多関節機構を有するロボットの多形態・
自在移動機構(Vroid)の一考え方*

(第1報, Vroid Iの基本動作と冗長性を考慮した関節負荷配分制御方法)

福田 敏男**, 小林 寛***

A Study on a Flexible Mobile Robot with Versatile Shape Control Based on
Multiple Link-Wheel Mechanism(1st Report, Fundamental Mechanism and Motion of Vroid I and Its Joint Load
Distribution Control Method with the Redundancy Consideration)

by Toshio FUKUDA and Hiroshi KOBAYASHI

This paper presents a new concept of a flexible mobile and versatile shape reconfigurable control mechanism of a robot, called a versatile robotnoid (Vroid), which can be applied for plant maintenance works and other outdoor operational works, where its working environments are restricted due to mobil space and terrain. The Vroid I based on the multiple link-wheel mechanism has abilities of passing through rough terrains, passing over obstacles and going up and down stairways. Compared the Vroid I with conventional wheel, crawler and legged locomotion types of the mobile mechanisms, the proposed one is considered to be superior to those from the viewpoint of flexibility and adaptability to working environments. Utilizing the redundancy of joints in degrees of freedom, a method of the joint static control sequence is proposed to minimize the torques required to joint rotation under some constraints, which can easily be solved by the linear programming approach.

Key Words: Application of Control, Mobile Robot, Multiple Link Mechanism, Versatile Shape Control, Redundancy Control, Torque Control Sequence, Joint Load Distribution Control

1. はじめに

現在までに、開発されてきた特殊環境下作業ロボット等の種々の移動機構は、(1)車輪走行形式、(2)クローラ形式、(3)脚形式の3種類に大別することができる。車輪走行形式は、平坦面においては効率よく移動可能であるが、障害物が走行面上にある場合や、沼地、砂地、窪地等の不整定地での走行は困難である⁽¹⁾。クローラ形式の場合では、車体そのものが大きくなり、狭い作業空間での移動が難しく、キャタピラ走行のために、走行面をきずつけたり、走行音が激しい。さらに、階段昇降の場合、キャタピラに階段のエッジを引っ掛けて走行するため、急な階段は登ることが困難となり、階段を降りる場合は、昇る過程より不安定となる欠点がある⁽²⁾⁽³⁾。脚形式の場合、障害物の乗り越えや、不整定地走行、あるいは階段昇降を安定に行うことが可能であるが、構造や制御が複雑になり、現在までの技術では高速走行させることが困難である⁽¹⁾⁽⁴⁾。

そこで、本論文では、平坦面では車輪により効率よく移動し、階段やその他の不整定面では、車輪と関節

を用いて移動走行可能な車輪と多関節構造からなる多形態自在移動機構 Vroid(Versatile robotnoid)の構造とその関節負荷配分制御方法について提案する。このような移動機構を有するロボットは、狭く、障害物の多いなどの制約条件下でのプラントメンテナンス作業などでの利用が考えられる。試作した1号機(Vroid I)は、一次元移動走行のみが可能であり、ここでは、その構造と基本動作を示す。また、関節の冗長性と各関節の負荷条件を考慮した関節負荷配分制御方法については、従来のヘビ状の索状能動体⁽⁵⁾ではあまり議論されていないが、一般に、このような形態では、各関節の負荷配分を考慮した制御シーケンスが重要となると考えられる。本方法は、従来のマニプレータの優先順位に基づく冗長性解析方法⁽⁶⁾と異なり、移動ロボットとしての Vroid I の形態幾何学条件、静的平衡条件、関節の制御モータの許容トルクの条件を、制約条件として、各関節の負荷の総和が最小になるよう、線形計画法を用いて解くもので、Vroid I の持つ冗長性を制御する関節負荷配分制御方法である。

