6脚ロボットの外乱による腿部角度偏差に対する 仮想インピーダンス姿勢制御の外乱抑圧性*

内田 洋彰^{*1}, 亀山 卓也^{*2}

Effectiveness of Disturbance Rejection of Imaginary Impedance Based Posture Control against Angular Errors in Thigh Links of Six-Legged Robot

Hiroaki UCHIDA^{*1} and Takuya KAMEYAMA

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

This paper deals with the disturbance rejection performance of a posture control method based on imaginary impedance for a six-legged robot. In the mechanism proposed by Hirose et al., the thigh links are important for controlling the body posture. Angular errors occur in these thigh links, when the robot walks over a step obstacle, angular sensors generate error signals, or zero point errors of angular sensors exist. In this study, we consider the errors as a step disturbance. We first derive a mathematical model for posture control in the presence of a disturbance. Next, a LQI controller based on imaginary impedance is designed to suppress the effect of the disturbance. The disturbance rejection performance of the proposed posture control method is verified by 3D simulations and experiments.

Key Words : Six-Legged Robot, Disturbance Rejection, Impedance Control, Posture Control, 3D Simulation, Experiment

1. 緒 言

6脚ロボットは2脚, 4脚ロボットと比較して静的安定性に優れており, 静歩行で最大歩行速度を得ることができる。また, 脚ロボットは車輪型の移動ロボットと比較して, 支持脚を離散的に接地することから階段等の不連続となる環境下での移動形態として, 期待されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。このような不整地での歩行においてはロボット胴体の姿勢制御が必要不可欠な技術である。6脚ロボットの姿勢制御手法として, Irawan 等⁽⁴⁾は不整地での支持脚関節角度を位置/力制御を行う目標軌道(位置ベース力制御)で与え, コンプライアンス制御を用いて実現している。この手法では, 支持脚の目標の力を生成する制御系設計と, 脚関節を目標軌道に追従する位置制御系の設計が必要となる。また, 著者らは6脚ロボットの姿勢制御手法として, 米田らが4脚ロボットの姿勢制御手法として提案しているスカイフックススペンション制御⁽⁶⁾を6脚ロボットの姿勢制御手法に拡張し, フィードバック(FB)の力指令値を最適サーボ系で計算し, ヤコビ行列を用いて支持脚を制御する手法⁽⁷⁾について報告した。しかし, この方法では, 油圧システム等, むだ時間が存在する, 時定数が大きいシステムでは応答に時間がかかり, 安定して姿勢を制御することができない問題が存在する。また, 広瀬らは歩行ロボットの脚機構として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汎用4脚ロボット⁽⁸⁾を設計し, 市販している。著者らはこの脚機構に注目し, この脚機構を有する6脚ロボットを用いてロボット胴体の胴体高さ, ピッチ角およびロール角をパラメータとする姿勢制御手法について検討してきた^{(7),(9)}。前報⁽⁹⁾では, 支持脚に作用する力を仮想的なバネとダンパでモデル化し, 仮想インピーダンスを設定することで, 3脚支持状態における腿部リンクへの入力から胴体姿勢までの数学モデルを導出した。このモデルに対して, ロボット胴体の高さ, ピッチ角およびロール角に対して積分器各1個を有する最適サーボ系を設計することで力センサおよびヤコビ行列を用いた支持脚に作用する力から入力トルクに変換する作業を必要としない姿勢制御を実現で

* 原稿受付 2012 年 6 月 24 日

^{*1} 正員, 木更津工業高等専門学校 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

^{*2} 学生員, 東北大学大学院

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

きることを示した。この手法は、アクチュエータの応答が問題となるシステムで特に有効であり、応答が問題とならないシステムでは力センサを用いる手法も有効である。しかし、前報では、胴体姿勢の目標値に対する追従性能についての検討しか行っておらず、実環境では歩行ロボットは不整地での歩行を目標としていることから、不整地歩行についても検討する必要がある。著者らが前報⁽⁹⁾で提案する手法では、腿部リンクの角度零度からの変化量を状態量として制御している。このため、段差等の不整地においては、腿部リンクにおいて角度に一定量の偏差（角度零度からのずれ）を有することとなる。本研究では、この偏差をステップ外乱とみなし、この偏差に対して、前報⁽⁹⁾で提案する1型のサーボ系で設計される仮想インピーダンス姿勢制御の外乱抑圧性を検証する。

一方、この角度偏差は、脚角度センサの零点誤差、ドリフト等でも発生する。この問題は、センサの誤差信号に対する耐故障性の問題ともなる。脚角度センサ故障を扱った報告としては4脚ロボットの脚1脚において、2関節の角度センサ情報が得られない場合の歩行制御手法について報告⁽¹⁰⁾があるが、多脚ロボットの歩行制御において、角度センサの誤差信号を外乱抑圧の観点から検討した研究はなされていないようである。本研究では、脚角度センサ（腿部）の誤差信号を一般的に発生頻度が高いと考えられるステップ関数として扱い、この誤差信号が姿勢制御に及ぼす影響およびその外乱抑圧性についても検討する。具体的には、著者らが提案した腿部リンクのアクチュエータへの入力から胴体姿勢（胴体高さ、ピッチ角およびロール角）を出力とする物理モデルを用い、不整地歩行における腿部角度リンクにおける零度からの角度偏差の項を外乱としてモデル化する。このモデルに対して1型のサーボ系を設計し、角度誤差および角度センサの誤差信号に対する外乱抑圧性について6脚ロボットの3DCADモデルを用いた3Dシミュレーションおよび実機を用いた歩行実験により、仮想インピーダンス姿勢制御手法の有効性を示す。

