3次元経路計画を想定した4脚ロボットの適応的歩容制御

学生員 五十嵐 洋* 正員 柿倉 正義*

Adaptive Gait Control for a Quadruped Robot on 3D Path Planning

Hiroshi Igarashi*, Student Member, Masayoshi Kakikura*, Member

A legged walking robot is able to not only move on irregular terrain but also change its posture. For example, the robot can pass under overhead obstacles by crouching. The purpose of our research is to realize efficient path planning with a quadruped robot. Therefore, the path planning is expected to extended in three dimensions because of the mobility. However, some issues of the quadruped robot, which are instability, workspace limitation, deadlock and slippage, complicate realizing such application. In order to improve these issues and reinforce the mobility, a new static gait pattern for a quadruped robot, called TFG: Trajectory Following Gait, is proposed. The TFG intends to obtain high controllability like a wheel robot. Additionally, the TFG allows to change its posture during the walk. In this paper, some experimental results show that the TFG improves the issues and it is available for efficient locomotion in three dimensional environment.

キーワード：自由歩容，静歩行，4脚ロボット，経路計画

Keywords: Free gait, Static gait, Quadruped robot, Path planning

1. はじめに

本論文では，4脚ロボットの問題点の改善と長所の強化を目的とした歩行パターン“軌道追従歩容”を提案する。この歩容は，これまで実現困難であった任意の位置，姿勢への4脚ロボットの誘導が可能であり，3次元複雑環境における移動に効果的である。

不整地移動を目的としたキャタピラ型や車輪型ロボットの研究は古くから行われている。しかし，配管やパイプのような踏みつけることで破損する恐れのある障害物は乗り越えることができず，迂回による回避を行う必要がある。これは，移動ロボットに要求される目的地までの迅速かつ効率的な移動の妨げとなり，このような障害物が混在する複雑環境下での実用化は難しいと考えられる。

一方，脚型歩行ロボットは歩行中に各足先の接地位置を選択することが可能であるため，高い対地適応性を有する。さらに，しゃがみ込むことによる障害物の潜り抜け，脚幅を狭めることによる狭い通路の移動といった移動形態を変化させながらの歩行が可能である。また，脚長が長い程これらの利点は向上し，より高い段差の踏み越えや，より高低差の大きな姿勢変更が期待できる。

しかし，これまでに提案されてきた4脚ロボットの歩容は，遊脚順序を一定に保つ周期的歩容が多く，デッドロック問題のため，旋回動作の実現は困難であった。そこで，広瀬らによって旋回中心を設定することによる4脚ロボットの歩容パターン，基準旋回歩容が提案された⁽¹⁾。しかし，この歩容ではあらかじめ旋回中心を設定する必要があるため，突発的な軌道の変更は困難であった。また，デッドロックの回避のため，一般に自由歩容(Free Gait)と呼ばれる非周期歩容パターンが提案されている⁽²⁾⁽³⁾。しかし，これらの歩容パターンは，一定の姿勢を前提としており，姿勢変更時の可動範囲を補償していないため，歩行中の姿勢変更によって可動限界に達する可能性が高い。

4脚ロボットを複雑環境へ適用するためには，車輪型ロボットのような高い制御性，すなわち任意のサブゴールの設定を可能とする機能に加え，突発的な軌道変更への対応，歩行中の姿勢変更の要求への対処が必要であると考えられる。本論文では，4脚ロボットの問題点の改善と対地適応性の強化を目的とした静歩行パターン，軌道追従歩容 TFG (Trajectory Following Gait) を提案する。さらに，いくつかのシミュレーション実験により，軌道追従歩容によって4脚ロボットの特徴を活かした移動が可能であることを検証する。

2. 経路計画問題との関連

従来行われてきた経路計画の多くは，制御性の高い移動体が想定されていた。これは，経路の設定が主題であるた

* 東京電機大学

〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2

Tokyo Denki University

2-2, Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

図 1 脚型ロボットによる 3 次元経路計画

Fig. 1. Path planning in three dimensional environment.

