

地形に合わせた二脚ロボットのための重心誘導型制御と運足誘導型制御の遷移

Switching technique of COM-navigation / foot-navigation controls for a biped robot that goes over various terrains

学 野崎 晴基 (阪大) 正 杉原 知道 (阪大)

Haruki NOZAKI, Osaka University
Tomomichi SUGIHARA, Osaka University

The paper proposes a technique to switch two biped control schemes, namely, a COM-navigation control and a foot-navigation control. The former suits to an open flat space and displays robustness against rather strong perturbations, while the latter enables careful foot-navigation on complex terrains. The two schemes can be alternated at arbitrarily timings by automatically determine some parameters so as to be consistent with the actual situation.

Key Words: Biped Robot, Controller

1 緒言

二脚ロボットは、人の脚部と似た構造を持っていることから、潜在的に人と同等の地形踏破能力を有する。しかし、ロボットが人と同程度に環境内を自在に移動するためには、未だ困難が山積している。二脚ロボットは大自由度を有しており、また環境に固定されない浮遊系である。さらに歩行に伴って環境と接触する部位が変化し続ける。そのため、不連続に変化する接触部から得られる反力と運動との関係を考えねばならない。接触部から受ける力は、引っ張り方向に発生できないため、ロボットは常に転倒の危険に晒され、運動の安定性を保証することが容易でない。

上記のような問題に対して、床から受ける反力の中心点であるゼロモーメントポイント (ZMP) に着目することで力学的拘束条件を比較的容易に扱えることが知られている。ZMP を用いた研究として、ロボットの各関節の参照軌道をオンラインで設計する方法が提案されている [1][2]。これらは、計画された参照軌道にロボットを従わせることである程度高度な運動を実現できるが、参照軌道を大きく外れることができないので、大きな外乱に対し柔軟に振る舞えないという困難さがある。

これらに対し、参照軌道を用いず、重心を直接誘導し、足先を重心に対して従属的に決定する方法 (重心誘導型制御) が熱田ら [3] から、足先を直接誘導し、重心を足先に対して従属的に決定する方法 (運足誘導型制御) が杉原 [4] からそれぞれ提案されている。重心誘導型制御は重心の制御器の性質を位置制御器、速度追従制御器、自励振動制御器にシームレスに変化させることで歩行を可能とし、任意のタイミングで運動指令値を変更しても破綻しない柔軟な歩行を可能にする。また、足先の制御を重心の状態に対して従属的に行うことで、大きな外力に対しても足を踏み出し転倒防止できる。ただし、足先が平坦で開けた環境を想定している。一方で、運足誘導型制御は足先を目標位置に着地させることに主眼を置いており、重心の運動が従属的に決定される。これは、不整地の歩行では足の着地位置が重要となり、無制約に決定することができないからである。そのため、着地位置を変更しなければならない外力を受けた際には、重心誘導型制御ほどロバストな対応はできない。

本研究では、上記二つの制御器 [3][4] を環境に合わせて運動中に任意のタイミングでシームレスに遷移させることで二脚ロボットの移動能力を向上させることを目的とする。この目的を達成するには、制御器の切り替え時におけるロボットの運動状態と、制御器の状態が一致するように制御器の情報を更新することが重要となる。ロボットの位置や速度といった観測された値は両制御器で継続して使用し、ロボットの操縦者からの指令値は新しく与えられたものに更新する。そして、運動状態と不一致から運動に支障をきたすパラメータについては切り替え時に自動的に推定され更新する。

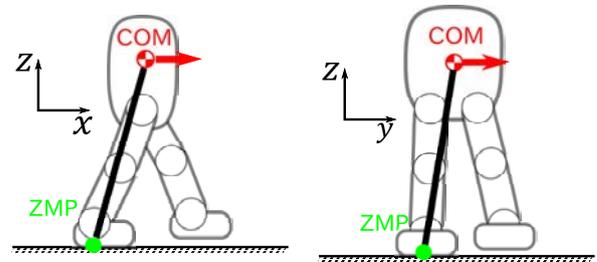


Fig.1 重心 - ZMP モデル

2 重心誘導型制御 [3]

