伸縮脚式二足歩行ロボットの試作

奥山 佳史・草野 兼光*・岩花 善衛・山根 茂典

生産機械工学科・*(現)日立造船(株)

(1985年9月3日受理)

Development of a Biped Locomotion Robot with Expanding and Contracting Legs

by

Yoshifumi OKUYAMA, Kanemitsu KUSANO*, Zen'ei IWAHANA and Shigenori YAMANE

Department of Mechanical Engineering

* Hitachi Zosen Co., Ltd.

(Received September 3, 1985)

This paper describes a development of a dynamic biped locomotion robot (MW-2), which has expanding and contracting legs and no knee joints. The equation of motion for the model having the four degrees of freedom is derived for the single support phase, which is constrained in sagittal plane. The model can be approximated to a inverted pendulum and the control method is discussed on the basis of the approximated model. The computer simulations have proved the validity of the control action.

The control algorithm is implemented using minicomputer, and walking motion of three or more steps has been realized.

1　はじめに

人間あるいは鳥類の歩行に見られる動的二足歩行は，制御理論的には不安定平衡点のまわりでの運動を支持脚交換により安定な系に変換するという，非線形不連続制御系といえ，これを機械で製作し人工的にそれを実現させる事は，非常に興味あるテーマであり，これまでにもいくつかの研究の結果が発表されている[1)-5)]．

それらの研究における二足歩行モデルとしては，人間の脚・胴体部分をモデル化した５リンクのモデルが用いられることが多い[3)4)]．しかし，膝関節は人間の歩行をなるべく忠実にシミュレートするという目的には必要ではあるが，二足歩行にとって本質的ではなく，膝なしモデルが用いられることもある[5)]．機械的な実現性を考慮すれば，膝関節を設けることは重量の点で不利であり，膝なしモデルのほうが適当である．そこで本研究では脚を伸縮式とした竹馬形膝なし二足歩行モデルによる歩行ロボットを試作し，動的歩行の実現を目指すこととした．今回，試作２号機において，断続的ながら３歩以上の歩行に成功したので，その機構，制御方法，歩行実験結果等について報告する．

2　Mechanical Walker (MW-2) の構造

試作２号機 Mechanical Walker 2（以下 MW-2 ）は，さきに製作した１号機 (MW-1)[6)] と原理的に同じ機構を有する伸縮脚式膝なし二足歩行ロボットであり，時定数を大きくし計算機負荷を軽減するため脚長を４５(cm)から人間とほぼ同じ７５(cm)と大型化した歩行機械である (Photo.2.1)．その脚の開閉は１台のモータの出力をかさ歯車により両脚に振り分けることにより，また，脚の伸縮はモータの回転運動をラック＆ピニオンにより直進運動に変換することにより行っている．また足部は１本歯の高げた状であり，前後（進行）方向に対しては足首トルクは働かなく，竹馬型歩行となる．左右方向に対しては左右の足部に重なりを持たせることにより片脚で自立できる．なお使用モータは脚開閉，伸縮共に24(W) DCモータである．

また，外部の固定された座標に対するロボットの姿勢を検出するため，足部に接地検出スイッチを設け，さらに脚下部にポテンショメータを取付け，それよりひげ状の針金を床面に延ばし，床面との角度を測定できるようにした．

MW-2 の設計に当っては，軽量化，特に脚部の質量を軽減し、さらに上部に質量を集中することに留意した．脚は直径17(mm)のアルミ製円筒パイプであり，足部は鋼鉄製で足幅は約34(cm)である．以上の結果，脚部の剛性にやや不満が残るものの，全質量 6.4(kg)，重心は主軸より約 6(cm)下となりほぼ目標を達成したといえる．

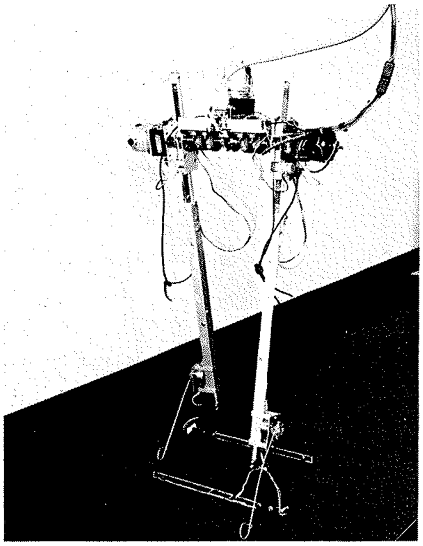

Photo.2.1　Mechanical Walker 2

3　MW-2 の動力学的解析

3．1　運動方程式

MW-2 の動力学的解明のため，およびシミュレーションにより動作の確認を行うため，運動方程式を求める．各部は全て剛体より成っているとし，MW-2 の動作は進行方向に平行な鉛直面 (sagittal plane) に拘束されていると仮定する．さらに各結合部の動きは滑らかであり摩擦等はないとする．二足歩行は一般に次の４つの相に分解され，それらの繰返しによって連続歩行が成立する[5)]．