めに、設定された経路上を追従することは容易であることを前提としていたためである。そこでは、障害物の回避手法は迂回のみであり、2次元環境を想定したものが多い。しかし、3次元環境を想定し、迂回以外の効果的な回避動作の付加によって、実環境におけるより効率的な移動が期待できる。このような移動の実現のためには、高い対地適応性を有した脚型歩行ロボットが有効である。

本研究では4脚ロボットによる経路計画を想定している。これにより、Fig.1のように、障害物の跨ぎ越えなどの迂回以外の回避動作を行うことができる。さらに、しゃがみ込むことによる障害物の潜り抜け、脚幅を狭めることによる狭い通路の通り抜けのような歩行形態を変えながらの移動も可能となる。

これまでも、4脚ロボットによる経路計画はいくつか試みられている。Bai らは、3次元環境の評価を行い、4脚ロボットの経路を導いている⁽⁴⁾。この研究では、障害を地形の変化、すなわち段差と溝に限定しており、潜り抜けや脚幅の制御といった脚型歩行ロボットの利点である姿勢の変更は考慮されていなかった。また、Lee らは、ベジェ曲線による4脚ロボットの軌道の生成、および追従を試みている⁽⁵⁾。この研究では静的な既知環境を想定しており、突発的な経路変更は想定されていない。

本論文では、3次元障害物として3種類の障害物：潜り抜けることの可能な障害物、跨ぎ越えることの可能な障害物、迂回で回避しなければならない障害物、を含む3次元環境を想定する。このうち、迂回による障害物回避についてはこれまでに提案された手法を適用することが可能である。しかし、そのためには車輪型ロボットと同様の高い制御性が要求される。提案する軌道追従歩容では、ロボットの状態およびサブゴール地点を本体中心の位置座標および姿勢により記述することにより、制御性の改善を試みる。しかし、車輪型ロボットと同等の高い制御性を獲得するためには、いくつかの問題点の改善が不可欠であり、これについて次章で検討する。

3. 4脚ロボットの問題点とその改善

4脚ロボットの主な問題点として、以下のものが考えられる。

図 2 安定遊脚条件

Fig. 2. Stability constraint during swing.

- (1) 車輪型に比べて移動速度が遅い (移動速度)。
- (2) 遊脚時に転倒の恐れがある (安定性)。
- (3) 各脚の関節角度に制限がある (可動限界)。
- (4) (2) と (3) の併発により歩行の継続が不能となる (デッドロック)。
- (5) 足先の滑りが生じ易い (滑り)。

(1) の移動速度に関する問題は、機構的な制限のため車輪型には到底及ばないのが現状であるが、迅速な移動の実現のためには可能な限り改善する必要がある。(2) の安定性と (3) の可動限界拘束は歩行ロボット特有の問題であり、歩行ロボットは常にこれに拘束される。また、4脚ロボットによる経路計画を実現するためには、特に (4) のデッドロックと (5) の滑りが問題となる。これは、計画された軌道上を追従するために、改善しなければならない課題である。以下に本論文で提案する軌道追従歩容における、これらの問題点に対する改善手法を示す。

〈3・1〉 移動速度 脚型歩行ロボットの移動速度を改善するために、効率の良い動歩行に関する研究が行われている。木村らは、神経振動子を用いることにより、動歩行パターンの生成を行っている⁽⁶⁾。また、Herr らは、馬の歩行パターンであるギャロップ歩容のモデル化および解析を試みている⁽⁷⁾。ところが、動歩行は常に動的安定性を維持する必要があり、搭載されたマニピュレータによる作業の実現や脚幅の制御などは困難である。本研究では複雑環境下での移動を想定しているため、移動速度よりも安定性を重視した静歩行を採用する。また、歩行速度は機構的制限の範囲内で任意に設定できるように歩容設計を行う。

〈3・2〉 安定性 4脚ロボットが静的安定を維持しながら遊脚を行うためには、3本の支持脚のつくる三角形の内部にロボットの ZMP が存在することが条件となる (Fig.2)。安定した遊脚が可能か否かを評価するために、静的安定性を数値的に表現することが望ましい。

本研究では、安定性の評価手法として、3次元の安定性を評価する基準である NE 安定余裕 (S_{NE})⁽⁸⁾ を採用する。 S_{NE} はロボット本体の重心位置と支持脚の位置より求まり、 S_{NEi} (i は遊脚候補の番号) が大きい程、脚 i を安定した状態での遊脚が可能であることを意味する。理論上、 $S_{NEi} < 0$

図3 キネマティクス余裕 Km
Fig. 3. Kinematics margin: Km .

図4 関節角度余裕 Am
Fig. 4. Proposed Angular margin: Am .