図 1 に示すように、二脚ロボットの運動を重心と ZMP の関係に基づいて巨視的に捉える。ロボットの前方方向を正として x 軸を、ロボットの左方向を正として y 軸を、ロボットの鉛直上向きを正として z 軸をそれぞれとる。この時、ロボットの重心位置を $p = [x \ y \ z]^T$ 、ZMP 位置を $p_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ と置くと、運動方程式は次のように表される。

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

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

ただし、 $\zeta = \sqrt{g/z}$ であり、 $g = 9.8[\text{m/s}^2]$ は重力加速度である。この時、ZMP p_Z には常に支持領域 S 内に存在しなければならないという拘束条件が課せられる。この拘束条件を満たしながら継続的な歩行を実現するには、足の踏み変えにより不連続に変形する支持領域 S 内で ZMP を操作することが不可欠となる。ロボットが歩行する時、前後方向と左右方向について違う性質を持つことに着目し、下のような制御器 x_Z, y_Z が提案されている。

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

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

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

$$y_Z = \begin{cases} y_{Zmax} & (T1: \hat{y}_Z > y_{Zmax}) \\ \hat{y}_Z & (T2: y_{Zmin} \leq \hat{y}_Z \leq y_{Zmax}) \\ y_{Zmin} & (T3: \hat{y}_Z < y_{Zmin}) \end{cases} \quad (6)$$

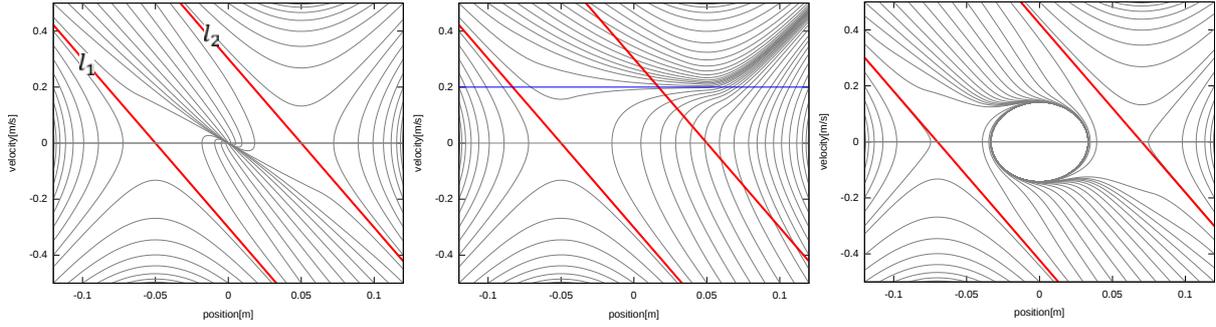


Fig.2 $q_x = 0.5, d_x = 0, d_{v_x} = 0$ Fig.3 $q_x = 0, d_x = 0, d_{v_x} = 0.2$ Fig.4 $q_y = 0.5, d_y = 0, \rho = 1$

ただし

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

$$\gamma(d) \equiv 1 - \rho \exp k \left\{ 1 - \frac{(q_y + 1)^2 d^2}{d_0^2} \right\} \quad (8)$$

である。 d_x, d_y は参照重心位置, d_{v_x}, d_{v_y} は参照重心速度, 定数 q_x, q_y, k, d_0 および ρ は設計パラメータである。支持領域 S は x 軸では閉領域 $[x_{Zmin}, x_{Zmax}]$, y 軸では閉領域 $[y_{Zmin}, y_{Zmax}]$ で表されると簡単化している。

上記の制御器は設計パラメータ q_x, q_y, ρ の値を参照重心速度 d_{v_x}, d_{v_y} に応じて変化させることで, 重心誘導の性質を位置制御, 速度追従制御, 自励振動制御に切り替えることができる。これらの性質は横軸に位置, 縦軸に速度を取った相図上の解曲線を用いることで, 重心の振る舞いを可視化して捉えることができる。