2. 6脚ロボットおよび3DCADモデル

図1に6脚ロボットの外観、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脚ロボットである。各関節のモータはウォームギヤを介して駆動している。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。また胴体には歩行面との距離を測る距離センサおよび姿勢センサが取り付けられており胴体の高さ、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

Fig.1 Six-legged robot

Fig.2 3D model of a six-legged robot

Table 1 Dimension of robot

Height	500mm	Weight of robot	24.9kg	Moment of Inertia of body I_p	0.6804kgm ²
Length	666mm	Length of thigh	168mm	Moment of Inertia of body I_r	0.2697kgm ²
Width	710mm	Length of shank	312mm		
$(x_1 \ y_1)(m)$	$(x_2 \ y_2)(m)$	$(x_3 \ y_3)(m)$	$(x_4 \ y_4)(m)$	$(x_5 \ y_5)(m)$	$(x_6 \ y_6)(m)$
$(-0.105 \ 0.285)$	$(0.105 \ 0.285)$	$(-0.105 \ 0.01)$	$(0.105 \ 0.01)$	$(-0.105 \ -0.285)$	$(-0.105 \ 0.285)$

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 10^5 N/m とダンパ 10^4 Ns/m でモデル化している。本研究では、6脚ロボットの3DモデルはVirtual Lab.Motion (DADS/Plant)でモデル化し、MATLAB/Simulinkを用いて数値計算を行っている。Virtual Lab.Motionでは、6脚ロボットの非線形運動方程式を自動的に導出している。

3. 歩行計画

図3に6脚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。3脚支持歩行では、胴体重心位置の歩行面への投影点が支持脚が作る支持多角形内に必ず存在するため、静的安定性が保たれる。6脚ロボットは最大で1歩12cm、1周期 $T(20\text{s or }40\text{s})$ で歩行する目標軌道とした。脚先軌道から逆運動学を用いて脚関節角度を求める。本研究では図4に示す3脚支持で交互に胴体を支持する歩行パターンとする。この歩行パターンは静的安定性を常に確保して歩行する静歩行で、デューティ比0.5の最大歩行速度で歩行する。また、4脚および5脚支持歩行の歩容も検討できるが、支持脚が冗長となり、文献(9)で提案する姿勢制御を4脚および5脚支持に適用した場合、可安定なモードが現れる。本研究ではこの問題については検討しない。

Fig.3 Leg number and position

Fig.4 Walking pattern

4. 姿勢制御手法

4.1 ロボットの姿勢モデル

6脚ロボットが図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 ($i=1\sim6$)、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(図3において胴体 x 軸)およびロール軸(図3において胴体 y 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(回転角度の変動は微小と仮定)における運動方程式は次式となる⁽⁶⁾。添え字()は支持脚がLeg II, IIIおよびVIの場合を表す。

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

また、支持脚に作用する鉛直方向の力を、歩行計画により計算できる胴体を支えるフィードフォワード(FF)の力と歩行時のダイナミクス変動を制御するフィードバック(FB)の力の和とする。

$$F_i = F_{ffi} + F_{fbi} \quad (2)$$

FF の力は歩行計画より，式(1)において鉛直方向の力およびモーメントを零とおく，左辺=零とすることで一意に求めることができる⁽⁶⁾．この場合，式(1)の x_i, y_i ($i=1\sim6$) は支持脚足裏の位置となる．この FF の力をヤコビ行列を用いて FF の腿部トルクに変換する．

$$T_{ffi} = J^T F_{ffi} \quad (3)$$

また，FF の胴体を支えるトルクはロボットの脚関節駆動機構にウォームギヤ（セルフロック機能），油圧シリンダ等を用いることで零とすることができる．本研究で使用する 6 脚ロボットはウォームギヤを用いており，FF の入力トルクは用いない．以下，本論文では，姿勢制御での入力はすべて FB のみの入力を意味する．

4・2 仮想インピーダンスを設定した支持脚時の腿部リンクのモデル⁽⁹⁾

本節では，4・1 節で求めた FF の支持脚鉛直方向の力をヤコビ行列で腿部リンクに印加した場合，または機構的に胴体の重力項をキャンセルした場合の静的に 6 脚ロボット胴体が支持されている状態について考える．このように考えることにより，仮想的に支持脚は土台を据え付けられているロボットマニピュレータ先端が歩行面に対して力制御を行う場合と同様とみなすことができる．歩行による姿勢変動を制御する姿勢制御を FB によって行う．本研究では目的の姿勢となるように変動させる仮想的な力 (ΔF_z) とモーメント ($\Delta M_p, \Delta M_r$) を図 5 で示すように腿部回転関節部に，支持脚に作用する力の反力として発生させる．ここで，支持脚先端で胴体の腿部回転関節部に働く力の反力となる仮想的な鉛直方向の力を図 5 に示すバネとダンパを用いてモデル化する．この仮想的な力とモーメントは式(1)を変形して次式の関係となる．添え字() は式(1)と同様に支持脚が Leg II, III および VI の場合を表す．図 5 では，Leg II, III および VI が支持脚の場合である．

$$\begin{cases} M \ddot{z} = \Delta F_z = F_{fb1(2)} + F_{fb4(3)} + F_{fb5(6)} \\ I_p \ddot{\theta}_p = \Delta M_p = y_{1(2)} F_{fb1(2)} + y_{4(3)} F_{fb4(3)} + y_{5(6)} F_{fb5(6)} \\ I_r \ddot{\theta}_r = \Delta M_r = x_{1(2)} F_{fb1(2)} + x_{4(3)} F_{fb4(3)} + x_{5(6)} F_{fb5(6)} \end{cases} \quad (4)$$

