

脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容*
(第6報, 斜面での段差上り歩容編)森村章一*¹, 中嶋秀朗*², 中野栄二*²Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot
(6th Report, Gait for an Upward Step on Slope)Shouichi MORIMURA*³, Shuro NAKAJIMA and Eiji NAKANO*³ Graduate School of Information Sciences, Tohoku University,
6-6-01 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

A leg-wheel robot has mechanically separated four legs and two wheels, and it performs high mobility and stability on rough terrains. Although we have researched the adaptive gait for large rough terrains of the leg-wheel robot, it was limited to the terrain without a slant. To climb it over, the stability of the robot needs to be more considered. In this paper, the method to raise the stability for the upward step is described. If the robot needs larger stability at the upward step, the body trajectory has to go along to the terrain. In other words, the wheels have to touch the terrain. However the shape of the rough terrain is so complicated, that it is difficult to check with an external sensor. Therefore, the points are a judgment whether the wheels contact with the terrain and the control of the body. The robot judge whether the wheels contact with the terrain using rotation information of wheels or the load shearing ratio of legs. By deciding the body trajectory with these two methods, the robot can climb the rough terrain over more safely.

Key Words: Leg-wheel Robot, Large Rough Terrain, Upward Step on Slope, Body Trajectory, Rotation Information of Wheels, Load Shearing Ratio of Legs

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り, 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できる. 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⁽¹⁾⁽²⁾. 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⁽¹⁾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.

図1に示す実験機は車椅子程度の大きさであるが, 0.2[m]程度の段差を乗り越えることは難しい. これは,

車輪機構は摩擦状態がよいときでも車輪径(実験機では0.64[m])の3分の1程度しか踏破することができない上に, 不整地では摩擦状態がよいとは限らないためである. そこで, 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(凹凸高さが±0.2[m]程度までの未知不整地)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⁽³⁾.

文献⁽⁴⁾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」の制御手法について論じた. さらに文献⁽⁵⁾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」の制御手法について論じた. そして文献⁽⁶⁾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」の制御手法について論じた. また文献⁽⁷⁾では, 通常不整地での移動制御手法(通常歩容)と大不整地での移動制御手法(大不整地適応歩容)を路面に応じて選択・使用する「総合歩容」について論じた.

しかしながら, 段差表面が斜面である地形(斜面ベースの大不整地)はこれまでの論文の対象外であった. これは, 人工的な屋外不整地では段差表面はある程度水平の場合が多いという理由によるものである. しかし, さらに移動可能範囲を広げるためには, 山林などの斜面ベースの不整地踏破能力は必要不可欠であ

* 原稿受付 2007年1月4日.

*¹ 学生員, 東北大学大学院情報科学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01).*² 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: morimura@rm.is.tohoku.ac.jp

る。本論文ではこれまで既に論じている「段差上り歩容」を斜面に適応する際の問題点について明確にし、その対策について議論する。なお、これまでの報告と同様、基礎的な未知不整地移動能力を内界センサ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思想に基づき議論を行っていくため、基礎的な不整地踏破能力を向上させることを目的とした本論文においては内界センサのみを用いることとする。

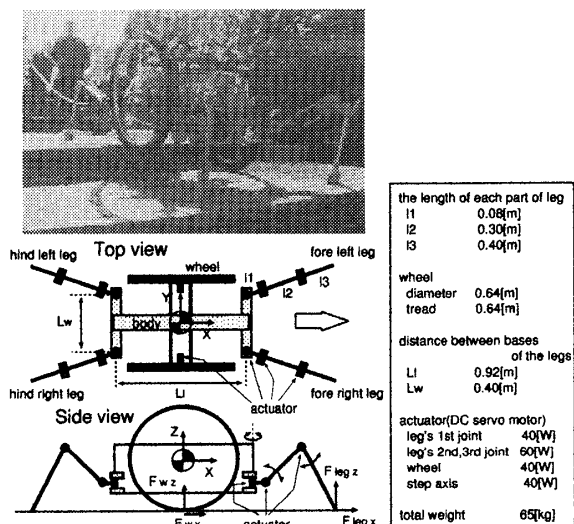


Fig. 1 A leg-wheel robot "Chariot 3"

2. 段差上り歩容の流れ

従来の段差上り歩容の流れについては、文献⁽⁴⁾で詳しく述べているが、ここでも簡単に説明する。

図2に段差上り歩容の流れを示す。

通常不整地では、 Trot 歩容による基本移動制御手法⁽¹⁾ (以下、通常歩容と呼ぶ) を用いている。通常歩容中に上り段差に車輪が接触すると、機体が進まなくなり、後述する車輪角度偏差による判別手法を用いて上り段差の始点を検知する (図2②)。

