〔総合論文〕

4足歩行機械の制御システム

広瀬茂男*　福田　靖**　菊池秀和***

歩行機械は，その高い自由度を生かすことにより，高度の運動性能と，対地適応性を発揮してゆくものと期待される．これまで歩行機械の歩容制御については，いくつかの基本的考察がなされている．しかし，制御システム全体の構造とその中の主要なサブシステムの機能を有機的に連携づけ総合的に論ずることは，まだほとんど行なわれていない．本研究は，筆者らが開発を進めている4足歩行機械を対象にして，その制御システムを論ずるため，まず問題の設定と基本となる概念の設定を行なう．ついでレベル A, B, C と名付けた3つの階層からなる制御系の全体構造を明らかにすると共に，特にレベルBに属する3つのサブシステム，つまり xy 座標での歩容決定，z 座標での歩容決定，振り上げ振り降しも考慮した遊脚の軌道生成についての詳細な検討を行う．さらに基本的運動調整系を行うレベルCについて，その具体的構成法も論ずる．最後に，それらの有効性は計算機シミュレーションで確認するとともに，試作した歩行機械 TITAN Ⅲ のジョイステックコントロールによる全方向移動，凹凸面での適応側行歩行などの歩行制御実験により検証する．

1. まえがき

陸上の有肢動物，例えば馬，豹そしてライオンなどは，環境に適した巧妙な走行を行なう．平原では効率的でリズミカルな歩行を行ない，岩場では注意深く足場を探り，小川は飛び越え，荒野を縦横無尽に走り回る．

これら有肢動物の歩行運動の制御は，脳幹から脊髄にいたる運動中枢における先天的な歩行リズムの生成と，足先などからの求心性刺激を受けて大脳半球や上位脳幹などで行う歩行リズムの適応的な修正という階層的な神経制御系によって統括されていることは，すでによく知られている[1]．しかしながら，学習過程も含むこれら運動神経系の具体的な構造となると，残念ながら全く解明されていないのが現状である．

一方，人工の歩行機械は，従来からいろいろな研究がなされており，その歩容（歩き方）制御に関する考察も多くなされている[2~6]．筆者らもすでにいくつかの基本的な検討を行なってきている[7~15]．しかし，それらはほとんどすべて歩容制御系の一部のサブシステムについての考察であり，特に本研究が対象とする4足歩行機械に限定すると，その制御システム全体の総合的な検討とそれに関する総一的な記述を行った資料はこれまで皆無であった．そのため，本研究では4足歩行機械について，ハードウエアとしては筆者らがこれまで開発してきたTITAN Ⅲ[15] を直接の対象としながら，その制御システムの全体構造と主要な内部構造サブシステムをなるべく一般的立場からしかも総合的に論じ，今後の歩行機械開発のための一つの具体的な足がかりの提示を試みることとする．

本研究が究極的に目指すものは，比ゆ的に言えば「人工の馬」の実現である．そして，本論文は，その馬の脳に相当する知能システムの基本構成法を考察するものである．乗馬者は脚の動かし方などを別段馬に指示しなくても，馬自身が前方の地形を検出し，効率的で安全な脚運動を生成し，歩行を続けてゆく．このような乗馬者—馬系という一つの大きな階層構造を人間—歩行機械系のそれに置換することができれば，歩行機械は自動車と同じような要領で操縦し得る，取り扱いのよい荒地用運搬手段（moving platform）と成り得るであろう．

いっぽう，この制御システムを人工移動機械の観点からとらえると，それは「知能的緩衝器」（intelligent suspension）であるともいえる．自動車は，バネ，ダッシュポットなどの受動的緩衝器によって地表の若干の凹凸を吸収する．これに対し，目的とする歩行機械の制御

原稿受付　1985年4月22日
* 東京工業大学工学部
** (株) 東芝
*** (株) 旭化成工業

システムは，地形を視覚や触覚でセンシングしながら，小さな凹凸には適応し，踏破不可能な障害物には自律的に回避動作を行ない荒地に能動的知能的に対処する．つまり緩衝器の進化した一形態ともみなし得るからである．

このような，歩行機械制御システムの基幹部の構成を体系的に論ずるため，本論文においてはまずいくつかの基本事項の設定を行ない（第2章），次いで階層システムの全体構造を明らかにし（第3章），歩行制御における基本概念の導入を行なう（第4章）．各サブシステムは，通常行なう予測的歩容決定システムについてまず詳細に論じ（第5，6，7，8章），次いで非常動作についての考え方を示す（第9章）．最後に，試作した歩行機械モデル TITAN Ⅲ に以上の考察を基に構成した制御システムを実際にインプリメントし，歩行制御実験によってこれらの考察の妥当性を検証する（第10章）．

2. 問題の設定

制御システムを論じてゆくため，いくつかの問題設定を行なう．

2.1 主要な記号

C_i：脚 i の xy 平面可動範囲（長方形）の図心点

D_u：遊脚 u の着地点探索領域

$D(P_a, P_b)$：点 P_b から点 P_a に至るベクトルの xy 平面投影距離

$D_x(P_a, P_b)$：点 P_b から点 P_a に至るベクトルの x 方向成分

$D_\alpha(P_a, P_b)$：$=D_x(P_a, P_b)\cos\alpha+D_y(P_a, P_b)\sin\alpha$

E_k：ステップ切換点 N_k において，歩行機械重心を原点とし xyz 座標を Fig. 1 のように胴体方向に合わせた座標系

$f, \bar{f}, r, \bar{r}$：ある指定された脚に対し，左右同じ側の前脚が f，後脚が r，左右反対の前脚が $\bar{f}$，後脚が $\bar{r}$

$g_i, g_{ix}, g_{iy}, g_{iz}$：脚 i が接地しているときの可動範囲の制限により，重心が移動軌道 L_G 上を移動できる距離およびその xyz 成分

$g_{0\max}$：ステップ S でのサポート相で重心が移動軌道 L_G 上を移動できる最大距離

$g_{\max}$：ステップ S で重心が軌道 L_G 上を移動できる最大距離

g_0：基準安定余裕 s_0 も考慮した $g_{0\max}$

g：基準安定余裕 s_0 も考慮した $g_{\max}$

g_u：$=g-g_0$

g_z：ステップ S で重心が z 方向に移動する距離

H：重心の地表からの平均高さ

h_{up}：遊脚のアップ相での上昇幅

h_{dwn}：遊脚のダウン相での降下幅

i：脚を示す記号（$i=1\sim4$）

j：遊脚を示す記号

J_u：遊脚 u がステップ切換点 N_{k+1} で存在すべき点（座標系 E_k 上）

I_u：遊脚 u の着地点の探索開始点（座標系 E_k 上）

k：ステップあるいはステップ切換点の番号

$L(P_a, P_b)$：xy 平面上での点 P_a，点 P_b を結ぶ直線

L_G：重心が移動する軌道の xy 平面投影線

n：タイマ割込制御におけるサンプリング回回数

N_k：k 番目のステップ切換点

P_a：符号 a で示される点

P_u：N_k における遊脚 u の位置（座標系 E_k 上）

s：縦安定余裕 (longitudinal stability margin)[2]

s_0：基準安定余裕．基準歩容1サイクル中の安定余裕 s の最小値

S_k：k 番目のステップ（解析では，前提として S_k の状態に歩行機械が存在していると考える）

$t_{spt}, t_{up}, t_{rtn}, t_{dwn}$：1ステップ中の遊脚のサポート相，

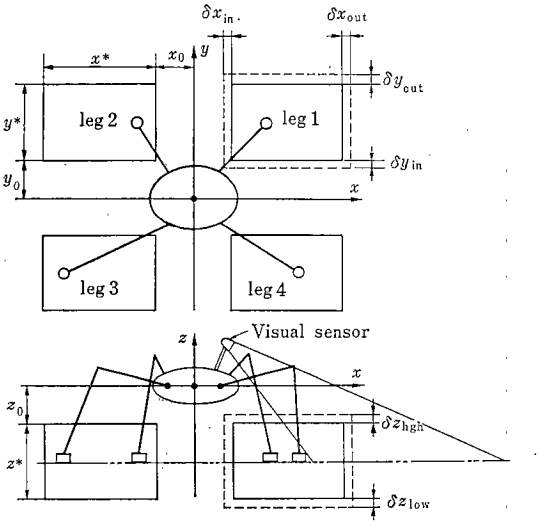


Fig. 1 The dimensions of reachable area. The reachable areas for control (solid line) are set smaller than mechanical limitation (dotted line).

アップ相，リターン相，ダウン相の時間

T_k：第 k 番目のステップ時間 $(=t_{spt}+t_{up}+t_{rtn}+t_{dwn})$

T：基準側行歩容のサイクルタイム

u：遊脚を示す記号

u^*：基準歩容で遊脚 u の前に遊脚である脚

v_x, v_y, v_z：脚の xyz 方向の振り速度

V_x, V_y, V_z：脚の xyz 方向の機構的最大振り速度

$v_G, v_{Gx}, v_{Gy}, v_{Gz}$：重心の移動速度とその xyz 成分

$V_G, V_{Gx}, V_{Gy}, V_{Gz}$：重心の最大移動速度とその xyz 成分

$x^*, y^*, z^*, x_0, y_0, z_0$：Fig. 1 に示す脚の可動範囲を示すパラメータ（正の値）

δx_{out}, δx_{in}, δy_{out}, δy_{in}, δz_{hgh}, δz_{low}：機構的可動範囲と解析で用いるソフトウエア上の可動範囲との偏差幅（Fig. 1 参照）

x_{rtn}：リターン相での遊脚の重心に対する振り幅

$x_i^m(t), y_i^m(t), z_i^m(t)$：脚 i の時刻 t での xyz 軸ポテンショメータのモニタ値

$x_i^d(t), y_i^d(t), z_i^d(t)$：時刻 t での脚 i の xyz 軸サーボ系への指令値

α：側行角

α_C：x, y 方向側行歩容の切換臨界角

β：デューティ比（duty factor）

θ_p, θ_r：姿勢センサから得られるピッチング角とローリング角

ϕ_G：重心軌跡のステップ S_{k+1} での迎角

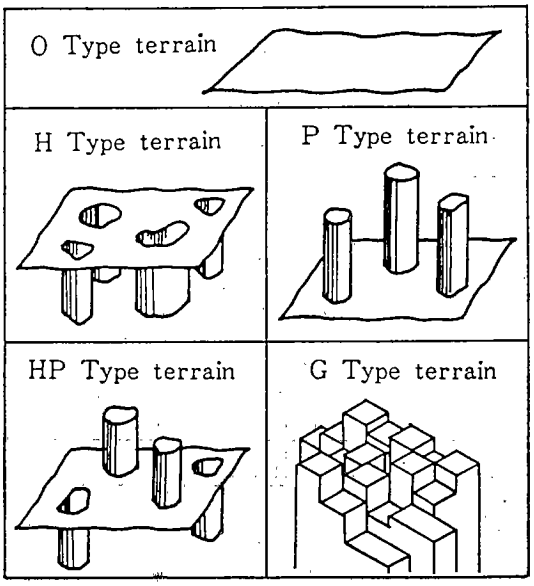


Fig. 2　Classification of terrain

2.2　対象とする歩行機械

歩行機械として望ましい脚の本数，また，そのメカニズム等は，筆者らがこれまで行なってきた研究から **Fig. 1** のように4足とし，各脚は直方体の可動範囲を有するものとする[14,15]．そして，この歩行機械の座標系としては，重心（以降重心と言うときは胴体の重心 G を示すことにする）を原点とし，胴体前後方向に x 軸，左右方向に y 軸，上下方向に z 軸を有するものとする．解析に当たっての座標系は，ステップ切換点 N_k（4·1 節参照）での重心座標系 E_k を基本的に用いる．脚は Fig. 1 のように xy 座標での象限に合わせて 1～4 脚と名付ける．制御を考える上での脚可動範囲は，Fig. 1 のように $x^*, x_0, y^*, y_0, z^*, z_0$ で示す．ただし，歩行機械の機構的可動範囲は Fig. 1 の破線に示すように xyz 方向とも $\delta x_{in}, \delta x_{out}, \delta y_{in}, \delta y_{out}, \delta z_{hgh}, \delta z_{low}$ だけソフトウエア上の可動範囲より余裕を持って大きいものとする．この余裕幅の使用については後に論ずる（6章）．

歩行機械には，移動前方の比較的近距離の地図情報を入力し得る視覚センサーを装備すると考え，歩容の決定に際しこれを使用できるものとする．また歩行中，歩行機械は胴体を常時水平に保つ姿勢制御を行なうものとする．今後，急斜面での上下動作などに対処させてゆくためには胴体の傾斜も考慮すべきだが，通常の凹凸に対してはこのような姿勢制御は，搭載する機器の安定のために望ましい．すでに提案している重力方向分離型アクチュエータ（GDA）[15] の効果を発揮させるためにもこの制御は必要である．

2.3　移動環境

歩行機械が移動すべき環境は，車などでは走行できないいわゆる「荒地」である．ただし，単に荒地といってもその実相は多様であり，これを表記するのは必ずしも容易ではない．これまでにも荒地の分類とその定量的表現についてはいくつかの研究があるが，ここでは **Fig. 2** に示すような5種類の分類を導入[8]する．

Oタイプ荒地とは，基準となるリズミカルな歩行が実現可能な地形である．平坦な地形がこのOタイプに相当するが，必ずしも完全に平坦でなくてもよく，後述する凹凸吸収歩容を考察すれば，若干の凹凸のある地表もOタイプに分類することができる．

