

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

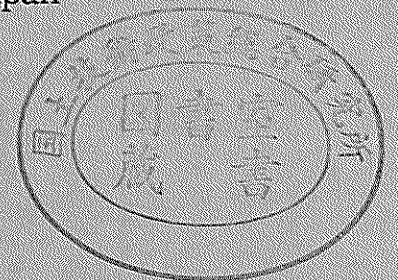
No.1026 June 2002

連続歩容を適用した6足歩行ロボットの不整地静歩行実験

田 中 敏 成

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

| | |
|---------------------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. まえがき | 4 |
| 2. 実験機の製作 | 4 |
| 2.1 6足歩行ロボット小型陸上実験機 | 4 |
| 2.2 脚先の機構 | 5 |
| 3. 制御ソフトウェアの開発 | 7 |
| 3.1 ソフトウェアの構成 | 7 |
| 3.2 ロボットへの運動指令 | 8 |
| 3.3 ロボットの歩容 | 8 |
| 3.4 脚先の水平可動範囲の可変化 | 9 |
| 3.5 脚先の凹凸への対応 | 10 |
| 3.6 安定余裕 | 11 |
| 4. 歩行実験 | 12 |
| 4.1 並進速度と安定余裕の関係 | 12 |
| 4.2 デューティ比及び歩幅と安定余裕の関係 | 13 |
| 4.3 側行角及びデューティ比の変化を伴う歩行の安定余裕の比較 | 14 |
| 4.4 一様な平面及び凹凸面上の歩行時の安定余裕の比較 | 16 |
| 5. 結論 | 19 |
| 6. あとがき | 19 |
| 謝辞 | 19 |
| 参考文献 | 19 |

Static Walking on the Uneven Ground Experiments in a 6-Legged Robot which Applied Continuous Gait Algorithm

Toshinari TANAKA*

Synopsis

Wheel mechanism and clawer contacts the ground continuously. On the other hand, walking machine is a discrete mechanism, which alternately repeats contact and separate from the ground. Therefore efficiency of the walking machine is not good and unsuitable for fast running. However, it is excellent to adapt itself to various condition of the ground because of the characteristically discreteness. Also, it dose not have a great deal of a bad influence on the ground and it may become a superior mobile mechanism for field robots.

We have developed aquatic walking robot "AQUAROBOT". Through the development, we have proposed walking method applied a continuous gait algorithm on the land. In this research, I developed a new walking control program, which is based on the former smooth and walking fast gait algorithm and is able to change the step width and adapt itself to the uneven ground while walking. And I applied to the 6-legged robot the new program, and verified influence of changing the some internal parameter or the condition of the ground(unevenness).

Key Words: Walking robot, The uneven ground, Continuous gait algorithm, Stability margin

* Researcher of Control Systems Division, Construction and Control systems Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-0468-445062 Fax : +81-0468-440575 e-mail : tanaka_t@pari.go.jp

連続歩容を適用した6足歩行ロボットの 不整地静歩行実験

田中 敏成*

要 旨

連続的に路面に接する車輪式やクローラ式などの走行型移動機構に対し、歩行機構は足の接地と離陸を繰り返すいわば離散的な移動機構である。エネルギー効率に優れる走行型移動機構に対し、歩行機構は往復運動を基本とすることから、エネルギー効率は比較的低く、高速移動には適していない。しかしながら、その離散的な特性から不整地に対する対地適応性に優れ、また、走行面に与える影響や浸食が少ないことから、足場の不安定な場所で作業を行うフィールドロボットのための有力な移動機構となり得る。

これまでに当所では歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の開発を通じ、連続歩容を適用した陸上での高速歩行手法を提案してきた。本研究では、この円滑でかつ高速歩行が可能な連続歩容を基に、歩行中の歩幅の変更や路面の凹凸への対応を図った新たな歩行制御プログラムを開発した。また、この歩行制御プログラムを適用した6足歩行ロボットについて、ロボット内部のパラメータや路面状況の変化がその安定性に及ぼす影響について検証した。

キーワード：歩行ロボット、不整地（凹凸面）、連続歩容、安定余裕

* 施工・制御技術部制御技術研究室研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：0468-44-5062 Fax：0468-44-0575 e-mail：tanaka_t@pari.go.jp

1. まえがき

港湾及び沿岸域において調査や施工等を行う各種水中作業機械は、多くの場合、直接作業を行う機能とともに何らかの移動機構を有し、その作業を実現している。例えば、ROV (Remotely Operated Vehicle) では水中 TV カメラ等の調査機能と移動機構としてのスラスタを、水中バックホウでは作業機能としてのバケットと移動機構としてのクローラを有し、これらが一体となって初めて十分な機能を発揮することができる。

水中での移動方式を大別すると、遊泳式と海底面走行式の2つに分けることができる。遊泳式はスラスタ式が主であるが、海底面走行式には車輪式、クローラ式、歩行式などそれぞれ特徴が大きく異なる移動方式がある。これら特徴の異なる海底面走行式の移動方式について移動性能の向上を図るためには、それぞれの特徴に十分留意する必要がある。以下にそれぞれの特徴を述べる。

車輪式やクローラ式などの一般的な海底面走行式の移動機構は連続的に走行面に接する移動機構である。それに対し、歩行式移動機構は足の接地と離陸を繰り返すいわば離散的な移動機構である。車輪式やクローラ式移動機構は回転運動を基本とすることからエネルギー効率に優れ、高速移動を得意としている。とりわけ前者は整地上で、後者は不整地上で高い移動能力を発揮する。一方、歩行式移動機構は往復運動を基本とすることから高速移動には適していない。しかしながら、歩行式移動機構はその離散的特性から不整地に対する対地適応性に優れ、また、走行面に与える影響や侵食が少ないことから、陸上や海底の別によらず、足場の不安定な場所で作業を行う作業機械やフィールドロボットのための有力な移動機構となり得るものである。

これまでに当所では歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の研究開発を行い、捨石マウンドの自動測量技術を確立するとともに、陸上では円滑かつ高速な歩行手法を提案してきた¹⁾。本稿ではこの円滑かつ高速な歩行制御手法を基本とした新たな歩行制御プログラムを6足歩行ロボットに適用し、歩行速度（以降、並進速度という）などの内部条件や路面の凹凸状況の変化がロボットの歩行時の安定性に及ぼす影響について検証した。

2. 実験機の製作

本章では歩行実験に用いた実験機「6足歩行ロボット小型陸上実験機」本体について述べるとともに、接地センサを設置した脚先の機構とセンサについて述べる。

2.1 6足歩行ロボット小型陸上実験機

本実験機はロボットの新たな制御アルゴリズムと開発した制御プログラムの検証を行うために製作したものである（写真-1、図-1）。

実験機は6本の脚を胴体の鉛直中心軸に対して放射状かつ等間隔に配置する軸対称脚配置型の6足歩行ロボットである。1脚あたり3関節を有し計18個のアクチュエータを有する脚構成は、従来のアクアロボと同様の脚構成、配置であり、絶対的な安定性の高さ、進行方向が限定されない移動自由度の高さ、これまでの知見や技術の蓄積の観点から本実験機の移動機構として採用した。

18個のアクチュエータは各関節の近傍ではなく、胴体内部に各脚ごとにユニット化して設置され、各関節はワイヤとプーリーを介して駆動される。また、ロボットの制御用計算機とロボット本体とはDA及びAD変換器を介して接続され、アクチュエータドライバへの指示、センサ情報の取得を行う。なお、ロボットの制御用計算機、アクチュエータドライバ、電源はロボットの内部に搭載した。従前のアクアロボでは、これらは全てロボットの外部に設置していたものであるが、本実験機では全てを内蔵した上で大幅な小型軽量化を図っている。

実験機の概要を表-1に示す。

表-1 6足歩行ロボット小型陸上実験機の概要

| | |
|----|--|
| 寸法 | W980[mm]×H630[mm] |
| 重量 | 55[kgf] |
| 備考 | 寸法は起動（立ち上がり）時 重量は空中重量（インタフェースBOX・PC含） 陸上専用 |

