

深層強化学習により獲得される 二脚步容遷移にみられるヒステリシス現象

Hysteresis in the Bipedal Gait Transition Acquired by Deep Reinforcement Learning

○古関駿介*、沓澤京*、大脇大*、林部充宏*

○Shunsuke Koseki*, Kyo Kutsuzawa*, Dai Owaki*, Mitsuhiro Hayashibe*

*東北大学 工学研究科 ロボティクス専攻

*Department of Robotics, Graduate School of Engineering, Tohoku University

キーワード : 歩容遷移 (gait transition), 二脚步行/走行 (bipedal walking and running),
ヒステリシス (hysteresis), 深層強化学習 (deep reinforcement learning)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 工学研究科 林部・沓澤/大脇研究室
古関駿介、Tel.: (022)795-5682 E-mail: shunsuke.koseki.q4@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

私たちヒトは力学的に異なる運動モードである歩行と走行を状況適応的に切り替え移動を行っている。歩容を単一のモードに固定せず、複数使い分けることで、幅広い速度かつ高いエネルギー効率での移動が可能となる。例えば、歩行では一般的におよそ 3.0 m/s より早く移動することができないが、走行に歩容を変えることで歩行の上限速度を超えた移動が可能となる¹⁾。また、低速度領域では歩行、高速度領域では走行が、エネルギー効率的に最適な運動となることが知られており^{1, 2)}、速度に応じて適切な歩容を選択することで、高いエネルギー効率の運動を維持することができる。

上述した歩容を使い分けることにより得られる利点は、ヒトだけでなく二脚ロボットでも確認されている。例えば、ヒト型ロボット ASIMO が

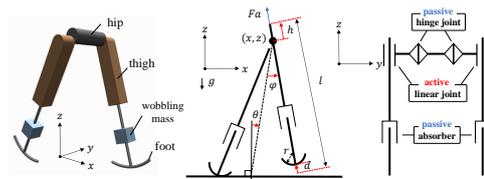
歩行する際の上限速度は約 1.3 m/s であるが、走行に歩容を遷移させることによって最大約 2.5 m/s までの速度で移動ができるようになる³⁾。また、コンパスモデルやヒューマノイドモデルにおいて、歩行と走行がそれぞれ低速度領域、高速度領域でエネルギー効率的に最適な運動となることがシミュレーション環境上で示されている^{2, 4)}。したがって、ヒトのような歩行と走行を使い分けを二脚ロボットに再現することは、幅広い速度かつ高いエネルギー効率で移動ができるロボットの実現につながる。

二脚ロボットの歩容遷移を取り扱った先行研究はいくつかある。Hodgins らは、支持脚後期中に地面を押し力を変えることで、コンパスモデルのような足の長さを自在に変えられるモデルにおいて、歩行、走行間の遷移を実現している⁵⁾。Nagasaka らは、ZMP を安定指標とした軌道生成を行い二脚ロボット QRIO において、歩行、

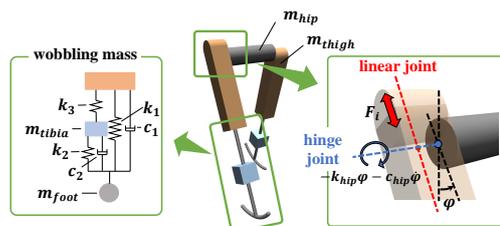
走行、ジャンプ間の遷移を行った⁶⁾。Kobayashiらは、ヒトの歩行モデルが倒立振り子、走行モデルがばね付き倒立振り子で表現されるように、歩行と走行では脚のコンプライアンスが異なることに注目し、脚の柔らかさを変えることで歩行と走行間の遷移を行った⁷⁾。また、詳しい制御方法は公開されていないが、HONDAのASIMOやBoston DynamicsのAtlasがヒトのようななめらかな歩容遷移を再現している。

しかしながら、これらの二脚ロボットの歩容遷移を取り扱った先行研究では、歩行と走行間の遷移の実現のみに重きが置かれており、歩容遷移時のダイナミクスは詳しく調べられていない。歩容遷移時のダイナミクスを詳しく調べることで、歩行と走行を使い分ける二脚ロボットの開発時にコントローラ設計の効率的化が期待できる。また、歩容遷移は非定常な現象であり、さらに遷移するタイミングや期間などを意識的に変えることが困難なため、ヒトの計測データからの解析が困難である。実際に、歩容遷移はなぜ起こるのか、何がトリガーとなっているのか、突発的に起こるのかそれとも徐々に起こるのか、など未解明な点は多い^{1, 8, 9)}。そのため、二脚ロボットを通して歩容遷移を調べることで、ヒトの移動運動メカニズム解明への貢献も期待できる。

そこで、本稿では遷移時の条件変えることで、二脚ロボットにおける歩容遷移時のダイナミクスを調べることを目的とする。この目的のため、我々の先行研究で実現したシミュレーション環境上で歩容遷移を行える二脚モデルを用いて、歩容遷移を開始するタイミングと、歩容を遷移させるための速度パラメータの変化率を変え、歩容遷移時の運動を計測し比較した。その結果、少ない歩数で歩容を変える場合、遷移を行うタイミングが転倒率に大きな影響を与えること、歩容遷移にかける歩数によらず遷移時の運動にはヒステリシスが見られることを確認した。