1) 右脚支持相
2) 右脚支持から左脚支持への変換相（両脚支持相）
3) 左脚支持相
4) 左脚支持から右脚支持への変換相（両脚支持相）

本節では，1)右脚支持相における運動方程式を求める．2)および4)の両脚支持相においては動作は非常にゆっ

くりと準静的に行われるものとし，ここでは運動の解析は行わない．

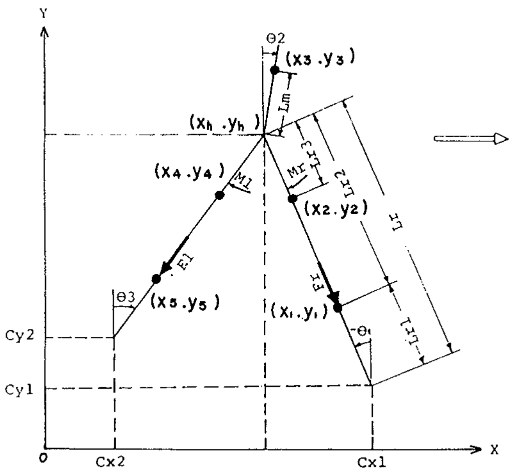

Fig.3.1 Biped locomotion model

まず始めに 自由落下状態に置かれたモデルを Fig. 3.1に示し，Lagrangeの方程式により解析する．この系において，自由度は6であり，系の状態は $\theta_1, \theta_3, L_{r2}, L_{l2}, x_h, y_h$ により規定され，また操作力は，股トルク M，脚伸縮力 F_r, F_l である．主軸の座標を(x_h, y_h)とすると各要素の重心の座標は，

$$
\begin{aligned}
x_1 &= x_h - L_{r2}\sin\theta_1, & y_1 &= y_h - L_{r2}\cos\theta_1 \\
x_2 &= x_h - L_{r3}\sin\theta_1, & y_2 &= y_h - L_{r3}\cos\theta_1 \\
x_3 &= x_h + L_m\sin\theta_2, & y_3 &= y_h + L_m\cos\theta_2 \\
x_4 &= x_h - L_{l3}\sin\theta_3, & y_4 &= y_h - L_{l3}\cos\theta_3 \\
x_5 &= x_h - L_{l2}\sin\theta_3, & y_5 &= y_h - L_{l2}\cos\theta_3
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

ここで，

$$\theta_2 = \frac{\theta_1 + \theta_3}{2}, \quad M = M_r - M_l \tag{3.2}$$

である．運動エネルギを E_K,ポテンシャル・エネルギを E_P，非保存力による仮想仕事を W とすれば E_K, E_P, W は以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
E_K = {} & \frac{1}{2}(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5)(\dot{x}_h^2+\dot{y}_h^2) \\
& + \frac{1}{2}(m_1L_{r2}^2+m_2L_{r3}^2+I_1+I_2)\dot{\theta}_1^2 \\
& + \frac{1}{8}(m_3L_m^2+I_3)(\dot{\theta}_1^2+2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3+\dot{\theta}_3^2) \\
& + \frac{1}{2}(m_4L_{l3}^2+m_5L_{l2}^2+I_4+I_5)\dot{\theta}_3^2 \\
& - (m_1L_{r2}+m_2L_{r3})(\dot{x}_h\cos\theta_1-\dot{y}_h\sin\theta_1)\dot{\theta}_1 \\
& + m_3L_m\left(\dot{x}_h\cos\frac{\theta_1+\theta_3}{2}-\dot{y}_h\sin\frac{\theta_1+\theta_3}{2}\right)\frac{\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3}{2} \\
& - (m_4L_{l3}+m_5L_{l2})(\dot{x}_h\cos\theta_3-\dot{y}_h\sin\theta_3)\dot{\theta}_3 \\
& - m_1\dot{L}_{r2}(\dot{x}_h\sin\theta_1+\dot{y}_h\cos\theta_1) \\
& - m_5\dot{L}_{r2}(\dot{x}_h\sin\theta_3+\dot{y}_h\cos\theta_3) \\
& + \frac{1}{2}m_1\dot{L}_{r2}^2 + \frac{1}{2}m_5\dot{L}_{l2}^2
\end{aligned}
\tag{3.3}
$$

