論 文

CONTRIBUTED PAPERS

ロボットによる宇宙構造物の地上組立実験^{*1}

Ground Experiment on Assembly of Space Structure Beams with a Manipulator System

福 澤 修 一 朗^{*2}
Shuichiro FUKUZAWA

Key Words : Ground Experiment, Space Structure Beam, Manipulator System, Solar Power Satellite

Abstract

A design methodology of both space structure beam and construction robot is described from the point of total cost minimum. The study is experimentally investigated. At first, two types of beams are prepared. One is a deployable truss structure. This truss is stowed in a rocket fairing folded, and is then deployed in orbit. The other is a putting-pipe-in-socket type beam in which members are separated from the beam, and then these are put in joints in orbit. In this paper secondly, ground experiment on beam construction with an industrial manipulator system are reported. The experiment proves that the dual arm system can conduct both types of beam. Furthermore, it obtains useful system requirements for structure beams. In conclusion, a design of both space structure beam and construction robot is proposed.

1. は じ め に

宇宙構造物には、米国 DOE が設計研究を行った太陽発電衛星をはじめとして、いくつかの設計研究例がある。それにともない、宇宙構造物の建設方法の研究も行われてきた。

提案された方法のひとつには、スペースシャトルなどを足場にした宇宙飛行士の船外活動による建設方法がある。これらの研究では、宇宙飛行士によるトラス組立時間の測定実験¹⁾、船外活動支援装置の製作²⁾などの成果が発表されている。また別の方法には、自動機械による建設方法がある。これらの研究では、リール状の複合材料からトラス構造物を連続的に生成する機械³⁾や、パイプ材料を軌道上で自動組立するロボット⁴⁾などの成果が発表されている。

ところで、現在、日本の太陽発電衛星ワーキンググループが設計研究を行っている宇宙構造物として、太陽発電衛星 SPS 2000 が存在する。この設計研究では米国 DOE の太陽発電衛星と異なり、今すぐに地上の発電システムと競合できる実現性の高いシステムにすることを目指している。そのため、無人の商業ロケットを用いて十数回に分割して打上げ、組立には安価な無人建設機械を利用し、衛星の姿勢安定化には重力傾斜トルクを用いるなど、新しい提案を行っている⁵⁾。

このような新しい太陽発電衛星 SPS 2000 を実現するためには、これらのコンセプトに合致した建設材料形状と建設システムもあわせて提案しなければならない。しかしながら、現在、太陽発電衛星 SPS 2000 の研究では、軌道上環境から受ける荷重に耐え得る寸法形状という観点からトラスの提案はされているものの、軌道上組立に適したトラス形状という観点からの提案はなされていない。もちろん、軌道上建設ベースの利用や宇宙飛行士による船外活動を想定した従来の建設方法の研究成果を、そのまま適用することもできない。

そこで本研究では、太陽発電衛星 SPS 2000 を宇宙構造物建設のためのひとつのモデルとして取り上げ、衛星材料と建設システム全体の低コスト化の実現をはかり、打ち上げエネルギーと軌道上建設エネルギーの最適化という意味でのエネルギー最小化につながる、トラス構造物と組立マニピュレータを提案することを目的とする。具体的な方法論としては、数種類の主構造トラスモデルの製作や地上組立実験を通して、トラスモデルと組立マニピュレータの低コスト化を実証的に論ずる。

本論文ではまず、ロボットを用いてトラスの地上組立実験を行う理由を述べ、展開方式と組立方式の2種

^{*1} 平成8年11月29日原稿受理

^{*2} 北海道電力(株)総合研究所

類のトラス設計例を示す。次に、このトラスモデルを用いて実施した地上組立実験の内容を示し、実験から得られた知見を整理する。最後にこれらの知見に基づいて、宇宙構造物に適したトラスおよび組立マニピュレータの提案を行う。

なお、建設システムを提案するためには、具体的な建設材料の形状などにもとづく細部の建設手順の他に、建設エネルギー、建設速度、姿勢安定性などの“ある評価基準”にもとづいて決定する大局的な衛星建造手順^{6,7)}も考慮する必要がある。ただしこれはトラス構造物の詳細形状に関係なく論じることができる性質のものなので、本論文ではこれに関する考察は行わない。

2. トラス機能試験モデル

2.1 トラス機能試験モデルの製作 本研究では実際にトラス機能試験モデルを製作し、産業用ロボットを用いて地上組立実験を行った。機能試験モデルは、折り畳んだ状態で打上げ軌道上で展開する“展開方式トラス”と、幾つかのパーツに分割梱包して軌道上で組立てる“組立方式トラス”の、2種類の形態に関して製作した。以下これらを、展開トラス、組立トラスと呼ぶ。

