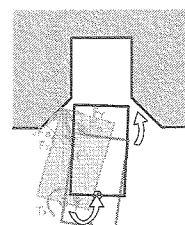


Fig.10 Position Adjustment of E.E.

(5)

こうすることによって、コネクタがソケット入り口付近でまだ挿入されていない場合には、引き戻した際に手先の負荷が抜ける。これに対し、コネクタがソケット内に挿入されている場合には z 方向に引き戻すと摩擦によって +z 方向に力加わるため挿入がされていることが知ることができる。また、コネクタが壁などに接触し過度の力がかかり続ける場合には、その間は力が軽減する方向に目標値を微小変位させる。

$$r'_{d1} + = \delta r_1 \quad \text{if } F_i \geq F_{lim1} \quad r_{d1} + = r'_{d1}$$

(6)

これらの力フィードバックと位置補正を組み合わせることによって、手先およびソケット側に過度の負荷を与えることなく、また、位置が多少ずれていても位置補正をしながら厳しいクリアランス内に収めることが可能となる。

3.3.2 アルゴリズム検証実験

3.3.1 で提案するアルゴリズムの検証実験結果について述べる。ロボットアームによってコネクタを結合する場合、予めコネクタの位置をロボットが知っており、その付近まで手先を移動した後に画像処理を行いながら最終的な位置微調整をし、把持するというのが一般的なシーケンスである。ここではもう一つの追加作業として、コネクタ把持の目標位置周辺で、まずはハーネスを検索し、ハーネスを辿ることによってコネクタ把持位置まで手先を誘導するという作業を想定し実験を行った。このハーネス検知追従技術はリソースラインの結合だけでなく、浮遊防止テザーの検知や、不慮の状況でコネクタが外れてしまいハーネスにつながったコネクタが浮遊している場合にコネクタを把持するのに必要な技術である。

Fig11 に USB コネクタを把持した場合の手先ハンド座標系を示す。コネクタの挿入方向は +z 方向である。コネクタ把持や挿入時の目標位置はそれぞれコネクタとソケットに固定された 3 点マーカーを用いて相対関係を計測し、ハーネスと距離計測／追従方向決定はハーネス幅およびハーネスにつけられたマーカーを用いて行った。

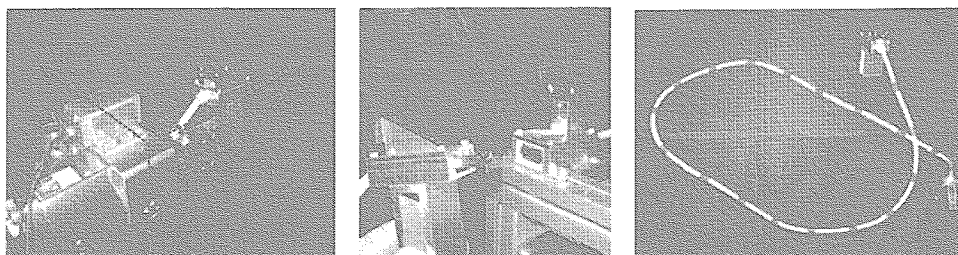


Fig.11 Insert Direction of USB Connector

(A) コネクタ挿入実験

アルゴリズムの有効性を比較するため、コネクタ挿入に画像フィードバック(VF)のみを用いた予備実験を行った。画像処理によって正確に目標位置に手先があれば、力フィードバック(FF)を用いなくて当然挿入することが可能である。しかし、実際には画像処理結果には様々な要因による誤差が含まれている。予備実験では挿入位置が目標位置より xy 方向で 1mm ずれると、そのまま z 方向に進行しても挿入できないことが分かった。一方、同条件で PA を適用した場合には位置補正して、

正しい挿入位置を検索している時間はかかるものの、正常に挿入することが可能であった。実験結果を Fig.12 に示す。

実験により PA を適用することでコネクタを正しく挿入することが可能となることが確認された。Fig.16 は正しい挿入位置に対して、コネクタ先端の x_y 位置がどのように移行したかプロファイルを示したグラフである。

