

異なる起伏の地形を移動する6脚ロボットのトライポッド歩容

佐藤 悠^{*1}, 井上 健司^{*2}

Tripod gait for six-legged robots walking on undulating terrain

Yu SATO^{*1} and Kenji INOUE^{*2}^{*1,*2} Department of Bio-Systems Engineering, Yamagata University
4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata 992-8510, Japan

Received 2 August 2016

Abstract

A method for a six-legged robot of walking on terrain with various undulations by tripod gait is proposed. First the robot detects foot landing using touch sensors, and estimates the inclination angle of the ground from the landing positions; the estimated ground is called “reference ground”. Second the robot measures the inclination angle of its body using acceleration sensor. Then the legs move up and down so that the body may be parallel to and may keep a constant distance from the reference ground. If the robot encounters deep depressions or downward slopes, the robot suspends walking and actively inclines the reference ground. As a result the body inclines, and the swing leg goes further down. When the swing leg reaches the ground, the robot restarts walking. Due to the feedback gain of body orientation control, the robot does not respond to fine change of undulation. Hence the body keeps a constant orientation on short distance undulation or rugged surface, and gradually inclines its body on long distance undulation such as slopes and stairs. The ability of climbing up and down slopes and steps in longitudinal and transverse directions is evaluated by experiments. The maximum angle of climbing up slopes is 30 degree, and that of climbing down slopes is 40 degree. The maximum height of climbing up steps is 150 mm, and that of climbing down steps is 180 mm. The robot can also go through a bump of 125 mm width and 60 mm height.

Key words: Six-legged robot, Tripod gait, Irregular terrain, Slope climbing, Step climbing

1. 緒 言

近年、地震、台風による建物の倒壊、土砂崩れなどの災害が、数多く発生している。災害現場は危険を伴うため、人命救助や遭難者の探索等を、人の代わりに行うことができるロボットが必要とされている。そのような環境でロボットが行動するには、様々な地形を踏破できる高い移動能力と、障害物を取り除く、必要物資を運ぶなどの作業能力が求められる。これまでに、障害物除去を行う双腕を搭載したクローラ型移動ロボット(羽澤他, 2012)や、双腕マニピレータを搭載した車輪型倒立振り子ロボット(佐藤他, 2013)、伸縮マニピレータ機構を搭載した移動ロボット(折戸他, 2014)などの研究が行われている。これらは、移動専用の移動機構と作業専用の腕機構がわかれているため、それぞれに特化した設計ができるという利点がある。しかし、移動のみを行うとき、腕は使用されないため、ロボットにとっては重量負荷でしかない。重量負荷を減らすために腕の数を少なくすると、複雑な作業への対応が困難となる。よって、移動専用の脚と作業専用の腕を用いる場合、移動能力と作業能力の両方を高めるようすると脚と腕の本数が多くなり、ロボットの重量化・大型化を招く恐れがある。これに対して、田窪らは腕脚統合型ロボット ASTERISK を開発した(田窪他, 2005, Takubo et al., 2006)。腕脚統合型ロボットは、腕と脚の機能を併せ持つ「リム」を複数備えており、各リムが状況に応じて腕機能と脚機能を切り替える。そのため、トータルのリムの本数を抑えてロボットの小型軽量化を図りつつ、高い移動能力・作業能力を発揮できる。ASTERISK は、6 本のリムをボディから放射状に配置した構造となっている。我々は、ボディに対す

るリムの取り付け位置を工夫することで、脚移動と腕作業の3つのモードを有する6脚作業移動ロボットを開発し、その移動能力・作業能力を拡大する研究を行っている(井上, 大江, 2008, Inoue et al., 2010, 笹岡, 井上, 2016, 竹田, 井上, 2016).

一般に、脚ロボットは対地適応性が高く、不整地での利用が期待されている。4脚ロボットが不整地移動を行うときには、安定性の高い移動が求められる。そのため、クローラ歩容をはじめとした多くの歩行法に関する研究が行われている。ニューラルネットワークを用いたCPGによる歩行法(Gay et al., 2013)や、障害物を考慮した目標位置へとボディを制御する歩行法(Ajallooeian et al., 2013)、脚に3Dバネダンパーモデルを採用した歩行法(Tran et al., 2012)、障害物の乗り越えや飛び石を渡る歩行法(Loc et al., 2009)、地形を推定して持ち上げた脚を降ろす位置を選定する歩行法(Havoutis et al., 2013)、安定性の高い地形を学習させて歩行ルートを選定する歩行法(Zucker et al., 2010)などが提案されている。広瀬らは、不整地歩行に適した直動脚とボディを有する4脚ロボットを開発した(広瀬他, 1991)。Komatsuらは、多関節脚の4脚ロボットにおいて、ボディを傾けてエネルギーを最小化する方法を提案した(Komatsu et al., 2015)。東日本大震災で被災した福島第一原子力発電所には、菅沼らが開発した4脚歩行ロボット(菅沼他, 2013)が実際に使用された。6脚ロボットの場合、1本おきの3脚を組にして2組を交互に動かすトライポッド歩容は、安定領域がボディを中心に広がっているため、安定性が高い。よって、多少の凹凸がある地面でも、脚の上下運動を変えずに、平地と同様に脚を動かすだけで歩行できる。しかし、凹凸が激しい未知不整地の場合、脚の上下運動を変えないと、遊脚は、凸部に接地しても下がり続け、凹部では接地していないのに下げるのを止めてしまう。その結果、3脚接地ができず、ボディが上下に動いたり傾いたりして、不安定な歩行になる。また、ボディを水平にして遊脚を上下するだけでは、斜度が急激に変化する斜面や大きい段差を踏破することは難しい。これは、遊脚を高く上げて凸部に接地できてもボディが衝突する場合や、遊脚を限界まで下げて凹部に接地できない場合があるためである。Kamikawaらは、接地した3脚の先端位置を通る仮想平面を設定し、ボディが仮想平面と平行になるように脚を上下することで、平地や斜面を歩行するトライポッド歩容を提案した(Kamikawa et al., 2012)。この方法では、ボディを仮想平面に平行にしたまま上下するだけで、積極的に傾けることはしないので、深い凹みや急な下り斜面には対応できない。また、1歩踏み出した際に仮想平面を設定し直すため、地表の凹凸やバンプのような短い起伏に対しても、仮想平面が変化する。仮想平面が変化すると、ボディが仮想平面に平行になるまで歩行を停止する。その結果、凹凸やバンプに反応してボディが揺れ動き、歩行速度も低下する。妻木らは、ボディを水平にしたまま不整地歩行が可能な直動脚の6脚ロボットを開発し、高い踏破能力を実現している(妻木他, 2006)。ただし、我々の目標は、移動に特化した機構を持つロボットの開発ではなく、腕脚統合型ロボットのような多関節脚の脚ロボットに適用可能な歩行法の開発にあるため、異なるアプローチが必要となる。

