アクチュエータのダイナミクスを考慮した 6脚歩行ロボットの姿勢制御*

内 田 洋 彰^{*1}

Posture Control of Six-Legged Robot in Consideration of Actuator Dynamics

Hiroaki UCHIDA^{*2}

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Kisarazu National College of Technology,
2-11-1 Kiyomidai-higashi, Kisarazu-shi, Chiba, 292-0041 Japan

It is desirable to establish a posture control method considering the dynamics of the actuator. In the present study, as a model considering the dynamics of the actuator, we constructed a mathematical model in which inputs were the driving torque of the thigh links in the supporting legs and the outputs were the height of the body, the pitching angle, and the rolling angle. The optimal servo control system was designed for this model. As a result of 3D simulation, the proposed control method showed a good following performance to the periodical references of the pitching and rolling angle compared with the control method not considering actuator dynamics. And, in the case of following the periodical references of the body posture, experimental results were almost coincident with 3D simulation results.

Key Words: Six-Legged Robot, Posture Control, Optimal Servo System, Irregular Terrain, 3D Simulation, Experiment

1. 結 言

多脚歩行ロボットは人間が作業困難な環境下で活躍すると考えられ、精力的に研究がなされている^{(1)~(6)}。特に不整地において必要不可欠と考えられる姿勢制御に関する研究としては、4足歩行ロボットの姿勢制御手法に関して、Yoneda ら⁽⁷⁾がスカイフックサスペンション制御を提案し、支持脚の鉛直方向の力を制御することで姿勢制御を実現している。著者ら⁽⁸⁾は支持脚の鉛直方向の力目標値を生成する手法として最適サーボ系を設計する手法を提案している。Qingjiu ら⁽⁹⁾はスライディングモード制御を適用し、6脚歩行ロボットの姿勢制御および振動制御を実現している。しかし、文献(8)および(9)では支持脚の鉛直方向の力と脚関節の駆動トルクとの関係はヤコビ行列を用いた幾何学的な関係として扱っている。この場合、脚リンクの駆動アクチュエータが有する時定数、むだ時間等が原因で実際の支持脚の力が力目標値となるまでに時間を要する。このようなシステムにおいて姿勢変動を短

時間で行う場合には、胴体姿勢に振動が生じる、場合によっては転倒する等の現象が現れる。

一方、脚ロボットの機構として広瀬らは移動速度を発生するリンク(旋回部)と力(ロボットの自重を支える)を発生するリンク(腿部)をそれぞれ別にする普及型4脚歩行ロボット⁽¹⁰⁾を設計し、市販している。著者らはこの脚機構においては、腿部リンクを制御することによりロボット胴体の姿勢(ピッチ角、ロール角、胴体高さ)を制御することに着目し、姿勢制御手法について検討してきた⁽⁸⁾。

本研究では、前述の問題に対して、腿部関節を駆動するアクチュエータへの入力を入力とし、ロボット胴体の高さ、ピッチ角およびロール角を出力とするモデルを導出する。このモデルに対して最適サーボ系を設計し、機構解析ソフト上に構築した6脚歩行ロボットの3Dモデルを用いた3Dシミュレーションおよび歩行実験により提案するアクチュエータのダイナミクスを考慮した姿勢制御手法の有効性を検討する。

提案する姿勢制御手法は、力目標値を求める必要がないため、ヤコビ行列を用いた力からトルクへの変換作業を省略できること、支持脚の力センサを必要としない利点がある。また、腿部リンクではロボットの自重を支える大きなトルクを発生する必要があるため、

* 原稿受付 2009年11月10日。

^{*1} 正員、木更津工業高等専門学校(〒292-0041 木更津市清見台東2-11-1)。

E-mail: uchida@maple.m.kisarazu.ac.jp

本研究で用いる6脚ロボットは、駆動機構としてウォームギアを採用しており、機構的に胴体の自重による負荷を相殺できる。

2. 6脚歩行ロボットおよび3DCADモデル

図1に6脚歩行ロボットの外観、表1にロボットの寸法を示す。ロボットの特徴は、脚部が人間における肩、腿および脛の3つの関節を持っている6脚歩行ロボットである。各関節ごとのモータはウォームギアを介して駆動している。このことにより、文献(8)で用いているロボット胴体の自重に抗するフィードフォワード(FF)の力目標値は必要としない。ロボットの動作は制御入力をD/A変換を介し、モータドライバからモータへ必要電流を流して駆動させる。また胴体

