

遅延フィードバックを用いた四脚走行制御

電気通信大学 情報システム学研究科
張 祖光 木村 浩 福岡 泰宏

Quadruped Running Control Using Delayed Feedback

Z.G. Zhang H. Kimura Y. Fukuoka

Graduate School of Information Systems, Univ. of Electro-Communications

Abstract: The purpose of this study is to find the simple control method to generate the steady running of a quadruped robot autonomously with good energy efficiency and adaptability against disturbances such as irregularity of terrain. In this paper, we first consider the fixed point of the quasi-passive running of a sagittal quadruped model with spring mechanism at knee joint. In running of a real robot, when mass of legs and friction at joints are small, we can consider friction and collision be disturbances on the quasi-passive running around the fixed point, and find the control method to cancel such disturbances. Especially, since it is difficult to measure the total energy of running in a real robot precisely, we propose the delayed feedback control (DFC) using the stance phase period measured by the contact sensor with good precision. We use DFC not only for the stabilization of running around the fixed point, but also for the transition from standing to steady bounding. When a robot runs up a step, energy based on the touch down plane is decreased. Such disturbance with energy loss can be canceled by DFC. We employ the touchdown angle adjustment for a quadruped robot to run up and down a shallow slope. We carry out the simulations to show that the proposed simple method is effective to generate the running with good energy efficiency and autonomous adaptability against disturbances. MPEG footage of those simulations can be seen at: <http://www.kimura.is.uec.ac.jp/running>.

Key Words: Quadruped Robot, Running, Irregular Terrain, Delayed Feedback, CPG

1 はじめに

脚式ロボットの走行研究としては Raibert ら [1] の一脚、二脚、四脚ロボット研究がよく知られている。Raibert らの研究の優れている点は機械システムデザインの良さもさることながら、走行制御を跳躍高さ、前進速度、胴体姿勢の制御に分離し、それぞれの運動がリミットサイクルを構成するような簡単な制御則を与えた点にある。さらに Raibert らは路面が既知であるとして簡単な不整地走行も実現している [2]。ただし、なぜそのような簡単な制御系が跳躍・走行運動を安定化できるかは必ずしも明らかではなかった。さらに、自立型脚式走行ロボットの開発、よりエネルギー効率の良い走行運動の実現、不整地への自律適応などが課題として残された。

我々は簡単な制御を用いたエネルギー効率の良い自律不整地走行の実現を目指しており、現在、考慮すべき点として、以下を挙げている。

- (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[3]~[7] 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。

本稿では以上を考慮しながら、段差や坂などの不整地走行シミュレーション結果について述べる。

2 準受動走行解析とエネルギー安定化制御

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し、CPG として働く。

2.1 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

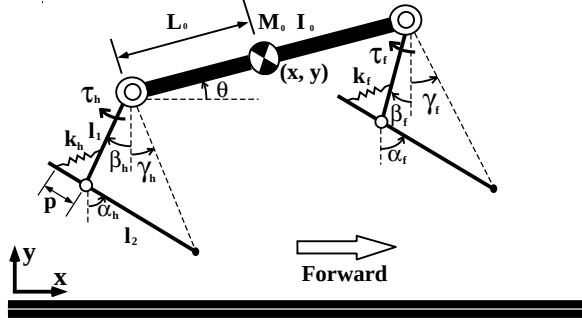


Fig. 1: 四脚ロボットの矢状面内モデル

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。

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、一周期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。

2.2 準受動走行と自己安定性

2.2.1 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_l^{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 $\mathbf{p} = [y_p, \theta_p, \dot{x}_p, \dot{\theta}_p]^T$ を参照点とし、前後脚の遊脚着地角度 $\mathbf{q} = [\gamma_f^{td}, \gamma_h^{td}]^T$ を入力として、 n 歩目の参考点 $\mathbf{p}[n]$ と入力 $\mathbf{q}[n]$ に関して次の離散力学システム