本研究では、6脚ロボットが、斜面・段差・階段・バンプ・地表の凹凸等の異なる起伏を有する地形をトライポッド歩容で移動する方法を提案する。起伏の程度は未知とする。本研究の第一の特徴は、ボディを傾けることで脚の可動範囲を拡大し、不整地の踏破能力を向上させることである。はじめに、ボディの傾きと高さを制御するための基準となる地面を「基準地面」と呼ぶ。脚先の接触センサを用いて6脚の接地を検出できた場合は、接地位置から求めた近似平面を基準地面とし、その水平面に対する傾き角度を推定する。次に、ボディに取り付けた加速度センサで、水平面に対するボディの傾き角度を計測する。基準地面とボディの傾き角度の誤差および基準地面とボディの距離に基づいて、ボディが基準地面と平行かつ一定距離を保つように脚を上下する。深い凹みや急な下り斜面に遭遇したときは、遊脚を限界まで下降させても接地を検出できない。そこで、ロボットは歩行を一旦停止し、接地できなかった遊脚側を下げる向きに基準地面を傾けていく。その結果、ボディ姿勢制御により、深い凹みや急な下り斜面の側を下げる向きにボディが傾いて、遊脚をさらに降ろすことができる。遊脚が地面に接地したら、ロボットは歩行を再開する。第二の特徴は、起伏の進行方向の長さに応じて、ボディの傾け方を変化させる点である。基準地面とボディの傾き角度の誤差に対するフィードバックゲインを調整することで、1〜2歩程度の進行方向長さで高低が変化するバンプや凹凸面ではボディの姿勢を一定に保ち、斜面や階段といった長距離の起伏では次第にボディを傾け、脚の可動範囲を拡大して踏破する。斜面・段差・バンプを歩行する実験を行い、提案手法の性能を検証する。

2. 6脚作業移動ロボット

2・1 6脚作業移動ロボット

我々が開発している6脚作業移動ロボットを図1に, その寸法と重量を図2に示す. リムの数を6としたのは, 2腕で作業を行いながら, 4脚で静的安定に移動できるためである. このロボットの特徴は, 直方体状のボディの下面4隅に4本のリムを, 上面の片側2隅に2本のリムを配置している点にある. 言い換えれば, ボディの長手方向の片側に4本, 反対側に2本が付いている. 各リムは3自由度で, ロボットは18自由度である. 関節には, ROBOTIS社のサーボモータ Dynamixel MX-106R (角度分解能 0.088[deg], ストールトルク 8.4[Nm]) を使用した. 外部のコンピュータでロボットの動作を生成し, 位置制御された関節サーボモータに RS-485 (通信速度 1M[bps]) を介して指令角度を送り, ロボットを動かす. 指令の周期は 20[ms]である. ロボットは, 外部直流電源 14.8[V] を用いて駆動する. 各リムの先端にはゴム性の半球が付いており, 歩行時には地面に点接地し, 2腕で物体を挟むなど簡単なハンドリングも可能となっている.

上述のリム配置から, ロボットは, リムの腕機能と脚機能の組み合わせが異なる3つの形態(モード)に変化できる. 3つのモードを図1に示す. すべてのリムを脚として用いる6脚モードでは, 高速安定な歩行が可能である. 一方, 物体把持等を考えた場合, 2腕は隣接していたほうがよい. そこで, 水平4脚2腕モードでは, ボディを水平にして前方上側のリム2本を腕に用いる. よって, 4脚状態で低い位置での2腕作業ができる. さらに, 垂直4脚2腕モードでは, ボディを垂直にして上方のリム2本を腕に用いる. 水平モードに比べて安定性は下がるが, 高い位置での2腕作業が可能になる. 目的に応じて3つのモードを切り替える点, 2つの2腕モードにより広い腕作業領域を確保している点が, このロボットの特徴である.

本研究で提案する6脚モードの歩行法は, このロボット特有の方法ではなく, 一般的な6脚ロボットにも適用できる. そこで, 以下では, 「リム」を「脚」と表すことにする.

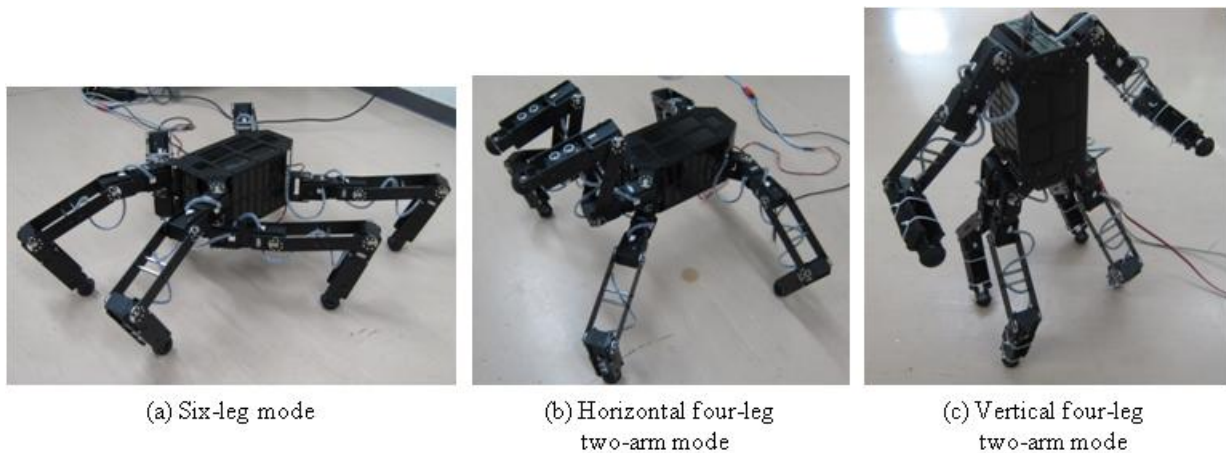


Fig.1 Working six-legged robot which can be transformed into three modes for locomotion and manipulation.

(a) In six-leg mode, the robot walks using six legs fast and stably. (b) In horizontal four-leg two-arm mode, two front legs are used as arms with the body horizontal to the ground. This mode enables manipulation using these arms at low level. (c) In vertical four-leg two-arm mode, the robot stands up with four lower legs. Two upper legs are used as arms with the body vertical to the ground. This mode enables manipulation using these arms at higher level.

2・2 センサ

本研究では, 地形の起伏の程度は未知としている. そこで, 脚の接地を検出するために, 脚先に接地センサを取り付けた. 図3のように, 脚先はバネの入ったピストン構造になっており, 地面に接地すると脚先が押し込まれる. 近接センサで押し込み量を測り, 押し込み量が設定した閾値以上になったら接地検出とする. 使用した近接センサは, ベストテクノロジー社の赤外線反射方式の IRPX センサである. ボディには3軸加速度センサを搭載し, 重力方向を計測してボディの傾き角度を求める. 使用した加速度センサは, ATR-Promotions社の TSND121 (分解能 0.1[mG]) である.

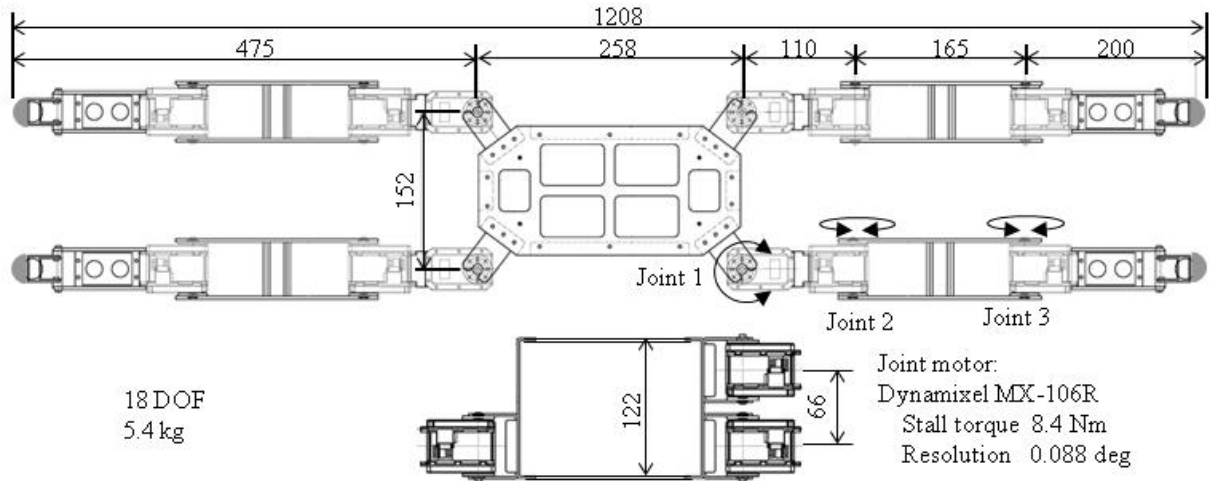


Fig. 2 Design of the working six-legged robot. The distinctive feature of this robot is the arrangement of six legs: two legs are attached to the upper corners of the body, and four legs to the lower corners.

