

離散時間モデルを用いた歩行周期制御 に基づく4足ロボットのペース歩行

佐野 明 人* 古 莊 純 次** 尾関修一郎***

A Pace Gait of Quadruped Robot Based on The Control of Walking Cycle Using A Discrete-time Model

Akihito SANO Junji FURUSHO Shuichiro OZEKI

A pace gait considering in this study is the walking in which lateral legs form pairs and the members of a pair strike the floor in unison and they leave the floor in unison. In order to realize a stable pace gait, it is very important to control actively a walking cycle. Namely, the proper control of the walking cycle ensures the cooperation of the sagittal motion and the lateral motion. In this study, a control method of the walking cycle based on the motion control in the lateral plane is proposed. A discrete-time model is suitable for the analysis of the walking system in case of adjusting the walking cycle. By using the proposed discrete-time model, several control method of the walking cycle are discussed. At first, a conventional proportional plus integral control is examined by using a maximum absolute value of the closed loop eigenvalues as a performance index. Secondly, an optimal servo controller and a dead beat controller are discussed. For the sagittal motion control, a trajectory of the leg is designed under the consideration of the algorithm of the lateral motion control. The COLT-3 achieved a smooth pace gait at a speed of 0.25 m/s.

Key Words : Pace Gait, Walking Cycle, Discrete-time Model, Optimal Servo Controller, Dead Beat Controller

1. はじめに

近年、脚式移動に対する期待が高まり、多くのロボット工学者たちの興味の対象となっている^{1)~14)}。いち早く検討された歩行は、常に静的に安定を保持した静歩行である。最近の静歩行の研究は、高度な環境認識に基づく脚軌道パターンの生成あるいは障害物の回避問題にまで及んでいる^{3),4)}。一方、動歩行の研究に関しては、最近始まったばかりである^{5)~14)}。動歩行では、静的には不安定な時期を持つので、歩行システムを動的に安定化させる必要があり、その制御は難しいものとなる。したがっ

て、外部環境を平坦路に限定した上で、その歩行制御方式の開発に力が注がれている。

4足歩行システムの動歩行に関しては、次に示す基本対称歩容が研究の中心となっている。トロット歩行は、対角線上の一对の脚を支持脚とし、残りの脚を遊脚とする歩行である。この動歩行は比較的高速での移動が可能であり、最も多くの研究がなされている^{5)~11)}。バウンス歩行は、前後の同じ側の脚を協調させて動く歩行であり、高速な歩行が可能である¹¹⁾。

本研究で検討するペース歩行は、左右の同じ側の脚を支持脚とし、残りの側の脚を遊脚とする歩行であり、トロット歩行・バウンス歩行と並ぶ基本対称歩容の一つである。動物の歩行研究において指摘されているように、らくだなど多くの動物は、中高速での移動においてペー

原稿受付 1991年5月30日

* 岐阜大学工学部機械工学科, ** 電気通信大学機械制御工学科, *** 川崎重工業(株)技術開発本部

ス歩行をごく自然に行っている^{15),16)}。一方、歩行ロボットの開発においては、トロット歩行と比べ制御が難しいという点から、今までのところ十分な研究がなされているとは言えず、木村ら¹⁰⁾および Raibert ら¹¹⁾による研究がある程度である。木村らは、まず力学的解析を十分に行うことが重要であると考え、安定性、移動速度および移動エネルギーの観点から望ましい動歩行パターンについて分析している。さらに、歩行ロボットを用いた歩行実験も行っているが、その具体的な制御方式については、それほど詳しく検討されていない。Raibert らの研究では、一瞬4脚全てが空中へ飛び上がる相を持つホッピング型のペース歩行を実現している。実験に用いられたロボットの脚は、空気ばねを用いた特殊な構造となっている。

安定なペース歩行を実現するためには、歩行周期を積極的に制御することが非常に重要であると考えられる。すなわち、歩行周期が制御されるとき、Sagittal 平面（進行方向を含む床面に垂直な平面）内の運動と Lateral 平面（進行方向に垂直な平面）内の運動の同期が確実となり、歩行は滑らかなものとなる。本研究では、Lateral 平面内の運動制御と Sagittal 平面内の運動制御を分離した一つの歩行制御方式を提案し、Lateral 平面内の運動制御に基づいて、ペース歩行における周期制御を行う。歩行周期の調整を目的とした場合、離散時間モデルによって歩行システムを解析する方が適している。したがって、本論文では、線形離散時間モデルを導き、歩行周期がどのような構造をした離散時間モデルの出力となっているかをまず検討し、このモデルを用いて、いくつかの歩行周期制御方式について議論する。

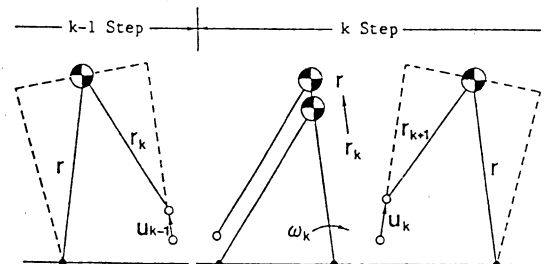
第2章では、Lateral 平面内の運動を記述する差分方程式を誘導し、歩行周期に関する式を求める。第3章では、2章で求めた離散時間モデルを用いて、いくつかの歩行周期制御方式について検討する。まず、最も基本的な比例・積分制御の適用を考え、つぎに、状態フィード

バック制御の適用を行う。第4章では、4足歩行ロボット COLT-3 の機構および搭載されているセンサについて述べる。さらに、3章で提案した周期制御方式に基づいて、足踏み制御実験を行いその有効性を確認する。第5章では、前進運動も考えた脚軌道計画を行う。すなわち、歩行周期制御アルゴリズムを考慮した Sagittal 平面内の脚軌道計画を行い、実際に COLT-3 を用いてペース歩行を実現する。

2. 離散時間モデル

2.1 ペース歩行

ペース歩行では、Fig. 1 に示すように Sagittal 平面内の運動と Lateral 平面内の運動を分離して取り扱うことが、近似的に可能である。前後の同じ側の脚が着地しているペース歩行では、Sagittal 平面内の運動は、ピッチ軸まわりに回転可能な関節を制御することによって比較的自由に制御できる。一方、Lateral 平面内の運動は、一つの倒立振子モデルによって近似的に表すことができる。この倒立振子モデルの運動は、各関節トルクによって直接制御することは不可能である。したがって、歩行周期は、Lateral 平面内の倒立振子運動によって支配されることになる。歩行周期が正確に制御できれば、



