6足歩行ロボットの姿勢制御を実現する フィードバック力指令値生成法*

内田 洋彰^{*1}, 野波 健蔵^{*2}

Generating Method of Feedback Force Reference Signal Realizing Attitude Control of Six-Legged Robot

Hiroaki UCHIDA^{*3} and Kenzo NONAMI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kisarazu National College of Technology,
2-11-1 Kiyomidai-higashi, Kisarazu-shi, Chiba, 292-0041 Japan

Recently, land-mine clearance activities have been addressed in the world. We've proposed the mine detecting method using six-legged robot. Concerning the mine detecting work by legged robot on the mine field where is uneven terrain, the legged robot is demanded the stable mine detecting work. In this research, we propose a new two generating method of feedback force reference signal in the case that the attitude of the six-legged robot is controlled by force control. First method is to extend Sky Hook Suspension Control, which is a useful attitude control method for a quadruped robot, to a six-legged robot. Second method is optimal servo control. The proposed attitude control method is examined by 3-D simulations of mine detection robot COMET-I and the experiments of mine detection six-legged robot COMET-II.

Key Words: Six-Legged Robot, Attitude Control, Force Control, Optimal Servo Control, 3-D Simulation, Experiments

1. 緒 言

現在, 世界中には多くの地雷が埋設されており, 埋設国の経済発展を大きく阻害している。その数は数千万から1億個以上と言われ, 地域紛争が起きるたびにその数は増えている。撤去作業が精力的に行われているが, その作業の多くは人力による作業であり, 人力撤去作業ではすべての地雷を撤去するのに数百年かかる計算になる。人間による地雷探知および除去作業はとても危険であり, 作業効率も低い。このような極限環境下での作業にこそロボット技術が活用され, 人間の安全な住環境を構築するロボットによる地雷探知・除去作業が世界的に注目されている⁽¹⁾。

ロボットによる地雷探知を実現するために, われわれの研究グループは地雷探知用6足歩行ロボットを開発した。開発した地雷探知用6足歩行ロボットは, ロボット頭部に2本のマニピュレータを有しており, 片方の腕には, 金属探知機と地中レーダの複合型地雷探

知機を有している。また, GPSも有しており, 地雷を探知した場所を2cmの誤差でマップ化することができる。現在までに, 進行方向に障害物が存在した場合には, 障害物を回避して歩行する歩行アルゴリズム⁽²⁾, 地雷探知機が地雷を発見した場合に, 地雷を回避して歩行する歩行アルゴリズム⁽³⁾などを実現している。

地雷探知作業においては, 安定な姿勢を保ちながらの作業が重要となる。地雷原は不整地であり, 歩行ロボットの姿勢を常に一定に保つには, 姿勢制御が必要不可欠である。これまでの6足歩行ロボットに関する研究として, Jung-Minらは6脚の脚の1本が損傷した場合に歩行できない部分を避けて歩行する歩容計画について検討している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また, 歩行はパターン発生器と反射の組合せで行われていることから, Braught⁽⁶⁾, Espenshied⁽⁷⁾らは生物規範型の手法について検討している。しかし, 不整地での姿勢制御に関して検討した報告はほとんどなされていないようである。姿勢制御を実現する場合, 脚リンクの軌道を生成し, 目標軌道に追従するように制御する手法と支持脚に作用する力を制御する手法が考えられる。未知環境下で軌道を生成することは非常に非効率であるので一般的には力制御が有効となる。力制御を行う場合, 力指令値の決定方法が重要となる。歩行ロボットの場

* 原稿受付 2002年11月15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)。

^{*2} 正員, 千葉大学工学部(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。

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

合、支持脚鉛直方向の力指令値が小さいとロボット胴体は沈み、逆に大きいとロボット胴体が上昇し、脚が突っ張る状態となる。また、支持脚位置により胴体のピッチ角およびロール角変動も大きくなる。

本研究では、力指令値の生成法として、二つの方法を提案する。具体的には、最初に、米田らによって提案された4足歩行ロボットのスカイフックサスペンション制御(SHSC)⁽⁸⁾を6足歩行ロボットの姿勢制御手法に拡張する。5脚および4脚步行の場合、支持脚の力指令値が一意に決定されないで、仮想脚を設定することにより、支持脚の力指令値を一意に決定できることを示す。次に、各脚の支持脚に作用する鉛直方向の力を入力とし、ロボット胴体の姿勢を出力とする数学モデルを導き、姿勢変動を最小にするフィードバック制御器により支持脚の鉛直方向の力指令値を生成する方法を示す。最後に、提案する制御手法の有効性をDADS/Plant(The Dynamic Analysis and Design System/Plant)上に構築した三次元モデルおよび実機を用いて確認する。また、力センサを用いずに胴体の姿勢センサのみで力制御ベースの姿勢制御を実現できることを示す。

