

## 四足動歩行ロボットの力学的解析

木村 浩\* 下山 勲\*\* 三浦 宏文\*\*

歩行には大きく分けて静歩行と呼ばれるものと、動歩行と呼ばれるものがある。動歩行は移動速度と移動エネルギーの点で優れていると言われている。本論文では、これまでの研究で欠けていた、これらの特徴を生かすためにはどのような動歩行が望ましいかという問題が、四足歩行ロボットについて考察される。

歩行を計画するときには、歩容 (Gait) や移動速度、歩行周期、歩幅、胴体高さなど多くのパラメータが存在する。本論文では、これらを「歩行の安定性」、「最大移動速度」、「移動エネルギー」という三つの指標を考慮して決定することを提案し、これらの指標とパラメータの関係を動力的に考察している。そして、結論として以下のことを得ている。

- (1) 歩行周期が短い程、安定に歩行できる。
- (2) 最大移動速度を上げるためには、ゆっくりと大きな歩幅で歩行することが望ましい。
- (3) 移動速度を最大にする歩行周期が存在する。
- (4) ある移動速度に対して移動エネルギーを最小にする歩行周期が存在する。
- (5) 移動エネルギー優先の歩行では Trot (対角線上の二脚を同時に振り出す歩容) が、移動速度優先では Pace (同じ側の前脚、後脚を同時に振り出す歩容) が望ましい。

そして、Collie-2 と呼ばれる四足歩行ロボットを用いて、以上の議論の妥当性と有用性を示している。

### 1. はじめに

近年ロボットの移動手段として脚式移動の実用化に対する要望が高まっている。従来行われてきたロボットの脚を対象にした研究は、次の二つに大別できる。

(a) 対象は主に四足以上の歩行ロボットで、着地足の作る多角形上に常に重心を置き、静的に安定を保つ歩行 (静歩行) の研究<sup>1-7)</sup>

(b) 対象は主に四足以下の歩行ロボットで、静的には不安定であるが、動的に安定を保つ歩行 (動歩行) の研究<sup>8-11)</sup>

静歩行においては、制御が容易であるので不整地歩行を実現し易いという特徴があり、動歩行においては、移動速度や消費エネルギーの点で優れているという特徴がある。筆者らは、環境に応じてこれらを使い分けができる歩行ロボットの実現を目指して、特に、四足動歩行の研究を行い、“Pace” や “Trot” と呼ばれる歩容を実現してきた<sup>17,19)</sup>。これを含めて、これまで行われてき

た (b) のタイプの研究においては、動歩行を実現することのみが注目され、どのような動歩行が移動速度や移動エネルギーなどの点から望ましいかという力学的考察は行われていない。しかし、先に述べた動歩行の利点を生かすためには、このような考察は必要不可欠であると考えられる。このような状況をふまえ、本論文では、歩行を評価する指標として「安定性」、「移動速度」、「移動エネルギー」を導入し、これらの指標と歩行を表す多くのパラメータ (脚長、歩容、歩行周期、歩幅など) の関係を動力学を用いて定式化している。このような定式化は、歩行ロボットの設計から歩行の計画において、重要な指針を与える。

本論文の構成は以下の通りである。

- 第二章では、歩行ロボットの運動方程式をたてそれを解くという力学的解析の問題が扱われる。
- 第三章では、四足動物の歩容を分類した研究<sup>2,22)</sup> を参考にして、四足歩行の代表的な三つの歩容 “Trot”, “Pace”, “Bound” を導入する。
- 第四, 五, 六章では、先に述べた、三つの指標と歩行を表すパラメータの関係が力学的に解析される。

原稿受付 1987年8月6日

\* 東北大学工学部 \*\* 東京大学工学部

○第七章では、計算結果が示される。  
 ○第八章では、以上の解析中でなされた仮定が適切であり、解析の結果が有用であることを実証するために、“Collie-2”と呼ばれる歩行ロボットを用いて実験を行った結果について述べる。  
 二章で述べられる歩行の逆動力学の過程においては、  
 ○アクチュエータの出力限界や安定性の問題を含めて実現可能でかつ容易な軌道をいかにして計画するか  
 ○床反力をどのように扱うか  
 など、一義的に決まらない問題が多い。従って、この過程においては、どのような制御を行うかという問題を含めて考察がなされる必要がある。これまで二足歩行ロボットについて行われた制御理論の検証の色彩が濃い研究<sup>14~16)</sup>とは異なり、本論文での立場は力学的解析を十分に行うことによりできるだけ簡単な制御によって動歩行を行わせることにある。従って、制御の問題は力学的解析に含め特に章を設けて論じることは行わないが、基本的な考えは、「動歩行の安定化を、不安定な系の一回一回を短くすること、すなわち、支持脚の交換(系の相変化)により行うことができる」ことである。これは、二足歩行の研究<sup>10)</sup>で詳しく述べられている。

2. 歩行ロボットの運動方程式

これまで四足以上の歩行ロボットの運動方程式としては、静的な釣り合いのみを考えたものが多く<sup>4,6,7)</sup>、胴体や脚の慣性力を無視できない動歩行に適用できるものはない。ここでは、拘束条件付きマニプレータ<sup>24)</sup>や二足歩

行の両脚支持期の解析で行われている手法を参考にし、四足動歩行解析のための運動方程式をたてる。そして、この運動方程式を用いて計画軌道から制御入力を求める過程での問題点とその解法について述べる。また、二章で述べる運動方程式とその解法は、歩容の力学的解析において、正確な計算モデルとしてしばしば用いられる。

2.1 歩行ロボットのモデル化

ロボットの力学や制御について具体的な議論を行う場合には、ロボットの自由度・機構・アクチュエータの性質などによって、その内容は大きく異なってくるはずである。本論文では、対象を動歩行可能な歩行ロボット(具体的には、“Collie-2”と呼ばれる四足歩行ロボット)に限定し、以下の仮定を設ける。

● 仮定 1

- (a) アクチュエータは電動モータとする。
- (b) 減速比は 10~20 程度と比較的小さく、関節での摩擦の影響は無視できる程度に小さい。
- (c) 自由度・機構は Fig. 1 示されるようであり、各関節は基本的に1アクチュエータ・1自由度系で、平行リンクなど特別な機構は用いられていない。また、バネやダンパなど受動要素は使用されていない。

ここで、(a)と(b)は動歩行に以要な制御応答性を得るためや定式化を容易にするためである。特に、これまでの静歩行用のロボットではアクチュエータの重量・トルク比を上げるためにウォーム・ギアやハーモニックドライブなどの高減速機が用いられているが、このようなロボットでは、モータのパワーの相当部分が摩擦によって失われるので、動歩行に必要な応答性を得ることや、運動方程式や歩行に必要なエネルギーの定式化などが困難であるという欠点がある。

(c)も解析を容易にするためである。

Fig. 1 において、ロボットの座標の原点を胴体の中心にとり、状態変数  $x$  として

$$x = \begin{bmatrix} x_p \\ x_{FR} \\ x_{HR} \\ x_{FL} \\ x_{HL} \end{bmatrix} \quad x_p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad x_{Leg} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix}$$

ここで、Leg=FR(Fore Right), HR(Hind Right), FL(Fore Left), HL(Hind Left)

を選ぶ。

また、本論文で用いる記号の意味を Table 1 に示す。

2.2 運動方程式と逆動力学における問題点

二脚以上が接地しているときには、歩行ロボットの運動方程式は拘束がある系の運動方程式となる。

ここで、簡略化のために以下のような仮定を設ける。

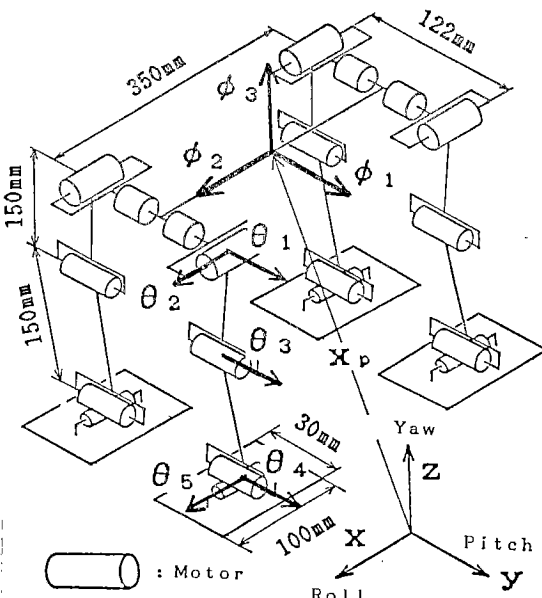


Fig. 1 Construction of Collie-2

●仮定 2

- (a) 遠心力, コリオリ力のように速度に依存した項は無視できる.
- (b) ヨー軸まわりの運動は起こらない. また, ロール軸まわりの運動とピッチ軸まわりの運動は床からの反力以外には干渉しない.