(a) Motion in the lateral plane

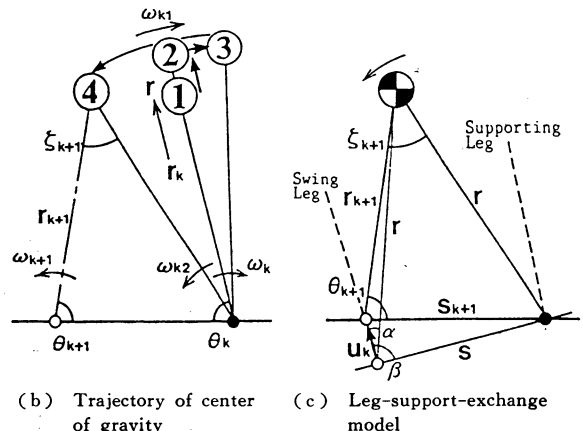


Fig. 2 Inverted pendulum model

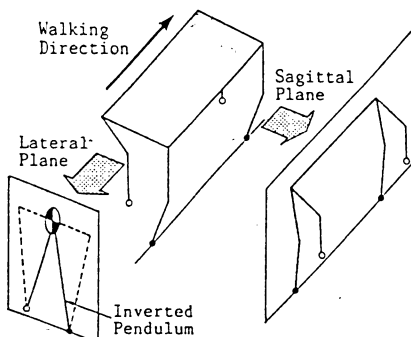


Fig. 1 Pace gait

Lateral 平面内の運動と Sagittal 平面内の運動の同期が容易になる。すなわち、歩行周期の適切な調節が、ベース歩行を実現する上で重要な要素となる。

2.2 倒立振り子モデルと状態方程式

本節では、Lateral 平面内の足踏み運動を離散時間モデルを用いて表す。本研究で検討するベース歩行には、次のような仮定を設ける。

- (1) 前後の脚は支持脚時にも遊脚時にも同期して動く。
- (2) 遊脚が着地したと同時に支持脚は床面から離れる。

2.2.1 角運動量追加法 歩行システムが持つ支持点まわりの角運動量は、支持点を切り換えるたびに失われる。したがって、何らかの方法で角運動量を補わなければ、足踏みの継続が不可能となる。角運動量を追加する方法として、遊脚膝を支持脚膝よりも大きく曲げて着地することが考えられる¹²⁾。これは、脚を縮めて着地することによって、正の重力モーメント（回転方向と同じ方向のモーメントを正とする）を受ける時間を負の重力モーメントを受ける時間より長くすることで、間接的にシステムが持つ角運動量を増加させる効果を持つ。同様の効果が期待できる方法として、遊脚を内転させ着地点を内側に移動させることも考えられる。本研究では、前者の遊脚を縮めて着地する方式を採用した場合について検討する。

次に、Fig. 2を用いてもう少し具体的に採用した角運動量の追加方式について述べる。これらの図は、足踏みによって起こる Lateral 平面内のロボットの運動を倒立振り子を用いて表したものである。したがって、各脚長は脚を Lateral 平面に射影した長さを示している。Fig. 2(a) は、 $k-1$ ステップ目および k ステップ目を示したものである。まず、 $k-1$ ステップ目は左脚支持状態で遊脚（右脚）を u_{k-1} だけ縮めて着地する。次に、 k ステップ目に入り、支持脚切換え直後に、縮めた脚を定常脚長 r まで伸ばす ($r_{k-1} \rightarrow r$)。 k ステップ目においても、遊脚（左脚）を u_k だけ縮め、再び支持脚切換えを行う。Fig. 2(b) は、 k ステップ目における倒立振り子モデルの重心位置の変化を示している。図中に矢印で示すように重心位置は①、②、③、④の順に変化する。図からわかるように、負の重力モーメントを受ける時期（②→③）より、正の重力モーメントを受ける時期（③→④）の方が長くなり、角運動量の追加が行われる。

2.2.2 状態空間表現 倒立振り子運動の離散時間モデルを次に求める。各相ごとについて順に関係式を求めることにする。軌道①→②で脚長が r_k から r （定常脚長）に戻される。ただし、この動作が瞬時に行われても、あ

るいは緩やかに行われても倒立振り子の全体としての挙動にはあまり影響しないので、この動作が瞬時に行われたとする。このとき、支持脚を伸ばす前の角速度 ω_k （支持脚切換え直後の角速度）と伸ばした後の角速度 ω_{k+1} との間には、次式で示す角運動量保存則が成り立つ。

$$\omega_{k+1} = \frac{r_k^2}{r^2} \omega_k \quad (1)$$

位置④で起こる支持脚切り換え時には、次に示す角速度の損失（角運動量損失）が生じる。ただし、 ω_{k+2} は、支持脚切換え直前の角速度である。

$$\omega_{k+1} = \frac{r \cos \zeta_{k+1}}{r_{k+1}} \omega_{k+2} \quad (2)$$

Fig. 2(c) は支持脚交換時をモデル化したものである。図中で、 s_{k+1} はスタンスであり、 θ_{k+1} および ζ_{k+1} はそれぞれ着地角度および開脚角度を示している。変数 r_{k+1} , s_{k+1} , θ_{k+1} , ζ_{k+1} および u_k は次式で表される関係を持つ。

$$\begin{aligned} r_{k+1} &= \sqrt{r^2 + u_k^2 - 2ru_k \cos \alpha} \\ s_{k+1} &= \sqrt{s^2 + u_k^2 - 2su_k \cos \beta} \\ \theta_{k+1} &= \cos^{-1} \left[\frac{s_{k+1}^2 + r_{k+1}^2 - r^2}{2s_{k+1}r_{k+1}} \right] \\ \zeta_{k+1} &= \cos^{-1} \left[\frac{r^2 + r_{k+1}^2 - s_{k+1}^2}{2rr_{k+1}} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

u_k が定常状態 \bar{u} のまわりで微小に変化したときの定常状態 (\bar{r} , \bar{s} , $\bar{\theta}$ および $\bar{\zeta}$) まわりでの r_{k+1} , s_{k+1} , θ_{k+1} および ζ_{k+1} の微小変化 Δr_{k+1} , Δs_{k+1} , $\Delta \theta_{k+1}$ および $\Delta \zeta_{k+1}$ は、それぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta r_{k+1} &= a_1 \Delta u_k, \quad \Delta s_{k+1} = a_2 \Delta u_k \\ \Delta \theta_{k+1} &= a_3 \Delta u_k, \quad \Delta \zeta_{k+1} = a_4 \Delta u_k \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\bar{u} - r \cos \alpha}{\sqrt{r^2 + \bar{u}^2 - 2r\bar{u} \cos \alpha}} \\ a_2 &= \frac{\bar{u} - s \cos \beta}{\sqrt{s^2 + \bar{u}^2 - 2s\bar{u} \cos \beta}} \\ a_3 &= \frac{(\bar{s} \cos \bar{\theta} - \bar{r})a_1 + (\bar{r} \cos \bar{\theta} - \bar{s})a_2}{\bar{s}\bar{r} \sin \bar{\theta}} \\ a_4 &= \frac{(r \cos \bar{\zeta} - \bar{r})a_1 + \bar{s}a_2}{r\bar{r} \sin \bar{\zeta}} \end{aligned}$$

位置②および位置④における倒立振り子モデルの運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーの和は、エネルギー保存則より等しい。そこで、(1) 式および (2) 式を考慮すると次式が成立する。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} m \left[\frac{r_k^2}{r} \omega_k \right]^2 + mgr \sin \theta_k \\ &= \frac{1}{2} m \left[\frac{r_{k+1}}{\cos \zeta_{k+1}} \omega_{k+1} \right]^2 + mgr_{k+1} \sin \theta_{k+1} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 m は質量であり、 g は重力加速度である。また、左辺が位置②におけるエネルギーを示しており、右辺が

位置④におけるエネルギーを示している。(5)式を定常状態まわりで線形化すると、次のような差分方程式を得る。

$$\Delta\omega_{k+1} = b_1\Delta\omega_k + b_2\Delta u_{k-1} + b_3\Delta u_k \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\bar{r}^2 \cos^2 \bar{\zeta}}{r^2} \\ b_2 &= \left[\frac{2r\omega}{r^2} a_1 + \frac{gr \cos \bar{\theta}}{\bar{r}^2 \bar{\omega}} a_3 \right] \cos^2 \bar{\zeta} \\ b_3 &= - \left[\frac{\bar{\omega}}{\bar{r}} + \frac{g \sin \bar{\theta} \cos^2 \bar{\zeta}}{\bar{r}^2 \bar{\omega}} \right] a_1 - \frac{g \cos \bar{\theta} \cos^2 \bar{\zeta}}{\bar{r} \bar{\omega}} a_3 \\ &\quad + \sin 2\bar{\zeta} \left[\frac{g \sin \bar{\theta}}{\bar{r} \bar{\omega}} - \frac{\bar{r}^2 \bar{\omega}}{2r^2} - \frac{gr \sin \bar{\theta}}{r^2 \bar{\omega}} \right] a_4 \end{aligned}$$