本研究で機能試験モデルを製作した理由には、2つの理由が存在する。最初の理由は、宇宙構造物として通用する実用モデルを考案することにより、主構造トラスの重量、ペイロードとしての充填効率、製造コストなどの情報を得るためである。これらの情報を得ることにより、太陽発電衛星 SPS 2000 に適した主構造トラスの形態を選択することができる。

2つめの理由は、トータルな意味での低コスト化にふさわしいトラス構造物の形態（組み立てられる機能）と、組立システムの機能要求の関係を明らかにするためである。これを具体的に述べると以下のように説明できる。

展開トラスは、組立機能を簡単化できるため建設システムの立場から見て好ましいが、衛星材料として考えるとペイロード充填効率が低く重量がかさみ製造コストも割高である。いっぽう、組立トラスは、複雑な展開機構が不要なため構造物の高充填効率化、軽量化、低コスト化が実現できるが、軌道上でかなりの組立機能が要求される。

すなわち主構造トラスに対する要求は、SPS 2000 全体システム内の立場によって互いに相反するものになる。そのため、システム全体としての低コスト化を実現するためには衛星材料と建設システムに最適な機能配分をする必要がある（組み立てられる機能と組み立てる機能）。これらの判断材料を得るために、実際

第1図 トラス機能試験モデルの呼称と寸法

に組立実験を行ったわけである。

2.2 機能試験モデルの呼称と寸法 機能試験モデルは、太陽発電衛星 SPS 2000 で採用された Double Bay Single Laced Beam⁸⁾ と呼ばれるトラス構造物を前提にした。このトラスは第1図に示すように、三角柱の側面に、斜めのトラスをはめ込んだ形状をしている。

トラスの三角形のフレーム部分をフレームパイプ（図中の三角フレーム）、高さ方向の3本のパイプを長手パイプ、側面に斜めにはめ込まれたパイプを斜めパイプと呼ぶ。また展開トラスおよび組立トラスの寸法は、軌道上環境から受ける荷重に耐え得る寸法形状という観点から数種類のトラス寸法が提案されているが⁹⁾、ここでは地上組立実験で受ける荷重に耐えられるように直径 20 mm（肉厚 1 mm）、長さ 1 m のパイプを用いたユニット 2 段の構成とした（高さ 2 m）。

2.3 展開トラスモデル 機能試験モデルのうち展開トラスは、収納高さがパイプ径よりも厚くならない形状を保ちつつ（充填効率を向上させるため）、ジョイント自由度を必要最小限にするよう工夫して設計した。

2.3.1 剛体ジョイントの自由度 第2図はジョイントをゴム紐で構成したトラスを展開するときの様子である。展開トラスはこの雛形モデルにもとづいて剛体ジョイントの自由度を決定した。以下に各ジョイントに必要な自由度を考察する。

長手パイプは両端でフレームパイプ平面の法線方向（トラス中心軸方向）に回転するので、まずジョイントにはトラス中心軸方向の回転自由度が必要である。次にフレームパイプの回転に従い横方向に倒れるので、横方向の回転自由度が必要である（すなわち両端合わせて 4 自由度）。

第2図 展開トラスの雛形モデル

斜めパイプ中心部は2つ折り可能なように、回転1自由度があれば良い。そのため斜めパイプ両端部にもこの折曲げ軸方向に回転自由度が必要なことは直ちに分かる。しかしそれ以外に、どの方向に自由度が必要なのか直感的に理解するのは難しい。

そこで斜めパイプに必要な自由度を調べるために幾つかのモデルを製作したところ、両端部には折曲げ軸方向の回転自由度以外に、それと独立する曲げ回転自由度があれば良いことが分かった(中央の折曲げ軸も含めて全部で5自由度)。

すなわち展開トラスを実現するために必要な最小自由度は、1ユニット当たり27自由度である。

2.3.2 収納過程の数式表現 トラス収納形状に関する定量的な知見を得るために、トラスの収納過程の幾何学的関係を数式表現化する。第3図は展開トラスの1ユニット分を表す。

トラス各点の位置は下側フレームパイプに固定した座標系で表記する。座標原点はフレームパイプの重心に置き、座標軸はフレームパイプのひとつと平行にX軸、ユニット中心軸上向きにZ軸、この2軸と右手系をなすようにY軸を定める。また下側のフレームパイプ頂点を T_1, T_2, T_3 とし、対応する上側頂点を T_4, T_5, T_6 と呼ぶ。

さらにZ軸まわりの上側フレーム回転角を θ 、ユニット1辺の長さを D 、高さを h 、斜めパイプ両端の距離 $T_i T_j$ (ただし $(i, j) = \{(1, 4), (2, 5), (3, 6)\}$) を l_1 、