このとき, 床との間に拘束条件式 (1) のある系の運動方程式は (2) 式のように表せる<sup>13)</sup>.

$$e(x)=0 \tag{1}$$

$$A(x)\ddot{x}=Cu+g(x)+E^t f \tag{2}$$

ここで,

- $x$ : 状態変数  $\in R^n$ ,  $u$ : 関節トルク  $\in R^k$ ,
- $f$ : 床反力  $\in R^m$ ,  $A$ : 慣性行列,  $g$ : 重力項
- $e$ : 拘束条件,  $E=\partial e/\partial x \in R^{m \times n}$

例えば, Fig. 1 のモデルで  $j$  本の脚が接地しているとすると, 一本の脚についてヨー軸まわりの拘束を除いて 5 つの拘束が存在するので,  $n=25, k=20, m=5 \times j$  となる.

式 (2) から, ある軌道  $x(t)$  を実現するためのフィードフォワード・トルク  $u(t)$  を求めるようにするとき, 歩行においては次の二つの問題がある.

(a) 一般に  $k < n$  であり, 任意の軌道  $x$  と床反力  $f$  を与えたときに, 式 (2) を満たす制御入力  $u$  を求めることは出来ない.

(b)  $f$  には, 以下の制約条件が付く.

- (1) (鉛直床反力)  $\geq 0$  でなくてはならない,
- (2) (水平床反力)  $\leq$  (鉛直床反力)  $\times$  (静止摩擦係数) でなくてはならない

(a) の問題は, 2.3 で床反力の指定を放棄して縮退化した運動方程式を導くことにより解かれる. (b. 1) の問題は, 3.2 で実現可能な軌道の計画の問題として述べる. (b. 2) の問題は, 6.2.3 でトルクの最適配分を考えることによって解かれる.

2.3 運動方程式の縮退化

歩行において重要なことは相の変化であり, マニピュレータの位置と力のハイブリッド制御の問題<sup>24)</sup>とは異なり, 2.2 で述べた (b. 1) と (b. 2) の条件が成り立つ限り拘束力の値の厳密な制御は重要でない. そこで, 床反力  $f$  は直接の制御対象ではなく, 系の状態  $x, \dot{x}, u$  に対して決定されるものであると考え, 式 (2) から  $E^t f$  の項を消去すると, 次式のように  $n$  次から  $n-m$  次に縮退化された式が得られる<sup>15)</sup> (付録 1).

$$QCu=Q(A\ddot{x}-g) \tag{3}$$

$$Q=E_p P$$

$$P=A^{-1}-A^{-1}E^t(EA^{-1}E^t)^{-1}EA^{-1}$$

$$E=[e_{n-m+1} \dots e_n]^t$$

Table 1 Meanings of symbols

$m_i$	Mass of link-1
$j_i$	Inertia of link-1
$p_i$	Distance between joint-1 and center of mass
$l_i$	Length of link-1
$u_i$	Torque at joint-1
$\theta_i$	Angle of link-1

$$E_p=[e_1 \dots e_{n-m}]^t$$

ここで,  $e_1 \dots e_{n-m}$  は  $e_{n-m+1} \dots e_n$  と独立でかつ互いに独立なベクトル.

このとき,  $u$  は式 (3) を満たせばよく,  $\text{rank}(C) > n-m$  のときには  $u$  は一意に決まらない. 従って  $u$  を決めるためには他に条件が必要である. 本論文では, エネルギー最小の条件を用いる (6.2.3).

3. 基本対称歩容

3.1 本論文で考察する歩行

○脚の運動

本論文で考察する歩行について, 以下のような条件を設ける.

- 歩行は定常的である.
- 各脚の運動は, 時間的なずれ以外は同一である.

○歩容

四足動物歩行における基本的な歩容として, 二脚が対になって動く歩容が動物で観察され, それぞれ

- (a) Trot : 対角の脚が同時に動く
- (b) Pace : 左右について同側の脚が同時に動く
- (c) Bound : 前後について同側の脚が同時に動く

と呼ばれている<sup>2,21)</sup> (Fig. 2). 本論文では, これらをまとめて「基本対称歩容」と呼ぶ. 基本対称歩容では, Fig. 2 のように, 二脚支持の系が現れる.

Bound においては, 腰ピッチ軸まわりに非常に大きなアクチュエータが必要であり, 消費エネルギーが大きいことから歩行には不向きであると考えられる. 従って, ●本論文で考察する歩容は, Trot と Pace に限定する.

○デューティ・ファクタ

ある脚 (例えば左前脚) が歩行の一サイクル内で着地している割合は, 通常, デューティ・ファクタと呼ばれている. ここでは, これを  $\alpha (0 < \alpha < 1)$  で表す.

基本対称歩容において,  $\alpha < 0.5$  のときには, 四脚がすべて地面から離れる期間が現れ, 筆者らはこれを「歩行」と区別して「走行」と呼んでいる. 本論文では, 走行の問題は扱わないので,

- $\alpha \geq 0.5$  とする.

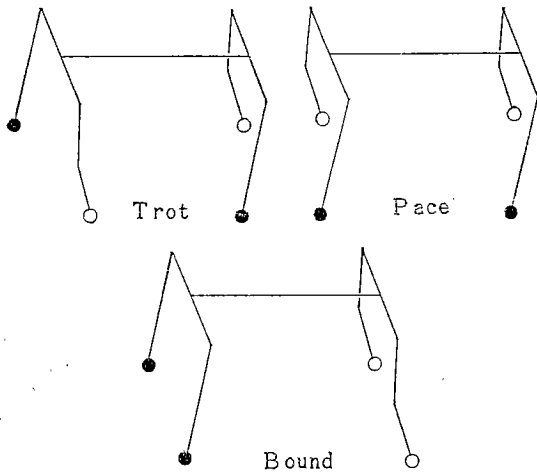


Fig. 2 Gaits (Trot, Pace and Bound)

3.2 実現可能な軌道の計画と倒立振子の力学系

基本対称歩容で現れる二脚支持の系で、ある軌道に対して(3)式から制御入力  $u$  を求めたとき、足首のアクチュエータが大きなトルクを発生する解の場合には、2.2で述べた条件(b.1)が満たされなくなる。これは、それぞれの系が静的には不安定であり、その軌道が実現不可能であることを示している。従って、これらの系に対しては、条件2.2(b.1)が成り立つような軌道  $x(t)$  を立てなければならない。

ここでは、二足歩行の一脚支持期のモデル化で行われている方法<sup>10)</sup>と同様に、支持脚足首にアクチュエータが存在しない倒立振子のモデルに基づいてこのような軌道を計画する。このとき各基本対称歩容で現れる二脚支持の系で、支持脚となっている二脚はほぼ同一の運動を行うので、これら二脚の作る面(Fig. 3-a, 4-aでの斜線部)の運動を一本のリンクの平面運動で表すと、それぞれの系は平面内に拘束された倒立振子の系に簡略化される。具体的には、遊脚の運動を無視し胴体部に含めると

