

模擬レギュレータに基づく二脚ロボットの重心・運脚統合制御

正 杉原知道 (九州大学)

Synthesized COM–Pedipulation Control of Biped Robots Based on Simulated Regulator

*Tomomichi Sugihara (Kyushu University)

Abstract— An autonomous biped controller synthesized from a ZMP manipulation and a pedipulation is proposed. The former actuates COM under the current supporting state, while the latter deforms the supporting region to achieve the desired actuation in the future. They run on an identical body without any confliction, since they originate with the same simulated regulator.

Key Words: Biped robot, COM, ZMP manipulation, Pedipulation, Simulated regulator

1. はじめに

二脚ロボットには、複雑な地形を頑健に踏破する能力が求められる。正確なモデル化の難しい環境で起こる様々な事象に対し、柔軟に振る舞うことが必要である。時刻の関数で記述された参照軌道に従って運動制御する方法 [1] [2] は、概して外因的事象に対する柔軟性が不足する。制御系は、時刻を陽に含まない自律系として設計されることが望まれる。

慣性系に直結した駆動器を持たない脚ロボットの制御は、環境と身体との接点を介した反力の間接操作 [3] と、支持状態を不連続に切り替える制御 [4][5] の共働によって達成される。これらは、同じ運動の異なる二つの側面にそれぞれ焦点を当てた、二脚ロボットの機動力を支える相補的な基盤と言える。両者とも強い非線形な性格を有するため、参照軌道に頼らずにこれらを統合することは容易ではない。

本稿では、上記の二者を齟齬なく統合する制御系を提案する。重心および ZMP [6] に着目したロボットの近似モデルをもとに、ZMP の存在範囲に関する制約を無視した模擬レギュレータを構成し、これが要求する ZMP と実際の支持状態との間に不整合が生じた際、実状に整合させる ZMP 操作と、将来的に不整合を解消するよう支持領域を変形する運脚制御を同時に行う。ZMP 操作と支持状態切り替えをシームレスに結合する方法は大石ら [7] も提案しているが、重心の制動に適用が限定されている。

2. 重心–ZMP 模擬レギュレータ

2.1 線形近似システムと模擬レギュレータ

Fig.1 右のような、近似的に全質量が重心に集中したモデルを仮定しよう。鉛直上向きに z 軸、ロボットの進行方向に x 軸、それらに直交する方向に y 軸をそれぞれ設け、重心および ZMP の座標をそれぞれ $p_G =$

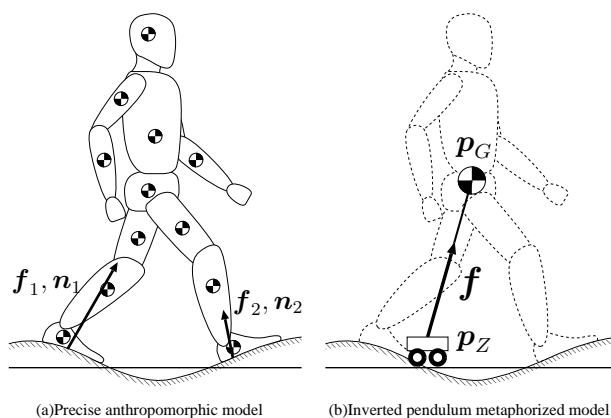


Fig.1 Approximately mass-concentrated biped model

$[x \ y \ z]^T$, $p_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ とすると、水平方向の運動方程式は次式で表される。

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

$$\ddot{y} = \omega^2(y - y_Z) \quad (2)$$

ただし、

$$\omega^2 \equiv \frac{\ddot{z} + g}{z - z_Z} \quad (\geq 0) \quad (3)$$

と定義した。 g は重力加速度である。また z_Z は地面の高さであり、既知とする。この式は、ZMP を操作量として重心を制御できることを示唆する。しかし、ZMP と重心の動きの関係はあまり単純でない。たとえば両脚支持状態から片足を持ち上げる場合、重心の進行方向への運動を阻害しない範囲で ZMP を素早く軸足に移すという、一見矛盾した操作が要求される。そこで、ZMP に頭われるモードを陽に設計できるよう、ZMP を状態変数に含め、ZMP の変化率を入力とした次のようなシステムを考えよう。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (4)$$

ただし Eq.(1)(2) の対称性より x 軸についてのみ考え、

$$\mathbf{x} \equiv \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x_Z \end{bmatrix}, \mathbf{A} \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \omega^2 & 0 & -\omega^2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{u} \equiv \dot{x}_Z$$