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

を考えたとき、平衡状態 $\mathbf{p}^*, \mathbf{q}^*$ は次式を満たす。

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

ここで平衡状態 $\mathbf{p}^*, \mathbf{q}^*$ で行列 $\mathbf{J}$

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

のすべての固有値の絶対値が1より小さいとき、 $\mathbf{p}^*$ 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 [8, 9]。以下、本論文では $\mathbf{p}^* = [0.2, 0, 0.95, -1.52]^T$ を代表的な固定点¹ と考える (表1)。

¹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 $\mathbf{p}^* = [0.2, 0, 0.95, -1.52]^T$ 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
$\mathbf{J}$ の固有値	0.0003, 0.0005, -0.032, 0.0213		

2.2.2 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 $\mathbf{p}^*$ に対応する $\mathbf{q}^*$ に遊脚着地角度を設定すれば、運動は $\mathbf{p}^*$ まわりに自己安定化される [10]。

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、 $\mathbf{q}^*$ に遊脚着地角度を設定するだけで運動が固定点 $\mathbf{p}^*$ に収束する場合、系は自己安定性を持つと定義する [8]。

2.3 エネルギー安定化制御

実際のロボット走行においては、2.2.2. 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 [8, 11, 12] 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 [13]。

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

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。 $\mathbf{p}^*, \gamma_l^{td}, E^*$ とし表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。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²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 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 [14]。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 $\mathbf{y}$ 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 [14] 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 で接地センサにより精度良く計測される支持脚期間³[12] を遅延フィードバックする方法を提案する。

3 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・前進速度を与える固定点 $\mathbf{p}^*$ 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 $\mathbf{q}^*$ 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。

3.1 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。

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

²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。

³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⁴、 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 3.3. で述べる DFC により計算される。

3.2 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 3.3. で述べる DFC により計算される。

3.3 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。

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

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

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

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 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。3.1. で述べ

⁴バウンド歩容の場合 $\psi_f = 0, \psi_h = \pi$ 、プロンク歩容の場合 $\psi_f = \pi, \psi_h = \pi$ 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。

