

二脚ロボットの立位安定化に重畳する反射的踏み出し制御

正 杉原知道 (阪大)

Reflexive Step-out Control Superposed on Standing Stabilization of Biped Robots

*Tomomichi Sugihara (Osaka Univ.)

Abstract— A method to superpose a reflexive step-out control on a biped standing control is proposed. The complexity of a step-out motion is that it often conflicts with the stabilization of COM since it requires the escapement from an equilibrium point to another point. In our scheme, ZMP is enforced to the pivot foot during critical situations and then gradually returns to the location which stabilizes COM.

Key Words: Biped control, Voluntary stepping, Reflexive step-out, ZMP manipulation

1. はじめに

二脚運動の様式は、両足で全身を支持する立位安定化や、転倒を防ぐための踏み出し、歩行など様々である。これらは、足の踏み換えによる不連続な支持領域変形と、支持領域内での反力操作の二者によって成立するという共通原理を持つ一方で、力学系としてはそれぞれ全く異なる構造・性質を持つ。特に、立位制御や定常的足踏みがある平衡点まわりでの運動であるのに対し、踏み出しは、平衡状態を故意に崩し、別の平衡点を持つ力学系に遷移するもので、動作の単純さと裏腹に複雑な制御を必要とする。

Sugihara[1] は、限られた支持領域の中で立位安定化能力を最大にする制御器設計と、立位維持できなくなった場合に転倒防止するための足の踏み出し位置を同時に議論した。しかし、踏み出し制御そのものについては未解決であった。大石ら [2] は、モデル予測制御に基づいた踏み出し運動計画法を提案しているが、動作のシーケンスと時間は先験的に与えていた。

本稿では、力学変容 [3] の枠組みで、立位安定化から反射的な踏み出し制御へと自動的に移行する方法を提案する。安定化制御において状態フィードバックで決めていた ZMP[4] 位置を、緊急時には強制的に軸足へ移し、その後元の安定化のための操作位置へと自然に復帰させる。これにより、重心の安定化と力学的整合性の保証という矛盾しがちな要求を両立する運動システムが実現される。

2. 力学変容に基づく二脚運動制御 [5]

力学変容は、フィードバック力学系の構造を連続的に変形し、立位制御や自励振動制御、定常的足踏み等をシームレスに遷移する枠組である。簡単のため Fig.1 のような左右方向の運動のみ考え、重心まわりに発生するトルクは十分小さく、かつ重心高さ z は一定であ

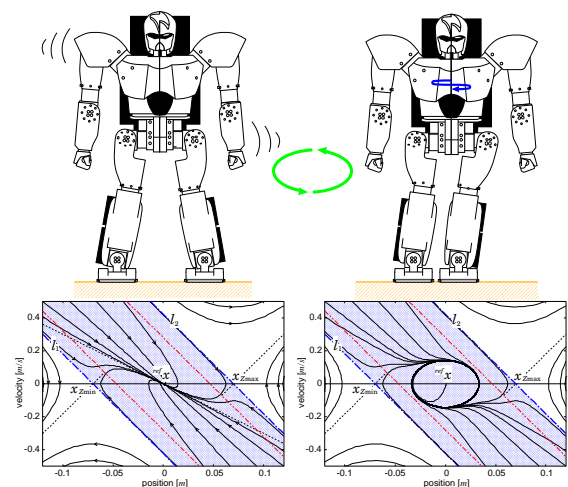


Fig.1 Dynamics morphing to synthesize biped motions

ると仮定しよう。重心位置を x 、ZMP 位置を x_Z とそれぞれおくと、次の運動方程式を得る [6]。

$$\ddot{x} = \omega^2(x - x_Z) \quad (1)$$

ただし $\omega \equiv \sqrt{g/z}$ 、 $g = 9.8[\text{m/s}^2]$ は重力加速度である。 x_Z は次のように支持領域内に拘束される。

$$x_{Zmin} \leq x_Z \leq x_{Zmax} \quad (2)$$

ただし x_{Zmin} 、 x_{Zmax} はそれぞれ x 軸上の支持領域の右端と左端である。重心参照位置 ${}^d x$ に対し、制御入力として ZMP を次のように決定する。

$$\tilde{x}_Z = {}^d x + (q+1) \left(x - {}^d x + f(\zeta) \frac{\dot{x}}{\omega} \right) \quad (3)$$

$$x_Z = \begin{cases} x_{Zmax} & (\text{S1} : \tilde{x}_Z > x_{Zmax}) \\ \tilde{x}_Z & (\text{S2} : x_{Zmin} \leq \tilde{x}_Z \leq x_{Zmax}) \\ x_{Zmin} & (\text{S3} : \tilde{x}_Z < x_{Zmin}) \end{cases} \quad (4)$$

