点接触仮定に基づく2足動歩行制御

—Sagittal 運動制御と安定化—

土井 将 弘*・長谷川 泰 久**・福田 敏 男*

Control of Dynamic Biped Walking Based on the Assumption of Point-contact

—Sagittal Motion Control and Stabilization—

Masahiro DOI*, Yasuhisa HASEGAWA** and Toshio FUKUDA*

In this paper, Passive Dynamic Autonomous Control (PDAC), the novel control method we proposed previously¹²⁾, is applied to the sagittal motion of biped walking. PDAC expresses the robot dynamics as an 1-dimensional autonomous system based on the two concepts: 1) point-contact 2) *Virtual constraint* (proposed by Grizzle and Westervelt *et al.*^{1), 2)} previously). Due to autonomy, this approach has two following notable point: 1) there is a conservative quantity 2) period from foot-contact to next foot-contact can be obtained by integrating 1D dynamics with respect to time. This paper proves the convergence of the conservative quantity under the condition of constant step-length by Theorem of Lyapunov. In addition, the coupling method of the sagittal and lateral motion that takes advantage of point 2) is designed. Finally, by means of PDAC and these methods, natural 3D dynamic walking based on the robot inherent dynamics is realized.

Key Words: biped walking, dynamics, underactuated, asymptotic stability, locomotion

1. はじめに

自然で高効率な2足歩行を実現するために、これまでロボットのダイナミクスに基づく制御手法がいくつも提案されている。こうした手法の中で、何人かの研究者がロボットと地面を点接触にすることによって、ロボットのダイナミクスを陽に用いる制御手法を提案している^{3)~5), 8)}。Miuraらはロボットと地面が3次元的に点接触となるロボットを製作し、遊脚着地時の姿勢を制御することによる安定化手法を用いて竹馬型の歩行を実現している⁶⁾。Kajitaらは重心軌道を地面と水平に設定することによって導き出される保存量に基づく制御手法を提案した⁷⁾。またChevallereauは仮想時間を導入することによってロボットを最適軌道に収束させる制御を提案している¹⁰⁾。GrizzleやWesterveltらはVirtual constraintという仮想的なホロノミック拘束を用いてSagittal面に固定された上体をもつ2足歩行ロボットによる安定な歩行を実現した^{1), 2)}。これらの点接触を用いた手法のいくつかはSagittal

面内において実際に滑らかな歩行を実現したが、3次元の動歩行を実現したものは少ない。Miuraらの竹馬型歩行が唯一3次元動歩行を実現したが、コントローラの安定性が線形化に基づいていたため、その運動は平衡点近傍でしか実現できなかった。そこで本論文では、点接触仮定に基づいた自然な3次元動歩行を達成する新しいコントローラを提案し、実際にロボットを用いて3次元動歩行を実現する。

Miuraら⁶⁾やFurushoら⁹⁾は、3次元の運動をLateral面とSagittal面の2面に分け、両面の独立なダイナミクスに基づいて運動を構築したが、これは、各面の運動がある程度小さく(小さい振幅、比較的小さな歩幅など)各面のダイナミクスのお互いに与える影響が小さいことと、他面の運動によって生じた外乱に対して各面の運動が安定であること、という2つの仮定に拠っている。本論文では、こうした仮定に基づいて、3次元のダイナミクスをLateral面とSagittal面の2面に分け、各面の安定なコントローラを構築することによって、3次元動歩行の実現を目指す。われわれは以前、点接触仮定に基づく新しい制御手法であるPDACを提案し、Lateral面の揺動運動を実現した¹²⁾。このLateral運動は2本の向かい合う倒立振子が衝突を繰り返しながらLateral面で揺動を行なうモデルを用いて記述され、状態に応じて遊脚着地時の足幅を調整することによって安定化を行なっている。また振幅を制御することによって目標の周期を達成することが可能である。

本論文ではPDACをさらにSagittal面の運動に対して適

* 名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻

** 筑波大学大学院システム情報工学研究科

* Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University

** Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba

(Received July 20, 2006)

(Revised October 24, 2006)