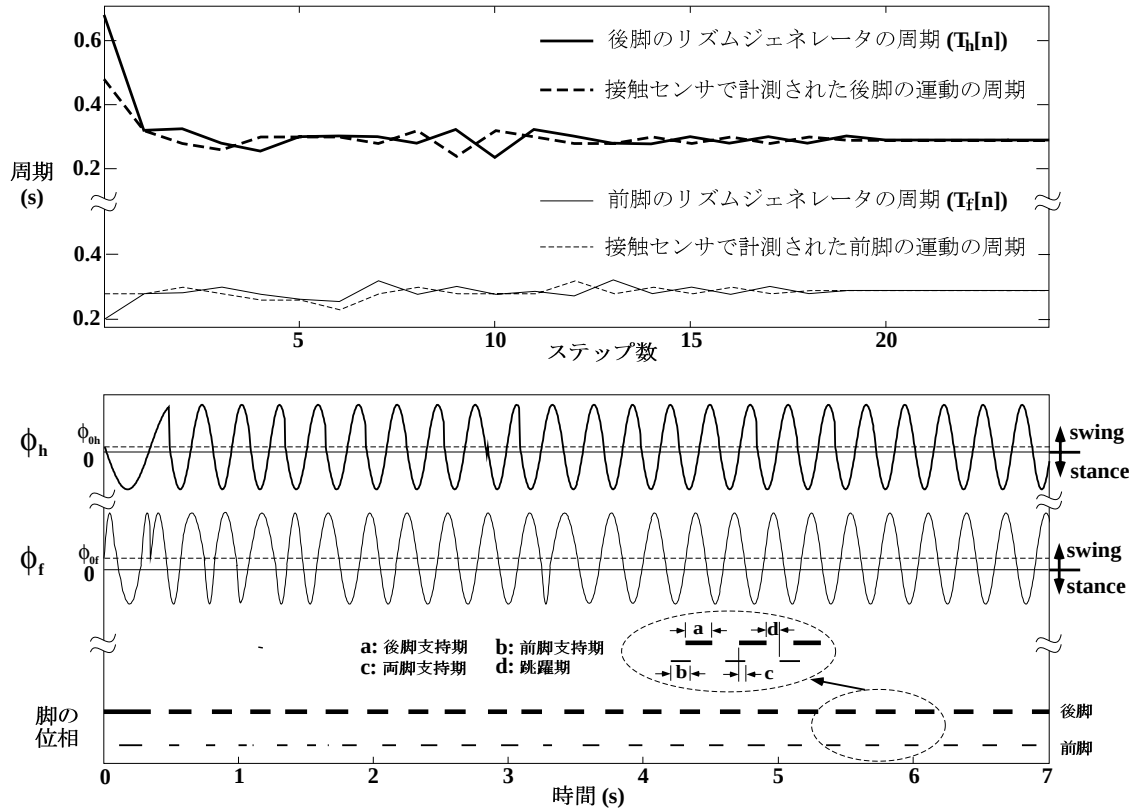


Fig. 2: 静止からバウンド歩容定常走行までの遷移. 上図: 前後脚のリズムジェネレータ周期と実際の運動周期の比較. 下図: 前後脚のリズムジェネレータ出力位相と実際の脚位相の比較. 各ステップの期間は約 0.29(s)

たように ψ_l の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。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、全質量が胴体に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 $T_l[n]$ 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_l 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 2.3 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。

4 不整地適応

3 で提案した DFC を用いた手法では、歩容を生成し系にエネルギーを注入することができるので、一時的な外乱を与える不整地への自律的な適応は十分可能と考えられる。実際に、定常状態から始めて高さ 2cm の段差を上るシミュレーションにおいて、以下のことが示されている [15]。

- 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始め、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

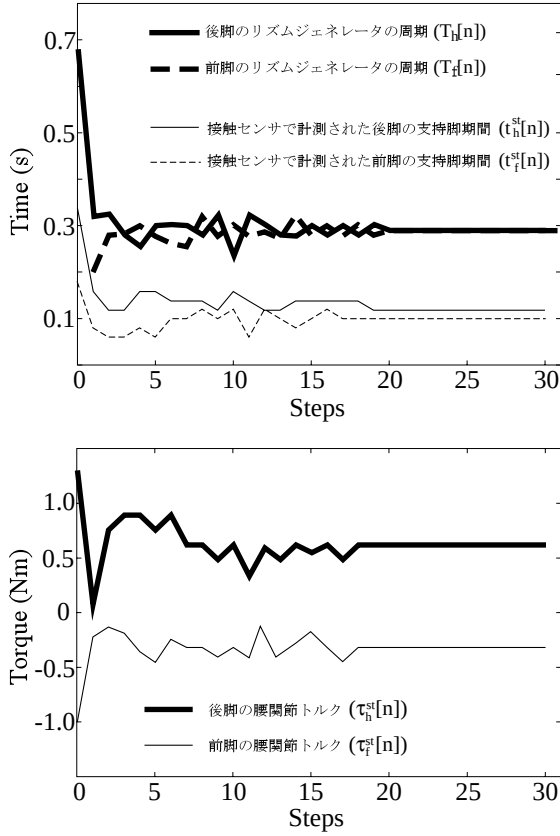


Fig. 3: 静止からバウンド歩容定常走行までの遷移. 接触センサで計測された支持脚期間 (上図・細線) と, DFC により調節されたリズムジェネレータ周期 (上図・太線) と支持脚腰関節トルク (下図).

の固有周期に引き込まれて定常状態に戻る.

しかし, 坂の上下のように対着地面位置エネルギーが定常的に増減する場合や大きな障害物を跳び越える場合には, 遊脚着地角度を変えて別の固定点に遷移させる [16] 制御が必要となる. ここでは, 以下のように目標遊脚着地角度を胴体の傾きに応じて変化させることにより, 対着地面位置エネルギーが定常的に増減する場合の適応を実現する.

$$\gamma_l^{td}[n] = \gamma_{l0}^{td} + \delta(l)K_{td}\theta_f^{td}[n-1], \quad (15)$$

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

ここで, $\gamma_l^{td}[n]$ は n^{th} ステップでの目標遊脚着地角度である, γ_{l0}^{td} は基準となる目標遊脚着地角度であり, 前後脚に対して $[\gamma_{f0}^{td}, \gamma_{h0}^{td}] = [0.524, 0.838]$ が設定されている. $\theta_f^{td}[n-1]$ は $(n-1)^{th}$ ステップで前脚が着地したときの胴体のピッチ軸まわりの角度であり, K_{td} はゲインである.

