擬似直線機構を利用した6足歩行機械 に関する基礎的研究†

阿 部 稔*・金 子 真*・西 沢 昭一郎*

Basic Study on the Six-Legged Locomotion Machine Using an Approximate Straight-Line Mechanism

Minoru ABE*, Makoto KANEKO* and Shoichiro NISHIZAWA*

Although legged locomotion machines equipped with three active degrees of freedom per each leg possess great flexibility on irregular terrain, such machines need very complicated software in controlling and coordinating leg motion. As a result, such machines perform awkwardly except a particular legged machine even when they walk on a flat plane and although they have flexible mechanism, multi-functioned walkings are not realized under the existing circumstances.

Under these circumstances, the authors propose such a fixed gait type legged machine (MELWALK MARK-III) as can attain two dimensional walking and terrain adaptability. In this particular model, the fixed gait (alternating tripod gait) is realized by only one active degrees of freedom using an approximate straight-line mechanism and seven other active degrees of freedom are added for two dimensional walking and terrain adaptability. Mechanism and basic control system on the proposed legged machine are described precisely with the comparison of conventional machines equipped with three active degrees of freedom per each leg.

Experiments are carried out to certify the basic movements and the simplicity of control algorithm. In order to check the dynamic effectiveness, the specific resistance and the payload limit are also measured. Several features of the proposed legged machine are revealed through these experiments.

Key Words: legged locomotion machine, robot, fixed gait, terrain adaptability specific resistance

1. はじめに

不整地を対象とした歩行機械の研究は大きく二つの流れに分類することができる¹⁾。一つの流れは歩行機械を生体に近い多関節構造とし、その多数の関節部自由度の協調制御を行うことにより、高い知能的対地適応性を実現しようとする流れである^{2)~6)}。しかしながら、このような流れに基づいて開発された歩行機械は、一部の歩行機械²⁾を除き、未だに平面歩行すらぎこちなく、また柔軟なメカニズムを有する割にはそれを十分に生かした多機能な歩行が実現されていないというのが現状である。この種の歩行機械ではシステムの柔軟性はソフトウェアにことごとく依存しており、ソフトの汎用性によってシステムの性能が決まる。その汎用的ソフトの構成上の困難さが問題の背景にあるものと筆者らは考えている。一方、もう一つの流れは、リンク、カムなどの機械的要素を用いた固定歩容(足どりがあらかじめ規定されている歩容)構造の歩行機械^{7),8)}の開発に沿ったものであるが、従来のこのタイプの歩行機械には、歩行機械にとって最も重要な能動的対地適応性が備っていないため、その技術的評価は低い。

ところで、人間の歩行動作を考えてみた場合、本来それは随意動作とされているが、定常歩行に限ってみるとその動作パターンは固定化されており⁹⁾、障害物に出くわしたときだけ一時的にそれを回避し得るパターンを発生して、それに対応する歩行に切り換わる程度で、全体的にみれば自律動作と考えられる。したがって基本的な足の動作パターンに不整地に適応するための付加的な動作が加わって脚移動の不整地歩行は

† 第23回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭59・7)

* 機械技術研究所 茨城県新治郡桜村並木 1-2

* Mechanical Engineering Laboratory, Niihari-gun, Ibaraki

(Received August 14, 1984)

(Revised January 21, 1985)

実現されていると理解することもできる。

このような考え方を歩行機械に応用するため、筆者らは擬似直線機構を脚部に利用し基本となる歩容をハードウェアで実現し、足の伸縮自由度で不整地面に適応することができるような歩行機械の研究^{10),11)}を進めている。このように歩容を構造的に固定する場合、従来の各足3自由度を備えた歩行機械に比べ自由な足場の選択はできなくなる。しかし制御システムがきわめて単純になるとともに、メカニズムに工夫を加えることにより歩行速度、エネルギー効率の向上が期待できる。