状態量として $\Delta\omega_k$ および $\Delta v_k (= \Delta u_{k-1})$ を選ぶと、次のような状態方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_{k+1} \\ \Delta v_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_k \\ \Delta v_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_3 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u_k \quad (7)$$

このように、Lateral 平面内の運動は、 Δu_k を入力とした2次の差分方程式に置き換えられる。

2.3 歩行周期に関する関係式

本節では、 $\Delta\omega_k$, Δv_k および Δu_k により k ステップ目の歩行周期 T_k がどのように変化するかを与える関係式を求める。定常歩行周期を \bar{T} とする。Fig. 3 は、支持脚交換直後に脚を伸ばす動作をした後の運動を、倒立振子によってモデル化したものであり、倒立振子モデルの傾斜角度を $\phi(t)$ とおく。このとき、倒立振子モデルの運動方程式は次のようになる。

$$mr^2\ddot{\phi}(t) - rmg \sin \phi(t) = 0 \quad (8)$$

ただし、初期条件は次のように与えられる。

$$\phi(0) = \theta_k - \frac{\pi}{2}, \quad \dot{\phi}(0) = \omega_{k1} \quad (9)$$

上式を定常軌道 $\bar{\phi}(t)$ まわりで線形化すると、次に示すような線形時変系を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g \cos \bar{\phi}(t)}{r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

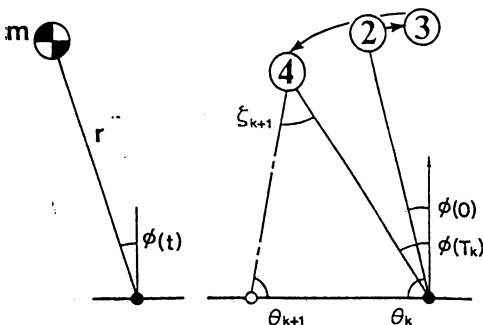


Fig. 3 Inverted pendulum model after adjusting the leg-length of the supporting leg

(10) 式の解を状態遷移行列 $H(t, \tau)$ を用いて、次のように表すことにする。

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi(t) \\ \Delta\dot{\phi}(t) \end{bmatrix} = H(t, 0) \begin{bmatrix} \Delta\phi(0) \\ \Delta\dot{\phi}(0) \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、

$$H(t, \tau) = \begin{bmatrix} h_{11}(t, \tau) & h_{12}(t, \tau) \\ h_{21}(t, \tau) & h_{22}(t, \tau) \end{bmatrix}$$

k ステップ目の初期角速度 ω_k および $k-1$ ステップ目の脚の伸縮量 $v_k (= u_{k-1})$ の変化に起因する時刻 \bar{T} における傾斜角度の変化は次のように与えられる。

$$\Delta\phi(\bar{T}, 0) = c_1\Delta\omega_k + c_2\Delta v_k \quad (12)$$

ここで、

$$c_1 = \frac{h_{12}(\bar{T}, 0)\bar{r}^2}{r^2}$$

$$c_2 = h_{11}(\bar{T}, 0)a_3 + \frac{2h_{12}(\bar{T}, 0)\bar{r}\bar{\omega}a_1}{r^2}$$

着地時刻 $T_k (= \bar{T} + \Delta T_k)$ における傾斜角度 $\phi(T_k)$ は次式で表される。ただし、2次の微小項は無視した。

$$\phi(T_k) = \bar{\phi}(\bar{T}) + \dot{\bar{\phi}}(\bar{T})\Delta T_k + \Delta\phi(\bar{T}, 0) \quad (13)$$

右辺第2項は、歩行周期の微小変化 ΔT_k による影響を

Table 1 Values of parameters

r	0.629 m	a_4	0.560
s	0.380 m	b_1	0.643
α	0.179 rad	b_2	4.878
β	1.658 rad	b_3	10.882
\bar{r}	0.619 m	\bar{T}	0.6045 s
\bar{s}	0.381 m	h_{11}	5.422
\bar{u}	0.010 m	h_{12}	1.368
$\bar{\omega}$	0.927 rad/s	c_1	1.325
$\bar{\theta}$	1.285 rad	c_2	7.452
$\bar{\zeta}$	0.619 rad	$\bar{\phi}$	1.120 rad/s
a_1	-0.938	d_1	-1.183
a_2	0.068	d_2	-6.654
a_3	2.062	d_3	-2.341

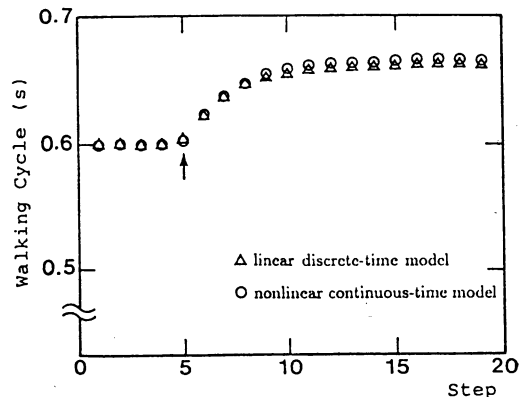


Fig. 4 Variation of walking cycle in case that input Δu_k is 0.001 m

表しており、右辺第3項は、(12)式で示されたように k ステップ目の初期角速度および $k-1$ ステップ目の脚の伸縮量の変化による影響である。また、 $\phi(T_k)$ は Fig. 3 に示したように着地時の形状から次のようにも表現できる。

$$\phi(T_k) = \bar{\theta} + \Delta\theta_{k+1} + \bar{\zeta} + \Delta\zeta_{k+1} - \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

(12)式、(13)式および(14)式を用いて整理すると次式を得る。

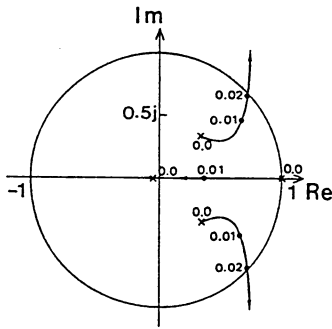
$$\Delta T_k = d_1 \Delta\omega_k + d_2 \Delta v_k + d_3 \Delta u_k \quad (15)$$

ここで、

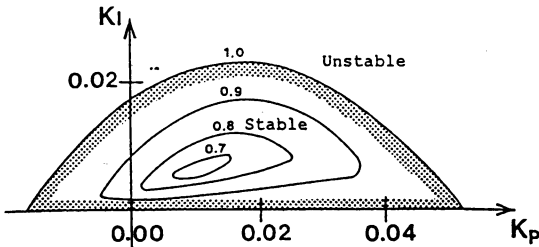
$$d_1 = -\frac{c_1}{\dot{\phi}(\bar{T})}, \quad d_2 = -\frac{c_2}{\dot{\phi}(\bar{T})}, \quad d_3 = -\frac{a_3 + a_4}{\dot{\phi}(\bar{T})}$$

(15)式からわかるように、歩行周期の変化 ΔT_k は、 $\Delta\omega_k$ 、 Δv_k および Δu_k の一次関数として表される。

以上のようにして求めた線形離散時間モデル（状態方程式である(7)式および歩行周期に関する関係式である(15)式）から得られたシミュレーション結果を Fig. 4 に△印で示す。ただし、各係数は Table 1 に与えたものを用いた。入力 $\Delta u_k = 0.001\text{m}$ の場合における歩行周期の変化を示す。横軸にはステップ数がとっており、縦軸には歩行周期がとっている。○印は非線形連続時間モデル((1)式、(2)式、(8)式および(9)式)