用することにより Sagittal 面の運動を設計し、さらに歩幅を一定に保つことによって歩行が安定化できることを証明する。そして Sagittal 面において目標の歩幅が達成されるまでの時間を算出し、この周期を目標として Lateral 面の運動を行なわせる。最後に本論文で設計した Sagittal 面の運動と、以前実現した Lateral 面の運動を合わせることで、3次元の動歩行を実現する。次章において PDAC について簡単に説明し、3章で Sagittal 面のコントローラの設計、4章で実験についてそれぞれ述べ、最後に5章で本論文をまとめる。

2. Passive Dynamic Autonomous Control

本章では以前われわれが提案した PDAC を簡単に説明する。PDAC は、ロボットが地面と点接触状態にあるダイナミクスに対して、Grizzle らの提案した Virtual constraint^{1),2)} を適用することにより、ロボット全体のダイナミクスを接触点周りの Phase で記述する手法である。

2.1 Converged Dynamics

まず始めに、Fig. 1 に示す n-link 直鎖ロボットを例に、接触点周りの Phase (以下これを Converged Dynamics と呼ぶ) の導出について述べる。

上述の点接触状態と Virtual constraint は次式のように記述される。

$$\tau_1 = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Theta &= [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T = [f_1(\theta), f_2(\theta), \dots, f_n(\theta)]^T \\ &=: \mathbf{f}(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

点接触は第1関節のトルクがゼロであること((1)式)を意味するが、この条件は一般的な2足歩行ロボットにおいては成立しない。そこで、本稿で実験に用いるような足首関節に高減速器をもつようなロボットに対しては後述の(29)式のように足首関節に想定した粘性トルクを加えることによって仮想的な受動関節を実現する。また、Virtual constraint は関節間にホロノミック拘束を与えることを意味しており、(2)式で表わされる。

本論文では(2)式の θ として絶対座標系から見たときの第1リンクの傾きを用いる。すなわち、水平な地面を仮定した

Fig. 1 Mechanical model of the serial n-link rigid robot. θ_i and τ_i are the angle and the torque of i th joint respectively. m_i and J_i are the mass and the moment of inertia of i th link respectively.

とき、 $\theta_1 = f_1(\theta) = \theta$ が成り立つ。

よく知られているように Fig. 1 のロボットの運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{M}(\Theta) \dot{\Theta}) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\dot{\Theta}^T \mathbf{M}(\Theta) \dot{\Theta}) - \mathbf{G}(\Theta) = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{M}(\Theta) = [\mathbf{m}_1(\Theta)^T, \mathbf{m}_2(\Theta)^T, \dots, \mathbf{m}_n(\Theta)^T]^T$, $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$, $\mathbf{G}(\Theta) = [G_1(\Theta), G_2(\Theta), \dots, G_n(\Theta)]^T$, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$, $\frac{\partial}{\partial \Theta} = [\frac{\partial}{\partial \theta_1}, \frac{\partial}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial \theta_n}]^T$ とする。この運動方程式において接触点周りのダイナミクス、すなわち、第1行目の運動方程式(接触点周りの運動方程式)はコリオリや遠心力の項((3)式の左辺第2項)を含まないので、以下のように記述できる。

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{m}_1(\Theta)^T \dot{\Theta}) - G_1(\Theta) = \tau_1 \quad (4)$$

(2) 式を時間微分して得られる次式

$$\dot{\Theta} = \frac{\partial \mathbf{f}(\theta)}{\partial \theta} \dot{\theta} = \left[\frac{\partial f_1(\theta)}{\partial \theta}, \frac{\partial f_2(\theta)}{\partial \theta}, \dots, \frac{\partial f_n(\theta)}{\partial \theta} \right]^T \dot{\theta} \quad (5)$$

と(1)(2)式を(4)式に代入するとつぎのような1次元のダイナミクスが得られる。

$$\frac{d}{dt} (M(\theta) \dot{\theta}) = G(\theta) \quad (6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} M(\theta) &:= \mathbf{m}_1(\mathbf{f}(\theta))^T \frac{\partial \mathbf{f}(\theta)}{\partial \theta} \\ G(\theta) &:= G_1(\mathbf{f}(\theta)) \end{aligned}$$

とする。このとき $M(\theta)$ は接触点周りの慣性モーメントを表わしており、常に $M(\theta) > 0$ となるように、 $\mathbf{f}(\theta)$ を設計する必要がある。特に、 $M(\theta) = 0$ は特異点となるので注意しなければならない。