Hタイプ荒地とはOタイプ荒地に歩行機械の脚がとどかない深い穴（Hole）が存在する荒地である．Hタイプ荒地においては歩行機械は，その遊脚着地位置としてこの穴の内部を選択することはできないが，その上空を横切ることは可能である．

Pタイプ荒地とは，Oタイプ荒地に歩行機械の脚長に比較して十分高い柱（Pole）あるいは岩などが存在する

荒地である．Pタイプの荒地においては，歩行機械は，柱部に脚を入れることを防ぐと同時に体のどの部分もその上を横切らないようにしなければならない．

HP タイプ荒地とは，Hタイプ荒地とPタイプ荒地の組み合わせ荒地である．

Gタイプ荒地とは，一般の凹凸荒地を離散高さのマトリックスである．

視覚装置が歩行機械に提供する地図は，まず入力されたレンジ信号からGタイプ荒地を構成し，ついで歩行機械の性能と移動方式を考慮して HP タイプ荒地に書き改め，座標系 E_k (4.1 節) で表記したものとする．本論文においてはHタイプ荒地での歩行を中心に考えてゆく．

2.4 安定条件

歩行機械を4足にする有効性の一つの大きな理由として，静的歩行と動的歩行の両者を無理なく実現できることがあげられる．4足ならば，脚の有する自由度を過不足なく生かすことにより静的姿勢を保った低速での安定な移動から動的での高速な移動までを地形の状況に応じて適応的に使い分けることができるからである．これら2つの歩行のうち静的歩行生成についての制御則は動的のそれより基本的であり，また動的歩行の解析はより複雑であるがその基本的な考え方は，静的歩行の安定余裕の概念の拡張として扱えると筆者らは考えている．よって，本研究では，ひとまず「静的安定」を保つことを第一次的条件とし，その上での歩行制御を論ずる．

静的安定の測度としては，安定余裕 (stability margin)[2] の概念が知られている．この値は，重心と支持脚多角形の関係で与えられ，重心の高さ，脚のコンプライアンスなどによっても支配される[7]．しかし，ここでは解析を容易にするため縦安定余裕 (longitudinal stability margin) s[2]，つまり重心推進軌道上 L_G で重心から支持脚多角形の辺までの最小距離をその測度の第一近似として用いる．なお，1サイクルの基準側行歩容 (4.3 節) での縦安定余裕 s の最小値を，特に基準安定余裕 s_0 と呼び基準収束型適応歩容 (4.2 節) 誘導のための測度とする．

3. 制御システムの構成

歩行機械の制御システムは，大別すると **Fig. 3** のように3つの階層に分類することが制御上望ましいことがわかっている．このうちレベルAは人間オペレータに相当するものである．ここでの判断は，歩行機械のハードウエア的制約とは無関係に，地勢や作業目的から大局的になされるものであり，移動ロボット一般の移動戦略の生成系として重要である．すでに述べたように，本研究はいわば「人工の馬」の脳に相当する知能制御システムの構造を論ずるものであり，一応このレベルAの考察は対象外としておく．

レベルBは知能的歩容制御系であり，さらに4つのレベルに細分化される．レベル B_1 はレベルAからの指令経路および速度を近距離前方地形の地図と照合し，障害物回避と効果的な歩行を実現する局所的経路修正を行なう系である．この経路とは，H型荒地では穴 (Hole) を迂回するとか乗り越え，O型地形部では地表の凹凸にうまく追従するような3次元的重心経路を意味する．ここでは，視覚装置との地形情報の通信，また経路生成のための人工知能的考察が要点である．レベル B_1 についての筆者らのこれまでの考察は[11]，未だ不十分でありここでは論じない．

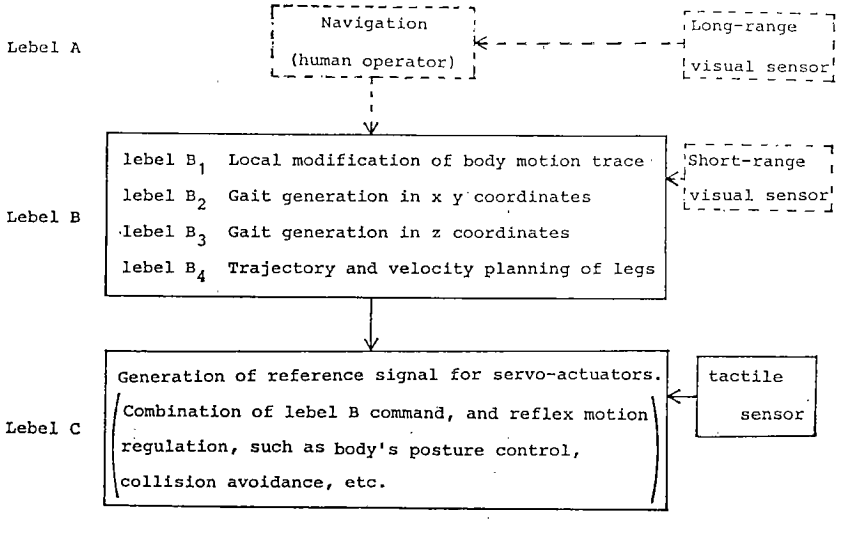


Fig. 3 Hierarchical control system of the walking vehicle

レベル B_2 は xy 座標において，脚の振り順序，重心移動量，脚の着地点の3種の制御量を求めるものである．ここでは，脚の振り順序と脚の幾何学的位置にのみ関する決定が行なわれ，時間（速度）に関する決定はなされない．

レベル B_3 は重心（つまり支持脚の z 方向高さ）の歩容を定めるものである．

レベル B_4 は，レベル B_2, B_3 で与えられたシーケンスに基づいた歩行を行なうため，重心の移動速度，遊脚の復帰軌道とその速度など，サーボ系に与えるための具体的な目標値生成を行なう系である．

そして，最下位のレベルCは，生物でいえば脳幹・脊髄系での反射的運動調整に相当する制御を行なう系である．具体的には，時々刻々脚の位置，センサーの状態等を入力し，上位からの指令を遂行しつつ，非常事態には対処できる動作を生成するものである．

これらの階層制御システムのうち本研究では Fig. 3 の実線で示したレベル B_2, B_3, B_4，そしてレベル C という歩行機械制御系の核となる部分について検討を行なう．短距離視覚センサについては，理論と計算機シミュレーションでは，その存在を仮定しているが，試作機に実装した歩行実験は未だ行っていない．よって Fig. 3 では一応破線で示しておく．

4. 歩行制御における基本概念の導入

歩行制御の考察上，重要となる基本概念をまず明らかにする．

4.1 ステップ S_k とステップ切替点 N_k

遊脚が上下運動をせず，推進，復帰運動のみを行なっていると考える場合には，ある遊脚が復帰動作を完了した時点から，次の遊脚が復帰動作を完了するまでの間をステップ S_k と呼ぶ．ただし k は，歩行開始後のステップ回数を示す．また，より一般的に遊脚が Fig. 8 に示すようなサポート相，アップ相，リターン相，ダウン相の4相から成る3次元運動を行うと考える場合には，ある遊脚がダウン相を終了する時点から，次の遊脚がダウン相を終了する時点までがステップである．ステップ切換点 N_k とは，このステップ S_k のダウン相終了時点のことである．なお，一般にはダウン相終了時点とは必ずしも遊脚が着地した時点とは一致せず，推進相に入ってからの時点となる．このようにしてステップを定義し歩容を論ずることの意義は4.5節の凹凸吸収歩容の説明で述べる．

本論文で導入する制御方式は，歩行機械がステップ切換点に至るときの脚の着地位置と，重心位置を次々に予測的に誘導し，下位の処理系でその運動をできる限りなめらかな運動で接続するという手順の処理を行なうものである．

4.2 基準収束型適応歩容

歩容を決定してゆく考え方には，選択目標となる歩容形態から2つの立場があると思われる．それらは，

（1） 基準歩容（standard gait）：平坦地において歩行する場合にとるべき，最も移動効率と安定性の良いリズミカルな歩容，および，

（2） 適応歩容（free gait）[4,5]：荒地において，静的安定を保ちながら，安全な足場を見つけ障害物を回避するなどのようにして選択される，荒地に適応した非定常的な歩容である．

荒地での移動を前提とする場合，基準歩容のみしかとれないのでは，安定な歩行は持続できない．一方，対地適応性のみを考慮する適応歩容では，たまたま荒地から平坦地にもどったときなどに生起される歩容が不定となり，最高の移動効率と安定性が保証されている基準歩容には必ずしも収束しない．そこで，本制御システムでは，常時地図と照合しながら対地適応歩行を行ない，地形が許す限りの範囲で，基準歩容への収束を計るいわば「基準収束型適応歩容」をとらせることにする．

4.3 基準側行歩容

基準収束型適応歩容を実現するためには，基準歩容をまず明確化しなければならない．すでに指摘されているように[2,16]，4足以上の静的安定歩行においては，波状歩容（wave gait）が直進する場合の基準歩容であり，4足歩行における波状歩容は特にクロール歩容（crawl gait）と呼ばれている．しかしこれらの直進歩容に対し，胴体方向と推進方向が一致しない歩行を「側行歩容」（crab walk）と呼ぶことにすると，この側行歩容の基準歩容については従来まったく検討が行なわれていないことがわかる．多自由度を有する歩行機械にとって，全方向移動性は一つの大きな機能であり，またそのような歩行は頻繁に使用する可能性のあることから，側行歩容の基準歩容を明らかにすることは不可欠である．

そこで，基準側行歩容の誘導をここで行なう．なお，歩容は xy 平面における足の幾何学的関係についてのみ求める．また歩行機械は前後左右方向に対称であることから，ひとまず $0 \leqq \alpha \leqq \pi/2$（ただし α は側行する方向と x 軸正方向との成す角で側行角と呼ぶ）．の範囲について考える．4脚の軌跡は，静的安定を最大限保つ条件から，重心に対し点対称であるとする．さらに，一般性を大幅に損わない範囲で脚軌道の拘束を与えるため，脚 i の軌道は側行角 α にかかわらず可動範囲 R_i の中点 C_i を通過するという条件も含めることにする．

このように考えると，可動範囲内の足先のストローク

軌跡は **Fig. 4** のようになり，そのストローク長さ λ^* は，

$$\lambda^*=\begin{cases}\dfrac{x^*}{\cos\alpha} & 0\leq\alpha\leq\tan^{-1}\left(\dfrac{y^*}{x^*}\right)\\ \dfrac{y^*}{\sin\alpha} & \tan^{-1}\left(\dfrac{y^*}{x^*}\right)\leq\alpha\leq\dfrac{\pi}{2}\end{cases}\qquad(1)$$

である．またこのときの遊脚の運行表は，**Fig. 5** のようになる．ここでは $\alpha=16°$ (0.28 rad) の場合を示す．これには xy 方向のみが示され z 方向は示されていない．また後に示す凹凸吸収歩容も含まれていない．しかし基準歩容のタイミングを知るための基礎的知見はすべて表記されている．

Fig. 5 の例は，**Fig. 6** (a) に示したように基本的には x 方向直進時のクロール歩容と同じものである．ところが Fig. 6 (b) のように $\alpha=74°$ (1.3 rad) の例などでは遊脚化順序が，1脚3脚2脚4脚 (1-3-2-4) のようになり，x 方向クロール歩容 Fig. 6 (a) の 1-3-4-2 と異なる．このことから，$0\sim\pi/2$ の中には x 方向の側行歩容から y 方向の側行に切り換わるべき臨界角 α_c が存在することがわかる．この臨界角 α_c は明らかに点 C_i を通過する側行角であり，このことから

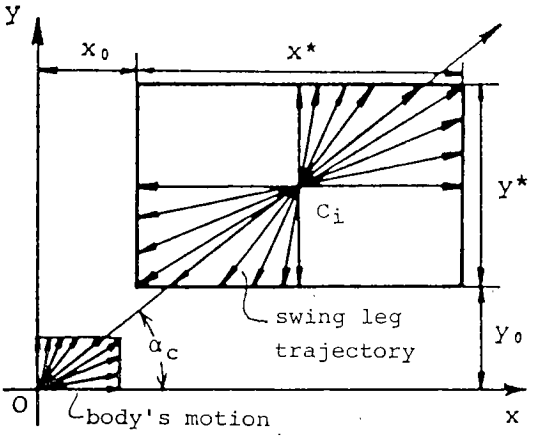


Fig. 4 The standard stroke motion of a leg and the coordinated motion of the body at various crab angles

