

## 脚車輪分離型ロボットの2脚復帰型自由歩容\*

中嶋秀朗\*<sup>1</sup>, 中野栄二\*<sup>2</sup>, 高橋隆行\*<sup>3</sup>

## Free Gait Algorithm with Two Returning Legs of a Leg-wheel Robot

Shuro NAKAJIMA\*<sup>4</sup>, Eiji NAKANO and Takayuki TAKAHASHI\*<sup>4</sup> Future Robotics Technology Center, Chiba Institute of Technology,  
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba, 275-0016 Japan

A leg-wheel robot has mechanically separated four legs and two wheels, and it performs high mobility and stability on rough terrains. In this paper, we propose a free gait algorithm for the leg-wheel robot, which allow continuous locomotion under random velocity commands. The gait algorithm which is based on the predictive event driven method determines legs lifting timing to avoid the legs reaching the borders of their work space. The robot is operated remotely by an operator who uses a controller to give straight velocity and angular velocity of the body. Legs' control is fully automated by the proposed algorithm that implements the operator's arbitrary commands. The proposed method is evaluated by simulations and experiments.

**Key Words:** Moving Robot, Motion Control, Robot, Leg-wheel Robot, Free Gait, Gait Algorithm, Event Driven Method, Continuous Locomotion

## 1. はじめに

現在, 不整地路面を対象とした移動機構の中心は, 車輪またはクローラである。車輪機構は構造が簡単で, かつ移動効率が高いため, 多くの移動機構で用いられているが, 不整地への適応力が一般に低い。クローラ機構は車輪に比較して高い不整地適応性を有し, 土木建設機械などでの豊富な実績があるものの, その適応範囲は連続的に接地点を確保できる地勢に限られる。

それに対して, 脚機構は接地点を任意かつ不連続に取ることが可能であるため, 段差などの踏破性に優れ, 斜面や大きな凹凸がある地形においても機体を安定に支持することができるという利点を持つ。

脚機構の使用に関する技術は確実に高まりつつある。しかしながら, その実用化に至るまでには, 次のような未解決の問題も多い。

1. 車輪機構やクローラ機構に比べてエネルギー消費が大きく, 単独での長時間の稼働が困難。
2. 機体の安定性が制御に大きく依存し, 現状のセンシング・制御技術では不整地での運用における信頼性が低い。
3. 複数の脚機構を協調させて目的とする動作を実現する制御手法が, 開発の途上にある。

これらの問題の解決を目的として, 著者らが提案, 開発した不整地移動プラットフォームが脚車輪分離型ロボットである。脚車輪分離型ロボットは, 図1の写真のように, 4脚と2車輪を独立した機構として有し, 両者を併用しての不整地移動, 車輪のみを使用しての整地移動を行う。脚車輪分離型ロボットで提案する運用形態は次の通りである。屋外作業現場まで向かう途中の整備路面を移動する際には, 脚を持ち上げ車輪のみを用いる「車輪モード」で移動する。起伏のある不整地路面に差し掛かった際には脚を下ろし, 脚と車輪を協調させた「脚車輪モード<sup>(1)~(3)</sup>」で移動する。上記の車輪モードと脚車輪モードを併用することで, 現在あるインフラを活用することができ, 整備路面では高速に, 未整備路面では確実に移動することができる。

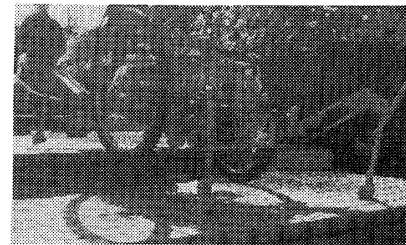


Fig. 1 A leg-wheel robot : Chariot 3

問題 (1) について脚機構の消費エネルギーが大きいのは, 機体の荷重をアクチュエータで常に支え続けなければならないことによるものだが, 脚車輪分離型

\* 原稿受付 2004年10月29日。

\*<sup>1</sup> 正員, 千葉工業大学未来ロボット技術研究センター(〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1)。\*<sup>2</sup> 正員, 千葉工業大学総合研究所(〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1)。\*<sup>3</sup> 正員, 福島大学共生システム理工学類(〒960-1296 福島市金谷川1)。

E-mail: nakajima@furo.org

ロボットは脚機構と併用して車輪機構で荷重を分担することで、そのエネルギー効率を改善している。問題(2)について機構の面から言えば、適切な制御なしには機体を支持しえない脚機構の他に、車輪機構によって常に機体が支持されており、ハードウェア自体の安定性が高い。機構的な安定性の高さは、脚機構の制御に要求される地形情報の精確性の緩和につながる。これに加え、車輪機構の受動コンプライアンスと脚機構のコンプライアンス制御により地面の凹凸を吸収し、脚姿勢の変位量から接地反力を推定することで、地形の事前センシングを必要とすることなく未知屋外不整地の移動を可能としている<sup>(1)~(3)</sup>。このような移動方式は、下草などの茂る屋外環境で精確な地形情報を取得することが容易ではない現状において、有効な手段であると言えよう。問題(3)については、脚の可動限界への到達という推進障害イベントの発生を各脚について予測し、脚の離昇タイミングを適切に設定することで、継続的な全方位移動を可能にする予測型イベントドリブン方式の歩容により解決を図ってきた<sup>(4)~(5)</sup>。

