

4 足 静 的 歩 行 機 械 の 研 究

田 口 幹

Development of a Quadruped Static Walking Machine

Kan TAGUCHI

Abstract

The author has already developed and reported the mechanism and basic control system of a Six-legged Static Walking Machine, and a Four-legged Dynamic Walking Machine. And he also mentioned that a fixed gait type walking machine has superiority in walking flat terrain locomotion to the walking machine equipped with three degrees of freedom per each leg.

In this paper, the author proposes such a fixed gaited type static walking machine as can attain two dimensional walking. The prototype machine has four legs driven by one active degree of freedom per each leg. Using as same approximate straight-line mechanism, modified Tchebicheff's link mechanism, as the previous machines the prototype machine can walk on flat terrain by only gait control without special control system for individual leg motion.

With some consideration of the dynamics of leg motion, a gait control algorithm for crawl gait has been installed on a 16 bits board-computer.

Experiments are carried out to certify the gait control for the static locomotion.

1. は じ め に

近年、ロボットの移動機能への関心が高まってきている。従来からの車輪型、クローラ型ロボットに加え、その優れた対地適応性から脚型移動ロボットの研究も盛んで、歩容の遷移、旋回、階段の昇降などの研究が行われている。しかし、その大半の歩行機械は、1脚につき3自由度を持つ自由歩容で、跨ぎ越し、階段昇降などが有利な反面、自由度が多いので制御の複雑化、本体の大型化、重量化は避けられない。本研究室において、現在までに6脚、4脚の歩行機械を開発してきたがその特徴は、チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構を用いた脚機構を使用することである。この脚機構を用いると、機構のみによって歩行に必要な脚先軌跡を得ることができ、1脚につき1自由度、もしくは、全体で1自由度でも歩行可能となり、制御の簡素化、本体の軽量化が図られる。本研究室では、1990年度から4脚歩行機械の研究開発を行ってきているが、1990年

度は動的歩行（トロット歩容）のみを行う歩行機械を試作、報告した。

動的歩行は重力を利用して加速することが可能であり、最大移動速度や移動エネルギーの点で静的歩行より優れている。しかし、動的歩行は静的には不安定であるため、歩行開始時および歩行停止時などには適していない。

前報で報告した4脚動的歩行機械は脚駆動機構であるチェビシェフリンクの駆動リンクを定回転で駆動し、対角線上の2脚を同時に動かすことにより動的歩容であるトロット歩容を1自由度で実現した。静的歩行においては、等速な対称歩行においても各脚の駆動速度や位相が異なる。そこで静的歩行機械では、機構や制御の面で多少複雑になるが各脚を独立に駆動・制御する必要がある。

本報では、これまでの6脚¹⁾、4脚歩行機械^{2),3)}と同様に脚先軌跡を改良チェビシェフリンク機構、パンタグラフ機構を用い、各脚を独立に駆動する4脚静的歩行機械を設計、試作したので報告する。

1992年9月25日受理

* 機械システム工学科

2. 4脚歩行機械の研究の現状

物を静的に支持するときには3点以上の支持点が必要である。よって、静的安定を保ちながら移動できる最小の脚数は4である。4脚歩行機械はいくつかの開発例があるが常に静的安定を保つ静的歩行のほかに、移動速度を速くするために、慣性力により動的に安定を保つ動的歩行の研究も行われている。

4脚歩行機械の開発例としては、東工大の広瀬らによる「TITAN-VI」⁴⁾、機械技術研究所の安達らによる「かめ2号」⁵⁾、(株)日立製作所の細田らによる4脚歩行機械⁶⁾、東大の木村らによる「Collie-1」⁷⁾、岐阜大の佐野らによる「COLT-3」⁸⁾、前報で報告した4脚動的歩行機械などがある。

広瀬らの「TITAN-VI」は、傾斜度 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の階段における安定な昇降運動と動的歩行による高速歩行運動も実現するため、脚機構として、GDA (重力方向分離駆動) の原理に基づいた新たな直動型の脚機構、TP機構 (Telescopic Pantograph Mechanism) を開発、採用している。

「かめ2号」は、3自由度 ASTBALLEM 機構を利用した準静的歩容型の歩行機械である。この機構は脚機構が簡単になり、剛性が高く、直進時は2自由度しか使用しないので、「TITAN-VI」などの多自由度のものに比べて制御が簡単になる。

(株)日立製作所の4脚歩行機械は、通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」の一貫として製作されたもので、計12の関節を油圧駆動型ロータリアクチュエータで駆動し自由に歩容を選ぶことが出来る。反面、「TITAN-VI」と同じく制御面の複雑化は避けられない。