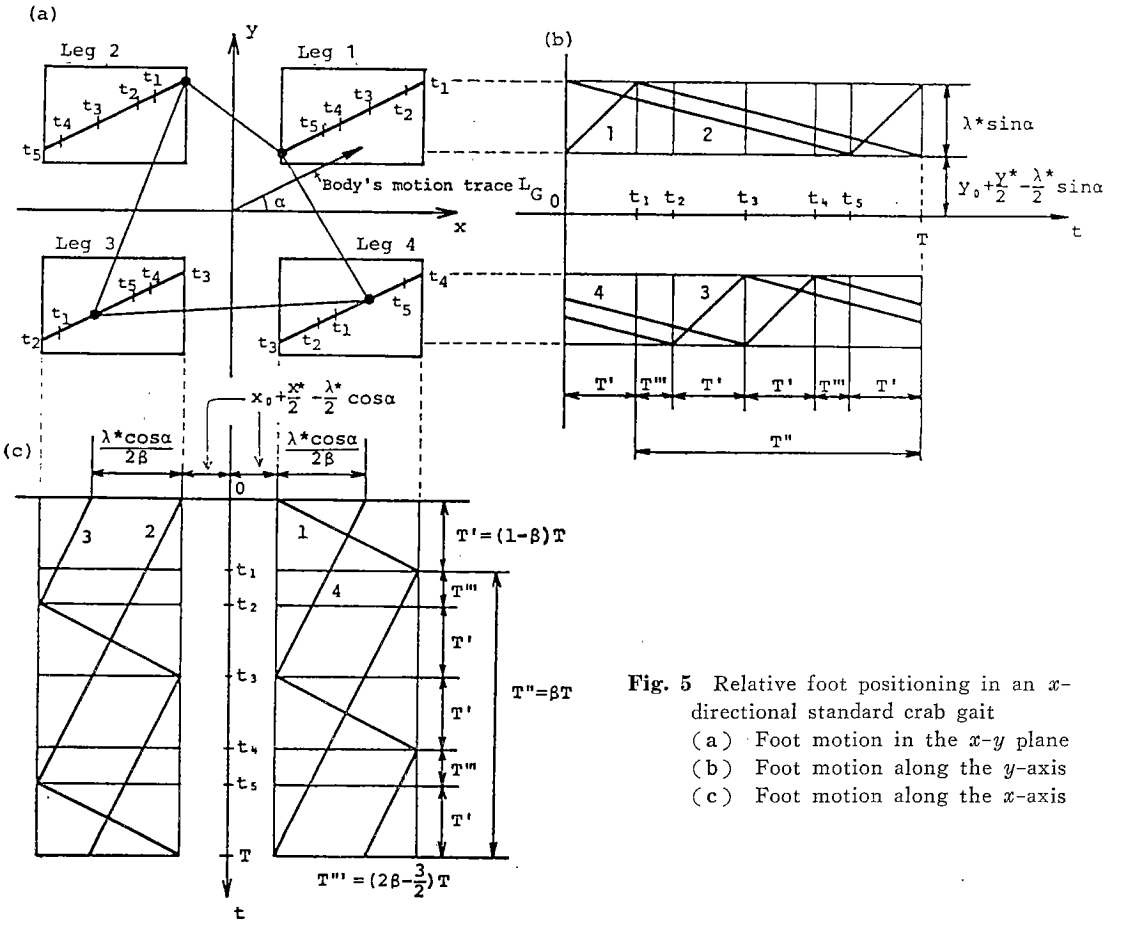


Fig. 5 Relative foot positioning in an x-directional standard crab gait
(a) Foot motion in the x-y plane
(b) Foot motion along the y-axis
(c) Foot motion along the x-axis

$$\alpha_c=\tan^{-1}\left(\frac{y_0+(y^*/2)}{x_0+(x^*/2)}\right) \qquad (2)$$

である．つまり $0\leqq\alpha\leqq\alpha_c$ では x 方向側行歩容，$\alpha_c\leqq\alpha\leqq\pi/2$ では y 方向側行歩容をとることになる．$\alpha=\alpha_c$ では，両歩容とも取り得るが重心は支持脚3角形の辺上を移動することになりこの場合安定余裕ゼロの状態が持続し望ましい歩容ではない．このような側行歩容を行なう場合の基準安定余裕 s_0 は，Fig. 5 で T'' 時間に λ^* 進む歩行を行っているときの T''' 時間に進む距離の半分に相当し，

$$s_0=\left(1-\frac{3}{4\beta}\right)\lambda^* \qquad (3)$$

と示される．重心の移動量決定時にこの s_0 を考慮することは，基準収束型適応歩容のための収束形状の目標を与えることを意味し重要である．

以上の考察は，第1象限内に限定していた．この議論を任意の側行角 α の側行歩容に拡張するためには，臨界側行角 α_c に対する α の大きさを用いて，側行角脚移動範囲を **Table 1** のように再定義すればよい．

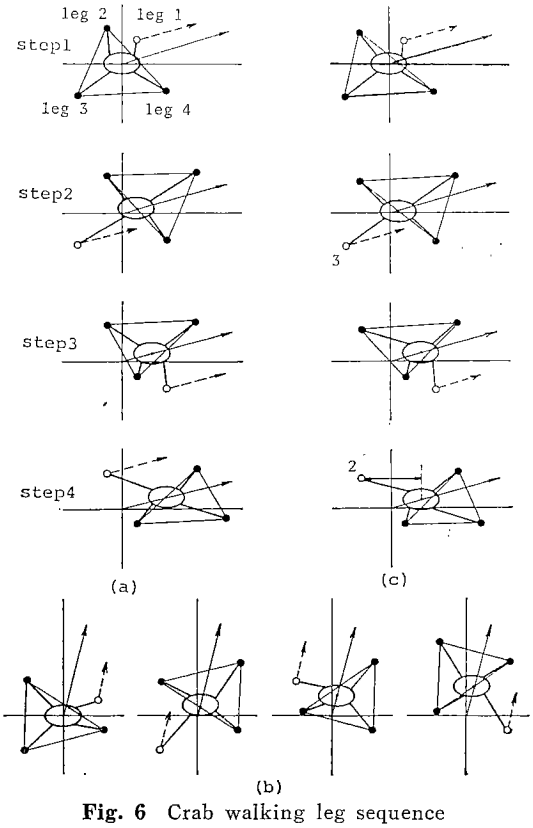


Fig. 6 Crab walking leg sequence
(a) x-directional standard crab gait ($\alpha=16°$)
(b) y-directional standard crab gait ($\alpha=74°$)
(c) Crab walking ($\alpha=16°$) started from an arbitary posture and swinging each leg by its maxmum stride. λ^*

4.4 予測制御

歩行中，次に遊脚にすべき脚の選択，その着地位置，その間の重心の移動量などを地形情報等を参照しながら決定していく歩容決定処理は，リアルタイムでコンピューターに実行させるとなると，ある程度の演算時間を必要とする．そのため，例えば遊脚が着地したごとに次の歩容の決定を行なうと，脚の着地ごとに若干の静止時が必要となり，連続的で滑らかな歩行運動は実現できない．そのため，歩容決定処理の演算を実際の歩行運動より先行して予測的に行なっておき，歩行に従ってすばやく歩容指令を変更してゆくという予測制御の導入が不可欠となる．ただし，予測制御といっても，どの程度前方までの予測を行なうかによって，2つのレベルに分けられよう．

一つは，視覚装置によってはるか前方までの地形を読み取り，それに応じて重心移動方向や速度の修正を行なうものである．これは，後で述べる制御システムのレベル B_1 の機能も含むものであり，本論文では論じない．いま一つは，数歩先までの歩容の予測である．本論文で考察する制御システムでは，特に1歩先前の歩容の予測を考えることにする．

つまり，本制御システムでは，歩行機械はステップ S_k の歩行運動を実行中であるとし，すでに求まっているステップ切換点 N_k に至るまでの歩容を実施していると想定する．そして，N_k で取るべき歩容パターンをもとに，次のステップ S_{k+1} における歩容の決定を，ステップ S_k の歩行運動を実行中に行なうものであると考える．このように歩容をあらかじめ定めておき，歩行機械が N_k に到着した瞬間に，算出した歩容指令を呼び出し，すぐにステップ S_{k+1} を開始することにより連続的な歩行を可能にしようとするものである．

4.5 凹凸吸収歩容

予測制御を行なう場合には，まず始めの前提として今

Table 1 Re-definition of crab angle α and motion range in omni-directional motion

range of crab angle α	rotational angle of coordinates	re-defined crab angle	re-defined motion range
		α'	x_0' x^* y_0' y^*
$-\alpha_c<\alpha\leqq\alpha_c$	0	α	x_0 x^* y_0 y^*
$\alpha_c<\alpha\leqq\pi-\alpha_c$	$\frac{\pi}{2}$	$\alpha-\frac{\pi}{2}$	y_0 y^* x_0 x^*
$\pi-\alpha_c<\alpha\leqq\pi+\alpha_c$	π	$\alpha-\pi$	x_0 x^* y_0 y^*
$\pi+\alpha_c<\alpha\leqq2\pi-\alpha_c$	$\frac{3}{2}\pi$	$\alpha-\frac{3}{2}\pi$	y_0 y^* x_0 x^*

の遊脚がステップ切換点 N_k で計算した通りの位置に着地することが必要である．もしも別の位置に着地してしまうと，次のステップ S_{k+1} のために予測計算した歩容は使用できなくなるからである．一方，平坦に見える地表にも若干の凹凸が残されている場合が多い．よって，遊脚の復帰運動には，脚の上昇降下運動が必要である．これらのことから，遊脚を上下させながら，しかも若干の凹凸にかかわらず計算した xy 座標位置に遊脚を着地させるという機能が，予測的な連続歩行には不可欠であることがわかる．この機能は，遊脚を余裕を持たせて上下動させ地表の若干の凹凸を吸収しながらなめらかな歩行を可能にするものであるので，以降これを「凹凸吸収歩容」と呼ぶ．

本論文で提案する凹凸吸収歩容では絶対座標系で遊脚が垂直に降下するように降下中遊脚は支持脚と同じ速度で並進させるとする．また凹凸吸収歩容の上昇幅 h_{up}，および下降幅 h_{dwn} は，凹凸の高低差が ΔH である地面の踏破性で決定する．つまり谷にある脚が山に当たらずに復帰運動を行なうためには，少なくとも ΔH だけ脚を上げる必要がある（**Fig. 7**（a）），また山にある脚が谷に着地するには，始めに ΔH 上げたとすると $2\Delta H$ だけ下げればよい（Fig. 7（b））．そこで，下げ幅 h_{dwn} を上げ幅 h_{up} の2倍としておく．これにより地面に最大 h_{up} の凹凸があってもそれに妨げられることなく遊脚を復帰することが可能となる．

以上のことから，本論文で提案する凹凸吸収歩容は，相対座標系での遊脚の軌道を **Fig. 8**（a）のように逆台形型にしようとするものである．そしてその軌道はサポート相，アップ相，リターン相，ダウン相の4相に細分化される．ただしここでサポート相とは，5·2 節で述べるように，後脚を遊脚化しようとするステップの開始点にのみ存在するものであり，当然この相においては4脚推進運動が生成される．なお，一般には遊脚の復帰運動は重心の移動方向とは別の3次元運動となる．この場合の遊脚の軌道は Fig. 8（b）（c）のように表記する．

ここでステップ切換点 N_k, N_{k+1} は図中のように定める．そしてすでに述べたようにソフトウエア上のステップ S_{k+1} の切換は，あくまで N_{k+1} に脚が到着する時刻まで待って行なうが，歩行機械の動作自体は，脚の降下中に足先接地が触覚センサで検知できた時点で降下運動を停止し，4脚推進相に入るという制御を想定する．こうすることにより，歩行中に4脚推進相の増減はあるものの，その基準安定余裕 s_0 はステップ切換点での値以上に必ず保持されて安定であり，またステップの切換タイミングも地形に乱されず，地形の凹凸を吸収した基準歩容が持続できるからである．

4.6 通常動作と非常動作

凹凸吸収歩容で実現される予測的な歩行を本論文では「通常動作」と呼ぶ．ただし，予測が完全でないときには通常動作が持続できない状況も生ずる．このときには，歩行機械はその通常動作をいったん停止し，特別の動作を生起しなければならない．以降このような動作を「非常動作」と呼ぶ．本論文で考察する制御システムは，できる限り通常動作による連続歩行を行なうが，この通常動作では対処し得ない特別の状況においてのみ非常動作をとり，1歩1歩停止しながら歩行してゆくという制御構造をとらせることにする．

5. xy 歩容決定（レベル B_2）

側行歩容において，基準収束型適応歩容を行なうための xy 平面での歩容決定法を考察する．具体的には，重心がステップ切換点 N_k にあると考えその重心座標系 E_k において，（1）4脚の xy 座標 $P_i(x_i, y_i)$（$i=1\sim4$），（2）側行角 α，（3）デューティ比（duty factor）β，（4）脚可動範囲 x^*, x_0, y^*, y_0 を用い，その次のステップ切換点 N_{k+1} までに，

（1）遊脚とすべき脚 u，

（2）遊脚 u がサポート相にあるときの重心の xy 平面移動量 g_0，

（3）遊脚がアップ相，リターン相，ダウン相にあるときの重心の xy 平面移動量 g_u，

（4）遊脚着地位置 J_u，

を誘導することである．そして，その誘導は遊脚の選択，重心の移動量の導出，遊脚着地点探索領域の設定，探索開始点の算出，そして遊脚着地位置の決定，の順で行なう．以下それぞれの詳細を説明する．

5.1 遊脚選択

遊脚選択の基本的考え方は，

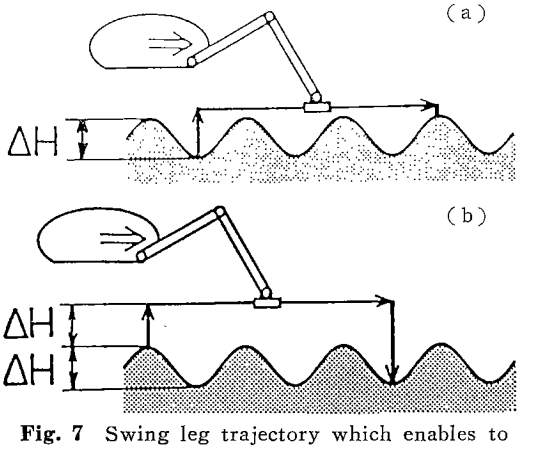


Fig. 7 Swing leg trajectory which enables to absorbs unenenness ΔH of the terrain

