

4 足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成

広瀬 茂 男* 米 田 完*

Dynamic & Static Fusion Control and Continuous Trajectory Generation of Quadruped Walking Vehicle

Shigeo HIROSE Kan YONEDA

The mobile robot based on the quadruped walking has specific characteristics, such as the ability to form an adaptive and active base in standstill posture, to make slow but smooth statically stable walking, and to make bumpy but fast dynamically stable running. This paper discusses to exhibit these advantages by introducing a new concept of the gait control named dynamic and static fusion gait, which covers from statically stable to dynamically stable walking. The gait is shown to realize by introducing a generalized trot gait which unifies crawl and trot gait, and a sideways sway compensation trajectory which sway the center of the gravity of the body to lateral direction to realize dynamic stability.

The paper elaborates the algorithm to generate the continuous trajectory of the center of gravity of the body and the foot. The walking experiment is done by using test constructed walking vehicle model TITAN IV and the continuous acceleration locomotion from standstill to dynamic walk of up to 400 mm/sec is shown to realize.

Key Words : Quadruped Walking Vehicle, Dynamic and Static Fusion Gait, Generalized Trot Gait, Sideway Sway Compensation Trajectory, Wave Exchange Point

1. ま え が き

4足歩行機械は、不整地であっても静止した安定な足場を構成する機能、静歩行（常に静的安定性を保持する歩行）によってゆっくりとしているが滑らかな移動を行う機能、動的歩行（動的安定性を保持する期間を含む歩行）によって振動的だがより高速な移動を行う機能などを有する。これらの機能を自在に選択できれば、4足歩行機械は今後多くの分野で実用的に利用できると思われる。本研究は、このような静止状態から高速歩行状態までの歩容を状況に応じて自在に選択することを可能にする歩容制御系の構成法を論ずるものである。

従来4足歩行機械の歩容制御法については、静歩行については筆者らのいくつかの研究がある¹⁻⁴⁾。動的歩行

については三浦、下山、木村⁵⁾、Raibert⁶⁾、古荘ら⁷⁾による先駆的な研究がある。しかし、静止状態から静歩行、そして動的歩行までを自在に選択できるようにし、連続的な推進速度の切り替えを可能にする4足歩行機械のための歩容制御法を「静動融合歩容」と呼ぶことにすると、このような静動融合歩容に関する研究は従来まったく行われていないことがわかる。

静歩行と動的歩行を切り換えることは一見簡単に思われる。しかし、歩容を替えながら歩行速度を連続的に変化するには、離散的なシーケンス運動である脚運動を接地面と不要なスリップを生成しないように正しいタイミングで切り換えてゆくことを必要とし、それほど簡単ではない。

そこで本研究では、これまで著者らが文献8)から9)までにおいて部分的に検討してきた考え方を整理統合し、また新たな歩容制御概念も導入することで静動融合歩容

原稿受付 1990年2月16日

* 東京工業大学工学部

の生成法をできるだけ体系的に論ずることにする。

本論文では、第2章で4足歩行機械の動的歩行を工学的に実現する上ではトロット歩容に基づく動的歩容の生成法が望ましいことを指摘し、クロール歩容とトロット歩容を統一的に表現できる拡張トロット歩容の提案、フィードフォワード的に胴体重心の軌道を修正する左右揺動補償の提案を行う。第3章でこれらの概念に基づく静動融合歩容の全生成システムを示す。第4章では左右揺動補償軌道、第5章では遊脚の連続軌道の具体的な生成アルゴリズムをそれぞれ論ずる。最後に第6章で、これらの考察の有効性を4足歩行機械モデル TITAN IV の歩行実験で検証する。

2. 基本歩容概念

静動融合歩容を検討してゆく準備として、基礎となるいくつかの歩容概念を論じておくことにする。

2.1 基準動的歩容としてのトロット歩容

一般に4足歩行機械の移動速度は、脚の最大振り速度を V 、デューティ比を β とするとき、

$$V_G = \frac{1-\beta}{\beta} V \quad (1)$$

と示される¹⁰⁾。ただし、ここでは脚の加減速時間や上下動に必要とする時間は無視している。一方、歩行時の安定余裕を高めるためには、デューティ比 β は大きくしておき脚をできる限り支持脚状態に保つべきである。そのため、ある移動速度を得るためには、(1)式から脚のサイクル運動の遊脚相を最大振り速度 V に設定し、デューティ比 β をできるだけ大きな値に保つようにして歩行することがよいことがわかる。

β が1であると静止状態を示す。 β が1から減少していくと、 $\beta=0.5$ までは移動速度が増大してゆき $\beta=0.5$ で最大速度 $V_G=V$ が得られる。 β を0.5より小さくし

ても移動速度 V_G の最大値は V より大きくできない。そのため以降の歩容決定は $1 \geq \beta \geq 0.5$ の範囲でデューティ比を調整するものとする。周知のように $1 > \beta \geq 0.75$ の範囲内では静歩行が行える。そして静歩行の基準歩容はクロール歩容である¹³⁾。

$0.75 > \beta \geq 0.5$ の範囲では2脚支持期が必ず生じ動的歩行が必要となる。2脚支持状態での動的歩容は6組、左右対称性を考えると3組存在する。これらはトロット歩容、ベース歩容、バウンド歩容と呼ばれている¹¹⁾。

