

四脚ロボットの遅延フィードバックによる不整地走行

電気通信大学 張 祖光 木村 浩 福岡 泰宏

Running of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Using Delayed Feedback Control

Zu Guang ZHANG Hiroshi KIMURA Yasuhiro FUKUOKA
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 propose the delayed feedback control (DFC) using the stance phase period measured by the contact sensor with good precision. 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, Bounding Gait, Quasi-passive Running, Fixed Point, Self-stabilization, Rhythm Generator, Delayed Feedback Control (DFC)

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 らの研究の成功に刺激されて、バネを持つ脚式ロボットの跳躍・走行実験が様々に行われてきた [2][3]。Raibert らの制御手法の有効性を示すために、バネを持つ脚式走行の安定化を跳躍と接地という相変化をともなう非線形力学系の安定なリミットサイクル構成問題と捉え、ポアンカレマップ上の固定点(fixed point)の安定性について解析した研究が多くなされている [4]~[8]。そのなかで Blickhan ら [5] は SLIP(Spring-Loaded Inverted Pendulum) と呼ばれる一脚モデルを用い、準受動走行の安定な固定点では、胴体速度や跳躍高さなどをセンサで計測して陽に制御を行わなくても遊脚着地角度がある一定値に保つだけで運動が外乱に対して安定化されることを示し、自己安定化(self-stabilization)と名付けた。ただし、四脚ロボットの不整地走行の実現のためには自己安定化だけでは不十分で、センサ情報を用いた安定化が必要と考えられる。

本研究では上記のような問題点に対して、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導出を目指す。本論文ではそのためにまず最初に、膝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を考える。また、運動の力学特性をうまく利用してある初期状態から固定点まわりの定常運動に遷移させることを考える。更に、段差を上がったときのように着地面を基準にしたエネルギーに損失のある一時的な外乱に対しては遅延フィードバック制御が有効であることを示す。

2 走行ロボットモデルとバウンド歩容

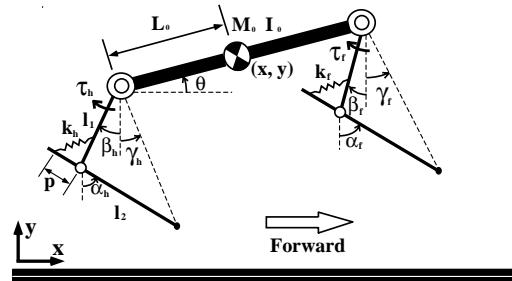


図 1: The sagittal plane model of a quadruped robot.

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。このモデルにおいて、膝関節は常に受動関節である。3.1 で述べる準受動走行では、固定点での固有値解析などを行うために、図 1 で脚質量や関節での摩擦がゼロという単純な 2 次元モデルを用い、運動方程式をたて、MATLAB によるシミュレーションを行う。一方、3.2 以降で述べる能動走行では、できるだけ実際のロボットの走行に近い運動を考えるために脚の質量・慣性モーメントや関節の粘性摩擦係数を与え、市販の力学シミュレー

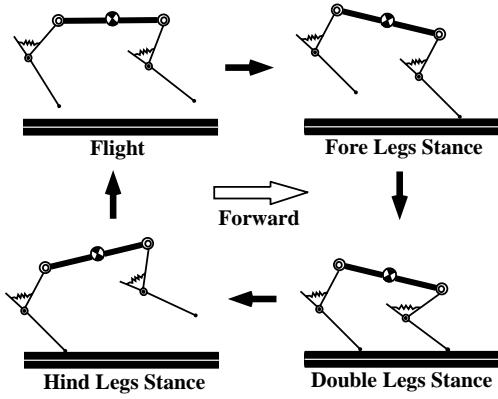


図 2: Phase transitions of the sagittal plane bounding gait.