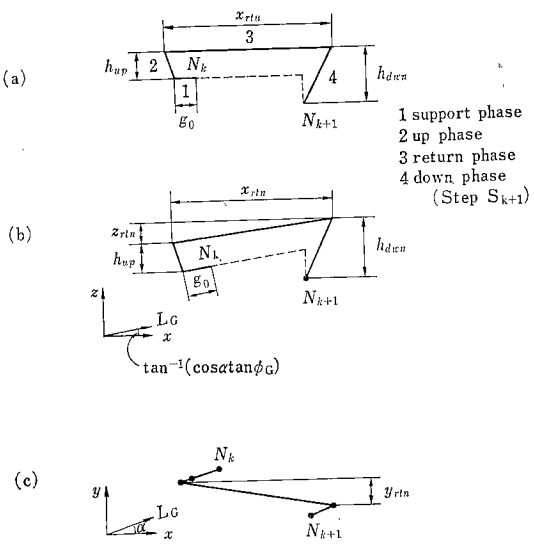


Fig. 8　3 dimensonal swing leg trajectory on body coordinates
(a) Special trajectory in case of $\alpha=\phi_G=0$
(b) Side view of normal trajectory
(c) Top view of normal trajectory

（1） もしも，N_k での重心座標系 E_k において，その脚平面配置に基準側行歩容と一致する部分が一部でもあれば，遊脚の選択にはその一致部分のパターンをくずさず，基準パターンに収束するのに適した脚を選択する．

（2） 一致する部分がなければ，前のステップ S_k で遊脚であった脚以外の3脚のうち，最も遊脚の平面復帰距離 ΔU が長い脚を遊脚とする．

というものである．このような遊脚選択法は，4·2 節に述べた基準収束型適応歩容を実現する上での一つの重要な要因となるものであり，また，4脚すべての着地点を算出し，その後始めて遊脚の決定を行なうという方式の不経済を回避するものでもある．具体的なアルゴリズムを **Fig. 9** に示す．この中で A, B, C, L の記号は，基準側行歩容での足先間の基準長さを示すパラメータである．

5.2　重心移動量の決定

ステップ S_{k+1} での重心の移動量 g_0, g_u の誘導は，それぞれの相状態での支持脚の可動範囲の限界と安定余裕とを考慮することで行う．この誘導の準備としてまず，側行角 α の歩行中において任意の脚 i が接地している場合に，その脚の可動範囲によって規制される重心の最大平面移動距離 g_{ix}, g_{iy} を求める．これは，

$$g_{ix}=(x_i-x_0)/\cos\alpha \qquad (i：前脚)\ (4)$$

$$g_{ix}=(x_i+x_0+x^*)/\cos\alpha \qquad (i：後脚)\ (5)$$

$\alpha>0$

$$g_{iy}=(y_i-y_0)/\sin\alpha \qquad (i：左脚)\ (6)$$

$$g_{iy}=(y_i+y_0+y^*)/\sin\alpha \qquad (i：右脚)\ (7)$$

$\alpha<0$

$$g_{iy}=(y_i-y_0-y^*)/\sin\alpha \qquad (i：左脚)\ (8)$$

$$g_{iy}=(y_i+y_0)/\sin\alpha \qquad (i：右脚)\ (9)$$

である．ただし，これらはたとえば（4）式では

$$D_x(P_i, P_{g_{ix}})=x_0 \qquad (10)$$

として求めたものである．これらを用いれば，4脚支持状態での重心の許容最大平面移動量 $g_{0\max}$ は次のように求まる．

$$g_{0\max}=\min(g_{ix}, g_{iy}(i=1\sim4)) \qquad (11)$$

また，選択された遊脚以外の3脚の可動範囲を考慮したときの重心の許容最大平面移動量 $g_{\max}$ は，

$$g_{\max}=\min(g_{ix}, g_{iy}(j=1\sim4：j\neq u)) \qquad (12)$$

である．ただし，$g_{0\max}, g_{\max}$ とも側行角 $\alpha=0$ のときには，g_{iy}, g_{jy} を始めから無視して良い．

$g_{0\max}, g_{\max}$ に対し，さらに基準安定余裕 s_0 を考慮すれば，実際に4脚支持中およびそれ以降の相状態にあるときの重心の移動すべき平面距離 g_0, g を求めることができる．ただし，前後脚のどちらがステップ S_{k+1} での遊脚となるかで，この誘導法は異なってくる．以下個別に考察する．

a） ステップ S_{k+1} で前脚が遊脚となる場合

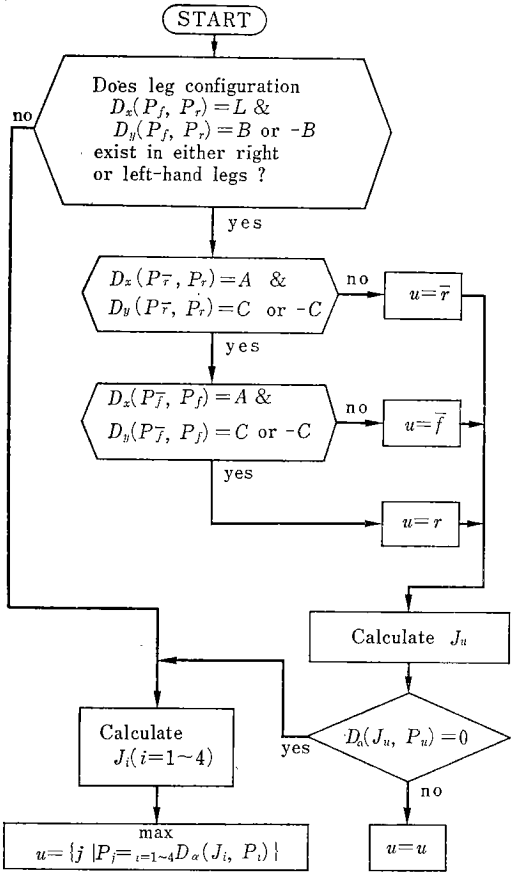
この場合，一般に前のステップ S_k で形成される支持脚3角形とステップ S_{k+1} の支持脚3角形とは重なった共通領域を有し，重心はその領域に含まれる．よってステップ切換点 N_k の始めには4脚支持相は必要ない．つまり $g_0=0$ である．一方，g の値は以下のように与えればよい．

$$\left.\begin{array}{lll}
(a) & D_\alpha(X, P_G)<0 & 遊脚化不可能 \\
(b) & 0\leq D_\alpha(X, P_G)<s_0 & g=0 \\
(c) & 0\leq D_\alpha(X, P_G)-s_0<g_{\max} & g=D_\alpha(X, P_G)-s_0 \\
(d) & g_{\max}\leq D_\alpha(X, P_G)-s_0 & g=g_{\max}
\end{array}\right\} \qquad (13)$$

なおここで，X とは遊脚とする前脚に対し，脚 $\bar{f}$ と r とを結ぶ直線 $L(P_{\bar{r}}, P_r)$ と重心移動軌跡 L_G との交点である．

b） ステップ S_{k+1} で後脚が遊脚化となる場合

後脚遊脚化の場合には，一般にステップ S_k の支持脚3角形とステップ S_{k+1} のそれは直線 $L(P_{\bar{r}}, P_f)$ で接する．よって有限な基準安定余裕 s_0 を取ろうとするとステップ S_{k+1} の始めには必ず4脚支持相が必要となる．つまり，後脚の遊脚化開始時にサポート相が不可欠ということになる．この場合のサポート相での重心移動量 g_0 の誘導法は以下のようになる．



$$\left[\begin{array}{ll} L=2x_0+x^*+(\frac{1}{\beta}-1)\lambda^*\cos\alpha & A=\frac{\lambda^*\cos\alpha}{2\beta} \\ B=\frac{1-\beta}{\beta}\lambda^*\sin\alpha & C=\mathrm{sgn}(r-2.5)(2y_0+y^*)+\frac{\lambda^*}{2\beta}\sin\alpha \end{array}\right]$$

Fig. 9 Swing-leg-selection algorithm

$$\left.\begin{array}{lll} \text{(a)} & g_{0\max}\leqq D_\alpha(X, P_G) & \text{遊脚化不可能} \\ \text{(b)} & g_{0\max}\leqq D_\alpha(X, P_G)+s_0<g_{0\max}+s_0 & \\ & & g_0=g_{0\max} \\ \text{(c)} & 0\leqq D_\alpha(X, P_G)+s_0<g_{0\max} & \\ & & g_0=D_\alpha(X, P_G)+s_0 \\ \text{(d)} & D_\alpha(X, P_G)+s_0\leqq 0 & g_0=0 \end{array}\right\} \quad (14)$$

ここで，X は $L(P_{\bar{r}}, P_f)$ と L_G との交点である．(14) 式は，遊脚のサポート相の終了時期を，ステップ S_{k+1} の支持脚3角形の中に基準安定余裕 s_0 分だけ重心が入り込んだ時に，できる限り一致するように誘導しようとするものである．なお，ステップ S_{k+1} の支持脚3角形に入れるのであれば，重心はできる限り先に進むべきである．よって $g=g_{\max}$ である．

以上により g_0，と g の決定法が求まった．なお，遊脚がアップ相に入ってから N_{k+1} までの重心移動量 g_u は，当然 $g_u=g-g_0$ である．

5.3 遊脚着地点探索領域の設定

ステップ S_{k+1} での遊脚 u が定まり，座標系 E_k でのこの間の重心の移動距離 g が求まった後には，座標系 E_k に対する N_{k+1} での遊脚着地座標を決定するため，その探索領域の設定が必要となる．最も単純な考え方は，この領域を遊脚 u の全可動範囲とするものであろう（もちろんこの範囲はすでに定義したソフトウエア上の仮想可動範囲である）．しかしながらシミュレーション実験から，この考え方は妥当でないことがわかった．たとえば Fig. 6（a）は x 方向基準側行歩容であるが，これを Fig. 6（c）のように若干異なるパターンから出発し，遊脚はその可動範囲いっぱいに復帰運動させることを考える．そうすると4歩目で歩行不能状態に陥る．地形は完全平坦地であったとしても歩行できなくなるということである．このことから，遊脚の着地点をあらかじめ制限しておくことの必要性がわかる．

多くのシミュレーション解析の結果，この設定法には大別して3つの考え方があることがわかった．そこでそれらを領域設定法 I，II，III と呼び，以下それぞれについての説明をおこなう．

a） 領域設定法 I

Fig. 6（c）の4歩目においてなぜ歩行不能になったかを考えると，これは脚2が遊脚化すべきときに脚2を最大に伸ばしても重心を前方の支持3角形内に入れられず，そのため脚2が遊脚化できないためである．しかしこの問題は，実はこれより2ステップ前に脚3が着地した時すでに生じている．そのため，この脚3の着地点を決定するとき2ステップ後の脚2の可動範囲の限界を考えておくことをしていれば，上述の問題は防げたものと思われる．このような考え方が領域設定法 I の基本である．

領域設定法 I は，後脚を遊脚化するときの着地領域の決定にのみ適用され，その決定に際して可動範囲を考慮すべき脚は遊脚 u に対し，その前脚 f を除く $\bar{f}, \bar{r}$，そして遊脚 u 自身である．つまり領域設定法 I は，ステップ S_{k+1} で後脚 u が遊脚化した後，ステップ S_{k+2} で前脚 f が遊脚化される通常シーケンスにおいて，さらにその後，ステップ S_{k+3} で重心がその時の支持脚3角形の内部に入れなくなることがないように，あらかじめ探索領域の限定を行なっておこうとするものである．具体的な手順を以下に示す．

まず考慮すべき遊脚 u の可動範囲は座標系 E_{k+1} 上の

ものを座標系 E_k に投影したものと考える．そしてこの可動範囲に対しさらに以下の制約をあたえる．

1) まず遊脚 u に対し脚 $\bar{f}$ と脚 $\bar{r}$ のみの制約を考える．このとき重心の平面移動量 $g_{\max}'$ はそれぞれの xy 方向可動範囲の制約の最小値，つまり

$$g'_{\max}=\min(g_{\bar{f}x}, g_{\bar{f}y}, g_{\bar{r}x}, g_{\bar{r}y}) \qquad (15)$$

よりは大きくできない．よって探索すべき領域は，$L(P_{g_{\max}'}, P_{\bar{f}})$ の後方領域とする．こうすれば，2ステップ後まだ脚 $\bar{f}, \bar{r}$ がそのまま着地していても重心は直線 $L(P_{\bar{f}}, P_{\bar{r}})$ を通過でき，少なくとも縦安定余裕 $s=0$ で支持脚3角形（$\Delta f\bar{f}u$）の内部に入れるからである．脚3について，この領域設定法を行なった例を **Fig. 10** のIで示した直線に示す．

2) 次に脚 u 自体による制約を考える．脚 u も着地位置によっては2ステップ後，重心を脚 $u, \bar{f}$ の対角線より前方に運ぶ運動を阻害することがある．この限界領域の誘導は若干煩雑である．まず **Fig. 11** のように遊脚 u が脚3であり $x=x_3$ のいずれかの場所に着地することを考える．そして G_0 を重心移動軌跡 L_G 上で

$$D_x(G_0, P_3)=x_0+x^* \qquad (16)$$

を満足する点とする．このとき脚3は点 P_1, G_0 を結ぶ線 $L(P_1, G_0)$ よりも後方にすべきである．そうすれば2ステップ後，重心が G_0 に至ったとき遊脚 u と脚 P_1 を結ぶ直線より重心を前方に位置できるからである．この条件は $L(P_1, G_0)$ と $x=x_3$ の交点を P_c とすると $x=x_3$ の線上では $y=0\sim P_c$ までの線分を許容することを意味する．このような領域を示す線 x_3 を変えながら誘導すると点 $P_c(x_c, y_c)$ は以下の双曲線を成し，許容範囲はその原点側である．

$$(y-x\tan\alpha)(x-x_{\bar{f}}+dx_u)=(y_{\bar{f}}-x_{\bar{f}}\tan\alpha)dx_u \qquad (17)$$

$$\text{ただし}\quad dx_u=x_0+x^*$$

同様の原理を脚 u の y 方向可動範囲に適用するとその臨界線は

$$(y-x\tan\alpha)(y-y_{\bar{f}}+dy_u)=(y_{\bar{f}}-x_{\bar{f}}\tan\alpha)dy_u \qquad (18)$$

$$\text{ただし}\quad dy_u=\begin{cases}-y_0 & (\alpha>0\ \ \text{脚}2)\\ -y_0-y^* & (\alpha<0\ \ \text{脚}2)\\ y_0+y^* & (\alpha>0\ \ \text{脚}3)\\ y_0 & (\alpha<0\ \ \text{脚}3)\end{cases}$$

