

バリスティック歩行からPDWを実現する階層型コントローラ

荻野 正樹 (大阪大学) 細田 耕 (大阪大学) 浅田 稔 (大阪大学)

Layered Controller to realize Passive Dynamic Walking from Ballistic Walking

Masaki Ogino (Osaka Univ.), Koh Hosoda (Osaka Univ.), Minoru Asada (Osaka Univ.)

Abstract— In this paper, we propose the layered controller which enables the biped robot adaptively to walk in minimal energy or passive dynamic walk, if possible. This controller consists of two layers; the lower layer stabilizes the walking, while the upper layer tries to realize the minimal energy walking. The torque is applied to the robot in short time after the the free leg leaves the ground, and so the walking is ballistic. Simulation results show that the proposed controller can realize passive dynamic walking successively from ballistic walking in the simple robot model.

Key Words: Passive Dynamic Walking, Ballistic Walking, layered controller

1. はじめに

ロボットのエネルギー最小の歩行として受動歩行があり、効率のよい二足歩行を実現するという観点から注目されている^{4, 3)}。これまでに、この受動歩行に単純な制御則を施し、歩行に必要なエネルギーを小さくする制御則がいくつか提案されている^{1, 6, 7)}。しかし、これらの研究は、受動歩行を出発点としているものの、受動歩行が可能な環境下で受動歩行が可能ではないため、エネルギー最小の歩行を実現するという意味において不完全であったり、受動歩行に収束が可能であっても、あらかじめ受動歩行時の軌道や状態など、ロボットの受動歩行モデルを何らかの形で必要とするものがほとんどである。

実際にはロボットが受動歩行が可能となる力学的条件をみたしているときでさえ、受動歩行が可能となる初期条件を発見すること、そしてそれをロボットに与えることは必ずしも簡単なことではない。そのためロボットが適応的に歩行エネルギーを減少させ、受動歩行を実現するような制御則が望まれる。そこで、本研究ではバリスティック歩行から歩行エネルギーを減少させ、最終的にそれが可能であれば受動歩行を実現する制御器を提案する。

バリスティック歩行とは Mochon と McMahon が提案したヒト歩行モデルである⁵⁾。ヒト歩行中の筋電図の観察によれば、遊脚期の筋の出力は遊脚期の最初と最後にしか観察されない。すなわち、運動のほとんどの期間は重力と慣性力だけを利用しているため、弾道学的 (バリスティック) 歩行と名付けられた。ヒト歩行が現在実現されているロボットの歩行に比べて自然に見えるのは、重力と慣性力の運動を見慣れた我々の感覚に合致するからであると考えられる。受動歩行はこのバリスティック歩行において入力エネルギーを無限小にした極限と考えることもできる。その意味でもバリスティック歩行を出発点として受動歩行を実現することは興味深い。

本報告で提案する制御器は二層からなる。下位層の制御器はロボットがバリスティックな歩行を実現し、上位層の制御器は下位層の制御パラメータを変化させながらエネルギー最小の歩行を実現することを目指す。歩

行の初期段階では下層の制御器によって安定なバリスティック歩行を実現する。歩行が安定されると、上位層が下位層の制御パラメータを変化させてエネルギー最小の歩行を探索し始める。ロボットの物理パラメータと環境の条件が受動歩行を行う条件と合致すれば、結果として受動歩行が獲得されることになる。

2. バリスティック歩行のための階層型コントローラ

歩行運動の状態空間を考え、遊脚が床に衝突した瞬間によってポワンカレ平面をとると、1ステップごとの歩行の運動の変化は、そのポワンカレ平面内の点の移動として扱うことができる。

n 回目の歩行における遊脚衝突時のロボットの状態を s_n とすると、受動歩行の場合には外部からエネルギー入力を受けないので、次のステップにおける状態はその前のステップの状態だけに依存し、

$$s_{n+1} = f(s_n) \quad (1)$$

とかくことができる。

これまでのバリスティックな歩行の研究では、このポワンカレ平面内で、交点が不動点となるための条件から安定なロボットの構造、初期値が求められた。そのための条件とは、 f の他変数偏微分行列 (Jacobian) のすべての固有値が単位円内に入ることである^{8, 3)}。