(a) 左：シミュレーション環境上のモデル
中：横から見たときの機構図 右：前から見たときの機構図



(b) 左：Wobbling 機構 右：直動アクチュエータとばね付き受動股関節

Fig. 1 使用した二脚モデル

2. 二脚モデルの歩容遷移

本節では、シミュレーション環境上の二脚モデルにおいて歩容遷移を実現した我々の先行研究について簡単に紹介する。要約すると、受動歩行モデルを基に作成した股関節が受動的な二脚モデルに、深層強化学習を用いて歩容の生成を行った。その結果、単一のコントローラによって、速度を規定するパラメータを変化させることで歩行と走行、およびその遷移を再現することに成功した。

2.1 使用した二脚モデル

使用した二脚モデルを Fig. 1 に、身体パラメータを Table 1 に示す。基本的な構造は、我々の先行研究の受動歩行モデル¹⁰⁾を参考した。運動は Fig. 1(a)の xz 面（矢状面）に拘束されている。本モデルの特徴は、股の回転関節が完全に受動的であり、身体の受動ダイナミクスを活用して移動運動を行う点である。脚を前後に振るためにアクチュエータではなく、重力による

Table 1 二脚モデルの身体パラメータ

	Unit	Value
l	[m]	0.8
r	[m]	0.27
m_{hip}	[kg]	20
m_{thigh}	[kg]	6
m_{foot}	[kg]	1

位置エネルギーとばねによる弾性エネルギーを使用する。各脚には最大出力が $F = 800\text{ N}$ のリニアアクチュエータが取り付けられており、脚方向 (Fig. 1 (b) 右の赤点線方向) に沿って大腿部を上下させる。股関節 (Fig. 1(b) の青点線方向) は、巻きバネ ($k_{hip} = 25\text{ Nm/rad}$) とダンパー ($c_{hip} = 2\text{ Nms/rad}$) を持つ受動的な回転関節である。下腿部には3つの線形ばね ($k_1 = 6000\text{ N/m}$, $k_2 = 6000\text{ N/m}$, $k_3 = 10000\text{ N/m}$)、2つのダンパー ($c_1 = 300\text{ Ns/m}$, $c_2 = 650\text{ Ns/m}$)、質量 ($m_{tibia} = 3\text{ kg}$) からなる wobbling 機構を持つ (Fig. 1(b))¹¹⁾。この機構により、着地時の足裏と地面との衝撃を低減する効果が得られる。足底は、20個の小さな球から構成される曲率半径 r の円弧形状である。

2.2 深層強化学習

歩容生成には、深層強化学習を使用した。簡単にまとめると、深層強化学習とは試行錯誤を繰り返し、現在の状態に対する最適な行動のとり方を獲得する手法である。以下の目的関数 $J(\pi)$ を最大化する方策を求める。

$$J(\pi) = \sum_{t=0}^T \mathbb{E}[\gamma^t (r(s_t, a_t))], \quad (1)$$

ここで、 γ は割引率、 r は後述する報酬関数、 s_t と a_t はそれぞれ状態と行動を表す。

2.3 報酬関数

式 (2) を報酬関数 r として用いた。ハイパーパラメータの値は Table 2 の通りである。

Table 2 報酬関数のパラメータ

Reward function					
ω_E	ω_l	ω_s	C_1	C_2	C_3
0.2	0.2	0.15	1.0	1.0	0.5

$$r(s_t, a_t) = -\omega_E |E_t - E_{t-1}| + \omega_v \dot{x} + f_{forward} + f_{alive} + f_{support}, \quad (2)$$

$$f_{forward} = \begin{cases} 0 & (\dot{x} \geq 0) \\ -C_1 & (\dot{x} < 0) \end{cases}, \quad (3)$$

$$f_{alive} = C_2, \quad (4)$$

ここで、 ω は重み係数、 E_t は t ステップ時のモデルの総エネルギー (運動、位置、弾性エネルギーの和)、 \dot{x} は hip セグメントの水平方向速度である。第一項により、エネルギー変化が大きい運動であるほど負の報酬が与えられる。第二項により、モデルの速度が大きいほど正の報酬が与えられる。第三項 $f_{forward}$ はモデルを常に前進させるための項である。モデルが後退、つまり $\dot{x} < 0$ のとき負の報酬が与えられる。第四項 f_{alive} はモデルの転倒を防ぐための項である。学習中、モデルが 80 度以上傾くとモデルは転倒しているとみなし、上限ステップに達していても、エピソードを終了した。モデルが倒れなければこの項により正の報酬が常に与えられるため、累積報酬は大きくなる。第五項 $f_{support}$ は学習を効率的に行うための補助的な項である。本稿ではスペースの都合上詳細は割愛する。