2. 地雷探知用6足歩行ロボットおよび3-Dモデル

図1に地雷探知用6足歩行ロボットCOMET-IIの概観を示す。本研究では、地雷原が不整地であり、ロボットが安定した探知作業を行うことを考慮して6足歩行ロボットを用いている。脚1脚は旋回部、腿部、すね部の回転3自由度を有し、直流モータでそれぞれ駆動している。足首部はばねによるパッシブな2自由

Fig. 1 Mine detection six-legged robot COMET-II

度を有しており、接地面に常に足の平全体で接地する機構となっている。ロボット本体の重量は120 kg、幅は1380 mm、長さは1240 mm、高さは600 mmである。各脚先には、歩行ロボットが不整地で柔軟な歩行を実現するためには必要な六軸の力センサが取付けられている。また、本プロジェクトでは人間が遠隔からロボットに作業命令を与える半自立歩行での地雷探知作業を目指しているので、ロボットが作業している外界情報を取り込む1個のCCDカメラ、1個の超音波センサが胴体前面部に取付けられている。さらには、不整地での安定した作業および歩行を実現するために胴体のピッチ角およびロール角を検出する姿勢センサを有している。

また、このロボットの双腕を有していないCOMET-Iの三次元モデルを用い、提案する制御手法の有効性を確認するために3Dシミュレーションを行う。図2に三次元モデルを示す。

3. 歩行計画

図3に6足歩行ロボットの脚番号を示す。また、図4に本研究で用いた6足歩行ロボットの歩行パターンを示す。図4(a)は5脚支持による歩容、図4(b)は4脚支持の後方ウェーブ歩容である。本研究では、6足歩行ロボットが不整地において安定した地雷探知作業

Fig. 2 3D CAD model of mine detection six-legged robot COMET-I

Fig. 3 Number of leg

および歩行を実現する姿勢制御手法について検討するため、姿勢が安定する5脚および4脚の姿勢制御手法について検討する。3脚支持による交互3点接地歩容には、SHSCを適用することにより姿勢の安定化を行うことができる。

4. 姿勢制御

4.1 拡張スカイフックサスペンション制御 (ESHSC)によるフィードフォワード(FF)の力指令値

本章では、歩行ロボットが不整地での歩行および地雷探知作業において必要不可欠と考えられる姿勢制御手法について検討する。多足歩行ロボットの姿勢制御手法として米田らによって提案された4足歩行ロボットの姿勢制御手法であるSHSCが有効な手法と考えられる。SHSCは胴体のピッチ角、ロール角および接地面からの胴体高さを目標値となるように各脚の鉛直方向の力を制御する手法である。この場合、支持脚は3脚で、支持脚が形成する支持多角形内にロボット重心の投影点が存在することが条件である。本研究で用いる歩行ロボットは6足歩行ロボットであり、歩行形態としては、5脚支持および4脚支持の歩行であるのでSHSCを適用する場合、2脚および1脚が冗長となる。そこで、5脚および4脚歩行における力指令値の生成方法について検討する。

図5に5脚と4脚支持歩行の場合にSHSCを適用する方法を示す。5脚歩行では、遊脚から離れている3脚を用いて仮想脚を設定する。4脚歩行でも同様に、支持脚が近接している2脚を用いて仮想脚を設定する。図5において●および⊕印は支持脚で、⊕印は仮想の支持脚●を形成する支持脚である。○印は遊脚を示す。この結果、SHSCは●の支持脚2脚と●の仮想の支持脚の3脚に適用することとなる。

Fig. 4 Walking pattern

仮想脚(l_{im})を用いた場合の支持脚と仮想脚への力指令値を求める手順について最初に述べる。仮想脚を構成する脚(⊕印)の座標を(x_{si}, y_{si}, z_{si})($i=1\sim3, n=2, 3$)とすると仮想脚(●印)の座標(x_{im}, y_{im}, z_{im})は

$$x_{im} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{si}}{n}, y_{im} = \sum_{i=1}^n \frac{y_{si}}{n}, z_{im} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{si}}{n} \quad \dots (1)$$

