機構系ダイナミクスの能動的改変による環境適応的走行運動の実現

○大脇 大¹, 石黒 章夫¹¹名古屋大学大学院工学研究科

Realization of Adaptive Bipedal Running by Changing the Body Dynamics Properties

○Dai Owaki¹ and Akio Ishiguro¹¹Graduate School of Engineering, Nagoya University

Abstract: Recently, it has been widely recognized that control and mechanical systems cannot be designed separately due to their tight interdependency. However, there still leaves much to be understood about how well-balanced coupling between control and mechanical systems can be achieved. Therefore, as an initial step toward this goal, this study intensively discusses the effect of the intrinsic dynamics of a robot's body on the resulting behavior, in the hope that mechanical systems appropriately designed will allow us to significantly reduce the complexity of control algorithm required as well as to increase the robustness against the environmental perturbation. More precisely, we focus on the property of leg elasticity of a passive dynamic running biped, and investigate how this influences the stability of running. As a result, we have found that a certain type of nonlinearity in the leg elasticity plays a crucial role to enhance the robustness against the environmental perturbation. To the best of our knowledge, this has never been explicitly considered so far.

Keywords: Passive dynamic running, Body dynamics property, Leg elasticity, Adaptive behavior, Morphological computation

1 はじめに

行動主体が発現する振る舞いは、制御系と機構系、そしてこれらを取り巻く環境との間の相互作用の力学によって規定される[1]。ここで、この相互作用の力学の源に、直接的な設計対象である制御系と機構系が位置しているという事実を改めて着目すると、これらは本来、設計過程で同等の重みを持つ存在として扱われるのが妥当であろう。しかるに、従来のロボットの設計においては、「制御系・被制御系」あるいは「制御器・制御対象」という呼称からも明らかなように、これら両者を支配関係に基づき明確に切り分け、システムの高度化は主として上流側に位置する制御系の高機能化のみによってなされてきた。このような制御系と機構系の扱われ方は、必然的に「力づく」の制御を要請することにつながり、結果として環境変動に対する脆弱性やエネルギー効率の低さといったさまざまな問題が露呈していたことは論を俟たない。

このような背景から、近年、ロボットの設計過程においては、以下に示す事項の重要性が認知されつつある：

- 与えられた機構系のダイナミクスを積極的に活用するような制御方策を採用すること。
- 簡便かつ頑健な制御方策となるように(あるいは実装した制御方策の潜在能力を引き出すように)機構系のダイナミクス自体に工夫を施すこと、さらに必要があれば、状況依存的に機構系ダイナミクスを改変すること。

このような観点からの研究は緒に就いたばかりであるが、前者に関してはダイナミクス・ベースト制御という呼称が与えられ、例えば受動歩行機械[2]が持つ機構系のダイナミクスに着目して、簡便な制御方策によって歩行運動を実現する試み(このようなロボットは準受動歩行機械と呼ばれている)などが精力的に行われている[3][4]。一方、後者に関しては、いわば「機構系から制御系へ歩み寄り」という思想に基づく設計方策といえるが、これを明示的に扱った研究は依然として乏しいのが現状である。本研究では、この後者に関して、行動主体の振る舞い生成においてその機構系にどの程度寄与させるべきか、について考察する。この背景には、ロボットの有する機構系ダイナミクスを適切に設計することができれば、(1) 制御方策の簡素化、(2) 環境変動に対する頑健性の向上、といった効果が得られる、という期待がある[5]。またこうした考察を通して、ロボットの設計過程において制御系と機構系それぞれにどのよう