2.4 学習方法

学習の特徴は、報酬関数 r 中の速度項の重みである $\omega_v \in [0.0, 3.0]$ の値が 1000step ごとにランダムで変化する点である。式 (2) において、 ω_v が大きいほど、速度に対して大きな報酬値がもらえるため、高速度の移動運動を学習する傾向が高まる。 ω_v の値に対する適切な出力を学習す

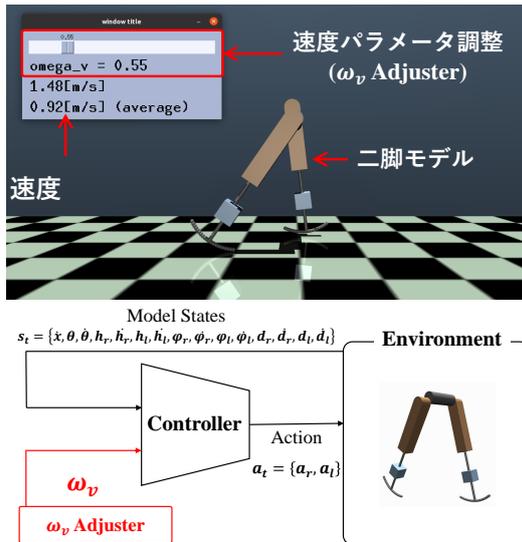


Fig. 2 上：シミュレーション環境上の二脚モデルの制御の様子、下：コントローラの概略図

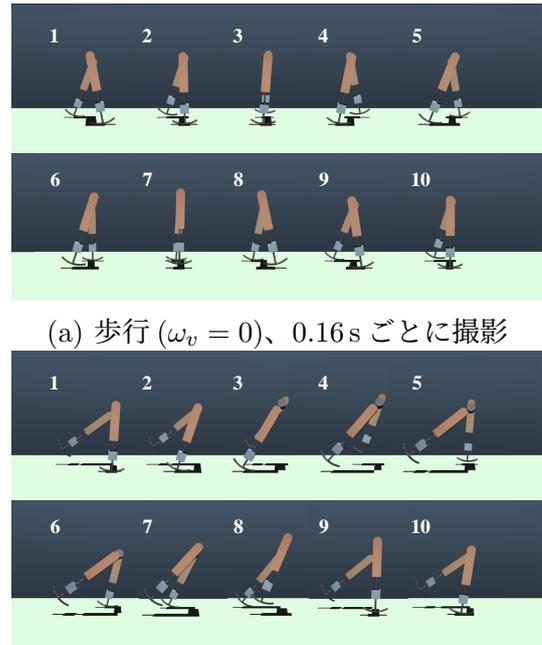
ることで、歩行と走行の学習を行った。Fig. 2 にシミュレーション環境上の二脚モデルの制御の様子とコントローラの概略図を示す。

2.5 実現した歩容遷移

得られたコントローラは、入力される速度を規定するコマンド ω_v に従って、出力（歩行と走行）を変えた。ここで、歩行は両脚支持期、走行は両脚遊脚期を周期的に持つ歩容と定義した。Fig. 3 に生成した歩行と走行のスナップショットを示す。また、入力する ω_v を 0.0 から 3.0 へと線形的に増加させることで歩行から走行、3.0 から 0.0 へと線形的に減少させることで走行から歩行の遷移が見られた。以下のリンクから生成した歩容遷移の動画を見ることが可能である (https://drive.google.com/file/d/1SVP7iEqVkdVb5YDB_OPE5ZZ-2RgNArN4/view?usp=sharing)。

3. 実験方法

本節では、2 節で紹介した歩容遷移ができる二脚モデルを用いた歩容遷移の実験方法について説明する。速度パラメータ ω_v を変え始めるタ



(a) 歩行 ($\omega_v = 0$)、0.16 s ごとに撮影

(b) 走行 ($\omega_v = 3.0$)、0.08 s ごとに撮影

Fig. 3 生成した歩容のスナップショット

イミングと増減の変化率を複数設定し、運動にどのような違いが出るかを比較した。

3.1 速度パラメータ変化率の設定

先行研究と同様に、歩行から走行への遷移は入力する ω_v を 0.0 から 3.0 へと線形的に増加させることで、走行から歩行への遷移は 3.0 から 0.0 と線形的に減少させることで再現する。 ω_v を、後述する各タイミングに対して、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1, 0.3, 0.6, 1.0, 2.0$ 秒の 5 通りで変化させ、速度パラメータ変化率に対する運動の違いを調べた。

3.2 歩容遷移開始タイミングの設定

3.2.1 歩行から走行

歩行から走行へと遷移を開始するために ω_v を変え始めるタイミングを、DS（両脚支持期）、SS1（片脚支持期前期）、SS2（片脚支持期中期）、SS3（片脚支持期後期）の 4 つ設定した。ここで、両脚支持期は両脚が地面に接地している期間 (Fig. 3 (a) の 1, 5, 9 に該当)、片脚支持期前期は支持脚が遊脚の前方にある期間 (Fig. 3