である．ここで、重心の鉛直方向の運動が水平方向の運動と比較して十分緩慢である、すなわち $\omega \simeq \text{const.}$ と仮定した．ZMP 変化率は参照状態 ${}^{ref}x$ まわりの状態フィードバックによって決定する．

$$\mathbf{u} = \mathbf{k}^T ({}^{ref}x - \mathbf{x}) \quad (5)$$

たとえば極配置法などを用いれば、ZMP 移動に速いモードを与えるようにゲイン \mathbf{k} を設計できる． y 軸方向についても同様に考える．このシステムの ZMP は、支持領域内に拘束されず、必ずしも実際の支持状態と整合しない．そこでこれを模擬 ZMP と呼ぶことにし、 ${}^S \mathbf{p}_Z = [{}^S x_Z \ {}^S y_Z \ z_Z]^T$ で表そう．

${}^S \mathbf{p}_Z$ が支持領域の外部に存在することは、現在の支持状態では所望の加速度を重心に供給できないことを意味する．このため、次の二つの制御が必要である．一つは、支持領域上の ${}^S \mathbf{p}_Z$ の最近傍点 ${}^d \mathbf{p}_Z$ を目標 ZMP とし、力学的に可能でかつ所望の値に最も近い加速度を与える制御である．これは筆者ら [8] によってすでに提案されている．いま一つは、 ${}^S \mathbf{p}_Z$ を将来的に包含するように支持領域を拡大変形する制御である．これについて次節で述べる．

なお、梶田ら [9] も同様のシステムを用いているが、先験的に与えた ZMP 軌道に追従させることを目的としており、自律系としての制御系設計とは異なる．

2.2 模擬 ZMP に基づく運脚制御

支持領域の変形は、脚を踏み替えることで達成される．軸足および遊脚足先の位置をそれぞれ $\mathbf{p}_S = [x_S \ y_S \ z_S]^T$ 、 $\mathbf{p}_K = [x_K \ y_K \ z_K]^T$ としよう．ここでは ZMP がすでに軸足内にあるとし、遊脚先目標位置 ${}^d \mathbf{p}_K = [{}^d x_K \ {}^d y_K \ {}^d z_K]^T$ を次のように決める．

模擬レギュレータの要求する重心加速度および実際の支持状態において可能な重心加速度は、それぞれ模擬 ZMP および目標 ZMP と重心との位置関係で定まり、両者が矛盾したときに踏み出しの必要性が生じる．ZMP は水平面上の点であるので、実際には x 軸および y 軸に分けて考える． ${}^d x_K$ は次式で与える．

$${}^d x_K = \begin{cases} \lambda_x {}^S x_Z + (1 - \lambda_x) x_S & (l_x < 0 \text{ のとき}) \\ x_K & (l_x \geq 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (6)$$

$$l_x \equiv (x - {}^S x_Z)(x - {}^d x_Z) \quad (7)$$

ただし λ_x は踏み出し量を決める定数 ($\lambda_x > 1$) である．すなわち、所望の重心加速度と実際に与えられる

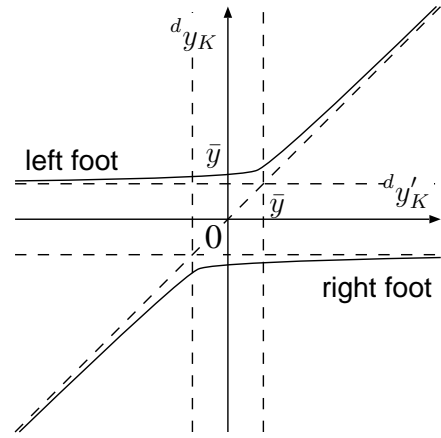


Fig.2 foot location modification function in y -axis

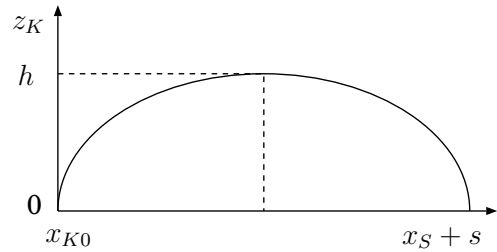


Fig.3 foot height function in xz -plane

重心加速度が逆向きである場合には、着地時にただちに向きを揃えられる位置へと遊脚を運び、そうでないときは現在の位置を維持する． y 軸方向については、同様の計算によって λ_y から ${}^d y'_K$ を求めた後、両脚の干渉を避けるために次のような変換を施す．

$${}^d y_K = \bar{y} + \frac{1}{2} \left\{ {}^d y'_K - \bar{y} \pm \sqrt{({}^d y'_K - \bar{y})^2 + a} \right\} \quad (8)$$