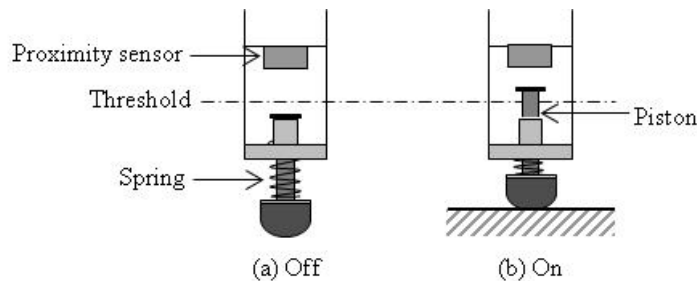


Fig. 3 Foot sensor to detect foot landing. A proximity sensor measures the distance to the piston. When the foot lands on the ground, the distance comes below the threshold and the foot landing is detected. When the foot is away from the ground, the spring returns the piston and the sensor is off.

3. 異なる起伏を有する地形の歩行法

3・1 地形

本研究で対象とする地形の例を図4に示す。図4(a)(b)のように斜度が急激に変化する斜面や大きい段差・階段の場合、ロボットはボディを積極的に傾ける必要がある。ボディを水平にして遊脚を上下するだけでは、遊脚を高く上げて接地できてもボディが衝突する場合や、遊脚を限界まで下げても接地できない場合があるためである。ボディを傾ければ脚の可動範囲が拡大し、踏破可能となる。反対に、図4(c)(d)のような1~2歩程度の進行方向長さで高低が変化するバンプや地表の凹凸に対しては、ボディを地形に沿って傾けるよりも、ボディを水平に保ったまま乗り越えたほうが安定に歩行できる。

本研究では、斜面・段差・階段といった大きな起伏・長距離の起伏に対してはボディを傾け、バンプや地表の凹凸といった小さい起伏・短距離の起伏に対してはボディの姿勢を一定に保つことで、地形に適した歩行を可能にする方法を提案する。ロボットは、以下のプロセスを繰り返して歩行する。

3・2 基準地面の設定

6脚ロボットのトライポッド歩容とは、1本おきの3脚、すなわち図5(a)の脚1, 4, 5と脚2, 3, 6をそれぞれ組にして、2組を交互に動かす歩容である。脚 i は、あらかじめ設定された中心位置 (x_i, y_i) と半径 r_i 、高さ H_i を持つ図5(b)の円柱軌道にそって動かす。支持脚期における脚 i のボディに対する高さを h_i とする。後述するように、 h_i は常に変化している。脚 i は、支持脚から遊脚に切り替わる瞬間の h_i から H_i だけ持ち上げる。地形は未知なので、接地センサで接地を検出するまで遊脚を下降させ、接地したら下降を停止して h_i を設定しなおす。

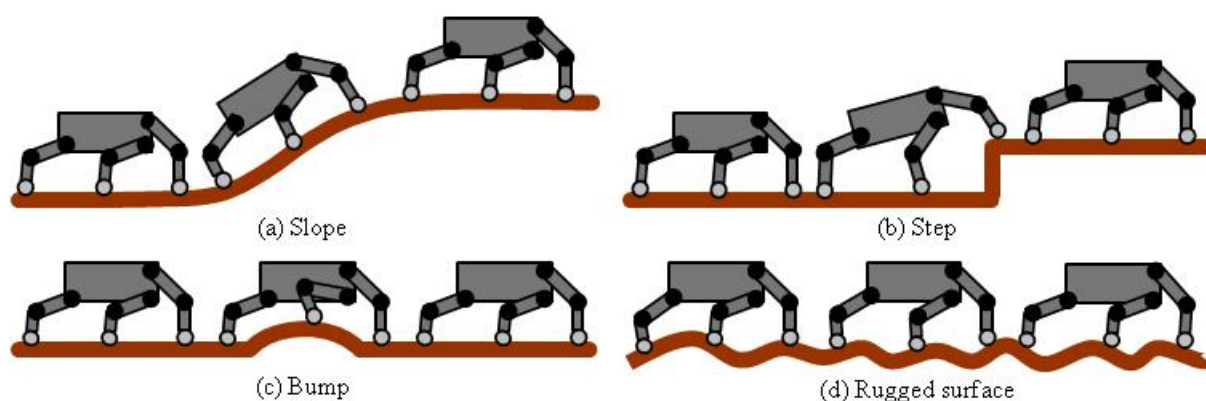


Fig.4 Examples of terrain. On large or long-distance terrain such as slopes (a), steps (b) and stairs, the robot inclines its body. On small or short-distance terrain such as bump (c) and rugged surface (d), the body goes through with keeping a constant orientation.

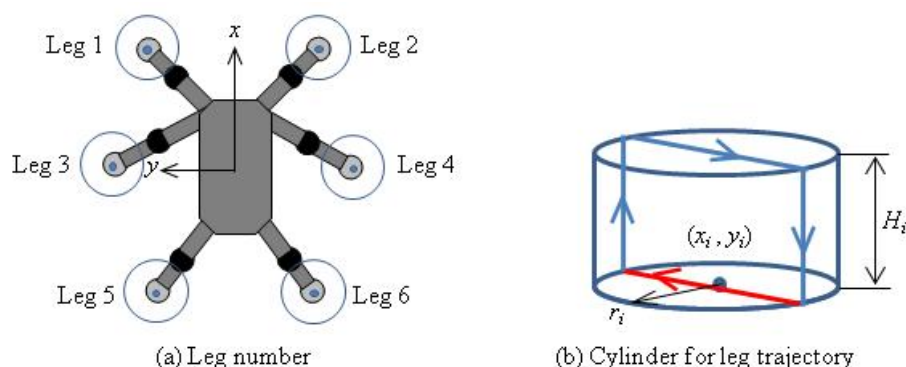


Fig.5 Tripod gait. (a) The robot moves one set of legs 1, 4 & 5 and the other set of legs 2, 3 & 6 alternately. (b) Each leg moves along the given cylinder. Support leg phase (red) and swing leg phase (blue).

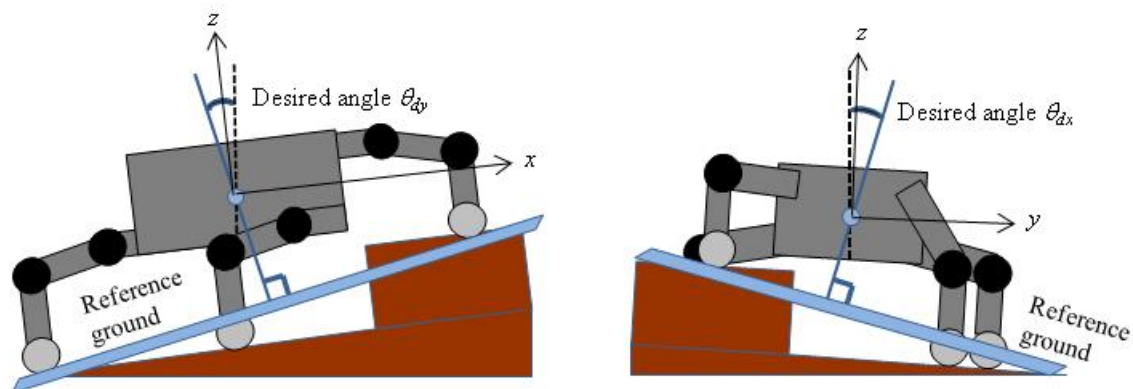


Fig.6 Reference ground which is a plane approximated from the landing positions of six legs. The inclination angles of the reference ground relative to horizontal plane, θ_{dx} and θ_{dy} , are obtained. These are the desired inclination angles of the robot's body.