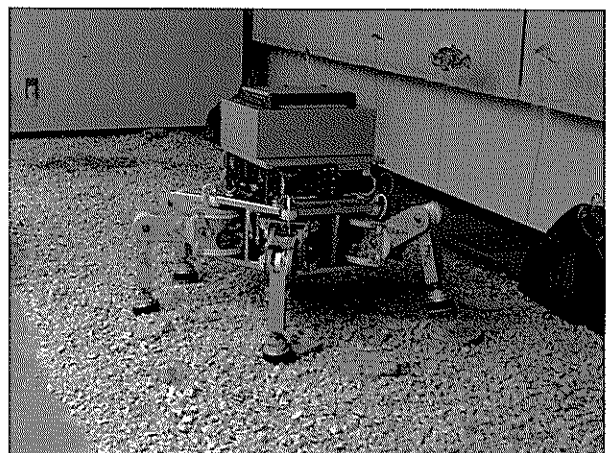


写真-1 6足歩行ロボット小型陸上実験機

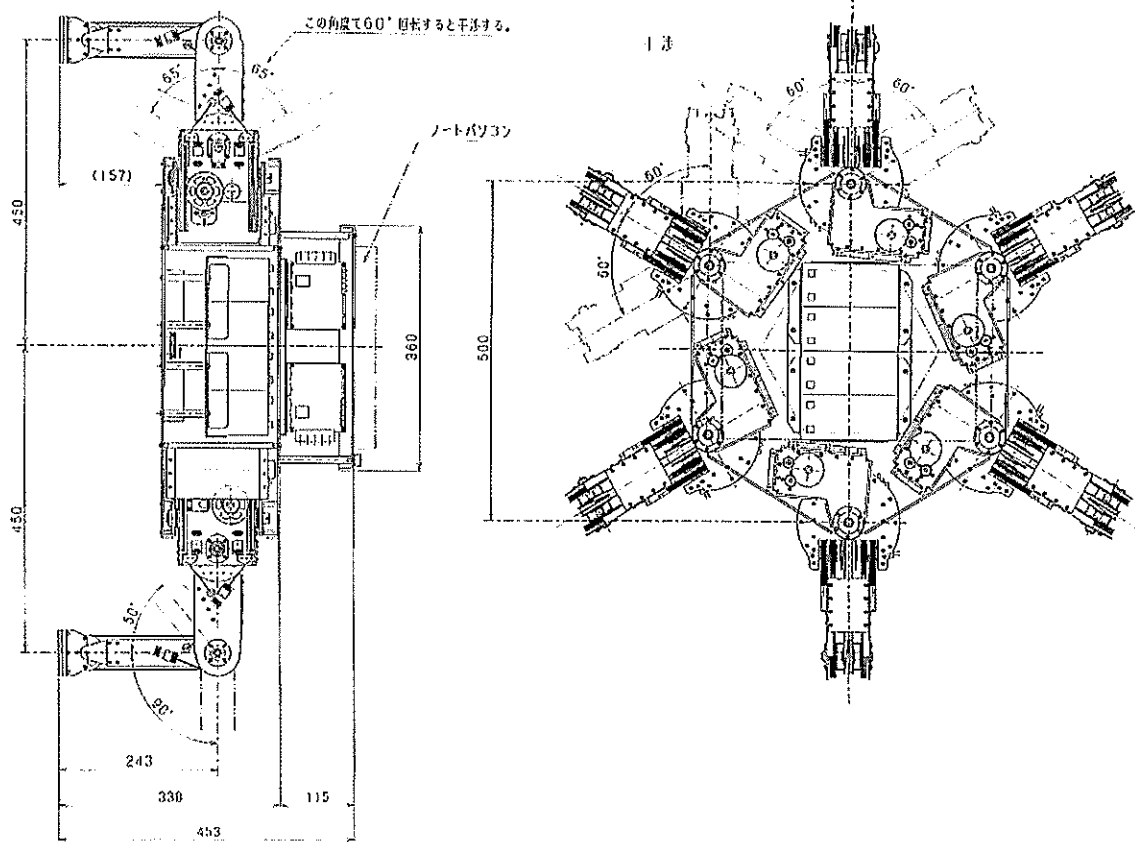


図-1 6足歩行ロボット小型陸上実験機

2.2 脚先の機構

路面の凹凸に対応するために、実験機に簡易的な接地センサを追加した。これにともない、脚先はセンサを内蔵する新たな機構のものに換装した。

まず、脚先の機構について述べる。脚先の機構は全ての脚で同様の機構を有している。足首の関節はアクチュエータを持たず、ボールリンクとコイルスプリングのみで支持するフリージョイントである(図-2)。これにより、脚先は路面に追従して接地することが可能となり、ある程度の接地状態の変化は足首だけで吸収することができる。

また、簡易接地センサには感圧導電性エラストマーセンサを用いた。これはセンサ部の変形量に応じて電気抵抗が変化する導電性ゴムであり、フリージョイント部と足底の間に挟んで設置した(写真-2, 図-3)。

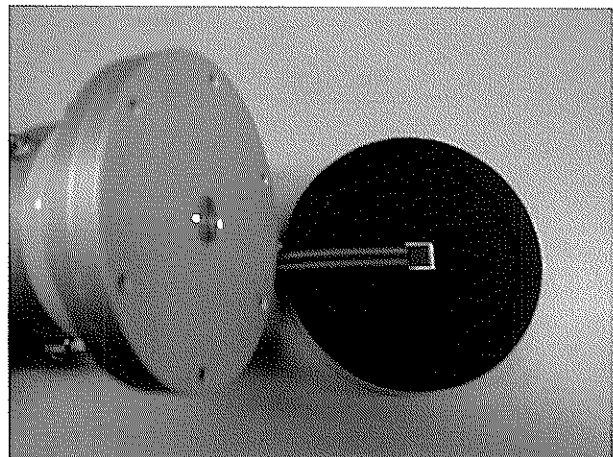


写真-2 簡易接地センサの設置状況

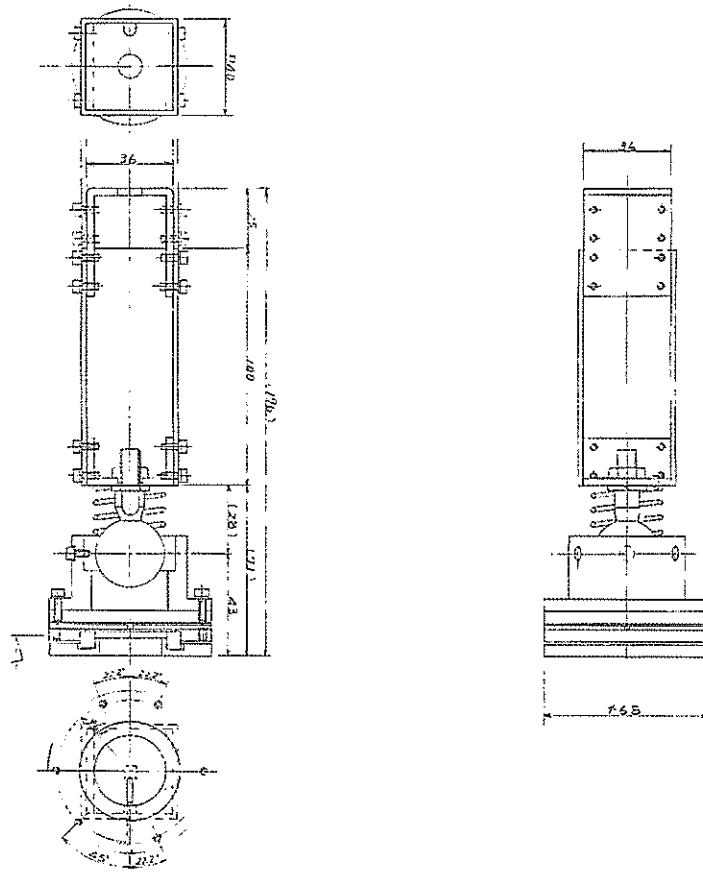
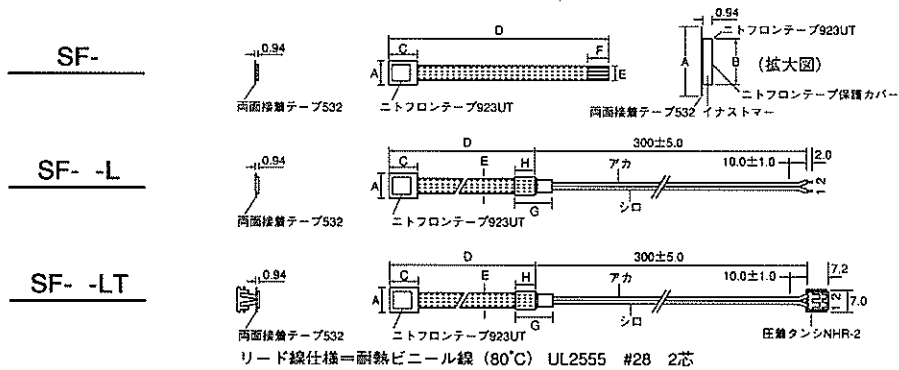


図-2 脚先の機構



①ニトフロンテープ保護カバー (No 923UT)
②両面接着テープ付 (No 532)

| 機種 項目 | SF-3 シリーズ | SF-4 シリーズ | SF-5 シリーズ |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| A | 3.9±0.1 | 4.9±0.1 | 5.9±0.1 |
| B | 3.1±0.2 | 4.1±0.2 | 5.1±0.2 |
| C | 5.0±1.0 | 5.8±1.0 | 7.0±1.0 |
| D | 50.0 | 50.0 | 65.0 |
| E | 3.9 | 4.9 | 5.9 |
| F | 5.0 | 5.5 | 5.0 |
| G | 13.0±1.0 | 13.0±1.0 | 13.0±1.0 |
| H | 7.0 | 7.0 | 7.0 |

図-3 感圧導電性エラストマーセンサ (イナバゴム(株) : SF-5-L)

3. 制御ソフトウェアの開発

本章では実験機に適用した制御ソフトウェアについて述べる。ここではまず、ソフトウェアの構成について述べ、次にロボットの主要な内部変数の定義と制御方式について述べる。

3.1 ソフトウェアの構成

ソフトウェアの構成は大別して簡単な遠隔操作を行うホストプログラム部とロボットに搭載される計算機上で動作するロボット制御プログラム部の2つに分けられる。

ホストプログラム部は簡単な遠隔操作コマンドをロボット側に送る操作パネルである(図-4)。ホスト側とロボット側は無線LANを介して接続され、ロボットの起動・着座、動作の開始・停止などの操作を遠隔で行うことができる。

ロボット制御プログラム部はロボットの胴体運動から

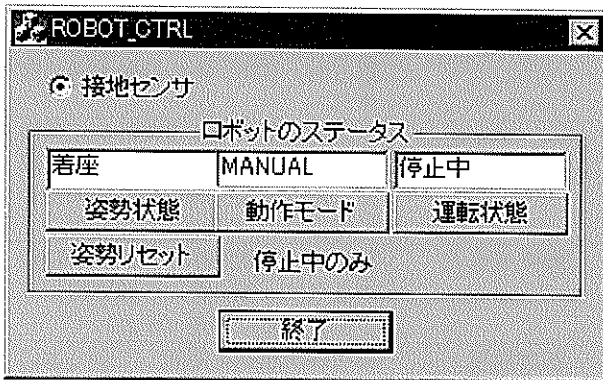


図-4 ホストプログラム (ダイアログ)