本論文では、はじめに歩容をリンク機構で創成する場合の基本的なリンクの設計指針について検討した後その設計指針に沿って脚部に擬似直線機構を導入している。次にその脚機構と不整地に対応できる自由度を付加した8自由度6足歩行モデル(MELWALK MARK-Ⅲ)を提案するとともにそのシステム構成と、基本制御方法について詳述している。さらに、各足3自由度を備えた従来の歩行機械と対比しつつ、制御性および力学的特性の面から本歩行機械の特徴を明らかにしている。

2. 脚構造の設計指針

ウマ、イヌ、ダチョウなどの生物においては、前肢の静止足先運動軌跡は Fig. 1 に示すように、一部に直線部を含む閉軌道を描くことが知られている¹²⁾。直線部は、厳密には「直線」ではないが、この部分が真の直線に近い程、歩行機械にとってはつぎの2点から望ましい。まず1点は歩行時における重心の上下動が少なくなるため、歩行機械の移動効率が高くなることである。移動効率の向上は特に自立をめざすロボットでは省エネの観点から留意されねばならない重要な問題である。また他の1点はこれも省エネに関係するが重力方向分離駆動¹⁾が可能になることである。立脚相の足先軌跡を厳密な直線にすることが理想的であるが、少ないアクチュエータで Fig. 1 の軌跡を得ることは一般に困難であるため、実用的には、直線のかわりに擬似直線であっても重力方向分離駆動方式の効果は十分期待できる。筆者らは脚部の複雑化をさけるため4節リンク機構以下のものに焦点をしぼり、いくつかのリンクを対象に計算機シミュレーションを行い、直線度(最大凹凸高さ δ /ストローク s)、および直

Fig. 1 Typical foot trajectory of animals

線区間の位相について吟味した¹¹⁾。その結果、Fig. 2 に示されるような4節リンク機構において、直線度0.001程度のきわめて直線性のすぐれたリンクパラメータが存在することが判明した。(Fig. 3 の $k_1 = 2.22$) しかも擬似直線部分の位相はほぼ 180° に相当するため、このリンク3組をペアにして 180° 位相をずらして駆動することにより昆虫の代表的な歩容の一つである交互3点支持歩行⁴⁾ (alternating tripod gait) が容易に実現できるという利点も含んでいる。なおパラメータの決定方法については《付録》に詳述している。

一方、この種のリンクを採用する時、歩容が1パターンに固定されるため、方向変換や対地適応性をもたせるための別の自由度を設ける必要がある。ここでは方向変換については推進とは別の回転の自由度をまた対地適応については脚に伸縮の自由度を付加することにより対処する。以上により、全自由度8という比較的少ない自由度で汎用的な歩行機械の特性を保持し

Fig. 2 A four-bar-linkage mechanism to produce an approximate straight-line and its coordinate system

Fig. 3 Relation between δ , δ/s and k_1

かつ効率面にも配慮した歩行機械の構成が可能になる。

3. 対地適応性を備えた 8 自由度 6 足歩行モデル (MELWALK MARK-III)

3.1 機構系

Fig. 4 に全体の構成を示す。MARK-III の胴体寸法は縦×横×高さ 500×500×100 mm, 最大足伸縮量 200 mm, 全重量 35 kg である。この歩行機械は 3 本の足を備えた 2 枚の基台が, 中央の垂直軸まわりに相対的に $\pm 18^\circ$ 回転できるように構成されており, 推進用 50 WDC モータおよびステアリング用 50 WDC モータは下部基台へ取り付けられている。また下部基台から上部基台への推進用動力伝達は 1 個のスプラインジョイントとその両端に取り付けられた 2 個のユニバーサルジョイントにより行われている。これにより上部基台に取り付けられている 3 本の足と, 下部基台に取り付けられている 3 本の足は位相が 180° 違った状態で, 機械的にリンクされ, 交互 3 点支持歩行が実現できる。なお歩行機械の重心は胴体を水平に維持する限り, 常に支持三角形の内部に入るように設計されている¹⁰⁾。

一方, 脚機構は **Fig. 5** で示されるように大きく三つの部分に分けることができる。1 番目の機構 (a) は

Fig. 4 Structure of the proposed six-legged machine with eight active degrees of freedom