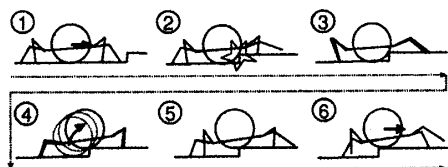


Fig. 2 An image of the gait for an upward step

段差の始点を検知すると、全ての脚を用いて機体を持ち上げる歩容 (全脚支持歩容) の準備のために脚の踏換 (準備踏換) を行う。このとき、全脚支持歩容での移動距離を最大限確保するために、全ての脚を可動範囲の始点に踏み換え、脚先位置と胴体姿勢などの幾何学的情報を用い、段差が水平で一段の単純なものと仮定し段差高さを推定する (図2③)。その後、全脚支持

歩容により推定高さだけ胴体を持ち上げる (図2④)。

脚が可動限界に達したことにより全脚支持歩容は終了し通常歩容に遷移するために、脚の踏換 (終了踏換) を行う (図2⑤)。はじめの2脚が踏み換えた後、通常歩容に遷移する (図2⑥)。

3. 制御手法

3.1 段差開始位置の検知 上り段差に到達すると、通常歩容では前に進めなくなり (図2②) 車輪角度偏差 δ_w が生じ、これにより段差開始位置を検知する。

車輪角度偏差 δ_w は、車輪目標角度を θ_{wd} 、左右の車輪現在角度の平均値を θ_w とすると、次式で表される。

$$\delta_w = \theta_{wd} - \theta_w \quad (1)$$

この δ_w が閾値 Δ_w を越えた時点で段差と判断する。

$$\delta_w > \Delta_w \quad (2)$$

これまでその閾値 Δ_w は一定であった。しかし、斜面においては段差がなくとも自重による負荷のため目標角度に対する車輪偏差は大きくなる。これは、機体が斜面から落ちていかないように支える力を発生しなくてはならないためである (図3)。

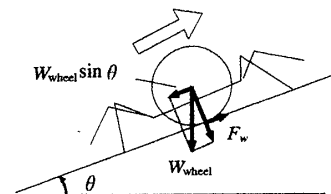


Fig. 3 Wheel angle error grows on a slope

この図において、 W_{wheel} は車輪が負担する荷重であり、ロボット全体の重さ W_{body} と、脚が負担する荷重 W_{leg} の差より求めることができる。なお、 W_{leg} は脚の関節のトルクから計算できる。

$$W_{wheel} = W_{body} - W_{leg} \quad (3)$$

F_w は車輪が発生する力、また、 θ は斜面の斜度である。このとき、 W_{wheel} の斜面に水平な成分 (W_{wheel} のうち車輪の回転力により支える成分) は、 $W_{wheel} \sin \theta$ となり、これが F_w と等しくなる。車輪は PD 制御を行っているために、その剛性により車輪角度偏差が決まり、 F_w に比例して偏差が大きくなる。つまり、 $\sin \theta$ に比例した大きさとなる。 θ は実際には脚先接地点と車輪接地点および姿勢角度より推定される仮想斜度⁽¹⁾ α_{img} を用いる。このことより、閾値 Δ_w を次式のようにした。

$$\Delta_w = \Delta_0 + A \sin \alpha_{img} \quad (4)$$

ここで A は比例定数, Δ_0 は閾値の基準値であり一定である。これらの値は実験により試行的に求めた。

3.2 全脚支持歩容における制御

3.2.1 自然地形のための踏破手法の必要性

段差上り歩容は、脚先位置と仮想斜度から段差高さを推定し、その情報を基に機体を持ち上げる高さを決定する。しかしながら、林業や火山噴火口付近の探索などの複雑な自然地形での使用を考えると以下のような問題が生じる。

地形の凹凸が複雑な形状であるため、段差の高さを推定することが困難であり、不整地踏破中に路面が崩れる(石が転がるなど)ことも多く、その場合、推定精度が大幅に悪くなる。その結果、乗り越え歩容への遷移が頻繁に発生し、移動効率が悪くなる。

よって移動速度は原理的に遅くなるが確実な方法をとることとし、自然地形などでは文献⁽⁴⁾に用いられていた方法とは別の手法である斜面对応型段差上り歩容を提案する。なお、段差形状が推定しやすい場所(街中など人工の路面が多い場所)では文献⁽⁴⁾にあるように段差にあわせて円弧軌道を行うこととし、段差高さの推定は前節に述べたように行う。これは、段差の形状が推定できる場所ではこの方法が効率がよく、高速に行える場合が多いからである。これらの手法の切替えは人が行うものとし、本論文では扱わない。

