

脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容*
(第3報, 段差下り歩容編)中嶋秀朗*¹, 中野栄二*¹Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot
(3rd Report, Gait for a Downward Step)Shuro NAKAJIMA*² and Eiji NAKANO*² 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 a downward step, which is one part of the adaptive gait, is described. The point of the flow of the gait for a downward step is described. When the robot approaches a downward step, a forefoot touches the surface deeply. It forecasts the existence of the downward step by the information on the forefoot's touch point. After that, the robot does the step edge searching operation. This searching operation is the point for going down the step, since the robot fell under the step if it has walked without knowing the step. When the body goes down the step a little, the load sharing ratio of legs increases so that the load of the body rests upon legs. Therefore, the robot finds the edge of it, and it changes footsteps for preparation of going down the step. After the preparation, it can lower the body from the step supported by all legs and wheels. To lower the body, the following items are needed similar to the case of an upward step: 1. Acquisition of target value of lowering the body. 2. Correspondence to difference between target depth and actual depth.

Key Words: Moving Robot, Motion Control, Robot, Gait for a Downward Step, 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⁽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. 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⁽⁸⁾. 文献⁽⁹⁾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. 本論文では, 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⁽³⁾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⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾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. カ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, ノイズなどによる判断の誤りも多いためである. 基礎的な未知

* 原稿受付 2005年8月25日.

*¹ 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

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。

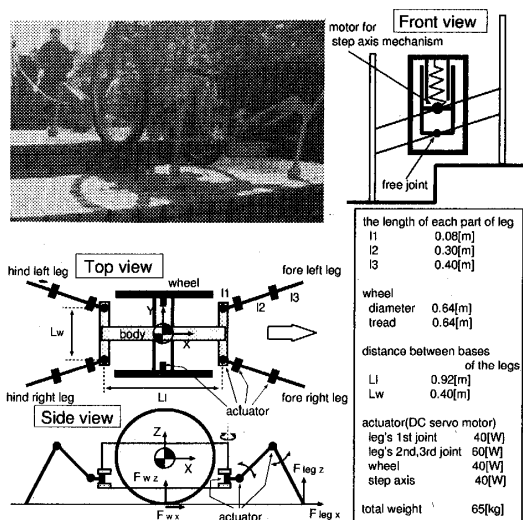


Fig. 1 A leg-wheel robot "Chariot 3"

2. 段差下り歩容の流れ

本論文で対象とする大不整地路面を図2に示す。0.1~0.2[m]程度の下り段差を Type B-1 路面とし、そのうち前脚接地点と車輪接地点の中間の地形が2段になった Type B-2 路面、中間部分が穴地形となった Type B-4、Type B-5 路面、さらに平面上の地形に穴があった Type C-3 路面がある。Type B-4 と Type B-5 は、車輪が穴に入らないか、または、入るかで分けており、Type C-3 は車輪が入る程度の穴地形である。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)(9)と同様、平面ベースの段差地形を対象とする。

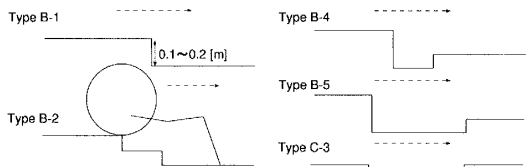


Fig. 2 Targetted rough terrain of the gait for a downward step

対象とする大不整地を歩く際の歩容形態は、「4脚全てと車輪で機体を支持して、機体を段差から下げる」ものとする。この理由は、段差に応じて機体を下ろす際には、安定性・省エネルギー・推進力と荷重の分散性などの観点から、この時も車輪は常時接地して機体を支持している方が望ましいからであり、段差上り歩容(9)と同様な考え方である。なお、4脚全てと車輪で支持して移動する歩容を「全脚支持歩容」と呼ぶ。

上記のように全脚支持歩容により大不整地を移動

する戦略を取るため、一步幅以上移動しないと下れない段差には対応できない。ただし本論文では歩幅を0.35[m]としており、対象としている0.2[m]程度までの不整地は十分移動可能である(0.2[m]の段差では0.297[m]移動すればよい)。

