

局所運動情報のみ用いる二脚ロボットの曲線追従歩行制御

野崎晴基 (阪大) 杉原知道 (阪大)

1. はじめに

二脚ロボットは、整備されていない外乱に富んだ環境を自在に移動する、車輪や履帯では持ち得ない機動力を潜在的に備えた移動形態である。複雑な地形上で安定に振る舞う能力に加え、任意のタイミングで移動方向や速度を変更し、咄嗟の状況に対応できる即応性が必要である。

様々な力学的拘束条件の下で、転倒や脚同士の干渉を避けながら、二脚ロボットを自在に移動させるのは未だ困難な問題である。環境や状況が事前によくわかっていれば、予め詳細な参照運動軌道を時刻の関数として設計し、これにロボットを従わせることである程度高度な作業を遂行することができる [1] [2]。しかし現実的な状況で、詳細な軌道を準備できるほどの情報が事前に得られることは稀である。参照軌道に頼らない二脚歩行制御 [3][4][5][6][7] も提案されているが、それらの多くは歩行しか想定していない等、自在な移動と作業を実現するまでには課題が山積している。

このような中、Sugihara[8][9][10][11] は様々な二脚運動を統一的に実現する力学変容に基づく制御を提案し、参照軌道を用いず、任意のタイミングでの動き出し、停止を含む速度可変歩行や、運動中に大きな振動を受けた際の踏み出しによる転倒回避などを可能にした。また筆者ら [12] はこれを拡張し、任意の曲線経路に沿った歩行を可能とする重心制御法を開発した。歩行においては、前後方向には各々の脚をほぼ無制約に振り子運動させられるのに対し、左右方向には互いの干渉を避けなければならない。すなわち前後方向と左右方向を明確に定義し、それぞれの方向について別個の制御を行う必要がある。筆者らの方法は、体幹に固定された移動座標系（体幹座標系）における ZMP 操作量を、曲線経路の接線・法線方向速度と曲率のみから決定するものである。すなわち大局的な曲率半径中心を知る必要が無い。しかし転倒を避けるための運足制御においては、重心の沿う経路と各足の沿う経路とは曲率半径が異なるため、曲率半径中心が分かっている必要があるという問題があった。

本稿では、このような曲線経路に沿った歩行制御において、局所的な運動情報のみで運足を決定する方法を提案する。立位可安定条件に基づけば、局所的には重心に対する目標遊脚着地位置を接線方向速度のみから決定できることが示される。さらに各足が沿うべき経路をマクローリン級数によって近似的に表現する。これによって、零除算に煩わされることなく、ZMP 操作と同様に体幹座標系の接線・法線速度と曲率、およびノミナルな足幅のみから運足を決定することができる。これは即応的な全方位歩行を実現するにあたって有利な性質である。

2. 任意曲線経路に沿う歩行制御 [12]

2.1 力学変容に基づく前後進歩行制御 [11]

二脚ロボットの運動を、重心と両足接地点および地面から受ける反力の関係に基づいて巨視的にとらえる。ロボット前方向、左手方向、鉛直上方向をそれぞれ x , y , z 軸正方向にとる。簡単のため、ロボットの全質量が重心に集中し、重心周りトルクおよび重心高さの変位を無視すると、ロボットの運動方程式は次式で表される。

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

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

ただし、重心位置を $p = [x \ y \ z]^T$, ZMP[13] 位置を $p_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ とそれぞれおいた。また $\zeta \equiv \sqrt{\frac{g}{z}}$, $g = 9.8[\text{m/s}^2]$ は重力加速度である。ZMP には、常に支持領域（地面との接触点群の凸包）の内部に存在しなければならないという制約が課される。以下では ZMP を操作量と見なし、全身協調によってこれを精度良く再現できると仮定する。二脚移動のためには、支持領域内での ZMP 操作と、足の踏み替えによる支持領域の不連続な変形を両立しなければならない。式 (1)(2) は対称性を持つが、二脚ロボットの身体構造が前後方向と左右方向とで非対称な特性を持つ、すなわち前後方向にはほぼ無制約に脚を運動させることができるが、左右方向には互いの脚の干渉を避けなければならないため、それぞれの方向を明確に区別し、異なる制御を施さなければならない。このことを踏まえて、次のように重心制御器を設計する。