○Trot

対角の着地足によって作られる面を倒立振子で表すことができる(Fig. 3-b)。

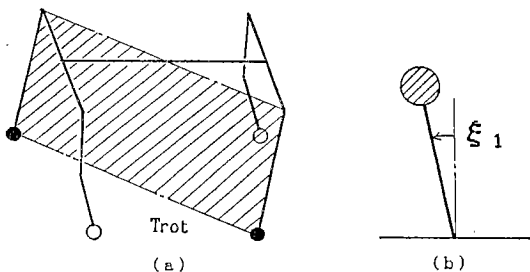


Fig. 3 Trot Gait and Model as Inverted Pendulum

○Pace

左右同側の着地足によって作られる面と胴体の二重倒立振子で表すことができる(Fig. 4-b)。

四章では、このような倒立振子の力学系の安定性と歩行周期の関係について考察する。

4. 歩行の安定性

1. でも述べたように、定常歩行という問題の特徴は、歩行期間中に現れる不安定な系に対して、脚の上げ下げによって生じる相変化を利用して安定化を図ることにある<sup>10)</sup>。本論文では、倒立振子のモデル(Fig. 3-b, 4-b)を用いて、安定な定常歩行が可能な最大周期  $T_{max}$  が各基本対称歩容に対して存在することを示す。

本論文で考察するデューティ・ファクタ  $\alpha=0.5$  付近の歩行では、支持脚交換期は短かいので、これを前の相の終端条件と次の相の初期条件を結ぶ等速運動の期間であると見なし、簡略化された倒立振子のモデル(Fig. 3-b, 4-b)での支持脚の角度  $\xi_1$  と角速度  $\dot{\xi}_1$  に対して、式(4)~(6)が成り立つと仮定して、以下の考察を簡単にする。

●仮定3

$$\alpha=0.5 \tag{4}$$

$$\xi_1(0)=-\xi_1(T_0) \tag{5}$$

$$\dot{\xi}_1(0)=-\dot{\xi}_1(T_0) \tag{6}$$

$$T_0=(1-\alpha)T=T/2$$

ここで、式(4)は支持脚の交換が瞬時に行われることを、式(5)は支持脚と遊脚の運動の対称性を、式(6)は支持脚交換時に重心の運動量が保存されることをそれぞれ意味している。また、式(5)、(6)での符号のどちらが成り立つかは、基本対称歩容によって異なる。

4.1 Trot の最大歩行周期

Fig. 3-b で表される倒立振子の運動は、制御の不完全さによって生じる初期値の誤差の影響を大きく受ける。従って、実験値とよく合う解析解を得ることは困難であるが、誤差の成長が許容範囲内であるような周期の最大値  $T_{max}$  を実験的に求めることができる。このとき、歩

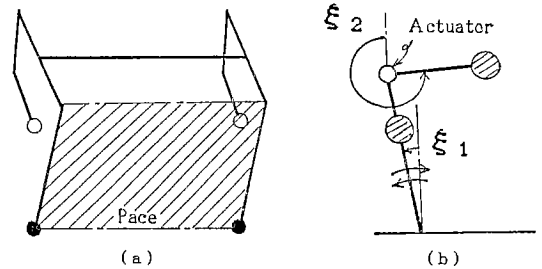
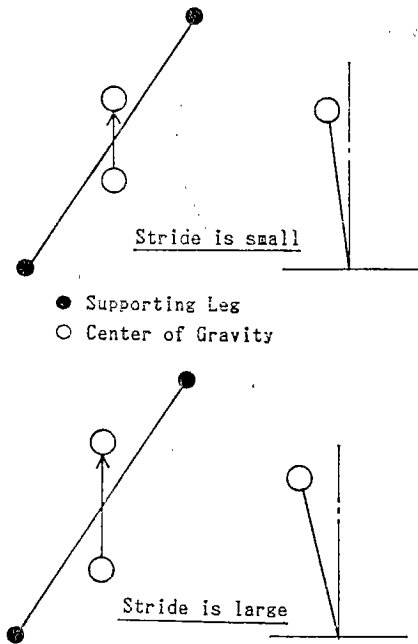


Fig. 4 Pace Gait and Model as Inverted Pendulum



Movement of the Center of Gravity Initial Condition of the Inverted Pendulum  
 Fig. 5 Relation between Stride and Initial Condition of the Inverted Pendulum

幅  $S$  が大きくなると倒立振子の倒れ角の初期値が大きくなるので (Fig. 5),  $T_{max}$  は低下する。

Collie-2 で、肩ロールの関節を機構的に拘束してロール運動を制御しない実験では

$$S=0 \text{ cm} \text{ で } T_{max}=0.8 \text{ sec}$$

$$S=6 \text{ cm} \text{ で } T_{max}=0.6 \text{ sec}$$

程度であった。

#### 4.2 Pace の最大歩行周期

Fig. 4-b で表されるロール運動の系は往復運動を行うことにより安定な二脚支持期を作り出す。この系の支持脚の運動方程式は、 $x=\xi_1$  とおいて、次式のように表せる (付録 2)。

$$\ddot{x}=ax-b \quad (7)$$

(Collie-2 では  $a=33.4(1/\text{sec}^2)$ ,  $b=7.78(1/\text{sec}^2)$ )

この系の状態図は Fig. 6 のようになる。この系で、運動全体に渡って  $x$  が小さいときには右辺第二項の影響が支配的であるので系の運動は単純であり定常歩行の条件式<sup>10)</sup>

$$x(0)=-x(T_0) \quad \dot{x}(0)=-\dot{x}(T_0) \quad (8)$$

を満たすことは容易である (Fig. 6 での実線)。反対に  $x$  が大きくなると右辺第一項の影響が現れて系は非常に不安定になるので、倒れ角の最大値  $x_{max}=x(T_0/2)$  は、

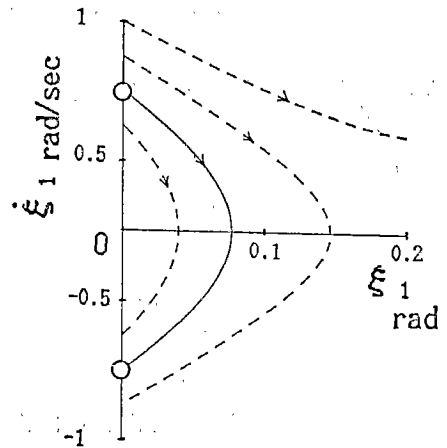


Fig. 6 Phase Space of Supporting Leg in Pace

$$x_{max} < x_{limit} \leq b/a \quad (9)$$

$x_{limit}$  は、実験的に求まる倒れ角の限界値で、式(7)の右辺を零にする  $x=b/a$  より小さい。を満たす必要がある。このとき、式(7)で  $x$  が小さいとして右辺第一項が無視できるとすると、式(7),(8),(9)より、次式が得られる。

$$T < \sqrt{32} x_{limit}/b \quad (10)$$

Collie-2 の実験では、 $x_{limit}=10(\text{degree})$ ,  $T_{max}=0.85(\text{sec})$  という結果が得られた。

### 5. 最大移動速度

#### 5.1 移動速度

移動速度  $V_G$  は、歩幅、歩行周期、デューティ・ファクタの三つの要素で表される (Fig. 7)。

$$V_G = S_G/T = S/\alpha T \quad (11)$$

$S_G$ : 一サイクルでの移動距離

$S$ : 歩幅 (胴体に対する遊脚の復帰行程距離)