Table 1 Dimension of robot

Height	500mm	Weight of robot	24.9kg
Length	666mm	Length of thigh	168mm
Width	710mm	Length of shank	312mm
Moment of Inertia I_p		0.6804kgm ²	
Moment of Inertia I_r		0.2697kgm ²

Fig. 1 Six-legged robot

Fig. 2 3DCAD model of six-legged robot

姿勢センサが取り付けられており胴体のピッチ角およびロール角を検出する。本研究ではこの6脚歩行ロボットを用いて提案する制御手法の有効性を検証する。また、図2に図1で示すロボットの3DCADモデルを示す。3DCADモデルは、胴体1、各脚3の計19のボディから構成され、これらをジョイントを用いて統合する。各脚の3関節はモータドライバへの入力電流から関節角度までの伝達関数モデルで、実機において周波数応答を行い、2次遅れ要素のモデルで近似している。足の平には4点の接触点を設定し、歩行面との接触をバネとダンパでモデル化している。

3. 歩行計画

図3に6脚歩行ロボットの脚番号を示す。図4は3脚支持歩行による歩行パターンを示す。歩行ロボットは最大で1歩6.5cm、1周期 T (6 or 18) [s] で歩行する軌道とした。脚先軌道から逆運動学を用いて関節角度を求める。本研究では4・3節で示す式(6)において、左辺=0の場合に支持脚に作用する F_i ($i=1, \dots, 6$) が一意に決定できる3脚支持で歩行を行う。4脚お

Fig. 3 Leg number and position

Fig. 4 Walking pattern

よび5脚支持歩行では支持脚が冗長となるため F_i を一意に決定できない。

4. 姿勢制御手法

4.1 支持脚時の腿部リンクのモデル 本研究で用いる6脚歩行ロボットの脚リンクは旋回部 (θ_{1i})、腿部 (θ_{2i}) および脛部 (θ_{3i}) ($i=1, \dots, 6$) の3自由度を有している。 θ_{1i} は図3に基準角と+方向を示す。図5に腿部リンクが姿勢制御を行うためにフィードバック (FB) 入力生成するためのモデルを示す。図5は支持脚時における腿部関節角度と支持脚に作用する鉛直方向の力との関係を示す。図中において l_{ti} は腿部リンクの長さ、 C_e および K_e は、接触面の減衰定数およびバネ定数である。また、 θ_{2i} および θ_{3i} の基準角と+方向についても示す。この図において、次の仮定を設ける。

①脛部は常に接触面に垂直になる ($\theta_{3i} = \theta_{2i}$)。

② θ_{2i} の可動範囲は微小とする。

この仮定により $\theta_{2i} = 0$ に戻すように働く支持脚に作用する鉛直方向の力 F_i は、次式となる。

$$F_i = K_e l_{ti} \theta_{2i} + C_e l_{ti} \dot{\theta}_{2i} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)は整地歩行 ($\theta_{2i,ref} = 0$) においてFBの力目標値を求める近似式であり、不整地歩行では $\theta_{2i} \neq 0$ となるので正確に姿勢を制御するFB力目標値を求める式とはならない。しかし、本研究では、アクチュエータのダイナミクスを考慮した姿勢制御モデルを導出し、胴体姿勢を制御することが目的である。式(1)における K_e および C_e を変化させることで、 $\theta_{2i} = 0$ となるようにする F_i を変化させることができる。このことにより不整地歩行での姿勢制御に対応できると考える。また、本研究で用いる6脚歩行ロボットの腿部リンクの可動範囲は $-45^\circ \sim +45^\circ$ となっている。この可動範

囲を超える支持状態は、腿部リンクでのロボット胴体の自重を支える機構的特徴を生かせなくなる。これらのことより、式(1)で支持脚に作用する力を近似し、アクチュエータのダイナミクスをロボットの姿勢制御モデルに取り込むことを考える。

