軌道上組立作業ロボット用エンドエフェクタの開発^{*1}

Development of Space Robot End-Effector for On-Orbit Assembly

西田 信一郎^{*2}・吉川 恒夫^{*3}

Shin-ichiro NISHIDA and Tsuneo YOSHIKAWA

Key Words: Space Robot, Assembly, End-Effector, Force Control, Mechanism

Abstract: We are studying next generation space robot technology for on-orbit assembling of large space structure. A new space robot end-effector suitable to on-orbit structure assembling was designed and its prototype model was developed and tested. This paper describes the required function, performance for space robot end-effector, new mechanism design and testing results of prototype model.

1. はじめに

軌道上での大型構造物として、宇宙ステーションの他に大型宇宙望遠鏡、宇宙電波望遠鏡、太陽光発電衛星などが検討されている^{1, 2)}。打上機のフェアリングサイズによって打上可能な機器サイズが限られるため、大型構造物は展開機構や軌道上での組立により構築する必要がある。展開機構では、華奢でヒンジの多い構造が避けられないため、構造柔軟性やヒンジのガタが軌道上での形状精度や指向方向制御性を確保する上で問題となるため、高精度の構造物は軌道上組立が想定される。軌道上での組立作業においては、組立途中の構造物上をロボットが移動して広い作業領域を確保して組立を行うことが効率的である^{3, 4)}。ロボットが構造物上を移動するためには、電源・信号をロボットに供給するためのラインやコネクタ付き取っ手などの機能要素を組立構造物に付加し、エンドエフェクタはこれを把持しながら移動する形態が必要であり、エンドエフェクタの把持状態の保持性やコネクタ結合が重要な課題となる。特に軌道上での構造物組立では、移動用だけでなく各要素に取っ手を設けてハンドリングや組立をするため、取っ手の軽量化も重要な課題となる。宇宙ロボット用エンドエフェクタとしては、シャトルマニピュレータ (SRMS) やマニピュレータ飛行実験 (MFD)⁵⁾、技術試験衛星 VII 型のロボットの事例がある^{6, 7)}。しかし、これらの事例ではガイド構造やコネクタ結合機構が取っ手の側にあり取っ手の重量が高むこと、把持状態での保持力を駆動機構のブレーキ力や軸受の耐荷重性に依存し、保持力を高く設定できないこと、等の課題があった。筆者らは、これらの課題を踏まえて、各研究部隊と協力して軌道上でのロボットによる組立作業や組立構造について研究を行い試作・評価を行ってきた⁸⁻¹⁰⁾。

本論文では、軌道上での構造物組立作業および構造物上の自立的移動に対応したエンドエフェクタへの要求機能および要求性能を検討し、従来例における前述の課題をクリアし、要求を満足する方式として、機構の非バックドライブ性による保持に着目して、新規方式であるクリップ式機構および挿入・嵌合のための球面形状ガイドと円弧形状エッジのカップ型取っ手を考案した。さらに、これらの方式を適用した高い保持性能と挿入性、電気コネクタ結合機構、軽量の取っ手を実現するエンドエフェクタの構成を検討・試作し、試験・評価により所期の特性を確認した結果につき記述する。

2. 軌道上組立作業とエンドエフェクタ要求事項検討

2.1 組立作業概念 宇宙ロボットによる大型構造物組立作業の概念図を第 1 図に示す。ロボットアームは、構造要素を順次結合することにより組立作業を行う。組立作業の進行に伴い作業場所の変更が必要になるが、ロボットアームは構造物上を尺取り虫のように移動して作業場所を変更する。この方式は、国際宇宙ステーション (ISS) のマニピュレータ (SSRMS) にも適用された方式である。

2.2 組立作業用ロボットアーム 構造部材のサイズとして一般的なロケットのフェアリング内径に整合する直径 3 m 程度を想定すると、特異姿勢を回避しつつ、これを無理なく扱って組立作業を行うアームとしては、長さに概ね数 10% の余裕が必要であり、4 m 以上の長さが必要となる。そこで、組立作業のロボットアームとして、第 2 図に示す構成を想定する。