以下のように遊脚離床後わずかな時間だけ腰部にトルクを与えるバリスティック歩行を考える。

$$\tau_w = \begin{cases} A_n & (0 < t < t_0) \\ 0 & (t_0 < t < T) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 t は遊脚が床から離れてからの時刻であり、 T_0 は歩行周期 T に比べて極めて小さい値、 A_n は定数である。

このとき、ポワンカレ断面上の状態の移動の式は、

$$s_{n+1} = f(s_n, A) \quad (3)$$

となる。受動歩行状態に比べて、トルクを加えるバリスティック歩行では、トルク A_n によって次状態をある

程度変化させることができるため、 A_n を適切に制御することが出来れば、歩行の安定性を増すことができる。Wisse らは上式の f から Jacobian を求め、Newton-Raphson iteration を使って 3 次元的に安定な歩行条件の探索を行っている⁹⁾。

あらかじめモデルのパラメータが既知である場合には、上記のような Jacobian を使った計算によって安定な歩行条件を求めることが出来るが、モデルパラメータが分からない状況からロボットが適応的に安定でエネルギーが最小となる歩行を見つけるためには、全く別のアプローチが必要である。

歩行の安定性を保ちながら、エネルギーが最小となる歩行を実現するためには、ポワンカレ平面上で不動点となることが必要である。そのためには、3 式とは逆の関係となる

$$A_n = g(s_n, s_{n+1}) \quad (4)$$

のような関数が有用である。この関数を用いれば、

$$A_n = g(s_n, s_d) \quad (5)$$

となるような制御を与えることによって、目標とする状態 s_n に収束させることが出来る。さらに、目標状態の探索を行い、

$$A_{min} = \min_{s_d} g(s_d, s_d) \quad (6)$$

となる s_d を見つけることが出来れば、最小エネルギーの歩行状態を実現することができる。

そこで、上記の式 5 を下層に、式 6 を上層に配置したコントローラを提案する (図 1. 下位層のコントローラ (ballistic controller) はポワンカレ平面におけるロボットの状態 s_n を目標値 s_d にするようなトルクをロボットに与える。上位層は下位層のトルク出力が最小となるように、下位層に実現すべき目標値を与える。

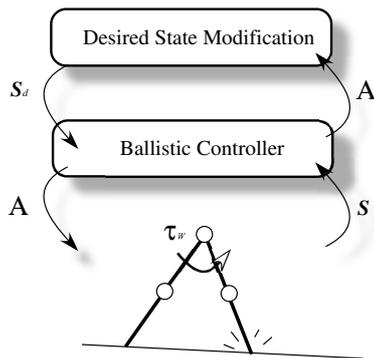


Fig.1 Proposing layered controller for biped walking

下位層は式 5 を実装するが、ロボットの物理パラメータの知識なしに関数 g を得ることは難しい。対象となるモデルが単純な場合は、予備的な試行を行うことによって、 A_n, s_{n+1} の関係を推定し、関数 g と同様に機能するフィードバックコントローラを作ることができる。そのような例を次章の 3.1 で述べる。対象となるモデルが複雑になり、単純なフィードバックコントローラ

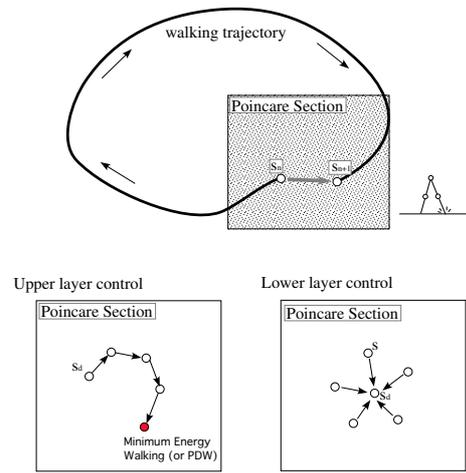


Fig.2 Poincaré section is taken at heel strike. On this plane, the lower layer of the controller tries to keep the state at heel contact in the same area as the desired one which is given by the upper layer. The upper layer of the controller tries to search the desired state which realize walking mode with minimum energy.

