

二脚ロボットの任意速度前後進制御のための力学変容

正 杉原知道 (大阪大学)

1. はじめに

実環境内を移動する脚ロボットにおいては、製造用ロボットと違い、運用環境や作業そのものについて事前に詳細な情報が得られることがほとんど期待できない。地形の不確かさや予期しない外乱に富んだ空間内で作業する上で、運動の参照軌道を、フィードバック制御系と切り離し時刻の関数として計画する方法 [1][2][3][4] の限界は明白である。しかし、環境との結合状態、すなわち支持状態を不連続に変化させながら、立ち作業、移動等の様々な運動を行う脚ロボットを、参照軌道に頼らず制御することは容易でない。

軌道計画をフィードバックループに組み込む方法 [5][6][7] は、地形や運動指令の変更に対応できるとして、今のところ注目すべき成果を挙げている。しかし、足を運ぶ時間や順序が先験的に与えられるなど比較的強い拘束が課せられ、想定された運動の再現に長ける半面、想定外の状況に対し柔軟に振る舞う能力に欠ける。軌道に頼らない制御の多く [8] [9] [10] [11] [12] は、今のところ立位制御と併用できない。

このような背景の下、筆者 [13] は力学変容と呼ぶパラダイムに基づいて、支持状態の変形と支持領域内での反力操作を大局的に設計し、特に左右方向の立位制御、定常的な踏み替え、咄嗟の踏み出しを統合する制御器を提案してきた。本稿ではこれを拡張し、任意の指令速度を任意のタイミングで与えてもそれに追従する前後進歩行制御を提案する。(i) 安定平衡点を持つ立位制御から安定平衡点の存在しない速度追従制御への連続的変形、(ii) 速度追従制御への変形に同期した運足制御、(iii) 速度追従制御から立位制御に復帰する際の安定平衡点の無撞着な設定、の三者によって、これが可能となる。

上記の (ii) 運足制御に含まれる、進行方向への遊脚踏み出しは、本質的に筆者自身 [14] による模擬レギュレータと同じ原理に基づくものだが、そこでは (I) 歩行のために参照位置を自動更新するオートマトンの設計が別途必要、(II) 前後・左右方向の制御器を同じように設計しているため、積極的に左右方向の足の干渉を避ける仕組みに欠ける、(III) ZMP 変化率を操作量としていたため、実装時に過度のサーボ制御性能と過度の反力計測精度を要求する、という問題があった。本稿で提案する方法は、これらを全て解決している。

2. 重心-ZMP モデルと力学変容 [13]

力学変容は、個々の運動制御器をフィードバック制御系がなすべき力学構造に基づいて設計し、制御器の連続変形によって異種の運動間をシームレスに遷移する枠組である。二脚ロボット制御をこの枠組で考えよう。図 1 のように、前向きに x 軸、左向きに y 軸、鉛直上向きに z 軸をそれぞれ設ける。簡単のため、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

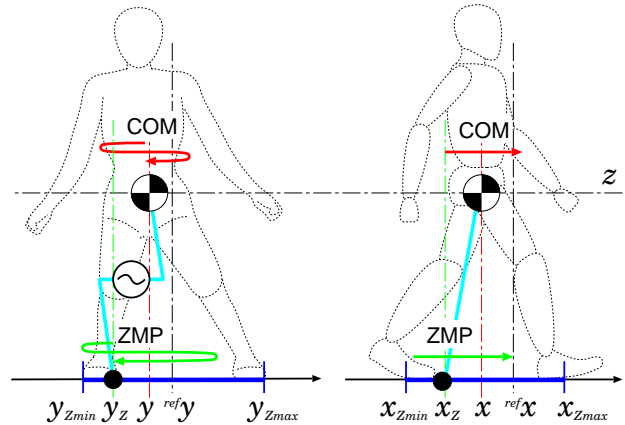


図 1 重心-ZMP モデル

z は一定であると仮定する。重心位置を $p = [x \ y \ z]^T$ 、ZMP 位置を $p_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ とそれぞれおくと、次の運動方程式を得る。