次に、式(1)で作用する力が腿部リンクに対して負荷トルクとして作用すると考える。本研究で制御する腿部リンクはDCモータで駆動され、ドライバにより電流制御されている。図5で示される腿部リンクに関してトルクの釣り合い式を次式とする。次式は、支持脚腿部リンクの機構(ウォームギア)、4.4節のFB制御等でロボット胴体の自重項をキャンセルした場合の腿部リンクの運動方程式となる。

$$T_i = K i_{ai} = J \frac{d^2 \theta_{2i}}{dt^2} + c \frac{d \theta_{2i}}{dt} + l_{ti} F_i \dots \dots \dots (2)$$

ここで、DCモータに関して、電機子電流を i_{ai} 、腿部角度リンクを θ_{2i} 、トルクを T_i 、トルク定数を K 、負荷の慣性モーメントを J 、機械的粘性減衰係数を c とする。

式(1)を式(2)に代入してラプラス変換するとDCモータへの電流 i_{ai} から θ_{2i} までの伝達関数は次式となる。

$$G(s) = \frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

$$a_1 = (c + C_e l_{ti}^2) / J, \quad a_0 = K_e l_{ti}^2 / J$$

$$b = K / J$$

$u_i(t) = i_{ai}(t)$ として、式(3)を状態空間表現する。

$$\dot{x}_i(t) = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x_i(t) + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u_i(t) \dots \dots \dots (4 \cdot a)$$

$$\theta_{2i}(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4 \cdot b)$$

ここで、 $x_i(t) = [x_{i1} \quad x_{i2}]^T = [\theta_{2i} \quad \dot{\theta}_{2i}]^T$ である。

4.2 遊脚時の腿部リンクモデル 遊脚時には4.1節の式(3)で示したモデルにおいて、歩行面からの負荷トルクは作用しないことから、 K_e および C_e は零としたモデルとなる。

$$G(s) = \frac{b}{s(s+a)} \dots \dots \dots (5)$$

周波数応答実験結果より、式(5)における腿部リンクパラメータ a , b はそれぞれ、4.602, 0.490 となった。その結果、式(3)において、 $J = 14.12 \text{ kgm}^2$, $c = 64.99 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$, $K = 6.92 \text{ Nm/A}$ となる。

4.3 ロボットの姿勢モデル 6脚歩行ロボットが図3においてLeg I, IVおよびVの3脚による3脚支持の状態を考える。支持脚の鉛直方向の力を F_i (i

Fig. 5 Relationship between the angle of thigh and the force in the perpendicular direction of the supporting leg

=1~6), ロボット胴体の質量を M , ロボット胴体の重心におけるピッチ軸およびロール軸周りの慣性モーメントを I_p および I_r , ロボット胴体の歩行面からの高さを z , 胴体のピッチ角およびロール角を θ_p および θ_r , 支持脚旋回部における回転軸の水平面における座標を $x_i, y_i (i=1\sim6)$ とする. この場合の鉛直方向とピッチ軸およびロール軸周りにおける運動方程式は次式となる⁽⁸⁾. 添え字 () は支持脚が Leg II, III および VI の場合を表わす.

$$\begin{cases} M\ddot{z} = F_{1(2)} + F_{4(3)} + F_{5(6)} - Mg \\ I_p\ddot{\theta}_p = y_{1(2)}F_{1(2)} + y_{4(3)}F_{4(3)} + y_{5(6)}F_{5(6)} \\ I_r\ddot{\theta}_r = x_{1(2)}F_{1(2)} + x_{4(3)}F_{4(3)} + x_{5(6)}F_{5(6)} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(1)で表される各脚の力を式(6)に代入すると各脚の状態変数, 胴体の高さ, ピッチ角, ロール角, およびそれらの速度からなる $\mathbf{x} = [x_{1(21)}, x_{12(22)}, x_{41(31)}, x_{42(32)}, x_{51(61)}, x_{52(62)}, z, \theta_p, \theta_r, \dot{z}, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_r]^T$ という12次の状態変数を定義することにより次の状態方程式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1(2)} \\ \dot{x}_{4(3)} \\ \dot{x}_{5(6)} \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1(2)} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & A_{4(3)} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & A_{5(6)} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 3} & A_{75} \\ A_{81(82)} & A_{84(83)} & A_{85(86)} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1(2)} \\ x_{4(3)} \\ x_{5(6)} \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1(2)} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & B_{4(3)} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & B_{5(6)} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \\ \mathbf{d}_8 \end{bmatrix} g \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i &= \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, 6) \\ \mathbf{x}_7 &= \begin{bmatrix} z \\ \theta_p \\ \theta_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_8 = \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, 6) \\ \mathbf{A}_{75} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_i &= \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, 6) \\ \mathbf{u} &= \begin{bmatrix} u_{1(2)} \\ u_{4(3)} \\ u_{5(6)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d}_8 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{A}_{8i} = \begin{bmatrix} \frac{C_{elti}}{M} & \frac{K_{elti}}{M} \\ \frac{C_{elti}}{I_p} y_i & \frac{K_{elti}}{I_p} y_i \\ \frac{C_{elti}}{I_r} x_i & \frac{K_{elti}}{I_r} x_i \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, 6)$$