(a) Loci of eigenvalues with respect to K_I



(b) Stable region and contour lines of $\max|\lambda_i|$ in K_p - K_I

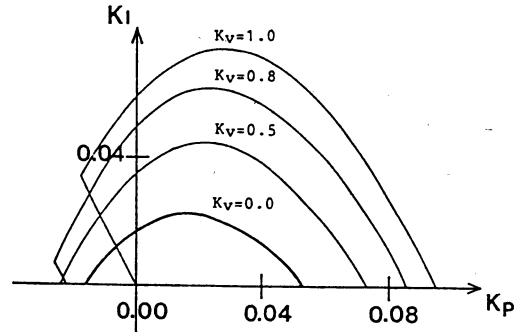
Fig. 5 Loci of eigenvalues and parameter plane ($K_p=0.010$, $K_I=0.006$)

から得られた結果を示している。両者は、図に示す程度の周期変化に対してはほぼ一致している。

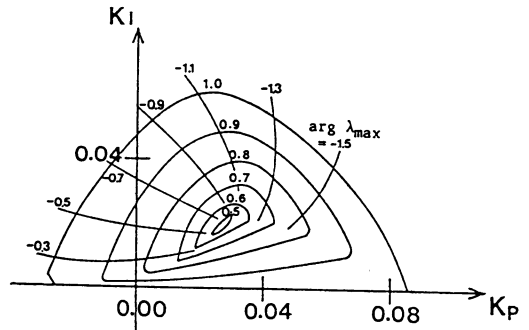
3. 歩行周期制御

3.1 比例・積分制御

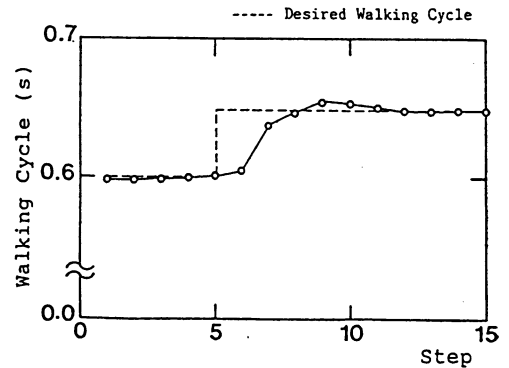
本節では、最も基本的な制御方式の一つである比例・積分制御の歩行周期制御への適用を考える。 k ステップ目の脚の伸縮量 u_k を決定する際には、まだ、 k ステップ目の着地が起きていないため周期 T_k は未定であり、前回の周期 T_{k-1} しか知ることができない。したがって、



(a) Variation of stable region with respect to K_v



(b) Contour lines $\max|\lambda_i|$ and argument of λ_{\max}



(c) Nonlinear simulation

Fig. 6 Parameter plane and simulation result ($K_v=0.775$, $K_p=0.022$, $K_I=0.014$)

出力としては T_{k-1} を用いることとなり、観測の時間遅れによりシステムの次数がさらに上がる。比例・積分制御は次のように表される。

$$h_k = h_{k-1} + (\Delta T_{rk} - \Delta T_{r,k-1}) \quad (16)$$

$$\Delta u_k = K_p(\Delta T_{rk} - \Delta T_{r,k-1}) + K_I h_k \quad (17)$$

ここで、 K_p および K_I はそれぞれ比例ゲインおよび積分ゲインを示しており、 ΔT_{rk} は周期目標値の変化量を表す。Fig. 5 (a) は、 K_p を 0.01 に固定し K_I を変化させた場合の固有値軌跡である。Fig. 5 (b) は、 $K_p - K_I$ 平面上における安定領域を示している。ハッチングで示された部分が安定領域であり、そのまわりが不安定領域である。また、図中には各 K_p, K_I に対する閉ループ固有値の絶対値の最大値 $\max|\lambda_i|$ を求め、 $K_p - K_I$ 平面上にその等高線を描いた。 $\max|\lambda_i|$ は、 $K_p = 0.010$, $K_I = 0.006$ でその最小値をとり、0.66 となる。すなわち、収束はそれほど速いものではない。

離散時間モデルの状態の一つである v_k は、前回の入力 u_{k-1} であるので測定する必要がない。一方、 ω_k は支持脚切換え直後の角速度であり、何らかの方法を用いて測定する必要があり、適切なセンサがない場合は測定困難である。そこで、実現の容易な Δv_k のフィードバックについて検討する。 Δv_k もフィードバックするとき、(17) 式は次のように書き換えられる。

$$\Delta u_k = -K_v \Delta v_k + K_p(\Delta T_{rk} - \Delta T_{r,k-1}) + K_I h_k \quad (18)$$

Fig. 6 (a) に Δv_k に対するフィードバック係数 K_v を変化させた場合の安定領域の変化を示す。 Δv_k のフィードバックにより安定領域が拡大しているのがわかる。また、 $K_v = 0.775$, $K_p = 0.022$, $K_I = 0.014$ のときに、 $\max|\lambda_i|$ は、0.477 となり、その最小値をとる。Fig. 6 (b) は、 $K_v = 0.775$ と固定した場合の $K_p - K_I$ 平面上における $\max|\lambda_i|$ の等高線を示している。また、絶対値が最大の固有値 λ_{\max} の偏角を $K_p - K_I$ 平面上にその等高線として描いたものである。Fig. 5 (b) および Fig. 6 (b) の比較からわかるように、応答性はかなり改善されている。次に、非線形シミュレーションを行った。フィードバック係数として、 $K_v = 0.775$, $K_p = 0.022$, $K_I = 0.014$ を用いた。周期目標値 T_r を 0.6 s から 0.65 s にステップ状に変化させた場合の応答を Fig. 6 (c) に示す。ほぼ 7 ステップ目で目標値に整定している。

3.2 状態フィードバック制御

(7) 式および (15) 式を次のように表すことにする。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\Delta u_k \quad (19)$$

$$\Delta T_r = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\Delta u_k \quad (20)$$

ここで、

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta v_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [d_1 \ d_2], \quad \mathbf{D} = d_3$$

本節では、(19) 式および (20) 式を用いて、積分型最適制御器および有限整定制御器の設計を行う。

3.2.1 積分型最適制御 ステップ状の目標値変化に対して定常偏差を零とするため、積分型最適制御を用いることにする。対象としているシステムでは、定常偏差を零にする定常操作量が零とはならない。そこで、通常の評価関数を採用すると、無限時間までの評価をとった場合評価値が発散するので、操作量の変化 w_k を代わりに用いた次の評価関数を考えることにする。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (q e_k^2 + r w_k^2) \quad (21)$$

ここで、

$$e_k = \Delta T_{rk} - \Delta T_r : \text{誤差信号} \quad (22)$$

$$w_k = \Delta u_{k+1} - \Delta u_k \quad (23)$$

ただし、 q および r は重みを表すスカラーである。

(19) 式および (20) 式で表されるシステムを、(21) 式の評価を最小にするように制御する制御入力 u_k を求める。最初に、以下に示すような拡張システムを導入する。

$\Delta \mathbf{x}_k$ を次のように定義する。

$$\Delta \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k \quad (24)$$

このとき、(19) 式より次の差分方程式を得る。

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{B} w_k \quad (25)$$

また、誤差信号に対しては次式が成り立つ。

$$e_{k+1} - e_k = \Delta T_{rk+1} - \Delta T_{rk+1} - \Delta T_{rk} + \Delta T_r \quad (26)$$

