

脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容\*  
(第4報, 乗り越え歩容編)中嶋秀朗\*<sup>1</sup>, 中野栄二\*<sup>1</sup>Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot  
(4th Report, Gait for Getting Over an Obstacle)Shuro NAKAJIMA\*<sup>2</sup> and Eiji NAKANO\*<sup>2</sup>The Department of Advanced Robotics, Chiba Institute of Technology,  
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba, 275-0016 Japan

A leg-wheel robot has mechanically separated four legs and two wheels, and it performs high mobility and stability on rough terrains. The adaptive gait for large rough terrains of the leg-wheel robot is composed of three gait strategies. In this paper, the gait for getting over an obstacle, which is one part of the adaptive gait, is described. The proposed method is evaluated by simulations and experiments. The point of the flow of the gait for getting over an obstacle is described. When the body reaches an obstacle, it does not come to advance easily. In this case, the robot can not always understand the height of the obstacle, since its forefeet sometimes do not touch it. Therefore, the robot raises its body as possible as it can, and gets over the obstacle. After getting over it, the body is lowered until it touches the ground. The system judges whether the body touches the ground by the information on load sharing ratio of legs.

**Key Words:** Moving Robot, Motion Control, Robot, Gait for Getting Over an Obstacle, Adaptive Gait, Leg-wheel Robot, Large Rough Terrain, Gait Strategy

## 1. はじめに

脚機構は接地点を任意かつ不連続に取ることが可能であるため、段差などの踏破性に優れ、斜面や大きな凹凸がある地形においても機体を安定に支持することができる。その一方で、構造が複雑であり、姿勢制御や脚制御が外界認識情報に強く依存するため、実用化のためには課題も多い。

そこで、筆者らは実用化への一つのアプローチとして、できるだけ低い精度の外界認識情報で、かつ、できるだけ簡単な制御手法により未知不整地移動を可能にしようという研究開発思想に基づき、図1に示す3自由度の脚を前後に4本、胴体左右に車輪を2つ独立に装備した脚車輪分離型ロボットを研究開発している<sup>(1)(2)</sup>。そして、凹凸高さが±0.1[m]程度までの未知の不整地(通常不整地)における外界センサレス方式の移動制御手法<sup>(1)</sup>を提案してきた。しかし実際には、凹凸高さが通常不整地より大きい不整地も多く存在する。

筆者らは既に、脚車輪分離型ロボットが移動するという観点から大不整地を体系的に分類し、大不整地適

応歩容を構成する3つの歩容戦略を提案した<sup>(8)</sup>。文献<sup>(9)</sup>では、凹凸高さが0.1~0.2[m]程度までの上り段差不整地を対象にした「段差上り歩容」の制御手法を提案した。さらに文献<sup>(10)</sup>では、凹凸深さが0.1~0.2[m]程度までの下り段差不整地を対象にした「段差下り歩容」の制御手法を提案した。本論文では、高さが0.1~0.2[m]程度までの凸路面不整地を対象にした「乗り越え歩容」の制御手法とその移動能力に関して記述する。

すでに大道らは、機構的に一部類似した脚車輪ロボットの歩容戦略<sup>(3)</sup>について記述したが、未知の不整地に対するものではなかった。これに対して本論文では、未知の不整地に関する脚車輪分離型ロボットの制御手法について議論する。

また、従来の4脚または6脚の脚式ロボットでは、脚先からの正確な力情報を用いた力制御を用いることで不整地移動を実現していた<sup>(4)-(7)</sup>のに対して、本論文では各関節の角度センサと胴体姿勢角度センサ(ピッチ, ロール)の2種類の内界センサのみで実現できる未知不整地の移動制御手法を提案する。力センサなどの外界センサに頼らない理由は、屋外の自然環境は、傾斜や段差、草やぬかるみなどさまざまであり、その状況を外界センサで判断しても精度が低く、ノイズな

\* 原稿受付 2005年8月25日。

\*<sup>1</sup> 正員, 千葉工業大学工学部(☎275-0016 習志野市津田沼2-17-1)。

E-mail: shuro.nakajima@it-chiba.ac.jp

どによる判断の誤りも多いためである。基礎的な未知不整地移動能力を内界センサの情報のみで確保した上で、必要な外界センサを付加するという考え方である。

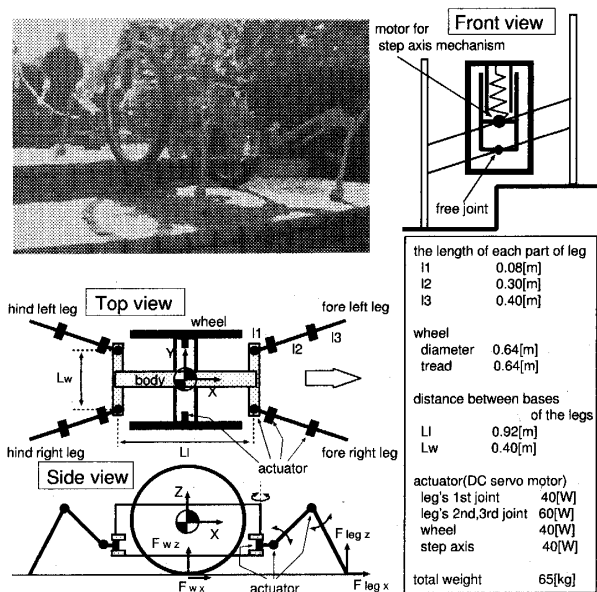


Fig. 1 A leg-wheel robot "Chariot 3"