Fig.5 Imaginary impedance model of FB control for a six-legged robot

図 6 は FF 入力等が印加された状態で胴体が静的に安定な状態とした場合に，仮想的なバネとダンパを用いて腿部リンクに反力 F_{fbi} を発生させる場合の脚リンクの関係を示す．本研究で用いる 6 脚ロボットの脚リンクは旋回部 (θ_{li})，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．図中において l_{ii} は腿部リンクの長さ， C_e および K_e は，式(4)で示される仮想的な力を発生させるために設定する減衰定数およびバネ定数である．仮想的な力（インピーダンス）を設定することにより，数学モデルにインピーダンス制御を行う要素を取り込む．この図において，脛部は常に接触面に垂直になる ($\theta_{3i} = -\theta_{2i}$) と仮定する．この仮定を用いると式(4)で示される仮想的な力およびモーメントを発生させる支持脚に作用する鉛直方向の FB の力 F_{fbi} は次式となる．また，段差等の不整地歩行状態では，腿部角度が常に零とはならない．この状態における偏差を $\Delta\theta_{2eqi}$ とする． $\Delta\theta_{2eqi}$ および腿部リ

Fig.6 Relationship between the angle of thigh and the imaginary force in the perpendicular direction of the support leg

Fig.7 Relationship between θ_{2i} and $\Delta\theta_{2eqi}$

ンクで θ_{2i} との変位差 Δl の関係を図7に示す．図7で赤の破線は $\Delta\theta_{2eqi}$ での胴体との関係を示す．仮想インピーダンスによる支持脚に作用する仮想的な力は次式となる．

$$F_{fbi} = K_e l_{ti} \Delta l + C_e l_{ti} \dot{\theta}_{2i} \cos \theta_{2i} \quad (5)$$

$$F_{fbi} = K_e l_{ti} \{ \sin(\theta_{2i}) - \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \} + C_e l_{ti} \dot{\theta}_{2i} \cos \theta_{2i} \quad (6)$$

ここで，本研究で用いるロボットの腿部関節角度 θ_{2i} の可動範囲は $-30^\circ \sim +30^\circ$ であること，および脚機構の腿部リンクの機構および駆動トルクで胴体姿勢を支えるという特徴から θ_{2i} を零近傍として線形化すると

$$F_{fbi} = K_e l_{ti} \theta_{2i} + C_e l_{ti} \dot{\theta}_{2i} - K_e l_{ti} \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \quad (7)$$

次に，式(7)で作用する力が腿部リンクに対して望ましい胴体姿勢を実現する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6で示される腿部リンクに関してトルクの釣り合い式は次式となる．

$$T_{fbi} = K i_{ai} = J \frac{d^2 \theta_{2i}}{dt^2} + c \frac{d\theta_{2i}}{dt} + l_{ti} F_{fbi} \quad (8)$$

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} ，FBのトルクを T_{fbi} ，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(8)において $x(t) = [\dot{\theta}_{2i} \quad \theta_{2i}]^T = [x_{i1} \quad x_{i2}]^T$ ， $\theta_{2i} \cong 0$ として，DCモータへの電流 i_a から θ_{2i} までの状態方程式および出力方程式は次式となる．

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u_i(t) + \begin{bmatrix} a_0 \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9-a)$$

$$\theta_{2i}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} \quad (9-b)$$

ここで，

$$a_1 = (c + C_e l_{ti}^2) / J, \quad a_0 = K_e l_{ti}^2 / J, \quad b = K / J, \quad u_{fbi} = i_{ai} \quad (i=1, \dots, 6)$$

である．

4・3 遊脚時の腿部リンクモデル

遊脚時には4.1節の式(8)で示したモデルにおいて、仮想的な姿勢を制御する負荷トルクは作用しないことから、 K_e および C_e は零として、入力 $I_{ai}(s)$ から $\Theta_{2i}(s)$ までの伝達関数は次式となる。

$$G(s) = \frac{\Theta_{2i}(s)}{I_{ai}(s)} = \frac{b}{s(s+a)} \quad (10)$$

脚リンクのトルク測定より、 $K=6.92[Nm/A]$ となった。また、周波数応答実験結果より、式(10)における腿部リンクパラメータ a , b はそれぞれ、7.94, 0.830 となった。その結果、式(8)において、 $J=8.34[kgm^2]$, $c=66.2[Nmr/s/rad]$ となる。慣性モーメントはウォームギヤ(ギヤ比 1/40)による腿部リンクの減速機構を含んだ値となっている。