な役割を与えるべきか、それらをどのようにカップリングさせればよいのかに関しての指針を与えることにもつながる、ということも併せて期待できる。

上記の考察に基づき本研究では、制御系と機構系の適切なカップリングに関して、機構系ダイナミクスを積極的に活用すること、さらには行動主体を取り巻く状況に応じて能動的に改変することによる環境適応的運動の発現といった観点から議論することを第一義的な目的とする。この目的のために、機構系である脚の弾性要素を活用し、斜面上で歩行が可能な二脚受動歩行機械[6]に着目した。受動歩行機械が重力により供給されるポテンシャルエネルギーと運動エネルギーのバランスにより歩行運動を実現するのに対して、受動歩行機械はこの2つのエネルギーに加え、さらに脚の弾性要素の弾性エネルギーをも活用し歩行運動を行う。歩行運動と比較して、歩行運動においては脚の有する弾性特性が積極的に活用されるため、歩行とは異なる「機構系から制御系への歩み寄り」の形態に関する興味深い知見が抽出されることが期待される。このように、機構系のダイナミクスがより顕在化する受動歩行機械に着目し、脚の有する弾性要素のバネ特性が二脚受動歩行の安定性に及ぼす影響について考察する。具体的には、SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum)と呼ばれるモデル化方策[7][8]に従って、脚にバネを有する単純な受動歩行機械をモデル化し、計算機シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、ある種の非線形性を有する弾性要素を実装したモデルにおいて、安定な歩行が継続可能なパラメータ領域(安定領域)が著しく拡大するという結果が得られたので報告する。従来研究では線形バネのみが扱われていたため、この現象は予想していなかったものである。さらに、非線形弾性要素を実装したモデルは突発的な外乱(斜度、路面状況の変化など)に対して頑健性を有するという結果は、制御系の負担を劇的に低減できることを示唆している。本研究が示す結果は、制御系と機構系間の連関のさせ方に対して、重要な知見を提供できると期待される。

2 問題設定

2.1 作業仮説

本研究では特に、受動歩行機械の機構系である脚のバネが環境と相互作用する期間である支持脚期に着目した。ヒトの歩行時における支持脚の運動をFig. 1(a)に示す。従

Fig. 1: (a) A schematic of the motion of the stance leg during human running. (b) SLIP model. In the figures, only one leg is shown for clarity.

Fig. 2: The model employed.

来、走行運動の解析においては、支持脚の運動はSLIPと呼ばれるモデル化方策に従いモデル化がなされてきた (Fig. 1(b)). そして、脚の弾性要素としては線形バネが実装されたモデルであった。しかしながら本研究では、「走行時の支持脚の運動は脚の有する複数の筋や腱が協動的に働くことで発現する」という事実に着目し、

- 支持脚期における脚の弾性特性は、走行の安定性に甚大な影響を与えるのではないか。
- 実際の生体においては、複数の筋や腱が協動的に働いているという事実を踏まえると、支持脚の弾性特性には何らかの非線形性が要請されるのではないか。

という作業仮説を設けた。この作業仮説に基づき、脚が有するバネ特性による受動走行の安定性への影響について検証を行う。

2.2 本研究で採用したモデル

本研究で採用した受動走行機械のモデルの図を Fig. 2 に示す。Figure 2 は、走行 1 周期のモデルの運動を表す。本研究では斜面に着地した状態を初期状態とした。同図に示すように、走行運動とは片脚支持脚期 (Stance phase) と両脚遊脚期 (Flight phase) が周期的に入れ替わる運動である。そのため、両脚遊脚期と片脚支持脚期という 2 つの状態が存在し、それぞれの状態についての運動方程式が必要となる。片脚支持脚期の運動のモデル化には、質点とバネから構成される spring-mass モデル [7] を採用した。また、両脚遊脚期は重心の放物運動としてモデル化した。上述の 2 つの運動方程式では状態変数が異なるため、斜面からの跳躍と斜面への着地において状態変数遷移条件が必要となる。運動方程式、状態変数遷移条件については次節以降にて詳しく説明する。

2.3 運動方程式

2.3.1 片脚支持脚期 (Stance phase) の運動方程式

片脚支持脚期の運動方程式は次式のように与えられる：

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{z}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-z^*} \{ \sin(\theta - \gamma) + 2\dot{z}^* \dot{\theta} \} \\ -f(z^*) + \cos(\theta - \gamma) - (1-z^*)\dot{\theta}^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

ここで、 θ は斜面に対する垂線と支持脚のなす角、 z^* は脚方向の変位を表す (斜面へ着地した状態でバネは自然長とし、 $z^* = 0$)。支持脚の足先は常に斜面に固定されており動かないとした。 $f(z^*)$ はバネの変位 z^* に関する復元力の関数であり、以降バネ特性と呼ぶ。上式は $t = \sqrt{l/g} t^*$, $z = l z^*$ を用いて無次元化しており、 $\dot{\cdot}$ は t^* による微分を示すものとする (以降 t^* , z^* はそれぞれ t, z と表記する)。それぞれパラメータは、脚長 l 、斜度 γ 、重力加速度 g とした。