ただし、ステップ入力を考えているため、 $\Delta T_{rk+1} = \Delta T_{rk}$ となるので、(20) 式、(23) 式および (26) 式より次式が導ける。

$$e_{k+1} = e_k - \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_k - \mathbf{D} w_k \quad (27)$$

拡張システムの状態変数を次のようにおく。

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_k \\ e_k \end{bmatrix} \quad (28)$$

このとき、求める拡張システムは次のような形で与えられる。

$$\mathbf{z}_{k+1} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{z}_k + \bar{\mathbf{B}} w_k \quad (29)$$

$$e_k = \bar{\mathbf{C}} \mathbf{z}_k \quad (30)$$

ここで、

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ -\mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}} = [0 \ \mathbf{I}]$$

(29) 式および (30) 式で表される拡張システムにおいて、(21) 式を最小化するフィードバック制御則は次のように与えられる。

$$w_k = -\mathbf{K} \mathbf{z}_k = -[\mathbf{K}_p : \mathbf{K}_I] \mathbf{z}_k$$

$$= -K_p \Delta x_k - K_I e_k \quad (31)$$

ただし、フィードバック係数行列 $K=[K_p, K_I]$ は次のように与えられる。

$$K = -(\bar{B}^T P \bar{B} + r)^{-1} \bar{B}^T P \bar{A} \quad (32)$$

ここで、 P は次に示す代数リカッティ方程式の正値解である。

$$P = \bar{A}^T P \bar{A} - \bar{A}^T P \bar{B} (\bar{B}^T P \bar{B} + r)^{-1} \bar{B}^T P \bar{A} + \bar{C}^T q \bar{C} \quad (33)$$

次に、実際の操作量 Δu_k について考える。 w_k が (31) 式のように与えられるためには、 Δu_k は次のようなものであればよい。

$$\Delta u_k = -K_p x_k - K_I \sum_{i=0}^{k-1} e_i \quad (34)$$

すなわち、 Δu_k を (34) 式のようにした場合、 w_k は次のようになる。

$$\begin{aligned} w_k &= \Delta u_{k+1} - \Delta u_k \\ &= -K_p x_{k+1} - K_I \sum_{i=0}^k e_i - \left(-K_p x_k - K_I \sum_{i=0}^{k-1} e_i \right) \\ &= -K_p \Delta x_k - K_I e_k \end{aligned} \quad (35)$$

上式は (31) 式と一致している。

(34) 式は (21) 式の評価を最小化する最適制御を与えており、状態の比例フィードバックおよび周期誤差の積分フィードバックから成っている。Fig. 7 に積分器を含む制御器の構造を示す。(34) 式からわかるように、誤差信号については、 $k-1$ ステップまでの値がわかればこの制御則は実行可能である。すなわち、前回までの歩行周期 T_0, T_1, \dots, T_{k-1} がわかれば実施可能である。

さて、最適制御器を設計する場合、重み関数 q および r の決定が重要となる。ここで、 $r=1$ と固定し q をいろいろ変化させながら、システムの固有値 λ_i を調べてみる。Fig. 8 (a) は、その固有値の変化を示したものである。Fig. 8(b) および(c)は、横軸に q をとり縦軸には、それぞれ最適フィードバック係数および $\max |\lambda_i|$ がとってある。この結果、 $q=5.672$ のとき、 $\max |\lambda_i|$ は 0.106 となり、その最小値をとる。このときの最適フィードバック係数を次に示す。

$$K = [-0.097 \quad -0.612 \quad 0.054] \quad (36)$$

Fig. 8(d) は、非線形シミュレーションによる歩行周

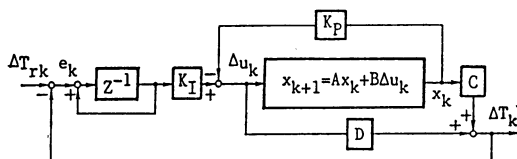
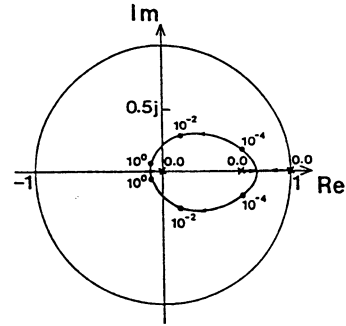
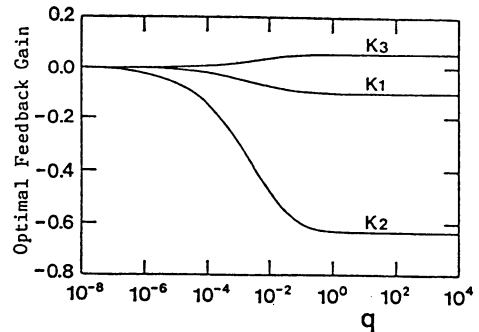


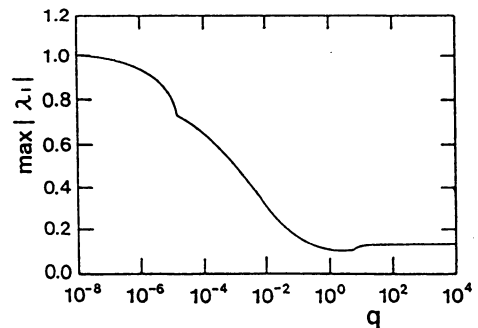
Fig. 7 Structure of controller including integrator



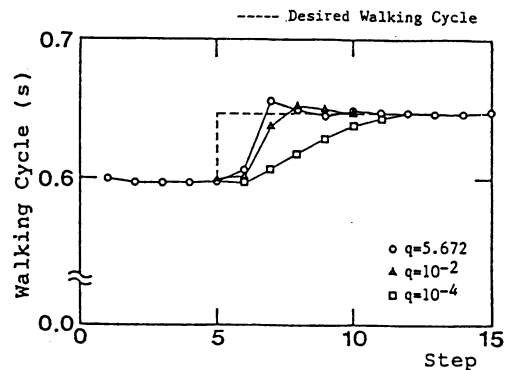
(a) Loci of eigenvalues in case of variation of q



(b) Optimal feedback gain



(c) $\max |\lambda_i|$ in case of the optimal servo controller



(d) Responses of walking cycle

Fig. 8 Optimal servo controller

期のステップ応答を示す。ただし、周期目標値は、0.6s から 0.65 s にステップ状に変化している。図からわかるように、かなり高ゲインになっているために多少オーバーシュートが見られる。また、参考のために q が 10^{-2} および 10^{-4} の場合の結果も示しておく。

3.2.2 有限整定制御 前項では制御器のパラメータの決定に積分型最適制御を用いたが、本項では有限時間整定となるように系を設計する。まず、状態フィードバックを行った場合のシステムの固有値をすべて零に設定するフィードバック係数を求める。このようにフィードバック係数を選ぶとき、 n 次系では n 回以下で整定する。得られたフィードバック係数は次のようなものである。

$$K = [-0.089 \quad -0.568 \quad 0.046] \quad (37)$$

最適制御理論を用いた (36) 式の場合と比較すると、ゲインはわずかに低いものとなっている。

Fig. 9 (a) に、非線形シミュレーションを行った結果を示す。歩行周期の変化幅がこの程度であれば、線形離散時間モデルを用いて設計したフィードバック制御器によっても、ほぼ有限時間整定が得られている。

