実用的 4 足歩行機械の開発に向けて

広 瀬 茂 男* 米 田 完*

1. ま え が き

本解説は、筆者らのこれまでの4足歩行機械の開発研究において実感するようになった歩行運動の特異性を整理し、実用化のために必要なメカニズム関連の技術的課題とその解決法等をまとめたものである。これらはあくまで筆者らの独善的見解であり、この分野で行われている他の研究者の優秀な研究を十分サーベイ出来ていないことをあらかじめお詫びしておく。

さて、歩行ロボットの開発研究は最近比較的多く行われるようになって来たが、実際に実用に供し得る歩行機械となると残念ながらこれまでほとんど実現されていないのが現状のようである。その理由は多く考えられる。技術的な側面では、たとえば、多自由度系を駆動するに適する軽量高出力な駆動系駆動源がまだ入手し難いこと、歩容（歩き方）制御法が未だ十分に解明されていないこと、歩行運動に必要なセンサ系の開発が不十分なこと、などが挙げられよう。しかし、このような技術的問題点の障壁の以前に、移動方法として歩行運動を利用すること自体の有効性がこれまで一般に広く認識されておらず真剣な開発努力がなかったことも、要因として大きいと思われる。

そこで本解説では、議論の前提として歩行運動を分類し、ついで実用性という観点から歩行移動の特徴を具体的に論ずる。また、歩行機械の形態決定の最大の問題点である脚本数についても、実用性という観点から検討する。さらに、歩行機械開発上の問題点としてエネルギー効率の向上を取り上げ、それを駆動系の構成によって向上する幾つかの方法論を論ずることとする。

なお、以降の議論では脚は床面と点接地するいわゆる理想脚移動機械¹⁾を前提の基本形とする。

2. 歩 行 の 種 類

歩行機械の特性と歩容制御を検討するためには、歩行

原稿受付 1993 年 3 月 1 日

Toward Development of Practical Quadruped Walking Vehicle

* 東京工業大学

の種類を明確化しておくことが必要である。そこで始めに歩行を安定維持法の観点から分類しておくことにする。

安定維持法からの歩行の一般的な分類法は歩行を「静歩行」と「動歩行」、そして「準動歩行」に分類するものであろう。ここで「静歩行」とは、その歩行の速度を低くしたと想定した場合でも静的安定が維持され計画通りの運動が持続できる歩行である。「動歩行」とは、対象とする歩行を動的効果を期待できない遅い速度で実現しようとするとき計画通りの歩行ができず転倒を始めてしまう歩行である。さらに「準動歩行」とは、歩行中に動歩行と静歩行が混在する歩行である。

さて、本解説ではこのような従来から使用されてきた歩行分類とは別に、「安全歩行」という概念も導入しておくことにする。安全歩行とは、歩行運動中に転倒運動が始まって回復不可能な転倒に発展せず静止立位姿勢を保持し続けられる歩行、と定義する歩行概念であり、ここで新たに提案するものである。安定歩行の具体的なイメージは、歩行中に歩行体の関節運動が停止した、つまり凍結(freeze)された状況を想定して説明しよう。

歩行体の関節運動が凍結されると、歩行体は転倒を始める。しかし、凍結の瞬間に重心が有する運動量と脚(地表に沿って進む遊脚も含む)の位置関係によっては、その転倒運動は回復不可能な転倒まで発展しないことがある。これは、運動凍結の瞬間の足先と重心をむすんで形成される多角錐が重心の周囲に位置ポテンシャルのバリアを形成し、重心の運動エネルギーがそのバリアを乗り越えない場合に生ずる。

このような安全歩行の概念は静歩行や動歩行の概念とは異質である。たとえば静歩行であっても、その移動速度が速い場合には凍結の瞬間に前方に転倒してしまうことがある。このような静歩行は安全歩行ではない。逆に動歩行であっても、遊脚が適当な位置でしかも地表すれすれに復帰動作を行っていれば、凍結時に始まる転倒がその遊脚の接地で防止されることもある。この場合の動歩行は安全歩行である。

安全歩行の概念は歩行機械による実用的な歩行を実現しようとする時有効と思われる。たとえば、動歩行は前

方地形環境についての完全な情報を持たない限り転倒を生じやすいと直感的に感じられる。しかし、動歩行が安全歩行であれば、まず適当な歩容計画に従って歩行させ、バランスを崩したらそのたびごとに試行錯誤的にその歩容を調整するというような歩行が行えるからである。このようなことから、本稿ではあえて安全歩行の概念を導入した。なお、実際の歩行機械に以上の議論を適用するには、足裏面積と足首関節の機構の効果も当然考慮すべきである。

