

# 多足歩行機械の自由度に関する基本的考察\*

金子 真\*\* 阿部 稔\*\*\* 館 暲\*\*\*\*

## ABSTRACT

All multi-legged locomotion machines that do not need any dynamic balance control can be classified into several levels functionally. The authors define (i) two dimensional walking, (ii) to maintain the body horizontal on rough terrain, (iii) to keep the absolute height of main body constant as the minimum walking functions of multi-legged locomotion machines.

By the way, how many active degrees of freedom are necessary and sufficient to realize the above functions? Although the consideration of degrees of freedom seems to be fundamental in developing multi-legged locomotion machines, this problem has not yet been studied thoroughly.

From this point of view, the active degrees of freedom are examined in this paper using a four-legged machine which offers the minimum number of legs capable of keeping static stability. Resultantly it is shown that "six" is the necessary and sufficient number of active degrees of freedom to realize the above functions.



動的なバランス制御を必要としない多足歩行機械は、機能的にいくつかのレベルに分類される。筆者らは歩行機械の最低限の歩行機能として、(i)二次元的歩行、(ii)不整地における本体の水平保持、(iii)本体の絶対高さの一定保持を定義している。

ところで、上記の機能を実現するのに必要かつ十分な能動自由度はいくつになるだろうか。自由度に関する考察は、歩行機械を開発する際の基本のように思われるが、この問題についてはまだ十分に研究されていない。

このような観点から、本論文では静的安定でかつ最少の足数を有する4足歩行機械を使って能動自由度について調べている。その結果、上記機能を実現する必要かつ十分な能動自由度は“6”であることを示している。

## 1. はじめに

マニピュレータの場合、自由度が6以下のときには一般に自由度が増えるにつれて機能も向上し、自由度が6になると手先部は理論上任意の点で任意の姿勢をとることが可能となる。一方、作業空間内に障害物が存在し、その障害物の裏側にある対象物を取扱おうようなときには、マニピュレータの自由度も6自由度では不十分となる場合が生じ、冗長自由度 (redundant degrees of freedom)

が必要となってくる。ところが自由度が6より多くなると、作業の柔軟性という面からは確かに効果があるが、制御アルゴリズムの複雑化といった問題が生じてくる。

ところで静的安定を前提とした歩行機械の場合、最低限の機能を実現するのに必要かつ十分な自由度はいくつになり、かつそこにとどのようなモデルが存在するのだろうか。冗長自由度を取り除いた歩行機械では、足場の選択、歩容の選択といった点では確実に拘束されてしまうが、制御の単純化、歩行速度の向上といった点では大幅な改善が期待できる。

自由度に関する考察は、歩行機械の研究を進める上で基本ともいえるが、従来の研究において歩行機能と自由度との関係について、深く検討が加えられたことはほとんどない。

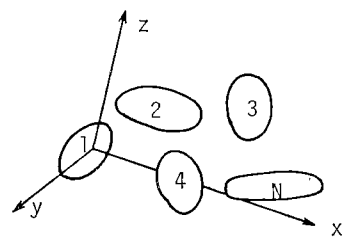
原稿受付 1983年8月20日

\* Basic Considerations on Degrees of Freedom of Multi-Legged Locomotion Machines

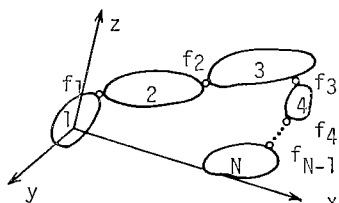
\*\* 機械技術研究所 機械部メカニズム課

\*\*\* 自動車安全公署部

\*\*\*\* システム部バイオメカニクス課



(a)  $F_k = 6(N-1)$



(b)  $F_k = 6(N-1) - \sum u_i$   
 $= -6(J-N+1) + \sum f_i$

**Fig. 1**  
Degrees of freedom of a mechanism

本論文では、自由度および歩行機械の機能について分類し、歩行機械の具備すべき最低限の機能を検討した上で、その機能を実現する必要かつ十分な自由度について考察している。

2. 歩行機械の自由度

2.1 対偶の自由度と機構の自由度

節（機構を構成する剛体：kinematic link）と節を連結する関節部のことを対偶（kinematic pair）という。対偶の自由度（degrees of freedom of a kinematic pair）は、例えば節間が全く拘束されていないとき6となり、節間が剛的に拘束されているときは0となる。一般に対偶の自由度  $f$  と拘束数  $u$  との間には常に式(1)が成立する。

$$f + u = 6 \quad (1)$$

なお、Table 1 に代表的な対偶の自由度と拘束数を示す。

次に Fig. 1 のように  $N$  個の節から構成される多自由度系を考える。仮に Fig. 1 (a) のように  $N$  個の節が全く拘束されていないとすると、任意の1個の代表節に固定された座標系からみると、他の  $N-1$  個の節は全体で  $6(N-1)$  個の機構の自由度（degrees of freedom of a mechanism）を有することになる。さらに Fig. 1 (b) のように、対偶  $i$  において  $u_i$  個の拘束を受けるとすると、多自由度系としての機構の自由度  $F_k$  は対偶数  $J$  として式(2)で表される<sup>2)</sup>。

$$F_k = 6(N-1) - \sum_{i=1}^J u_i \quad (2)$$

Table 1 Examples of kinematic pair

Item Pair	Schematic diagram	Number of freedom	Number of constraints
Spherical pair		3	3
Cylindrical pair		2	4
Turning pair		1	5
Prismatic pair		1	5