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

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

ただし $\omega \equiv \sqrt{g/z}$ 、 $g = 9.8[\text{m/s}^2]$ は重力加速度である。ZMP p_Z には、必ず支持領域 S 内部に存在するという拘束条件が課される。すなわち、

$$p_Z \in S \quad (3)$$

脚移動のためには、支持領域 S 内での ZMP 操作と、 S の不連続変形を両立させなければならない。二脚ロボットは左右一対の脚を使ってこれを行う。式 (1)(2) は x と y について対称だが、両脚は左右方向の運動において干渉しやすいため、2 方向に同じ制御器を適用することは不適當である。

左右方向については、これまでに次のような制御器を提案した。すなわち、重心参照位置 ${}^d y$ に対し目標 ZMP を次のように決定する。

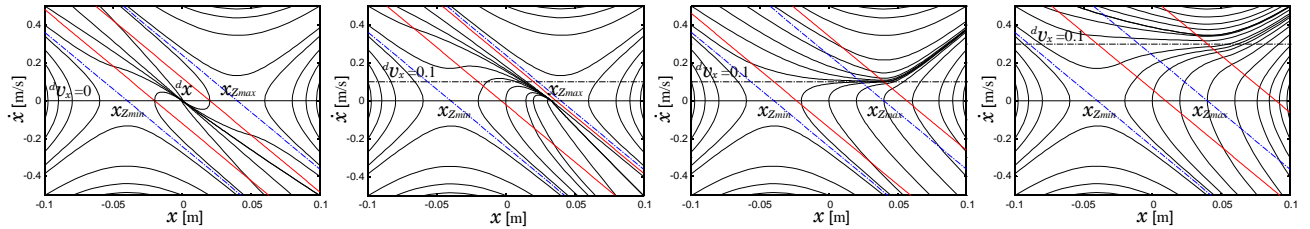
$$\tilde{y}_Z = {}^d y + (q_y + 1) \left(y - {}^d y + f(\zeta) \frac{\dot{y}}{\omega} \right) \quad (4)$$

$$y_Z = \begin{cases} y_{Zmax} & (S1: \tilde{y}_Z > y_{Zmax}) \\ \tilde{y}_Z & (S2: y_{Zmin} \leq \tilde{y}_Z \leq y_{Zmax}) \\ y_{Zmin} & (S3: \tilde{y}_Z < y_{Zmin}) \end{cases} \quad (5)$$

ただし

$$f(\zeta) \equiv 1 - \rho \exp k \left\{ 1 - \frac{(q_y + 1)^2 \zeta^2}{r^2} \right\} \quad (6)$$

$$\zeta \equiv \sqrt{(y - {}^d y)^2 + \frac{\dot{y}^2}{\omega^2 q_y}} \quad (7)$$



(a) $q_x = 1, d_{v_x} = 0$ [m/s] (b) $q_x = 1, d_{v_x} = 0.1$ [m/s] (c) $q_x = 0, d_{v_x} = 0.1$ [m/s] (d) $q_x = 0, d_{v_x} = 0.3$ [m/s]

図2 参照速度と極配置の変更によるレギュレータから速度追従系への変容

であり, 定数 $q_y (\geq 0)$, $k (> 0)$, $r (> 0)$ および $\rho (\geq 0)$ は設計パラメータである. また, 支持領域 S が y 方向の閉領域 $[y_{Zmin}, y_{Zmax}]$ で表されると簡単化している. 実際の ZMP が目標 ZMP をよく再現するならば, y 方向の重心運動は次の区分自律系に従う.

$$\ddot{y} = \begin{cases} \omega^2 y - \omega^2 y_{Zmax} & (S1) \\ -\omega(q_y + 1)f(\zeta)\dot{y} - \omega^2 q_y(y - d_y) & (S2) \\ \omega^2 y - \omega^2 y_{Zmin} & (S3) \end{cases} \quad (8)$$

この制御器は, $\rho = 0$ のとき最良重心-ZMP レギュレータ [15] 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.