3. 歩行機械の5大特性

歩行による移動機械が有する特有の機能性を実用性という観点からまとめてみることにする。それらは以下の5点に分類できると考えられる。

3.1 地表支持点の任意選択性

車輪、クローラは荒れ地をタイヤあるいは履帯で平滑化して移動する。それに対し歩行機械は、まず脚支持点を図1のように適応的に選択し、ついでそれらの間を補間するような軌道を生成し、胴体をそれに沿わせて移動を行う。このような移動方式をとるため、歩行機械は凹凸のはげしい不整地でも脚支持点を適当に選択することにより滑らかに移動できる。この効果は、比喩的にはサンプル値制御の有限整定応答の考え方に対応するとも言える。このことから、たとえば、瓦礫の山によじ登らなければならないパワーシャベルの移動装置として脚は最適である。その様子を図2に示す。

3.2 離散的な支持点を構成する機能

車輪、クローラは連続的な轍を残す。それに対し、歩行脚の接地点は離散的である。このような特徴を有するため、歩行機械は階段の昇降、地上の障害物の非接触なまたぎ越え、などの移動運動を容易に実現できる。

図2 山岳地の瓦礫の山に登る歩行機械

図1 歩行の凹凸面平滑化特性

畑でスイカを収穫するロボットを設計するとき、車輪で動き回ると地を這う鳶を切りやすい。図3のように脚を用いれば、鳶を避けながら畑を歩き回れるであろう。このような特性は支持点が離散的であることによってもたらされる。

3.3 接地面圧の低減化機能

脚機構の場合、足裏の接地面積を必要によっては大きくすることができ、また、足首の能動あるいは受動自由度によって足裏を地表形状に従って支持できる。このことから足裏の接地面圧は低減化でき、脆弱な地表面でも歩行機械の運動性は低下し難いと言える。

なお、沼地などの脆弱な地表面での移動に歩行が適することは、エネルギー効率の側面からも推測される。車輪は脆弱地表面では連続的な轍を残し土砂の変形のために大きなエネルギーを消費してしまう。それに対し、歩行機械は3.2、3.3の性質から土砂の変形を低く抑えることができ、移動時のエネルギー損失を低減化できるからである。ただし、長靴で沼地を歩くと長靴を毎回引き抜くの力がいる。そのため沼地では歩行運動は非効率であると感じる方も多いかもしれない。しかし、これは長靴を引抜く時長靴の下に負圧が生成され、足裏が吸盤のように引かれるためである。そのため、脚の引き上げ時に足

図3 スイカ収穫用歩行機械

裏に負圧を発生させない工夫などで、このような抵抗は軽減できるであろう。

3.4 無スリップ方向転換機能

クローラは3.3の接地面圧を低減化する特性は大きい、その場合方向転換などを行うと大きな滑りが生ずる。それに対し、歩行機械は足裏面積が広くても、足裏と地表面でスリップが生じない方向転換ができる。そのため歩行機械は脆弱面での移動に最適である。

たとえば、自然環境の破壊を最小限に抑えることが必要な土木機械、削き出しの鉄筋などの上を自在に動き回ることが必要な建築機械、畳や板の間などの傷つきやすい環境を動き回らなければならないホームロボットなどには、このような特性が有効に利用できるであろう。

3.5 確実に能動的な足場を構成する機能

移動機械が達成すべき機能は、ほとんどの場合、単なる移動だけではない。目的地に到着した後、そこで作業を行う足場となる機能も兼ね備えることが必要とされる。その点、歩行機械は静止時にその脚をロックすれば、地形に従った確実な足場を構成でき有効である。

車輪移動型の場合、静止作業時にはアウトリガーを伸ばして足場を構成する。サスペンションを有する車輪は確実な足場にならないからである。このような土木機械のアウトリガーが、もしも多自由度で油圧駆動される強力な脚であれば、それは移動のためだけでなく静止時にも足場と利用できよう。

