

脚式移動におけるCPG(Central Pattern Generator)の役割

- 適応的な歩行・走行生成の統一的理解に向けて-

木村 浩*・張 祖 光*

* 電気通信大学情報システム学研究所 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* Graduate School of Information Systems, Univ. of

Electro-Communications, Chofu-ga-oka 1-5-1, Chofu, Tokyo

*E-mail: {hiroshi, hero}@kimura.is.uec.ac.jp

キーワード：適応的振動 (adaptive oscillation), 自励振動 (self-excited oscillation), 強制振動と
同調 (enforced oscillation and synchronization),
引き込み (entrainment), リズム発生器 (rhythm
generator), 自律適応 (autonomous adaptation)

1 はじめに

従来型のモデルベースな手法では不整地での自律適応的な歩行・走行が困難であることが指摘されている [1]。一方、生物規範型機構設計・制御手法によりある程度の自律適応が比較的容易に実現できることが近年いくつかのグループにより示されている [2]。しかし、生物規範型といってもいくつかの項目についてその考え方にはグループによって大きな違いがある。本稿では、主にこれらの項目についての比較・検討を 2 にまとめ、歩行・走行の生成・適応を統一的に考える第一歩としてこれらを考慮した著者らの不整地走行シミュレーション [3] を紹介したい。なお、受動歩行については本稿では詳しく取り上げないが、その自己安定性の構造については本特集号の大須賀の解説を、受動歩行を規範とした二脚歩行生成については参考文献 [4, 5, 6] を参照して頂きたい。

2 適応的脚式移動研究の現状

2.1 適応的な振動としての脚式移動

本稿では、歩行・走行を含めた脚式移動を内部パラメータや外部環境の変化に適応可能な振動と考える。このような適応的な振動には二種類あることを小野ら [機論 C, 1993] は指摘している。一つは「自励振動」であり、他方は「強制振動 + 同調」である。この二つの振動の分かり易い例としてブランコを考えると、自分でこぐこと (内部状態のフィードバック) により徐々に振幅を大きくしていく (エネルギーを蓄積する) のが「自励振動」であり、タイミングよく (同調しながら) 背中を他人に押されること (強制駆動) によりエネルギーを蓄積するのが「強制振動 + 同調」である。

ここで小野らによる二つの自励振動歩行を紹介したい。[7] では、受動歩行可能な二足歩行モデルのロール運動について、横方向にスライドする可動質量を駆動するアクチュエータ出力に支持脚ロール角度をフィードバックすることにより自励 (self-excited) 振動系を構成している。また、[8] では、胴体のないピッチ平面二足歩行モデルにおいて、遊脚・膝関節角度を腰関節トルクにフィードバックし、受動膝関節のクラッチを併用することにより自励振動型の二足歩行が

可能であり、フィードバックゲインと安定性の関係などを調べている。いずれの例においても、機構と床面の持つ動特性から決まる自然な歩行運動が自律的に誘発されており、自励振動型の歩行が脚長や質量の変化などの内部パラメータの変化に強いこと、すなわちある程度の適応性を持つことが示されている。

一方、小野らが指摘しているように強制振動自体は適応機能を持たないので、外部環境に合わせるためには同調 (synchronization, entrainment) 機能が必要であり、これは相互引き込み (mutual entrainment) 機能を持つ CPG (Central Pattern Generator) による振動生成・適応に相当する。自励振動は簡便であるが、周期・歩幅・移動速度などの調節や不整地などの環境変化に対するセンサーフィードバックの導入が困難である。一方、強制振動 + 同調はこれらが可能であり、繊細な調節・アクティブな自律適応・上位システムからの指令による適応を考えたときより適切であると言える。ただし、共振特性・相互引き込みの特性 [9]・どのようなセンサ情報をどのようにフィードバックするのか [2] など考慮すべき項目は多い。

2.2 受動ダイナミクス vs. CPG

一般に動物の高速移動においてはバネ-ダンパ系でモデル化される筋骨格系での自己安定性 (3.2.2.) が重要である [10, 12]。例えば Full らのグループは筋肉や腱の持つバネ特性を利用して構成される受動ダイナミクス (バネ・質量系) が運動のリズムを生成し、かつ、系の粘弾性と支持脚・遊脚の相変化により適応がなされるので、CPG のようなリズムジェネレータや位相調節のようなセンサフィードバックは必要ないと主張している。これは 2.1 で述べた例でいえば「自励振動」[13] または「強制振動のみ」[14, 15] で適応的な振動を実現しようとする考えで、このグループを「受動ダイナミクス派」と呼ぶ。

一方、低・中速歩行に關与する神経システムについては、動物の歩行は主に CPG と反射の組み合わせにより生成されていること、CPG は外部振動との相互引き込み機能を持つこと、これら CPG や反射の機構は主に脊髄に存在し脳幹・小脳・大脳など上位中枢からの調節を受けていること

は、事実として広く受け入れられている [11]。このような生物学の知見を参考にして数多くの CPG を用いた歩行のシミュレーションやロボットを用いた実験が行われてきた。2.1 で述べたように、CPG は「強制振動 + 同調」で適応的な振動を実現しようとする考えで、このグループを「CPG 派」と呼ぶ。

