局所フィードバックの概念を考慮した2足歩行の 低次元モデル[†]

古 莊 純 次*・森 塚 秀 人**・増 淵 正 美*

Low Order Modeling of Biped Locomotion System Using Local Feedback

Junji FURUSHO*, Hideto MORITSUKA** and Masami MASUBUCHI*

A new low order model is developed for biped locomotion system having five links by using predominant modes when local feedback is considered. It is shown that these predominant modes are not influenced by the coefficient of local feedback. By computer simulation, this low order model has been proved to provide good approximation for the original high order system especially with respect to the center of gravity and the angular momentum of the biped system. These properties are most important for the low order model of dynamical walking. Since the model is very simple and accurate, it can be used as the model for deciding global strategy of multilevel control.

1. ま え が き

2足歩行の動的な制御についての研究は従来から数多く行われてきた^{1)~8)}。その研究は大きく二つに分類でき、一つは人間の歩行を観察することによりその特徴を抽出しようとする方向であり、他の一つは2足歩行を各関節部に働く筋力(トルク)の制御問題として捉えようとする方向である。歩行を動的システムの制御という立場から考える後者の研究は、歩行ロボットの制御アルゴリズムの決定、人間の歩行の制御則の発見、さらに義肢の制御方法について考えるとき重要となる。いずれの目的のためにも歩行現象を力学モデルで表わす必要があるが、人間の歩行についてはあまりにも自由度が大きいため骨格系の主要機能のみをモデル化した多リンクモデルによりその制御則が研究されている。しかし、その運動を2次元平面に限った5リ

ンクモデル^{5),8)}、すなわち上体、遊脚上下部、支持脚上下部よりなるモデルでさえ、五つの入力をもつ10次非線形常微分方程式で記述されるため、簡単に解析できない。

そこで、モデルを低次元化することが一般に考えられるが、得られた低次元モデルは、もとの高次元モデルとの間に定量的な関係をもつものでなければならない。すなわち、低次元モデルの軌跡から高次元モデルの軌跡が近似的にはあるが簡単に復元[†]できることが、制御に利用できる低次元モデルの条件といえる。このような低次元モデルとして従来、宮崎、有本は、5リンクモデルに特異摂動法を適用して倒立振子モデルを与え、支持脚足首に働くトルクだけをその入力としている^{5),6)}。

本研究では、モード制御¹²⁾の概念を用いて高次の歩行モデルから低次元モデルを得る。しかし、5リンクモデルにおいて各関節への入力トルクを零とした自律系は、直立静止状態の回りで線形化したときそのモードとして $\pm\sigma_i$, $i=1, 2, 3$, $\pm j\omega_k$, $k=1, 2$ をもつため、急速に減衰するモードを無視してモデルの低次元を行っても、それほど大きく低次元化することはできない。ところが、各関節に対して局所フィードバック制御を適用するとき、フィードバック係数の値にほとんど影響されない $\pm\sigma_i$ に基づく二つのモードが存在し、フィードバック係数をある程度以上大きくするとその二つが支配モードとなることがわかる。本研究ではこの支配モードを用いて次元の低下を行う。各関節に対して局所フィードバックがかかっているという仮定は、人間の場合については筋の制御についての研究^{9)~11)}から妥当と考えられる。また、歩行ロボットの制御を考える際には、パラメータの不正確さの影響を受けにくい制御のためにも局所フィードバックの適用は妥当といえる。

本研究で得た2次の低次元モデル(そのモードは、 $\pm\sigma_i$ であるから物理的に解釈すると倒立振子モデルといえる)は、従来の研究と異なり、着地点における

[†] 第2回 Dynamical System Theory シンポジウムで発表(昭54・12)

* 大阪大学工学部 吹田市山田丘 2-1

** (財)電力中央研究所 狛江市岩戸北 2-11-1

* Faculty of Engineering, Osaka University, Suita

** Central Research Institute of Electric Power Industry, Komae

(Received October 20, 1980)

(Revised February 6, 1981)

支持脚足首のトルク以外に、各関節における局所フィードバックの目標値をもまたその入力としてもつものである。そのためたとえば、直立静止状態から支持脚足首のトルクを使わずに遊脚を前方に振り出すことにより歩行を開始する場合にもよい低次元モデルとなっている。