これらの歩容の説明のため $f\bar{f}r\bar{r}$ という記号を使用する³⁾。ここでは f はある指定された前脚、 \bar{f} は f に対し左右逆側の前脚、 r は f 側の後脚、 \bar{r} は f と左右逆側の後脚を示す。この記号によるとトロット歩容は $f\bar{r}, \bar{f}r$ の組合せ、ベース歩容は $fr, \bar{f}\bar{r}$ の組合せ、バウンド歩容は $f\bar{f}, r\bar{r}$ の組合せを同時に動かす歩行であると言える。

これらのうちトロット歩容は以下に示す2つの特徴により、4足歩行機械の動的歩行の実現に特に重要であると考えられる。

トロット歩容の第1の特徴は動的歩容を行なう時の安全性の高さである。Fig. 1の様なトロット歩容においては歩行機械全体は支持脚 f, \bar{r} を結ぶ直線(以降支持脚対角線と呼ぶ)を回転軸とする倒立振り子になる。このため転倒のモードは、支持脚対角線まわりの回転のモードのみに束縛される。一方、遊脚 \bar{f} あるいは r は地表面に沿って復帰動作を行なっている。そのためたとえ転倒が生じたとしても、どちらかの遊脚がタイミングがずれて接地するだけで完全に転倒してしまうことが防止できる。またトロット歩容は動的歩行であるが、2脚支持相を切り替える瞬間には一瞬4脚支持相が形成される。そのため発生した姿勢の乱れはこのとき修正できる。

この特性はトロット歩容による動的歩行の実現を予想外に単純化する。なぜなら、ある軌道運動を実現すると

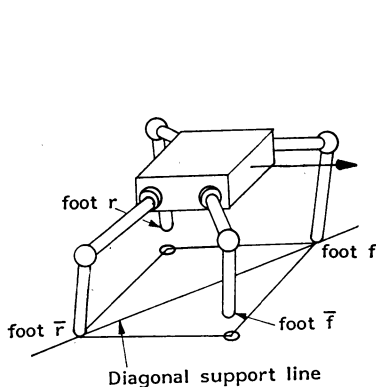


Fig. 1 Quadruped walking vehicle and its notations

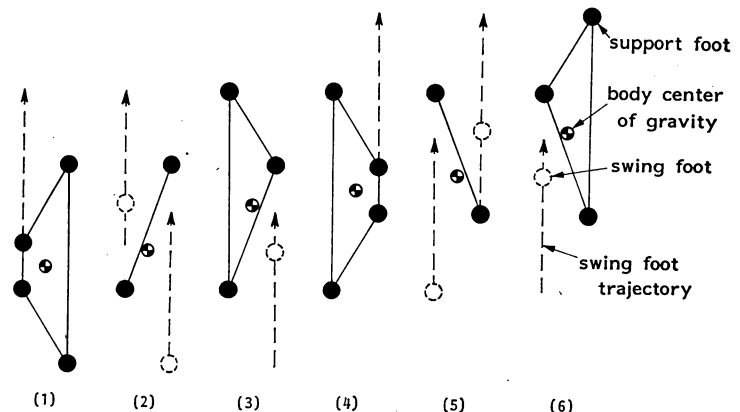


Fig. 2 An example of crawl gait in case of $\beta=0.6$

きまずフィードフォワード的に胴体の軌道運動を補償する。これだけでも歩行は十分持続できると考えられるが、もしも地表の凹凸などの影響で歩行パターンが大きく乱れた場合には、それを姿勢センサや足先の力センサで実時間で検出し、フィードバック的に修正する。という2段階の制御系の構成を可能にするからである。

なお、ここでの議論ではすべて足裏の面積は考えず点接地しているとしている。足裏の面積がある場合本論文で導入した歩容はその分より安定に実現できることになる。

トロット歩容の第2の特徴はクロール歩容との整合性の良さである。この点については次節で論ずる。

以上の様な理由から、本研究ではトロット歩容を4足歩行機械動的歩行の基準歩容として考えることにする。

2.2 拡張トロット歩容

静歩行と動的歩行を歩行速度に応じて自動的に選択できるようにするためには、クロール歩容とトロット歩容を共通する一つの歩容概念に統合化しておくことが望ましい。そのため「拡張トロット歩容」と呼ぶ歩容を新たに導入することにする。

導入する拡張トロット歩容の内容は、「ウェーブ切替点」と「ウェーブ」という新しい概念を使用して説明する。ウェーブ切替点とは、クロール歩容あるいはトロット歩容において後脚が復帰動作を完了した時点である。またウェーブとはウェーブ切替点の間の期間である。一般に、クロール歩容、トロット歩容ともウェーブ切替点は1サイクル運動中2回形成される。またウェーブ切替点では一瞬4脚が台形をなす台形脚配置が構成される。例えば Fig. 2 はデューティ比 $\beta=0.6$ のクロール歩容であるが、ここでは(1)(4)の2カ所で台形脚配置が形成されている。このようなウェーブとウェーブ切替点の定義を用いると $1 > \beta \geq 0.5$ の範囲のクロール歩容からトロット歩容に至る歩容は統一的に以下のように表現できる。

「後脚 r の復帰動作完了で始まるウェーブにおいて、前脚 l はそのウェーブの開始点で遊脚化を開始し(1-

β) T 時間後接地する。また、後脚 r はそのウェーブの終了時点でちょうど接地するように、終了地点の $(1-\beta)$ T 時間前から遊脚化を開始するというようにして生成される歩容。」ただしここで、 T は歩行の1サイクル時間である。

このような定義によると、 $\beta=0.75$ の場合は典型的なクロール歩容となる。また、 $\beta=0.5$ ではトロット歩容となる。つまりクロール歩容からトロット歩容までが統一的に表記できたことになる。このような歩容を以降拡張トロット歩容と呼ぶことにする。