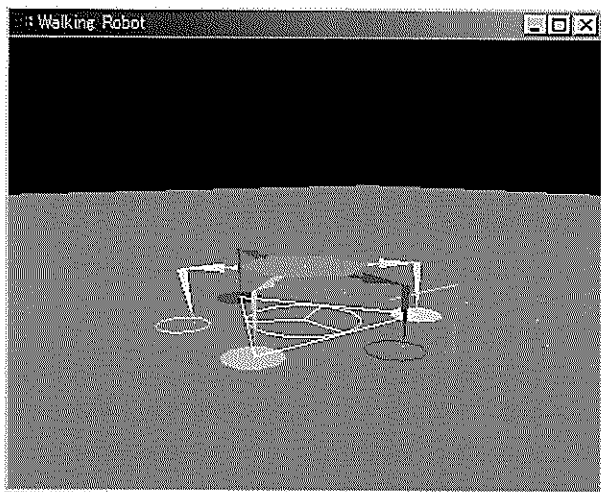


図-5 シミュレーション画面

脚先の運動までロボット全体の運動を計画し制御する実時間制御プログラムである。ここではあらかじめ与えられた移動経路に沿った胴体運動を実現するように、各脚の動作は自律的に決定される。これはロボットに搭載された計算機上で動作し、ロボットの制御状況の確認のためのシミュレーション画面と、ホスト部と同様の操作パネル、ロボットの内部状態モニタで構成されている(図-5, 図-6)。

なお、このシミュレーション画面は主に実験機を用いずにプログラムの検証を行う場合に用いる。

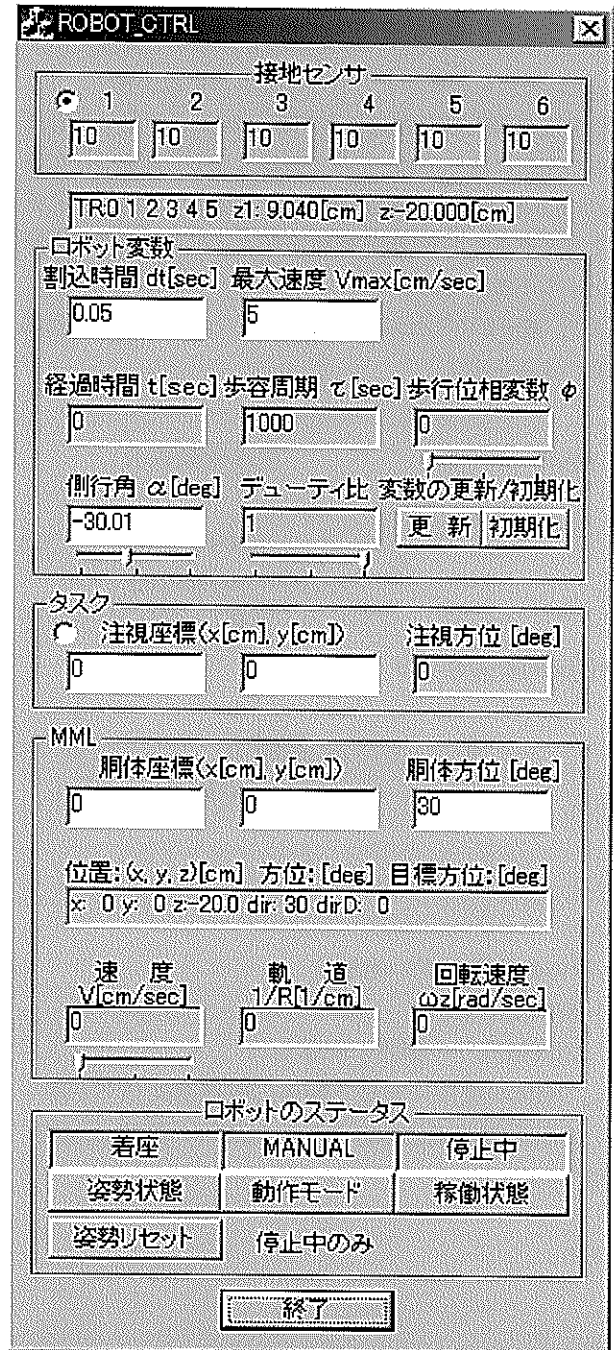


図-6 ロボット制御プログラム (ダイアログ)

3.2 ロボットへの運動指令

ロボットへの運動指令は、胴体の並進速度 v 、鉛直軸まわりの胴体回転速度 ω_z 、軌道の曲率 κ で与える MML (Model-based Mobile-robot Language) を適用する²⁾。与えられた運動指令はロボット内部で平面上の並進運動成分に分解して利用される。

ここでは MML をそのまま適用したが、システムとしては MML もしくは並進運動成分をインタフェースとして、システムの上位階層に胴体の軌道生成プログラムを追加して利用することが可能である³⁾。

ここで式(1)にロボットの運動指令に関する変数を示し、図-7 にそれらの変数とともに座標系の定義を示す。ここで世界座標系と胴体座標系を明確に区別して記する必要がある変数に関しては、それぞれ添え字 W, B をつけて表す。世界座標系とは運動空間におけるロボットの絶対位置を示す座標系であり、胴体座標系とはロボットの重心とする座標系である。

また、表-2 にこれ以降に登場するロボットの主な内部変数の定義を示す。

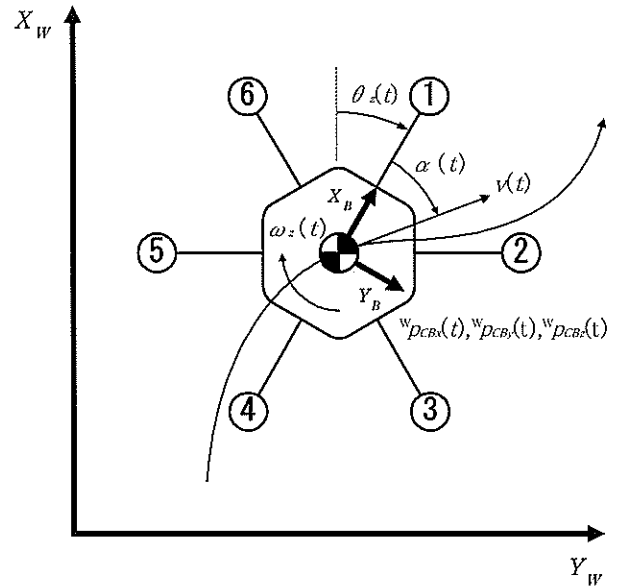


図-7 ロボットへの運動指令と座標系の定義

表-2 ロボットの主な内部変数の定義

| 側行角 α | ロボットの進行方向。第1脚の設置方向とロボットの移動方向がなす角。 |
|-----------------|--|
| デューティ比 β | 1歩容周期に対する支持脚相期間の割合。総脚数に対する1歩容周期における支持脚数の時間的割合に等しい。 |
| 脚位相差 ϕ_i | 第1脚の動作開始タイミングに対する各脚(第 <i>i</i> 脚)の動作開始タイミングの位相差(ずれ)。 |
| 歩容周期 τ | 第1脚が運動を開始してから次に同脚が運動を開始するまでの期間。支持脚相期間と遊脚相期間の和に等しい。 |
| 支持脚相期間 τ_S | 1歩容周期中に支持脚である期間。 |
| 遊脚相期間 τ_T | 1歩容周期中に遊脚である期間。 |
| 歩行位相変数 ϕ | 1歩容周期を0から1に正規化した時間。 |
| 支持脚相変数 ϕ_S | 支持脚相期間を0から1に正規化した時間。 |
| 遊脚相変数 ϕ_T | 遊脚相期間を0から1に正規化した時間。 |

MML 並進運動成分

$${}^B v_{CB}(t) = \begin{bmatrix} v(t) \cos \alpha(t) \\ v(t) \sin \alpha(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$(v(t), \kappa(t), \omega_z(t)) \Rightarrow$

$${}^B \omega_{CB}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v(t) \kappa(t) + \omega_z(t) \end{bmatrix}$$

ただし、

v : 胴体の並進速度の絶対値

κ : 胴体軌道の曲率

ω_z : 鉛直軸周りの胴体の回転速度

${}^B v_{CB}$: 胴体座標系における胴体の並進速度ベクトル

${}^B \omega_{CB}$: 胴体座標系における鉛直軸周りの胴体の回転速度ベクトル

である。

3.3 ロボットの歩容

歩行の際の脚の動作順序を歩容と呼ぶ。これは歩行を決定する重要な定義であり、一般的に歩容は脚位相差 ϕ_i で表すことができる。脚位相差とは第1脚の動作開始タイミングに対する各脚(第*i*脚)の動作開始タイミングの位相差(ずれ)を表している。また、ここでの動作開始タイミングとは各脚が接地した瞬間を指す。

ここで一般的に安定余裕（後述，図-9，図-10及び式(8)~(10)参照）の高い歩容として脚動作が波のように伝播するウェーブ歩容（波動歩容）が知られている．特に後方から進行方向に向けて脚動作が伝播する前方ウェーブ歩容は静的に最も安定余裕が高い歩容である⁴⁾．