(a) の 2, 6, 10 に該当)、片脚支持期中期はおよそ支持脚と遊脚が重なりあう期間 (Fig. 3 (a) の 3, 7 に該当)、片脚支持期後期は支持脚が遊脚の後方にある期間 (Fig. 3 (a) の 4, 8 に該当) を指す。

3.2.2 走行から歩行

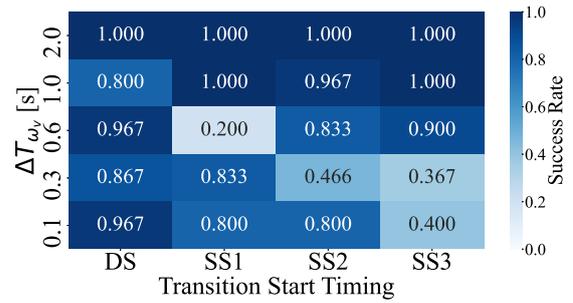
走行では、遷移を開始するタイミングを、SS1 (片脚支持期前期)、SS2 (片脚支持期中期)、SS3 (片脚支持期後期)、DA1 (両脚遊脚期前期)、DA2 (両脚遊脚期中期) の 5 つ設けた。生成した走行の片脚支持期の平均時間は 0.24 秒、両脚遊脚期の平均時間は 0.13 秒であった。これを踏まえて、片支持期前期は片脚が地面に接地した直後の期間 (Fig. 3 (b) の 1, 6, 10 に該当)、片脚支持期中期は脚が地面に接地してからおよそ 0.1 秒後の期間 (Fig. 3 (b) の 2, 7 に該当)、片脚支持期後期は脚が地面に接地してからおよそ 0.2 秒後の期間 (Fig. 3 (b) の 3 に該当)、両脚遊脚期前期は両方の脚が地面から離れた直後の期間 (Fig. 3 (b) の 4, 8 に該当)、両脚遊脚期中期は両脚遊脚期開始からおよそ 0.065 秒後の期間 (Fig. 3 (b) の 5, 9 に該当) とした。

4. 実験結果

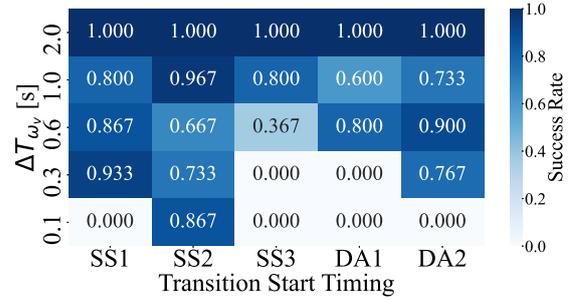
4.1 転倒した割合

Fig. 4 に ω_v を変え始めたタイミングと、変化にかけた時間 ΔT_{ω_v} による、転倒せずに遷移できた割合を示す。各条件でモデルの初期状態を変え 30 回試行を行った。歩行から走行への遷移時は ω_v を変化させ始めた地点から 15m、走行から歩行への遷移時は 5m 移動したとき、歩容遷移に成功したとみなした。

Fig. 4(a) より、歩行から走行の遷移では、 ΔT_{ω_v} が小さいとき転びやすい ω_v を変え始めるタイミングがあることがわかる。具体的には、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ のときは SS3、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.3$ のと



(a) 歩行から走行



(b) 走行から歩行

Fig. 4 歩容遷移成功率 (n=30)

きは SS2 と SS3、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.6$ のときは SS1、のタイミングで ω_v を変え始めると半数以上が転倒した。一方で、 $\Delta T_{\omega_v} \geq 1.0$ では、遷移成功率がどのタイミングでも 80% を超えた。特に $\Delta T_{\omega_v} = 2.0$ では、どのタイミングで ω_v を変え始めても、ほぼ 100% の確率で転ばずに歩行から走行へ遷移した。以上より、歩行から走行への遷移では ΔT_{ω_v} が小さい、つまり速度パラメータ ω_v の変化率が大きいと、 ω_v を変え始めるタイミングが、遷移成功率に与える影響が大きくなることがわかる。

Fig. 4(b) より、走行から歩行の遷移でも、 ΔT_{ω_v} が小さいとき、 ω_v を変え始めるタイミングによって遷移成功率が大きく異なることがわかる。例えば、 $\Delta\omega_v = 0.1$ のときは SS2 で ω_v を変え始めると 80% を超える高い遷移成功率を示したが、他のタイミングでは一度も遷移に成功しなかった。また、SS2 で ω_v を変え始めると遷移成功率が高いわけではなく、 $\Delta\omega_v = 0.3$ では SS1、 $\Delta\omega_v = 0.6$ では DA1 が最も成功率の高いタイミングであった。歩行と同様に速度パラメータを変え始めるタイミングが遷移成功率を