2. 乗り越え歩容の流れ

乗り越え歩容で対象とする大不整地路面を図2に示す。0.1~0.2[m]程度の高さで、車輪接地点と脚先接地点間より短い奥行き凸路面を Type C-1 路面と、そのうち脚先接地点が車輪接地点より高い Type A-3 路面、車輪接地点が脚先接地点より高い Type B-3 路面がある。上記の対象路面の分類・選定方法に関しては、文献(8)に記述したため本論文では省略し、路面名称はそのまま用いた。また、文献(8)-(10)と同様、平面ベースの段差地形を対象とする。

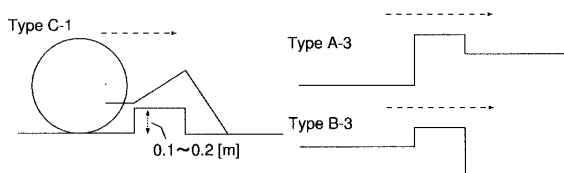


Fig. 2 Targetted rough terrain of the gait for getting over an obstacle

対象とする路面の特徴は、前脚接地点の路面高さより高い路面が、前脚接地点と車輪接地点の間に存在することである。前脚と車輪間に凸地形がある場合には、当該路面上に脚が接地しない可能性があるため、脚先の接地高さ情報を用いてその路面高さを必ずしも把握することができない。そこで、ロボットが取りうる最大限の高さで凸地形を乗り越えることとする。具体的には、凸地形を検知した場合には機体を停止させ(図3(a))、脚を踏み換えた(準備踏換:図3(b))後に、

最大限機体を持ち上げる(図3(c))。その後、機体を一步幅分だけ進め(図3(d))、機体を接地するまで下げ(図3(e))、脚を踏み換えて(終了踏換:図3(f))、通常歩容に遷移する。

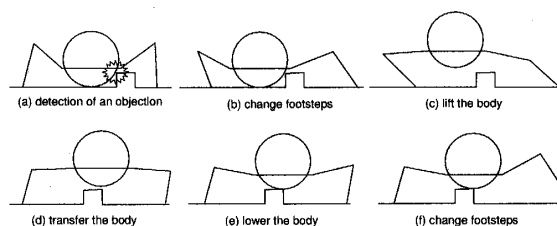


Fig. 3 Flow of the gait for getting over an obstacle

上記乗り越え歩容は、凸地形の高さにかかわらず最大限機体を持ち上げる。そのため必要以上に時間を要し、また、エネルギー的な負担も大きい。一方で乗り越え歩容で越えることができない凸地形は、そのロボットの寸法では物理的に移動が相当困難な地形であるということになる。また、Type A-3, Type B-3 路面での乗り越え歩容は、後述するが、それぞれ段差上り歩容(9)、段差下り歩容(10)で行けない地形に対する歯止めの位置づけになっている。

すなわち乗り越え歩容は、高い不整地対応能力は持つが、時間やエネルギーロスが多い歩容であり、凸路面のように路面高さなどの把握が困難な場合や、段差上り歩容および段差下り歩容で行けない場合といった高い不整地能力が強く求められるところで用いるためのものである。

3. 乗り越え歩容の制御手法

3.1 乗り越え歩容への遷移の検知 図2の対象路面の移動を考えた場合には、乗り越え歩容に切り換わるケースは図4に示す3通りとなる。順に説明する

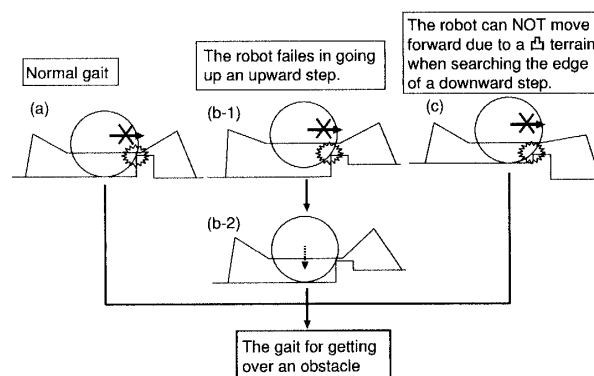


Fig. 4 Three cases in which the robot uses the gait for getting over an obstacle

と、まず図4(a)では、通常歩容中に機体が進行できなくなり、かつ、推定段差高さ  $H_e$ (9)が低い場合である。機体が進行できないという検知は、段差上り歩容

(9)の「上り段差開始位置の検知」と同様に、車輪*i*の回転角 $\theta_{wi}$ の目標角 $\theta_{wdi}$ からの偏差の小さい方が、閾値 $\Delta_{wmin}$ を越えたことを用いる。すなわち次式である。

$$\min(\delta_{wi}) > \Delta_{wmin} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

車輪角度偏差の小さい方を用いる理由は文献(9)で記述したため省略するが、車輪角度偏差の小さい方が閾値を超過した場合は、機体はほとんどの場合進めない状態だからである。なお、この判断を処理周期1回の結果を用いて行くと誤検知につながるため、時系列データ中(0.45[s]間)の検知割合(8割以上)を用いて判定を行い、誤検知の確率を低くした。値は、実験的に決定した。

この時点では、上り段差が存在するために機体が進まないのか、凸路面が存在するために機体が進まないのかはわからない。そこで、式(1)を検知した後の準備踏換で取得する前脚*i*の推定段差高さ $H_{ei}$ の高さで、「段差上り歩容(9)」または「乗り越え歩容」を選択する。すなわち、全脚支持歩容開始時に次式のように、 $H_{ei}$ がいずれも閾値 $\Delta_{get\ over}$ (=0.05:実験的に選定)より小さい場合には乗り越え歩容とし、それ以外の場合には段差上り歩容とする。

$$\max(H_{ei}) < \Delta_{get\ over} \quad (i=1,2) \quad (2)$$

ここで、前脚*i*の推定段差高さ $H_{ei}$ に関しては、既に文献(9)で記述したため詳細は省略するが、図5に示すように、仮想面(1)に対する垂直方向の高さであり、機体の姿勢角度と脚先位置に基づき求められる。