2.3.2 両脚遊脚期 (Flight phase) の運動方程式

両脚遊脚期の運動方程式は、以下のように与えられる：

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}^* \\ \ddot{y}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \gamma \\ -\cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (2)$$

ここで、 x, y は重心の位置を表す。式 (1) と同様に $t = \sqrt{l/g} t^*$, $x = l x^*$, $y = l y^*$ を用いて無次元化している (以降 t^* , x^* , y^* は t, x, y と表記する)。

2.4 状態変数の遷移

本研究で用いたモデルにおいては、斜面からの跳躍 (Jumping) そして斜面への着地 (Landing) における状態変数の遷移条件が必要となる。斜面からの跳躍においては、足先まわりの角運動量と系全体のエネルギーが保存される。一方、斜面への着地においては、足先と斜面との衝突によるエネルギー損失が存在する。斜面への着地における足先と斜面との衝突の条件を、(1) 無限小時間で完了する、(2) 接地点以外の点に撃力は作用しない、(3) 衝突は非弾性衝突である (弾性係数 $e = 0$)、と仮定する。衝突は無限小時間で完了することから、この系のエネルギーは失われるが、足先まわりの角運動量は保存される。斜面からの跳躍においては足先まわりの角運動量保存とエネルギー保存、斜面への着地においては足先まわりの角運動量保存から、前後の状態変数の遷移条件が得られる。

2.4.1 斜面からの跳躍 (Jumping)

跳躍判定条件 以下の条件式を満たすとき、斜面からの跳躍が可能となる：

$$z^- = 0, \quad (3)$$

$$(\dot{\theta}^-)^2 - \cos(\theta^- - \gamma) > 0. \quad (4)$$

式 (3) はバネが自然長の状態、式 (4) は重心に作用する遠心力が重力より大きい状態を表す。

状態変数遷移条件 跳躍前後の角運動量保存則, エネルギー保存則より, 跳躍による状態変数遷移条件は, 以下のよう
に与えられる:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^+ \\ \dot{y}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta^-) & \sin(\theta^-) \\ -\sin(\theta^-) & -\cos(\theta^-) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}^- \\ \dot{z}^- \end{bmatrix}. \quad (5)$$

ここで, 上式にある $[\theta^-, z^-, \dot{\theta}^-, \dot{z}^-]^T$ は跳躍直前の状態変数
を表しており, 一方, 残りの変数である $[x^+, y^+, \dot{x}^+, \dot{y}^+]^T$
は跳躍直後の状態変数を表している (各変数の添え字に注
意されたい).

2.4.2 斜面への着地 (Landing)

着地判定条件 以下の条件を満たすとき, 足先は斜面と接
触する:

$$y^- = \cos(\theta_c). \quad (6)$$

θ_c は着地したときの斜面の垂線に対する支持脚のなす角を
表し, 毎ステップの初期状態において一定となるパラメー
タとする.

状態変数遷移条件 衝突前後の角運動量保存則より, 衝突
による状態変数の遷移条件は, 以下のよう
に与えられる:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}^+ \\ \dot{z}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_c) & -\sin(\theta_c) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}^- \\ \dot{z}^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{z}_c \end{bmatrix}. \quad (7)$$

ここで, 上式にある $[x^-, y^-, \dot{x}^-, \dot{y}^-]^T$ は衝突直前の状態変
数
を表しており, 残りの変数である $[\theta^+, z^+, \dot{\theta}^+, \dot{z}^+]^T$ は衝
突直後の状態変数
を表しており, $\theta^+ = \theta_c, z^+ = 0, \dot{z}^+ = \dot{z}_c$
となる (各変数の添え字に注意されたい). $\theta_c, \dot{z}_c$ は, 毎ス
テップの初期条件として与えるパラメータである. θ_c は斜
面との接地角であり, $\dot{z}_c$ はバネに与えるバネ方向の初速度
である.