(6) 式の両辺に $M(\theta) \dot{\theta}$ をかけ両辺を時間について積分するとつぎのように接触点周りのダイナミクスを導出することができる。

$$\begin{aligned} \int \left(M(\theta) \dot{\theta} \right) \frac{d}{dt} (M(\theta) \dot{\theta}) dt &= \int G(\theta) M(\theta) \dot{\theta} dt \\ \Leftrightarrow \dot{\theta} &= \frac{1}{M(\theta)} \sqrt{\int 2G(\theta) M(\theta) d\theta}. \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式の右辺の積分が $\int G(\theta) M(\theta) d\theta = D(\theta) + C$ と計算されるとすると、(7)式は次式のように1次元の自律システムで記述される。

$$\dot{\theta} = \frac{1}{M(\theta)} \sqrt{2(D(\theta) + C)} \quad (8)$$

$$:= F(\theta) \quad (9)$$

この Phase 式が Fig. 1 のロボットの Converged Dynamics である。このダイナミクスは Virtual constraint と点接触の仮定を用いることによりロボット全体のダイナミクスを接触点周りの自律的なダイナミクスに集約させたものであり、モデル化誤差や外乱などが存在しない環境では、ロボットの実

際の運動はこの Converged dynamics に完全に従うものと考えられる。

2.2 PDAC Constant

前述のように Converged dynamics は自律的なシステムであり、また時不変であるから、保存力だけが働いて運動する物体における力学的エネルギーと同じような、運動中に不変な保存量が存在する。具体的には (8) 式の右辺にある積分定数がこの保存量に相当し、以下この保存量を PDAC Constant と呼ぶ。PDAC Constant は運動の初期状態、すなわち初期の θ , $\dot{\theta}$ によって決まり、その後は外乱などの外的な力が作用しない限り不変である。逆にいえば、物理的な保存運動がエネルギーを保存するように起こると同様に、(1)(2) 式の 2 条件を与えられたロボットは PDAC Constant を保存するように運動することがわかる。ここで注目すべき点は、歩行を行なっているロボットは関節を駆動するため力学的エネルギーは保存せず、また重力が働くため角運動量も保存しないが、PDAC を用いる事によって保存量が得られることである。本稿では次章において、この PDAC Constant を用いてリアプノフの定理により本提案手法による歩行の漸近安定性を証明する。

3. Sagittal 面の運動制御

3.1 3 リンクモデル

簡単のために本論文ではロボットの上半身は動かさず固定する。このとき、ロボットは Fig. 2 に示すような 3 リンクのモデルで記述できる。このモデルの運動方程式は (3) 式のように記述され、また、支持脚足首周り (即ち接触点周り) の運動方程式は (4) 式ようになる。ただし $n = 3$ である。(4) 式の左辺を以下に示す。

$$\begin{aligned} M_{11}(\Theta) &= J_1 + J_2 + J_3 + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 a_2^2 \\ &\quad - 2m_2 a_2 l_1 \cos \theta_2 + m_3 l_1^2 + m_3 a_3^2 \\ &\quad + 2m_3 a_3 l_1 \cos(\gamma - \theta_3) \\ M_{12}(\Theta) &= -J_2 - m_2 a_2^2 + m_2 a_2 l_1 \cos \theta_2 \\ M_{13}(\Theta) &= -J_3 - m_3 a_3^2 - m_3 a_3 l_1 \cos(\gamma - \theta_3) \\ G_1(\Theta) &= (m_1 a_1 + m_2 l_1 + m_3 l_1)g \sin \theta_1 \\ &\quad + m_2 g a_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ &\quad + m_3 g a_3 \sin(\theta_1 + \gamma - \theta_3) \end{aligned}$$

ただし、 $\mathbf{m}_1(\Theta) = [M_{11}(\Theta), M_{12}(\Theta), M_{13}(\Theta)]$ 。

3.2 関節間の仮想拘束

本論文では最も簡単に、上半身の傾きを一定角度に保ち、支持脚と遊脚が前後対称となるように拘束を設計する。すなわち、

$$\theta_1 = f_1(\theta) = \theta \quad (10)$$

$$\theta_2 = f_2(\theta) = 2\theta \quad (11)$$

$$\theta_3 = f_3(\theta) = \theta \quad (12)$$

Fig. 2 3-link model in the sagittal plane. m_i , J_i , l_i and a_i are the mass, the moment of inertia, the length of link and the distance from the joint to COG of link i respectively. γ is the angle of the forward tilting. In the right figure, θ_1 , θ_2 and θ_3 are the ankle angle of the stance leg, the angle from the stance leg to the swing leg, the angle to lift the trunk up respectively.