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

$$x_Z = \begin{cases} x_{Zmax} & (\text{T1: } \tilde{x}_Z > x_{Zmax}) \\ \tilde{x}_Z & (\text{T2: } x_{Zmin} \leq \tilde{x}_Z \leq x_{Zmax}) \\ x_{Zmin} & (\text{T3: } \tilde{x}_Z < x_{Zmin}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{y}_Z = {}^d y + (q_y + 1) \left(y - {}^d y + f(\gamma) \frac{\dot{y}}{\zeta} \right) \quad (5)$$

$$y_Z = \begin{cases} y_{Zmax} & (\text{S1: } \tilde{y}_Z > y_{Zmax}) \\ \tilde{y}_Z & (\text{S2: } y_{Zmin} \leq \tilde{y}_Z \leq y_{Zmax}) \\ y_{Zmin} & (\text{S3: } \tilde{y}_Z < y_{Zmin}) \end{cases} \quad (6)$$

ただし

$$f(\gamma) \equiv 1 - \rho \exp k \left\{ 1 - \frac{(q_y + 1)^2 \gamma^2}{R^2} \right\} \quad (7)$$

$$\gamma \equiv \sqrt{(y - {}^d y)^2 + \frac{\dot{y}^2}{\zeta^2 q_y}} \quad (8)$$

であり、 ${}^d x$, ${}^d y$ は参照重心位置、 ${}^d v_x$ は前後方向の参照速度、 $q_x (\geq 0)$, $q_y (\geq 0)$, $k (> 0)$, $R (> 0)$ および $\rho (\geq 0)$ は定数である。

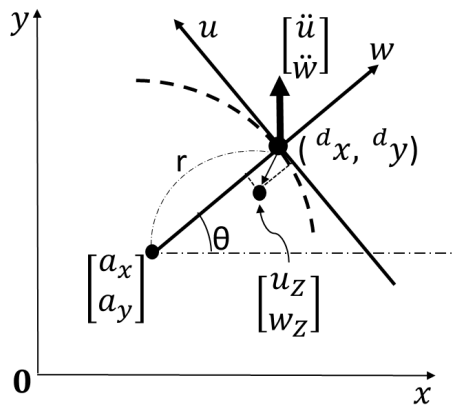


図1 円弧に沿った重心移動座標系

上記制御器は、左右方向には参照位置を中心として重心を安定に自励振動させること、前後方向は重心を参照速度へと追従させることを狙いとしている。左右方向の重心の振動と連動して両足を踏み替え、また前後方向には立位安定条件に基づいて遊脚を交互に着地させることで、継続的な前後進歩行が達成される。

2.2 任意曲線経路に沿った歩行制御 [12]

前節の制御器は、常に歩行方向は変わらないとし、前後方向と左右方向がそれぞれ慣性座標系の x 軸、 y 軸と常に一致するとして設計した。しかし、ロボットが慣性系内を自由に歩行する場合、前後・左右方向は慣性座標系と無関係に、頻繁に変化する。したがって、制御器は体幹とともに移動する座標系（体幹座標系）に対して設計する必要がある。

簡単のため、ロボットをある円弧経路に沿って歩行させることを考えよう。重心が慣性系内の点 (a_x, a_y) を中心として水平面上で円弧を描くように運動するものとし、次のように座標変換する。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、重心座標の動径および偏角をそれぞれ r および θ とおいた。ロボットにとっての前後方向および左右方向は、重心運動の接線方向および動径方向とそれぞれ対応づけることができる。そこで図1のように、重心位置を原点とし、接線方向を u 軸、動径方向を w 軸とする体幹座標系を新たに考える。 u - w 座標系における ZMP 位置を (u_z, w_z) として運動方程式 (1)(2) を変換すると、次式を得る。

$$\ddot{r} = r\dot{\theta}^2 - \zeta^2 w_z \quad (10)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2r\dot{\theta}}{r} - \frac{\zeta^2 u_z}{r} \quad (11)$$