のときに、脚 i を遊脚しようとするとき4脚ロボットは転倒する。そこで、脚 i を遊脚する直前にその脚のNE安定余裕 S_{NEi} を計算し、その値が閾値 S_{NE0} 以下、つまり脚 i が安定した遊脚を実行することが不可能であれば、脚 i は遊脚を行わない。さらに、 S_{NE} を遊脚の判定基準として採用することにより、例えば荷物の運搬時などにロボット本体の重心位置が本体中心からずれる場合であっても、転倒しない遊脚動作を保証することが可能となる。これについては、〈5・4〉節で検証する。

〈3・3〉可動限界 各関節には機構の制限から可動限界拘束が存在する。現在の関節角度から可動限界までの余裕の評価手法としてキネマティクス余裕 Km (Kinematics Margin) が提案されている⁽⁹⁾。 Km は Fig. 3 に示すように、各足先の可動範囲を近似的に定義し、その後端からの距離として定義されている。 Km を導入することにより、可動限界まで余裕がどの程度あるかを数値的に記述することが可能となる。しかし、 Km は平坦な地形のみを想定しており、本体の姿勢は一定であると仮定されていた。本研究では3次元環境での経路計画を想定しているため、旋回や積極的な姿勢の変更が不可欠となる。

そこで、Fig. 4 のように各関節角度に着目し、限界角度までの余裕を関節角度余裕 Am (Angular Margin) と定義し、可動範囲の評価として採用する。脚 i の j 関節における関節角度余裕 Am_{ij} を

$$Am_{ij} = \begin{cases} \theta_{maxij} - \theta_{ij} & \text{if } \theta_d \leq \theta_{ij} \\ \theta_{ij} - \theta_{minij} & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots(1)$$

ただし

図5 デッドロック状態
Fig. 5. Dead lock state.

$$\theta_d = \frac{\theta_{maxij} + \theta_{minij}}{2}, \dots\dots(2)$$

と定義する。ここで、 θ_{maxij} は i 脚 j 関節の最大限界関節角度、 θ_{minij} は i 脚 j 関節の最小限界関節角度、 θ_{ij} は i 脚 j 関節の現在の関節角度である。関節角度余裕 Am は、 $Am_{ij} = 0$ のとき、脚 i の第 j 関節が可動限界に達したことを意味し、機構的制限により緊急停止させる必要がある。さらに、脚 i の関節角度余裕 Am_i を $\min(Am_{i1}, Am_{i2}, Am_{i3})$ と定義し、 Am_i を常時0以上に維持することによって、姿勢変更時や障害物の踏み越えの際にも各関節角が可動範囲内にあることが保証される。

〈3・4〉デッドロック 可動限界に近い脚が遊脚不可能な状態である場合 (Fig. 5) は、デッドロックとなり、歩行を継続することができない。特にクロール歩容のような周期的歩容では、旋回時にデッドロックが発生することが多い。このため、ロボット本体を任意の時刻に任意の方向へ動かすことは不可能である。広瀬らは、あらかじめ旋回中心を設定し、歩行計画を行う手法を提案している⁽¹⁾が、動的環境や滑りの検出時に必要となる突発的な軌道変更の実現は困難である。本研究で提案する軌道追従歩容では、関節角度余裕 Am を監視することで、可動限界に近づいた脚を優先的に遊脚するというアルゴリズムと強制的遊脚モードの付加によって、デッドロックの回避を試みる。これにより、任意のサブゴールを指定した際にも歩行を完遂することが可能となる。

〈3・5〉滑り 脚型歩行ロボットの重大な問題点として滑りがある。この改善のために、いくつかのアプローチが考えられる。例えば、足先の機構を改良することによる滑べりの防止である。このような改良は必要ではあるが、完全に滑りを無くすことは困難である。そこで、本研究では滑りを直接検出することによる移動中の軌道の補正を想定する。例えば、足裏に装着した光学マウスによって滑り量を検出した場合⁽¹⁰⁾、突発的な軌道の補正を可能とする歩容パターンが要求され、本研究で提案する軌道追従歩容もそのような動作を考慮している。これについては、〈5・5〉で検証を行う。

4. 軌道追従歩容 TFG

本研究では、4脚ロボットに3次元経路計画を適用するために、軌道追従型歩容を提案する。この歩容は、4脚ロボットの問題点の改善に加え、車輪型ロボットのような高い制御性の獲得、歩行中の姿勢変更の実現を目的としている。軌道追従歩容は各脚の Am を監視し、 Am の小さい脚を優先的に遊脚する非周期的歩容である。

これにより、4脚ロボットの歩行を脚に依存せずに本体中心の軌道のみで記述することが可能となる。また、 Am に閾値を設定し、それを下回った脚を強制的に遊脚させることで、デッドロックの回避を保証している。軌道追従歩容は、以下に示す本体移動と脚移動の2つのモジュールの並列処理によって実行される。