現在、走行 [10, 12, 13, 14, 15] や受動歩行を規範とした歩行¹[4, 5, 6] では受動ダイナミクス派が、適応的な歩行については CPG 派 [16, 17, 18, 19, 20, 21] が、それぞれの主張がうまく働くことをシミュレーションやロボットを用いた実験で示しているが、これら二つをうまくつなぐ試みはなされていない。また、走行において定常状態ではバネ・質量系が系固有のリズムを生成するので、CPG が必要なのは明らかである。しかし、静止から定常への遷移や不整地走行時の外乱への適応など過渡的な応答を考えたとき、CPG の同調機能や歩容調節機能が有効に働くことが考えられる。

2.3 CPG のモデル：振動子 vs. 非振動子

CPG のモデルとして (非線形) 振動子を考えるグループ [16, 17, 18, 19] と非振動子を考えるグループ [20, 21] がある。振動子はセンサ入力なしでも振動が可能であり、非振動子はセンサ入力があって初めてパターンを生成でき、それぞれヤツメウナギ [11] やナナフシ [20] などを用いた神経生理学・神経行動学の知見をその根拠としている。すなわち、生物の運動は中枢神経で作られるのか、センサ入力により起動された反射の連鎖として作られるのかという 100 年来の “central vs. peripheral 論争” をいまだに引きずっている。Cruse[20] は振動子は時定数や固有周期の形で世界モデルを内包しているために汎用的でないと批判しているが、木村ら [22] は機構の動特性がそれらの形で振動子にエンコードされている [9] からこそ歩行などが可能であると反論している。

2.4 CPG へのセンサフィードバック

CPG はセンサー情報を入力されることにより初めて機構や外界に適した運動パターンを生成することができる。それではどのようなセンサ情報が必要であろうか。Pearson らはネコの歩行において脚運動の前後到達点 (AEP, PEP, anterior or posterior extreme position) や床との接触情報が脚の位相に reset をかけていることを示しており、土屋ら [17] はこれらのセンサ情報を用いて四脚や二脚の適応的な歩容生成を行っている。また、Cruse[20] も同様なセンサ情報を用いている。一方、Grillner[11] はヤツメウナギの CPG へは関節角度がフィードバックされ相互引き込みが発生すること指摘しており、多くの研究 [16, 18, 19] に影響を与えている。

¹ 自励振動と捉えることが可能であるが、現時点でその歩行はあまり適応的ではない。

2.5 CPG 出力の物理的意味は何か？

生物において CPG の出力する情報が何であるかは実はよく分かっていない。多賀 [16] は CPG 出力はトルクであるとしてより簡単な運動生成系を提案しているが、筋肉モデルを考慮できていない。矢野ら [19] は CPG の出力は位相であるとして Hill の筋肉モデルまで考慮したより精密な人の二脚歩行のシミュレーションを行っている。近年は CPG 出力を位相と考える研究 [17, 18, 19, 20] が多い。

2.6 適応的な四脚走行の実現について

以上の比較・検討を念頭において以下を考慮しながら、3 では適応的な四脚走行の実現手法を提案する。

- (1) 定常状態ではバネ・質量系が支配的であるが、過渡状態での調節時にのみ自律的に CPG が働くシステムを作れるか。
- (2) 自身の固有周期を持たずバネ・質量系の固有周期に容易に引き込まれ、かつ、敏速に応答できる CPG を構成できるか。
- (3) ノイズやドリフトなどの工学的な問題も考慮しながら、走行における適応のためのセンサフィードバックとして何が適切であるか。

3 CPG を用いた不整地走行へ向けて

エネルギー効率に優れた定常走行を自律的に生成可能で、かつ、不整地などの外乱に対して自律的な適応能力を持つ簡単な制御則の実現を目指す。最初に、ひざにバネのある受動関節を持つ平面四脚ロボットにおいてバウンド歩容での準受動走行を考え、エネルギー効率に優れ自己安定化により制御を簡略化できる固定点を運動の理想状態として求める。次に実際のロボット走行において、脚質量や摩擦が小さい場合には摩擦や衝突を準受動走行の固定点まわりの運動に発生した外乱と捉えて、これをキャンセルするための制御として遅延フィードバック制御 (DFC: Delayed Feedback Control) を考える。また、静止状態から固定点まわりの定常運動への遷移、および、簡単な不整地適応のためにリズムジェネレータを導入する。リズムジェネレータは周期への DFC により走行運動と相互引き込みを起こし、CPG として働く。

3.1 走行ロボットモデルとバウンド歩容

四脚ロボットのバウンド走行運動を扱うために図 1 に示すような矢状面内モデルを考える。このモデルは、剛体である胴体と膝関節にバネが付けられた二リンク脚二本により構成される。添字 $l = \{f, h\}$ であり、それぞれ前脚 (fore) と後脚 (hind) を表す。膝関節は常に受動関節である。シミュレーションにはバネ定数を除いて四脚ロボット「鉄犬 2」の物理定数を用いる。