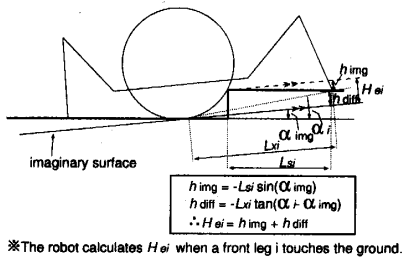


Fig. 5 Estimation of a step height

図4(b-1)は、段差高さの推定値よりも高い段差の存在により、段差上り歩容にて段差を上っている最中に機体を目標値通りに上昇できない場合である。このため、段差上り歩容の全脚支持歩容で機体を上昇している時に、左右の車輪角度偏差 $\delta_{wi}$ の合計が閾値 $\Delta_{wup}$ を越えた場合に、乗り越え歩容への遷移を検知するものとした。合計値を用いた理由は、実験の結果、路面の状況により各車輪の偏差状況は異なるため、片方の車輪偏差で検知するよりも両車輪の合計値を用いた方がよいと判断したためである。実験により $\Delta_{wup} = 30[\text{deg}]$ とした。段差上り歩容中に、車輪角度偏差 $\delta_{wi}$ の合計

が閾値 $\Delta_{wup}$ を超過した場合には、途中まで上昇した機体をいったん下ろし(図4(b-2))、その後、図3(b)の準備踏換をして乗り越え動作をする。

図4(c)は、段差下り歩容(10)の下り段差始点探索動作中に機体が前進できない場合である。この場合も、左右の車輪角度偏差 $\delta_{wi}$ の合計が閾値 $\Delta_{wdown}$ を越えた場合に乗り越え歩容への遷移を検知するものとした。実験により $\Delta_{wdown} = 25[\text{deg}]$ とした。

**3.2 車輪の制御** 乗り越え動作時の車輪の制御について記述する。図3(c), (e)の機体上げ下げ時は、車輪を停止させる。図3(d)で機体を推進させるときは、路面の高さによっては車輪が接地している場合もあるため、機体の目標速度分だけ回転させる。

**3.3 脚の制御** 図3(c)の機体上げ動作時には、機体を最大限上昇させるため、脚を下限まで下げる。ただし、図6(a)のように左右の脚の接地路面高さが異なる場合に、全脚を下限まで下げると、倒れてしまう可能性がある。そこで、図6(b)に示すように脚を下げる。具体的には、機体上昇動作開始直前の左右脚

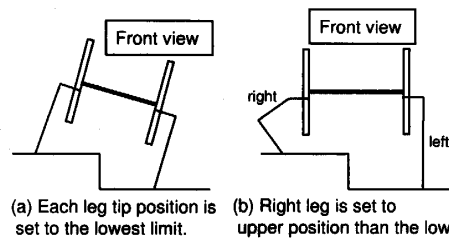


Fig. 6 Motion for getting over an obstacle in the case of a surface with different level on either side

の接地高さの差は保ったまま、片方の脚が下限に到達するまで脚を下げる。このとき、前後脚については孤立して行く。

図3(d)の機体推進動作時には、機体座標系*z*方向の脚位置は固定する。機体座標系*x*, *y*方向は、操作者の指示速度に応じてイベントドリブン歩容アルゴリズム(2)により決まる。

図3(e)の機体下げ動作時は、各脚を同時に上げ、車輪が接地するまで機体を下げる。

次に、脚先の機体座標系*z*方向のコンプライアンスの設定に関して記述する。

図3(e)で車輪が接地したことの判断は、下り段差歩容の推定不足対策(10)などと同様に、脚荷重分担率 $k_{leg}$ (9)の推移を監視することで行う。具体的には、 $k_{leg}$ が閾値 $R_k = 0.5$ (値は実験的に選定)より小さくなると、車輪が接地したと判断する。脚荷重分担率 $k_{leg}$ とは、機体全重量のうち脚全体で支持負担する割合である。この場合、脚先剛性があまりに高いと機体を下げていった場合に脚による機体支持から車輪による機体

支持の遷移期間が短く、機体下げ動作終了のタイミングがわかりづらくなる。そこで、脚先にコンプライアンスを設定し、目標脚先位置と実際の脚先位置の偏差が通常歩容<sup>(1)</sup>の基本設定値  $\Delta_s$  となるようにする。つまり、4脚で全機体荷重  $W$  を支持し、かつ、 $z$  方向の脚先位置と目標位置との偏差が  $\Delta_s$  となる次式の脚先剛性  $K_{zd}$  を設定する。 $n$  は支持脚の本数  $n=4$  である。

$$K_{zd} = W / n\Delta_s \quad (3)$$

なお、準備踏換直後のコンプライアンスの値は、式(3)の値とは異なるため、図3(c)の期間に、各脚において一定割合ずつコンプライアンス値を変化させ、図3(d)で式(3)の値になるようにする。

