

トラスビームビルダーの開発および建設エネルギーの考察

平山 寛*・稲垣直寛**

Development of a Truss Beam Builder and Study about Energy for Construction

By

Hirohsi HIRAYAMA* and Naohiro INAGAKI**

Abstract : SPS2000 task team are developing technologies for automatic construction of large space structures on orbit, to prove a feasibility of the SPS2000. A truss beam builder was developed in this study, whose functions can be verified easily in gravity condition on the ground. It became possible by using this machine to estimate a value of energy required for construction of the truss beam in weightlessness from results of ground experiments.

Then a power control system was developed, which improves efficiency of energy usage for a DC motor from a solar array. This system adjusts numbers of series and parallel sells in the array to match an operation point of the motor with a maximum output power point of the array. The advantages of this system were predicted from numerical simulations of this system.

概 要

SPS 2000 タスクチームでは、SPS 2000 が建設可能であることを実証するために、大型宇宙構造物の軌道上自動組立技術の開発を進めている。その研究のひとつとして、地上重力下でも機能検証が容易なトラスビームビルダーを開発した。これを用いて、無重量状態でのトラスビーム建設に要するエネルギーを地上実験から推算することが可能となった。

また、組立機械上の太陽電池で発電した電力を、DCモーターでの仕事に有効に変換するために、作業状態や日照条件が変化しても、太陽電池の接続を変化させて、より多くの仕事を行える電力制御システムを開発し、実証実験を行った。

*九州大学

**東京大学大学院

重要語：大型宇宙構造物，トラスビーム，自動組立，宇宙ロボット，太陽電池

1. 序

1.1. 背景

SPS 2000 の実現のためには，大型宇宙構造物の軌道上建設が大きな技術課題である．とくにコストおよび安全性を考慮すると，組立はロボットや自動機械を用いて無人で行うことになる．このためSPS 2000 ワーキンググループでは，SPS 2000 が建設可能であることを実証するために，自動組立に適した建設方法を提案し，かつそれを実験的に実証する試験を行ってきた．

1991年には主構造トラスビームの伸展方法として，組立式と展開式の2種類を製作し比較を行った．また，既製の6自由度双腕手動操縦マニピュレータを用いた伸展実験を行い，両形式とも伸展可能であることを実証するとともに，組立機械に要求される機能の洗い出しを行った．

先の結果として，部分組立式のトラスビームを採用し，組立の際の位置決めには視覚情報が重要であることが指摘された．そのため1993年に，ビデオカメラ画像を用いてトラス部材の位置・姿勢を計測する技術の開発が行われた．

その後，自動組立へ向けた開発が本格化し，1994年には5自由度と4自由度の2台組のマニピュレータを製作し，トラスビームの組立実験を行った．この頃より，組立機械の消費エネルギーという観点が重要視されるようになった．これは，組立機械で利用できる電力は搭載太陽電池によって限られているため，作業速度の上限は単位作業に要するエネルギーにほぼ反比例することが予想されるからである．したがって，このマニピュレータでは，太陽電池による駆動実験を行い，建設に要するエネルギーが測定された．しかし，マニピュレータによる組立では，無重量状態の模擬が難しく，宇宙での建設エネルギーを地上実験で測定する精度に疑問が残った．

宇宙機器全般に言えることだが，とくに大型宇宙構造物では，地上試験の際に無重力模擬を行う設備も大規模になり，開発費に占める試験コストの比が高くなる傾向がある．SPS 2000ではコストを重視するため，試験コストを抑える方法を考えた．そこで，1996年に，地上重力下での機能検証がしやすいように工夫した，トラスビームビルダーを開発した．この機械は，建設に要する機械の仕事に関して，重力に対する仕事を組立機械の内部でキャンセルする機構をもつ．そのため，外部に重力補償設備を必要とせず，無重量状態での建設エネルギーを，地上実験で容易に測定することができる．この機械を用いて，トラスビーム組立実験を行い，その際の消費電力を計測した．本論文では，このトラスビームビルダーの開発と，消費電力について述べる．