$T$ : 歩行周期  $\alpha$ : デューティ・ファクタ

この式より、移動速度を上げる手段として

○歩幅  $S$  を大きくする。

○歩行周期  $T$  を小さくする。

○デューティ・ファクタ  $\alpha$  を小さくする。

の三つがあることが分る。ここでは、デューティ・ファクタは動歩行において最も小さくした ( $\alpha=0.5$ ) として、移動速度の最大値 (最大移動速度) が、歩幅と歩行周期の関数としてどのように規定されるかについて 5.2 で考察する。

#### 5.2 アクチュエータの出力限界と最大移動速度

遊脚を歩幅  $S$  だけ振り出すには、遊脚を加減速する必要がある、このときに必要な慣性力補償トルクの最大値

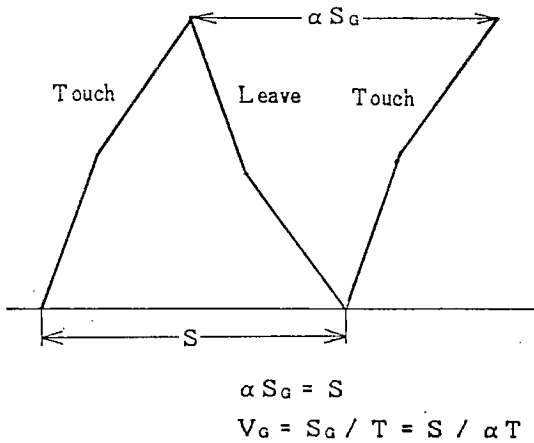


Fig. 7 Relation among Velocity, Stance, Duty Factor and Period

$U_{max}$  を Fig. 8 で表される遊脚の簡単なモデルを用いて求めると、次式が得られる (付録 3).

$$U_{max} = J \times 48 \times \frac{S}{lT^2} \quad (12)$$

$S$  : 歩幅,  $T$  : 歩行周期

$l$  : 遊脚の長さ,  $J$  : 遊脚の慣性モーメント

ここで,  $U_{max}$  は, 遊脚を駆動するアクチュエータの出力限界  $U_{limit}$  より小さくしなければならないので, (12) 式を  $U_{max} \leq U_{limit}$  に代入して

$$S \leq \frac{U_{limit}}{48J} \times l \times T^2 \quad (13)$$

が得られ, 歩幅の上限値が歩行周期  $T$  の関数となることが分る. ここで, 4 で述べた安定に歩行可能な最大周期  $T_{max}$  によって最大歩幅  $S_{max}$  が式 (14) のように決定される.

$$S_{max} = \frac{U_{limit}}{48J} \times l \times T_{max}^2 \quad (14)$$

また, 式 (14) を式 (11) に代入して次式が得られる.

$$V_G \leq \frac{U_{limit}}{24J} \times l \times T \quad (15)$$

これより, 移動速度を上げるために歩行周期を小さくす

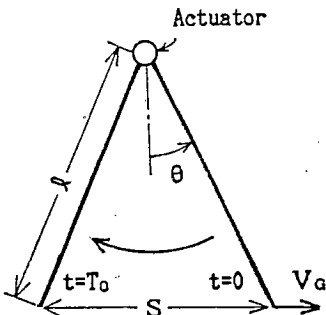


Fig. 8 One Link Model of Swinging Leg

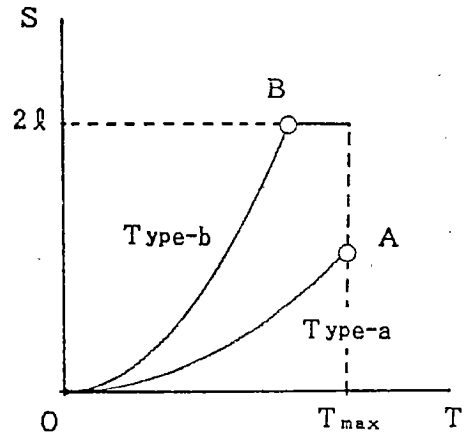


Fig. 9 Relation between Period and Stride

ることは, 最大移動速度の点から得策ではなく, できるだけゆっくりとした周期と大きな歩幅で歩行することが望ましいことが分る. しかし, 歩幅  $S$  は脚長の二倍を越えることができないので

$$S \leq 2l \quad (16)$$

という制約条件が存在する.

このとき, 歩行周期  $T$  が最大周期  $T_{max}$  を越えない領域において,  $U_{limit}$  と他の定数  $J, l$  との大小関係より次の二つの場合が存在する.

○Type-a

アクチュエータの出力限界  $U_{limit}$  が小さいために,  $S_{max} < 2l$  となる場合.

この場合には, 式 (16) の制約条件は無視できるので, 最大移動速度  $V_{Gmax}$  は最大歩行周期  $T_{max}$  により決定され (Fig. 9, 点A), 式 (15) より次式のように表せる.

$$V_{Gmax} = \frac{U_{limit}}{24J} \times l \times T_{max} \quad (17)$$

○Type-b

アクチュエータの出力限界  $U_{limit}$  が大きいために,  $S_{max} > 2l$  となる場合.

この場合には, 歩幅は式 (16) によって制限されるので, 移動速度を最大にする歩行周期  $T$

$$T = \sqrt{96J/U_{limit}} (< T_{max}) \quad (18)$$

が存在し (Fig. 9, 点B), 最大移動速度  $V_{Gmax}$  は式 (11), (16), (18) より, 次式のように表せる.

$$V_{Gmax} = \sqrt{\frac{U_{limit}}{6J} \times l^2} \quad (19)$$

Collie-2 の場合には,  $U_{limit} = 1.15(\text{Nm})$ ,  $J = 0.0153(\text{kgm}^2)$ ,  $l = 0.3(\text{m})$  であり,  $T = 0.8$  のときには,  $S_{max} = 0.3(\text{m})$  となるので, Type-a であるといえる. また, 犬などの動物では移動速度に関係なく歩幅は一定なこと

が観察されることから、動物は Type-b であると考えられる。

## 6. 移動エネルギー

### 6.1 動歩行に必要なエネルギーの定義

仮想的なロボットでなく、現実のロボットが歩行を行う際に消費されるエネルギーとしては、一般に

- (1) 力学系に与えられる運動エネルギー
- (2) 摩擦によって失われるエネルギー
- (3) 着地時に床との衝突により失われるエネルギーなどが考えられ、さらに使用するアクチュエータが電動モータの場合には
- (4) 全てのモータの電機子で発生するジュール熱が考えられる。これらのうちどれが支配的になるかは、歩行形態やアクチュエータによって異なる。

広瀬<sup>9)</sup>は、静歩行に必要なエネルギーとして(1)を採用し、減速比の大きなアクチュエータと昆虫などと似たような脚形式の組み合わせがエネルギー効率において優れていると述べている。しかし、高減速アクチュエータを使用した場合に摩擦による損失を無視することは現実的でないので、(2)も考慮されなければならない。

これに対して、減速比が小さく取られた歩行ロボットでは(2)の影響は少ないが、高トルクを大電流により得るので(4)が考慮されなければならない。本項では、動歩行において消費されるエネルギーとして何を選ぶべきかについて考える。

まず、簡単のために仮定1の他に次のような仮定を設けて考察対象を(1)と(4)に限定する。

#### ● 仮定4

(3)によるエネルギーの損失は無視できる。

このとき、(1)を○系と全てのアクチュエータとの間でやりとりされる力学的エネルギーのうち、アクチュエータから系に与えられるものだけを考慮したもの<sup>9)</sup>と定義し、式で表すと次のようになる。

$$E_m = \int_0^T \sum_{\text{Leg=FR}} \sum_{i=1}^5 \delta(u_i \dot{\theta}_i) dt \quad (20)$$

$u_i$ : リンク  $i$  に働くトルク (Nm)

$\dot{\theta}_i$ : リンク  $i$  の角速度 (rad/s)

$$\delta(x) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x \leq 0 \end{cases}$$