#### 4. シミュレーション

本章では、提案する歩容制御手法にて、対象とする犬不整地路面の移動が可能であることを検証する。

以下のシミュレーションおよび実験条件として、遊脚の脚先速度 0.5[m/s]、遊脚時の脚上げ高さ 0.2[m]、遊脚の接地検出するまでの最大脚下げ高さ 0.4[m]、歩幅 0.3[m]、脚先の目標位置と実際位置の基本偏差  $\Delta_s=0.043$ [m]、全脚先合計の機体座標系  $z$  方向の脚先剛性および車輪サスペンション剛性 7500[N/m]、脚と車輪の基本荷重分担率 1:1、車輪回転制御の P ゲイン 80[Nm/rad]、D ゲイン 20[Nm/rad]、段軸制御の P ゲイン 1000[Nm/rad]、D ゲイン 100[Nm/rad/s]、環境は未知とし、脚にはトロット歩容<sup>(2)</sup>を行わせた。また、シミュレーションは動力学シミュレーションソフトである ODE (Open Dynamics Engine) を用い、条件として、脚および車輪と路面の接触は剛体で、脚と路面の摩擦係数は 0.4、車輪と路面の摩擦係数は 0.7 とした。

**4.1 Type C-1 路面** 図7(a)に示す、高さ 0.15[m]、幅 0.15[m]の未知の凸路面に対する移動シミュレーションを行った。(b)はそのときの様子を示したものである。ロボットは、乗り越え歩容により凸路面上に乗り上がり、その後、段差下り歩容<sup>(10)</sup>にて凸路面から下りた。

そのときのデータを図8(a)～(f)に示す。

図8(a)は、機体の目標直進速度を示す。図中(1)で、機体を最大限上昇させ、(2)で機体を上げたまま1歩幅分推進し、(3)で機体を下ろし凸路面上に接地する。その後、図中(4)～(6)で段差下り歩容により、凸路面上から下りる。

図8(b)には、胴体ピッチ角、胴体ロール角、そして仮想斜度を示した。乗り越え歩容では、図6のように全脚を下げたままのため、姿勢角はほぼ一定となり、

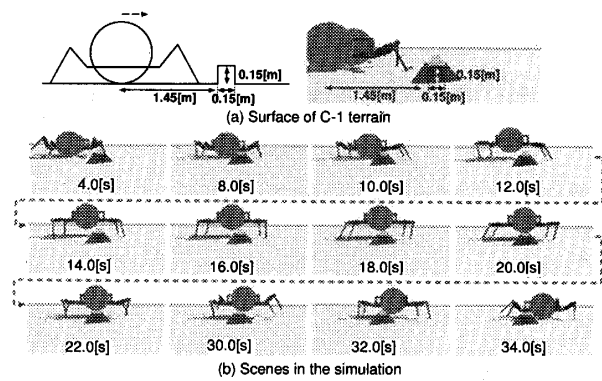


Fig. 7 Scenes in the simulation when moving on Type C-1 terrain

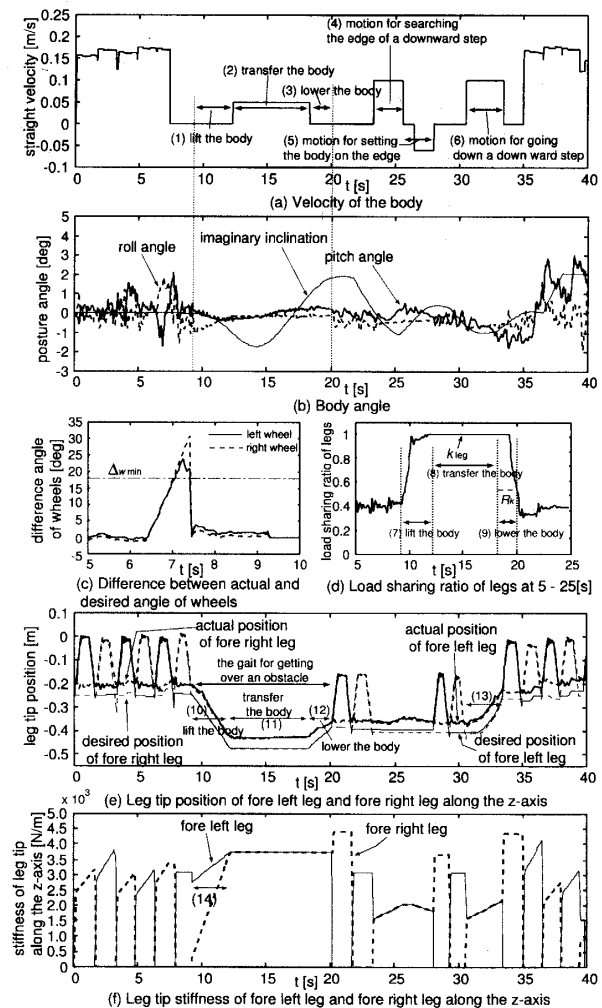


Fig. 8 Simulation data (Type C-1)

また、乗り越え歩容時以外では、胴体ピッチ角は仮想斜度に追従し、胴体ロール角は水平を保っている。

図8(c)には、車輪角度偏差を示した。6[s]以降に凸路面上に車輪が接触し、両車輪の偏差が増加していることがわかる。

図8(d)には、乗り越え動作時の脚荷重分担率  $k_{leg}$

の推移を示した。図中 (7) の機体上げ動作で  $k_{leg}$  が上昇し、(8) の機体推進動作では  $k_{leg}$  がほぼ 1 となり、(9) の機体下げ動作では機体が接地するため  $k_{leg}$  が減少していることがわかる。  $k_{leg}$  が閾値  $R_k$  より小さくなると終了踏換動作に移行する。

図 8 (e) には、左右前脚先の機体座標系 z 方向の目標位置と実際位置を示した。図中 (10) は機体上げ動作のときのものであり、(11) は機体推進動作時、(12) は機体下げ動作時のものである。両脚とも下限 (-0.475[m]) まで目標値が下がっていることがわかる。なお、図中 (13) は段差下り歩容での全脚支持歩容期間である。