式 (15) の目標遊脚着地角度調節を用いて 8 度の坂の

上下を行ったシミュレーション結果を示す. Fig. 4 において, 坂を上るときには前進速度が低下し坂を下るときには前進速度が増加しながら, 坂の上下に成功していることが分かる. また, 胴体の角度に応じた目標遊脚着地角度 (Fig. 5), および, DFC により調節されたリズムジェネレータ周期と支持脚腰関節トルク (Fig. 6) が示されている. 特に Fig. 6 において, 坂の上りでは後脚トルクにより推進してポテンシャルエネルギーを注入し, 下りでは前脚によりブレーキをかけてポテンシャルエネルギーを発散している様子が分かる.

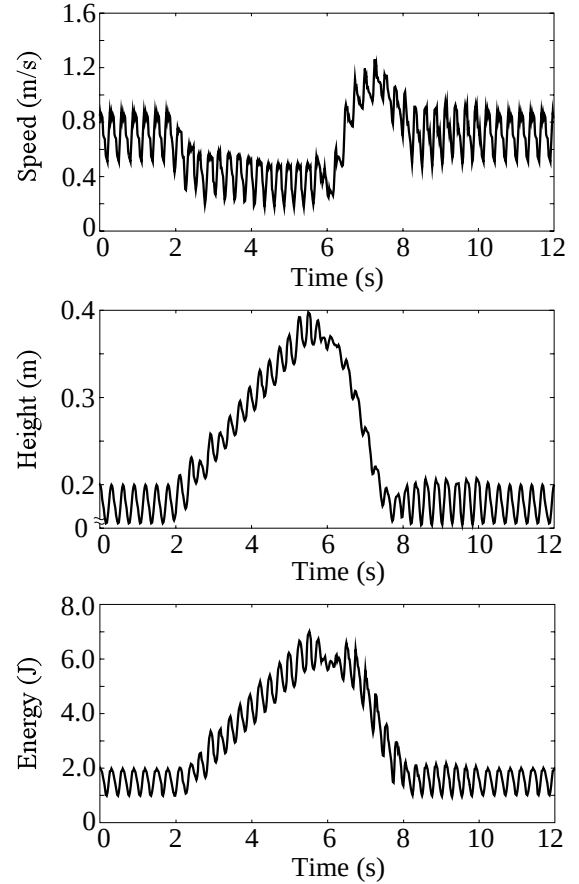


Fig. 4: 8 度の坂の上下時の対基準面エネルギー, 対基準面胴体高さ, 前進速度

5 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一つのシステムで構成できた. また, 目標遊脚着地角度調節を用いて坂の上下走行を実現できた.

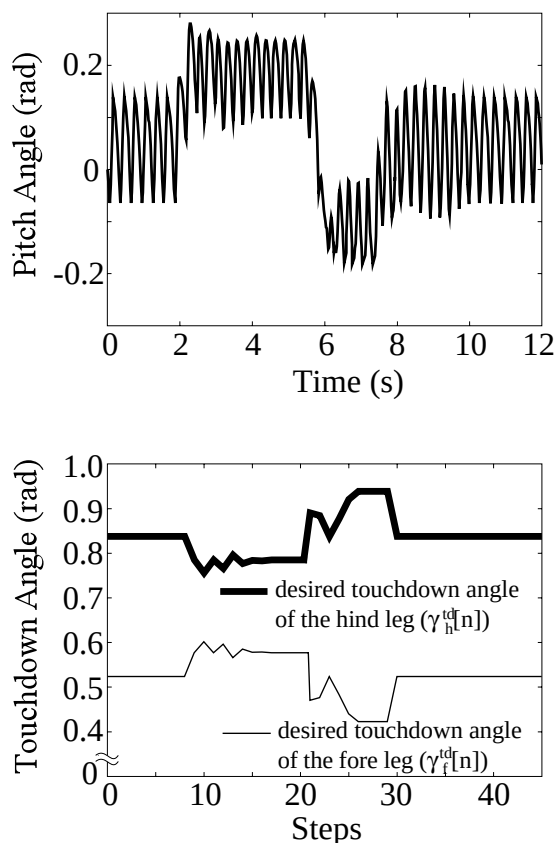


Fig. 5: 8 度の坂の上下時の胴体角度 (上図) と目標遊脚着地角度 (下図)