2.4.3 走行 1 周期の状態変数の遷移

本研究で採用したモデルの有する力学系から, それぞれ
の状態への状態変数の遷移は以下のようにまとめられる:

$$\begin{aligned} & \text{step}(n) \text{ の初期状態 } \mathbf{q}_n^0 = [\theta_c, \dot{\theta}_n, 0, \dot{z}_c]^T \\ & \quad \downarrow \\ & \text{片脚支持脚期 (Stance phase) } \mathbf{q} = [\theta, \dot{\theta}, z, \dot{z}]^T \\ & \quad \downarrow \\ & \text{斜面からの跳躍 (Jumping):} \\ & [\theta^-, \dot{\theta}^-, z^-, \dot{z}^-]^T \mapsto [x^+, \dot{x}^+, y^+, \dot{y}^+]^T \\ & \quad \downarrow \\ & \text{両脚遊脚期 (Flight phase) } \mathbf{q} = [x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T \\ & \quad \downarrow \\ & \text{斜面への着地 (Landing):} \\ & [x^-, \dot{x}^-, y^-, \dot{y}^-]^T \mapsto [\theta^+, \dot{\theta}^+, z^+, \dot{z}^+]^T \\ & \quad \downarrow \\ & \text{step}(n+1) \text{ の初期状態 } \mathbf{q}_{n+1}^0 = [\theta_c, \dot{\theta}_{n+1}, 0, \dot{z}_c]^T \end{aligned}$$

本モデルの力学系において, ポアンカレ断面上の状態とし
て step(n) における初期状態を定義すると, ポアンカレ写
像は以下の式で表される:

$$\mathbf{q}_{n+1}^0 = P(\mathbf{q}_n^0). \quad (8)$$

$(\theta_c, \dot{z}_c)$ は毎ステップ同一となるパラメータであるため, ポ
アンカレ写像は 1 次元写像 $\dot{\theta}_n \mapsto \dot{\theta}_{n+1}$ となる. そのため
解析が容易であることがわかる.

Fig. 3 : Spring properties implemented.

3 シミュレーション結果

本稿では, 環境変動に対する頑健性の検証のため, パラ
メータ平面 $\theta_c - \dot{z}_c$ 内の安定な走行が継続可能な領域 (以
降, 安定領域と呼ぶ) を観察した. パラメータ $(\theta_c, \dot{z}_c)$ は,
地面との接触の状態を規定するため, 斜度の変化や路面状
況に大きく依存するパラメータである. したがって, パラ
メータ空間内の安定領域が大きいほど環境変動に対して頑
健である. Figure 3 は受動走行機械に実装したバネ特性
を示す. 線形バネに加え, 自然界に存在する生物に近い特
性といえる下に凸な非線形バネと人工物に見られる特性と
いえる上に凸な非線形バネを実装したモデルを用い, バネ
特性が振る舞いの頑健性に与える影響について比較検証を
行った.

Figure 4 は, パラメータ平面 $\theta_c - \dot{z}_c$ 内の安定領域を示
す. 図中の濃淡は, 固定点での値に対し 100% の摂動を与
えたときの定常状態へ収束するまでの走行歩数を示し, 淡
いほど収束が迅速な領域である. 斜線部 (黄色) は走行
が不可能な領域である. それぞれに実装したバネ特性は,
(a) $f_l(z) = Kz$, (b) $f_{nla}(z) = Kz^2$, (c) $f_{nltn}(z) = Kz^{1/2}$
である. また, 各パラメータは, バネ定数 $K = 100$, 斜度
 $\gamma = 0.50[\text{rad}]$ とした. 線形バネを実装したモデル (Fig. 4
(a)) と比較して, 下に凸な非線形バネを実装したモデル
(Fig. 4 (b)) において安定領域が拡大する一方, 上に凸な
非線形バネを実装したモデル (Fig. 4 (c)) においては安定
領域が縮小していることに注意されたい. このように, 実
装したバネ特性の相違によって, 安定領域の大きさ, すな
わち振る舞いの頑健性に甚大な影響が確認されたことは興
味深い. さらには, 非常に多く存在する非線形特性の中
でも, 人工物に見られる上に凸な非線形特性ではなく, 生物
に見られる下に凸な非線形特性を有するとき, 振る舞いは
より安定となるという事実はきわめて興味深い現象である.