図 8 (f) には、左右前脚先の機体座標系 z 方向の剛性を示した。脚先位置の目標位置との偏差に応じて、剛性が適切に変化している。図中 (14) は機体上げ動作時の剛性値であり、通常歩容時の剛性から乗り越え動作時の剛性に連続的に変化している。

**4.2 Type A-3 路面** 図 9 (a) に示す高さ 0.10[m] の段差の始端に、高さ 0.20[m]、幅 0.15[m] の凸部がある路面に対する移動シミュレーションを行った。(b) は、そのときの様子を示したものである。ロボットは、0.10[m] の上り段差という認識 (段差上り歩容時の推定段差高さ<sup>(9)</sup>は  $H_e = 0.089$ ) のもと、はじめに段差上り歩容<sup>(9)</sup>を行うが、途中で段差を上れないことを検知し、乗り越え歩容に遷移する。その後、乗り越え歩容にて凸部に上った後に、段差下り歩容にて段差を下り、移動を実現した。

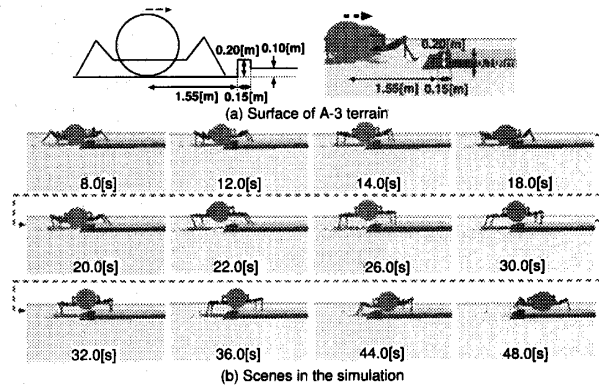


Fig. 9 Scenes in the simulation when moving on Type A-3 terrain

そのときのデータを Fig.10 (a) ~ (f) に示す。

図 10 (a) には、機体目標速度を示した。図中 (1) は段差上り歩容を行っている期間である。推定段差高さが実際の段差高さよりも低いため、図 10 (c) に示すように、車輪角度偏差  $\delta_{wi}$  の合計が閾値  $\Delta_{wup}$  を超過 (図中 (6)) し、乗り越え歩容に遷移する。図 10 (a)

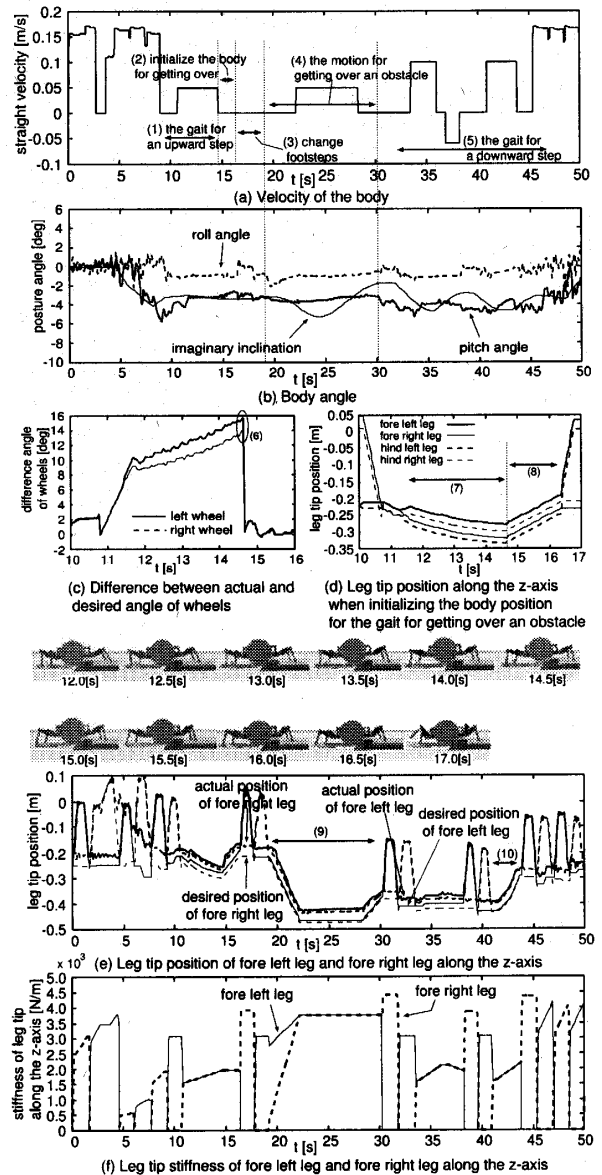


Fig. 10 Simulation data ( Type A-3 terrain )

(2) は、途中まで上昇した機体を下ろして乗り越え歩容の準備をしている期間である。図中 (3) は、乗り越え歩容の準備踏換期間であり、(4) で乗り越え動作を行っている。また、図中 (5) で段差下り歩容を行い、凸路面に乗った機体を下ろしている。

図 10 (b) には、胴体ピッチ角、胴体ロール角、そして仮想斜度を示した。Type C-1 路面移動時と同様、乗り越え動作時 (図 10 (a) (4) の期間) には姿勢角はほぼ一定であり、また、それ以外では、胴体ピッチ角は仮想斜度に追従し、胴体ロール角は水平を保って移動している。

図 10 (c) には、段差上り歩容の全脚支持歩容<sup>(9)</sup>で段差を上っているときの、左右の車輪角度偏差を示した。図中 (6) で乗り越え歩容への遷移を検知後は、