通常，前方ウェーブ歩容は脚配置が左右対称でかつ脚動作の進行方向とロボットの移動方向が同じでなければならない．実験機は進行方向の変化を伴う移動を行うことから，必ずしも脚配置が進行方向を挟んで左右対称とはならず，そのままでは前方ウェーブ歩容を維持することができない．そこでこの歩容 ϕ_i を側行角 α とデューティ比 β の関数 $\phi_i(\alpha, \beta)$ に拡張して進行方向の変化に対応している．この歩容は拡張ウェーブ歩容と呼ばれ，側行角とデューティ比の異なる前方ウェーブ歩容同士を内外挿補完することで導出したものであり，アクアロボ陸上実験機において適用した実績がある^{1), 5)}．式(2)~(4)にロボット制御プログラム部に導入した歩容の脚位相差 ϕ_i を示す．

$$\alpha'_i = \left[\alpha - \frac{(2i-1)\pi}{6} \right]_{\text{mod } 2\pi} \quad \text{LegNo } i=1,2,\dots,6 \quad (2)$$

FOR $i=1,3,5$

$$\psi_i\left(\alpha, \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} 0 & \left(0 < \alpha'_i < \frac{\pi}{6}\right) \\ \frac{\alpha'_i}{2\pi} - \frac{1}{12} & \left(\frac{\pi}{6} < \alpha'_i < \frac{5\pi}{6}\right) \\ \frac{1}{3} & \left(\frac{5\pi}{6} < \alpha'_i < \frac{7\pi}{6}\right) \\ -\frac{\alpha'_i}{2\pi} - \frac{1}{12} & \left(\frac{7\pi}{6} < \alpha'_i < \frac{11\pi}{6}\right) \end{cases}$$

$$\psi_i\left(\alpha, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{4}$$

FOR $i=2,4,6$

$$\psi_i\left(\alpha, \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \left(0 < \alpha'_i < \frac{\pi}{6}\right) \\ \frac{\alpha'_i}{2\pi} + \frac{5}{12} & \left(\frac{\pi}{6} < \alpha'_i < \frac{5\pi}{6}\right) \\ \frac{5}{6} & \left(\frac{5\pi}{6} < \alpha'_i < \frac{7\pi}{6}\right) \\ -\frac{\alpha'_i}{2\pi} + \frac{5}{12} & \left(\frac{7\pi}{6} < \alpha'_i < \frac{11\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi_i\left(\alpha, \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{4}$$

$$\psi_i(\alpha, \beta) = \left[6 \left\{ \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \psi_i\left(\alpha, \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right) \psi_i\left(\alpha, \frac{1}{2}\right) \right\} \right]_{\text{mod } 1} \quad (4)$$

3.4 脚先の水平可動範囲の可変性

前項で述べた通り，歩容は脚動作の順序やリズムを決定する重要な定義であり，基本的に脚はこの規則に従って制御される．しかしながら，ある側行角とデューティ比における歩容を実現するロボットの脚先の水平可動範囲，並進速度，歩容周期の組み合わせはその機構的制限の範囲で無限にあり，一意に定めることはできない．そこで前提条件として脚先の水平可動範囲を一定とし，並進速度を指令として与えることで，デューティ比と歩容周期を一意に定めることとした．なお，歩容の定義に必要な側行角はここに挙げたその他の内部変数の決定には関与していない．よって，脚先の水平可動範囲が一定の場合，ロボットの並進速度の増加にともないデューティ比と歩容周期は減少し，並進速度の減少にともなってそれぞれ増加する．

ここで留意する必要があるのは，減速時の並進速度 ${}^w v_{CB} \neq 0$ における脚動作である．これまでの定義によれば並進速度 ${}^w v_{CB} \neq 0$ ，つまりデューティ比 $\beta \neq 1$ で急激に歩容周期 τ は増加し，並進速度 ${}^w v_{CB} = 0$ で歩容周期 $\tau = \infty$ となって胴体が停止する前に脚動作が破綻してしまう．

そこで，並進速度の減速時及び停止時については，脚先の水平可動範囲の半径 R_{CWV} に対して並進速度に応じた重み付けを行い，かつ，デューティ比 β の上限を5/6程度に設定することで常に有限の歩容周期 τ を確保した．

$$\text{Step}_i = R_{CWV} \sqrt{\text{Gain}_{ix}^2 + \text{Gain}_{iy}^2} \quad (5)$$

加速及び、等速移動時

$$\begin{cases} \text{Gain}_{ix} = \cos\alpha + \frac{R_{OR}\omega_z}{{}^w v_{\max}} \cos\left(\frac{\pi(i-1)}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \\ \text{Gain}_{iy} = \sin\alpha + \frac{R_{OR}\omega_z}{{}^w v_{\max}} \sin\left(\frac{\pi(i-1)}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (6)$$

減速時及び、停止時

$$\begin{cases} \text{Gain}_{ix} = \frac{{}^w v_{CB}}{{}^w v_{\max}} \cos\alpha + \frac{R_{OR}\omega_z}{{}^w v_{\max}} \cos\left(\frac{\pi(i-1)}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \\ \text{Gain}_{iy} = \frac{{}^w v_{CB}}{{}^w v_{\max}} \sin\alpha + \frac{R_{OR}\omega_z}{{}^w v_{\max}} \sin\left(\frac{\pi(i-1)}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

ただし，

i : 脚番号1~6

R_{CWV} : 脚先の水平可動範囲の半径（制限可動範囲）

${}^w v_{CB}$: 胴体の並進速度

${}^w v_{\max}$: 遊脚復帰速度

($\beta = 1/2$ の際の胴体の並進速度に等しい)

ω_z : 鉛直軸周りの胴体の回転速度

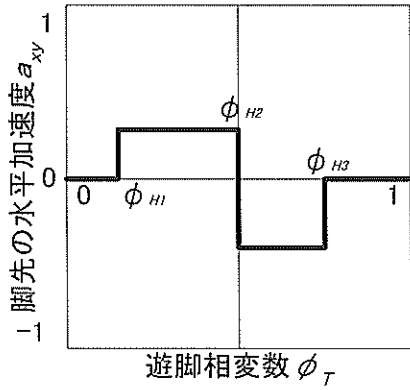
R_{OR} : 胴体中心から脚先可動範囲の最遠点までの水平距離

である．

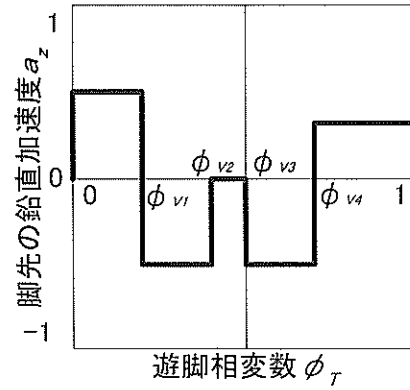
3.5 脚先の凹凸への対応

支持脚相にある脚の運動は、胴体を一定の高さに保持しながら脚先を世界座標系で固定している。一方、遊脚相における脚先の運動は、脚先の接地目標点を目指して移動するが、鉛直方向の運動と合わせて、あらかじめ定められた運動のテンプレートに基づいて決定される（図-8(a)～(e)）。このテンプレートは脚先速度を-1から1に、時間を遊脚相変数として0から1に正規化したものである。

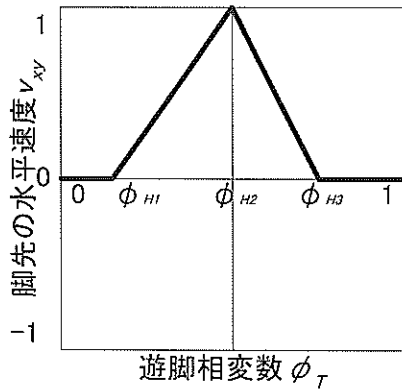
なお、遊脚相にある脚が接地センサによって脚先と路面との接触を検知した場合には、当該脚のみを強制的に支持脚相に移行することで路面の凹凸に対応する。



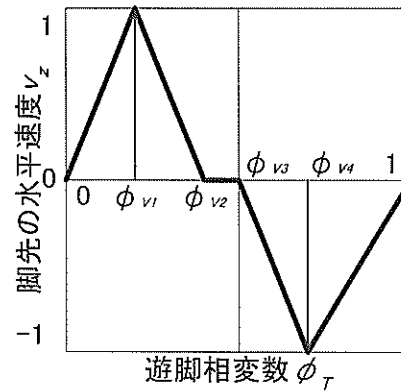
(a) 脚先の水平方向の加速度



(b) 脚先の鉛直方向の加速度

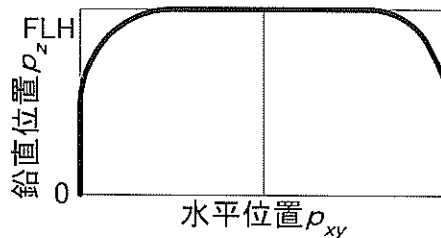


(c) 脚先の水平方向の速度



(d) 脚先の鉛直方向の速度

$$\begin{cases} \phi_{H1} = 0.15, \phi_{H2} = 0.50, \phi_{H3} = 0.75 \\ \phi_{V1} = 0.20, \phi_{V2} = 0.40, \phi_{V3} = 0.50, \phi_{V4} = 0.7 \end{cases}$$



(e) 脚先の軌道

図-8 脚先運動のテンプレート

3.6 安定余裕

ここではロボットの安定性を表す指標として安定余裕を用いる。図-9 及び図-10(a)より、

$$\frac{\text{慣性力+外力}}{\text{自重}} = \frac{\text{最短距離}}{\text{胴体高さ(重心)}} \quad (8)$$