さらに重要なことは、脚は単に静止した足場になるだけでなく、搭載した作業装置を能動的に駆動するパラレルマニピュレータとしても使用できる点である。我々が物をハンドリング作業をする場合、対象物が軽いものであれば上腕だけで作業する。しかし重い物の場合には、上肢は伸ばしきり力を生成しやすい特異姿勢に保持しながら下肢を2つとも並列に駆動することによって強力な力で作業することがある。これはまさに脚をパラレルマニピュレータと利用する例といえる。脚で支持される将来の土木機械は、脚力による強力な多自由度運動を行うことになるであろう。

4. 歩行機械の脚本数

実用的な歩行機械を構成しようとしたとき、脚の本数は何本が望ましいかをいくつかの側面から検討しておくことにする。

4.1 自由度の数

マニピュレータの場合には、駆動装置を基台部に配置しアーム部分だけを軽量化する設計も可能である。しかし移動機械は、駆動装置のみならずパワー源制御装置をすべて搭載し動き回らなければならない。そのため、そ

の駆動機構設計においては「軽量化」を達成することが著しく重要である。駆動系の自由度は、そのためできるだけ少なくすべきである。自動車は自由自在に動き回りが、考えてみるとその基本自由度はエンジンとハンドル操作の2自由度でしかない。

4.2 静的安定姿勢の実現性

写真機の三脚のように、静的安定姿勢を維持するには3脚以上の脚数が必要である。

4.3 静歩行の実現性

静歩行は3脚以上を支持脚とし、他の1脚以上を復帰動作させることで実現できる。よって静歩行のためには4脚以上が必要である。

4.4 動歩行、準動歩行、安全歩行の実現性

「動歩行」は1脚のホッピング歩行から実現できる。また、「準動歩行」は、歩行中に3脚以上の静的安定状態が含まれる歩行であり、これは3脚以上あれば実現できる。それでは「安全歩行」は最低何脚で実現できるだろうか。

0脚支持状態、つまり全脚で跳躍する歩行中の安全歩行は、3脚以上で実現できる。なぜなら、重心の運動速度と遊脚の床面からの浮上距離に応じて3脚を適度に広げれば空中で運動が凍結されても安定な着地ができ完全転倒を防止できるからである。1脚支持状態の安全歩行も、運動が凍結された瞬間の重心の速度から重心が動いてゆく方向を予測し、その方向に支持脚以外の遊脚2脚を復帰動作させておけば、歩行体は完全転倒しない。よって3脚以上で可能である。2脚支持状態ではその転倒運動は、2つの支持脚を結ぶ軸回りの回転運動に拘束される。よって検討する瞬間の重心の速度からどちら側に転倒するかを判定し、転倒側に遊脚1脚を配置しておけば完全転倒が防止できる場合がある。よって3脚以上で可能である。以上のことから、安全歩行はいずれにしろ3脚以上で実現できることがわかる。

4.5 総合評価

以上の議論から、歩行機械を実現する上での最適な脚数が分かる。脚本数は機構を単純化し軽量化するため少ないほど望ましい。しかし、実用上必要性が高いゆくりとした滑らかな移動を実現できる静歩行は4脚以上で実現できる。よって静歩行の実現性を考慮すると4脚が最適であることになる。本解説はそのため4脚を中心に議論する。

なお、3脚歩行機械は機構がより簡単であり、動歩行をしなければならないとしても安全歩行が可能であり、また静止時におけるアクティブな三脚足場を構成できるため、状況によっては実用性が高いと言える。そのため、今後積極的に検討すべき形態と考えられる。

5. 歩行のエネルギー効率

機械システムのエネルギー効率を向上するためには、駆動すべき対象の質量、摩擦などを減少すること以外に、アクチュエータの作動状態を最適に保持することが必要である。歩行運動のエネルギー特性を向上するためにもこれらの点を考慮することが必要である。以降これを、1) 負のエネルギー消費の防止（これはさらに、ポテンシャルエネルギーの側面と運動エネルギーの側面に分類される）と、2) インピーダンスマッチングの実施、の2つの側面から検討することにする。

5.1 負のエネルギー消費の防止

通常のアクチュエータは、外部からエネルギーが供給されブレーキをかけるような作動状態では、その供給されるエネルギーを回生 (regenerate) できない。もちろん、電車の駆動系のようにブレーキをかけると電動機が発電機になりエネルギーを回収できる回生ブレーキもあるが、通常のロボット用アクチュエータには見られない。我々の筋肉自体も回生機能がない。山を登る時だけでなく、山を下る時も疲れるのはそのためである。