決めるわけではないことがわかる。 $\Delta\omega_v \geq 1.0$ では、どのタイミングで ω_v を変化させ始めても成功率が50%を超えた。特に、 $\Delta\omega_v = 2.0$ では観測下で、どのタイミングでも遷移に必ず成功した。このことから、走行から歩行の遷移でも、 ΔT_{ω_v} が小さいと、 ω_v を変え始めるタイミングが遷移成功率に与える影響が大きいことがわかる。

4.2 ΔT_{ω_v} と遷移までに必要とする歩数

本節では、 ΔT_{ω_v} の値と遷移までに必要とする歩数の関係を明らかにする。Fig. 5とFig. 6に歩行から走行、走行から歩行への遷移に成功したときの脚の接地状態をそれぞれ示す。Fig. 5の上図は $\Delta T_{\omega_v} = 0.3$ 、下図は $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$ 、Fig. 6の上図は $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ 、下図は $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$ 、で遷移させた。横軸は時間であり、水色の領域は左脚、赤色の領域は右脚、紫色の領域は両方の脚が地面に接地している期間であることを示す。各図中の2本の黒色の線は、左の線が ω_v を変え始めた時間、右の線は変え終えた時間である。

本稿では、 ω_v を変え始めたときに接地している脚を一步目とし（ただし、変え始めたタイミングが両脚支持期のときは後に接地した脚の方を一步目、両脚遊脚期のときは直後に接地した脚を一步目とする）、歩行から走行への遷移は片脚支持期後に両脚遊脚期が、走行から歩行への遷移は片脚支持期後に両脚支持期が発現したとき完了したとみなす。例えば、Fig. 5の上から二番目、左から二番目の図では（SS1 $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$ ）、およそ4.5秒の黒線で示すタイミングで ω_v を変え始めてから、二歩後に両脚遊脚期が発現しているため、二歩で遷移したとみなす。

初めに、歩行から走行の遷移での結果をまとめる。Fig. 5より、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ のとき、 ω_v を変え始めてから、およそ1-2歩で走行へと遷移した。なお、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ のとき、DSで ω_v を変え始めると、他のタイミングとは異なる運動パターンで遷移をした。二脚モデルは接地させ

た脚を一度地面から離し、脚の地面への入射角を調整し再接地していた。 $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$ のときは、およそ2-3歩で遷移した。以上から、歩行から走行への遷移では ΔT_{ω_v} が小さいと、遷移までに必要な歩数が少ない傾向があることがわかる。

次に、走行から歩行の遷移での結果をまとめる。Fig. 6より、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.3$ のとき、 ω_v を変え始めてから、およそ3-5歩で歩行へと遷移した。 $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$ のときは、およそ6-8歩で遷移した。走行から歩行への遷移でも ΔT_{ω_v} が小さいと、遷移に必要な歩数が少ない傾向があることがわかる。

4.3 遷移時のリミットサイクル

Fig. 7(a)に $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ 、(b)に $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$ で歩行から走行へ遷移させたときの軌道を示す。横軸は二脚モデルの地面に対する傾き θ 、縦軸は右脚の角度 φ_r (Fig. 1(a)に記載)である。青の閉じた軌道は定常的な歩行($\omega_v = 0$)、赤褐色の閉じた軌道は走行($\omega_v = 3.0$)のリミットサイクルである。赤褐色の線はDS、オレンジの線はSS1、緑の線はSS2、紫の線はSS3で ω_v を変え始めた後の2秒間の軌跡である。上述したように、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ のときにDSで ω_v を変え始めると、他とは異なる運動パターンが見られた。Fig. 7(a)から、確かに赤褐色の線のみ明らかに異なる軌道をとっている。一方で、その他の軌道では、 ΔT_{ω_v} の値と ω_v を変えるタイミングによらず、定常歩行の軌道から離れるタイミングが共通していた。おおよそ $\varphi_r \sim -0.2$ で定常歩行の軌道から外れていることがわかる。また、 ΔT_{ω_v} の値が異なると、走行のリミットサイクルへ近づき方が違うことがわかる。 $\Delta\omega_v = 0.1$ の方が走行のリミットサイクルへ直線的に移動している。

Fig. 8には、走行から歩行へ遷移するときの軌道を示す。(a)と(b)の ΔT_{ω_v} の値はそれぞれ0.1, 1.0である。オレンジの線はSS1、緑の線は