$$
\begin{aligned}
E_P = {} & (m_1+m_2+m_3+m_4+m_5)gy_h - m_1gL_{r2}\cos\theta_1 - m_2gL_{r3}\cos\theta_1 \\
& + m_3gL_m\cos\frac{\theta_1+\theta_3}{2} - m_4gL_{l3}\cos\theta_3 - m_5gL_{l2}\cos\theta_3
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

$$W = M\frac{\Delta\theta_1-\Delta\theta_3}{2} + F_r\Delta L_{r2} + F_l\Delta L_{l2} \tag{3.5}$$

(3.3)～(3.5)式を Lagrange の運動方程式

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial\theta} = \frac{\partial W}{\partial\Delta\theta} \tag{3.6}$$

ここで， $L = E_K - E_P$

$\theta = (\theta_1, \theta_3, L_{r2}, L_{l2}, x_h, y_h)^T$

に代入することにより，次式の自由落下中のモデルの運動方程式が導かれる．

$$P\ddot{\theta} + Q\dot{\theta}^2 + R\theta_s + S = F \tag{3.7}$$

ここで， $\ddot{\theta} = (\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_3, \ddot{L}_{r2}, \ddot{L}_{l2}, \ddot{x}_h, \ddot{y}_h)^T$

$\dot{\theta}^2 = (\dot{\theta}_1^2, \dot{\theta}_3^2)^T$

$\theta_s = (\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3, \dot{L}_{r2}\dot{\theta}_1, \dot{L}_{l2}\dot{\theta}_3)^T$

$P = (p_{ij}) \in \mathbb{R}^{6\times6}$, $Q = (q_{ij}) \in \mathbb{R}^{6\times2}$, $R = (r_{ij}) \in \mathbb{R}^{6\times3}$