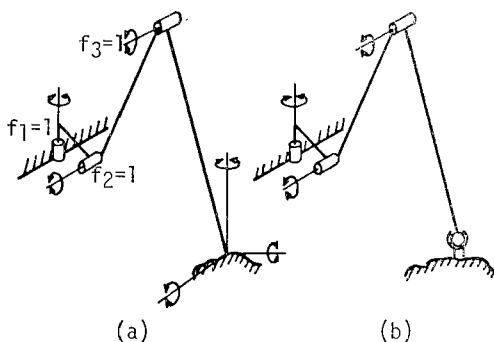
また式(2)は対偶の自由度  $f_i$  を使って式(3)のように表すこともできる。

$$F_k = -6(J-N+1) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (3)$$

式(3)の第1項のカッコの中は、多自由度系に存在する閉ループの数を意味し、マニピュレータのように閉ループが存在しない場合、第1項が零となり、機構の自由度と対偶の自由度の総和は一致するが、静的安定を前提とした歩行機械のように、地面と本体に対していくつかの閉ループが存在する場合、機構の自由度は対偶自由度の総和より少なくなる。式(2),(3)は A. Morecki<sup>3)</sup> らが手掌の自由度を求める際に用いた式と本質的に一致している。なお機構の自由度は運動の自由度、可動度<sup>2)</sup> (mobility) あるいは単に自由度<sup>1)</sup> と呼ばれることもある。

2.2 自由度の分類

対偶の自由度は、さらにアクチュエータが対応している能動自由度 (active degrees of freedom) と、アクチュエータの対応していない受動自由度 (passive degrees of freedom) に分類することができる。Fig. 2 は典型的な歩行機械の脚機構<sup>5),6)</sup>を示したものである。Fig. 2 (a) のように脚の各対偶の自由度 ( $f_1, f_2, f_3$ ) が能動自由度になっていると、可動限界内で足先を任意の点に位置決めすることができる。一方、足先と地面との対偶の自由度は受動自由度となり、一般に Fig. 2 (a) のように3軸まわりの回転の自由度が仮定される<sup>5)</sup>。理想



**Fig. 2** Typical leg mechanism and types of degrees of freedom

的には摩擦のある点接触タイプの足先がこれに対応するが、摩擦のある面接触タイプであっても Fig. 2 (b) のように、Table 1 の球対偶 (spherical pair) を介して足と脚を連結すれば、実質的に点接触タイプと等価な受動自由度を与えることが可能となる。以上の知識をもとに我々が一般に使用している自由度を分類すると Table 2 のようにまとめることができる。

ところで、 $n$  自由度歩行機械といった場合の  $n$  はどのような自由度を表しているのだろうか。その明確な定義はなされていないが、一般に  $n$  は能動自由度の総和を表していると考えられる。能動自由度の総和は歩行機械が与えられれば、いかなる位相においても不変であり、かつ直観的な意味において制御性を評価する指標となり得る。これに対して歩行動作の各位相において変化する機構の自由度は、多自由度系のすべての節を位置決めするのに、いくつの独立なパラメータが必要であるかということを示すもので、歩行時の動きの柔軟性を評価する指標にもなり得る。

### 2.3 従来の歩行機械の自由度と機能

Table 3 はこれまでに研究試作された主な歩行機械の能動自由度の総和について整理したものである。ただし、\* 印のついた歩行機械は直進歩行しかできない。Table 3 において最も能動自由度が多いのは、Fig. 2 の脚のように足先が任意の点に位置決めできるタイプで、全足で  $3k$  能動自由度 ( $k$  は足数) 備えている。整地用移動機械の代表にあげられる車輪式移動機械や、若干の不整地が走行できるクローラ式移動機械が、わずかに2つの能動自由度で自由に動き回れることを考慮すれば、このような歩行機械の能動自由度はきわめて多いことがわかる。各足に3つの能動自由度を有する  $k$  足歩行機械の場合、機構の自由度  $F_K$  は遊脚相の足数を  $k_1$  として式 (4) のように表すことができる。

$$F_K = 6 + 3k_1 \quad (k_1 = 0, 1, \dots, k-3) \quad (4)$$

式 (4) は付録1で示されているように式 (3) を使って証明することができる。また、式 (4) は仮に全足立脚相 ( $k_1=0$ ) になっても、胴体の3軸方向の並進運動および3軸まわりの回転運動が可能であることを示している。歩行式海底ロボット<sup>13)</sup> (全足立脚相の機構の自由度は、胴体の上下方向の1自由度のみ) を除き、未だに実用的な不整地用歩行機械の実現に至っていない現時点において、はたしてこれだけの柔軟性が必要なのだろうか。

本論文では、このような現状を考慮し、歩行という立場で歩行機械に必要な最低限の機能を定義し、特に制御の単純化という観点から能動自由度をどこまで減らせるかという問題に焦点を絞ることにする。

Table 2 Classification of degrees of freedom

degrees of freedom	degrees of freedom of a kinematic pair	degrees of freedom of a mechanism	active degrees of freedom
			passive degrees of freedom

Table 3 Active degrees of freedom of legged locomotion machines

4-leggs	Tokyo Institute of Technology [7] Mechanical Engineering Laboratory [8]	12 8*
6-leggs	Ohio State University [5]	18
	Moscow State University [6]	18
	Carnegie-Mellon University [9]	18
	Odetics, Inc. [10]	18
	Paris University [11]	12*
	Roma University [12]	12*
8-leggs	Komatsu Ltd. [13]	10