1.2. 目的

本研究では，SPS 2000の組立機械が必要とするエネルギーを見積もることと，地上で機能検証試験がしやすい組立機械および試験方法を開発することを目的とした．続いて，太陽電池とDCモーターの特性を考慮して，限られた太陽電池の発生エネルギーから，より多くの仕事をひきだすための，電力制御方法を考案し，試験で実証することを目的とする．

2. 機構の内力で重力を補償するトラスビームビルダーの開発

2.1. 機構の内力で重力補償の概念

上下対称な動作を単一のモーターで駆動する場合，上昇する質量へ与える仕事と，加工する質量から得る仕事と，動力伝達機構の内力を通して相殺されるため，モーターの負荷トルクには重力に対する仕事が作用しない．この原理を応用し，懸架機構などの外部設備なしに，消費エネルギーに関する無重量模擬が可能なトラスビームビルダーを開発した．図1に機構の模式図を，図2に外観写真を示す．この機械は主に6本の送りネジからなり，

3本は右ネジ, 3本は左ネジで, 1本のタイミングベルトを介して1個のモーターで駆動されるので, それぞれの組は逆方向へ等速で移動する. 送りネジの先端には, トラス部品を把持するためのエンドエフェクタが固定されている. 上昇側が重力に対して行う仕事と, 下降側が重力から得る仕事は, 双方で運搬するトラスの重量が等しい場合には, タイミングベルトの張力を介して釣り合い, モーターの電力消費には重力の効果が現れない.

この装置は1辺1mのオクタヘドラルトラスビームを, 上下に最大10段ずつ, 合計約17m伸展することが出来る. 敢えて重力に対する仕事が見えやすい鉛直方向へトラスを伸ばすのは, この方式による重力補償の効果を確認しやすくするためと, トラスビームが外部からの支持なしに水平伸展された場合の曲げ荷重よりも, 鉛直伸展の場合の軸荷重に強いからである.

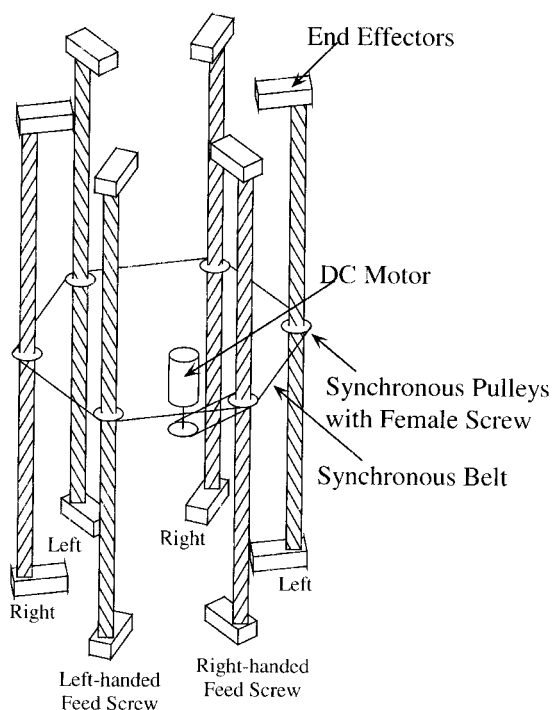


図1 トラスビームビルダーの機構模式図



図2 トラスビームビルダー外観写真

2.2. オクタヘドラルトラスビームの伸展

伸展実験に用いるトラスの形式として, 対称性が高く, 自動組み立て作業に適している, オクタヘドラルトラスビームを採用した. 収納状態からの伸展手順を図3に示す. ビームは収納状態では分解され, 正4面体を積み重ねた状態に納められている. 正4面体の3側面がパネで展開し, ビームの1段分である正8面体となる. この正8面体が, 送りネジによる上下動と収納部の水平回転運動によって連結されて, オクタヘドラルトラスビームとして伸展される.