$S = (s_i) \in \mathbb{R}^6$, $F = (f_i) \in \mathbb{R}^6$

$p_{11} = m_1L_{r2}^2+m_2L_{r3}^2+m_3L_m^2/4+I_1+I_2+I_3/4$

$p_{12} = (m_3L_m^2+I_m)/4$

$p_{15} = -(m_1L_{r2}+m_2L_{r3})\cos\theta_1+(1/2)m_3L_m\cos\theta_2$

$p_{16} = (m_1L_{r2}+m_2L_{r3})\sin\theta_1-(1/2)m_3L_m\sin\theta_2$

$p_{21} = (m_3L_m^2+I_3)/4$

$p_{22}=m_4L_{13}^2+m_5L_{12}^2+m_3L_m^2/4+I_3/4+I_4+I_5$

$p_{25}=-(m_4L_{13}+m_5L_{12})\cos\theta_3+(1/2)m_3L_m\cos\theta_2$

$p_{26}=(m_4L_{13}+m_5L_{12})\sin\theta_3-(1/2)m_3L_m\sin\theta_2$

$p_{33}=m_1$

$p_{35}=-m_1\sin\theta_1$

$p_{36}=-m_1\cos\theta_1$

$p_{44}=m_5$

$p_{45}=-m_5\sin\theta_3$

$p_{46}=-m_5\cos\theta_3$

$p_{51}=-(m_1L_{r2}+m_2L_{r3})\cos\theta_1+(1/2)m_3L_m\cos\theta_2$

$p_{52}=-(m_4L_{13}+m_5L_{12})\cos\theta_3+(1/2)m_3L_m\cos\theta_2$

$p_{53}=-m_1\sin\theta_1$

$p_{54}=-m_5\sin\theta_3$

$p_{55}=m_1+m_2+m_3+m_4+m_5$

$p_{61}=(m_1L_{r2}+m_2L_{r3})\sin\theta_1-(1/2)m_3L_m\sin\theta_2$

$p_{62}=(m_4L_{13}+m_5L_{r2})\sin\theta_3-(1/2)m_3L_m\sin\theta_2$

$p_{63}=-m_1\cos\theta_1$

$p_{64}=-m_5\cos\theta_3$

$p_{66}=m_1+m_2+m_3+m_4+m_5$

$q_{31}=-m_1L_{r2}$

$q_{42}=-m_5L_{12}$

$q_{51}=(m_1l_{r2}+m_2l_{r3})\sin\theta_1-(1/4)m_3L_m\sin\theta_2$

$q_{52}=(m_4l_{13}+m_5l_{12})\sin\theta_3-(1/4)m_3L_m\sin\theta_2$

$q_{61}=(m_1l_{r2}+m_2l_{r3})\cos\theta_1-(1/4)m_3L_m\cos\theta_2$

$q_{62}=(m_4l_{13}+m_5l_{12})\cos\theta_3-(1/4)m_3L_m\cos\theta_2$

$r_{12}=2m_1L_{r2}$

$r_{23}=2m_5L_{12}$

$r_{51}=-(1/2)m_3L_m\sin\theta_2$

$r_{52}=-2m_1\cos\theta_1$

$r_{53}=-2m_5\cos\theta_3$

$r_{61}=-(1/2)m_3L_m\cos\theta_2$

$r_{62}=2m_1\sin\theta_1$

$r_{63}=2m_5\sin\theta_3$

$s_1=(m_1L_{r2}+m_2L_{r3})g\sin\theta_1-(1/2)m_3gL_m\sin\theta_2$

$s_2=(m_4L_{13}+m_5L_{13})g\sin\theta_3-(1/2)m_3gL_m\sin\theta_2$

$s_3=-m_1g\cos\theta_1$

$s_4=-m_5g\cos\theta_3$

$s_5=0$

$s_6=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5)g$

$f_1=M/2$

$f_2=-M/2$

$f_3=F_r$

$f_4=F_l$

other terms=0

次に片脚支持（右脚支持）の場合の運動方程式を求める．ロボットを支持する床は十分堅くて変形は0であるとする．また床と足との間には十分な摩擦が働き滑りはないと仮定する．このとき拘束条件は次式で与えられる．

$$
\begin{aligned}
f_1&=X_h-(L_{r2}+L_{r1})\sin\theta_1=0\\
f_2&=y_h-(L_{r2}+L_{r1})\cos\theta_1=0
\end{aligned}
\qquad (3.8)
$$

拘束のある動的システムは一般に未定乗数λを用いて次のように記述される．

$$P\ddot{\theta}+Q\dot{\theta}^2+R\theta_a+S=F+E\lambda \qquad (3.9)$$

ここで，

$$E=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial f_1}{\partial\theta_1} & \dfrac{\partial f_1}{\partial\theta_3} & \dfrac{\partial f_1}{\partial L_{r2}} & \dfrac{\partial f_1}{\partial L_{12}} & \dfrac{\partial f_1}{\partial x_h} & \dfrac{\partial f_1}{\partial y_h}\\[2mm] \dfrac{\partial f_2}{\partial\theta_1} & \dfrac{\partial f_2}{\partial\theta_3} & \dfrac{\partial f_2}{\partial L_{r2}} & \dfrac{\partial f_2}{\partial L_{12}} & \dfrac{\partial f_2}{\partial x_h} & \dfrac{\partial f_2}{\partial y_h}\end{bmatrix}^T$$

$\lambda=(\lambda_1,\lambda_2)^T$

上式より λ_1,λ_2 および x_h, y_h を消去すれば次式の運動方程式が得られる．

$$P_c\ddot{\theta}_c+Q_c\dot{\theta}^2+R_c\theta_a+S_c=F_c \qquad (3.10)$$

ここで，　$\ddot{\theta}_c=(\ddot{\theta}_1,\ddot{\theta}_3,\ddot{L}_{r2},\ddot{L}_{12})^T$

$P_c=(p_{ij}')\in R^{4\times4}, Q_c=(q_{ij}')\in R^{4\times2}, R_c=(r_{ij}')\in R^{4\times3}$

$S_c=(s_i')\in R^4, F_c=(f_i')\in R^4$

$p_{11}'=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5)(L_{r1}+L_{r2})^2+(m_1L_{r2}^2+m_2L_{r2}^2+I_1+I_2)$
$\quad -2(m_1L_{r2}+m_2L_{r3})(L_{r1}+L_{r2})+(1/2)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})$
$\quad \cos\theta_1+(1/2)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\cos(\theta_1-\theta_2)$
$\quad +(1/4)(m_3L_m^2+I_3)$

$p_{12}'=-(m_4L_{13}+m_5L_{12})(L_{r1}+L_{r2})\cos(\theta_1-\theta_3)$
$\quad +(1/2)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\cos(\theta_1-\theta_2)+(1/4)(m_3L_m^2+I_3)$