図3に段差下り歩容の流れを示す。大不整地以外

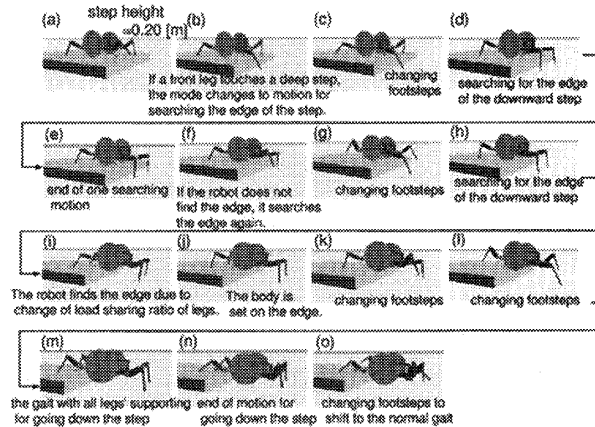


Fig. 3 An image of the gait for a downward step

(以下、通常不整地と呼ぶ)では、脚はトロット歩容(2)とし、基本移動制御手法(1)を用いた歩容制御手法(以下、通常歩容)を使用する(図3(a))。

前脚が段差下の路面に接触すると、文献(9)と同様にして前脚の接地深さと胴体の傾きから推定した段差深さ推定値を使用して、移動する先の下り段差の存在を予測する(図3(b))。ただし、どこからが下り段差の始点であるかはわからない。そのため、下り段差の存在を検知した後は「下り段差始点探索動作」に移行し、下り段差の始点を探す(図3(c)~(h))。

下り段差始点探索動作中は、安定性を最大限確保するため、4脚全てと車輪で支持した状態で進み、1歩幅進む毎に全ての脚を可動範囲の始点まで踏み換える。前脚接地位置と車輪接地位置は離れており、1歩幅で下り段差の始点が検知できるとは限らない。通常は、脚の踏換時に再度下り段差の存在を予測し、探索動作に移行するが、穴地形などの場合は、1回目の探索動作終了後の踏換時には脚の接地位置が穴の外となり、下り段差の予測に至らない場合も存在する。そのため、前脚接地位置と車輪接地位置の離れ分は前脚の接地深さ情報を保持し、最深値を用いて下り段差の予測を行う。下り段差始点探索動作中に下り段差を機体が下り始めると、脚に負担がかかるため、脚荷重分担率 k_{leg} は定性的に増加する(図3(i))。脚荷重分担率 k_{leg} とは、次式に示すように全荷重のうち機体座標系 z 方向に脚全体が支持する荷重の割合を表したものである。ここで、 n : 支持脚数、 δ_i : 支持脚 i の機体座標系 z 方向脚先位置の目標位置との偏差 (= [実際位置] - [目標

位置)], C_{zi} : 支持脚 i の機体座標系 z 方向コンプライアンス, W : 機体重量である.

$$k_{leg} = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{zi}/C_{zi})}{W} \quad (1)$$

脚荷重分担率 k_{leg} の特徴を活用し, 下り段差始点探索動作中の k_{leg} の変化を監視することで, 下り段差の始点位置を検出する.

下り段差始点探索動作による始点検出時点では, 機体中心は始点位置を多少超えている (図3 (i)). そのため機体を少し後退させて, 機体中心を段差の始点位置に合わせる動作「機体位置合わせ動作 (図3 (j))」が必要となる. なぜなら, 全脚支持歩容の歩幅を最大限にするための脚の踏換 (準備踏換: 図3 (k), (l)) を行う際に, 段差から機体が落ちかかかっていると姿勢が不安定になるからである.

機体を段差の始点位置にセットした後は, 全脚支持歩容での機体下降動作 (図3 (m), (n)) に移る. 正確な地形情報が取得できない状況下では, 段差を下り終わったことを確実に判断することは困難である. そのため, 全脚支持歩容による移動距離を最大限確保することとし, 脚の可動限界への到達を持って全脚支持から通常歩容への切換 (終了踏換: 図3 (o)) を行う.

3. 段差下り歩容の制御手法

3.1 下り段差の検知 下り段差の存在予測は, 図4に示す仮想面に対する垂直方向の深さを表した前脚 i の推定段差深さ H_{ei} を用いて行う. H_{ei} については, 文献⁽⁹⁾で既に記述したため説明は省略する.

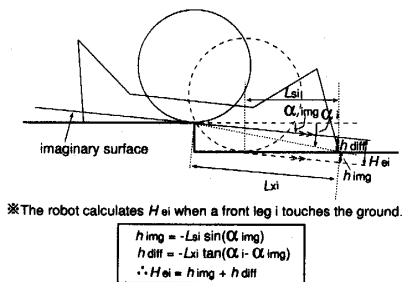


Fig. 4 Estimation of a step depth

前脚 i の推定段差深さ H_{ei} は, 仮想面からの凹凸成分に基づく h_{diff} と仮想斜度⁽¹⁾ (仮想面の斜度) に基づく h_{img} から成り立つ. ここで H_{ei} は, 仮想斜度成分に基づく h_{img} を持っているため, 平らな下り斜面でも負に算出される. 単純に H_{ei} の値で判断すると, 凹凸のない下り斜面でも下り段差だと誤検知してしまうため, h_{diff} を以下のように併せて評価し, それを解消する.

判定における閾値に関しては, 本論文では次の2つのケースにより値を変えている. 値は, 各種路面における移動実験の結果選択した.

通常判定の場合 (ケース 1): H_{ei} が -0.10 [m] 以下で, 大不整地の下り段差を検知する. ただし, 平らな下り斜面というのみで検知しないように, h_{diff} が -0.02 [m] 以下で凹地形であることも条件とした.