ただし

$$f(\zeta) \equiv 1 - \rho \exp \left\{ 1 - \frac{(q+1)^2 \zeta^2}{r^2} \right\}, \quad \zeta \equiv \sqrt{x^2 + \frac{\dot{x}^2}{\omega^2 q}} \quad (5)$$

であり, 定数 q , r および ρ は設計パラメータである. このとき重心の振舞は次の区分自律系に従う.

$$\ddot{x} = \begin{cases} \omega^2 x - \omega^2 x_{Zmax} & (S1) \\ -\omega(q+1)f(\zeta)\dot{x} - \omega^2 q(x - {}^d x) & (S2) \\ \omega^2 x - \omega^2 x_{Zmin} & (S3) \end{cases} \quad (6)$$

この制御器は, $\rho = 0$ のとき最良重心-ZMP レギュレータ [1] に一致し, $\rho > e^{-1}$ のときに, 状態 (S2) において次式で表される安定なリミットサイクルを持つ.

$$(x - {}^d x)^2 + \frac{\dot{x}^2}{\omega^2 q} = \frac{(1 + \log \rho)r^2}{(q+1)^2} \quad (7)$$

特に $\rho = 1$ のとき, これは振幅 $\frac{r}{q+1}$, 周期 $\frac{2\pi}{\omega\sqrt{q}}$ の単振動となる. さらに Sugihara[5] は, ZMP の振動に同期して力学的拘束条件を自動的に満足しながら定期的な踏みを行う制御を提案した.

3. 立位制御への反射的踏み出し制御の重畳

3.1 踏み出しの力学

最良重心-ZMP レギュレータ [1] に基づけば, 重心がある状態にあるとき, 支持領域を変形しないままで安定化可能であるか否かを容易に判別できる. すなわち, 次の条件が満たされるならば重心は可安定である.

$$x_{Zmin} < x + \frac{\dot{x}}{\omega} < x_{Zmax} \quad (8)$$

また重心が条件 (8) を満たさないとき, 安定性を回復するための目標着地位置が次のように求まる.

(SL: $x + \frac{\dot{x}}{\omega} \geq x_{Zmax}$ のとき)

$${}^d x_L = {}^d x + (q+1) \left(x - {}^d x + \frac{\dot{x}}{\omega} \right) \quad (9)$$

(SR: $x + \frac{\dot{x}}{\omega} \leq x_{Zmin}$ のとき)

$${}^d x_R = {}^d x + (q+1) \left(x - {}^d x + \frac{\dot{x}}{\omega} \right) \quad (10)$$

ただし ${}^d x_L$ は安定性回復のための目標左足着地位置, ${}^d x_R$ は同目標右足着地位置である. しかし, どこに足を踏み出せば良いかが分かったとしても, そこに足を踏み出す制御はそれほど単純ではない. 例えば Fig.2 のように重心が状態 (SL) に陥った状況を考えよう. 式 (10) に基づいて左足を踏み出せば, 重心の安定性を回復でき

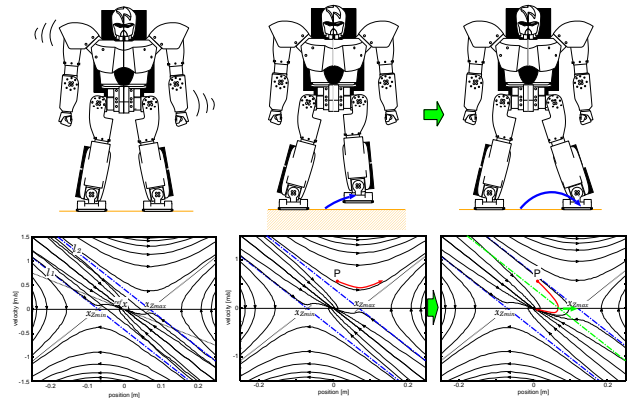


Fig.2 Step-out motion and deformation of support

る. しかしこのとき制御器 (4) は, ZMP を $x_Z = x_{Zmax}$ に留め, 現在の支持領域で出し得る最大の加速で重心を押し止めようとする. 左足を踏み出すためには, ZMP をいったん軸足 (右足) に移し, 左足が受ける反力を零にしなければならないが, その結果, 重心はさらに左に倒れる方向に加速される. 人が何気なく行っている動作の中で, 一時的に本来の目的と矛盾した ZMP 操作が要求されるこの問題は, これまでに十分な議論がなされていない.