2.3 胴体重心の左右揺動補償軌道

拡張トロット歩容による動的歩行を行なうとき、フィードフォワード的に与える胴体重心軌道の補償法を検討することにする。

x 軸を指令軌道とするような $\beta=0.5$ のトロット歩容を考えよう。このとき支持脚対角線が地表に残すパターンは Fig. 3(a) のように斜めに交差を繰り返すものとなる。このようなトロット歩容では、転倒することなく単に歩行を続けることが目的であれば、胴体重心の動的制御は必ずしも必要ない。このことは第2.1節でトロット歩容の安定性としてすでに論じた。

ただし、指令軌道をそのまま追従しようとする、歩行機械の胴体は支持脚対角線回りの倒立振子的な計画外の運動を繰り返すことになってしまう。そのため支持2脚を切り替えるごとに、遊脚が計画したタイミングと異なる時点で接地し、胴体が不必要に振動してしまうことになる。この不具合を無くし、動的歩行中においてもなめらかな運動を生成できるようにするには、指令された胴体重心の軌跡をあらかじめ補償しておくフィードフォワード制御が有効である。この制御法を検討するため、ここでは ZMP(zero moment point)¹²⁾ の概念を導入することにする。

ZMP とは以下のように定義されている。歩行体が水平面上を移動しており、その脚には床から力 F とモーメント M の組合せから成る床反作用力が作用しているとする。この時、ZMP とは床面上のある作用点であり、その床反作用力のうちのモーメント M の水平面内成分が

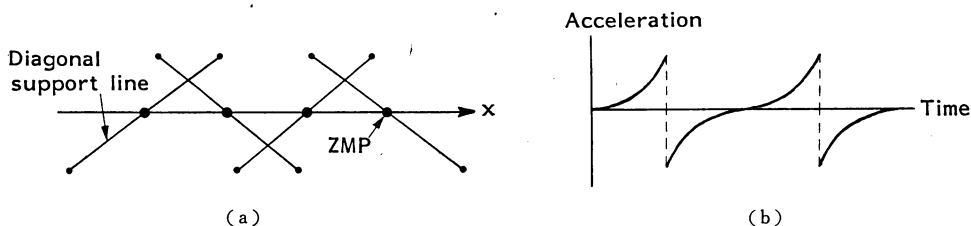


Fig. 3 A body motion example to keep the ZMP on diagonal support lines by forward and backward acceleration

ゼロになる点である。

ZMP を考慮して指令された胴体重心の軌道を補償するという事は、ZMP が支持脚に囲まれる領域に常時入ることを保証し、しかも胴体運動を出来る限りなめらかに保つような胴体軌道の生成を意味している。これらの補償軌道は多くの手法で生成できる。それらは、胴体重心の3方向の加速運動と3軸まわりの角速度運動のいずれか、あるいはそれらの組み合わせを調整するものである。

これらの補償軌道の中で、最も基本的なものが Fig.3 である。これは胴体重心軌道の上下左右の2方向運動、そして胴体の3軸回転運動は指令された通りに保ち、進行方向(x 軸方向)への加減速運動のみの補償で ZMP を支持脚対角線に乗せようとするものである。なお、Fig.3 の例では指令された胴体軌跡は x 軸に沿う直線運動であり、胴体の回転運動はないと指令されているとしている。そして Fig.3(a) は指令軌道と ZMP, Fig.3 (b) は補償運動を行うときの胴体重心の x 軸方向の加減速パターンである。

この手法では、補償軌道は指令された軌道と一致する。しかし、軌道に沿った加減速パターンがかなり大きく変動するという欠点を有している。それは、Fig.3(b) に示されているように4脚設置した瞬間の台形脚配置状態で、胴体重心の加減速の方向を完全に切り換えなければならないためである。

より望ましい胴体重心の軌道制御法として、本論文では Fig.4 に示す手法を提案する。これは、左右方向(y 軸方向)の加速度のみを調整し、左右方向に揺動する補償軌道を生成するものである。なお、Fig.4(a) の破線は補償軌道、実線はそのときの ZMP 軌道である。Fig.4(b) はこの補償軌道の左右方向の加減速パターンである。この歩行は、重心軌道を進行方向に対して左右に揺動させるものであるため、以降「左右揺動補償」と呼ぶことにする。左右揺動補償の特徴は以下の通りである。

1) 加速度変化が、Fig.3 の手法より連続的で平滑である。そのため、たとえば移動速度をゼロに近づけてゆ

く極限状態を考えると、Fig.3 の手法ではストライド(脚の復帰幅)を無限に短くしてゆかなければならないが、左右揺動補償軌道の場合には有限ストライドの静歩行が実現可能となる。

2) 胴体重心の高さをある程度とり、左右方向の足の接地幅を狭くすると、左右への揺動が少ないほとんど直線的な歩行ができる。馬などの哺乳動物はこのような形態的な特徴を有しており、このことで滑らかな Trot 歩行を実現しているものと考えられる。

これらのことから、以降動的歩行実現のためには左右揺動補償を行うことにする。

3. 静動融合歩容の制御システム

導入した拡張 Trot 歩容と左右揺動補償を用いた静動融合歩容は以下に示すようなシステム構成で実現できると思われる。このうちのレベル A とレベル C の一部は、すでに提案した静歩行のための歩容制御システム³⁾と同じであるが、レベル B は異なった構成となっている。