(a) four-bar-linkage (b) sub-link (c) pulley-belt

Fig. 5 Leg mechanism of MELWALK MARK-III

足先の軌跡を作るための 4 節リンク機構であり直線度の最もすぐれたリンクパラメータ $k_1=2.22$ が採用されている。2 番目の機構 (b) は胴体に対して足を常に直角方向に維持するための機構で, 2 本のサブリンクにより 2 組の平行四辺形リンクを構成している。3 番目の機構 (c) は足の上下駆動機構である。脚部の軽量化によりエネルギー消費の低減を計るため足の上下駆動用 30 WDC モータは胴体側に取り付けられ, 動力はプーリー, ベルトを介してギヤボックスに伝達されている。またギヤボックス内ではウォーム, ウォームホイール, ピニオンを介してラックに伝達され, 足の上下動を実現している。ウォーム, ウォームホイールを採用した理由は, DC モータの出力が零の状態で自立させるためである。つまり, 重力方向分離駆動の利点を生かすためである。なお, Fig. 5(c) のような動力伝達機構にすると, 推進用 DC モータと足の上下駆動用 DC モータとの干渉は全くなく, 両者を独立に制御することができる¹¹⁾。

Fig. 6 は筆者らが過去に提案した歩行機械としての最低限の機能¹³⁾を満足する歩行機械の能動自由度数 (active degrees of freedom) について整理したものである。ここで SPM (Separated Plate Model), CLM (Crank Leg Model) および×印の歩行機械は筆者らが能動自由度をできるだけ減らすという観点から自由度考察した際に導入されたモデルである (詳細については文献 13), 14) 参照)。MARK-III の位置付けとしては, 6 足の最少能動自由度モデルではないが, 従来の 6 足歩行機械³⁾⁻⁶⁾に比べ能動自由度が 10 個も減らされていることがわかる。したがって, 制御システムの大幅な単純化を計ることができることは直観的に考えても容易に理解できる。

Fig. 6 Comparison between MELWALK MARK-III and conventional machines in the active degrees of freedom

Fig. 7
Total control system

3.2 センサおよび制御系

一般にロボットの知能化には内界センサと外界センサの2種類のセンサが不可欠である。内界センサとはロボット自身の状態を知るためのセンサで MARK-Ⅲの場合には、胴体からみた足の長さを知る回転形ポテンシオメータ (6ch), DC モータの回転量を検出するエンコーダ (8ch), ステアリング時の胴体の回転角度を検出するポテンシオメータ (1ch), 胴体の回転限界を検出する磁気センサ (2ch), 足の位相を検出するポテンシオメータ (1ch) および姿勢センサが対応している。また外界センサすなわち、環境からの情報を得るセンサとしては、MARK-Ⅲには足が地面に接地した状態を検出するためのリニアポテンシオメータを使った触覚センサ (6ch) が備っている。以上のセンサ系とモータ駆動系を合わせ、全体としての制御系を図示すると Fig. 7 のようになる (ただし障害物センサは未装備である)。歩行機械にとって障害物センサは重要なセンサの一つではあるが、歩行機械自体の基本的な機能の評価を行う上で本質的なセンサではない。これについては今回は研究対象とはしない。

DC モータは計算機側からのパルスで駆動される。計算機 (DEC 社製 PDP 11/44) からは各チャンネル同時に駆動用パルス (8ch) とモータ回転方向指令用 ON, OFF 信号 (8×1 bit) がモータサーボ系に転送される。ここで、エンコーダからのフィードバック信号の積分値とパルス指令値の積分値との差に対応した電流が DC モータに供給される仕組みになっている。このようなパルス制御の利点は位置の制御と速度の制御が同時に実現できる点にある。つまり、単位時間当りの指令パルス数で速度が決定され、パルス数の積分値で位置の指令ができる。MARK-Ⅲで使われたモータ