第3図 展開トラスの収納過程を表す座標系および変数の定義

斜めパイプの中心部ジョイント(折曲げジョイント)の位置を C_i (例えばパイプ $T_1 T_5$ のジョイントは C_1)、回転前の上側フレームパイプ頂点と回転後の頂点をそれぞれXY平面に射影したときの2点間の距離を l_2 とする。このとき、下側フレームパイプ各頂点の座標は、

$$\begin{aligned} T_1 &: \left(-\frac{D}{2}, -\frac{D}{2\sqrt{3}}, 0\right) \\ T_2 &: \left(\frac{D}{2}, -\frac{D}{2\sqrt{3}}, 0\right) \\ T_3 &: \left(0, \frac{D}{\sqrt{3}}, 0\right) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

上側頂点座標のXY成分はこれらの座標成分をZ軸まわりに角度 θ だけ回転したものである。Z軸成分は h に等しい。そこで上側各頂点の座標は次のようになる。

$$\begin{aligned} T_4 &: \left(-\frac{D}{2} \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}}\right), \frac{D}{2} \left(\sin \theta - \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}}\right), h\right) \\ T_5 &: \left(\frac{D}{2} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}}\right), -\frac{D}{2} \left(\sin \theta + \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}}\right), h\right) \\ T_6 &: \left(\frac{D}{\sqrt{3}} \sin \theta, \frac{D}{\sqrt{3}} \cos \theta, h\right) \end{aligned} \quad (2)$$

また幾何学的関係から l_2 および h の値を次のように求めることができる。

$$l_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} D \sqrt{1 - \cos \theta} \quad (3)$$

$$h = \frac{D}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + 2 \cos \theta} \quad (4)$$

さらにフレーム頂点の座標と式(4)より、斜めパイプ両端の距離 l_1 は式(5)のように表現できる。

$$l_1 = D \sqrt{\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} + 1} \quad (5)$$

次に、斜めパイプ T_1T_5 の方向を直線 $\overline{T_1T_5}$ の方向で代表させることにする。各頂点の座標成分と l_1 を用いてこの単位方向ベクトル $\vec{i}$ を成分表示すると次のようになる。

$$\vec{i} = \frac{D}{2l_1} \left(\left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} + 1 \right), \right. \\ \left. \left(-\sin \theta - \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + 2 \cos \theta} \right) \quad (6)$$

このベクトル $\vec{i}$ は上側フレームの回転角度 θ により一意に定まる。しかし折曲げジョイント C_1 には $\vec{i}$ 軸まわりに 360° の回転自由度が残っているので、斜めパイプの姿勢はまだ一意に定めることができない。そこで折曲げジョイントの回転軸ベクトルを $\vec{k}$ とし、2つの方向ベクトル $\vec{i}$ と $\vec{k}$ を用いて斜めパイプの姿勢を表すことにする。ベクトル $\vec{k}$ はトラス収納状態に関係なく、 $\vec{i}$ 軸まわりに任意の向きを取ることができる (ただし常に $\vec{k} \cdot \vec{i} = 0$ でなければならない、記号 $\circ$ は内積を表わす)。

$\vec{k} \cdot \vec{i} = 0$ を満たす限り $\vec{k}$ の方向は任意である。しかし座標 Z 軸の $\vec{i}$ 軸直交成分方向ベクトル ($\vec{Z}$ で表す) に対して適当な角度を維持すると、次節に示すように、種々の収納形態を選ぶことができるようになる。

2.3.3 トラス収納過程の数値シミュレーション 第4図は $\cos^{-1}(\vec{k} \cdot \vec{Z}) = 25^\circ$ に保ちながらトラスを収納する場合のシミュレーション例である。斜めパイプはフレームパイプにかなり近づいた状態で収納できることが分かる。

数通りのシミュレーションの結果、折曲げ軸 $\vec{k}$ が $\vec{Z}$ 軸に平行ならば収納後の斜めパイプはフレームパ

イプ頂角の二等分線に一致し、折曲げ軸方向と $\vec{Z}$ のなす角度が 30° のとき斜めパイプはフレームパイプと平行に重なり、角度がそれ以上大きくなると斜めパイプはフレームパイプの外側に飛び出した形で折り畳まれることが分かった。

以上のシミュレーションより、収納容積を最小限に抑える場合には折曲げ軸のなす角度を $25^\circ \sim 30^\circ$ 程度に固定しておけば良いことが分かった。