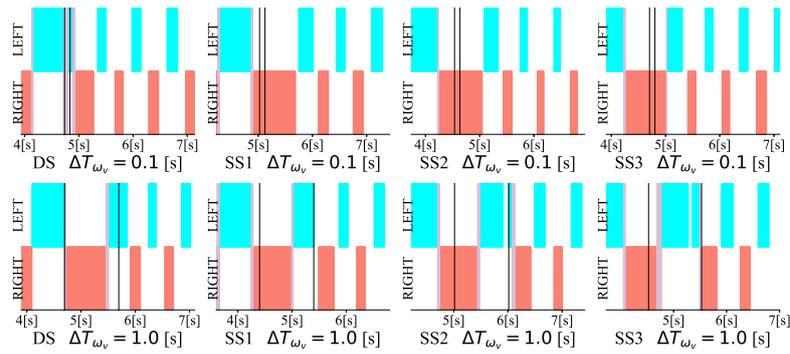


Fig. 5 歩行から走行への遷移時の脚の接地状態

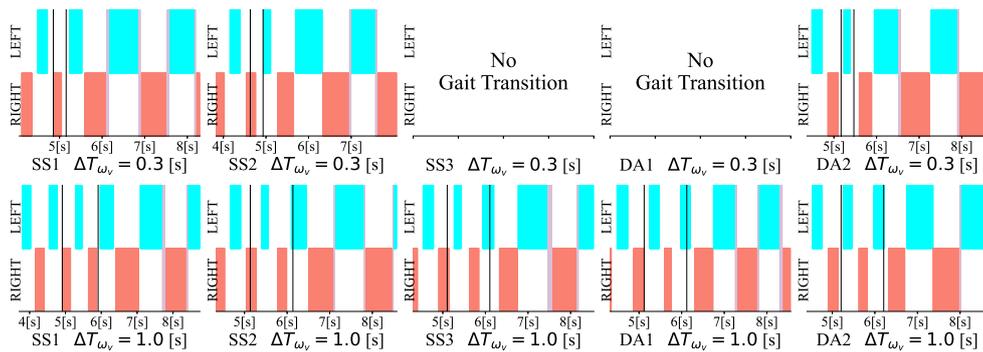


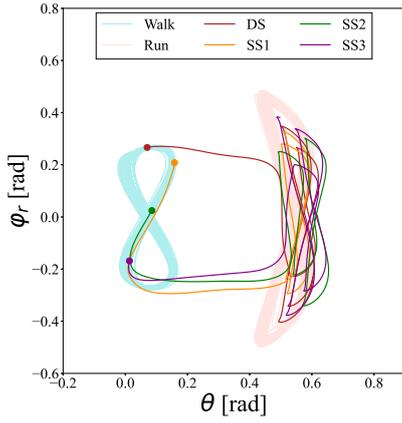
Fig. 6 走行から歩行への遷移時の脚の接地状態

SS2、紫の線は SS3、赤褐色の線は DA1、灰色の線は DA2 で ω_v を変え始めた後の 2 秒間の軌跡である。Fig. 4 で示したように、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ のとき倒れないで遷移を行えたのは SS2 で ω_v を変え始めたときのみであった。Fig. 8(a) から、歩行のリミットサイクルへ移動しているのは確かに緑色の線のみであることがわかる。Fig. 8(b) から、歩行と異なり定常走行の軌道から離れるタイミングには共通性がないように見られる。走行のリミットサイクルから離れた後しばらくは、 ω_v を変え始めた時系列の順番に従い軌道が平行移動の関係にあることが確認できる。

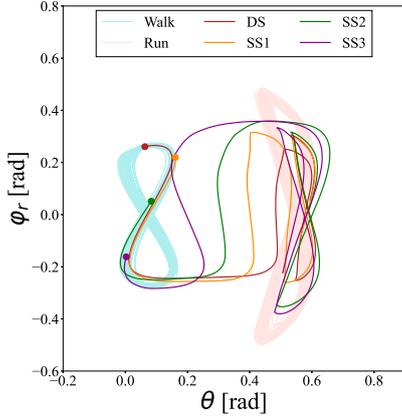
また、歩行から走行、走行から歩行への遷移では共通の軌道をとっていないことがわかる。Fig. 7 と Fig. 8 を比較すると、遷移前の歩容によって遷移時にとる軌道が大きく異なることがわかる。

4.4 歩行へ遷移するときの床反力と入射角

走行から歩行へ遷移させるとき、 ΔT_{ω_v} が小さいと、成功率は ω_v を変え始めるタイミングにより大きく異なった。特に、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ では、遷移に成功した試行は SS2 で ω_v を変え始めたときのみであった。そこで、なぜこのタイミングでの遷移成功率が高かったかを調べるため、このときの二脚モデルの運動を定常的な走行と比較した。Fig. 9 に、定常的な走行（上）と $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$ として SS2 で ω_v を変え始めたとき（下）の二脚モデルが受ける進行方向の床反力 N_x 、地面垂直方向の床反力 N_z 、入射角 α を示す。ここで、入射角 α とは、Fig. 10 で示すように脚が接地したときの、地面垂直方向に対する侵入角度である。図中の黒ハッチ領域左端で ω_v が 3.0 から下がり始め、右端で 0.0 となる。定常的な走行と床反力を比較すると、遷移時では ω_v を変えた直後の入射角が大きく増加していることがわかる。また、入射角の増加



(a) $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$



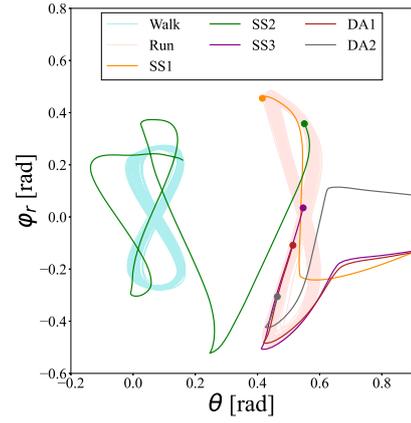
(b) $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$