Fig. 8 Control method for terrain adaptability

タサーボ系は最大 50 kHz のパルス信号に追従できるように設計されている。

3.3 歩行動作生成アルゴリズム

各足に 3 自由度を備えた歩行機械は、安定した歩容を実現するための歩容発生サブシステム、各種センサからの情報をもとに胴体姿勢、胴体高さ、脚状態などを変えたりする基本運動調整サブシステムさらに歩容の選択、速度制御を行う中枢システムといった制御システムから構成されており、しかもそれらは階層構造を形成している^{2), 15)}。MARK-Ⅲの制御システムも基本的には階層構造になるが、従来提案されている方式よりも構造およびその中身自体はるかに単純なものとなる。基本階層構造は速度、進行方向の制御を行う中枢システム (操縦形では人間が担当) と各種センサからの情報をもとに各部の運動を調整する基本運動調整サブシステムである。ここで基本運動調整サブシステムの中身について詳細に分析してみることにする。

1) 対地適応制御

支持脚交換位相 ($\theta = \pi/2, 3\pi/2$) では、遊脚相の 3 本の足先のリニアポテンショメータの出力 V_p を Fig. 8 のように計算機側にフィードバックすることにより各足は衝撃的に地面に衝突することなく不整地面に対応して位置決めされる。この動作によって新たな支持面を形成することができる。

2) 胴体の重心高さ制御

本歩行機械では省エネルギー的観点から基本的には、胴体の重心高さはできるだけ変えない制御方法を前提としている。したがって胴体の重心高さを変えるのは以下の三つのケースのみである。

- (i) 支持脚交換位相で、遊脚相の足を下限まで下げて足が地面に接触しないとき→胴体下降 ($-\Delta h$)
- (ii) 遊脚相の足の復帰運動中、足を上限まで上げても障害物に接触するとき→胴体上昇 ($+\Delta h$)
- (iii) 進行中、胴体自身が接触するような障害物に出くわしたとき→胴体上昇 ($+\Delta h$)

3) 姿勢制御

2章で示されている設計指針に沿った固定歩容形歩行機械の場合、推進動作中胴体は直線または擬直線に沿って移動するため、胴体の水平は常に維持される。地面の変形がないとすると胴体が傾く原因となるのは支持脚交換位相において、新たな支持面を確保するために、遊脚相の 3 本の足を地形に合わせて位置決めするときだけである。したがって理想的には胴体の傾きは生じない。

4) 方向変換制御

MARK-Ⅲは中枢システムからの指令により、進行方向を変えることもできる。Fig. 9 に方向変換の基本動作とそのタイムチャートを示す。Fig. 9(a) において a は上部基台の方向を示し、b は下部基台の方向を示す。方向変換は 2 通りの方法で実現できる。一つは近似的に $r=R$ の回転半径を有するもので Fig. 9(b) のタイムチャートで実現される方法である。もう一つは、Fig. 9(c) のタイムチャートで実現される方法でその場で足踏みしながら方向を変える方法である。この場合近似的に回転半径を零にすることができる。MARK-Ⅲの場合、2 枚の基台は垂直軸まわりに相対的に最大 18° 回転できるため、5 歩で胴体の方向をほぼ 90° 変えることができる。

以上の運動調整サブシステムを歩行の位相に対して整理すると Fig. 10 のようになる。ただしカッコ内

Fig. 9 Control method for changing the body direction

Fig. 10 Relation between link phase and corresponding control system

Fig. 11 Two walking strategies for the irregular terrain

の制御アルゴリズムは随時必要に応じて実行される。

一方不整地面における歩行戦略を考えてみると Fig. 11 で示されるように大きく 2 通りが考えられる。一つは遊脚相の足が、障害物に衝突したときあるいはその直前に規定量持ち上げられるという動作を繰

り返ししながら進む方法 (Fig. 11(a)) である。この方法の利点はむやみに足を持ち上げないため、エネルギー効率、歩行速度の向上といった点で有効ではあるが、スムーズな歩行を実現するためには、各足に高度な障害物検出センサが必要である。もう一つは遊脚相の足を常時胴体の高さまで持ち上げた後、胴体を推進させる方法 (Fig. 11(b)) である。この方法は常時足を胴体高さまで持ち上げるため、効率のよい方法ではないが、胴体高さ以下の障害物に対して遊脚相の足が衝突することはないため、胴体部の障害物検出センサだけで基本的な歩行は実現できるといった大きな利点を有している。

