H型宇宙トラス構造物移動ロボットの 機構と制御に関する研究*

福田 敏男^{*1}, 松浦 英雄^{*2}, 新井 史人^{*1}
西堀 賢司^{*3}, 小栗 隆嗣^{*4}, 小西 盛人^{*5}

Mechanism and Control of Mobile Robot on H-Type Space Truss Structure

Toshio FUKUDA, Hideo MATSUURA, Fumihito ARAI,
Kenji NISHIBORI, Takashi OGURI and Morihito KONISHI

The age of space development is approaching, and development of space robots is becoming increasingly important. We have developed a small mobile robot on an H-type space truss structure to perform maintenance tasks on the space structure. This robot has two hands which can hold the truss, and moves on the truss by the inch worm mechanism. The remarkable feature of this robot is the compact extension mechanism. It is connected with pantographs in series. This mechanism enables the realization of a high rate of expansion with light weight. In this paper, we present the mechanism and control method of this robot and results of mobility experiments obtained under the gravity compensation system.

Key Words: Space Robot, Motion Control, Moving Robot, Manipulator, Computer Control

1. はじめに

現在人類は本格的な宇宙開拓時代を迎えようとしている。20世紀末に打ち上げが予定されている有人宇宙ステーション「フリーダム」をはじめとして、構想段階の宇宙ステーション、月面ステーションなど多種多様の宇宙大形構造物が考えられている⁽¹⁾。

宇宙ステーションは全長100mもの巨大な構造物のため、宇宙空間で組立てるのが望ましい。現在アメリカが進めている宇宙基地フリーダムで用いられる方法は、人間が宇宙空間に出て直接作業を行う方法でEVA(Extra-Vehicular-Activity)⁽¹⁾⁽²⁾と呼ばれ、従来、宇宙大形構造物の組立、修理、点検のための基本的手段とされてきた⁽³⁾。

しかし、人間の宇宙空間での船外活動は次の理由から当初期待されたほど有効ではなかった。

(1) 厚い手袋をしているため細かな作業を十分に

こなせない。

(2) 疲労が激しく、長時間の作業ができない。

(3) 移動に時間を要する。

(4) 作業対象からの反作用を吸収する機構を要する。

(5) 人間が宇宙で活動・生活していくためには、酸素、水、食料が必要で、これらを維持する装置の打ち上げコストが大きすぎる。

(6) 人間が危険にさらされる機会が多い。

これらより、ロボットを使用することの優位性が指摘され、その開発が進められている^{(1)~(6)}。このようなロボットには、組立作業以外に宇宙構造物の破損個所の検査・診断の機能、さらには補修作業の機能が求められている。

従来より研究されていたロボットとしてSMM(Self-Mobile Space Manipulator)⁽⁵⁾があげられるが、コンパクトに収容することが困難で運搬の際に収容スペースを大きくとってしまうという欠点があった。本研究では、先に述べた補修作業などに対応するための構造物上の移動が可能であるのみならず、収容時にはできるだけロボット本体が小さくなるよう伸縮率を大きくしたロボットを提案することを目的とする。我々は従来研究において、地上の配管の外側を移

* 原稿受付 1995年12月1日。

^{*1} 正員、名古屋大学大学院工学研究科(〒464-01 名古屋市千種区不老町1)。

^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員、大同工業大学工学部(〒457 名古屋市南区大同町2-21)。

^{*4} 大同工業大学学部生。

^{*5} 大同工業大学大学院。

動可能なロボットの機構と制御に関する研究を行った⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。宇宙トラス構造物上の移動では配管上の移動と同様、別のトラスへの乗り移り動作が必要となる。このため機構設計において、従来研究を参考とした⁽⁷⁾。配管ロボット⁽⁷⁾では重力の影響のため伸縮率を大きくすることが困難であったが、本研究では宇宙での利用を考えるため、伸縮率を大きくし、本体をコンパクトにまとめるための機構として、伸縮装置をパンタグラフ状のパーツを連ねた構造にした。これにより高い伸縮率を実現したところに大きな特徴がある。このような宇宙ロボットの研究は、従来行われていない。また、SMM と提案するロボットの動作時における仕事を概略計算により定量的に比較すると、提案するロボットの優位性がいえた。このロボットを設計・試作し、動作実験を行ったので報告する。