〈4・1〉 本体移動 軌道追従歩容において、ロボット本体は脚の動作に関係なくサブゴールへ向かって移動する。その際、本体姿勢 (pitch, roll, yaw) もパラメータとして設定し、歩行中のサブゴール変更も許可する。これにより、突発的な事態に対する軌道変更や、小刻みにサブゴールを設定することによる滑らかな巡回軌道を描くことが可能となる。つまり、本体移動に関しては、車輪型ロボットのような制御が期待できる。サブゴールにおけるロボットの状態 P を、本体中心位置座標 (x, y, z) 、および本体姿勢 $(\theta_p, \theta_r, \theta_y)$ の6つのパラメータより、

$$P = (x, y, z, \theta_p, \theta_r, \theta_y) \dots \dots \dots (3)$$

と定義する。また、サブゴールまでの移動速度を指定することも可能とする。そして、最終目的状態をゴールとして指定することで、歩行動作の終了条件とする。これにより、動作計画モジュールは遊脚動作を考慮せずとも任意のサブゴールを設定することで、脚型ロボット本体の動作を記述することが可能となる。

〈4・2〉 脚移動

〈4・2・1〉 遊脚動作 計画された本体の軌道に各脚を追従させる歩容を実現するために、脚の動作は3つパラメータ: width, pace, riseにより決定する。これより、Fig.6のように、進めるべき次の脚位置 Nfp (Next foot point) が一意に定まる。width, pace, rise はそれぞれ歩容中にも変化させることを許可する。

例えば、通過領域の幅に制限がある環境では脚幅パラメータ width を小さくすることで、狭い場所を通り抜けることが可能となる。これについては、〈5・3〉節で検証する。さらに、障害物を乗り越えるためには、脚を持ち上げる高さ rise を調整する。しかし、安定性の維持のため、遊脚時間はできるだけ短いことが望ましい。そこで、脚を持ち上げる高さ rise は可能な限り小さくする。このように、遊脚動作が一意に決定されることで、遊脚のタイミングのみを考慮すればよい。また、次に置くべき足先位置を座標として表現しているため、段差、溝などの踏み越え、跨ぎ越えやマップ情報に基づく、脚と環境中の物体との衝突判定が可能となる。

図6 パラメータによる遊脚動作

Fig. 6. Leg swing locomotion by the parameters.

図7 周期的歩容収束のための歩幅調整

Fig. 7. Pace adjustment for convergence on crawl.

能となる。

また、安定性の保証のため、脚 i の遊脚の直時に S_{NEi} を計算し、 $S_{NEi} \leq 0$ 、つまり脚 i の安定した遊脚が不可能である場合には、遊脚は行わず、他の動作が選択される。

〈4・2・2〉 周期的歩容への収束 さらに、直進歩行において、クロール歩容が移動効率が高い点に着目し、pace の調整によって軌道追従歩容をクロール歩容と同様の遊脚順序を持つ周期的歩容へ収束させる。一般的なクロール歩容は、Fig.7(a)に示すように遊脚順序が一定である。ここで、遊脚候補の脚を lc 、クロール歩容の遊脚順序における lc の1回前の遊脚を lp とする。また、Neutral line から本体方向への相対足先位置を Local Foot Point: LFP と定義する (Fig.7(b))。これより、脚 lp の相対足先位置 LFP_{lp} と、現在の脚 lc の歩幅 $pace_{lc}$ から、調整後の脚 lc の歩幅 $pace_{lc}^{adj}$ は以下のように決まる。

$$pace_{lc}^{adj} = pace_{lc} - \alpha LFP_{lp} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 α は、収束に対する重みである。この収束性について、〈5・2〉節で検証および考察を行う。

〈4・2・3〉 遊脚選択 軌道追従歩容は、ロボット本体の位置・状態に応じて遊脚を選択する非周期的歩容である。遊脚選択は以下の手順で行う。まず、関節角度余裕 Am が小さい脚から順に優先的に候補としてあげる。そして、遊脚候補の NE 安定余裕 S_{NE} を求め、安定遊脚が不可能な場合には遊脚候補から外される。このように、遊脚を非周期的に選択することで、姿勢の変更や障害物の踏み越えにも適応的な遊脚が期待できる。

図8 強制遊脚動作

Fig.8. Forced swing mode.

図9 軌道追従歩容アルゴリズム

Fig.9. Algorithms of TFG.