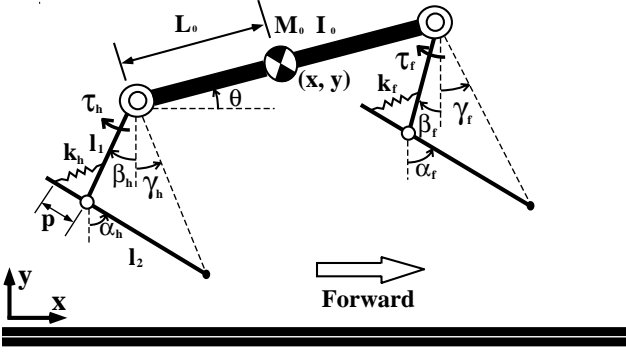


図 1: 四脚ロボットの矢状面内モデル

本稿では図 1 において，順番に flight, fore leg stance, double legs stance, hind leg stance が順番に現れるバウンド歩容を考える．すなわち，一周内に一度だけ後脚支持期の後に extended flight phase と呼ばれる跳躍相が現れる．

3.2 準受動走行と自己安定性

3.2.1 固定点

バウンド歩容での準受動走行とは，脚質量や関節での摩擦がゼロであるので衝突によるエネルギー損失は無視でき，さらに，遊脚は常に目標の遊脚着地角度 γ_i^{td} に設定できる運動とする．また，支持脚期間に腰関節のトルクはゼロとする．定常的な準受動走行は，離散力学システムのポアンカレマップ上の固定点として求めることができる．すなわち，バウンド走行でのロボットの跳躍最高点（図 1）での状態 $p = [y_p, \theta_p, \dot{x}_p, \dot{\theta}_p]^T$ を参照点とし，前後脚の遊脚着地角度 $q = [\gamma_f^{td}, \gamma_h^{td}]^T$ を入力として， n 歩目の参考点 $p[n]$ と入力 $q[n]$ に関して次の離散力学システム

$$p[n+1] = \mathcal{P}(p[n], q[n]) \quad (1)$$

を考えたとき，平衡状態 p^*, q^* は次式を満たす．

$$p^* = \mathcal{P}(p^*, q^*) \quad (2)$$

ここで平衡状態 p^*, q^* で行列 J

$$J = \frac{\partial \mathcal{P}(p, q)}{\partial p} \quad (3)$$

のすべての固有値の絶対値が 1 より小さいとき， p^* は漸近安定な固定点となる．

バウンド走行では跳躍最高点での高さや前進速度などが異なる多くの固定点が存在する [13]．以下，本論文では $p^* = [0.2, 0, 0.95, -1.52]^T$ を代表的な固定点²と考える（表 1）．

3.2.2 自己安定性

準受動走行はエネルギーが保存される運動であるが，例えば跳躍最高点でのポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの

²約 2(cm) 跳躍し平均速度約 0.8(m/s) で走行する．

表 1: 固定点 $p^* = [0.2, 0, 0.95, -1.52]^T$ での状態量．ポテンシャルエネルギーの原点を静止時重心位置にとる．

y_p (m)	0.2	θ_p (rad)	0
\dot{x}_p (m/s)	0.95	$\dot{\theta}_p$ (rad/s)	-1.52
γ_f^{td} (rad)	0.524	γ_h^{td} (rad)	0.838
energy (J)	0.136	cyclic period (s)	0.292
J の固有値	0.0003, 0.0005, -0.032, 0.0213		

間に移動があれば運動は非定常になる可能性がある．しかし，漸近安定な固定点 p^* に対応する q^* に遊脚着地角度を設定すれば，運動は p^* まわりに自己安定化される [12]．

一方，脚質量や摩擦が小さい場合には，摩擦や衝突を準受動走行の固定点まわりの運動に発生した外乱と捉える．このとき，跳躍高さや前進速度をセンサで計測することなく，摩擦や衝突により失われたエネルギーを補償し，かつ， q^* に遊脚着地角度を設定するだけで運動が固定点 p^* に収束する場合，系は自己安定性を持つと定義する [13]．

3.3 バウンド走行実現のための考察

実際のロボット走行においては，3.2.2. で述べたように摩擦や衝突により失われたエネルギーを補償する必要がある．また，自己安定性は外乱の小さな場合に制御系を簡単にする有効な性質である [13, 14, 15] が，大きな外乱に対しては当然センサーフィードバックが必要と考えられる．ここでは摩擦や衝突により失われたエネルギーを回復し定常状態を保つための制御を従来の研究を参考にして二種類紹介し，脚式走行を実現する際の工学的な問題点について考察する．