参考文献

- [1] M.H. Raibert : Legged Robots That Balance, MIT Press (1985)
- [2] J.K. Hodgins and M.H. Raibert: Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion, IEEE trans. on Robotics and Automation, 7-3, 289/298 (1991)
- [3] 多賀：歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15-5, 680/683 (1997)
- [4] 福岡, 木村：四足ロボットの生物規範型不整地適応歩行 - 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)
- [5] S. Aoi, K. Tsuchiya, K. Tsujita : Turning Control of a Biped Locomotion Robot using Nonlinear Oscillators, Proc. of ICRA2004, 3043/3048 (2004)
- [6] 藤井, 石黒, P.E.Hotz : 多型的な CPG 回路モデルによる 2 脚ロボットの長時間行動遷移, 日本ロボット学会誌, 22-4, 56/62 (2004)
- [7] 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)
- [8] I. Poulakakis, E. Papadopoulos, M. Buehler : On the Stable Passive Dynamics of Quadrupedal Running, Proc. of ICRA2003, 1368/1373 (2003)
- [9] Z.G. Zhang, Y. Fukukoka and H. Kimura : Stable Quadrupedal Running based on a Spring-Loaded Two-segment Legged Model, Proc. of ICRA2004, 2601/2606 (2004)

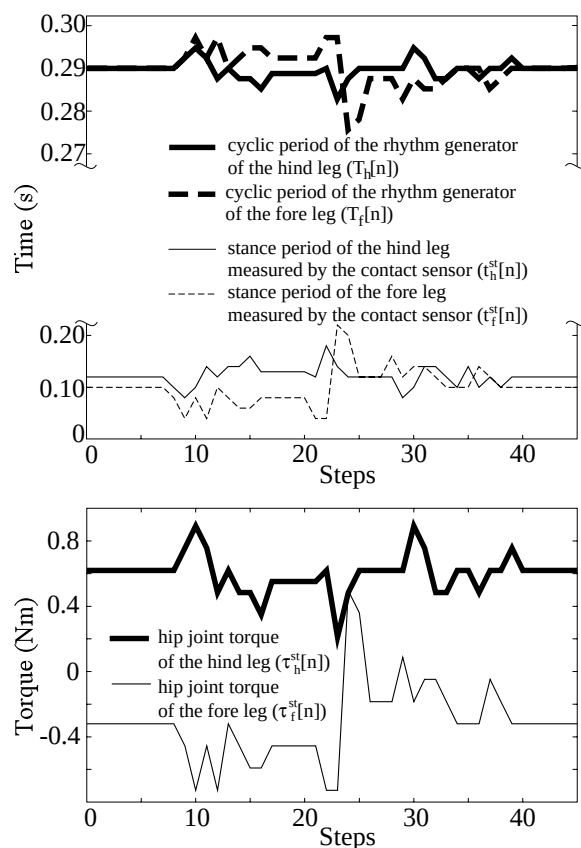


Fig. 6: 8 度の坂の上下時の接触センサで計測された支持脚期間 (上図・細線) と DFC により調節されたリズムジェネレータ周期 (上図・太線), および, 支持脚腰関節トルク (下図).

- [10] A. Seyfarth, H. Geyer, M. Gunther, R. Blickhan : A movement criterion for running, J. of Biomechanics, 35, 649/655 (2002)
- [11] U. Saranli, D.E. Koditschek : Template Based Control of Hexapedal Running, Proc. of ICRA2003, 1374/1379 (2003)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] Z.G. Zhang, H. Kimura, Y. Fukukoka : Autonomously Generating Efficient Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control, Advanced Robotics, (accepted) (2006)
- [16] S.H. Hyon and T. Emura : Energy-preserving control of a passive one-legged running robot, Advanced Robotics, 18-4, 357/381 (2004)