$q_x > 0, q_y > 0$ のとき制御器は位置制御器となり, 解曲線は図 2 のようになる。同図において重心の状態 (x, \dot{x}) が直線 l_1, l_2 で挟まれた領域に存在する時, 重心は支持領域を変える必要なく平衡点に安定に収束している。この領域は立位安定領域 [5] と定義されており, l_1, l_2 はそれぞれ次式で定義されている。

$$l_1 : x + \frac{\dot{x}}{\zeta} = x_{Zmin} \quad (9)$$

$$l_2 : x + \frac{\dot{x}}{\zeta} = x_{Zmax} \quad (10)$$

$q_x = 0, d_{v_x} \neq 0$ のとき, 制御器は速度追従制御器となり, 解曲線は図 3 のようになる。同図において, 重心の状態が立位安定領域内にいる間は重心速度 \dot{x} が目標重心速度 d_{v_x} に収束するように誘導され, 立位安定領域から外れると発散する。そのため, 転倒せず歩行するには支持領域 S を更新する必要がある。これは, 重心の状態が立位安定領域内に含まれるようロボットの遊脚を踏み出せばよく, 遊脚を $x + \dot{x}/\zeta$ に着地させることで, 立位安定条件を常に満たしながら歩行することができる。

$q_y > 0, \rho = 1$ のとき, 制御器は自励振動制御器となり, 解曲線は図 4 のようになる。重心及び ZMP は周期的に振動し, 左右の足の間を交互に移動する。ZMP が支持足裏面内にいる間に遊脚を移動させることで ZMP を支持領域 S に収めながら制御することができる。

以上のように, 重心誘導型制御は位置制御器, 速度追従制御器, 自励振動制御器を切り替えながら重心を誘導し, 遊脚の着地位置を重心の状態に対して従属的に決定することで安定して歩行する制御である。そして, 遠心力及びコリオリ力を打ち消す項を式 (3), 式 (5) に追加することで, 旋回を伴う全方位への歩行が可能となる [3]。ただし, 着地位置を直接指定できないため, 高低差のある地形や着地位置に制限がある地形には適していない。

3 運足誘導型制御 [4]

前章と同様に, 二脚ロボットの運動を重心と両足接地点が地面から受ける反力との関係に基づいて巨視的にとらえる。ロボット

の運動方程式は式 (1) で表されるものとする。運足誘導型制御器は, x 軸方向と y 軸方向に対して対称な制御器のため, x 軸方向に関してのみ説明する。

二脚ロボットが転倒を防止しながら歩行するには, 次の条件を考える必要がある。

- ZMP を軸足位置 x_P 近傍に移動させ, 軸足裏に入った以降に踏み出し足を離床させる
- 踏み出し脚が目標位置 d_{x_S} に到達し着地したときに, 立位安定条件を満たす。

二つの条件のうち後者は, 時刻 $t = T[s]$ において次式 (11) が満たされる, と言い換えることができる。

$$x_S(T) = x(T) + \frac{\dot{x}(T)}{\zeta} = d_{x_S} \quad (11)$$

この下で, 前者の条件を考慮し, 次のような最小化問題として制御入力 x_Z を決定する。

$$\frac{1}{2} \int_t^T (x_Z - x_P)^2 dt \rightarrow \min. \text{ subject to Eq.(11)} \quad (12)$$

制御入力は着地までの残り時刻 $T - t$ 及び重心の運動状態, 支持足位置, 目標着地位置といった情報から毎時決定され, 時刻 T において重心の運動状態が式 (11) を満たすよう次式のように設計される。

$$x_Z = x_P - \frac{(h^N(x - v/\zeta - x_P) + x_P - d_{x_S})(1 + h)}{(1 - h^N)(1 + h^N)} h^{N-1} \quad (13)$$

ただし, 着地までの時間 $T - t$ は, 離散時間 Δt により $T - t = N\Delta t$ と離散化され, $h \equiv 1 + \zeta\Delta t$ であり, x 及び v は現在時刻の重心位置・速度である。

踏み出し足は, 以下のような運動方程式に基づく。

$$\ddot{x}_S = a_{Sx} \quad (14)$$

ただし, a_{Sx} は踏み出し足の x 軸方向加速度である。さらに, 以下のような境界条件が課せられる。

$$x_S(T) = d_{x_S} \quad (15)$$

$$v_{Sx}(T) = d_{v_{Sx}} (= 0) \quad (16)$$

この下で, 次のような独立した最小化問題として制御入力 a_{Sx} を決定する。

$$\frac{1}{2} \int_t^T a_{Sx}^2 dt \rightarrow \min. \text{ subject to Eq.(15), (16)} \quad (17)$$

制御入力は着地までの残り時刻 $T - t$ 及び遊脚の運動状態, 目標着地位置から決定され, 時刻 T において遊脚が目標着地位置に収束するよう足先を誘導する。