### 3. 歩行機械の機能的分類

歩行機械の機能をレベル (1)~(5) までの5段階に分類した上で、不整地歩行を前提とした歩行機械の具備すべき最低限の機能を吟味する。

レベル(1): 平面において静的安定を保持しながら直進後退ができる。

レベル(2): 平面において静的安定を保持しながら任意の位置に到達できる。

レベル(3): 不整地において、静的安定を保持しながら任意の位置に到達でき、かつ本体(胴体部)を水平に保持することができる。

レベル(4): レベル(3)の機能を有し、かつ本体の絶対高さをできるだけ一定に保持することができる。

レベル(5): 可動範囲内で任意の足場を選択することができる。

なお、ここで対象とする不整地としては簡単のため、歩行機械が踏破可能な凹凸からなる地形 (O型荒地)<sup>14)</sup> とする。

また、静的安定を保持するため、歩行機械は以下の2つの必要条件を満足しなければならない<sup>15)</sup>。

(i) 立脚相の足が3本以上あること

(ii) 立脚相にある足先で形成される多角形 (以下支持多角形と呼ぶ) 内に、重心の垂直投影点が存在すること

レベル(3)において、本体を水平に保持する第1の理由は、前記必要条件(ii)に関連して歩行機械の静安定マージン<sup>16)</sup> (支持多角形内へ重心から垂線を立てた点を垂直投影点とし、この点から支持多角形までの距離を、

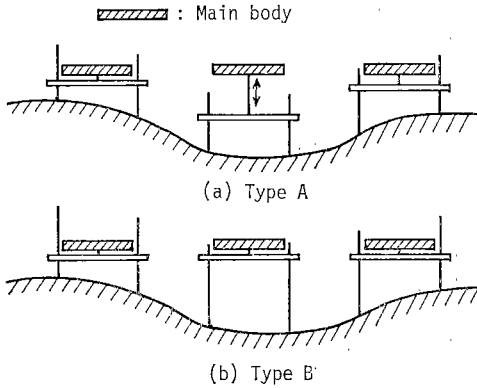


Fig. 3 Two methods to keep body height constant

進行方向前後に測定した値の1サイクルにおける最小値)を十分確保するためである。また荷物の搭載性、制御の簡略化、鉛直および水平運動の分離によるエネルギー効率の向上<sup>17)</sup>といった観点からも本体の水平保持は重要な機能と考えられる。

一方レベル(4)において、本体の絶対高さをできるだけ一定に保持することは、省エネルギー的観点から要求される機能である。エネルギー回生機構の備った理想的な歩行機械では、消費エネルギーは本体の上下動があっても、出発点と到着点との相対的な高さの差だけに左右されるが、エネルギー回生機構の備っていない現実的なアクチュエータを用いる限り、足の可動範囲内において、本体の絶対高さではできるだけ一定に保つことが望ましい。この場合、本体の絶対高さを一定に保持するのに2通りの方法がある。1つの方法は Fig. 3 (a) のようにスライド式アクチュエータにより、本体 (Fig. 3 では main body) の絶対高さを一定に保つ方法 (タイプA) で、もう1つの方法は Fig. 3 (b) のように本体は下部シャーシに固定されていて、本体の絶対高さを変えないように遊脚相にある足を位置決めした後、本体を水平移動させる方法 (タイプB) である。タイプAの場合、本体の質量を  $m_0$ 、スライド変化量  $\Delta Z$  (伸びを正とする) とすると、本体とシャーシを連結しているアクチュエータには常に  $F=m_0g$  なる力が作用しているため、 $\Delta Z$  の正負により外部に対して仕事をしたりされたりする。 $\Delta Z$  が正の場合、アクチュエータにより  $m_0g\Delta Z$  なるエネルギーが消費される。 $\Delta Z$  が負の場合、アクチュエータは外部よりエネルギーを供給されるが、今日のアクチュエータでは一般にこれを回生して利用することは困難である。タイプBの場合、本体の水平移動に対して重力によるエネルギー消費は原理的に零にすることが可能となる<sup>17)</sup>。本研究では、エネルギー消費が少ないという意味でタイプBの方法を前提としている。また Fig. 4 はレ

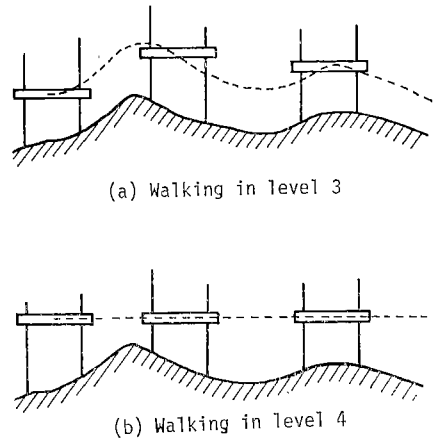


Fig. 4 The difference between level 3 and level 4

ベル(3),(4)の歩行形態の相違を示したものである。一方、レベル(4)までの機能も含むレベル(5)の歩行では、式(4)で示される機構の自由度を有効に使用して、側行歩容<sup>18)</sup>(本体の軸に対して斜め任意方向への直進歩行)や直進歩行に本体の任意の回転動作を組合せる歩容など、高度な歩行形態をとり得るが、本研究ではこれらの機能は柔軟性に関する機能と考える。したがって、歩行機械に最低限要求される機能としてレベル(4)を定義することにする。