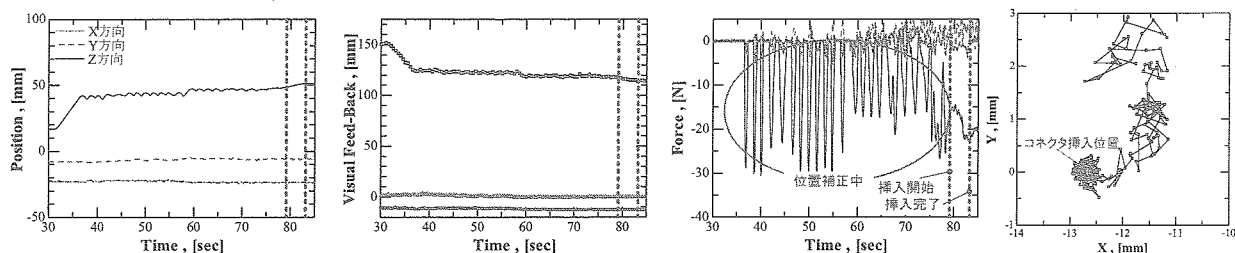


Fig.12 Experimental Result of Connector Insertion Experiment

(B) ハーネス検知追従+コネクタ把持挿入実験

次に想定した一連の作業を通しての実験を行った。作業シーケンスは以下である。

- (1) 手先カメラの画像の中からハーネスを検知する。
- (2) ハーネスが視野にない場合は手先を移動させハーネスを検索する。
- (3) ハーネスを検知したら進行方向を決定し、ハーネスを追従していく。この際、ハーネスの直径を計測することによってハーネスとの相対距離を計算し、手先とハーネスの距離を指令された値に保ちながら追従する。
- (4) ハーネスの先端に辿りついたらコネクタ把持部の3点マーカを検出し、コネクタとの相対位置/姿勢を計測する。
- (5) コネクタに接近した後に把持し、ソケット付近まで移動する。
- (6) ソケット側の3点マーカを検出し、ソケットとの相対位置/姿勢を計測する。
- (7) 手先の位置と力を制御しながらコネクタを挿入する。

Fig.13 にハーネスを検出し画像処理した結果を示す。ハーネスを検索後、検知したら手先に進行方向をベクトルとして与え、ハーネス上の赤いマーカを検知した場合にはその前後の幅を計測することで距離情報もアームに送る。このときの手先位置データを Fig.14 に示す。ハーネス検索は手先を初期位置から $\phi 150\text{mm}$ の円を描くように移動し、検出に成功した後にコネクタ位置までハーネスとの距離を 120mm に保ちながら追従するよう操作した。