であり，やはりその原点側が許容領域である．領域設定法Iとはこれら3つの限界線で示される共通領域ということになる．

b) 領域設定法II

領域設定法IIも後脚にのみ適用される．ただし，考慮するのは領域設定法Iと異なり直後のステップでの収束性である．つまり，ステップ S_{k+1} で後脚 u が遊脚であった後，ステップ S_{k+2} でその前脚 f が遊脚化されれば，基準歩容の遊脚化順序をとることとなり，基準形への収束が早く望ましい．そこで領域設定法IIでは遊脚 u を $L(P_{\bar{f}}, Pg_{\max})$（ただし $g_{\max}$ は (12) 式で定義したステップ S_{k+1} での重心移動量）の前方に置くべきであることを主張している．

ただし，領域設定法IIは領域設定法Iとは異なり，指定する領域以外の着地を完全に禁止するものでなく，単に探索の優先順序を与えるだけである．

c) 領域設定法III

領域設定法IIIは，後脚だけでなく前脚にも適用される．この設定法は単純である．たとえば Fig. 10 のように側行角 α が大きくて重心移動軌跡 L_G が脚の可動範囲を横切るとき，脚3についてはこの重心移動軌跡 L_G の右側のみを探索領域とするものである．これは重心移動軌跡 L_G に対する脚の左右の位置関係を保持することを目的としたものである．

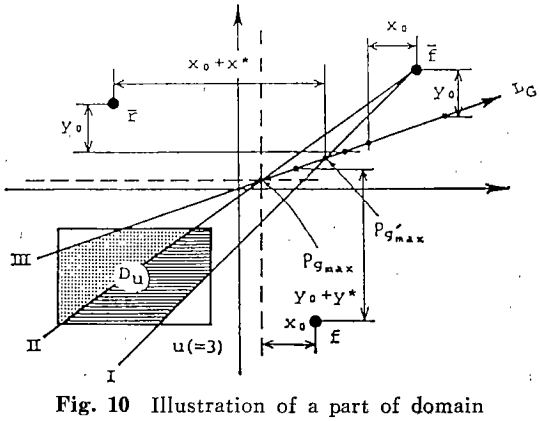


Fig. 10 Illustration of a part of domain prescribing method I, II, and III

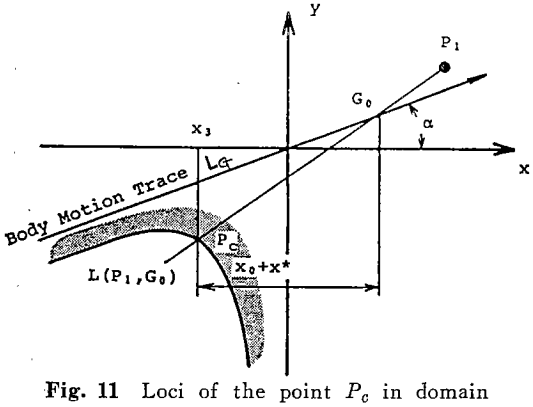


Fig. 11 Loci of the point P_c in domain prescribing method I, based on the geometric limitation of leg u

以上領域設定法 I, II, III を説明したが，遊脚の着地点探索領域 D_u はこれら領域設定法 I, II, III を満足し，しかも脚可動範囲内の領域として定義される．Fig. 12 にはH型荒地の歩行例により領域設定法の適用状況を説明している．

5.4 探索開始点 I_u の決定

探索領域 D_u の中で特に探索を開始する点 I_u に注目する理由は，平坦地やO型荒地では，探索開始点 I_u がそのまま着地点 J_u となるため，この選択が基準収束型適応歩容への収束特性を与えることになるからである．I_u の決定法としては，以下のような「位相保持法」を提案する．これは，まずある脚 u に対し基準歩容では1ステップ前に遊脚である脚（これを u^* と呼んでおく）の位置に注目する．そしてこの u^* が支持脚のまま，x 方向か y 方向の可動範囲の限界まで到達することを想定する．このとき，遊脚 u が足先の基準ストローク軌跡（Fig. 4 参照）にあり，このコースの終点（可動範囲限界線と交わる点）より基準歩容でとるべき位相差分だけ u^* より前に位置していれば，遊脚 u^* が復帰を完了するときには u はコース終点に至る．そして u^* の復帰完了点が基準歩容のコース開始点であるとすれば，u と u^* の位置関係は基準歩容のパターンと一致する．このようにして基準歩容への復帰性の高い I_u の決定を行なおうとするものである．具体的には，点 $P_{\Delta x}, P_{\Delta y}$ を足先の基準ストローク軌跡上に求める．これは，

$$\left.\begin{aligned} D_x(P_{\Delta x}, P_{u^*}) &= \Delta x \\ D_y(P_{\Delta y}, P_{u^*}) &= \Delta y \end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

を満足する点であり，$\Delta x, \Delta y$ は **Table 2** に示す．そして I_u は $P_{\Delta x}, P_{\Delta y}$ のうち遊脚の復帰量の少ない方とし，もしも両者とも探索領域 D_u に含まれない場合には，足先の基準ストローク軌跡と D_u 境界の交点のうちの前方を I_u とする，というのが本論文で提案する「位相保持法」である．

なお，これ以外に重心に対する基準位置や脚相互の位置関係から I_u を決める手法も考えられるが，シミュレーション実験によるとこの「位相保持法」が最も基準形への収束性が良好であった．

5.5 着地点 J_u の決定

Table 2 Δy and Δy for the Phase-Reserved Positioning Method

u	u^*	Δx	Δy
1	2	$2x_0+\frac{3}{2}x^*+\left(\frac{1}{\beta}-\frac{3}{2}\right)\lambda^*\cos\alpha$	$\frac{\mathrm{sgn}(\alpha)}{2}y^*+\left(\frac{1}{\beta}-\frac{3}{2}\right)\lambda^*\sin\alpha$
4	3		
2	4	$-2x_0-\frac{1}{2}x^*-\frac{1-\beta}{2\beta}\lambda^*\cos\alpha$	$-\mathrm{sgn}(u-2.5)\cdot(2y_0+y^*)+\frac{\mathrm{sgn}(\alpha)}{2}y^*-\frac{1-\beta}{2\beta}\lambda^*\sin\alpha$
3	1		

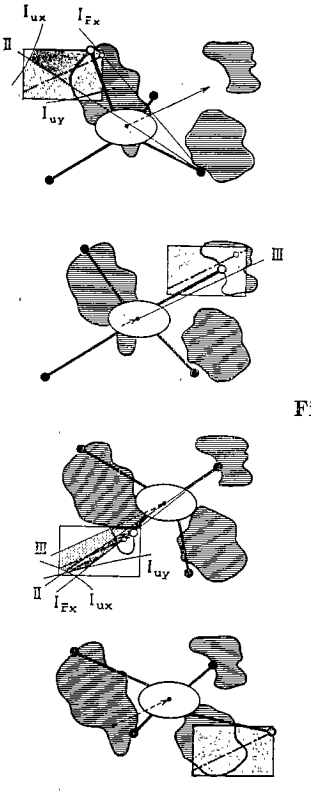


Fig. 12 Integrated procedure of the adaptive-gait-control sequence $\alpha=28°$; $\beta=0.8$; I_{rx} indicates the domain prescribing method I when the x-directional mechanical limit of leg r is applied

探索領域 D_u の中で，探索開始点 I_u から実際の着地点 J_u を決定する手順としてはいろいろな手法が考えられるが，ここでは単純な以下のような手順を提案する．

1. 探索領域 D_u を地図情報と対応させて有限幅の離散化セル a_{ij} に分割する．

2. 探索開始点 I_u の存在するセル a_{ij} について地図を参照し，その点が Hole でなく着地可能か判定する．可能であればこの点を着地点とする．着地不可能であれば以下の手順を行なう．

3. まず列方向に $a_{i+1,j}, a_{i-1,j}, a_{i+2,j}, a_{i-2,j}$ のよう

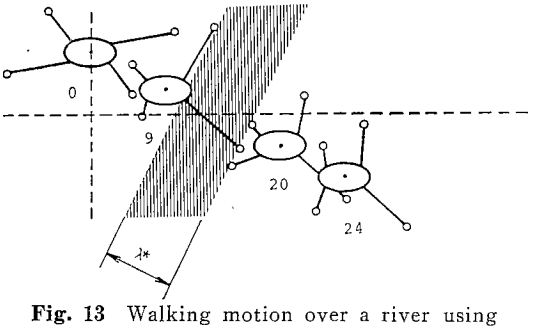


Fig. 13 Walking motion over a river using the proposed algorithm (Step numbers are shown : $\beta=0.75$)

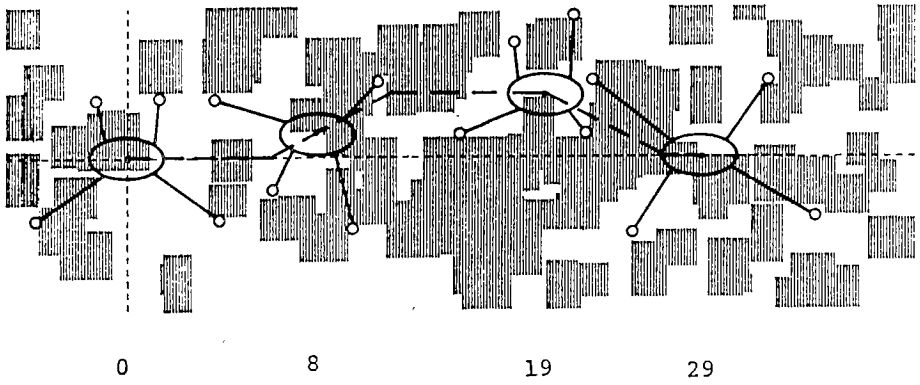


Fig. 14　Adaptive walking on H-type terrain with local modification of the motion trace

に D_u 内のセルの着地可能性の判定を行なう．

4.　まだ着地可能点がなければ行方向に $j-1$, $j+1$, $j-2$, $j+2$ と D_u 内の探索を拡張してゆき，最終的に J_u を決定してゆく，というものである．ここで，各行の探索開始点は足先の基準ストローク軌跡を含むセルからである．

5.6　計算機シミュレーションによる検討

以上に導入した歩容決定法の妥当性は，多くの計算機シミュレーションにより検証したが，ここではそのうちの3例を示す．**Fig. 12** はH型荒地での歩容決定シーケンスを具体的に示した例である．領域設定法 I, II, III および D_u, I_u, J_u などの設定の様子を示している．**Fig. 13** は河に相当する障害を渡るシミュレーションである．河の幅は脚の可動範囲で許容される最大振り幅と同じ λ^* としている．この場合でも河の手前で河渡りの体勢をとり，渡った後には自動的に基準側行歩容にもどる歩容が取られていることがわかる．**Fig. 14** は多数の穴のあるH型荒れ地での歩行を示している．この例ではレベルAで与えられた指令コースの途中に踏破不可能な大型の穴がある．そこでこの歩容決定ではコースを台形型に迂回させ，側行角を変えながら歩き続けている．このような迂回軌跡の生成はレベル B_1 で生成したものであり，本論文では生成法については論じないが，いずれにしろこれらのシミュレーション実験から，かなりの荒地条件であっても本歩容決定法により基準収束型適応歩容が生起され，歩行機械は指令された重心移動軌跡を追従してゆき歩行を持続していることがわかる．

6.　z 歩容決定（レベル B_3）

座標系 E_k においての，重心のステップ切換点 N_{k+1} の位置 $P_g(g\cos\alpha, g\sin\alpha)$ と，遊脚の位置 $J_u(x_u, y_u)$ の誘導法が前章で明らかとなった．本章では，それぞれの高さ g_z, z_u の誘導法の説明を行なう．

このうち遊脚の高さ z_u は，遊脚着地点 $J_u(x_u, y_u)$ に対応する座標系 E_k での地図の高さを選択すればよいので，その誘導は容易である．しかし，重心高さ g_z を誘導するには，地表から重心を高さHだけ上に保つ条件や，胴体を地表に衝突せずしかも連続的に上下させる条件を考慮する必要がある．そしてこのような g_z の誘導法にはいくつかの立場が考えられるが，本研究では前脚 $(f, \bar{f})$ の高さ情報のみを用いる手法を提案する．なお，このときの前脚とは側行角に応じて定義するものである．

一般に歩行機械の構造上，前脚に当たる脚は常に重心よりも進行方向の前方に位置している．よってその前脚の着地点高さから重心にとっての地形の将来の高さを予測することができる．そこでこの手法ではまず推定した N_{k+1} での前2脚の地表高さを，地図と照合することにより求める．そして xy 平面上で前2脚を結ぶ直線 $L(P_f, P_{\bar{f}})$ と重心移動軌跡 L_G の交点を $A(x_A, y_A)$ とし，A点の予測高さを

$$\hat{z}_A=\frac{(x_A-x_{\bar{f}})z_f+(x_f-x_A)z_{\bar{f}}}{x_f-x_{\bar{f}}} \qquad (20)$$