最初に，準受動走行の固定点から計算される目標エネルギー E^* に跳躍最高点での系のエネルギーが追従するように次式のトルクを与える「目標エネルギー追従制御」を考える [4]．

$$\tau_l^{st}[n+1] = \tau_l^{st}[n] - K_{ER,l}(E_p[n] - E^*) \quad (4)$$

ここで n 番目のステップの跳躍最高点での系のエネルギーが $E_p[n]$ ，支持脚期間中の腰関節一定トルクが $\tau_l^{st}[n]$ ，ゲインが $K_{ER,l}$ である． p^*, γ_i^{td}, E^* として表 1 で示した固定点での値を与え目標エネルギー追従制御を行った [3]．結果として固定点まわりの定常状態での支持脚腰関節トルクとして $\tau_f^{st} = -0.32(Nm)$ と $\tau_h^{st} = 0.62(Nm)$ が得られたが，これは各ステップでまさつと衝突により失われた系のエネルギーを補償するために必要なトルクであると考えられる．「目標エネルギー追従制御」は固定点まわりのバウンド走行の定常化に有効に働くことが示されたが，実ロボット制御においてはエネルギーという目標値を必要とするという問題点³がある．

一方，目標値を必要とせずに固定点まわりの運動を定常化する手法として遅延フィードバック制御 (Delayed Feedback

³モデル誤差等の問題で解析やシミュレーションで求めた目標エネルギーが適切であるかどうか．

Control: DFC) がある．ここで DFC とは，次の離散力学システム

$$\mathbf{x}[n+1] = \mathcal{F}(\mathbf{x}[n], \mathbf{u}[n]) \quad (5)$$

$$\mathbf{y}[n] = \mathcal{G}(\mathbf{x}[n]) \quad (6)$$

の不安定平衡点 \mathbf{x}^* を

$$\mathbf{u}[n] = \mathcal{K}(\mathbf{y}[n] - \mathbf{y}[n-1]) \quad (7)$$

という制御則で安定化するものである [5]．DFC 手法においては式 (7) に示すように，フィードバック項はセンサ情報から計算される状態量の差分形式であり，目標値を必要としないという利点がある．大須賀ら [5] は，DFC の \mathbf{y} として衝突点での運動エネルギーを選び，エネルギー状態の変化からアクチュエータの調節トルクを求める DFC により，下り坂での平面二脚歩行が受動歩行の固定点まわりに漸近安定化されることをシミュレーションにより示している．

ここで同様に \mathbf{y} として跳躍最高点でのエネルギーを選び，DFC 用いた準受動走行の固定点まわりの定常化を考えた時，目標エネルギーを必要としないが系のエネルギーをロボット内センサで計測された値から計算する必要がある．しかし，実ロボットにおいては，加速度センサなどの出力から跳躍高さ・前進速度を求めるときには積分誤差やノイズ・ドリフトなどの工学的な問題があり，それらの値を使って系のエネルギーを精度良く計算しフィードバックに用いることは困難である．本稿ではこの問題を解決するために，3.4 で接地センサにより精度良く計測される支持脚期間⁴[15] を遅延フィードバックする方法を提案する．

3.4 静止から定常バウンド走行への遷移

ここではある跳躍最高点高さ⁵と前進速度を与える固定点 p^* を目標状態とし，固定点の情報として各脚の遊脚着地角度 q^* を用いる．ただし，バウンド歩容を表す状態量 (周期，脚間位相差，エネルギー，跳躍最高点での高さ・前進速度・胴体角速度など) は静止状態から固定点まで，機構と床面との相互作用のなかで発生するダイナミクスに従い自律的に遷移する．筆者らは固定点への収束においてモデル誤差が与える影響を調べているが，本稿では割愛させて頂く．

3.4.1 リズム生成部

リズム生成部において n 番目のステップでの各脚の位相 ϕ_l を次式のように定義し， $\phi_l > 0$ の時は遊脚相， $\phi_l \leq 0$ の時は支持脚相の制御を行うよう腰関節トルク出力部に指令を出力する．

$$\phi_l = \sin(\omega_l t + \psi_l) + \phi_{0l}, \quad \omega_l = \frac{2\pi}{T_l[n]} \quad (8)$$

⁴制御ループのサンプリング時間，例えば，1(ms) 程度の誤差で計測可能．

ここで， $T_l[n]$ ， ω_l は n 番目のステップでの脚 l の周期と角振動数， ψ_l は歩容を生成させるための初期位相⁵， ϕ_{0l} は各脚のデューティ比を与えるオフセットである． $T_l[n]$ は 3.4.3. で述べる DFC により計算される．

3.4.2 腰関節トルク出力部

各脚の腰関節トルク出力部はリズム生成部から脚の位相 ϕ_l を受けとり，その正負により以下のように制御系を切り替える．

$\phi_l > 0$ の時は遊脚相：PD 制御

$$\tau_l(t) = K_p(\gamma_l - \gamma_l^{td}) + K_d\dot{\gamma}_l \quad (9)$$

$\phi_l \leq 0$ の時は支持脚相：一定トルク出力

$$\tau_l(t) = \tau_l^{st}[n] \quad (10)$$

遊脚相の制御で， γ_l^{td} は固定点の情報 (表 1) から得られた遊脚目標着地角度， K_p と K_d は PD 制御ゲインである．支持脚相の制御で， $\tau_l^{st}[n]$ は 3.4.3. で述べる DFC により計算される．