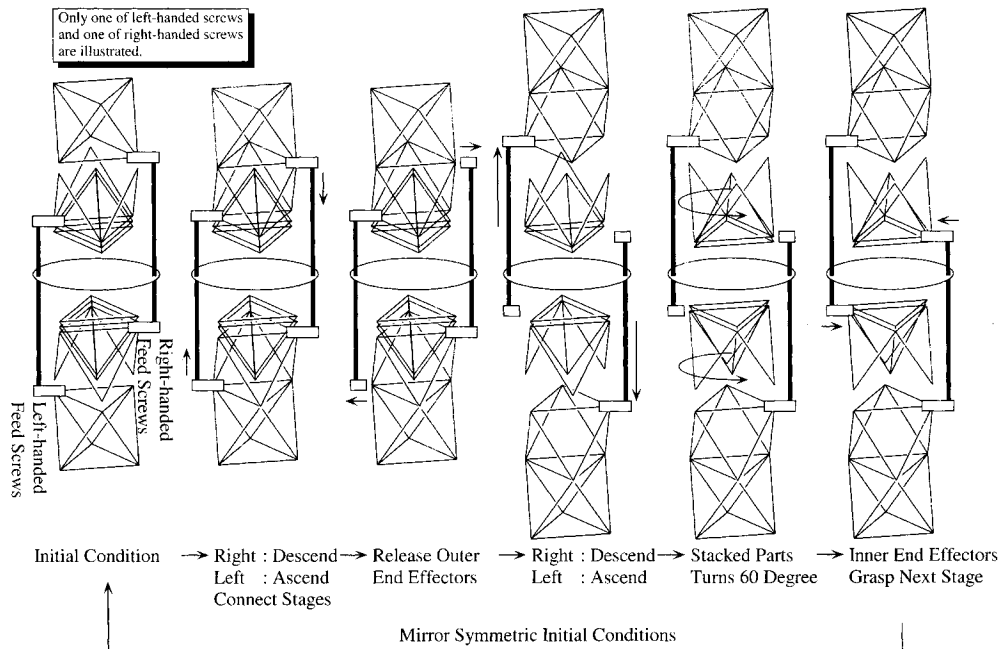


図3 トラスビームの伸展作業手順

2.3. 実験結果

トラスビームの伸展実験の結果、組立機械の構体およびトラス部材の剛性不足のため、トラス要素同士の接続の際に位置精度が不十分で、完全自動化には至らなかった。しかしその部分だけ有人で補助すれば、伸展作業は可能となり、消費エネルギーの測定も出来た。

測定の結果、重力に関する仕事は相殺されており、モーターの消費電力に作用しないことが確かめられた。よってこの重力補償方法は、無重量状態での作業に要する消費エネルギーを地上実験で計測する場合に、簡易で有効な方法であると言える。

本装置では、送りネジの減速比が大きく、摩擦係数も大きかったため、負荷重量を与えたときに、重力に対する仕事よりも摩擦力に対する仕事の方が約10倍の値をもって増加した。摩擦成分は見積もることが出来るので、それを差し引くと無重量状態での仕事を見積もることが可能であるが、精度の低いデータとなる。したがって今後の課題として、良好な無重量模擬のためには、機構の運動に伴う摩擦力を小さくする必要があることが指摘された。

3. 太陽電池の接続切換による電力利用効率の向上

3.1. 太陽電池の接続切替による動作点マッチングの概念

通常的人工衛星での太陽電池アレーの構成は、バス電圧を上回るように直列セル数が、必要な電流を上回るように並列セル数が決定されている。そして負荷とのマッチングのため、余剰な電流と電圧は、レギュレータで熱として消費され、これはエネルギー損失となる。また、ほとんど全ての衛星は、日陰での運用のために二次電池を使用している。この充放電の効率に関しても、エネルギー損失が生ずる。

しかし組立機械の場合、DCモーターは安定なバス電圧を必要としない。また、二次電池がなくとも、日陰時は作業を休止することになるが、日照時には充電に割く電力が要らない分、より多くの作業が可能で、一周期で達成する仕事は、二次電池を用いるのと同程度になると予測される。したがって、太陽電池とDCモーターを直結駆