タ Working Model と C 言語で記述された制御部を組み合わせたシステムで 3 次元シミュレーションを行う。本論文では四脚走行に、図 2 に示すようなバウンド歩容を用いる。

3 定常走行の安定化

3.1 摩擦と衝突が無い場合の準受動走行

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 $p = [y_p, \theta_p, \dot{x}_p, \dot{\theta}_p]^T$ 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。

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

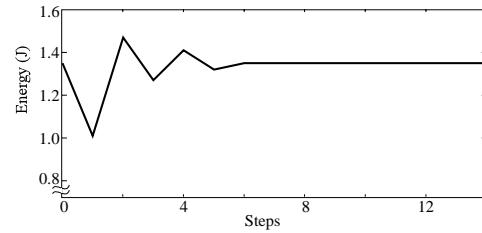
ここで平衡状態 p^* , q^* で行列 J

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

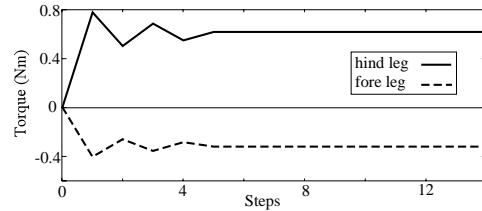
のすべての固有値の絶対値が 1 より小さいとき、 p^* は漸近安定な固定点となる。ここでは、ある初期値から始めて、固定点 p^* と入力 q^* の組合せを Newton – Raphson 法により探索する。本論文では、表 1 に示す固定点を目標状態として用いる。

表 1: The characteristics of the fixed point

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)	1.36	cyclic period (s)	0.292
eigen values of J	0.0003, 0.0005, -0.032, 0.0213		



(a) Energy of the bounding quadruped at the apex



(b) Hip joint torque in the stance phase

図 3: Results of the energy referenced control.

準受動走行はエネルギーが保存される運動である。遊脚着地角度を q^* に設定すれば運動が固定点 p^* まわりに漸近安定であるため、跳躍高さや前進速度をセンサで計測して遊脚着地角度を調節するなどの制御 [1] の必要は無く、制御系を非常に簡単にすることができます。

3.2 摩擦と衝突がある場合の目標エネルギー追従制御の適用

準受動走行はあくまでも理想的な運動であり、実ロボットの制御では、質量・慣性モーメントや関節粘性摩擦を持つ遊脚を目標遊脚着地角度まで制御し、かつ、摩擦や衝突で失なわれたエネルギーを補償する必要がある。

浅野ら [9] は平面二脚ロボットの平地歩行において、受動歩行モデルから計算される目標エネルギー軌道に系のエネルギーが追従するようにトルクを与える「目標エネルギー軌道追従制御 (Energy Referenced Control)」を提案している。ここでは、準受動走行の固定点から計算される目標エネルギーに跳躍最高点での系のエネルギーが追従するようにトルクを与える「目標エネルギー追従制御」を考える。

目標エネルギー追従制御を行った際の系のエネルギーと支持脚腰関節トルクを図 3 に示す。ここで、初期状態から摩擦と衝突により系のエネルギーは一旦減少するが、目標エネルギー追従制御によりエネルギーが再注入され、6 ステップ目でエネルギーが回復し定常状態になっていることが分かる。また、エネルギー以外の状態も初期値に収束し、固定点と同様な定常バウンド走行が実現された。従って、図 3-(b) の定常状態での支持脚腰関節トルク $\tau_f^{st} = -0.32(Nm)$ と $\tau_h^{st} = 0.62(Nm)$ は、各ステップで摩擦と衝突により失な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。

3.3 摩擦と衝突がある場合の遅延フィードバック制御の適用

遅延フィードバック制御 (Delayed Feedback Control: DFC) とは、次の離散力学システム

$$x[n+1] = \mathcal{F}(x[n], u[n]) \quad (4)$$

$$y[n] = \mathcal{G}(x[n]) \quad (5)$$

の不安定平衡点 x^* を

$$u[n] = \mathcal{K}(y[n] - y[n-1]) \quad (6)$$

という制御則で安定化するものである [10]。この DFC 手法においては式 (6) に示すように、フィードバック項は差分形式で十分であるので、エネルギーなどの目標値を必要としない安定化制御を達成することが期待される。

大須賀ら [10] は、DFC の 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。また、玄ら [8] は、同様に系全体のエネルギー変化を観測することにより固定点に収束させる遊脚着地角度を DFC で調節するという方法を用い、脚質量、摩擦、衝突が無い簡単なモデルを用い平地で平面一脚ロボットの準受動歩行をシミュレートした。