ラで構築できない場合は、試行的な歩行により得られたトルクと状態変化の関係をニューラルネットワークによって表現し、擬似的な g の関数を得る。ニューラルネットワークを使った式 5 の実装については、次章の 3.2 で述べる。

下位層のコントローラの目標値を探索する上位層のコントローラは、以下のような確率的な最急勾配法によって実装した。

$$\begin{aligned} & \text{if}(|s - s_d| < \delta) \\ & \text{if}(A_{min} > A) \\ & \quad A_{min} = A \\ & \quad s_{d0} = s_d \\ & \quad s_d = s_{d0} + \text{random perturbation} \end{aligned}$$

3. 結果

提案する階層型コントローラを、(1) 膝関節を持たない二足歩行モデル、(2) 膝関節を持つ二足歩行モデル、に対して適用した。前者のモデルは受動歩行が可能なモデルであるが、提案手法をこのモデルに適用すると、最終状態として受動歩行が獲得される。後者のモデルは受動歩行を行うことは出来ないが、提案手法により歩行に必要なエネルギーが最小となる状態へと収束させることができる。

以下のシミュレーションにおいては、膝なしモデルの脚は 1.5[kg], 0.6[m] とし、膝ありモデルの脚は、上腿を 1.0[kg], 0.3[m], 下腿を 0.5[kg], 0.3[m] とした。また床との衝突はバネ=ダンパーモデルによってモデル化し、その係数は 20000[N/m], 100[N sec/m] とした。また力学計算には Articulated Body 法²⁾ を用い、時間刻み幅は 0.2[msec] としている。

3.1 膝なしモデルにおける実験結果

この実験では、膝なし二足歩行モデルをバリスティック歩行させるために、支持脚が遊脚に切り替わってから0.1 [s] の間一定のトルクを遊脚と支持脚の間に加えている。下層のコントローラである "ballistic controller" によって目標状態へと収束させるために、以下のような単純なフィードバックコントロールによって下層のコントローラを実装した。

$$A_{n+1} = A_n - \alpha |s - s_d|, \quad (7)$$

また、簡単のためロボットの状態 s とその目標状態 s_d は、遊脚と支持脚の間の角の角速度 $\dot{\theta}_w$ によって代表させ、

$$A_{n+1} = A_n - \alpha (\dot{\theta}_w - \dot{\theta}_{wd}), \quad (8)$$

のようにした。ここで $\dot{\theta}_{wd}$, α は上位層から与えられる目標値と、フィードバックゲインである。上位層のコントローラは、前章で述べた確率的な再急勾配法で実装した。

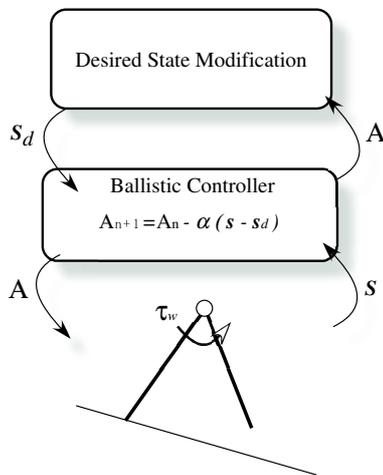
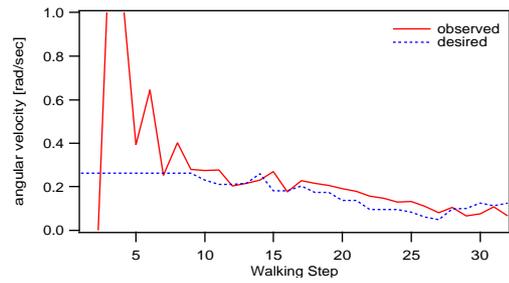