本研究では、ボディの傾きと高さを制御するための基準となる地面を「基準地面」と呼ぶ。図6のようにすべての遊脚が接地できた場合、すなわち6脚支持状態になったタイミングで、6個の脚先接地点を最小自乗法で近似した平面を基準地面とする。6脚支持状態で基準地面を設定するのは、支持脚3本だけで設定すると2組の支持脚の基準地面が異なり、それらが交互に入れ替わるので、安定性に欠けるためである。水平面に対する基準地面の x 軸回りの傾き角度 θ_{dx} と y 軸回りの傾き角度 θ_{dy} を、それぞれ水平面に対するボディの x 軸回りの傾き角度 θ_x と y 軸回りの傾き角度 θ_y の目標値とする。

基準地面は、6脚支持状態になるたびに更新される。基準地面は、ボディから見た脚先位置により計算するため、1回の更新時に得られるのは、前回の基準地面に対する相対角度 $\Delta\theta_{dx}$, $\Delta\theta_{dy}$ になる。そこで、初期状態から $\Delta\theta_{dx}$, $\Delta\theta_{dy}$ を積算して、 θ_{dx} , θ_{dy} を求める。

3・3 ボディの姿勢・高さ制御

地面に対する脚の可動範囲を均等にするには、ボディは地面に平行にしたほうがよい。また、大きな障害物を乗り越えるためには、ボディの高さをある程度確保しなければならない。そこで、前節で設定した基準地面に対してボディが平行かつ一定距離を保つように、支持脚3本を上下させてボディの姿勢と高さを制御する。

ボディが基準地面と平行になるには、ボディの傾き角度 θ_x , θ_y と基準地面の傾き角度 θ_{dx} , θ_{dy} の誤差を小さくすればよい。そこで、ボディに取り付けた3軸加速度センサで重力方向を検出し、ボディの傾き角度 θ_x , θ_y を求める。図7のように、 x 軸回りの傾き誤差を補正するための脚 i の高さ補正量 Δh_{xi} と、 y 軸回りの傾き誤差を補正するための脚 i の高さ補正量 Δh_{yi} を次式で決定する。

$$e_x(t) = \sin(\theta_{dx}(t) - \theta_x(t)) \quad (1)$$

$$e_y(t) = \sin(\theta_{dy}(t) - \theta_y(t)) \quad (2)$$

$$\Delta h_{xi}(t) = \begin{cases} -\left[k_{\phi}e_x(t) + k_{\phi}\{e_x(t) - e_x(t - \Delta t)\}\right] & (i = 1, 3, \text{ or } 5) \\ \left[k_{\phi}e_x(t) + k_{\phi}\{e_x(t) - e_x(t - \Delta t)\}\right] & (i = 2, 4, \text{ or } 6) \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta h_{yi}(t) = \begin{cases} -\left[k_{\phi}e_y(t) + k_{\phi}\{e_y(t) - e_y(t - \Delta t)\}\right] & (i = 1 \text{ or } 2) \\ 0 & (i = 3 \text{ or } 4) \\ \left[k_{\phi}e_y(t) + k_{\phi}\{e_y(t) - e_y(t - \Delta t)\}\right] & (i = 5 \text{ or } 6) \end{cases} \quad (4)$$

(t) は現在の値、($t - \Delta t$) は1制御周期前の値を表す。 k_{ϕ} , k_{ϕ} は傾き誤差に対する位置フィードバックゲイン、速度フィードバックゲインである。本研究では、地表の凹凸から階段まで、様々な大きさの起伏を対象としている。式(1)(2)を用いずに傾き誤差をそのまま e_x , e_y としてしまうと、段差等で地面の傾きが大きく変化すると、脚の高さも大きく変化し、ボディが急に傾いてしまう。式(1)(2)を用いることで、地面の傾きの大きな変化に対する脚の高さ補正量が抑えられ、ボディを緩やかに傾けることができる。 y 軸回りの傾き補正式(4)において、脚1,2が可動限界に達しても傾き誤差が残っている場合は、脚3,4の Δh_{yi} を脚5,6の Δh_{yi} の1/2とし、ボディの傾きをさらに補正する。一方、脚5,6が可動限界に達しても傾き誤差が残っている場合は、脚3,4の Δh_{yi} を脚1,2の Δh_{yi} の1/2とし、ボディの傾きをさらに補正する。

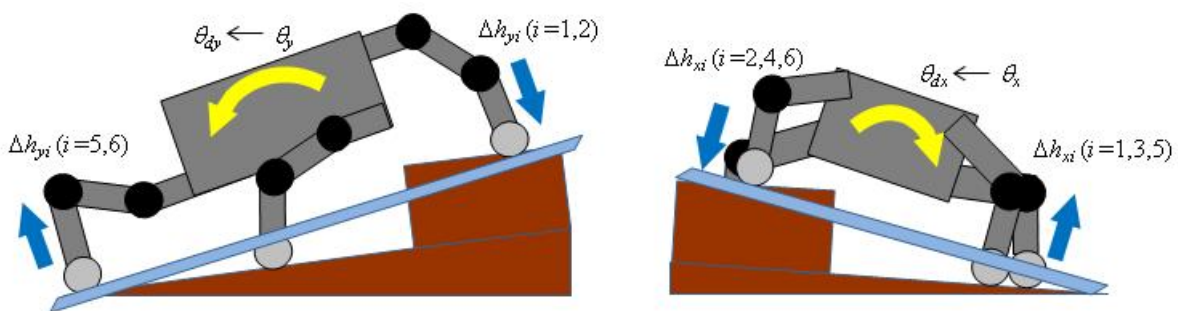


Fig. 7 Body orientation control. The leg i moves up and down by Δh_{xi} and Δh_{yi} so that the body may be parallel to the reference ground.

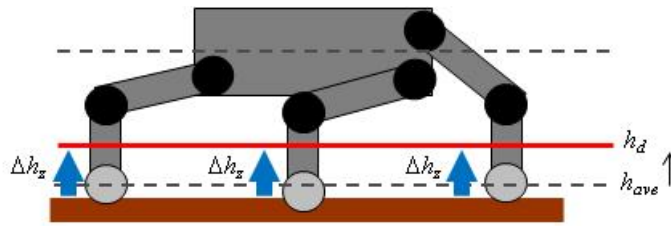


Fig.8 Body height control. The support legs move up and down by Δh_z so that the body may keep a constant distance h_d between the body and the reference ground.