の関係が成り立つ。転倒モーメントが発生しない条件は外乱と重力の合力の延長線(作用線)と路面との交点が支持脚多角形の中に入ることであるから、

$$\text{外乱} \leq \text{安定余裕} \times \text{自重} \quad (9)$$

ただし、

$$\text{安定余裕} = \frac{\text{最短距離}}{\text{胴体高さ(重心)}} \quad (10)$$

の条件で外乱を許容できる。すなわち安定余裕とは、許容する外乱の大きさを自重に対する割合で表したものである。言い換えると、安定余裕が十分にあり、この条件を満たすように歩容やパラメータを計画することで、歩行中の安定性に関する特別な制御無しに静的な安定性を保って歩行できることになる。よって、ここでは静的な安定性についてのみ考えることとする。ただし、脚の重量は胴体の重量と比較して十分小さく、重心まわりに質量が集中しているものとする。

また将来、図-10(b)のように、この制限を逸脱するような歩行環境に遭遇した場合、安定余裕に基づいてさらに姿勢や重心の位置などを積極的に制御することで対応が可能となると考えられる。

次に、安定余裕の算出法を示す。パラメータ表示された直線 $x = tb + a$ (t ; 実数) と点 c について、直線 x 上の任意の点と点 c の距離の2乗は、

$$\begin{aligned} |x-c|^2 &= |b|^2 t^2 + 2b \cdot (a-c)t + |a-c|^2 \\ &= |b|^2 \left(t + \frac{b \cdot (a-c)}{|b|^2} \right)^2 + \frac{(b \cdot (a-c))^2}{|b|^2} + |a-c|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

で表され、

$$t = -\frac{(b \cdot (a-c))^2}{|b|^2} \quad (12)$$

で最小となる。よって、この辺までの最短距離 $norm$ は、

$$norm = |x-c| = \sqrt{\frac{(b \cdot (a-c))^2}{|b|^2} + |a-c|^2} \quad (13)$$

となる。これを支持脚多角形の各辺について算出し、最も小さいものから安定余裕を算出する。

$$\text{安定余裕} = \frac{\min(norm_i)}{\text{胴体高さ(重心)}} \quad (14)$$

この手法によれば、ロボットの位置や進行方向、胴体の方位等に関わらず、常にその安定余裕を監視することが可能となる。

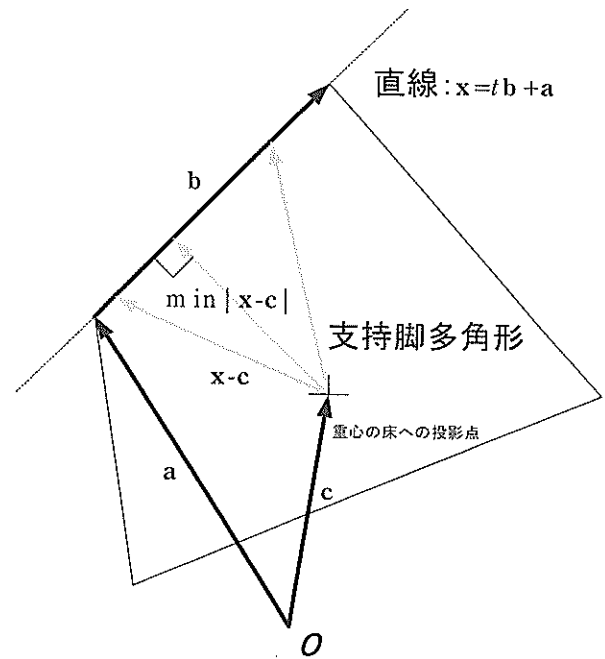
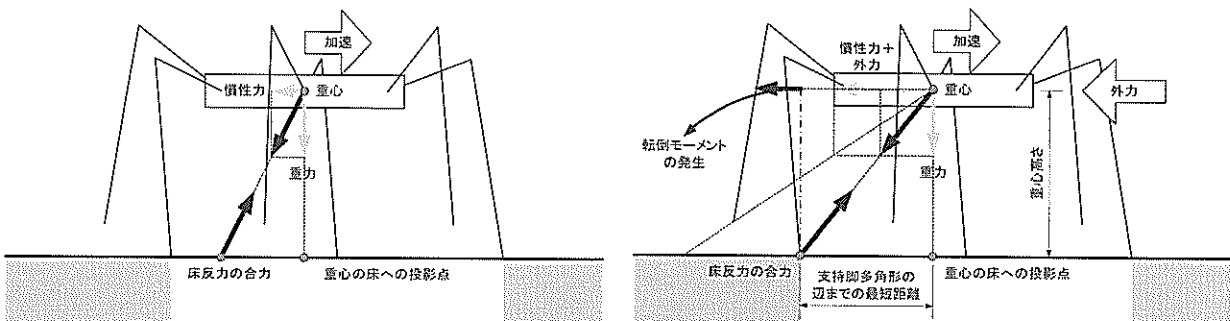


図-9 安定余裕の算出法



(a) 静的に安定な状態

(b) 転倒モーメントが生ずる不安定な状態

図-10 ロボットの歩行と安定余裕の関係

4. 歩行実験

第2章と第3章で実験機及びその制御ソフトウェアについて述べてきた。本章では、これらを用いて行った歩行実験について述べる。ここではロボットの運動を決定するその内部変数や路面状況の変化が、ロボットの歩行時の安定余裕に及ぼす影響について検証を行った。つまり、種々の歩行条件を設定し、製作した6足歩行ロボット小型陸上実験機を用いて歩行実験を行うことで、各種歩行条件がロボットの静的な安定性、すなわち安定余裕に及ぼす影響を明らかにする。

なお、以降の実験では脚先の水平可動範囲の半径(制限可動範囲) R_{CURV} を歩幅と称する。

4.1 並進速度と安定余裕の関係

並進速度の変化が安定余裕に及ぼす影響について、歩行実験によって確認した。

ここでは並進速度についていくつかの条件を設定して実験を行ったが、歩行中は並進速度を含め、側行角、デューティ比、歩幅等のロボットの内部条件は一定とした。実験条件1を次の表-3に示す。

表-3 実験条件1

| | |
|--------|---------------------|
| 歩幅 | 5.0[cm] |
| 並進速度 | 1.0, 2.0, 5.0[cm/s] |
| デューティ比 | 1/2 |
| 側行角 | $-\pi/6$ [rad] |
| 軌道(曲率) | 0.0 [1/cm] |

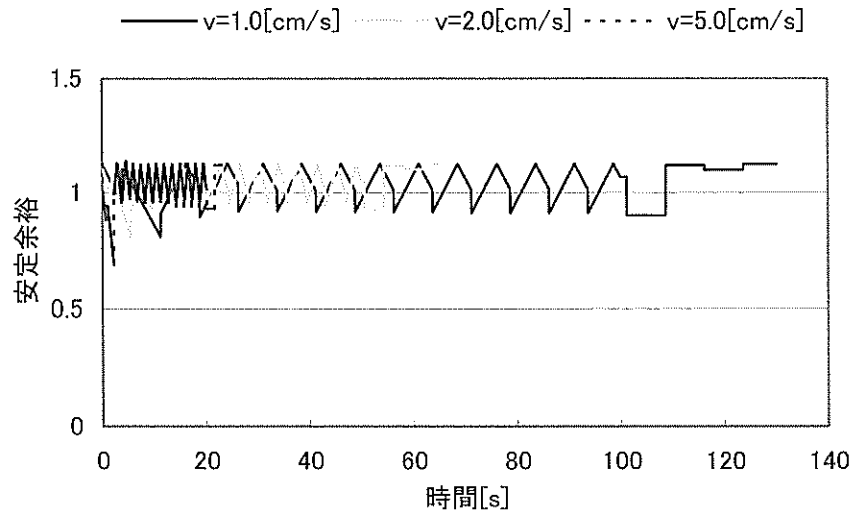


図-11 歩行中の安定余裕の変化

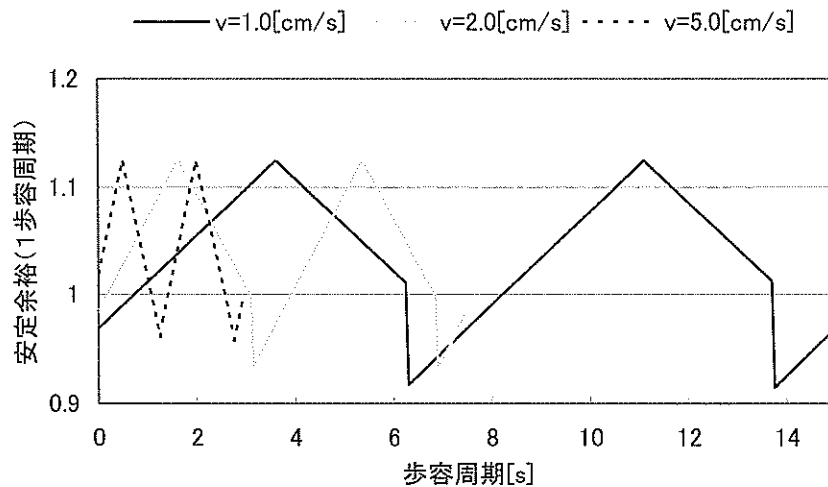


図-12 1歩容周期の安定余裕の比較

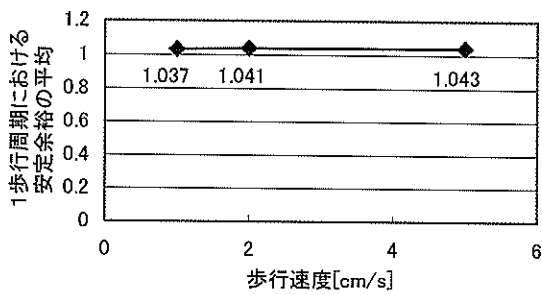


図-13 並進速度と安定余裕の平均の関係

実験結果として、歩行中の安定余裕の変化を図-11に、1歩容周期分の安定余裕の比較を図-12に示し、これらの結果から算出された並進速度と安定余裕の平均の関係を図-13に示す。

