

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

○熱田洋史 (阪大) 野崎晴基 (阪大) 杉原知道 (阪大)

1. はじめに

二脚ロボットが環境を自由に歩くためには、立位、足踏み、前後進歩行、左右歩行、旋回歩行など、複数の運動とその組み合わせが必要になる。それぞれの運動に対して事前に参照軌道群を与える方法 [1, 2, 3] では外乱や指令値の急変更に対して柔軟に対応できないため、複雑な環境で安定に振る舞うのは難しい。そのため個々の単位運動をシームレスに統合した制御器の設計が重要である。しかし様々な力学的拘束条件に支配される二脚ロボットを、転倒や脚の干渉を防ぎながら柔軟に振る舞わせるのは簡単ではない。こうした問題に対して、重心と ZMP [4] の大局的な関係に着目することでシステムを低次元化することの有効性が知られており、Sugihara [5, 6, 7] は立位制御や足踏み、前後歩行を統合する制御器を提案してきた。また Atsuta [8] は前後・左右歩行の統合、野崎ら [9] は滑らかな曲線経路に沿った歩行制御を提案している。

ロボットが環境を自由に移動する場合、ロボットの進行方向は環境に固定された慣性系に対して頻繁に変化するため、ロボットに与える指令値は慣性系基準の値ではなく、ロボットの身体を基準にした値の方が自然である。またロボットが直接的に観測できる状態量も同様に、慣性系基準の量ではなく自らの身体を基準にした量だけである。したがって実装上の観点から、制御器はロボットの観測座標系、すなわち身体に固定された移動座標系に基づいて表現されるべきである。このことは数学的には慣性座標系基準で記述された制御則を移動座標系に座標変換することで達成されるが、フィードバック則をロボットの観測座標系に基づく状態量のみで再構成できるかは自明でない。

そこで本稿では、二脚ロボットが環境を自由に歩くために必要な前後・左右・旋回歩行をシームレスに統合し、進行方向および移動速度を任意に変更可能な歩行制御を実現する。また実際のロボットに実装することを考え、ロボットの身体を基準にした指令値を与えることができ、ロボットが直接観測可能な状態量のみで構成された制御器を提案する。

2. 慣性座標系に基づく前後進歩行制御 [7]

慣性座標系 Σ_W に基づいた前後進歩行制御について述べる。ロボットの全質量が重心に集中したモデルを考えよう。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。重心の位置を $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$, ZMP 位置を $\mathbf{p}_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ とする。重心回りに発生するトルクは十分小さく、重心高さ z は一定、地面高さ $z_Z = 0$ であると仮定すると次の運動方程式が得られる。

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

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

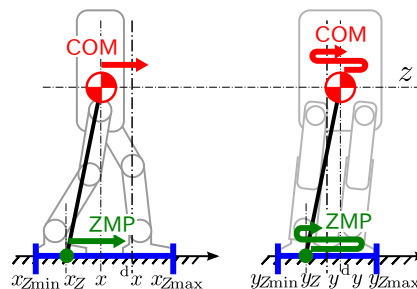


図1 重心-ZMP モデル

ただし $\zeta \equiv \sqrt{g/z}$ であり、 $g = 9.8[\text{m/s}^2]$ は重力加速度である。ZMP の位置 \mathbf{p}_Z は支持領域 \mathbf{S} に対して次の拘束条件が課せられる。

$$\mathbf{p}_Z \in \mathbf{S} \quad (3)$$

運動方程式 (1)(2) は拘束条件 (3) のもとで ZMP を制御入力として重心を制御可能であることを示している [10]。Sugihara [7] は立位制御、定常的な足踏み、前後進歩行を統合する制御器として目標 ZMP 位置 x_Z および y_Z を次式で定めることを提案した。

$$\tilde{x}_Z = d_x + (q_x + 1) \left(x - d_x + \frac{\dot{x} - d_{v_x}}{\zeta} \right) \quad (4)$$