$p_{13}'=(1/2)m_3L_m\sin(\theta_1-\theta_2)$

$p_{14}'=m_5(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_3)$

$p_{21}'=-(m_4L_{13}+m_5L_{12})(L_{r1}+L_{r2})\cos(\theta_1-\theta_3)$
$\quad +(1/4)(m_3L_m^2+I_3)$

$p_{22}'=m_4L_{13}^2+m_5L_{12}^2+I_4+I_5+(1/4)(m_3L_m^2+I_3)$

$p_{23}'=-(m_4L_{13}+m_5L_{12})\sin(\theta_1-\theta_3)$
$\quad +(1/2)m_3L_m\sin(\theta_1-\theta_2)$

$p_{31}'=(1/2)m_3L_m\sin(\theta_1-\theta_2)$

$p_{32}'=-(m_3L_{13}+m_5L_{12})\sin(\theta_1-\theta_3)$
$\quad +(1/2)m_3L_m\sin(\theta_1-\theta_2)$

$p_{33}'=m_2+m_3+m_4+m_5$

$p_{34}'=-m_5\cos(\theta_1-\theta_3)$

$p_{41}'=m_5(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_3)$

$p_{43}'=-m_5\cos(\theta_1-\theta_3)$

$p_{44}'=m_5$

$q_{11}'=(1/4)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_2)$
$\quad -(1/2)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_2)$

$q_{12}'=-(m_4L_{13}+m_5L_{12})(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_3)$
$\quad+(1/4)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_2)$
$q_{21}'=(m_4L_{13}+m_5L_{12})(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_3)$
$\quad-(1/2)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_2)$
$q_{31}'=m_2L_{r3}-(m_2+m_3+m_4+m_5)(L_{r2}+L_{11})$
$\quad-(1/4)m_3L_m\cos(\theta_1-\theta_2)$
$q_{32}'=(m_4L_{13}+m_5L_{12})\cos(\theta_1-\theta_3)$
$\quad-(1/4)m_3L_m\cos(\theta_1-\theta_2)$
$q_{41}'=m_5(L_{r1}+L_{r2})\cos(\theta_1-\theta_3)$
$q_{42}'=-m_5L_{12}$
$r_{11}'=(1/2)m_3L_m(L_{r1}+L_{r2})\sin(\theta_1-\theta_2)$
$r_{12}'=2\{(m_2+m_3+m_4+m_5)(L_{r1}+L_{r2})-m_2L_{r3}\}$
$\quad+m_3L_m\cos(\theta_1-\theta_2)$
$r_{13}'=-2m(L_{r1}+L_{r2})\cos(\theta_1-\theta_3)$
$r_{22}'=-2(m_4L_{13}+m_5L_{12})\cos(\theta_1-\theta_3)+m_3L_m\cos(\theta_1-\theta_2)$
$r_{23}'=2m_5L_{12}$
$r_{31}'=-(1/2)m_3L_m\cos(\theta_1-\theta_2)$
$r_{33}'=-2m_5\sin(\theta_1-\theta_3)$
$r_{42}'=2m_5\sin(\theta_1-\theta_3)$
$s_1'=\{-(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5)g(L_{r1}+L_{r2})+m_2L_{r3}g+m_1L_{r2}g\}\cdot$
$\quad\sin\theta_1-(1/2)m_3L_mg\sin\theta_2$
$s_2'=(m_4L_{13}+m_5L_{12})g\sin\theta_3-(1/2)m_3L_mg\sin\theta_2$
$s_3'=(m_2+m_3+m_4+m_5)g\cos\theta_1$
$s_4'=-m_5g\cos\theta_3$
$f_1'=M/2$
$f_2'=-M/2$
$f_3'=F_r$
$f_4'=F_l$
other terms=0

3．2 線形近似モデルによる解析

(3.10)式において，$\theta_C=(\theta_1,\theta_3,L_{r2},L_{12})$ とおき，$\theta_C=(0,0,0.465,0.465)$，$\dot{\theta}_C=0$ の近傍において線形化し，各諸元を代入すれば次の微分方程式が得られる．

$$A\ddot{\theta}_c+B\theta_c=F \qquad (3.11)$$

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0\\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0\\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34}\\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44}\end{bmatrix}\quad B=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0\\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$F=(f_1\ f_2\ f_3\ f_4)^T$