動する組立機械は、電圧・電流のレギュレーションや、充放電にかかわる電力損失を除去できる分だけ、より多くの仕事を達成できる可能性がある。その上、二次電池がない分、軽量で、シンプル・高信頼そして低コストにできる。

DCモーターを太陽電池に直結駆動した場合の動作点は、両者のI-V特性の交点となる。その動作点と、太陽電池特性の最大電力(P_{max})点との差は、利用されなかった電力となる。電力利用効率を向上させるには、動作点が P_{max} 点に近くなるよう特性をマッチングさせる。しかしモーターの特性は、作業負荷によって変動し、太陽電池特性も日照条件等によって変動するため、単に両者を直結するだけでは、幅広い条件下に渡ってマッチングを保つことができない。

太陽電池アレーがサブアレーからなる場合、サブアレーの直列・並列数を再構成することにより、アレー全体としてのI-V特性を調整することができる。図4はこの概念を、2つのサブアレーの場合で示したものである。負荷や太陽電池の発電状態に応じて、サブアレーの直・並列をより適した構成に切り替えることにより、動作点は P_{max} 曲線に近づく。切替を行うサブアレー数を増やしてゆくと、合成されたI-V特性は、 P_{max} の包絡線に漸近してゆき、幅広い条件下に渡ってマッチングを保つことができる。

同様の効果は、モーターの減速比を可変にすることによっても得られるが、電気的な切替の方が故障も少なく、かつ軽量にできると思われる。

3.2. 実験モデル

直並列切替による効果の実証のために、4枚のアレーからなる実験装置を製作した。このアレーの3通りの接続パターンを図5に示す。図6はこの装置のブロックダイアグラムである。太陽電池はハロゲンランプで照射され、スイッチングユニットとPCを用いて、より多くの電力を供給するように直並列数が切り替えられる。PCは動作点の電圧・電流とモーターの回転数を計測し、どの接続パターンが最適か判断する。太陽電池への入射光の放射照度と、モーターの負荷の重さは手動で設定される。太陽電池の接続切替は、スイッチングトランジスタで行っているため、若干の電圧降下が生じる。