2. 基本構造と制御機能

2.1 基本構造 簡単のため、Vroid I では直進のみを考慮して、図1に示すように4関節5リンクの

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和60年3月29日。

** 正員、東京理科大学工学部(〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

*** 学生員、東京理科大学大学院。

細長い多関節構造を採用する。その各関節部に、それぞれ DC モータを配置し、この DC モータにより、自由に各関節が回転できるようにする。さらに、移動機構用にリンクの両端および各関節部に合計 6 個の DC モータを配置する。関節駆動用の軸と、車輪駆動用の軸は、円管軸を使用して同軸上にあるため、これらの DC モータにより車輪走行をさせる。この 4 関節 5 リンクの構造は、次の点を考慮して決定した。

(1) 階段を昇る場合、登段モードにおいて、常に最低一箇所階段の角を二つのリンクで押さえることにより、静的安定性を維持することが可能であるが、これよりも少ない関節数では、不安定なモードを使用しなくては階段を登ることはできない。

(2) 沼地、砂地、窪地等の不整定地で、車輪走行が困難な環境の場合、五角形を作り回転することにより移動可能であるが、4 関節未満の関節数では、回転移動過程において一つの関節が過負荷になる動作モードをとらなくてはならず、またこの時一関節で自重を支えるために、沼地、砂地等では、移動困難となることがある。

(3) 障害物の高さが 2 リンク以上のものを乗り越える場合には、これ以下の自由度では静的安定度を欠いた動作モードを取らなくてはならない。以上の理由から 4 関節 5 リンクと決定した。ただし、各関節の可動範囲は、約 300° 以下とする。

2.2 制御機能 Vroid I の各関節のアクチュエータは、同出力の DC モータを使用しているために、その各関節の負荷配分を行うことにより、リンクの姿勢を決定することができる。また、Vroid I の使用される環境を考慮して、図 2 に示すモジュール分散制御機構により、リンクの故障等に対応できるようにする必要がある。また、直立させて静止させる場合等、動的バランスが必要な場合や、五角形を回転させて移動する場合、動的安定化制御や、衝撃力最小化力制御を行う必要がある。

2.3 Vroid I の特徴 Vroid I は、次のような特徴を有している。

図 1 構造概略図

(1) 各関節および両端に車輪を有しているために、平坦面では車輪走行を行い効率よく移動が可能である。

(2) 障害物の乗り越え動作や、階段昇降動作においては、Vroid の各関節を回転させることにより、形態モードを変化させ、そのモードを組合せることにより、静的に安定な姿勢をとることが可能である。

(3) 沼地、砂地、窪地の不整定地等で、車輪走行が困難な場合には、各関節を曲げて五角形を構成し、それを回転させることにより、移動が可能である。

(4) 構造が簡単で、動的制御が行いやすく、高所での検査等を行う場合、伸展して、1 本に直立して静止することも可能である。

(5) 壁と壁の狭いすきまや、狭い配管の下などをくぐり抜けて移動することや、各関節の回転を制御して、中央のリンクを常に水平に保ちながら、不整定地を移動することも可能である。

図 3 は、今回試作した Vroid 1 号機である。この各関節の可動範囲は、約 300° 、1 モジュールの質量が、約 1.2 kg である。

3. 関節負荷配分制御方法

3.1 基本動作 Vroid I の製作、実験に先立ち、コンピュータで、シミュレーションした結果、各関節を 45° のステップで回転させると、表裏の重複を除いて約 520 の形態モードを取ることがわかった。ここで、 45° のステップで回転させたのは、Vroid I は、関節用アクチュエータに DC モータを使用しているため、関節の角度は、無数に決められることになる。そのた