〈4・2・4〉強制遊脚 Am の小さい脚を優先的に遊脚とするアルゴリズムにおいても、突発的な移動の際にはデッドロック状態に陥る可能性がある。これを回避するために、 Am が閾値 Am_0 を下回った時点で、Fig.8に示すように強制遊脚を行う。これは、安達らによって提案された脚踏み換えルール⁽¹¹⁾を単純化したものである。

強制遊脚の手順を以下に示す。まず、各脚の Am をそれぞれ再計算し、 Am が閾値 Am_0 を下回った脚が検出された時点で本体を一時的に停止させ、その脚を遊脚候補脚 l_c とする。ここで、 l_c に隣接する2脚のうち、安定遊脚が可能な脚を l_n と定義する。そして、 l_c は遊脚せずに、 l_n を l_c の遊脚が可能となる位置へ遊脚動作を行う。この時点で、 l_c は安定した遊脚が可能となり、通常の遊脚動作を行うことができる。 l_c の遊脚動作が終了した後、歩行を再開する。しかし、強制遊脚は本体移動を強制的に停止するため、移動効率が著しく低下するという問題があり、可能な限り低減する必要がある。

〈4・3〉歩容アルゴリズム 軌道追従歩容アルゴリズムを Fig.9 に示す。この歩容は、本体移動モジュールと斜線部に示す脚移動モジュールの並列処理によって実行される。これにより、動作指令は本体移動のみを考慮すれば良く、遊脚動作は並行して実行される脚移動モジュールによって随時解決される。脚移動モジュールでは、各脚の Am をを監視し、最も Am の小さい脚、すなわち可動限界に近い

図10 TITAN-VIIIの概観

Fig.10. Overview of TITAN-VIII.

表1 TITAN-VIIIの主な仕様

Table 1. Specifications of TITAN-VIII.

Size	300 × 600 × 250 [mm]
DOF	12 (3 joints × 4 legs)
Weight	20 [kg]
Weight capacity	7 [kg]
Maximum walking velocity	0.3 [m/s] (duty factor=0.75)
Actuator	DC motor

図11 TITAN-VIIIにおける各関節の可動範囲

Fig.11. Work space limitation of each joint.

脚を優先的に遊脚とする。また、遊脚動作時に遊脚候補のNE安定余裕 S_{NE} をチェックすることで遊脚時の転倒を未然に回避する。

5. シミュレーション実験および考察

〈5・1〉シミュレーション環境 本章では、提案する軌道追従歩容の有効性をいくつかのシミュレーションにより検証する。軌道追従歩容を適用する4脚ロボットのモデルとして、東京工業大学で開発された TITAN-VIII⁽¹³⁾を採用する (Fig.10)。TITAN-VIIIの主な仕様を Table1に、また各関節角度の可動範囲を Fig.11に示す。以下のシミュレーションは、全て TITAN-VIIIの仕様に即しており、実機と同様の制御を想定している。

〈5・2〉周期的歩容への収束 軌道追従歩容は、〈4・2・2〉節で述べた pace の調整アルゴリズムにより、直進時にはクロール歩容に収束させる。本実験では、一般的なクロール歩容と、軌道追従歩容によってそれぞれ直進歩行を行い、LFPを比較した。Fig.12(a)に示すように、歩き始めは多少歩調に乱れが生じているが、10 sec 付近から、周期的な歩調に収束していることがわかる。

ここで、クロール歩容における歩行の初期状態は、Fig.13

図 12 軌道追従歩容の収束性の検証

Fig. 12. Convergence to crawl gait.

図 13 クロール歩容における初期状態拘束

Fig. 13. Constrained initial positions of crawl gait.

図 14 DTE 点における比較

Fig. 14. Comparison of DTE point.

のように設定する必要があるのに対し、軌道追従歩容では、足先位置をランダムに設定している。それにもかかわらず周期的歩調への収束が可能であるため、サブゴールを設定する際に現在の足先位置、姿勢を考慮する必要がなく、任意に設定することが可能となる。これは、軌道追従歩容の特徴であり、経路計画により計算された軌道間を任意の間隔のサブゴールとして結ぶことで、経路を追従することが期待できる。

ここで、軌道追従歩容の LFP の遷移に位相差が生じる理由について考察する。クロール歩容は直進歩行時に高い安定性を維持する歩容であるとされているが、Fig.14(a)に示すように遊脚時に対角三角形切替点 (DTE 点) と呼ばれる不安定となる瞬間が存在する⁽¹²⁾。一方、提案する軌道追従歩容では、前脚の遊脚時にも安定性の判定が行われる。そのため、静的安定性を維持している必要があり、遊脚のタイミングにずれが生じる (Fig.14(b))。しかし、歩幅が同じ場合には軌道追従歩容とクロール歩容は同等の遊脚回数で目的地まで到達することが可能である。これより、安定

図 15 歩行中の姿勢変更

Fig. 15. Changing posture during walk.