4・4 ロボットのFB姿勢モデル

仮想インピーダンスを設定した場合の各脚の力、式(7)を式(4)に代入すると各脚の状態変数、胴体のピッチ角、ロール角、胴体高さおよびそれらの速度からなる $x=[x_{11(21)}, x_{12(22)}, x_{41(31)}, x_{42(32)}, x_{51(61)}, x_{52(62)}, z, \theta_p, \theta_r, \dot{z}, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_r]^T$ 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。胴体高さ z は $\theta_{2i}=0$ の場合、零とする。添え字()は支持脚が Leg II, III および VI の場合を表わす。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1(2)} \\ \dot{x}_{4(3)} \\ \dot{x}_{5(6)} \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1(2)} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & A_{4(3)} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & A_{5(6)} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 3} & A_{75} \\ A_{81(82)} & A_{84(83)} & A_{85(86)} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1(2)} \\ x_{4(3)} \\ x_{5(6)} \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1(2)} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & B_{4(3)} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & B_{5(6)} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} u_{fb} + \begin{bmatrix} d_{1(2)} \\ d_{4(3)} \\ d_{5(6)} \\ d_7 \\ d_8 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} (i=1, \dots, 6), \quad x_7 = \begin{bmatrix} z \\ \theta_p \\ \theta_r \end{bmatrix}, \quad x_8 = \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}, \quad A_i = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} (i=1, \dots, 6), \quad A_{75} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{8i} = \begin{bmatrix} \frac{C_e l_{ti}}{M} & \frac{K_e l_{ti}}{M} \\ \frac{C_e l_{ti}}{I_p} y_i & \frac{K_e l_{ti}}{I_p} y_i \\ \frac{C_e l_{ti}}{I_r} x_i & \frac{K_e l_{ti}}{I_r} x_i \end{bmatrix} (i=1, \dots, 6), \quad B_i = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} (i=1, \dots, 6), \quad u_{fb} = \begin{bmatrix} u_{fb1(2)} \\ u_{fb4(3)} \\ u_{fb5(6)} \end{bmatrix},$$

$$d_i = \begin{bmatrix} a_0 \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \\ 0 \end{bmatrix} (i=1, \dots, 6), \quad d_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad d_8 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1,4,5(2,3,6)} \frac{K_e l_{ti}}{M} \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \\ \sum_{i=1,4,5(2,3,6)} \frac{K_e l_{ti}}{I_p} y_i \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \\ \sum_{i=1,4,5(2,3,6)} \frac{K_e l_{ti}}{I_r} x_i \sin(\Delta\theta_{2eqi}) \end{bmatrix}$$

である。外乱 d_i および d_8 は $\Delta\theta_{2eqi}$ が一定の場合、定数となる。

式(11)を以下のようにおく。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_{fb}(t) + d(t) \quad (12)$$

4・5 姿勢制御手法

4・4節で示したFB姿勢モデルを用いて、外乱 $d(t)$ の影響を抑えるサーボ系を設計する。6脚ロボットが活躍すると考えられる環境下では、ロボットの姿勢目標値としてはステップ関数、また、外乱としてはステップ外乱の発生頻度が高いと考えられるので1型のサーボ系を設計する。腿部関節角度の誤差 $\Delta\theta_{2eqi}$ をステップ関数の外乱と考えると、1型のサーボ系は、ステップ外乱に対して定常偏差を零とすることができる⁽¹¹⁾。

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t) \\ \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_{fb}(t) + d(t) \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $\dot{e}$ は目標値ベクトル $r(t) = [z_r \ \theta_{pr} \ \theta_{rr}]^T$ と出力ベクトル $y(t) = [z \ \theta_p \ \theta_r]^T$ との誤差ベクトルである。式(13)を行列表現すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -C \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u_{fb} + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} d \quad (14)$$

式(14)は次式のように表される。

$$\dot{x}_g = A_g x_g + B_g u_{fb} + f_g r + e_g d \quad (15)$$

支持脚のFB入力 u_b は、次式の評価関数を最小にするように求められる。

$$J = \int_0^\infty \{x_g(t)^T Q x_g(t) + u_{fb}(t)^T R u_{fb}(t)\} dt \quad (16)$$

ここで、 $Q(n \times n)$ と $R(m \times m)$ は設計仕様で与えられる重み行列で、 $Q \geq 0, R > 0$ である。式(16)を最小にする制御入力 u_b^o は次式となる。

$$u_{fb}^o = -R^{-1} B_g^T P x_g = -\begin{bmatrix} F_e & F_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ x \end{bmatrix} \quad (17)$$

ここで、 $P(n \times n)$ は次式のリカッチ方程式を満足する解である。式(17)のフィードバックゲイン行列 $\begin{bmatrix} F_e & F_x \end{bmatrix}$ は歩行面のインピーダンスを考慮して決定されるゲイン行列となっている。

$$P A_g + A_g^T P - P B_g R^{-1} B_g^T P + Q = 0 \quad (18)$$

図8に最適サーボ系のブロック線図を示す。

Table 2 Parameters of simulation s and experiments

Imaginary impedance gain in Eq.(5)		
$K_e = 10^3 [N/m], C_e = 10^2 [Ns/m]$		
Optimal Servo System		
$Q = \text{diag}(10^4, 10^4, 10^4, 0, \dots, 0), R = \text{diag}(1, 1, 1)$		
a, b in	shoulder	shank
Eq.(5)	$a=104, b=0.661$	$a=7.16, b=0.311$