3.2.2 自然地形の踏破の際の考え方

段差上り歩容を斜面において行う際、段差高さがわからないときの問題点について考える。この場合、主に問題となるのはその場所が上り斜面で上り段差であった場合である。このとき機体の軌道をどうするかが問題となる。なお、下り斜面において上り段差があったとしても通常歩容によって踏破できることが多く、それほど問題とはならない。

このとき機体の動く軌道として以下の3種類が考えられる。

● 軌道1

機体を持ち上げられる最大高さまで持ち上げ、その後、斜面方向に進め地面に下ろす方法(図4①)

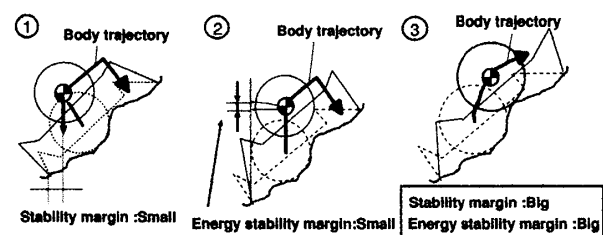


Fig. 4 Comparison of the stability margin

が考えられる。しかし、この方法を斜面で行うと機体を持ち上げる際に後方に下がることになり、その際、静的安定余裕が小さくなり、好ましくない。

● 軌道2

軌道1に対し、機体を後方に下げず、鉛直上向きに持ち上げ、その後、機体を前進させ、地面に下ろす方法(図4②)も考えられる。この方法は、機体を後方に下げることがないため、静的安定余裕は①の方法のように小さくなることはない。しかし、重心位置を高く持っていくことになり、その結果、エネルギー安定余裕⁽⁸⁾が小さくなるため、この方法もあまり好ましい方法ではない。

● 軌道3

機体を地面に沿わせながら段差を踏破する方法(図4③)。この方法を用いたとき、機体が後方に下らないため静的安定余裕は、段差踏破前の初期位置より小さくならない。また、機体の水平方向の位置が同じである場合、機体の高さが低い方がエネルギー安定余裕が大きくなり、軌道3は最も低い位置を通るようになっている。そのため、軌道1~3の中で最も安定性が高い。

以下、軌道3を実現する方法を検討していく。

3.2.3 解決法 機体を地面に沿わせる方法を考える際に鍵となることは以下の通りである。

- 山林などの自然地形であるため、地形が崩れる可能性を考えると、地形情報は常に化する。なんらかの方法で地形情報を得る場合、リアルタイムに地形の変化を確実に得ることが必要となる。
- しかしながら、複雑な地形情報を完全に得ることは非常に困難である。そのため、地形情報の取得を多少失敗したとしても、ロボットが危険な状態に陥らない制御法が必要となる。

これらのことを考慮し、機体の制御法を検討する。

この後、機体を地面に沿わせる制御法として、脚荷重分担率監視法と車輪回転状態監視法を検討する。この2つの方法の利点欠点を議論し、最終的にはこれらの方法を組み合わせて制御を行う。はじめに各制御法について述べる。

3.2.4 脚荷重分担率監視法 機体を地面に沿わせる方法のひとつとして、脚荷重分担率 k の監視を行う方法が挙げられる(図5)。脚荷重分担率は、ロボットの重さを W_{body} 、各脚の負担する荷重を $W_{\text{leg}i}$ とすると、