3.2 ZMP の強制ポジショニングと安定化への復帰

重心が状態 (SL) にあるとき左足を上げるためには, 前節で説明したように ZMP を右足に, 逆に状態 (SR) にあるときには ZMP を左足に強制的に移すことが必要である. 一方, 踏み出しによって支持領域を拡大した後は, 速やかに ZMP を制御器 (4) によって決定される位置に復帰させなければいけない. これを実現するため, 式 (4) で決定される ZMP を \bar{x}_Z とし, 改めて次式で制御入力としての ZMP を与える.

$$x_Z = \bar{x}_Z + \Delta x_Z \quad (11)$$

ただし Δx_Z は, 状態 (SL) においては $x_R - \bar{x}_Z$, 状態 (SR) においては $x_L - \bar{x}_Z$ をとるものとし, それ以外は次の微分方程式に従って振る舞う.

$$\Delta \dot{x}_Z = -\frac{\Delta x_Z}{T} \quad (12)$$

ただし T は Δx_Z の減衰の時定数である.

3.3 足昇降制御

状態の遷移は足昇降に伴う離地・着地によって起こる. 足が着地時に式 (10) または (9) を満たすならば, 状態 (SL) または (SR) から (S2) へと遷移する.

従来方法 [5] における足昇降制御を説明する. まず, ZMP と重心速度によって次の複素数 p_Z を定義する.

$$p_Z \equiv x_Z - {}^d x - \frac{(q+1)\dot{x}}{\omega\sqrt{q}} i \quad (13)$$

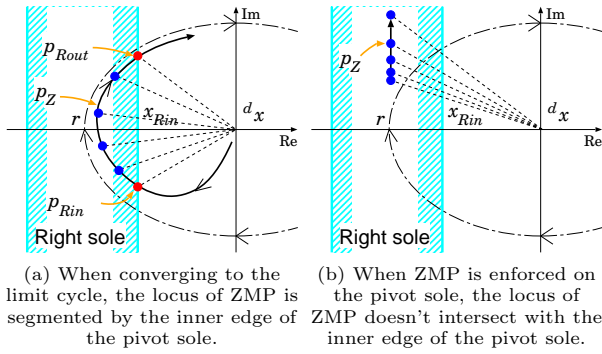


Fig.3 Locus of ZMP phase in the pivot sole

p_Z が軸足接地領域内を動くとき、Fig.3(a)のように、その内縁と交叉する2点によって切り取られる。これに基づいて、切り取られた区間内での p_Z の相対位置を逐次推定し、足の昇降運動の位相 ϕ_L, ϕ_R を定義する（詳細はここでは省略する）。定義された位相に対し、左足上げ高さを次のように決定する。

$$z_L = \frac{1}{2} \frac{h|p_Z|}{r} \sigma_1(\rho) (1 - \cos 2\pi\phi_L) \quad (14)$$

ただし h は定数であり、 $\sigma_1(\rho)$ は次で定義される。

$$\sigma_1(\rho) \equiv \begin{cases} 1 & (\rho > 1) \\ \frac{\rho - e^{-1}}{1 - e^{-1}} & (e^{-1} \leq \rho \leq 1) \\ 0 & (0 \leq \rho < e^{-1}) \end{cases} \quad (15)$$

右足上げ高さ z_R も同様に決定する。

ここで、前節の方法によって ZMP を強制的に軸足に固定した場合、Fig.3(b) のように p_Z と接地領域内縁が交叉しないので、上記の方法では踏み出し足が接地しない。その間、重心速度は増加し、式(10)(9)で決まる踏み出し足着地位置も外側に向かって発散する。この問題を解決するために、式(14)を次で置き換える。

$$z_* = \frac{1}{2} \frac{h|p_Z|}{r} \sigma_1(\rho) \sigma_2(x) (1 - \cos 2\pi\phi_*) \quad (16)$$

ただし $\sigma_2(x)$ は次のように定義される。

$$\sigma_2(x) \equiv \begin{cases} \frac{|x_K - x_P|}{s_{max}} & (|x_K - x_P| < s_{max}) \\ 0 & (|x_K - x_P| \geq s_{max}) \end{cases} \quad (17)$$

s_{max} は許容される最大踏み出し幅であり、 K, P はそれぞれ軸足が右足のとき L, R 、軸足が左足のとき R, L とする。これは、踏み出し足が軸足から離れた距離に応じて足上げを抑制し、踏み出し位置の発散を防ぐ働きがある。また、ZMP を軸足に固定している間は、足の昇降を起こすために $\rho = 1$ とする。