「Collie-1」は、機構はできるだけ簡単にして、柔軟な動作や高速な動作をソフトウェアによって実現することを目指している。12個の関節を持ち、各関節にはDCサーボモータとポテンショメータが取り付けられている。この歩行機械は動歩行が目的なので、歯車の摩擦や高速運動時の逆起電力でトルクが落ちないように減速比は8~10と小さく設計されているのが特徴である。

「COLT-3」は、1脚についてピッチ軸まわりに2自由度およびロール軸まわりに1自由度持ち、計13自由度を持っている。各関節はDCサーボモータからの出力をギアとタイミングベルトで伝導して駆動させている。

3. 試作歩行機械の基本的機構

1) 基本的機構

試作した4脚歩行機械の基本的機構として前報までと同様、改良チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構を用いる。これまでに、問題となった改良チェビシェフリンク機構のリンク部と脚機構を結ぶ軸部の剛性不足を解消するため、改良チェビシェフリンク機構を2つ連結し同位相で回転させ疑似直線部を得るダブルチェビシェフリンク機構を採用する。この機構によりリンク部の剛性を大幅に上げ、安定した歩行を実現できる。

2) 脚のダイナミクス

脚の振りによる胴体への影響や任意の運動に対して各時刻でアクチュエータが必要とするトルクなどを知るために改良チェビシェフリンク機構によって駆動されるパンタグラフ機構の運動解析を行い、各脚のダイ

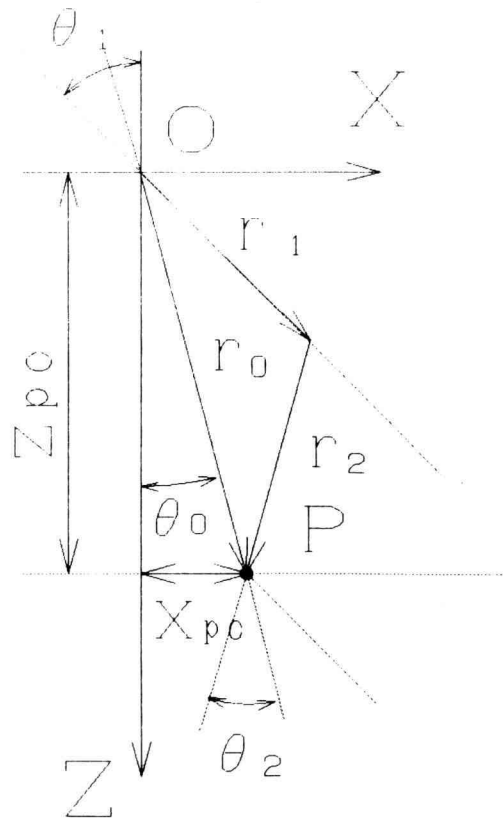


Fig. 1. Angles in pantograph mechanism

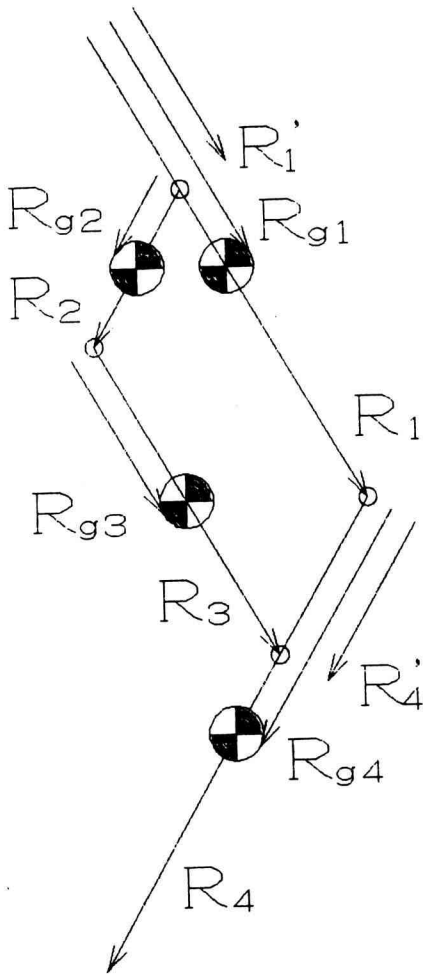


Fig. 2. Vectors in pantograph mechanism

ナミクスを計算した。

パンタグラフ機構では、Fig. 1 における P 点を等速に運動させた場合、各リンク間のなす角は非線形的に変化する。その角度をそれぞれ $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ と定め、Fig. 1 に示すように各リンクに対応するベクトルを $r_0 \sim r_2$ としてそれらを算出すると、