2. 定式化

Fig. 1 に示す5リンクモデルを考える。文献 5), 8) の5リンクモデルでは、支持脚下部と遊脚下部の質量および慣性モーメントを等しいとしているが、遊脚下部は脛と足よりなり、支持脚下部は脛だけからなると考えたほうがよいので、遊脚の下部および支持脚の下部の質量と慣性モーメントをそれぞれ異なる記号で表わし m_1, I_1 および m_5, I_5 とした。Fig. 1 に示す5リンクモデルの運動方程式はつぎの微分方程式により表わされる。

$$A\ddot{\theta} + B\dot{\theta}^2 + C\sin\theta = DT + ET_1 \quad (1)$$

ただし

$$\theta \triangleq \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{pmatrix}, \quad \dot{\theta}^2 \triangleq \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \\ \dot{\theta}_4^2 \\ \dot{\theta}_5^2 \end{pmatrix}, \quad \sin\theta \triangleq \begin{pmatrix} \sin\theta_1 \\ \sin\theta_2 \\ \sin\theta_3 \\ \sin\theta_4 \\ \sin\theta_5 \end{pmatrix}, \quad T \triangleq \begin{pmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix}$$

$$A \triangleq \{q_{ij}\cos(\theta_j - \theta_i)\}, \quad B \triangleq \{-q_{ij}(\theta_j - \theta_i)\}$$

$$C \triangleq \begin{pmatrix} -s_1 & & & & \\ -s_2 & 0 & & & \\ & -s_3 & & & \\ & & -s_4 & & \\ 0 & & & -s_5 & \end{pmatrix}, \quad D \triangleq \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Fig. 1 Biped locomotion model

$$E \triangleq \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで $\theta_1 \sim \theta_5$ は各部材の鉛直軸に対する角度であり、右回りを正とした。 $T_1 \sim T_5$ はそれぞれつぎの関節に加わるトルクである。

T_1 ; 支持脚足首 T_2 ; 支持脚膝 T_3 ; 支持脚腰
 T_4 ; 遊脚腰 T_5 ; 遊脚膝

また、

$$q_{11} = m_1 a^2 + (m_2 + m_5 + M) r_1^2 + I_1$$

$$q_{22} = m_2 b^2 + (m_2 + m_5 + M) r_2^2 + I_2$$

$$q_{33} = M L^2 + I_3$$

$$q_{44} = m_5 r_2^2 + m_2 (r_2 - b)^2 + I_2$$

$$q_{55} = m_5 (r_1 - c)^2 + I_5$$

$$q_{12} = m_5 r_1 r_2 + m_2 r_1 (r_2 + b) + M r_1 r_2$$

$$q_{13} = M L r_1, \quad q_{14} = -m_5 r_1 r_2 - m_2 (r_2 - b) r_2$$

$$q_{15} = -m_5 r_1 (r_1 - c), \quad q_{23} = M r_2 L$$

$$q_{24} = -m_5 r_2^2 - m_2 r_1 (r_2 - b), \quad q_{25} = -m_5 r_2 (r_1 - c)$$

$$q_{34} = q_{35} = 0, \quad q_{45} = m_5 r_2 (r_1 - c)$$

$$q_{ji} = q_{ij}, \quad i = 1, \dots, 5, \quad j = 1, \dots, 5$$

$$s_1 = (m_1 a + 2m_2 r_1 + M r_1 + m_5 r_1)g$$

$$s_2 = (m_2 b + M r_2 + m_2 r_2 + m_5 r_2)g$$

$$s_3 = M L g$$

$$s_4 = -\{m_2 (r_2 - b) + m_5 r_2\}g$$

$$s_5 = -m_5 (r_1 - c)g$$

(1) 式のモデルは非線形項をもっているが、その特徴を把握するため、 $\theta = 0, \dot{\theta} = 0$ の回りで線形化するとつぎようになる。

$$A_i \ddot{\theta} + C\theta = DT + ET_1 \quad (2)$$

ここで

$$A_i \triangleq \{q_{ij}\}$$

さらに、 $x = (\theta^T, \dot{\theta}^T)^T$ と置いて線形系の標準的な表記法に書き直すようにする。

$$\frac{dx}{dt} = \bar{A}x + \begin{bmatrix} 0 \\ -A_i^{-1}D \end{bmatrix} T + \begin{bmatrix} 0 \\ -A_i^{-1}E \end{bmatrix} T_1 \quad (3)$$

ここで

$$\bar{A} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & I \\ -A_i^{-1}C & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