一方、踏み出し足の左右方向の運動 x_L, x_R は、離地しているときのみ式(10)(9)で与えられた目標位置

に追従するよう、次式に従って決定する。

$$\ddot{x}_L = k(d x_L - x_L) - c \dot{x}_L \quad (18)$$

$$\ddot{x}_R = k(d x_R - x_R) - c \dot{x}_R \quad (19)$$

これは文献[7]と同様の考えに基づく。また、着地している間は同じ位置に留まるようにする。

4. シミュレーション

人型ロボット mighty[8] を想定し、シミュレーションを行った。簡単のため全質量が重心に集中したモデルとし、 $z = 0.25[\text{m}]$ 、 $h = 0.02[\text{m}]$ 、 $q = 0.5$ とした。足裏の幅は左右ともに $0.07[\text{m}]$ で、その中心をそれぞれの足の位置とし、初期状態において左右足間の距離は $0.084[\text{m}]$ とした。その他の制御パラメータは $T = 0.1$ 、 $s_{max} = 0.3$ 、 $k = 5 \times 10^4$ 、 $c = 2 \times 10^2$ とした。また着地後に重心が自動的に両足中心に収束するように、踏み出し足の離床後は次式を適用した。

$$d x = \frac{x_L + x_R}{2} \quad (20)$$

$$r = \frac{x_L - x_R}{2} \quad (21)$$

踏み出しが引き起こされる状況として、次の二つを想定した。(I) 重心参照位置が現在の支持領域の外に設けられた。(II) 外力が加えられ、重心の状態が (SL) へ強制的に移動させられた。

Fig.4 に、(I) の想定で重心参照位置を左足外縁よりも外に移動させたときの重心、ZMP、両足の軌跡を示す。図中、支持領域を点ハッチングしてある。重心状態が可安定領域から外れた時に、ZMP が強制的に右足へと移動し、またその間の \tilde{x}_Z の動きによって左足の踏み出し運動が誘発されていることがわかる。また、足の踏み出しによって変形された支持領域に対し、重心が再び可安定領域に入り、着地直後から参照位置へと収束している。Fig.6 はロボットの運動および相空間における重心運動のスナップショットである。

(II) の想定で、重心に外力を加えたときの重心、ZMP、両足、外力の軌跡を Fig.5 に示す。下のグラフは加えた外力の履歴を示し、ロボット重量で正規化してある。踏み出しが引き起こされた原因は (I) の想定と異なるが、 \tilde{x}_Z の動きに伴う左足および ZMP の挙動は同様であった。Fig.6 はロボットの運動および相空間における重心運動のスナップショットである。

5. おわりに

重心が現在の支持領域のままでは安定化できなくなった場合に必要となる足の踏み出し運動の複雑さ、特に安定化に一時的に矛盾する ZMP 操作が要求されることを指摘した。これに基づき、不可安定領域で強制的