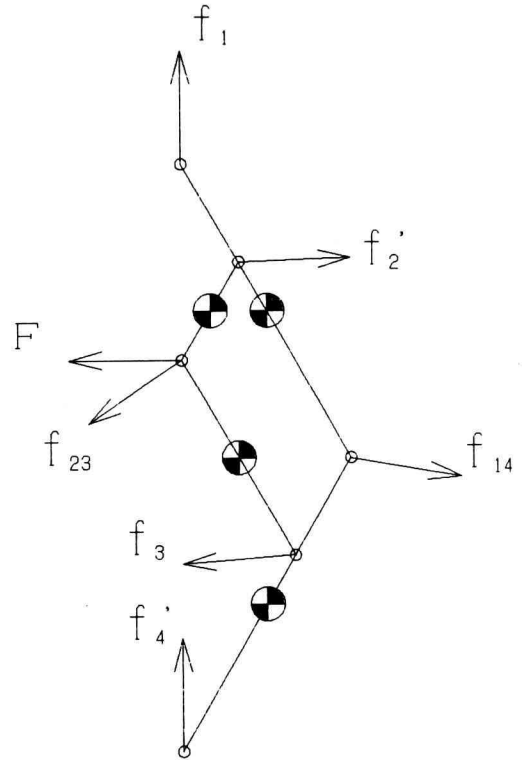


Fig. 3. Forces on nodes in pantograph mechanism

$$\theta_1 = \theta_0 + a \tan 2(\sqrt{1-C^{*2}}, C^*) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \pi - \{\theta_0 + a \tan 2(r_1 S_{1-0}, r_1 C_{1-0} - r_0)\} \quad (2)$$

ただし、

$$C^* = C_{1-0} = \frac{r_0^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_0 r_1} \quad (3)$$

となる。

但し、 S_{1-0} は $\sin(\theta_1 - \theta_0)$ 、 C_{1-0} は $\cos(\theta_1 - \theta_0)$ と省略表示した。以下の式でもこの表記法を用いる。

この角度 θ_1, θ_2 を用いて、Fig. 2 のようにベクトルを設定し、各リンクにおける力およびモーメントのつりあいから Fig. 3 に設定したような各接合点での力を求めると (4) 式となる。

$$H = CF$$

(4)

ただし,

$$H = \begin{bmatrix} -m_1(\dot{\theta}_1^2 S_1 - \ddot{\theta}_1 C_1)rg_1 \\ -m_1\{(\dot{\theta}_1^2 C_1 + \ddot{\theta}_1 S_1)rg_1 - g\} \\ -m_2(\dot{\theta}_2^2 S_2 - \ddot{\theta}_2 C_2)rg_2 \\ -m_2\{(\dot{\theta}_2^2 C_2 + \ddot{\theta}_2 S_2)rg_2 - g\} \\ -m_3(\dot{\theta}_1^2 S_1 - \ddot{\theta}_1 C_1)rg_3 \\ -m_3\{(\dot{\theta}_1^2 C_1 + \ddot{\theta}_1 S_1)rg_3 - g\} \\ -m_4(\dot{\theta}_2^2 S_2 - \ddot{\theta}_2 C_2)rg_4 - f_{4x}' \\ -m_4\{(\dot{\theta}_2^2 C_2 + \ddot{\theta}_2 S_2)rg_4 - g\} - f_{4z}' \\ I_1 \ddot{\theta}_1 \\ I_2 \ddot{\theta}_2 \\ I_3 \ddot{\theta}_1 \\ I_4 \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2}(r_4 S_2 f_{4z}' + r_4 C_2 f_{4x}') \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -\frac{r_1 C_1}{2} & -\frac{r_1 S_1}{2} & -\frac{r_1 C_1}{6} & -\frac{r_1 S_1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r_1 C_1}{2} & \frac{r_1 S_1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{r_2 C_2}{2} & -\frac{r_2 S_2}{2} & 0 & 0 & \frac{r_2 C_2}{2} & \frac{r_2 S_2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r_2 C_2}{2} & -\frac{r_2 S_2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r_3 C_1}{2} & \frac{r_3 S_1}{2} & \frac{r_3 C_1}{2} & \frac{r_3 S_1}{2} & 0 & 0 & \frac{r_3 C_1}{2} & \frac{r_3 S_1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r_4 C_2}{6} & \frac{r_4 S_2}{6} & \frac{r_4 C_2}{2} & \frac{r_4 S_2}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{1x} \\ f_{1z} \\ f_{2x} \\ f_{2z} \\ f_{23x} \\ f_{23z} \\ f_{3x} \\ f_{3z} \\ f_{14x} \\ f_{14z} \\ F_x \\ F_z \end{bmatrix}$$