$$k = \frac{\sum W_{\text{leg}i}}{W_{\text{body}}} \quad (5)$$

と定義される。

通常歩容で歩行していたロボットが上り段差を発見

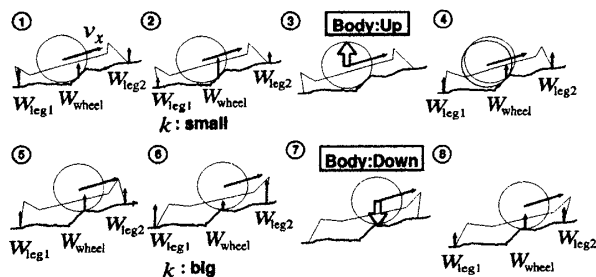


Fig. 5 Method of checking the load shearing ratio of legs

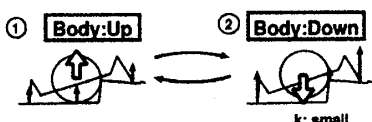


Fig. 6 The problem of the method of checking the load shearing ratio of legs

し、全脚支持歩容を開始したとする。はじめに、全ての脚を用いて機体を前方に進める (図5 ①)。このとき、車輪が地面により上側に押され、車輪が分担する荷重が大きくなり、その結果、脚荷重分担率 k が小さくなる (図5 ②)。この状態は、機体の位置が地面に対し低い位置にあるということなので、機体を上に持ち上げる (図5 ③)。これを繰り返せば段差を上り踏破することができる (図5 ④)。ただし、段差を踏破する際、機体を上に持ち上げすぎている場合もある。例えば、図5 ⑤ から図5 ⑥ の状態になったとすると、車輪が浮き気味となり、車輪にかかる荷重が小さくなり、脚荷重分担率 k が大きくなる。この状態は、機体の位置が地面に対し高い位置にあるということなので、機体を下に下げる (図5 ⑦)。このように、ある一定の脚荷重分担率基準値を定め、実際の値がそれより大きいか、小さいかを比較することで機体を上下させ、それにより、機体は地面に沿った位置を移動する。

しかしながら、この方法には大きな問題が一つある。ロボットが上ろうとした不整地が図6のような急な段差であった場合、この方法は問題となる。段差の手前にロボットがいるとき (図6 ①)。車輪が負担する荷重が大きいため、機体を上側に持ち上げようとする。すると、図6 ②のような状態となるが、このとき、車輪はその端の方で荷重を支えていることになる。しかし、その力はほとんど摩擦力で支えていることになり、このような状態では垂直抗力が小さいため摩擦力も小さくなる。そのため、車輪が支える荷重は大きくなることなく、脚荷重分担率は大きな値となる。そのため、機体を下げようという制御が働き、再び、図6 ①

のような状態へに戻ってしまう。これを繰り返してしまふために、この方法では段差を踏破することができない可能性がある。

3.2.5 車輪回転状態監視法

脚荷重分担率監視法とは異なる、もうひとつの方法を考える。モータに電圧を印加せず、車輪をパッシブな状態とすることで地面に触れているかどうかを調べる方法である (図7)。車輪が接地していた場合、車輪は外力により回転する (図7 ①)。また、車輪が浮いていた場合、車輪は回転しない (図7 ②)。このように車輪の回転状態を監視し、この情報から車輪が地面に接地しているかどうかを判定できる。この判定を今後、接地判定と呼ぶことにする。接地判定を元に機体を上昇、あるいは下降させることで不整地を踏破できる。このとき、ロボットを上昇させる方向の決定法の違いにより以下の2つの方法が考えられる。

● 方法1

機体の進行方向 (X 方向) の速度を一定とし、接地判定を元に、機体の高さ方向 (Z 方向) の速度を変更する方法 (図8 左)

● 方法2

機体の速度を一定とし、接地判定によってロボット本体の移動角度 θ_{up} を変化させる方法 (図8 右) ここで考慮すべき点として以下のことが挙げられる。いずれかの方法によって決定される機体の移動方向は地形の接線角と近い方向でなくてはならない。車輪に加わる力を軸方向の成分と接線方向の成分に分解したときに接線方向の成分が車輪を回転させる力になり、機体が凸路面に引っかかり接線方向の成分が小さくなった場合に、車輪が地面に接しているにもかかわらず車輪が回転せず接地判定を誤る可能性があるためである (図9)。このことを考慮して、方法1と方法