5リンクモデルのモードは、 $\bar{A}$ の固有値を計算することにより得られる。5リンクモデルの各部の寸法、質量、慣性モーメントとして Table 1 のものを用いると、モードはつぎようになる。

$$\pm 2.94, \pm 7.99, \pm 30.63$$

$$\pm 4.04j, \pm 10.49j$$

Table 1 Values of the parameters of the biped

	Mass (kg)	Moment of Inertia (kgm ²)	Length (m)	Center of Mass from Lower Joint (m)
Upper Body	49.00	2.35	0.0	0.28
Upper Leg	7.63	0.105	0.431	0.247
Lower Leg	4.55	0.089	0.502	0.267

このようなモード分布をもつため、このままでは支配モードによるモデルの低次元化はできない。

3. 局所フィードバック制御とモード

筋制御系の研究によれば、筋肉はその長さと縮む速度を測るセンサをもち、それらによって各関節の相対回転角度と角速度を感知できる^{9)~11)}。そしてその情報を使い下位レベルの関節の制御として、局所 PD フィードバック制御（ただし可変ゲインではある）の存在が指摘されている^{9)~11)}。したがって歩行ロボットの制御を行う際にも、下位レベルの制御としての各関節における局所フィードバックが外乱の影響を受け難い制御のために必要と考えられる。そこで各関節に対する局所フィードバックを考えると、たとえば遊脚膝の相対曲げ角 ($\theta_4 - \theta_5$) についてはつぎようになる。

$$T_5 = -f_{k5}(\theta_{r5} - (\theta_5 - \theta_4)) + f_{d5}(\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_4) \quad (5)$$

ここで、 θ_{r5} は遊脚膝関節の曲げ角に対する目標値であり、 f_{k5}, f_{d5} はフィードバックゲインである。支持脚足首トルク T_1 については局所フィードバックを考えないことにする。局所フィードバック制御を行列、ベクトルを用いてまとめてつぎのように表わすことにする。

$$T = F_k \theta + F_d \dot{\theta} + F_r \theta_r \quad (6)$$

ここで

$$F_k \triangleq \begin{bmatrix} -f_{k2} & f_{k2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f_{k3} & f_{k3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f_{k4} & f_{k4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_{k5} & f_{k5} \end{bmatrix}$$

$$F_d \triangleq \begin{bmatrix} -f_{d2} & f_{d2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f_{d3} & f_{d3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f_{d4} & f_{d4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_{d5} & f_{d5} \end{bmatrix}$$

$$F_r \triangleq \begin{bmatrix} -f_{k2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f_{k3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f_{k4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_{k5} \end{bmatrix}$$

$$\theta_r \triangleq [\theta_{r2}, \theta_{r3}, \theta_{r4}, \theta_{r5}]^T$$

θ_{r2} : 支持脚膝の曲げ角の目標値

θ_{r3} : 支持脚上部と上体がなす角の目標値

θ_{r4} : 遊脚上部と上体がなす角の目標値

Fig. 2 Root locus

(6)式を(3)式に代入し、 $x = (\theta^T, \dot{\theta}^T)^T$ なる関係を使うと、つぎようになる。

$$\frac{dx}{dt} = \tilde{A}x + \begin{bmatrix} 0 \\ A_i^{-1}DF_r \end{bmatrix} \theta_r + \begin{bmatrix} 0 \\ A_i^{-1}E \end{bmatrix} T_1 \quad (7)$$

ここで

$$\tilde{A} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_i^{-1}(-C + DF_k) & A_i^{-1}DF_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

局所フィードバックを行ったシステムのモードは行列 $\tilde{A}$ の固有値を計算することにより得られる。

つぎに、フィードバック係数 $f_{di}, f_{ki}, i=2, 3, 4, 5$ の値を種々に変えて固有値の分布を計算すると、フィードバック係数の値にほとんど影響されない二つの固有値（常に ± 2.9 の近傍にある）が存在することがわかった。一例として

$$\begin{cases} f_{k2}=100K, & f_{k3}=150K, & f_{k4}=100K, \\ f_{d2}=10K, & f_{d3}=15K, & f_{d4}=5K, \\ f_{k5}=100K \\ f_{d5}=2.5K \end{cases} \quad (9)$$