Fig.3 Layered controller with simple feedback controller

図4にシミュレーションによる実験結果を示す。図4(a),(b)はそれぞれ、一歩ごとの衝突時における角速度と、遊脚離床時から0.1[sec]間に腰部に加えられるトルクの大きさを示している。歩行の初期段階ではトルクは安定しておらず、目標とする角速度も満たされていない。しかし、下層のコントローラにより歩行の安定性がある程度保たれている。約10歩目以降は、最初に設定された目標状態が達成され、上位層のコントローラによる、出力トルクがより小さくなるような目標角速度の探索が始まっている。約30歩以内に出力トルクはほぼ0になり、受動歩行状態が実現されている。

3.2 膝ありモデルにおける実験結果

3.1で述べたような、式5を単純なフィードバック則によって実装したコントローラを膝ありモデルに適用すると、歩行周期が分岐して2周期歩行となり、下層のコントローラは目標値へ歩行状態を近づけることが出来なくなる。歩行モードを1周期歩行に収束させるために、図5のように下層のコントローラをニューラルネットワークで実装した。



(a) the angular velocity of hip joint at the moment of heel strike in each step



(b) the magnitude of output torque at each step

Fig.4 Walking mode converges to PDW under the proposing controller when the slope is inclined 1 [deg]

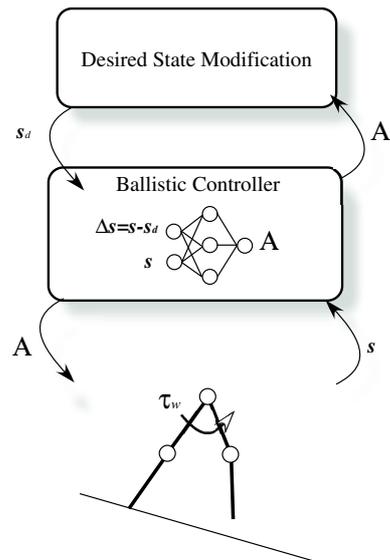
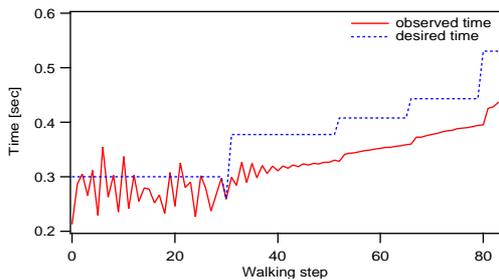
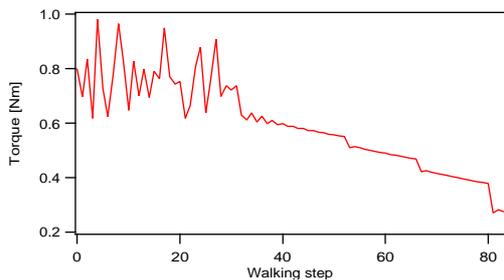


Fig.5 Layered controller with neural network

このニューラルネットワークは、遊脚が床と衝突した瞬間の状態とその瞬間での目標とする状態との差を入力とし、出力すべきトルクの振幅を出力とする。ロボットのモデル情報を用いない場合、目標状態を実現するようなトルク出力は前もって知ることは出来ない。そこで、ニューラルネットワークのトレーニング期を設け、ロボットにランダムなトルクを与え、そのときの n 歩目の状態 s とその状態から $(n+1)$ 歩目までの状態変化 $\delta s = s(n+1) - s(n)$ を入力したときに n 歩目でのトルク出力 A を出力するようにバックプロパゲーション法によってニューラルネットワークの学習を行う。上位層のアルゴリズムは前章で述べた確率的な最急勾配法によって実装されている。