2.3 組立作業項目 宇宙ロボットによる軌道上組立作業は、主に第 1 表に示す作業項目で構成される。各作業項目に必要なロボットアームのエンドエフェクタの機能要素を第 1 表に併せて示す。把持作業には、画像計測を伴う。また、信号伝送を必要とするのは、尺取り虫型の移動と取付確認や状態の確認である。いずれの作業においても取っ手以外のものの把持の必要性は見当たらない。MLI の着脱の

^{*1} © 2005 日本航空宇宙学会
平成 16 年 7 月 15 日原稿受理

^{*2} 宇宙航空研究開発機構

^{*3} 京都大学大学院

第1図 宇宙ロボットによる軌道上組立の概念図

第2図 想定するロボットアームの自由度配置

第1表 組立作業に必要なエンドエフェクタ機能要素

Tasks	Grasp	Signal transmit	Torque apply
Payload handling	○		
Attach a segment		○	○
Take out a segment	○		○
Inchworm motion	○	○	
Attach/detach MLI	○		
Confirm connection	○	○	○

ように軽量で一端が連結された対象を扱う場合のために電気コネクタを持たない小型の取っ手も有効である。

2.4 エンドエフェクタ要求機能・性能 軌道上組立への対応から、エンドエフェクタには、次の機能を具備することが有効かつ必要である。

- 把持機能：位置ずれのある状態でも着実に把持
- ソケットレンチ機能：トルク印加・回転駆動機能
- 電気コネクタ結合：電源や信号の授受
- 軽量な取っ手：シンプル・軽量な取っ手の把持

構造物上をロボットアームが移動するため、ロボットアームが移動に際して把持する取っ手部やエンドエフェクタは、ロボットアームで発生する最大荷重が加わることを想定して構成する必要がある。また、移動式アームのエンドエフェクタは、肩関節の関節出力トルクレベルのモーメントに対する保持耐力が必要である。先端力 10 N の第 2 図の自由度配置のアームの場合、関節所要出力トルクは約 50 Nm となる。最大発生荷重は、アームの姿勢と周辺条件に左右されるが、先端力仕様値の 30 倍の 300 N の耐力を確保する。設定したエンドエフェクタの要求性能を第 2 表に示す。

3. 組立作業用エンドエフェクタの方式検討

3.1 従来のエンドエフェクタの課題 SRMS のスネアワイヤ方式や技術試験衛星 VII ロボットのリンク指方式などの従来のエンドエフェクタは、結合状態の保持を駆動機

第2表 エンドエフェクタの要求性能

Items	Performance	Remarks
Pull-in force	60 N, 3 Nm	by fingers
Allowable load	300 N, 50 Nm	in holding
Allowable misalignment	10 mm, 3 deg	combined
Electric connector	D-sub: 15 pins × 2	power, signal
Socket driver torque	20 Nm

a. リンク指方式（ETS-VII）

b. スネアワイヤ方式

第3図 従来のエンドエフェクタの把持方式

構のブレーキにより実現しており、ブレーキ力を上回る外力が加わった場合には、駆動機構がバックドライブされて把持状態が維持できない方式であった（第 3 図）。このため、確実な保持のためには、JEMRMS 子アームのようにラッチ機構を別途追加する必要があった。また、挿入のガイドが、主に取っ手側に設けられ、取っ手の重量が嵩む問題があった。また、電気コネクタの結合は、取っ手側にコネクタの前後動作の機構を設ける方式であったため、取っ手の重量が高み、ソケットレンチ機能を占有してしまう問題があった。

3.2 新規エンドエフェクタ方式 把持物の不慮の放出が甚大な被害を招く部材の搬送やロボットアームの移動時の基部固定には把持の着実性が要求される。また、前述のように取っ手以外の対象の把持の必要性はない。そこで、専用の取っ手を着実に把持できる結合機構方式を選定し、前述の組立作業用エンドエフェクタ要求機能に対応した検討を行い、エンドエフェクタとして、以下の各種の特徴を持った構成を新規に考案した。

- 挿入性の良い半球形ガイド構造をエンドエフェクタ側に有する（取っ手側にガイド構造不要）
 - クリップ式把持による高剛性、高耐荷重保持
 - クリップ指駆動機構連動のコネクタ結合機構
- 取っ手側にガイド構造やコネクタ結合機構が不要となるため、取っ手の構成をシンプルにでき、軽量化できる。半球形ガイド構造を有するエンドエフェクタの取っ手への挿入概念とクリップ式把持の概念を第 4 図に示す。