終了踏換期間の場合 (ケース 2): 図5に示したような連続した段差の移動で, 特に最終段を考えた場合, 仮想面からの凸成分が通常よりも大きくなる. そのため, h_{diff} が正となり, 結果として H_{ei} が大きくなって, 下り段差の検知に至らない可能性がある. よって終了踏換期間では, H_{ei} が -0.05 [m] 以下という条件だけで下り段差を検知する.

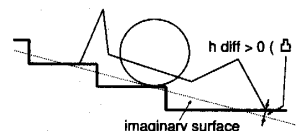


Fig. 5 Consecutive downward steps

3.2 下り段差始点探索動作 下り段差を検知すると全脚が可動範囲の始点になるように脚を踏み換え, 下り段差の始点を探索する「下り段差始点探索動作」に移行する. 下り段差始点探索動作では, 全脚と車輪で支持しながら脚の可動範囲の始点から終点まで, 脚荷重分担率を監視しながら進む.

下り段差の始点を機体が過ぎると, 機体が段差の下に落ちようとして脚の荷重分担率 k_{leg} が増加する. この定性的な特徴を用いて始点の検出を行う. 具体的には, k_{leg} が当該探索動作中の最小値と比較して $D_{ratio} = 0.1$ (この値は実験的に選定) より大きくなった場合に, 下り段差の始点と認識する (図11 (c) (6) 参照).

ただし下り段差始点の検出時点では, 機体は下り段差の始点を多少超えているため, 機体を段差の始点まで後退させる「機体位置合わせ動作」が必要となる.

なお, 下り段差始点探索動作開始直後 (0.05 [m] 以内) に始点を検知した場合には, 0.2 [m] 程度までの下り段差に対しては, 位置合わせをせずとも全脚支持歩容における歩幅を確保できるため, そのまま全脚支持歩容に移行する.

3.3 機体位置合わせ動作 下り段差の始点を検知した時点では, 図6写真 (a) のように機体は段差の始点より少し進んだ状態である. この状態で脚の踏換を行うと, 機体が落ちる可能性がある. そこで, 機体中心を段差の始点に合わせるために後退するのが, 機体位置合わせ動作である. 本動作は全脚で支持したまま後退するため, 安定な動作である. この様子を示したのが図6右側の連続写真 (0.3 [s] 間隔) である. 下り段差を検知した時点 (a) から機体中心が段差の始点に戻る (b) まで後退している. このときの脚荷重分担率 k_{leg} の推移を図6の左側に示す. これは, 高さ

0.15[m]の段差に対するものであり、(b)で機体が始点に戻った後も、そのまま後退させたときのデータである。なお後退速度は0.06[m/s]とした。この値は実験的に求めたものである。この図より、機体位置合わせ動作時の脚荷重分担率 k_{leg} の推移には、次の三つの特徴があることがわかる。

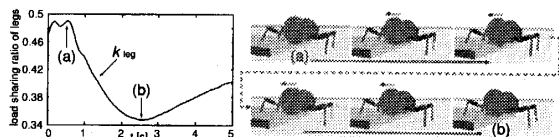


Fig. 6 Load sharing ratio of legs during the setting motion

1. (a) → (b) では、 k_{leg} が減少する。
2. (b) 付近で k_{leg} の変化率が減少する。
3. (b) 付近で k_{leg} が最小値をとり、その後上昇する。

機体位置合わせ動作時に、上記の特徴のいずれかが現れた時点で、機体中心が段差の始点まで戻ったと判断し、機体位置合わせ動作を終了する。なお、具体的な閾値の値は実験的に選定し、1. では減少分が0.13以上の場合、2. では0.9[s]間、1[s]あたりの変化率が0.067以下の場合、3. では最小値からの増加分が0.04以上の場合とした。

3.4 全脚支持歩容における制御 機体位置合わせ動作終了後、4脚全てと両車輪で支持して、ロボット本体が段差を下るのが全脚支持歩容である。

脚の踏換動作により全ての脚が可動範囲の始点に接地した状態から始まり、全ての脚と車輪により機体を支持した状態で段差を下り、脚が可動限界に到達した時点で終了する。段差上り歩容⁽⁹⁾と同様に、脚を踏み換えて前脚 i が接地するときに前脚 i の推定段差深さ H_{ei} を取得する。そして両前脚の推定値の平均値を、ロボット本体としての段差深さ推定値 H_e とする。