としたときの K についての根軌跡を Fig. 2 に示す。図には、 K を 3 から 20 までの間で変えたときの根軌跡を実線で示す。(8)式の行列は 10×10 行列であるのに、図において 8 個の固有値に対する軌跡しかないのは、 ± 2.9 近傍の固有値が K を変えてもほとんど動かないからである。この図だけからは、 ± 2.9 近傍の固有値の動きはわかりにくいので、Table 2 に各 K に対する ± 2.9 近傍の固有値の値を示す。Fig. 2 にはさらに K を 0 から 3 の間で変えたときの根軌跡の概略を破線で示し、20 以上で変えたときの軌跡を一点鎖線で示す。図よりわかるように、 ± 2.9 の近傍にある K の影響をほとんど受けけない固有値を除くほかの固有値は、 K を大きくしていくと複素平面の左へ移動していく。その結果、 ± 2.9 近傍の固有値が系の遅いモードを支配するものとなっていくことがわかる。たとえば図よりわかるように、 $K=20$ のとき ± 2.9 近傍の固有値以外は実数部がすべて -9.47 より小となっている。

つぎにこの現象に物理的解釈を加えてみる。各関節

Table 2 Variation of dominant modes

K	Dominant	modes
0	-2.94	2.94
1	-2.97	2.90
2	-2.85	2.98
3	-3.04	2.96
4	-2.97	2.95
5	-2.96	2.94
6	-2.95	2.94
7	-2.95	2.93
8	-2.94	2.93
9	-2.94	2.93
10	-2.94	2.93
15	-2.93	2.93
20	-2.93	2.93
25	-2.93	2.93
30	-2.93	2.92

の相対曲げ角は、直接トルクを加えて制御することができるため、ある程度以上の強さで各関節に局所フィードバックを行うと、その曲げ角の応答はかなり速いものとするができる。そこで全体としては、各関節における曲げ角が制御可能な倒立振子に近づくため、倒立振子に対応すると考えられる ± 2.9 の二つのモード以外は、急速に複素面の左へ移動すると考えられる。

(9)式のようにフィードバック係数 f_{ki} , f_{di} の比率を決めた場合に限らず以上の性質が保たれることは、各種のフィードバック係数に対して確かめた。そこで、人間のように局所フィードバックゲインが可変であると考えられる場合でも、支配モードが動かないという性質は保たれる。

一例として(9)式のような比率でフィードバック係数を選んだが、この比率はサーボメカニズムとしての歩行の動きがなめらかに行えるものである。すなわち、計算機シミュレーションよりわかったことであるが、 f_{ki} , $i=2, 3, 4, 5$ を一つだけ極端に強くしたりあるいは弱くしたりするとなめらかな動きとはならなかった。また f_{ki} と f_{di} の間には一定の比率をもたせないと、目標値に対する追従性が悪化するので、この程度の比率が最も適したものであった。

4. 支配モードによる低次元化

つぎに支配モードによって(7)式を低次元化することを考える。局所フィードバックによって得られた2個の支配モードを λ_1, λ_2 とし、応答の速い残りの8個のモードを $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$ とする。また、 λ_1, λ_2 に対応する $\bar{A}$ の固有ベクトルを v_1, v_2 とし、 $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$ に対応する

固有ベクトルを $v_3 \sim v_{10}$ とする。以上の $v_1 \sim v_{10}$ を用いて座標変換行列 V を $V \triangleq [v_1, v_2, \dots, v_{10}]$ と定義し、

$$x \triangleq V \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \xi_1: 2 \text{ 次ベクトル} \\ \xi_2: 8 \text{ 次ベクトル} \end{array}$$

と置いて座標変換すると(7)式はつぎようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \theta_r + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} T_1 \quad (10)$$

ただし

$$\begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \triangleq V^{-1} \bar{A} V, \quad \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \triangleq V^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ A_1^{-1} D F_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} \triangleq V^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ A_1^{-1} E \end{bmatrix} \quad A_1: 2 \times 2$$

である。ここで、 A_1, A_2 はそれぞれ対角要素として λ_1, λ_2 および $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$ をもつ対角行列である。したがって、(10)式のシステムは、遅いモードをもつシステムと速いモードをもつシステムとにつぎのように分解できる。

$$\dot{\xi}_1 = A_1 \xi_1 + G_1 \theta_r + H_1 T_1 \quad (11)$$

$$\dot{\xi}_2 = A_2 \xi_2 + G_2 \theta_r + H_2 T_1 \quad (12)$$

(12)式のシステムは速いモードをもつものであるから、 θ_r, T_1 の変化が十分ゆるやかなものであれば、 $\dot{\xi}_2 \doteq 0$ としてつぎのように書き直すことができる。

$$\xi_2 \doteq -A_2^{-1} G_2 \theta_r - A_2^{-1} H_2 T_1 \quad (13)$$

ゆえに(7)式の解 x は、(11)式の2次微分方程式を解き、

$$x = V \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = [V_1 \ V_2] \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \\ \doteq V_1 \xi_1 - V_2 A_2^{-1} [G_2 \ H_2] \begin{bmatrix} \theta_r \\ T_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