3.3 球形ガイド構造による挿入 作業対象の機器に対する構成上の負担軽減/トータル重量軽減の観点から、取っ手を極力軽量化することが望ましい。そこで、次の観点から、球形ガイドをエンドエフェクタ側に設け、取っ手をカッ

接触点の抗力 f_n 、摩擦力 f_d の合力ベクトルは、ロボットアームの先端位置の参照点 X を通らず、例えば第 5 図では必ず参照点 X の左側を通る。これにより $-af_1$ の倒れのトルクを生じるが、図の右回り方向のトルクであるため、エンドエフェクタの胴部の前面が取っ手に接触した時点で打ち消すトルクが作用して姿勢が修正される。球形状のガイド構造では基本的にガジリを生じないが、平行挿入部は対角線が最大長径となり、唯一ガジリを生じる可能性がある。しかし、ガイド構造の長径 L と取っ手の長径 L_G に次の差異（クリアランス l_c ）を設ければ、ガジリを生じることなく挿入・嵌合が行われる。

$$l_c = \sqrt{L^2 + d_p^2} - L \quad (7)$$

平行挿入部（長さ d_p ）は、嵌合後の横荷重や捻りトルクに対する接触面圧の低減のためには有効であるが、挿入性の観点からは必要ないことが判る。

以上のように、球面形状を基本としたガイド構造を用い、仮想インピーダンス制御での挿入を行うことにより、位置・姿勢ずれが修正されて嵌合位置に至ることができる。

3.4 クリップ式把持機構による把持/保持 エンドエフェクタの高い負荷モーメントに対して耐性と剛性を確保するため、新規の把持機構方式としてクリップ式を提案する。この方式は、指動作によりエンドエフェクタの構造と取っ手構造の双方を指構造で挟み込むことにより保持を実現する方式であり、次の特徴を有する。

- 保持状態でのロードパスが構造だけを通り、構成上で高い耐性の確保が難しい指の支持部や駆動機構を通らないため、保持耐性が高い。
- 構造どうしの接触面を広くとれ、構造接触であるためガタが小さく剛性が高い。

概して円柱外形のエンドエフェクタと取っ手の結合状態での保持において、以下に示す配分方式で各方向の印加外力/トルクに対する保持性/耐性を確保する。

- ① 横方向並進力：球形ガイド構造の剪断耐性
- ② 押し付け並進力：前面構造圧縮耐性
- ③ 引っ張り並進力：指機構引っ張り耐性
- ④ 捻りトルク：球形ガイド構造の中心軸回り剪断耐性
- ⑤ 倒れトルク：指機構引っ張り耐性

本方式での指機構による保持/耐性の概念を従来方式例（ETS-VII ロボットの把持機構）と比較して第 6 図に示す。従来の方式では指の支持点や駆動するリンク機構のヒンジ部に印加荷重 F やそれを上回る荷重 F_1 , F_2 が発生し、 F_2 がアクチュエータの負荷荷重となるが、クリップ式の機構ではロードパスが指の構造部材上に限られる。支点やローラでの荷重 F_4 はクリップの接触面の印加荷重に対する傾斜角に依存するが、例えば傾斜角を 3 度とすれば F_4 は印加荷重の約 5.2% に過ぎない。また、結合状態を保持するためには、従来の方式では、指の駆動アクチュエータに駆動方向の予圧をかけた状態でサーボ保持するかまたはブレーキ保持する必要があった。一方、クリップ式では指駆動のローラの動作方向と指の動作方向が直交しており駆動

第 6 図 クリップ式把持機構での荷重関係

第 7 図 小取っ手の把持形態

機構アクチュエータがバックドライブされないため、アクチュエータにはブレーキは不要であり、機構の内部摩擦だけで保持が可能である。従って、結合状態の保持のためのアクチュエータの荷重負担は無い。なお、小取っ手の把持も指の内側によるクリップ式把持とし、ローラを逆方向に駆動することにより実現できる（第 7 図）。