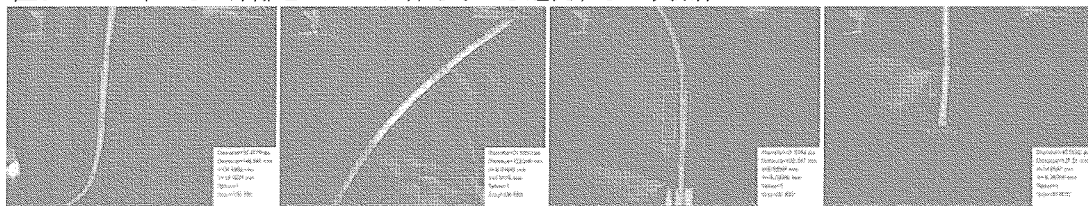


Fig.13 Image Processing of Harness Detection and Chasing

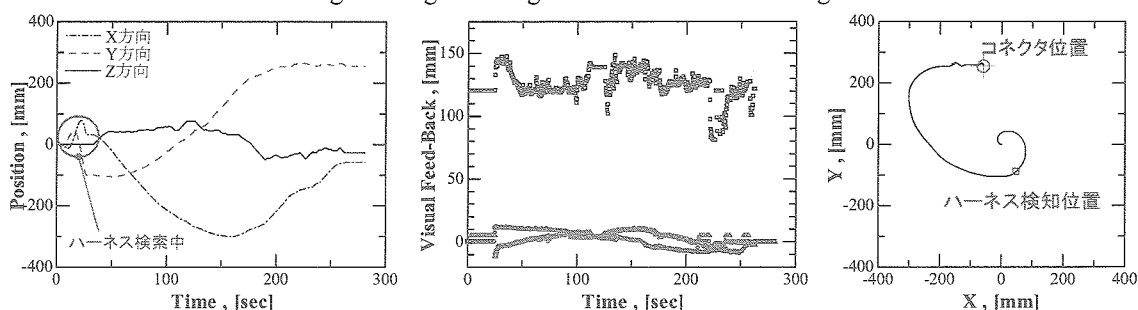


Fig.14 Experimental Result of Harness Detection and Chasing

Fig.15(a)~(f)にその後のコネクタ検知から挿入までの画像処理結果を示す。(a)ハーネスを辿り、手先が先端のコネクタ付近に達したらハーネス検知の画像処理からコネクタの3点マーカ検知の画像処理に切り替え相対位置/姿勢を計測する。(b)正常に3点マーカをトラッキングできたら、コネクタ把持位置まで手先の位置と姿勢を制御し、(c)ハンドによってコネクタを把持する。コネクタを把持したら、(d)予め設定されたソケットの位置付近まで手先を移動し、(e)その周辺でソケット側の3点マーカを検索し、(f)正常に検知できたら手先の力を制御しながらコネクタを挿入する。Fig.16にこのときの手先位置データを示す。また、このときのVFの画像処理結果とFTセンサの値をFig.17に示す。

今回の実験では単独のロボットアームによる作業で手先カメラ画像とFTセンサのみで行ったが、画像処理アルゴリズムの自動切換え、対象物が検知できない場合の検索、画像処理が正常に行われない場合の待機/退避モード、手先負荷による位置補正など半自律的な作業を実現することができた。今後、軌道上での安全性、確実性の高い精細作業を実施するためには単独ロボットの監視ではなく、別のロボットやモニタカメラによる監視を同時に行い、作業ロボットの制御に組み込んで行く必要がある。