に代入することにより近似的に与えられる。ただし V_1, V_2 は

$$V_1 \triangleq [v_1 \ v_2] \quad V_2 \triangleq [v_3 \ v_4 \ \dots \ v_{10}]$$

と定義されるそれぞれ $10 \times 2, 10 \times 8$ 行列である。

以上の手順で、5リンクモデルに対して、(11), (14)式で表わされる2次の低次元モデルを導くことができる。本研究で得た低次元モデルは、その入力として足首のトルク T_1 だけをもつのではなく目標値 θ_r もまたもつ点が文献(5, 6)のモデルと異なっている。

5. シミュレーションによる検討

3.4節では、局所フィードバックの存在を仮定したとき、5リンクモデルは直立静止状態のまわりにおいて2次の低次元線形モデルで近似可能であることをモードについての考察より示した。本節では、(11), (14)式で表わされる低次元モデルが、もとの非線形5リンクモデルで局所フィードバックを考えたものをどの程

度近似することができるかを計算機シミュレーションにより示そう。

局所フィードバックを仮定すると、5リンクモデルは(1)、(6)式より

$$\begin{aligned} A\ddot{\theta} - DF_r\dot{\theta} + B\dot{\theta}^2 - DF_r\theta + C\sin\theta \\ = DF_r\theta_r + ET_1 \end{aligned} \quad (15)$$

となる。フィードバック係数 f_{ki} , f_{di} , $i=2, 3, 4, 5$ は、(9)式において $K=20$ としたものを選んだ。このように選ぶと3節で示したとおり、線形化されたモデルは、支配モードとして ± 2.93 をもつ。また支配モードを除くモードの中で最も応答の遅いのも -9.47 である。

今、支持脚足首のトルク T_1 を零として、すなわち支持脚足首を自由回転支持として、直立静止状態から定常歩行へとはいつていく過程をシミュレーションし、低次元モデルと5リンクモデルを比較する。Fig. 3(a)には5リンクモデル、すなわち(15)式に適当な目標値 θ_r を与えたときの歩行を示す。Fig. 3(b)は、(11)式の低次元モデルに同じ目標値 θ_r を与え、その解 ξ_1 から(14)式によって5リンクモデルの θ を復元し描いたものである。ただし、支持脚変換直後の初期角速度 $\dot{\theta}$ は、衝撃運動に関するラグランジュ方程式より得た。

歩行の制御とは重力場を利用した角運動量の制御といえ、たとえば歩行を停止する際には重心が着地点の真上に来たときに角運動量が零となるように制御を行う。そこで、Fig. 4には、Fig. 3に示した歩行における5リンクモデルと低次元モデルを、その全体の重心位置の変化および角運動量という観点から比較した。図には1歩目から4歩目までについて各ステップごとに分けてそれらの変化を示した。図の横軸 t' は支持脚変換時を基点とした時間軸である。実線は5リンクモデルであり、破線は低次元モデルである。Fig. 4の(a)図は、全体の重心位置の変化を示し、縦軸は着地点を通る鉛直軸から重心までの水平距離である。(b)図は角運動量の変化を示す。図よりわかるように、直立静止状態から最初の着地までの1歩目においても、ほとんど定常歩行にはいりかけている4歩目においても、動的歩行の最も重要な要因と考えられる重心位置と角運動量に関して、低次元モデルは5リンクモデルのよい近似となっている。

以上のシミュレーション結果から、通常の歩行においては、低次元モデルを得るために行った仮定、すなわち目標値 θ_r の変化が十分ゆるやかなので(12)式を(13)式で置き換えることができるという仮定が妥当であることがわかる。