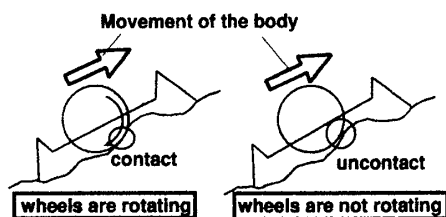


Fig. 7 Checking the rotation of wheels

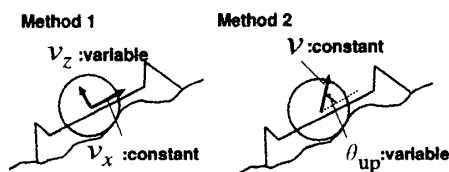


Fig. 8 Comparison between the two methods

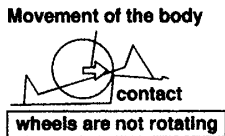


Fig. 9 Misjudgment that the robot does not touch the ground

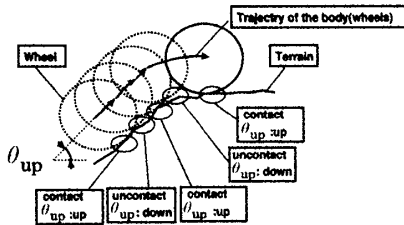


Fig. 10 The trajectory of the body

2について検討する。

方法1を行った場合には、進行方向(X方向)の速度 v_x が一定であるために、路面が急であった場合に、機体のZ方向速度 v_z を非常に大きくしなければならぬ。しかし、モータの出力には限界があり、その速度を出すことは困難である。 v_x を十分小さくしておくことも考えられるが、それでは路面の形状がなだらかであった場合にロボット本体の移動速度が極端に落ちてしまう。また、路面の接線角とほぼ等しくなるようなZ方向の速度を決定しなくてはならないが、方法1を行っている最中に路面の接線角を推定するのは難しい。これに対し、方法2は、速度を一定としているために、モータの能力に見合った速度を常に出すことが可能となる。また、ロボットの進行方向の角度を決定し、その方向も車輪の接地判定によって決定しているため(図10)、本体の移動方向を地形の角度からフィードバックを行っているのに近い制御となっており、本体の進行方向は路面の接線角とほぼ等しくなる。これらのことから方法2を採用する。

ここで、 θ_{up} を誤った方向としないため、 θ_{up} の角度範囲を定める。 θ_{up} の最大値 θ_{max} は、実験機で踏破可能な最大の段差高さ h_{max} を乗り越え始めるときの接線角となるため、その値に設定する(図11左)。ここでは実験機のサイズより $h_{max}=0.2[\text{m}]$ とする。

θ_{up} の最小値 θ_{min} は地面から少しだけ浮いてしまったとき(図11右)のことを考え、 $0[\text{deg}]$ よりわずかに小さな値とする。ここでは実験的に選択し $-5[\text{deg}]$ とした。また、 θ_{up} の初期値 θ_{mit} は上で定めた θ_{max} と等しくする。これは θ_{mit} を小さい値にしてしまうと、最初から図9の状態になり、車輪に加わる力に車輪と地面との接線方向の成分がほとんどないため、車輪が地面に接していても回転しにくく接地判定を誤る可能性

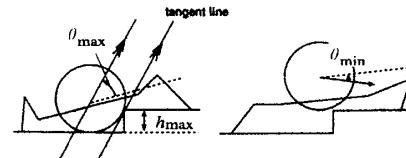


Fig. 11 θ_{max} and θ_{min}

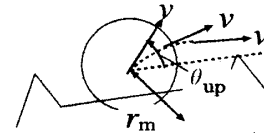


Fig. 12 Curvature radius of the body

があるからである。

また、移動方向の角度の急激な変化を防ぐために、 θ_{up} の変化の速度 $\dot{\theta}_{up}$ を適切に決定してやる必要がある。ここでは、 θ_{up} の角度変化と機体の移動速度 v から決まる、機体中心の曲率半径 r_m を元に決定する(図12)。ここで、 r_m は次式のように表される。

$$r_m = \frac{v}{\dot{\theta}_{up}} \quad (6)$$

r_m を決定する際に以下の3つのことを考慮する

- 機体が図9の状態に陥らないためには、 r_m はある程度大きい方がよい。小さすぎると図13②のようになり、車輪に加わる力の方向が適切でないため、車輪が地面に触れても回転しにくく、結果として接地判定を誤る可能性がある。そのため、

$$r_m \gg 0 \quad (7)$$

とする必要がある。

- r_m が極端に大きすぎると図13③のようになり、車輪が接地しなくなる。そのため、 r_m は車輪半径 r より小さくする必要がある。

$$r_m < r \quad (8)$$

- また、ただの平らな斜面踏破中に誤検知により万が一、大不整地適応歩容に移行してしまったとき(図14)のことを考えると、曲率半径は小さい方がよい。これは、 θ_{mit} が θ_{max} と同じ値であるために、凹凸がなくとも機体が地面から浮き、その高さ h が次式のように曲率半径の大きさで決まるからである。

$$h = r_m \quad (9)$$

これらのバランスを考え r_m を決定する必要があるが、今回は機体の浮く高さを $0.05[\text{m}]$ 以内に抑えることとし、 $r_m=0.05[\text{m}]$ とした。今回の実験機のサイズで $r_m=0.05[\text{m}]$ にしたときには、図13②の状態に陥