図 2 制御系

図 3 概観

め、まずその中の代表として、45°ずつ回転させたものであり、Vroid Iは、前後対称で区別がないために、それらの重複モードを除外したものである。

3.2 Vroid Iの冗長性 Vroid Iは、直進のみを考慮して試作したため、水平、垂直の二次元移動機構と考えることができる。車輪駆動による並進移動を考慮しない場合には、Vroid Iは4関節持つので、自由度4であるために、冗長性を持っていることになる。この冗長性を持つために、Vroid Iは、障害物を回避しながら目標地に移動を行ったり、形態モードを取る際に各モータの消費エネルギーを少なくしたりすることが可能となる。さらには、モータ等が故障した場合でも、残りの自由度でその故障に対処することなどにも冗長性を利用することができる。

$$J = \begin{pmatrix} l(S_4 + S_{34} + S_{234}) & l(S_4 + S_{34}) & lS_4 & 0 \\ l(1 + C_4 + C_{34} + C_{234}) & l(1 + C_4 + C_{34}) & l(1 + C_4) & l \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdots \cdots (1)$$

ただし、

$$S_i = \sin \theta_i, \quad S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

$$C_i = \cos \theta_i, \quad C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

ここで、関節変数 $\theta_1 \sim \theta_4$ は、Vroid Iの各関節の角度である。このヤコビアンマトリックス J によって、Vroid Iの各関節変数の微小変化 $d\theta^T = (d\theta_1, d\theta_2, d\theta_3, d\theta_4)$ から先端座標の微小変化 $dr^T = (dx, dy, dz)$ を求めることができる。

$$dr = Jd\theta \cdots \cdots (2)$$

3.4 逆ヤコビアン 式(1)において、ヤコビアンマトリックスの形は、Vroid Iが冗長性を有するために 3×4 のマトリックスとなっている。このために、ヤコビアンマトリックスの逆マトリックスは、場合によっては無数に存在し、 dr から $d\theta$ を求めることは可能だが、逆に $d\theta$ は一意には決まらないことになる。そのため、まず最初に逆ヤコビアンを求めるために、一般化逆行列を用いて計算を行った。これは、 $\min \|d\theta\|$ となるように $d\theta$ を決める逆ヤコビアンを求めるものである。ただし、 $\|d\theta\|$ はユークリッドのノルムである。これによって、各関節変数の微小変化量を最も少なく制御することができる。

3.5 トルク評価 一般化逆行列を用いた逆ヤコビアンでは、各関節変数の微小変化を最小にしているだけであるが、Vroid Iでは、各関節のアクチュエータはすべて等しく、それぞれにかかる負荷を配分しなくてはならず、一般化逆行列だけでは静的な安定性を欠くことになり、制御しにくい場合がある。また、マニプレータの場合では、一般化逆行列を用いてもよいが、Vroid Iは、移動機構であるから、マニプレータの肩に相当する根元の基礎が存在せず、さらにこれが移動するために、全体の静的なバランスも考慮する必要が生ずる。そこで、各関節アクチュエータに加わるトルクを評価基準として計算を行う必要がある。そのためにまず、以下のような拘束条件を加える。

3.5.1 形態幾何学的条件 Vroid Iは、構造上各リンク同士が交わることはできないので、このための条件である。図5のように、任意の2リンクの両端の座標を $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ とする。

図4 Vroid Iに設定した座標系

図5 形態幾何学条件におけるリンク座標

ここで、直線 $(x_1, y_1)-(x_2, y_2)$ の方程式

$$y - y_1 = (y_2 - y_1)(x - x_1) / (x_2 - x_1) \\ = A(x - x_1) \dots\dots\dots (3)$$

直線 $(X_1, Y_1)-(X_2, Y_2)$ の方程式

$$y - Y_1 = (Y_2 - Y_1)(x - X_1) / (X_2 - X_1) \\ = B(x - X_1) \dots\dots\dots (4)$$

ただし

$$A = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1), B = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1) \\ \dots\dots\dots (5)$$

とすると、この2直線の交点の座標を (x, y) とする

$$x = (Ax_1 - BX_1 + y_1 - Y_1) / (A - B) \\ y = A(x - x_1) + y_1 \dots\dots\dots (6)$$

となるから、この2リンクが交わらない条件は、

$$\left. \begin{array}{l} x \leq x_1 \text{ or } x_2 \leq x \\ \text{or } x \leq X_1 \text{ or } X_2 \leq x \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