$$(y - d_y)^2 + \frac{\dot{y}^2}{\omega^2 q_y} = \frac{(1 + \log \sqrt{\rho})r^2}{(q_y + 1)^2} \quad (9)$$

特に $\rho = 1$ のとき, これは振幅 $\frac{r}{q_y + 1}$, 周期 $\frac{2\pi}{\omega\sqrt{q_y}}$ の単振動となる. 定常状態においては ZMP も重心の振動に位相遅れなしで同期し, 振幅は r となる. これに基づいて, 力学的拘束条件を自動的に満足しながら定常的足踏みを行う制御を提案した. 詳細は文献 [13] を参照されたい. また, 目標 ZMP を再現するための全身モータ制御については杉原ら [16] を参照されたい.

3. 前後方向の任意速度追従系への力学変容

3.1 立位制御から速度追従制御への変容

前後歩行のための制御器設計を考えよう. 立位制御においては, 支持領域の変形は考える必要がなく, 前後, 左右とも参照位置を安定平衡点とするようなレギュレータを設計すれば良かった. すなわち x 方向の重心参照位置を d_x , 参照速度を d_{v_x} とすると,

$$\ddot{x}_Z = d_x + (q_x + 1) \left(x - d_x + \frac{\dot{x} - d_{v_x}}{\omega} \right) \quad (10)$$

$$x_Z = \begin{cases} x_{Zmax} & (T1: \tilde{x}_Z > x_{Zmax}) \\ \tilde{x}_Z & (T2: x_{Zmin} \leq \tilde{x}_Z \leq x_{Zmax}) \\ x_{Zmin} & (T3: \tilde{x}_Z < x_{Zmin}) \end{cases} \quad (11)$$

ただし, 支持領域 S は x 方向の閉領域 $[x_{Zmin}, x_{Zmax}]$ で表されると簡単化している. なお, この簡単化は後ほ

ど解消される. このとき x 方向の重心運動は次に従う.

$$\ddot{x} = \begin{cases} \omega^2 x - \omega^2 x_{Zmax} & (T1) \\ -\omega(q_x + 1)(\dot{x} - d_{v_x}) - \omega^2 q_x(x - d_x) & (T2) \\ \omega^2 x - \omega^2 x_{Zmin} & (T3) \end{cases} \quad (12)$$

状態 T2 において, $q_x \neq 0$ ならば平衡点は $(x, \dot{x}) = \left(d_x + \frac{q_x + 1}{\omega q_x} d_{v_x}, 0 \right)$ である. すなわちこのとき, d_{v_x} は平衡点を d_x から動かす作用があるが, 速度を d_{v_x} に収束させるものではない. 図 2(a) は $q_x = 1$ および $(d_x, d_{v_x}) = (0, 0)$, 同図 (b) は $q_x = 1$ および $(d_x, d_{v_x}) = (0, 0.1)$ に対する系の相図である. (b) において平衡点がシフトしている事がわかる. 一方, $q_x = 0$ のとき, T2 における運動方程式は次のようになる.

$$\ddot{x} = -\omega(\dot{x} - d_{v_x}) \quad (13)$$

このとき平衡点は存在せず, \dot{x} は d_{v_x} に収束する. 収束の時定数は ω のみに依存することに注意されたい. $d_{v_x} > 0$ ならば状態はいずれ T1 へ, $d_{v_x} < 0$ ならば T3 へとそれぞれ移行し, \dot{x} は発散する. 図 2(c) は $q_x = 0$ および $(d_x, d_{v_x}) = (0, 0.1)$, 同図 (d) は $q_x = 0$ および $(d_x, d_{v_x}) = (0, 0.3)$ に対する系の相図であり, 上に説明した事が起こっている様子が見てとれる.

3.2 速度追従制御への変形に同期した運足

前節に述べた内容から, 次の二つの事柄が言える.