4. 基礎実験

MARK-Ⅲには障害物センサが未装備であるため、高度な知能的な不整地歩行実験はできないが、不整地面の凹凸レベルが胴体の高さ以下であれば、Fig. 11(b)の制御アルゴリズムを適用した簡単な知能的な不整地歩行は確認できる。ここで障害物センサを使わないにもかかわらず知能的と呼ぶ理由は足先の触覚センサ（外界センサ）の情報に基づいた判断機能を備えているからである。

本節では、MARK-Ⅲによる方向変換動作、簡単な不整地歩行動作の実験について述べた後、MARK-Iを使った力学的特性実験についても触れている。

4.1 方向変換動作

Photo. 1, Photo. 2 はそれぞれ回転半径 $r=0.8$ m

Photo. 1
An experiment of changing the body direction (rotational radius $r=0.8$ m)

Photo. 2
An experiment of changing the body direction with stepping (rotational radius $r=0.0$ m)

で 90° 回転した場合およびその場で足踏みしながら 90° 回転した場合の連続写真である。 90° 方向を変えるのに約 23 秒要している。各足 3 自由度有する歩行機械について比較できる数値は明らかにされていないが、いずれにせよ、固定歩容形歩行機械の場合、その構造の単純さに起因して、簡単かつ高速に方向変換動作が行える可能性を秘めていることは明白であろう。

4.2 不整地歩行動作

Photo. 3 に歩行動作の連続写真を示す。白線は胴体および 1 本の足先の代表点に取り付けられたランプの光の軌跡である。不整地としては足の伸縮量 (200 mm) 以下の凹凸にするため床に高さ 60 mm 程度のブロックを置いたもので代用している。基本となる制御アルゴリズムとしては Fig. 11(b) が採用されている。Photo 3 より胴体は擬似直線に沿ってほぼ水平に動いている様子がわかる。またこの場合 1 歩に要する平均時間は 12 秒であった。このように不整地面での歩行が極端に遅くなるのは現在のところ足の伸縮速度に依存している。

ところで不整地面での歩行速度を上げるためには、(i)ハードウェアおよび(ii)ソフトウェアの改良が要求される。ハードウェア的には、筆者らがすでに提案しているように足の伸縮駆動部にハイブリッドアクチュエータを取付け、負荷により減速比を切換えるのが有効な方法と思われる¹⁰⁾。また歩幅 s が大きくなるようなリンクパラメータ (具体的には小さな k_1) を選定し、モータ 1 回転当りの移動距離をかせぐ方法も考えられる。一方ソフトウェア的には Fig. 11(a) のように前方の地形を事前に認識することにより、地形に合った足先の運動を生成する方法を確立することが、歩行速度の向上にはきわめて有効と思われる。ただし、この場合には、地形認識センサあるいは障害物センサの装備を前提としている。

4.3 力学的特性

擬似直線機構を用いた歩行機械の力学的特性につい

Photo. 3 An experiment of proceeding on a simple irregular terrain (the obstacle height $h=60$ mm)

Fig. 12 Gabrielle-von Karman diagram

て調べるため、MARK-I を使って移動仕事率および荷重の搭載性についての簡単な実験を行った。Fig. 12 (ガブリエールフォンカルマン図)^{17), 18)} は、以上のようにして測定されたモータ消費パワー P に (1) 式を用いて、移動仕事率 ε (移動体の単位重量を単位長さ移動させるのに必要なエネルギー) を算出したものである。