図8のように、ボディと基準地面を一定距離 h_d に保つには、支持脚3本の平均高さ h_{ave} と h_d の誤差を小さくすればよい。そこで、ボディの高さを補正するための脚の補正量 Δh_z を次式で決定する。

$$e_z(t) = h_z(t) - h_{ave}(t) \quad (5)$$

$$\Delta h_z(t) = k_{zp} e_z(t) + k_{zv} \{e_z(t) - e_z(t - \Delta t)\} \quad (6)$$

ここで、 k_{zp} 、 k_{zv} は高さ誤差に対する位置フィードバックゲイン、速度フィードバックゲインである。

ボディの姿勢と高さを制御するための支持脚 i の補正量 Δh_i は、これら3つの補正量の和になる。

$$\Delta h_i(t) = \Delta h_{xi}(t) + \Delta h_{yi}(t) + \Delta h_z(t) \quad (7)$$

$$h_i(t + \Delta t) = h_i(t) + \Delta h_i(t) \quad (8)$$

制御周期 Δt で式(1)～(8)を繰り返す。

以上の方法で基準地面を設定し、基準地面と平行になるようにボディの姿勢と高さを制御することで、斜度が急激に変化する斜面や大きい段差・階段に対してボディが傾き、脚の可動範囲が拡大して踏破可能となる。

基準地面は、6脚支持状態になったタイミングで、断続的に変化する。一方、式(1)～(8)のボディの姿勢制御は、基準地面を目標値として、歩行中は常に行う。その結果、歩行を停止することなく、ボディの傾きは滑らかに変化する。

基準地面の傾きの変化に対するボディの傾きの変化の応答速度は、式(3)(4)のフィードバックゲイン k_ϕ によって決まる。 k_ϕ を大きくした場合、基準地面の傾きの変化に対してボディが素早く反応するため、バンプや地表の凹凸といった小さい起伏・短距離の起伏においても、ボディが小刻みに傾く。一方、 k_ϕ を小さくした場合は、地形の細かい変化に反応しにくくなるため、ボディの姿勢を一定に保ったまま歩行できる。すなわち、フィードバックゲイン k_ϕ の設定により、大きな起伏・長距離の起伏に対してはボディを傾け、小さい起伏・短距離の起伏に対してはボディの姿勢を一定に保つことが可能となる。

3.2節で述べたように、水平面に対する基準地面の傾き角度は、前回の基準地面に対する相対角度を初期状態から積算（積分）して求めている。このような積分計算では、値にドリフトが生じる可能性がある。一方、ボディの傾き角度は、加速度センサで測定した水平面に対する絶対角度となっている。提案手法では、基準地面の傾き角度とボディの傾き角度が一致するようにボディの姿勢を制御する。その結果、基準地面の傾き角度のドリフトは解消される。

3・4 深い凹みへの対応

深い凹みや急な下り斜面を遭遇した場合、遊脚を可動範囲限界まで下降させても、地面に接地できないことがある。歩行を続けるためには、ボディを積極的に傾けて遊脚をさらに下降させ、接地させる必要がある。

そこで、遊脚を限界まで下降させても接地を検出できない場合は、歩行を一旦停止する。図9のように、接地できなかった遊脚の仮想的な接地点を、現在の遊脚よりも下に設定し、基準地面を生成する。新しい基準地面は、

深い凹みや急な下り斜面に向かって傾いた状態になる。ボディの姿勢制御により、ボディは新しい基準地面に追従して傾くので、遊脚はさらに下降できるようになる。なお、ボディを傾けることを優先させるため、姿勢制御式(1)~(4)のみを行い、高さ制御式(5)(6)は行わない。仮想接地点を徐々に下げながらこの処理を繰り返し、遊脚が地面に接地したら、ロボットは歩行を再開する。

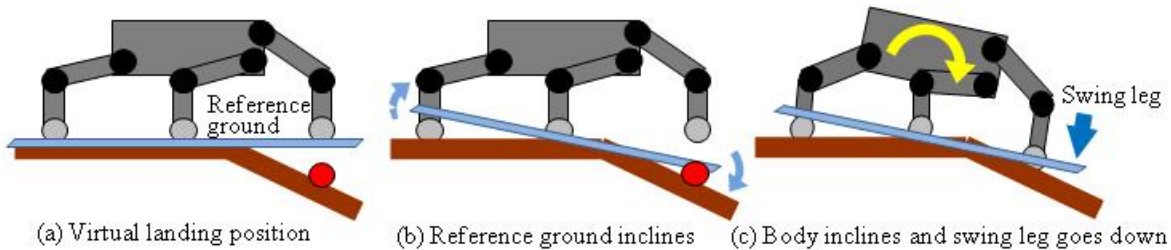


Fig.9 Control at deep depression. (a) If the robot encounters deep depression, the robot sets the virtual landing position of the swing leg below its current position. (b) The reference ground inclines. (c) The body also inclines due to body orientation control, and the swing leg can go further down.

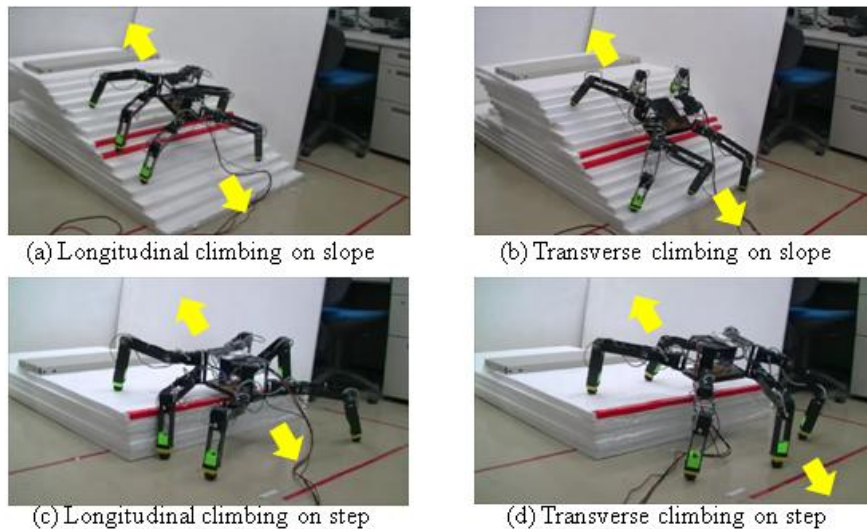


Fig.10 Experiments of walking on large or long-distance undulation.

4. 歩行実験

4・1 実験方法

提案手法では、短距離の起伏や地表の凹凸に対してはボディの姿勢を一定に保ち、大きな起伏・長距離の起伏では次第にボディを傾ける。そこで、バンプ、斜面、段差を歩行する実験を行い、歩行能力を検証する。歩行のパラメータは、円柱軌道の半径 $r_l = 40[\text{mm}]$ 、高さ $H_l = 200[\text{mm}]$ 、ボディと基準地面の目標距離 $h_d = 250[\text{mm}]$ 、傾き誤差に対するフィードバックゲイン $k_{\theta_p} = 2.0$, $k_{\theta_d} = 20.0$ 、高さ誤差に対するフィードバックゲイン $k_{z_p} = 0.045$, $k_{z_d} = 9.0\text{e}^{-4}$ 、指令歩行速度を $100[\text{mm/s}]$ とした。

実験1では、短距離の起伏の例として、高さ $60[\text{mm}]$ 、進行方向の長さ $125[\text{mm}]$ の四角いバンプを通過させる。ボディに搭載した加速度センサで歩行中のボディの傾き角度を計測し、姿勢の変化を調べる。

実験2では、大きな起伏・長距離の起伏の例として、斜面と段差を歩行させ、ロボットの最大踏破能力を検証する。図10のように、それぞれの地形において、ボディが縦向きでの上り下り、横向きでの上り下りを行い、踏破可能な最大斜度、最大段差高さを調べる。斜面と段差は、厚さ $30[\text{mm}]$ の発泡スチロール板を重ねて作成した。

本研究の特徴は、ボディを傾けることで脚の可動範囲を拡大し、不整地の踏破能力を向上させることである。そこで、実験3では、ボディを傾けずにボディの高さ制御のみを行い、実験2と同じ地形を歩行させ、実験2の結果と比較する。深い凹みに遭遇した場合も、遊脚が接地するまでボディを平行に下ろす。