1. 立位制御において $d_{v_x} \neq 0$ とすることはあまり意味がない. 非零の d_{v_x} が与えられた時点で, 速度追従制御が求められていると判断すべきである.
2. 速度追従制御においては, 足の踏み替えが起これなければ運動はいずれ破綻する. したがって非零の d_{v_x} が与えられたら, 自動的に左右方向の自励振動を生じさせるべきである.

すなわち, ここまで独立な制御パラメータとして考えていた d_{v_x} , q_x , ρ を, 次のように連動させる.

$$(q_x, \rho) = \begin{cases} (0, 1) & (d_{v_x} \neq 0 \text{ のとき}) \\ (q'_x, \rho') & (d_{v_x} = 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (14)$$

ただし, q'_x , ρ' はそれぞれ, 非零の d_{v_x} が与えられる直前の q_x , ρ のリザーブ値である.

前後方向の運足については, 片足が離床し遊脚となっているならば, 既報 [15] にて述べたように, 立位可安

定条件に基づいて目標踏み出し位置 d_{x_S} を定め、それによって遊脚を運ぶことで、足の着床と同時に再度速度が収束する力学系に変容し、継続的な歩行が可能になる。今、 $q_x = 0$ であるので、強立位可安定条件と弱立位可安定条件は同値になり、それに基づけば d_{x_S} は次のように定めれば良い。

$$d_{x_S} = x + \frac{\dot{x}}{\omega} \quad (15)$$

これは本質的に模擬レギュレータに基づく運足制御 [14] と同じものである。

3.3 立位制御への復帰するための安定平衡点設定

速度追従制御においては参照位置 d_x が制御器に含まれず、ロボットは d_x と無関係に移動する。立位制御に復帰する際に移動前の参照位置が残っていることは、速度追従により移動したいという要求と矛盾し、危険である。したがって立位制御への復帰時には、これを支持領域の内部で設定し直さなければならない。

前節の通り、立位制御への復帰は $d_{v_x} = 0$ とすることでなされる。このとき速やかにロボットが停止するよう、 $d_{v_x} \neq 0$ である間は常に参照位置を現在の重心位置で更新する、すなわち、 $d_x = x$ とする。

4. シミュレーション

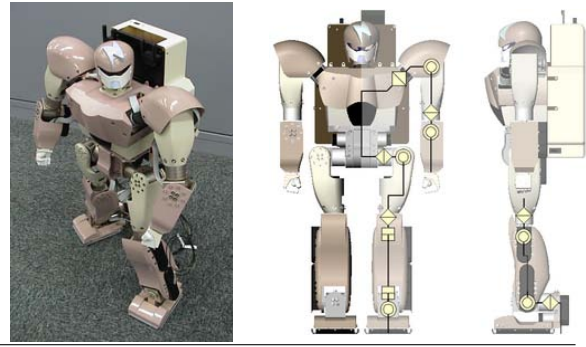
図3に示す小型人型ロボット mighty [17] を想定し、前後歩行制御のシミュレーションを行った。簡単のため、全質量が重心に集中しているモデルを用い、左右片足幅を $r = 0.05$ [m]、重心高さを $z = 0.26$ [m]、 $q_y = 1$ 、 $k = 1$ とした。両足とも前方に 0.055 [m]、後方に 0.04 [m]、左右にそれぞれ 0.035 [m] の幅を持つ長方形で表現されている。また各足が遊脚となった際に、式 (15) で決まる目標位置に追従する、次のような二次遅れ制御器を設計した。

$$\ddot{x}_* = K(d_{x_S} - x_*) - C\dot{x}_* \quad (16)$$

ただし $*$ には L または R が入る。 x_L, x_R はそれぞれ左足先、右足先の x 方向位置である。 $K = 3000$ 、 $C = 50$ とした。式 (5)(11) における簡単化された飽和則は、目標 ZMP の支持領域上最近傍点をとる操作で代替した。微分方程式の数値解法には 4 次の Runge-Kutta 法を用い、積分時間幅は 0.01 [s] とした。