である.

式(7)を以下のようにおく.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{d}g \quad \dots\dots\dots (8)$$

4.4 最適サーボ系 式(8)のシステムにおいて, 目標値に追従し, 重力項によるステップ外乱に対して定常偏差を零とするサーボ系を設計する.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{r} - \mathbf{y} \quad (= \mathbf{r} - \mathbf{C}\mathbf{x}) \\ \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{d}g \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで, $\mathbf{z}$ は目標値ベクトル $\mathbf{r}$ と出力ベクトル $\mathbf{y} = [z, \theta_p, \theta_r]^T$ との誤差ベクトルである. 式(9)を行列表現すると次式となる.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{C} \\ 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{d} \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{r} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)は次式のように表される.

$$\dot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{A}_g \mathbf{x}_g + \mathbf{B}_g \mathbf{u} + \mathbf{d}_g g + \mathbf{f}_g \mathbf{r} \quad \dots\dots\dots (11)$$

支持脚のFB入力 $\mathbf{u}_b$ は, 次式の評価関数を最小にするように求められる.

$$J = \int_0^\infty [\mathbf{x}_g(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_g(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで, $\mathbf{Q} (n \times n)$ と $\mathbf{R} (m \times m)$ は設計仕様で与えられる重み行列で, $\mathbf{Q} \geq 0, \mathbf{R} > 0$ である. 式(12)を最小にする制御入力 $\mathbf{u}_b^0$ は次式となる.

$$\mathbf{u}_b^0 = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_g^T \mathbf{P} \mathbf{x}_g \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで, $\mathbf{P} (n \times n)$ は次式のリカッチ方程式を満足する解である.

$$\mathbf{P} \mathbf{A}_g + \mathbf{A}_g^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B}_g \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_g^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

4.5 アクチュエータのダイナミクスを考慮しない姿勢制御手法 アクチュエータのダイナミクスを考慮する制御手法の有効性を考慮しない場合の手法と比較するために, 本節では考慮しない場合の手法⁽⁸⁾について述べる. 式(6)を状態方程式で表わすと次式となる.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_r \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta_p \\ \theta_r \\ \dot{z} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ B_{41(42)} & B_{44(43)} & B_{45(46)} \\ B_{51(52)} & B_{54(53)} & B_{55(56)} \\ B_{61(62)} & B_{64(63)} & B_{65(66)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{1(2)} \\ F_{4(3)} \\ F_{5(6)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} g \\
& \dots\dots\dots (15)
\end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
B_{4i} &= 1/M, \quad B_{5i} = y_i/I_p, \quad B_{6i} = x_i/I_r \\
(i &= 1, \dots, 6)
\end{aligned}$$

式(15)のシステムに対して4・4節同様にサーボ系を設計し, 支持脚に作用するFBの力目標値 F_{fb} を求める. 求めた脚先の力目標値を実現する各関節の駆動トルク τ_{fbi} はヤコビ行列 J_r を用いると次式となる.

$$\tau_{fbi} = J_r^T F_{fb} \quad (i=1, \dots, 6) \dots\dots\dots (16)$$

以上より, 本研究で提案する腿部リンクのダイナミクスを考慮したモデルを用いて制御系設計を行うことにより, 式(16)で示されるトルクへの変換が不要となることがわかる.