$$\varepsilon = \frac{\bar{P}}{MgU_m} \quad (1)$$

ただし、 $\bar{P}$ は 1 サイクルの平均消費パワー、 M は移動体の全質量 (歩行機械の質量 M_1 + 搭載質量 M_2)、 U_m は重心の平均移動速度である。Fig. 12 において実線は DC モータに供給されるパワーから算出されたものであり (以下 ε_i と呼ぶ)、1 点鎖線は DC モータの効率を考慮して、歩行機械に供給される正味のパワーから算出されたものである (以下 ε_n と呼ぶ)。Fig. 12 には搭載質量 $M_2=0, 9 \text{ kg}$ についての実験結果が示されている。 ε_i の場合、歩行速度が低くなるほど大きな値となるのは低速度で DC モータの効率が著しく低下するためである。 ε_n は速度の増加とともに増加する傾向を示す。これは脚の運動によるパワー消費が速度の 2 乗に比例して増加するためである。全体的に搭載質量 M_2 が増えるほど移動仕事率は小さくなる。 M_2 は胴体の一部とみなせるから上記事実は脚質量/胴体質量を小さくした方が移動仕事率はよくなることを実験的に立証したものである。一方、各足 3 自由度を有する歩行機械との比較を行うため、文献 2) の歩行機械のデータが Fig. 12 にプロットし

てある。ただし (1) 式で定義される移動仕事率に換算している。

このように擬似直線機構を使った歩行機械の移動仕事率は、従来エネルギー効率がいいと言われている PANTOMEC 脚機構を用いた歩行機械よりもずっと小さく人間の歩行や動物の歩行とほぼ同じオーダーとなっていることがわかる (注 1)。なお文献 3) の 6 足歩行機械に比べ、エネルギー効率はほぼ 2 桁改善されている¹⁹⁾。

一方、荷重の搭載性は今後歩行機械の自立化 (パワー源、制御系を搭載したという意味) を計る上で重要な指標である。MELWALK の場合、MARK-I で少なくとも 12 kg (本体質量 4.2 kg)、MARK-III で 24 kg (本体質量 35 kg) まで可能である。MELWALK の場合、従来の歩行機械と違って足先が常に胴体近傍にあるため、自重支持反力による過大なモーメントが腰部にかからない。このことは材料力学的観点からみても搭載性の向上に大きく寄与するものと思われる。

5. あとがき

本論文では、固定歩容形歩行機械に対地適応性を付加するという考え方を導入し、擬似直線機構で足先軌跡を実現し、それに足の伸縮動作を追加した 8 自由度 6 足歩行機械 (MELWALK MARK-III) を提案した。また基本制御系と制御アルゴリズムについて論じ、基本動作実験を通してその妥当性を確認した。また、従来の各足に 3 自由度備えた歩行機械に比べ、きわめて単純な制御で不整地に対応できることを示した。さらに移動仕事率、荷重の搭載性といった力学的な観点からみてもすぐれた特性を有していることを実験的に確認した。地形に対する問題、および本論文で議論しなかった障害物センシングについては別の機会に論じることにした。

最後に本研究を進めるにあたり有益な助言をいただいた機械技術研究所谷江和雄主任研究官に心から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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, 242/250 (1980)
- 2) 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, 16-5, 747/753 (1980)

(注 1) Fig. 12 の人間の歩行時におけるデータでは、消費エネルギーとして歩行に起因するエネルギーだけでなく代謝エネルギーまで含まれているため、実際には Fig. 12 よりずっと下に位置づけられる。