ただし複号は、左足は +、右足は - とする．これは Fig.2 のような概形をとる．定数 a が小さいほど、漸近線の折れ点 $({}^d y'_K, {}^d y_K) = (\bar{y}, \bar{y})$ に変換曲線が近づく．

遊脚足先の初期位置を $\mathbf{p}_{K0} = [x_{K0} \ y_{K0} \ z_{K0}]^T$ とし、目標遊脚高さ ${}^d z_K$ をたとえば

$${}^d z_K = 2h\sqrt{\theta(1-\theta)} \quad (9)$$

$$\theta \equiv \min \left\{ \frac{({}^d x_K - x_{K0})^2 + ({}^d y_K - y_{K0})^2}{|x_S - x_{K0} + s|}, 1 \right\} \quad (10)$$

で決定すれば、 ${}^d y_K = y_{K0}$ が維持される場合に、Fig.3 のような最大高さ h の楕円弧に沿って軸足位置から歩幅 s で着地するような遊脚の運動が得られる．

このように決めた ${}^d \mathbf{p}_K$ は時間的連続性は考慮しておらず、ZMP が軸足に移った瞬間、もしくは重心に対する模擬 ZMP と目標 ZMP の位置関係が反転した瞬間に跳躍する恐れがある．そこで実際には、たとえば 2 次のローパスフィルタなどを通して平滑化する．

以上の制御系を Fig.4 のブロック線図に示す．図中、IP Observer は目標 ZMP ${}^d \mathbf{p}_Z$ と等価な目標重心位置

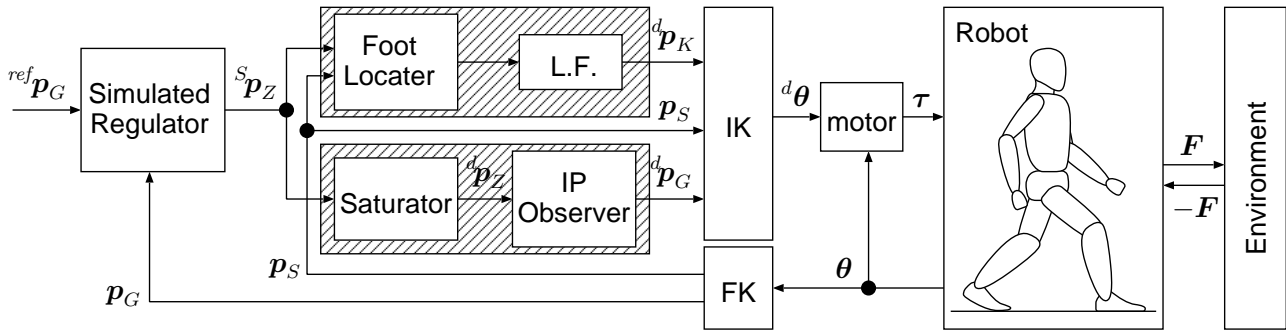


Fig.4 Block diagram of the proposed biped control system with the simulated regulator

${}^d p_G$ を出力するサブシステムである [10] . 運脚制御器と ZMP 操作による重心制御器が、模擬レギュレータから分岐し逆運動学に合流していることが分かる .

3. 目標状態/支持状態遷移の結合による自律的連続歩行

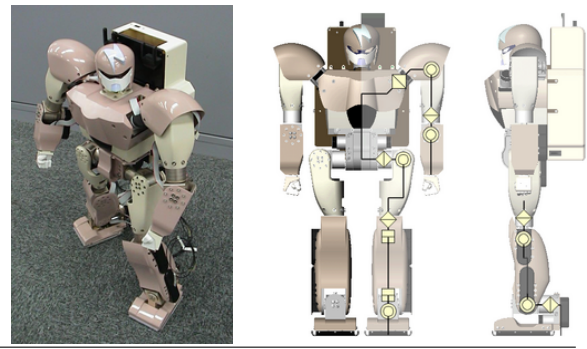
参照重心位置を ${}^{ref} p_G = [{}^{ref} x \quad {}^{ref} y \quad {}^{ref} z]^T$ とすると、 x 軸方向の模擬レギュレータの参照状態は ${}^{ref} x = [{}^{ref} x \quad 0 \quad {}^{ref} x]^T$ となる . ${}^{ref} p_G$ を故意に支持領域の外部に設ければ、前節の制御によって踏み出し動作が生成される . 踏み出しによって支持領域が ${}^{ref} p_G$ を内部に含むように変形されたら、再度 ${}^{ref} p$ を支持領域外部に移動させる . このように、参照状態の遷移と支持状態の遷移を結合することによって、継続的な歩行が実現される . 具体的には、歩幅 s が与えられたら、 x 軸方向の軸足位置 x_S に対し次式で ${}^{ref} x$ を決定する .

$${}^{ref} x = x_S + rs \quad (11)$$

ただし r は適当な正の係数 ($0 < r < 1$) である . また、方向転換する場合には、 x 軸、 y 軸を指定された進行方向に合わせて改めて設け直し、上式によって目標重心位置を与えれば良い .