$a_{11}=3.38$,$a_{33}=5.61$,$b_{11}=-43.8$
$a_{12}=-0.221$,$a_{34}=-0.805$,$b_{12}=-.360$
$a_{21}=0.226$,$a_{43}=-0.805$,$b_{21}=-.360$
$a_{22}=0.231$,$a_{44}=0.805$,$b_{22}=3.31$
$f_1=M/2$
$f_2=-M/2$
$f_3=F_r-(m_2+m_3+m_4+m_5)g$
$f_4=F_l+m_5g$

上式より明らかなように$\theta_1=\theta_3=0$の近傍においては，系は倒立振子と振子が結合した次式で記述される二重振子系と，脚の伸縮に関する系の２つの系に分離される．

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}\\ b_{21} & b_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta_1\\ \theta_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} M/2\\ -M/2\end{bmatrix} \qquad (3.12)$$

(3.12)式は $x=(x_1,x_2,x_3,x_4)=(\theta_1,\dot{\theta}_1,\theta_3,\dot{\theta}_3)$とおき状態変数表示をすれば，次式となる．

$$\dot{x}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0\\ k_1 & 0 & -k_2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ k_3 & 0 & -k_4 & 0\end{bmatrix}x+\begin{bmatrix}0\\ u_1^*\\ 0\\ u_2^*\end{bmatrix} \qquad (3.13)$$

$k_1=14.0$,$k_2=0.89$,$k_3=15.2$,$k_4=15.2$
$u_1^*=0.007M$,$u_2^*=-2.1M$

$k_2/k_1=0.064\ll1$であるので，上式はさらに，

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ k_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ u_1^*\end{bmatrix} \qquad (3.14)$$

なる倒立振子系のサブシステムと，

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -k_4 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_3\\ x_4\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & 0\\ k_3 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ u_2^*\end{bmatrix} \qquad (3.15)$$

なる振子系のサブシステムとに分離される．また倒立振子系(3.14)式において，u_1^*は微小となるので股トルクMは系に対してほとんど影響することなく，系は初期状態のみで定まる運動となる．これは，腰部質量に対して脚部の質量が微小であるため，脚の運動は腰部の運動にほとんど影響を与えないという MW-2 の構造によるものである．

(3.14)式の状態方程式の相平面軌跡を Fig.3.2 に示す．Trajectory A は静止状態から歩行開始するときの軌道であり，両脚支持相において後脚を徐々に伸ばし，$x_1=0$,x_2 微小の状態において片脚支持に切換えた場合である．本論文における歩行制御アルゴリズムはこの軌道を採用する．Trajectory B は定常連続歩行の場合の軌道である．実線は支持脚変換が瞬時になされ，かつ遊脚接地時にエネルギ損失が全くないと仮定した場合の軌道である．破線は遊脚接地時のエネルギ損失を考えた場合であり，定常歩行を続けるためには両脚支持相において後脚を蹴る等の方法により損失エネルギを補う必要がある．歩行速度はこの蹴りの量によって制御できる．

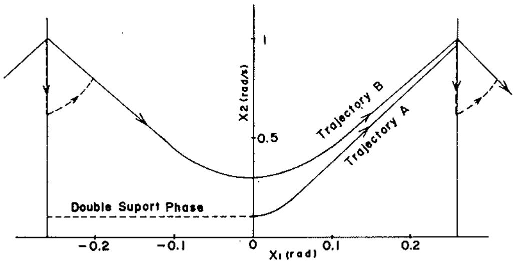

Fig.3.2　Phase plane trajectory

4．歩行制御システム

MW-2 の歩行制御系は Fig.4.1 に示すような階層構造となっている．制御系は大きく３つの階層に分けられている．第一の階層は，歩行速度，歩幅，始動・停止等の歩容の決定に携わる．本研究においては，この階層は人間が担当する．第２の階層は，第１の階層により指定された歩容を満足させるための各アクチュエータに対する設定入力（目標値）を決定する．最後の第３の階層は，第２の階層によって決定された目標値に追従するサーボ系である．

```
Level 1  Decision of the gait  ←──────┐
                 (step length,speed,etc.)  │
              ↓                            │
Level 2  Generation of trajectory  ←──────┤
              ↓                            │
Level 3  Software servo  ←────────────────┤
              ↓                            │
         Posture sensor  ──────────────────┘
```