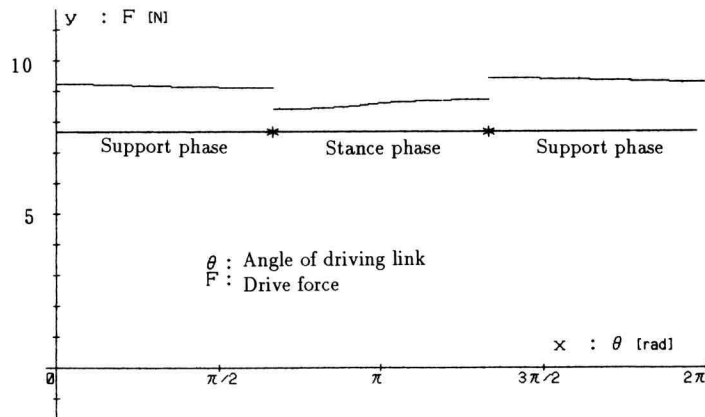


Fig. 4. A simulation result

ダイナミクスを求めるために (4) 式を F について解く。

歩行機械の脚の運動方程式は、遊脚相時と支持脚相時とで場合分けをする。

(4) 式において、遊脚相時は床反力 (f_4') が 0 であり、支持脚相時は全重量を支持している。したがって、改良チェビシェフリンク機構における遊脚相時は駆動角 θ が 121° から 239° の間であるから、脚の運動方程式の遊脚相時の条件は、水平床反力、垂直床反力が共に 0 となる。

また、立脚相時は立脚相時の脚の数と立脚多角形への重心の投影点の位置によって各立脚毎の床反力が変化する。本モデルの歩行はクロール歩容を行うものとし、床反力の垂直抗力を N として考える。

立脚相時においては、改良チェビシェフリンク機構を駆動するのに必要な力 F の垂直成分は本体を移動するのには関与していないので水平成分についてのみ考えればよい。脚と地面の間の静止摩擦係数を μ とおくと、脚が地面を滑らずに推進力を出す条件は、

$$F_x \leq \mu N \quad (5)$$

である。したがって、

$$\mu \geq \frac{F_x}{N} \quad (6)$$

でなければならない。

遊脚相と立脚相における改良チェビシェフリンク機構からパンタグラフ機構である脚を駆動するのに必要な力をシミュレーション (Fig. 4) によって求めた。

4. 試作歩行機械の概要

広瀬らは、脚の形態を Fig. 5 に示すように、は乳類にみられるような M (mammal) 形脚と、昆虫類にみられる I (insect) 形脚とに分類している。不整地歩行では歩行機械の脚の長さは長ければ長いほど歩幅が小さくて都合良く、安定性を考えると重心が低い方がよい。さらに、この 2 種の脚を移動に必要なエネルギーの効率という点から比較してみると、M 形よりも I 形脚が歩行機械に適していると指摘している。

しかし、本研究で想定される歩行機械では、本体の自重を支えているのは、疑似直線機構であるチェビシェフリンクなどの機構的な部分であり、多自由度の歩行機械でみられるように、制御されたサーボモータなどに代表されるアクチュエータではない。また、今後の展開として静的以外の歩行を可能にするために、本研究が想定している歩行機械においては、I 形脚よりも重心位置が高い M 形脚が有利であると思われるので今回試作した歩行機械でも M 形脚を採用する。

今回、設計、試作した歩行機械は、静的歩行のみに限らず動的歩行も可能であるよう 4 脚がそれぞれ独立に駆動できる脚駆動方式とする。歩行に必要な脚先軌跡は、改良チェビシェフリンク機構 (ダブルチェビシェフリンク機構) を用い全対偶を回転対偶とする。脚は前で述べたようにパンタグラフ機構とし、脚先が改良チェビシェフリンク機構の描く疑似直線を拡大した疑似直線運動を行うものとする。したがって立脚による自重支持には GDA (重力方向分離) により本体前進用モータには負荷をかけない。

