

# バリスティック歩行によるロボットの二足歩行の実現

◎荻野 正樹 (大阪大学工学研究科)

細田 耕 (大阪大学工学研究科)

浅田 稔 (大阪大学工学研究科)

## 1 はじめに

近年、受動歩行はヒューマノイドの二足歩行を実現するための従来とは異なる手法として注目されている。受動歩行とは、コントローラもアクチュエータも使わずに、ロボット自身の力学的ダイナミクス(重力と慣性力)のみを使って緩く傾斜した坂を降りていく歩行形態である<sup>2)</sup>。この方法は、ZMPの歩行が目標軌道の設計に多くの労力がさかれているのに対して、全く目標軌道を必要としないという点で際だっている。そのため、ロボット自身のダイナミクスを利用すれば、エネルギー的にも制御的にも簡単になるのではないかと、という観点から多くの研究者が受動歩行の研究に取り組んでいる<sup>6, 7)</sup>。

しかし、受動歩行を実現するための条件は非常に厳しく、ロボットが受動歩行可能な構造を持っているとしても、それに適切な初期速度を与えることは困難である。そこで、大須賀らはロボットに受動歩行時の軌道を追従するフィードバックを与え、歩行が受動歩行に近くなると、フィードバックのゲインを小さくすることで、受動歩行に安定に近づける制御則を提案している<sup>6)</sup>。また荻野らは遊脚着地時の姿勢を一定に保つための学習器を使って歩行を安定化させ、さらにその姿勢の探索を行うことで、受動歩行を実現する手法を提案している<sup>4)</sup>。

このように、受動歩行ではない状態から受動歩行を実現するための研究も行われているが、現実のヒューマノイドにおいては、受動歩行を実現できる構造を持ったロボットは希であることから、エネルギーを多く消費する歩行からエネルギー最小の歩行へ安定に実現する方策が必要とされる。そこで、本研究では、センサー情報によって状態遷移を行うコントローラによってバリスティック歩行を実現し、ロボットが自身の物理モデルを持たない状況から、エネルギー最小の歩行を安定に実現するためのコ

ントローラを提案する。

## 2 バリスティック歩行

以下では、図1のような、上半身と上腿、下腿、足部からなる左右の脚部を持つ合計7リンクのロボットモデルを用いる。ヒト歩行では、遊脚期にほ

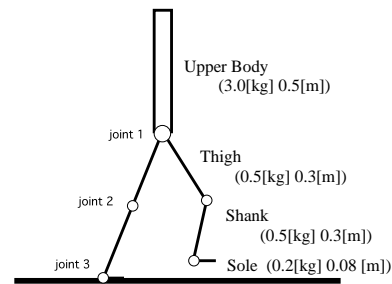


図1: Robot Model

とんど筋肉の活動が見られずバリスティックであると言われている<sup>3)</sup>。ロボットの歩行においても、重力と慣性力だけを使った運動状態を利用することにより、より自然でエネルギーの少ない歩行が実現すると期待される。そこで、ロボットにおいてバリスティック歩行を実現するために、各脚のコントローラを以下のように、支持脚期 (support phase)、遊脚初期 (swing1 phase)、遊脚中期 (swing2 phase)、遊脚終了期 (swing3 phase)、の4状態に分けた状態遷移機械によって表現した(図2)。支持脚期には、股関節には上半身を地面に対して垂直な姿勢を保つためのフィードバック制御がかけられ、膝関節には支持脚を通して、膝を伸展させるような軌道が与えられる。すなわち、各関節を

$$\begin{aligned} \tau_1 = & -K_p(\theta_1 - \theta_{1d}) - K_v(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1d}) \\ & -K_{wp}\theta_{wd} - K_{wv}\dot{\theta}_{wd} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\tau_2 = -K_p(\theta_2 - \theta_{2d}) - K_v(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2d}) \quad (2)$$