5. 3D シミュレーション

5・1 整地歩行 最初に表1および表2で示される値を用いて最適サーボ系を設計した場合の閉ループシステムの固有値を図6に示す. 図6(a)はアクチュエータのダイナミクスを考慮した場合, 図6(b)はアクチュエータのダイナミクスを考慮しない場合である. 図中には重み行列 Q による固有値の変化がわかるように $Q = \text{diag}(1, 1, 1, 0, \dots, 0)$ の固有値も“×”で示している. 図6(a)および(b)より腿部リンクの角度および角速度を支配する固有値は図6(a)の点線上に存在する. このことより, このモードは胴体姿勢を制御するモードよりも応答が速くなることがわかる. 図6(a)および(b)より表2で示される設計パラメータ Q の誤差ベクトルに対する重みは同じとした. 図6(b)よりアクチュエータのダイナミクスを考慮し

Table 2 Parameters of simulation

Enviromental coefficients in Eq.(1)		
$K_s = 10^4 [N/m], C_s = 10^3 [Ns/m]$		
Optimal Servo System with Actuator Dynamics		
$Q = \text{diag}(10^6, 10^6, 10^6, 0, \dots, 0), R = \text{diag}(1, 1, 1)$		
Optimal Servo System without Actuator Dynamics		
$Q = \text{diag}(10^6, 10^6, 10^6, 0, \dots, 0), R = \text{diag}(1, 1, 1)$		
a, b in	shoulder	shank
Eq.(5)	$a = 10.41, b = 0.661$	$a = 7.160, b = 0.310$

ない場合は重みを大きくした方が良いと思われるが, 重みを1桁大きくして($10^6 \rightarrow 10^7$)シミュレーションを行った場合にはロボット胴体の振動がさらに大きくなったので表2で示される値とした. また, 歩行面のバネ定数および減衰定数は試行錯誤で決定した.

整地歩行において提案する制御手法の有効性について検討する. 図2に示されるコンピュータ上に構築した6脚歩行ロボットの3DCADモデルを用い, 胴体のピッチ角およびロール角を周期関数 $[ref = A_{mp} \sin(2\pi t/T), T=6s]$, 胴体高さは一定値(零)に追従させる歩行シミュレーションを行った. シミュレーションを行ったブロック線図を図7に示す. 6脚歩行ロボットの3Dモデルはブロック線図のSix-legged Robotのブロックでモデル化しており, 旋回部, 腿部, 脛部は式(5)および表2のパラメータでモデル化している. 制御手法としては, 4・4節の最適サーボ系および4・5節のアクチュエータのダイナミクスを考慮しない手法で行った. 姿勢制御は各脚の腿部リンクについてのみ行う. 旋回部と脛部は目標軌道に追従する位置制

(a) In the case of considering actuator dynamics

(b) In the case of not considering actuator dynamics

Fig. 6 Comparison of eigen values by optimal servo system

Fig. 7 Block diagram of 3D simulation model

(a) Pitching angle of the body

(b) Rolling angle of the body

(c) Height of the body

御で行う。また、腿部リンクについては支持脚時には姿勢制御を行うが、遊脚時には目標軌道に追従する位置制御とする。支持脚から遊脚への切り替えはあらかじめ与えられた時間で行い、遊脚から支持脚への切り替えは、支持脚が鉛直方向の力を脚先で検出した場合に切り替える。シミュレーション結果を図8に示す。シミュレーション結果は歩行2.5周期の結果である。これは、アクチュエータのダイナミクスを考慮しない場合には胴体の姿勢変動が大きくなり、解析が不能となったためである。図8(a)は胴体のピッチ角、図8(b)はロール角、図8(c)は胴体の高さ、図8(d)はLeg Iの腿部リンクの角度、図8(e)は支持脚時の腿部リンクへの制御トルクを示している。図8(d)および図8(e)では図5で示した方向とは逆に反時計方向を+としている。Leg Iでは3~6s, 9~12sが遊脚時となっている。各図中において実線はアクチュエータのダイナミクスを考慮した場合、破線はアクチュエータのダイナミクスを考慮しない場合、点線は目標値である。ピッチ角およびロール角ともアクチュエータ