#### 4. 最少能動自由度に関する考察

レベル(1),(2)の歩行はカム・リンク等を組み合わせることにより、それぞれ1能動自由度、2能動自由度<sup>19)</sup>で実現されているし、かつそれらが最少の能動自由度であることは容易に理解できる。

次に、レベル(4)の歩行を前提とした最少能動自由度モデルの追求という観点から、歩行機械を2つのタイプに分類する。

(i) 歩行動作と静的安定保持の両方を、脚の能動自由度により実現するタイプ (I型歩行機械)

(ii) 歩行動作と静的安定保持を、別の能動自由度により実現するタイプ (S型歩行機械)

I型歩行機械は昆虫、動物といった生物をモデル化したもので、従来の歩行機械の多く<sup>5-7,9,10)</sup>はこのタイプに属する。S型歩行機械は歩行動作だけ可能な歩行モデルを考え、そのモデルが規定された歩行パターンに対して静的安定条件を満足しない場合、重心を移動させるための能動自由度を追加するタイプで、その例はきわめて少ない<sup>20)</sup>。ところで、重心移動は重力方向に垂直な平面内に限定され、しかも支持多角形内に入れることが目的なので、たとえ必要であっても1能動自由度で十分である

(Fig. 6, 7 の 4 足歩行モデル参照). 以上の考察より本研究では, 能動自由度を減らすという観点から S 型歩行機械に着目し, その最少能動自由度について検討することにする.

4.1 必要性についての検討

一般に足数が少なくなるほど能動自由度も少なくなることが期待できるため, 静的安定歩行が実現できる最少の足数である 4 足を想定し, Fig. 5 に示されるような 4 足歩行機械および座標系を考えるものとする. ここに  $\vec{L}_i$  ( $i=1, 2, \dots, 4$ ) は脚  $i$  と本体との連結点の位置ベクトルであり,  $\vec{F}_i$  ( $i=1, 2, \dots, 4$ ) は脚  $i$  の足先の位置ベクトルである. また本体の重心を地表面上に垂直に投影した点を  $P_G$  とし,  $P_G$  の位置ベクトルを  $\vec{G}$ ,  $P_G$  から本体までの高さベクトルを  $\vec{H}$  とする. さらに支持多角形 (ここでは三角形) の法線方向に立てた単位ベクトルを  $\vec{n}$  とし,  $x, y, z$  方向単位ベクトルを  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  とする. ただし 4 足とも立脚相になる場合  $\vec{n}$  は定義されないが, これは能動自由度を検討する上で本質的な問題ではないので, 4 足立脚相のときは直前の 3 足立脚相のときの  $\vec{n}$  をそのまま考え, 4 足立脚相  $\rightarrow$  3 足立脚相のとき新たな  $\vec{n}$  が決まるものとする.

ここで, レベル (4) の機能を (a) 本体の任意の位置への位置決め, (b) 本体の水平保持, (c) 本体の絶対高さ保持の 3 つの機能に分けて考えると, 各機能は以下のように前記ベクトルを用いて表すことができる.

(a) ベクトル  $\vec{G}$  が地表面上の任意の位置に決まること.

$$(b) (\vec{L}_i - \vec{L}_{i+1}) \cdot \vec{k} = 0 \quad i=1, 2 \quad (5)$$

ここに  $\vec{A} \cdot \vec{B}$  はベクトル  $\vec{A}, \vec{B}$  の内積を表す.

$$(c) Z_{max} = \text{Max}_{i=1-4} (\vec{L}_i - \vec{F}_i) \cdot \vec{k} \quad (6)$$

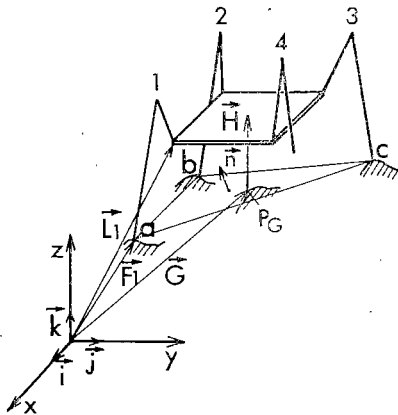


Fig. 5 Vector notation of each position of a four-legged machine

$$Z_{min} = \text{Min}_{i=1-4} (\vec{L}_i - \vec{F}_i) \cdot \vec{k} \quad (7)$$

ここに  $i$  は立脚相の足番号に対応する.

$$(i) Z_{max} < h_{max} \text{ かつ } Z_{min} > h_{min}$$

$$\frac{d}{dt} (L_i \cdot \vec{k}) = 0 \quad (i: \text{任意}) \quad (8)$$

$$(ii) Z_{max} = h_{max} \text{ または } Z_{min} = h_{min}$$

本体の高さを変える.

ここに  $h_{max}, h_{min}$  は調節できうる本体と足先の最大高さおよび最小高さである.

一方, 任意の地形に対して本体を常に水平に保持するということは, 見方を変えれば, 単位ベクトル  $\vec{n}$  が歩行機械本体に対して任意の方向を向くことができるということにほかならない. さらに, 本体の絶対高さをできるだけ一定に保持できるということは, ベクトル  $\vec{H}$  が可動範囲内で任意に定まるということになる. つまりレベル (4) の歩行を実現するためには少なくともベクトル  $\vec{G}, \vec{n}, \vec{H}$  が任意に決まる必要がある. なおベクトル  $\vec{G}, \vec{n}, \vec{H}$  の成分は式 (9), (10), (11) のように表示することができる.

$$\vec{G} = (x_G, y_G, z_G) \quad (9)$$

$$\vec{n} = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) \quad (10)$$

$$\vec{H} = (0, 0, h) \quad (11)$$

ここに,  $\alpha, \beta, \gamma$  はそれぞれ歩行機械本体に固定された各座標軸とベクトル  $\vec{n}$  とのなす角とし, 式 (12) を満足する.