$$x_Z = \begin{cases} x_{Z\max} & (\text{S1: } \tilde{x}_Z > x_{Z\max}) \\ \tilde{x}_Z & (\text{S2: } x_{Z\min} \leq \tilde{x}_Z \leq x_{Z\max}) \\ x_{Z\min} & (\text{S3: } \tilde{x}_Z < x_{Z\min}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{y}_Z = d_y + (q_y + 1) \left(y - d_y + \gamma(d) \frac{\dot{y}}{\zeta} \right) \quad (6)$$

$$y_Z = \begin{cases} y_{Z\max} & (\text{T1: } \tilde{y}_Z > y_{Z\max}) \\ \tilde{y}_Z & (\text{T2: } y_{Z\min} \leq \tilde{y}_Z \leq y_{Z\max}) \\ y_{Z\min} & (\text{T3: } \tilde{y}_Z < y_{Z\min}) \end{cases} \quad (7)$$

ただし

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

$$\gamma(d) \equiv 1 - \rho \exp k \left\{ 1 - \frac{(q_y + 1)^2 d^2}{\bar{d}_0^2} \right\} \quad (9)$$

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、定数 $q_x (\geq 0)$, $q_y (\geq 0)$, $k (> 0)$, $\bar{d}_0 (> 0)$ および $\rho (\geq 0)$ は設計パラメータである。また支持領域 \mathbf{S} は x 方向の閉領域 $[x_{Z\min}, x_{Z\max}]$ および y 方向の閉領域 $[y_{Z\min}, y_{Z\max}]$ で表されると簡単化している。

$\gamma(d)$ は左右方向に自励振動を発生させるための非線形粘性摩擦であり、 $\rho > e^{-k}$ のときに安定リミットサ

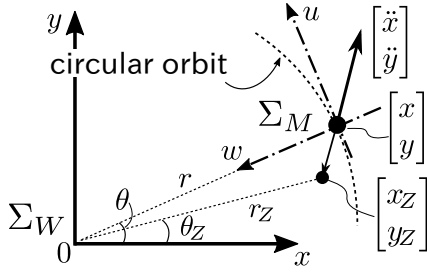


図2 円弧に沿った重心の運動

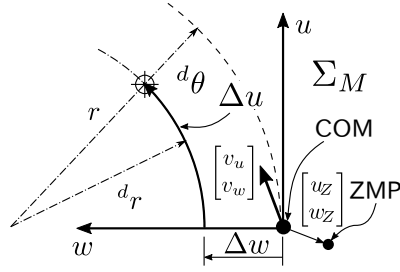


図3 円弧に沿った二脚制御における状態量

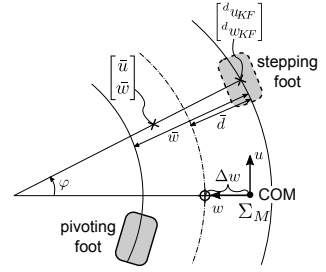


図4 遊脚の目標着地位置

イクルが発現する, 特に $\rho = 1$ のときにリミットサイクルの振幅が $d = \frac{\bar{d}_0}{q_y + 1}$ となる. このとき ZMP は, 振幅 \bar{d}_0 , 重心と同位相で振動する. $\bar{w}_0 = 2\bar{d}_0$ を, 正準両足間隔と呼ぶことにする.

3. 移動座標系に基づく歩行制御

3.1 任意曲線に沿った歩行制御

前後進歩行制御では, 運動の方向は慣性系に対して変わらないものとして前後, 左右方向を x 軸, y 軸にそれぞれ対応させることができた. しかしロボットが慣性系内を自由に歩行する場合, ロボットの前後, 左右方向は慣性系に対して頻繁に変化する. したがって旋回歩行を可能にするには, ロボットに固定された移動座標系に基づいて制御器を設計する必要がある.