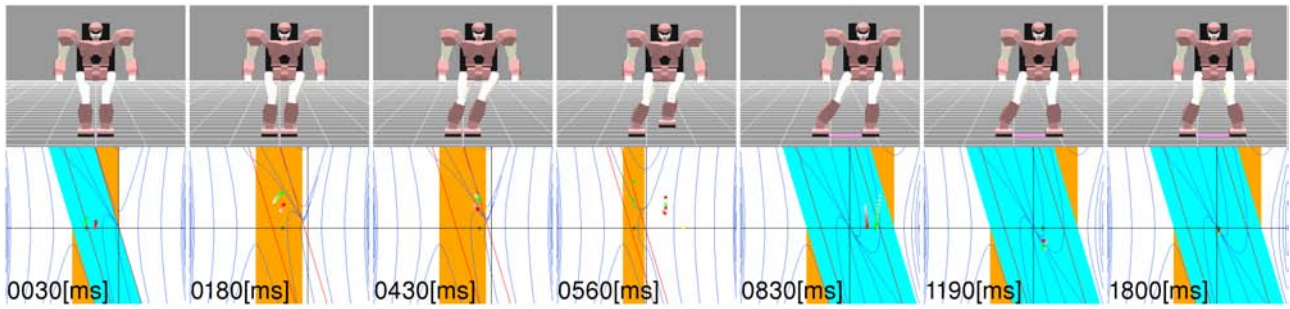


Fig.6 Snapshots of a step-out motion at will

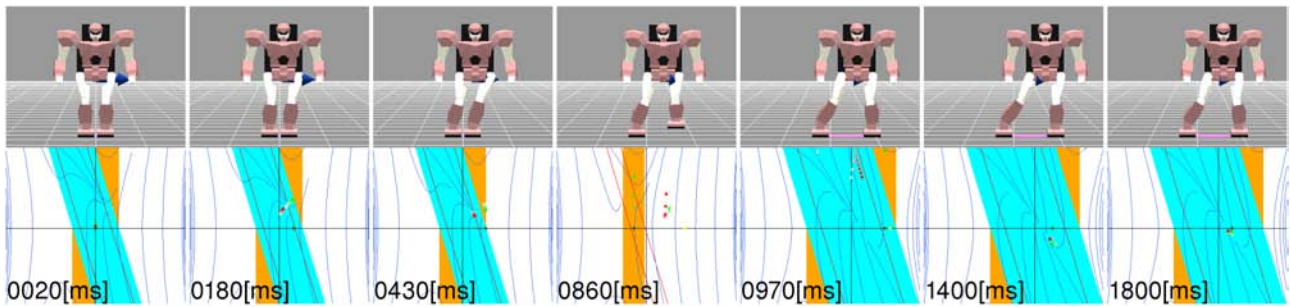


Fig.7 Snapshots of a step-out motion in an emergency case

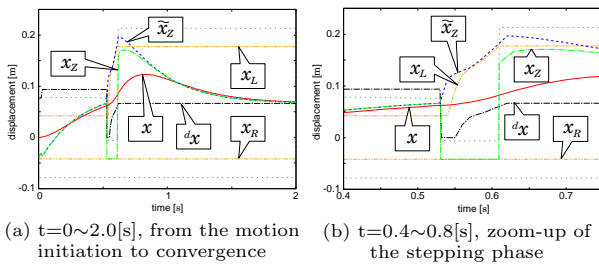


Fig.4 Loci of COM, ZMP and feet in a step-out motion at will

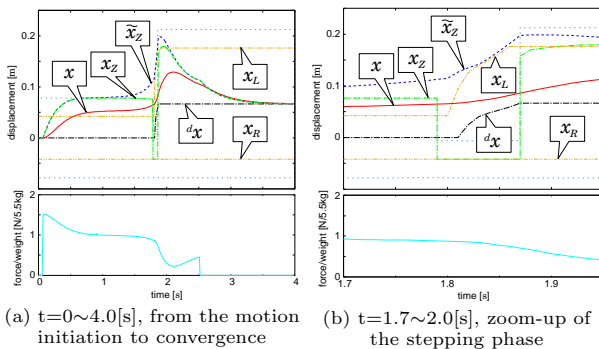


Fig.5 Loci of COM, ZMP and feet in a step-out motion due to an emergency

に軸足に移動し安定性回復後に速やかに元の制御に復帰させる ZMP 操作と、過度な踏み出しを防ぐために踏み出し幅に応じて足上げを抑制する機構を組み合わせ、立位安定化制御に反射的踏み出し制御を重畳する方法を提案した。

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A) (課題番号: 22680018) の支援を受けた。

参考文献

- [1] T. Sugihara. Standing Stabilizability and Stepping Maneuver in Planar Bipedalism based on the Best COM-ZMP Regulator. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1966–1971, 2009.
- [2] 大石理也, 杉原知道, 中村仁彦. 倒立振子の最適制御に基づいたヒューマノイドロボットの踏み出し計画. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'07 講演予稿, 2007.
- [3] T. Sugihara. Dynamics Morphing from Regulator to Oscillator on Bipedal Control. In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2940–2945, 2009.
- [4] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [5] T. Sugihara. Consistent Biped Step Control with COM-ZMP Oscillation Based on Successive Phase Estimation in Dynamics Morphing. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 4224–4229, 2010.
- [6] K. Mitobe, G. Capi, and Y. Nasu. Control of walking robots based on manipulation of the zero moment point. *Robotica*, Vol. 18, pp. 651–657, 2000.
- [7] T. Sugihara. *Climbing and Walking Robots*, chapter 12. Simulated Regulator to Synthesize ZMP Manipulation and Foot Location for Autonomous Control of Biped Robots, pp. 201–212. INTECH, May 2010.
- [8] T. Sugihara, K. Yamamoto, and Y. Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 56, pp. 82–94, 2007.