1) レベル A

最上位指令系であり、歩行機械が移動すべき方向、速度、移動姿勢などの指令をある程度遠距離まで予測的に生成する制御系。

2) レベル B

歩行機械が現在ウェーブ W_k を実施中であり、その終了時のウェーブ切替点 WE_k での胴体重心の位置、速度、姿勢そして足先位置が既知である状況において、次のウェーブ W_{k+1} での脚運動を立案する系。このレベルは以下のように2つに分けられる。

レベル B₁

計測した前方の地図情報と照合することにより、次のウェーブ切替点 WE_{k+1} での胴体重心の位置、速度、姿勢そして足先位置の決定と、ウェーブ W_{k+1} でのデュティ比 β の決定を、対地適応性と歩行効率を最適化しながら実施する系。

レベル B₂

既知となったウェーブ切替点 WE_k と WE_{k+1} の情報を基に、ウェーブ W_{k+1} の全区間における脚の運動計画

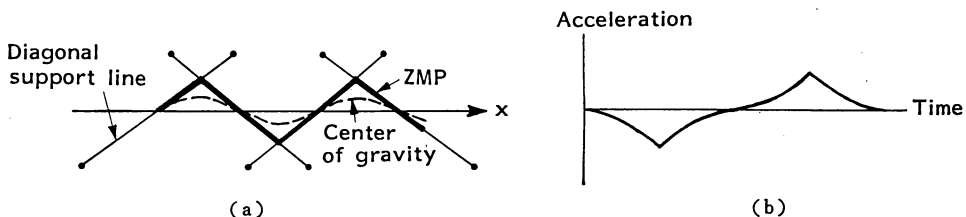


Fig.4 Proposing body motion to keep the ZMP on diagonal support lines by sideways undulation

を立案する系。その手順は以下の3段階から構成されている。

- a) 動的安定を生ずるために必要な、胴体重心がたどるべき左右揺動補償軌道を絶対座標系上で計画する系。
- b) WE_k , WE_{k+1} の足着地位置を絶対座標系上で滑らかに結ぶような遊脚の復帰軌道を計画する系。
- c) 最後に上述のそれぞれの計算結果を胴体座標系に表記し直し、各脚アクチュエータへの軌道目標値を生成する系。

3) レベル C

胴体姿勢の制御、振脚中の脚の障害物との接触を回避する動作のための制御などの反射的運動を生成する系。これは振脚運動中常時実施される。動歩行実施時には、センサフィードバックによる動的平衡調整もこの系で行われ、動的安定性の維持が計られる。

本論文では、静動融合歩容のための制御システムが以上のように構成されたと考え、レベル B_2 での処理法を論ずる。その他のレベルにおける処理法は、紙面の制約の関係で別稿で改めて論ずることにする。

なお文献 3) の静歩行のための歩容決定法では、デューティ比 β の範囲を $1 > \beta \geq 0.75$ とし、常時静的安定を維持する条件下で歩容を選択していた。そのため歩容選択の自由度が少なく移動速度が低く抑えられてしまう問題を有していた。これに対し、本論文で提案する歩容決定法は、 $1 > \beta \geq 0.5$ の範囲で重心が支持脚多角形（2脚支持の場合は線分）から外に出る歩容も認め、その場合には動的安定性保持のための補償軌道を生成する方法になっている。この点ではるかに歩容選択の可能性が高く、また高速化しやすい歩容決定法であると言える。

4. 胴体重心の左右揺動補償軌道

4.1 前提条件

レベル B_2 で立案する胴体重心の左右揺動補償軌道の詳細を論ずるため、まずいくつかの前提条件を示しておくことにする。

i) 既知パラメータはウェーブ W_{k+1} での胴体重心の目標軌道、この区間でのデューティ比 β 、静歩行と動歩行の実施期間、そしてウェーブ切替点 WE_k と WE_{k+1} での胴体重心の位置、速度、姿勢、そして足先位置である。

ii) 胴体重心の目標軌道は、地表面から高さ H の水平面上をたどる直線軌道であり、胴体の方向は変動しないものとする。より一般的な自由曲線の目標軌道が指令された場合の議論は議論が煩雑になるので別報で行うことにする。

iii) 胴体重心の目標軌道に沿った方向の加速度は、ウ

ェーブ W_{k+1} の期間では一定であるとする。

iv) 胴体重心が y 軸方向に生ずる補償軌道の速度は、ウェーブ W_{k+1} の期間で連続的に変化するものとする。

v) 脚の振り運動が胴体に及ぼす動的効果は第1近似として無視する。これは胴体と脚の運動計画を独立して行うことで補償軌道計算の演算アルゴリズムを著しく単純化できること。また、この近似による ZMP の変動誤差のオーダーは、筆者らの試作した機械モデルの諸元の場合、足先移動量の約 3% 程度であり比較的小さく⁹⁾、本制御系は最終的には軌道のフィードフォワード補償だけでなく、レベル C のフィードバック的な動的平衡調整と組み合わせることを目標としているため、将来的にはあまり問題にならないと考えられるためである。

vi) 左右揺動軌道を論ずるための基準座標系であるウェーブ座標系 Σ_w は、原点をウェーブ切替点 WE_k における目標軌道上の点とし、目標軌道を x 軸とするように設定する。また、この座標系上には Fig. 5 のようにウェーブ W_{k+1} 初期の静歩行期間、中期の動歩行期間、そして終了期の静歩行期間をそれぞれ第1, 2, 3相と名付けて設定しておく。また、支持脚対角線もその座標系上に設定しておく。