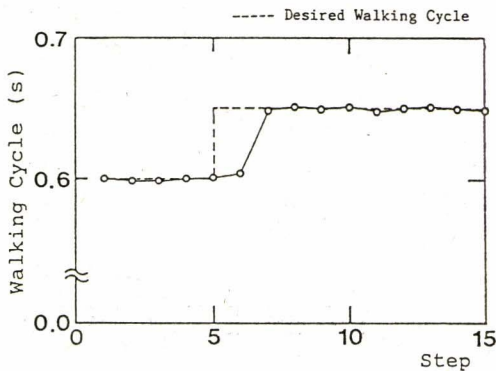
一般的に、有限整定制御はモデル誤差に対して感度が高く、制御結果が非常に悪化する。本研究のシステムで

大きなモデル誤差として考えられるのは、支持脚切換えのモデル誤差である。そこで、支持脚交換時の角運動量損失率が少し変化したとき、応答がどのように変わるかを検討しておく。(2) 式を次のように書き換えることにする。

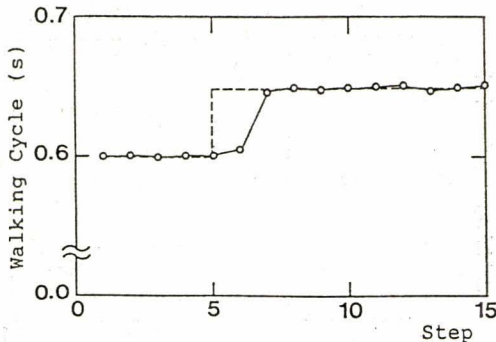
$$\omega_{k+1} = \rho \frac{r \cos \zeta_{k+1}}{r_{k+1}} \omega_{k2} \quad (38)$$

ただし、 ρ は交換係数であり $\rho=1$ とすると (2) 式と一致する。交換係数 ρ によって衝突時の損失を変化させ、係数 ρ に対する感度を調べてみる。非線形シミュレーションは、 $\rho=0.9$ として行う。ただし、 ρ が 1 のときに求めたフィードバック係数を用いる。Fig. 9(b) にシミュレーションの結果を示す。図からわかるように、交換係数が変化しても、有限整定制御がほぼ達成されている。

本章で検討した三つの制御方式の中で、高ゲインではあるが有限整定制御が最も収束が速く、また通常問題になるパラメタ感度もそれほど高くない。そこで、4 章および 5 章で述べる制御実験に対して、有限整定制御を適用する。



(a) Response of walking cycle



(b) Sensitivity to modeling error by changing coefficient ρ

Fig. 9 Dead beat controller

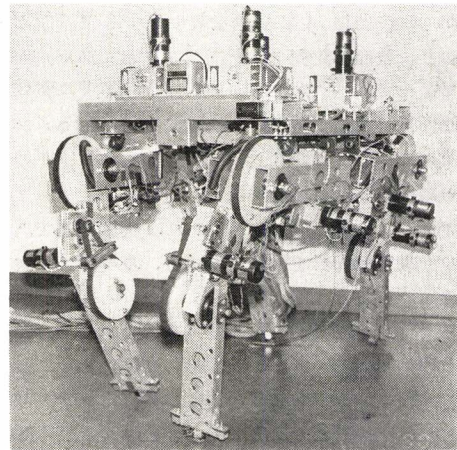


Fig. 10 Quadruped locomotion robot COLT-3

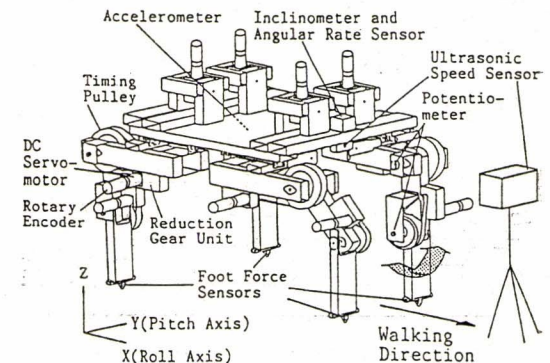


Fig. 11 Actuators and sensors

4. 足踏み制御実験

4.1 4足歩行ロボット COLT-3

4.1.1 機構 4足歩行ロボット (COLT-3) の外観を Fig. 10 に示す。また、駆動系およびセンサ系の概略図を Fig. 11 に示す。総重量 45 kg, 全長 0.94 m, 全高 0.88 m, 全幅 0.58 m, 脚長 0.52 m の馬型ロボットである。各脚につきロール軸まわりに1自由度とピッチ軸まわりに2自由度を持ち、計 12 自由度構成となっている。各関節は、小型軽量の DC サーボモータ (山洋電気 R 406 : 60 W, 0.55 kg), 減速機およびタイミングベルトの組合せを採用し独立に駆動している。減速機の減速比はすべての関節に対して、13.8 とした。さらに、この出力をタイミングベルトを介して減速することにより、腰および膝関節の総合減速比をそれぞれ 110 と 89 に設定している。このように、タイミングベルトを用いた駆動方式には、次のような利点がある。

(1) 駆動部と被駆動部との距離を自由に設定することができる。したがって、重量配分を上方に設定でき、脚の制御性が向上する。動歩行においては、遊脚の制御性が歩行の最高速度を決めてしまう重要な要因となる。

(2) 着地時の衝撃力をベルトがある程度吸収してくれる。

COLT-3 の爪先には、直径約 10 mm のゴムブロックを使用している。そこで、2脚支持状態になった場合の挙動は、ほぼ倒立振り運動と見なすことができる。

4.1.2 センサ ロボットの胴体部には、前進方向の加速度を計測する加速度計 (東京計器 MA 101) およびピッチ軸およびロール軸まわりの角速度と傾斜角を計測する傾斜角・角速度計 (ワトソン社 ADS-C 131) が搭載されている。爪先の構造材である角パイプの上下面には歪ゲージが貼られていて、上下方向の曲げ量を測定し

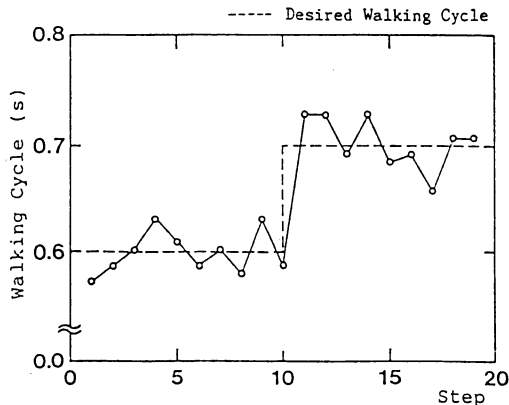


Fig. 12 Experimental result of stepping motion

ている。この歪ゲージによって、爪先から膝関節に向かう方向の力成分が測定でき、床との接触力がある程度分かる。本実験では、これを着地センサとして用いている。本研究では、胴体速度の計測に超音波のドップラ効果を利用した速度センサを製作し使用した。ロボットから放たれた超音波 (40 kHz) は床面に固定された超音波マイク (Fig. 11 参照) により受信され、ドップラ効果による周波数および位相の偏位が計測される。