また、(4)では、モータを流れる電流はトルクに比例するので、次式のように表せる。

$$E_e = \int_0^T \sum_{\text{Leg=FR}} \sum_{i=1}^5 R_i (u_i / G_i / K_i)^2 dt \quad (21)$$

$R_i$ : 電機子抵抗 (3.2 Ω for Collie-2)

$G_i$ : 歯車の減速比 (16.7 for Collie-2)

$K_i$ : トルク定数 (0.035 Nm/A for Collie-2)

ここで、トルク  $u_i$  は、歩行を行う軌道に対して式(3)を  $u$  について解くことによって得られる。

Collie-2 について、 $E_m$  と  $E_e$  を式(20)と式(21)より計算し比較すると Table 2 に示す結果が得られる。この計算において、 $E_e$  については、6.2 で述べる最適化が図られている。これから分かるように、Collie-2 の動歩行では、ジュール熱損失  $E_e$  は力学的損失  $E_m$  より一桁大きい。従って、本論文では歩行に必要なエネルギーを  $E_e$  で表すことにする。

このとき単位移動距離あたりに必要なエネルギー(以下、単に移動エネルギー)は

$$P = E_e / V_G T \quad (22)$$

となる。

### 6.2 移動エネルギーを最小にするパラメータの計算

6.1 で述べた移動エネルギー  $P$  は、歩容、移動速度、歩行周期、各関節の軌道などの関数となっている。また、式(3)を解くために加える条件によっても  $P$  の値は異なる。本論文では、歩容と移動速度の観点からのみ  $P$  の比較を行うので、比較が意味を持つように、その他のパラメータや条件は、ある歩容と移動速度に対して、 $P$  を最小にするように選ばれる必要がある。しかし、式(21)、(22)を直接用いて、 $P$  を最小にする問題を考察することは困難であるので、ここでは、ある歩容と移動速度に対して  $P$  を最小にする歩行を計画する手順を次の三つに分離して、それぞれ近似式をたて考察を行う。

- (1)  $P$  を最小にする歩行周期の計算
- (2)  $P$  を最小にする各関節の軌道の計算
- (3)  $P$  を最小にする制御入力の計算

これまで歩行の最適化の問題について、Chow ら<sup>20)</sup>が Optimal-Programming 手法によって人間の二足歩行を解析しているが、歩行周期の問題は扱われておらず、また、不明確な仮定が多く実際の歩行ロボットにどの程度有効であるか不明である。広瀬<sup>9)</sup>は、任意の移動速度に対してエネルギー消費を最小にする歩幅が存在することについて述べているが、本論文のような定式化はなされていない。

#### 6.2.1 移動エネルギーを最小にする歩行周期の計算

簡単な解析よりある歩容での  $P$  を歩行周期  $T$  と移動速度  $V_G$  で直接表すと、次式が得られる(付録4)。

Table 2 Energy in the Dynamic Walk

Gait	T(sec)	$V_G$ (m/sec)	$E_m$ (J)	$E_e$ (J)
Trot	0.63	0.25	0.729	10.5
Pace	0.59	0.25	0.690	21.3

$$P = C_{sw} \frac{V_G}{T^2} + C_{up} \frac{1}{V_G T^4} + C_{sp} T^2 V_G + \frac{C_{body}}{V_G} \quad (23)$$

それぞれの項は以下の意味を持っている。

- 第一項：遊脚を前に振り出すときに加減速するためのエネルギー
- 第二項：遊脚を上には振り上げるときに加減速するためのエネルギー
- 第三項：支持脚の倒れた角に依存した重力補償のエネルギー
- 第四項：遊脚を含めた胴体部を支持する重力補償のエネルギー

また、各歩容での各項の係数  $C_{sw}$  などの値は、式 (21) と (22) から計算される  $P$  の値を各要素に分割することによって得られる (付録 4)。

式 (23) で  $dP/dT=0$  を解くことにより、 $P$  を最小にする  $T$  を求めることができる。基本対称歩容について計算した結果を Fig. 10 に示す。このような  $T$  が存在する理由を直観的にいうと、歩行周期  $T$  が大きくなると歩幅  $S$  が大きくなるので第三項が増加し、 $T$  が小さくなると遊脚の加速度が大きくなり第一項と第二項が増加するからである。

このとき、式 (22) で分母はすでに定まっているので、以下の考察において、 $P$  を最小にするためには式 (22) の分子すなわち式 (21) を最小にすれば良いことになる。

### 6.2.2 移動エネルギーを最小にする軌道の計算

式 (2) で表される運動方程式は軌道の最適化を図るには複雑過ぎる。従って、簡単のために以下の仮定を設

ける。

#### ● 仮定 5

- (a) ロール軸まわりの運動は歩容と周期によりほぼ決定されるので、考察対象としない。
- (b) 胴体の慣性モーメントが大きいので、ピッチ軸まわりの運動は、支持脚の運動と遊脚の運動に分けることができ、各脚の各運動を最適化することにより全体の軌道の最適化を図ることができる。
- (c) 遊脚の軌道は、境界条件と脚を持ち上げる高さ  $\Delta H$  によってほぼ決定されるので、最適化を図ることは難しくかつあまり意味がないので行わない。

#### ○ 支持脚軌道の最適化

支持脚の運動を Fig. 11 に示すモデルで表す。ここで簡単のために次の仮定を設ける。

#### ● 仮定 6

- (a) 胴体は固定で、脚は 2 リンクから成り、床反力は一定 ( $f_z = \text{全重量}/2, f_x = 0$ ) である。
  - (b) 運動方程式は零点まわりに線形化できる。
- このとき、支持脚の運動方程式を次式のように  $x_i$  と  $\ddot{x}_i$  の線形結合で表すことができる。

$$u_j = \sum_{k=1}^2 (h_{jk} \ddot{x}_k + g_{jk} x_k) + c_j \quad (j=1 \dots 2) \quad (24)$$

ここで、支持脚の軌道に関して式 (21) を最小にすることは、次式 (25) を最小にすることと等価である。

$$E = \int_0^{T_0} \sum_{j=1}^2 u_j^2 dt \quad (25)$$

式 (24) の条件で、式 (25) を最小にする支持脚の軌道を変分法の直接法の一つであるガレルキンの方法を用いて解いた結果を Fig. 12 に示す。この図から、重力と床反力による負荷を減らすために、脚高さ  $h$  が途中で大きくなるような運動を支持脚が行うことが分る。

### 6.2.3 移動エネルギーを最小にする制御入力の計算

ある時間  $t$  において必要な制御入力  $u$  を式 (3) を用いて計画軌道  $x(t)$  から求めるとき、2.3 でも述べたように、他に条件が必要である。ここでは、式 (26) のようにトルクの自乗和を最小にする条件を付け加える。

$$\sum_{Leg=FR}^{HL} \sum_{i=1}^5 u_i^2 \rightarrow \min. \quad (26)$$

この条件は、式 (21) で定義されるエネルギーを、6.2.1、6.2.2 を考慮して得られる軌道に対して最小にする。また、支持脚が不必要に踏ん張りあって水平床反力の値を大きくすることを防ぐので、2.2 で述べた (b.2) の制約条件の成立を助ける。