3.5 コネクタ結合機構 クリップ動作をする指の駆動機構を前後直進カム方式とすることにより、電気コネクタの結合機能を兼ね備えた構成を考案した。電気コネクタの嵌合のための許容位置ずれ量は、僅か（例えば、D-sub コネクタで 0.5 mm 以下）であるため、指による取っ手の引き込み・嵌合が完了した後にコネクタ結合が行われる構成とした。即ち、指の把持完了後にローラ機構がさらに前進し、指の角度を維持したままローラ機構と同じムービングピースに取り付けられたコネクタが直進・結合するカム機構とした（第 8 図）。

4. エンドエフェクタの試作

4.1 ガイド構造 ガイド構造面には、二硫化モリブデン焼成膜による固体潤滑を施すことを基本とする。平行挿入部の長さを 5 mm とし、大・小取っ手に対応する球形ガイド構造の半径は各々 30 mm, 23 mm に設定した。

4.2 大取っ手 電気コネクタを有し、構造物上での伝い歩きや構造要素のハンドリングに用いる大取っ手（L-GRIP）は、組立構造物上に多数必要であるため、極力軽量にする必要がある。そこで、エンドエフェクタの二分割配置した

第 8 図 大取っ手把持の詳細形態とコネクタの結合

球面形状のガイド構造に嵌合するように複数の円弧の連続で構成された（全体としては楕円形状に近い）カップ型のシンプルで軽量の構造を考案した．半球を分割したガイド構造と干渉しない位置に 1 対の D-sub コネクタを配置した．材質は，アルミ合金を基本とし，カップの内面およびエッジはエンドエフェクタのガイド構造と摺動を生じるため二硫化モリブデン焼成膜による固体潤滑を施すことを基本とする¹¹⁾．

4.3 小取っ手 電気コネクタを持たない小取っ手は，操作時に大きな倒れモーメントが加わらないため，軽量・小型に構成できる．そこで，半球を分割した形状のガイド構造の内側にも球形のガイド形状を設け，ここに嵌合する円弧形状部を有する（全体としては X 字型）の小型の取っ手（S-GRIP）を考案した．把持姿勢の制約を緩和するために，90 度ごとに対称な形状とした．中央には，ソケットドライバに対応した穴を設ける．円弧型構造部は，ガイド構造やクリップ指との摺動を生じるため二硫化モリブデン焼成膜による固体潤滑を施す．

各取っ手の試作機を第 9 図に示す．大，小取っ手の重量は，各々 170 g，80 g であり，大取っ手は例えば ETS-VII ロボット用の取っ手（1.6 kg）と比較すると約 1/10 の重量の軽量の構成となっている．

4.4 クリップ指機構

4.4.1 指形状 挿入が完全でなく，僅かに浮いた状態でも引き込んで把持・固定ができるようにクリップ指には，テーパ形状による引き込み導入部を設ける．

4.4.2 材質 小さな構造に大きな荷重の加わる指機構には，鋼などの強度の大きく固体潤滑処理が可能な材質を用いる必要がある．試作機は大気中用であるため，ステンレス鋼（厚み：6 mm）で構成した．

第 9 図 エンドエフェクタ用各種取っ手の試作品

第 10 図 クリップ式把持機構の静荷重応力解析結果

4.4.3 解析 前述のように結合状態での保持においては，指機構の引っ張り荷重耐性が重要となる．例えば，構造物のアームの移動や把持物の搬送，固定作業などでは，何らかの不具合で緊急停止をした場合などに慣性力によってロボットアームの基部となる取っ手に大きな荷重が加わる場合がある．このような状態で指機構およびエンドエフェクタ，取っ手構造に加わる荷重を把持状態の指と周辺の構造について有限要素法（要素数：68）により解析した．解析結果を第 10 図に示す．解析は 1 N の引っ張り荷重を取っ手に加えた場合の結果である．要求仕様の 300 N が加わった状態では，指部材上の最大応力が 52 MPa であり，部材（ステンレス鋼）の降伏応力（1020 MPa）に対して十分に余裕のある結果（MS：18.6）となった．即ち，指機構が保持に影響する引っ張り荷重に対しては，（2 本の指で保持するため）要求仕様 300 N の 37.2 倍の荷重（ 1.12×10^4 N）までの耐性を確保でき，倒れトルク要求仕様 50 Nm に対しては（取っ手の長径が 0.1 m であるため）11.2 倍のトルク（ 1.12×10^3 Nm）までの耐性を確保できるという結果となった．これは，例えば，従来例の ETS-VII のエンドエフェクタ（各々，約 45 N，5 Nm）の約 230 倍の耐性である．また，指の接触点の変位は約 1.43×10^{-8} m であり，引っ張り剛性は約 1.4×10^8 N/m，倒れ剛性は約 7.0×10^5 Nm/rad