式 (10) の第1項は遠心力に、式 (11) の第1項はコリオリ力にそれぞれ対応する。前説の制御に基づいて、 u_z 、 w_z を次のように設計する。

$$u_z = -(q_\theta + 1) \frac{d v_u - \dot{u}}{\zeta} - \frac{2\dot{w}\dot{u}}{\zeta^2 r} \quad (12)$$

$$w_z = \frac{\dot{u}^2}{\zeta^2 r} + f(w, \dot{w}) \frac{q_r + 1}{\zeta} \dot{w} + (q_r + 1)(w - d_w) \quad (13)$$

ただし、 $d v_u$ は円周に沿った参照速度、 d_w は動径方向の参照位置、 $q_\theta (> 0)$ 、 $q_r (> 0)$ は定数であり、

$$f(\gamma) = 1 - \rho \exp k \left\{ 1 - \frac{(q_r + 1)^2}{R^2} \gamma^2 \right\} \quad (14)$$

$$\gamma = \sqrt{(w - d_w)^2 + \frac{\dot{w}^2}{\zeta^2 q_r}} \quad (15)$$

とする。 $q_\theta = 0$ 、 $\rho = 1$ とすれば、遠心力・コリオリ力を補償しながら、動径方向には d_w を中心とする振幅 $\frac{R}{q_r + 1}$ 、周期 $\frac{2\pi}{\zeta \sqrt{q_r}}$ の安定リミットサイクルに、前後方向には速度 \dot{u} を $d v_u$ にそれぞれ収束させることができる。

式 (12)(13) が θ を含んでおらず、 u - w 座標系での重心運動に関わる状態量と、局所的な曲率半径のみで定義されていることに注意されたい。これは、ある円周に沿って歩行させるために必要な情報が、経路からの偏差と曲率半径のみであることを意味する。さらに曲率半径は正負どちらの値も許容され、時計回り・反時計回りの旋回を統一的に扱うことができる。すなわち大局的な経路形状を情報として与える必要がない。さらに、極限 $r \rightarrow \infty$ すなわち $1/r = 0$ となる場合を考えれば、これは前節で設計した前後進歩行制御器と一致する。したがってこの制御は、円弧状経路に限らず、直線を含む任意の滑らかな曲線経路への追従歩行にそのまま適用可能である。一方、逆の極限として $r \rightarrow 0$ となる場合を考えると、この制御器は定義できなくなる。すなわちその場旋回運動には適用できない。

継続的な歩行を維持するためには、立位可安定条件を満たすように遊脚足先を交互に着地させる必要がある。これは平面極座標で表せば、

$$\theta_S = \theta + \frac{\theta}{\zeta} \quad (16)$$

$$r_S = r \pm r_P \quad (17)$$

とすれば良い。ただし、 $d r_S$ および $d \theta_S$ は、それぞれ遊脚足先目標着地位置の動径および偏角、 r_P は両足間の左右方向幅の半分の距離である。復号 \pm は、遊脚の左右から決定する。この目標位置に追従するよう、次の二次遅れ系で遊脚足先位置を制御する。

$$\ddot{\theta}_* = -\frac{2\dot{\theta}_* \dot{r}_*}{r_*} - C\dot{\theta}_* - K \frac{r_S}{r_*} \sin(\theta_* - \theta_S) \quad (18)$$

$$\ddot{r}_* = r_* \dot{\theta}_*^2 - C\dot{r}_* - K(r_* - r_S \cos(\theta_* - \theta_S)) \quad (19)$$

ただし、*には L または R が入る。 L は左足、 R は右足のそれぞれ偏角および動径であることを意味する。足上げ高さは先行研究 [11] と同様に、重心の左右方向揺動に基づいて定義される位相に従って決定する。

3. 局所運動情報のみ用いる曲線追従歩行制御

3.1 重心制御

前章の制御器は、次のような問題があった。

1. ロボットの持つ情報から運動の基準点を指定することが困難となる。これは、極座標系の中心位置が不明な場合、制御入力を元にロボットに運動をさせることが困難になることを意味する。