以上の実験結果から、並進速度の変化は安定余裕にほとんど影響しないことがわかる。これは並進速度以外のロボットの内部条件が同じであれば、並進速度の変化を歩容周期の変化で吸収し、重心の水平面への投影位置や支持脚多角形の形状にほとんど影響を及ぼさないことによると考えられる。

このことは、図-12が示す歩行速度が異なるそれぞれの安定余裕の推移の形状を、歩容周期の割合に応じて時間方向に圧縮・伸長することで、ほぼ同様の形状になることから理解できる。

4.2 デューティ比及び歩幅と安定余裕の関係

デューティ比及び歩幅の変化が安定余裕に及ぼす影響について、歩行実験によって確認した。

ここではデューティ比及び歩幅についていくつかの条件を設定して実験を行ったが、歩行中はデューティ比や歩幅を含め、並進速度、側行角等のロボットの内部条件は一定とした。実験条件2を次の表-4に示す。

表-4 実験条件2

| | |
|--------|----------------|
| 歩幅 | 5.0, 10.0[cm] |
| 並進速度 | 2.0[cm/s] |
| デューティ比 | 1/2, 2/3, 5/6 |
| 側行角 | $-\pi/6$ [rad] |
| 軌道(曲率) | 0.0[1/cm] |

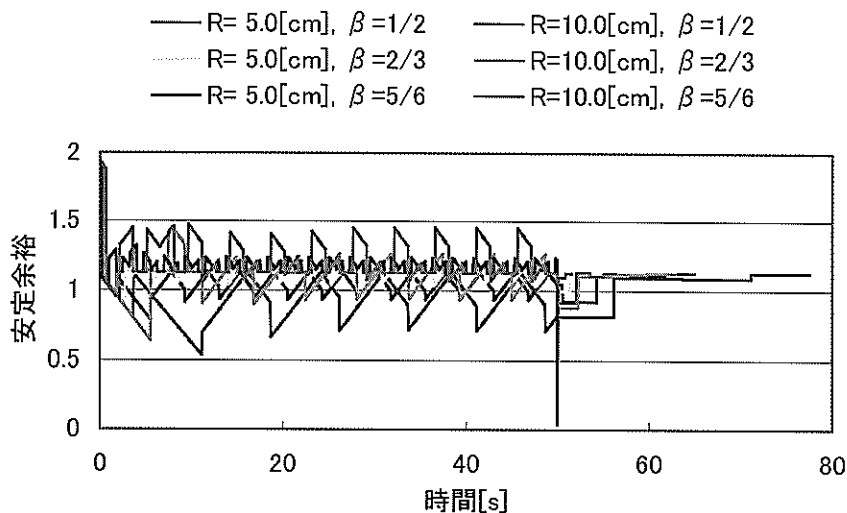


図-14 歩行中の安定余裕の変化

— R=5.0[cm], $\beta=1/2$ — R=10.0[cm], $\beta=1/2$ - - - R=5.0[cm], $\beta=2/3$
 — R=10.0[cm], $\beta=2/3$ — R=5.0[cm], $\beta=5/6$ — R=10.0[cm], $\beta=5/6$

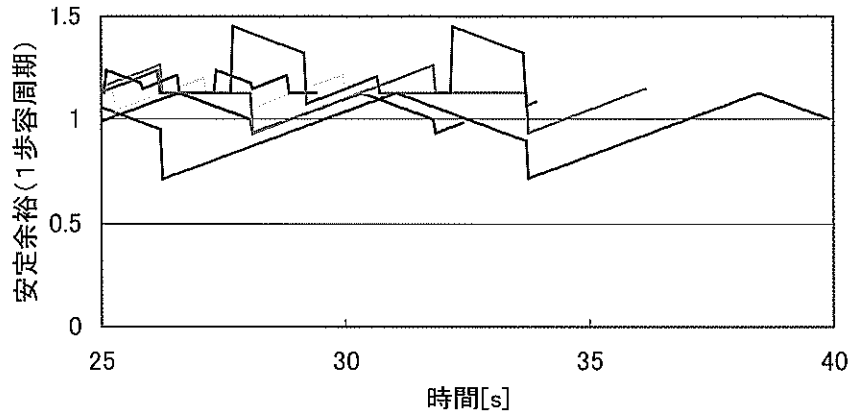


図-15 1歩容周期の安定余裕の比較

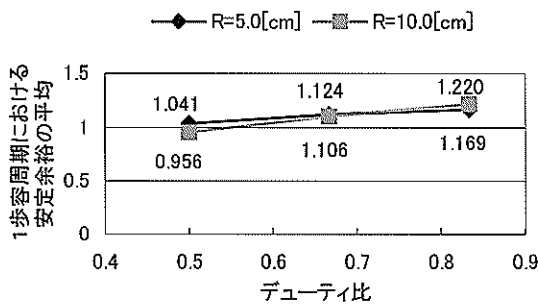


図-16 デューティ比と安定余裕の平均の関係

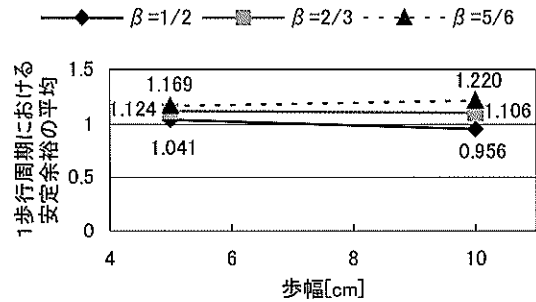


図-17 歩幅と安定余裕の平均の関係

実験結果として、歩行中の安定余裕の変化を図-14に、1歩容周期分の安定余裕の比較を図-15に示し、これらの結果から算出されたデューティ比と安定余裕の平均の関係を図-16に、歩幅と安定余裕の平均の関係を図-17に示す。

以上の実験結果から、デューティ比の増加は安定余裕の増加を促すが、歩幅の増加は必ずしも安定余裕の増加に寄与しないことがわかった。つまり、歩幅の増加に伴って安定余裕は、デューティ比が大きいときには微増するが、デューティ比が小さいときには逆に減少してしまう。

デューティ比の増加が安定余裕の増加を促すことは、1歩容周期あたりの接地脚数が増加することから理解しやすい。これは同一直径の外接円を有する多角形の面積がその頂点数の増加に伴って増加することから明らかである。一方、歩幅の影響について考察すると、歩幅の増加は支持脚多角形を拡大する反面、デューティ比が小さい場合、すなわち支持脚数が少ない場合には足の踏み換えによる

支持脚多角形の変形量が増大し、その面積拡大の効果は瞬間的でしかなくなってしまう。このような理由から、デューティ比の大きさによって歩幅の影響が逆転する現象が現れたものと考えられる。

ただし、いずれの場合も平均で1.0程度の安定余裕を維持しており、自重と同程度の外乱に耐えられるだけの安定余裕を有していることがわかる。

なお、図-14に見られる安定余裕のスパイク状のピークは接地センサの反応の遅れによる接地脚数の一瞬の増減によるものであり、実験結果への影響はほとんどないことを確認している。

4.3 側行角及びデューティ比の変化を伴う歩行の安定余裕の比較

歩行中に側行角及びデューティ比の変化を伴う場合の安定余裕の変化について、歩行実験によって比較した。

ここでは歩行中の歩幅は一定とするが、並進速度は加速、

等速、減速と変化し、それに合わせてデューティ比は変化を伴うものとした。ただし、側行角については一定とした場合と変化を伴う場合の2つの場合について歩行実験を行い、それぞれの安定余裕の変化について比較を行った。実験条件3を次の表-5に示す。

表-5 実験条件3

| | |
|--------|-----------------------------------|
| 歩幅 | 5.0 [cm] |
| 並進速度 | 5.0[cm/s] |
| デューティ比 | 1/2~1.0 |
| 側行角 | $-\pi/6$ ($\sim 11\pi/6$) [rad] |
| 軌道(曲率) | 0.0 ($\pi/100$) [1/cm] |

※ 数値の()は側行角可変の場合

歩行中の安定余裕とデューティ比の変化を図-18に、側行角の変化を図-19に示し、これらの結果から算出された各運動状態における安定余裕の平均の比較を図-20

に示す。

以上の実験結果から、デューティ比の変化を伴う歩行、デューティ比と側行角の変化を伴う歩行の安定余裕を比較して、ほとんど同様の推移をしていることがわかる。さらに、加速時(デューティ比は減少)、等速時(デューティ比は一定)、減速時(デューティ比は増加)の安定余裕はそれぞれ十分な安定余裕を示している。

ここで、等速時の安定余裕が加減速時と比較して低い理由は、等速時はデューティ比が0.5で一定、加減速時は0.5から1.0で変化していることから、平均して等速時より加減速時の方がデューティ比は大きいためであり、安定余裕は速度の変化に影響されないという4.1節の実験結果と、デューティ比の増加に伴って安定余裕が増加する4.2節の実験結果に一致している。