4 四脚ロボットのバウンド走行実現のための考察

4.1 従来手法の問題点

準受動歩行の固定点まわりのバウンド走行の実現を考えた時、3.2 と 3.3 で述べた従来手法においては以下のようないくつかの問題点があげられる。

- (a) 目標エネルギー追従制御では目標エネルギーが必要であり、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実ロボット制御において適切であるかどうかという問題もある。
- (b) ロボットの走行制御において、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・ドリフトの問題があり、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。
- (c) ロボット実験においては静止状態から定常状態に遷移させるメカニズムが必要である。

本論ではこれらの問題を解決するために、以下に述べるように支持脚期間の変化を遅延フィードバックする方法を提案する。

4.2 センサ特性を考慮したと遅延フィードバック制御によるエネルギー調節

Cham ら [7] は、六脚ロボットの不整地走行における系のエネルギー安定化制御について、胴体傾斜角度を角速度センサなどで精度良く検出することが困難であるという理由から、胴体傾斜角度を用いたトルク調節よりも接地センサを用いたエネルギー入力期間の調節の方が実装し易いと述べている。式 (6) の DFC は系のエネルギー安定化制御であるが、4.1 で述べたようにセンサの特性から走行運動のエネルギーを精度良く求めることが困難であるため、本論文では y としてエネルギーではなく Cham らと同様に接地センサにより精度良く計測される支持脚期間を用いる。

4.3 バウンド走行のための歩容生成とエネルギー注入

バウンド走行の静止状態から定常状態への遷移の問題は端的にいえば、歩容（各脚のリズムと脚間位相差）生成とエネルギー注入の問題となり、この二つは相互に深く関連している。

3.2 と 3.3 で述べたように、静止ではないある初期運動状態が与えられたときに定常状態に収束する制御が、浅野らの研究では系のエネルギーのフィードフォワードとフィードバックの組合せで、大須賀ら、玄らの研究では、系のエネルギー変化のフィードバックのみで実現され、運動のリズムを陽に与えるリズム発生部は必要でなかった。また、Buehler ら [6] はバネを持つ四脚ロボット Scout-II において、支持脚が掃引角に達するまで支持脚腰関節に一定トルクを発生し、遊脚を目標着地角度に PD 制御する簡単な手法で、リズム発生部無しでバウンド走行の静止状態から定常状態への遷移を実現している。

しかし本研究では、静止状態から掃引角や一定トルクなどのパラメータを必要とせずにエネルギー効率に優れた準受動歩行の固定点へ収束させるため、さらに後述する支持脚腰関節トルク調節と組み合わせて不整地などの外乱に対するロバスト性を上げるために、制御系にリズム発生部が必要と考える。ただし、定常状態になればリズムは主にバネにより生成されるので、制御系のリズム発生部の役割は非常に小さくなると考えられる。

結局、歩容生成とエネルギー注入は、制御系のリズム発生部と支持脚腰トルク発生部に 4.2 で述べた支持脚期間変化を遅延フィードバックすることにより行われ、結果として運動は準受動歩行の固定点に収束する。

5 静止から定常バウンド走行への遷移

最も望ましい制御系は、固定点の情報を用いることなく、例えば与えられた跳躍最高点高さと前進速度を満たす未知の固定点に静止状態から遷移させることができるものである。しかし、遊脚着地角度 $q = [\gamma_f^{td}, \gamma_h^{td}]^T$ によって収束する固定点が異なることから、ここではある跳躍最高点高さ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。

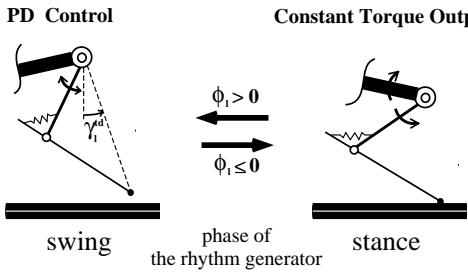


図 4: Switching of the hip joint controller according to the output phase: ϕ_l of the rhythm generator.