3.4.1 車輪の制御 図7に、全脚支持歩容時の車輪の動きを示す。

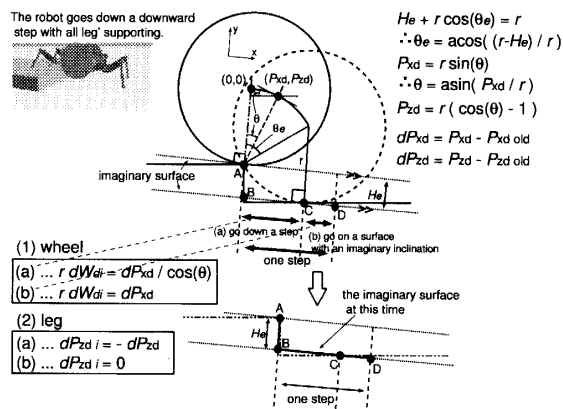


Fig. 7 Wheel and leg control when going down a step with all legs' supporting

全脚支持歩容の1歩幅の前半で段差を下り (A → C)、その後は前進する (C → D)。全脚支持歩容開始時における1歩幅分の仮想面は、図中のA、B、C、Dを結んだ路面となる。ここで、ロボットのピッチ角は仮想面に平行に制御し、仮想面と平行に進むと仮定すると、車輪 i の微小時間当たりの回転角度 dW_{di} は、 dP_{xd} を機体座標系 x 方向の機体中心の微小移動量、車輪半径を r とすると、 θ を全脚支持歩容開始からの回転角として、式(2)で表される。この車輪目標角に対してPD制御を行う。胴体ピッチ角を仮想面に平行にする理由は、通常歩容⁽¹⁾と同様に、遊脚時も含めた前後脚の可動範囲を、ともに大きくするためである。

$$\begin{cases} dW_{di} = dP_{xd} / (r \cos \theta) & \text{(a) } \theta < \theta_e \\ dW_{di} = dP_{xd} / r & \text{(b) } \theta \geq \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

ここで、全脚支持歩容開始時の機体座標系を基準とした機体中心の座標を (P_{xd}, P_{zd}) とし、 θ は図7に示すように求められる。また θ_e は、「段差を下りた時点での機体(車輪)中心と図中のA点を結んだ直線」と「点Aを通り、仮想面に垂直な直線」とのなす角である。 dP_{xd} は、操縦指令として与えられる。

ここで、D地点に向かうにつれて実際の路面と仮想面にずれが生じるが、CD間が最長となり誤差が最大となる0.1[m]の段差でも、誤差は0.003[m]程度であり、脚のコンプライアンスと車輪サスペンションにて十分吸収できる範囲であるため許容している。

3.4.2 脚の制御 脚軌道についても、車輪の場合と同様に、機体中心の位置 (P_{xd}, P_{zd}) との幾何学的な関係から設定する。機体を下げるには脚を上げる必要があるため、脚軌道は図7により次式で表される。

$$\begin{cases} dP_{zdi} = -dP_{zd} & \text{(a) } \theta < \theta_e \\ dP_{zdi} = 0 & \text{(b) } \theta \geq \theta_e \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 dP_{zd} : 機体中心の機体座標系 z 方向の微小時間移動量、 dP_{zdi} : 脚 i の機体座標系 z 方向の微小時間移動量である。

機体座標系 x, y 方向の脚先位置は既に提案した歩容アルゴリズム⁽²⁾により決定する。

次に、脚は離散的に接地するため、式(3)に加えて初期値である接地時の脚先目標位置を設定する必要がある。全脚支持歩容の場合にも、通常歩容の場合と同様に脚先にコンプライアンス特性をもたせて多様な路面外乱に対応させるため、遊脚相から支持相への切り換わり時に、脚先の実際位置から基本設定値 $\Delta_y^{(1)}$ だけ低い位置に脚先目標位置を設定する。脚先のコンプライアンスの設定も通常歩容⁽¹⁾と同様に行い、また、全脚支持歩容中にも仮想面に胴体ピッチ角が平行になるように、脚先軌道調整を通常歩容と同じ時期に行う。

3.4.3 段軸の制御 段差上り歩容⁽⁹⁾と同様に、安定性確保のため胴体目標ロール角 θ_{dr} を 0 とするように、スカイフックダンパ理論に基づく式 (4) のフィードバック制御を行う。段軸機構は図 1 正面図に示す段軸機構のモータを制御することで、胴体ロール角を制御する機構である。

$$T_{\theta_r} = -K_r(\theta_r - \theta_{dr}) - D_r(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_{dr}) = -K_r\theta_r - D_r\dot{\theta}_r \quad (4)$$

ここで、 T_{θ_r} : 段軸機構モータのトルク、 θ_r : 胴体ロール角、 θ_{dr} : 胴体目標ロール角、 K_r 、 D_r : 角度ゲインおよび角速度ゲインである。

これにより段差上り歩容同様、下り段差への斜め進入に対しても、胴体ロール角を水平に保ったまま左右車輪を時間差で下ろすことができ、移動可能となる。

3.4.4 過大な段差深さ推定への対応 前脚が接地する位置は段差始端から離れているため、推定段差深さ H_e は、地形形状によっては正確なものとはならない。例えば、図 8 に示す地形の場合は、全脚支持歩