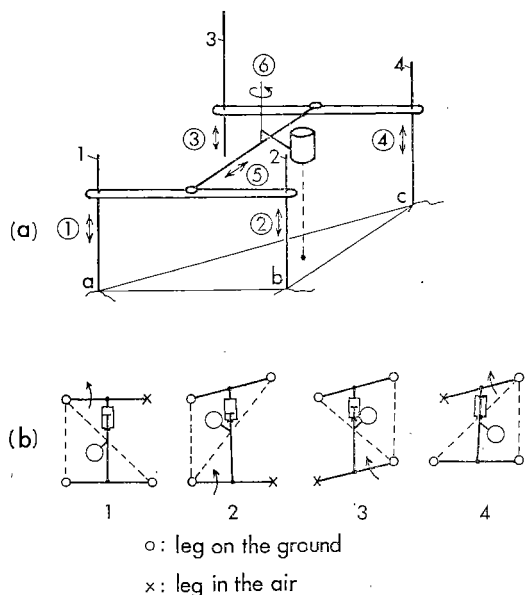
$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (12)$$

さらにベクトル  $\vec{G}$  は地表面上の任意の点であるから, 地形が与えられれば式 (13) のように  $z_G$  は  $x_G, y_G$  の関数となる.

$$z_G = z_G(x_G, y_G) \quad (13)$$

したがって, 式 (9)~(13) より実際に独立なパラメータの数は“5”となる.

次に, これらのパラメータを能動自由度と対応づけて考えると,  $x_G, y_G$  は歩行動作を介して歩行機械が二次元的に動けることに対応するもので, 最低 2 つの能動自由度が必要であることを示している. また,  $h$  は歩行動作に関係なく本体を  $z$  方向に動かすことができる 1 つの能動自由度が必要であることを示している. さらに 2 つの姿勢パラメータ ( $\alpha, \beta, \gamma$  の任意の 2 つ) は, 歩行動作を介して支持多角形を含む面が, 本体に対してその姿勢を変えることに対応するため, 最低 2 つの能動自由度が必要であることを示している. しかも各能動自由度はすべて独立であるから, 以上の考察によりレベル (4) の歩行動作 (静的安定保持については保証されていない) を実現するためには, 最低 5 つの能動自由度が必要であることが明らかになった.

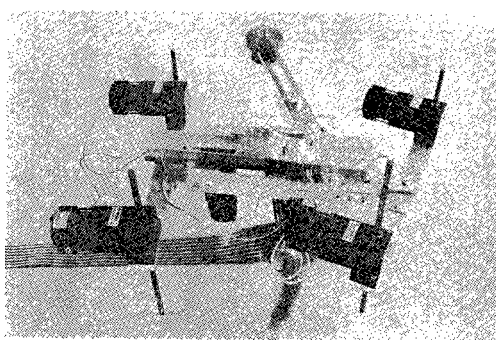


**Fig. 6** The suggested four-legged model with six degrees of freedom and a walking procedure

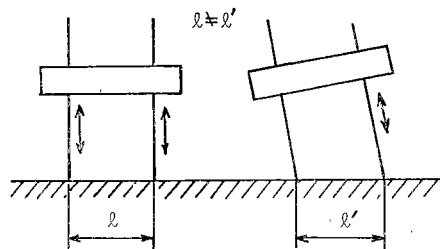
4.2 十分性についての検討

**Fig. 6** (a), **Fig. 7** のような4足歩行モデルを考える。このモデルは上下方向にスライド可能な4本の足(4能動自由度)と、前脚と後脚とを連結するスライド可能な胴体(1能動自由度)、および重心移動用の回転おもり(1能動自由度)の計6つの能動自由度と、前脚と胴体および後脚と胴体の各連結点において、回転に関する受動自由度を有するモデルである。ただし足先と地面との間の対偶としては、**Fig. 2**(a)のタイプの対偶が仮定されているものとする。歩行動作は **Fig. 6** (b) のように立脚相の足で形成される三角形の内部に重心を入れ、次に×印の足を遊脚相にしてから、胴体をどちらかの方向にスライドさせることにより実現する。なお、各位相における機構の自由度と能動自由度との対応は

**Table 4** のようになる(足番号、能動自由度の番号については **Fig. 6** 参照)。Table 4 より明らかなように、本体(胴体部)の上下動には立脚相にある3本の足を同期させなければならない。なぜならば立脚相の足を独立に制御し、本体を傾けることは足が地面に対してすべることを意味するからである(**Fig. 8** 参照)。このように歩行動作中(1本の足は遊脚相)必ず2つの能動自由度が縮体(立脚相の3本の足は機構的に1本



**Fig. 7** General view of the suggested four-legged model



**Fig. 8** The slip between foot and ground in the suggested four-legged model (This is caused by the independent operation of each leg on the ground.)