図2のように慣性座標系 Σ_W の原点を中心とした円周に沿ってロボットが歩行することを考えよう. なお円周の中心を座標系原点とすることによって一般性は失われない. 慣性座標系 Σ_W におけるロボットの重心位置 (x, y) , ZMP 位置 (x_Z, y_Z) を次式のように極座標表現する.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_Z \\ y_Z \end{bmatrix} = r_Z \begin{bmatrix} \cos \theta_Z \\ \sin \theta_Z \end{bmatrix} \quad (10)$$

時間で微分することによって (x, y) の速度・加速度はそれぞれ次のように求められる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \dot{r} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + r\dot{\theta} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}) \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

これらを運動方程式 (1)(2) に代入すれば, 次式を得る.

$$\begin{aligned} (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}) \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \\ \zeta^2 \left(r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} - r_Z \begin{bmatrix} \cos \theta_Z \\ \sin \theta_Z \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

図2のように円弧の接線方向がロボットの前方向, 動径内向きがロボットの左方向となる座標系 Σ_M を考えよう. 運動方程式 (13) を Σ_M における表現に変換すると, 次のようになる.

$$2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} = \zeta^2 r_Z \sin(\theta - \theta_Z) \quad (14)$$

$$-\ddot{r} + r\dot{\theta}^2 = -\zeta^2 \{r - r_Z \cos(\theta - \theta_Z)\} \quad (15)$$

さらに, 座標系 Σ_M における ZMP の位置を $[u_Z \ w_Z]^T$ とおく. すなわち,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_Z \\ y_Z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_Z \\ w_Z \end{bmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{bmatrix} u_Z \\ w_Z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -r_Z \sin(\theta - \theta_Z) \\ r - r_Z \cos(\theta - \theta_Z) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

である. これを用いれば式 (14)(15) は次式で表される.

$$2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} = -\zeta^2 u_Z \quad (17)$$

$$-\ddot{r} + r\dot{\theta}^2 = -\zeta^2 w_Z \quad (18)$$

移動座標系 Σ_M に基づく運動方程式 (17)(18) に対して, 制御器を次のように設計しよう.

$$u_Z = \frac{q_u + 1}{\zeta} r(\dot{\theta} - d\omega) + q_u(\theta - d\theta) + \frac{2\dot{r}\dot{\theta}}{\zeta^2} \quad (19)$$

$$w_Z = -\frac{q_w + 1}{\zeta} \gamma(d)\dot{r} - q_w(r - d_r) - \frac{r\dot{\theta}^2}{\zeta^2} \quad (20)$$

ただし, q_u, q_w は非負の定数, $d\omega$ は座標系原点を回転中心とした参照角速度, $d\theta$ は座標系原点を回転中心とした参照偏角, d_r は参照経路の半径であり,

$$d \equiv \sqrt{(r - d_r)^2 + \frac{\dot{r}^2}{\zeta^2 q_w}} \quad (21)$$

$$\gamma(d) \equiv 1 - \rho \exp k \left(1 - \frac{(q_w + 1)^2 d^2}{d_0^2} \right) \quad (22)$$

と定義する.

式 (19)(20) に含まれる $\theta, \dot{\theta}, r, \dot{r}$ は Σ_W に対する運動の大局的情報であり, ロボットにとって直接観測するのが難しい. また運動の参照値として $d\theta, d\omega, d_r$ を与えるのも環境内を自由に移動するロボットの参照値として適当でない.

そこで図3のように現在のロボットの重心が半径 d_r の参照経路の同心円上にあつて, 動径方向の参照経路までのずれを $\Delta w = r - d_r$, 参照経路に沿った目標位置までの距離を $\Delta u = d_r(d\theta - \theta)$ とそれぞれおく. 重心は慣性座標系 Σ_W に対し速度 $[\dot{x} \ \dot{y}]^T$ を持つ. これを方向だけ Σ_M から見たものに変換したものを $[v_u \ v_w]^T$ とおくと, 次式で表される.