図 16 歩行中の姿勢変更 (結果)

Fig. 16. Results of changing posture during walk.

性の面からも軌道追従歩容が有効であるといえる。

〈5・3〉歩行中の姿勢変更 軌道追従歩容では、脚型ロボットの利点のひとつである歩行中の姿勢変更を許可している。この機能を検証するため、Fig.15に示すような、障害物を含む環境における歩行のシミュレーションを行った。ここでは、しゃがみ込みによる上方障害物の潜り抜け動作と脚幅を狭めることによる狭い通路の通り抜けに着目する。潜り抜け動作はサブゴールの Z 軸成分を、脚幅の制御は遊脚パラメータ width をそれぞれ調整することにより実現する。

Fig.16(a)にロボット本体の X 座標に対する各脚の LFP の遷移を、Fig.16(b)に各脚の Am の遷移をそれぞれ示す。75-125 cm で上方障害物の潜り抜け動作を行っているため、全脚の Am が低下しているが、可動限界に達する前に遊脚動作を行っていることがわかる。また、Fig.16(c)に各脚の接地座標を示す。これより、150-200 cm で歩幅を狭めることに成功していることがわかる。しかし、歩幅を狭めることで関節角度を圧迫する傾向があり、Am の遷移に乱れが生じている。しかし、もし脚長が長ければ、軌道追従歩容により脚幅を狭める動作がスムーズに行えることが期待できる。

図 17- 想定する ZMP のずれ

Fig. 17. Assumed shift of ZMP.

〈5・4〉 ZMP が本体中心からずれた場合 脚型ロボットの応用例として、荷物等の運搬やマニピュレータの搭載が考えられる。そのような場合、ロボットの本体の重心位置が本体中心からずれる可能性がある。本論文で提案する軌道追従歩容では、このような状況でも S_{NE} により安定性を判定するため、歩行を継続することが可能である。シミュレーションでは、Fig.17(b) に示すように、ZMP の位置座標を本体中心から、(-5, 5) だけずらした場合を想定し、軌道追従歩容によって直進歩行を行った。

Fig.18(次頁) にシミュレーション結果を示す。Fig.18(a) および (b) は、時間に対する関節角度余裕の遷移を示しており、この図より、 $Am = 0$ 、すなわち可動限界に到達することなく歩行が完了していることがわかる。また、Fig.18(c) および (d) は、Fig.7(b) で定義した LFP の時間に対する遷移を表している。Fig.18(c) より、ZMP がずれている場合は、本体中心に ZMP がある場合 (Fig.18(d)) に比べ、遊脚周期に乱れが生じていることがわかる。これは、ZMP が偏っている側の脚 Leg1 および Leg3 の遊脚動作時に支持脚のつくる三角形の内側に ZMP が入りづらいうちに起因する。しかし、遊脚を Am により選択的に決定しているため、ZMP にずれが生じた際にも歩行を完遂することが可能となる。

〈5・5〉 突発的な軌道変更 軌道追従歩容は、車輪型ロボットのような高い制御性の獲得も目的としている。歩行中に滑りが生じ、それを何らかの手法により検出したと仮定して、軌道の補正を試みる。このような補正を実現するためには、デッドロックに陥ることなく突発的な軌道の変更を行う必要がある。シミュレーションでは、Fig.19 のようにサブゴールを設定し、歩行中に仮想的な滑りをランダムに生じさせた。滑りは、本体の yaw 角と本体位置に作用させ、同時に全脚の足先位置座標を計算し直すことで表現した。

シミュレーションにおける LFP の遷移を Fig.20(a) に、 Am の遷移を Fig.20(b) にそれぞれ示す。これらの結果より、歩調は乱れているが、可動限界に達することなくゴールへ到達していることがわかる。今後、滑り検出手法を実装し、軌道追従歩容に適用することで、計画された軌

図 19 仮想滑りによる突発的動修正

Fig. 19. Trajectory correction by virtual slip.

図 20 仮想滑りによる突発的軌道修正の結果

Fig. 20. Results of the trajectory correction.