アクチュエータがこのような特性を有することから、ある機械システムのあるサイクル動作を対象としたとき、そこで必要とされるエネルギーの総和がたとえゼロであっても、もしもどこかのアクチュエータが負のエネルギーを生成してしまうと、結果的にエネルギーが消費されてしまうという現象が生ずる。歩行運動には、ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの2つの側面にこの損失が生ずる。以降その現象と対策を述べよう。

a) ポテンシャルエネルギーの損失²⁾

歩行運動中にポテンシャルエネルギーが消費される現象を説明しよう。

図4(a)は、脚質量が無視できる歩行機械が自重を脚で支持しながら、水平に等速運動している様子である。図は胴体座標系で記述しており、脚が地面に対して床反力を受けながらスライドするように示されている。図4(b)はこの動作の間に腰 (hip) 関節と膝 (knee) 関節のアクチュエータが発生するパワーである。このパワーは自重に対応する床反力を支持するトルクと関節の回転方向の積で得られる。脚先端が AB 間と BC 間で出力パワーは正負に変動する。ただし、どの状態でも2つのアクチュエータが生成するパワーの和は常にゼロである。

さてこのような脚運動を、回生ブレーキを持たない通常のアクチュエータで駆動すると図4(b)に示す負のパワー領域の総和のエネルギーは、通常のアクチュエータで駆動されている限り熱となって消費されてしまう。注意していただきたいのは質量のない脚を振り、胴体を水

図4 歩行運動での負のエネルギー消費

平に等速度で移動するという一見物理的にはエネルギーを全く必要としないような運動の中にも、大きなエネルギーが失われてしまうということである。

このような現象が負のポテンシャルエネルギーの損失であるが、この損失は図5(a)のように重力方向の駆動系とそれと直交する方向の駆動系を分離する脚機構を導入することで防止できる。ただし、ここで垂直方向のアクチュエータは十分高い減速比を有するかセルフロック機構を有するとしている。図5(a)の機構では重力方向と水平方向の運動が分離されており、歩行中脚が自重を支持した後は垂直方向のアクチュエータはロックされて水平方向のアクチュエータのみで推進を行なう。こうすると負のパワー消費モードは生成せず上述の問題は回避できる。このような考え方を筆者は GDA (Gravitationally Decoupled Actuation) と呼んでいる。

この GDA の原理を生かしながら同時に関節型の可動範囲の広さを生じようとしたのが図5(b)(c)(d)などのパンタグラフ機構である^{2,3)}。図5(c)は、R, Q 点で機構全体が垂直軸回りに自在回転できるようにし、R, Q 点の3次元運動がP点の3次元運動に拡大できる3次元パンタグラフ機構、図5(d)はエバンス機構、動滑車などを用いた直動型の円筒座標パンタグラフ機構である⁴⁾。

b) 運動エネルギーの損失⁵⁾

(a) 直動機構

(b) パンタグラフ機構

(c) 3次元パンタグラフ機構

(d) 直動型パンタグラフ機構

図5 負のパワー消費を防ぐ機構

図6 運動・歪みエネルギー変換機構

脚は高速に加減速運動を行う。そのため、減速時に負の運動エネルギーを散逸する。このような問題は、脚を減速する時にその運動エネルギーを他の形態のエネルギーに変換し保存する機構を導入することで対処できる。

減速時のエネルギーをポテンシャルエネルギーに変換し持続的な往復運動を実現するものの代表例としては「振り子」がある。実際振り子型のエネルギー保存脚機構も試作されたことがある³⁾。しかし、この場合は、脚は正弦的な加減速運動しかできない、脚に不必要な質量が必要である、移動速度が固有振動数に限定される、などの問題がある。

減速時のエネルギーを、スプリングの歪みエネルギーに変換する考え方を図6に示す。脚質量がスプリング付き反射板に当たると方向を変える系である。これによれば脚は通常等速運動を行い、脚の振り巾は反射板の間隙を変化して調整できる。具体的な機構案を図7に示しておく。

サーボモータにより脚が左の方向に速度 v で運動しているものとする。このとき脚を停止する動作は、まずサーボモータの指令値をゼロにしてクラッチを接続する。こうするとスプリングが捻られ運動エネルギーが吸収されて減速してゆく。回転が停止したタイミングでブレーキを入れる。逆に右方向に動かす動作は、ブレーキを解除して脚を右側にスプリングで加速し、最高速になったときにクラッチを解放し、あとはサーボ制御を行う。この機構では、停止位置が厳密には決らないが脚の運動制御には十分であろう。ワンウェイクラッチを用いたより現実的な機構については文献5)を参照されたい。