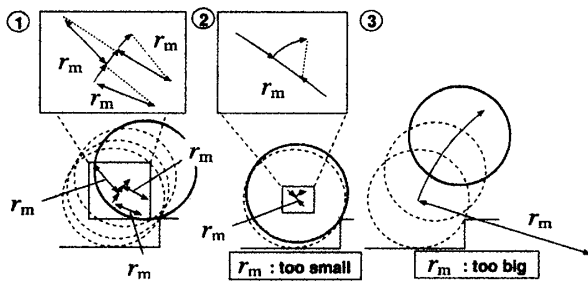


Fig. 13 Selection of curvature radius

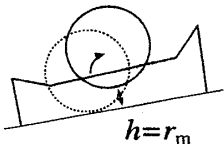


Fig. 14 Rise height by false judgement

らないことをシミュレーションにより確認した。 θ_{up} の変化速度は $r_m=0.05[m]$ を使い式 (6) により決定した。

図 15 は、上り段差に到達し大不整地適応歩容に遷移後の車輪角度をシミュレーションした値である。time=0.9[sec] で機体を持ち上げ始め、車輪が変化し始めている。ここで、 $K_p=0$ 、 $K_d=0$ である。車輪に摩擦などが動かないため、一度回転し始めると減速することがなく、車輪が地面から離れても回転し続ける。

現実には、摩擦があるため車輪が地面から離れて回転し続けることはないが、摩擦係数が小さすぎると車輪の回転状態を監視しにくい。そこで、車輪の角度を

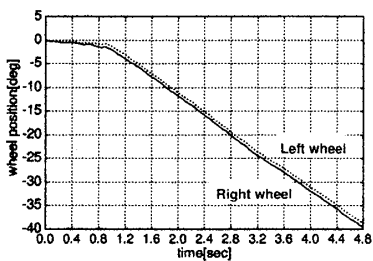


Fig. 15 Wheel angle (no control)

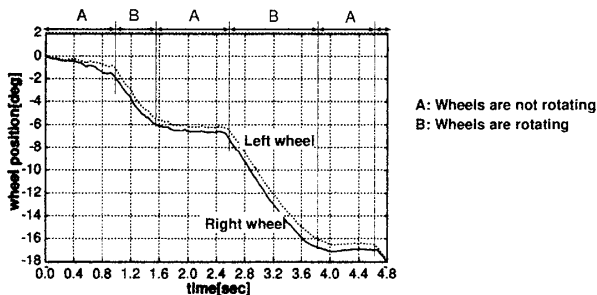


Fig. 16 Wheel angle (dumping control)

ダンパの要素を与え ($K_d \neq 0$)、回転が減速するようにすると車輪が地面から離れたときに回転が止まり、車輪の接地判定が容易になる。図 16 は、実際にダンパ成分を持たせたときの車輪回転角をシミュレーションしたものである。車輪が接地しているときは車輪角が変化し、離れると変化していないことから、この変化量を監視することにより車輪の接地状態が判定できる。

3.2.6 斜面对応型段差上り歩容 脚荷重分担率監視法と車輪回転状態監視法を比較すると、車輪回転状態監視法では前述のように急な段差についても踏破することができる。しかしながら、車輪が常時機体荷重を支持しないため、同じ斜度でも不連続な凹凸がなく、連続的に車輪が接地する地形では脚荷重分担率監視法を用いた方が安全性の面と、車輪推進力を有効に使えるという面で有利である。そのため、最初は車輪回転状態監視法を用い、路面の接線角が小さくなってきたとき、つまり θ_{up} が小さくなってきたときに脚荷重分担率監視法に切り替えることを提案する (図 17)。

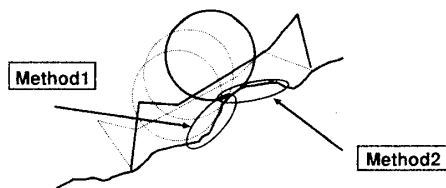


Fig. 17 Gait for an upward step on slope

具体的には次式が成り立つときに方法を切り替える。

$$\theta_{up} < \theta_{threshold} \quad (10)$$

ここで、 $\theta_{threshold}$ は一定値である。こうすることで、車輪が荷重を支えられる場所では荷重を支持し、接地多角形が大きくなり安全性が上がる。かつ、車輪の駆動力を有効に使うことも可能となる。このように2つの方法を切り替え段差を上る方法を斜面对応型段差上り歩容と呼ぶことにする。この方法により、車輪回転状態監視法のみより安全性と不整地踏破性が上がる。

4. 実験による動作確認

4.1 平地ベースでの動作確認 ここまで述べてきた方法を実験により確認する。図 18 に車輪回転状態監視法により段差を上る様子を示す。ここでは、脚先位置などから推定される段差高さ情報を用いていない。0.2[m/s] で直進移動を行い、段差踏破中は機体の移動軌跡に沿って0.2[m/s] で移動している。図より段差を踏破できることが確認できる。同様に凸型地形を踏破する様子を図 19 に示す。段差高さ情報を使わない方法であるため、乗り越え歩容⁽⁶⁾とは異なり、この