4.2 左右揺動補償軌道の接続条件

3つの相に分類される単一ウェーブ区間での左右揺動補償軌道は以下のような考え方で接続する。

第1相、第3相の軌道運動は、境界条件を満足する範囲内ならば任意に設定できる。しかし、このうち第1相の補償軌道を直前のウェーブとの連続性まで考慮して設定しようとする、指令された歩容指令によっては大きく屈曲した軌道が生成され、ZMP が静的安定領域を外れることがある。このことはいくつかのシミュレーション実験で明らかとなった。またそのような補償軌道を生成しようとする演算がかなり複雑になってしまう。

ところが拡張トロット歩容では、すでに指摘したよう

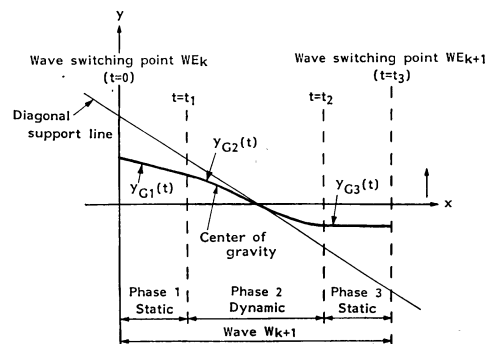


Fig. 5 Trajectory planning of body's center of gravity

にウェーブ切替点で一瞬4脚支持状態が形成される。そのためその時点では若干ZMPが変動しても安定性が大きく悪化してしまうことは防止できる。そこで第1相の初期状態(ウェーブ切替点 WE_k)においては特に速度の連続性は考えず、できるだけ単純な補償軌道を選択することにする。

一方、第3相についてはウェーブ切替点 WE_{k+1} 以降の運動はまだ未知である。そのため第3相の終了条件はその進行方向は目標軌道に沿うようにし、次のウェーブでどの方向に軌道を修正するとしてもできるだけ平均的に対応できるように準備しておくべきである。またその軌道もできるだけ簡単化し演算を高速化すべきである。

さらに、これらの歩容決定法は静歩行が出来る状況、つまり第2相が狭くなった場合には自動的に目標軌道をたどり、常に動的安定保持を行なう歩容では自動的に第2相のみが生成されるものが望ましい。

以上のような立場で、左右揺動補償の y 軸方向の軌道運動計画をまとめると以下のようになる。

1) ウェーブ W_{k+1} の第1相では、 y 軸方向の運動は等速とする。

2) 第2相の y 軸方向運動は、初期条件を第1相の速度と等しくし、終端条件を y 軸方向速度がゼロとなるようにする。そして、 x 軸方向速度と同期して運動することでZMPが支持脚対角線に乗るようにする。

3) 第3相での y 軸方向速度はゼロに保持する。

4.3 左右揺動補償軌道の生成

以上の考察を考慮した左右揺動軌道の具体的な生成手順は以下の通りである。

まず、胴体重心の進行方向(x 軸方向)の座標は前提条件の iii) から第1, 2, 3相すべてにおいて、

$$x_G = V_{x0}t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (2)$$

と与えることにする。ここで、初速度 V_{x0} はウェーブ切替点 WE_k での胴体重心速度である。加速度 α は与えられたウェーブ切替点 WE_k と WE_{k+1} の速度とその間の経過時間から計算される定数である。

各相での胴体重心の y 方向座標は以下のように求める。第1相の胴体重心の y 座標 $y_{G1}(t)$ ($t=0 \sim t_1$) は、前節の 1) から

$$y_{G1}(t) = y_{G0} + V_{y0}t \quad (3)$$

と与える。ただし y_{G0} はウェーブ切替点 WE_k での重心の y 座標である。また、 V_{y0} は設定する初速度であり、ここでは未知数である。

第2相の胴体重心の y 座標 $y_{G2}(t)$ ($t=t_1 \sim t_2$) は、ZMPを支持脚対角線の上に乗せる条件で求める。一般に、前提の ii) から胴体重心が $P_G(x_G, y_G)^T, \dot{P}_G, \ddot{P}_G$ の運動を

行なうとすると、地表面上のZMPの座標 $P_Z(x_Z, y_Z)^T$ は

$$P_Z = P_G - A \cdot \ddot{P}_G \quad (4)$$

ただし、 $A = (H/g)$

H : 重心の高さ

g : 重力加速度

となる。よって第2相で胴体重心の y 方向加速度が \ddot{y}_{G2} (t) であるとき、ZMPの軌道は

$$P_Z(t) = \begin{bmatrix} x_Z(t) \\ y_Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{x0}t - A\alpha + \frac{1}{2}\alpha t^2 \\ y_{G2}(t) - A\ddot{y}_{G2}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。一方、支持脚 $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$ を結ぶ支持脚対角線は、

$$y_z(t) = y_a + \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} (x_z(t) - x_a) \quad (6)$$

である。

以上のことから、ZMPを支持脚対角線に保つような胴体重心の y 座標 $y_{G2}(t)$ は、(5)式を(6)式に代入して誘導される微分方程式の解として求まり、

$$y_{G2}(t) = C_1 \exp(t/\sqrt{A}) + C_2 \exp(-t/\sqrt{A}) + B_2 t^2 + B_1 t + 2AB_2 + y_{z0} \quad (7)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} V_{x0}, \quad B_2 = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \cdot \frac{\alpha}{2} \\ y_{z0} &= y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} (A\alpha + x_a) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。ここで、 C_1 と C_2 は未知の定数である。