3.4.3 遅延フィードバック制御による固定点への収束

離散力学システム式 (5),(6) の \mathbf{x}, \mathbf{y} として次式を用いる．

$$\mathbf{x}[n] = [T_f[n], T_h[n], \tau_f[n], \tau_h[n]]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{y}[n] = [t_f^{st}[n], t_h^{st}[n]]^T \quad (12)$$

ここで， $t_l^{st}[n]$ は n 番目のステップで接地センサにより計測された脚 l の支持脚期間である．この計測された支持脚期間の変化を用いて，次式のような DFC を考える．

$$T_l[n+1] = T_l[n] - K_{DF.T}(t_l^{st}[n] - t_l^{st}[n-1]) \quad (13)$$

$$\tau_l^{st}[n+1] = \tau_l^{st}[n] - \delta(l)K_{DF.\tau}(t_l^{st}[n] - t_l^{st}[n-1]) \quad (14)$$

$$\delta(l) = \begin{cases} -1, & l = f : foreleg \\ 1, & l = h : hindleg \end{cases}$$

ここで，式 (13) と式 (14) は式 (5) と式 (7) を合わせたもので，それぞれ脚の位相関数の周期への遅延フィードバックと支持脚腰関節トルクへの遅延フィードバックであり， $K_{DF.T}$ と $K_{DF.\tau}$ はそれぞれの遅延フィードバックゲインである．

3.4.4 シミュレーション結果

受動走行の固定点 (表 1) での遊脚着地角度を与え，静止から定常バウンド走行への遷移のシミュレーションを行った．式 (13) と式 (14) の DFC の初期値として， $\{T_f[0], T_h[0], \tau_f[0], \tau_h[0]\} = \{0.20, 0.69, -1.0, 1.3\}$ を用いた．ここでバウンド走行を生成するために DFC の初期値は適切に設定される必要がある．3.4.1. で述べたように ψ_l の

⁵バウンド歩容の場合 $\psi_f = 0, \psi_h = \pi$ ，ブロンク歩容の場合 $\psi_f = \pi, \psi_h = \pi$ となる．ここで，初期位相 0 は遊脚期から π は支持脚期から始まることを意味する．

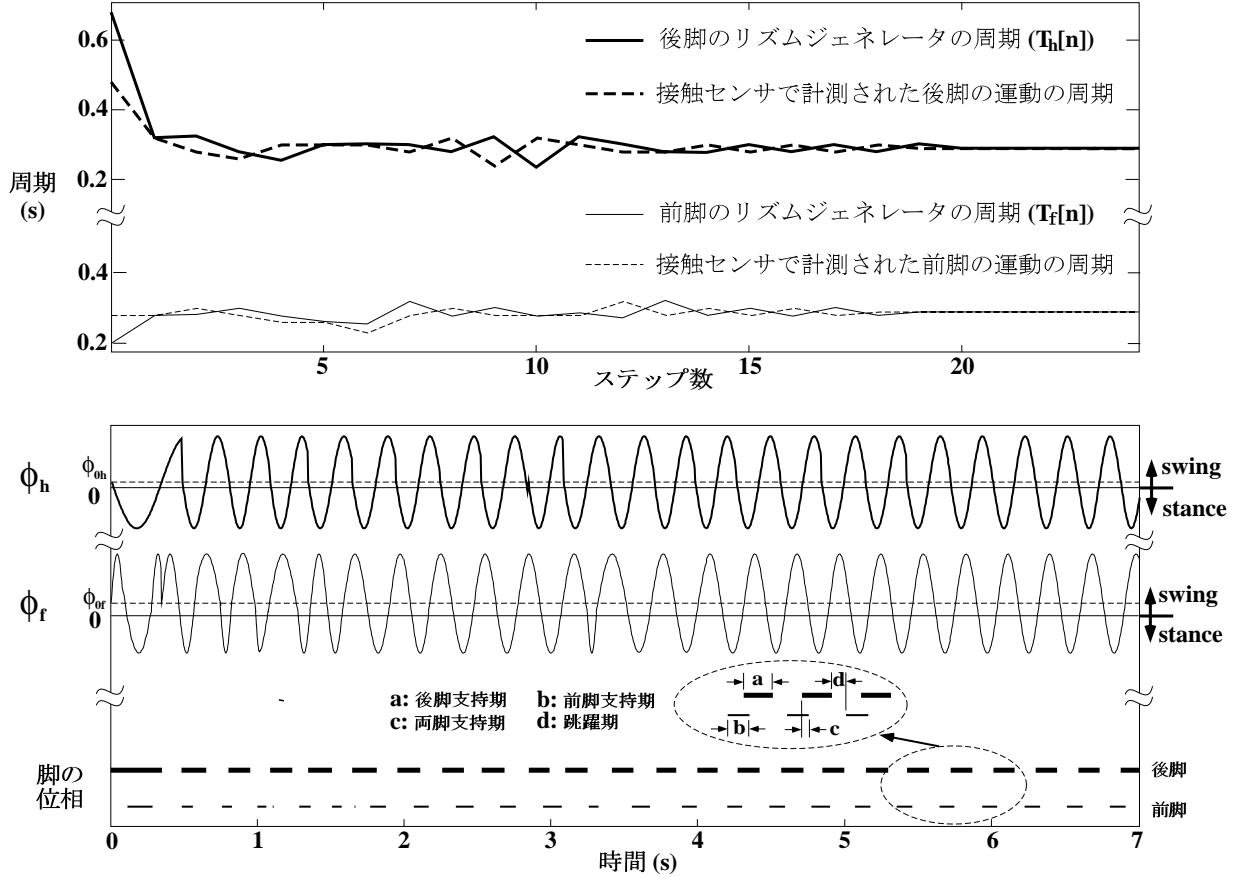


図 2: 静止からバウンド歩容定常走行までの遷移．各ステップの期間は約 0.29(s)