Fig.8 Block diagram of optimal servo system

5. 3D シミュレーションおよび歩行実験

5.1 閉ループ系の固有値

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 9 に示す。表 2 において、式(16)で示される評価関数の重み行列 Q は、不整地歩行においてロボット胴体姿勢が目標値となるように誤差ベクトル e にのみ重みを与える。図 9 で“○”は 5.2, 5.3 および 5.4 節で用いる $Q = \text{diag}(10^4, 10^4, 10^4, 0, \dots, 0)$ ，“□”は $Q = \text{diag}(10^6, 10^6, 10^6, 0, \dots, 0)$ ，“×”は $Q = \text{diag}(1, 1, 1, 0, \dots, 0)$ の場合の固有値を示している。仮想インピーダンスのバネ定数および減衰定数は試行錯誤の結果、表 2 で示す値とした。本研究での歩行パターンでは、胴体重心の歩行面への投影点が、支持脚 3 脚が作る三角形の内部に必ず存在し、歩行の安定性は保証されている。また、閉ループ系の固有値は複素平面の左半面に全て存在し、3 脚支持状態のフィードバック系は漸近安定となる。また、図 10 に 5.3 および 5.5 節で検討する 3D シミュレーションを行う場合のブロック線図を示す。旋回部、脛部および遊脚時の腿部は目標軌道に追従する PD 制御、支持脚時の腿部は姿勢制御のブロックで駆動トルクを生成している。

Fig.9 Eigen values of Feedback system in the case of $K_e = 1000\text{N/m}$, $C_e = 100\text{Ns/m}$

Fig.10 Block Diagram of 3D Simulation Model

5.2 足踏み実験

図 4 に示される 3 脚支持歩行で、 $T = 100\text{ s}$ とした場合に、その場(平地)で足踏みを行った。角度センサからの信号に誤差信号を付加した場合について実験を行った。支持脚時における姿勢制御の腿部関節角度センサの偏差に対する有効性を確認するので、遊脚時には誤差信号は与えず、目標軌道に追従する PD 制御とした。実際に、偏差が存在する場合には、脚先にタッチセンサ、力センサ等を装着し、支持脚相と遊脚相を正確に制御する必要がある。実験を行った 6 脚ロボットはタッチセンサ、力センサ等のセンサを有していないので、軌道計画を行った時間で切り替えている。腿部角度センサ信号には支持脚となった時間後にコントローラで誤差信号を加えて、

Fig.11 Experimental results of steps with error signal of the thigh links' angular sensors

その値を用いて式(17)で計算される FB 入力を腿部リンクの駆動トルクとして与えている。実験結果を図 11 に示す。制御時間は 100s~200s で、6 脚支持状態から LegII, III および VI が遊脚となり、150s で支持脚が LegII, III および VI で姿勢制御を行った。腿部関節角度センサの誤差信号は支持脚の三脚に同じだけの誤差信号を与えた。図 11(a)~(c)に胴体高さ、ピッチ角およびロール角の時間応答波形を示す。図中で、赤の実線は角度信号に -0.2rad 、青の破線は -0.5rad 、黒の点線は誤差信号がない場合である。 -0.5rad は本研究で用いている 6 脚ロボットの可動範囲の限界値を考慮した値である。 -0.2rad は目視において明らかに零点誤差として認識できると思われる値として用いている。図 11(d)~(f)にはそれぞれ LegI と II, LegIII と IV, LegV と VI の実際の腿部関節角度の応答波形を示す。図中で実線は誤差信号が -0.2rad 、破線は誤差信号が -0.5rad 、点線は誤差信号がない場合である。また、赤、青、緑の線は LegI, IV, V の組み合わせ、マゼンタ、シアン、黒の線は LegII, III, VI の組み合わせで示している。支持脚時における制御入力、図 11(d)~(f)の支持脚の角度にそれぞれ誤差信号を付加した値を用いて生成していることに注意されたい。胴体高さにおいて腿部角度誤差信号が存在する場合、6 脚支持状態から 3 脚支持状態になった直後(100s)は、腿部関節角度の誤差信号により、腿部関節角度をその角度にするような制御となり、 -0.2rad 、 -0.5rad の場合とも胴体を押し上げている。しかし、その後、姿勢制御が働き、約 20s 後には零近傍に収束している。支持脚踏み換え後は逆に胴体が沈んでいる。これは、図 11(e)において、LegIII がマイナス方向に変動しているためである。しかし、その後姿勢制御により零近傍に収束している。ピッチ角およびロール角についても支持脚踏み換え時に姿勢変動が現れるが、時間が十分に経てば姿勢制御により目標値近傍に制御されている。このことより、腿部関節角度に誤差信号が存在する場合、本研究で用いている 6 脚ロボットでは、20s で目標値に制御することができると考えられる。そこで、歩行周期を $T = 40\text{s}$ として 3D モデルを用いた歩行シミュレーションおよび歩行実験により腿部関節角度信号の誤差信号に対する外乱抑圧性を検証する。

