

ZMP 自励振動に自己無撞着同期する二足昇降制御

正 杉原知道 (九大)

Biped Step Control with Self-consistent Synchronization to ZMP Oscillation

*Tomomichi Sugihara (Kyushu Univ.)

Abstract— A self-consistent foot stepping control with ZMP oscillation even during the transitional movement is proposed. It runs on the COM-ZMP oscillator with a dynamics morphing developed by the author. A novel index by which the foot lifting is synchronized to the oscillation is defined in the complex plane.

Key Words: Biped control, Phase synchronization, Self-excited oscillation, ZMP manipulation

1. はじめに

二脚歩行は、不連続に足を踏み換えて支持領域を変形させながら非平衡状態を経由し空間内を移動する、非線形性の強い運動である。身体の内部座標空間が有界であるのに対し、外部空間はほぼ無限の広がりを持つから、定常歩行は自ずと左右足の踏み換えを交互に繰り返す周期的なものになる。生物における神経振動子 (CPG) [1] の存在にも裏付けられ、非線形振動を用いた様々な歩行制御 [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] が検討されてきた。

これらの従来研究は、制御器を構成する振動子がまず四肢の振動を作り、その結果足先と環境との反復衝突という外因的な振動が生じ、さらにそれに振動子自身が同調する性質を利用する、という共通のスタンスをとる。そこには、片足を上げるために圧力中心 (ZMP[10]) をもう片方の足に移す、などの意志が働く余地はなく、特に過渡期における振る舞いは予測が難しいものとなる。加えて、立位制御と制御器の構造が全く異なる、パラメータ設計に陽な指針を持たない、安定化のための制御を重畳しなければならないなどの問題がある。

これに対し筆者 [11] は、立位制御器の安定化能力を最大化し、さらに周期・振幅の調節が容易な自励振動制御器へとシームレスに変形する方法を提案した。また定常振動時に、その位相情報を用いて、ZMP の描くりミットサイクルに安定に同期する足踏み制御が可能であることを示した。しかし空間的な情報が欠落するこの方法では、過渡期や ZMP の飽和によってリミットサイクルに歪みが生じたときに、足の昇降と ZMP の動きが整合しなくなる問題があった。本稿では、ZMP 振動の位相情報と空間情報から新たに足運動の位相を定義し、自己無撞着な足昇降制御を行う方法を提案する。

2. 力学変容する立位・自励振動制御器 [11]

Fig.1 に示すようなラテラル面内での二脚運動を考える。簡単のために、重心まわりに発生するトルクは重心の並進慣性力が ZMP まわりに発生するトルクに

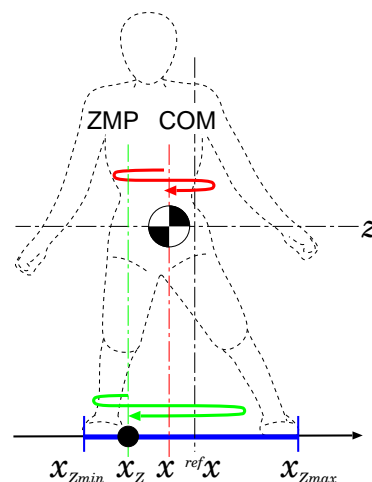


Fig.1 An approximate mass-concentrated biped model in lateral plane

比べて十分小さく、かつ重心の鉛直方向高さ z は一定であると仮定する。重心参照位置を原点とし、左右方向の重心位置を x 、ZMP 位置を x_Z とそれぞれおくと、ZMP を入力とする次の線形な運動方程式を得る [12]。

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

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り、 $x_{Zmin} < 0 < x_{Zmax}$ を満たすとす。このような最も単純化されたモデルであっても、拘束条件 (2) が制御を困難にしている。これを考慮し、制御入力として目標 ZMP を次のように決定する。