値設定によりシミュレーションは前脚が遊脚期，後脚が支持脚期で始まるが，最初の後脚の支持脚期に系に大きなエネルギーを与えるために $T_h[0], \tau_h[0]$ の初期値は定常状態での値より大きめに取ってある．また提案した DFC において， $x[n]$ から $y[n]$ を求める式 (6) の写像 \mathcal{G} は非常に複雑であり，固定点に漸近収束するゲイン $K_{DF,T}, K_{DF,\tau}$ を解析的に求めることは非常に困難であるので，ここでは試行錯誤的に求めた．

結果として静止状態から定常状態への自律的な遷移が得られた [3]．跳躍最高点での高さや前進速度は準受動走行の固定点 (表 1) とほぼ同じ値が得られた．また，前後脚のつま先の最高点の高さ (クリアランス) はそれぞれ約 3(cm) と 2(cm) であった．エネルギーについては，全質量が胴体存在するモデルを用い遊脚の持つ運動エネルギーを無視すると準受動走行の固定点とほぼ同じ値が得られている．

歩容生成に関しては図 2 において，前後脚ともに 20 ステップあたりでリズム生成部の周期 $T_i[n]$ と接触センサにより計測される運動の周期が一致し，リズム生成部の脚位相 ϕ_i と運動の脚位相がともに同期してバウンド歩容に収束している．また，定常状態での周期，脚間位相差は固定点でのそれらとほぼ一致している．このことはリズム生成部と

実際の運動が式 (13) の DFC により相互に引き込まれ，運動が固定点に収束したことを意味している．

図 3 に式 (13) と式 (14) の DFC に関連する $t_l^{st}[n], T_l[n], \tau_l^{st}[n]$ を示す．計測された支持脚期間の変化を遅延フィードバックすることにより，リズム生成部の周期と支持脚腰関節トルクが収束していることが分かる．特に前後脚の支持脚腰関節トルクの収束値 $-0.32(Nm)$ と $0.62(Nm)$ は 3.3 の目標エネルギー追従制御によって得られた出力トルクとほぼ同じであり，式 (14) の DFC によりまさつや衝突で失われたエネルギーを補償するために最小限必要なトルクに収束していることが分かる．

3.5 不整地走行シミュレーション：高さ 2cm 段差上り

3.4 で提案した手法を用い，定常状態から始めて約 2 秒後に高さ 2cm の段差を上るシミュレーションを行った (図 4)．図 5 において⁶，段差に乗り上げたときに 7 ステップ目から $t_l^{st}[n]$ に変動が生じて DFC が働き，8 ステップ目に長めの後脚支持脚期間 (A) に大きめの後脚腰関節トルク (B) が出力されることにより必要なエネルギーが注入され (図 4 で約 2.3 秒後での跳躍)，過渡状態を経て歩容やトルクなどが 17