このとき、式 (3) の条件下で式 (26) を満たす  $u$  は、

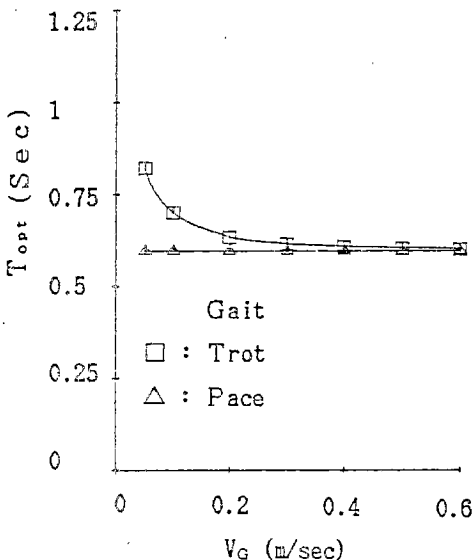


Fig. 10 Optimal Period in Each Gait



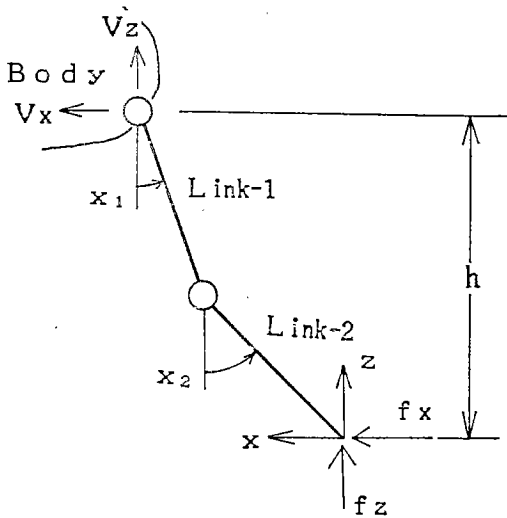


Fig. 11 Simple Model of Supporting Leg

ラグランジエの未定乗数法を用いて、次の連立一次方程式を解くことによって得られる。

$$\begin{bmatrix} QC & 0 \\ 2I & -(QC)^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q(A\ddot{x}-g) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

### 7. 計算結果

Collie-2 について、各基本対称歩容と静歩行（デュ－ティ・ファクタ  $\alpha=0.75$ 、脚が 1/4 周期ずれて動く Crawl 歩容）における移動エネルギー  $P$  を式 (21) と (22) から計算した結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 で、最も右にある点での移動速度  $V_G$  が 5.2 で述べた最大移動速度  $V_{Gmax}$  を表している。

### 8. 実験と考察

#### 8.1 実験結果

Trot と Pace と 7. で述べた静歩行の実験結果を比較したものを Fig. 14 に示す。これらは、Fig. 13 に対応する実験結果である。各歩容や各歩行周期で最も右にある点は、その歩容や歩行周期で実現された最大移動速度を表している。

#### 8.2 歩行周期の影響

##### ○歩行周期と安定性

4.1 でも述べたように、Trot では、歩幅が大きくなるほど、また歩行周期が大きくなるほど、歩行は不安定になる。また、Pace では、歩行周期が大きくなるほどロール運動の振幅が大きくなり、歩行は不安定になる。特に、 $T=0.9(\text{sec})$  以上では不安定であり、しばしば歩行不能に陥った。

##### ○歩行周期と最大移動速度

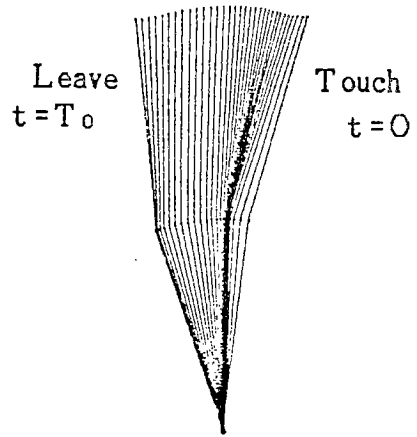


Fig. 12 Optimal Motion of Supporting Leg

5.2 でも述べたように、Collie-2 での最大移動速度  $V_{Gmax}$  は、アクチュエータの出力限界のために周期が大きいほど大きくなる。Fig. 14 にはこのことがよく現れている。

##### ○歩行周期と移動エネルギー

実験結果 ( $\alpha=0.55$ ,  $V_G=0.1\sim 0.15(\text{m/sec})$ ) で、Trot において移動エネルギーが最小となる歩行周期  $T=0.8(\text{sec})$  は、 $\alpha=0.5$  の場合に換算すると  $T=0.72(\text{sec})$  であり、これは 6.2.1 での計算結果とよく一致している。

#### 8.3 歩容の比較

##### ○歩容と移動エネルギー

Fig. 14 での歩容と移動エネルギーの関係は、Fig. 13 での計算結果における関係と相似である。このように低速の歩容では Trot が移動エネルギーに関して最も優れている。

##### ○歩容と最大移動速度

静歩行では  $\alpha$  を 0.75 より小さくすることができないので、 $V_{Gmax}$  は非常に小さい。また、Trot では 4.1 で述べた理由により移動速度を上げると安定に歩行可能な最大周期  $T_{max}$  が低下するので、5.2 で述べた理由により最大移動速度は低下する。

従って、Collie-2 の歩行では、Trot が可能な移動速度では移動エネルギーの小さい Trot を行い、不可能なときには Pace を行うことが望ましいことが分る。

### 9. おわりに

歩行とは非常に自由度の多い運動であり、歩行を計画し実現する際には、歩容を決定する脚間の位相差とデュ－ティ・ファクタ、移動速度、歩行周期、歩幅、胴体高さ、制御入力を求める条件など非常に多くのパラメー

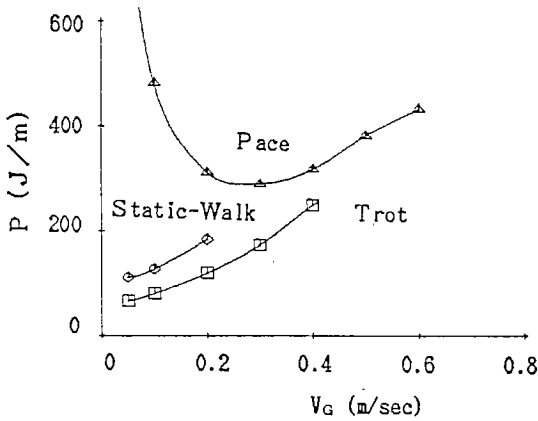


Fig. 13 Energy in Each Gait (from (30), (31))

タや条件が存在する。歩行の持つ自由度を生かすようにこれらを決定するためには何らかの指標が必要となる。本論文では、四足動物歩行を実現する際の指標として、安定性、最大移動速度、移動エネルギーの三つを挙げ、これらについて考察した結果以下の知見が得られた。

●歩行周期は、指標に大きな影響を与える。最大移動速度を上げるためには、ゆっくりとした周期と大きな歩幅で歩行することが望ましいが、安定に歩行できる最大周期によってこれは制限される。そして、移動速度を最大にする歩行周期が存在する。また、ある移動速度に対して移動エネルギーを最小にする歩行周期が存在する。

●代表的な歩容には、Trot, Pace, Bound と呼ばれるものがある。歩容は、指標に大きな影響を与える。Trotが可能な移動速度ではTrotを行い、不可能なときにはPaceを行うことが望ましい。