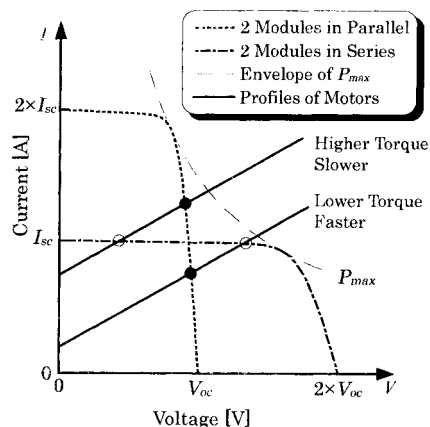


図4 直並列切替によるマッチングの概念

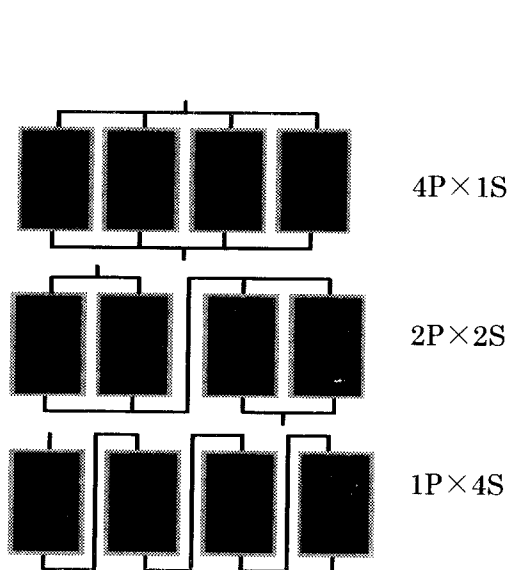


図5 4枚の太陽電池アレーの接続パターン

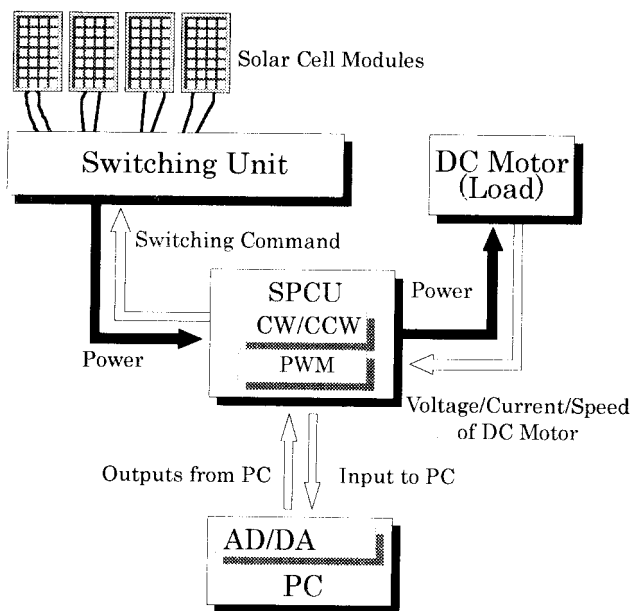


図6 実験装置のブロック図

3.3. 結果

上述の実験装置は、自動切替機能が現在開発中のため、切替を手動で行い、定常状態について実験を行っている。ここでは、この装置のパラメータに基づいた数値シミュレーション結果で、その効果を示す。

図7は、太陽電池への放射照度に対する、モーターの定常回転角速度を表している。十分な照度が得られるときには、直列接続の方が多くの仕事をできるが、照度が少ない場合には並列の方が有利である。

図8は、この切替式の太陽電池での始動時の加速特性を、4枚直列接続で固定の太陽電池で駆動した場合と比較したものである。始動直後には4枚並列状態で、大きなトルクで加速する。速度が上がるにつれ、トルクは不要になり、より高速回転に適した、2直列2並列へ、さらに4直列へと切り替わる。この結果、直列固定の太陽電池に比べて、応答特性が良く、かつ多くの仕事を行うことができる。

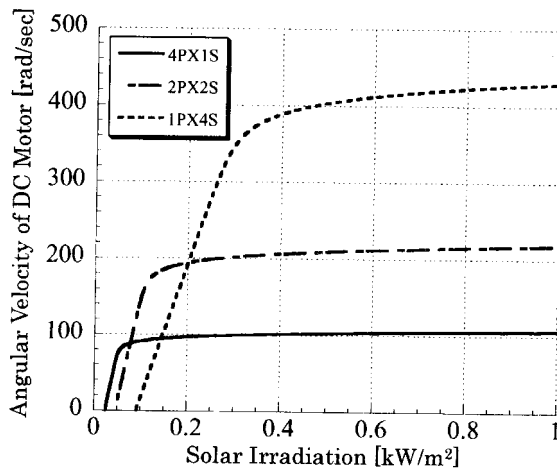


図7 放射照度と回転数の関係

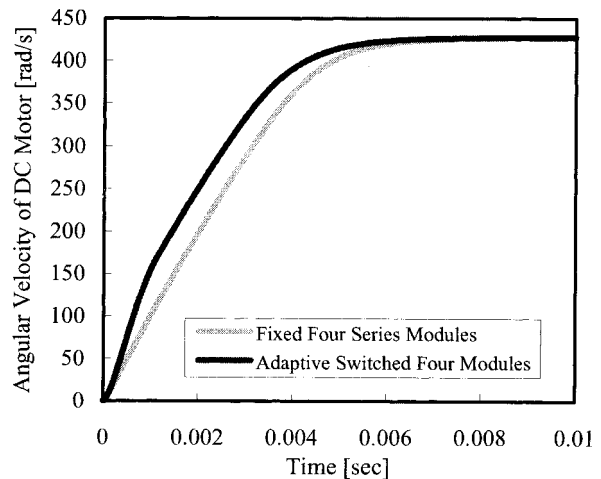


図8 加速時の加速

4. まとめ

トラスビームビルダーの開発と、その電力利用効率果然の方法について研究を行った。上下対称動作をするビームビルダーによる実験では、重力に対する仕事を機構の内力で相殺する方法を検証した。その結果、無重量状態での作業エネルギーを地上重力下で見積もる簡素な試験法として有効であることを示した。