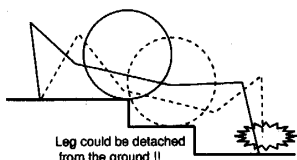


Fig. 8 A terrain of 2 downward steps

容開始時に推定する段差深さは、実際に機体の下がる段差深さより過大なものとなる。

誤差が小さい場合には、脚先コンプライアンスと車輪サスペンションにて吸収する一方で、誤差が大きい場合には脚先コンプライアンスと車輪サスペンションでは吸収することができない。

段差深さを過大に推定した状態で全脚支持歩容を行うと、脚を過大に上げることになり、脚が浮き、不安定な状態となる可能性がある (図 8)。その場合、脚による荷重支持負担分が減るため、脚荷重分担率 k_{leg} の減少という形で上記現象が現れる。そこで本論文では、全脚支持歩容で機体を下げているときに k_{leg} を監視し、 k_{leg} が閾値 $R_{down} = 0.3$ 以下になったら脚を上昇させることを止め、機体下げ動作を行わないというアルゴリズムを導入する (値は実験的に選定)。その際、車輪の制御も式 (2) の (a) から (b) に変化させる。

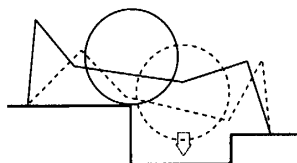


Fig. 9 A 凹 terrain

3.4.5 推定段差深さ不足への対応 図 9 に示した地形の場合は、全脚支持歩容開始時に推定する段差

深さは、実際に機体下る段差深さより小さくなる。そのため推定誤差が大きい場合には、全脚支持歩容終了時でも機体が浮いたままの状態となる。

その状態で脚の踏換を行うと姿勢が大きく傾いてしまうため、全脚支持歩容中の機体下げ動作の終了時から全脚支持歩容終了までの期間、脚荷重分担率 k_{leg} を監視し、車輪が接地していないと判断した場合にはさらに機体を下げるアルゴリズムを導入する。すなわち、全脚支持歩容中の機体下げ動作の終了時 (図 7 の (a) 期間終了) から全脚支持歩容終了 (図 7 の (b) 終了) まで k_{leg} が閾値 $k_{sdown} = 0.6$ を超過した場合には、車輪が接地するまで機体を下げる。なお、上記の各判定は段差上り歩容と同様に、ある時間中の検知割合を基準として判定することで、誤検知を少なくする。

4. シミュレーションと実験

本章では、提案する歩容制御手法にて、対象とする大地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深さ 0.4[m]、歩幅 0.35[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⁽²⁾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 B-1 路面

4.1.1 シミュレーション (Type B-1) 図 10 (a) に示す深さ 0.20[m] の未知の下り段差路面に対する移動シミュレーションを行った。図 10 (b) はそのときの様子を示したものであり、0.20[m] の下り段差の移動が実現できていることがわかる。

そのときのデータを図 11 (a) ~ (f) に示す。図 11 (a) は、機体の目標直進速度である。目標速度の小さな凹凸は、イベントドリブン方式⁽²⁾による指示速度に対する制限の結果である。図中 (1) は脚の踏換による機体停止である。図中 (2) は、下り段差始点探索動作期間であり、1 回目で段差の始点が検出できず複数回行われたことがわかる。図中 (3) は、段差始点検知後の機体位置合わせ動作期間であり、機体速度が負となり後退していることがわかる。その後図中 (4)

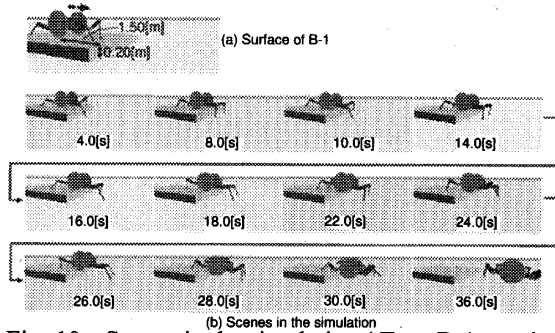


Fig. 10 Scenes in the simulation (Type B-1 terrain)