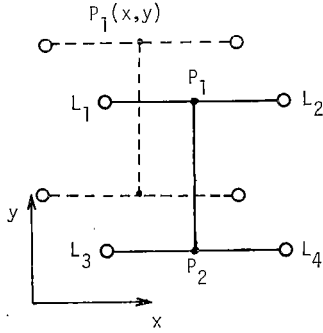
分に相当)していることにより、機構の自由度は能動自由度の総和より2少なくなり4となる(付録2参照)。その内訳は本体の上下に1つの機構の自由度が対応し、移動に胴体のスライドと遊脚相の足の上下の2つの機構の自由度が対応し、重心移動に1つの機構の自由度が対応するが、実質的に姿勢に関する機構の自由度は存在しない。姿勢に関する機構の自由度は本来、本体の上下動とともに立脚相の足の3つの能動自由度により実現されるべきものであるが、この自由度は本体と地面との間の閉ループの存在および足先と地面との対偶で、すべりがないという仮定により失なわれたものである。しかしな

**Table 4** The relation between active degrees of freedom and degrees of freedom of a mechanism

lifted leg's number	item of degrees of freedom of a mechanism			
	up-and-down movement of main body	up-and-down movement of lifted leg	sliding movement of main body	shift of the center of gravity
1	② ③ ④	①	⑤	⑥
2	① ③ ④	②	⑤	⑥
3	① ② ④	③	⑤	⑥
4	① ② ③	④	⑤	⑥
all legs are on the ground	①②③④	×	×	⑥

○: active degrees of freedom

**Fig. 9**  
Two dimensional  
expression  
of the suggested  
model

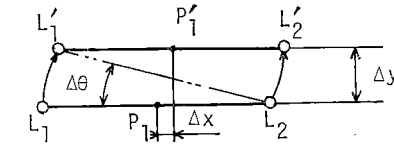


から姿勢に関する機能は機構の自由度としては失なわれても、機能的に完全に失なわれているわけではない。すなわち遊脚相の足が地形に合わせて位置決めされ、新たな足が遊脚相になったとき、結果として支持多角形の姿勢は本体に対して変化する。先の理由によりこの動作が歩行動作と同時に実現できないため、機構の自由度という概念の中に入らないだけである。

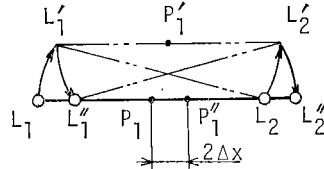
以上の考察により、この4足歩行モデルにおける本体の水平保持機能、および可動範囲内において本体の絶対高さの一定保持機能の実現可能性は確かめられたことになる。したがって、このモデルがレベル(4)の機能を満足しているかどうかを調べるには、このモデルが静的安定で任意の位置に到達できるかどうかを調べればよいことになるが、回転おもりの移動により、静的安定を保持するための必要条件(ii)は満足できるので、ここでは任意の位置への到達可能性についてのみ調べる。

任意の位置に到達可能かどうかを調べるには、Fig. 9において点  $P_1$  が任意の点  $(x, y)$  に到達できるかどうかを吟味すればよい。なぜなら点  $P_1$  が任意の点に到達できれば点  $P_2$  についても同じことがいえるからである。ここで Fig. 10 (a) のようにはじめに点  $L_1$  を点  $L_2$  のまわりに  $\Delta\theta$  だけ回転させ  $L_1'$  とし、次に点  $L_2$  を点  $L_1'$  のまわりに  $\Delta\theta$  だけ回転させ点  $L_2'$  とすると、この2回の動作によって点  $P_1(x, y)$  は  $x$  方向に  $\Delta x$ 、 $y$  方向に  $\Delta y$  移動し、点  $P_1'(x + \Delta x, y + \Delta y)$  に移動する。さらに Fig. 10 (b) のように点  $L_1'$  を点  $L_2'$  のまわりに  $\Delta\theta$  だけ回転させ  $L_1''$  とし、その後点  $L_2'$  を点  $L_1''$  のまわりに  $\Delta\theta$  だけ回転させ点  $L_2''$  とすると、結局  $P_1(x, y)$  は点  $P_1''(x + 2\Delta x, y)$  に移動する。つまり Fig. 10 (b) の一連の動作は点  $P_1$  を  $x$  方向に  $2\Delta x$  だけ動かす動作と考えることができる。

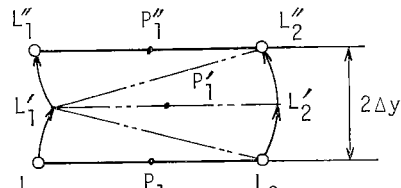
次に Fig. 10 (c) のように、Fig. 10 (a) の状態から点  $L_2'$  を点  $L_1'$  のまわりに  $\Delta\theta$  だけ回転させ点  $L_2''$  とし、その後点  $L_1'$  を点  $L_2''$  のまわりに  $\Delta\theta$  だけ回転させ  $L_1''$  とすると、結局点  $P_1(x, y)$  は  $P_1''(x, y + 2\Delta y)$  に移動する。つまり Fig. 10 (c) の一連の動作は、点



(a) A basic procedure for movement of point  $P_1$



(b) A procedure for x-directional movement of point  $P_1$



(c) A procedure for y-directional movement of point  $P_1$

**Fig. 10** A walking procedure to reach any position in the  $x-y$  plane

$P_1$  を  $y$  方向に  $2\Delta y$  だけ動かす動作と考えることができる。したがってこの2つの動作を組合せれば、点  $P_1$  は原理的に任意の位置に到達できる。点  $P_2$  についても全く同じことがいえる。以上より、このモデルはレベル(4)の機能を満足していることが証明された。しかも回転おもりを除いた能動自由度の総和“5”は、必要性の観点から得られた4.1節の値と一致するし、回転おもりの1能動自由度は、4足のS型歩行機械として必要かつ十分な能動自由度である。