第11図 エンドエフェクタ試作機の外観

第12図 エンドエフェクタ内部の機構構成概要

と求められた．これは，想定するロボットアーム関節機構の剛性 ($2.2 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$)¹³⁾ の約 32 倍である．従って，本解析結果から十分に高い保持耐性と剛性が得られることが確認できたと言える．

4.5 電気コネクタ 宇宙用機器には，接触面に金メッキが施された D-sub コネクタが多用されているが，これは展性の高い金属である金による真空潤滑性を有し，軌道上での着脱実験も実施されている¹⁵⁾．また，アライメントずれの修正/吸収のために 0.5 mm ストロークの弾性部材をコネクタの支持部に介在させた．

エンドエフェクタの試作機の外観を第 11 図に示し，内部の機構構成の概要を第 12 図に示す．

4.6 ソケットドライバ 六角形状のボルトヘッドに嵌合して回転駆動をするソケットドライバを中央部に配置した．ソケットドライバには，指の駆動とは別のアクチュエータ（DC モータ，ハーモニックドライブ減速機）を設けることにより，常に回転角度情報を保存できる．また，ソケット部には，スプリングによる押し付け機構を内蔵している．

5. 試 験

試作したエンドエフェクタが挿入性，保持性等の主要な機能・性能要求を満足することを試験により確認した．

5.1 挿入性試験

5.1.1 試験方法 大小の取っ手に対するエンドエフェクタの挿入の許容位置ずれ性能の試験を実施した．取っ手とエンドエフェクタの横方向の相対的な位置ずれを微動ステージにより設定し，横方向および捻れ回転のコンプライアンス機構で支持した取っ手に重力補償装置で吊り下げたエンドエフェクタを残留重力で静的に挿入（挿入力：18 N）し，挿入性を調べた．コンプライアンス機構は，フリーボール

第13図 挿入性試験のコンフィギュレーション

a. L-GRIP translational error case

b. L-GRIP translational and rotational (3deg) error case

c. S-GRIP translational error case

第14図 挿入性試験の結果（位置ずれと挿入可否）

ローラ機構で支持して水平方向に自在にしたステージ部にスプリングを接続（並進剛性：400 N/m, 回転剛性：20 Nm）する方式で構成した．試験装置の構成を第 13 図に示す．

5.1.2 試験結果 大，小の取っ手についての試験結果を第 14 図に示す．いずれの取っ手についても 10 mm 以上の許容位置ずれに対して挿入性が確保されていることが確認

第 15 図 ガイド構造上の S-GRIP との接触痕

第 16 図 引き込み試験のコンフィギュレーション

できた。また、小取手については、取手側の円弧形状の端（X 字の各先端）が制約となっており、ガイド上の接触部の傾斜方向が挿入方向に直角になるケースが挿入の限界の要因となっていることが判明した。第 15 図にガイド構造との接触痕を示す。従って、90 度ごとの対称形状を見直して 180 度対称として X 字型の嵌合形状を長くすれば、挿入の許容位置ずれ量をさらに大きくできることが判った。

5.2 引き込み試験

5.2.1 試験方法 大取手に引っ張り荷重（100 N）を印加した状態で指による引き込み動作を行い、正常に引き込み・嵌合が行えるかどうかを試験した。荷重は、大取手に錘を吊り下げて実現した。引き込み試験のコンフィギュレーションを第 16 図に示す。

5.2.2 試験結果 要求仕様値（60 N）を上回る 100 N の印加荷重化でも問題なく引き込み動作ができ、正常に嵌合された。これにより構成した指機構で引き込み機能が機能し、要求仕様以上の性能が得られることが確認できた。

5.3 保持性試験

5.3.1 試験方法 取手を把持した状態での倒れモーメントに対する耐性試験を実施した。試験装置およびコンフィギュレーションを第 17 図に示す。大取手を把持した状態のエンドエフェクタにブームを取り付け、このブームにワイヤ・プーリ経路で錘による荷重を加えてエンドエフェクタに倒れモーメントを印加した。