電力利用効率向上の研究では、日照状態や負荷トルクに応じて、太陽電池アレーの直並列数を切り替えることにより、より多くの仕事を達成できることを示した。

謝 辞

トラスビームビルダーの実験は、宇宙科学研究所・宇宙エネルギー工学部門にて、長友信人教授の指導の下で行われた。遂行にあたっては成尾芳博、前野潤、石井忠司、衛藤雅己の各氏をはじめ、宇宙エネルギー工学部門の各位から多大な尽力をいただいた。また、太陽電池に関する研究は、九州大学大学院・航空宇宙工学専攻にて行われた。これは、中野健二、末松護の両氏によるところが大きい。この場を借りて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] 宇宙科学研究所・太陽発電衛星ワーキンググループ・SPS2000タスクチーム：SPS2000概念計画書, 1993.
- [2] 平山 寛, 石井忠司, 吉田浩充, 小笠原正和, 成尾芳博, 長友信人：エネルギー消費を設計パラメータとする自動組立機械の考察, 第38回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1994.
- [3] Ishii, T. and H. Hirayama : Application of Robots Directly Powered by Solar Cell Array to the Construction of SPS2000 , 第14回宇宙エネルギーシンポジウム , 1995.
- [4] 石井忠司：太陽電池直結型宇宙用自動組立装置の可能性について, 東京大学修士論文, 1995.
- [5] 平山 寛, 稲垣直寛：地上重力下で自動組立機能が検証可能な宇宙構造物に関する実験と考察, 第12回宇宙構造・材料シンポジウム, 80-83, 1996.
- [6] 稲垣直寛, 平山 寛：重力の影響を最小化するトラス自動組立機械に関する考察と実験, 第12回宇宙構造・材料シンポジウム, 84-87, 1996.
- [7] 稲垣直寛：重力を内部でバランスさせる機構を持つトラスビーム自動組立機械の試作と評価, 東京大学修士論文, 1997.
- [8] 衛藤雅己：SPS2000主構造トラスビームの建設時間の実験的考察, 東京都立科学技術大学学士論文, 1997.
- [9] 平山 寛, 稲垣直寛, 衛藤雅己, 中野健二：地上で機能検証が可能なトラスビーム組立機械の開発, 第41回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1997.
- [10] 中野健二：太陽電池直結によるDC MOTORの動特性試験, 九州大学学士論文, 1998.
- [11] Hirayama, H. and N. Inagaki : Development of an Automatic Truss Beam Builder for Verification on the Ground, Proceedings of 22nd ISTS, 98-b-12, 1998.
- [12] 中野健二, 末松 護, 平山 寛：大型宇宙構造物を建設するための, バッテリーなし太陽電池システムの性能評価, 第43回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1999.
- [13] 末松 護, 中野健二, 平山 寛：大型宇宙構造物の建設に対する太陽電池電力システムの提案と有効性の実証, 1999日本航空宇宙学会西部支部講演会, 1999.
- [14] 中野健二, 末松 護, 平山 寛：宇宙太陽電池システムに関する研究, 第19回宇宙エネルギーシンポジウム, 2000.
- [15] 中野健二：宇宙用太陽電池システムに関する研究, 九州大学修士論文, 2000.
- [16] 末松 護：太陽電池の接続を負荷に応じて切替えることによる有効性の実証, 九州大学学士論文, 2000.
- [17] Hirayama, H., K. Nakano and M. Suematsu : Adaptive Switching of Connections between Solar Arrays to Drive a DC Motor Efficiently for Space Robots, Proceedings of 23rd ISTS, 00-d-23, 2000.
- [18] 平山 寛, 稲垣直寛：地上重力下で機能検証が可能なトラスビーム組立機械の開発, 日本航空宇宙学会論文集, 2000.