2. ロボットの設計条件

本ロボットを使用するのは NASA で計画中の H 型宇宙トラス構造物(以下、トラスと称す)上と仮定し、実際の実験ではトラスのモデルとして、幅 100 mm、厚さ 6 mm のアルミ製の板を適当な長さに切断して使用する。実際のトラスの断面を図 1 に示す。

ロボットの特徴としては、

- (1) トラスから別のトラスへの乗り移りが可能であること。
- (2) 軽量かつ小形であること。
- (3) 真空中での使用に耐えられること。
- (4) 無重力状態で使用するロボットである。

が考えられるが、本研究では地上での実験を考慮し、二次元平面内の動作についてのみ考え、(1)、(2)、(4)を考慮する。なお、(4)については重力補償装置としてエアベアリングを使用する。本ロボットは、このエアベアリングの重量も考慮して設計しているため、実際に宇宙空間で使用する場合には、必要なモータのパワーは本ロボットより小さくできると考えられる。

Fig. 1 Section of space truss

ロボットの動作形態は、従来の SMM に用いられている先端にハンドが付いた 2 本のリンクをアクチュエータでコンパスのように接続し、開閉動作させる形態と、二つのハンドをつなぐリンクの長さを変化させ、伸縮動作を直線的に行い動作する形態の二つが考えられる。前者の動作形態をタイプ A、後者の動作形態をタイプ B と呼ぶことにする。それぞれの動作形態の概念図を図 2 に示す。ただし、二つのハンド (M_1 , M_3) は始めは重なっているものと仮定する。またタイプ B では、アクチュエータ (M_2) は常に二つのハンドの中間点にあるものと仮定する。なお、この図は動作時に実際にリンクが通過する範囲をコンピュータにより描いたものである。

タイプ A は大きな伸縮率を得易いが、動作に必要なスペースも大きくなってしまふ。一方タイプ B は動作に必要なスペースは小さくてすむ。タイプ A に比べてタイプ B の動作方法は狭いすき間にも進入することができ、トラスの入り組んでいるところでも動作が可能であると考えられる。

また、 M_1 , M_3 と M_2 の質量をすべて m と仮定し、無重力状態でロボットが 1 歩踏み出す動作、つまり M_1 を距離 L だけ直進させる動作における仕事を考える。ただし、リンクの質量は考えないものとする。

時間 t における M_1 の移動距離を $l(t)$ とする。先述の動作を時間 T で終了させるとすると、

$$l(0)=0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$l(T)=L \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。また、動作の始めと終わりで M_1 は停止しているの、

$$\frac{dl(t)}{dt} = i(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

とすると、

$$i(0)=0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 2 Walking methods

$$\dot{l}(T)=0 \cdots \cdots \cdots (5)$$

となる。

式(1), (2), (4), (5)の条件を考慮し, $l(t)$ を次の三次式で表すものとする。

$$l(t) = \frac{3}{T^2} L t^2 - \frac{2}{T^3} L t^3 \cdots \cdots (6)$$

まず, タイプ A について考える。タイプ A の M_1 に与えられた仕事量 W_{A1} は,

$$\frac{d^2 l(t)}{dt^2} = \dot{l}(t) \cdots \cdots \cdots (7)$$

とすると,

$$W_{A1} = \int_0^T |m \dot{l}(t) \dot{l}(t)| dt \cdots \cdots \cdots (8)$$

と表せる。式(8)より W_{A1} は, 次のようになる。

$$W_{A1} = \frac{9m}{4T^2} L^2 \cdots \cdots \cdots (9)$$

また,

$$\cos \theta = \frac{l(t)}{L} \cdots \cdots \cdots (10)$$

と表せる。

タイプ A の M_2 に与えられた仕事量 W_{A2} を X 成分と Y 成分とに分解して考える。 X 方向, Y 方向の時間 t における移動量をそれぞれ $l_{2x}(t)$, $l_{2y}(t)$ とすると,

$$l_{2x}(t) = \frac{L}{2} \cos \theta \cdots \cdots \cdots (11)$$

$$l_{2y}(t) = \frac{L}{2} \sin \theta = \frac{L}{2} \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \cdots \cdots \cdots (12)$$