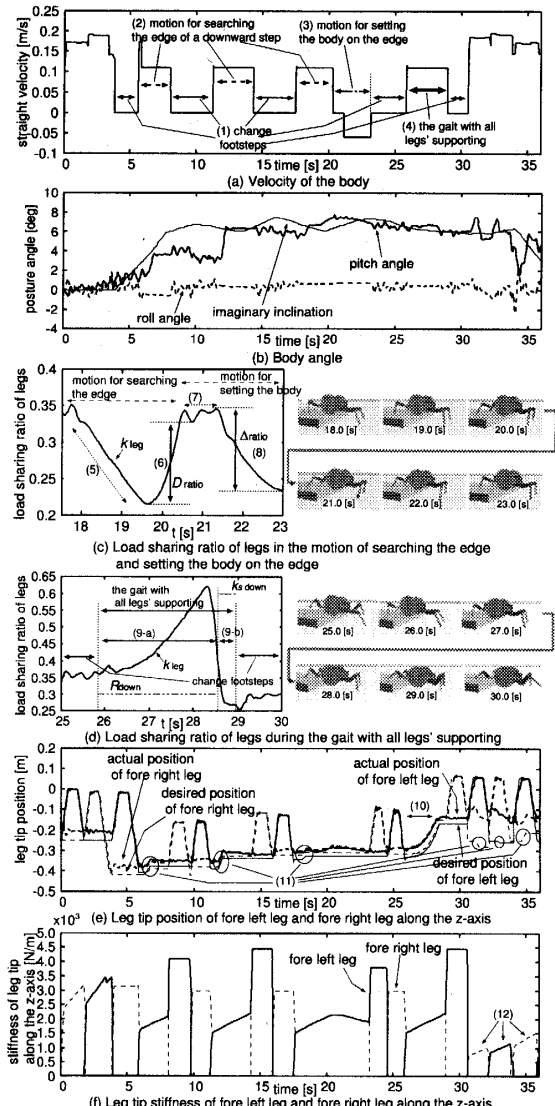


Fig. 11 Simulation data (Type B-1 terrain)

で、全脚支持歩容にて段差を下る。このときの推定段差深さは $H_e = -0.180$ であった。参考までに、段差深さ $0.20[\text{m}]$ の場合の H_e の理論値は $-0.181[\text{m}]$ である。

図 11 (b) は、胴体ピッチ角と胴体ロール角、および仮想斜度⁽¹⁾を示したものである。胴体ピッチ角は、正側が前下がりであり、負側が尻下がりである。胴体ロール角は、正側が右下がりであり、負側が左下がり

である。図より、ピッチ角は仮想斜度に追従し、またロール角はほぼ水平を保った状態で移動を実現できていることがわかる。

図 11 (c) は、 $17.5 \sim 23.0[\text{s}]$ における脚荷重分担率 k_{leg} の推移を示したものである。このとき、3 回目の探索動作と機体位置合わせ動作を行っている。右側の連続写真は 1.0 秒ごとのものである。図中 (5) で脚荷重分担率 k_{leg} が下がる傾向にあるのは、下り段差に達するまでは仮想斜度が正つまり前下がりであるため、機体姿勢は下り斜面を仮定する。一方で実路面は水平であり、仮想面に対して機体は上っていくため、車輪による支持負担が多くなり、結果として k_{leg} が減少する。図中 (6) での k_{leg} の上昇は、下り段差の始点を機体を通り過ぎ、段差の下に機体が落ちるのを脚が支え始めたためである。この k_{leg} の上昇変化量が閾値 $D_{\text{ratio}} = 0.1$ を超過することで、下り段差の始点を検知する。下り段差始点検知後は図中 (7) において機体を停止させた後、機体位置合わせ動作に移行する。図中 (8) で k_{leg} が減少するのは、機体位置合わせ動作で機体を後退させると機体が段差上に戻り、そのため車輪による荷重負担が上昇するためである。その後は、図 6 の左側の図の (a) ~ (b) の変化分に関する閾値 $\Delta_{\text{ratio}} = 0.13$ を超過することにより、機体位置合わせ動作を終了する。

図 11 (d) には、 $25 \sim 30[\text{s}]$ における脚荷重分担率 k_{leg} の推移を示した。右側の連続写真は 1.0 秒ごとのものである。図中 (9-a) 間で機体を下げている間、脚荷重分担率 k_{leg} と閾値 R_{down} を比較することで段差深さを過大に推定した場合に対応できるが、この例では問題ない。また図中 (9-b) 間の機体下げ動作終了以降は、 k_{leg} と閾値 $k_{\text{s,down}}$ を比較することで、段差深さ推定値が不足し機体の下降量が少ない場合に対応できるが、この例では問題ない。

図 11 (e) には、左右前脚先の機体座標 z 方向の目標位置と実際位置を示した。図中 (10) の全脚支持歩容では、各脚先の目標位置を H_e 上げて、機体を下げている。図中 (11) の脚先軌道の調整は、通常歩容⁽¹⁾と同様に、脚接地後に胴体ピッチ角を仮想斜度に平行にするための調整である。なお、目標位置と実際位置の偏差は、コンプライアンスを設定しているためである。

図 11 (f) には、左右前脚 (支持脚時) の脚先剛性を示した。遊脚時の剛性は、見やすさのために 0 と表示している。下り段差始点探索動作、機体位置合わせ動作、および全脚支持歩容時には、脚先位置偏差は通常歩容 (2 脚は遊脚) の基本設定値 Δ_e と同じくした上で全脚での支持となるため、剛性は小さくなる。図中