である。

(10)~(12) 式と (1) 式から、(6) 式は

$$\begin{aligned} M_s(\theta) &= J_1 - J_2 + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 - m_2 a_2^2 \\ &\quad + m_3 l_1^2 + m_3 a_3 l_1 \cos(\gamma - \theta) \\ &:= E_1 + E_2 \cos(\gamma - \theta) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} G_s(\theta) &= (m_1 a_1 + m_2 l_1 + m_2 a_2 + m_3 l_1)g \sin \theta \\ &\quad + m_3 g a_3 \sin \gamma \\ &:= E_3 + E_4 \sin \theta. \end{aligned} \quad (14)$$

となるので、

$$\begin{aligned} &\int M_s(\theta) G_s(\theta) d\theta \\ &= \int (E_1 + E_2 \cos(\gamma - \theta)) (E_3 + E_4 \sin \theta) d\theta \\ &= E_2 E_4 \left(\frac{\sin \gamma}{2} \theta - \frac{\cos(2\theta - \gamma)}{4} \right) + E_1 E_3 \theta \\ &\quad + E_2 E_3 \sin(\theta - \gamma) - E_1 E_4 \cos \theta + C_s \\ &:= D_s(\theta) + C_s \end{aligned} \quad (15)$$

である。 C_s は積分定数であり、Sagittal 運動における PDAC Constant を意味している。(8) 式から、Sagittal 面における Converged dynamics は

$$\dot{\theta} = \frac{1}{M_s(\theta)} \sqrt{2(D_s(\theta) + C_s)} \quad (16)$$

$$:= F_s(\theta). \quad (17)$$

となる。ただし、特異点を避けるために γ を $M_s(\theta) > 0$ となる範囲で選ぶものとする。ヒューマノイドロボットや 2 足歩行ロボットでは一般的に $l_1 > a_3$ であり $E_1 > E_2$ が成り立つため、以下 $M_s(\theta) > 0$ として議論を進める。

3.3 遊脚着地のモデル

遊脚着地時のモデルとしては従来手法^{1)~3), 5)}と同様に完全非弾性衝突を仮定する。すなわち、遊脚着地の前後で角運動量保存則は成立するが、エネルギーは保存しない。

Fig. 3 Parameters at foot-contact. $l_e[k]$ and $\xi_e[k]$ are the length and inclination of the inverted pendulum which connects the ankle of support leg and robot COG before impact at the end of k th step. $l_i[k+1]$ and $\xi_i[k+1]$ are those after impact. $\theta_e[k]$ and $\theta_i[k+1]$ are the angles around the contact point before and after impact.

Fig. 3 は遊脚着地時の倒立振子の角度や長さを表わしている。ここで、 k 歩目から $k+1$ 歩目に移る際の遊脚着地について考える。遊脚着地時における後脚足首周りの角速度を $\dot{\theta}_e[k]$ とすると、(16) 式より、

$$\dot{\theta}_e[k] = \frac{1}{M_s(\theta_e[k])} \sqrt{2(D_s(\theta_e[k]) + C_s[k])} \quad (18)$$

が成り立つ。ただし、 $C_s[k]$ は k 歩目における PDAC Constant の値を表わすものとする。

上半身の傾きが一定であり、重心が回転しないため、遊脚着地時における前脚の足首周りの角運動量 $P_i[k+1]$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} P_i[k+1] &= m_t l_e[k] l_i[k+1] \dot{\theta}_e[k] \\ &\quad \cdot \cos(\xi_e[k] + \xi_i[k+1]) \\ &= \frac{m_t l_e[k] l_i[k+1] \cos(\xi_e[k] + \xi_i[k+1])}{M_s(\theta_e[k])} \\ &\quad \cdot \sqrt{2(D_s(\theta_e[k]) + C_s[k])} \\ &:= h[k] \sqrt{2(D_s(\theta_e[k]) + C_s[k])}. \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、 $m_t = m_1 + m_2 + m_3$ とする。