2.3.4 展開トラス製作例 第5図に展開トラス収納形状および展開形状を示す。剛体ジョイントで構成したトラスは、収納高さがパイプ径よりも厚くならずに収納でき、必要最小限の自由度でトラス構造物状に展開することが確認できた。測定の結果、ジョイント1個あたりの質量は 0.5 kg 、展開状態と収納状態の体積比は $25:1$ になることが分かった。

2.4 組立トラスモデル 機能試験モデルのうち組立トラスは、展開トラスの組立作業性との比較を明確にするために、展開トラスの回転自由度をそのまま差込方式のパイプに置き換えるものとした。また、ジョイントをフレームにあらかじめ組み込むことにより、フレームパイプは個々のパイプに分割せずに三角形のまま利用するものとした。

すなわち、トラスは長手パイプ、斜めパイプ、フレームパイプの3種類である。

2.4.1 リファレンス作業 トラスの組立順序は無数に存在する。そこで組立作業性を評価するために、リファレンス作業を次のように定めた。

- 1) 下側フレームパイプの3つのジョイントに、長手パイプの下端を順次差し込む。

第4図 展開トラスの収納シミュレーション

第5図 展開トラスの製作例

(a) ジョイントおよびフレームパイプ組立図

(b)差込パイプ組立図 (長手, 斜め)

第6図 組立トラスの設計例

- 2) 長手パイプの上端に、上側フレームパイプの3つのジョイントを順次結合する。
- 3) 下側フレームパイプの3つのジョイントに、斜めパイプの下端を順次差し込む。
- 4) 斜めパイプの上端を、上側フレームパイプのジョイントに順次差し込む。

このリファレンス作業のうち、長手パイプ上下端および斜めパイプ下端をフレームパイプに固定する作業はただパイプをジョイントに差し込むだけの単純動作である。

しかし斜めパイプ上端をフレームパイプに差し込む作業はこれらと明らかに異なる。パイプ他端は下側フレームパイプに固定されており、上側フレームパイプも長手パイプを介してやはり下側に固定されている。そこで他のパイプと同じように差し込むためには構造物をたわめパイプ端点をジョイント入口に運び、次に

徐々にたわみを戻しながらパイプ端点を穴に差し込まなければならない。

すなわちリファレンス作業の内容には単純なパイプ差込作業と、複数本のアームによる複雑な協調作業の、少なくとも2種類のレベルの作業が存在することが予想される。なお、リファレンス作業として別の作業手順を選んでも、やはりこの2種類のレベルの作業は必要である。

2.4.2 組立トラス設計例 第6図に組立トラスの設計例を示す。設計はトラス長手方向に対称形状にすることにより、1種類のジョイントでトラスを構成できるように工夫した。また、構造物を歪めることなく側面方向から斜めパイプをはめ込むように、ジョイント側面に固定溝を設けた。測定の結果、ジョイント1個あたりの質量は0.4 kg、展開状態と収納状態の体積比は約50:1になることが分かった。

3. ロボットによる地上組立実験¹¹⁾

3.1 遠隔操縦ロボットを利用する目的 地上組立

実験では、力フィードバックなし遠隔操縦方式の産業用ロボットを利用する。

産業用ロボットを利用する理由は、提案する宇宙組立システムにできる限り既存の商業技術を利用して、潤滑や放熱といった宇宙特有の問題ではなく、純粋な軌道上組立機能の実現という意味において、システム開発コストの削減と信頼性の向上を図るためである。特に本実験では、力フィードバックなし位置決めサーボ機能（一般的な産業用ロボット仕様）で、トラスの組立が可能か否かを明確にすることをひとつの目標にしている。

遠隔操縦方式のロボットを用いるため、画像認識や状況判断能力などのソフトウェアの部分は検討することができない。しかし見方を変えると、人間という理想的な画像認識機能と判断能力を備えたプログラムロボットと見なすこともできる。すなわち長さ、自由度、制御方式などのハードウェアに関する判断材料を得ることは可能である。

そこで本研究では、宇宙建設システムに関して種々の判断材料が得られる遠隔操縦ロボットを有効な研究手段であると考え、地上組立実験を実施することにした。なおここで扱う組立作業は、ロボットベース（移動機構）をトラス構造物上の一部に固定した状態で実行することを想定している。

3.2 遠隔操縦ロボットの選定 本実験で用いるトラスは1辺が1m, 高さが2mなので, 作業を行うロボットは1~2m程度のストロークが必要になる. またリファレンス作業を実行するためには, マニピュレ