(12) で剛性が小さくなる理由は、そのときの位置偏差が大きくなり、脚先力を調整しているからである。

4.1.2 実験 (Type B-1) 図 12 (a) に示す 0.2[m] の未知の下り段差路面に対する移動実験 (図 12 (b)) を行った。紙面の都合上、胴体姿勢角度データのみ図 12 (c) に示した。実験時の胴体姿勢角の推移傾向は、シミュレーションと同様であった。なお、実験データの胴体姿勢角変化が、シミュレーションに比べて大きな理由は、関節摩擦の影響や脚と機体に関するモデル誤差などによるものと考えている。推定段差深さは $H_e = -0.177$ であった。また、その他の実験データも、シミュレーションとほぼ同様であることを確認した。

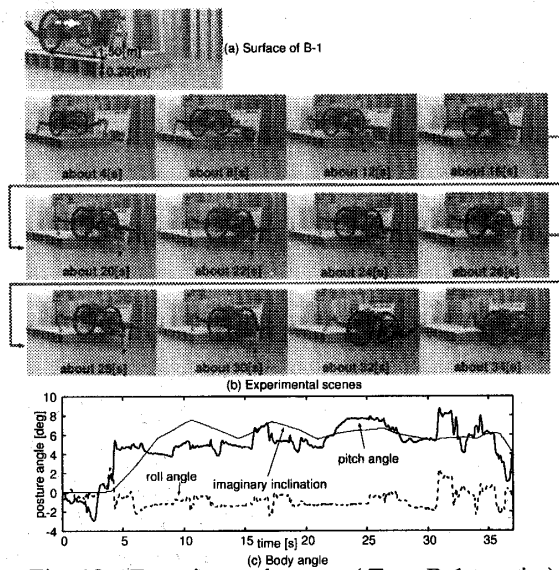


Fig. 12 Experimental scenes (Type B-1 terrain)

5. その他の不整地での移動実験の様子

図 2 に示したその他の対象路面、および段差に斜めに進入する場合、左右段違い下り路面の場合、そして、なだらかな下り段差の場合の移動実験について記述する。全対象路面についてシミュレーションと実験を行い、移動能力を検証し確実に移動できることを確認したが、紙面の都合上、実験の様子のみを掲載する。

5.1 Type B-2 路面 図 13 (a) に示す、深さ 0.10[m] の段差が 2 段連続する路面に対する移動実験 (図 13 (b)) を行った。全脚支持歩容開始時に行う段差深さの推定値が、実際に機体の下り深さよりも深くなるため、前述した段差深さの過大推定に対する脚と車輪の制御により対応する。1 段目の推定段差深さは $H_e = -0.162$ であり、また 2 段目の推定段差高さは $H_e = -0.078$ であった。

図 13 (c) には、機体が 1 段目の段差を下る全脚支持歩容期間における脚荷重分担率 k_{leg} の推移を示した。実際の段差深さ -0.1 [m] に対して、推定段差深さは $H_e = -0.162$ であるため脚を上げすぎ、 k_{leg} は図中

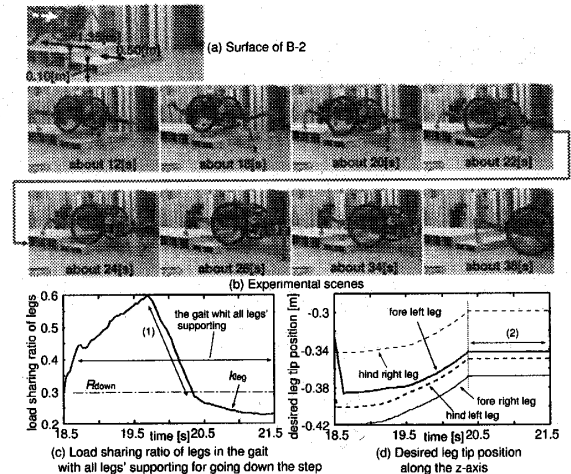


Fig. 13 Type B-2 terrain

(1) に示すように減少し、閾値 R_{down} より下がる。このため、図 13 (d) の (2) で z 方向の脚先位置を一定とし、機体を下げるのを止める。