道を正確に追従することが期待できる。

〈5・6〉 3次元既知環境への適用 この実験では、より現実的な3次元環境を想定し、あらかじめサブゴールを与え、軌道追従歩容によって歩行させた場合の検証を行う。Fig.21 に想定する3次元環境を示す。ここで、障害物の位置、高さは既知であるとした。この環境には、潜り抜けが可能な上方の障害物、踏み越えることが可能な足元の障害物、そして避ける必要のある大型の障害物の3種類の障害物が存在する。これらの障害物を4脚ロボットの特徴を活かして回避させる。この実験では次の3つ障害物回避動作、(1) 迂回による大型障害物の回避、(2) 上方障害物の潜り抜け、(3) 段差の踏み越え、にそれぞれ着目する。シミュレーションの結果、時間に対する本体の高さを Fig.22(a) に、 Am および LFP の遷移を Fig.22(b), (c) にそれぞれ示す。また、時間に対する足先の高さを Fig.22(d) に示す。

〈5・6・1〉 大型障害物の迂回 10 - 30 sec で迂回動作が行われている。迂回動作では、LFP に乱れが生じているが、関節角度を可動限界内に維持したまま歩行を続け、直進動作に復帰した際に周期的歩容に収束している。

〈5・6・2〉 上方障害物の潜り抜け 障害物の潜り抜け動作は 40 - 50 sec 付近と 65 - 75 sec 付近で行われている。これは、サブゴールの Z 成分を小さく設定することにより実現しており、結果的にロボット本体の軌道を低く維持することが可能となる。Fig.22(b) に示すように、この

図 18 ZMP が本体中心からずれた場合の歩行パラメータ比較

Fig. 18. Comparison of gait parameters in shifting ZMP.

図 22 3次元環境の歩行シミュレーション結果

Fig. 22. Experimental results of the gait in 3D complex environment.

図 21 想定する 3次元環境とサブゴール

Fig. 21. Experimental environment and sub-goals.

動作における各脚の関節角度余裕 Am は全体的に低下しているが、可動限界に達すること無く歩行を継続していることがわかる。

〈5・6・3〉 段差の踏み越え 50 – 65 sec にかけて Leg2 および、Leg4 が踏み越え動作を行っている。このように片側だけが踏み越えるような動作であっても、デッドロックに陥ることなく歩行を継続している。これは、段差を踏み越えている途中であっても、 Am によって関節角度を評価することが可能であり、優先的に遊脚するように働くためである。

また、75 sec 以降は、階段の乗り越えを行っている。これは、サブゴールの高さを階段の高さを考慮して設定することで実現している。階段を登っている最中であっても、可動限界に達することなく歩行を完遂することが可能となった。

〈5・6・4〉 考 察 本シミュレーションでは、既知の 3次元障害物を想定しているが、今後、環境認識機能を付加する必要がある。例えば、障害物が潜り抜けが可能であるかの判定、段差高の検出などがあげられる。また、経路

の計画の際に高さを考慮した3次元的な経路計画手法が要求される。このような場合でも、軌道追従歩容は高い制御性を有するため、環境認識や経路計画の実現に対してその適用が容易に可能となる。

6. おわりに

本研究では、脚型ロボットの問題点である不安定性、可動限界拘束、またこれらが併発した際に起こるデッドロック問題を改善する歩行パターンとして軌道追従歩容を提案した。この軌道追従歩容は、脚型ロボットの利点である姿勢変更を歩行中に行うことを可能とし、また、任意のサブゴール指定による高い制御性の獲得を実現した。

本論文では、軌道追従歩容をいくつかのシミュレーション実験により検証した。その結果、本体の重心位置がずれた場合や、突発的な滑りが検出された場合にも安定性と可動範囲を保証しながら歩行を完遂することが可能であることが示された。また、直進歩行において安定で効率が良くとされるクロール歩容に歩容パターンを収束させることで、移動効率の改善を試みた。さらに、より現実的な3次元複雑環境を想定したシミュレーション実験では、適切にサブゴールを設定することができれば、階段の昇降も可能であることを示唆した。また、この歩容パターンは脚長、自由度、可動範囲の違う4脚ロボットに対しても閾値 Am_0 , S_{NE0} を適切に設定することで有効に適用可能であると考えられる。

今後、環境認識機能の追加および、3次元的な経路計画手法を確立することが必要である。これにより、車輪型ロボットでは移動困難な複雑環境下での効率的な移動が期待できる。

(平成14年8月30日受付, 平成15年3月3日再受付)