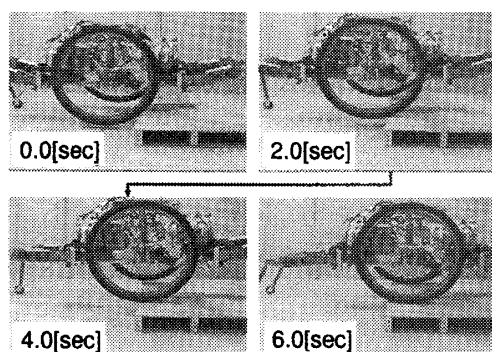


Fig. 18 Climbing of an upward step by method of checking the change of wheel angles (Step height = 0.1[m])

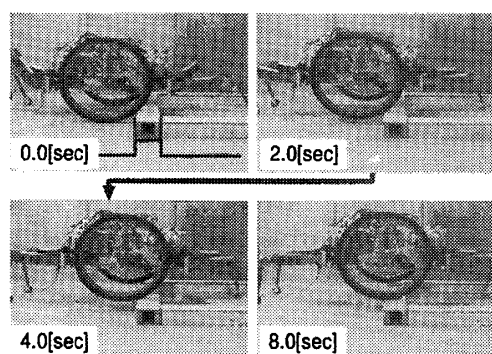


Fig. 19 Climbing of an obstacle by method of checking the change of wheel angles (Step height = 0.1[m])

ような凸型地形であっても機体を地面に沿わせながら踏破することが可能である。また、車輪回転状態監視法から脚荷重分担率監視法への切り替えを行った場合の踏破の様子を示したのが図20である。図18と基本的には同じような動作であるが図18では車輪が浮くことがある(4.0[sec]時点の奥側の車輪)のに対し、図20では車輪が常時接地していることがわかる。

段差を車輪回転状態監視法で踏破したとき(図18)の θ_{up} の変化の様子を図21に示す。図21より、 θ_{up} が微妙に大きくなったり小さくなったりしながら全体的には小さくなっていることがわかる。つまり、車輪回転状態監視法だけでは車輪が地面に接地と非接地を繰り返しながら地形に沿って動いているのである。

4.2 斜面ベースでの動作確認 4.1節のように平地ベースでは、車輪回転状態監視法のみでも、脚荷重分担率監視法への切り替えを行った場合にも、段差を踏破することができ、見た目には優劣がはっきりしなかった。しかし、斜面においてはこの優劣がはっきりとする。なお、以下で記述する斜面は、第二報で報告した

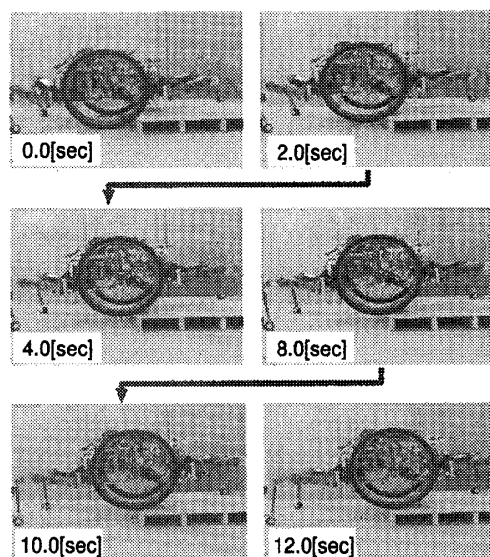


Fig. 20 Climbing of an upward step by gait for an upward step on slope (Step height = 0.1[m])

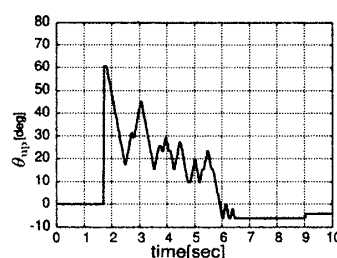


Fig. 21 A change of θ_{up}

段差上り歩容では段差高さの誤判断が理由で上ることができなかったことを付け加えておく。

図22は車輪回転状態監視法のみで移動の様子、図23は脚荷重分担率監視法への切り替えを行う斜面对応型段差上り歩容で踏破の様子である。0.2[m/s]で直進移動を行い、段差踏破中は機体の移動軌跡に沿って0.2[m/s]で移動している。今回の実験では、それほど急でない山道の平均斜度と同程度である10[deg]で実験を行った。また、山道のような未知不整地においては、様々な段差高さが存在し、3.2.5節で述べた θ_{up} の初期角度 θ_{init} と、実際の段差と車輪との接線角にずれが生じることも多い。このずれがない場合に θ_{up} の計算が最も適切に行われると考えられるが、それ以外の場合にも問題なく段差踏破できるかを確認するために、 θ_{init} 決定時の段差高さである0.2[m]とは異なる段差高さである0.15[m]での検証を行った。