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

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

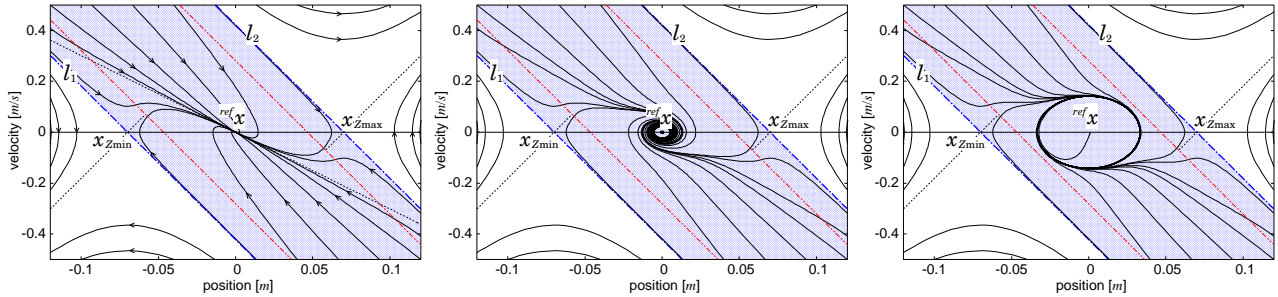


Fig.2 Dynamics morphing from regulator to oscillator: curves of the piecewise autonomous system Eq.(7) for (left) $\rho = 0$, (center) $\rho = e^{-1}$ and (right) $\rho = 1$, where $\omega = \sqrt{g/0.27}$, $x_{ref} = 0$, $x_{Zmin} = -0.07$, $x_{Zmax} = 0.07$, $q = 0.5$ and $r = 0.05$ are fixed. The stable standing region is maximized between two lines l_1 and l_2 .

ただし

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

$$\zeta \equiv \sqrt{x^2 + \frac{\dot{x}^2}{\omega^2 q}} \quad (6)$$

であり, 定数 $q > 0$, $r > 0$ および $\rho \geq 0$ は制御器の設計パラメータである.

実 ZMP を目標 ZMP に一致させることができれば, 重心のダイナミクスは次の区分系で表される自律システムとなる.

$$\ddot{x} = \begin{cases} \omega^2 x - \omega^2 x_{Zmax} & (S1) \\ -\omega(q+1)f(\zeta)\dot{x} - \omega^2 qx & (S2) \\ \omega^2 x - \omega^2 x_{Zmin} & (S3) \end{cases} \quad (7)$$

この制御器は次のような特徴を持つ.

1. $\rho = 0$ のとき, 相空間において安定化可能な重心の初期状態の集合 (立位安定領域) が最大化される, 最良重心-ZMP レギュレータ [13] に一致する.
2. $\rho > e^{-1}$ のときに, 状態 (S2) において次式で表される安定な楕円状のリミットサイクルを持つ.

$$x^2 + \frac{\dot{x}^2}{\omega^2 q} = \frac{(1 + \log \rho) r^2}{(q+1)^2} \quad (8)$$

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.

3. 任意の正の q, ρ, r に対し $f(\zeta)$ は単調増加関数であり, さらに次が言える.

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} f(\zeta) = 1 \quad (9)$$

すなわち, リミットサイクルから離れるほど最良重心-ZMP レギュレータに性質が近くなる.

Fig.2 は $x_{Zmin} = -0.07$ [m], $x_{Zmax} = 0.07$ [m], $z = 0.27$ [m], $q = 0.5$, $r = 0.05$ [m] としたときの, $\rho = 0$ (左), $\rho = e^{-1}$ (中央), $\rho = 1$ (右) に対するシステムの相図 (解曲線群) である. 図中, 立位安定領域を

点ハッチングしている. いずれの場合においても立位安定領域は 2 直線 l_1 と l_2 に挟まれた領域 (理論上の最大領域) に一致しており, 安定化能力を最大に保ったまま自励振動系へと変容していく様子がわかる.

3. ZMP 自励振動への自己無撞着足踏同期

前節に述べた制御器によって重心が安定なリミットサイクルに収束しているならば, ZMP も重心に対して位相遅れなしでリミットサイクルを形成し, そのゲインは $q+1$ となることが知られている [11]. 特に $\rho = 1$ のとき ZMP の振幅は r となる. 本節では, ZMP の振る舞いから位相情報と空間情報を抽出し, それに整合する足昇降制御を設計する.