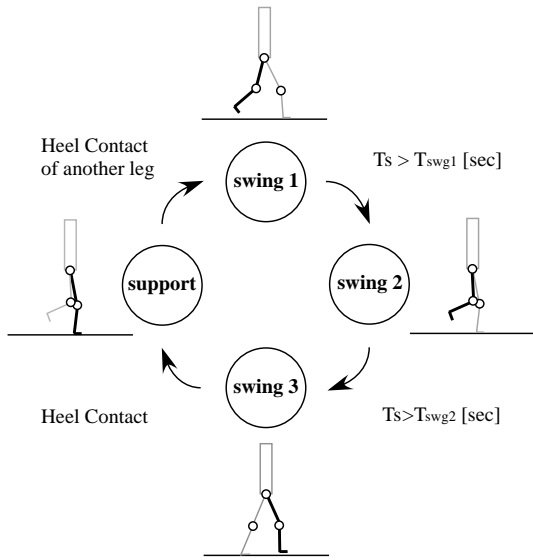


図 2: state machine controller consisting of 4 states

のように PD 制御を行い，その目標値を，

$$\theta_{1d}(t) = \begin{cases} \frac{(\theta_{1e}-\theta_{1s})}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T_{spt}}\right) + \theta_{1s} & (t < T_{spt}) \\ \theta_{1e} & (t \geq T_{spt}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_{1d}(t) = \begin{cases} \frac{\pi(\theta_{1e}-\theta_{1s})}{2T_{spt}} \sin \frac{\pi t}{T_{spt}} & (t < T_{spt}) \\ 0 & (t \geq T_{spt}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_{2d}(t) = \begin{cases} \frac{(\theta_{2e}-\theta_{2s})}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T_{spt}}\right) + \theta_{2s} & (t < T_{spt}) \\ \theta_{2e} & (t \geq T_{spt}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_{2d}(t) = \begin{cases} \frac{\pi(\theta_{2e}-\theta_{2s})}{2T_{spt}} \sin \frac{\pi t}{T_{spt}} & (t < T_{spt}) \\ 0 & (t \geq T_{spt}) \end{cases} \quad (6)$$

のように与える。ただし， $\theta_{*s}$  は支持脚期に遷移時の角度， $\theta_{*e}$  は支持脚状態における終了時での目標角度を表しており， $t, T_{spt}$  はそれぞれ支持脚期に入ってからからの時間，支持脚期の目標時間である。シミュレーション実験では，PD 制御のゲインは， $K_p = 300.0$  [Nm/rad]， $K_v = 3.0$  [Nm sec/rad]， $K_{wp} = 300.0$  [Nm/rad]， $K_{wv} = 0.3$  [Nm sec/rad] とし，支持脚期における目標値を  $\theta_{1e} = 20.0$  [deg]， $\theta_{2e} = 0.0$  [deg] としている。

支持脚期は，反対側の脚が遊脚期から支持脚期に遷移したときに遊脚初期へと遷移する。遊脚初

期では，股関節，膝関節にはフィードバックトルクではなく一定のトルクを与える。遊脚初期は一定時間たつと遊脚中期へと遷移する。遊脚中期では，股関節にも膝関節にもトルクを全く加えない。遊脚中期は一定の時間がたつと遊脚後期へと遷移する。遊脚後期には，股関節，膝関節，ともに地面との接地のための目標姿勢が実現するようなフィードバックトルクがかけられる。このように接地の姿勢を一定に保つことで歩行の安定性を保証している。遊脚後期は地面との接地により支持脚期へと遷移する。すなわち，

$$\tau_1 = \begin{cases} A & (t < T_{swg1}) \\ 0 & (T_{swg1} \leq t < T_{swg2}) \\ -K_p(\theta_1 - \theta_{1d}) - K_v(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1d}) & (T_{swg2} \leq t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\tau_2 = \begin{cases} -B & (t < T_{swg1}) \\ 0 & (T_{swg1} \leq t < T_{swg2}) \\ -K_p(\theta_2 - \theta_{2d}) - K_v(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2d}) & (T_{swg2} \leq t) \end{cases} \quad (8)$$

ここで，遊脚後期の PD 制御の目標値は支持脚期の目標値の式 (4)-(7) と同様のものが与えられる。本研究では遊脚後期での目標値を  $\theta_{1e} = -20$  [deg]， $\theta_{2e} = 20$  [deg] とした。

なお，4つの状態を通じて，足首関節にはゲインの小さい ( $K'_p = 3.0$  [Nm/rad]， $K'_v = 0.3$  [Nm sec/rad]) PD 制御がかけられている。

$$\tau_3 = -K'_p(\theta_3 - \theta_{3d}) - K'_v(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_{3d}) \quad (9)$$

