動歩行をめざした4足歩行ロボットの H^∞ 制御*内田 洋彰^{*1}, 野波 健蔵^{*2} H^∞ Control of a Quadruped Locomotion Robot Aiming
at Dynamic Walking

Hiroaki UCHIDA and Kenzo NONAMI

In the one period from legs landing to landing on the ground, a quadruped locomotion robot has two phases: the support phase and the swing phase. In the support phase, the foot is subjected to constraint force from the ground, and moment and force from the body, but not in the swing phase. Thus, in one period of walking, it is thought that the dynamics of the legs change greatly. It is desirable to construct a control design method taking account of the change in dynamics. In this paper, we deal with the change in dynamics as parameter perturbation. The H^∞ control method, which is a robust control method against disturbance, is applied to the quadruped locomotion robot. First, we show the design method of H^∞ optimal tracking control. Next, we compare H^∞ and frequency-shaped (H^2) optimal tracking control with conventional optimal tracking control in simulations and experiments.

Key Words: Quadruped Locomotion Robot, Dynamic Walk, Robust Control, H^∞ Control, H^2 Control, Optimal Tracking Control, Feedback Control, Feedforward Control, Experiments

1. 緒 言

4足歩行ロボットの研究については多くの研究成果が報告されている^{(1)~(5)}。しかし、これまでの研究においてはロボットの機構、歩容計画および歩行形態などが研究の中心となり、歩行形態を実現する制御系の設計方法について詳細に検討した研究は著者らが知るかぎりにおいてはあまり見当たらない。

そこで、著者らは4足歩行ロボットが高速に移動することが可能な動歩行のトロット歩容を実現する制御系設計方法について検討してきた。最初に、最適制御理論のフィードフォワード(以下FFと略す)制御とフィードバック(以下FBと略す)制御からなる2自由度制御系の最適トラッキング制御⁽⁶⁾を適用した。次に、最適トラッキング制御をベースとし、評価関数に動的な重み付けを行い、ロボットの歯車のバックラッシュによる高周波成分を除去する周波数成形最適トラッキング制御⁽⁷⁾を用いてトロット歩行を実現した。ロボットの動歩行においては、着地してから遊脚を経て次に

着地するまでの歩行1周期において、移動面に脚先が接地している支持脚相と移動面に接地していない遊脚相とが存在する。支持脚時には脚先が接地面から拘束力を受け、また、胴体を支持するので胴体からもモーメントおよび外力を受ける。しかし、遊脚時には地面からの拘束力を受けず、また、胴体からのモーメントおよび外力も支持脚時とはかなり異なる。このように歩行ロボットの脚リンクのダイナミクスは歩行1周期中において大きく変化すると考えられる。このようなダイナミクスの変化を理論的に解析し、ダイナミクスの変化を考慮した制御系設計はかなり複雑で困難な作業となる。4足歩行ロボットを高速に、また、安定に動歩行を行わせるには、このようなダイナミクスの変化を考慮した制御系設計法の確立が望まれる。これまでの研究において佐野ら⁽⁸⁾が、支持脚切換え現象を考慮してFBゲインを変化させ制御を行っているが、切替え時期の問題などがあり、実用的であるとはいえない。本研究では、このようなダイナミクスの変化をシステムのパラメータ変動として扱い、外乱に対してロバストな制御手法である H^∞ 制御を制御系設計手法として4足歩行ロボットの制御に適用する。これまでに H^∞ 制御を機械システムに適用した例は数多く報告されている^{(9)~(12)}、しかし、ロボットの軌道追従制御に適

* 原稿受付 1995年4月5日。

^{*1} 正員、木更津工業高等専門学校 (〒292 木更津市清見台東2-11-1)。^{*2} 正員、千葉大学工学部 (〒263 千葉市稲毛区弥生町1-33)。

用した例は見当たらない。

本研究では、最悪外乱を考慮した制御系設計手法である H^∞ 制御をロボットの軌道追従制御に有効である最適トラッキング制御に適用する。提案する H^∞ 最適トラッキング制御は、目標軌道にロバストに追従するロバストサーボ設計法の一つであり、ロボットの軌道追従制御には有効な手法であると考えられる。最初に、 H^∞ 最適トラッキング制御の設計方法を示し、次に、シミュレーションにより H^∞ 、周波数成形最適トラッキング制御(H^2)および従来のノミナルモデルを対象とした最適トラッキング制御を、外乱が作用した場合について比較検討する。また、実際の歩行実験により3手法の検証を行う。