以上で説明した制御器では、外力などを受けて運動の状態が変化した時、着地時刻 T を固定していることから制御入力が高大なものになってしまう場合がある。そこで、足先の現在時刻 t における運動情報と着地時刻 T の目標位置から、新しく時刻 t^* を推定し着地までの残り時間を $T - t^*$ として修正することで、多少の外力を受けても足先を目標位置に着地させることができる [6]。推定される残り時間 $T - t^*$ は次式となる。

$$T - t^* = \frac{3Tv_S + 6(d x_S - x_S) \pm \sqrt{\{Tv_S - 6(d x_S - x_S)\}^2 + 8T^2 v_S^2}}{4v_S} \quad (18)$$

ただし、着地位置を変更が柔軟にできないため、強い外力に対しては重心誘導型制御ほどロバストな対応ができない。

4 制御器遷移

前述した二つの制御器を任意のタイミングでシームレスに切り替えることを提案する。毎回立ち止まって安定性を確保してから制御器を切り替えるのではなく、運動中の任意のタイミングで切り替え、機動性を損ねないことを目標とする。

ただ単純に制御器をつなぎ合わせるだけでは、上記の目標は達成できない。図 5 に示すような制御システムにて運動を行うとする。このシステムでは、重心誘導型制御ならば青線の経路で、運足誘導型制御ならば赤線の経路で制御が行われ、片方の制御がされている時、もう片方の制御は動いていない。このシステムにて図 6 に示すように任意のタイミングで制御器を切り替えて歩行することを考える。この運動では、まず重心誘導型制御で段差近くまで歩行し、近づいたら運足誘導型制御に切り替える。そして運足誘導型制御にて段差を上りきったら、また重心誘導型制御に切り替え歩行を続ける。このとき、点線部分では制御器が動かないため、切替前後に情報の乖離が生じてしまい、切替直後の運動に問題が生じてしまう。

重心誘導型制御器から運足誘導型制御器への切り替えでは次のことが問題となる。

(1) 残り時間 $T - t$ とロボットの運動状態の不一致

これは、特に対策を取らなかった場合、運足誘導型制御器での切り替え後の着地までの時間 $T - t$ が、現在の運動の状態と関係ない切り替え前に保持していた時間となってしまうことが問題となる。この切り替え前に保持していた時間が実際に着地までにかかる時間とずれていた場合、着地までの時間が実際より短ければ速く足を着こうとして加速し、逆に実際の時間より長ければ減速してしまい、ロボットに無理な運動をさせてしまう危険がある。

運足誘導型制御器から重心誘導型制御器への切り替えでは、次の二つが問題となる。

(2) 参照位置 d_p とロボットの運動状態の不一致

(3) 目標足幅 d_w とロボットの運動状態の不一致

前者は、重心誘導型制御器に切り替わる際に渡される参照位置と本来あるべき参照位置が大きすぎずれていた場合問題となる。重心誘導型制御器における参照位置は、左右方向における重心の振動中心となる座標である。しかし、運足誘導型制御ではロボットがこのパラメータと関係なく動いてしまうため、制御器の切り替えでロボットと参照位置が離れてしまう。そして離れたまま重心誘導型制御器に切り替わると、参照位置を中心に重心の振動を起こそうとして重心がそちらに移動してしまうため、ロボットが転倒してしまう危険がある。後者の目標足幅については、ロボットの左右方向における着地位置及び自励振動にも関わるパラメータであり、このパラメータは連続した値として制御が行われている。しかし、運足誘導型制御で足幅が変動し、重心誘導型制御に切り替わったとき、現在の足幅と目標足幅の間で大きな差がでてしまうため、足幅および着地位置の決定に不都合が生じる危険がある。

以上の問題を解決し、制御器をシームレスに切り替えるのに必要な情報を明らかにするため、図 5 のシステムにおいて制御器内で扱える情報を、情報の取得手段から次の 3 種類に分類する。