と表せる。 W_{A2} は,

$$W_{A2} = \int_0^T |m \dot{l}_{2x}(t) \dot{l}_{2x}(t)| dt + \int_0^T |m \dot{l}_{2y}(t) \dot{l}_{2y}(t)| dt \cdots \cdots \cdots (13)$$

となる。式(13)は, 式(11), (12)と, $T=1$, $L=1$ としたときのコンピュータによる数値積分の結果より

$$W_{A2} = \frac{9m}{4T^2} (0.5L)^2 + 0.75 \frac{m}{T^2} L^2 \cdots \cdots \cdots (14)$$

と近似できる。

タイプ A の M_1 , M_2 に与えられた総仕事量 W_A は, W_{A1} , W_{A2} の和となるので,

$$W_A = \frac{9m}{4T^2} L^2 + \frac{9m}{4T^2} (0.5L)^2 + 0.75 \frac{m}{T^2} L^2 \cdots \cdots \cdots (15)$$

と表せられる。

次にタイプ B について考える。タイプ B の M_1 に与えられた仕事量 W_{B1} は, タイプ A と同様に計算して

$$W_{B1} = \frac{9m}{4T^2} L^2 \cdots \cdots \cdots (16)$$

また, タイプ B の M_2 の移動距離は, M_1 の $1/2$ 倍となり, M_2 に与えられた仕事量 W_{B2} は

$$W_{B2} = \frac{9m}{4T^2} (0.5L)^2 \cdots \cdots \cdots (17)$$

タイプ B の M_1 , M_2 に与えられた総仕事量 W_B は, W_{B1} , W_{B2} の和となるので,

$$W_B = \frac{9m}{4T^2} L^2 + \frac{9m}{4T^2} (0.5L)^2 \cdots \cdots \cdots (18)$$

と表せられる。

Table 1 Model parameters of robot

Height (max)	172 mm
Width	110 mm
Length	413 mm
Weight	2321 g

Fig. 3 Overview of robot

Fig. 4 Basic structure

式(15)と(18)より、両式の比を考えると、

$$W_B = 0.79 W_A \dots\dots\dots (19)$$

となり、タイプ B の動作に必要なエネルギーは、タイプ A に必要なエネルギーの約 8 割で済むと考えられる。

よって、タイプ B の動作形態を本ロボットに使用する。

3. 基本構造

上記の設計条件に基づいて、ロボットの設計、試作を行った。試作したロボットの概観を図 3 に、諸元を表 1 に示す。次に本ロボットの基本構造について述べる。基本構造を図 4 に示す。このロボットはハンドユニット 2 組と伸縮装置を関節でつないだ構造になっており、本体の伸縮と二つのハンドによるトラスの把握とモチ換えによる間欠動作で移動する構造とした。間欠動作では 1 度の動作での移動量を大きくとる必要がある。本ロボットは、パンタグラフの構造をベースに伸縮率を大きくしたところに大きな特徴を有する。これによって、ロボット打ち上げ時に収容スペースを小さくすることができる。なお、本ロボットは重力補償装置としてエアベアリングを用いる。そのため、動作範囲を二次元平面に限定した構造になっている。

3.1 ハンドの構造 ハンドはトラスの幅に対応した爪でトラスを把握する仕組みになっている。開閉

Fig. 5 Open close motion of hand

Fig. 6 Structure of extension unit

動作の図を図 5 に示す。爪にはラックがつながっており、DC モータの軸に取付けられたピニオンでラックを動かし、開閉動作を行う。モータのトルクでラックを締め付け、爪とトラスとの摩擦によって姿勢を保持する。