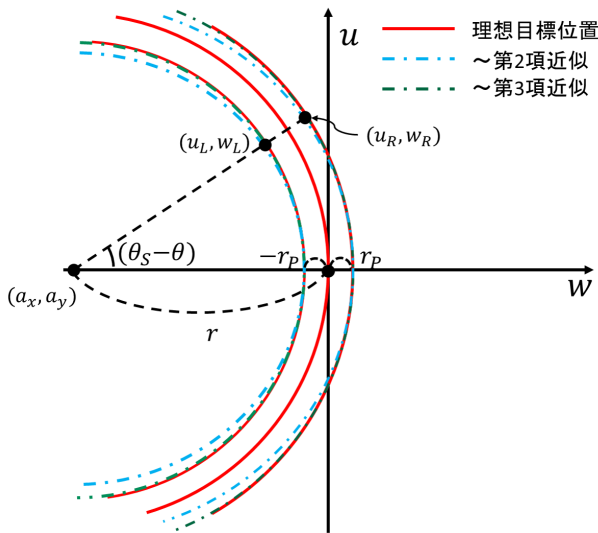


図2 マクローリン展開した際の足先目標位置

2. $r \rightarrow \infty$ が直線に沿った歩行制御に対応するが、 ∞ を数値的に表現することは不可能である。

後者の問題は、曲率半径 r の代わりに曲率 κ を用いることで解決できる。すなわち運動方程式 (10)(11) を、次のように書き改める。

$$\ddot{u} = -2\dot{u}\dot{\kappa} - \zeta^2 u_Z \quad (20)$$

$$\ddot{w} = \dot{u}^2 \kappa - \zeta^2 w_Z \quad (21)$$

ただし $\kappa = 1/r$ である。 κ を用いることで直線歩行を包含した曲線追従歩行の表現が可能となる。直線歩行は $\kappa = 0$ に対応する。なお、その場旋回が $\kappa \rightarrow \infty$ に対応することにも注意されたい。本表現においては、原理的に実現できない運動と、数値的に表現できない運動とが一致している。

3.2 遊脚の運足制御

遊脚の運足制御についても体幹座標系で表現し直す。図2より次が成り立つ。

$$u_S = r_S \sin(\theta_S - \theta) \quad (22)$$

$$w_S = r_S \cos(\theta_S - \theta) - r \quad (23)$$

ただし、右下の添字 S は各座標系での遊脚足先目標位置を表す。ここで、遊脚の足先目標着地位置が立位可安定条件に基づいて式 (??)(??) のように決定されることを用いれば、 $\kappa = 1/r$, $\theta = \dot{u}\kappa$ であることより次式を得る。

$$u_S = \left(\frac{1}{\kappa} \pm r_P\right) \sin\left(\frac{\dot{u}\kappa}{\zeta}\right) \quad (24)$$

$$w_S = \left(\frac{1}{\kappa} \pm r_P\right) \cos\left(\frac{\dot{u}\kappa}{\zeta}\right) - \frac{1}{\kappa} \quad (25)$$

すなわち、曲率半径中心から見た足先目標位置の偏角を、重心の経路接線方向速度および曲率のみから決定可能である。さらに、正弦関数および余弦関数をそれぞれマクローリン展開する。それぞれ第3項までとすると次式のようになる。

$$u_S = \left(\frac{\dot{u}}{\zeta} - \frac{\dot{u}^3 \kappa^2}{6\zeta^3} + \frac{\dot{u}^5 \kappa^4}{120\zeta^5}\right) (1 \pm r_P \kappa) \quad (26)$$

$$w_S = \left(-\frac{\dot{u}^2 \kappa}{\zeta^2} + \frac{\dot{u}^4 \kappa^3}{\zeta^4}\right) (1 \pm r_P \kappa) \pm r_P \quad (27)$$