- 3) R. B. McGhee, and G. I. Iswandhi: Adaptive Locomotion of a Multi-legged Robot over Rough Terrain, IEEE Trans. System, Man and Cybern., SMC-9-4, Apr. 176/182 (1979)
- 4) M. H. Raibert and I. E. Sutherland: Machine that Walk, Scientific American, 13-1, Jan. 32/41 (1983)
- 5) E. A. Devjanin, et al.: The Six-legged Walking Robot Capable of Terrain Adaptation, Proc. of 4th Romansy, 375/384 (1981)
- 6) T. G. Bartholet: The First Functionoid Developed by Odetics. Inc., Proc. of ICAR Symo. Tokyo, Japan, 293/298 (1983)
- 7) J. E. Shigley: The Machines of Walking Vehicles, Report No. LL-71, (1960) Land Locomotion Laboratory, Warren Michigan
- 8) I. I. Artobolesky: Mechanisms in Modern Engineering Design, 1, 405, Mir Publisher (1975)
- 9) R. Tomovich: On the Synthesis of Self-moving Automata, Avtomatika i Telemekhanika, 26-2, 298/307 (1964)
- 10) 阿部, 金子, 谷江ほか: 擬似直線機構を用いた6足歩行機械(MELWALK)の研究(第1報, 脚機構の解析とMARK-I, IIのハードウェア構成), 機械技術研究所所報(投稿中)
- 11) 阿部, 金子, 谷江ほか: 擬似直線機構を用いた6足歩行機械に関する研究, 第2回知能移動ロボットシンポジウム予稿集, 27/32 (1984)
- 12) 渡部, 山崎: 歩行系の解析に関する研究, バイオメカニズム, 2, 東大出版, 349/350 (1984)
- 13) 金子, 阿部, 館: 多足歩行機械の自由度に関する基本的考察, 日本ロボット学会誌, 2-2, 142/150 (1984)
- 14) 金子, 館, 阿部: 多足歩行機械の自由度に関する基本的考察と最少能動自由度に関する研究, 機械技術研究所所報, 39-2, 1/14 (1985)
- 15) A. A. Frank: Automatic Control Systems for Legged Locomotion Machines, USC Report 273/000 (1968)
- 16) 金子: 歩行機械とハイブリッドアクチュエータ, 日本ロボット学会誌, 2-4, 349/350 (1984)
- 17) G. Gabrielle and T. Karman: What price speed, Mechanical Engineering 72, No. 10 (1950)
- 18) 梅谷, 広瀬: ほふく運動の生物力学的研究, バイオメカニズム, 2, 東大出版, 289/297 (1973)
- 19) 金子, 阿部: 脚式移動機構の設計, バイオメカニズム学会誌, 9-1, 10/17 (1985)

《付 録》

Fig. 2 の点 $T(x, y)$ の軌跡は(A.1)~(A.3)のよ
うに表わすことができる.

$$x^2 + y^2 + k_2^2(k_1^2 - 2k_1 \cos \theta + 1)l_1^2 = 4l_1^2 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{x}{y} = \frac{\sin \theta}{k_1 - \cos \theta} \quad (\text{A.2})$$

$$k_1 = \frac{l_2}{l_3}, \quad k_2 = \frac{l_3}{l_1} \quad (\text{A.3})$$

ここで擬似直線の必要条件として, $y(\pi) = y(\pi/2)$ を仮定する. 対称性により, この仮定は $y(\pi) = y(\pi/2) = y(3\pi/2)$ と等価である. したがって, (A.1)~(A.3)式より(A.4)式が得られる.

$$k_2^2(1 + k_1^2)(1 + 2k_1) = 4 \quad (\text{A.4})$$

(A.4)式は一つの式に対して二つの未知数 k_1, k_2 を含んでいるため, 単一解は存在しない. Fig. 3 は k_1 を変化させて直線度 δ/s を調べたものである. ただし, δ は $l_1 = 100 \text{ mm}$ としたときの値である. Fig. 3 より $1.5 < k_1 < 5.0$ において, $\delta/s < 0.01$ となるため, 擬似直線としての十分性は満足されていると思われる. したがって, Fig. 3 を参考に適当な k_1 を選定すれば, k_2 は(A.4)式より求めることができる. つまり l_1, l_2, l_3 のうちの任意の一つの値を決定(歩行機械のスケールを決めることに対応)しさえすれば, 残りのパラメータは(A.3)式から自動的に決まる. なお, $l_1 = 1$ としたとき歩幅 s は(A.5)式で近似的に与えられる.

$$s \doteq 4 \sqrt{\frac{2k_1^2}{(k_1^2 - 1)(k_1^2 + 1)(2k_1 + 1)}} \quad (\text{A.5})$$

したがって, k_1 が大きくなるにつれ s は漸近的に 0 に収束するため, 大きな k_1 を選定することは特策ではなく, $k_1 < 5.0$ 程度で十分である.