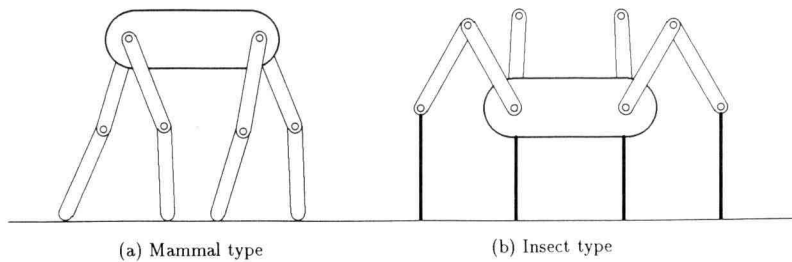


Fig.5. Two types of quadruped creatures

また、安定した歩行実現のためには出力/重量比が重要となる。試作した歩行機械では脚自体の軽量化による脚慣性の低減、及び胴体部の構造の簡略化等により全重量の軽量化を図っている。

センサー類は、各脚の足先に接地を確認する接地センサーとしてリミットスイッチが1脚につき4個備え付けられている。また、立脚及び遊脚時の制御の切り換えを行うために改良チェビシェフリンク機構部にリミットスイッチが1脚につき2個装備されリンク軌跡の前、後端を検出する。また、リンク軌跡の前後方向の位置検出のための直動型ポテンショメータも装備している。

胴体部は駆動用モータを1脚につき1つ計4つ必要であるためこれらを配置するのに十分なスペースを確

保し、また、モータを吊すのに十分な強度でありしかも、部品点数も少なく軽量に設計する。形状は、箱形状となっており、中央上部に通る2本の剛性の高い梁と下部に通る4本の梁が骨格となっており、脚ユニットとの接合にも使用され歩行機械全体を支えている。

脚機構はパンタグラフ機構を使用し、その倍率を1:3とする。また、脚そのものは必要十分な剛性を持ち、かつ軽量なものとする。脚先部は歩容を静的歩行に限定せず動的歩行も可能であるように常に脚先を水平に保つ必要があるため脚ユニットの元から脚の膝を介し脚先に至る3点を平行リンクを用いて水平を保つ水平維持リンク機構を設置する。駆動用の改良チェビシェフリンク機構と脚のパンタグラフ機構、水平維持リン

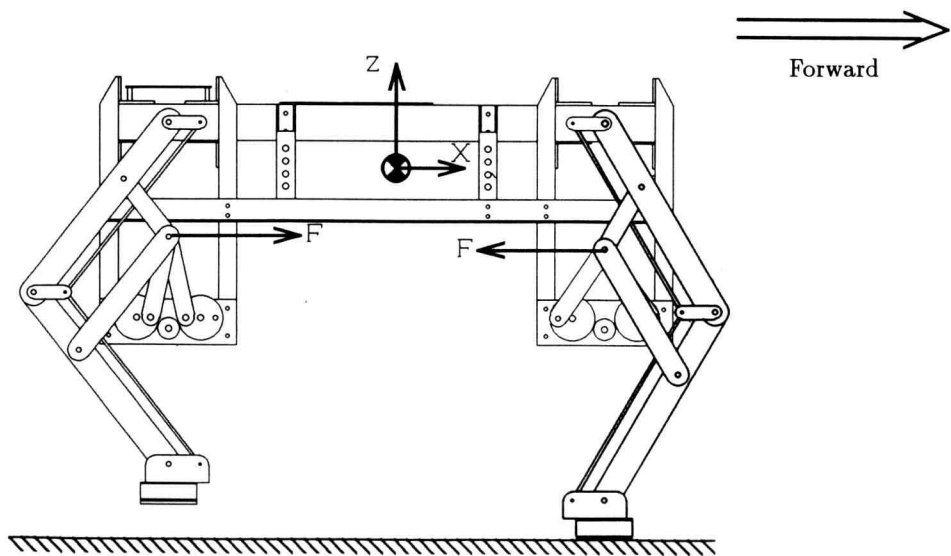


Fig. 6. Pantograph legs with link drive forces

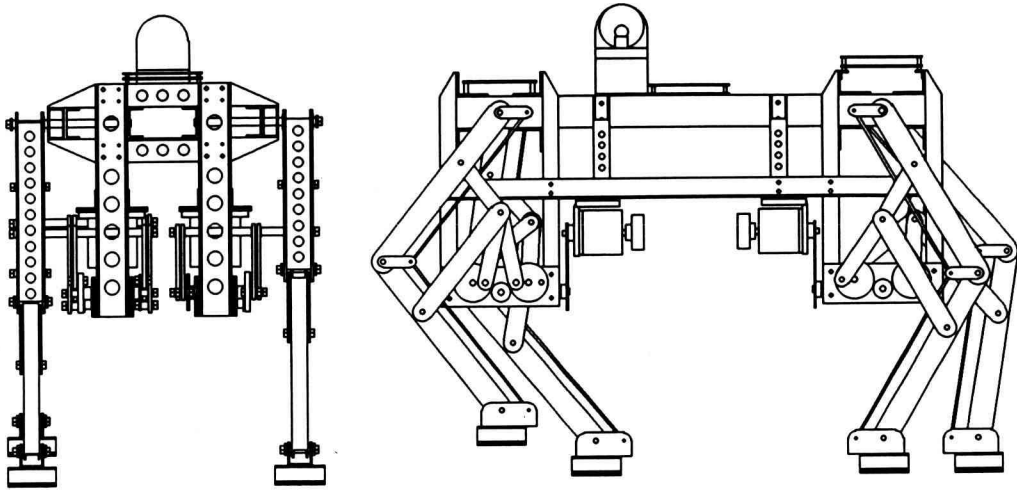


Fig. 7. General view of the prototype robot

Table 1: DIMENSIONS AND WEIGHT OF ROBOT

Total weight	17.5 [kgf]
Total length	630 [mm]
Total width	290 [mm]
Total height	240 [mm]
Leg clearance	290 [mm]
Leg length	415 [mm]

ク機構の配置は、Fig. 6 のようになる。

胴体の上部に脚制御用の V25CPU ボード、モータ駆動回路及びセンサー用の電装系を、下部には脚を駆動させるためのモータを配置する。Fig. 7 に全体前面図および同側面図を示す。

4 脚歩行機械の主要寸法を Table 1 に示す。

5. 試作歩行機械の制御

クロール歩容による静歩行では、重心を着地足が作る 3 角形内に保つことにより歩行が行われる。(Fig. 8 参照。)この場合、系の運動があまり速くない限り鉛直床反力が常に負にならないという条件が満足されるので、軌道の計画や制御が非常に簡単になるという利点がある。そこで、本歩行機械でもこのクロール歩容による歩行を採用する。

本歩行機械がクロール歩行を行うためには、歩行速度を一定に保つ必要がある。そこで、本体を定速で移動させるためには、歩行用チェビシェフリンクの駆動用モータの回転数と脚先速度は比例しているのので、このモータの回転数を立脚時と遊脚時で変化させる。また、チェビシェフリンクを介して脚を駆動するにあたり 1 サイクルのなかで負荷の大きな変動がある。このため負荷に関係なくモータの回転数制御する必要がある。そこで、本歩行機械では容易に回転数制御のできるパルスモータを使用した。

本歩行機械において、静的歩行をさせる場合には 4 脚を独立に駆動し、さらにデューティ比 β (立脚時間 / 1 サイクルに要する時間) を 0.75 以上にしなければならない。そのためには、改良チェビシェフリンク機構部の両脇に設置されたリミットスイッチにより立脚及び遊脚の切り換え時を検出し静的歩行に必要な脚先速度を生成する。立脚相時と遊脚相時との脚先移動速度を 1 対 3 にすることでデューティ比を 0.75 に近づけ、クロール歩行を実現させる。Fig. 9 に本歩行機械の制御系とセンサー系の概念図を示す。

6. 試作歩行機械の基本動作

製作した歩行機械 [Photo 1] の基本性能をふまえた上で、設計仕様を満足するかを調べ、静的歩行における改良チェビシェフリンク機構 (ダブルチェビシェフリンク機構) 及び 4 脚独立駆動における制御における

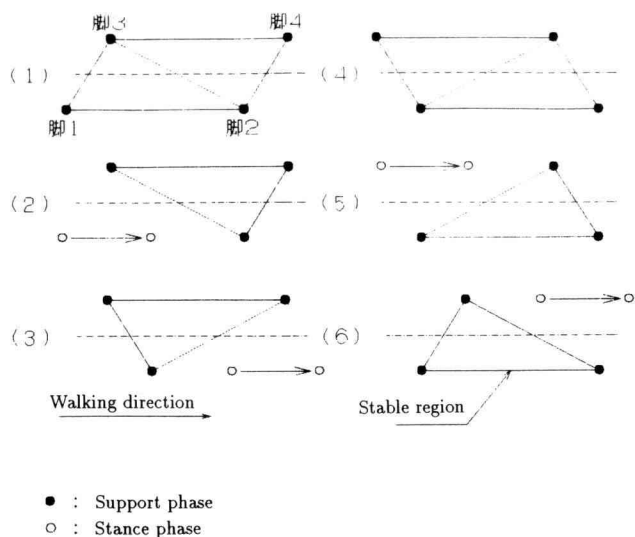


Fig. 8. Crawling gait

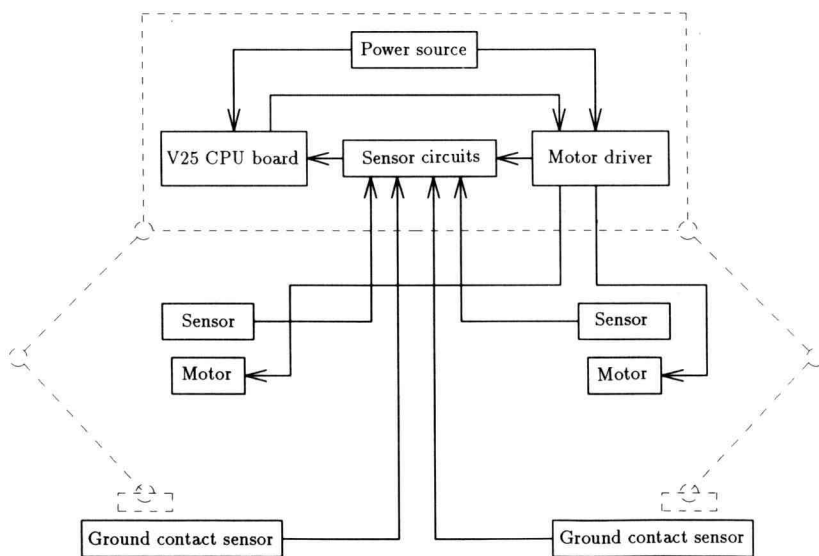


Fig. 9. Control system

有効性を確かめる実験を行った。

まず、本体を整備台の上に置き、クローリング歩容をさせる準備として4脚を初期設定の位置まで駆動させる。そして、モータを駆動させ改良チェビシェフリンク機構の両端に設置された接触センサーにより立脚相及び遊脚相時で速度を二段階に変化させる。この制御

により、整備台上でのクローリング歩容を実現した。その後、床に降ろし、歩行実験を行った。Photo 2～Photo 7に歩行の様子を示す。

実験の結果、安定した歩行には多少の改良が必要であるものの、本歩行機械の有効性を確認することができた。

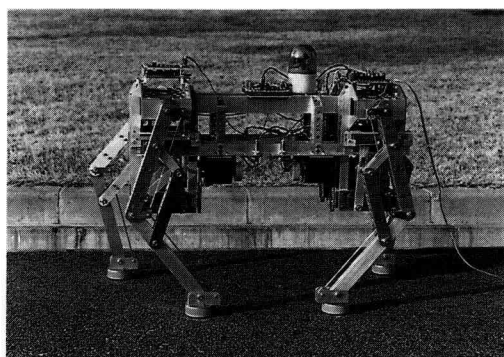


Photo 1 Quadruped walking machine

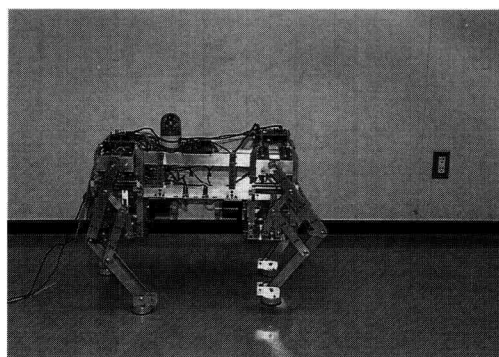


Photo 4 Walking experiment (c)

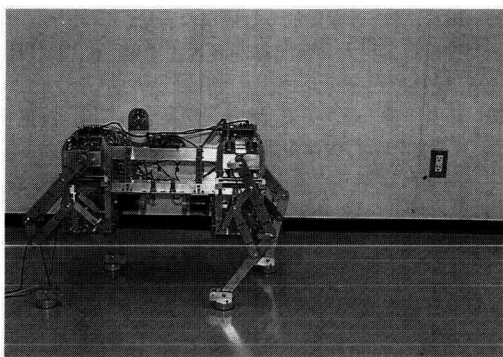


Photo 2 Walking experiment (a)

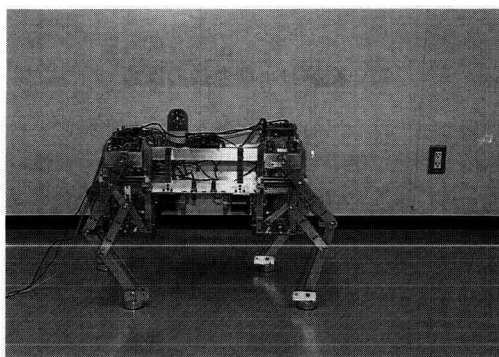


Photo 5 Walking experiment (d)