以上のような状態遷移機械を両脚に持つロボットを平地において歩行させたときの支持脚，遊脚のトルクの時間推移を図 3 に示す。

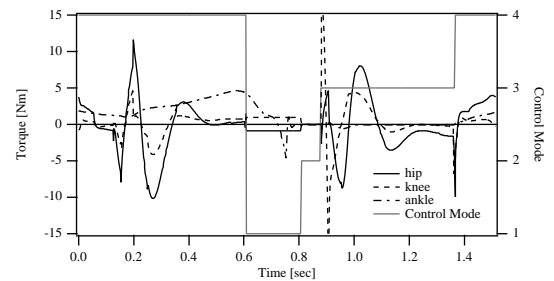


図 3: output torque in ballistic walking

### 3 Ballistic 学習器によるトルクの最小化

図3には遊脚後期と支持脚期に大きなトルクが現れている。このトルクは、遊脚初期に与えるトルクが大きすぎる、あるいは小さすぎたために、遊脚後期でのフィードバック項（あるいはその反作用）が大きくなってしまった結果であると考えられる。遊脚初期に適切なトルクを与えることができれば、遊脚後期におけるフィードバックトルクを小さく押さえることができ、よりエネルギー効率の高い歩行の実現が期待される。そこで、バリスティックコントローラを拡張し、バリスティック歩行のパラメータの探索を行う学習器を導入することにより、学習初期に与えるフィードフォワードトルクの最適化を行う。前章で導入したバリスティック歩行のため

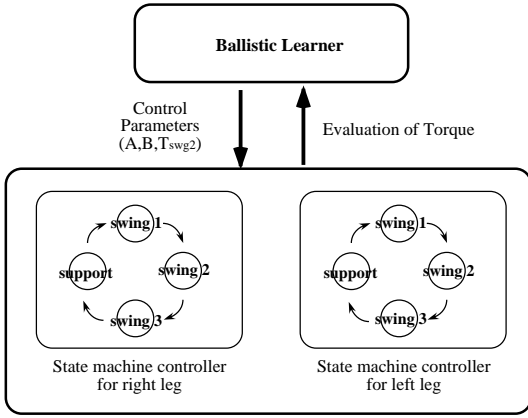


図4: Ballistic walking with Learner

の状態遷移コントローラの中で、姿勢の安定化を保証するPD制御以外のパラメータ、すなわち遊脚初期に股関節、膝関節に与える一定トルク  $A, B$  と、受動状態である遊脚中期の時間の長さ  $T_{swg2}$  を探索の対象とした。これらのパラメータの最適化を行うために、2歩の間に出力された総トルクを歩行時間によって平均化した

$$Eval = \frac{1}{T_{step}} \int_0^{T_{step}} \sum_{i=1}^3 \tau_i dt \quad (10)$$

を評価関数として、以下のような確率的な最急勾配法によって探索を行った。

$$\begin{aligned} & \text{if}(Eval < Eval_{min}) \\ & \quad A_{min} = A \\ & \quad B_{min} = B \\ & \quad T_{swg2min} = T_{swg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= A + \text{random perturbation} \\ B &= B + \text{random perturbation} \\ T_{swg} &= T_{swg} + \text{random perturbation} \end{aligned}$$

図5にシミュレーションの結果を示す。図5-(a),(b)はそれぞれトルクと遊脚中期の時間の長さの学習時の変化である。図5-(c)は歩行時の平均トルクの学習時の変化を示している。学習中に入力トルクが大きく変化しているにも拘わらず、遊脚接地時の姿勢を一定に保つことで、安定な歩行を行いながらトルク最小の歩行の探索が可能となっている。当初の思惑とは異なり、遊脚期の最初に与えるトルクのうち、股関節に与えるトルクは学習の結果0となり、膝関節のトルクは逆に大きくなっている。また、歩行のためのトルク出力が小さくなると、歩行が不安定になり、それを補うために大きなトルク出力が小さなトルク出力の間に現れるようになることが特徴的である。