そして、Collie-2 と呼ばれる四足歩行ロボットを用いた実験により以上の議論の妥当性と有用性を示した。

[付録1] 式(3)の導出

拘束条件式(1.1)のもとに運動方程式(1.2)から  $E^t f$  を消去することを考える。

$$e(x) = 0 \quad (m \text{ 次}) \quad (1.1)$$

$$A\ddot{x} = Cu + g + E^t f \quad (n \text{ 次}) \quad (1.2)$$

$$E = \partial e / \partial \dot{x} = [e_{n-m+1} \dots e_n]^t$$

式(1.1)を時間で微分して  $E\dot{x} = 0$  を得る。これをさらに時間で微分して次式を得る。

$$E\dot{x} + E\ddot{x} = 0 \quad (1.3)$$

式(1.3)を一般化して次のように表す。

$$h(x, \dot{x}) + E\ddot{x} = 0 \quad (1.4)$$

ここで、 $e_{n-m+1} \dots e_n$  と独立かつ互いに独立なベクトルとして  $e_1 \dots e_{n-m}$  を選び

$$E_p = [e_1 \dots e_{n-m}]^t, \quad E^* = [e_1 \dots e_n]^t \quad (1.5)$$

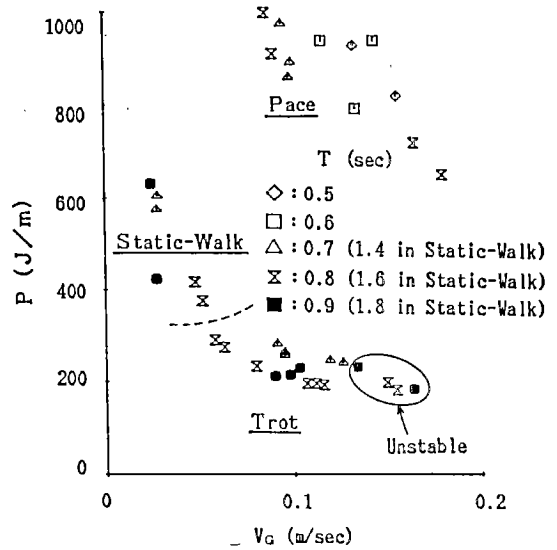


Fig. 14 Energy in Each Gait (from Experiment)

とおくと、次式が成り立つ。

$$E^* = \begin{bmatrix} E_p \\ E \end{bmatrix}, \quad E^* \dot{x} = \begin{bmatrix} E_p \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E^* \ddot{x} = \begin{bmatrix} E_p \ddot{x} \\ -h \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

さて、式(1.2)より

$$\ddot{x} = A^{-1}(Cu + g) + A^{-1}E^t f \quad (1.7)$$

であり、これを式(1.4)に代入して

$$h + EA^{-1}(Cu + g) + EA^{-1}E^t f = 0 \quad (1.8)$$

を得る。これより

$$f = -(EA^{-1}E^t)^{-1} \{ EA^{-1}(Cu + g) + h \} \quad (1.9)$$

となり、この式からトルク  $u$  を与えたときの系の拘束力  $f$  を求めることができる。さらに式(1.9)を式(1.7)に代入して

$$\ddot{x} = \{ A^{-1} - A^{-1}E^t(EA^{-1}E^t)^{-1}EA^{-1} \} (Cu + g) - A^{-1}E^t(EA^{-1}E^t)^{-1}h \quad (1.10)$$

を得る。この式からトルク  $u$  を与えたときの系の加速度  $\ddot{x}$  を求めることができる。

この式の両辺に  $E^*$  をかけると、 $E$  をかける方は自動的に満たされる。従って、 $\ddot{x}$  と  $u$  の満たすべき関係は  $E_p$  をかけてできる次の  $n-m$  次の式に縮退化される。

$$QCu = Q(A\ddot{x} - g) \quad (1.11)$$

ここで、

$$P = A^{-1} - A^{-1}E^t(EA^{-1}E^t)^{-1}EA^{-1}, \quad Q = E_p P$$

また  $\ddot{x}$  と  $u$  が分かっているときには次式が成り立つ。

$$f = (EA^{-1}E^t)^{-1}E \{ \ddot{x} - A^{-1}(Cu + g) \} \quad (1.12)$$

この式より条件 2.2(b) の軌道計画時での成立を確認することができる。

〔付録2〕 式(7)の導出

Fig. 4-b の運動方程式は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} J_1+m_1\dot{p}_1^2+m_2l_1^2 & m_2l_1\dot{p}_2\cos(\xi_1-\xi_2) \\ m_2l_1\dot{p}_2\cos(\xi_1-\xi_2) & J_2+m_2\dot{p}_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_2 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1\dot{p}_1+m_2l_1)g\sin\xi_1 \\ m_2\dot{p}_2g\sin\xi_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで、遊脚が床から離れているためには、 $\xi_2 \geq 3\pi/2$  であることが望ましい。このような胴体の軌道として、着地時の床との衝突も考慮して

$$\xi_2 = \xi_{2\max} \sin^2(\pi t/T_0) + 3\pi/2 \quad (\xi_{2\max} > 0) \quad (2.2)$$

が考えられる。このとき、重心の大きな上下動はエネルギー的に望ましくないので、 $\xi_{2\max} \leq 5(\text{degree})$  程度が望ましい。

ここで、簡単のために  $\xi_{2\max} = 0$  とし、式(2.1)を辺々加えて  $u$  を消去し、線形近似を行うと次式が得られる。

$$\ddot{\xi}_1 = a\xi_1 - b \quad (2.3)$$

$$J = J_1 + m_1\dot{p}_1^2 + m_2l_1^2, \quad a = (m_1\dot{p}_1 + m_2l_1)g/J, \\ b = m_2\dot{p}_2g/J$$

〔付録3〕 式(12)の導出

Fig. 8 の遊脚のモデルにおいて、慣性力補償トルクの最大値  $U_{\max}$  は、リンクの軌道  $\theta(t)$  の最大加速度  $\ddot{\theta}_{\max}$  に比例する。

$$U_{\max} = J \times \ddot{\theta}_{\max} \quad (3.1)$$

ここで、 $\theta(t)$  が、境界  $t=0, T_0$  (ここで、 $T_0 = (1-\alpha)T, \alpha=0.5$ ) での位置と速度の連続性のみを考慮して三次関数で表されるとすると、境界条件(3.2)式に対して式(3.3)のように表される。

$$\theta(0) = S/2l, \quad \dot{\theta}(0) = V_G/l = S/lT_0 \\ \theta(T_0) = -\theta(0), \quad \dot{\theta}(T_0) = \dot{\theta}(0) \quad (3.2)$$

$$\theta(t) = pt^3 + qt^2 + rt + s \quad (3.3)$$

このとき、最大加速度  $\ddot{\theta}_{\max}$  は  $t=0, T_0$  で

$$\ddot{\theta}_{\max} = |2q|, \quad q = -3 \times \frac{2\theta(0) + T_0\dot{\theta}(0)}{T_0^2}$$

より、式(3.4)となり式(3.1)とあわせて式(3.5)が得られる。

$$\ddot{\theta}_{\max} = 48 \times S/lT^2 \quad (3.4)$$

$$U_{\max} = J \times 48 \times \frac{S}{lT^2} \quad (3.5)$$

このように、遊脚を駆動するために必要な最大トルクは、歩幅に比例し、歩行周期の自乗に反比例する。

〔付録4〕 式(23)の導出

6.2.1 で述べたそれぞれの項について、以下の仮定を設けることにより、定式化を行うことができる。

1. 遊脚を前に振り出すためのエネルギー

付録3での考察と同様に、慣性力補償トルクは、歩幅

に比例し歩行周期の自乗に反比例すると仮定して

$$E_{\text{swing}} = \text{Const.} \times (S/T^2)^2 \times T = C_{\text{sw}} V_G^2/T \quad (4.1)$$

2. 遊脚を上には振り上げるためのエネルギー

振り出しと同じく、ある振り上げ高さに対して慣性力補償トルクは歩行周期の自乗に反比例すると仮定して

$$E_{\text{up}} = \text{Const.} \times (1/T^2)^2 \times T = C_{\text{up}}/T^3 \quad (4.2)$$

3. 支持脚の倒れ角に依存した重力補償エネルギー

胴体や支持脚については、定常歩行では基本的には加減速する必要はないので、重力補償のためのエネルギーが支配的になる。支持脚に対する重力補償は、支持脚の倒れ角があまり大きくないときには歩幅に比例すると仮定して

$$E_{\text{support}} = \text{Const.} \times S^2 \times T = C_{\text{sp}} T^3 V_G^2 \quad (4.3)$$