となる。さらに、Vroid I が目標位置に行くための、姿勢変化を記述するために、先に計算を行ったヤコビアンマトリックス J を用いて

$$dr = Jd\theta \dots\dots\dots (8)$$

を幾何学条件に加える。

3.5.2 障害物がない場合の静的平衡条件 これは、Vroid I が与えられた形態モードをとる時、転倒しないよう、静的にバランスをとるための条件である。

図6のようにVroid I のリンクの各節点に1~6と番号をふった時、1, 2番めおよび i 番めが接地していると仮定した場合、その i 番めの接点回りのモーメントのつりあいを考えると、

$$\sum_{j=1}^{i-1} \left[\left\{ (l - r_j) \cos \theta_{j-1} + l \sum_{k=j}^{i-2} \cos \theta_k \right\} m_j \right] g > D_i \\ \dots\dots\dots (9)$$

ただし

$$\theta_j = \sum_{k=1}^j \theta_k, \theta_0 = 0 \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで式(9)右辺 D_i は、 i 番めの節点にかかるトルクである。

3.5.3 障害物がある場合の静的平衡条件 障害物があった場合の静的なバランスを保つための条件である。ここでは、障害物等の外部環境を、図7のよう

に直線近似し、以下のように $g(x)$ を与えるものとする。

$$y = 0 \quad (x < K) \dots\dots\dots (11)$$

$$g(x) = y = ax + b \quad (K \leq x < L) \dots\dots\dots (12)$$

$$y = c \quad (L \leq x < M) \dots\dots\dots (13)$$

$$y = dx + e \quad (M \leq x < N) \dots\dots\dots (14)$$

$$y = 0 \quad (N \leq x) \dots\dots\dots (15)$$

上式を図7の K, L, M, N を用いて書き直すと、式(12)は、

$$y = a(x - K) \dots\dots\dots (16)$$

式(13)は、

$$y = a(L - K) \dots\dots\dots (17)$$

式(14)は、

$$y = a(L - K)(x - N) / (M - N) \dots\dots\dots (18)$$

となる。ここで、Vroid I の各リンクの番号付けを図6のとおりとし、さらに図7のように根元リンクの姿勢を表す関節変数として θ_0 を導入すると求める条件は、

$$\sum_{j=0}^i \left[\left\{ r_j \cos \left(\sum_{k=0}^{j-1} \theta_k \right) + \sum_{n=0}^{j-2} l \cos \left(\sum_{k=0}^n \theta_k \right) \right\} m_j \right] g \\ > \sum_{j=i+1}^5 \left[\left\{ r_j \cos \left(\sum_{k=i}^j \theta_k \right) + \sum_{n=i}^{j-1} l \cos \left(\sum_{k=i}^n \theta_k \right) \right\} m_j \right] g \\ \dots\dots\dots (19)$$

ただし、その拘束条件として

$$\sum_{j=0}^{i-1} \theta_j = 0 \quad (i \text{ 番め水平}) \dots\dots\dots (20)$$

$$l \sum_{j=0}^{i-2} \sin \left(\sum_{k=0}^j \theta_k \right) = c \dots\dots\dots (21)$$

(i 番めの高さは、 $y = c$)

のように求まる。

3.5.4 各関節制御トルク制限 各関節回転用アクチュエータとしてのDCモータは、4個とも同等のものを使用しているために、モータの駆動制御トルクに制限を加える必要がある。そこで、次の拘束条件をつける。