⁶ 上図の縦軸で $t_l^{st}[n]$ と $T_l[n]$ ではスケールが異なることに注意．

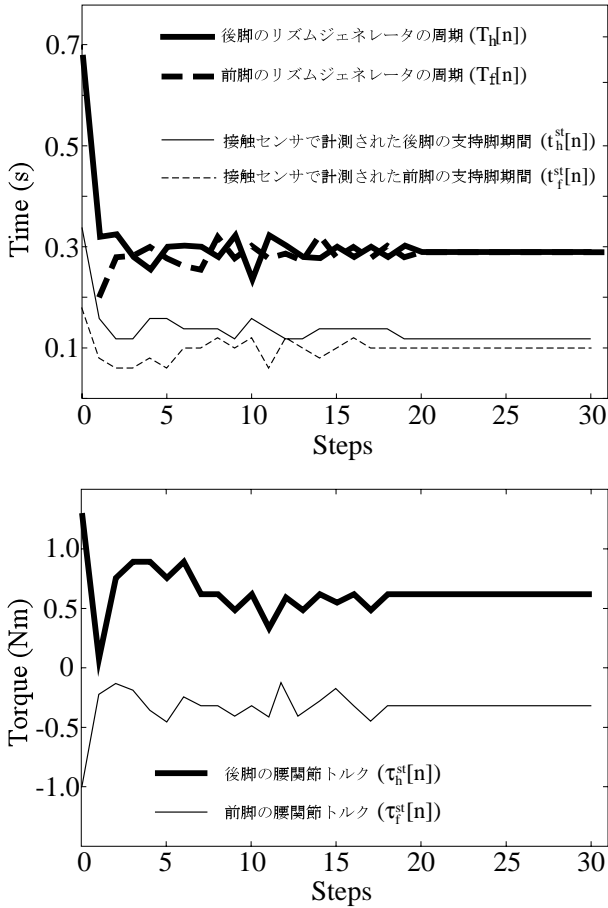


図 3: 静止からバウンド歩容定常走行までの遷移

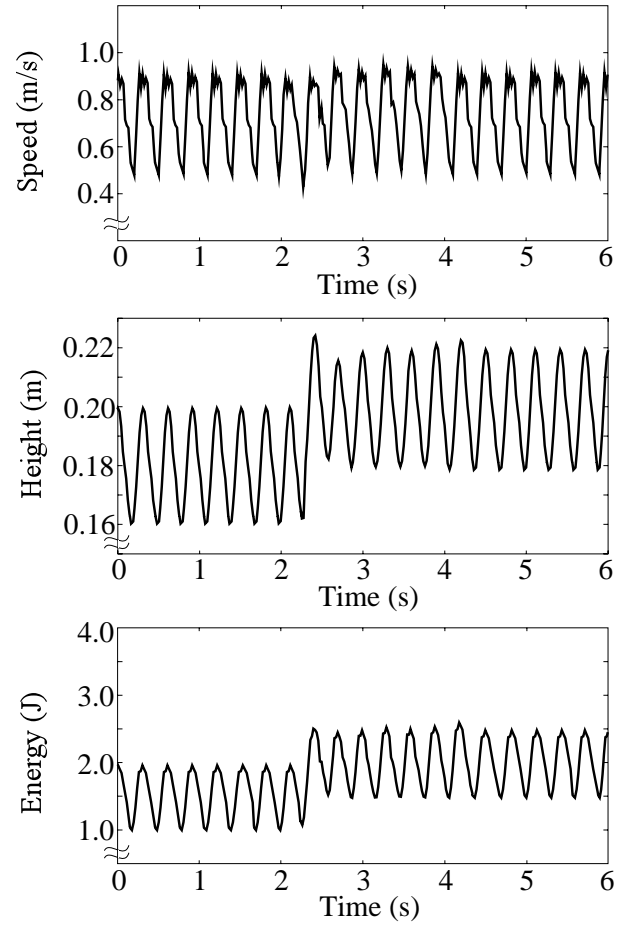


図 4: 高さ 2(cm) の段差越え

ステップ目で初期値に収束していることが分かる。また、図 4 において、DFC により再調整が行われ前進速度、対着地面跳躍高さ、対着地面エネルギーが初期値に収束している⁷ことが分かる。特に、定常状態では CPG はバネ・質量系の固有周期に引き込まれてある意味で受動的に振動しているが、外乱によるバネ・質量系の振動の変化に対して積極的に位相の調節を初め、トルク出力部と共同して必要なエネルギー注入を行い、再度バネ・質量系の固有周期に引き込まれて定常状態に戻っている。

なお、リズムジェネレータや DFC を用いず支持脚期では 3.3 の目標エネルギー追従制御で求めた一定トルクを出力し遊脚期では γ_l^{td} への PD 制御を行う方法で、高さ 2cm の段差を上るシミュレーションを行ったところ、運動は固定点から大きくはずれ最終的には安定なバウンド走行が失われてしまった。これは、対着地面エネルギーにある程度の変化のある外乱に対して自己安定性は十分でないことを示している。

⁷ 対基準面跳躍高さと対基準面エネルギーは高さ 2cm の段差分だけ増加している。

4 おわりに

遅延フィードバックを用いた CPG とトルク発生部を組み合わせた手法が、効率的でかつ適応性を持つ走行運動の生成にも有効であることが示された。特に、接触センサにより実用的な精度で計測可能な支持脚期間を遅延フィードバックに用いた。結果として、過渡状態や不整地適応などの非定常状態において CPG が有効に働き、定常状態ではバネ・質量系という受動ダイナミクスが主に働くという系が、切り換えを必要とせずに一つのシステムで構成できた。これは適応的な振動を発生させる場合の「受動ダイナミクス vs. CPG」という対立をつなぐ点で興味深い。

参考文献

- [1] 土屋：移動知：脳・身体・環境の生み出す知能、計測と制御、44-9、(2005)
- [2] 木村：生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応、計測と制御、42-9、705/711 (2003)
- [3] 張，木村，福岡：DFC を用いた四脚ロボットの不整地走行、ロボティクスシンポジウム予稿集、531/536、(2005)
- [4] 浅野，羅，山北：受動歩行を規範とした 2 足ロボットの歩容生成と制御、日本ロボット学会誌、22-1、130/139 (2004)
- [5] 大須賀，杉本，杉江，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)