角運動量は

$$P = M_s(\theta) \dot{\theta}$$

で表わされるため、遊脚着地後の PDAC Constant, $C_s[k+1]$, は

$$\begin{aligned} C_s[k+1] &= \frac{1}{2} P_i[k+1]^2 - D_s(\theta_i[k+1]) \\ &= h[k]^2 C_s[k] \\ &\quad + h[k]^2 D_s(\theta_e[k]) - D_s(\theta_i[k+1]) \\ &:= s_1[k] C_s[k] + s_2[k]. \end{aligned} \quad (20)$$

となる。

3.4 安定化と安定性の証明

本論文では Sagittal 運動を安定化するために、歩幅を目標値 λ_d に固定する。このような条件下では明らかに任意の k 歩目において、

$$\theta_e[k] = -\theta_i[k+1] = \arcsin\left(\frac{\lambda_d}{2l_1}\right) := \theta_c = \text{const} \quad (21)$$

が成り立つ。ただし幾何学的な条件から $0 \leq \theta_c < \frac{\pi}{2}$ である。上体の傾き γ が常に一定であることから、同様に $\xi_e[k]$, $\xi_i[k+1]$, $l_e[k]$, $l_i[k+1]$ もすべて一定値となる。したがって、(19) 式において

$$h[k] := H = \text{const}$$

が成り立つ。さらに (20) 式に関しても

$$s_1[k] = h[k]^2 = H^2 := S_1 = \text{const}$$

$$\begin{aligned} s_2[k] &= h[k]^2 D_s(\theta_e[k]) - D_s(\theta_i[k+1]) \\ &= H^2 D_s(\theta_c) - D_s(-\theta_c) := S_2 = \text{const} \end{aligned}$$

が成立する。

まず始めに、歩行が発生する条件について論じる。ただし、以下では実用的な観点から $0 < \gamma < \frac{\pi}{2}$ として議論を進める。歩行が継続的に行なわれるためには常に $\dot{\theta} > 0$ である必要があるが、 $M_s(\theta) > 0$ から、この条件は $P = M_s(\theta) \dot{\theta} > 0$ という条件と等価である。ここで P と θ の関係に注目すると、

$$\begin{aligned} \frac{dD_s(\theta)}{d\theta} &= M_s(\theta) G_s(\theta) \\ &= (E_1 + E_2 \cos(\gamma - \theta))(E_3 + E_4 \sin \theta) \end{aligned}$$

であり、 $E_3 > 0$, $E_4 > 0$ であることから、 $D_s(\theta)$, すなわち角運動量 P は

$$\theta = \arcsin\left(-\frac{E_3}{E_4}\right) := \hat{\theta}$$

のとき、最小となり、 $-\frac{\pi}{2} < \theta < \hat{\theta}$ で単調減少、 $\hat{\theta} < \theta < \frac{\pi}{2}$ で単調増加することがわかる。 $\frac{1}{2} P^2 = D_s(\theta) + C_s$ であるから、 $P > 0$ という上記の条件は次式

$$P > 0 \iff C_s > -D_s(\hat{\theta}) := \hat{C}_s \quad (22)$$

で記述される。したがって、歩行が行なわれる条件、すなわち、歩行が停止しないための条件は、(20) 式より

$$S_1 \hat{C}_s + S_2 > \hat{C}_s \quad (23)$$

つぎに、歩行のダイナミクスが唯一の軌道に収束した状態を考える。このとき、毎歩の PDAC Constant は一定値に収束しており、

$$C_s[k] = C_s[k+1] := C_s^*$$

が成立する。したがって、(20) 式より

$$\begin{aligned} C_s^* &= S_1 C_s^* + S_2 \\ \iff S_2 &= C_s^*(1 - S_1) \end{aligned} \quad (24)$$