5.2 インピーダンスマッチング

脚の1サイクル運動中の特に垂直方向の運動には、2つの大きく異なる動作モードが必要とされる。つまり、大きな力を必要とするが速度は小さくてよい自重支持モードと、1脚を振るだけの小さな力でよいが速度が大きくなければならない遊脚モードである。歩行機械はこの2つの動作モードを高速に切り替えて歩行する。このモードの切り替えは、駆動系減速機の減速比を負荷感応型にして行えばよい。しかし、これまでの無段変速機は重すぎ、高速で高頻度の切り替えは出来なかった。そこでここでは2つの考え方を紹介しておくことにする。

第1の考え方は、新しい無段変速機を実現するもので

図 7 運動エネルギー保存型脚駆動機構の例

ある⁶⁾。図 8 は回転を直動運動に変換する系に 負荷感応型の変速機構を導入した例である⁶⁾。小パイプと大パイプの間にローラを図のようにスプリングで斜めに装備する。両パイプ間に圧縮力が働かない状態で両パイプ間を回転するとローラの傾斜度は大きく保たれ、速い直動運動が生成されるが、圧縮力が働くとローラの傾斜度は少なくなり低速で高出力の直動運動が生成される。このような無段変速機構は、トラクションドライブであるため負荷荷重を高く出来ない問題はあるが、単純で応答性がよく脚の駆動系以外に広い分野で応用できるであろう。

第 2 の考え方は、無段変速をあきらめて 2 段変速のみを行うものである。実はこのような駆動機構は生体においても観察できる。焼き魚を思い出して頂きたい。魚には赤身のある赤色筋と白身の白色筋がある。このうち赤色筋は、回遊などの運動で主として使用され、白色筋は敵の攻撃を回避するなどの急激な運動に使用されている。このような考え方を機構的に実現することは、高減速比のモータ A と、低減速比のモータ B の 2 種類の駆動系を使用して可能である。ただしこの場合、低速高出力運動をモータ A で行うときモータ B が連結されていても邪魔にはならないが、高速低出力運動をモータ B で行うときモータ A が連結されているとモータ A が負荷となってしまふ。そのため、モータ A はクラッチで脱離出来るようにしなければならない。このようにして構成した 2 段変速駆動系は TITAN VI に実際に使用され、その有効性は検証されている⁴⁾。

図 8 負荷感応型直動機構

6. あとがき

実用的な 4 足歩行機械を実現させるために必要と思われる諸問題を整理した。4 足歩行機械は明らかに実用的になり得ると筆者らは確信している。今後より多くの方々がこの方面の開発研究に興味を持たれ、実用化を加速してくれることを期待したい。

参考文献

- 1) 日本ロボット学会編：ロボット工学ハンドブック（コロナ社），357（1990）。
- 2) 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，東京大学出版 pp. 242-250，1980。
- 3) Waldron, K. J., and Kinzel, G. L.: The relationship between actuator geometry and Mechanical Efficiency in robots, Proc. 4th Ro. Man. Sy. Symp. Elsevier, 366-374 (1981)。
- 4) Hirose, S., Yoneda, K., Arai, Ibe : Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN VI, Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics, pp. 723-738, (1991)。
- 5) 広瀬：エネルギー保存型制動機による歩行機械の駆動性向上，第 7 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，341-344（1989）。
- 6) 広瀬，本間，松沢，早川：パラレルリンク歩行ロボットの提案と基本的歩行実験，第 6 回知能移動ロボットシンポジウム論文集，7-14（1992）。

広瀬茂男 (Shigeo HIROSE)

1947 年 12 月 6 日生。1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程卒。工学博士。同年同学機械物理工学科助手。1979 年同学助教。1992 年同学教授。現在に至る。ロボットの機構，センサ，制御の研究に従事。（日本ロボット学会正会員）

米田 完 (Kan YONEDA)

1961 年 10 月 16 日生。1985 年東京工業大学理学部物理学科卒，1987 年同大学院修士課程物理工学専攻終了，1989 年同大学院博士後期課程機械物理工学専攻中退，同年同学機械物理工学科助手，現在に至る。センサシステム，移動ロボットの研究に従事。（日本ロボット学会正会員）