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\dot{\theta} \\ -\dot{r} \end{bmatrix} \quad (23)$$

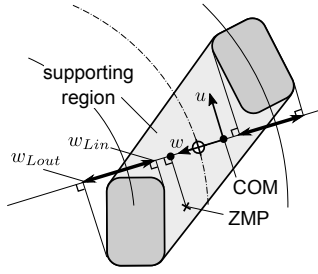


図5 旋回を伴う場合の支持領域

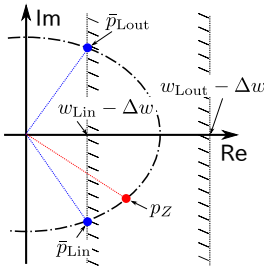
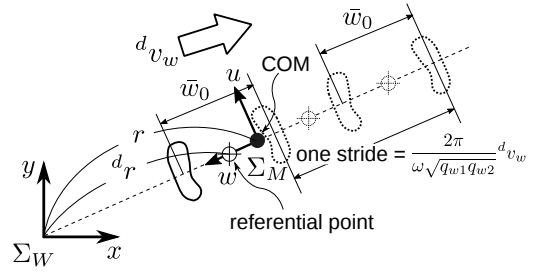
図6 複素平面上で p_Z が描く軌跡

図7 両足間隔を変化させることで実現される左右歩行

さらに参照経路に沿った参照速度を ${}^d v_u = {}^d r {}^d \omega$ とおき、参照経路の曲率 $\kappa = \frac{1}{{}^d r}$ を定義する。これらより、式 (19)(20)(21) はそれぞれ次のように表される。

$$u_Z = \frac{q_u + 1}{\zeta} \{v_u - (1 + \kappa \Delta w) {}^d v_u\} - q_u (1 + \kappa \Delta w) \Delta u + \frac{2\kappa v_u v_w}{\zeta^2 (1 + \kappa \Delta w)} \quad (24)$$

$$w_Z = \frac{q_w + 1}{\zeta} \gamma(d) v_w - q_w \Delta w - \frac{\kappa v_u^2}{\zeta^2 (1 + \kappa \Delta w)} \quad (25)$$

$$d \equiv \sqrt{\Delta w^2 + \frac{v_w^2}{\zeta^2 q_w}} \quad (26)$$

なお、 $\kappa = 0$ のときの入力が

$$u_Z = \frac{q_u + 1}{\zeta} \{v_u - {}^d v_u\} - q_u \Delta u \quad (27)$$

$$w_Z = \frac{q_w + 1}{\zeta} \gamma(d) v_w - q_w \Delta w \quad (28)$$

となることから、この制御器が直進歩行を包含していることがわかる。

運動の参照値は ${}^d v_u$, κ , 観測すべき状態量は Δu , Δw , v_u , v_w であり、これらはカメラセンサやジャイロセンサ等でロボットが直接観測することができる。

3.2 運脚制御

運脚制御は重心制御と密接に関わるため、これもまた慣性系基準の情報に含まれない形で設計されるべきである。そこで Sugihara[5] の提案する強立位可安定条件を満たす点を Σ_M に基づく表現に改め、それをもとに遊脚の目標着地位置を求める。強立位可安定条件を満たす点 \bar{u} , \bar{w} は次式で求められる。

$$\bar{u} = \frac{q_u + 1}{\zeta} v_u - q_u (1 + \kappa \Delta w) \Delta u + \frac{2\kappa v_u v_w}{\zeta^2 (1 + \kappa \Delta w)} \quad (29)$$

$$\bar{w} = \frac{q_w + 1}{\zeta} v_w - q_w \Delta w - \frac{\kappa v_u^2}{\zeta^2 (1 + \kappa \Delta w)} \quad (30)$$

しかし左右脚の干渉を防ぐためには、 $[\bar{u}, \bar{w}]^T$ をそのまま遊脚の目標着地位置にすることはできない。そこで図4に示すように、参照経路の同心円で基準足幅だけずれたルール上に遊脚の目標着地位置を定める。図4に示す φ には次の関係が成り立つ。

$$\tan \varphi = \frac{\kappa \bar{u}}{1 + \kappa \Delta w - \kappa \bar{w}} \quad (31)$$