となる。(24) 式を (23) 式に代入すると次式

$$(1 - S_1)(C_s^* - \hat{C}_s) > 0$$

となり、(22) 式から明らかに $C_s^* > \hat{C}_s$ であるので、結局、

Fig. 4 Condition of θ and γ in order to generate continual walking

歩行の発生条件は

$$1 - S_1 > 0 \quad (25)$$

となる. (25) 式は実験に用いるロボット (Gorilla Robot II: Fig. 8, Table 1) のパラメータを用いた場合には Fig. 4 に示す領域を意味する. Fig. 4 では $\gamma < \frac{\pi}{2}$ としたが, 歩行が可能な範囲の上限は, 遊脚を前に振る際のトルクや, 上体を一定角に保つために必要なトルクなどの実機的な制限により決定される. Fig. 4 の範囲は実機のトルクや角速度に制限がない場合を表わしている.

以上を踏まえて, 以下リアプノフの定理を用いて歩行の安定性を示す. まず始めに C_s の収束値からの誤差を

$$\delta C_s := C_s^* - C_s \quad (26)$$

とする. つぎに, 正定関数 V をつぎのように定義する.

$$V = (\delta C_s)^2$$

$V(0) = 0$ かつ $V > 0$ ($\delta C_s \neq 0$) であるから, V は明らかに正定である. 関数 V の差分を計算すると, (20)(24)(26) 式より

$$\Delta V = V[k+1] - V[k]$$

Fig. 5 Simulation results of sagittal stabilization. (Left) Phase portrait of the sagittal dynamics. (Right) θ trajectory vs. time.

Fig. 6 Simulation results of sagittal stabilization. (Left) Return map of PDAC Constant. (Right) Return map of θ at foot-contact.

Fig. 7 Return map of θ at foot-contact vs. step-length

$$\begin{aligned} &= \delta C_s[k+1]^2 - \delta C_s[k]^2 \\ &= (\delta C_s[k+1] + \delta C_s[k])(\delta C_s[k+1] - \delta C_s[k]) \\ &= -(2C_s^* - C_s[k+1] - C_s[k]) \\ &\quad \cdot (C_s[k+1] - C_s[k]) \\ &= -(2C_s^* - S_1 C_s[k] - S_2 - C_s[k]) \\ &\quad \cdot (S_1 C_s[k] + S_2 - C_s[k]) \\ &= -(2C_s^* - S_1 C_s[k] - (1 - S_1)C_s^* - C_s[k]) \\ &\quad \cdot (S_1 C_s[k] + (1 - S_1)C_s^* - C_s[k]) \\ &= -(1 + S_1)(1 - S_1)(C_s^* - C_s[k])^2 \\ &= -(1 + S_1)(1 - S_1)\delta C_s[k]^2 \end{aligned} \quad (27)$$

となる. (22) 式より明らかに $1 + S_1 = 1 + H^2 > 0$ が成り立ち, また (25) 式より歩行の起こる範囲では $1 - S_1 > 0$ であるから, (27) 式は

$$\Delta V = 0 \quad (\delta C_s = 0)$$

かつ

$$\Delta V < 0 \quad (\delta C_s \neq 0)$$

となり, 負定である. したがってリアプノフの定理より, 本歩行のダイナミクスは Fig. 4 の範囲において平衡点 C_s^* に漸近安定である.

つぎにこの安定性を数値シミュレーションによって確認する. Fig. 5 は θ の位相線図と時間変化を表わしている. この図から Sagittal 面のダイナミクスの収束性を確認できる. ただし, このシミュレーションにおいては歩幅を 0.18[m], $\gamma = 0.035[\text{rad}]$ とした.

また PDAC Constant と遊脚着地時における受動関節角速度のリターンマップを Fig. 6 に示す. これらの図から, Sagittal 面のダイナミクスが安定な Fixed point をもつことが確認できる.

最後に, Sagittal 面のダイナミクスの安定性が歩幅に依存しないことを確認するために, 歩幅を変えてシミュレーションを行なった. Fig. 7 は遊脚着地時における θ のリターンマップを各歩幅に対してプロットしたグラフである. この図から Sagittal 面の運動が歩幅に関係なく安定であることが確認できる.