ZMP を利用した位相の定義には, Morimoto ら [9] によるものがある. 循環を考慮し, さらにリミットサイクルが複素平面上で円となるように虚部をスケールした複素数で定義し直すと, 次式ようになる.

$${}^M p_Z \equiv x_Z - \frac{\dot{x}_Z}{\omega\sqrt{q}} i \quad (10)$$

しかし, ZMP は加速度の次元で変化するため, その変化率 \dot{x}_Z はセンシティブであり, 特に ZMP の跳躍や飽和が起こったときに不連続に変化してしまう. これを避けるために, 本稿では次の定義 p_Z を採用する.

$$p_Z \equiv x_Z - \frac{(q+1)\dot{x}}{\omega\sqrt{q}} i \quad (11)$$

x 軸上の左足裏内側縁の位置が x_{Lin} であるとし, Fig.3 のような p_Z の軌跡を考えよう. これが左足裏面内に含まれるのは, 実部が x_{Lin} である直線と軌跡との 2 交点 p_{Lin} および p_{Lout} に挟まれた区間においてである. しかし, p_{Lin}, p_{Lout} を事前に知ることはできない. そこで, $|p_Z| > x_{Lin}$ が満たされるときに限り, これらの推定値 \bar{p}_{Lin} および \bar{p}_{Lout} を次のように計算する.

$$\bar{p}_{Lin} = x_{Lin} - \sqrt{|p_Z|^2 - x_{Lin}^2} i \quad (12)$$

$$\bar{p}_{Lout} = x_{Lin} + \sqrt{|p_Z|^2 - x_{Lin}^2} i \quad (13)$$

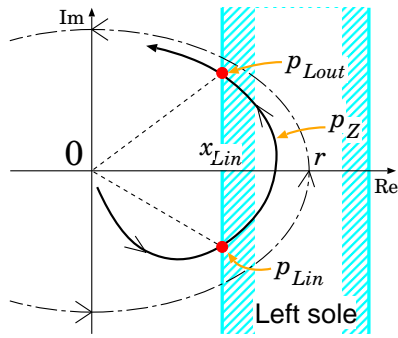


Fig.3 Locus of ZMP phase in transition

p_Z が次式を満たすならば, ZMP が左足裏面内に存在することが保証される.

$$0 < \phi_L < 1 \quad \text{ただし} \quad \phi_L \equiv \frac{\angle p_Z / \bar{p}_{Lin}}{\angle \bar{p}_{Lout} / \bar{p}_{Lin}} \quad (14)$$

これを用いて, 条件 $|p_Z| > x_{Lin}$ かつ式 (14) が満たされるときは次式:

$$z_R = \frac{1}{2} \frac{h|p_Z|}{r} \sigma(\rho) (1 - \cos 2\pi\phi_L) \quad (15)$$

で右足高さ z_R を決定し, そうでないときは $z_R = 0$ とする. ただし h は定数であり, $\sigma(\rho)$ は次で定義される.

$$\sigma(\rho) \equiv \begin{cases} 1 & (\rho > 1) \\ \frac{\rho - e^{-1}}{1 - e^{-1}} & (e^{-1} \leq \rho \leq 1) \\ 0 & (0 \leq \rho < e^{-1}) \end{cases} \quad (16)$$

左足高さ z_L も同様に決定する. この方法は, 以下のような効果を持つ.

まず, 位相 ϕ_L は実際の区間 $p_{Lin} \sim p_{Lout}$ に対してではなく, Fig.4 左のように現在の p_Z から逐次推定される $\bar{p}_{Lin} \sim \bar{p}_{Lout}$ に対して決まる. 動作中に知り得ない p_{Lin}, p_{Lout} の情報を要せず, p_Z がリミットサイクルに漸近する過程で, 足昇降もまた定常時の振る舞いに自動的に漸近する.

ϕ_L は単調増加するとは限らない. p_Z の虚部は ZMP ではなく重心の速度で定義されるので, Fig.4 右のように区間の始点・終点ともに第 1 象限に存在することが起こり得る. 始点において p_Z は p_{Lin} ではなく p_{Lout} に一致したと見なされる. このことは奇妙に感じられるが, z_R は位相 0 と 1 でともに 0 となり, かつ連続性が保たれるので, 運動に悪影響が及ぶことはない.

最大足上げ高さは ρ と $|p_Z|$ から決まる. ρ は自励振動の強さを示し, $|p_Z|/r$ はリミットサイクルへの収束度合いを表す. いずれも大きいほど足踏みを活性化させるように働く.