5・3 平地歩行 3D シミュレーション

図 2 で示される 3D モデルを用いて腿部関節角度に誤差信号として、 -0.2rad および $+0.2\text{rad}$ が支持脚三脚に同時に存在する場合で、一步 12cm の歩行シミュレーションを行った。シミュレーション結果を図 12 に示す。3D モデルは、支持脚の鉛直方向の力を検出することが可能であるため、6 脚支持状態を設け、胴体姿勢の安定化を図っている。図 12(a)~(c)に胴体高さ、ピッチ角およびロール角の時間応答波形(0~160s, 4 周期)、図 12(d)~(f)にはそれぞれ Leg I と II, Leg IV と III, Leg V と VI の実際の腿部関節角度の時間応答波形(80~160s, 2 周期)、図 12(g)には -0.2rad の誤差信号を付加した場合の支持脚鉛直方向の力の時間応答波形(80~160s, 2 周期)を示す。図 12(a)~(c)で、赤の実線は角度信号に -0.2rad 、青の破線は $+0.2\text{rad}$ 、黒の点線は誤差信号がない場合である。また、図 12(d)~(f)の図中の実線は誤差信号が -0.2rad 、破線は誤差信号が $+0.2\text{rad}$ 、点線は誤差信号がない場合である。赤、青、緑の線は Leg I, IV, V の組み合わせ、マゼンタ、シアン、黒の線は Leg II, III, VI の組み合わせを図 11(d)~(f)と同様に示している。図 12(g)では、赤の実線が Leg I, 青の破線が Leg VI, 緑の点線が Leg V の支持脚時、マゼンタの実線が Leg II, シアンの破線が Leg III, 黒の点線が Leg VI の支持脚時での支持脚鉛直方向の力を示している。3D シミュレーションでは、軌道計画の支持脚切り替え時間で、姿勢制御手法を切り替えると姿勢変動が大きくなったので、支持脚鉛直方向の力を検出し、6 脚支持状態を設けることで切り替え時の姿勢変動が小さくなるようにした。具体的には、図 12(d)の 80~82.5s の支持脚 I,IV,V から II,III,VI への切り替え時では、80~82s までは Leg I,IV,V は角度を変化させず支持状態を保持し、Leg II,III,VI を接地させ、接地した場合にはその角度を保持し、82~82.5s の間で II,III,VI の姿勢制御に移行する。図 12(a)の胴体高さでは、0s 近傍で誤差信号ある場合、上下方向に変位している。これは、Leg I,IV,V の腿部角度が誤差信号に対して反応し、同一方向に三脚とも変位しているため胴体高さの変動が大きくなっている。この結果は、図 11(a)の 0s 近傍での胴体高さ変動と同様の変動を示しており、3D シミュレーションの妥当性を示している。その後は、胴体高さ、図 12(b)のピッチ角においては姿勢制御切り替え時に若干の変動は見られるが、6 脚支持状態の姿勢切り替え時間が有効に働き、変動は小さくなっている。図 12(c)のロール角では、支持脚切り替え時に 0.05rad 程度の変動がみられる。これは、切り替え後の腿部角度変動において Leg I,V(II,VI)のロボット左側(右側)の組み合わせと反対側 Leg V(III)の角度変動が $+$ ($-$)と $-$ ($+$)となり、ロボット胴体がロール軸回りに傾いているためである。しかし、その後、姿勢制御が有効に働いて零近傍に収束している。腿部リンクの角度(図 12(d)~(f))も支持脚切り替え時には、誤差信号のため変動がみられるが、その後、零近傍に収束している。図 12(g)の支持脚鉛直方向の力は、Leg I,IV,V の支持脚時には、

Fig.12 3D simulation results with error signal for angular sensor on even terrain

(g) Foot force in the case with error signal -0.2 rad

Fig.12 3D simulation results with error signal for angular sensor on even terrain

左側 I, V で胴体の半分の荷重を, 右側 IV でその残り半分の荷重を分担しているのが分かる. また, 胴体が歩行により移動するので, 重心位置が近づいてくる Leg I の力が増加し, 重心位置が遠くなる Leg V の荷重が減少している. この値は, 式(1)の左辺を零とし, x_i, y_i ($i=1\sim6$) を脚先位置として求められる FF の力とほぼ一致する. 以上より, 3D シミュレーションによる歩行により, 腿部角度に誤差信号が存在する場合の仮想インピーダンス姿勢制御による外乱抑圧性を確認することができる.