$$D_i \leq D_{\max} \dots\dots\dots (22)$$

ただし、 D_i は各関節にかかるトルクである。

以上のような拘束条件のもとで、次のような評価関

図6 Vroid Iの概形

図7 障害物がある場合の静的平衡条件

図8 もとの Vroid I の姿勢

図10 線形計画法を用いた場合

図9 一般化逆行列を用いた場合

数

$$I_1 = \min \sum_{i=1}^4 dD_i \dots\dots\dots (23)$$

$$I_2 = \min \left(\max \sum_{i=1}^4 D_i \right) \dots\dots\dots (24)$$

等を計算することにより、各関節制御トルクの最適化を行うことができる。ただし、 dD_i は、 D_i の微小変化量である。

以上の各式の中で各関節にかかるトルクを D_i と記してきたが、 D_i は以下の式によって与えられる。

$$D_i = {}^{i-1}g \sum_{p=i}^4 m_{p+1} {}^{i-1}\bar{r}_p \dots\dots\dots (25)$$

ただし、

${}^{i-1}g$: 相対重力ベクトル

m_{p+1} : 各モジュールの質量

${}^{i-1}\bar{r}_p$: 相対重心位置ベクトル

本論文では、式(23)、(24)の評価関数の内、線形化することにより直接線形計画法で計算できる式(23)を用

図11 壁伝い直立モード

いて、トルク評価を行う。まず、非線形関数である式(23)を、

$$\cos(\theta + \delta\theta) = \cos\theta - \delta\theta \sin\theta \dots\dots\dots (26)$$

等を用いて線形化を行い、その結果以下のような式を得る。

$$\sum_{i=1}^4 dD_i = C^T X \dots\dots\dots (27)$$

$$C = \begin{bmatrix} 4r_5m_5S_{1234} + 3(lm_5 + r_4m_4)S_{123} + 2(lm_5 + lm_4 + r_3m_3)S_{12} + (lm_5 + lm_4 + lm_3 + r_2m_2)S_1 \\ 4r_5m_5S_{1234} + 3(lm_5 + r_4m_4)S_{123} + 2(lm_5 + lm_4 + r_3m_3)S_{12} \\ 4r_5m_5S_{1234} + 3(lm_5 + r_4m_4)S_{123} \\ 4r_5m_5S_{1234} \end{bmatrix} \dots\dots (28)$$

$$X^T = (\delta\theta_1, \delta\theta_2, \delta\theta_3, \delta\theta_4) \dots\dots\dots (29)$$

ここで、線形化された評価関数

$$I_1 = C^T X \dots\dots\dots (30)$$

を、上記の4種の拘束条件下で最小にするように、計算を行う。これに基づいた制御方法を関節負荷配分制御方法と呼ぶことにする。

4. 実験結果

本章では一般化逆行列を用いた場合と前章で述べた関節負荷配分制御方法を、シミュレーションし、試作した Vroid I で動作実験を行い比較検討する。

4.1 シミュレーション結果 Vroid の先端のリンクの姿勢を、 x 軸方向に $dx=0$ 、 y 方向に $dy=l/4$ (l はリン

図 12 障害物乗り越えモード

図 13 回転移動モード

ク長)の並進, z 軸まわりに $\delta z = 10^\circ$ の回転移動させる. 図 8 に, Vroid I のもとの形, 図 9 に, 一般化逆行列を用いた場合の Vroid I の形態変化, 図 10 に, 線形計画法を用いて計算した場合の Vroid I の形態変化を示す.

図 9 の場合, 先端リンクの姿勢は与えられたようになっているが, 一番めの関節回りのモーメントのつりあいを考えると, この形態モードは静的バランスを欠き, 実際には静的にとることができない. ところが, 図 10 の場合は, 第 1 関節と第 4 関節が接地して, 先端リンクが大きく変化を行っており, この形態モードでは, 静的安定性があり, さらに種々の拘束条件を満たした最適モードであることがわかる.

4.2 Vroid I による動作制御実験 4.1 節のシミュレーションと同じ条件で求めた結果を用いて, Vroid I で実際に実験を行った. 一般化逆行列を用いた方法で制御した場合, 静的安定度を欠き, 第 1 関節と第 4 関節を接地し, 先端リンクの姿勢と位置が, 与えた値からずれてしまった. 次に関節負荷配分制御方法によって制御した場合は, 先端リンクの姿勢, 位置が与えられたとおり満足のいく結果を得ることができた.

4.3 基本動作実験 今回提案した関節負荷配分制御方法により得られた Vroid I の各種の形態移動変化モードを次に挙げる. 図 11 のモードは, 壁伝いに直立する場合の一例であり, 高所の検査等に用いることができる. 図 12 は, 配管等の障害物の乗り越え動作モードである. ただし, この障害物の高さは, 仮りに

2 リンク分にとってある. 図 13 は, 沼地, 砂地, 窪地等の車輪走行が困難な不整定地を, 形態を五角形に変化させて, 負荷配分をしながら回転することにより前, 後進するモードである.

5. おわりに

Vroid I の基本構造と関節負荷配分制御方法とこれらの有用性について述べ, その基本動作の確認を行った. ここで試作した Vroid I は, 一次元方向のみ移動可能であり, またセンサ類も取付けられていないため, 今後二次元方向移動と, センサ機能を充実させる必要がある. さらに, Vroid I は, 元来, 動的制御を行うことを目標としており, 動的バランシング制御等を行うことにより機能向上をはかる予定である.

終わりに, 本論文のシミュレーションには, 本学学生, 中川誠也君に協力していただいたので感謝する.

文 献

- (1) 奥村他 7 名, 移動ロボットの将来, 日本ロボット学会誌, 2-3 (昭 59), 181.
- (2) 大道・井上, 日本ロボット学会誌, 2-3 (昭 59), 244.
- (3) Köhler, G. W., *Proc. 8th Int'l Symp. on Industrial Robot's (ISIR)*, 2 (1978), 805.
- (4) 三浦・下山, ロボット学会誌, 1-3 (昭 58), 176.
- (5) 広瀬・織田・梅谷, 計測自動制御学会論文集, 17-6 (昭 56), 686.
- (6) 花房・吉川・中村, 計測自動制御学会論文集, 19-5 (昭 58), 421.
- (7) Paul, R. P., *Robot Manipulators: Mathematics Programming and Control*, (1981), 85, MIT Press.

討 論

〔質問〕 下山 勲〔東京大学工学部〕

(1) 図11~13に示されている各種の形態移動変化モードは、例えば4・1節のように $dx, dy, \delta z$ を指定して得られるものと思われるが、具体的にはどのようにして得られたものか。

(2) Vroid Iのような冗長性を有する機構で、例えば4・1節の $dx, dy, \delta z$ に対して関節角 θ をいかに決めかが問題であると同時に、人間が扱いやすい「前進せよ」「壁伝いに直立せよ」などのような命令をいかに $dx, dy, \delta z$ に直せるかも問題になると思う。Vroid Iでは、この問題をどのように扱っているか。

〔回答〕 (1) 各種形態移動変化モードは、図11における壁伝い直立モード、図12の障害物乗り越えモード、図13の回転移動モードのそれぞれ一例である。本論文では、各形態をとるための先端の軌道を与え、先端リンク姿勢の微小変化 $dx, dy, \delta z$ を、(例えば壁伝いの場合には壁を伝う軌道をとるように) 与えることにより得られた結果である。

(2) 現時点での Vroid I では、外部環境を推定するセンサ類が取り付けられていないので、先端リンクの位置と姿勢を、オペレータが与えて、それに対して、本論文の方法を用いて、関節負荷を最小とするように、各モードをとる関節角を決定した。ご指摘のような制御のためには、走行環境モデルが Vroid 側に要求される。本論文では、Vroid は、このようなモデルを有せず、前述した方法で、オペレータから与えられた軌道に沿って移動する制御方法を使用している。ご指摘のヒューマンライクな制御を達成する一つの方法としては、先端リンクにテレビカメラなどのセンサを取付けて、先端リンクの姿勢を常に考慮し、環境モデルと対話しながら Vroid I が自分で姿勢を決定するような制御が考えられる。