このようにすることで、 $1/\kappa$ を式から消去し、計算において零除算に煩わされるのを避けることができる。また、近似を用いない理想的な足先目標位置と、マクローリン展開の第2項まで、第3項までをそれぞれ使用した足先目標位置を図2に示す。マクローリン展開の第3項までとった場合、少なくとも視認できる程度の誤差は無くなる。

また、足先目標位置への追従制御も次のように書き換える。

$$\ddot{u}_* = -{}^d\ddot{u} + u_* ({}^d\dot{u}\kappa)^2 - 2\dot{w}_* {}^d\dot{u}\kappa - w_* {}^d\ddot{u}\kappa + K(u_S - u_*) - C({}^d\dot{u} + \dot{u}_* + w_* {}^d\dot{u}\kappa) \quad (28)$$

$$\ddot{w}_* = -{}^d\ddot{w} + w_* ({}^d\dot{u}\kappa)^2 + 2\dot{u}_* {}^d\dot{u}\kappa + u_* {}^d\ddot{u}\kappa + K(w_S - w_*) - C({}^d\dot{w} + \dot{w}_* - u_* {}^d\dot{u}\kappa) \quad (29)$$

ただし、添字 $*$ には L もしくは R が入り、それぞれ右足、左足の情報を表す。

4. シミュレーション

人型ロボット mighty[14] を想定し、提案方法をシミュレーション上で実装した。ただし簡単のため、全質量が重心に集中しているモデルを用いた。重心高さは 0.26[m]、最大足上げ高さは 0.02[m], $k = 1$ とした。目標 ZMP 座標が支持領域を外れた際には、支持領域上の最近某点をとることで置き換えた。遊脚時の設計パラメータを $K = 490$, $C = 26$ とした。指令値は体幹座標前方方向への速度 ${}^d v_u$ [m/s] を与え、運動中に $-0.2 \sim 0.2$ の範囲で無作為に変更した。体幹座標左右方向への速度は与えず、常に 0 とした。曲率 κ を $-10 \sim 10$ の範囲で無作為に変更した。

シミュレーション中のロボット歩行のスナップショットを図3に、任意の目標速度および曲率を与えた時の x - y 平面における重心と体幹座標中心の軌跡を図4に、その際の目標速度及び体幹座標前方への速度の変化を図5に示す。図4, 5より、無作為に変化させた目標速度および曲率に対して、直線経路、曲線経路に関わらず滑らかに追従できている。

5. おわりに

二脚ロボットの体幹を基点とした、旋回を伴う歩行・直進歩行を包含する制御器、および遊脚制御について提案した。制御器を体幹座標系で定義し、曲率半径の代わりに曲率を用いることで局所運動情報のみから運足を決定することが可能となった。また、正弦関数および余弦関数をマクローリン展開を用いて近似することで、零除算に煩わされることなく常に計算可能とできた。