5.3.2 試験結果 加えた倒れモーメントでは、把持している取手の浮きは生じず、剛に把持できていることが確認できた。印加モーメントに対するモーメントアームの変位の角度換算値を第 18 図にプロットして示す。除荷時の戻りにはスティックスリップを生じているが指の変形によって嵌合部に摺動を生じるためと考えられる。要求性能の 50 Nm でも問題なく保持できていることが確認でき、剛性

第 17 図 保持性試験のコンフィギュレーション

第 18 図 保持性試験結果（モーメントアーム変位）

第 19 図 力覚制御挿入試験コンフィギュレーション

値は 1.54×10^4 Nm/rad で、クリップ式把持方式の高い耐モーメント保持性能が確認できた。

5.4 力覚制御挿入試験

5.4.1 試験方法 2 次元動作ができる水平多関節アームの手先部に大取手を取り付け、固定したエンドエフェクタへの挿入動作試験を実施した。試験装置の構成を第 19 図に示す。ロボットアームの可搬重量制限のため、取手とエンドエフェクタを逆配置としたが、アーム動作による挿入性の確認としては問題ないと考えられる。ロボットアームは、4 関節の冗長自由度アームであるが、第 2 関節を常に角度保持制御して、3 関節アームとして使用した。試験での挿入の横方向の初期位置ずれは 5 mm、挿入速度は 5 mm/秒に設定した。

5.4.2 制御方式 センサとアクチュエータのコロケーションにより、高い応答性の力覚制御動作を得るため、ロボットアームの関節トルクセンサ情報をフィードバックして関

節単位の仮想インピーダンス制御¹³⁾を行った。アーム先端に設定したい仮想剛性 k_{TIP} から関節単位の捻り剛性 k_{JNT} への変換は次式で行った。

$$k_{JNT} = J^T k_{TIP} J \quad (8)$$

ここで、 J は関節系からアーム先端系へのヤコビ行列である。手首関節の仮想捻り剛性は目標とする先端の回転剛性と同等のレベルに設定し、肩・肘の2関節は先端の並進剛性から式(8)により算出した捻り剛性に設定した。アームの各関節の角度制御目標 θ_{REFi} は次の式で求めた。

$$\theta_{Di} = \frac{1}{I_i} \int_{t_0}^t (\tau_i - c_i \dot{\theta}_i - k_{JNTi} \theta_i) dt' \quad (9)$$

$$\theta_{REFi} = \theta_{COMi} - \theta_{Di} \quad (10)$$

ここで、
 I_i : 仮想慣性モーメント
 τ_i : 関節トルク (トルクセンサ検出値)
 c_i : 仮想粘性係数
 $\dot{\theta}_i$: 関節の回転速度
 θ_i : 関節の角度
 θ_{COMi} : 関節への角度指令値

試験では、大取っ手の前面中央に仮想コンプライアンス中心を設定し、次の仮想インピーダンスを使用した。

- ・仮想剛性: 5000 N/m, 5 Nm
- ・仮想粘性: 475 Ns/m, 0.5 Nms
- ・仮想質量/慣性: 10 kg, 0.1 kgm²

また、嵌合位置に対する目標食い込み量は 40 mm に設定した。なお、位置制御には関節モータ軸のロータリエンコーダ情報を用いた。また、位置・仮想インピーダンスの制御周期は 2 msec とした。

5.4.3 試験結果 アーム動作によって、正常に挿入が行えた。挿入後の嵌合完了位置までの平均未達量は約 0.8 mm であった。挿入動作の履歴 (横方向位置 X , 横方向力 F_x , 押し付け力 F_y) を第 20 図に示す。動作開始後、約 10 秒で接触を生じ、滑らかなガイドによって挿入が行われ、約 16 秒の時点で挿入が完了した。完了時の押し付け力は、約 9 N であった。(その後も仮想食い込み量の増加により押し付け力は増加している。) これにより、ガイド構造および取っ手の形状は想定している制御方式である関節仮想インピーダンス制御に適合して滑らかにガイド・挿入ができることを確認できた。

