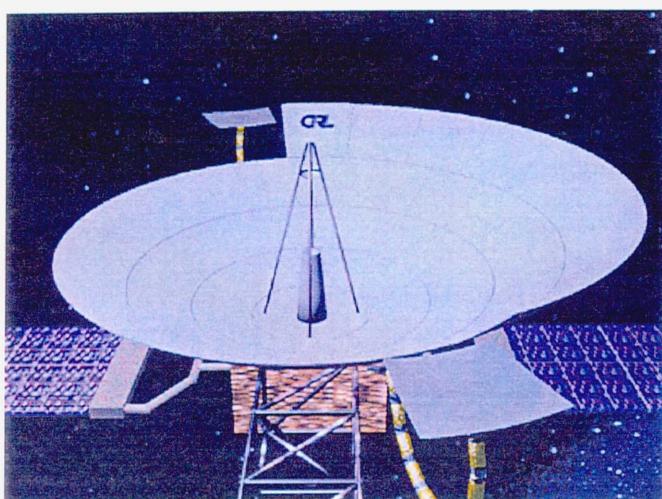


## ETS-VIIでのアンテナ組立に 関する実験について

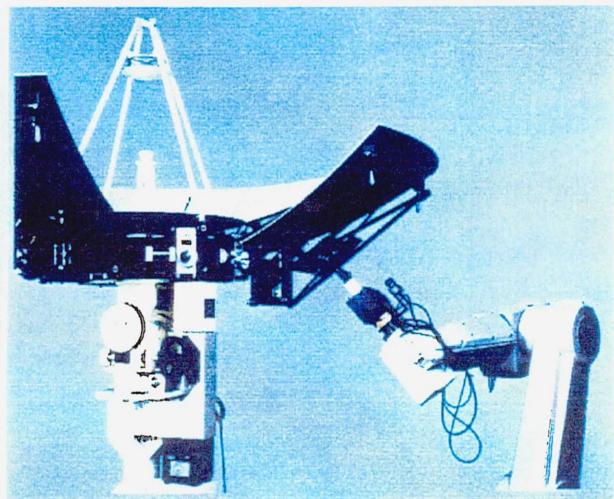
平成11年6月16日  
郵政省通信総合研究所

### 【はじめに】

通信総合研究所（CRL）では宇宙で大型アンテナを構築する一つの方法として、ロボットアームを用いて宇宙空間でアンテナを組み立てる技術について研究を行ってきた。大型アンテナを宇宙で実現する方法として展開型、膨張型等が考えられているが、ロボットアームを利用した組立型アンテナも、展開型、膨張型には無い特徴を持つ一つの有効な方法であると考えられる。組立型アンテナは地上で加工した剛性の高い部材で出来た分割鏡面を用いるため、展開型、膨張型に比べて鏡面精度が高く、高い周波数での利用において特に有効である。また、組立により、非常に大きなアンテナの構築や、段階的なアンテナ構築といった利用形態も考えられる。その一環として、CRLは技術試験衛星VII型（ETS-VII）での実験機会を得て、宇宙開発事業団の協力の下、宇宙ロボットを用いた宇宙空間でアンテナを組み立てる技術について実験を行ってきた。ここではその成果について報告する。



《宇宙空間における大型アンテナ組立のイメージ図》



《2m径組立型アンテナ地上モデル》

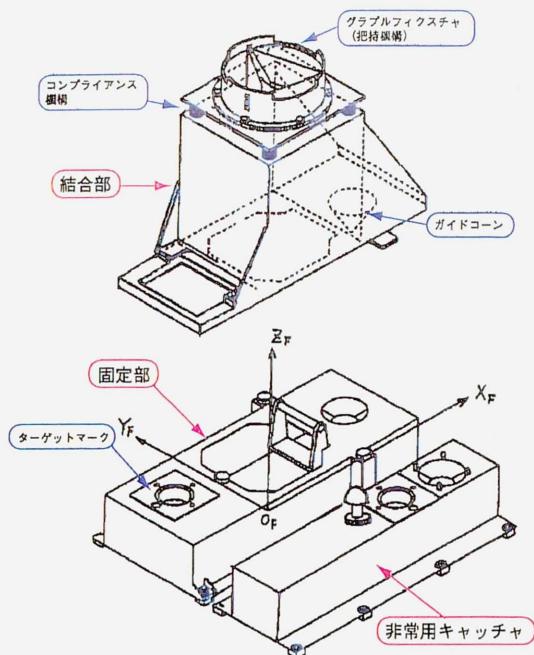
### 【実験項目】

CRLではETS-VIIにおいて以下に掲げる項目について実験を計画し実施してきた。1年半の間、宇宙開発事業団の協力の下44回（パス）の実験を実施し、予定していた全ての実験項目について良好な結果を得ることができた。以下に、順次その具体的な例を紹介する。