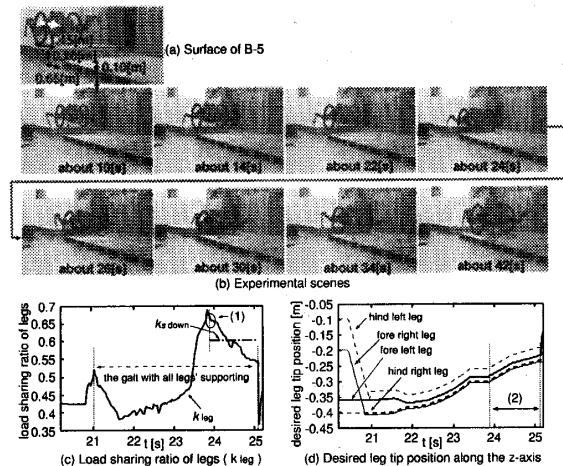


Fig. 14 Type B-5 terrain

5.2 Type B-5 路面 図 14 (a) に示す、下り段差に続き奥行き 0.65[m] の穴が存在する路面に対する移動実験 (図 14 (b)) を行った。全脚支持歩容時の段差深さ推定値は $H_e = -0.083$ であった。B-5 路面移動の特徴は、全脚支持歩容時の脚先は -0.1 [m] の段差上に接地しているが、機体下る段差深さは穴地形の -0.2 [m] である点である。このとき、全脚支持歩容での機体下降動作終了後の推定段差深さ不足対策により、機体を -0.2 [m] の路面まで下げることに伴い、地形形状に応じた移動を実現する。

図 14 (c) には、全脚支持歩容時の脚荷重分担率 k_{leg} の推移を示した。図中 (1) で機体下げ不足を検知し、機体を下げる。図 14 (d) には、各脚の全脚支持歩容時の z 方向の脚先目標位置の推移を示した。図中 (2) は、段差深さ推定不足対策のための機体下げ動作であり、図 14 (c) (1) における検知により動作する。

5.3 Type B-4 路面 図 15 (1-a) に示す、下り段差の後に車輪半径程度の穴地形が存在する路面に対す

る移動実験 (図 15 (1-b)) を行った. 車輪が穴に入ることがないため, Type B-1 路面と同様にして, 移動できていることがわかる.

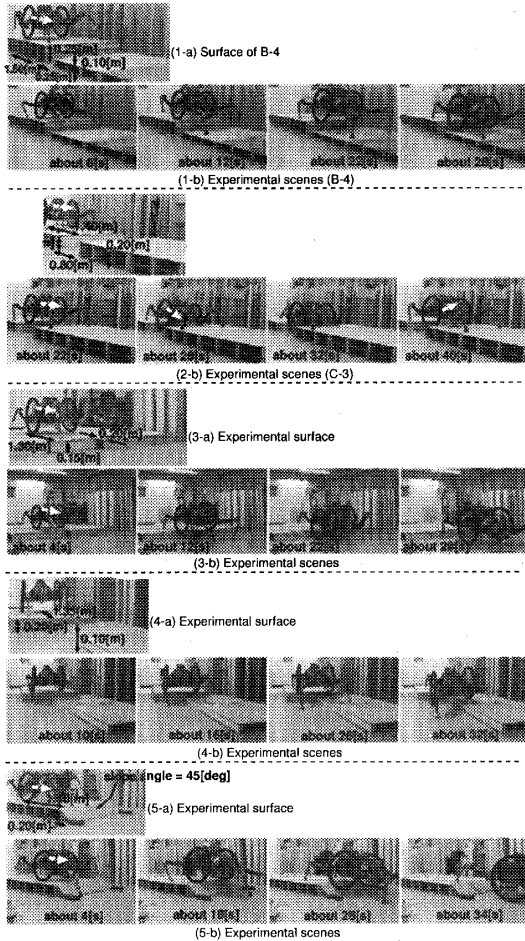


Fig. 15 Other rough terrains

5.4 Type C-3 路面 図 15 (2-a) に示す, 車輪直径程度の穴地形が存在する路面に対する移動実験 (図 15 (2-b)) を行った. 段差下り歩容で穴に入り, その後, 段差上り歩容にて段差から出ることによって, 移動した.

5.5 段差への斜め進入 段差に対して斜めに進入する場合に, 垂直に進入する場合と比較して異なる点は, 段差の始点位置が左右で異なることである.

図 15 (3-a) に示すように, 深さ 0.15[m] の段差の開始位置が左右で 0.2[m] ずれた路面について実験 (図 15 (3-b)) を行った. 右車輪が段差下り歩容で下り, その後は胴体が半分程度下りるため, 下り段差を検知せずに, 左車輪は通常歩容のまま下りて移動した.

5.6 左右段違い下り路面 図 15 (4-a) に示す左右段違い下り路面に対して実験 (図 15 (4-b)) を行った. 左右の路面の高さが異なるにもかかわらず, 段軸制御により, 胴体ロール角はほぼ水平のまま移動できていることがわかる.

5.7 なだらかな下り段差路面 図 15 (5-a) に示すなだらかな下り段差地形に対して実験 (図 15 (5-b))

を行った. このときも, 想定地形との差をコンプライアンスで吸収することで, 移動できた. なお, 長い斜め段差地形に対しても, 脚の踏換中に車輪が確実に接地できる地形があれば, 複数回の段差下り歩容を行うことで移動できることを実験により確認した.

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段差下り歩容に関して, その制御手法を提案した. そして, 提案した段差下り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, 大不整地適応歩容の残りの移動戦略 (乗り越え歩容) について提案し, その移動能力を検証することである. 別の論文にて詳細に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.