4. シミュレーション

小型人型ロボット mighty[14] を想定し, 足踏み制御のシミュレーションを行った. 簡単のため全質量が重心に

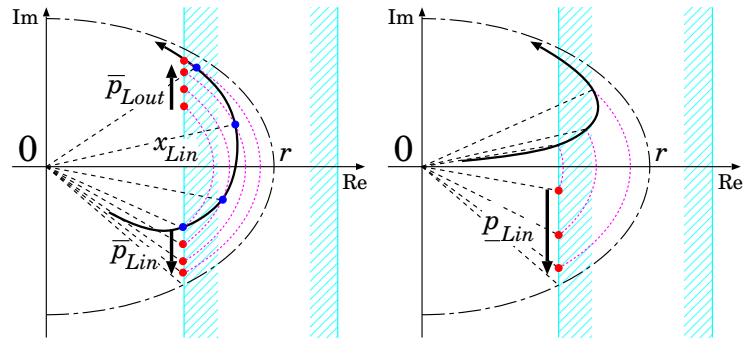


Fig.4 Automatic phase modulation in transition

集中したモデルとし, $x_{Zmin} = -0.0845[\text{m}]$, $x_{Zmax} = 0.0845[\text{m}]$, $z = 0.27[\text{m}]$, $r = 0.09[\text{m}]$, $h = 0.02[\text{m}]$, $q = 0.5$ とした. また ρ を次のような時刻の関数とした.

$$\rho = \begin{cases} \frac{t}{T_1} & (0 \leq t < T_1 = 0.2[\text{s}]) \\ 1 & (T_1 \leq t < T_2 = 4.8[\text{s}]) \\ \frac{T-t}{T-T_2} & (T_2 \leq t < T = 5.0[\text{s}]) \\ 0 & (t \geq T) \end{cases} \quad (17)$$

これは両脚立位から振動へ, 再度両脚立位へと連続的に遷移することを期待したものである. $r > |x_{Zmin}| = |x_{Zmax}|$ なので ZMP は頻繁に飽和し, $\rho = 1$ のときの定常振動の周期はその理論値 $4.7[\text{s}]$ よりも大きくなると思われる.

Fig.5 左に p_Z および重心の運動を表す複素数

$$p_G \equiv x - \frac{\dot{x}}{\omega\sqrt{q}} i \quad (18)$$

の複素平面上での軌跡を示す. 過渡期の両者の歪みはリミットサイクルで近似できるものではなく, ZMP の飽和によってリミットサイクル自体の形状も楕円でなくなっていることがわかる. 斜線ハッチングした領域は左右足裏領域である. 参考のために ${}^M p_Z$ と p_Z , および両者の虚部の時間変化をプロットしたものを Fig.5 中央および右に示す. Morimoto らの定義では, 位相が頻繁に不連続に変化していることがわかる. この点で, 本稿で定義した位相表現の方がより好ましいと言える.

Fig.6 は, 上からそれぞれ ρ , x および x_Z , z_L および z_R , ϕ_L および ϕ_R をプロットしたものである. x および x_Z のグラフで, 支持領域を点ハッチングしている. 過渡期 $t \simeq 0.3 \sim 0.5$ において, ϕ_R が 1 からスタートし, 減少・増加した後に再び 1 となっているが, これはこの期間に p_Z が x_{Lin} と第 1 象限で 2 回交わっていることによる. 前節で述べた通り, このことによる運動への悪影響はない. ρ は式 (17) によって支持状態と無関係に変化させたが, x_Z に対し無撞着な足昇降動作が自動的に生成された.

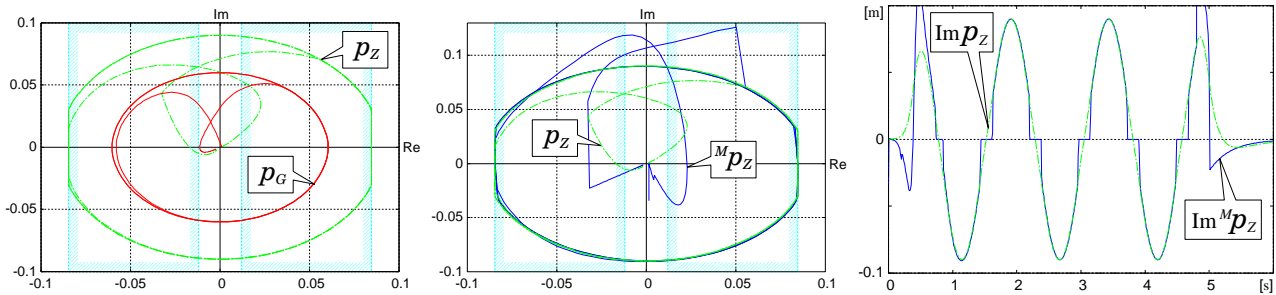


Fig.5 (Left) Loci of COM and ZMP phases in the tested motion (Center) Comparison between p_Z and $^M p_Z$ (Right) Comparison of the time series of imaginary parts of p_Z and $^M p_Z$