5・4 平地歩行実験

腿部関節角度に角度偏差に相当する誤差信号として, -0.2rad が支持脚三脚に同時に存在する場合で, 一步 12cm の歩行実験を行った. 実験結果を図 13 に示す. 図 13(a)~(c)に胴体高さ, ピッチ角およびロール角の時間応答波形 (0~160s, 4 周期), 図 13(d)~(f)にはそれぞれ Leg I と II, Leg III と IV, Leg V と VI の実際の腿部関節角度の時間応答波形 (80~160s, 2 周期) を示す. 図 13(a)~(c)で, 赤の実線は支持脚時において角度信号に-0.2rad の誤差信号を付加した場合, 黒の点線は誤差信号がない場合である. 図 13(d)~(f)の図中の実線は誤差信号が-0.2rad, 点線は誤差信号がない場合である. 赤, 黒の線は Leg I, IV, V の組み合わせ, 青, 緑の線は Leg II, III, VI の組み合わせを示している. 腿部角度に誤差信号が存在しない場合と比較して-0.2rad の誤差信号を付加した場合には, 胴体高さおよびロール角において支持脚切り替え時に変動が大きくなっている. ピッチ角については, 誤差信号を付加したことによる変動はあまりみられない. 胴体高さについては, 支持脚が Leg II,III,VI の組 ($t=20\sim40s$, $60\sim80s$, $100\sim120s$, $140\sim160s$) では, 胴体高さ, ピッチ角ともに切り替え時に誤差による変動は大きくなっているが, その後, 姿勢制御により, 零に向かって値が変化している. 腿部関節角度も支持脚切り替えに伴う変動は大きいですがその後, 零近傍に収束している. 一方, Leg I,IV,V の組 ($t=0\sim20s$, $40\sim60s$, $80s\sim100s$, $120s\sim140s$) では, ロール角では, 同様に零近傍に収束しているが, 胴体高さでは, 目標値から離れている. これは, 図 13(d)~(f)の腿部角度の $t=80\sim100s$ において Leg IV の角度-0.1rad 近傍で止まってしまっているためである. また, 本研究で用いている 6 脚ロボットは計 18 個のアクチュエータを有しており, このアクチュエータの不感帯, 飽和等のモデル化誤差, 角度センサの零点誤差等により目標値近傍では特に, 3D シミュレーション結果と歩行実験結果との間に差が生じている. しかし, 支持脚切り替え後のロール角の角度変動であるが, 3D シミュレーションの結果図 12(c)では, Leg II,III,VI の支持脚時には+方向に変動し, Leg I,IV,V では-方向に変動している. 実験結果でも, 同様に Leg II,III,VI の支持脚時には+方向に変動し, Leg I,IV,V では-方向に変動している. このことは 3D シミュレーションの妥当性を示している. 実験結果においても切り替え後の初期状態に依存してロール角の変動が現れている. しかし, その後は姿勢制御が有効に働き, 零近傍に収束している. このことより歩行実験においても腿部角度信号に誤差が存在する場合の外乱抑圧性を確認することができ, 仮想インピーダンス姿勢制御手法の有効性を示した.

Fig.13 Experimental results of walking on even terrain with angular sensor error

5・5 段差歩行 3D シミュレーション

本節では段差を乗り越える不整地歩行において仮想インピーダンス姿勢制御手法の有効性を確認する．図 14 に示される段差が存在する問題について外乱の影響および姿勢制御の有効性を検証する．図 15 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 40mm である．6 脚ロボットは，この段差を軌道設計において 1 歩 12cm，1 周期 20s の 10 周期 200s で乗り越える問題とする．また，胴体重心位置が段差上に存在する場合には，胴体高さの目標値を段差分だけ加算し，胴体重心位置と歩行面との高さは一定値とする．さらには，3D シミュレーション結果では，段差が存在すること，および歩幅の制御には旋回部および脛部の PD 制御の応答結果が影響すること等により歩幅は 12cm とはならない． x 方向およびヨー角方向にもロボット胴体は変位する．ピッチ角，ロール角の目標値は零とする．3D シミュレーションは①腿部関節角度に角度誤差として $+0.2\text{rad}$ が存在する場合，②角度誤差が存在しない場合，および③，文献(7)で示す，式(4)のモデルで 1 型のサーボ系を構成して支持脚の FB 力目標値を求め，式(3)のヤコビ行列を用いて腿部リンクの駆動トルクとするアクチュエータのダイナミクスを考慮しない場合，について行った．③の手法では常に腿部リンクの正確な関節角度情報が必要となることに注意されたい．3D モデルを用いたシミュレーション結果を図 16 に示す．段差上に脚が存在する周期は，①の場合，脚 I と II は，1 周期～4 周期，脚 III と IV は 3～6 周期，脚 V は 5～8 周期，脚 VI は 4～7 周期，②の場合，脚 I と II は，1 周期～5 周期，脚 III は 3～7 周期，脚 IV は 3～6 周期，脚 V と VI は 5～8 周期，③の場合，脚 I と II は，1 周期～5 周期，脚 III は 3～8 周期，脚 IV は 3～6 周期，脚 V は 5～10 周期，脚 VI は 4～8 周期となっている．また，①と②の場合の設計パラメータとなる重み行列は，1 周期 20s としたので， $Q = \text{diag}(10^6, 10^6, 10^6, 0, \dots, 0)$ とした．また，③の場合には， $Q = \text{diag}(10^5, 10^5, 10^5, 0, \dots, 0)$ とした．図 16(a)～(c)に胴体高さ，ピッチ角およびロール角の時間応答波形(0～200s，10 周期)，図 16(d)～(f)にはそれぞれ Leg I と II，Leg III と IV，Leg V と VI の実際の腿部関節角度の時間応答波形(0～200s，10 周期)を示す．図 16(a)～(c)で，赤の実線は①，青の破線は②，黒の点線は③の場合である．また，図 16(d)～(f)の図中の実線は①，破線は②，点線は③の場合である．赤，青，緑の線は Leg I，IV，V の組み合わせ，マゼンタ，シアン，黒の線は Leg II，III，VI の組み合わせを図 11(d)～(f)と同様に示している．図 16 より，①および②の場合ともに支持脚切り替え時において，支持脚の段差および腿部角度信号の誤差の影響により姿勢変動が現れているが，その後，姿勢制御が有効に働き，目標値に収束している．図 16(d)および(f)の脚角度の時間応答波形では，脚 I および II が段差に載っている 10～50s，段差から降りている 90～140s，脚 V および VI では，段差に載る前の 50～90s，段差に載っている 130～170s の区間において，段差の影響で角度偏差が生じているのがわかる．一方，③の場合には，支持脚 10s の間では目標値に収束せず，歩行 10 周期でみると，振動的な応答となっている．特に段差から降りる 130s～190s では姿勢変動が大きい．これは，図 16(d)～(f)の腿部角度の時間応答波形からも，①および②では，初期変動は大きいですが，目標の姿勢となるように値が収束しているが，③では変動が大きくなっている．このことより，仮想インピーダンス姿勢制御では，6 脚ロボットがステップ状の段差に載っている場合にも腿部角度における外乱による角度偏差に対してその影響を小さくし，目標の姿勢に制御できていることがわかる．