となる。歩行ロボットが仮想脚と2本の支持脚の3脚支持で静歩行を行うとすると、歩行面から受ける力とモーメントは、接地力を($\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z$), 重心回りのモーメントを($\bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{M}_z$), 重心の座標を(x_G, y_G, z_G), 2本の支持脚の脚の座標を(x_a, y_a, z_a), (x_b, y_b, z_b)($a, b=1\sim6$), 各脚の鉛直方向の目標接地力を F_{ffi} ($i=a, b, im$), 本体の重量を M_g とすると、以下の式で表される。

モーメントの釣合ひ式

$$(x_a - x_G)F_{ffa} + (x_b - x_G)F_{ffb} + (x_{im} - x_G)F_{ffim} = -\bar{M}_y \quad \dots (2)$$

$$(y_a - y_G)F_{ffa} + (y_b - y_G)F_{ffb} + (y_{im} - y_G)F_{ffim} = \bar{M}_x \quad \dots (3)$$

Fig. 5 Triangle by supporting legs of attitude control

接地力と自重の釣り合い式

$$F_{ffa} + f_{ffb} + F_{ffim} - M_g = \bar{F}_z \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。以上の3式から、1本の仮想脚と2本の支持脚の目標接地力 F_{ffa} は、

$$F_{ffa} = \frac{\bar{M}_x(x_b - x_{im}) + \bar{M}_y(y_b - y_{im}) + \{y_b x_{im} - y_{im} x_b + y_c(x_b - x_{im}) + x_c(y_{im} - y_b)\}(\bar{F}_z + M_g)}{x_a(y_{im} - y_b) + x_b(y_a - y_{im}) + x_{im}(y_b - y_a)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。 F_{ffb} および F_{ffim} も同様に求められる。

次に、図6に仮想脚の力指令値を、仮想脚を構成した脚に分配する方法を示す。仮想脚を構成した脚の重心からの距離を $(l_{xi}, l_{yi})(i=1\sim 3, im)$ とする。この場合、自重とモーメントに関して仮想脚と仮想脚を構成した脚との関係式は以下のようになる。

(a) 3脚で仮想脚を構成した場合

モーメントの釣り合い式

$$l_{xi}F_i = l_{x1}F_1 + l_{x2}F_2 + l_{x3}F_3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$l_{yi}F_i = l_{y1}F_1 + l_{y2}F_2 + l_{y3}F_3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

接地力の釣り合い式

$$F_i = F_1 + F_2 + F_3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

(b) 2脚で仮想脚を構成した場合

モーメントの釣り合い式

$$l_{xi}F_i = l_{x1}F_1 + l_{x2}F_2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$l_{yi}F_i = l_{y1}F_1 + l_{y2}F_2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

接地力の釣り合い式

$$F_i = F_1 + F_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

3脚で仮想脚を構成した場合、関係式は式(6)～(8)となり、 $F_1 \sim F_3$ について解けば、仮想脚を構成した支持脚の力指令値を求めることができる。2脚で仮想脚を構成した場合、関係式は式(9)～(11)となるが、決定しなければならない力指令値は、 F_1 と F_2 の二つであるので関係式が一つ多くなる。この場合に、ロール角がピッチ角より大きい場合には、ロール角を小さくするように式(9)と式(11)の2式より目標の力指令値 F_1 と F_2 が決定でき、逆にピッチ角がロール角より大きい場合には、ピッチ角を小さくするように式(10)と式(11)の2式より目標の力指令値 F_1 と F_2 が決定できる。