4. シミュレーション

Fig.5 に示すロボット [11] を想定して、先端以外に質量を持たない倒立振り子モデルを用いたシミュレーションを行い、提案する制御を検証した . 振子の高さは $0.27[m]$ とし、両足裏面とも前方に $0.055[m]$ 、後方に $0.04[m]$ 、左右にそれぞれ $0.035[m]$ の幅を持つものとした . 状態フィードバックゲインは極配置法により設計し、極は x 軸方向に関して $-3, -6, -10$ 、 y 軸方向に関して $-2.5, -25, -30$ とした . 各制御パラメータをそれぞれ $\lambda_x = 2$ 、 $\lambda_y = 3$ 、 $a = 0.001$ 、 $r = 0.9$ とし、最大足上げ高さは $h = 0.01[m]$ とした . また遊脚目標位置には、2 次のローパスフィルタ $\frac{1}{(0.02s + 1)^2}$ を施した . 初期状態は $(x, y) = (0, 0)$ で静止しているとし、両足の初期位置はそれぞれ左足 $(0, 0.045)$ 、右足 $(0, -0.045)$ と



Name:	mighty
Height:	580 [mm]
Weight:	6.5 [kg]
Number of joints:	20 (8 for arms,12 for legs)

Fig.5 External view and specifications of the robot

した . 6 歩目までは歩幅 s を $0.3[m]$ として 3 節の方法によって参照重心位置を自動更新し、6 歩目を着いた直後に、参照重心位置を両足の中点に固定した .

目標重心位置 $({}^{ref} x, {}^{ref} y)$ 、重心 (先端質点) (x, y) 、模擬 ZMP 位置 $({}^S x_Z, {}^S y_Z)$ 、目標 ZMP 位置 $({}^d x_Z, {}^d y_Z)$ と、両足先の目標位置位置 $({}^d x_L, {}^d y_L)$ 、 $({}^d x_R, {}^d y_R)$ およびそれらをローパスフィルタに通した (x_L, y_L) 、 (x_R, y_R) の軌跡を Fig.6 に示す . 遊脚の着地による支持領域の拡大と参照状態の変化により、陽に歩行周期を与えなくても、速度がほぼ一定な継続的歩行が実現できている . またこの例では、 y 軸方向に関して模擬 ZMP と目標 ZMP は常に一致している . Fig.7 は、倒立振り子の運動のスナップショットである . 図中、赤丸は参照重心位置、緑丸は模擬 ZMP、赤紫の領域は支持領域を表す . Fig.8 は、上記の結果から逆運動学によって合成したロボットの運動のスナップショットである .

5. おわりに

ZMP 操作と運脚を統合した二脚ロボットの自律制御を提案した . 目標 ZMP と実際の支持状態との間に不整合が生じたときに、前者は支持状態を優先させる制御を、後者は支持領域を不連続に変形する制御を行う . 両者は外力の制約を取り外した同一の模擬レギュレータ