6. 結 言

本研究では広瀬らが提案する脚機構を有する 6 脚ロボットの腿部脚角度に信号誤差および段差等の不整地歩行

Fig.14 Case of irregular terrain

Fig.15 Top view of existing step obstacle

Fig.16 3D simulation results of walking on irregular terrain

で生じる偏差が存在する場合に、これらの信号誤差および角度偏差を外乱と考え、外乱が胴体姿勢に及ぼす影響および仮想インピーダンス姿勢制御の外乱抑圧性について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 6 脚ロボットの不整地歩行で生じる腿部リンクの角度偏差および角度センサに生じる誤差信号を外乱としてモデル化し、角度偏差をステップ外乱とした場合に、外乱に対して有効な 1 型の最適サーボ系となる仮想インピーダンス姿勢制御手法を示した。
- (2) 実機を用いた平地での足踏み実験を行い、腿部角度にステップ関数の誤差信号を付加した場合に、踏み換え直後には誤差信号の影響で姿勢変動が現れるが、十分に時間が経過すれば姿勢制御により誤差信号の影響を小さくし、姿勢の目標値に収束することを確認した。
- (3) 踏み換え実験の結果を基に、歩行周期を 20s として、腿部関節角度に誤差信号を付加した場合の平地での 3D 歩行シミュレーションおよび歩行実験を行った。3D シミュレーションおよび歩行実験とも支持脚切り換え後に腿部リンク角度に付加した誤差信号の影響で姿勢変動が現れるが、その後、姿勢制御が有効に働いて誤差信号の影響を抑え、姿勢の目標値に収束することを確認した。また、3D シミュレーション結果と歩行実験結果において、胴体姿勢変動および支持脚腿部関節角度の応答の傾向はほぼ一致することを確認した。
- (4) 3D モデルを用い段差を乗り越える歩行シミュレーションを行った。腿部角度に誤差信号を付加した場合、腿部角度に誤差信号が無い場合とも、腿部リンクの角度偏差および誤差信号により、支持脚切り換え後に姿勢変動は現れるが、その後、姿勢制御が有効に働き、誤差信号が存在する場合、存在しない場合ともに角度偏差および誤差信号の影響を抑え、目標とする姿勢に制御でき、凹凸地形でも胴体姿勢を保ってスムーズに歩行できることを確認した。

今後は、実機による凹凸地形歩行の検証、対応可能な高低差の検証を行う必要がある。

謝 辞

本研究の 6 脚ロボットは、科研費(18510151)の助成を受けて製作した。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Celaya, E. and Porta, J.M., "A Control Structure for the Locomotion of a Legged Robot on Difficult Terrain", *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, Vol.5, No.2(1998),pp.43-51.
- (2) Saranli, U., Buehler, M. and Koditschek, D. E., "RHex : A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot", *International Journal of Robotics Research*, Vol.20,No.7 (2001),pp.616-631.
- (3) Qingjiu H., Fukuhara Y. and Xuedong C., "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.
- (4) Irawan, A. and Nonami K. "Compliant Walking Control for Hydraulic Driven Hexapod Robot on Rough Terrain", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.23,No.1 (2011),pp.149-162.
- (5) Kamikawa, K., Takubo, K., Mae, Y., Inoue, K and Arain, T, "Omni-Directional Gait of Multi-Legged Robot on Rough Terrain by Following the Virtual Plane", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.24,No.1 (2012),pp.71-85.
- (6) 米田完, 飯山浩幸, 広瀬茂男, "4 足歩行機械のスカイフックサスペンション制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7 (1994), pp. 1066-1071.
- (7) 内田洋彰, 野波健蔵, "6 足歩行ロボットの姿勢制御実現するフィードバック力指令値生成法", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 685 (2003), pp. 2315-2322.
- (8) 広瀬茂男, 有川敬輔, "研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8 (1999), pp. 1191-1197.
- (9) 内田洋彰, "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", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 772 (2010), pp. 3680-3688.
- (10) 内田洋彰, 野波健蔵, 井口良彦, 黄慶九, 家内孝彰, "自己修復制御機能を有する 4 足歩行ロボットの部分モデルベース型歩行制御", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 646 (2000), pp. 1867-1875.
- (11) 中野道雄, 美多勉, "制御基礎理論 (古典から現代まで)", 昭晃堂(1982), pp. 193.