この φ を用いると、目標着地位置 $[{}^d u_{KF}, {}^d w_{KF}]^T$ は次式で求めることができる。

$$\begin{bmatrix} {}^d u_{KF} \\ {}^d w_{KF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin \varphi}{\kappa} \\ \frac{1 - \cos \varphi}{\kappa} + \Delta w \end{bmatrix} \pm \bar{d}_0 \begin{bmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (32)$$

ただし符号は左足が +、右足が - である。

次に足昇降制御について述べる。旋回を伴う歩行の場合、図5に示すように足の向きは移動座標系に直交するとは限らない。そこで支持領域を Σ_M の w 軸に投影した領域をもとに足上げ高さを定める。左足が支持脚、右足が遊脚となる場合を考えよう。 w 軸方向の ZMP 位置と重心速度からなる次の複素数 p_Z を定義する。

$$p_Z = w_Z - \Delta w - \frac{(q_w + 1) v_w}{\zeta \sqrt{q_w}} i \quad (33)$$

p_Z が複素平面内を動くとき、図6のように軸足内縁と交差する点 \bar{p}_{Lin} , \bar{p}_{Lout} で作られる区間内での p_Z の相対位置を逐次推定する。推定値 \bar{p}_{Lin} , \bar{p}_{Lout} は次式で求められる。

$$\bar{p}_{Lin} = w_{Lin} - \Delta w - \sqrt{|p_Z|^2 - (w_{Lin} - \Delta w)^2} \quad (34)$$

$$\bar{p}_{Lout} = w_{Lout} - \Delta w + \sqrt{|p_Z|^2 - (w_{Lout} - \Delta w)^2} \quad (35)$$

\bar{p}_{Lin} と \bar{p}_{Lout} のなす区間における p_Z の相対位置を位相 ϕ として次式で定める。

$$\phi \equiv \angle \frac{(p_Z / \bar{p}_{Lin})}{(p_Z / \bar{p}_{Lout})} \quad (36)$$

これを用いて右足の目標足上げ高さを次式で求める。

$${}^d z_R = \frac{1}{2} \frac{h_{\max} |p_Z|}{\bar{d}_0} \sigma(\rho) (1 - \cos 2\pi \phi) \quad (37)$$

ただし h_{\max} は定数、 $\sigma(\rho)$ は次式で定義される。

$$\sigma(\rho) \equiv \begin{cases} 1 & (\rho > 1) \\ \frac{\rho - e^{-1}}{1 - e^{-1}} & (e^{-1} \leq \rho \leq 1) \\ 0 & (0 \leq \rho < e^{-1}) \end{cases} \quad (38)$$

左足の足上げ高さも同様に求める。

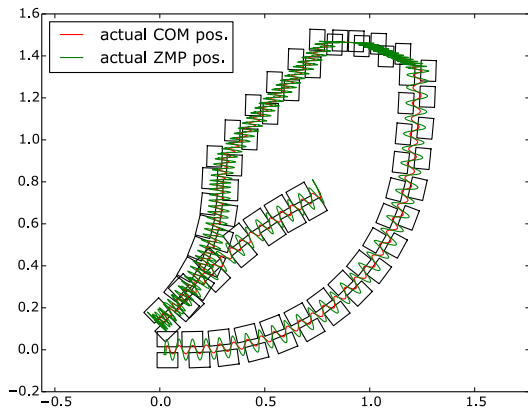


図8 シミュレーション結果

3.3 左右歩行制御

Atsuta ら [8] の提案した左右歩行制御では、脚の干渉を防ぐために速度追従系と自励振動系を切り替える必要があった。しかし2つの力学系を切り替える際、挙動が不自然になる問題や、速度追従系において位相 (36) が定義できない問題があった。そこで両足間隔 \bar{w} を能動的に変化させることで、自励振動系を維持したまま左右歩行を実現することを考える。図7に示すように w 方向参照速度 ${}^d v_w$ を与えたとき、重心揺動1周期でちょうど1歩分ずれるように目標両足間隔を定め、振動中心 ${}^d r$ は両足間隔の中央となるように定める。