とする．なおここでA点の予測高さを上記の手順によらずただ単にA点の地図の標高と単純に考えてはならない．なぜなら，たとえば穴の乗り越えを行なう場合には，(20) 式によらないとその穴の深さを無視することができなくなるからである．さてこのようにA点の予測

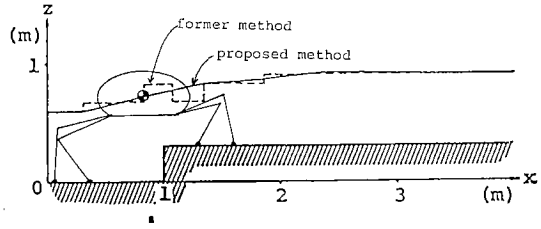


Fig. 15　The trajectory of body's center over steps

高さを定めるとA点での重心高さは $\hat{z}_A+H$ であればよいことになる．そのため N_{k+1} での重心高さ目標値 g_z は結局，

$$g_z=\frac{g}{\sqrt{x_A{}^2+y_A{}^2}}(\hat{z}_A+H) \qquad (21)$$

となる．なお実際の制御では，z 方向の可動範囲を考慮して，$z_g\geq -z_0$ のときは $z_g=-z_0$，$z_g\leq z_0-z^*$ のときは $z_g=-z_0-z^*$ のように上下限を設けるようにする．(このときの可動範囲は，上方の余裕幅 δz に遊脚の上昇高さが含まれると考え，$-z_0-z^*\sim -z_0$ としている)．こうするとステップ S_{k+1} での重心の移動方向の迎角 ϕ_G は $\phi_G=\tan^{-1}(g_z/g)$ である．

このように重心高さを予測計測し，その計測値を折線的に連結して重心の高さを制御しようというのが提案する手法である．この手法のシミュレーション実験例を **Fig. 15** に示す．図中の破線は従来の試作機で用いていた，支持脚高さの平均を常時-Hとする方式で生じた軌跡である．予測にもとずく本方式によれば，従来の方式よりはるかに改善された円滑な重心の高さ制御が実現し得る事がわかる．ただし，ここでは重心は十分高く保つことを前提とし，胴体下端と地表との接触時の対処については未だ考察していない．

7. 脚軌道生成（レベル B_4）

重心座標系 E_k におけるステップ切換点 N_{k+1} での重心の三次元座標 P_g と，遊脚着地点の三次元座標 J_u，の誘導法を前章までに示した．これによりステップ S_{k+1} においての，全4脚駆動サーボ系への速度指令値を誘導するすべての準備ができた．以下支持脚と遊脚に分けてその誘導法を示す．ただし，このときには前提として，重心の移動速度 v_G は各ステップごとに一定に保たれていると想定する．今後は，動きの滑らかさを増大するため，速度変化の連続性を考慮した速度設定法も考えて行くべきであるが，ここでは，演算が簡潔なためこの設定を用いる．

さて，支持脚は，重心が移動する分だけ正反対に全支持脚とも同期して振れば良いから，その xyz 方向の移動量は一律に $(-g\cdot\cos\alpha, -g\cdot\sin\alpha, -g_z)$ とすればよい．ただし，その速度 $-v_G(-v_{Gx}, -v_{Gy}, -v_{Gz})$ はステップでの速度均一化条件から遊脚の速度の誘導の後決定されるものである．

遊脚の運動は，すでに述べたように脚の上下運動を含む凹凸吸収歩容を行なうことが前提となっているので，その具体的な誘導法は若干複雑である．そこで次節に凹凸吸収歩容の具体的な誘導法をまず示し，その後それをもとに遊脚を含む全脚の軌道指令値の生成法を論ずることにする．

7.1 凹凸吸収歩容のための脚軌道生成

すでに述べたように，凹凸吸収歩容を行なうためには，遊脚はステップ S_{k+1} において支持脚の推進運動に協調してサポート相，アップ相，リターン相，ダウン相という4つの相からなる3次元的な復帰動作を行なわなければならない．このうち，サポート相での重心移動距離は 5·2 節の解析から g_0 と与えられており，またそこでの制御は支持脚と同じである．よって以降アップ相，リターン相，ダウン相という3つの相での条件を検討する．そしてここでもまず x 方向の関係を誘導する．

誘導にあたっての既知量は，レベル B_2, B_3 の歩容決定により求まっている3相での重心の x 方向移動量 g_{ux} $(=g_u\cdot\cos\alpha)$，座標系 E_k における遊脚の x 方向復帰幅 $D_x(J_u, P_u)$，地形の計測結果から定められていると想定する遊脚の上昇下降幅 h_{up}, h_{dwn} そして歩行の高速化のため機械的最大値とする上下動の速度 v_{up}, v_{dwn} である．一方，知りたい脚軌道パラメータは，重心の地表に対する x 方向移動速度 v_{Gx}，遊脚の重心に対する x 方向復帰速度 $v_{rtn}{}^x$，そして重心に対する遊脚の復帰幅 x_{rtn} である．これらには次の関係が成り立つ．

$$g_{ux}=v_{Gx}\left(\frac{h_{up}}{v_{up}}+\frac{x_{rtn}}{v_{rtn}{}^x}+\frac{h_{dwn}}{v_{dwn}}\right) \qquad (22)$$

$$D_x(J_u, P_u)=x_{rtn}+v_{Gx}\left(\frac{x_{rtn}}{v_{rtn}{}^x}\right) \qquad (23)$$

式 (22) は，アップ相，リターン相，ダウン相の3相での重心の移動距離 g_{ux} が，3相で重心が移動速度 v_{Gx} で推進した移動距離と等しいことを表わす．式 (23) は，座標系 E_k における遊脚復帰幅が，重心に対する遊脚復帰幅 x_{rtn} とリターン相での重心の移動量の和であるという関係を表わす．

これら2式を解き，脚軌道パラメータ $v_{Gx}, v_{rtn}{}^x, x_{rtn}$ の3つを誘導したいわけであるがこのためには未知数を1つ定める必要がある．未知数の設定は状況に応じて以下のように行なう．

(1) x 方向遊脚復帰速度 $v_{rtn}{}^x$ を機構的な最大速度 V_x とする．これは重心移動を最高速度 V_{Gx} としたい場合に相当する．このとき V_{Gx} の値は，

$$V_{Gx}=\frac{\sqrt{B^2-4AC}-B}{2A} \qquad (24)$$

ただし
$$\begin{cases} A=\left(\dfrac{h_{up}}{v_{up}}+\dfrac{h_{dwn}}{v_{dwn}}\right)\Big/V_x \\ B=\dfrac{h_{up}}{v_{up}}+\dfrac{D_x(J_u, P_u)-g_x}{V_x}+\dfrac{h_{dwn}}{v_{dwn}} \\ C=-g_{ux} \end{cases}$$

となる．またこのときの x_{rtn} は

$$x_{rtn}=V_x\left\{\frac{g_{ux}}{V_{Gx}}-\left(\frac{h_{up}}{v_{up}}+\frac{h_{dwn}}{v_{dwn}}\right)\right\} \quad (25)$$

と求まる．

（2） 重心移動速度を v_{Gx} とする．これは，（1）で得られた重心移動速度の最大値 V_{Gx} よりも遅い任意速度 v_{Gx} での移動を行う場合を意味する．このとき x_{rtn}, $v_{rtn}{}^x$ は

$$x_{rtn}=(D_x(J_u, P_u)-g_x)+v_{Gx}\left(\frac{h_{up}}{v_{up}}+\frac{h_{dwn}}{v_{dwn}}\right) \quad (26)$$

$$v_{rtn}{}^x=\frac{x_{rtn}}{\dfrac{g_{ux}}{v_{Gx}}-\left(\dfrac{h_{up}}{v_{up}}+\dfrac{h_{dwn}}{v_{dwn}}\right)} \quad (27)$$

と求まる．

（1）および（2）により，歩行機械が凹凸吸収歩容を行いながらしかも最高重心移動速度 V_{Gx} 以下の任意の歩行速度 v_{Gx} で移動するための，歩行パラメータの決定法が明らかになった．

以上は x 方向についてのみの議論であったが，yz 方向についても同様の関係式が成り立つ．ただし，側行角 α や迎角 ϕ_G が負のとき，遊脚復帰中の重心移動距離は負となるが，この場合これらの符号を変えた後歩行パラメータを求め，さらにその後符号をもとにもどすという処理を仮定すれば，上記の議論はそのまま成り立つ．

さて，遊脚の復帰動作は x, y, z 方向を同期して行なうべきである．そのため重心の速度 v_G は上位（レベルA）からの指令がたとえ $v_G{}^d$ であったとしても xyz 方向の重心移動最大速度 V_{Gx}, V_{Gy}, V_{Gz} から上限が設定され，実際には

$$v_G=\min\left(\frac{V_{Gx}}{\cos\phi_G\cos\alpha},\ \frac{V_{Gy}}{\cos\phi_G\sin\alpha},\ \frac{V_{Gz}}{\sin\phi_G},\ v_G{}^d\right) \quad (28)$$

でなければならない．このとき，遊脚のリターン相の時間 t_{rtn} は

$$t_{rtn}=\frac{g_u}{v_G\cos\phi_G}-\left(\frac{h_{up}}{v_{up}}+\frac{h_{dwn}}{v_{dwn}}\right) \quad (29)$$

となる．

以上により，xyz の同期を考慮したうえでのリターン相での時間 t_{rtn}，重心移動速度 v_G の誘導法が明らかとなった．なおこのときの x 方向の重心の移動速度は，

$$v_{Gx}=v_G\cdot\cos\phi_G\cos\alpha \quad (30)$$

であり，$v_{Gy}=v_G\cos\phi_G\sin\alpha$，$v_{Gz}=v_G\sin\phi_G$ となる．またリターン相での x 方向速度は，

$$v_{rtn}{}^x=(D_x(J_u, P_u)-g_x)/t_{rtn} \quad (31)$$

となる．さらに $t_{up}=(h_{up}/v_{up})$，$t_{dwn}=(h_{dwn}/v_{dwn})$ は自明であり，また後脚が遊脚するときの始めにあるサポート相の時間 t_{spt} は，

$$t_{spt}=g_0/(v_G\cdot\cos\phi_G) \quad (32)$$

である．ステップ S_{k+1} のステップ時間 T_{k+1} は，$T_{k+1}=t_{spt}+t_{up}+t_{rtn}+t_{dwn}$ となる．以上で未知の軌道パラメータが求まり，駆動サーボ系へのすべての指令値が生成できたことになる．

8. 反射的運動調整系（レベルC）

運動調整系であるレベルCは，各ステップを細分する一定間隔のサンプル時間ごとに，まず脚駆動サーボ系からの位置指令，足先や胴体などの触覚センサ群からの信号，姿勢センサの信号を取り込み，レベルBであらかじめ誘導してある脚サーボ指令に安定性維持や障害物接触等の非常時回避動作指令を相乗させ，最後にそれを脚駆動サーボ系への最終的な逐次目標値として与えるという動作を繰り返すためのサブシステムである．このサンプル時間は，脚の高速で円滑な動きを生ずるためにはプロセッサの演算速度が許容する限り短いほどよい．たとえば，脚の振り速度が 1m/sec の時，サンプル時間 50m/sec での脚の移動量は 50mm であるが，今後脚の加減速制御を行なったり，障害物接触時に素早い対応をするにはこれでは不十分である．よって，レベルCの処理系ではサンプル時間を出来る限り短くするための演算処理上の工夫が一つの要点となる．またレベルCになるとその制御方式は歩行機械のハードウエアの特性に大きく依存する．本研究では，後述する試作歩行機械 TITAN III を基に論じておく．以下本論文で提案するレベルCの制御アルゴリズムを示す．ただしこれは歩行実行中のステップ S_k において n 回目のサンプル時点での処理手順を示したものである．

1） 4脚の位置 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ $(i=1\sim4)$ に関するポテンショメータ信号，各脚からの触覚信号，ジョイスティックからの側行角と移動速度の指令信号，ピッチ角，ロール角の姿勢信号を，サンプリングの開始時点 $(n\Delta t)$ で取り込む．

2） 遊脚については，脚軌道生成アルゴリズム（レベルB）で生成した．アップ，リターン，ダウンの3相の軌道を辿らせるために，時刻 $t(n\Delta t\leqq t<(n+1)\Delta t)$ での遊脚の目標値を

Table 3 Velocity commands in swing leg phases

v_u \ phase	support	up	return	down
v_{ux}	$-v_{Gx}$	$-v_{Gx}$	v_{rtn}^x	$-v_{Gx}$
v_{uy}	$-v_{Gy}$	$-v_{Gy}$	v_{rtn}^y	$-v_{Gy}$
v_{uz}	v^* (note)	v_{up}	v_{rtn}^z	v_{dwn}

$$\left.\begin{aligned} x_u{}^d(t)&=x_u{}^d((n-1)\Delta t)+v_{ux}\Delta t \\ y_u{}^d(t)&=y_u{}^d((n-1)\Delta t)+v_{uy}\Delta t \\ z_u{}^d(t)&=z_u{}^d((n-1)\Delta t)+v_{uz}\Delta t \end{aligned}\right\} \quad (33)$$