図4に示すようなシミュレーションソフトウェアを開発した。本ソフトウェアにおいては、各パラメータを右部スライダによって変更でき、またその結果が即座にシミュレーションに反映される。初期状態を $(x, \dot{x}, y, \dot{y}) = (0.0409, 0, 0, 0)$ 、 $q_x = 0.5$ 、 $\rho = 0$ とし、スライダを使って d_{v_x} を $-3.0 \sim 3.0$ [m/s] の範囲で無作為に変更した。動作の最後においては $d_{v_x} = 0$ [m/s] とし、立位制御に戻した。動画スナップショットを図5に、重心目標速度・重心速度・重心位置・ZMP位置・足先位置・支持領域等をプロットしたグラフを図6に、それぞれ示す。

まず図6(a)より、 x 方向重心速度が目標速度に追従していることがわかる。運動中、特に負の目標速度に対する後退歩行中に、何度も ZMP が支持領域縁に膠着し、重心が一時的に不可制御になっているが、遊脚の着地と同時に可制御領域が拡がり、再度目標速度に収



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

図3 mighty の外観と関節配置

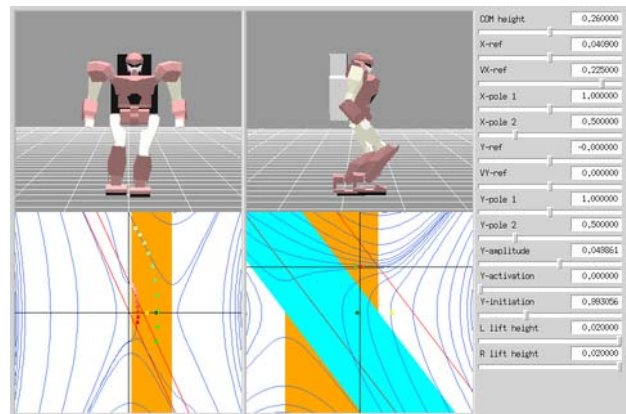


図4 シミュレーションプログラムのスクリーンショット

束している。ただし遊脚着地の瞬間は ZMP が不連続に移動しているため、速度が微分不可能となっている。

同図 (b) は、 x 方向の重心位置、ZMP 位置、目標踏み出し位置、両足位置、支持領域を、(c) は y 方向の重心位置、ZMP 位置、支持領域を、それぞれプロットしたものである。目標速度の切り替えタイミングは無作為に選んだにも関わらず、動き出し、方向転換、停止の過渡期も含めて、ZMP 操作による重心の制御と踏み替えによる支持領域変形、両足の運びが (x, y) 方向において整合し、継続的に運動を行えている。

5. おわりに

時刻の関数として定義された参照軌道に頼らず、立位制御から踏み出し、歩行まで表現可能な自律系を実現する力学変容に基づいた二脚運動制御器を開発した。任意の指令速度を任意のタイミングで与えてもそれに追従する前後歩行制御が可能になった。

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] A. Takamishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, T. Takeya, and I. Kato. Realization of Dynamic Walking Stabilized with Trunk Motion. In *ROMANSY 7*, pp. 68–79, 1988.