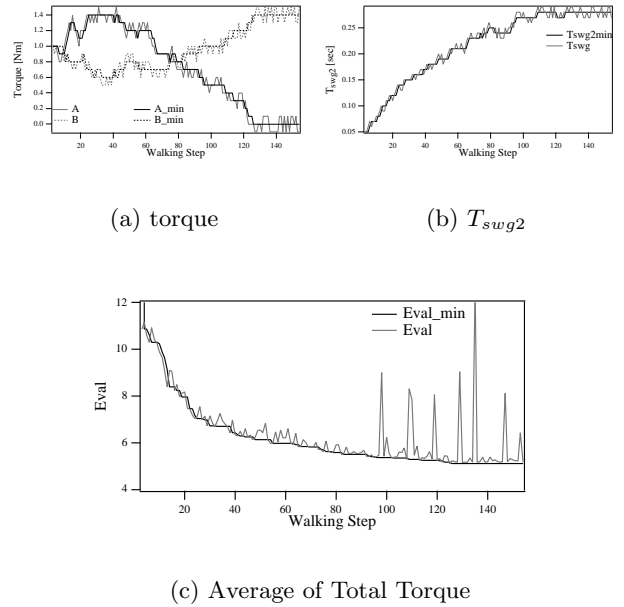


図5: learning curve of control parameters and total torque

図6は学習の結果得られた歩行時のトルクの時間プロファイルである。トルクの調整を行わなかった図3と比較すると、遊脚終了期のフィードバックトルクが最小化されており、その結果、支持脚期に現れていた、反対側の脚の遊脚終了時のフィードバックトルクの反作用の影響も小さくなっている。

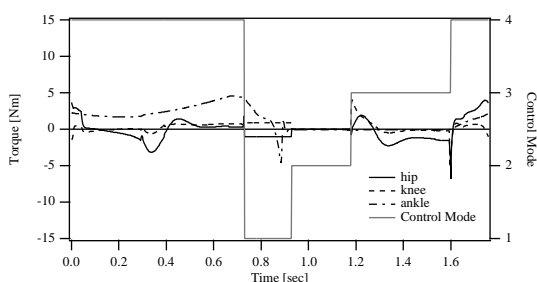


図 6: State machine mode and torque

## 4 考察

本研究では、左右の脚に状態遷移を行うコントローラを用いて歩行の安定性を保証し、さらにその上にそれらのコントローラのパラメータを学習する学習器を設け、歩行に必要なトルクの最小化を行った。このような状態遷移を用いたコントローラは既に Pratt<sup>7)</sup> が二足歩行の実現に用いているが、センサー情報によって状態遷移を行うコントローラは CPG (Central Pattern Generator) の機能の一部を実現していると言える。実際、土屋ら<sup>8)</sup> は同様のコントローラを CPG と呼び、センサー情報に基づく状態遷移がロボットの歩行に安定性をもたらすとしている。

一方で、生物の CPG を直接モデル化するときには、Matsuoka のモデルやリカレントニューラルネットワークが用いられることが多いが、これらのモデルに対して歩行を行う結合係数や時定数を決定することは困難であり、そのために遺伝的アルゴリズムが用いられることが多い<sup>1)</sup>。ロボットの二足歩行の実現において生物の回路網にヒントを得てコントローラを設計するとき、CPG のモデルを直接使用することなく、CPG 回路が実現している性質を別の表現によって表現する方が扱いやすい可能性がある。本研究はその可能性の一端を示している。

## 参考文献

- [1] 長谷, 西口, 山崎 : "3次元筋骨格系と階層的神経系を有する2足歩行モデル", 第16回バイオメカニズムシンポジウム, pp. 275-284, 1999.
- [2] McGeer, T.: "Passive walking with knees", 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3, Cincinnati, pp.1640-1645, 1990.

- [3] Mochon, S. and McMahon, T.A. : "Ballistic walking", J. Biomech., 13, pp. 49-57, 1980.
- [4] 荻野, 春名, 俵, 細田, 浅田 : "受動歩行からヒューノイドロボット歩行に向けて", バイオメカニズム, 16, pp.223-230, 6月, 2002.
- [5] Ono, K. Takahashi, R. Imadu, A. and Shimada, T.: "Self-excitation control for biped walking mechanism", In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1149-1154, 2000.
- [6] 大須賀 : "受動的歩行を規範とした歩行ロボットと制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp.233-236, 2002.
- [7] Pratt, J. : "Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of bipedal Walking Robots", Doctor thesis, MIT, June. 2000.
- [8] 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, Vol. 20, No. 3, pp.243-246, 2002.

---

### 連絡先

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

大阪大学大学院工学研究科

知能機能創成工学専攻

荻野 正樹

E-mail: ogino@er.ams.eng.osaka-u.ac.jp

Tel: 06-6877-5111 内線 3381

FAX: 06-6879-7348