車輪目標角度を実際の角度にリセットするため、車輪角度偏差が一旦0となる。

図10(d)には、段差上り歩容から乗り越え歩容に遷移する際の、各脚先の機体座標系z方向の目標位置を示した。図中(7)で段差上り歩容により機体を上昇させるが、図10(c)の(6)で示した時間の後、先位置を上昇させることで機体を下げ、乗り越え歩容の準備を行う(図10(c)(8))。そのときの様子を図10(d)の下に連続写真で示した。なお、機体は段差上り歩容中に上昇した分だけ下ろす。

図10(e)には、左右前脚先の機体座標系z方向の目標位置と実際位置を示した。図中(9)は乗り越え歩容における乗り越え動作期間であり、図中(10)は段差下り歩容における全脚支持歩容期間である。

図10(f)には、左右前脚先の機体座標系z方向の剛性を示した。

**4.3 Type B-3 路面** 図11(a)に示す、深さ0.15[m]の下り段差の端に、高さ0.10[m]、幅0.15[m]の凸部がある路面に対する移動シミュレーションを行った。(b)はそのときの様子を示したものである。ロボットは、段差の手前で下り段差始点探索動作<sup>(10)</sup>に入る。下り段差始点探索動作中(図11(d)(1))に凸路面にぶつかるために車輪角度偏差が大きくなり、凸地形の存在を検知して、乗り越え歩容に遷移する。乗り越え動作(図11(d)(2))にて凸路面に機体を乗り上げ、その後、段差下り歩容(図11(d)(3))にて段差を下る。

図11(c)には、胴体ピッチ角、胴体ロール角、そして仮想斜度を示した。図11(d)には、左右前脚先の機体座標系z方向の目標位置と実際位置を示した。目標位置と実際位置に偏差が生じるのは、脚先にコンプライアンスを設定しているからである。図11(e)には、左右前脚先の機体座標系z方向の剛性を示した。なお図11(d)(4)の期間は、凸路面上から機体を下ろす際の下り段差始点探索動作である。

以上より、段差下り歩容と乗り越え歩容の連携によりType B-3路面を移動できることがわかる。

## 5. 不整地路面での移動実験の様子

図2に示した対象路面、および左右段違い路面において移動実験を行った結果を記述する。左右段違い路面に関してもシミュレーションを行い、また、各実験とも前章と同様に詳細にデータを把握したが、紙面の都合上、その一部のみを掲載する。なお文献<sup>(9)(10)</sup>では、斜め進入する場合となどらかな段差についても記載したが、乗り越え歩容の場合のそれらの路面での効

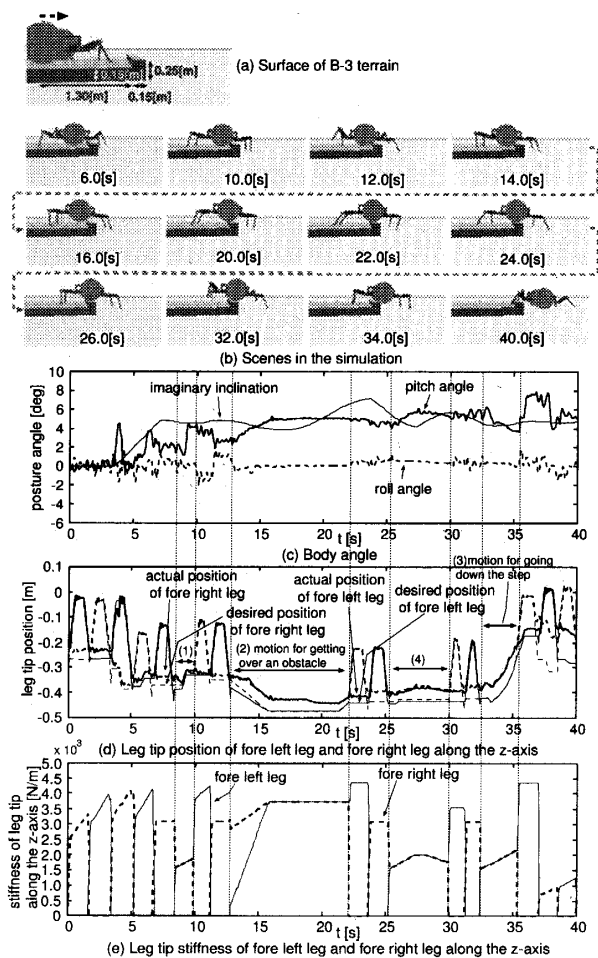


Fig. 11 Simulation data when moving on Type B-3 terrain

果は、文献<sup>(9)(10)</sup>の検討で十分予測できるため、本章では省略した。

**5.1 Type C-1 路面** 図12(a)に示す路面に対する移動実験を行った。これは、図7と同じ地形である。図12(b)はそのときの様子を示したもの(進行方向は右前から左奥)であり、実験機でも乗り越え歩容にて凸路面上に乗り上げ(図12(b)14~20[s]付近)、その後、段差下り歩容にて凸路面から下り(図12(b)34~38[s]付近)、移動が実現できていることがわかる。

**5.2 Type A-3 路面** 図13(a)に示す路面に対する移動実験を行った。これは、図9と同じ地形である。図13(b)は、そのときの様子を示したもの(進行方向は右前から左奥)であり、実験機でも、段差上り歩容で段差を上れないことを検知した後(図13(b)14[s]付近)に、乗り越え歩容に遷移して、凸路面上に乗り上げ(図13(b)22~28[s]付近)、その後、段