5.1 脚相生成とトルク出力

5.1.1 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（図 4）。

$$\phi_l = \sin(\omega_l[n]t + \psi_l) + \phi_{0l}, \quad \omega_l[n] = \frac{2\pi}{T_l[n]} \quad (7)$$

ここで、 $T_l[n]$ 、 $\omega_l[n]$ 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、 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 5.2 で述べる DFC により計算される。

5.1.2 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（図 4）。

$\phi_l > 0$ の時は遊脚相：PD 制御

$$\tau_l(t) = -K_p(\gamma_l - \gamma_l^{td}) - K_d\dot{\gamma}_l \quad (8)$$

$\phi_l \leq 0$ の時は支持脚相：一定トルク出力

$$\tau_l(t) = \tau_l^{st}[n] \quad (9)$$

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 5.2 で述べる DFC により計算される。

5.2 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 (4), (5) の x, y として次式を用いる。

$$x[n] = [T_f[n], T_h[n], \tau_f[n], \tau_h[n]]^T \quad (10)$$

$$y[n] = [t_f^{st}[n], t_h^{st}[n]]^T \quad (11)$$

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。4.2 でも述べたように、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。

$$T_l[n+1] = T_l[n] - K_{DF.T}(t_l^{st}[n] - t_l^{st}[n-1]) \quad (12)$$

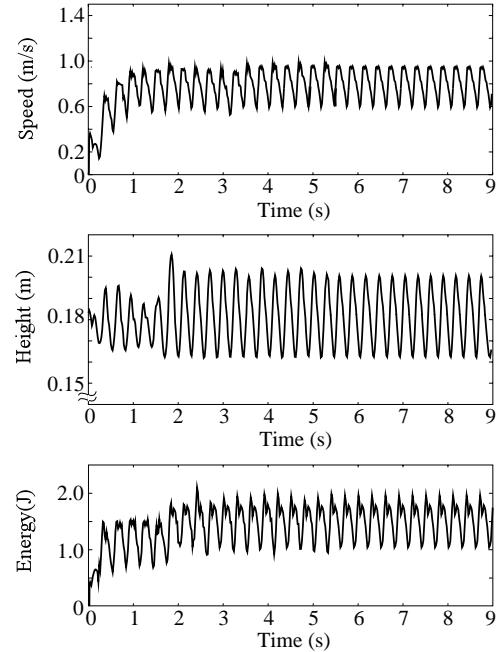


図 5: DFC in the transition from standing to steady bounding.

$$\tau_l^{st}[n+1] = \tau_l^{st}[n] - \delta(l)K_{DF.\tau}(t_l^{st}[n] - t_l^{st}[n-1]) \quad (13)$$

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

ここで、式 (12) と式 (13) は式 (4) と式 (6) 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。

ここで提案した DFC において、 $x[n]$ から $y[n]$ を求める式 (5) の写像 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、5.3 のシミュレーションにおいては試行錯誤的に求めた。

5.3 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、表 2 に示す制御系のパラメータを用いて、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 (12) と式 (13) 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

表 2: The parameter values of the controller used in simulations.

parameters	value	parameters	value
ψ_f	0	ψ_h	π
ϕ_{0f}	0.16	ϕ_{0h}	0.09
γ_f^{td} (rad)	0.524	γ_h^{td} (rad)	0.838
$K_{DF.T}$	0.12	$K_{DF.\tau}$	6.8
K_p (N·m/rad)	1.2	K_d (N·ms/rad)	0.02

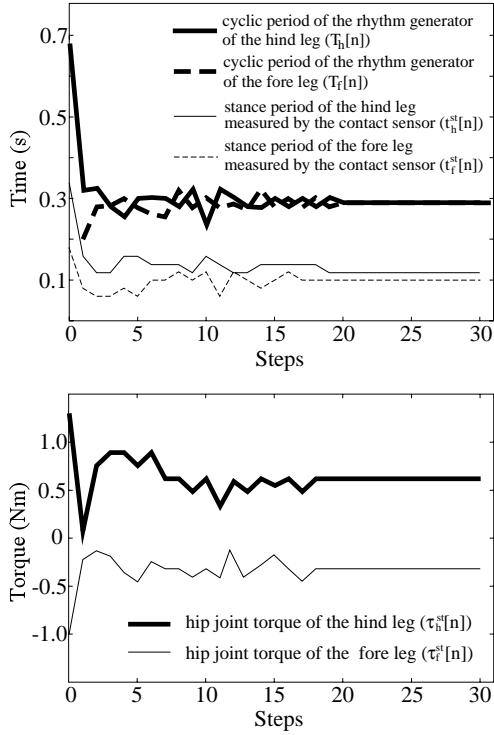


図 6: DFC in the transition from standing to steady bounding.