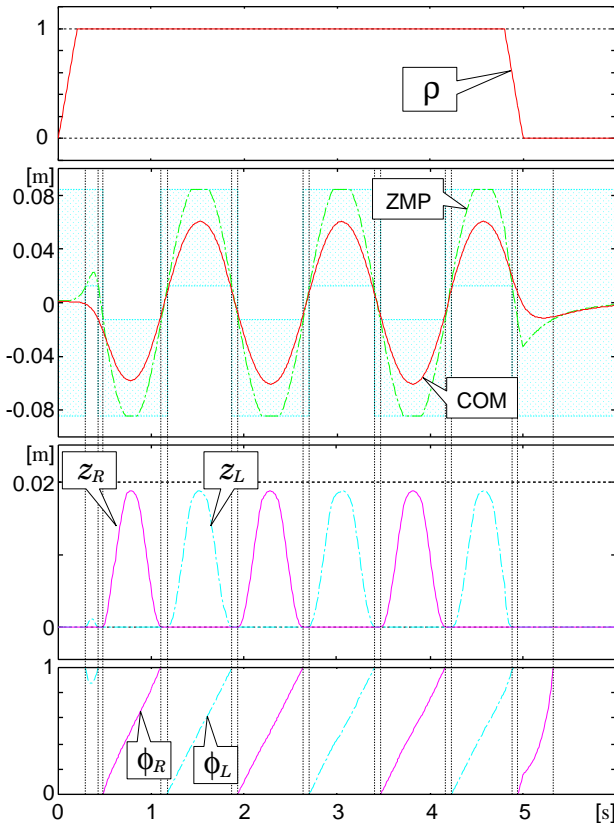


Fig.6 Loci of ρ , COM, ZMP, feet and foot-lifting phase in the tested motion

5. おわりに

立位安定化と重心の自励振動を統合する制御器において、二者間を連続的にかつ無作為に遷移させたときに、過渡期や ZMP 飽和時においても自己無撞着な足昇降が生成される制御を提案した。

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号: 20760170) および次世代研究スーパーstar養成プログラム (九州大学総長裁量経費) の支援を受けた。

参考文献

- [1] S. Grillner. Locomotion in vertebrates: Central mechanisms and reflex Interaction. *Physiological Reviews*, Vol. 55, pp. 367–371, 1975.
- [2] R. Kato and M. Mori. Control Method of Biped Lo-

comotion Giving Asymptotic Stability of Trajectory. *Automatica*, Vol. 20, No. 4, pp. 405–414, 1984.

- [3] L. Jalics, H. Hemami, and Y. F. Zheng. Pattern Generation Using Coupled Oscillators for Robotic and Biorobotic Adaptive Periodic Movement. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 179–184, 1997.
- [4] G. Taga. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. *Biological Cybernetics*, Vol. 73, pp. 97–121, 1995.
- [5] O. Katayama, Y. Kurematsu, and S. Kitamura. Theoretical Studies on Neuro Oscillator for Application of Biped Locomotion. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2871–2876, 1995.
- [6] S. Miyakoshi, G. Taga, Y. Kuniyoshi, and A. Nagakubo. Three Dimensional Bipedal Stepping Motion using Neural Oscillators – Towards Humanoid Motion in the Real World. In *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 84–89, 1998.
- [7] S. Aoi and K. Tsuchiya. Stability Analysis of a Simple Walking Model Driven by an Oscillator With a Phase Reset Using Sensory Feedback. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 391–397, 2006.
- [8] R. Héliot and B. Espiau. Multisensor Input for CPG-Based Sensory-Motor Coordination. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 191–195, 2008.
- [9] J. Morimoto, G. Endo, J. Nakanishi, and G. Cheng. A Biologically Inspired Biped Locomotion Strategy for Humanoid Robots: Modulation of Sinusoidal Patterns by a Coupled Oscillator Model. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 185–191, 2008.
- [10] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [11] 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*, 2009 (to appear).
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.