謝辞 本研究は科学研究費補助金挑戦的萌芽研究課題番号 #26540135 (研究代表者: 杉原知道) の支援を受けた。

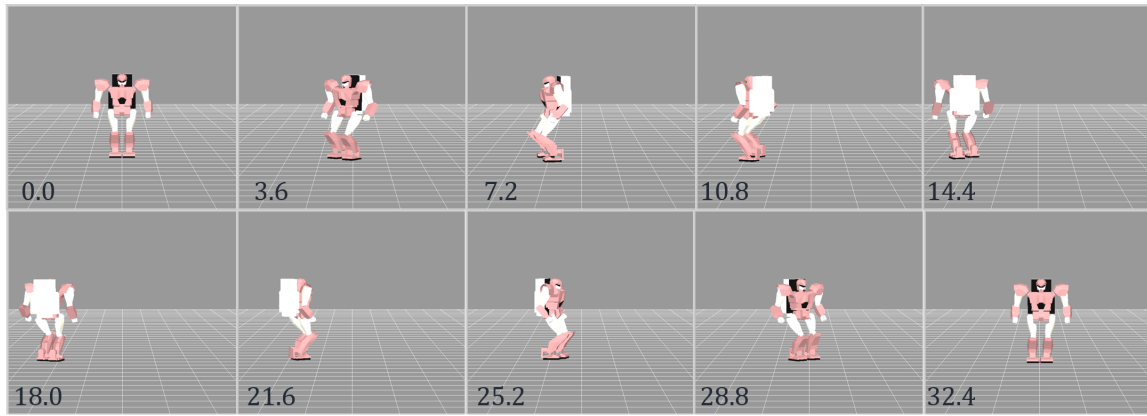


図3 円弧に沿った歩行シミュレーションのスナップショット

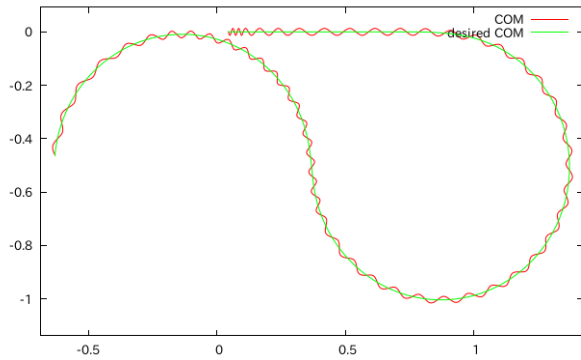


図4 無作為に曲率及び目標速度を変化させた際の重心位置及び体幹中心

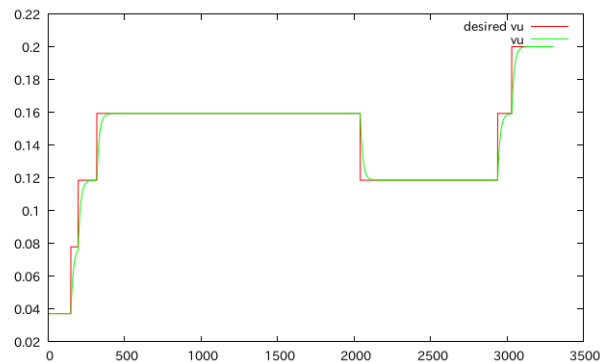


図5 目標速度に対する速度追従性

参考文献

- [1] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, T. Takeya, and I. Kato: "Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion", in Proceedings of 7th CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp.68-79, 1988.
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka: "The development of Honda humanoid robot", in Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp.1321-1326. IEEE, 1998.
- [3] F. Gubina, H. Hemami, and Robert B McGhee: "On the dynamic stability of biped locomotion" IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol.2, pp.102-108, 1974.
- [4] T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase, and T. Kawase: "Realization of a high speed biped using modern control theory" International Journal of Control, vol.40, pp.107-119, 1984.
- [5] M. Yamakita, F. Asano, and K. Furuta: "Passive velocity field control of biped walking robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00., Vol. 3, pp.3057-3062. IEEE, 2000.
- [6] S. Kajita, O. Matsumoto, and M. Saigo: "Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA., Vol. 3, pp.2299-2306. IEEE, 2001.
- [7] C. Chevallereau, J. W Grizzle, and C. Shih: "Asymptotically stable walking of a five-link underactuated 3-D bipedal robot" IEEE Transactions on Robotics, vol.25, no.1, pp.37-50, 2009.
- [8] T. Sugihara: "Standing stabilizability and stepping maneuver in planar bipedalism based on the best COM-ZMP regulator", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA'09., pp.1966-1971. IEEE, 2009.
- [9] T. Sugihara: "Consistent biped step control with com-zmp oscillation based on successive phase estimation in dynamics morphing", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4224-4229. IEEE, 2010.
- [10] T. Sugihara: "Reflexive step-out control superposed on standing stabilization of biped robots", IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.741-746. IEEE, 2012.
- [11] T. Sugihara: "Biped control to follow arbitrary referential longitudinal velocity based on dynamics morphing", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1892-1897. IEEE, 2012.
- [12] 野崎晴基, 杉原知道: "滑らかな曲線経路に沿った二脚ロボットの任意速度歩行制御" ロボティクス・メカトロニクス, 2014.
- [13] M. Vukobratović and J. Stepanenko: "On the stability of anthropomorphic systems" Mathematical Biosciences, vol.15, no.1, pp.1-37, 1972.
- [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.