Fig. 7 歩行から走行へ遷移時の軌道

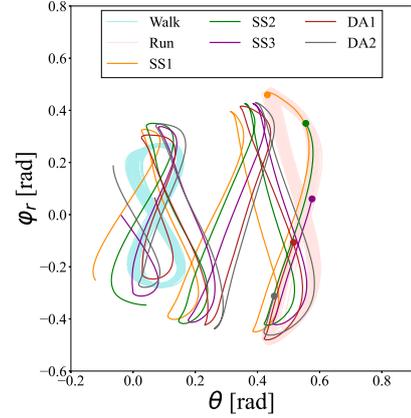
とともに、進行方向反対向きに力積を受けていた。定常的な走行では1回の片脚支持脚中に受ける進行方向の床反力の時間積分 $\int N_x(t)dt$ が $-0.0255 \pm 5.24 \text{Ns}$ ($n=250$) であったのに対し、Fig. 9 下図の ω_v を変えたとき後の片脚支持期(2つ目の山)では -30.36Ns 、その次(3つ目の山)では -35.60Ns 、の進行方向逆向きの力積を受けた。

4.5 考察

今回の実験から、 ΔT_{ω_v} が小さいとき、つまり速度パラメータ ω_v の変化率が大きいときは少ない歩数で遷移できるが ω_v を変え始めるタイミングによって遷移成功率が大きく変わる。また、 ΔT_{ω_v} が大きいとき、つまり ω_v をゆるやかに変えるときは遷移するまでの歩数は増える



(a) $\Delta T_{\omega_v} = 0.1$



(b) $\Delta T_{\omega_v} = 1.0$

Fig. 8 走行から歩行へ遷移時の軌道

が ω_v を変え始めるタイミングが遷移成功率に与える影響は小さいことを確認した。また、遷移前の歩容によって遷移時にとる軌道が大きく異なることを確認した。

初めに、歩行から走行への遷移に関して考察を行う。Fig. 4(a) より、遷移するタイミングを適切に設定すれば、少ない歩数でも遷移成功率が高かった。そこで、少ない歩数で成功率の高い遷移を行えるタイミングを考える。Fig. 7 より、歩行から走行へ遷移するときは、支持脚の開き角度 φ がおよそ -0.2 、およそ支持脚後期に定常歩行の軌道から離れていた。また、Fig. 4(a) から、 $\Delta T_{\omega_v} = 0.1, 0.3$ では $\varphi_r \sim -0.2$ となる支持期後期以前に ω_v を変え始めるほど遷移成功率が高かった。これらから、短期間の歩行から走行への遷移では、定常歩行の軌道から離れる支持脚後期までの準備期間が長いほど、

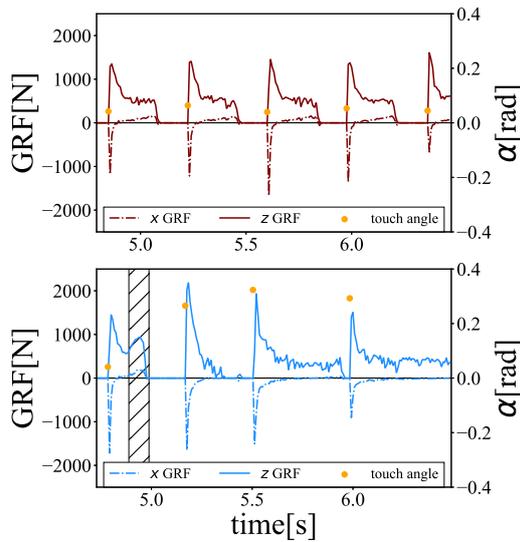


Fig. 9 定常的な走行と $\Delta T\omega_v = 0.1$ での走行から歩行遷移時の床反力と入射角 α

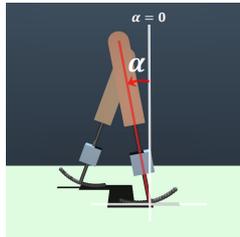


Fig. 10 入射角 α

遷移成功率が高まると推測できる。よって、支持脚初期から走行へ遷移するための運動生成を行い、支持脚後期で定常歩行の軌道から離れることで、少ない歩数で安定した歩容遷移を行えると考えられる。

次に、走行から歩行への遷移において、少ない歩数で転ばずに遷移するためのタイミングを考える。Fig. 4(b) より、 $\Delta T\omega_v \leq 0.6$ において、支持脚中期と後期では遷移成功率が大きく異なっており、支持脚後期以前に ω_v を変え始めると成功率が高いことがわかる。これから、支持脚中期と後期の間歩行に遷移しやすい期間があるのではないかと推測した。Fig. 9 上図より、定常的な走行ではおおよそ片脚支持期中期から進行方向の床反力 N_x が正となる。また、Fig. 9 下図より、 ω_v を変えた直後の接地では入射角が大幅に増加した。さらに、入射角が増加すると同