ータが複数本必要であると予想される。これらの条件を満たすロボットのひとつとして、中部電力株式会社所有の配電作業ロボットを選定した⁹⁾。

配電作業ロボットは、トラックの荷台に搭載されたブーム先端に操縦席およびマニピュレータを取付けた構成をしている。ブーム部は旋回、起伏、軸方向の伸縮、先端部分の首振りの4自由度を持ち、先端のマニピュレータ部を作業箇所(電柱の上部)に運ぶ役目を果たしている。マニピュレータは双腕を有し、それぞれ6軸づつ回転自由度を持っている。また作業は遠隔操作方式で実行される。

3.3 実験内容 前述の2種類のトラス機能試験モデルを用いて、トラス展開実験とパイプ差込実験を実施した。トラス展開は2ユニットいっぺんに行い、上下フレームパイプの軸まわりの回転が相殺するような形で行い、またパイプ差込作業は、前述のリファレンス作業手順に従って組み立てる方法と、斜めパイプを側面方向からはめ込む方法の、2通りの方法で行った。

またパイプを鉛直方向下向きに差し込む際、把持器のグリップ力を途中で弱めると重力によりパイプが自然にジョイント穴に落ち込む場合がある。この状況を避けるため、差込が完了するまでグリップ力を弱めずに作業を進めた。さらにトラス全体を倒して、長手パイプを横方向に差し込む実験も実施した。

組立トラスのパイプは人間がキャビン内から手渡しで渡した。すなわちトラス組立作業は毎回エンドイフェクタ先端をキャビン手前まで戻しパイプを受け取った後に、腕を前方の作業箇所に伸ばして差し込むかたちで進めた。配電作業ロボットの操作は筆者自らの手で行った。

なお組立トラス実験では、パイプを1本差し込む毎に人間がねじ止めを行い、ラッチ機構を備えたトラスを組み立てるように作業を進めた。すなわち本実験で行うトラス組立実験は、機能的にはラッチ機構付きトラスで行う実験と等価である。

3.4 実験結果

3.4.1 トラス展開作業 第2図と同じ動作で配電作業ロボットの双腕を用いてトラス展開を行ったところ、何の問題もなく作業を実行できることが確認できた。したがって、ロボットベースがトラス構造物の下端に固定されていれば、微小重力環境においても展開できることが予想される。

3.4.2 トラス組立作業

1) 長手パイプ差込作業 第7図(a)は長手パイプ1本目を差し込む様子を表す(手前の斜めパイプには意味なし)。作業は2mほど手前のキャビン内から目視により行ったが、差込作業を実行することができ

た。作業中の目視の内容はパイプ先端とジョイント穴の位置と姿勢のずれ情報(どの方向にどれだけ)だけであった。ただし差込が完了したか否かもトラスの変形状態から判断した。作業は単腕で行った。

第7図(b)は長手パイプ2本目を差し込む様子である。この場合作業箇所が手前すぎてキャビン内から目視することはできなかった。そのため補助者から、パイプ先端とジョイント穴のずれ情報の教示を受けながら作業を行った。その結果パイプをジョイントに差し込むことができた。教示情報はパイプ先端とジョイント穴の位置姿勢のずれ情報と、差込が完了したか否かの情報であった。作業は単腕で行った。

第7図(c)は長手パイプ3本目の差込失敗例である。作業箇所がキャビンから最も遠いので奥行き情報が分かりづらく、またフィード後の運搬距離が最も長くなった。そのためパイプを作業箇所に運ぶまでに上端がキャビン側に傾いてしまい、そのまま差し込んだのでパイプ先端が途中で引っかかった。トラスがたわんだので差込が完了したと思いグリップを開くとパイプが跳ねて落下したわけである。このときも作業は単腕で行った。

そこで今度は補助者からパイプ姿勢のずれ情報の教示を受けながら差込作業を行ったところ、3本目の長手パイプを差し込むことができた。やはり作業は単腕で行った。

2) フレームパイプ接続作業 第7図(d)はジョイント2つ目を長手パイプに被せる作業の失敗例である。この場合ジョイントをパイプ頭に近づけると、それに合わせてパイプ頭もジョイントから離れる方向に逃げ、結局フレームを接続することができない。これはフレームパイプが1本目の長手パイプで下側(トラスユニット)と接続しており、フレーム運動が相手側パイプに伝わるために生ずる現象である。

第7図(e)は片腕で長手パイプを押えながらもうひとつの腕で2つ目のジョイントを被せる作業を表す。双腕を用いるとフレームの接続を行うことができた。また3つ目のジョイントも双腕で接続可能であった。

3) 斜めパイプ側面はめ込み作業 第7図(f)は斜めパイプを側面方向からはめ込む様子を表す。この場合は長手パイプと異なり単腕で作業を行おうとすると、トラス全体が横方向にふらついてうまくはめ込むことができなかった。そこで図のように片腕(図では右腕)でトラスを支えて残りの腕で斜めパイプのはめ込みを行った。