4.2 足踏み制御実験

本節では有限整定制御を適用した足踏み制御実験を行う。実際の支持脚切換え時には、着地の衝撃による振動も大きいために、正確に状態量 $\Delta\omega_k$ を測定することが困難となる。そこで、支持脚交換後から角速度が零になるまでの時間変化 $\Delta\eta_k$ を新たな観測量とした。 $\Delta\eta_k$ は、次に示すように $\Delta\omega_k$ と Δv_k の一次関数で表される。

$$\Delta\eta_k = f_1\Delta\omega_k + f_2\Delta v_k \quad (39)$$

ここで、

$$f_1 = -\frac{\bar{r}^2 h_{22}(\bar{\eta})}{r^2 \dot{\phi}(\bar{\eta})}$$

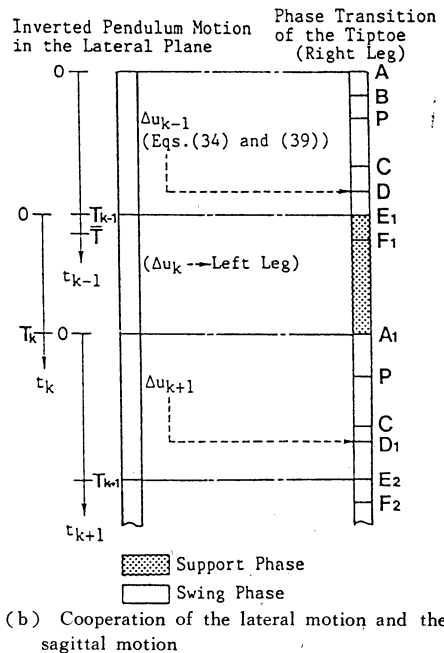
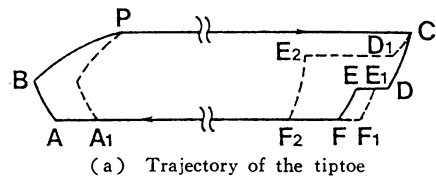


Fig. 13 Leg trajectory planning based on the lateral motion

$$f_2 = \frac{a_3 r^2 h_{21}(\bar{\eta}) - 2\bar{r}\bar{\omega}a_1 h_{22}(\bar{\eta})}{r^2 \dot{\phi}(\bar{\eta})}$$

実験は周期 0.6 s で足踏みを行い、10 ステップ目で周期目標値を 0.7 s にステップ状に変化させた。Fig. 12 はその実験結果である。図からわかるように、目標値が変化した後、2 ステップ目で目標周期にほぼ到達している。その後、多少振動的な挙動を示しているが、この振動はシステムのカタなどの機械的要因によるものだと考えられる。以上の結果から、有限時間整定による歩行周期制御の有効性が示せた。

5. ペース歩行制御実験

5.1 脚軌道計画

本章では、前進運動も考えた脚軌道について検討する。すなわち、歩行周期制御 アルゴリズムを考慮した Sagittal 平面内の脚軌道計画を行う。Fig. 13(a) は、胴体固定座標系から見た爪先軌道を示す。定常歩行時の爪先軌道が実線で示されており、A→B→C→D→E→Fの経路を通る。まず、次に示す三つの動作に基づいて、実線で示された遊脚の軌道について説明する。

(1) 復帰動作：支持脚から遊脚に遷移して、前方の所定の位置 (C点) まで振り出される。まず、爪先の水平方向の対地速度が零になるように、胴体部に対して脚を後方に振りながら徐々に持ち上げる (A→B)。次に、胴体部に対する爪先速度が負から正となり前方へ振り出され、C点に到達したら保持される (B→C)。

(2) 調整動作：伸縮量 Δu_k を実現する滑らかな軌道が与えられる。このとき、脚は徐々に後方に振られる (C→D)。

(3) 待機動作：爪先の水平方向の対地速度が零に保持され着地を待つ (D→E)。この時期には、遊脚爪先と支持脚爪先を Sagittal 平面に射影した点の間の距離が一定となっている。また、調整動作によって、既に希望の伸縮量の実現されている。したがって、この間いつ着地が起きても一定の歩幅および希望の Δu_k が実現できる。図では、E点で着地が起きたことを示す。実際の着地は、爪先の力センサによって検出される。

支持脚期に関しては、脚切換え直後に、曲がった脚を定常脚長 r まで速やかに伸ばす (E→F)。その後、胴体部の地上高および速度が一定になるように、各関節に対する目標角度関数が与えられる (F→A)。

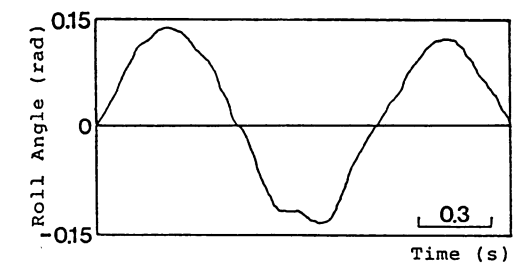
実際の歩行実験では様々な外乱が加わるため、ある程度の歩行周期 (着地時期) のずれに対処しなければならない。Fig. 13(b) は、Lateral 平面内における倒立振り運動および Sagittal 平面における右脚爪先の軌道経路との同期を示している。図中のアルファベットは、

Fig. 13(a) に示された途中経路である。 $k-1$ ステップ目に関しては、BC 間のある時点で Lateral 平面内の角速度 $\dot{\phi}$ が零になり、(39) 式で示される観測量 $\Delta \eta_{k-1}$ が求まる。 $k-1$ ステップ目の遊脚の伸縮量 Δu_{k-1} は、(34) 式および (39) 式に従って計算される。D点で調整動作が完了し待機動作に移る。ここで、E点で着地する予定が E₁ 点で着地が起こった場合、 $k-1$ ステップ目の歩行周期 T_{k-1} は定常歩行周期 \bar{T} より短くなっている。

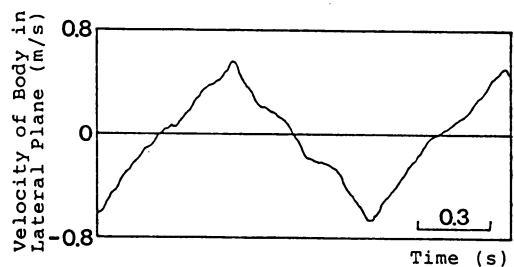
次に、右脚が遊脚から支持脚に切り替わると E₁→F₁ の破線の軌道に沿って定常脚長 r まで速やかに伸ばされる。 k ステップ目に関しては、決定された伸縮量 Δu_k が左脚の制御器に送られる。右脚は A₁ 点で遊脚に遷移し、P点で定常の軌道に滑らかに復帰する。 $k+1$ ステップ目に関しては、伸縮量 Δu_{k+1} によって D₁ 点を通る破線の経路が計算され、E₂ 点で着地が起こる。

5.2 歩行制御実験

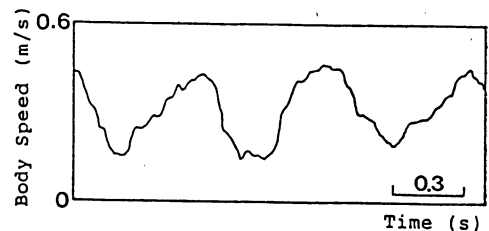
本節では、5.1 節で述べた脚軌道計画に基づいて歩行制御実験を行う。本研究では、前節で述べたようにある