のように与える．ただしここで，Δt はサンプリング間隔，v_{ux}, v_{uy}, v_{uz} は各相においてそれぞれ **Table 3** のように定義された速度である．表中の v^* については支持脚についての速度指令と同様に設定する．また，$x_u{}^d(0), y_u{}^d(0), z_u{}^d(0)$ はステップ切換点 N_{k-1} における遊脚位置座標に相当している．

3) 支持脚については

$$x_j{}^d(t)=x_j{}^d((n-1)\Delta t)+v\Delta t \quad (34)$$

$$y_j{}^d(t)=y_j{}^d((n-1)\Delta t)+v\Delta t \quad (35)$$

$$\begin{aligned} z_j{}^d(t)=&\{z_j{}^m(n\Delta t)+(z_j{}^*(n\Delta t)-\bar{z}_j{}^m(n\Delta t))\} \\ &+C_1(-x_j{}^m(n\Delta t)\cdot\theta_p+y_j{}^m(n\Delta t)\cdot\theta_r) \\ &+C_2\Delta z \end{aligned} \quad (36)$$

とする．ここで，xy 方向は単に目標値を設定速度で動かすだけであるが，z 方向には幾つかの調整機能が付加されている．つまり，(36)式の右辺第1項中の $z_j{}^*(n\Delta t)$は

$$z_j{}^*(n\Delta t)=\begin{cases} \bar{z}_j{}^m(0) & n=0 \\ z_j{}^*((n-1)\Delta t)-v_{Gz}\Delta t & n\geq 1 \end{cases} \quad (37)$$

のように定義するものであり，姿勢制御となじみ制御とからの修正を受けない高さ目標値である．$\bar{z}_j{}^m(n\Delta t)$ は支持脚高さのモニタ値の平均である．よって (36) 式の右辺第一項は重心の平均高さの調整を行なうものとなっている．

(36) 式の右辺第二項の $x_j{}^m(n\Delta t)$，$y_j{}^m(n\Delta t)$ は時刻 $n\Delta t$ での支持脚座標のモニター値，θ_p, θ_r は同じく各サンプリングタイムごとの水平面からのローリング角とピッチング角の偏差値である．よって，この第二項は姿勢制御のための補正指令値の生成を行っている．なお，本式の誘導は付録Aに示す．

(36) 式の右辺第三項の Δz は，4脚支持相の場合に支持脚のどれかの足裏センサが OFF になったら一定距離その脚を下に伸ばすという動作を行なうためのものである．4脚支持相は不整定状態であるので，できる限り全脚で体重を支持するためこのような調整機能が必要となる．このことから，Δz の機能は「なじみ制御」と呼ぶことにする．C_1, C_2 は姿勢制御，なじみ制御の感度を与える荷重係数である．

4) 算出した $x_i{}^d(t), y_i{}^d(t), z_i{}^d(t)$ と時刻 $n\Delta t$ で検出した脚の実際のモニター値との差から，時刻 t でのサーボ系への速度指令値は次のように生成される．

$$\left.\begin{aligned} v_{ix}{}^d(t)&=(x_i{}^d(t)-x_i{}^m(n\Delta t))/\Delta t \\ v_{iy}{}^d(t)&=(y_i{}^d(t)-y_i{}^m(n\Delta t))/\Delta t \\ v_{iz}{}^d(t)&=(z_i{}^d(t)-z_i{}^m(n\Delta t))/\Delta t \end{aligned}\right\} \quad (38)$$

この速度指令値の生成には，このようにP制御だけでなく歩行ロボットに適した PID 制御を今後導入して行くべきであるが，ここではまだ論じない．以上がレベルCでの作業である．

なお，(33) 式において通常よく用いられるような，$x_i(n\Delta t)=x_i(0)+n\Delta x$ という移動量の算出法を採らなかったのは，ステップが変わるごとに初期値 $x_i(0)$ の書き換えを行なわなければならないが，その手順が繁雑になるためである．(35) 式の方式によれば，ステップの位相が異なる4脚を同じような処理手順で制御でき，手順が簡潔で演算も速い．誤差の累積も1サイクルごとに解消されるため問題にならない．

9. 非常動作とその制御

9.1 非常動作の種類

非常動作とは，今まで述べてきたような，予測制御に基づく通常動作が出来なくなる時にとる動作である．現状では非常事態として次の3種類を考慮している．

（1） 移動中遊脚が障害物に接触した時．

（2） 遊脚がステップ切換点に至っても接地しない時．

（3） 遊脚の着地点の足場が不安定な時．

なお，（1）については，移動中の胴体と障害物との接触も本来は含めて考えるべきである．しかし，その処理法は遊脚接触に準じて考えられ，またここでは胴体を高く保つことを想定することにより，ひとまず除外しておく．本研究で導入したこれら（1），（2），（3）のための処理手順は次節にまとめる．

9.2 非常動作の処理手順

（1）の非常動作では，遊脚足先の触覚から信号が入力されると同時に，a）遊脚と胴体の前進を停止して非常動作に入り，遊脚の復帰軌跡の一定幅逆トラッキングと，一定幅上昇を行なう．b）ついで，多少低速で遊脚のみを一定幅復帰させて行く．c）b）の結果，再度障害物に接触したら，近接センサを用いて障害物から一定距離を保つようにし脚を上昇させていく．d）b）で一定幅復帰しても障害物に接触しなければ，通常動作に復帰する．e）c）で障害物を乗り越えれば，通常動作に復帰する．f）c）で障害物を乗り越えられない場合には，レベルBにもどり着地点再考を行なう．という手順の処理を行なう．なおここで，レベルBにもどっての着地点再考の手順は次のとおりである．

Ⅰ） 非常動作を分析することにより障害物に相当する位置を判定し，地図上のその位置を着地禁止領域とする．

Ⅱ） 遊脚が現在ある位置を遊脚の着地点探査開始点とし，後退も含む新着地点の決定を行なう．

Ⅲ） その後，通常動作にもどる．

（2）の非常動作では，胴体推進を停止して非常動作に入り，遊脚を垂直下方に降下してゆく．もしも脚の下方可動範囲に到達しても着地しない場合には，その位置を地図上に着地禁止位置として書き込み（1）と同じ手順で着地点再考を行なう．

（3）の非常動作は階段の縁に接地した場合などに相当する．足先の分布触覚センサにより，そのような不安定な着地が検出されたときに，（1）と同じ手順で着地点再考を行なう．なお，足先の触覚群により縁の方向性もわかれば地図に書き込むべき禁止領域は，その方向性を有する矩形にできて実際的である．歩行機械モデル TITAN Ⅲ では実際にそのような機能を有する触覚センサを第 10 章に示すように装備し，地図を積極的に使用した歩行を実現している．

9.3　レベル B, C 間の通信

レベル B（特に B_2, B_3, B_4）とレベル C 間の信号の授受を通常動作，非常動作とも正しく行なうためにはレベル B, C 両者からアクセスできるフラグを使用し，ハンドシェイク型の通信系を構成することが有効であることがわかった．本節ではその通信方式を述べる．使用したフラグは以下の 3 種である．

フラグ 1：F_1：レベル C からレベル B へ，歩容演算を要求するときセットし，レベル B で演算終了時にリセットされるもの．

フラグ 2：F_2：レベル B からレベル C へ歩容演算が終了したことを通知するときセットし，レベル C がパラメータ受領完了時にリセットされるもの．

フラグ 3：F_3：レベル C からレベル B へ演算した歩容パラメータを要求するときセットし，レベル C がパラメータ受領完了時にリセットされるもの．

以下，通常動作と非常動作に分けてその通信方式を述べる．

通常動作ではステップ切換時にまず F_2 がセットされているか確認した後 F_3 をセットしてすでに演算した歩容パラメータをレベル C に伝達する．レベル C がこれを受領するとただちに歩行を開始する．同時に F_1 をセットし歩容演算を実行する．演算が完了したら F_1 をリセットし，F_2 をセットして次のステップ切換を待つ．次のステップでも同様の作業を繰り返す．

非常動作では，その開始点はステップ中の任意の時点であるので，非常モードに入るとすぐに胴体移動を停止させ，状況に応じた非常動作を実行する．その動作の結果 F_1 がセットされたらば歩容演算を実行する（片当たり回避動作では非常動作開始と同時に F_1 がセットされる）．F_1 のセットと同時に F_3 もセットしておく．歩容演算が完了したら F_2 をセットする．あらかじめ F_3 をセットしておいたため，歩容演算の完了と同時に着地点の再考結果はレベル C に渡され，歩行運動を再開する．この後は，通常動作に復帰する．このようにレベル B, C が通信を行なうことにより，階層制御を円滑に行なうことが可能となる．

10.　試作歩行機械モデルによる歩行実験

Fig. 17, Fig. 18 に示す 4 足歩行機械モデル TITAN Ⅲを試作し，以上の本研究で導入した制御系の妥当性を検証した．その詳細を以下に示す．

10.1　ハードウエア

TITAN Ⅲ は，脚長 1.2m，全質量 80kg，全 12 自

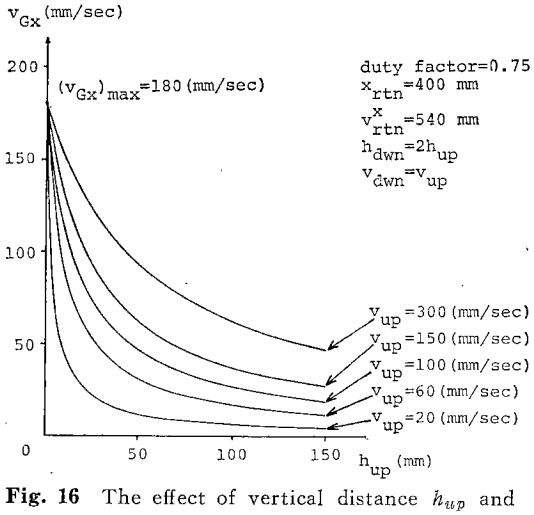


Fig. 16　The effect of vertical distance h_{up} and its velocity v_{up} of the swing leg motion to the locomotion speed of the body v_{Gx}

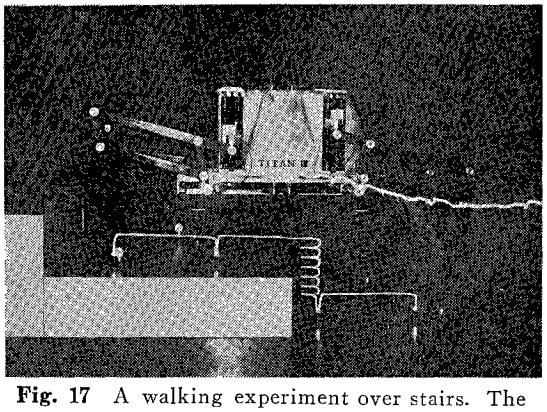


Fig. 17　A walking experiment over stairs. The foot and body motion are shown by the trajectories of the lamp attached on toe and body center

由度のリニアアクチュエータで駆動される．リニアアクチュエータは，定格出力 30W（x, z 軸），20W（y 軸）の DC モータとボールネジ，リニアローラガイドで構成される．サーボ系はポテンショメータによる変位検出とアーマチュア電圧制御型の速度コントロール方式によったソフトウエアサーボ系となっている．足先センサとしては超弾性特性を有する形状記憶合金ワイヤ 8 本を用いたウィスカセンサーを導入している．機構に関する詳細な検討は文献[15]に行なったのでここでは省略する．なお，視覚装置は現状では装備していない．

10.2 制御系の構成

制御装置としては 16bit パーソナルコンピュータ PC-9801（NEC）を用いた．入出力信号とその I/O 装置はポテンショメータ入力（12ch A/D），ジョイスティックからの指令入力（2ch A/D），加速度計を用いた姿勢角センサ入力（2ch A/D），触覚センサ入力（20bit PIO），12 軸サーボアクチュエータへの指令出力（12ch D/A）である．なおここで触覚センサとしては 9-2 節の機能を得るため，各脚 12bit のコンタクト信号を，足先に装備した ROM によって処理し，接触モードを教示する 5 bit 信号にコード化し取り込むようにしている．

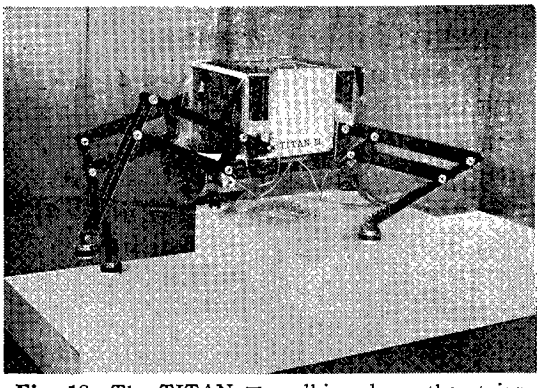
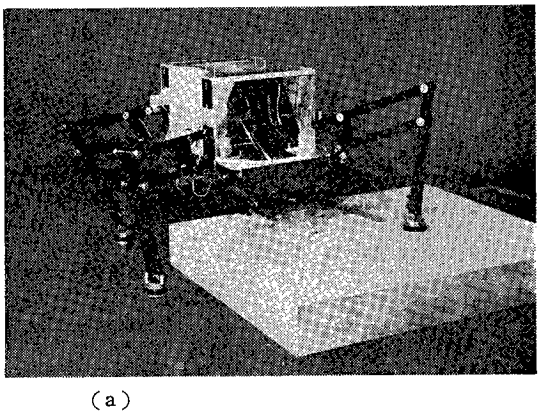
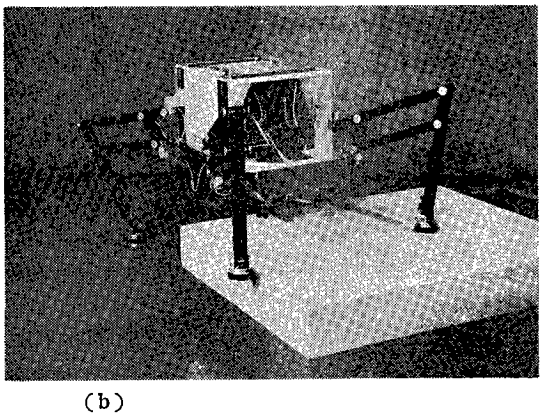