図より、提案する斜面对応型段差上り歩容では段差を踏破できたのに対し(図23)、前者の方法では車輪の駆動力を使えないために、機体を十分に持ち上げきれず、その後の脚の踏換時に姿勢をくずして機体が落ち

段差踏破に失敗したことがわかる (図 22), このことから, 提案する手法が斜面上の未知不整地において, 段差状不整地を上る上で有効であることが確認できた。

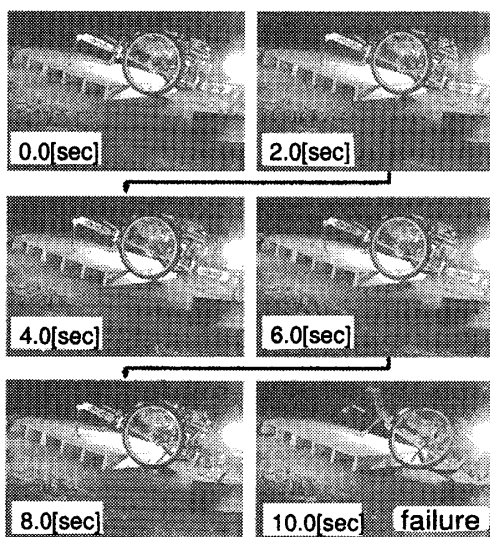


Fig. 22 Climbing of an upward step on slope by method of checking the change of wheel angles (Slope angle:10[deg], Step height:0.15[m])

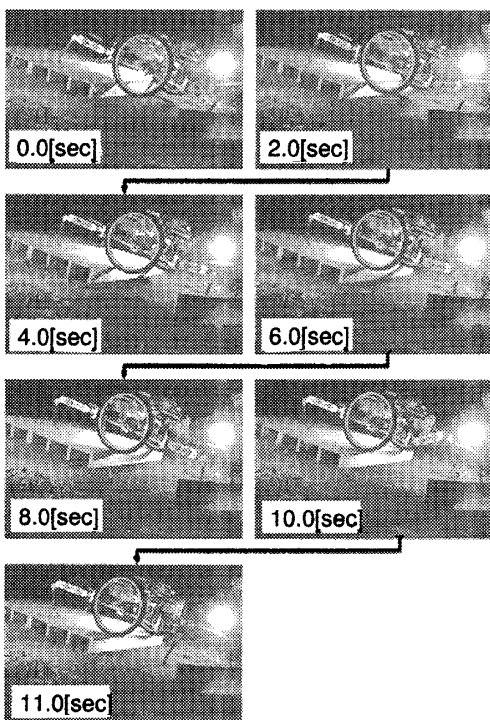


Fig. 23 Climbing of an upward step on slope by gait for an upward step on the slope (Slope angle:10[deg], Step height:0.15[m])

5. お わ り に

本論文では, これまでなされなかった脚車輪分離型ロボットの斜面での段差上り歩容を検討した. 特に重要な上り斜面での段差上り歩容 (斜面对応型段差上り歩容) について検討し, ロボットが転倒しない安全な方法を提案した. また, 実験によりその方法を用いて, 斜面での上り段差を移動可能となったことを確認した.

しかしながら, 本論文では斜面での段差下り歩容について議論しなかった. 段差下り歩容は特に下り斜面において踏破を適切に行わなければ, 機体が落下し事故となる可能性が高い. そのため, 今後は下り斜面の段差下り歩容について議論していく必要がある.

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) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Nakajima, S. and Nakano, E., *Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot (4th Report: Gait for getting over an obstacle)*, "Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)", vol.72, no.721, (2006), pp.2948-2955.
- (7) Nakajima, S. and Nakano, E., *Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot (5th Report: Integrated Gait)*, "Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)", vol.72, no.721, (2006), pp.2956-2963.
- (8) S.Hirose, H.Tsukagoshi, and K.Yoneda, *Static Stability Criterion for Walking Robots on Irregular Terrains*, "Journal of the Robotics Society of Japan", vol.16, no.8, (1998), pp.1076-1082.