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。5.1 で述べたように 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。

図 5 に前進速度、跳躍高さ、系の対基準面エネルギーを示す。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ている。図 5 のエネルギーの計算では遊脚の持つエネルギーも考慮しているので、跳躍最高点でのエネルギー値：約 1.4(J) は準受動走行の固定点での値と少し異なっているが、3.2 と同様に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ほぼ同じ値が得られる。

図 6 に式 (12) と式 (13) の DFC に関する $t_i^{st}[n], T_i[n], \tau_i^{st}[n]$ 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 3.2 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(図 3)とほぼ同じであり、式 (13) の DFC により摩擦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。

6 定常状態での外乱に対する安定性

5 で提案した手法の有効性を示すために、定常状態での外乱に対する安定性をシミュレーションにより確認した。

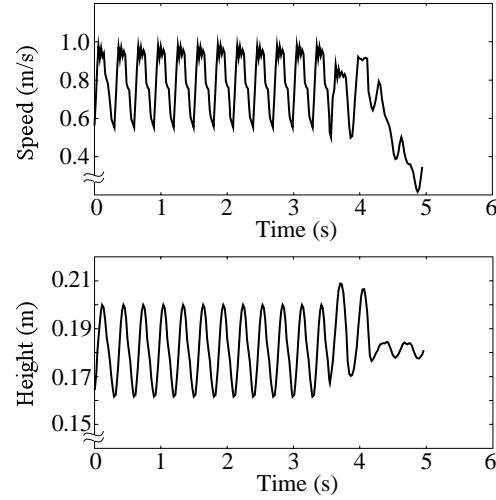


図 7: Bounding up a step 2 (cm) in height without DFC.

摩擦や衝突によるエネルギー損失がある場合でも自己安定化が働くことを示すために、固定点(表 1)から定常運動を始めて、2 秒後の跳躍期に後脚の遊脚着地角度に $0.034(rad)$ (約 2°) の外乱を一回だけ加えたシミュレーションを行った。結果として、摩擦や衝突によるエネルギー損失がある場合でも、対着地面エネルギーに変化のない外乱に対して自己安定化は有效地に働き、胴体高さや前進速度をセンサにより計測することなく遊脚着地角度を一定に保つことにより胴体高さや前進速度は一定に保たれることが示された。

同じ制御を行い、対着地面エネルギーが減少する場合として、定常状態から始めて約 3.5 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 7において、歩容の乱れや対着地面エネルギーの減少に対するフィードバックがないために、運動は固定点から大きくはずれ最終的に安定なバウンド走行が失われている。このように、対着地面エネルギーに変化のある外乱に対して、自己安定化は十分でなく、歩容の調節とエネルギーの再注入により固定点に運動を復帰させる制御が必要となる。

5 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 8)。図 9において、段差に乗り上げたときに 7 ステップ目から $t_i^{st}[n]$ 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 8 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 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 8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ことが分かる。

本論文で提案した 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。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

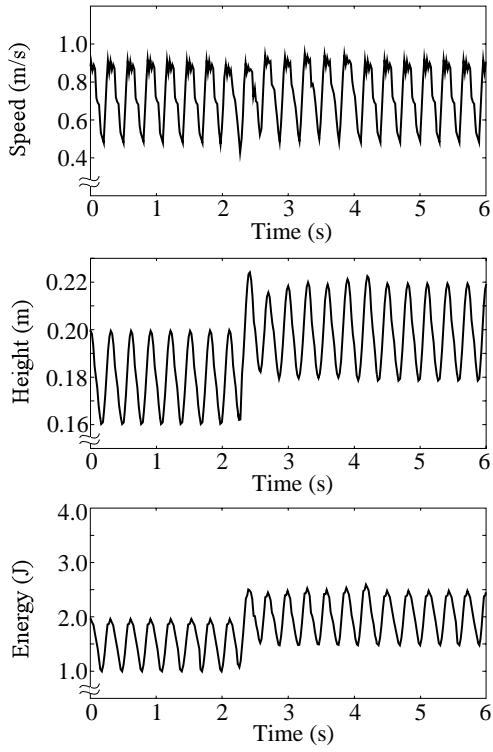


図 8: Bounding up a step 2 (cm) in height with DFC.