- アンテナ結合機構の基本着脱に関する実験
- アンテナ結合機構の位置誤差吸収能力に関する実験
- 画像処理を利用した全自動アンテナ組立に関する実験
- 宇宙ロボットの先端的制御方法に関する実験
  - マスター アーム操作実験
  - オーディオ フィードバック実験

## 【搭載実験装置】

各実験項目の説明にはいる前に、CRL が開発し ETS-VII に搭載した実験装置について紹介する。アンテナ結合機構基礎実験装置(AAM)は組立型アンテナの結合機構部を宇宙実証するために開発されたもので、図に示すような形状をした機構である。「結合部」は組立型アンテナのラッチ機構によって「固定部」と結合している。アンテナ組立の実験は「結合部」に取り付けられたグラブルフィックスチャと呼ばれる持ち手をロボットアームがつかみ、ラッチを解除後、「結合部」を「固定部」から分離・移動・再結合することにより行う。



《アンテナ結合機構基礎実験装置》

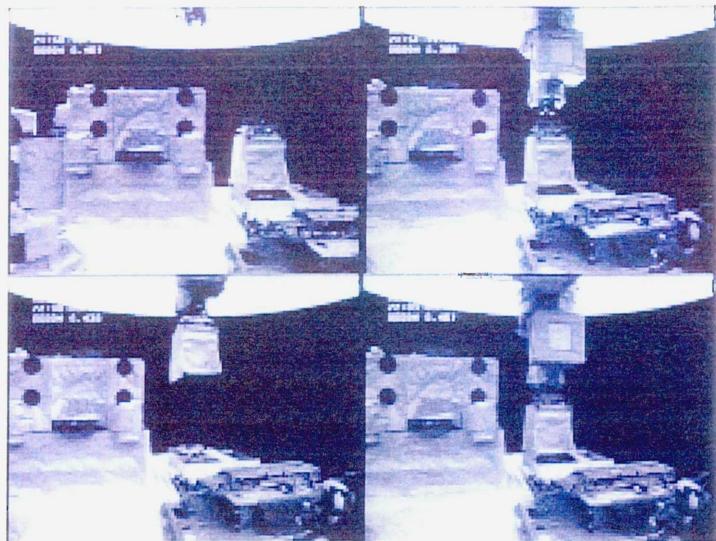
「結合部」と「固定部」の間で正確な結合が実現できるように、工夫がなされている。

ロボットアーム手先部に取り付けられた「手先カメラ」からターゲットマークを撮影すると、「結合部」と「固定部」の相対的な位置関係によって、得られる画像が異なる。この画像を解析すると、ロボットアーム手先部と「固定部」の間の理想的な結合位置からのズレを計算することができ、正確な自動組み付け作業を実現することができる。

更に、画像解析で修正できない微小な変位や、振動等時間変動する変位は、「結合部」に取り付けられたガイドコーンとグラブルフィックスチャに取り付けられたバネ(コンプライアンス機構)が「結合部」を機械的に誘導することで修正され、正確で確実な組み付け作業を実現することが可能となっている。

## 【アンテナ結合機構の基本着脱に関する実験】

アンテナ結合機構の実験は以下のようなシーケンスにより実施される。(1) ロボットアームをAAM上方に移動し、手先に取り付けられたカメラで撮影したターゲットマークの画像をたよりに、AAMをつかむ。(2) ロボットアームに取り付けられたソケットレンチを回してAAMの結合機構をはずす。(3) ロボットアームでAAMの結合部を持ち上げ、固定部から分離する。(4) 手先に取り付けられたカメラで撮影したターゲットマークの画像をたよりに、AAMの結合部と固定部の位置関係を保ちながら、結合部を固定部に押し付ける。このとき、結合機構が自動的に働き結合が実現される。(5) ロボットアームでつかんでいたAAMをはなし、実験を終了する。以上の分離再結合の過程を20分の実験時間の間に1回ないし2回実施する。下に示したダウンリンク画像は一連の作業の様子を示している。