3.2 伸縮部の構造 伸縮部の構造の概観を図 6 に示す。図 6 のように伸縮部はパンタグラフ状のパーツを連ねた構造になっている。これにより一箇所に力を加えると、全体が伸縮する。駆動は DC モータで行い、ポテンションメータによって動作量を計測できる。伸縮部の最大伸縮率は、地上用の配管ロボット⁽⁷⁾では 1.5 倍にも満たなかったが、本ロボットでは 3.7 倍と高い伸縮率を得ている。本ロボットは曲げ剛性を高めるため、伸縮部にこれを二つ平行に並べて使用している。

3.3 関節部の構造 モータ軸に取付けた歯車で、関節軸に取付けた歯車を回転させることにより動作させる。駆動は DC モータで行い、エンコーダによって動作量を計測できる。回転範囲は 180°である。

ハンドの開閉を除くと本ロボットは 3 自由度をもっている。

4. システム構成

本ロボットのシステム構成を図 7 に示す。ロボットに取付けられたポテンションメータおよびエンコーダの読みとり値をそれぞれ A/D ボード、カウンタ回路を通してコンピュータに入力する。また、各駆動用モータへの出力は、コンピュータから出力したデジタル信号を D/A ボードを介してアナログ信号に変え、ドライバ回路を通し増幅し、電圧値として与えている。

5. 基本動作

5.1 直進走行モード 本ロボットは先にも述べ

Fig. 7 System configuration

Fig. 8 Going straight on space truss

Fig. 9 Transferring truss in acute angle

たように2組のハンドの持ち換えとそれらをつなぐ伸縮部の伸縮とによって尺取虫のように間欠移動を行う構造となっている。直進モード図を図8に示す。これが、トラス上を移動する基本動作となる。

5.2 トラス乗り移りモード 2本のトラスが鋭角をなして交差しているとき(図9では 60°)、一方のトラスからもう一方のトラスへと乗り移る動作を行う。トラス乗り移りモード図を図9に示す。まず前ハンドを開き後ハンドを土台としてロボットの各部を動作させ、前ハンドを乗り移るトラスまで移動しトラスを把握する。次に後ハンドを開き、今度は前ハンドを土台とした動作をし、乗り移りを行うことができる。

6. 運動制御方法

6.1 デュアルモード制御 本ロボットは二つのハンドでトラスを持ち換えながら移動するので、ロボット全体を、トラスをつかんでいる方のハンドを土台とするマニピュレータのように考え、デュアルモード制御⁽⁷⁾を使用して制御する。デュアルモード制御とはハンド(A)でトラスをつかみハンド(B)を動かす場合をコントロールモードB、ハンド(B)でトラスをつかみハンド(A)を動かす場合をコントロールモードAと称し、持ち換えの際に二つのモードを切り換えることによって、直進、乗り移りの動作を統一的に表現し、制御する方法である。

ロボットの外に基準となる点をおき、そこから見た土台となるロボットのハンドの位置姿勢を 3×3 の変

(a) Control mode A (b) Control mode B

Fig. 10 Dual mode control

Fig. 11 Coordinate system

換行列 Z として取扱う。そのようすを図 10 に示す。

本ロボットの座標系とリンク構成を図 11 に示す。ただし、ハンドはエンドエフェクタとみなして除外してある。また、ハンドの座標系はハンドがトラスをつかんだときトラスの中心と一致するようにとってある。ハンド A の位置姿勢を示す変換行列 T_A 、ハンド B の位置姿勢を示す T_B をそれぞれ式 (20)、(21) に示す。

ただし、式 (22)、(23) である。

コントロールモード A では、基準点 O から土台ハンド B への変換は Z_B で示され、実際の制御は T_A によって行われる。ハンド A がトラスをつかんだとき、その位置姿勢 Z_A は式 (24) で表される。

コントロールモード B に移るときは、式 (24) で土台ハンド A の位置姿勢 Z_A が求められているので、これを新たな土台として先端ハンド B が T_B 行列によって制御され、モード B の終了時には、式 (25) によって Z_B が計算され、再びモード A に移る。