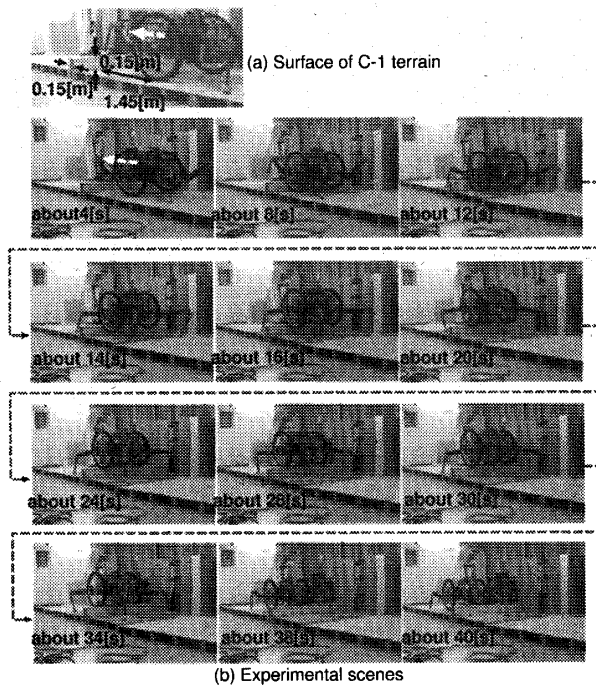


Fig. 12 Experimental scenes when moving on Type C-1 terrain

差下り歩容にて凸路面から下りている (図 13 (b) 42~44[s] 付近) ことがわかる。

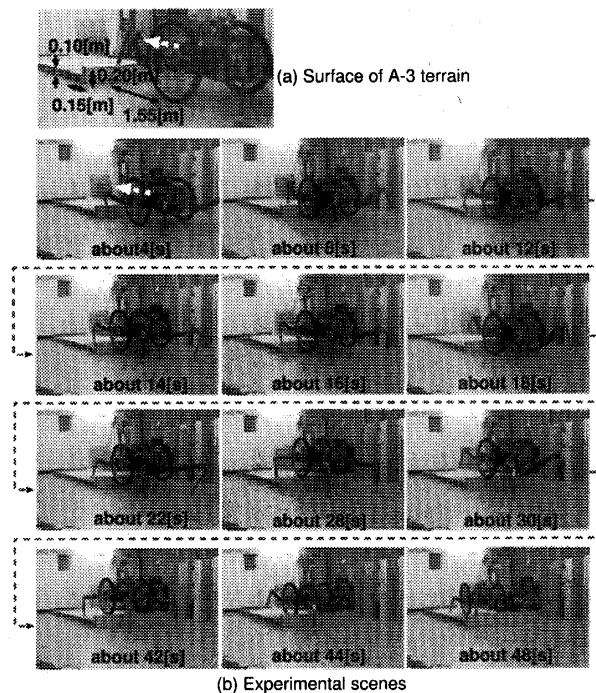


Fig. 13 Experimental scenes when moving on Type A-3 terrain

**5-3 Type B-3 路面** 図 14 (a) に示す路面に対する移動実験を行った。これは、図 11 と同じ地形である。図 14 (b) はそのときの様子を示したもの (進行方向は左奥から右前) であり、実験機でも、下り段差始点探索動作中に進めないことを検知した後 (図 14 (b) 8[s] 付近) に、乗り越え歩容に遷移して、凸路面上に乗り上げ (図 14 (b) 14~22[s] 付近)、その後、段差下り歩容にて凸路面から下りている (図 14 (b) 26~30[s] 付近) ことがわかる。

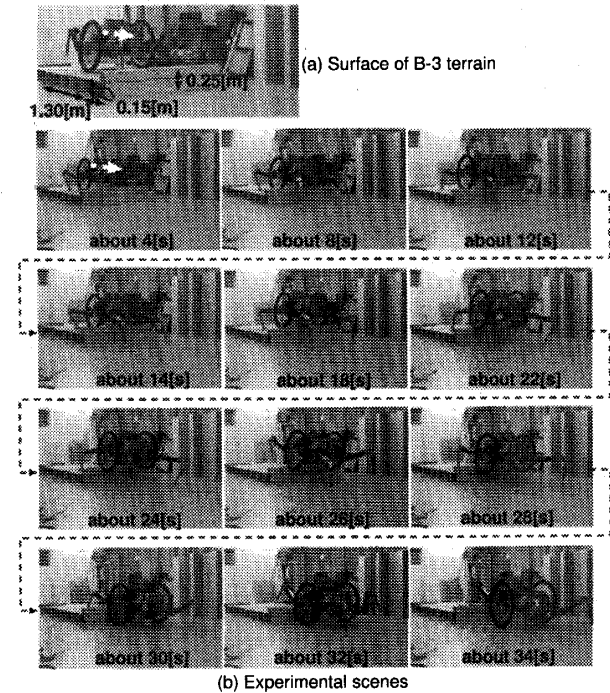


Fig. 14 Experimental scenes when moving on Type B-3 terrain

**5-4 左右段違い路面** 図 15 (a) に示すように、凸路面以降の路面高さが左右で異なる路面に対する移動実験を行った。この場合は、右側の路面が 0.05[m] 高い。図 15 (b) は、そのときの様子を示したもの (進行方向は右奥から左前) である。左右路面の高さが異なっても、乗り越え歩容における機体上げ動作が安定して行われ、移動が実現できていることがわかる。

図 15 (c) には、胴体ピッチ角、胴体ロール角、そして仮想斜度を示した。左右路面の高さが違う場合においても、姿勢がロール方向に大きく傾いたりせず、移動が実現できていることがわかる。なお、35[s] 付近の大きな揺れは、後脚が凸路面に接地するときの衝突の影響によるものである。