これは、目視によってパイプの姿勢を45°に維持することは困難なので、本来スムーズにはめ込むことができるはずのパイプ頭がジョイントに引っ掛かるため

第7図 ロボットによるトラス地上組立実験

である。

4) 長手パイプの水平方向への差込作業 第7図(g)は長手パイプを水平方向に差し込む作業例を表す。ロボットの単腕で、長手パイプをすべて組み立てることができた。

5) 斜めパイプの双腕協調差込作業 第7図(h)はパイプ下端を軸方向に差し込む様子を表す。上述の結果と同様に作業は問題なく行うことができた。第7図(i)はロボット左腕（写真の右側の腕）でトラスをたわめて、右腕で斜めパイプ頭をジョイント穴に運び、たわみを戻しながら頭を穴に差し込む様子を表す。作業はうまく実行することができた。

3.4.3 組立実験から得た知見 まず、展開トラスに関しては、次の知見を得ることができた。

- 1) 位置決めサーボ機能を備えた双腕を用いてトラスの展開作業が可能であることを確認できた。
- 2) 今回の実験ではトラス捕捉に適したエンドイフェクタが見つからないためトラス側に捕捉部を設けた。またエンドイフェクタを工夫すれば単腕でも展開可能であることが分かった。すなわちトラスを展開する場合は、むしろエンドイフ

ェクタの設計が重要であることが分かった。

次に、組立トラスに関しては、以下の知見を得ることができた。

- 1) 位置決めサーボ機能を備えた双腕でパイプ差込作業、フレーム接続作業、側面方向からの斜めパイプ差込作業および最も作業レベルの高い協調作業（構造物をたわめながら斜めパイプ頭を穴に差し込む）をすべて実行可能であることを実証できた。
- 2) そのうち長手パイプ下端と斜めパイプ下端の軸方向差込は単腕で行うことができた。これらを単腕で差し込むことができる理由は、下側ユニットが完成している（静定トラス状態にある）ので差込口が不規則にふらつくことがないためであると考えられる。
- 3) いっぽう長手パイプ上端部分の差し込み（上側フレームパイプの接続）と、斜めパイプの側面方向からの差し込み作業は双腕が必要であった。長手パイプ下端と違い双腕が必要な理由は、差し込まれる側が未完成（不安定状態）なのでわずかの外乱により差込口が不規則に運動するた

めである。

- 4) フレームパイプの1つ目の接続は単腕で作業可能な場合があった。しかし2つ目以降のジョイントを接続する場合には、フレーム運動が下側ユニットを介して相手側パイプに伝わるので必ず双腕が必要であった。したがって斜めパイプ組立方法(側面からのはめ込み、軸方向差し込み)に関係なく作業には双腕が必要であることが分かった。
- 5) 構造物をたわめながら斜めパイプ頭を穴に差し込む作業は必ず双腕が必要であった。しかし力フィードバックなしの位置決めサーボ機能で充分作業が可能であった。
- 6) 作業に必要な視覚情報は、はめ込み口とパイプ頭の位置・姿勢のずれ情報と、差込完了情報の2つであった。このことは操縦者が作業対象物を目視せずに補助者から間接的に情報を教えてもらうことにより、実験的に確認できた。
- 7) また作業は、ずれ情報を教示してもらいそれを修正しながら進める方法(単純な視覚フィードバック制御)で実現できることを確認できた。
- 8) 作業はすべて6自由度マニピュレータで障害物を回避しながら同時にパイプ頭の位置と姿勢を合わせることができた。すなわち各腕の自由度

は6自由度あれば良いことが確認できた。

- 9) 一般に物体の位置・姿勢を合わせるにはそれだけで6自由度必要であるが、障害物回避まで行えたのは、パイプが軸まわりに対称形状であること(1自由度浮いたことになる)と、低密度のトラス構造物のため障害物回避がそれ程自由度負担にならなかったため、と考えられる。
- 10) 実験結果より、視覚センサ付きの産業用ロボット仕様のマニピュレータ(力フィードバック制御なし位置決めサーボ)で、作業が最も困難な組立トラスまで組立可能であることが分かった。すなわち、力制御機能を付加したロボットコントローラを新規開発する必要はなく、既存の産業用コントローラで代替可能なこと(その分、開発コストを削減できること)を実験的に示した。

3.4.4 組立作業における危険性解析 トラス組立作業実験では、当初予定していた配電作業ロボットによる作業達成度の確認や、組立マニピュレータのシステム要求の抽出の他に、トラス組立作業における不具合要因の分析まで行うことができた。この分析は軌道上組立マニピュレータシステムの設計を行う上で貴重な資料となるので、危険性解析¹⁰⁾の結果として整理する(第1表)。