Table 1 Link parameters of Gorilla Robot III

Mass[kg]	link1	m_1	2.618
	link2	m_2	3.451
	link3	m_3	15.143
COG position	link1	a_1	0.23
	link2	a_2	0.28
	link3	a_3	0.22
Moment of inertia	link1	J_1	0.042
	link2	J_2	0.070
	link3	J_3	0.047

3.5 Sagittal 運動の周期

一定歩幅の条件を満たすためには、Sagittal 運動において目標の歩幅に到達する時間に同期して Lateral 運動が遊脚着地するように制御を行わなければならない。Sagittal 面のダイナミクスは 1 次元の自律システム (Converged dynamics) で記述されているため、Converged dynamics を時間積分することによって、次式に表わすように Sagittal 運動が目標の歩幅に達する時間を算出することが可能である。

$$T_s = \int_{\theta_i[k]}^{\theta_e[k]} \frac{1}{F_s(\theta)} d\theta. \quad (28)$$

算出した T_s を Lateral 面の目標周期としてわれわれが以前提案した Lateral 運動制御を用い¹²⁾、Sagittal 運動と Lateral 運動を合わせることで 3 次元の動歩行を実現する。

4. 実験

前章で提案した歩行制御手法を用いて 3 次元動歩行の実験を行なった。実験では目標の歩幅と上体の傾き γ をロボットにあらかじめ与えた。ただし、受動関節を仮定している足首関節には粘性があるため、以下の実験では、あらかじめ同定して求めた粘性トルクと角速度の関数 $\beta(\dot{\theta})$ を用いて

$$\tau_\beta = \beta(\dot{\theta}) = \beta \circ F(\theta) \quad (29)$$

のように粘性トルクの推定値を算出し、この τ_β を足首関節に加えることにより仮想的な受動関節を実現している。

4.1 Experimental Setup

実験環境と実験に用いるロボット、Gorilla Robot III¹¹⁾ を Fig. 8 に示した。このロボットは 24 自由度で、20~30[W] の 24 個の AC モータが減速比 100~200 のハーモニックギアを介して関節を駆動する。また、本手法ではロボットが遊脚

の着地と同時に支持脚を交換し、着地脚の足首関節を受動関節に切り替える必要があるが、足裏に搭載されたフォトセンサーを用いて遊脚の着地を認識している。

4.2 Experimental results

この実験では、支持脚交換直後に遊脚が地面を擦ってしまうのを防ぐために、ロボットは遊脚相において膝関節をわずかに曲げる。ただし、遊脚の膝曲げは 5[deg] 程度と非常に小さいため、ダイナミクスに与える影響は無視できるものとする。遊脚足首関節は地面と水平になるように常に制御を行なう。実験に関しては水平な平面上で行なったが、地面表面にはアルミ版の撓みなどに起因した ± 1.0 [cm] の連続的な凹凸が存在している。

実験では、最初の 5 歩で 0.15[m] になるように目標歩幅を与え、5 歩目以降は 0.15[m] に固定した。実験の結果、動的で自然な歩行を 30 歩以上安定に実現できることが確認された。5 歩目以降の歩行では、歩幅約 0.15[m]、歩行速度約 0.23[m/s] であった。実験時の 1, 7, 12, 16, 19, 22 歩目におけるスナップショットを Fig. 9 に示す。ロボットの下半身の関節角度および関節角速度データを Fig. 10, 11 にそれぞれ示した。これらの図から、滑らかで動的な運動が周期的に実現されていることが確認できる。

5. 結論

本論ではわれわれが以前提案した Passive Dynamic Autonomous Control (PDAC) を 2 足歩行の Sagittal 運動に適用した。PDAC に従って関節間の拘束を設計した上で、歩幅を一定にすることによって安定化を行なった。そして、PDAC を用いることによって得られる保存量である PDAC Constant の収束力の誤差の 2 乗を計算することによってリアプノフ関数が存在することを示し、Sagittal 運動の漸近安定性を証明した。設計した安定な Sagittal 運動の自律的なダイナミクスを時間積分することによって Sagittal 面における遊脚着地からつぎの遊脚着地までの周期を計算し、その周期を目標周期としてわれわれが以前提案した Lateral 面の運動制御を行なった。最後に、Sagittal 面、Lateral 面それぞれの運動制御を同時に行なうことによって、動的で自然な歩行が 30 歩以上安

Fig. 8 Gorilla Robot III (about 1.0[m] height, 22.0[kg] weight, 24 DOF)

Fig. 9 Snapshots of the walking experiment. Each figure shows the snapshots at (a)1st (b)5th (c)9th (d)12th (e)14th (f)16th step.