(d) Angle of the thigh link in Leg I

(e) Control input to thigh link of Leg I between supporting phase

Fig. 8 3D simulation results on even terrain

のダイナミクスを考慮した場合には目標値に追従している。しかし、アクチュエータのダイナミクスを考慮しない場合には、目標値よりも振幅が大きくなり発散している。胴体高さについてもアクチュエータのダイナミクスを考慮した場合には考慮しない場合に比べて変動が小さくなっている。また、図7(d)および(e)のLeg Iの腿部リンクの角度および入力力はアクチュエータのダイナミクスを考慮した場合には周期的に同じ波形となっているが、考慮しない場合には振幅が大きくなっている。また、制御トルクにおいてアクチュエータのダイナミクスを考慮した場合には、遊脚から支持脚に切り替わった直後に振動的な大きな入力力が印加されている。これは図6(a)で示した応答の速いモードが働いて、遊脚から支持脚時になる場合の切り替えによる制御対象の変動を初期外乱と捉え、外乱による変動を抑える入力力が作用しているためと考えられる。その後、速いモードが収まり、姿勢を制御するモードで制御されている。アクチュエータのダイナミクスを考慮しない場合には、支持脚の鉛直方向の力を瞬時にFBされた力で修正しなければならないが、腿部リンクの時定数の影響により支持脚の力の修正まで時間がかかり、その影響が胴体姿勢に現れていると考えられる。

5・2 不整地歩行 5・1節では不整地を周期的な関数で想定したシミュレーションを行ったが、本節ではステップ上の不整地歩行において提案する制御手法の有効性を確認する。図9に示される階段状の障害物が存在する問題について姿勢制御の有効性を検証する。図10に段差の形状とロボットとの位置関係を示す。段差の高さは40 mmである。6脚歩行ロボットは、この段差を1歩20 mm、1周期18 sの10周期180 sで乗り越える問題とする。この場合、ピッチ角、ロール角および胴体高さの目標値は零とする。脚IとIIは、1周期から5周期まで段差状に存在する。脚IIIとIVは3~7周期、脚VとVIは5~9周期となっている。3Dモデルを用いたシミュレーション結果を図11および12に示す。図12はシミュレーション時間が84 s

Fig. 9 Case of irregular terrain

および150 sでのアニメーションを示す。図11(a)および(b)より、段差に脚を載せた瞬間および降ろした瞬間にはピッチ角およびロール角にその影響が現れているが、姿勢制御手法が有効に働いて、その後、ピッチ角およびロール角共に零近傍に保たれており、安定

Fig. 10 Top view of existing step obstacle

(a) Pitching angle of the body

(b) Rolling angle of the body

Fig. 11 Simulation results in the case of the irregular terrain

(a) Animation at 84 s

(b) Animation at 150 s

Fig. 12 Animations in the case of existing a step obstacle

した歩行が実現されているのがわかる。

6. 実 験

図2で示した6脚歩行ロボットを用いて提案する姿勢制御手法の有効性について検討する。歩行実験は、1周期6 secで、5・1節で行った平地でピッチ角およびロール角を目標の周期関数に追従させる歩行とする。式(12)の重み行列は $Q = \text{diag}(50\,000, 50\,000, 50\,000, 0, \dots, 0)$ として行った。歩行実験結果および3Dシミュレーション結果を図13に示す。歩行周期は定常歩行の4周期分を示している。図13(a)はピッチ角、図13(b)はロール角、図13(c)は支持脚時の腿部リンクへの制御トルクを示す。図13(c)においても図5で示した方向とは逆に反時計方向を+としている。図中において実線が歩行実験結果、破線が3Dシミュレーション結果、点線が目標値である。歩行実験では胴体高さ z は支持脚の関節角度から幾何学的に求めている。また、支持脚の腿部角速度および胴体の速度成分($x_{11(21)}$, $x_{41(31)}$, $x_{51(61)}$, $\dot{z}$, $\dot{\theta}_p$, $\dot{\theta}_r$)についてはカルマンフィルタを用いてオブザーバを構成し、推定値を用いて歩行実験を行っている。図よりピッチ角およびロール角とも周期的に安定した歩行を実現している。また、図13(c)の制御トルクにおいては、3Dシミュレーションおよび実験とも支持脚切り替え後に振動的な大きな制御トルクが印加されているのがわかる。この速い入力モードが収束した後の姿勢制御モードの入力が3Dシミュレーション結果と異なる波形となっているのは、アクチュエータの不感帯等が原因と考えられ