Fig.4.1　Hierarchy control system

二足歩行ロボットのように多入力多出力であり，また多数のアクチュエータの高度な協調動作が必要となる制御系においては，上述のような階層制御系を構成することは有効なことである．さらに，第３の階層においてはソフトウェア・サーボを構成するので各アクチュエータに対して最適なサンプリング周期を選び，またコンピュータの計算負荷を軽減するために各アクチュエータに各々プロセッサを配置するmulti-CPU システムが最適である．しかし，本研究においてはシステムの制約上１つのCPU で処理することとし，CPU の利用効率を上げるためmulti-task 処理を行うこととした．各task の機能を次に示す．

task 1 サンプリング周期管理
task 2 フィードバック・コントロール・　…階層３
task 3 軌道の生成　　　　　　　………階層２
task 4 マン・マシン・インターフェース…階層１

なお，コンピュータ（Data General社製　Eclipse s/20）の計算能力により第３の階層のソフトウェア・サーボのサンプリング周期は20(ms)とした．

5．歩行方法

5．1　歩行方法

歩行方法の概略は，両脚支持状態において前脚の長さは一定とし，後脚を徐々に伸ばし重心を前方に移動させ，後脚が床を離れた瞬間から後脚（遊脚）を定められた角度だけ前方に振出し，遊脚が接地した段階で一歩の歩行を完了とするものである．実験においては，股角度，遊脚長への目標値の与え方に対して以下に述べる３つのパターンを設定した．

パターンＡ

1)　両脚支持において静止した状態．両脚の長さは等しい．
2)　後脚を一定速度でゆっくりと伸ばし，重心を徐々に前方に移動させる．
3)　後脚が床を離れると同時に後脚（遊脚）を設定値まで縮める．股角度は固定．
4)　遊脚長が設定値に達した後，遊脚を前方に振り出す．
5)　股角度が設定値に達したならば遊脚を初期状態まで伸ばす．１歩の歩行完了．

パターンＢ

パターンＡにおける3)と4)を同時に実行する．すなわち後脚が床から離れると同時に後脚を縮め，同時に前方へ振出す．股角度の設定値は２段階とし，遊脚長さが設定値（交換可能な長さ）に達するまでは０°，その後は１歩分の角度である．

パターンＣ

パターンＢにおける股角度の設定値を次式で与える．その他はパターンＢと同様である．

［股角度の設定値］＝［支持脚の接地角］×４－［１歩分の角度］

支持脚の接地角は片脚支持相に移行する瞬間において約０°であるので，股角度の設定値は１歩分の角度をθ_Gとすれば，$-\theta_G$からθ_Gへと連続的に変化する．

５．２　シミュレーション結果

片脚支持相においては動作は準静的に行われると仮定し，後脚の長さに対する股角度，重心を計算する．重心が前脚の接地点を越えた時点より片脚支持相に移行する．片脚支持相においては運動方程式に従い，解を Runge-Kutta-gill 法により解き，時間に対する歩行形状を得る．シミュレーションは遊脚が接地した時点で終了する．シミュレーション結果はパターンＡ，Ｂ，Ｃ共大きな差は見られないので，パターンＢのものをFig.5.1 に示す．遊脚の伸縮速度は十分である．股角度の即応性は十分とは言えないが，ほぼ満足できる．

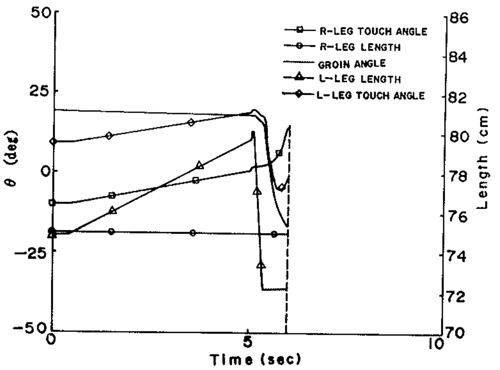

Fig.5.1 Simulation result for pattern B

６．実験結果

歩行パターンＡ，Ｂ，Ｃ，左脚支持の場合の各応答をFig.6.1,6.2,6.3 に示す．

パターンＡは，３つのアクチュエータを同時に操作することはないので，脚交換時に左右の脚が衝突することはないが脚の交換に最も時間がかかり，両脚支持相から片脚支持相に移行する時点の状態により，遊脚の振出しが間に合わなくなり前方へ転倒の危険性が生じる．