6・2 ヤコビ行列 モード A、モード B それぞれのヤコビ行列 J_A, J_B を式 (26)～(29) に示す。

$$T_A = \begin{bmatrix} C_2C_4 - S_2S_4 & -C_2S_4 - S_2C_4 & a(C_2C_4 - S_2S_4) + b(C_2S_4 + S_2C_4) + L_3C_2 + a \\ S_2C_4 + C_2S_4 & -S_2S_4 + C_2C_4 & a(S_2C_4 + C_2S_4) + b(S_2S_4 - C_2C_4) + L_3S_2 + b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

$$T_B = T_A^{-1} \dots\dots\dots (21)$$

$$C_i = \cos \theta_i \dots\dots\dots (22)$$

$$S_i = \sin \theta_i \dots\dots\dots (23)$$

$$Z_A = Z_B T_A \dots\dots\dots (24)$$

$$Z_B = Z_A T_B \dots\dots\dots (25)$$

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} = J_A \begin{bmatrix} d\theta_2 \\ d\theta_4 \\ dL_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (26)$$

$$J_A = \begin{bmatrix} -a(C_2S_4 + S_2C_4) + b(C_2C_4 - S_2S_4) - L_3S_2 & -a(C_2S_4 + S_2C_4) + b(C_2C_4 - S_2S_4) & C_2 \\ a(C_2C_4 - S_2S_4) + b(C_2S_4 + S_2C_4) + L_3C_2 & a(C_2C_4 - S_2S_4) + b(C_2S_4 + S_2C_4) & S_2 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (27)$$

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} = J_B \begin{bmatrix} d\theta_2 \\ d\theta_4 \\ dL_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (28)$$

$$J_B = \begin{bmatrix} a(C_2S_4 + S_2C_4) - b(C_2C_4 - S_2S_4) & a(C_2S_4 + S_2C_4) - b(C_2C_4 - S_2S_4) + L_3S_4 & C_4 \\ a(C_2C_4 - S_2S_4) + b(C_2S_4 + S_2C_4) & a(C_2C_4 - S_2S_4) + b(C_2S_4 + S_2C_4) + L_3C_4 & S_4 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (29)$$

変換行列、ヤコビ行列を計算することにより、ロボット先端(ハンド中心)の位置、姿勢および各関節の微小変化に対するハンドの位置と姿勢の微小変化を知ることができる。

7. 動作実験

7・1 ロボットの動作特性 本ロボットの動作特性を表 2 に示す。実際に動作させるときには、各部の動作量がこの範囲内でなければならない。ハンドの開閉量については実際にトラスをつかむときには 100 mm でトラスと接触するので、それ以上は閉じない。

7・2 軌道制御実験 無重力状態における本ロボットの機構の有効性を確認するために、コントロールモード A について次の実験を行った。

2 本のトラスを 60° の角度をもたせて並べ、トラス

の交差点から 225 mm の位置にあるハンド A を、もう一方のトラスの交差点から 450 mm の位置まで移動させた。(図 8 の①から④の動作)変換行列 T_A がわかっているので逆運動学を用いることにより、目標とするハンド先端の位置と姿勢を与えると、そのときの各関節の角度および伸縮部長さが計算によって求めら

Table 2 Working range

	Working range		
L_3	113	～ 418	[mm]
θ_2	-90	～ +90	[°]
θ_4	-90	～ +90	[°]
Hand	80	～ 125	[mm]

Fig. 12 Control system configuration

Fig. 13 Experimental result: extension L

れる。それをもとにして各動作部分について五次多項式を用いて目標軌道を決定し⁽¹²⁾、目標軌道に追従するようにフィードバックによる比例制御を行った。ブロック図を図12に示す。実験結果のグラフを図13から図15に示す。図13~15の上段のグラフはそれぞれ、伸縮部長さ L 、ハンドBの回転角 θ_2 、ハンドAの回転角 θ_4 のグラフ、下段のグラフはそれぞれのモータに出力した電圧値のグラフである。図13の電圧にはノイズが発生しているが、これは、ポテンションメータからの出力に加わったノイズの影響を受けているためである。しかし、制御を行うにおいて支障をきたすほどではなかったため、そのまま使用した。