さらに第3相では、前節の3)から左右方向速度 $\dot{y}_{G3}(t)$ ($t=t_2 \sim t_3$) をゼロに設定するので

$$y_{G3}(t) = Y_{G3} \quad (9)$$

となる。ここで Y_{G3} は未知の定数である。

以上、(3)(7)(9)式に含まれる未知の定数は合計4つであった。これらの未知定数は、前提iv)の左右方向運動の連続条件を満足するため、時刻 t_1, t_2 について以下の4つの関係が成り立つことで誘導できる。

$$y_{G1}(t_1) = y_{G2}(t_1) \quad (10)$$

$$\dot{y}_{G1}(t_1) = \dot{y}_{G2}(t_1) \quad (11)$$

$$y_{G2}(t_2) = y_{G3}(t_2) \quad (12)$$

$$\dot{y}_{G2}(t_2) = 0 \quad (13)$$

誘導した結果を以下に示す。

$$\begin{aligned} C_1 = & - \left\{ \sqrt{A} (2B_2 t_2 + B_1) \left(1 + \frac{t_1}{\sqrt{A}} \right) \exp \left(\frac{t_2 - t_1}{\sqrt{A}} \right) \right. \\ & \left. - B_2 t_1^2 + 2AB_2 + y_{z0} - y_{G0} \right\} \\ & / \left\{ \left(1 + \frac{t_1}{\sqrt{A}} \right) \exp \left(\frac{2t_2 - t_1}{\sqrt{A}} \right) \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{t_1}{\sqrt{A}} \right) \exp \left(\frac{t_1}{\sqrt{A}} \right) \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

$$C_2 = C_1 \exp\left(\frac{2t_2}{\sqrt{A}}\right) + \sqrt{A}(2B_2t_2 + B_1) \exp\left(\frac{t_2}{\sqrt{A}}\right) \quad (15)$$

$$V_{y0} = \frac{C_1}{\sqrt{A}} \exp\left(\frac{t_1}{\sqrt{A}}\right) - \frac{C_2}{\sqrt{A}} \exp\left(\frac{-t_1}{\sqrt{A}}\right) + 2B_2t_1 + B_1 \quad (16)$$

$$Y_{G3} = y_{G2}(t_2) \quad (17)$$

誘導した胴体重心の左右揺動軌道は支持脚の座標 P_a , P_b や胴体の進行速度が変化してもそれに対応した胴体重心軌道を生成することを可能にする汎用性のある歩容生成法であるといえる。

例として直線上の目標軌道をたどり、静止状態から最高歩行速度 400mm/sec まで一定加速度で加速するような運動を指令されたとき、生成される胴体重心の左右揺動補償軌道を Fig. 6 に示す。Fig. 6 から加速するに従って自動的に β の小さい歩容がされ、動的歩容に入ると左右揺動補償を始め、次第にその振幅が大きくなってゆくことがわかる。

5. 遊脚運動の連続軌道生成

5.1 前提条件

レベル B_2 での遊脚連続軌道の生成法を検討するため、いくつかの前提条件を検討しておくことにする。

1) 上位指令系から、遊脚を始める時点と接地時点での足先の絶対座標位置は与えられているとする。本論文では x 軸方向水平直進運動を考察するため、これは x 方向のストローク長さ λ が与えられていることに相当する。遊脚期の時間 T_s 、遊脚の最大振り上げ高さ H^* も指令されているとする。

2) 遊脚が上下方向 (z 軸方向) および水平方向 (x 軸方向) に出し得る運動はその最大加減速度が機構的条件から規定され、それぞれ α_z, α_x であるとする。

3) 最大振り上げ高さ H^* は、障害物回避特性を向上するため遊脚中できるだけ長時間保持することにする。

4) 遊脚開始時 (以下 up 相と呼ぶ) および終了時 (以下 down 相と呼ぶ) においては Fig. 7 のように脚を地面に対して垂直に運動させる期間を設ける。これは、外乱により着地のタイミングが多少前後しても着地位置

が大きく変化しないようにするためである。この垂直移動距離は up 相で H_u 、down 相で H_d とする。

5) down 相を開始する高さは Fig. 7 に示すように接地推定高さの $H_d/2$ であるとする。これは、接地推定高さの上下に距離 $H_d/2$ の垂直上下動部分を設けることにより、地表の最大距離 $H_d/2$ の予知できなかった凹凸を吸収するためのものである。ただし、この上下運動期間はタイミングの余裕を与えるためだけのものであり、実際の歩行では足先が接地したら瞬間に z 方向速度は支持脚モードに切り換えるものとする。

6) x 軸方向の最大振り速度 v_r は、遊脚軌道計画の結果の1つとして生成される。ただし、上位指令系からの歩容計画においては、この値が機構的な制限を越えないようにあらかじめ余裕を持って計画されているものとする。

5.2 具体的生成法

これらの前提の基に遊脚軌道は以下のように生成する。まず、Fig. 8(a)(b) のように z 軸方向および x 軸方向それぞれについて速度線図を設定する。ここで、 z 軸方向には、高さ H^* まで脚を最短時間で上昇させるため、時刻 t_{z2} の間に最大加速および最大減速運動を同一時間 ($t_{z2} - t_{z1} = t_{z1}$) 行う。下降時は時刻 t_{z3} から時刻 T_s まで最大加速および最大減速の運動を同じく同一の時間 ($T_s - t_{z4} = t_{z4} - t_{z3}$) 実施し、 $H^* + H_u$ の距離降下させる。

x 軸方向は、最大加速、等速 (速度 v_r)、最大減速という順の運動を行なうとする。復帰速度 v_r は全復帰距離がストローク距離 λ と一致するように決定する。ここで、復帰運動の開始時刻 t_{x1} は z 方向の軌道計画で足先高さが H_u となる時刻、終了時刻 t_{x4} は足先高さが $H_d/2$ となる時刻である。