(a) 5-LINKS MODEL

(b) LOWER ORDER MODEL

Fig. 3 Simulation

Fig. 4 Locomotion of center of gravity and angular momentum

6. 低次元モデルの物理的解釈

前節までの議論で、(12)式のダイナミクスを無視した、(11)式の微分方程式と(14)式の代数式による低次元モデルで歩行現象が十分正確に表現できることを、重心の動き、角運動量変化およびモードの観点から示した。最後に本節では、(11)式の微分方程式の物理的解釈を行う。遊脚の効果がとくに興味深いので、ここでは支持脚の足首トルク T_1 および支持脚に関する目標値 θ_{r2} , θ_{r3} を零とした場合について考える。フィードバック係数 f_{ki} , f_{di} を、 $K=20$ として(9)式のように決めたとき、(11)式より低次元モデルはつぎのようになる。

$$\dot{\xi}_1 = \begin{bmatrix} 2.93 & 0 \\ 0 & -2.93 \end{bmatrix} \xi_1 + \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.50 \end{bmatrix} \theta_{r4} + \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.164 \end{bmatrix} \theta_{r5} \quad (16)$$

(16)式を

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.15 & 0.15 \\ -0.45 & -0.45 \end{bmatrix} \xi_1$$

として座標変換すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 8.77 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.014 \\ -0.372 \end{bmatrix} \theta_{r4} \\ &+ \begin{bmatrix} 0.002 \\ -0.132 \end{bmatrix} \theta_{r5} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。上式の右辺第2項および第3項の係数ベクトルにおいて第1成分は微小なので無視すると、 $\phi_1 = \phi_2$ となり、

$$\dot{\phi}_1 - 8.77\phi_1 = -0.372\theta_{r4} - 0.132\theta_{r5} \quad (18)$$

となる。上式は、式の形よりわかるように、倒立振子モデルに強制トルクとして θ_{r4} 、 θ_{r5} が加わった方程式を表わしている。

7. 結 論

本論文ではまず最初に、各関節における局所フィードバックを考えると、フィードバックゲインによってほとんど影響を受けないモードが存在し、そのモードはフィードバックゲインを増大させたとき、他のモードが複素平面の左に移動するため、支配モードとなることを指摘した。つぎに、この局所フィードバックによって現れる支配モードを用いて、高次元歩行モデルより低次元歩行モデルを導く方法について述べ、(11)式で示される2次の低次元モデルを得た。この低次元モデルは、高次元モデルと定量的な関係をもつものであり、近似的にはあるが簡単に高次元モデルの動きを復元できるものである。また、計算機シミュレーションによりこの低次元モデルがどの程度高次元モデルを近似しているかを調べ、動的歩行運動にとって重要な角運動量や全重心の動きについては、高次元モデルと本論文で得た低次元モデルとの間ではほとんど差がないことを確かめた。

歩行の制御は非常に複雑なため階層的な制御を行う必要があると考えられている。本研究で得た低次元モデルを上位レベルでの制御決定に用い、下位レベルでは局所フィードバック制御を行う階層制御を用いて、歩行の停止や外乱からの復帰を行う制御方策についてはまた別の機会に報告したい。

謝辞 最後に日頃有益な御討論をいただいている大阪大学工学部 嘉納秀明助教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Vukobratovic (加藤・山下訳)：歩行ロボットと人工の足，日刊工業新聞社 (1975)
- 2) 加藤，田中，谷江：2足歩行機械の試作，バイオメカニズム1，258/266，東大出版会 (1973)
- 3) 山下忠：2足移動の動的特性の線形モデルによる解析，計測自動制御学会論文集，10-5，579/585 (1975)
- 4) 伊藤宏司，藤井久一，伊藤正美：二足歩行のサーボモデルによる解析，バイオメカニズム4，263/270，東京大学出版会 (1978)
- 5) 有本，宮崎：歩行機械とその制御，計測と制御，18-1，44/49 (1979)
- 6) 宮崎，有本：特異摂動法による多自由度二足歩行系の解析，計測自動制御学会論文集，15-4，84/90 (1979)
- 7) F. Gubina, H. Hemami and R. B. McGhee: On the Dynamic Stability of Biped Locomotion, IEEE Trans., BME-21-2, 102/108 (1974)
- 8) H. Hemami and R. L. Farnsworth: Postural and Gait Stability of a Planar, Five Link Biped by Simulation, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-22-3, 452/458 (1977)
- 9) R. Gawronski: 筋制御系の構造について，続人間の手足の制御 (加藤一郎監訳)，24/34，学献社 (1973)
- 10) 鈴木，田崎，中浜：生理学通論II，160/190，共立出版 (1972)
- 11) 赤沢，梶山，藤井：神経-筋制御系のシミュレーション，バイオメカニズム2，71/81，東京大学出版会 (1973)
- 12) 増淵，伊藤：モード制御，計測と制御，17-6，439/450 (1978)