上記の手法により、6足歩行ロボットの5脚支持お

Fig. 6 Force distributions of imaginary leg to supporting legs

および4脚支持歩行においてSHSCを実現する支持脚の力指令値を求めることができる。

上記で求めた脚先の力を実現する各関節の駆動トルク τ_f はヤコビ行列 J_r を用いると次式となる。

$$\tau_f = J_r^T F_{ffi} \quad \dots\dots\dots (12)$$

4・2 ESHSCによるフィードバック(FB)の力指令値 歩行ロボットは、非常に外乱の影響が大きいためFFの力指令値のみでは姿勢変動が非常に大きくなり、歩行時の安定性が問題となる。そこで、支持脚の状態が胴体の姿勢に影響を与えることから胴体の歩行面からの高さ、ピッチ角およびロール角を検出し、支持脚の各脚にFBの力指令値を与えることにより姿勢の安定化をはかる。この手法では、胴体重心位置の高さ(z)、ピッチ角(θ_p)およびロール角(θ_r)は姿勢センサで検出できるものとする。また、脚先にはタッチセンサが装着されていると仮定する。FBの駆動トルク τ_b は胴体の姿勢に関してインピーダンスを設定しそれより求める。胴体のピッチおよびロール軸回りのモーメントと胴体重心の位置に偏差が生じた場合の修正に必要なモーメント $\Delta M_x, \Delta M_y$ および鉛直方向の力 ΔF_z を

$$\Delta M_x = -D_x \dot{\theta}_p - K_x \theta_p \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\Delta M_y = -D_y \dot{\theta}_r - K_y \theta_r \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta F_z = -D_z \dot{z} - K_z \Delta z \quad \dots\dots\dots (15)$$

のように設定する。ただし、 $K_x, K_y, K_z, D_x, D_y, D_z$ は、胴体に設定する各軸のばね定数と減衰定数である。各脚のFBの力指令値は式(5)において $\bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{F}_z$ を式(13)～(15)中の $\Delta M_x, \Delta M_y, \Delta F_z$ と置き換えることにより求められる。駆動トルク τ_b は式(12)により求められる。また、本研究で用いられる力制御手法は力指令値が胴体姿勢により常に変化するため、力フィードバック制御系を組む必要はなく、姿勢センサのみで力制御を実現している。COMET-IIは力センサを有しているが、本研究では、タッチセンサとしてのみ使用している。

4・3 最適サーボ系によるFBの力指令値 4・2節の手法では、支持脚のFBの力指令値が仮想脚を用いないと一意に決定されない。そこで、4・3節では、入力として、支持脚の鉛直方向の力、出力としてロボット胴体の重心位置の高さ、ピッチ角およびロール角を出力とする数学モデルを導き、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を目的の値に制御するFBの力指令値生成制御器を設計する。

6足歩行ロボットが6脚支持の状態を考える。支持脚の鉛直方向の力を $F_i (i=1\sim 6)$ 、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 、支持脚の水平面における座標を $x_i, y_i (i=1\sim 6)$ 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。

$$\begin{cases} M\ddot{z} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 - Mg \\ I_p\ddot{\theta}_p = y_1F_1 + y_2F_2 + y_3F_3 + y_4F_4 + y_5F_5 + y_6F_6 \\ I_r\ddot{\theta}_r = x_1F_1 + x_2F_2 + x_3F_3 + x_4F_4 + x_5F_5 + x_6F_6 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)は次式の状態方程式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_r \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta_p \\ \theta_r \\ \dot{z} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/M & 1/M & 1/M & 1/M & 1/M & 1/M \\ y_1/I_p & y_2/I_p & y_3/I_p & y_4/I_p & y_5/I_p & y_6/I_p \\ x_1/I_r & x_2/I_r & x_3/I_r & x_4/I_r & x_5/I_r & x_6/I_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)は一般的に次式で表される。

$$\dot{x} = Ax + Bu + dg \quad (18)$$

式(18)のシステムに対して、目標値に偏差なく追従する次式で表されるサーボ系を設計する。

$$\begin{cases} \dot{z} = r - cx \\ \dot{x} = Ax + Bu + dg \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 z は目標値ベクトル r と出力ベクトル y との誤差ベクトルである。式(19)を行列表現すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -c \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ d \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (20)$$

式(20)は次式のように表される。

$$\dot{x}_g = A_g x_g + B_g u + d_g g + f_g r \quad (21)$$

支持脚のFBの力指令値 u_b は、次式の評価関数を最小にするように求められる。

$$J = \int_0^\infty [x_g(t)^T Q x_g(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (22)$$

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(22)を最小にする制御入力 u_b^0 は次式となる。

$$u_b^0 = -R^{-1}B^T P x \quad (23)$$

ここで、 $P(n \times n)$ は次式のリカッチ方程式を満足する

Fig. 7 Block diagram of optimal servo system

解である。

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (24)$$

図7に最適サーボ系のブロック線図を示す。

本研究で提案する姿勢制御手法は、脚に作用する鉛直方向の変動反力がロボット胴体の姿勢変動として現れることに着目しており、姿勢変動に現れない変動反力は胴体姿勢に影響を及ぼさないことになる。また、提案する姿勢制御手法が不安定になるのは、ロボット胴体の重心の投影点が支持脚が作る支持多角形の外側に出る場合である。