2. ロボットの構造および歩行形態

2.1 ロボットの構造 図1に本研究で用いた4足歩行ロボットの概観を示す。総質量は4.7 kgである。自由度は1脚につき2自由度をもち、全部で8自由度となっている。使用しているモータは、定格出力1.1 WのDCサーボモータを用いている。Motor 1が

Fig. 1 Configuration of quadruped locomotion robot

Fig. 2 Leg model

リンク機構を介してThighを駆動させ、Motor 2がThigh内部を通してあるタイミングベルトを介してShankを駆動させる。各回転角はポテンショメータを用いて取り込んでいる。図2に脚番号および各脚の回転角度を示す。Thighの回転角を θ_{1i} 、ShankのThighからの回転角を θ_{2i} ($i = I, II, III, IV$ (脚番号))とする。

2.2 歩行形態 本研究で用いた目標歩行パターンを図3に示す。1歩0.12 mで、遊脚期間は0.64 sとしている。接地から接地までの1周期は1.60 sである。歩容は、3脚支持期と2脚支持期を有する Trot 歩容形の動歩行であり、胴体は一定の高さ b_h および0.075 m/sの速度で移動すると仮定している。この場合のデューティ比は0.6となっており、脚先軌道は図4に示す軌道としている。この脚先軌道となる θ_{1i} および θ_{2i} はロボットの逆運動学により求められる。

3. H^∞ 最適トラッキング制御

3.1 各脚リンクの伝達関数 本研究では4足歩行ロボットを、角脚リンクの目標角度に追従させる分散制御系として制御系を設計する。制御系設計法は、 H^∞ 最適トラッキング制御則である。各脚リンクの伝達関数は、モータへの入力電圧を V_a 、リンクの回転角を θ とすると次式で表される。

$$\frac{\Theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{s(1+Ts)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K および T は負荷の慣性モーメント、機械的粘性減衰の係数、電機子回路抵抗およびモータ定数からなる定数である。

Fig. 3 Desired walking pattern

Fig. 4 Desirable orbits of toe

本研究で用いた4足歩行ロボットの各脚リンクの伝達関数は、脚 I, II の Thigh, III, IV の Thigh および I ~ IV の Shank について次式で表される。

$$\text{Thigh I, II} \quad G = \frac{0.449}{s(1+0.055s)} \quad \dots\dots\dots(2\cdot a)$$

$$\text{Thigh III, IV} \quad G = \frac{0.343}{s(1+0.061s)} \quad \dots\dots\dots(2\cdot b)$$

$$\text{Shank I} \sim \text{IV} \quad G = \frac{0.364}{s(1+0.056s)} \quad \dots\dots\dots(2\cdot c)$$

式(2)で示された伝達関数を状態変数ベクトル $x_p = [x_1, x_2]^T = [\theta, \dot{\theta}]^T$ を用いて状態方程式に書き改めると式(3)のようになる。

Thigh I, II

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -18.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 8.11 \end{bmatrix} u \quad \dots\dots\dots(3\cdot a)$$

Thigh III, IV

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -16.39 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 5.62 \end{bmatrix} u \quad \dots\dots\dots(3\cdot b)$$

Shank I ~ IV

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -17.86 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 6.50 \end{bmatrix} u \quad \dots\dots\dots(3\cdot c)$$

上式の状態方程式および出力方程式は一般的に、次式で示される。

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p u \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$y_p = C_p x_p \quad \dots\dots\dots(5)$$

3.2 H^∞ 最適トラッキング制御 式(4)および(5)で示されるシステムについては、いま、初期時刻 t_0 より終端時刻 t_f まで希望関数 $z_p(t)$ が与えられている。この場合、誤差ベクトルを式(6)のようにおく。

$$e(t) = z_p(t) - y_p(t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(1)のシステムに作用する外生信号を $w(t)$ 、制御量を $z(t)$ とした場合、 w から z までの評価関数を次式のようにおく⁽¹³⁾。

$$J = \|G_{zw}\|_\infty = \sup_{0 \leq \omega \leq \infty} \bar{\sigma}\{G_{zw}(j\omega)\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$\bar{\sigma}$ は行列の最大特異値であり、

$$\bar{\sigma}\{A\} = \{\lambda_{\max}(A^*A)\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