Fig. 10 Angle of the joints (a) in the lateral plane
(b) in the sagittal plane

Fig. 11 Angular Velocity of the joints (a) in the lateral plane
(b) in the sagittal plane

定に実現できることを確認した。

参 考 文 献

- 1) J.W. Grizzle, G. Abba and F. Plestan: Asymptotically Stable Walking for Biped Robots: Analysis via Systems with Impulse Effects, IEEE Transaction on Automatic Control, **46**-1, 56/64 (2001)
- 2) E.R. Westervelt, G. Buche and J.W. Grizzle: Inducing Dynamically Stable Walking in an Underactuated Prototype Planar Biped, in Proc. International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, 4234/4239 (2004)
- 3) A.D. Kuo: Stabilization of Lateral Motion in Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics Research, **18**-9, 917/930 (1999)
- 4) A.A. Grishin, A.M. Formal'sky, A.V. Lensky and S.V.

Zhitomirsky: Dynamic Walking of a Vehicle With Two Telescopic Legs Controlled by Two Drives, The International Journal of Robotics Research, **13**-2, 137/147 (1994)

- 5) A. Goswami, B. Espiau and A. Keramane: Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws, Autonomous Robots **4**, 274/286 (1997)
- 6) H. Miura and I. Shimoyama: Dynamic Walking of a biped, The International Journal of Robotics Research, **3**-2, 60/74 (1984)
- 7) S. Kajita, T. Yamaura and A. Kobayashi: Dynamic walking control of a biped robot along a potential conserving orbit, IEEE Transactions on Robotics Automation, **8**-4, 431/438 (1992)
- 8) K. Ono, T. Furuichi and R. Takahashi: Self-Excited Walking of a Biped Mechanism With Feet, The International Journal of Robotics Research, **23**-1, 55/68 (2004)
- 9) J. Furusho and A. Sano: Sensor-based control of a nine-link biped, The International Journal of Robotics Research, **9**-2, 83/98 (1990)
- 10) C. Chevallereau: Time-Scaling Control for an Underactuated Biped Robot, IEEE Transactions on Robotics Automation, **19**-2, 362/368 (2003)
- 11) 梶間日出輝: マルチロコモーションロボットによるブラキエーション運動制御に関する研究, 名古屋大学大学院工学研究科, 博士論文 (2005)
- 12) 土井, 松野, 長谷川, 福田: 点接触の仮定に基づく 2 足歩行の Lateral 運動制御, 日本機械学会論文集 C 編, **72**-718, 1832/1839 (2006)

[著 者 紹 介]

土 井 将 弘 (学生会員)

2004 年名古屋大学大学院博士課程前期課程修了。2004 年より名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻博士課程後期課程, 現在に至る。2 足歩行制御, ロボット運動制御, 劣駆動ロボットの制御などの研究に従事。

長谷川 泰 久 (正会員)

1996 同大学大学院博士課程前期課程修了。96 年から 98 年, 三菱重工業 (株) に勤務。98 年より名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻助手。2003 年より岐阜大学工学部講師, 2004 年より筑波大学大学院システム情報工学研究科講師, 現在に至る。博士 (工学)。主な研究領域は, 学習型運動制御, ロボットマニピュレーション, 知的ロボットシステム。

福田 敏 男 (正会員)

1977年東京大学大学院博士課程修了, 工学博士。この間, 73~75年アメリカール大学大学院留学, 77年通産省工業技術院機械技術研究所研究員, 主任研究官を経て, 82年東京理科大学工学部機械工学科講師, 83年助教授, 79~81年西ドイツシュツットガルト大学客員研究員, 86年アメリカール大学客員助教授, 89年4月名古屋大学工学部機械工学第2学科教授。92年4月同機械情報システム工学科教授。93年イタリア Scuola Superiore S. Anna 客員教授。自己組織化ロボット, マイクロロボット, ニューロ・ファジィ制御, 指やマニピュレータの制御, 特殊環境下のロボットの研究などに従事。

.....