このうち特に、上側フレームパイプ装着作業中の長

第1表 トラス組立作業における危険性解析

不慮の事態	原因	フェーズ	影響	対策
パイプ先端 引っ掛かり	-パイプ先端～ジョイント間の相対位置・姿勢認識の誤差	-パイプ単純差込み(すべて) -フレーム装着動作(すべて) -双腕協調差込み(すべて)	-ラッチ失敗 -トラス材料の塑性変形や品質低下 -構造物の許容応力低下	-差込動作をもう一度繰り返す -カメラ視点の変更 -カメラの複数化 -差込み動作・制御アルゴリズムを工夫 -画像認識アルゴリズムを工夫 -画像認識高精度化
	-はめあいガタによるパイプのランダムな姿勢変動	-フレーム装着動作(2個目以降*)	-ロボットの移動不可能	
	-他の接続箇所を介して伝わる振動や変形力	-フレーム装着動作(2個目以降*)		
パイプ先端・ジョイントの逃げ	-はめあいガタによるパイプのランダムな姿勢変動	-フレーム装着動作(2個目以降*)	-ラッチ失敗 -構造物の許容応力低下 -ロボットの移動不可能	-差込動作をもう一度繰り返す -逃げやふらつきを抑えるため双腕で作業を行う
	-他の接続箇所を介して伝わる振動や変形力	-フレーム装着動作(2個目以降*)		
トラス材料 の落下	-トラス材料把持の不具合	-パイプ単純差込み(すべて) -フレーム装着動作(すべて) -双腕協調差込み(すべて)	-ラッチ失敗 -構造物の許容応力低下 -ロボットの移動不可能	-別の材料を使用する -エンドエフェクタ改良 -差込み動作・制御アルゴリズムを工夫 -状況認識能力向上
	-ラッチ未完了のままグリップ開放したらパイプがはぜて飛んだ	-パイプ単純差込み(すべて) -フレーム装着動作(1個目だけ)	-他の建設材料(太陽電池アレイなど)の破損	

注*) 移動機構などの振動を伝える媒体が存在する場合は1個目から対象になる。

手パイプの逃げは実験計画では想定していなかった事態である。地上実験を分析した結果、作業レベルには単腕による単純差込、双腕による複雑な協調はめ込みの他に、パイプのふらつきを押さえるための双腕による同期差込の、3種類のレベルがあることが判明した。

同期差込と協調はめ込みの違いは微妙であるが、繰り返し精度の優れたロボットでプレイバック可能なものが同期差込（単腕はパイプのふらつきを押さえるだけ）、ガタや柔軟性などの不確定要素を含むためにプレイバック不可能なものが協調はめ込みである。

3.4.5 構造物の振動の影響 ここで扱った組立作業は、ロボットベースがトラス構造物上の一部に固定されることを想定している。そのため、実際の微小重力環境においても、地上組立実験と同様にトラス組立作業が実行できると考えられる。

しかし、軌道上組立作業では、組立ロボットの運動やパイプ差込の反動などにより振動が発生し、構造物に無理な荷重がかかって破損に至る危険性が存在する。この点に関しては、今後、組立ロボットと構造物相互の振動を考慮した、数値シミュレーションあるいは地上組立実験を実施して、検討する必要があると考えられる。

4. トラス実用モデルと組立マニピュレータの提案

4.1 組立トラス実用モデルの提案 第2章の組立トラスは、ロボットによる組立作業の作業レベルを測定するために製作したモデルなので、実用モデルとしては未完成であった。あわせて地上組立実験より、斜めパイプは側面からはめ込まなくても組立てられることが実証できた。そこで、実用性の高い組立トラスジョイントとラッチ機構を設計した（第8図）。

この設計の特徴は、パイプ側ではなくジョイント側に突起部を設けたところにある。このように設計変更することにより、パイプ端を包み込まなければならないというジョイント形状の制約がなくなり、ジョイント容積・重量を6割程度まで削減することに成功した。またパイプ端にピンを立てる必要がなくなったため、部品点数、コストの軽減にも成功した。これらはパイプ中身が中空であることをうまく利用した設計変更である。またラッチ機構もシンプルな形状にまとめあげることができた。

いっぽう展開トラスに関してはすでに実用化を考慮したリアルなモデルを提案した。しかしできる限りシンプルな形状にしようとしても、ジョイント形状は非常に複雑なものになった。またトラスの対称性を最大限利用しても、部品点数はかなりの数にのぼった。さらに加工を低コスト化するため回転部分には市販のベ