を意味する。ここで、 $A^* = \bar{A}^T$ は複素行列の共役転置であり、 $\lambda_{\max}$ は最大固有値である。ここで、式(7)の評価関数は

$$\|w\|_2 = \left\{ \int_0^\infty w^T(t)w(t)dt \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots(9\cdot a)$$

$$\|z\|_2 = \left\{ \int_0^\infty z^T(t)z(t)dt \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots(9\cdot b)$$

と定義し、 $\|w\|_2 = 1$ とすると

$$\|G_{zw}\|_\infty = \sup_\omega \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} = \sup_\omega \|z\|_2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

となる。

H^∞ 制御問題は $\|G_{zw}\|_\infty < \gamma$ (γ は正数) となる制御器を求める問題であり、パラメータ変動に対して安定になるロバスト安定問題と外乱に対する感度低減問題を混合感度問題として扱う。本研究で制御対象としている式(3)のシステムは、ロボットを接地させず空中において周波数応答実験を行った結果得られた値である。そのため、式(3)のシステムは、ロボットの脚が遊脚時の状態を示している。支持脚時には、脚先が地面に拘束され、脚リンクの慣性モーメントが大きくなる。このことは、式(3)の状態方程式のシステム行列 A の(2,2)の要素のパラメータ変動とみなすことができる。本研究では状態変数はすべて観測できるものと仮定し、オブサーバを用いず、状態フィードバックのみで H^∞ 制御器を設計する。

この問題の一般化プラントは次式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{w1} \\ \dot{x}_{w2} \\ \dot{x}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{w1} & 0 & 0 \\ 0 & A_{w2} & -B_{w2}C_p \\ 0 & 0 & A_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{w1} \\ x_{w2} \\ x_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_p \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} B_{w1} \\ 0 \\ B_p \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{w2} \\ 0 \end{bmatrix} z_p \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{w1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{w2} & -D_{w2}C_p \\ 0 & 0 & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{w1} \\ x_{w2} \\ x_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} D_{w1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ D_{w2} \\ 0 \end{bmatrix} z_p \quad \dots\dots\dots(12)$$

式(11)および(12)を以下のようにおく。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1w + B_2u + B_3z_p \\ z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u + D_{13}z_p \\ y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u + D_{23}z_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots(13)$$

この問題の解軌道 $x^0(t)$ は、 x と同次元の補助変数ベクトル $p(t)$ を用いて、次の線形同次方程式の2点境界値問題の解として求められる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - B_2D_{12}^T C_1 & B_1B_1^T/\gamma^2 - B_2E_{12}^{-1}B_2^T \\ -C_1^T(D_{12}^T)^T D_{12}^T C_1 & -(A - B_2D_{12}^T C_1)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_3 \\ -N \end{bmatrix} z_p \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $D(m \times p)(m \geq p)$ で列フルランクの場合

$$\begin{aligned} D^+ &= (D^T D)^{-1} D^T \\ (D^+)^T D^+ &= I_m - D D^+ \\ N^T &= D_{12}^T C_1 \end{aligned}$$

また, $p(t)$ は

$$u^0(t) = -D_{12}^+ C_1 x(t) - E_{12}^{-1} B_2^T p(t) \quad \dots\dots\dots (15)$$

なる関数を満足する。ここで, 状態フィードバック $p(t)$ を

$$p(t) = K(t)x(t) + q(t) \quad \dots\dots\dots (16)$$

とおく, $K(t)$ は x と同次元の対称行列である。式(14)の $p(t)$ を式(16)の $q(t)$ で置換すれば次式となる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F & H \\ -G & -F^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_3 \\ -KB_3 - N \end{bmatrix} z_p \\ &\dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