6. お わ り に

軌道上での構造物組立用の宇宙ロボットのエンドエフェクタを検討し、従来のエンドエフェクタ機構の適用において、挿入性、保持耐性、取っ手の軽量化を課題として抽出した。この課題に対して、球面形状のガイド構造により良好な挿入性を有し、新規のクリップ式把持方式により耐荷重性および剛性の高い把持ができるエンドエフェクタ機構方式とこれに対応した軽量の取っ手を新規に考案した。そして、これらの機構の試作および試験により挿入性、保持

第 20 図 力覚制御挿入試験結果 (位置, 発生力履歴)

性などにおいて必要な性能が得られることを確認した。また、取っ手については、例えば ETS-VII ロボット用取っ手と比較して約 1/10 に軽量化ができた。さらに 2 次元ロボットアームを用いて軌道上での適用を想定している関節仮想インピーダンス制御方式により良好にエンドエフェクタの挿入動作が行えることを確認した。

エンドエフェクタの検討および試作に当たっては、各種の宇宙ロボットテストベッド用の試作を通じて、若林靖史氏、稲場典康氏、町田和雄先生、上野浩史氏、長谷川昭彦氏に有益な議論、ご助言を戴いた。末筆ながら、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Nishida, S., Kawashima, N. and Okamura, R.: Onboard Assembly of Large Space Telescope by Space Robot, Tsukuba, Space Factory on ISS Workshop, Universal Academy Press, ISSN1345-7810, 1999.
- 2) 西田信一郎, 岡村 良, 戎崎俊一, 高橋義幸, 半田利弘: 宇宙ロボットによる軌道上望遠鏡組立, 第 43 回宇宙科学技術連合講演会, 1999.
- 3) Nishida, S. and Yoshikawa, T.: Onboard Assembly of Large Space Structure by Torque Controlled Space Robot, SPIE S&S, 2003.
- 4) Nishida, S. and Yoshikawa, T.: Large Reflector Assembly in Orbit by a Mobile Space Robot, ISR2004, 2004.
- 5) Nagatomo, M., Mitome, T., Omote, T., Ezawa, N. and Kasuga, K.: Outline of Manipulator Flight Demonstration (MFD) Robot Arm, i-SAIRAS '97, 1997, pp. 195-200.
- 6) 小田光茂, 西田信一郎, 林 正人, 菅野 崇, 稲場典康, 高野裕, 稲垣哲也: 技術試験衛星 VII 型ロボット実験系の開発, 第 42 回宇宙科学技術連合講演会, 1998, pp. 29-34.
- 7) 小田光茂, 稲垣哲也, 赤塚宏一, 小笠原肇, 菅野明宏: きく 7 号

- 搭載ツール機構部の軌道上初期確認, 第 42 回宇宙科学技術連合講演会, 1998, pp. 88–94.
- 8) 西田信一郎, 岡村 良: 次世代ロボット用エンドエフェクタの試作, 第 42 回宇宙科学技術連合講演会, 1998.
- 9) Nishida, S., Takegai, T., Ohi, Y., Machida, K., Toda, Y. and Iwata, T.: Prototype of an End-Effector for a Space Inspection Robot, *Advanced Robotics*, **15** (2001), pp. 279–285.
- 10) 西田信一郎, 上野浩史, 松本秀一, 西楨健司: 軌道上組立構造要素, 第 45 回宇宙科学技術連合講演会, 2001.
- 11) 松本康司, 鈴木峰夫, 川邑正広: 種々の MoS₂ 焼成膜の高温真空下でのトライボロジー特性, 第 45 回宇宙科学技術連合講演会 01-2F16, 2001.
- 12) 西田信一郎, 林 正人, 小田光茂: 技術試験衛星 VII 型ロボットへの力覚制御の適用, *日本機械学会論文誌 C 編*, **69** (2003), pp. 187–194.
- 13) 西田信一郎, 吉川恒夫: 宇宙用アクティブリンプロボット関節の開発, *日本航空宇宙学会論文集*, **52** (2004), pp. 393–401.
- 14) 西田信一郎, 吉川恒夫: 宇宙ロボット用トルクセンサ内蔵関節の試作, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002.
- 15) 小田光茂, 稲垣哲哉, 秋葉 宏, 上野真司: ETS-VII 搭載実験用軌道上交換ユニットの開発及び運用結果の概要, 第 42 回宇宙科学技術連合講演会, 1998.