(a) Pitching angle of the body

(b) Rolling angle of the body

(c) Control input to thigh link of Leg I between supporting phase

Fig. 13 Experimental results in the case that the reference signals are harmonic function

る。しかし、実験結果は3Dシミュレーション結果とほぼ一致しており、3Dシミュレーションが妥当であることがわかる。また、4・5節のアクチュエータのダイナミクスを考慮しない手法でも歩行実験を行ったが、胴体の振動が大きくなり、歩行を継続するのは困難な結果となった。以上のことより本研究で提案する

姿勢制御手法が有効であることがわかる。

7. 結 言

本研究ではアクチュエータのダイナミクスを考慮した6脚歩行ロボットの姿勢制御手法を提案し、以下の結果を得た。

(1) 支持脚に作用する力をバネとダンパを用いてモデル化し、アクチュエータのダイナミクスを考慮したロボット胴体の姿勢モデルを導出した。このモデルに対する姿勢制御手法として最適サーボ系を設計する手法を示した。提案する姿勢制御手法は、支持脚に作用する力目標値を設定する必要がないこと、および力センサを必要としない利点を有している。

(2) 提案する手法は腿部リンクのダイナミクスを考慮することにより応答の速いモードが現れ、このモードが支持脚切り替え時のダイナミクスの変動を抑えるように働き、その後姿勢制御モードで制御されることを確認した。

(3) 3Dシミュレーションにより提案する手法とアクチュエータのダイナミクスを考慮しない手法との比較検討を行った。周期関数を目標値とする場合、提案する手法は安定して歩行を持続することを確認した。また、ステップ状の段差に対しても有効であることを確認した。

(4) 周期関数を目標値とする歩行では実験結果と3Dシミュレーション結果がほぼ一致し、歩行実験においても提案する姿勢制御手法の有効性を確認した。

謝 辞

本研究の実験は木更津高専5年亀山卓也氏(当時)が行った。また、科研費(18510151)の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Gonzalez de Santos, P., Cobano, J. A., Garcia, E., Estremera, J. and Armada, M. A., A six-legged Robot-based System for Humanitarian Demining Missions, *Mechatronics*, Vol. 17 (2007), pp. 417-430.
- (2) Huang, Q.-J. and Nonami, K., Humanitarian Mine Detecting Six-legged Walking Robot and Hybrid Neuro Walking Control with Position/force Control, *Mechatronics*, Vol. 13 (2003), pp. 773-790.
- (3) Barai, R. K. and Nonami, K., Optimal Two-degree-of-freedom Fuzzy Control for Locomotion Control of a Hydraulically Actuated Hexapod Robot, *Information Sciences*, Vol. 177 (2007), pp. 1892-1915.
- (4) Reevea, R., Webba, B., Horschlerb, A., Indiveric, G. and Quinnb, R., New Technologies for Testing a Model of Cricket Phonotaxis on an Outdoor Robot, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 51 (2005), pp. 41-54.
- (5) Safak, K. K. and Adams, G. G., Modeling and Simulation of an Artificial Muscle and its Application to Biomimetic Robot Posture Control, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 41 (2002), pp. 225-243.
- (6) Galvez, J. A., Estremera, J. and de Santos, P. G., A New Legged-robot Configuration for Research in Force Distribution, *Mechatronics*, Vol. 13 (2003), pp. 907-932.
- (7) Yoneda, K., Iiyama, H. and Hirose, S., Sky-Hook Suspension Control of a Quadruped Walking Vehicle, *Journal of Robotic Society of Japan*, Vol. 12, No. 7 (1994), pp. 1066-1071, (in Japanese).
- (8) Uchida, H. and Nonami, K., Generating Method of Feedback Force Reference Signal Realizing Attitude Control of Six-Legged Robot, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No. 685 (2003), pp. 2315-2322.
- (9) Huang, Q., Fukuhara, Y. and Chen, X., Posture and Vibration Control Based on Virtual Suspension Model Using Sliding Mode Control for Six-Legged Walking Robot, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 1, No. 2 (2007), pp. 180-191.
- (10) Hirose, S. and Arikawa, K., Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII for Commercially Available Research Platform, *Journal of Robotic Society of Japan*, Vol. 17, No. 8 (1999), pp. 1191-1197, (in Japanese).