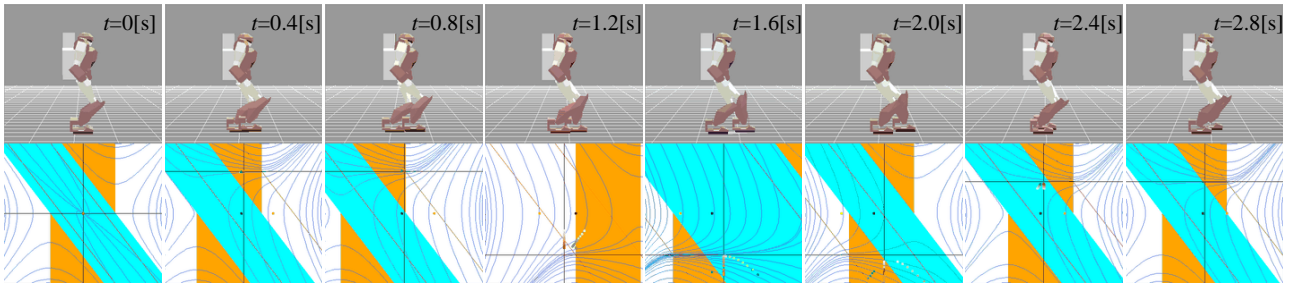


図5 速度追従制御における力学系の変容とロボットの運動

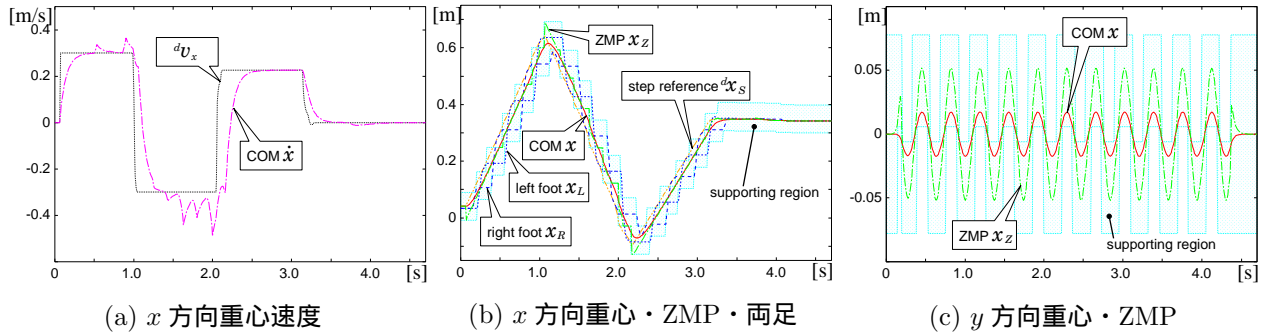


図6 任意速度追従シミュレーション結果

- [2] Kazuo Hirai. Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot. In *Proceeding of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 500–508, 1997.
- [3] Ken'ichiro Nagasaka, Yoshihiro Kuroki, Shin'ya Suzuki, Yoshihiro Itoh, and Jin'ichi Yamaguchi. Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3189–3914, 2004.
- [4] Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura. Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots. *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 25, No. 3, pp. 658–669, 2009.
- [5] Shuuji Kajita, Mitsuharu Morisawa, Kensuke Harada, Kenji Kaneko, Fumio Kanehiro, Kiyoshi Fujiwara, and Hirohisa Hirukawa. Biped Walking Pattern Generator allowing Auxiliary ZMP Control. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2993–2999, 2006.
- [6] Koichi Nishiwaki and Satoshi Kagami. Online Walking Control System for Humanoids with Short Cycle Pattern Generation. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 729–742, 2009.
- [7] Andrei Herdt, Nicolas Perrin, and Pierre-Brice Wieber. Walking without thinking about it. In *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 190–195, 2010.
- [8] Ferdinand Gubina, Hooshang Hemami, and Robert B. McGhee. On the Dynamic Stability of Biped Locomotion. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, Vol. BME-21, No. 2, pp. 102–108, 1974.
- [9] Tsutomu Mita, Toru Yamaguchi, Toshio Kashiwase, and Taro Kawase. Realization of a high speed biped using modern control theory. *The International Journal of Control*, Vol. 40, No. 1, pp. 107–119, 1984.
- [10] Masaki Yamakita, Fumihiko Asano, and Katsuhisa Furuta. Passive Velocity Field Control of Biped Walking Robot. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3057–3062, April 2000.
- [11] Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto, and Muneharu Saigo. Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2299–2036, 2001.
- [12] Christine Chevallereau, Jessy W. Grizzle, and Ching-Long 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.
- [13] Tomomichi 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.
- [14] Tomomichi Sugihara. Simulated Regulator to Synthesize ZMP Manipulation and Foot Location for Autonomous Control of Biped Robots. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1264–1269, 2008.
- [15] Tomomichi 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.
- [16] 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.
- [17] Tomomichi Sugihara, Kou Yamamoto, and Yoshihiko Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 56, pp. 82–94, 2007.