1. 重心・足先の運動状態
2. 制御器固有のパラメータ
3. 運動指令値

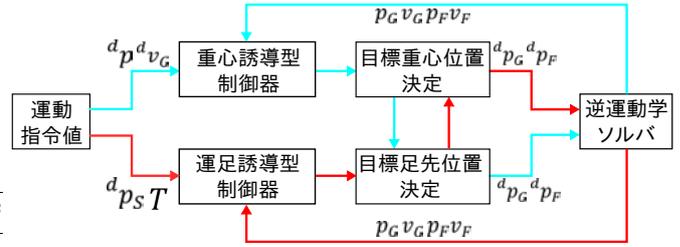


Fig.5 想定する制御システム

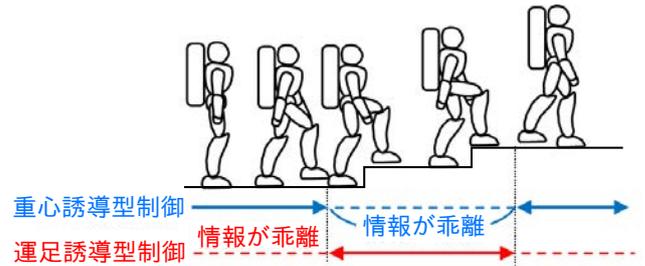


Fig.6 制御器切替時の情報の乖離

制御器ごとに情報を上記 3 種類に分類すると表 1 に示すように分類され、ロボットの運動状態と切り替え後の制御器情報が一致するように、これら分類した情報を更新することでシームレスな制御器遷移を実現する。更新方法は表 1 に示す通りで、重心・足先の運動状態は両制御器で使用されており、不連続に変化させることができない値のため、両制御器で共通して使用する。

重心誘導型制御器の設計パラメータは重心状態の描く解曲線に影響を与えるが、ロボットの運動状態と不一致となることはないため、重心誘導型・運足誘導型の切り替え時に値を保持し、もう一度切り替えられ戻ってきた時に保存した値をそのまま使用する。

前述した、ロボットの運動状態と一致していなければ問題となる情報は切り替え時に自動的に推定されるものとする。それぞれ、運足誘導型制御器の着地までの時刻 $T - t$ は、現在の足先の位置及び速度と制御器から着地までの時刻を推定 [6] し、自動で置き換えるものとし、重心誘導型制御器の参照位置 d_p は現在の足先位置の中心点に、目標足幅 d_w は現在の足幅に、自動で置き換えるものとする。また、操縦者から与えられる運動指令値に関しては、新しく与えられた値を使用する。

このように情報を取り扱うことで、制御器の切り替え直後の情報と運動の状態との乖離を緩和し、シームレスな制御器切り替えが可能となると考えられる。

5 シミュレーションと結果

人型ロボット [7] を用いて、前章で述べた提案方法をシミュレーション上で確認した。シミュレーション中のロボットの動作を図 7 に示す。ロボットから見て対岸に向かう方向を正として x 軸を、 x 軸正の方向に対して左手方向を正として y 軸をそれぞれ取る。 x 軸方向の ZMP 位置、重心位置、両足位置の時間変化を図 8、図 9 に、 y 軸方向の ZMP 位置、重心位置、両足位置の時間変化を図 10 にそれぞれ示す。制御器を切り替えるタイミングは、重心誘導型制御器から運足誘導型制御器が $t = 6.0s$ 、運足誘導型制御器から重心誘導型制御器が $t = 12s$ で行われている。

図 8 の時刻 $t = 6s$ において、ZMP の急激な変化が見られるが、これは制御器の切り替え後の右足位置の描く軌跡から、目標着地位置がロボットより手前に指定されたことが原因と考えられ、境界条件 (11) を満たすために減速方向に制御入力がかかったものである。制御器の切り替え時刻では、切り替え後の制御器が目的の運動に沿うように制御していることから、シームレスに制御器の遷移ができているとわかる。