4・2 実験結果

実験1における歩行の様子を図11に示す。図12は、ボディの傾き角度 θ_x (青色)と θ_y (赤色)、基準地面の傾き角度 θ_{dx} (緑色)と θ_{dy} (紫色)の時間的な変化を示している。基準地面の傾き角度が階段状に変化しているのは、遊脚が接地して6脚支持状態になった時だけ、基準平面が更新されるためである。図12から、ボディの傾き角度が基準地面の傾き角度に滑らかに追従していること、ロボットは $-4 \sim 2[\text{deg}]$ 程度しか傾かず、基準地面よりも傾き角度は抑えられていることがわかる。よって、短距離の起伏は、ボディをあまり傾けずに通過可能であることが確認できた。

実験2における歩行の例を図13, 14に示す。表1は、図10の各ケースにおける最大斜度、最大段差高さをまとめたものである。踏破可能な最大斜度は、上り下りとも横向き歩行の方が優れていた。段差上りでは、地面から脚を上げられる高さの限界に達したため、歩行する向きによらず $150[\text{mm}]$ が最大段差高さとなった。一方、段差下りでは、深い凹みに適応する処理によって、横向き歩行で $180[\text{mm}]$ の段差までを降りることができた。

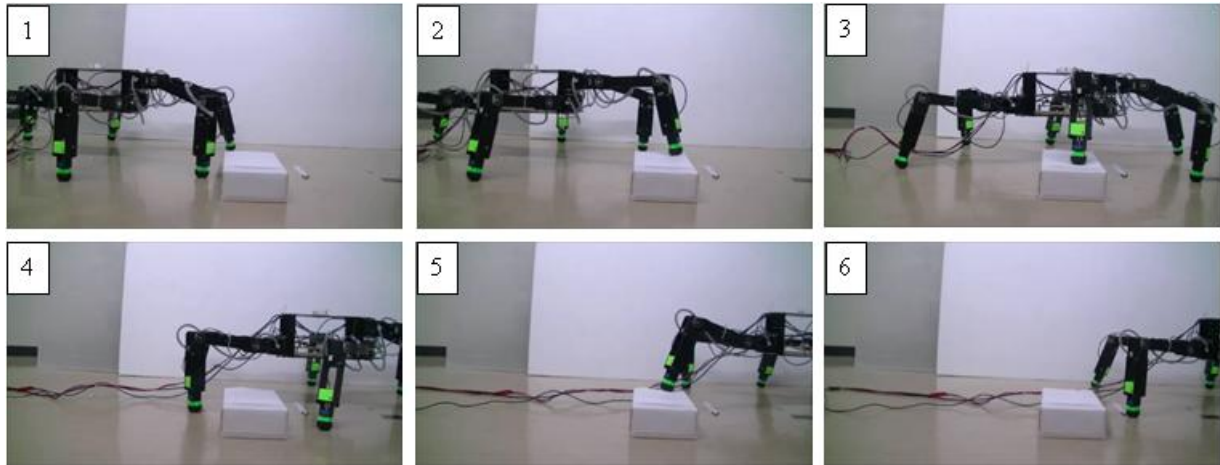


Fig. 11 Experimental result of walking through a bump of 125 mm width and 60 mm height. The robot keeps its body horizontal.

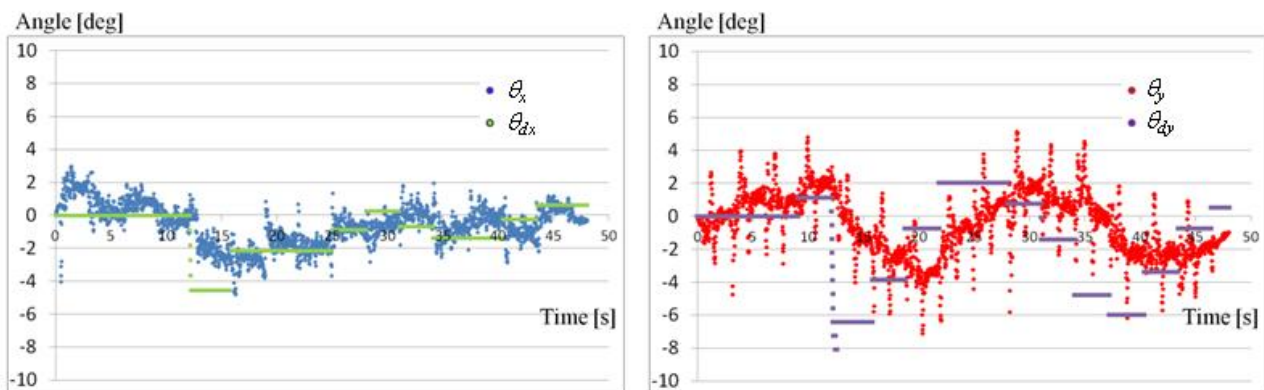


Fig. 12 Experimental result of walking through a bump of 125 mm width and 60 mm height. The inclination angles of reference ground, θ_{dx} and θ_{dy} , and the body inclination angles, θ_x and θ_y .

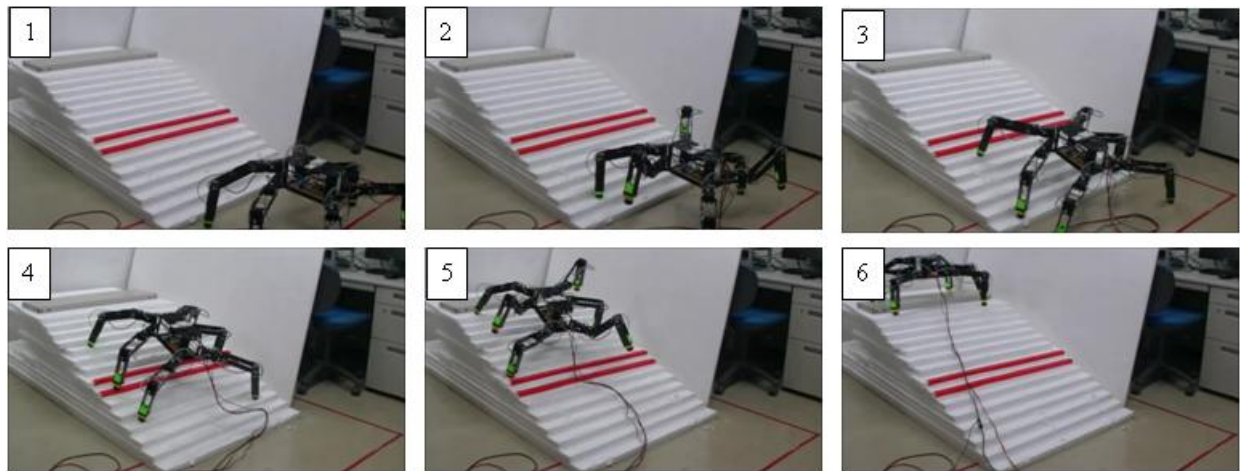


Fig.13 Experimental result of longitudinal climbing up the slope of 27.5 deg.