〔質問〕 阿部 稔

〔工業技術院機械技術研究所〕

(1) 2・1節の基本構造中にある4関節5リンクの表現について、側面より見た場合が4関節5リンクで、正確な表現ではないと思われる。平面に投影した単純化モデルなどの説明が必要と思われるが、いかがか。

(2) 物をまたいで移動する機構は、防災ロボットなどの分野でその出現が望まれているが、本機構はその解答の一つになる可能性をもち、研究の将来を期待したい。

(i) 2・3節の Vroid の特徴の一つとして荷物の積載性を強調したほうがよいと思うが、いかがか。

(ii) 各リンクの長さは一定にし、解析を容易にしているのは理解できるが、将来実際にモデルを作る場合は、リンクの長さをわずかずつ変え(平面図ではしごのステップになるリンクの長さも変化させ)、全体をコンパクトに丸めることができるようにし、運搬を容易にする構造が望ましく、実用的と考える。いかがか。

〔回答〕 (1) Vroid I は、水平、垂直方向のみ移動可能な二次元移動機構として扱っているため、本論文では、側面から見た4関節5リンクの表現を用い、リンク機構として解析を行った。

また、平面モデル化は、図1の構造概略図の上段に示す形で、簡単な説明は、2・1節に述べられている。補足すると、図1における R1~R4 は関節回転用 DC モータで、W1~W6 は、車輪駆動用 DC モータであり、各モータは進行方向に向かい横置きに置かれている。

(2)(i) ご指摘については、もっともであると思う。現在試作した Vroid I では軽量のものを積載することが可能である。

(ii) ご指摘については、なるほどと考えるが、Vroid I では、特徴として、前・後・表・裏の区別の無い対称形を考慮したために、現在の形状をとることにした。ご指摘の実用モデルは、将来の課題と考えている。

〔質問〕 出澤 正徳〔理化学研究所〕

(1) 式(7)は一般的にいえるのか。ここには示されていない何らかの仮定が必要と思われるが、いかがか。

(2) 障害物がない場合の静的平衡条件の式は、式(9)のみで充分か。一般的には $i+1, \dots, 6$ の部分を考慮する必要はないのか。何らかの仮定が必要とされないか。また、 D_i には下限も必要とされるのではないか。

〔回答〕 (1) 式(7)における x_1, x_2, X_1, X_2 は、Vroid I の任意の2リンクの各両端の x 座標であり、これらは、変換マトリックスより求めることができる。ここで、式(7)においては、 $x_1 < x_2, X_1 < X_2$ と仮定しての条件であり、もし、これらの大小関係が逆の場合は、入れ換えることにより、同一の計算で拘束条件を求めることができる。

(2) 式(9)左辺は, i 番め節点回りの, $i-1$ 番め節点方向へのモーメントであり, 右辺 D_i は, $i+1$ 番め方向へのモーメントである. D_i は, 根元の動かないマニプレータの関節負荷と同じ方法で求めたものであり, $i-1$ 番め方向の Vroid I のリンクが固定していると仮定してのモーメントである. そして, もし, 式(9)において不等号の向きが反対になった場合には, Vroid I の各関節角はそのまま, $i+1$ 番め方向に転倒するという意味である.

また, ここで言う i 番めの節点というのは, 接地しているすべての節点を言うのであり, $i+1, \dots, 6$ 番め

までが接地している場合も含まれている. i 番め以降 $i+1, \dots, 6$ 番めまでの節点のうち, 接地している節点が存在している場合には, その点を新たに i 番めと考え, その点で式(9)を適用する. もし, $i+1, \dots, 6$ 番めの節点で接地している点が無ければ, $i+1, \dots, 6$ 番めの部分を考慮する必要はないと考えられる.

また, この拘束条件では, $D_i \geq 0$ の場合のみを考えており, Vroid I は, 水平面上を走行するものと仮定しているため, 第1リンクの存在する水平面よりも, 下に他の各節点が存在するというモードは考慮しないので, 特別に D_i の下限は必要ないとする.