《実験中に衛星から送られてきた画像の一例  
(ロボットアームの肩に取り付けられたカメラで撮影)》

CRLは軌道上で以下に紹介する実験も含め通算40回の分離再結合を実施した。AAMの機構は現在も良好に機能しており、特性等も変化していない。また、基本着脱事件の一部としてコンプライアンスマード（手先にかかった力を検出し、この力を緩和するようにロボットアームをあたかもばねが入っているかのように自動的に動作させる制御方法）を併用した再結合なども確認している。

#### 【アンテナ結合機構の位置誤差吸収能力に関する実験】

ETS-VIIのロボットアームは同じ目標位置を何度も指示したときのずれ、いわゆる繰り返し精度が高くなるように設計されている。また手先が動作中に振動することもほとんどない。しかし、大型のロボットアーム、たとえば宇宙ステーション等で用いられるロボットアームでは、ロボットの繰り返し精度はそれほど高くなく、またロボットの手先に振動が発生することがある。そこで、CRLの搭載実験機器には、このような位置のずれを機械的に吸収し、正確で確実な結合を実現する工夫がなされている。先に説明したガイドコーンがその一つで、コーン状の機構の位置ずれをその受け皿が補正し、アンテナ結合機構を正しい結合位置へ導いてくれる。この時、先に説明したメカニカルコンプライアンスが、ロボットアームの手先と正しい結合位置とのずれを吸収する働きを果たす。

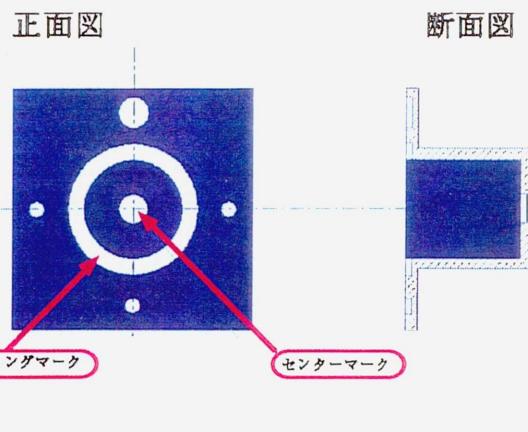
このような誤差の吸収機能を確認するために、正しい結合位置からあえて位置で5mm、姿勢で1度、意図的にずらして結合させる実験を行った。いずれの場合も、それぞれ正しい結合位置へ補正され、結合することに成功した。また、実験後の解析から何れの場合にも8N（ニュートン）というわずかな先端力で結合が実現できたことが確認された。このことは、このアンテナ結合機構が位置決め精度の高くないロボットアームでも十分組み立て可能であることを示している。

#### 【画像処理を利用した全自動アンテナ組立に関する実験】

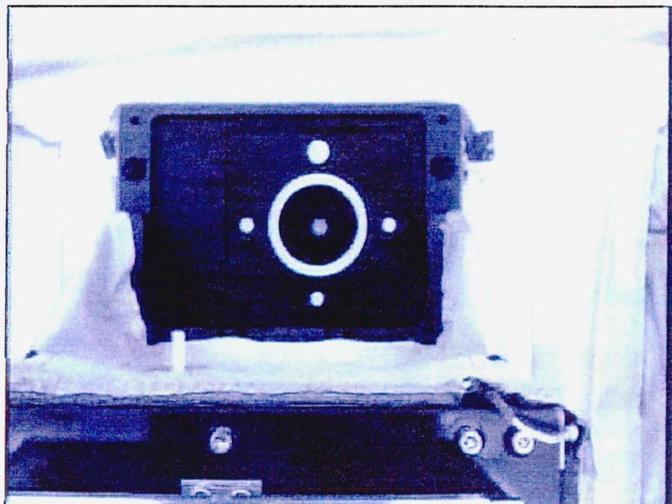
アンテナのような非常に高い精度が要求されるものを、遠隔操作によって組み立てる場合、組み立てる部品同士の位置を正確に計測し調節することが特に重要である。その組立を宇宙ロボットにより行う場合は、カメラや計測機器を多数設置することが難しいため、少ない機器による情報で、効率良く正確な位置計測・調節を実現する必要がある。