パターンＢは，遊脚の縮小と振出しを同時に行うため，脚の交換に要する時間は最低であり，歩行の再現性は最も高い．

パターンＣは，股関節サーボ系に対する設定入力がランプ状となり最も動きが滑らかになることが期待できるが，実験結果では歩幅が大きくなることが多かった．

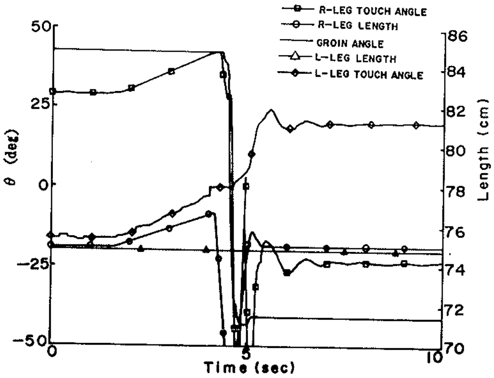

Fig.6.1　Experimental result for pattern A

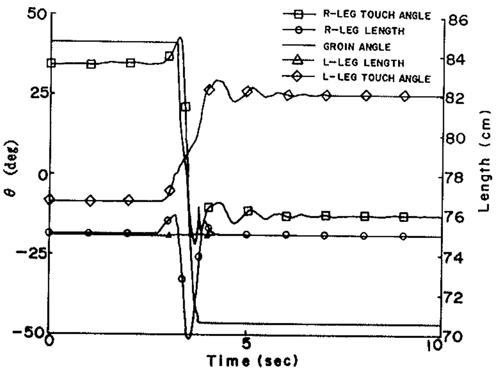

Fig.6.2　Experimental result for pattern B

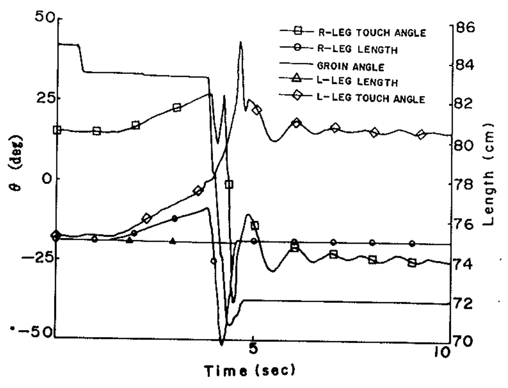

Fig.6.3　Experimental result for pattern C

各パターン共，始動時の姿勢，特に歩幅がある範囲に入っていれば，１歩分に関してはほぼ完全に再現性が保証でき，その歩幅は約10～25(cm)であった．１歩後の歩幅がこの範囲内にあれば，連続歩行が可能である．パターンBにおいては３～４歩の連続歩行が実現できた．それ以上は配線ケーブルおよび滑り防止の床マットの大きさの制約により不可能である．

７．むすび

モータ等の重量物を上部にまとめ，脚部の質量を極力小さくした試作２号機により，断続的ながら３歩以上の歩行が実現でき，また実験の再現性も十分であった．今回の歩行方法は連続歩行における第１歩目のものと言う事ができ，１歩の歩行の後，接地の衝撃による振動が減衰するのを待ってから次の歩行に移っている．歩行実験中，片脚支持相に移る瞬間の初期速度が過大な場合，または遊脚接地時の歩幅が過小な場合，時折，前方へ倒れそうになるという現象が見られた．このことから，初期速度を増大させ，それに応じて遊脚の振出し速度・振出し角度を制御すれば，真の意味での連続歩行も可能と思われる．ただ足首トルクの利用できない竹馬形歩行においては，支持脚長により多少の制御は可能であるものの，片脚支持相における運動はほとんどその初期条件のみにより決定されるため，支持脚変換時においてより精密な制御が要求される．

今後は，姿勢を感知するための平衡感覚および視覚センサを備えた二足歩行ロボットおよび連続動歩行機械の開発が課題である．

最後に，製作に当り御援助いただいた本学実習工場の方々，並びに協力された卒研生の児玉尚昭（(現)興和㈱），南都弘之（(現)三田工業㈱）の両君に感謝の意を表する．

[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) バイオメカニズム学会編，バイオメカニズム1～3，東大出版会(1972～1975)

3) H.Hemami and R.L.Farnsworth, Postural and Gait Stability of a Planar Fivelink Biped by Simulation, IEEE Trans. On Automatic Control, AC-22-3, 452/458(1977)

4) 宮崎・有本，二足歩行のダイナミックスの制御理論的考察，計測自動制御学会論文集，14-4,428/433 (1978)

5) C.L.Golliday Jr. and H.Hemami, An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls, IEEE Trans. On Automatic Control, AC-22-6,963/972(1977)

6) 佐々木，伸縮脚式二足歩行ロボットのシミュレーションと歩行実験，鳥取大学大学院工学研究科　修士論文(1984)