このような軌道計画を行うときの具体的な指令値は、 z 方向については以下になる。

$$t_{z1} = \sqrt{\frac{H^*}{\alpha_z}} \quad (18)$$

$$t_{z2} = 2t_{z1} \quad (19)$$

$$t_{z3} = T_s - 2\sqrt{\frac{H^* + H_d/2}{\alpha_z}} \quad (20)$$

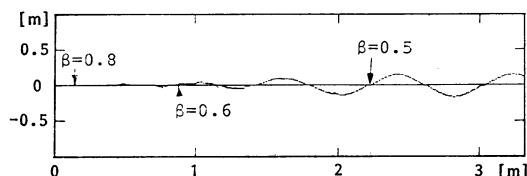


Fig. 6 Top view of the trajectory of body's center of gravity from static (left side) to dynamic (right side) walk

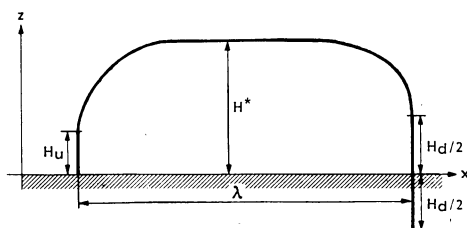


Fig. 7 Trajectory planning of swing leg in absolute coordinates

$$t_{z4} = T_s - \sqrt{\frac{H_u^* + H_d/2}{\alpha_z}} \quad (21)$$

$$V_z(t) = \alpha_z t \quad (0 \leq t < t_{z1}) \quad (22)$$

$$V_z(t) = \alpha_z(t_{z2} - t) \quad (t_{z1} \leq t < t_{z2}) \quad (23)$$

$$V_z(t) = 0 \quad (t_{z2} \leq t < t_{z3}) \quad (24)$$

$$V_z(t) = -\alpha_z(t - t_{z3}) \quad (t_{z3} \leq t < t_{z4}) \quad (25)$$

$$V_z(t) = \alpha_z(t - T_s) \quad (t_{z4} \leq t < T_s) \quad (26)$$

また、 x 方向については以下になる。

$$t_{x1} = \sqrt{\frac{2H_u}{\alpha_x}} \quad (27)$$

$$t_{x4} = T_s - \sqrt{\frac{2H_d}{\alpha_x}} \quad (28)$$

$$t_{x2} = t_{x1} + \frac{1}{2} \{ (t_{x4} - t_{x1}) - \sqrt{(t_{x4} - t_{x1})^2 - 4\lambda/\alpha_x} \} \quad (29)$$

$$t_{x3} = t_{x4} - \frac{1}{2} \{ (t_{x4} - t_{x1}) - \sqrt{(t_{x4} - t_{x1})^2 - 4\lambda/\alpha_x} \} \quad (30)$$

$$V_x(t) = 0 \quad (0 \leq t < t_{x1}) \quad (31)$$

$$V_x(t) = \alpha_x(t - t_{x1}) \quad (t_{x1} \leq t < t_{x2}) \quad (32)$$

$$V_x(t) = \alpha_x(t_{x2} - t_{x1}) \quad (t_{x2} \leq t < t_{x3}) \quad (33)$$

$$V_x(t) = \alpha_x(t_{x3} - t) \quad (t_{x3} \leq t < t_{x4}) \quad (34)$$

$$V_x(t) = 0 \quad (t_{x4} \leq t < T_s) \quad (35)$$

Fig. 9(a) に絶対座標系から見た足先軌道を示す。そしてこれと胴体重心の運動を合成し、実際に歩行機械が生成すべき運動である胴体座標系での軌道の例を Fig. 9(b) に示す。

6. 歩行実験

静動融合歩容の実現性を検証するため、4足歩行機械

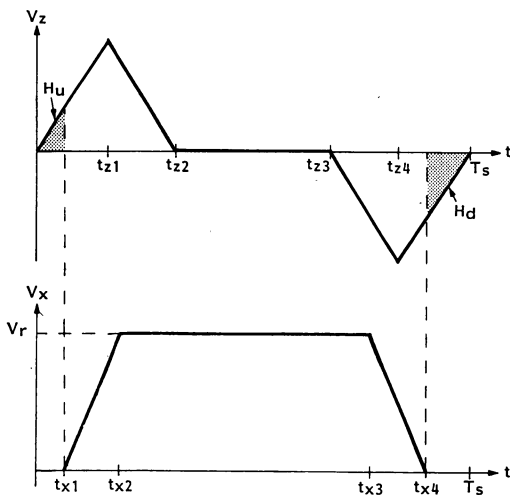


Fig. 8 Velocity diagrams of swing leg

モデル TITAN IV (脚長 1.2m, 全重量 160kg) を用いて平坦地で重心が速度ゼロの状態から拡張トロット歩容でデューティ比 β を小さくしてゆき連続的に加速する実験を行なった。ただしここではフィードフォワード的な左右揺動補償のみを行い、レベル C でのフィードバック制御は行っていない。その実験の 1 例を Fig. 10, Fig. 11 に示す。この歩行実験は静止状態から $\beta=0.8$ でスタートし、8 ウェーブで $\beta=0.5$ 、速度 400mm/sec まで一定加速度で増速してゆき、その後は一定速度で移動するような目標軌道を与えた場合である。

Fig. 10 は胴体上部にランプを取り付け、移動中の胴体上部の軌跡を示している。Fig. 11 はこのランプを取り付けた胴体上の点の速度変化を示している。これはこの胴体上の点にプーリーを付けたタコジェネレータを設置し、移動環境に張ったワイヤを巻きつけて計測したものである。計測された運動はほぼ理論通りであったが、最高速度での歩行時にある程度前後方向の振動が相乗されていることが観測された。