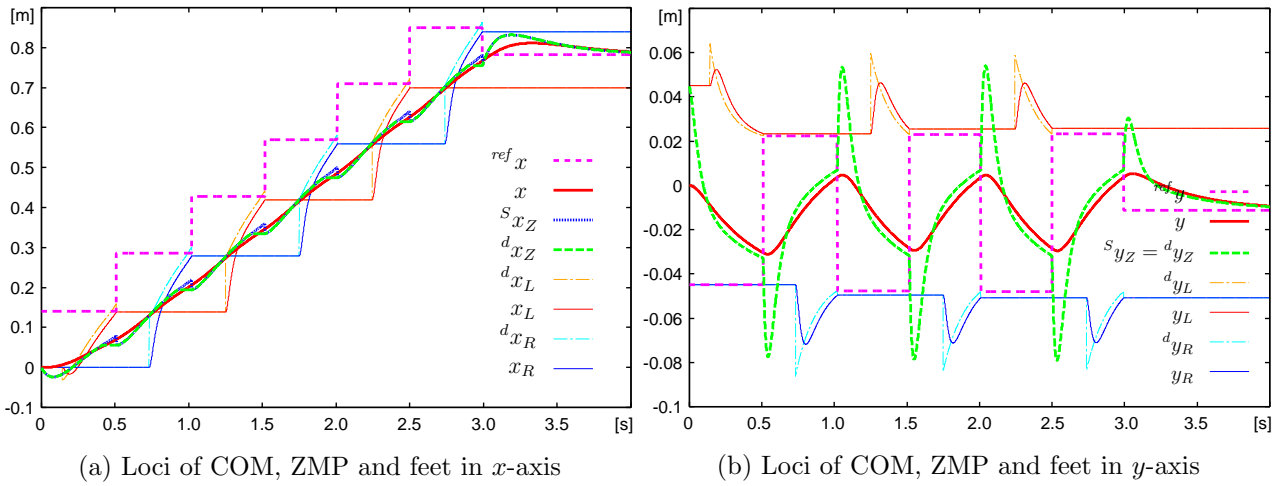


Fig.6 Resulted loci of COM, ZMP and feet

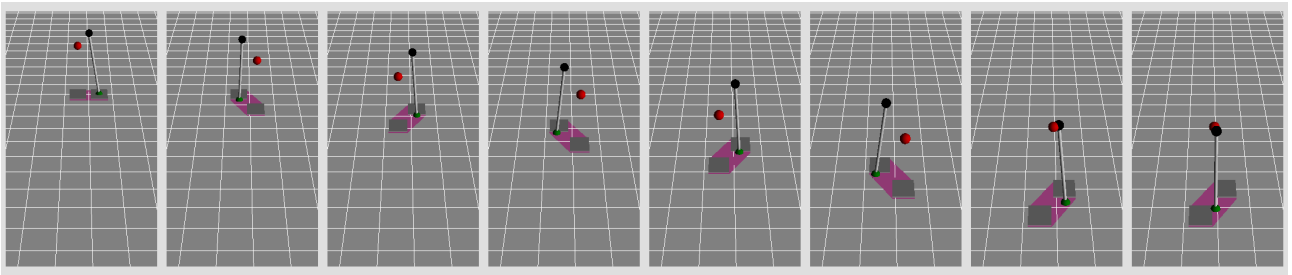


Fig.7 Snapshots of an inverted pendulum motion controlled by the proposed method

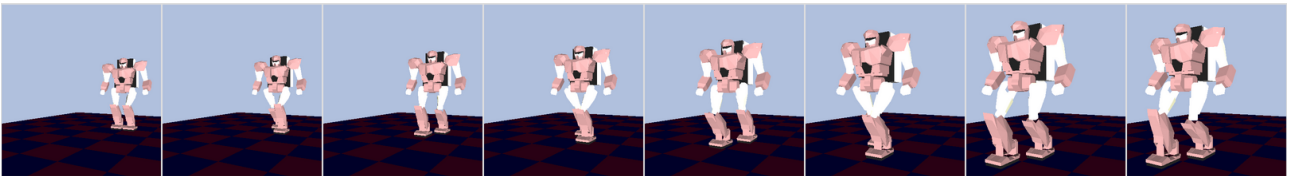


Fig.8 Snapshots of a walking motion replayed by mighty

に基づいており、競合することなく不整合を解消する。

本研究は、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] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, T. Takeya, and I. Kato. Realization of Dynamic Walking Stabilized with Trunk Motion. In *ROMANSY 7*, pp. 68–79, 1988.
- [2] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa, and Toru Takenaka. The Development of Honda Humanoid Robot. In *Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1321–1326, 1998.
- [3] Miomir Vukobratović, A. A. Frank, and Davor Juričić. On the Stability of Biped Locomotion. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, Vol. BME-17, No. 1, pp. 25–36, 1970.
- [4] D. C. Witt. A Feasibility Study on Automatically-Controlled Powered Lower-Limb Prostheses. Report, University of Oxford, 1970.
- [5] 下山勲. 竹馬形 2 足歩行ロボットの動的歩行. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 48, No. 433, pp. 1445–1455, 1982.
- [6] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [7] 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.
- [8] 杉原知道, 中村仁彦. ZMP-重心モデルと台車型倒立振り子モデルのアナロジーによるヒューマノイドロボットの高機動化制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 8, pp. 74–83, 2005.
- [9] 梶田秀司, 金広文男, 比留川博久. 予見制御理論を応用した 2 足歩行パターン生成. 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 1D23, 2002.
- [10] 杉原知道, 中村仁彦. 非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 222–231, 2006.
- [11] 杉原知道, 中村仁彦. 高機動性獲得に向けた運動制御実験のための小型ヒューマノイドロボットの開発. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.