(a) Roll angle of the body



(b) Velocity of the body in the lateral plane



(c) Body speed

Fig. 14 Experimental results of pace gait

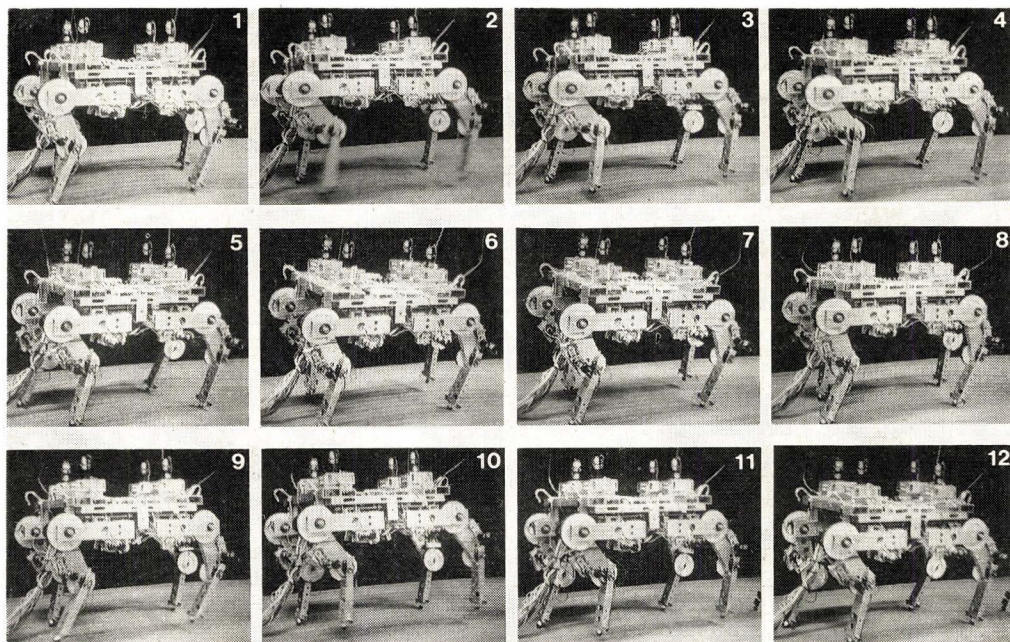


Fig. 15 A photographic playback in continual dynamic pace

程度の歩行周期のずれに対処できるような脚軌道生成アルゴリズムを採用している。歩行実験においては、各ステップ毎に適切な軌道を実時間で計算する。

Fig. 14(a) および (b) は、それぞれ胴体部の左右方向の傾斜角および胴体部の左右方向の速度（腰関節の位置に横向きに取り付けた速度センサからのデータ）である。本実験では、歩行周期目標値を 0.6 s とした。図からわかるように、各ステップ毎にほぼ同じパターンを繰り返しており、歩行周期も 0.6 s 近辺で制御されている。Fig. 14(c) は、超音波速度センサから得られた前進速度データである。ロボットが停止あるいは後退することなく、滑らかに歩行していることがわかる。Fig. 15 は、歩行の様子を示す連続写真である。ダイナミックにベース歩行を行っていることがよくわかる。このとき、歩幅は 0.15 m であった。以上の結果からわかるように、有限整定制御による Lateral 平面内の運動と脚軌道アルゴリズムに基づく Sagittal 平面内の運動に十分な協調が見られ、ベース歩行における歩行周期の調整および滑らかな前進運動が実現されている。

6. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) ベース歩行の運動制御に対して、Lateral 平面内の運動と Sagittal 平面内の運動に分離する制御方式を適用した。安定なベース歩行を実現するためには、歩行周期の制御が重要であることを示した。

(2) Lateral 平面内の運動における角運動量追加法として、遊脚を縮めて着地する方法を採用した。また、Lateral 平面内の足踏み運動は、 Δu_k を入力とした 2 次の差分方程式 ((7) 式) で記述される構造であることを明らかにした。

(3) 歩行周期の微小変化 ΔT_k は、状態 $\Delta \omega_k$, Δv_k および入力 Δu_k の一次関数 ((15) 式) で表されることを示した。

(4) 線形離散時間モデルを用いて、いくつかの歩行周期制御方式について検討した。一つは、基本的な比例・積分制御であり、もう一つは、状態フィードバック制御である。状態フィードバック制御としては、積分型最適制御および有限整定制御について議論した。非線形シミュレーションによって、高ゲインではあるが最も収束が速い有限整定制御の適用を決めた。また、有限整定制御で通常問題となるパラメタ感度もそれほど高くないことを示した。

(5) 4足歩行ロボット COLT-3 を用いて、足踏み制御実験を行った。その結果、有限時間整定を行うフィードバック係数を用いることで、歩行周期の適切な調整を実現した。

(6) 歩行周期の微小変化を考慮した Sagittal 平面内の脚軌道アルゴリズムを提案し、実時間において脚軌道計算を行った。その結果、実際に COLT-3 を用いて、一步約 0.6 s 、歩幅 0.15 m の滑らかなベース歩行を実現した。

参 考 文 献

- 1) 湯浅 伊藤, “自律分散システムとその歩行パターン発生器への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol.25-2, pp.180-187, 1989.
- 2) 榊原 菅, 細田 服部, 藤江, “4脚歩行機構のための低衝撃足先軌道”, 日本ロボット学会誌, 8-6, pp.662-671, 1990.
- 3) 広瀬 福田, 菊池, “4足歩行機構の制御システム”, 日本ロボット学会誌, 3-4, pp.304-324, 1985.
- 4) N. Koyachi, H. Adachi and E. Nakano, “Design and Basic Control of Stair-Climbable Fixed Gait Hexapod Walking Machines”, Proc. of the USA-JAPAN Symposium on Flexible Automation, Minneapolis, pp.673-680, 1988.
- 5) 佐野 古莊 後藤, “速度および加速度センサを用いた4足歩行ロボットの胴体速度制御”, 日本機械学会論文集 (C編), 56-529, pp.2460-2467, 1990.
- 6) 滝田 背戸, “ソフトウェアサーボ系による4足歩行ロボットの静的歩行制御”, 日本機械学会論文集 (C編), 52-484, pp.3249-3255, 1985.
- 7) 米田 広瀬, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.433, 1989.
- 8) 佐野 古莊 橋口, “コンプライアンス制御機能を有する4足歩行システムに関する基礎的研究”, 日本機械学会論文集 (C編), 57-539, pp.2297-2304, 1991.
- 9) 佐野 古莊 長沼, “四足歩行システムの低次モデル(ロボット歩行の場合)”, 日本機械学会論文集 (C編), 56-529 pp.2474-2482, 1990.
- 10) 木村 下山, 三浦, “四足歩行ロボットの力学的解析”, 日本ロボット学会誌, 6-5, pp.367-378, 1988.
- 11) M. H. Raibert, Legged Robots That Balance, The MIT Press, 1986.
- 12) A. Sano and J. Furusho, “Dynamically Stable Quadruped Locomotion(A Pace Gait in The COLT-3)”, Proc. of the International Symposium on Industrial Robots, pp.253-260, 1989.
- 13) 佐野 古莊, “擬似角運動量に基づく動的4足歩行の解析”, 計測自動制御学会論文集, Vol.24-12, pp.1299-1305, 1988.
- 14) 下山, “竹馬形2足歩行ロボットの動的歩行”, 日本機械学会論文集 (C編), 48-433, pp.1445-1454, 1982.
- 15) R. McN. Alexander, “The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals”, The International Journal of Robotics Research, 3-2, pp.49-59, 1984.
- 16) M. Hildebrand, “Analysis of Tetrapod Gaits: General Considerations and Symmetrical Gaits”, Neural Control of Locomotion, ed. R.M. Herman, et al., New York: Plenum, pp.203-236, 1976.
- 17) K. Ogata, “Discrete-time Control Systems”, Prentice Hall, 1987.

訂正とおわび

前号 (Vol.9, No.6) において下記の通り誤植がありましたので、
訂正のうえ、関係者におわび申し上げます。

		誤	正
p.45	(8) 式	\dot{p}	\bar{p}
	(9)	\dot{p}	\bar{p}
	(11)	m_1	m_i
	(12)	$\tau\{$	$\{\tau $
	(13)	$m_i \dot{h}_s \dot{s}$	$m_i \dot{h}_s \dot{s}$
p.46	(18)	$\vec{T} = \{\vec{\tau} $	$\vec{T} = \{\vec{\tau} $
p.47	(22)	$K_s(\ddot{S}_n^2$	$K_s(\dot{S}_n^2$