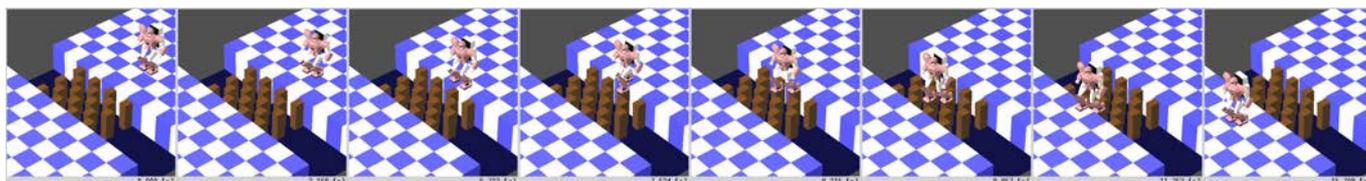


Fig.7 平坦な地形と飛び石の混在する環境の歩行運動

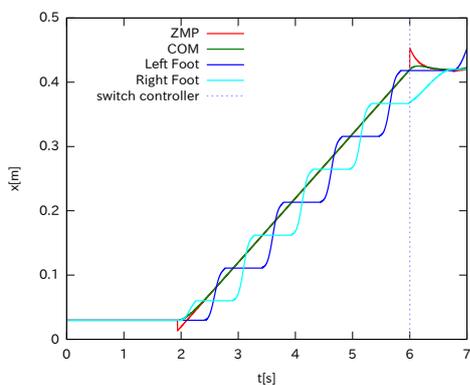


Fig.8 x 軸方向の ZMP, 重心, 両足位置の時間変化

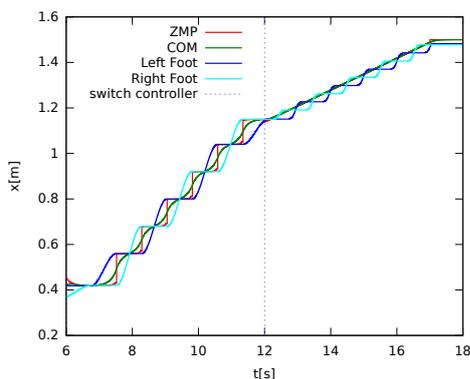


Fig.9 x 軸方向の ZMP, 重心, 両足位置の時間変化

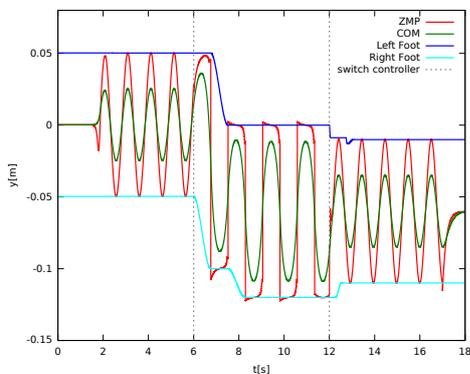


Fig.10 y 軸方向の ZMP, 重心, 両足位置の時間変化

	重心誘導型	運足誘導型
分類 1	p_G, v_G, p_F, v_F 共通して使用	
分類 2	q_u, q_w, ρ, d_0, k 保存 $d_{\bar{w}}$ 自動的に推定	$T - t^*$ 自動的に推定
分類 3	d_p 自動的に推定 d_{v_G} 新しい値を使用	d_{p_S}, T 新しい値を使用

Table 1 切り替え時における各情報の取り扱い

6 結言

本研究では、人型ロボットの歩行制御として、整地上の歩行制御器と不整地上の歩行制御器の二つの制御器を挙げ、これら制御器を任意のタイミングでシームレスに遷移させる方法を提案した。二つの制御器を遷移させる時、それぞれの制御器の情報の乖離からロボットの運動に問題が生じるため、各制御器内で取り扱う情報をそれぞれの性質から分類し、更新方法を決定した。提案方法を用いて制御器の切り替えをシミュレーション上で行い、制御器がシームレスに遷移していることを確認した。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号:#15H02762)および文部科学省科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(課題番号:#26540135)の支援を受けた。

参考文献

- [1] S. Kajita and et al. Biped walking pattern generator allowing auxiliary ZMP control. In *Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2993–2999, 2006.
- [2] K. Nishiwaki and S. Kagami. Online walking control system for humanoids with short cycle pattern generation. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 729–742, 2009.
- [3] 熱田洋史, 野崎晴基, 杉原知道. 移動座標系に基づいた二脚ロボットの前後・左右・旋回歩行制御. 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015. 2I2-05.
- [4] 杉原知道. 着地時の強立位安定性を保証する二脚ロボットの運足誘導型制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(発表予定), 2016.
- [5] T. Sugihara. Standing stabilizability and stepping maneuver in planar bipedalism based on the best COM-ZMP regulator. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1966–1971, 2009.
- [6] 杉原知道. 運動状態からの時間情報再構成によるロボット到達運動制御. 第33回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1D1–07, 2015.
- [7] 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.