問題(3)に関して、脚機構を適切に協調させ、継続的な推進動作を実現してきた従来の研究は大きく3通りに分けられる。

1. ウェーブ歩容<sup>(7)~(8)</sup>やトロット歩容<sup>(9)</sup>など、レギュラー歩容の脚の移動量、デューティ比を可変として、任意の速度指示に対応した手法。
2. 安定性、移動速度などの条件に関して最適化する歩容パターンをあらかじめ計画する手法<sup>(10)~(11)</sup>。
3. 復帰および接地タイミングを決定する幾つかの簡単なルールに基づき、創発的な歩容パターンの形成を行うルールベースの手法<sup>(4)~(5)~(12)~(16)</sup>。

さらに(3)に分類される研究例は、6脚ロボット<sup>(12)~(14)</sup>と4脚ロボット<sup>(15)~(16)</sup>、4脚2車輪の脚車輪分離型ロボット<sup>(4)~(5)</sup>に分けられる。

6脚ロボットの研究例<sup>(12)~(14)</sup>のうち、Alexandreらは、隣接する2脚が同時に遊脚とならないように、隣接する脚同士の位相状態を監視し、位相関係がある状態を越えたら一方の脚を遊脚化させるというルールを用いて自由歩容を実現した<sup>(14)</sup>。

4脚ロボットでは、機体の安定を保つ理由から遊脚を1脚とした歩容に対する研究が行われてきた<sup>(15)~(16)</sup>。

一方、脚車輪分離型ロボットでは、熊谷らにより遊脚を1脚に限定した予測型イベントドリブン歩容(クリープ歩容)が実現された<sup>(4)</sup>。そこでは、安定余裕を重視し、遊脚を1脚以下(支持脚3脚以上)に抑えたクリープ歩容を前提としていた。ただ実際には、車輪を常時接地させる脚車輪モードでは、2脚を遊脚化した

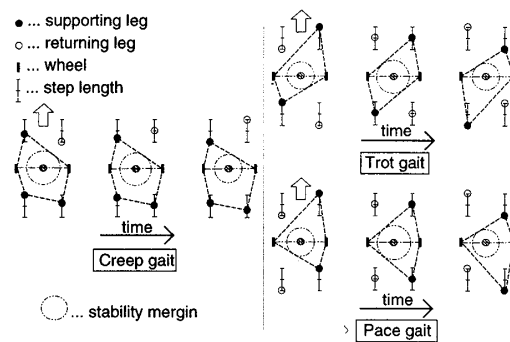


Fig. 2 Stability margin of each gait

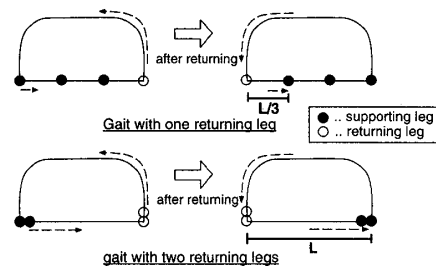


Fig. 3 Movement distance of supporting legs while other legs are returning

場合でも、十分に静的安定余裕は確保できる。

図2は、脚の動かし方をクリープ、トロット、ペース歩容とした場合の、ある脚の遊脚時間における静的安定余裕の推移を明示したものである。クリープ歩容については、静的安定余裕が最小となる場合の脚配置を記載した。この図から脚車輪分離型ロボットにおいて1周期中の最小静的安定余裕は、遊脚が1脚であっても2脚であっても変わらないことが分かる。歩行中のどのタイミングで不整地が発生するか予測できない以上、歩容全体の安定性を最小静的安定余裕で評価することは、意味がある。

図3は、1脚復帰歩容と2脚復帰歩容における1復帰時間中の移動距離を比較したものである。前提として、各脚の遊脚速度は一定である。この図は、1復帰時間中に1脚復帰歩容では $L/3$ 、2脚復帰歩容では $L$ 進むことから、2脚復帰歩容の直進最高速度は、1脚復帰歩容の3倍であることを示している。

以上により、遊脚数を1から2にしても最小静的安定余裕は変わらず、直進最高速度は3倍となることから、予測型イベントドリブン歩容を2脚遊脚化へと発展させることは、その有用性を更に高めることとなる。

次に、歩容には、脚の離昇や接地タイミングが周期的に固定しているレギュラー歩容と、ある評価指標により各脚の離昇や接地タイミングを決定する非周期的な自由歩容(free gait)がある。動物は両方の歩容を使い分けており、平面地形を一定速度で移動する場合な

どにはレギュラー歩容を多く用いる一方で、不整地移動や回転などの任意方向への移動の際には、非周期的な自由歩容を多く用いている。この理由は、固定周期のレギュラー歩容では、脚の離昇や接地タイミングが固定化され、脚の動作が制限されるためである。そこで本論文では、できるだけ制限事項を少なくした2脚同時遊脚化可能な自由歩容アルゴリズムを提案する。

本報告のアルゴリズムは、脚車輪分離型ロボットの特徴である車輪機構による常時支持という利点を最大限活かし、前2脚または後2脚が同時遊脚化することのみを禁止した歩容である点が、他の研究と異なる点である。また提案する自由歩容は、任意の方向を含む速度指示に対して継続的な推進動作を実現でき、かつ静的安定余裕を常時確保できる歩容のうち同時遊脚数が最大のものである。

## 2. 2脚復帰型自由歩容アルゴリズム

本ロボットの移動制御手法としては、車輪機構の受動コンプライアンスと脚機構のコンプライアンス制御を用いて地面の凹凸を吸収し未知不整地を移動可能とする、すでに文献<sup>(3)</sup>で提案した手法を用いる。これは、脚と車輪による支持を行う脚車輪モードに対するものである。文献<sup>(3)</sup>に移動制御手法部分は記述したため、本報告では、姿勢制御を含まない脚の動作アルゴリズムについてのみ記述する。文献<sup>(3)</sup>の制御手法により、例えば0.10[m]程度までの障害物があっても、障害物に対応した脚先コンプライアンスと高さに関する脚先軌道が得られ機体は安定しているため、以下の歩容アルゴリズム部分では、障害物に関して復帰開始イベントとして考慮する必要はない。

また、本ロボットはオペレータによる操縦を前提としており、機体の直進速度および回転角速度の2つを指示速度としてロボットに与える。以下の議論では、この指示速度に対して即座に反応できる歩容生成アルゴリズムを提案する。なお、指示速度が機体の実現しうる移動速度を上回る場合の実際の目標速度として、2.3節では指示速度を制限する手法を提案する。

**2.1 同時遊脚化禁止脚** 脚車輪モードを仮定した場合には図2から、少なくとも前後1脚ずつが支持脚であれば、クリープ歩容と同じ最小安定余裕が得られることは、明らかである。逆に、3脚以上を遊脚化すると、前または後2脚を同時に遊脚とすることとなり、静的安定余裕は0となる。上記のことから脚車輪モードにおいて、最小安定余裕がクリープ歩容と同じで、かつ、同時遊脚数を最大とする歩容は、前後少なくとも1脚ずつを支持脚とする最大同時遊脚数2の歩

容（以下2脚復帰型自由歩容と呼ぶ）であることが導かれる。なお、上記歩容の必用十分条件は、前後少なくとも1脚ずつが支持脚であることであるため、前後脚における遊脚化に関する関係は存在しない。上記の2脚復帰型自由歩容の特徴を次にまとめる。

- 前2脚または後2脚は同時遊脚化禁止脚である。
- 同時遊脚化禁止脚である前2脚に対して、後述する可動限界到達時間と遊脚動作完了時間による比較を行い、離昇および接地タイミングを決定する。後2脚に対しても同様である。
- 脚の離昇および接地タイミングは、前脚と後脚に関して独立に決定される。

**2.2 脚の離昇および接地タイミング** 脚の離昇および接地タイミングについては、可動限界到達時間と遊脚動作完了時間という2つの指標を定義し、その比較により決定する。両指標はそれぞれ機体の移動速度が変化しないという仮定の下で脚の可動限界への到達ならびに遊脚動作の完了に要する時間の予測値である。時間軸上の予測範囲は、全支持脚の可動限界到達を回避するという観点から、予測時点において可動限界から最も遠い支持脚が可動限界に到達するまで、つまり機体の動作1周期分としている。

図4はある瞬間の運動をモデル化したものである。このモデルは旋回動作を表しており、本体に対する脚 $(g_r, i)$ の脚先の瞬間的な運動は、旋回中心 $O$ を中心とする円軌道 $M_{(g_r, i)}$ に沿うものとなる。ここで、脚 $(g_r, i)$ の $g_r$ は前脚の $f$ または後脚の $h$ であり、 $i$ は前脚同士または後脚同士における時間的な可動限界までの近さを近い順に1, 2としたものである。ただし、前2脚または後2脚において、一方の脚が遊脚の場合には、遊脚を0, 支持脚を1と表す。また、 $g_r$ を同時遊脚化禁止脚グループ記号、 $i$ を同一グループ内脚番号（略して脚番号）と呼ぶ。本論文では、同一グループの脚数は2であるが、それ以上でも以下の議論は成り立つ。この軌道を扇形の領域 $A_{(g_r, i)}$ で示した脚可動領域で切り取った弧を瞬間脚先軌道と呼ぶ。直進動作の場合には、瞬間脚先軌道は線分である。瞬間脚先軌道の長さ $l_{\max(g_r, i)}$ が脚 $(g_r, i)$ の瞬間的なフルストローク長であり、瞬間脚先軌道上での脚先の位置を、その進行方向の端点 $Q_{(g_r, i)}$ から脚先接地点 $P_{(g_r, i)}$ までの長さ $l_{(g_r, i)}$ で表す。脚先の速度は直進動作における機体並進速度 $v$ 、あるいは旋回動作における機体角速度 $\dot{\theta}$ と脚先の旋回半径 $\rho_{(g_r, i)}$ に対し、次式となる。

$$l_{(g_r, i)} = \begin{cases} |v| & (\text{straight movement}) \\ \rho_{(g_r, i)} |\dot{\theta}| & (\text{rotating movement}) \end{cases} \quad (1)$$

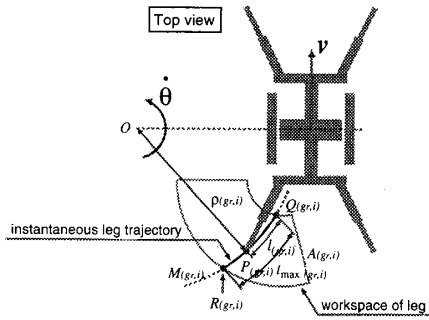


Fig. 4 Notations used in the gait algorithm description

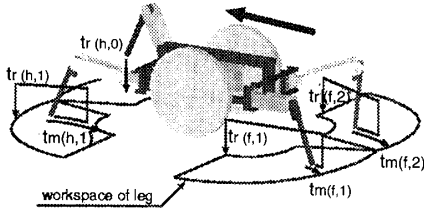


Fig. 5 An assignment of the timing parameters

このままの速度で運動を続けるものと仮定すると、脚  $(g_r, i)$  の可動限界点  $R_{(g_r, i)}$  までの可動限界到達時間  $t_{m(g_r, i)}$  は、次式に定義される。なお、瞬間脚先軌道は処理時間毎に更新されるため、オペレータの指示速度の変更（実際には後述する制限後の目標速度）に、各変数は即座に対応する。

$$t_{m(g_r, i)} = \frac{l_{\max(g_r, i)} - l_{(g_r, i)}}{l_{(g_r, i)}} \quad (2)$$

次に、脚  $(g_r, i)$  の遊脚動作の完了に要する時間を考える。  $l_{(g_r, i)}$  を媒介変数として脚先の平面座標を  $x_{(g_r, i)}(l_{(g_r, i)})$  と表し、遊脚動作の完了時点での目標接地座標を  $x_{d(g_r, i)}$  とする。目標接地座標は、接地後の機体移動速度が変化しないと仮定した場合に、支持相における脚先が脚可動領域の基準点（扇型半径方向と角度方向の midpoint）を通過するように、脚可動領域の境界線上に設定している。なお、目標接地座標についても処理時間毎に更新される。

前脚2脚または後脚2脚を同時に遊脚化することを禁止するため、脚  $(g_r, i)$  の遊脚動作が開始可能な状態になるのは脚  $(g_r, i-1)$  の遊脚動作が終わってから、ということになる。

脚  $(g_r, i-1)$  の遊脚動作完了時間を  $t_{r(g_r, i-1)}$  で表すことにすると、その間に脚  $(g_r, i)$  は  $x_{(g_r, i)}(l_{(g_r, i)})$  から  $x_{(g_r, i)}(l_{(g_r, i)} + l_{(g_r, i)} t_{r(g_r, i-1)})$  まで移動する。この位置が脚  $(g_r, i)$  の遊脚動作完了時間を考える上での脚上げ動作の開始位置である。遊脚動作の軌道が図6に示したように3つの相、つまり脚上げ高さまでの鉛直脚上げ動作（離昇相, lifting phase）、 $x_{d(g_r, i)}$  までの直線的

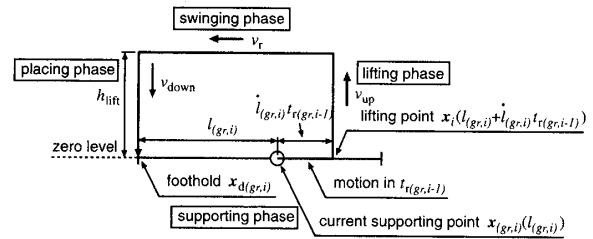


Fig. 6 Calculation of the returning time

な水平移行動作（移行相, swinging phase）、および地面に接するまでの鉛直脚下げ動作（接地相, placing phase）から構成される矩形軌道であるとする。脚  $(g_r, i)$  が  $x_{d(g_r, i)}$  にて遊脚動作を完了するまでに要する時間、すなわち脚  $(g_r, i)$  の遊脚動作完了時間は漸化式

$$t_{r(g_r, i)} = t_{r(g_r, i-1)} + T_{up} + \frac{|x_{d(g_r, i)} - x_{(g_r, i)}(l_{(g_r, i)} + l_{(g_r, i)} t_{r(g_r, i-1)})|}{v_r} + T_{down} \quad (3)$$

で表されることになる。ここで、 $T_{up}$ 、 $T_{down}$  はそれぞれ離昇、接地動作に要する時間であり、簡単のために脚の加減速は無視し、脚上げ高さ  $h_{lift}$ 、脚上げ速度  $v_{up}$ 、脚下げ速度  $v_{down}$  に対して、 $T_{up} = h_{lift}/v_{up}$ 、 $T_{down} = h_{lift}/v_{down}$  と定義している。 $v_r$  は遊脚の移行相における脚先水平移動速度であり、脚の有効可動範囲内においては一定値と仮定している。 $t_{r(g_r, i)}$  の計算に用いる  $t_{r(g_r, 0)}$  は、支持脚  $(g_r, 1)$  の遊脚動作が開始可能な状態になるまでの時間であり、遊脚がある場合にはその接地に必要な最短時間

$$t_{down(g_r, 0)} = \frac{h_{(g_r, 0)}}{v_{down}} \quad (4)$$

がこれに相当する。ここで脚番号0は遊脚を示し、 $h_{(g_r, 0)}$  は遊脚の脚先高さを表す。 $t_{r(g_r, 0)}$  の定義は、可動限界への過度な接近を防ぐためのマージン  $T_{cr}$  を  $t_{down(g_r, 0)}$  に付加し、次式で表される。

$$t_{r(g_r, 0)} = \begin{cases} T_{cr} & \text{(no returning leg in the same } g_r \text{ legs)} \\ t_{down(g_r, 0)} + T_{cr} & \text{(with a returning leg in the same } g_r \text{ legs)} \end{cases} \quad (5)$$

$g_r$  が同じ脚の同時遊脚動作を避けるためには、脚番号の大きい脚（時間的に可動限界到達が遅い脚）の可動限界到達というイベントの発生に先行して、脚番号の小さい脚の遊脚動作が完了してはならない。それを可能とする条件は、上述の可動限界到達時間  $t_{m(g_r, i)}$  と遊脚動作完了時間  $t_{r(g_r, i)}$  を用いて、 $g_r$  が同じ脚に関して

$$t_{m(g_r, i)} > t_{r(g_r, i-1)} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

と表される。ただし、同じ  $g_r$  脚の1脚が遊脚の場合には、 $i = 2$  は考えない。脚の遊脚動作はこの条件が

常に成立するように実施する必要があるため、支持脚の遊脚動作の開始は、次式が成立した時点とする。

$$t_{m(g_r,i)} \leq t_{r(g_r,i-1)} \quad (i=1,2) \quad (7)$$

なお、式(7)において、2脚とも支持脚で、かつ、 $i=1$ の場合は脚番号1の脚が可動限界に達した場面となる。

遊脚動作の対象となるのは、脚番号1の脚である。同じ $g_r$ 脚内で遊脚がない場合には遊脚動作は直ちに開始され、遊脚が存在する場合にはそれを接地させた上で、遊脚動作を行う。

以上のアルゴリズムは、それぞれの同時遊脚化禁止脚グループ、すなわち前脚2脚および後脚2脚それぞれについて適用される。

**2.3 速度制限** 2.2節のアルゴリズム単体では、指示速度が機体の実現しうる移動速度を上回る場合に、脚の遊脚動作が機体の推進動作に追い付かず、完全に復帰できないまま支持脚が可動限界に到達するため、歩幅が狭くなり、かつ、脚の踏み換え動作が頻繁になる。この状態が続くと最終的には歩幅が0となり、機体が停止してしまう。

歩幅が漸減することを防止し、上記問題点を解決するために、オペレータの指示速度に対して、遊脚が完全に復帰することを保証する速度制限を施す。

脚 $(g_r,0)$ の遊脚動作完了時間は式(5)により定義したが、ここでは、完全な遊脚動作完了時間 $t'_{r(g_r,0)}$ を見積もるために、以下のように書き改める。なお、脚 $(g_r,0)$ は遊脚であり、同じ $g_r$ 脚内に遊脚が存在しない場合の遊脚動作完了時間は、式(5)と同様にマージン $T_{cr}$ とした。

$$t'_{r(g_r,0)} = \begin{cases} T_{cr} & \text{(no returning leg in the same } g_r \text{ legs)} \\ t_{up(g_r,0)} + \frac{|x_{d(g_r,0)} - x_{(g_r,0)}|}{v_r} + T_{down} + T_{cr} & \text{(with a lifting or swinging leg} \\ & \text{in the same } g_r \text{ legs)} \\ t_{down(g_r,0)} + T_{cr} & \text{(with a placing leg in the same } g_r \text{ legs)} \end{cases} \quad (8)$$

$t_{up(g_r,0)}$ は遊脚の離昇動作実施中の、残りの所要時間を表し、2.2節の $t_{down(g_r,0)}$ と同様な考えで定義される。

同じ $g_r$ 脚内に遊脚がある場合には、遊脚の完全な遊脚動作完了を保証するために、支持脚の可動限界到達時間 $t_{m(g_r,1)}$ が、遊脚の遊脚動作完了時間 $t'_{r(g_r,0)}$ 以上であればよく、次式の条件となる。

$$t_{m(g_r,1)} \geq t'_{r(g_r,0)} \quad (9)$$

機体の制限速度は、それぞれの $g_r$ に関する上式を同時に満たすものとなる。

Table 1 Physical parameters of Chariot 3

link length of the legs	
1st, 2nd, 3rd link	0.08, 0.30, 0.38[m]
wheels	
diameter	0.6[m]
tread	0.58[m]
workspace of the legs	
internal, external radius	0.30, 0.60[m]
angle	-20 - 60[deg]
distance between bases of the legs	
front and back	0.92[m]
right and left	0.4[m]
actuator (DC servo motor)	
legs' 1st joint, wheels	40[W]
legs' 2nd,3rd joint	60[W]
total mass	
	65[kg]

よって、式(9)を文献<sup>(4)</sup>と同様にして、指示速度ベクトルの方向は変えずに大きさのみを変更した制限速度の近似解として求めると、遊脚がある場合の機体の制限後の目標速度は式(10)または(11)となる。なお、遊脚がない場合、またはオペレータの指示速度の絶対値が式(10)または(11)より小さい場合には、オペレータの指示速度を制限する必要はなく、そのまま機体の目標速度となる。

$$|v_{max}| = \min \left( \frac{l_{max(g_r,1)} - l_{(g_r,1)}}{t'_{r(g_r,0)}} \right) \quad (g_r = f, h) \quad (10)$$

(straight movement (with returning legs))

$$|\dot{\theta}_{max}| = \min \left( \frac{l_{max(g_r,1)} - l_{(g_r,1)}}{\rho_{(g_r,1)} \cdot t'_{r(g_r,0)}} \right) \quad (g_r = f, h) \quad (11)$$

(rotating movement (with returning legs))

### 3. シミュレーションによる検証

2章で提案した歩容アルゴリズムの特徴の把握および有効性の検証のため、シミュレーションを行った。シミュレーションは動力学シミュレータであるODE (Open Dynamics Engine) を用いて実施した。用いた脚車輪分離型ロボットの物理パラメータは表1である。

図6の各パラメータは $h_{lift} = 0.15[m]$ 、 $|v_{up}| = |v_r| = |v_{down}| = 0.5[m/s]$ と設定し、指示速度として機体の直進速度と回転角速度を与えた。

**3.1 クリープ歩容との速度の比較** 図7に、同一の指示速度を与えた場合の、文献<sup>(4)</sup>によるクリープ歩容と、提案した2脚復帰型自由歩容における、2.3節による制限後の機体目標速度を示した。また図8に

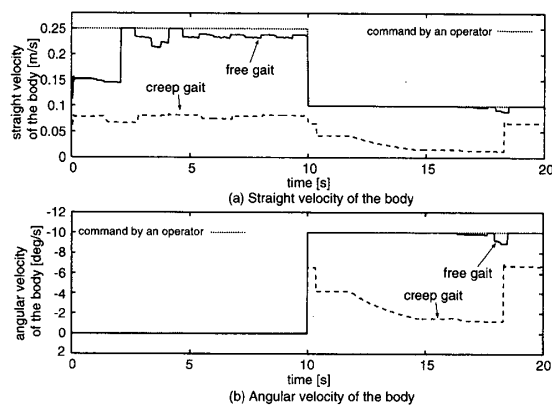


Fig. 7 Comparison between creep gait and free gait (velocity of the body)

は、そのときの各脚の無次元化脚位置を示した。ここで、支持相の無次元化脚位置とは、図4の記号を用いて  $l_{(g_r,i)}/l_{\max(g_r,i)}$  と表されたものである。すなわち無次元化脚位置 0 は、完全な遊脚動作完了点（支持脚開始点）を指し、1 は支持脚の可動限界到着点を指す。つまり、右上がり支持相で、右下がり移行相となる。なお、離昇相および接地相の無次元化脚位置は、支持相の始点と終点の位置とし、移行相の無次元化脚位置は離昇相と接地相を直線で結んだものを表示した。図8の10[s]で不連続になっているのは、このとき指示速度が変化し、瞬間脚先軌道が変化するためである。

指示速度として、0~10[s]において直進速度0.25[m/s]を与え、10~20[s]において直進速度0.10[m/s]、回転角速度-10.0[deg/s]（右方向に回転）を与えた。図7の上図が直進速度で、下図が回転角速度である。0~20[s]における直進速度のクリープ歩容に対する2脚復帰型自由歩容の速度比の時間平均は3.59であり、10~20[s]における回転角速度のクリープ歩容に対する2脚復帰型自由歩容の角速度比の時間平均は4.40であった。

この結果から、提案する歩容はクリープ歩容に比べて3倍以上の高速移動が実現できることが分かる。なお、脚配置により速度制限の状況も変化するため、上記値は指示速度により変化する。また、上記の値が3倍以上の値をとる理由の一つとして、文献<sup>(4)</sup>では全脚が支持していても支持脚同士で制限をしているのに対して、本論文の手法では同じ  $g_r$  脚の両方が支持脚の場合には、その  $g_r$  脚に関する速度制限はないことがあげられる。

**3.2 任意方向速度指示下での継続的推進動作の検証** 提案する歩容が任意方向への速度指示に即座に対応し、かつ、継続的推進動作が可能であることを、

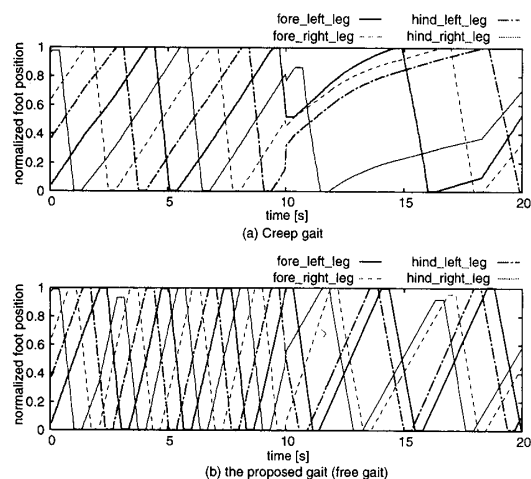


Fig. 8 Normalized foot position

シミュレーションにより検証する。

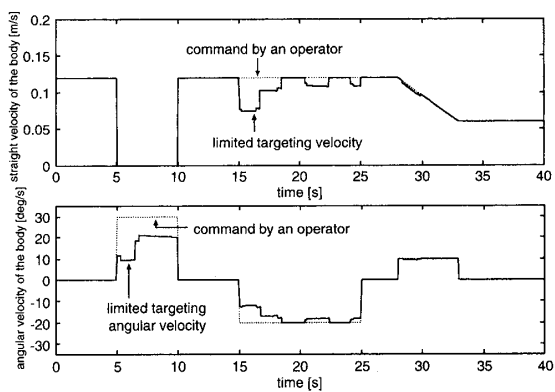
図9(a)は、点線の指示速度を与えたときの2.3節による制限後の目標直進速度および制限後の目標回転角速度を示したものである。(b)には制限後の目標速度に基づく機体の重心位置の軌跡、(c)には、各脚の無次元化脚位置を示す。

図9(a)(b)よりロボットは、 $t=0\sim5$ [s]で直進後、その場左回転 ( $t=5\sim10$ [s]) し、 $t=15\sim25$ [s] および  $t=28\sim33$ [s] でそれぞれ右と左にカーブしながら進む。 $t=28\sim33$ [s]では、直進目標速度を0.12→0.06[m/s]に漸減させた。

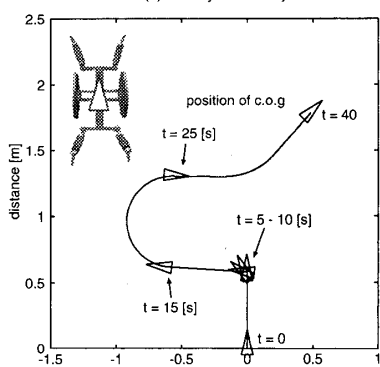
まず、図9(a)より任意の指示速度変化に対して、速度制限はかかるものの、機体が停止することなく継続的な推進動作を実現していることが分かる。

15[s]付近で直進速度の制限が大きくかかっている理由を説明すると、このとき直進から右方向への旋回へと指示速度が変化する。直進と旋回では脚軌道が異なるため、図9(c)の13~17[s]を拡大した図10に示すように、左前脚以外の各支持脚の無次元化脚位置が不連続に変化する。15[s]で変化した指示速度下では、左前脚 (= (f,1) 脚) と右前脚 (= (f,2) 脚) において  $t_{m(f,2)} \leq t_{r(f,1)}$  となるため、式(7)により、左前脚は可動限界に到達していないが、遊脚動作を開始する(図10のA点)。その結果、遊脚となる左前脚の完全な遊脚動作を保証するために速度制限が生じる。また、B点では、上記の速度制限下において、左後脚 (= (h,1) 脚) と右後脚 (= (h,2) 脚) において  $t_{m(h,2)} \leq t_{r(h,1)}$  となるため、左後脚は可動限界に到達していないが、遊脚化する。

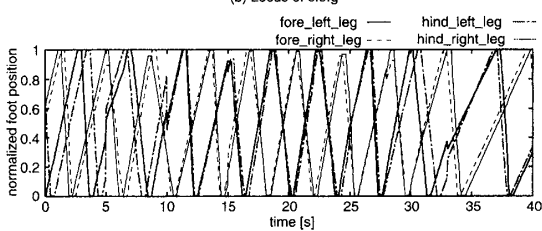
図11に、 $t=8.3\sim11.3$ [s]における左後脚の目標軌道を示す。図9(a)に示したように、 $t=10$ [s]で指示速



(a) Velocity of the body



(b) Locus of c.o.g



(c) Normalized foot position

Fig. 9 A result of simulation

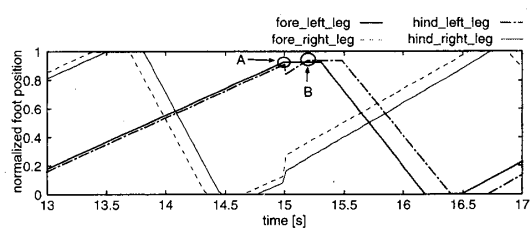


Fig. 10 Normalized foot position at 13~17[s]

度は、その場回転から直進に変化する。このとき左後脚は支持相であり、図 11 から  $t=10[s]$  で即座に、軌道が直進に変化していることが分かる。

4. 実験による検証

シミュレーションにより検証した自由歩容のアルゴリズムが実機を用いた場合にも有効に動作することを

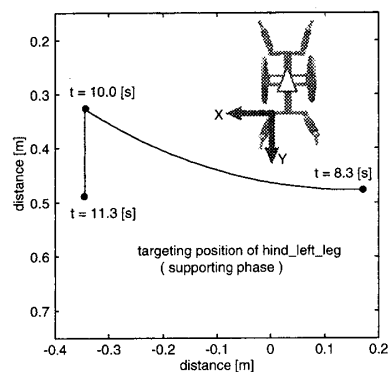
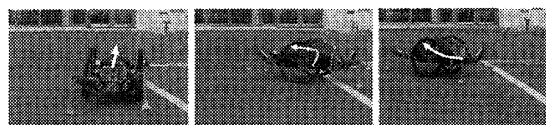
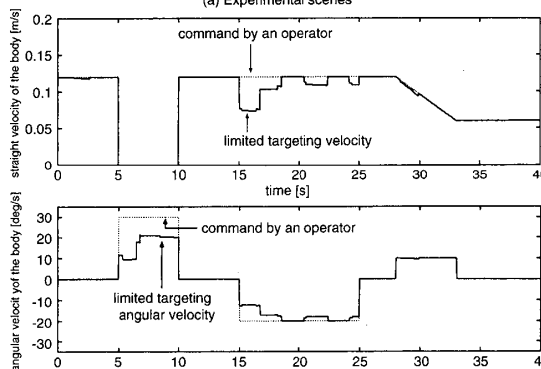


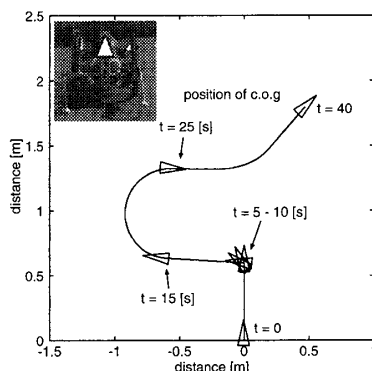
Fig. 11 A trajectory of hind-left leg at 8.3~11.3[s]



(a) Experimental scenes



(b) Velocity



(c) Locus of c.o.g

Fig. 12 An experimental result

確認するため、脚車輪分離型ロボット Chariot 3 を用いて実験を行った。

制御装置にはシングルボードコンピュータ (Intel Pentium III 1GHz) を用い、ART-Linux による実時間制御を行った。制御コンピュータと機体は FPGA ボードを介して接続されており、FPGA ボードは制御出力

であるトルク情報のPWMパルスへの変換と、各関節に設けられたロータリーエンコーダのパルスのカウントを行う。歩容アルゴリズムの処理周期は30[ms]とし、機体ハードウェアの制御周期は5[ms]とした。実験条件は、シミュレーションと同一である。

自由歩容の実験の様子を図12(a)に、実験結果を図12(b)(c)に示す。図12(b)には、2・3節による制限後の目標直進速度および制限後の目標回転角速度を、(c)には、制限後の目標速度に基づく機体の重心位置の軌跡を示している。

図9(a)と図12(b)を比較すると、実験データとシミュレーションデータはほぼ同じであり、シミュレーションの妥当性が確認できる。また、シミュレーション同様、急な回転方向を含む指示速度の変化に対して即座に反応し、かつ、継続的な推進動作を実現していることが分かる。さらに、図9(b)と図12(c)を比較しても、ほぼ同様の機体軌跡を描いていることが分かる。

以上から、実機を用いた場合でも、任意方向かつ任意タイミングの速度指示下において、継続的な推進動作が実現できることが確認できた。

## 5. おわりに

本論文では、予測型イベントドリブン方式による最大同時遊脚数2の自由歩容アルゴリズムを提案し、脚車輪分離型ロボットにおいて、任意方向の速度指示に対して継続的な推進動作が実現できることを、シミュレーションならびに実験により検証した。

提案する歩容は、最大同時遊脚数が1であるクリープ歩容と同じ最小静的安定余裕を保持したまま、最大同時遊脚数を2とし、高速化を実現した歩容である。そこでは、脚車輪分離型ロボットにおける同時遊脚化禁止脚の概念を示し、同時遊脚化禁止脚同士内でのみ、可動限界到達時間と遊脚動作完了時間を比較し、脚の離昇および接地タイミングを決定すればよいことを導いた。なお本論文の考え方は、同時遊脚化禁止脚のいずれか1脚が支持すれば静的安定性が保たれるロボットにおいて、適用可能である。

また今後の課題として、本論文のように脚の離昇・接地タイミングを可動限界への到達イベントのみで決定した場合には、式(10)(11)により、速度が低い方の同時遊脚化禁止脚グループの制限により機体速度が決まり、結果としてその影響が他のグループに波及し新たな速度制限を発生させる可能性があるため、速度を評価イベントの一つに加え、さらなる高速化を図る脚の離昇・接地アルゴリズムの提案が必要であると

考えている。

## 文 献

- (1) E.Nakano, T.Takahashi, Z.Wang, Y.Dai and S.Nakajima, *A Simplified Cooperational Motion Control Method of a Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment*, "Proceedings of The 4th World Multiconference on Systems Cybernetics and Informatics", vol. XI, (2000), pp. 234-239.
- (2) S.Nakajima, E.Nakano and T.Takahashi, *Motion Control Technique for Practical Use of a Leg-Wheel Robot on Unknown Outdoor Rough Terrains*, "Proceedings of The International Conference on Intelligent Robots and Systems", vol.1, (2004), pp.1353-1358.
- (3) 中嶋, 中野, 高橋, 脚車輪分離型ロボットの未知不整地における基本移動制御手法, "日本ロボット学会誌", vol.22, no.8, (2004), pp.1082-1092.
- (4) 熊谷, 高橋, 王, 中野, 予測型イベントドリブン歩容による脚車輪分離型ロボットの継続的推進動作, "日本ロボット学会誌", vol.19, no.6, (2001), pp.99-107.
- (5) 中嶋, 中野, 高橋, 脚車輪分離型ロボットの予測型イベントドリブン方式によるトロット, ペース歩容, "日本ロボット学会誌", vol.22, no.8, (2004), pp.1070-1081.
- (6) 塚越, 広瀬, 間歇クロール歩容の提案とその生成原理, "日本ロボット学会誌", vol.17, no.2, (1999), pp.145-152.
- (7) K.J.Waldron and R.B.McGhee, *The Adaptive Suspension Vehicle*, "IEEE Control System Magazine", (1986), pp.7-12.
- (8) 金山, 米田, 鈴木, McGhee, 高橋, 自律水中歩行ロボットの国際共同研究計画, "第4回ロボットシンポジウム予稿集", (1994), pp.245-250.
- (9) 米田, 飯山, 広瀬, 4足歩行機械の間欠トロット歩容, "日本ロボット学会誌", vol.14, no.6, (1996), pp.123-128.
- (10) 榊原, 服部, 細田, 菅, 藤江, 4脚歩行機構の開発(6)4脚歩行機構における重心移動軌道の生成, "第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集", (1989), pp.701-702.
- (11) D.J.Cho, J.H.Kim and D.G.Gweon, *Optimal turning gait of a quadruped walking robot*, "Robotica", vol.13, no.6, (1995), pp.559-564.
- (12) R.B.McGhee and G.I.Iswandhi, *Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain*, "IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics", vol.SMC-9, no.4, (1979), pp.176-182.
- (13) D.R.Pugh, E.A.Ribble, V.J.Vohnout, T.E.Bihari, T.M.Walliser, M.R.Patterson and K.J.Waldron, *Technical Description of the Adaptive Suspension Vehicle*, "The International Journal of Robotics Research", vol.9, no.2, (1990), pp.24-42.
- (14) P.Alexandre and A.Preumont: *On the gait control of a six-legged walking machine*, "The International Journal of Systems Science", vol.27, no.8, (1996), pp.713-721.
- (15) D.J.Pack and H.Kang, *Free Gait Control for a Quadruped Walking Robot*, "Laboratory Robotics and Automation", vol.11, issue 2, (1999), pp.71-81.
- (16) 安達, 小谷内, 新井, 本間, 篠原, 西村, 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, "日本ロボット学会誌", vol.16, no.3, (1998), pp.329-336.