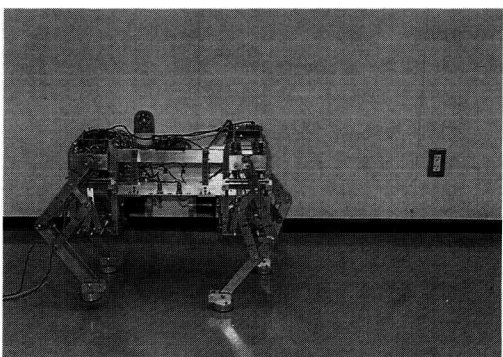


Photo 3 Walking experiment (b)

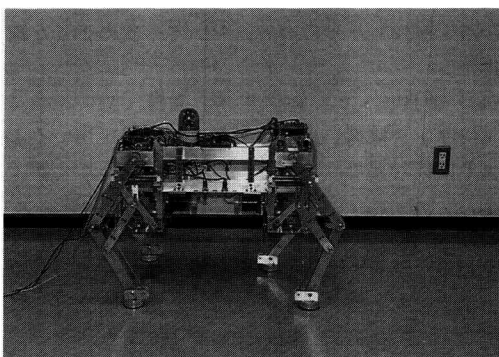


Photo 6 Walking experiment (e)

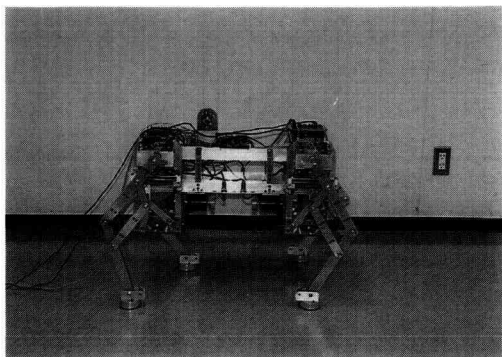


Photo 7 Walking experiment (f)

7. 結論および今後の課題

本研究室では、以前より複雑な機構や制御によらず機構的な部分で制御面を容易にした脚型歩行機械の開発を目的に研究を続けてきた。これまでの歩行機械は駆動用アクチュエータを1つにし改良チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構を用い、各脚の駆動を同期させることにより静的歩行及び動的歩行を実現してきた。そして、本報はさらにアクチュエータの数を増やし4脚を独立に制御し駆動させることで静的歩行であるクロール歩容を実現し、その機構の有効性を確認した。

設計・試作した歩行機械において、次のような結論を得た。

(1) 改良チェビシェフリンク機構（ダブルチェビシェフリンク機構）とパンタグラフ機構を用いることにより回転対偶だけで歩行機械を構成することができた。

(2) 前報での課題であった改良チェビシェフリンク機構のリンク部の剛性不足をダブルチェビシェフリンク機構にすることによりリンクの剛性を上げることができ、歩行機械自体を安定させることができた。

(3) 改良チェビシェフリンク機構（ダブルチェビシェフリンク機構）を用い、脚先移動速度を制御することにより、静的歩行に必要な脚の軌跡を容易に得ることができ、静的歩行が可能であることが確認できた。

以上のような結果、次のような課題が残った。

(1) 脚自体の重量をかなり抑えたつもりであるが、それでもなお慣性力が動き歩行機械全体に揺動をもたらしたので、脚自体をさらに軽くする必要がある。

(2) クロール歩容における1つの制御法が確立されたので、これから静歩行と動歩行の間の遷移歩容の制御へ発展させていくことが必要である。

参 考 文 献

- 1) 田口 幹：6脚歩行機械の研究，
神奈川工科大学研究報告 B 理工学編，p. 123/133
(1991)
- 2) 田口 幹：4足動的歩行機械の研究，
神奈川工科大学研究報告 B 理工学編，p. 185/191
(1991)
- 3) 田口 幹，高津英生，金子 美喜夫，宮田 雅章：
4脚動的歩行機械の研究
第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集 p. 905
- 4) 広瀬茂男，他：
直動型4脚歩行機械 TITAN VI の開発
第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集 p. 283
- 5) 安達弘典，小谷内範穂，他：
自由歩容形4脚移動ロボットの開発
第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集 p. 319
- 6) 細田祐司，藤江正克，管 和俊，榊原義宏，服部 誠：
4脚歩行機械の開発 (3)
第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集 p. 307
- 7) 木村 浩，下山 勲，三浦宏文：
四足歩行ロボット Collie-1 の制御
第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集 p. 409
- 8) 佐野明人，古荘純次：
点支持型四足歩行ロボットの三次元動的制御に関する実験的研究
日本機械学会論文集 (C 編) p. 3014