(a) the time during which the knee of free leg is straight



(b) the magnitude of output torque at each step

Fig.6 Applying layered controller to robot with knees

このシミュレーションでは、支持脚の膝関節は屈曲しないようにフィードバック制御がかけられている。また、遊脚が真っ直ぐになってから床と衝突するまでの時間をロボットの状態を示す変数とした。

図6にシミュレーション結果を示す。30歩までがニューラルネットワークの学習期であり、ランダムなトルクを与えられている。30歩目以降はニューラルネットワークに現在の状態と、目標状態との差を入力し、その出力結果をロボットに与えている。40歩までに歩行モードが1周期歩行に収束しており、ニューラルネットワークが式5を獲得していることが分かる。50歩目以降は上位層のコントローラが働き、よりトルクの必要としない目標状態の探索が行われ、エネルギー最小の歩行へと近づいている。

4. おわりに

本報告では、バリスティックな歩行からエネルギーを最小にしていけるための階層型コントローラについて紹介した。以下に現状での問題点を2つ述べる。

一つ目の問題点は、ロボットの状態を代表させる変数の選び方についてである。本来は、ロボットのセンサー情報全てを使ってロボットの状態変数とすべきであるが、状態空間が膨大になってしまい、探索が現実的ではなくなる。そこで本報告で述べたシミュレーション実験では、股部の角速度や遊脚の膝が真っ直ぐになってから床に衝突するまでの時間を、ロボットの状態を示す変数とした。ロボットの状態を表現するための必要最低限の変数をどのように発見するかは将来の目標である。

二つ目の問題は転倒の推定についての問題である。上位層は最小のエネルギーで歩行が可能となる目標値を探索するが、その探索ではポワンカレ面においてどの領域が安定であるかの判断はしていない。そのため、もしロボットが構造的に受動歩行が可能でない場合は、上位層の探索の最終段階では、ロボットは歩行を継続するためのエネルギーを失い転倒することになる。このような転倒を回避するためには、ポワンカレ平面内の歩行安定性を評価するモジュールを追加することが必要となる。現在、そのようなモジュールの追加を検討している段階である。

この研究の一部は、日本学術振興会科学研究費、基盤研究A、触覚・視覚・聴覚を持つ多自由度機械に宿る知能の解明、代表者 石黒浩(和歌山大学)の補助をいただいている。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Asano, F. Yamakita, M. and Furuta, K.: "Virtual passive dynamic walking and energy-based control laws", In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1149-1154, 2000.
- 2) Featherstone, R.: "The calculation of robot dynamics using articulated-body inertias", The International Journal of Robotics Research, vol. 2, no. 1, pp. 13-30, 1983.
- 3) Garcia M, Chatterjee A, Ruina A, Coleman M.J.: "The simplest walking model: stability, complexity, and scaling", ASME J Biomech Eng, 120, pp. 281-288, 1998.
- 4) McGeer, T.: "Passive walking with knees", 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3, Cincinnati, pp.1640-1645, 1990.
- 5) Mochon, S. and McMahon, T.A.: "Ballistic walking", J. Biomech., 13, pp. 49-57, 1980.
- 6) 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.
- 7) Osuka, K. and Kirihara, K.: "Development and control of new legged robot quartet III - from active walking to passive walking-", In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 991-995, 2000.

- 8) Van der Linde, RQ: "Passive bipedal walking with phasic muscle contraction", Biol. Cybern. 81, pp. 227-237, 1999.
- 9) Wisse, M. Schwab, A. L. van der Linde, R. Q.: "A 3D Passive Dynamic Biped with Yaw and Roll Compensation", Robotica, 19, pp.275-284, 2001.