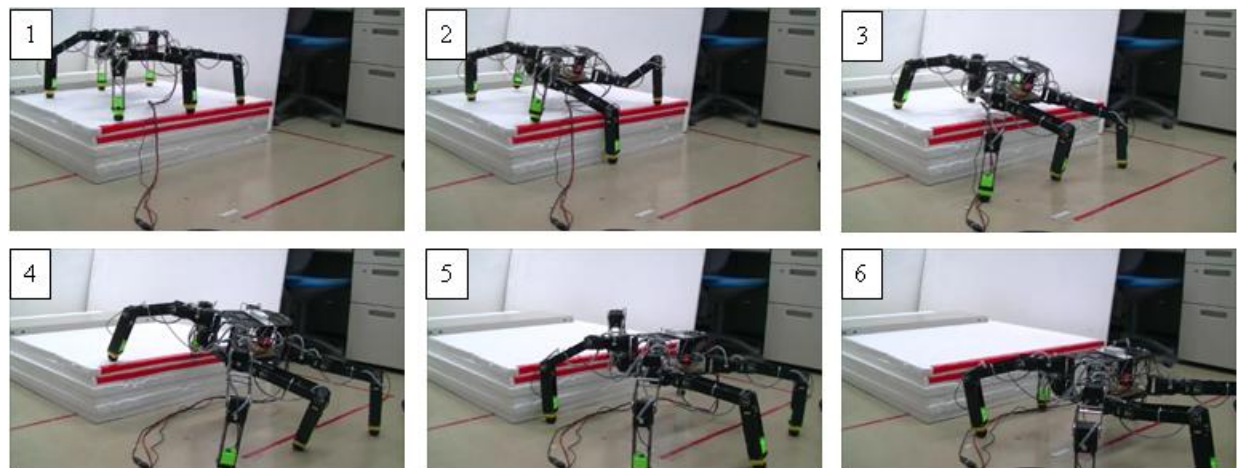


Fig.14 Experimental result of transverse climbing down the step of 180 mm height.

Table 1 Maximum value of climbable slope angle and step height by the proposed method.

	Longitudinal		Transverse	
	Up	Down	Up	Down
Slope angle [deg]	20.0	27.5	30.0	40.0
Step height [mm]	150	150	150	180

Table 2 Maximum value of climbable slope angle and step height by body height control only.

	Longitudinal		Transverse	
	Up	Down	Up	Down
Slope angle [deg]	12.5	7.5	7.5	7.5
Step height [mm]	150	150*)	150*)	150*)

*) Body slightly touches the ground.

ボディの高さ制御のみを行った実験3の結果を表2に示す。いずれの場合も、脚の上下動が限界に達したことが、最大値を決める要因であった。表2の*)のケースは、ボディが段差に接触しながら動いていたので、ボディが段差に接触しないで移動できる限界は、表の値よりも低くなる。表1と2の結果から、提案手法のほうが、斜

面の踏破能力が優れていることがわかる。段差については、ほぼ同等であった。段差は、地面の高さが1回大きく変化し、その後は同じ高さが続くので、最初の1脚が接地できればよい。一方、斜面では、進むに従って地面の高さが変わっていくので、脚の上下動の量も増えていき、限界に達するためと考えられる。

5. 安定性に関する考察

本研究では、ボディの姿勢・高さ制御により脚の可動範囲を拡大し、不整地踏破能力を向上させることを主眼としている。このとき、トライポッド歩容の特徴、すなわち安定領域がボディを中心に広がっていることが、安定性を保つ上で重要な役割を果たしている。ロボットが転倒しないためには、質量中心の地面への鉛直方向投影点 G が、支持多角形で構成される安定領域の内側になければならない。そして、ロボットが斜面にあるとき、斜度が大きくなるにつれて、 G は斜面下方に移動する。図15は、斜面上のロボットの安定領域と G 、および G が斜面下方に移動可能な範囲（白矢印）を示している。(a)の4脚ロボットのクローल歩容の場合、斜面下方の1脚を上げた3脚支持状態では、 G は安定領域境界に接近する。従って、安定性を確保するためには、ボディに対して支持脚を斜面下方にずらし、 G を安定領域の内側に保たなければならない。言い換えれば、ボディから見た支持脚の接地位置が制約され、脚の可動範囲の縁付近に寄るなどして、ボディの姿勢・高さ制御に必要な脚の上下運動が制限される危険性がある。一方、(b)(c)の6脚ロボットのトライポッド歩容の場合、安定領域がボディを中心に広がっているため、支持脚の接地位置をずらさなくても、 G が斜面下方に移動可能な範囲に余裕がある。つまり、支持脚の接地位置に対する制約が少ない分、脚の上下運動を大きく取れるため、ボディの姿勢・高さ制御の範囲も大きくなる。さらに、(b)(c)からわかるように、横向きトライポッド歩容の方が G の斜面下方に移動可能な範囲が大きいので、最大斜度も大きくなる。表1の斜面の実験結果は、これを裏付けている。

実験に用いたロボットは、ボディに対する脚の取り付け位置が特徴的ではあるものの、トライポッド歩容時は、ボディの左右に、3脚ずつをほぼ等間隔に並べて接地しているので、特殊なものではない。よって、提案手法は、他の6脚ロボットにも適応可能と考えられる。ただし、ボディを傾けることに支障があるロボットには適用できない。例えば、ボディに物を載せるなどして質量中心がボディよりも高い位置にある場合は、ボディを傾けると転倒する危険性があるため、適用は困難である。

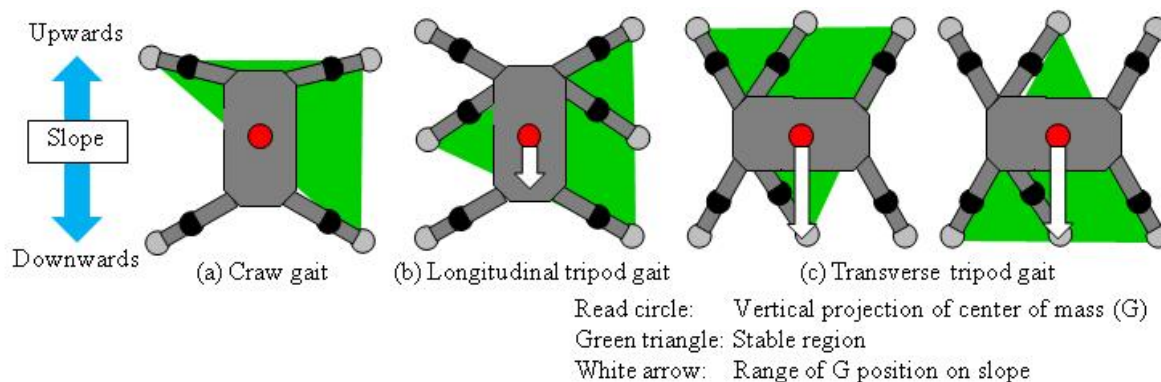


Fig.15 Stability of robots on slope. The vertical projection of center of mass, G , must be within stable region. As the slope is steeper, G goes more downwards. Transverse tripod gait has longer range of G position (white arrow) than other cases. Hence it can climb steeper slope.

6. 結 言

本研究では、6脚ロボットが異なる起伏を有する未知不整地を歩行する方法を開発した。短距離の起伏を通過する実験の結果、ロボットはボディをあまり傾けることなく、歩行できることを確認した。また、斜面と段差を上り下りする実験の結果、斜面上りでは最大斜度 $30[\text{deg}]$ 、斜面下りでは最大斜度 $40[\text{deg}]$ 、段差上りでは最大高さ $150[\text{mm}]$ 、段差下りでは最大高さ $180[\text{mm}]$ の地形を踏破することができた。