Fig. 18 The TITAN Ⅲ walking down the stairs

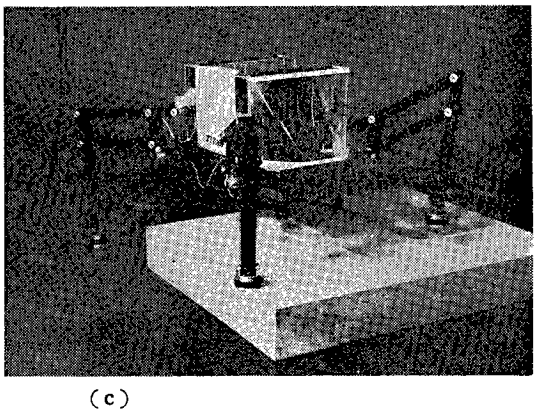
使用言語は MS-DOS 上のオプティマイズド C（CI-C 86）である．本論文に示す制御システム全体は約 70 kbyte で記述されている．本論文に記述したレベル C の単一サンプリング間隙の演算時間は約 11msec であった．よってタイマ割り込み間隙は 20msec とし，サンプリングの始めにレベル C の演算入出力を行ないその後



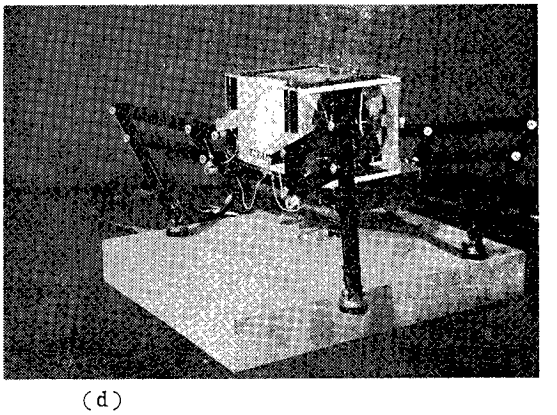
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 19 A sequence of the adaptive walking over irregular terrain

の残り時間をレベルBの演算に割り当てるタイマ割り込み処理を実行し，それによって階層制御系を構成した．

10.3 制御プログラムのインプリメンテイション

TITAN Ⅲ には視覚装置がまだ未装備のため，前章までに提案している制御プログラムは，その一部を修正した状態でインプリメントされている．その主な修正点は以下の通りである．

レベルBの制御系には，歩行機械前方の地形を 50×50 mm のセル 100×100 に分割したと想定する地図領域を有している．しかしその地図が持つ情報は，現状では足が階段の縁を部分的に踏んだ場合などの着地禁止領域に関するもののみであり，高さ情報は含まれていない．そのためステップ S_{k+1} における重心の z 歩容の決定にはステップ切換点 N_k のすでに既知である前 2 脚の位置と高さを用いることとした．これでも通常はその前脚位置は重心位置より前方に位置しているので予測的歩行は可能である．また地図から J_u の高さを予測することができないため常にこれを P_u と等しいと考え $g_z=0$, $z_{rtn}=0$ とした．さらに TITAN Ⅲ で新たに導入したウィスカセンサでは未だ距離情報は得られないコンタクトセンサなので，9·2 節の（1），c）の処理はセンサを ON OFF させながら実施している．その様子を Fig. 19 の足先軌跡に示す．こうすれば探索に時間はかかるが張り出した段差にも追従できるからである．以上の点を除けば TITAN Ⅲ の制御プログラムは本論文で論じた方法論をそのまま使用している．

10.4 歩行実験

本研究で提案したレベルB，レベルCの制御システムの妥当性を検証するため，まず TITAN Ⅲ による直進歩行実験を行った．第 7.1 節で導入した制御方式によれば歩行速度は，**Fig.16** のようになることが誘導できるが，実施可能な速度範囲での歩行実験から，この関係が成立することが検証できた．ついで，**Fig.17**, **Fig. 18** のような階段の上り降り実験を行った．Fig. 17 の足先軌跡から，足先はほぼ直方形軌跡をたどり所期の脚軌道生成ができていること，また，段差部で障害物探査を行う非常動作が理論通り生成し，障害物回避動作を行っていることが確認できた．Fig. 17 の胴体重心軌跡からは，本論文で提案した z 方向制御により，なめらかな重心軌跡制御が実現できていることがわかる．

さらにその後，予測制御による平坦地での連続的歩行，若干の凹凸面を吸収する凹凸吸収歩行，ジョイスティックで操縦することによる任意側行角の対地適応的歩行などの実験を行なった．歩行中，ジョイスティックで側行角を変えるとステップの終了後，移動方向が変化し新しい基準側行歩容に収束して行くことを確認した．±180° の全方向歩行が可能であった．**Fig. 19** は階段の上り下り実験を示す．Fig. 19（a），（b），（c），（d）は側行角 30°（$\beta=0.8$, $v_G=20$ mm/sec）の歩行実験の一部を示している．TITAN Ⅲ は自動的にブロックを乗り越えるが，その際ブロックの縁に足が当たることが足先のウイスカセンサで検出されると（Fig. 19（b））着地点再考を行ない，同時に計測される縁の方向ベクトルから，より良い着地点を地図上で探索し，足の踏み変えを行い（Fig. 19（c））歩行を持続している．平坦地にもどると基準側行歩容に収束している．これらの歩行実験から，本研究で導入した制御システムの有効性が検証できたと考えている．

11. あとがき

4足歩行機械の制御システムに関しこれまでの研究をまとめ，その階層的構造と各サブシステムの実際的構成法を統一的に論じた．そしてその妥当性を計算機シミュレーションと実際の歩行機械モデル TITAN Ⅲ の歩行実験で検証した．以上の考察により，歩行機械を「人工の馬」と発展させてゆくために必要な，一つの足がかりを与え得たと考えている．

しかし，今後この歩行機械を実用的な装置に進化させてゆくためには機構，制御両面についてのさらに多くの研究を必要とする．残された制御上の問題はたとえば，（1）視覚装置の搭載による完全なレベル B 制御系の構成とそれによる予測制御の実現．（2）動的歩行を行なうための制御系と静的と動的歩行の円滑な切換えを行なう制御系の構成．（3）遊脚復帰軌道および重心軌道をより平滑化する制御系の構成．（4）すでに提案している旋回歩容の組み込み．（5）不定形可動範囲のより実際的歩行機械のための制御システムの構成．などである．

最後に，研究遂行にあたって常に御協力いただいている梅谷陽二教授，混沌とした制御手法に秩序を与え新しい考え方を模索していた初期の段階で尽力いただいた岩崎広之氏（現（株）三菱重工），野瀬松男氏（現（株）小松製作所），実験などで現在協力いただいている本学横井一仁氏，吉田和弘氏らに深甚なる感謝の意を表する．

【付　録　A】

胴体を常時水平に保つ姿勢制御は，レベルCでサンプリングタイムごとに実行しなければならない．一般に4脚の位置ベクトルを $P_i(x_i, y_i, z_i)$ $(i=1\sim4)$ とし重心をピッチ角 θ_p，ロール角 θ_r だけ傾けるための脚の新座標ベクトルを $P_i(x_i', y_i', z_i')$ とすると，

$$\boldsymbol{P}_i'=E^{i\theta_r}E^{j\theta_p}(\boldsymbol{P}) \qquad \text{(A-1)}$$

である．ただし，$E^{i\theta_r}, E^{j\theta_p}$ はそれぞれ x 軸，y 軸まわ

りの回転変換行列を示す[17]．これから，

$$\left.\begin{aligned} x_i' &= x_i\cos\theta_p + z_i\sin\theta_p \\ y_i' &= x_i\sin\theta_r\sin\theta_p + y_i\cos\theta_r - z_i\sin\theta_r\cos\theta_p \\ z_i' &= -x_i\cos\theta_r\sin\theta_p + y_i\sin\theta_r + z_i\cos\theta_r\cos\theta_p \end{aligned}\right\} \quad \text{(A-2)}$$

が求まる．θ_p, θ_r とも微小とすれば，

$$z_i' = -\theta_p x_i + \theta_r y_i + z_i,\quad x_i' = x_i,\quad y_i' = y_i \quad \text{(A-3)}$$

となる．実際の制御に当たっては，サンプル時間が短く偏差が少ないため，高速演算が可能な（A-3）式の近似修正法を用いる．

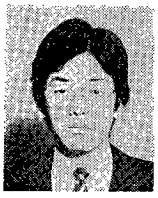
参考文献

1) R. McN. Alexander and G. Goldspink, "Mechanics and Energetics of Animal Locomotion", Chapman and Hall Ltd, pp. 131-147, 1977
2) McGhee, R. B., and Frank, A. A., "On the stability properties of quadruped creeping gait", Math. Biosci., Vol. 3-3, pp. 331-351, 1968
3) McGhee, R. B., et al., "Real-time computer control of a hexapod vehicle", Proc. 3rd CIS-IFToMM Symp. Theory and Practice Robots and Manipulators. Amsterdam, Elsevier, pp. 323-339, 1978
4) McGhee, R. B., and Iswandhi, G. I., "Adaptive locomotion of multilegged robot over rough terrain", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC, Vol. 9-4, pp. 176-182, 1979
5) Kugushev, E. I., and Jaroshevskij, V. S., "Problems of selecting a gait for an integrated locomotion robot", Paper delivered at 4th Int. Conf. Artifical Intell. Tbilisi, Georgian SSR, USSR., 1975
6) D. E. Okhotsimski, et al., "Integrated walking robot simulation and modelling", IFAC 7th Triennial World Cong., A Link Between Science and Applications of Automatic Control, Helsinki, pp. 917-924, 1978
7) 広瀬，岩崎，梅谷，"歩行機械の静的安定性評価基準"，第21回自動制御連合講演会講演予稿集，pp. 253-254, 1978
8) 広瀬，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. 18-2, pp. 193-200, 1982
9) Hirose, S., "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle", Int'l Journal of Robotics Research, Vol. 3-2, pp. 113-133, 1984
10) 広瀬，菊池，梅谷，"4足歩行機械の基準旋回歩容"，日本ロボット学会誌，Vol. 2-6, pp. 545-556, 1984
11) 広瀬，菊池，梅谷，"4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究　その4　障害回避経路の生成"，第25回自動制御連合講演会講演予稿集，pp. 331-332, 1982
12) 広瀬，菊池，梅谷，"4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究　その5　重心高さの制御"，第1回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集，pp. 117-118, 1983
13) 広瀬，菊池，福田，梅谷，"4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究　その7　遊脚の軌道生成"，第2回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集，pp. 37-40, 1984
14) 広瀬，梅谷，"歩行機械の脚形態と移動特性"，バイオメカニズム学会編，バイオメカニズム　5　—動体の機構と制御—，pp. 242-250, 1980
15) Hirose, S., Masui, T., Kikuchi, H., Fukuda, H., Umetani, Y., "TITAN III: A Quadruped Vehicle—Its Structure and Basic Characteristics…", Proc. of 2nd Int'l Symp. of Robotics Research, Kyoto Japan, pp. 247-253, 1984
16) Wilson, D. M., "Insect walking", Annu. Rev. Entomol. 11, pp. 103-121, 1966
17) 牧野　洋，"自動機械機構学"，日刊工業新聞社，1976

広瀬茂男 (Shigeo HIROSE)

昭和22年12月6日生れ，51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，54年同学助教授，現在に至る．51，58年計測自動制御学会論文賞受賞，ロボット工学，バイオメカニズムの研究に従事．

（日本ロボット学会正会員）



福田　靖 (Yasushi FUKUDA)

昭和58年東京工業大学機械物理工学科卒，60年同学機械物理工学専攻修士課程卒，同年（株）東芝入社．重電技術研究所に所属，ロボット開発に従事．

（日本ロボット学会　昭和60年度学生会員）

菊池秀和 (Hidekazu KIKUCHI)

The Gait Control System of the Quadruped Walking Vehicle*

Shigeo HIROSE** Yasushi FUKUDA*** Hidekazu KIKUCHI****

ABSTRACT

Walking vehicle has potential capability to be developed into off-road vehicle with high mobility and adaptivity by using the coordination control of its multi-degrees of freedom. There have been several discussions on the gait control of the walking vehicle. However the overall discussion of the gait control system and discussion on the subsystem in relation to all has not been executed so far.

The paper thus try to discuss this problem by setting the quadruped walking vehicle, which the authors have been developing. As the direct objective of the study. First of all the premises for discussion are established. The hierarchical structure of the total control system consisting of three level. i. e. level A, B, C, are then clarified. The control algorithm of each level especially on level B, C are elaborated. As to level B, the gait control in xy coordinates, that in z coordinates, and trajectory control of the legs are discussed. As to level C the control algorithm of the reflex motion regulation are discussed. Finally these discussions are verified by the walking experiments of the constructed walking vehicle model TITAN III. The joystick control of omnidirectional motion., or adaptive locomotion over irregular steps are successfully demonstrated.

Key words : Mobile robot, Quadruped walking vehicle, Gait control, Reflex motion control

* Received April 4, 1985

** Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology.
*** Toshiba Ltd.
**** Asahi Chemical Industry Co., Ltd.