我々は、アンテナ結合機構にターゲットマークという目印を取り付けておき、ロボットアームの手首に取り付けられたカメラでこの画像をとり、この画像を解析することで自動的にロボットアームの手の位置を計測し調節する方法を開発した。ターゲットマークというのは下図に示すような形をしており、このマークとカメラの相対的な位置関係によって異なった画像が得られる。例えば、カメラがマークに近づくと、マークの大きさが視野の中で大きくなり、カメラが左右に移動するとマークの中心が視野の中で左右に移動する。また、カメ

ラの視線方向がマークに正対していないと、中心の白点が他の白点に対して相対的にずれて見える。このように、手先カメラからターゲットマークを撮影した1枚の画像から、基準となる位置・姿勢からのずれを容易に計算し調整することができる。



《ターゲットマーク》



《実験中に衛星から送られてきた画像の一例  
(ロボットアームの手先に取り付けられたカメラで撮影したターゲットマーク)》

そこで、本実験では、結合機構の上方のいくつかの点で、画像誘導の機能確認を行った。その結果、何れの場合でも、正しい把持点へ自動的にロボットアームを移動させることができた。

実験直後のデータ解析から、アプローチ方向（ロボットアームが接近する方向）で平均1.8mm、その他の方向で平均1mm程の精度が実現できたことが確認できた。この結果は、アンテナを自動組立するうえで必要な精度（アプローチ方向で±10mm、その他の方向で±5mm）を十分実現できていることを示している。

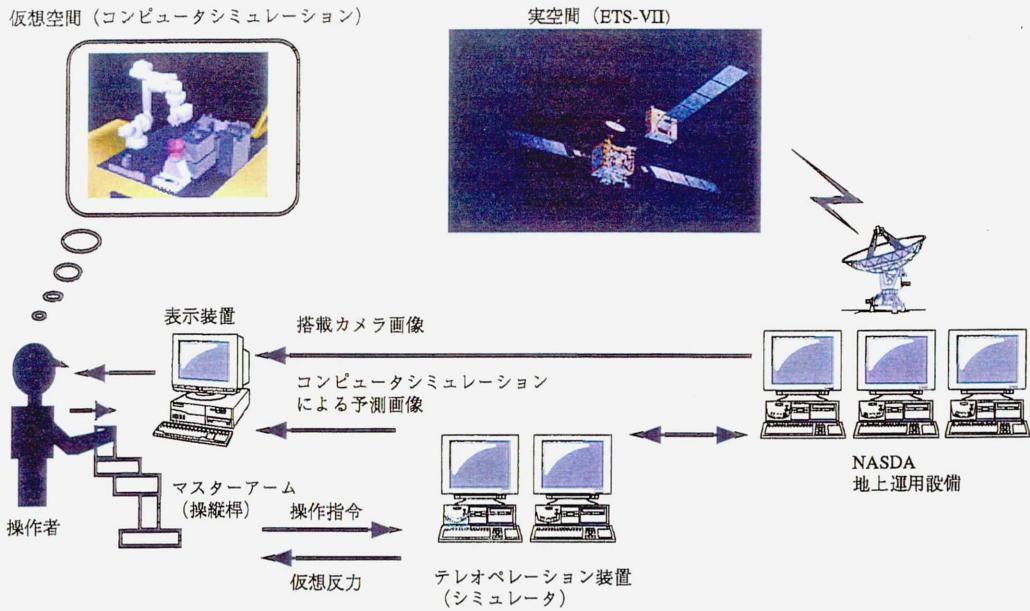
さらにこのような画像処理を用いることで、位置のずれを自動的に補正し、すべての組み立て過程を自動操作により実現することに成功した。

#### 【マスター アーム操作実験】

ここで述べるマスター アームは、対象となる衛星のロボットアーム（スレーブアーム）を操作するための操縦桿として用意したもので、これを動かすことでロボットアームの位置と姿勢を自由自在に操作することができる。この操作方法は一般にはマスタスレーブ制御と呼ばれている。このマスター アームは、対象とする位置・姿勢すべてが同時に自由に操作できるのに加えて、対象とするロボットが物に触っているときに受けている力などを、あたかも操作する人が触っているように感じさせることで、作業をスムーズに進めることができる。

る。

しかし、一般に、宇宙ロボットを遠隔操作する場合、動かそうとするロボットと、操作をする地上の実験装置との間に時間遅れがあるため、マスター・アームを用いた制御は、予期しない振動が発生するなど、制御システム全体が不安定になるため用いられた例がなかった。我々は、この様に全体が不安定になるのを避けるために、地上実験装置の中に対象とするロボットのシミュレータを用意した。これを用いて衛星に搭載したロボットアームを地上からマスタスレーブ制御で操作する実験を行い、世界で初めて地上から安定して操作することに成功した。