図 15 (d) ~ (g) には、乗り越え動作時の各脚先の機体座標系 z 方向の脚先位置と目標位置、および脚先



剛性を示した。左右段差高さの差の分だけ、乗り越え動作時の左右前脚の脚先目標位置が異なっていることがわかる。後脚に関しては、路面の高さの差がないことからほぼ同じ位置となっている。

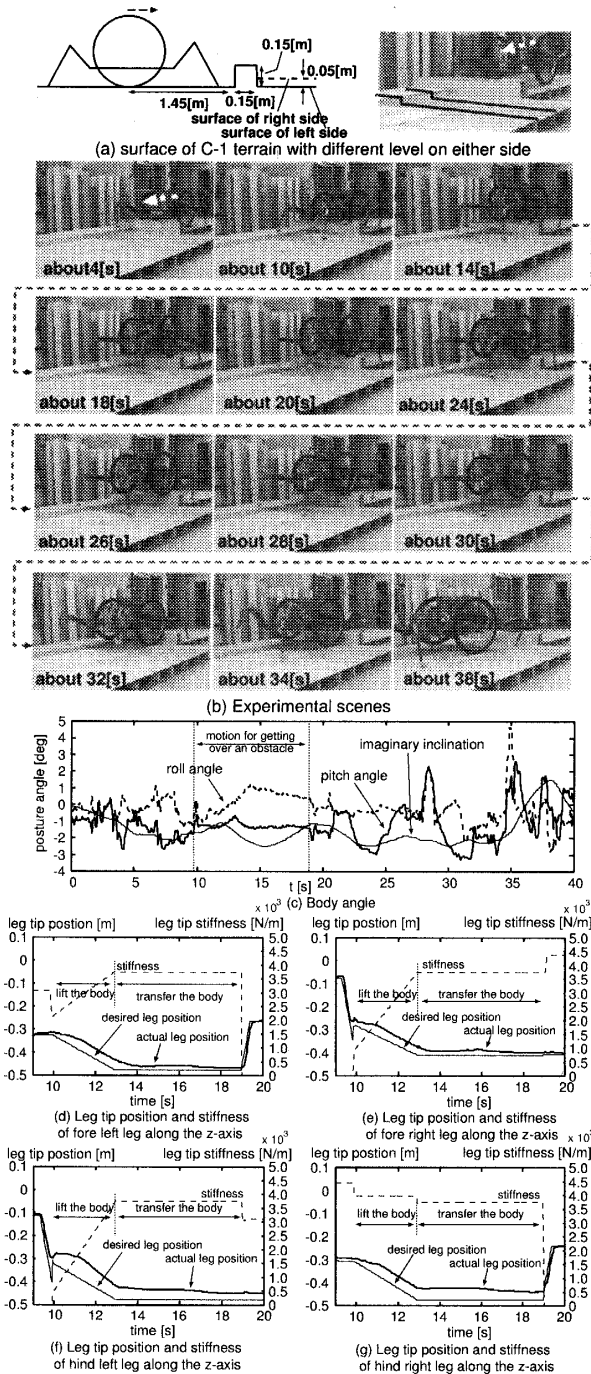


Fig. 15 Experimental scenes when moving on a terrain with different level on either side

## 6. おわりに

本論文では、脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容の一つである乗り越え歩容に関して、その制御手

法を提案した。そして、提案した乗り越え歩容が対象とする大不整地地形について、シミュレーションと実験により移動能力を検証した。全ての対象路面に対して、シミュレーションと実験をそれぞれ行い確実に移動できることを確認したが、本報告では紙面の都合上、一部のデータと実験の様子を掲載するにとどまった。

今後の課題としては、本論文も含めて提案した3つの歩容戦略からなる大不整地適応歩容と通常歩容が有機的に連携することで、各種不整地が連続する総合的な不整地を脚車輪分離型ロボットが移動可能であることを検証することである。別論文にて報告したいと考えている。

## 文 献

- (1) Nakajima, S. et al., *The Motion Control Method for a Leg-wheel Robot on Unexplored Rough Terrains*, "Journal of the Robotics Society of Japan", vol.22, no.8, (2004), pp.1082-1092.
- (2) Nakajima, S. et al., *Trot and Pace Gaits based on the Predictive Event Driven Method for a Leg-wheel Robot*, "Journal of the Robotics Society of Japan", vol.22, no.8, (2004), pp.1070-1081.
- (3) Ohmichi, T. and Ibe, T., *Development of Vehicle with Legs and Wheels*, "Journal of the Robotics Society of Japan", vol.2, no.3, (1984), pp.244-251.
- (4) S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, "MIT Press", (1989).
- (5) D. M. Gorinevsky and A. Shneider, *Force Control of Legged Vehicles over Rigid and Soft Surfaces*, "International Journal of Robotics Research", vol.9, no.2, (1990), pp.4-23.
- (6) J. E. Bares, W. L. Whittaker, *Configuration of Autonomous Walkers for Extreme Terrain*, "The International Journal of Robotics Research", vol.12, no.6, (1993), pp.535-559.
- (7) T. Hori, et al., *Force Control for Hexapod Walking Robot with Torque Observer*, "Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems", (1994), pp.1294-1300.
- (8) Nakajima, S. and Nakano, E., *Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot (1st Report: Gait Strategy)*, "Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)", vol. 72, no. 721, (2006), pp. 2926-2931.
- (9) Nakajima, S. and Nakano, E., *Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot (2nd Report: Gait for an Upward Step)*, "Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)", vol. 72, no. 721, (2006), pp. 2932-2939.
- (10) Nakajima, S. and Nakano, E., *Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot (3rd Report: Gait for a Downward Step)*, "Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)", vol. 72, no. 721, (2006), pp. 2940-2947.