4. 胴体を支持するためのエネルギー

Pace で現れる二脚支持期で、遊脚を含めた胴体の重力補償トルクはほぼ一定と仮定して

$$E_{\text{body}} = \text{Const.}^2 \times T = C_{\text{body}} T \quad (4.4)$$

従って、 $E_e = E_{\text{swing}} + E_{\text{support}} + E_{\text{body}}$  と式(22)より次式が得られる。

$$P = C_{\text{sw}} \frac{V_G}{T^2} + \frac{C_{\text{up}}}{V_G T^4} + C_{\text{sp}} T^2 V_G + \frac{C_{\text{body}}}{V_G} \quad (4.5)$$

ここでなされた仮定が適切であり、係数  $C_{\text{sw}}, C_{\text{sp}}$  などが、各基本対称歩容において、移動速度  $V_G$  や歩行周期  $T$  に関係なくほぼ一定であることは、計算によって確かめられ、以下の値が Collie-2 について得られる。

	$C_{\text{sw}}$ (J/m <sup>2</sup> s)	$C_{\text{sp}}$ (Js <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	$C_{\text{body}}$ (J/s)	$\Delta H$ (m)	$C_{\text{up}}$ (Js <sup>3</sup> )
Trot	80	650	0	0.005	0.18
Pace	80	650	42	0.01	0.50

### 参考文献

- 1) R. B. McGhee, et al., "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits", *Mathematical Biosciences*, Vol.3, pp.331-351, 1968.
- 2) 田口, 他, "四足移動機械と歩行方法", *バイオメカニズム* 2, 東京大学出版会, pp.154-163, 1973.
- 3) 広瀬, 他, "四足歩行機械の制御システム", *日本ロボット学会誌*, Vol.3, No.4, pp.46-66, 1985.
- 4) 金子, 他, "路面の変形を考慮した多足歩行機械の一制御方法—交互点3支持歩行を中心に—", *日本ロボット学会誌*, Vol.4, No.3, pp.231-240, 1986.
- 5) 小谷内, 他, "自立形六脚移動ロボット MELCRAB-2—電氣的連結による半固定歩容—" 第3回知能移動ロボットシンポジウム予稿集, pp.25-30, 1986.
- 6) 広瀬, 他, "歩行機械のエネルギー効率に関する基本的考察", 第17回自動制御連合講演会予稿集, pp.928-933, 1978.
- 7) 金子, 他, "エネルギー効率の観点からみた歩行機械の相似性に関する基礎研究", *日本ロボット学会誌*, Vol.3, No.3, pp.207-219, 1985.
- 8) M. H. Raibert, et al., "Experiments in Balance with 3D One-Legged Hopping Machine", *Robotics Re-*

- search, MIT Press, Vol.3, No.2, pp.75-92, 1984.
- 9) 加藤, 他, “安定な閉軌道を持つ力学系を基礎にした 2 足歩行の制御”, パイオメカニズム 5, 東京大学出版会, pp.259-268, 1979.
  - 10) 下山, 他, “2 足歩行ロボット BIPER-4 の動歩行に関する研究”, 日本機械学会論文集, No.827-2, pp.111-118, 1982.
  - 11) 有本, 他, “二足歩行ロボットの階層制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.1, No.3, pp.167-175, 1983.
  - 12) 古荘, 他, “動的二足歩行の階層制御及びその実験的検討”, 第 20 回 SICE 学術講演会予稿集, pp.303-304, 1981.
  - 13) H. Hemami et al., “Modeling and Control of Constrained Dynamic Systems with Application to Biped Locomotion in the Frontal Plane”, IEEE trans. on AC, Vol.24, No.4, pp.526-535, 1979.
  - 14) 長井, 他, “二足歩行系における両脚支持期の安定化の解析とシミュレーション”, 第 21 回自動制御連合講演会, pp.255-256, 1978.
  - 15) 伊東, 他, “拘束のある二足歩行運動の解析と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.1, No.3, pp.31-35, 1983.
  - 16) 美多, 他, “線形化拘束条件付運動のフィードバック制御”, 電気学会論文誌-C, Vol.103, No.1, pp.17-24, 1983.
  - 17) H. Miura, et al., “Dynamical Walk of Quadruped Robot”, 2nd ISRR, pp.254-261, 1984-8.
  - 18) I. Shimoyama, et al., “Control System for Walking Robot -Dynamic Walk and Intelligent Control”, 3rd ISRR, pp.246-252, 1985-10.
  - 19) 木村, 他, “動力学を考慮した四足歩行パターンの解析”, 第 4 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.395-398, 1986.
  - 20) 岡島, 他, “四足歩行システムの動的制御”, 第 4 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.391-392, 1986.
  - 21) M. H. Raibert, “Running with Symmetry”, The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.4, pp.3-19, 1987.
  - 22) M. Hildebrand, “Symmetrical gaits of dogs in relation to body build”, J. Morphology 124, pp.353-359, 1968.
  - 23) C. K. Chow, et al., “Studies of Human Locomotive via Optimal Programming”, Mathematical Biosciences Vol.10, pp.239-306, 1971.
  - 24) 吉川, “ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6, pp.25-31, 1985.



木村 浩 (Hiroshi KIMURA)

昭和 36 年 2 月 5 日生れ。昭和 58 年東京大学工学部機械工学科卒業, 63 年同大学院博士課程修了, 工学博士。同年, 東北大学工学部機械工学第二学科助手, 現在に至る。日本機械学会, 情報処理学会の会員。(日本ロボット学会学生会員)



三浦宏文 (Hirofumi MIURA)

昭和 13 年 3 月 17 日生れ。昭和 35 年東京大学工学部機械工学科卒業, 40 年同大学院工学系研究科修了, 工学博士。40 年東京大学工学部講師, 41 年同大学助教授, 53 年同大学教授, 現在に至る。この間, ジャイロ機器, システム工学, ロボットなどの研究に従事。日本機械学会, オペレーションズリサーチ学会, 日本システム学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



下山 勲 (Isao SHIMOYAMA)

昭和 30 年 1 月 6 日生れ。昭和 52 年東京大学工学部機械工学科卒業, 57 年同大学院工学系研究科修了, 工学博士。57 年東京大学工学部講師, 58 年同大学助教授, 現在に至る。この間, ロボットの研究に従事, 日本機械学会, 計測自動制御学会会員 (日本ロボット学会正会員)

## Dynamics in Dynamic Walk of the Quadruped Robot\*

Hiroshi KIMURA\*\* Isao SHIMOYAMA\*\*\* Hirofumi MIURA\*\*\*

-----  
ABSTRACT

Walking can be classified into "Static Walking" and "Dynamic Walking". It is said that Dynamic Walking is superior in both speed and consumed energy. This paper describes how the quadruped robot should walk dynamically to take these advantages. Such consideration is lacking in the past research.

In walking, there are many parameters (for example, gait, speed, period, stride, and height of body, etc). In this paper, it is proposed that these parameters should be determined by considering "Stability", "Maximum Speed" and "Consumed Energy". The relation between these three indices and those parameters are analyzed by means of Dynamics. The conclusions are the following :

- (1) The shorter a period is, the quadruped can walk the more stably.
- (2) The longer a period is, the quadruped can walk with wider stride and faster.
- (3) There is a period which makes the speed a maximum.
- (4) There is a period which makes the consumed energy a minimum for a given speed.
- (5) When comparing "Trot" gait (in which two diagonal legs swing at the same time) and "Pace" gait (in which two right legs or two left legs swing at the same time), Trot is superior when considering the consumed energy, and Pace is superior when considering the maximum speed.

Lastly, the validity of above arguments is proved by the experiments using the quadruped robot "Collie-2".

**Key Words :** Quadruped Robot, Dynamic Walk, Stability, Maximum Speed, Consumed Energy, Collie-2

-----  
\* Received August 6, 1987

\*\* Department of Mechanical Engineering II, Faculty of Engineering, Univ. of Tohoku

\*\*\* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo