

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

中 嶋 秀 朗* 中 野 栄 二* 高 橋 隆 行*

Trot and Pace Gaits based on the Predictive Event Driven Method for a Leg-wheel Robot

Shuro Nakajima*, Eiji Nakano* and Takayuki Takahashi*

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 gait algorithms for trot and pace gaits, and velocity limitation method, which allow continuous locomotion of a leg-wheel robot under random velocity commands. The gait algorithms which are based on the predictive event driven method determine the leg lifting timing to avoid the legs reaching the border of the work space. The velocity limitation method limits the velocity command when it exceeds the mechanical specifications of the robot. Combined the velocity limitation method with the gait algorithms, the proposed method ensures the continuity of locomotion on trot and pace gaits. It is evaluated by simulations and experiments.

Key Words: Leg-wheel Robot, Trot Gait, Pace Gait, Continuous Locomotion, Predictive Event Driven Method

1. 結 言

近年では屋外作業の機械化が進み、土木・建設分野では大小様々な作業機械が稼働し、省力化に役立っている。しかし、機械化の広がりには平野部やダムなどの大規模工事現場に限られ、山間部における小規模な工事現場、あるいは林業分野などではその作業の多くを人手に依存しているのが現状である。

山間部における機械化が進展しない主たる理由は、作業機械の移動能力の不足にあると考えられる。現用の土木機械の移動機構は、車輪機構、クローラ機構が中心である。車輪機構は低コストで整地における移動効率が高いが、一般にグリップ力・段差踏破能力は低い。クローラ機構は車輪機構に比べれば高い不整地適応性を有し、屋外作業機械としての豊富な実績があるものの、やはりその適用範囲は連続的に接地点を確保できるような地勢に限られている。一方、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り、段差の踏破性に優れ、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。このような脚機構の特長は、脚を有する動物が持つ運動能力から考えても明らかといえよう。

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未解決の問題も多い。その主なものとしては、次の事柄があげられる。

- (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、中野らが提案、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 [1]。脚車輪分離型ロボットは、Fig. 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舗装道路などの整備された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 [2]。舗装され



Fig. 1 A leg-wheel robot: Chariot III

原稿受付 2003 年 12 月 3 日

*東北大学大学院情報科学研究科

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

ていない路面や、段差のある路面など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 [4] ~ [6] 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。

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、脚機構の負担を軽減し、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いえば、適切な制御なしには機体を支持しえない脚機構のほかに、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 [3] ~ [6]。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いえよう。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クリープ歩容により、解決を図っている [18] [19]。

問題 (3) に関して、脚機構を適切に強調させ、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 [8] ~ [10] やトロット歩容 [11] 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された歩容パターンをオフライン演算によって計画する手法 [12] [13]。
- (3) 復帰および接地タイミングを決定するいく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 [14] ~ [18]。

予測型イベントドリブン方式によるクリープ歩容 [18] は (3) に分類されるが、本報告では、この歩容パターン作成ルールを発展させて実現するトロット、ペース歩容アルゴリズムについて論じる。

なお、米田らにより提案された間欠トロット歩容では、各脚を上げる直前でオペレータからの指示を受け付けるという制限付きではあるが、任意方向への移動を実現している [11]。本報告で提案する内容は、オペレータからの指示に即座に対応でき、かつ、デューティ比と歩幅を自動で調節することにより継続的な推進動作を保障する予測型イベントドリブン方式のトロット、ペース歩容である。

以下、本論文の構成である。まず 2 章では、予測型イベントドリブン方式における 2 脚復帰歩容の必要性を論じる。3 章では、すでに報告した予測型イベントドリブン方式によるクリープ歩容アルゴリズム [18] について簡単に解説する。4 章では、トロットおよびペース歩容アルゴリズムについて記述し、さらに、

提案する歩容の特徴を、単純なトロット歩容および間欠トロット歩容と比較する。そして 5 章では、提案する手法の有効性をシミュレーションと実験により検証する。

2. 2 脚復帰化の必要性

脚車輪分離型ロボットは左右に車輪を備えているため、静的安定となる支持脚数は、クリープ歩容における 3 のほか、トロット、ペース歩容における 2 の場合がある。文献 [18] で提案した歩容では、復帰脚を 1 脚以下 (支持脚 3 脚以上) に抑えたクリープ歩容を前提にしていた。この理由は、脚車輪分離型ロボットの移動対象路面は不整地であるため、できる限り安定余裕を確保するのが望ましいと考えたからである。ただ一方で、脚車輪分離型ロボットは機構的な安定性が高いため、復帰脚を 2 脚まで許容し 2 脚支持の状態としても、十分に移動可能な不整地が多いという事実もある。

Fig. 2 は、クリープ、トロット、ペース歩容のおおのにおいて、ある脚の復帰時間における静的安定余裕の推移を図示したものである。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、復帰脚が 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。つまり、静的安定余裕の 1 周期平均および支持多角形の面積の観点から比較すると、1 脚復帰 (3 脚支持) の場合の方が、2 脚復帰 (2 脚支持) の場合に比べて安定性が高いことは明白ではあるが、静的安定余裕の最小値の観点からは変わらない。さらに、不整地環境はランダムであり、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。

Fig. 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、各脚の復帰速度は一定である。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。

以上をまとめたものが Table 1 である。復帰脚数を 1 脚から 2 脚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 脚復帰化へと発展させることは、その有用性をさらに高めることとなる。

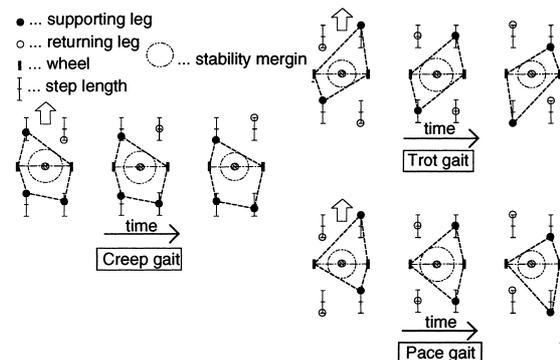


Fig. 2 Stability margin of each gait

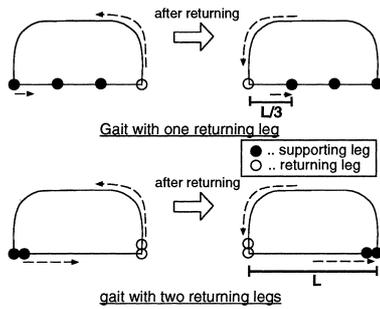


Fig. 3 Movement distance of supporting legs while other legs are returning

Table 1 Comparison between creep gait and trot, pace gait

	creep	trot, pace
minimum stability margin (ratio)	1	1
max speed (ratio)	1	3

3. 予測型イベントドリブン方式によるクリープ歩容 [18]

3.1 歩容アルゴリズム

予測型イベントドリブン歩容で回避対象としている推進障害イベントは、脚の可動限界への到達であり、可動限界到達時間と復帰動作完了時間という二つの指標を定義し、その比較により脚の動作を生成する。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復帰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。Fig. 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 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_i に沿ったものとなる。この軌道を扇形の領域 A_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 $l_{max i}$ が脚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_i から脚先接地点 P_i までの長さ l_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 ρ_i に対し、

$$\dot{l}_i = \begin{cases} |v| & \text{(straight movement)} \\ \rho_i |\dot{\theta}| & \text{(rotating movement)} \end{cases} \quad (1)$$

と表される。このままの速度で運動を続けるものと仮定すると、脚 i の可動限界点 R_i までの可動限界到達時間 t_{mi} は、次式に定義される。なお、瞬間脚先軌道は処理時間ごとに更新され、オペレータの指示速度の変更（実際には 3.2 節による制限後の指示速度）に即座に反応する。

$$t_{mi} = \frac{l_{max i} - l_i}{\dot{l}_i} \quad (2)$$

次に、脚 i の復帰動作の完了に要する時間を考える。 l_i を媒

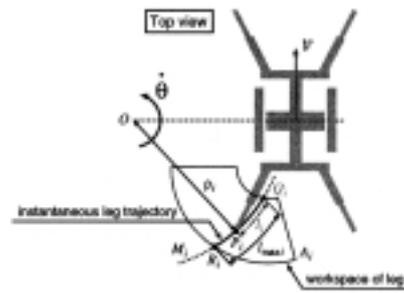


Fig. 4 Notations used in the gait algorithm description

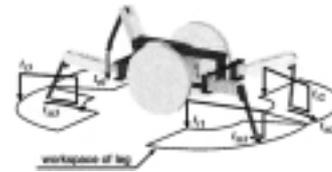


Fig. 5 An assignment of the timing parameters

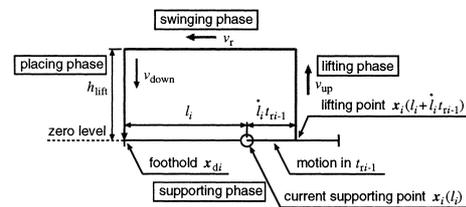


Fig. 6 Calculation of the returning time

介変数として脚先の平面座標を $x_i(l_i)$ と表し、復帰動作の完了時点での目標接地座標を x_{di} 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中点）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、目標接地座標は処理時間ごとに更新される。

クリープ歩容では復帰脚数が 1 以下に制限されるため、復帰動作は現在の脚先座標 $x_i(l_i)$ から直ちに開始できるとは限らない。脚番号を Fig. 5 のように可動限界到達時間の短い順に $1, 2, \dots$ と動的に割り振って考えると、脚 i の復帰動作が開始可能な状態になるのは脚 $i - 1$ までの復帰動作が終わってから、ということになる。

脚 $i - 1$ の復帰動作完了時間を t_{ri-1} で表すことにすると、その間に脚 i は $x_i(l_i)$ から $x_i(l_i + \dot{l}_i t_{ri-1})$ まで移動する。この位置が脚 i の復帰動作完了時間を考えるうえでの脚上げ動作の開始位置である。復帰動作の軌道が Fig. 6 に示したように三つの相—脚上げ高さまでの鉛直脚上げ動作（離昇相, lifting phase）、 x_{di} までの直線的な水平移行動作（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と、脚 i が x_{di} にて復帰動作を完了するまでに要する時間、すなわち脚 i の復帰動作完了時間は漸化式

$$t_{ri} = t_{ri-1} + T_{up} + \frac{|x_{di} - x_i(l_i + \dot{l}_i t_{ri-1})|}{v_r} + T_{down} \quad (3)$$

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 は復帰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_{r1} の計算に用いる t_{r0} は、支持脚 1 の復帰動作が開始可能な状態になるまでの時間であり、復帰脚がある場合にはその接地に必要な最短時間

$$t_{down0} = \frac{h_0}{v_{down}} \quad (4)$$

がこれに相当する．ここで脚番号 0 は復帰脚を示すものとし、 h_0 は復帰脚の脚先高さを表す． t_{r0} 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_{down0} に付加し、

$$t_{r0} = \begin{cases} T_{cr} & \text{(no returning leg)} \\ t_{down0} + T_{cr} & \text{(with a returning leg)} \end{cases} \quad (5)$$

と表される．

支持脚の可動限界到達を避けるためには、ある支持脚の可動限界到達というイベントの発生に先行して、時間的により可動限界近傍にある支持脚の復帰動作が完了していなくてはならない．それを可能とする条件は、上述の可動限界到達時間 t_{mi} と復帰動作完了時間 t_{ri} を用いて

$$t_{mi} > t_{ri-1} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

と表される．脚の復帰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．そこで、支持脚の復帰動作開始タイミングは、いずれかの脚について

$$t_{mi} \leq t_{ri-1} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

が成立した時点としている．復帰動作の対象となるのは、可動限界到達時間が最小の支持脚—脚 1 である．他に復帰脚がない場合には復帰動作は直ちに開始され、他に復帰脚が存在する場合にはそれを接地させたくて、復帰動作を行う．

3.2 速度制限手法

3.1 節で述べた歩容アルゴリズムでは、脚の可動限界到達を事前に回避することによって継続的な推進動作を実現している．しかし、歩容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、脚の復帰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に支持脚が可動限界に到達するようになり、推進動作は断続的なものとなる．そこで文献 [18] では、入力された指示速度を、以下に述べる最高速度決定アルゴリズムによって計算される最高速度との最小値をとる形の速度制限を施したうえで歩容アルゴリズムへ入力し、推進動作の継続性を保証している．

歩容アルゴリズムにおける速度超過は、目標接地座標の手前での接地—復帰動作の不完全な終了と、それに伴う相遷移頻度の上昇という形で現れる．そこで、復帰動作の不完全な終了を回避するように機体の移動速度を制限することで、推進動作の継続性を維持している．

脚 i の復帰動作完了時間は、式 (3)~(5) によって定義されていたが、ここでは、復帰脚についても完全な復帰動作の終了時間を見積もるために、 t_{ri} を t'_{ri} と書き改め、

$$t'_{ri} = t'_{ri-1} + T_{up} + \frac{|x_{di} - x_i(l_i + i_t'_{ri-1})|}{v_r} + T_{down} \quad (8)$$

$$t'_{r0} = \begin{cases} T_{cr} & \text{(no returning leg)} \\ t_{up0} + \frac{|x_{d0} - x_0|}{v_r} + T_{down} + T_{cr} & \text{(with a lifting or swinging leg)} \\ t_{down0} + T_{cr} & \text{(with a placing leg)} \end{cases} \quad (9)$$

とする． t_{up0} 、 t_{down0} は復帰脚の離昇、接地動作の実施中に、その残りの所要時間を表す． t_{down0} の定義は式 (4) で与えられるものであり、 t_{up0} の定義は、次式である．

$$t_{up0} = \frac{h_{lift} - h_0}{v_{up}} \quad (10)$$

復帰動作の完全な終了を保証するためには、脚 i の可動限界到達までの時間よりも脚 $i-1$ の復帰動作に要する時間が短くなるような移動速度に設定するため、文献 [18] では、次の条件を加えている．

$$t_{mi} \geq t'_{ri-1} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (11)$$

条件式 (11) と式 (1), (2), (8), (9) から成る連立不等式が脚 i に関する機体移動速度 v 、 $\dot{\theta}$ の条件であり、それらを満足する v 、 $\dot{\theta}$ が、機体の最高速度となる．この連立不等式は陽には解けないが、文献 [18] では近似による解

$$|v_{\max}| = \min \left(\frac{l_{\max i} - l_i}{t'_{ri-1}} \right) \quad \text{(straight movement)} \quad (12)$$

$$|\dot{\theta}_{\max}| = \min \left(\frac{l_{\max i} - l_i}{\rho_i t'_{ri-1}} \right) \quad \text{(rotating movement)} \quad (13)$$

を得ている．これがロボットの制限後の目標速度となる．

4. 予測型イベントドリブン方式によるトロット、ベース歩容

本章では、3 章で概説した予測型イベントドリブン方式によるクリーブ歩容アルゴリズムの考え方を拡張したトロット、ベース歩容アルゴリズムを提案し、その特徴をシミュレーションにより検証する．なお、3 章で概説した予測型イベントドリブン方式を前提とし、可動限界到達時間、復帰動作完了時間などの概念は同一とする．また、移動制御手法として、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未知不整地を移動可能な「脚車輪分離型ロボットの未知不整地基本移動制御手法」[6] を用いる．そのため歩容アルゴリズム部では、姿勢制御を含まない脚の動作について考慮すればよい．また、通常はイベントとして脚先軌道上の障害物が考えられるが、上記基本移動制御手法と文献 [19] による不整地余裕深さを加味した接地相軌道を付加することで、障

害物に対応した脚先コンプライアンスと脚先軌道が得られるため、以下の歩容アルゴリズム部分ではイベントとして障害物は考慮しなくともよい。

4.1 アルゴリズム

復帰脚を1脚に制限していた従来のクリーブ歩容から、トロット、ペース歩容に拡張するには、復帰脚を2脚とし、かつ、復帰脚同士または支持脚同士の動作を同期させる必要がある。クリーブ歩容に対して、トロット、ペース歩容に拡張するための付加ルールと変更点をまとめたものが Table 2 であり、以下各項目について詳説する。

4.1.1 同期脚のグループ化

トロットまたはペース歩容は、2脚を同時に復帰する歩容である。そこで、トロット、ペース歩容のおのおのについて、同期する2脚ずつのグループに分ける。トロット歩容については左前脚と右後脚のグループと、右前脚と左後脚のグループに分け、ペース歩容については左前脚と左後脚のグループと、右前脚と右後脚のグループに分ける (Fig. 7 参照)。

トロットとペースの歩容アルゴリズムとしての相違点は、このグループ脚の違いだけである。

4.1.2 同一グループ内の脚上げおよび脚下げタイミング

同一グループ内の脚については、同時に脚を上下させる。すなわち、同一グループ内の一方の脚に脚離昇リクエストが発行された場合、もう一方の脚も同時に離昇させる。移行相から接地相への相遷移も同様に、両脚同期させる。それを図示したものが Fig. 8 である。

白抜きのマルは位相タイミングが同期する相遷移個所を示し、黒マルは位相タイミングが他脚に依存しない (各脚独立) 個所を示す。

同一グループ内の脚の昇降動作を同期化することにより、2脚を復帰脚とするトロットまたはペース歩容となる。

4.1.3 復帰脚における移行速度の調整

復帰脚において脚軌道速度が全脚同じであり、かつ、同一グループ内で脚を同時に上げ下げした場合、同一グループ内の脚位相差が固定化する可能性がある。位相差の固定化を Fig. 9 で説明すると、ロボットの進行方向が変化するなどして、支持脚の片方の脚 (Leg A) が早く可動限界に到達して離昇リクエストが発行されると (Fig. 9 上段)、もう一方の脚 (Leg B) は可動限界まで余裕がある状態で離昇する。その分、Leg B の移行相における復帰距離が短くなる (Fig. 9 中段 $l_r(\text{leg B}) < l_r(\text{leg A})$)。移行相における移行速度 v_r が同じ場合、Leg B が移行相から

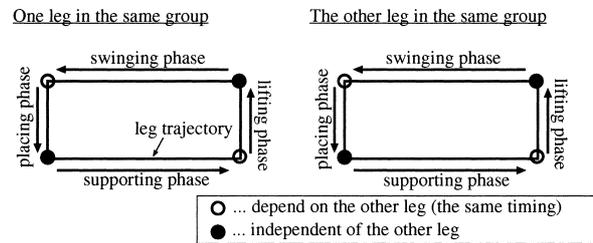


Fig. 8 Synchronizing point between two legs in a group

Table 2 Comparison between trot/pace gait and creep gait

	trot, pace	creep
1:Classification of synchronized legs into two groups	(trot) group A: Fore left+Hind right group B: Fore right+Hind left (pace) group A: Fore left+Hind left group B: Fore right+Hind right	no classification
2:Timing of leg up and down	the same timing in the same group	independent of other legs
3:Speed adjustment in swinging phase	speed adjustment in swinging phase	no adjustment
4:Timing of lifting request	$\min(t_{m(g,i)}) \leq \max(t_{r(g-1,i)})$ ($g = 1, 2 \quad i = 1, 2$)	$t_{mi} \leq t_{ri-1}$ ($i = 1, 2, 3, 4$)
5:Velocity limitation	$\min(t_{m(1,i)}) \geq \max(t'_{r(0,i)})$ ($i=1,2$)	$t_{mi} \geq t'_{ri-1}$ ($i = 1, 2, 3, 4$)

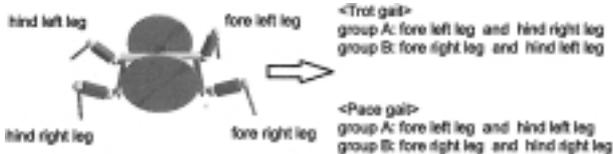


Fig. 7 Classification of synchronized legs into two groups

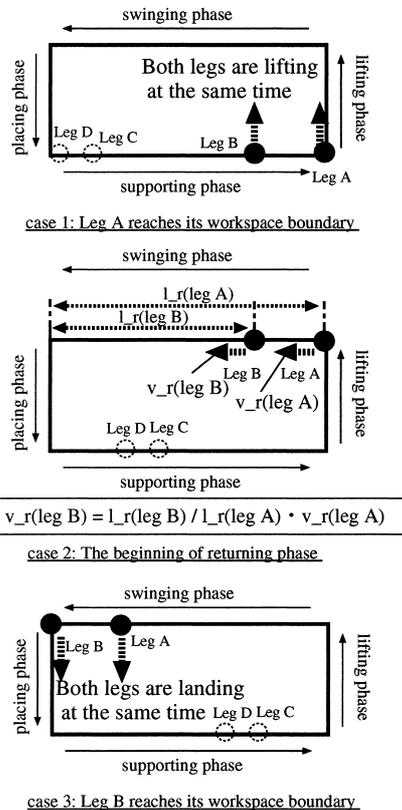


Fig. 9 Phase difference of two legs in a group is fixed in a certain situation

接地相に切り換わる時点では Leg A が復帰限界まで余裕がある (Fig. 9 下段). この状態で両脚が接地し, 支持相に遷移すると, 再度 Fig. 9 上段のような状態に戻り, 位相差が固定化する.

これを解消し, 復帰限界まで到達できるようにするために, 復帰脚移行速度の調整を行う.

ここで, 離昇相における離昇高さは離昇開始点から一定高さとしている. よって, 離昇速度が一定であり, 同時に離昇開始すれば, 離昇相から移行相へ切り換わるタイミングは同一となる.

離昇相から移行相への移相タイミングが同一になるため, 両脚とも同時に復帰限界に到達するためには, 移行相における移行速度を調整する. 調整方法は Fig. 9 中段に示すように, 離昇相から移行相に切り換わる時点での各脚の復帰距離 $l_{r(\text{legA})}$, $l_{r(\text{legB})}$ の比により各脚の移行速度 $v_{r(\text{legA})}$, $v_{r(\text{legB})}$ を調整する. ただし, 復帰速度はハードウェアの使用限界値に設定していることが多いため, 速度を低下させる方向で調整する. つまり Fig. 9 の場合は, $v_{r(\text{legB})} = l_{r(\text{legB})}/l_{r(\text{legA})} \cdot v_{r(\text{legA})}$ とする. ここで減速割合 $l_{r(\text{legB})}/l_{r(\text{legA})}$ を移行速度調整係数 C_{rt} と定義する.

$$C_{rt} = l_{r(\text{legB})}/l_{r(\text{legA})} \quad (14)$$

ここで, 調整後に指示速度が変化した場合, 両脚が同時に復帰限界まで到達できるとは限らないという問題点がある. ただし, 上記速度調整の算出を移行相中に頻繁に実施すると, 例えば 1 回目と 2 回目で調整対象脚が異なる場合には, 減速後の速度を基にさらに減速するため, 必要以上に移行速度が遅くなり, 結果として, 後述する機体速度の制限につながる. また, 実運用上では, 移行相中の短期間に頻繁に指示速度が変化する場面は想定しにくいいため, 上述した問題点は許容することとした.

4.1.4 離昇リクエストの発行時期

クリープ歩容 [18] では, 式 (7) の成立時点で, 可動限界到達時間が最小の支持脚に離昇リクエストを発行し, 他に復帰脚がない場合は直ちに離昇を開始させ, または, 他に復帰脚が存在する場合にはそれを接地させた上で離昇させている.

トロット, ベース歩容の離昇リクエスト発行時期について論じる前に, 式 (3) で表される復帰動作完了時間について, 定義し直す.

各脚を (g, i) のように g グループの i 脚と表すこととし, 同一グループ内で可動限界に時間的に近い順に 1, 2 と番号を付ける. グループ番号については, 4 脚とも支持脚の場合には, 可動限界に時間的に一番近い脚を含むグループを 1 とし, もう一方をグループ 2 とする. 片方のグループが復帰脚で, もう一方のグループが支持脚の場合には, 復帰脚グループを 0 とし, 支持脚グループを 1 とする.

このとき, 式 (3) と同様にして, 脚 (g, i) の復帰動作完了時間は漸化式

$$t_{r(g,i)} = \max(t_{r(g-1,j)}) + T_{up} + \frac{|x_{d(g,i)} - x_{(g,i)} (t_{(g,i)} + \dot{l}_{(g,i)} A)|}{v_r} + T_{down} \quad (j = 1, 2) \quad (15)$$

で表すことができる. $\max(t_{r(g-1,j)})$ を用いているのは, 移行

速度調整係数 C_{rt} により, 減速調整されるためである. また, $t_{r(1,i)}$ の計算に用いる $t_{r(0,i)}$ は, 支持脚グループの復帰動作が開始可能な状態になるまでの時間であり, T_{cr} を可動限界への過度な接近を防ぐためのマージンとして, 次式となる.

$$t_{r(0,i)} = \begin{cases} T_{cr} & (\text{no returning leg}) \\ t_{down(0,i)} + T_{cr} & (\text{with returning legs}) \end{cases} \quad (16)$$

以上の再定義をしたうえで, 離昇リクエストの発行時期について述べる. 基本的な考え方は, 脚グループ単位で可動限界到達時間 t_m と復帰動作完了時間 t_r を比較し, 可動限界に到達するまでに復帰動作が間に合わない場合に, 離昇リクエストを発行することである.

Fig. 10 上段に示すように 2 脚が復帰脚の場合は, 支持脚グループの最小可動限界到達時間が復帰脚グループの最大復帰動作完了時間以下になった時点で復帰脚グループの脚を接地させ, 支持脚グループの脚を離昇させる. また, 4 脚支持の場合には以下の二つの場合がある.

- グループ 1 の最小可動限界到達時間が $t_{r(0,i)} (= T_{cr})$ より小さくなったとき, すなわち支持脚が可動限界に到達した場合にグループ 1 を離昇させる (Fig. 10 中段).
- グループ 2 の最小可動限界到達時間が, グループ 1 の脚を

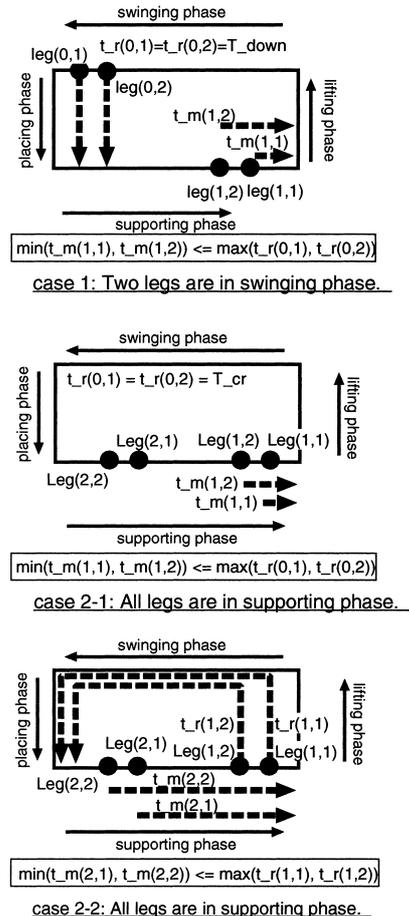


Fig. 10 Timing of issuing a request to lift legs of group 1

その場から復帰させた場合の最大復帰完了時間以下になった場合に、グループ 1 を離昇させる (Fig. 10 下段)。

以上を表す条件式は式 (17) となる。

$$\min(t_{m(g,i)}) \leq \max(t_{r(g-1,i)}) \quad (g = 1, 2 \quad i = 1, 2) \quad (17)$$

4.1.5 速度制限

3 章でも述べたように、歩容アルゴリズム単体では、指示速度が機体の実現し得る移動速度を上回る場合に、脚の復帰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し、推進動作は断続的なものとなる。そこで、指示速度に対して制限を施すことで推進動作の継続性を保証する。

文献 [18] では式 (11) のように支持脚同士に関しても速度制限の条件に入れていたため、例えば 4 脚すべてが支持脚で復帰脚がない場合でも速度制限がかかっていた。これに対して本報告では、できる限り高い移動速度の実現を目指し、復帰脚が完全に復帰することのみを保証する速度制限を以下のように設定する。

復帰中の脚 $(0, i)$ の復帰動作完了時間は式 (16) により定義したが、ここでは、復帰脚 $(0, i)$ の完全な復帰動作終了時間 $t'_{r(0,i)}$ を見積もるために、以下のように書き改める。

$$t'_{r(0,i)} = \begin{cases} T_{cr} & \text{(no returning leg)} \\ t_{up(0,i)} + \frac{|x_{d(0,i)} - x_{(0,i)}|}{v_r} + T_{down} + T_{cr} & \text{(with lifting or swinging legs)} \\ t_{down(0,i)} + T_{cr} & \text{(with placing legs)} \end{cases} \quad (18)$$

$t_{up(0,i)}$, $t_{down(0,i)}$ は復帰脚の離昇、接地動作実施中の、残りの所要時間を表し、3 章と同様に定義される。

復帰脚がある場合には、復帰脚 (グループ 0) の完全な復帰動作完了を保証するために、支持脚 (グループ 1) の最小可動限界到達時間 $\min(t_{m(1,i)})$ が、復帰脚の最大復帰動作完了時間 $\max(t'_{r(0,i)})$ より大きければよく、次式のように表される。

$$\min(t_{m(1,i)}) \geq \max(t'_{r(0,i)}) \quad (i = 1, 2) \quad (19)$$

式 (19) を文献 [18] と同様、近似解として求めると、復帰脚がある場合の機体の制限速度は式 (20), (21) となる。

$$|v_{max}| = \min \left(\frac{l_{max(1,i)} - l_{(1,i)}}{\max(t'_{r(0,i)})} \right) \quad (i = 1, 2) \quad \text{(straight movement (with returning legs))} \quad (20)$$

$$|\dot{\theta}_{max}| = \min \left(\frac{l_{max(1,i)} - l_{(1,i)}}{\rho_{(1,i)} \cdot \max(t'_{r(0,i)})} \right) \quad (i = 1, 2) \quad \text{(rotating movement (with returning legs))} \quad (21)$$

なお、復帰脚がない場合には、速度制限は発生しない。

Table 3 Physical parameters of the simulation model

link length of the legs	
1st link	0.08[m]
2nd link	0.30[m]
3rd link	0.38[m]
wheels	
diameter	0.6[m]
tread	0.58[m]
workspace of the legs	
internal radius	0.30[m]
external radius	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]

4.2 シミュレーションによる提案する歩容の特徴

4.1 節で提案した歩容アルゴリズムにより実現されるトロット、ベース歩容の特徴を把握するため、シミュレーションを行った。シミュレーションは ODE (Open Dynamics Engine) を用いて実施した。シミュレーションモデルのパラメータは脚車輪分離型ロボットの実験機 Chariot III に準じるものとし、Table 3 のように設定した。

Fig. 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。移動対象路面は平面としたため、文献 [19] の不整地パラメータ d は 0 とした。

4.2.1 歩容形態

Fig. 11 は、途中に一定の指示速度を含む、指示速度を漸増した場合のトロット歩容 (直進) の結果である。Fig. 11 (a) には、指示速度と制限後の機体目標速度を示し、Fig. 11 (b) には支持脚の推移、Fig. 11 (c) には各脚の無次元化脚位置の推移を示す。Fig. 11 (b) の縦の 1 点鎖線は、復帰脚グループの完了と支持脚グループの可動限界到達が同時に起こる場合を指し、斜線部分は 4 脚支持期間を示す。また、Fig. 11 (c) において、支持相の無次元化脚位置とは、Fig. 4 の記号を用いて l_i/l_{max_i} と表されたものである。すなわち無次元化脚位置 0 は、完全な復帰完了点 (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、復帰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。

Fig. 11 (b) より、低速度では間欠トロットとなり、速度が上がるにつれてデューティ比 β が下がり、D 点以降では $\beta = 0.5$ のトロット歩容になっていることが分かる。この理由は、提案する歩容において復帰脚は、移行速度調整によりグループ内の遅い方の復帰動作完了時間後には支持脚となる。そのため、機体指示速度が遅く、復帰動作完了時間より可動限界到達時間が長い場合は、4 脚とも支持脚 ($\beta > 0.5$) の時間帯が発生するからである。ただし、提案する歩容の 4 脚支持期間は、グループ 1 とグループ 2 の支持脚切り換え時に等分布するとは限らない。特に Fig. 11 (c) に示す E 点の歩幅調節後は (右前, 左後) 脚から (左前, 右後) 脚へ支持脚が切り換わるときのみ、4 脚支持

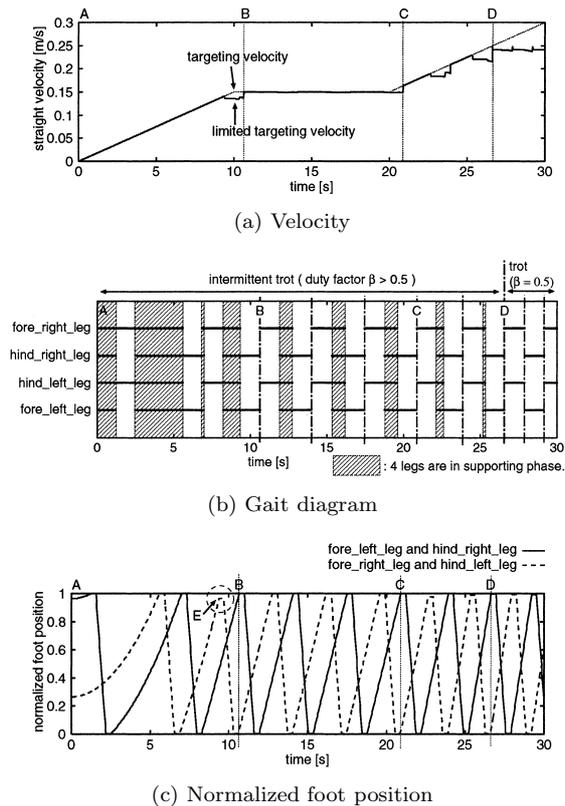


Fig. 11 A result of simulation when a straight speed is increasing

期間が発生しており、この理由は後述する。なお、脚車輪分離型ロボットは常時車輪が接地し静的安定余裕が確保されているため、等分布である必要はない。

機体指示速度が上がり、復帰動作完了時間と可動限界到達時間が等しくなると、 $\beta = 0.5$ のトロット歩容となる。その後は、指示速度が上がっても、4.1.5 項の完全な復帰動作を保证する速度制限により、制限後の目標速度は一定となる (Fig. 11 (a) D~ の制限後の目標速度が該当)。

4.2.2 歩幅

Fig. 11 (c) の E 点では、右前脚と左後脚は、可動限界に到達していないが復帰相に切り換わっている。このケースは、指示速度が上がり、グループ 2 の可動限界到達時間の最小値がグループ 1 の復帰動作完了時間の最大値よりも小さくなったためである (Fig. 10 下段)。言い換えれば、可動限界到達時間と復帰動作完了時間に応じて、歩幅を自動的に調節していることになる。なおこのとき、4.1.5 項の速度制限により、支持脚の可動限界到達と復帰動作終了が同一タイミングとなるため、4 脚支持期間は発生せず、Fig. 11 (c) の E 点以降は 4 脚支持期間が片分布する。

4.2.3 デューティ比 β

提案する歩容では、グループ内での同期化のための移行速度調整は行うものの、機体速度に応じた復帰脚の速度調整は行わない。そのため、機体速度が遅い場合には支持脚が可動限界に到達する前に復帰が完了し 4 脚支持となる。デューティ比 β は、機体速度を v 、歩幅を S 、歩幅 S の終端から始端への復帰時間を

T_r とすると、2 脚支持期間が T_r で、4 脚支持期間が $S/|v| - T_r$ であるから

$$\beta = \frac{T_r}{S/|v|} \cdot 0.5 + \frac{S/|v| - T_r}{S/|v|} \cdot 1.0 \quad (22)$$

と表される。直進の場合には S, T_r は一定であるから、 β は機体速度 v に応じて決まる。Fig. 11 (a) の B~C および D~ においては、速度 v が一定であり、このとき、各速度に応じた一定の β となる。Fig. 11 (b) より、B~C および D~ では、おのおの β は一定となっていることが分かる。

なお直進以外では、機体速度の時間変化に応じて各変数が決まり、その結果として β が決まる。

4.2.4 可動範囲の有効利用

提案する歩容では、4.1.5 項の速度制限により完全な復帰動作終了を保证しているため、復帰脚が完全に復帰することができる。これは、Fig. 11 (c) の無次元化脚位置が 0 まで到達していることから分かる。

また、機体速度が一定のとき (Fig. 11 (c) の B~C および D~) には、全脚が無次元化脚位置が 1 まで、すなわち、可動限界まで可動範囲を使用できる。この理由は、離昇脚の離昇リクエストの発行タイミングは Fig. 10 の三つの場合であるが、4.1.5 項の速度制限により完全な復帰動作終了を保证しているため、Fig. 10 上段のケースは発生せず、また、B または D 点において同時に可動限界到達と復帰完了し、その後の機体速度が一定のため、Fig. 10 下段のケースも発生せず、離昇リクエストの発行は中段の可動限界到達時のみとなるからである。

4.2.1~4.2.4 項をまとめると、提案する歩容は、速度に応じて、 $0.5 < \beta < 1$ の間欠トロットと $\beta = 0.5$ のトロットを自動遷移する歩容であり、かつ、継続的な推進動作を実現するための歩幅調節を除いて脚の可動範囲を最大限使用できる歩容であるといえる。なお、本報告ではトロット歩容を例にとり説明したが、ベース歩容についても同様に議論できる。

5. シミュレーションと実験による検証

本章では、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、継続的な推進動作が可能であることを、シミュレーションと実験により検証する。

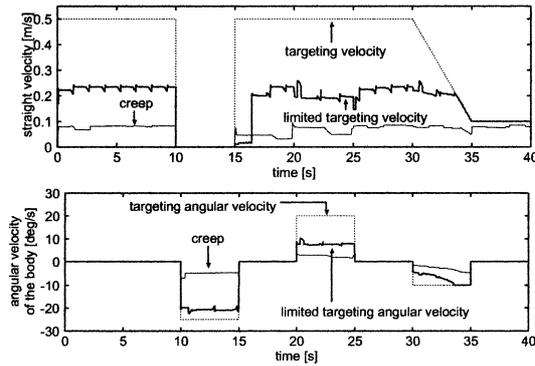
5.1 シミュレーション

5.1.1 トロット歩容

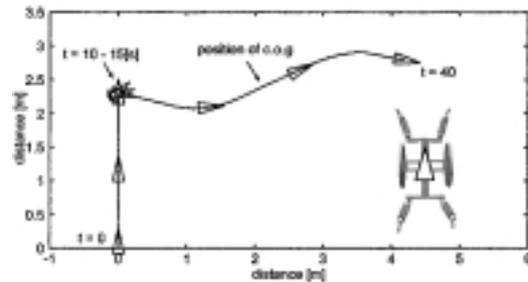
4.2 節と同一の条件により、トロット歩容のシミュレーションを行った結果を Fig. 12 に示す。Fig. 12 (a) には、制限後の目標直進速度および制限後の目標回転角速度を、Fig. 12 (b) には、制限後の目標速度に基づく機体の重心位置の軌跡、Fig. 12 (c) には、各脚の無次元化脚位置を示す。Fig. 12 (a) の細い実線は、同一指示速度を与えたときの、クリープ歩容の制限後の目標速度である。

Fig. 12 (a), (b) よりロボットは、 $t = 0 \sim 10$ [s] で直進後、その場回転 ($t = 10 \sim 15$ [s]) し、 $t = 20 \sim 25$ [s] および $t = 30 \sim 35$ [s] で左右にカーブしながら進む。その際、直進目標速度を $t = 30 \sim 35$ [s] で $0.5 \sim 0.1$ [m/s] に漸減させた。

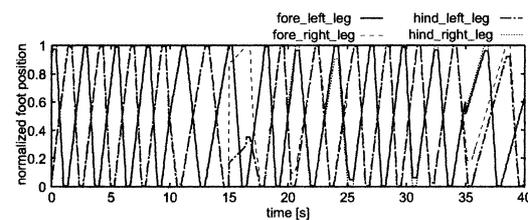
Fig. 12 (a) より任意の指示速度変化に対して、速度制限はか



(a) Velocity



(b) Locus of c.o.g.



(c) Normalized foot position

Fig. 12 A result of simulation (trot gait)

かるものの、機体が停止することなく継続的な推進動作が実現でき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、このときその場回転から直進方向に指示速度が急変する。回転と直進では脚軌道が異なるため、Fig. 12 (c) に示すように支持脚である右前脚と左後脚の無次元化脚位置が不連続に変化する。特に右前脚は、変化後の指示速度に対して無次元化脚位置が 0.9 程度と可動限界に近づく。このため、可動限界到達時間が短くなり、復帰動作の完全な終了を保証するために、大きく速度制限がかかる。

また、制限後の目標速度に関して、トロット歩容に対する自由歩容の時間平均の比をとると、直進速度については $K_s = 2.98$ 、回転角速度について $K_r = 3.43$ という結果が得られた。この値は速度制限が発生する、0~10, 15~33 [s] (直進速度)、10~15, 20~25, 30~33 [s] (回転角速度) について、次式により計算したものである。

$$K_s = \frac{\int_0^{10} v_{d \text{ trot}} dt + \int_{15}^{33} v_{d \text{ trot}} dt}{\int_0^{10} v_{d \text{ creep}} dt + \int_{15}^{33} v_{d \text{ creep}} dt} \quad (23)$$

$$K_r = \frac{5}{13} \left(\frac{\int_{10}^{15} \theta_{d \text{ trot}} dt}{\int_{10}^{15} \theta_{d \text{ creep}} dt} \right)$$

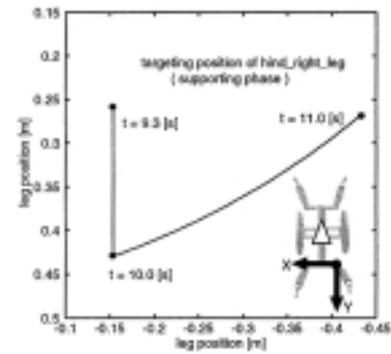


Fig. 13 A trajectory of hind-right leg at 9.3~11.0 [s]

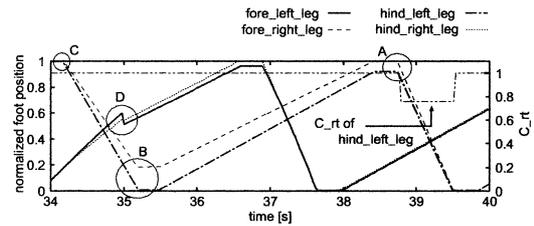


Fig. 14 Normalized foot position at 34~40 [s]

$$+ \frac{5}{13} \left(\frac{\int_{20}^{25} \theta_{d \text{ trot}} dt}{\int_{20}^{25} \theta_{d \text{ creep}} dt} \right) + \frac{3}{13} \left(\frac{\int_{30}^{33} \theta_{d \text{ trot}} dt}{\int_{30}^{33} \theta_{d \text{ creep}} dt} \right) \quad (24)$$

ここで、 v_d は制限後の機体の直進目標速度であり、 θ_d は制限後の機体の回転目標角速度である。 K_r は、区間ごとに目標速度が異なるため、区間ごとの比を区間の長さで重み付け配分した。

クリープ歩容に比べて 3 倍以上の速度が実現できる主な理由の一つとして、クリープ歩容では支持脚同士についても速度制限の考慮対象としていたのに対して、提案する歩容では、復帰脚の完全復帰のみ速度制限の考慮対象としていることがあげられる。

Fig. 13 に、右後脚 ($t=9.3 \sim 11.0$ [s]) の目標軌道を示す。Fig. 12 (a) に示したように、 $t=10$ [s] で指示速度は、直進からその場右回転に変化する。このとき右後脚は支持相であり、Fig. 13 から $t=10$ [s] で即座に、軌道がその場旋回に対応していることが分かる。

Fig. 14 は、Fig. 12 (c) の無次元化脚位置の $t=34 \sim 40$ [s] を拡大表示したものに、左後脚の移行速度調整係数 C_{rt} を付加表示したものである。 $t=35$ [s] で旋回動作から直進動作に変化し、Fig. 4 の瞬間脚先軌道 $l_{max i}$ が不連続的に変化するため、D 点での無次元化脚位置も不連続に変化している。

Fig. 12 (a) より、 $t=35$ [s] 以降は 0.1 [m/s] の直進である。Fig. 14 の A 点は、右前脚が可動限界に到達したため、同じグループの左後脚はまだ可動限界に到達していないが、同時に離昇した場面である。復帰完了点までの距離が異なるため、 C_{rt} により左後脚の復帰速度を減速調整し、同時に復帰完了していることが分かる。左後脚の復帰開始点の無次元化脚位置が 0.9 程度に対して、 C_{rt} が 0.8 程度と値が異なる理由は、 $t=35$ [s] の速度変化により、右前脚は不完全な復帰となり、その位置が

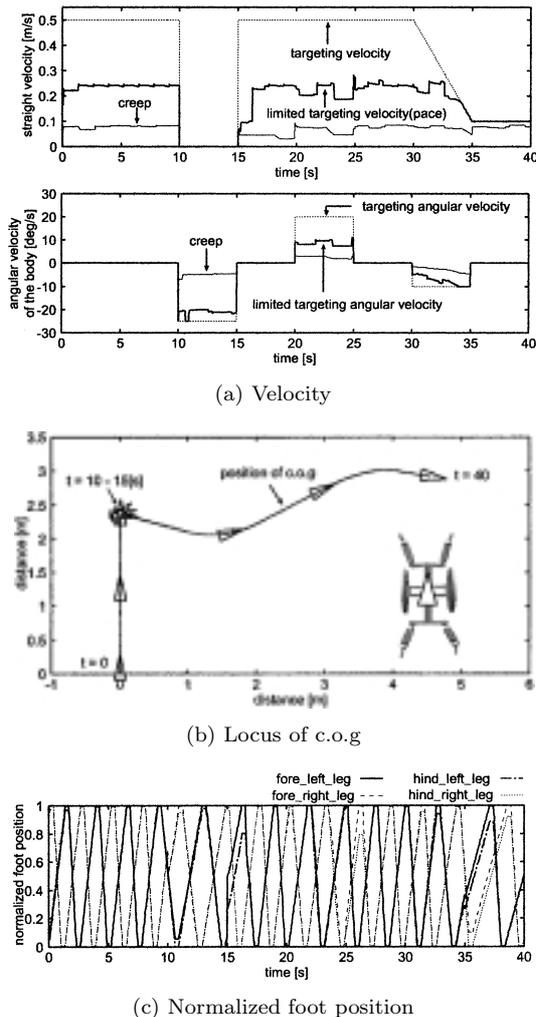


Fig. 15 A result of simulation (pace gait)

らの復帰距離との比較をするからである。なお、B点で右前脚が完全に復帰完了せずに支持脚となる理由は、4.1.3項で指摘した問題点であり、移行速度調整後に指示速度が変化するため、両脚が同時に可動限界に到達できなかったからである。

以上をまとめると、提案する歩容により、任意の方向を含む速度指示に対して、即座に反応し、かつ、継続的な推進動作ができる歩容を実現できた。なお、指示速度の変化に即座に反応できる点、および4.2節で記述した歩幅、デューティ比の自動調整と可動範囲の有効利用の点が、文献[11]で提案された間欠トロット歩容アルゴリズムとは異なる点である。

5.1.2 ペース歩容

ペース歩容のシミュレーションをトロット歩容と同じ条件で行った。結果をFig. 15に示す。

トロット歩容と同様、Fig. 15(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が実現できていることが分かる。また、制限後の目標速度に関してクリープ歩容と比較すると、直進速度については $K_s = 3.22$ 、回転角速度については $K_r = 3.60$ である。

基本的な特徴はトロット歩容と同様であるが、異なる点を以下

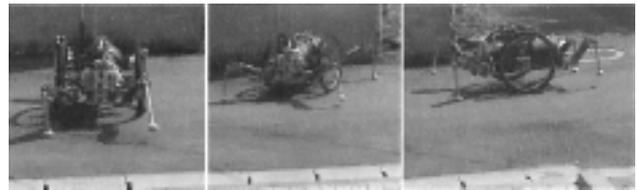


Fig. 16 Experimental scenes

Table 4 Mechanical specifications of Chariot III

actuator (DC servo motor)	
legs' 1st joint	40[W]×4
legs' 2nd,3rd joint	60[W]×8
wheels	40[W]×2
total weight	65[kg]

に述べる。旋回動作している $t = 10 \sim 15, 20 \sim 25, 30 \sim 35$ [s] の Fig. 12(a) と Fig. 15(a) を比較すると、ペースの方がトロットより制限後の目標速度に凹凸がある(比較しやすいのは、 $t = 20 \sim 25, 30 \sim 35$ の直進速度)。この理由は、トロットではグループの脚は旋回時の内外側各1脚ずつとなるため、グループ同士の条件は同じとなる。一方、ペースではグループ脚が、旋回時の内側同士、または、外側同士となるため、内側または外側で速度制限が変化するためである。ただし、トロットでは常に、内側脚または外側脚の速度制限の厳しい方が機体の目標速度となるのに対して、ペースでは、内側脚および外側脚のおのの速度制限が用いられるため、必要以上に制限がかからない。そのため、ペース歩容の方がトロット歩容に比較して、高速度での移動が可能である。実際、Fig. 12(a)、Fig. 15(a)に示す指示速度の場合、トロットに対するペースの速度比を計算すると、 $K_s = 1.08, K_r = 1.06$ となり、ペース歩容の方が高速で移動できている。

5.2 実験

シミュレーションにより検証した各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確認するため、脚車輪分離型ロボット Chariot III を用いて実験を行った (Fig. 16)。Chariot III の機体諸元は、Table 3、Table 4 に示す通りである。

制御装置にはシングルボードコンピュータ (Intel Pentium III 1GHz) を使い、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。各歩容の処理周期は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。

トロット歩容の実験結果をFig. 17に、ペース歩容の実験結果をFig. 18に示す。(a)には、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、(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を示している。

Fig. 12(a) と Fig. 17(a) 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

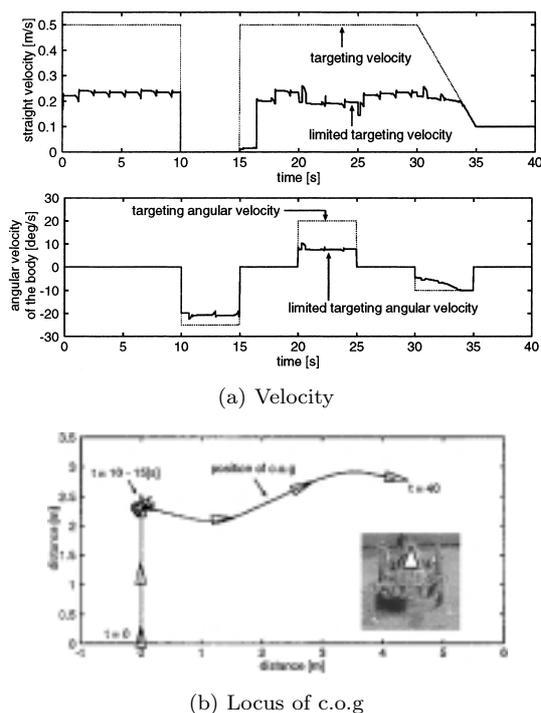


Fig. 17 A result of experiment (trot gait)

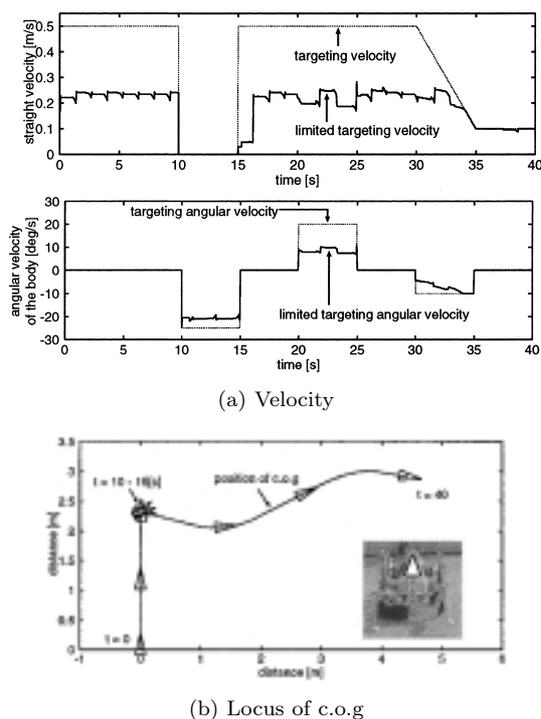


Fig. 18 A result of experiment (pace gait)

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、Fig. 12 (b) と Fig. 17 (b) を比較しても、ほぼ同様の重心軌跡を描いていることが分かる。

同様の議論は、Fig. 15 と Fig. 18 に対しても成立する。

以上から、実機を用いた場合でも、提案する歩容アルゴリズム

は有効に機能し、任意方向かつ任意タイミングの速度指示下において、継続的な推進動作を達成する歩容が実現できることが検証された。

6. 結 言

本論文では、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。また、従来の予測型イベントドリブン方式によるクリーブ歩容に比べ3倍程度以上の高速度で、移動できることも確認できた。

本論文で提案するトロット(ペース)歩容は、 $0.5 < \beta < 1$ の間欠トロット(ペース)と $\beta = 0.5$ のトロット(ペース)を速度に応じて自動遷移する歩容であり、かつ、継続的な推進動作を実現するために、歩幅を自動調節し、その上で、脚の可動範囲を最大限使用する歩容であるという特徴がある。

今後の課題として、間欠トロット(ペース)では、支持脚数は2脚または4脚となり、3脚は取ることができないため、 $\beta > 0.5$ のときに支持脚数として3脚も取れるより一般的な歩容アルゴリズムを提案する必要があると考えている。

参 考 文 献

- [1] 木村, 中野, 野中: “脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.4, pp.520-525, 1992.
- [2] 中野, 木村, 野中: “脚車輪分離型ロボットの開発および車輪走行時の胴体揺動抑制”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.58, no.551, pp.2138-2143, 1992.
- [3] 中野: 走行ロボットの走行制御装置, 特願平 7-289966, 1995.
- [4] Y. Dai, E. Nakano, T. Takahashi and H. Ookubo: “Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment,” Proc. of 7th Int. Conf. on Advanced Robotics, Spain, Sep. 1995, vol.2, pp.911-916.
- [5] 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, SCI '2000, vol.XI, pp.234-239, 2000.
- [6] 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 (IROS), Sep.28-Oct.2, 2004, Sendai, Japan. 掲載予定.
- [7] 塚越, 広瀬: “間欠クローラ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, pp.301-308, 1999.
- [8] D.E. Orin: “Supervisory Control of a Multilegged Robot,” The Int. J. of Robotics Research, vol.1, no.1, pp.79-91, 1982.
- [9] K.J. Waldron and R.B. McGhee: “The Adaptive Suspension Vehicle,” IEEE Control System Magazine, Dec. pp.7-12, 1986.
- [10] 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, pp.245-250, 1994.
- [11] 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, pp.881-886, 1996.
- [12] 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, pp.701-702, 1989.
- [13] D.J. Cho, J.H. Kim and D.G. Gweon: “Optimal turning gait of a quadruped walking robot,” Robotica, vol.13, no.6, pp.559-564, 1995.
- [14] 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, pp.176-182, 1979.

- [15] 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 Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.24-42, 1990.
- [16] P. Alexandre and A. Preumont: "On the gait control of a six-legged walking machine," Int. J. of Systems Science, vol.27, no.8, pp.713-721, 1996.

- [17] 安達, 小谷内, 新井, 本間, 篠原, 西村: "可動限界到達時の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, pp.329-336, 1998.
- [18] 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, pp.775-783, 2001.
- [19] 熊谷, 高橋, 庄司, 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不整地移動", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.3, pp.400-410, 2004.



中嶋秀朗 (Shuro Nakajima)

1973年4月5日生。1995年東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻修士課程に飛び級入学。1997年同修了。同年4月JR東日本に入社し、列車制御システムの開発などに従事。2003年4月東北大学大学院情報科学研究科応用情報科学専攻博士課程に入学、現在に至る。不整地移動ロボットの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



高橋隆行 (Takayuki Takahashi)

1961年11月1日生。1987年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了, 同年4月同大学工学部助手, 同大学情報科学研究科講師を経て, 2000年より助教授, 現在に至る。博士(工学)。非線形機械の制御, 移動ロボットなどの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



中野栄二 (Eiji Nakano)

1942年3月24日生。1970年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専門課程博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。1987年東北大学工学部教授。1993年東北大学大学院情報科学研究科教授。現在に至る。この間, 1976年から1977年米国スタンフォード大学人工知能研究所客員研究員。不整地移動ロボット, マルチロボット, メッセンジャロボット等の研究開発に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)