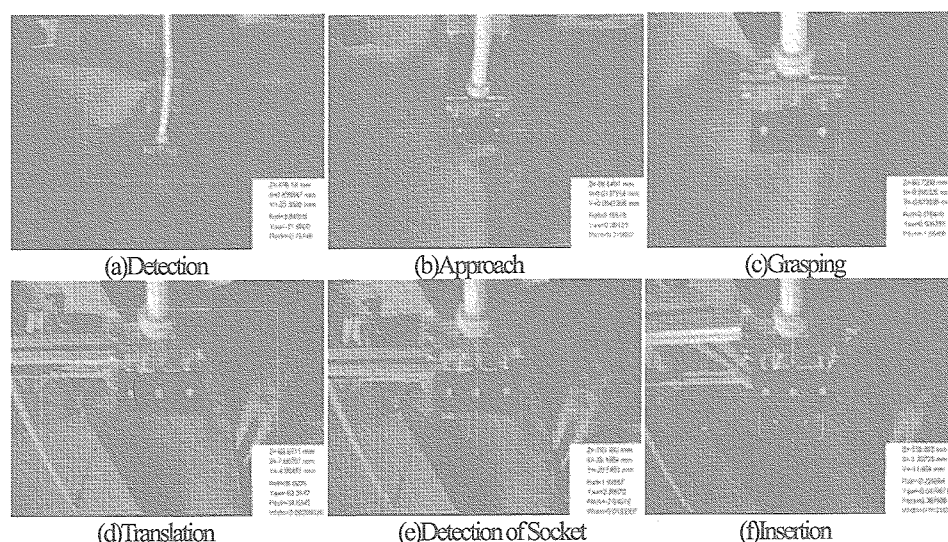


Fig.15 Image Processing of Connector Handling and Insertion

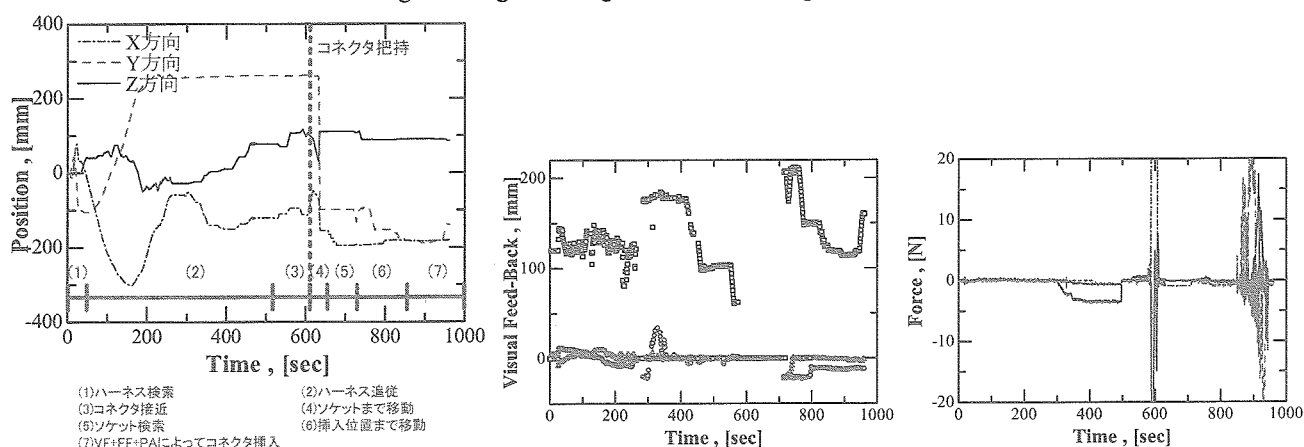


Fig.16 Experimental Result of Connector Handling and Insertion

4.まとめ

ロボティクスによる軌道上暴露実験支援などのEVA代替作業の地上検証用テストベッドを整備し、システム構成機器である精細作業ロボットアームを用いた実験支援作業について検討した。その中で具体的な例として、汎用コネクタのハンドリングおよび挿抜操作を想定し、コネクタ挿入時の制御アルゴリズムおよびハーネス検知からコネクタ把持挿入までの操作シーケンスに関して検討および検証実験を実施した。

汎用コネクタの挿入操作に関してはUSBコネクタを用い、挿入のための厳しいクリアランスと大きな摩擦を考慮して力フィードバックおよび位置補正による挿入アルゴリズムを提案した。これらのアルゴリズムと手先カメラによる画像フィードバックを用いることで、コネクタの位置が目標位置より数mmずれている場合でも過度の力を与えることなく挿入可能であり、挿入後も適切な押し付け力を保持可能であることを実証した。

ハーネスを検知してからハーネス先端のコネクタを把持、目的のソケットに挿入するまでの一連の操作に関して実験を行い、半自律的に操作が可能であることを実験により示した。画像処理によってハーネスの直径を検出することによってハーネスとの相対距離を保ちながら追従し、コネクタ把持および挿入に関してはコネクタ/ソケットにそれぞれ取り付けられた3点マーカを検出することで手先との相対関係を計測し、最終的にはFTセンサのデータを基に力フィードバックおよび位置補正をすることで安定してコネクタの挿入が可能であることを実証することができた。

本実験では、アーム単体のカメラおよびFTセンサを用いて操作を行ったが、軌道上で安全確実に作業を行うためにはコネクタ把持完了やコネクタ挿入完了の確認方法、作業時のロボットアームと障害物との干渉衝突回避などを別のセンサで行う必要がある。これらは自律的に全ての作業を行うためには必須の技術であり、テストベッドの2本のアームおよびモニタカメラを用いて行う予定である。

[参考文献]

- [1]伊藤, “船外実験プラットフォーム利用利便性向上と利用促進制度見直しへの取り組みについて”, 第25回ISS利用WG, 東京, 2003年9月
- [2]上野他, “船外実験支援精細作業ロボットの構想”, 第48回宇宙科学技術連合講演会, 福井, 2004年11月
- [3]澤田他, “精細作業用協調ロボット地上実験テストベッド”, 第49回宇宙科学技術連合講演会, 広島, 2005年11月