ここで,

$$F = A - B_2 D_{12}^+ C_1 + B_1 B_1^T K / \gamma^2 - B_2 E_{12}^{-1} B_2^T K \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\begin{aligned} G &= K(A - B_2 D_{12}^+ C_1) + (A - B_2 D_{12}^+ C_1)^T K \\ &\quad + K(B_1 B_1^T / \gamma^2 - B_2 E_{12}^{-1} B_2^T) K \\ &\quad + C_1^T (D_{12}^+)^T D_{12}^+ C_1 + \dot{K} \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

$$H = B_1 B_1^T / \gamma^2 - B_2 E_{12}^{-1} B_2^T \quad \dots\dots\dots (20)$$

いま, $G=0$ かつ $\dot{K}=0$ とすれば式(17), (19)は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F & H \\ 0 & -F^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_3 \\ -KB_3 - N \end{bmatrix} z_p \\ &\dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &K(A - B_2 D_{12}^+ C_1) + (A - B_2 D_{12}^+ C_1)^T K \\ &\quad + K(B_1 B_1^T / \gamma^2 - B_2 E_{12}^{-1} B_2^T) K \end{aligned}$$

Fig. 5 Block diagram of H^∞ optimal tracking control

$$+ C_1^T (D_{12}^+)^T D_{12}^+ C_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる。式(22)は代数 Riccati 方程式で, この解 K は, 制御時間無限大のときの最適フィードバック係数である。式(21)の解は次のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(t) \\ q(t) \end{bmatrix} &= \exp \left\{ \begin{bmatrix} F & H \\ 0 & -F^T \end{bmatrix} t \right\} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ q(t_0) \end{bmatrix} \\ &\quad + \int_{t_0}^t \exp \left\{ \begin{bmatrix} F & H \\ 0 & -F^T \end{bmatrix} (t-\tau) \right\} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} B_3 \\ -KB_3 - N \end{bmatrix} z_p(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

式(23)は遷移行列を使って表すと次式になる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(t) \\ q(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Phi_{11}(t) & \Phi_{12}(t) \\ 0 & \Phi_{22}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ q(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_1(t) \\ \Psi_2(t) \end{bmatrix} \\ &\dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

一方, 式(21)をブロック線図で示したのが図5である。図5は $q(t_0)$ を決めれば実現できる。式(24)の第1式から

$$x^0(t_f) = x^*(t_f) + \Phi_{12}(t_f) q(t_0) + \Psi_1(t_f) \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここで,

$$x^*(t_f) = \Phi_{11}(t_f) x(t_0) \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。 $x^*(t_f)$ は補償系からの入力がない場合の解軌道を示す。式(25)から,

$$q(t_0) = \Phi_{12}^{-1}(t_f) \{ x^0(t_f) - x^*(t_f) \} - \Psi_1(t_f) \} \quad \dots\dots\dots (27)$$

と求められる。希望関数 $z_p(t)$ ははじめに与えられているから $\Psi_1(t_f)$ は既知となり, 初期値 $q(t_0)$ が決まる。

また, 図5において F , F_{w1} および F_{w2} は, 式(15)および(16)より

$$u^0(t) = -D_{12}^+ C_1 x - E_{12}^{-1} B_2^T p \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$u^0 = -(F x_p + F_{w1} x_{w1} + F_{w2} x_{w2}) - E_{12}^{-1} B_2^T q \quad \dots\dots\dots (29)$$

の関係となり, W_1 および W_2 は

Fig. 6 Frequency weighting function

(a) Angle

(b) FB control input u_b (c) FF control input u_f (d) Control input u Fig. 7 H^∞ and H^2 optimal tracking control

$$W_1(t) = \frac{z_1(t)}{u(t)} \quad \dots\dots\dots (30 \cdot a)$$

$$W_2(t) = \frac{z_2(t)}{e(t)} \quad \dots\dots\dots (30 \cdot b)$$

となる。

4. シミュレーション

4.1 重み関数行列 重み関数 W_1 および W_2 を次式のような周波数依存の伝達関数とする。

$$W_1(s) = \frac{As^2}{s^2 + 2\xi\omega_1 s + \omega_1^2} \quad \dots\dots\dots (31 \cdot a)$$

$$W_2(s) = \frac{\omega_2^2}{s^2 + 2\xi\omega_2 s + \omega_2^2} \quad \dots\dots\dots (31 \cdot b)$$