なお、図-18に見られる安定余裕のスパイク状のピークは図-14と同様の理由によるものである。

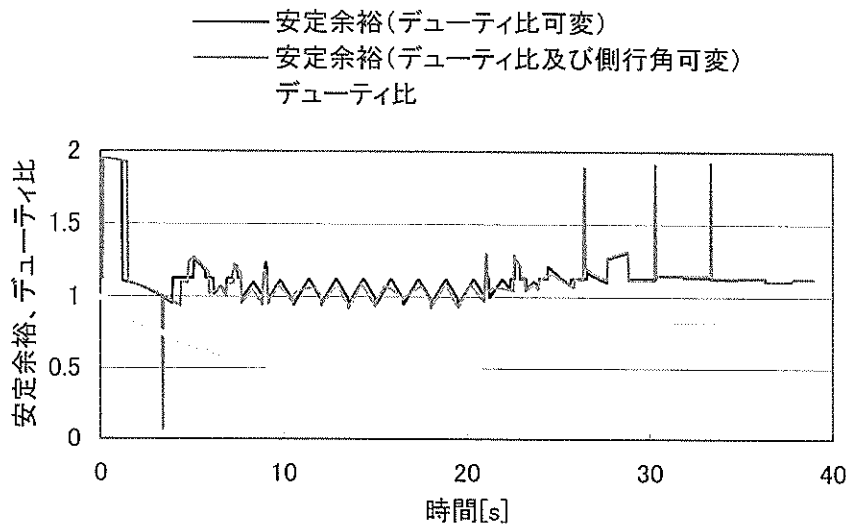


図-18 安定余裕の変化とデューティ比の変化

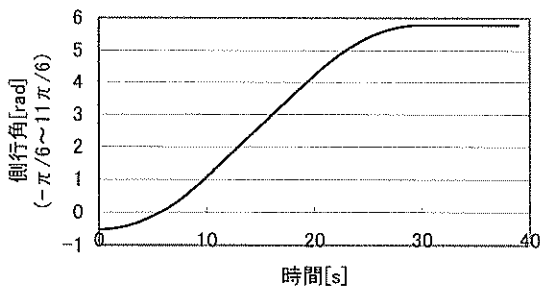


図-19 側行角の変化

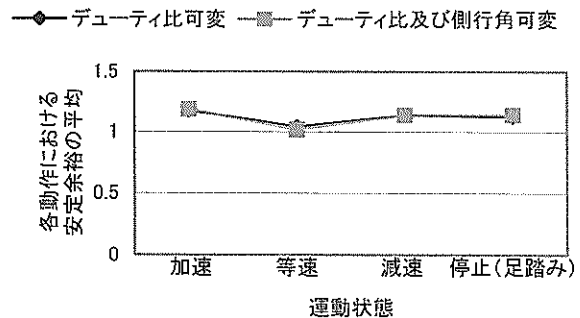


図-20 側行角及びデューティ比可変で歩行した場合の各動作における安定余裕の平均の比較

4.4 一様な平面及び凹凸面上の歩行時の安定余裕の比較

一様な平面及び段差のある路面を歩行中の安定余裕の変化について、歩行実験によって比較した。

ここでは歩行中の歩幅と側行角は一定とするが、並進速度は加速、等速、減速と変化し、それに合わせてデューティ比は変化を伴うものとした。この条件で、平面上を歩行した場合と段差上を歩行した場合の2つの場合について歩行実験を行い、それぞれの安定余裕の変化について比較を行った。実験条件4を次の表-6に示す。

なお、本実験機には傾斜センサを搭載していないことから、現状では歩行とともに蓄積する傾斜誤差を除去することができない。この傾斜誤差は脚先の接地高さの誤差となり、路面の凹凸が安定余裕に与える影響を検証する上で不都合となる。そこで本実験では、ロボットは全脚に対して同様の凹凸対応アルゴリズムを有しているが、1脚のみが段差上を歩行し、他の5脚は常に平面上を歩行することで胴体の傾斜を抑制し、それが脚先の接地高さに及ぼす影響を最小限に抑えた。

表-6 実験条件4

| | |
|--------|----------------|
| 歩幅 | 5.0 [cm] |
| 並進速度 | 5.0[cm/s] |
| デューティ比 | 1/2~1.0 |
| 側行角 | $-\pi/6$ [rad] |
| 軌道(曲率) | 0.0[1/cm] |

実験結果として、歩行中の安定余裕の変化を図-21に、1歩容周期分の安定余裕の比較を図-22に示し、これらの結果から算出された安定余裕の平均(並進速度は等速)の比較を表-7に示す。

また、実験に用いた段差を図-23に示す。段差の高さは3.0[cm]と6.0[cm]の段差を組み合わせた凸型の段差であり、変形はしないものとする。

以上の実験結果から、数cm程度の段差のある路面は安定余裕にほとんど影響しないことがわかる。これは、路面状況の変化によって脚の接地タイミングが変化しても、重心の水平面への投影位置や支持脚多角形の形状にほとんど影響を及ぼさないことによると考えられる。

また、図-24から脚の接地位置が床面の高さに追従して変化していることがわかるが、床面の高い位置では脚先が路面内に食い込んだ状況になっている。これは脚先の速度テンプレートの特徴から、脚先の接地位置が高くなるにつれて接地の瞬間の速度は高くなり、計算周期や接地センサの精度の影響がより大きく出ているものと考えられる。このことは図-25に示す脚先の接地速度と接地高さの誤差の関係に一致している。