4 まとめおよび今後の課題

本稿では, 脚にバネを有する単純なモデルの二脚受動機
械を採り上げ, 脚のバネ特性が受動走行の頑健性に与える
影響の検証を行った. シミュレーションの結果, 支持脚の
有するバネ特性の相違がパラメータ空間 $\theta_c - \dot{z}_c$ 内の安定
な受動走行が可能な領域に甚大な影響を与えることが確認
された. 特に, 生物に近いといえる下に凸な非線形性を有
するモデルにおいて, より振る舞いは頑健になるという結
果が得られた. 本研究で得られた結果から, 脚のバネ特性
が受動走行の頑健性に重要な役割を果たしていることが明
らかになった. この事実は, 生成される振る舞いに対して,
機構系の有するダイナミクスが大きな影響を与えているこ
とを示唆している. こうした結果は, 近年, R.Pfeifer らに
よって提唱されている機構系にも振る舞い生成の一翼を担
わせる Morphological computation[9] という概念を強く支

(a) In the case of the linear spring Kz . (b) In the case of the nonlinear spring Kz^2 . (b) In the case of the nonlinear spring $Kz^{1/2}$.

Fig. 4 : Comparison of the robustness against the environmental perturbation.

持する結果である。受動走行機械に関する既存研究としては Hyon らの研究 [10] が挙げられるが、彼らは振る舞いの安定化をさらなる制御器の追加によってのみ実現することを試みている。ロボットの設計段階から陽に機構系の有する役割を意識している本研究とは全く立場が異なり、本研究の新規性・学術的意義はきわめて高いと確信する。

今後の課題としては、以下の2つの事項に関する議論が挙げられる：

- 機構系が持つ自己安定性を最大限に活用した簡便な走行制御の実現。
- 機構系ダイナミクスの能動的改変による環境適応的走行運動の実現。

前者に関して、著者らは、下に凸な非線形バネを実装することにより状態空間内のベクトル場が改変され、機構系の有する自己安定性が向上することを報告した [11]。そして、このような機構系の持つ自己安定性を最大限に活用することにより、制御系の簡素化といった効果が期待される。また後者に関して、環境適応的な運動発現のためには、機構

系ダイナミクスを状況依存的に改変する必要があると考えられる。上記の2点に関する議論を通して、簡便な制御方策による環境変動に対して頑健な走行ロボットの実機による実現を目指す。さらにこのような考察を通して、ロボットの振る舞い生成において、その制御系と機構系にそれぞれの程度寄与させるべきか、についての指針を与えることができるかと期待される。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」(領域番号 454)からの援助によって行われた。また、東北大学大学院理学研究科物理学専攻 川勝年洋教授からは多くの有益な助言を賜った。ここに謝意を表します。

文 献

- [1] R. ファイファー, C. シャイアー著 (石黒章夫, 小林宏, 細田耕 監訳): 知の創成—身体性認知科学への招待—, 共立出版 (2001)
- [2] T. McGeer: Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics Research, **9**-2, 62/82 (1990)
- [3] 大須賀公一, 杉本靖博, 杉江俊治: 遅延フィードバック制御に基づく準受動的歩行の安定化制御, 日本ロボット学会誌, **22**-2, 193/199 (2004)
- [4] S. H. Collins, A. Ruina, M. Wisse, and R. Tedrake: Efficient Bipedal Robots Based on Passive-dynamic Walkers, Science, **307**, 1082/1085 (2005)
- [5] 石黒章夫, 大脇大: ウェルバランスト・コントロールを目指して—受動歩行機械を起点とした一考察—, システム/制御/情報, **49**-10, 417/422 (2005)
- [6] T. McGeer: Passive Dynamic Running, Proc. of the Royal Society of London, Series B, Biological Science, **240**-1297, 107/134 (1990)
- [7] A. Seyfarth, H. Geyer, M. Gunther, and R. Blickhan: A Movement Criterion for Running, Journal of Biomechanics, **35**, 649/655 (2002)
- [8] R. Ghigliazza, R. Altendorfer, P. Holmes, and D. E. Koditschek: A Simply Stabilized Running Model, ASME J. on Applied Dynamical Systems, **2**-2, 187/218 (2003)
- [9] R. Pfeifer and F. Iida: Morphological Computation: Connecting Body, Brain and Environment, Japanese Scientific Monthly, **58**-2, 48/54 (2005)
- [10] S.-H. Hyon and T. Emura: Energy-preserving Control of a Passive One-legged Running Robot, Advanced Robotics, **18**-4, 357/450, (2004).
- [11] 大脇大, 石黒章夫: 非線形弾性要素を有する二脚受動歩行機械の安定性解析, 第18回自律分散システム・シンポジウム 資料, 111/116 (2006)