ここで

$$\xi = 0.707, A = 0.08$$

$$\omega_1 = 10 \times 2\pi \text{ rad/s}, \omega_2 = 1 \times 2\pi \text{ rad/s}$$

W_1 は高周波帯域でゲインが大きいハイパスフィルタの関数であり、 W_2 は低周波帯域でゲインが大きいローパスフィルタの関数である。この関数は実験により決定した。本論文では、制御対象が1入力1出力のシステムであるので、重み行列は式(31)で表される1入力1出力の関数となる。この関数のボード線図を図6に示す。

4.2 H^∞ および H^2 最適トラッキング制御

H^∞ 最適トラッキング制御は H^∞ 最適トラッキング制御の外乱 w の項を考慮しない場合なので、式(13)の係数行列 B_1 , D_{11} , $D_{21} = 0$ として計算する。 H^∞ および H^2 最適トラッキング制御を行った場合のシミュレーション結果を図7に示す。図7(a)が脚IのShankの角度で、図7(b)がFB制御入力

$$u_b = -(F x_p + F_{w1} x_{w1} + F_{w2} x_{w2}),$$

図7(c)がFF制御入力 u_f および図7(d)が制御入力 $u(u_b + u_f)$ を示している。 H^∞ および H^2 制御とも角度はほぼ一致しているが、 u_b および u_f は γ の値を小さくすると大きくなっていることがわかる。また、

Fig. 8 System noise

(a) Angle

(a) Angle of Thigh (I)

(b) Control input u

(b) Angle of Shank (I)

Fig. 9 Optimal tracking control with disturbance

H^∞ 制御において $\gamma = 1.0 \times 10^{-4}$ より大きくとるとほぼ H^2 制御に一致する。また、 $\gamma = 1.0 \times 10^{-6}$ より小さくすると振動が大きくなり誤差が大きくなる。

4.3 外乱が作用した場合 4足歩行ロボットの歩行1周期中においては支持脚相と遊脚相が存在する。この場合、脚リンクのダイナミクスは大きく変化する。そこで本研究ではこのダイナミクスの変化をパラメータ変動として扱う。式(3)で示されるシステム行列の(2,2)の値を元の75%に変化した場合および図5のブロック線図においてシステムノイズ w が同時に加わった場合について検討する。この場合のシステムノイズを図8に示す。システムノイズは白色雑音である。また、周波数成形を行わないでノミナルモデルで最適トラッキング制御を行った場合についても検討する。 H^∞ 、 H^2 およびノミナルモデルでの最適トラッキング制御のシミュレーション結果を図9に示す。図9(a)が角度で図9(b)が制御入力 u である。制御入力は制御器の関係上 $\pm 3V$ で飽和している。 H^∞ 制御は $\gamma = 1.0 \times 10^{-5}$ について検討している。図中において一点鎖線はノミナルモデルでの最適トラッキング制御である。図より H^∞ および H^2 制御とも角度および制御入力ともにほぼ一致しており差異が見られない。

(c) Control input of Shank (I)

(d) Power spectrum density of control input

Fig. 10 Experimental results of walking

同様に、式(3)で示されるシステム行列の(2, 2)の値が125%に変化した場合についても検討したが H^∞ および H^2 制御ともほぼ一致した結果となった。このことから本システムにおいては、 H^∞ および H^2 制御ともパラメータ変動およびシステムノイズの外乱に対するロバスト性はあまり変わらないことがわかる。これは、本研究では、歩行ロボットの動歩行を実現するように重み関数 W_1 、 W_2 および γ を決定しているため、 H^∞ 制御と H^2 制御の制御器の差が小さくなっており、 H^∞ 制御の有効性が顕著には現れていないと考えられる。また、ノミナルモデルに対する最適トラッキング制御と比較すると制御入力に低周波の振動が見られるが高周波成分は除去されている。角度の追従性もノミナルモデルで設計した場合に比べ追従性が優れていることがわかる。