なお、図-21に見られる安定余裕のスパイク状のピークは図-14、図-18と同様の理由によるものである。

表-7 一様な平面と段差路面を歩行した場合の安定余裕の平均の比較

| 平 面 | 段 差 |
|-------|-------|
| 1.035 | 1.040 |

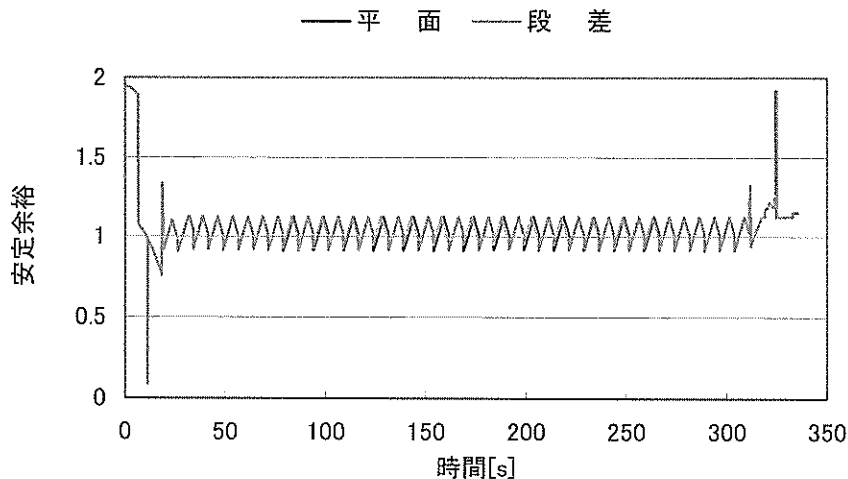


図-21 歩行中の安定余裕の変化

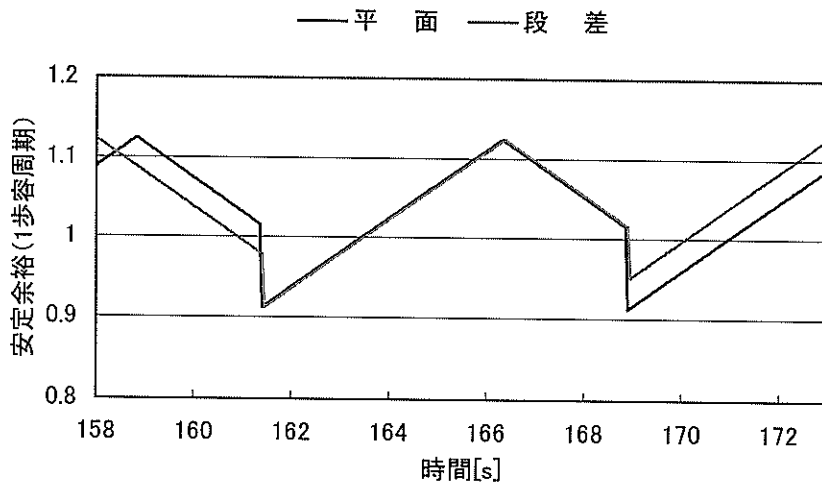


図-22 1歩容周期の安定余裕の比較

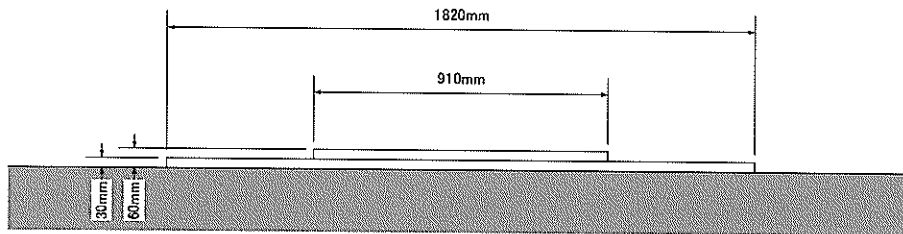


図-23 凹凸面上歩行実験に用いた段差

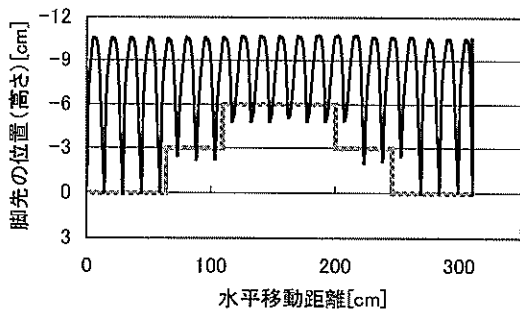


図-24 脚先の軌道と接地位置

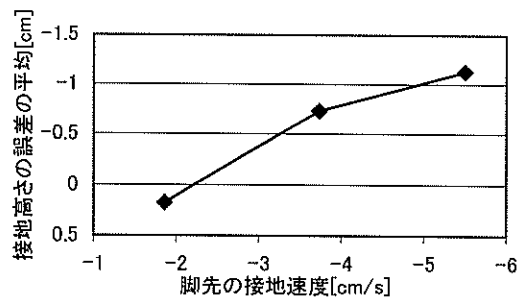
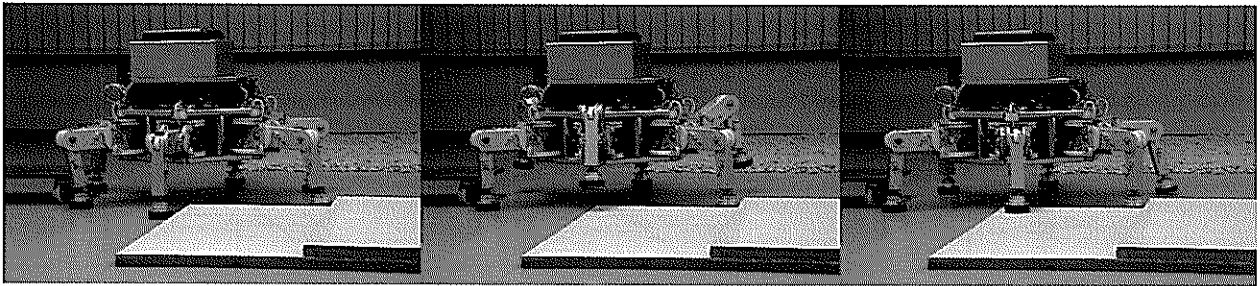
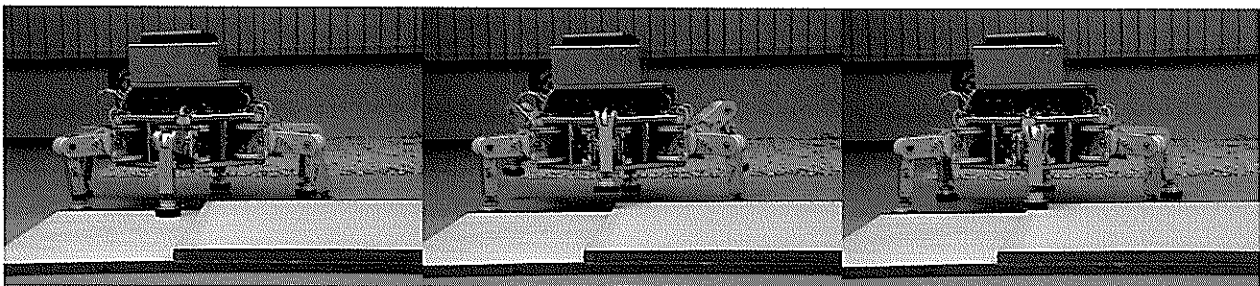


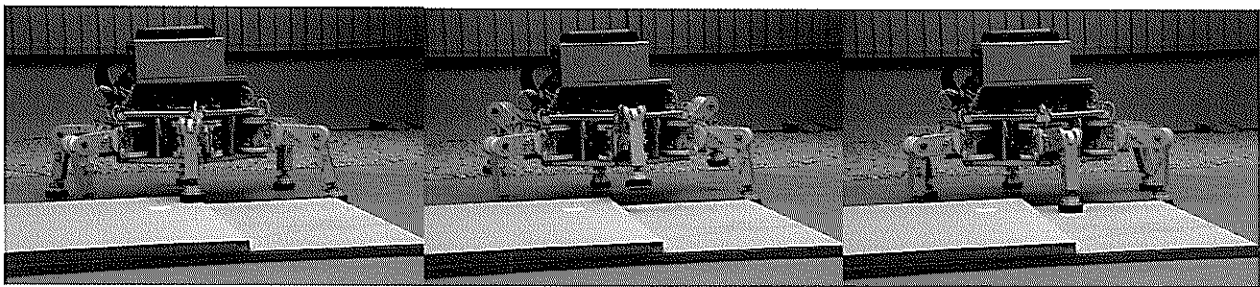
図-25 脚先の接地速度と接地高さの誤差の関係



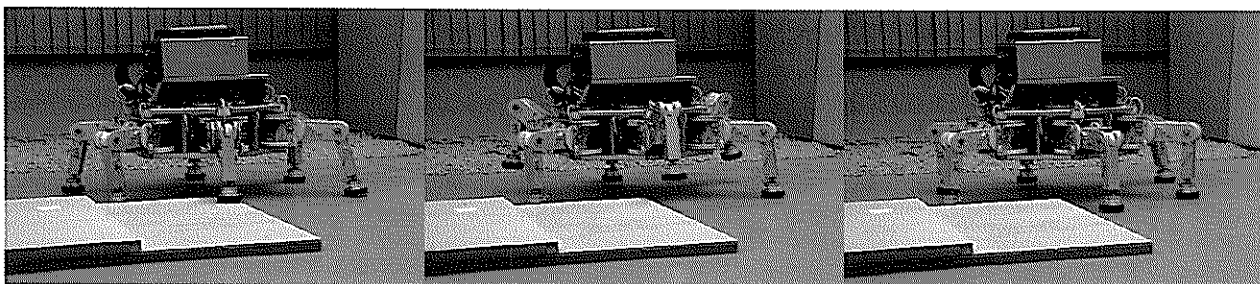
(a) 段差 : 0.0[cm]—3.0[cm]



(b) 段差 : 3.0[cm]—6.0[cm]



(c) 段差 : 6.0[cm]—3.0[cm]



(d) 段差 : 3.0[cm]—0.0[cm]

写真-3 段差路面上の歩行の様子

5. 結論

以上の実験結果から、各種歩行条件と安定余裕の関係について次のことが明らかになった。

- ① 並進速度の変化は安定余裕にほとんど影響しない
- ② デューティ比の増加に伴って安定余裕は増加する
- ③ デューティ比が大きい場合には歩幅の増加に伴って安定余裕は増加する傾向にあるが、デューティ比が小さい場合には安定余裕は逆に減少する傾向にある
- ④ 側角可変時とデューティ比可変時の安定余裕の推移は同様である
- ⑤ 一様な平面上と路面状況の変化を伴う凹凸面上の歩行の安定余裕の推移は同様である

ここで適用した歩行制御方式は以上の関係に留意することで、ロボットの機構的な制限の範囲で十分な安定余裕を維持して歩行可能であると言える。また、ここで取り上げた安定余裕は歩行ロボットの静的な安定性について幾何学的に定義したものである。よって、同様の脚機構を有する歩行ロボットであれば、これらと同様の関係が成り立つと考えられ、それらを新たに設計・開発する際にもこれらの関係を利用できることを示している。

また、床面の高さに応じて脚先の接地位置の誤差が大きくなる傾向が明らかとなり、脚先の接地速度との関連性を示した。

6. あとがき

床面の高さに応じて脚先の接地位置の誤差が大きくなる傾向については、脚先速度のテンプレートの見直しや計算周期の高速化、接地センサの精度向上によって誤差を減少できると考えられる。

計算周期の高速化を図る場合には、より正確で高速な割り込み処理を行うために、専用の開発環境における組み込み用アプリケーションの開発が必須である。また、ここで用いた簡易接地センサは力の方向が一方向のみの検出であること、不感帯やゲイン特性にばらつきがあることから、より高精度の多分力計などで代替することで精度や特性の改善が期待できる。ただし、いずれの方法の場合でも全ての誤差を除去することはできない。以上の方法と併せて、脚先の接地位置の誤差によって生ずる胴体の傾きを傾斜センサで逐次監視し、修正を施すことが有効であると考えられる。

また、脚先位置が歩行路面の測量データとして十分な精度を持つためには、内界センサによる脚先位置の相対的な計測に加えて、RTK-GPSなどによる胴体の絶対高さの計測が必要である。

今後は胴体高さの制御と合わせて胴体傾斜の修正手法をロボットに適用し、接地位置の誤差減少を図る。また、安定余裕によって許容できる外乱の大きさを示したことから、これらの実験結果を踏まえて動的な安定性についても考慮し、より大きな外乱に対応した歩行制御手法について検討する。さらに、脚の支持力や推進力の制御手法についても新たな知見を導入し、地盤状況の変化などに対応した新たな歩行制御手法について検討することで、干渉などの新たな作業領域への歩行ロボットの適用を目指す。

(2002年2月14日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、制御技術研究室内はもとより情報化技術研究室の方々には、日頃より有益なご助言やご示唆、ご指摘を頂いた。また、実験場所の確保には所内の多くの方々のご理解とご協力を頂いた。なお、今回利用した実験機は、平成11年度(1999年)に採択していただいた港湾技術研究所シーズ研究の際に製作したものを基にしている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田中敏成・秋園純一・高橋英俊・佐藤栄治・鈴木健治・米田完・金山裕・McGhee, R.B.: 歩行式水中調査ロボットの開発—(第4報)歩容及び軌道の実時間計画法—, 港湾技術研究所報告, Vol.37, No.2, 1998, pp.259-294.
- 2) Kanayama, Y. and Onishi, M.: Locomotion function in the mobile robot language, MML, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, pp.1110-1115.
- 3) 田中敏成・金山裕・米田完・鈴木健治・秋園純一: 多脚式歩行ロボットのための軌道生成法の一提案, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 日本ロボット学会, 1997, pp.113-114.
- 4) Song, S.M. and Waldron, K.J.: Machines that walk: The adaptive suspension vehicle, *The MIT Press, Cambridge, Massachusetts*, 1989.
- 5) Yoneda, K., Suzuki, K., Kanayama, Y., Takahashi, H. and Akizono, J.: Gait and foot trajectory planning for versatile motions of a six-legged robot, *Journal of Robotic Systems*, 14(2), John Wiley & Sons, Inc, 1997, pp.121-133.

港湾空港技術研究所資料 No.1026

2002.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 0468(44)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シ ー ケ ン

Copyright © (2002) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。