時に、モデルが受ける進行方向の力積 $\int N_x(t)dt$ は大きな負の値をとった。よって、地面を押し出す前に歩行へ遷移しようとする、蹴る力を調整することで脚を前に振り出し、直後の接地時に進行方向に対して負の床反力 $\int N_x(t)dt$ を受け速度を落とすことができるため、地面を押し出す前の支持脚中期が歩行へ遷移しやすいタイミングであると結論づける。

歩行から走行、走行から歩行への遷移では、遷移時の軌道が明らかに異なっていた。また、遷移に要する歩数も $\Delta T\omega_v = 1.0$ において、歩行から走行では2-3歩であったのに対し、走行から歩行では6-8歩と異なっていた。これらは、再現した歩容遷移にヒステリシスが存在するため、すなわち遷移過程のダイナミクスが前の歩行パターンに依存するため、生じたと説明できる。ヒステリシスは、制御パラメータを増加（または減少）させることで、異なるアトラクターへ遷移させるとき、元のアトラクターに留まる引力の差により生じ¹⁾、ヒトの歩容遷移でもヒステリシス現象は確認されている^{1, 12)}。本研究の結果は、深層強化学習を用いて生成した歩容遷移にもヒトと同じようにヒステリシス現象が発現することを示している。Fig. 7, 8 より、定常的な歩行と走行の身体の傾き θ を比較すると、歩行と比べて走行の方が前のめりに傾いていることがわかる。前のめりであると直立時と比較して転びやすいため、急激に姿勢を変えることが困難である。そのため、ヒステリシス現象が発現したと考えた。

5. 結言

本稿は、深層強化学習を用いて生成した二脚歩容遷移において、速度パラメータを変えるタイミングと増減時の変化率を変え、運動にどのような違いが出るかを観測した。その結果、少ない歩数で遷移するときは遷移を開始するタイミングが転倒率に大きな影響を与えること、遷

移するまでの歩数が多いと遷移を開始するタイミングによらず遷移成功率が高いことを示した。また、深層強化学習により生成した歩容遷にはヒトと同じようにヒステリシス現象が見られることを確認した。本研究の結果は、歩容遷移により幅広い速度領域でエネルギー効率の高い移動を可能とする二脚ロボットを開発するための枠組みとなること、さらにヒトの歩容遷移メカニズムの解明に知見を与えられることが期待できる。今後は、よりヒトに近い筋骨格モデルを用いた歩容遷移を再現する予定である。

参考文献

- 1) Frederick J Diedrich and William H Warren Jr. Why change gaits? dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 21, No. 1, p. 183, 1995.
- 2) Manoj Srinivasan and Andy Ruina. Computer optimization of a minimal biped model discovers walking and running. *Nature*, Vol. 439, No. 7072, pp. 72–75, 2006.
- 3) HONDA 社 ASIMO のウェブサイト. <https://www.honda.co.jp/ASIMO/>.
- 4) Nils Smit-Anseeuw, Rodney Gleason, Ram Vasudevan, and C David Remy. The energetic benefit of robotic gait selection—a case study on the robot ramone. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2, No. 2, pp. 1124–1131, 2017.
- 5) Jessica K Hodgins. Biped gait transitions. In *ICRA*, pp. 2092–2097, 1991.
- 6) Kenichiro Nagasaka, Yoshihiro Kuroki, Shinya Suzuki, Yoshihiro Itoh, and Jinichi Yamaguchi. Integrated motion control for walking, jumping and running on a small bipedal entertainment robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, Vol. 4, pp. 3189–3194. IEEE, 2004.
- 7) Taisuke Kobayashi, Yasuhisa Hasegawa, Kosuke Sekiyama, Tadayoshi Aoyama, and Toshio Fukuda. Unified bipedal gait for walking and running by dynamics-based virtual holonomic constraint in pdac. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1769–1775, 2016.
- 8) Alan Hreljac, Rodney T Imamura, Rafael F Escamilla, and W Brent Edwards. When does a gait transition occur during human locomotion? *Journal of sports science & medicine*, Vol. 6, No. 1, p. 36, 2007.
- 9) Shota Hagio, Mizuho Fukuda, and Motoki Kouzaki. Identification of muscle synergies associated with gait transition in humans. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 9, p. 48, 2015.
- 10) Dai Owaki, Koichi Osuka, and Akio Ishiguro. On the embodiment that enables passive dynamic bipedal running. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 341–346, 2008.
- 11) Ali Asadi Nikooyan and Amir Abbas Zadpoor. Mass-spring-damper modelling of the human body to study running and hopping—an overview. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part H: Journal of engineering in medicine*, Vol. 225, No. 12, pp. 1121–1135, 2011.
- 12) Veerle Segers, Peter Aerts, M Lenoir, and Dirk De Clercq. Spatiotemporal characteristics of the walk-to-run and run-to-walk transition when gradually changing speed. *Gait & posture*, Vol. 24, No. 2, pp. 247–254, 2006.