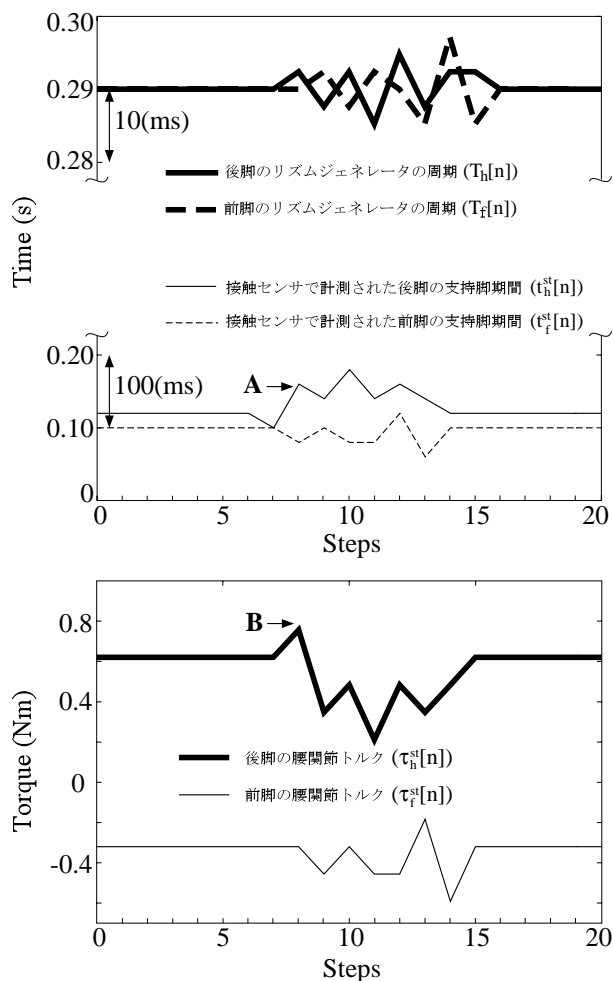


図 5: 高さ 2(cm) の段差越え

- [14] U. Saranli, D.E. Koditschek : Template Based Control of Hexapedal Running, Proc. of ICRA2003, 1374/1379 (2003)
- [15] J.G. Cham, J.K. Karpick, M.R. Cutkosky : Stride Period Adaptation of a Biomimetic Running Hexapod, Int. J. of Robotics Research, 23-2, 141/153 (2004)
- [16] 多賀: 歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15-5, 680/683 (1997)
- [17] 土屋, 辻田: Central Pattern Generator モデルに基づく 4 脚歩行ロボットの歩行制御, 日本ロボット学会誌, 20-3, 243/246 (2002)
- [18] 福岡, 木村: 四足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行 - 神経・機械カップリング系構成法の提案とピッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価 -, 日本ロボット学会誌, 21-5, 569/580 (2003)
- [19] 矢野, 富田: 実環境における 2 足歩行の創発的リアルタイム制御, 日本ロボット学会誌, 23-1, 11/16 (2005)
- [20] H. Cruse : The functional sense of central oscillations in walking, Biol. Cybern, 86, 271/280 (2002)
- [21] K.S. Espenschied, R.D. Quinn, R.D. Beer, H.J. Chiel : Biologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot, Robotics and Autonomous Sys. 18, 59/64 (1996)
- [22] Y. Fukuoka, H. Kimura, A.H. Cohen : Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain based on Biological Concepts, Int. J. Robotics Research, 22-(3,4), 187/202 (2003)
- [23] M.H. Raibert : Legged Robots That Balance, MIT Press (1985)

[著者紹介] 木村 浩 きむら ひろし (正会員)

1961 年 2 月 5 日生 . 83 年東京大学工学部機械工学科卒業 . 88 年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程修了 . 工学博士 . 東北大学工学部助手などを経て, 現在, 電気通信大学情報システム学研究科助教授 . 96 年カーネギーメロン大学客員研究員 . 脚式ロボットの歩行・走行などの研究に従事 . 1989, 2003 年度日本ロボット学会論文賞, 2004 年船井情報科学振興賞, SAB2004 Best Technical Paper Award などを受賞 . 日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE などの会員 .

- [6] 細田: 非限定環境に適応する二足歩行ロボット, 計測と制御, 44-9, (2005)
- [7] 小野, 岡田: 自励振動アクチュエータに関する研究 (第 3 報, 自励駆動による二足歩行機構), 機論 C, 60-579, 3711/3718 (1994)
- [8] K. Ono, T. Furuichi, R. Takahasi : Self-Excited Walking of a Biped Mechanism with Feet, Int. J. Robotics Research, 23-1, 55/68 (2004)
- [9] 木村: 生物規範型歩行ロボット制御 - 筋骨格系と神経系のカップリング -, 計測と制御, 40-6, 441/447 (2001)
- [10] R.J. Full, D.E. Koditschek : Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land, J. of Experimental Biology, 202, 3325/3332 (1999)
- [11] S. Grillner : 脊椎動物の移動の神経ネットワーク, 日経サイエンス 1996 年 3 月号, 76/83 (1996)
- [12] A. Seyfarth, H. Geyer, M. Gunther, R. Blickhan : A movement criterion for running, J. of Biomechanics, 35, 649/655 (2002)
- [13] I. Poulakakis, E. Papadopoulos, M. Buehler : On the Stable Passive Dynamics of Quadrupedal Running, Proc. of ICRA2003, 1368/1373 (2003)