すべての動作部分の動作は良好で、目標軌道に沿っ

Fig. 14 Experimental result: angle θ_2 Fig. 15 Experimental result: angle θ_4

てうまく収束した。最終的な誤差量は、伸縮部長さ L で -0.3 mm、回転角 θ_2 で -0.26° 、回転角 θ_4 で -0.17° であり、土台ハンドを原点とした座標系におけるハンド先端の位置、姿勢の誤差は X 方向に -1 mm、 Y 方向に -2.4 mm、姿勢 θ で -0.43° であった。これらの誤差がでた理由として、制御則に比例制御のみを使用したためであることがあげられるが、これは制御則に積分制御則を加えることで解決できると考えられる。また、ハンドの開閉動作も含めた持ち換え動作(図9の①から⑤の動作)に要する時間は約6秒

であった。しかし、このロボットは高い応答性をもっているため、さらなる動作時間の短縮は可能であると考えられる。

今回の実験により、トラス上の移動および別のトラスへの乗り移り動作が可能であることが確認できた。

8. 結 論

今回の実験では、重力補償装置による疑似無重力状態において試作したロボットの動作は良好であった。このことより、このロボットの機構はトラス乗り移り動作に有効であることが確認できた。また、伸縮率を大きくとり収納時にはコンパクトにできるという目標も達成できた。

今後は三次元空間における乗り移り動作への拡張、宇宙空間での利用を目指した実用化研究を行う必要がある。

文 献

- (1) 狼嘉彰, 世界における宇宙ロボットの研究開発動向, 計測と制御, 28-12(1989), 1041-1046.
- (2) 飯倉省一, 宇宙ロボット, 機誌, 93-865(1990), 977-980.
- (3) 狼嘉彰, 宇宙ロボットプロジェクト, 日本ロボット学会誌, 7-1(1989), 78-86.
- (4) Xu, Y., Brown, B., Aoki, S. and Kanade, T., Mobility and Manipulation of a Light-Weight Space Robot, *Proc. 1992 IEEE/RSJ Int.'l Conf. Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, NC, Vol. 1(1992), 11-19.
- (5) Brown, B., Friedman, M., Kanade, T., Xu, Y., 上野浩史・吉田哲二, 宇宙移動マニピュレータロボットの開発, 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集, No. 1(1991), 87-90.
- (6) 福田敏男・松浦英雄・新井史人・西堀賢司・杉山俊明, 宇宙トラス構造物移動ロボットの機構に関する研究, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, No. 1(1992), 113-114.
- (7) 福田敏男・細貝英美・大塚雅司, 自律型配管メンテナンスロボットに関する基礎的研究, 機論, 53-495, C(1987), 2325-2330.
- (8) Fukuda, T. and Hosokai, H., Automatic Pipeline Inspection by Intelligent Robots, *Proc. 10th IMEKO World Congress*, Vol. 5(1985), 219-226.
- (9) Fukuda, T. and Hosokai, H., Intelligent Pipeline Inspection and Maintenance Robot, *15th Int.'l Symp. on Industrial Robots (ISIR)*, Vol. 1(1985), 339-346.
- (10) Fukuda, T., Hosokai, H. and Otsuka, M., Autonomous Pipeline Inspection and Maintenance Robot with Inch Worm Mobile Mechanism, *Proc. 4th Int.'l Conf. on Robotics and automation*, (1987), 539-544.
- (11) Fukuda, T., Hosokai, H. and Shimasaka, N., Autonomous Plant Maintenance Robot (Mechanism of Mark IV and Its Actuator Characteristics), *Proc. 1990 IEEE Int.'l Conf. Intelligent Robots and Systems*, (1990), 471-478.
- (12) Craig, J. J., ロボティクス, (1991), 190-200, 共立出版株式会社.