文 献

- (1) S. Hirose, H. Kikuchi, Y. Umetani: "The Standard Circular Gait of the Quadruped Walking Vehicle", *J. of the Robotics Society of Japan*, PP.545-556 (1984) (in Japanese)
広瀬茂男・菊地秀和・梅谷陽二:「4足歩行機械の基準旋回歩行」, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.6, pp.545-556 (1984)
- (2) J. Estremera and P.G. Santos: "Free Gait for Quadruped Robots over Irregular Terrain". *Int. J. of Robotics Research*, Vol.21, No.2, pp.115-130 (2002)
- (3) S. Bai, K.H. Low, G. Sct, and T. Zielinska: "A New Free Gait Generation for Quadrupeds Based on Primary / Secondary Gait", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1371-1376 (1999)
- (4) S. Bai and K.H. Low: "Terrain Evaluation and its Application to Path Planning for Walking Machines", *Advanced Robotics*, Vol.15, No.7, pp.729-748 (2001)
- (5) J.K. Lee and S.M. Song: "Path Planning and Gait of Walking Machine in An Obstacle-strewn Environment", *J. of Robotic System*, Vol.8, No.6, pp.801-827 (1991)
- (6) H. Kimura, S. Akiyama, and K. Sakurama: "Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator", *AUTONOMOUS ROBOTS*, Vol.7, No.3, pp.247-258 (1999)
- (7) Hugh M. Herr and Thomas A. McMahon: "A Galloping Hourse Model", *The Int. J. of Robotics Research*, Vol.20, No.1, pp.26-37 (2001)
- (8) S. Hirose, H. Tsukakoshi, and K. Yoneda: "static stability criterion for walking robots on irregular terrains". *J. of the*

Robotics Soc. of Japan, Vol.16, No.8, pp.48-54 (1998-8) (in Japanese)

- 広瀬茂男・塚越秀行・米田 完:「不整地における歩行機械の静的安定性評価基準」, 日本ロボット学誌, 16, 8, pp.1076-1082 (1998-8)
- (9) R.B. McGhee and G.I. Iswaghi: "Adaptive Locomotion of a Multi-legged Robot over Rough Terrain", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-9, No.4, pp.176-182 (1979)
- (10) H. Igarashi and M. Kakikura: "Path Planning for a Quadruped Robot in 3D Complex Environment - Slip Detection and Revision of Trajectory Using Mouse Pointer: 2nd report -", *Proc. of the 8th Robotics Symposia*, pp.516-521 (2003) (in Japanese)
五十嵐洋・柿倉正義:「3次元複雑環境における脚型ロボットの経路計画-光学マウスによる足先のすべり検出および軌道修正(第2報)-」, 第8回ロボティクスシンポジウム, pp.516-521 (2003)
- (11) H. Adachi et al.: "Semi-Autonomous Walking Based on Leg Transition at the Border of the Leg Work Space", *J. of the Robotics Soc. of Japan*, Vol.16, No.3, pp.329-336 (1998-3) (in Japanese)
安達弘典・小谷内範徳・新井建生・本間敬子・篠原善裕・西村賢一朗:「可動限界到達時の脚踏み換えルールに基づく4脚ロボットの操縦型歩行制御」, 日本ロボット学誌, Vol.16, No.3, pp.329-336 (1998)
- (12) H. Tsukakoshi and S. Hirose: "The Proposal of the Intermittent Crawl Gait and its Generation", *J. of the Robotics Soc. of Japan*, Vol.17, No.2, pp.301-309 (1999) (in Japanese)
塚越秀行・広瀬茂男:「間歇クロール歩容の提案とその生成原理」, 日本ロボット学誌, 17, 2, pp.301-309 (1999-2)
- (13) S. Hirose and K. Arikawa: "Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII for Commercially Available Research Platform", *J. of the Robotics Soc. of Japan*, Vol.17, No.8, pp.1191-1197 (1999-8) (in Japanese)
広瀬茂男・有川敬輔:「研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIIIの開発」, 日本ロボット学誌, 17, 8, pp.1191-1197 (1999-8)

五十嵐 洋 (学生員) 1977年4月2日生。2002年3月東京電機大学工学研究科博士前期課程修了。同年4月東京電機大学工学研究科電子工学専攻博士後期課程入学, 現在に至る。4脚歩行ロボットの研究に従事。

柿倉正義 (正員) 1942年9月4日生。1965年東京電機大学工学部電子工学科卒。同年, 電気試験所(現産業技術総合研究所)入所。1980年情報制御研究室長, 1988年自律システム研究室長。1974~1975年エジンバラ大学人工知能学科。1990年東京電機大学工学部電子工学科教授。工学博士。