5. 実験

5.1 制御システム コントローラとしてPC 9821 Ap(66 MHz)を用いている。ロボットからの角度をポテンショメータで検出し、A/Dコンバータを介して、コントローラに取り込んでいる。モータは電圧で制御を行っている。モータへの電圧は、コントローラで計算し、D/Aコンバータを介して出力され、パワーアンプで増幅してモータを駆動する。

5.2 最適トラッキング制御の比較 図10に H^∞ 、 H^2 およびノミナルモデルでの最適トラッキング制御を用いて歩行実験を行った場合の実験結果を示す。図10(a)は脚IのThighの角度(θ_{I1})を図10(b)は脚IのShankの角度(θ_{I2})、図10(c)はその場合のShankへの制御入力、図10(d)は図10(c)のパワースペクトルを示す。 $\gamma=1.0 \times 10^{-5}$ で H^∞ 制御を行った。 $\gamma=5.0 \times 10^{-6}$ では制御入力が大きくなり、歩行がうまくできない結果となったためである。図10よりThighおよびShankの角度および制御入力ともに H^∞ および H^2 とも一致した結果が得られている。しかし、パワースペクトルにおいて約2 Hzまでの低周波数での値は H^∞ 制御がわずかに大きくなっており、シミュレーション結果と一致していることがわかる。このことから実験においても、 H^∞ および H^2 制御のロバスト性はあまり変わらないことが確認できる。ノミナルモデルで設計した最適トラッキング制御はロボット本体のかさ歯車のバックラッシュの影響で制御入力に高周波の振動が生じており、この影響で歩行中に H^∞ および H^2 制御と比較すると振動している。

5.3 歩行実験 H^∞ 最適トラッキング制御を用

いて歩行実験を行った。歩行実験は床反力および滑りの影響を少なくするためにじゅうたんの上で行った。この場合1歩12 cmの目標軌道に対して約17 cmの歩行を実現した。また、 H^2 制御とほぼ一致した結果となった。

6. 結 言

4足歩行ロボットの歩行1周期中においては、支持脚相と遊脚相が存在し、支持脚時と遊脚時には脚のダイナミクスが大きく変化する。本研究ではこのダイナミクスの変化をパラメータ変動と考え、このような外乱を理論的に取り扱うことができる H^∞ 制御をロボットの軌道追従制御として有効である最適トラッキング制御に適用し、以下の結果が得られた。

(1) 支持脚時と遊脚時のダイナミクスの変化を外乱とみなし、外乱を系統的に扱うことができる H^∞ 最適トラッキング制御の設計法を提案し、設計手順を導いた。

(2) 本論文で提案した H^∞ 最適トラッキング制御、 H^2 最適トラッキング制御およびノミナルモデルを対象とした従来の最適トラッキング制御の3手法についてシミュレーションおよび実験により比較検討を行った。その結果、 H^∞ および H^2 制御は、4足歩行ロボットのシステムにおいてはあまり制御性能に差異は見られず、同程度のロバスト性能であることが示された。

(3) 歩行実験においても H^∞ および H^2 制御は類似した結果が得られ、ともに円滑な動歩行を実現した。

本研究を実施するに当たり、ご援助いただいた木更津高専機械工学科宮川正平教授に感謝する。

文 献

- (1) 古荘, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 306.
- (2) 広瀬・米田, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 360.
- (3) Furusho, J., ほか3名, *Proc. Sec. Int. Conf. Movic*, (1994), 198.
- (4) Raibert, M. H., *Legged Robots That Balance*, (1986), 83, The MIT Press.
- (5) 千葉・ほか3名, 機論, 61-581, C(1995), 138.
- (6) 内田・ほか3名, 機論, 60-575, C(1994), 2351.
- (7) 内田・ほか2名, 機論, 61-589, C(1995), 3627.
- (8) 佐野・ほか2名, 機論, 54-508, C(1988), 3022.
- (9) 野波・ほか2名, 機論, 57-534, C(1991), 568.
- (10) 梶原・ほか2名, 機論, 58-555, C(1992), 3238.
- (11) 大須賀, 日本ロボット学会誌, 11-4(1993), 502.
- (12) 渡辺・吉田, 機論, 60-577, C(1994), 3025.
- (13) 美多, H^∞ 制御, (1994), 3, 昭晃堂.