上記2種類の制御手法において、ESHSCでは、最適サーボ系と比較して数学モデルを求める必要がなく、フィードバックゲインの決定も容易であることから、6足歩行ロボットの制御に容易に実装することができる。

5. シミュレーション

5.1 不整地を想定した階段状の障害物

5.1節では、図8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9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10 mmである。6足歩行ロボットは、この段差を1歩20 mm、1周期6 sの10周期60 sで乗り越える問題とする。脚IとIIは5脚支持歩行では、1周期から5周期まで段差状に存在する。4脚支持歩行では、1周期から4周期までである。脚IIIとIVは5脚支持歩行では3～7周期、4脚支持歩行では3～6周期、脚VとVIは5脚支持歩行では5～9周期、4脚支持歩行では、脚Vが5～8周期、脚VIが6～9周期となっている。本研究では、歩行面に多少の凹凸はあるが、ほぼ平坦な土地を歩行する場合の力指令値生成法の有効性を検証するた

めに段差を不整地の一例としている。傾斜面や支持脚が受ける接地面からの反力が胴体に対して垂直方向でない場合は本手法をベースとした力指令値生成法の検討が必要である。

5.2 不整地歩行シミュレーション 姿勢制御は支持脚に作用する鉛直方向の力を制御するため、各脚の腿部リンクについてののみ力制御を行う。旋回部とすね部は目標軌道に追従する位置制御で行う。また、腿部リンクについては支持脚時には力制御を行うが、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替える。また、FFの力指令値はあらかじめ設計した軌道計画に基づいてESHSCにより求められた力指令値を用いる。3DのCADを用いたシミュレーション結果を図10および図11に示す。図10はESHSCでの4脚支持歩行におけるシミュレーション時間が8.0s、28.0sおよび50.5sでのアニメーションを示す。ESHSCにおいては $(K_x, K_y, K_z, D_x, D_y, D_z) = (10^5, 5 \times 10^5, 5 \times 10^5, 10^3, 10^3, 10^3)$ 、最適サーボ系では、式(22)における重み行列 Q および R は $Q = \text{diag}(10^{13}, 10^{13}, 10^{13}, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ お

よび $R = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1)$ とした。また、5脚歩行および4脚歩行ともに1周期を六段階に分け、例えば脚Iが遊脚のときには、式(17)において $F_1 = 0$ とする。数学モデルを導出する場合には、軌道計画において脚Iの遊脚が、遊脚開始地点と遊脚終了地点との中間地点での支持脚の (x_i, y_i) 座標から数学モデルを導出する。その結果、数学モデルは六組のモデルとなり、支持脚が切替わるごとに制御系のFBゲインが変わることとなる。アニメーション結果より、支持脚が段差上にある場合には、腿部リンクが、段差上にない場合と比較して、上部に上がっており、姿勢制御により生成された力指令値による力制御が有効に働いているのがわかる。また、図11(a)～(c)に5脚支持歩行における胴体のピッチ角、ロール角および胴体高さの変動を示す。図中において実線がESHSC、点線が最適サーボ系である。目標値は $(\theta_p, \theta_r, z) = (0, 0, 0)$ とした。ESHSCおよび最適サーボ系ともピッチ角およびロール角ともに目標の零に制御されており、段差の影響が現れていないことがわかる。胴体高さにおいては、

Fig. 8 Case of uneven terrain

Fig. 9 Top view of existing step obstacle

(a) Animation at 8.0 s

(b) Animation at 28.0 s

(c) Animation at 50.5 s

Fig. 10 Animations in the case of existing a step obstacle

ESHSC では、整地歩行の場合と同様に約 1 mm の定常偏差が生じているが、段差の影響は見られない。最適サーボ系では 3 変数とも零に制御されており、サーボ系が有効に働いているのがわかる。このことより、制御性能を向上させるには、ESHSC よりも最適サーボ系が有利であることもわかる。