脚の干渉を防ぎながら左右歩行を継続するには、重心を進行方向に押し出すフェーズと、逆足を引き寄せるフェーズに分けて考える必要がある。重心を押し出すフェーズでは、位相 ϕ に応じて目標両足間隔 ${}^d \bar{w}$ が徐々に広がるように設計する。

$${}^d \bar{w} = \bar{w}_0 + \frac{2\pi}{\omega \sqrt{q_{w1} q_{w2}}} \phi |{}^d v_w| \quad (39)$$

一方逆足を引き寄せるフェーズでは、位相 ϕ に応じて目標両足間隔 ${}^d \bar{w}$ が正準両足間隔 \bar{w}_0 に近づくように設計する。

$${}^d \bar{w} = \bar{w} + (\bar{w}_0 - \bar{w}) \phi \quad (40)$$

また重心参照位置は常に両足間の中央に位置するように定める。

4. シミュレーション

人型ロボット mighty[11] 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 $z = 0.26[\text{m}]$ 、最大足上げ高さは $h_{\max} = 0.02[\text{m}]$ 、 $k = 1$ とした。両足とも前方に $0.055[\text{m}]$ 、後方に $0.04[\text{m}]$ 、左右にそれぞれ $0.035[\text{m}]$ の幅をもつ長方形で表現されている。また各脚が遊脚となる間、目標足位置に追従するような二次遅れ制御器を設計した。

$$\ddot{\mathbf{p}}_{KF} = K ({}^d \mathbf{p}_{KF} - \mathbf{p}_{KF}) - C \dot{\mathbf{p}}_{KF} \quad (41)$$

ただし $K = 3000$ 、 $C = 50$ とした。微分方程式の数値解法に4次のRunge-Kutta法を用い、積分時間幅は $0.01[\text{s}]$ とした。目標ZMPが支持領域を外れた際には支持領域上の最近傍点をとることで置き換えた。

初期状態を $(x, \dot{x}, y, \dot{y}) = (0.0409, 0, 0, 0)$ 、 $q_u = 0.5$ 、 $q_w = 0.5$ 、 $\rho = 0$ とし、指令値として前後方向参照速度 ${}^d v_u$ 、左右方向参照速度 ${}^d v_w$ 、曲率 κ をジョイスティックを用いて無作為に与えた。シミュレーション結果を図8に示す。操縦者はロボットの身体を基準にした運動指令を与えることができ、前後・左右・旋回歩行を自由に行えていることが確認できる。

5. おわりに

二脚ロボットの移動座標系に基づいた、前後・左右・旋回歩行を包含する制御器、および運脚制御について提案した。移動ロボットの特性上、運動指令やフィードバックする状態量はロボット身体に固定された移動座標系に基づいて記述されるべきである。そこで慣性座標系に基づいて表現された制御則を、座標変換によって移動座標系基準に表現し直し、ロボットが直接観測できる状態量のみで制御器を再構成した。

本研究は科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(課題番号#26540135)、科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号#15H02762)および新エネルギー・産業技術総合開発機構環境・医療分野の国際研究開発・実証プロジェクト/ロボット分野の国際研究開発・実証事業「災害対応ロボット・オープンプラットフォームの研究開発」(代表:中村仁彦)の支援で行われた。

参考文献

- [1] M. Vukobratović and D. Juričić. Contribution to the Synthesis of Biped Gait. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*, Vol. BME-16, No. 1, pp. 1–6, 1969.
- [2] 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.
- [3] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka. The development of Honda humanoid robot. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1321–1326, 1998.
- [4] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the stability of anthropomorphic systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [5] 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.
- [6] T. 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.
- [7] T. Sugihara. Biped control to follow arbitrary referential longitudinal velocity based on dynamics morphing. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1892–1897, 2012.
- [8] H. Atsuta and T. Sugihara. Sideward Locomotion Control of Biped Robots Based on Dynamics Morphing. In *Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 959–964, Chicago, Sep. 2014.
- [9] 野崎晴基, 杉原知道. 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. 第32回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1B3–03, 2014.
- [10] 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.
- [11] T. Sugihara, K. Yamamoto, and Y. Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, No. 1, pp. 82–94, 2008.