第8図 組立トラスの実用モデルの設計例

アリング、ボールジョイント等を用いたが、ジョイントコストは上述の組立トラスジョイントに比べて約4倍になった。

そこで本研究では低コスト化を実現するトラス構造物として、軽量で、製作コストも安く、充填効率の高い組立トラスを提案する。

4.2 組立マニピュレータシステムの提案 組立マニピュレータに関しては、トラス地上組立実験から次の具体的なシステム要求を抽出できた。前節で提案したトラス実用モデルも組立の作業レベルは同一なので、これを宇宙用組立マニピュレータのシステム要求としてここに整理する。

- 1) マニピュレータは力フィードバックなし位置決めサーボロボットで充分機能を果たす。
- 2) 組立トラスにはガタや柔軟性による誤差が存在するため、視覚フィードバック制御が必要である。
- 3) 作業にはパイプをたわめながら差し込む協調動作が含まれるため、双腕にしなければならない。
- 4) マニピュレータの自由度は各腕につき6自由度あればよい。自由度配置は横置き6自由度が望ましい。

ところでトラス差込作業の特徴は、作業箇所が広範囲に分散している上に、差込作業のストロークが短い

第9図 組立マニピュレータの設計案

点である。そこで組立機構は精度は粗いが可動範囲の大きいブーム部と、可動範囲は小さいが高精度作業が可能なマニピュレータ部の2つの機構に分割する。すなわち上記に加えて次のシステム要求を追加する。

- 5) マニピュレータのリーチは長くせず0.5m程度にする。
- 6) マニピュレータを作業箇所应运ぶブーム部を別途準備する。
- 7) ブーム自由度は6箇所のジョイント位置への移動と側面トラス接続作業を実行できるように定める。

以上のシステム要求を満たすように定めた組立マニピュレータ設計案を第9図に示す。ブーム部には前後方向の並進自由度、上下方向の並進自由度、および回転1自由度を設けた。

5. ま と め

宇宙構造物向けのトラス構造物として、展開トラスおよび組立トラスの2通りの構造物を製作した。このうち展開トラスは、1ユニット当たり27自由度で実現できることを示した。また組立トラスの作業レベルには、単腕単純差込、双腕同期差込、双腕協調はめ込みの、3種類の作業レベルがあることを示した。また6自由度のカフィードバックなし位置決めマニピュレータ2本で、トラスの組立作業が可能であることを示した。地上実験結果にもとづいて、トラス構造物には軽量で、製作コストも安く、充填効率の高い組立トラスを、組立マニピュレータには6自由度の視覚フィードバック付位置決めマニピュレータ2本に可動範囲の大きいブーム部を付加した機構を、それぞれシステム

全体の低コスト化に適した方式として提案した。

本研究を行うにあたり、文部省宇宙科学研究所の長友信人教授には研究のご指導をして頂いた。また、中部電力株式会社の村井友廣氏には、配電作業ロボットを地上組立実験のために使わせて頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Bush, H. G., Heard, W. L., Jr. and Walz, J. E.: Structural Concepts for Large Spacecraft, NASA CP-2118, 1980, pp. 199-215.
- 2) Bush, H. G., Lake, M. S., Watson, J. J. and Heard, W. L., Jr.: The Versatility of a Truss Mounted Mobile Transporter for In-Space Construction, NASA TM-101514, 1988.
- 3) Jenkins, L. M.: Construction of Large Space Power Facilities, Space Power, 8, 3 (1989), pp. 379-386.
- 4) Rhodes, M. D., Will, R. W. and Wise, M. A.: A Tele-robotic System for Automated Assembly of Large Space Structures, NASA TM-101518, 1989.
- 5) 鈴木啓司: 10,000 KW 級太陽発電衛星のシステムに関する研究, 東京大学大学院修士論文, 1991.
- 6) 福澤修一朗, 長友信人: 太陽発電衛星のビーム建設方法について, 第35回宇宙科学技術連合講演会, 1991, pp. 209-210.
- 7) 福澤修一朗: ロボットによる太陽発電衛星 SPS 2000 の建設手順について (建設システム設計案と建設タスク分析), 第9回宇宙構造物シンポジウム, 1993.
- 8) Natori, M. and Miura, K.: Deployable Structures for Space Applications, 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1985.
- 9) JATEC 日本技術経済センタ: 架空配電線工事と無停電工法最新総合技術資料集, メディアハウス, 1991.
- 10) Rodgers, W. P.: Introduction to System Safety Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- 11) 福澤修一朗, 長友信人, 村井友廣: 配電作業ロボットを用いた SPS 2000 主構造ビーム建設実験, 第11回宇宙エネルギーシンポジウム, 1992, pp. 71-77.