このような振動は、補正軌道生成時に与えた歩行機械の重心位置の誤差、サーボ系の誤差による脚の軌道運動のずれ、床面の若干の凹凸の影響などで生じたものと思われるがその詳細な検討は未だ行っていない。

6. ま と め

本論文では、静歩行と動的歩行を状況に応じて自在に選択する静動融合歩容を実現するため、拡張トロット歩容、フィードフォワード的な動的安定を生成する左右揺動補償などの概念を導入した。また、レベル A, B (B_1, B_2), C から構成される静動融合歩容のための全制御システムを論じた。特にレベル B_2 における胴体重心の左右揺動補償軌道の生成法と遊脚軌道の生成法は詳細に論じた。最後に試作した 4 足歩行機械モデル TITAN IV による歩行実験を行い、フィードフォワード的な指令軌道の左右揺動補償によれば、レベル C でのセンサフィードバックによる動的平衡調整が無くても、速度ゼロから 400mm/sec までの連続加速度歩行がある程度滑らかに実現できることを示した。

この実験から、本論文で提案するフィードフォワード制御の有効性は検証できたと考えている。今後は動歩行時の振動現象をより詳細に検討した後、レベル C での動的平衡調整を組み込むことにより、より滑らかな歩行運動の実現や、凹凸面上で一般的な自由曲線の指令軌道をたどる静動融合歩容の実現を試みてゆきたいと考えている。

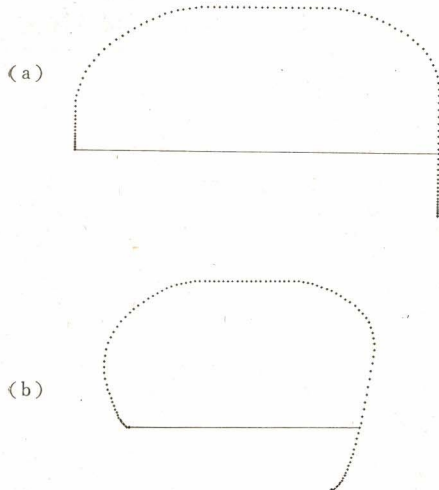


Fig. 9 An example of swing leg trajectory
(a) in absolute coordinates
(b) in body coordinates

参考文献

- 1) 廣瀬, 岩崎, 梅谷, “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, Vol.18, No.2, pp.193-200 (1982)
- 2) 廣瀬, 菊池, 梅谷, “4 足歩行機械の基準巡回歩容”, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.6, pp.545-556 (1984)
- 3) 廣瀬, 福田, 菊池, “4 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.304-323 (1985)
- 4) 廣瀬, 国枝, “4 足歩行機械の一般化基準脚軌道”, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.4, pp.455-461 (1989)
- 5) 木村, 下山, 三浦, “四足歩行ロボットの力学的解析”, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.5, pp.367-378 (1988)
- 6) Raibert, M. H., “Legged Robots That Balance”, MIT Press (1985)
- 7) 佐野, 古荘, 岡島, “支持脚切り換え現象を考慮した 4 足歩行ロボットの動的制御”, 日本機械学会論文集 C-508 (1988)
- 8) 廣瀬, 古谷, 高木, “4 足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その11静的遷移歩行に関する基礎的研究”, 第4回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.393-394 (1985)
- 9) 米田, 廣瀬, “同 その17 静動融合型対地適応歩容における安定性保持”, 第7回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.433-436 (1989)

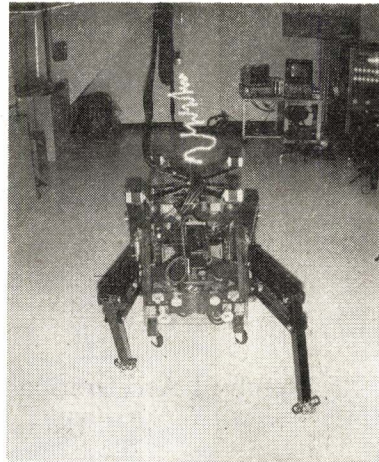


Fig. 10 Dynamic & static fusion gait started from the standstill posture of $\beta=0.8$ $V_G=0$ mm/sec to dynamic walk of $\beta=0.5$ $V_G=400$ mm/sec. The undulation of the body is shown by the trajectory of the light attached on the body.

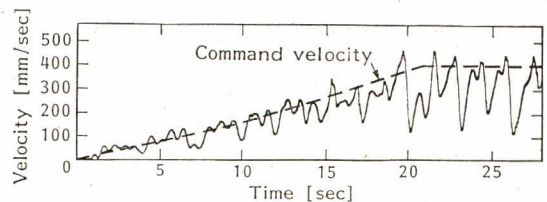


Fig. 11 Measured locomotion velocity V_G vs. command velocity of the walk shown in Fig.10

- 10) ロボット工学ハンドブック, 日本ロボット学会編, コロナ社, 353/364 (1990)
- 11) R. Tomovic, A General Theoretical Model of Creeping Displacement, Cybernetica, Vol.4, No.2 (1961)
- 12) M. Vukobratovic, J. Stepanenko, “On the Stability of Anthropomorphic Systems”, Mathematical Biosciences, Vol.15, pp.1-37 (1972)
- 13) R. B. McGhee, A. A. Frank, “On the Stability of Quadruped Creeping Gaits, Mathematical Biosciences, Vol.3, No.3, pp.331-351 (1968)