《バーチャルリアリティ技術を応用したマスタスレーブ制御》



《マスター・アームとシミュレータ》

#### 【オーディオフィードバック実験】

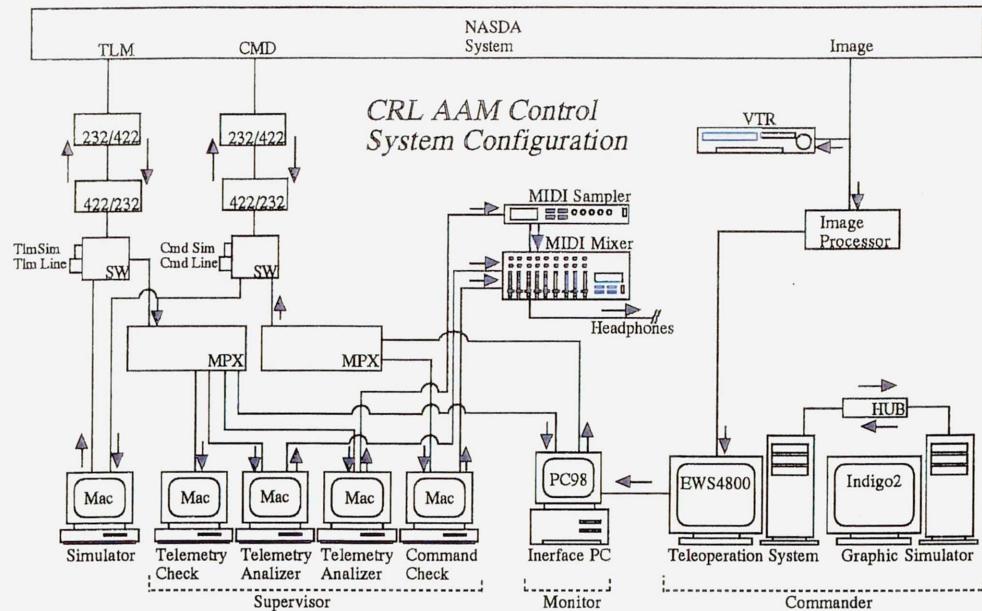
宇宙ロボットを遠隔操作する場合、画像で確認できる情報が限られるので、操作をする人は衛星から送られてくる非常に多くの情報を、適切に素早く判断する必要がある。特に力の情報はものをつかむとき、引っ掛けりがあるのかないのか、正しくつかんでいるのか等を判断するのにとても重要である。判断ミスや認識ミスは取り返しのつかない事故につながる可能性がある。

そこで我々は、聴覚の持つ（1）特に意識を集中していなくても注意を喚起できる、（2）変化の傾向をとらえやすい、といった特徴に着目し、衛星からの情報の多くを音として提示することで操作の効率と信頼度を上げる工夫をしてきた。たとえば、ロボットが動作を開始したり終了したりといった状況変化を音声で、ロボットが感じている力の情報を連続音の高低で聞かせることで、操作全体の効率を上げることができる。

また、このようなシステムの効果を定量的に判断する一つの方法として、アイマークレコーダーという装置

を用いて実験を行う。このアイマークレコーダーというのは、操作する人の視点の動きを記録して、定量的に調べができる装置である。

私たちはこのような装置を使って、人は宇宙ロボットを操作するときどのように情報を得ているのか、宇宙ロボットを操作するうえで使いやすい操作システムとは何かについて検討を進めてきた。



《オーディオフィードバックシステム》



《アイマークレコーダーでの実験の様子》

#### 【今後の展開】

ETS-VIIは6月から11月まで後期利用実験フェーズとして、より発展的な応用実験を行う期間に移る。CRLはこの中でさらに8回の実験を行うことが予定されている。CRLではこれらの実験機会に、基本実験で得られた経験をもとに、より発展的な宇宙ロボットの操作方法についての実験を行うとともに、内外の大学や研

究機関との共同実験を行うことを考えている。

CRLでは本実験と平行して、宇宙空間で故障した人工衛星を検査したり、修理したりする技術についても研究を進めてきている。一連の実験で得られた宇宙ロボットの制御方法に関する技術は、こうした、人工衛星の検査や修理にも応用していく計画である。