以上の考察により、Fig. 6 (a)、Fig. 7 で示される4足歩行モデルはレベル(4)の歩行を実現し、かつ最少能動自由度を備えたモデルであることが明らかになった。

なお本モデルの場合、任意の位置だけでなくうまく制御することにより任意の方向を向かせることも可能<sup>21)</sup>であることを付記しておく。

### 5. む す び

はじめに自由度についての分類を行い、その中で能動自由度の総和と機構の自由度は、歩行機械の自由度に関する考察を行う上で重要な指標になり得ることを示した。

次に、静的安定を前提とした多足歩行機械に要求される最低限の機能として、以下の機能(i)~(iii)を定義

した。

- (i) 静的安定を保持することができる。
- (ii) 不整地において任意の位置に到達できる。
- (iii) 不整地において本体を水平に保持し、かつ本体の絶対高さをできるだけ一定に保持することができる。

これらの機能を実現するためには、(ii), (iii) の観点から5つの能動自由度が必要かつ十分な能動自由度であり、(i)まで含めて考えると、6つの能動自由度が必要かつ十分な能動自由度であることが明らかになった。

最後に、本研究を遂行するにあたり有益な助言をいただいた機械技術研究所システム部の谷江和雄および機械部の小森谷清、谷和男の諸氏に対して心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Nakano, E., Ozaki, S., "Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator MELARM", 4th ISIR, pp. 251, 1974
- 2) Hunt, K. H., "Kinematic Geometry of Mechanisms", Clarendon Press Oxford, p. 33, 1978
- 3) Morecki, A. et al., "Mechano-electrical and Bio-mechanical Principles of Control of the Human Upper Limb Muscles", Archiwum Budwy Maszyn No.4, 1964
- 4) 加藤, "人工の手・足", 計測と制御, 第7巻, 第12号, p. 881, 1968
- 5) McGhee, R. B., et al., "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain", IEEE Trans. Systems, Man, Cybern., Vol. SMC-9, No. 4, Apr. pp. 176, 1979
- 6) Devjanin, E. A., et al., "The Six-legged Walking Robot Capable of Terrain Adaptation", Romansy, pp. 375, 1981
- 7) 広瀬, 梅谷, "4足歩行機械の基本的運動調整系の構成と歩行実験", 計測自動制御学会論文集, 第16巻, 第5号, pp. 747, 1979
- 8) 池田ほか, "4足歩行機械の有限状態制御", バイオメカニズム2, 東大出版, pp. 165, 1973
- 9) Raibert, M. H., Sutherland, I. E., "Machine That Walk", Scientific American, Vol. 13, No.1, Jan.

pp. 32, 1983

- 10) Barthelet, T. G., "The First Functionoid Developed by ODETICS. INC.", Proc. of ICAR Symp., Tokyo, Japan, 1983
- 11) Kessiss, J. J., et al., "Walking Robot Multi-level Architecture and Implementation", Romansy, pp. 347, 1981
- 12) Petternernella, M., Salinari, S., "Feasibility Study on Six-legged Walking Robots", 4th ISIR, pp. 33, 1974
- 13) Ishino, Y., et al., "Walking Robot for Underwater Construction", Proc. of ICAR Symp., Tokyo, Japan, 1983
- 14) 広瀬ほか, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する基礎的研究", 計測自動制御学会論文集, 第18巻, 第2号, pp. 194, 1982
- 15) Frank, A. A., "Automatic Control Systems for Legged Locomotion Machines", USCEE Report, 1968
- 16) McGhee, R. B., Frank, A. A., "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits", Mathematical Biosciences, Vol. 3, No.3, pp. 331, 1968
- 17) 広瀬, 梅谷, "歩行機械の脚形態と移動特性", バイオメカニズム5, 東大出版, pp. 242, 1980
- 18) 広瀬ほか, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究" 第23回 SICE 自動制御連合講演会予稿集, p. 389, 1980
- 19) 阿部ほか, "擬似直線機構を用いた6足歩行機械に関する研究(第1報)", 第22回 SICE 学術講演会予稿集, p. 605, 1983
- 20) 金子ほか, "自由度の少ない歩行機械(第1報)", 第22回 SICE 学術講演会予稿集, p. 603, 1983
- 21) 金子ほか, "多足歩行機械の自由度に関する基本的考察", 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 121, 1983

〔付録1〕

例えば, Fig. 11, 12 のように各足3自由度備えた4足歩行機械の場合, 考えられ得る足の接地状態としては、(i) 全足立脚相, (ii) 3足立脚相の2通りしかない。

(i) 全足立脚相の場合

Fig. 11 より, ループ 1, 2, 3, 4 といった閉ループが存在するが, 例えばループ 4 はループ 1, 2, 3 を合成して表すことができるため, 実際に独立な閉ループの数は3つだけである。一方, 各足は3つの能動自由度と3つの受動自由度(足と地面との対偶)を有しているため、

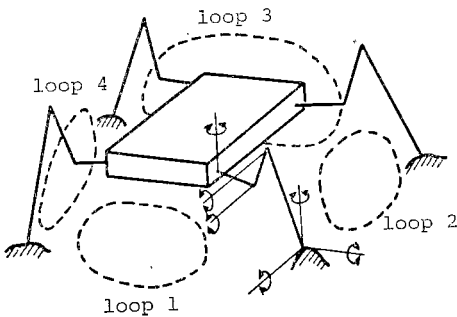


Fig. 11 A four-legged machine with three active degrees of freedom for each leg (All legs are on the ground.)