本研究では、歩行の円柱軌道の中心位置、半径、高さはあらかじめ与えていた。今後は、これらを動的に変化させ、より急な斜面や高い段差の踏破を目指す。

文 献

- Ajallooeian, M., Gay, S., Tuleu, A., Spr'owitz, A. and Ijspeert, A. J., Modular control of limit cycle locomotion over unperceived rough terrain, *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2013), pp.3390-3397.
- Gay, S., Santos-Victor, J. and Ijspeert, A., Learning robot gait stability using neural networks as sensory feedback function for central pattern generators, *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2013), pp.194-201.
- 羽澤寛志, 高橋俊太, 藤田豊己, 双腕を有するクローラ型不整地移動ロボットの障害物除去, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集* (2012), 1P1-G10.
- Havoutis, I., Ortiz, J., Bazeille, S., Barasuol, V., Semini, C. and Caldwell, D. G., Onboard perception-based trotting and crawling with the hydraulic quadruped robot (HyQ), *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2013), pp.6052-6057.
- 広瀬茂男, 米田完, 荒井和彦, 井辺智吉, 直動脚 4 足歩行機械 TITAN VI の開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.9, No.4 (1991), pp.445-452.
- 井上健司, 大江寛次郎, 3 つのモードを切り替え可能な 6 脚作業移動ロボットの開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集* (2008), 1A1-E04.
- Inoue, K., Ooe, K. and Lee, S., Pushing methods for working six-legged robots capable of locomotion and manipulation in three modes, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2010), pp.4742-4748.
- Kamikawa, K., Takubo, T., Mae, Y., Inoue, K. and Arai, 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.
- Komatsu, H., Endo, G., Hodoshima, R., Hirose S. and Fukushima E. F., How to optimize the slope walking motion by the quadruped walking robot, *Advanced Robotics*, Vol.29, No.23 (2015), pp.1497-1509.
- Loc, V., Roh, S., Koo, I. M., Trong, T. D., Kim, H. M., Moon, H. and Choi, H. R., Control of a quadruped robot with enhanced adaptability over unstructured terrain, *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2009), pp.2671-2676.
- 折戸裕輔, 小野寺涼太, 小松伸悟, 秋山幸宏, 宇沼尚悟, 齋藤敬, 伸縮マニピュレータ機構による人間用環境対応移動ロボットの開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集* (2014), 1P1-O04.
- 笹岡孟史, 井上健司, 4 脚 2 腕ロボットの直立準動歩行, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集* (2016), 1A1-06b1.
- 佐藤拓磨, 永野健太, Canete Luis, 高橋隆行, 双腕マニピュレータを搭載した車輪型倒立振子ロボットの制御, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集* (2013), 2A1-P11.
- 菅沼直孝, 上原拓也, 松崎謙司, 三ツ谷祐輔, 落合誠, 寺井藤雄, 露木陽, 災害復旧用 4 足歩行ロボットの開発, 第 31 日本ロボット学会学術講演会 (2013), RSJ2013AC2N2-01.
- 竹田祥紀, 井上健司, 6 脚作業移動ロボットの走行制御, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集* (2016), 1A1-06b2.
- 田窪朋仁, 新井健生, 井上健司, 梅谷智弘, 林原靖男, 小柳栄次, 腕脚統合型ロボット「ASTERISK」の開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演論文集* (2005), ALL-N-004.
- Takubo, T., Arai, T., Inoue, K., Ochi, H., Konishi, T., Tsurutani, T., Hayashibara, Y. and Koyanagi, E., Integrated limb mechanism robot "ASTERISK", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.18, No.2 (2006), pp.203-214.
- Tran, D. T., Koo, I. M., Moon, H., Jung-San, C., Park, S. and Choi, H. R., Motion control of a quadruped robot in unknown rough terrains using 3D spring damper leg model, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2012), pp.4931-4936.
- 妻木俊道, 阿部誠一郎, 千葉健吉, 6 脚歩行機械 Landmaster3 の開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.24, No.7 (2006), pp.851-860.
- Zucker, M., Bagnell, J. A., Atkeson, C. G. and Kuffner, J., An optimization approach to rough terrain locomotion, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2010), pp.3589-3595.

References

- Ajalloeian, M., Gay, S., Tuleu, A., Spröowitz, A. and Ijspeert, A. J., Modular control of limit cycle locomotion over unperceived rough terrain, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013), pp.3390-3397.
- Gay, S., Santos-Victor, J. and Ijspeert, A., Learning robot gait stability using neural networks as sensory feedback function for central pattern generators, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013), pp.194-201.
- Hazawa, H., Takahashi, S. and Fujita, T., Removing obstacle by tracked mobile robot with two arms, Proceedings of the 2012 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2012), 1P1-G10 (in Japanese).
- Havoutis, I., Ortiz, J., Bazeille, S., Barasuol, V., Semini, C. and Caldwell, D. G., Onboard perception-based trotting and crawling with the hydraulic quadruped robot (HyQ), Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013), pp.6052-6057.
- Hirose, S., Yoneda, K., Arai, K. and Ibe, T., Design of prismatic quadruped walking vehicle TITAN VI, Journal of Robotics Society of Japan, Vol.9, No.4 (1991), pp.445-452 (in Japanese).
- Inoue, K. and Ooe, K., Six-legged robots capable of locomotion and manipulation in three modes, Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2008), 1A1-E04 (in Japanese).
- Inoue, K., Ooe, K. and Lee, S., Pushing methods for working six-legged robots capable of locomotion and manipulation in three modes, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2010), pp.4742-4748.
- Kamikawa, K., Takubo, T., Mae, Y., Inoue, K. and Arai, 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.
- Komatsu, H., Endo, G., Hodoshima, R., Hirose S. and Fukushima E. F., How to optimize the slope walking motion by the quadruped walking robot, Advanced Robotics, Vol.29, No.23 (2015), pp.1497-1509.
- Loc, V., Roh, S., Koo, I. M., Trong, T. D., Kim, H. M., Moon, H. and Choi, H. R., Control of a quadruped robot with enhanced adaptability over unstructured terrain, Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2009), pp.2671-2676.
- Orito, Y., Onodera, R., Komatsu, S., Akiyama, Y., Unuma, S. and Saito, T., Mobile robot for human environment with novel telescopic manipulators, Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2014), 1P1-O04 (in Japanese).
- Sasaoka, T. and Inoue, K., Upright quasi-dynamic walking for four-legged and two-armed robots, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2016), 1A1-06b1 (in Japanese).
- Sato, T., Nagano, K., Canete, L. and Takahashi, T., Control of a wheeled inverted pendulum robot equipped with dual manipulator – A control method of disturbance compensation control using Extended State Observer and feedforward input –, Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2013), 2A1-P11 (in Japanese).
- Suganuma, N., Uehara, T., Matsuzaki, K., Mitsuya, Y., Ochiai, M., Terai, F. and Tsuyuki, Y., Saigai fukkyu you 4 soku hokou robot no kaihatsu, Proceedings of the 31th Annual Conference of the Robotics Society of Japan (2013), RSJ2013AC2N2-01 (in Japanese).
- Takeda, Y. and Inoue, K., Running control for working six-legged robots, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2016), 1A1-06b2 (in Japanese).
- Takubo, T., Arai, T., Inoue, K., Umetani, T., Hayashibara, Y. and Koyanagi, E., Development of limb mechanism robot “ASTERISK”, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2005), ALL-N-004 (in Japanese).
- Takubo, T., Arai, T., Inoue, K., Ochi, H., Konishi, T., Tsurutani, T., Hayashibara, Y. and Koyanagi, E., Integrated limb mechanism robot “ASTERISK”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2 (2006), pp.203-214.
- Tran, D. T., Koo, I. M., Moon, H., Jung-San, C., Park, S. and Choi, H. R., Motion control of a quadruped robot in unknown rough terrains using 3D spring damper leg model, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2012), pp.4931-4936.
- Tsumaki, T., Abe, S. and Chiba, K., Development of 6 legged robot ‘Landmaster3’, Journal of Robotics Society of Japan, Vol.24, No.7 (2006), pp.851-860 (in Japanese).
- Zucker, M., Bagnell, J. A., Atkeson, C. G., Kuffner, J., An optimization approach to rough terrain locomotion, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2010), pp.3589-3595.