(a) Pitching angle

(b) Rolling angle

(c) Height of body

Fig. 11 3D Simulation results of 5 supporting legs on uneven terrain

6. 実験

本研究で提案する姿勢制御手法の有効性を検証するため、図 1 で示した 6 足歩行ロボット COMET-II で実験を行った。COMET-II は、ロボット前部に双腕のマニピュレータを有しているため、ロボットの重心位置が胴体中央から 0.12 m 前部へ移動している。遊脚の時間は 2 s とし、1 周期は 12 s で実験を行った。図 12 および図 13 に ESHSC と最適サーボ系において 5 脚支持歩行で歩行実験を行った場合の実験結果を示す。ESHSC では、 $(K_x, K_y, K_z, D_x, D_y, D_z) = (10^5, 5 \times 10^5, 5 \times 10^5, 10^3, 10^3, 10^3)$ とし、最適サーボ系では重み行列を $Q = \text{diag}(5 \times 10^4, 5 \times 10^4, 5 \times 10^4, 0, 0, 0, 0, 0)$ および $R = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$ とした。シミュレーションと比較して実験での最適サーボ系での重み係数を小さくしたのは、モータおよびロボットの脚機構に過大な負荷がかかるのを避けたためである。図 12(a) および(b)は ESHSC のピッチ角およびロール角の歩行 3 周期における時刻歴応答である。図 13 は最適サーボ系での時刻歴応答である。また、実験では、歩

(a) Pitching angle

(b) Rolling angle

Fig. 12 Experimental results of 5 supporting legs in ESHSC

Fig. 13 Experimental results of 5 supporting legs in optimal servo control

行面に厚さ 3 cm の段差を設け、脚IVとVが2周期めに段差に乗り、3周期めで段差を降りる不整地歩行も行った。図中において点線が段差のない整地歩行、実線が段差を乗り越える不整地歩行の結果である。ESHSC では、ピッチ角の変動が脚を切替える際に現れているが、ピッチ角およびロール角ともに零に制御されているのがわかる。段差の影響もほとんど見られない。最適サーボ系では、重み係数を小さくしたため、胴体の変動が大きくなっているが安定した歩行を実現している。上記のことから本研究で提案する ESHSC と最適サーボ系による姿勢制御手法が 6 足歩行ロボットの姿勢制御手法として有効であることがわかる。

7. 結 言

本研究では、地雷探知用 6 足歩行ロボットが安定した地雷探知作業を行う場合に、胴体姿勢を安定にする姿勢制御を力制御ベースで行う場合の力指令値生成法について検討した。最初に、FB の力指令値生成法として仮想脚を用いた ESHSC と数学モデルを基に最適サーボ系を設計する手法を示した。次に、設計した力指令値生成法の有効性を確認するために、COMET-I の 3D モデルで、不整地歩行を行った。また、COMET-II において歩行実験も行った。その結果、提案する ESHSC および最適サーボ系を用いた

姿勢制御を実現する力指令値生成法の有効性を確認した。また、胴体本体の姿勢センサのみで力制御を実現できることも示した。

文 献

- (1) 野波健蔵, 地雷探知ロボットの開発, 検査技術, (2000), 28-33.
- (2) 小溝大介・野波健蔵, レーザ変位計を用いた地雷探知用 6 足歩行ロボットの障害物回避, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2001-9), 321-322.
- (3) 深尾洋一郎・野波健蔵, 地雷探知ロボットの軌道追従とインピーダンス制御, 機論, 69-679, C(2003), 662-668.
- (4) Yang, J. M. and Kim, J. H., Fault-Tolerant Locomotion of the Hexapod Robot, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. B*, 28-1 (1998), 109-116.
- (5) Yang, J. M. and Kim, J. H., A Fault Tolerant Gait for a Hexapod Robot over Uneven Terrain, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. B*, 30-1 (2000), 172-180.
- (6) Braught, G. W. and Thomopoulos, S. C. A., Adaptive Control of Leg Coordination in a Hexapod Robot Using a Biologically Inspired Heterogeneous Neural Network, *Int. Jour. Intelligent Control and Systems*, 12-1 (1998), 93-110.
- (7) Espenschied, K. S., Quinn, R. D., Beer, R. D. and Chiel, H. J., Biologically Based Distributed Control and Local Reflexes Improve Rough Terrain Locomotion in a Hexapod Robot, *Robotics and Autonomous Systems*, 18-1, 2 (1996), 59-64.
- (8) 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, 12-7 (1994), 1066-1071.