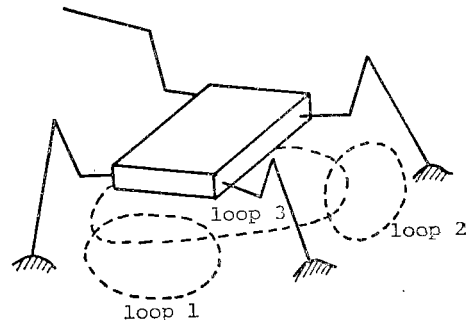


Fig. 12 A four-legged machine with three active degrees of freedom for each leg (Three legs are on the ground.)



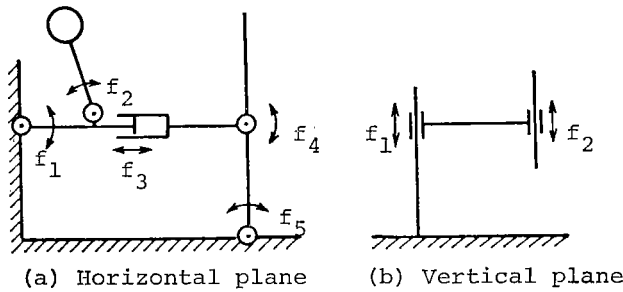


Fig. 13 Planar mechanisms of the suggested four-legged model

対偶自由度の総和は1本の足で6となる。以上の考察をもとに、式(3)(本文中)の機構の自由度を計算すると  $F_K = -6 \times 3 + 4 \times 6 = 6$  となる。

(ii) 3足立脚相の場合

Fig. 12より独立な閉ループの数は、(i)の場合より1つ少なくなる。また(i)において、立脚相であった足が1本遊脚相になるため、足と地面との間の3つの受動自由度は1本分失なわれてしまう。したがって、式(3)の機構の自由度は  $F_K = -6 \times 2 + 3 \times 6 + 3 = 9$  となる。

一般に  $k$  足歩行機械で  $k_1$  足が遊脚相になっている場合を考えると、独立な閉ループの数は  $k - k_1 - 1$  となる。また立脚相の足1本につき対偶の自由度は6になるため、 $k - k_1$  足では  $6(k - k_1)$  となる。さらに、遊脚相の足1本につき対偶の自由度の総和は3となるため、 $k_1$  足で

は  $3k_1$  となる。したがって、式(3)は式(A.1)のようになり、式(4)(本文中)が証明されたことになる。

$$F_K = -6(k - k_1 - 1) + 6(k - k_1) + 3k_1 = 6 + 3k_1 \quad (A.1)$$

ただし、 $k_1 = 0, 1, \dots, k - 3$  である。

[付録2]

仮定により地面と足との間のすべりは許されないため、提案された4足歩行モデルの胴体部は水平面から傾くことはできない。したがって、

(i) 水平面内での運動と (ii) 垂直面内での運動は完全に独立になり、かつそれらの機構は平面機構に帰着する。平面機構の場合、式(3)は式(A.2)のようになる<sup>2)</sup>。

$$F_K = -3(J - N + 1) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (A.2)$$

以下、3足立脚相の場合について考える。

(i) 水平面内での機構の自由度

Fig. 13(a)より  $J = 5, N = 5, f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 1$  となる。したがって式(A.2)より  $F_K = 2$  となるが、これは胴体の推進動作と回転おもりの回転動作に対応するものである。

(ii) 垂直面内での機構の自由度

Fig. 13(b)より  $J = 2, N = 3, f_1 = f_2 = 1$  となる。したがって式(A.2)より  $F_K = 2$  となるが、これは胴体の上下動と遊脚相の足の上下動に対応するものである。



金子真 (Makoto KANEKO)

昭和29年1月18日生れ。昭和51年九州工業大学機械工学科卒業。昭和53年東京大学大学院修士課程修了。昭和56年同大学博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。移動ロボット用障害物検出センサ、多足歩行機械などロボット関連の研究に従事。気液二相流ポンプ系の不安定現象にも興味を持つ。現在機械部メカニズム課技官。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)



阿部稔 (Minoru ABE)

昭和7年8月11日生れ。昭和30年3月横浜国立大学工学部機械工学科卒業。同年4月通産省工業技術院機械試験所(現、機械技術研究所)に入所。現在に至る。この間、機械要素の研究に従事後、動力義手、盲人用歩行誘導機械等福祉機器の研究開発に従事。現、自動車安全公害部長。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会、日本ME学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)



館 暉 (Susumu TACHI)

昭和21年1月1日生れ。昭和43年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和48年同大学院博士課程修了。工学博士。同年同工学部助手、50年機械技術研究所に移り、現在システム部バイオメカニクス課主任研究官。バイスペクトルなどの統計的信号処理、電気刺激による情報伝達、盲導犬の機能を有する歩行誘導機械の研究などに従事。54~55年、マサチューセッツ工科大学客員研究員として医療福祉工学の研究に従事。IEEE、日本ME学会、日本脳波筋電図学会、バイオメカニズム学会、応用物理学会、日本機械学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)