減する場合や大きな障害物を飛び越える場合には、遊脚着地角度を変えて別の固定点に遷移させる [8] 制御が必要となる。

7 おわりに

本論文ではバネを持つ四脚ロボットのバウンド走行において、準受動走行の固定点の情報として各脚の遊脚着地角度のみを与え、リズム発生部と支持脚腰関節トルク発生部に、接触センサにより計測される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、静止から定常的なバウンド走行まで自律的に遷移させる手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。特に、脚質量・粘性摩擦・衝突を考慮したこと、バウンド走行を静止から定常状態への遷移で実現すること、そのため脚のリズム発生部を導入したこと、エネルギーの目標値を必要としないこと、加速度計やレイトジャイロなどのセンサの特性を考慮してより精度良く接触センサで計測可能な支持脚期間を遅延フィードバックに用いることなど、本論文では実際のロボットにおいてバウンド走行をより簡単に実現するための配慮を行った。

結果として得られた定常運動は準受動走行の固定点まわりの運動であり、自己安定性やエネルギー効率の点で優れており、また遅延フィードバック制御は対着地面エネルギーの一時的な増減があるような外乱に対して有効に働くことが示された。今後は実機による検証、より高度な不整地への自律適応などが課題となっている。

参考文献

- [1] M.H. Raibert: “Legged Robots That Balance,” MIT Press, 1985.

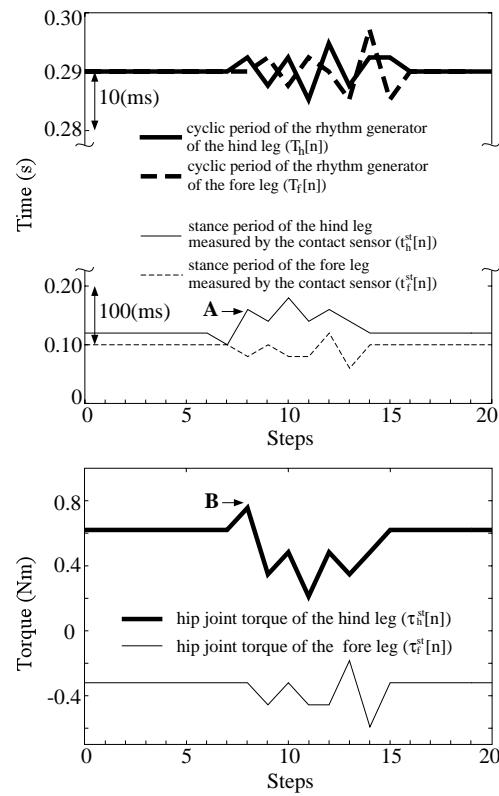


図 9: Bounding up a step 2 (cm) in height with DFC.

- [2] M. Ahmadi and M. Buehler: “Stable control of a simulated one-legged running robot with hip and leg compliance,” IEEE trans. on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, pp.96-104, 1997.
- [3] 玄, 上條, 美多: “動物の脚構造をモデル化した1脚走行ロボット-Kenken,” 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.4, pp.453-462, 2002.
- [4] D.E. Koditschek and M.Buehler: “Analysis of a simplified hopping robot,” Int. J. of Robotics Research, Vol.10, No.6, pp.587-605, 1991.
- [5] A. Seyfarth, H. Geyer, M. Gunther and R. Blickhan, “A movement criterion for running,” J. of Biomechanics, Vol.35, pp.649-655, 2002.
- [6] I. Poulakakis, E. Papadopoulos and M. Buehler: “On the Stable Passive Dynamics of Quadrupedal Running,” Proc. of the IEEE Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1368-1373, 2003.
- [7] J.G. Cham, J.K. Karpick and M.R. Cutkosky: “Stride Period Adaptation of a Biomimetic Running Hexapod,” Int. J. of Robotics Research, Vol.23, No.2, pp.141-153, 2004.
- [8] S.H. Hyon and T. Emura: “Energy-preserving control of a passive one-legged running robot,” Advanced Robotics, Vol.18, No.4, pp.357-381, 2004.
- [9] 浅野, 義, 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, Vol.22, No.1, pp.130-139, 2004
- [10] 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, Vol.22, No.2, pp.193-199, 2004.