

脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容*
(第5報, 総合歩容編)中嶋秀朗*¹, 中野栄二*¹Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot
(5th Report, Integrated Gait)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 integrated gait of the normal gait and the adaptive gaits for large rough terrain is proposed. The proposed gait has following features: 1. There is a path from a gait to any other gait. 2. The robot does not fall into the endless loop of detection, because it works whenever it detects something. 3. A gait changes finally to the gait for getting over an obstacle which has the maximum ability of movement when the robot can not move. The robot can move on rough terrains where irregular ruggednesses up to 0.2 [m] in height or depth exist by using the integrated gait. The effectiveness of the integrated gait is verified through simulations and experiments.

Key Words: Moving Robot, Motion Control, Robot, Integrated Gait, 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つ独立に装備した車いす程度の大きさの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。

そこで、大きさが車いす程度である脚車輪分離型ロ

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]程度までの未知の不整地)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。

本論文では、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・使用する歩容(以下、総合歩容)について、構成と特徴を記述し、その移動能力を検証する。

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⁽⁷⁾について記述したが、未知の不整地に対するものではなく、また、連続する不整地路面に関しては論じられていなかった。これに対して本論文は、未知不整地を対象にした、通常歩容と大不整地適応歩容からなる総合歩容に関して記述したものであり、連続不整地上での総合歩容の移動能力を検証した

* 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

ものである。

なお、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⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾のに対して、総合歩容の構成要素である通常歩容及び大小不整地適応歩容は、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移動制御手法である。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。

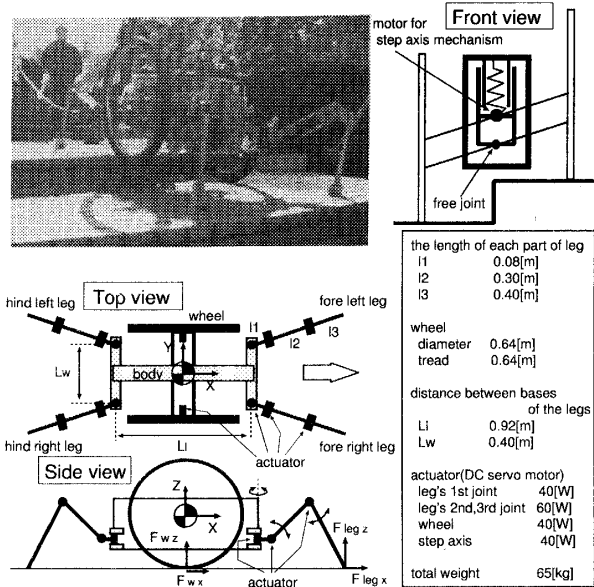


Fig. 1 A leg-wheel robot "Chariot 3"

2. 総合歩容

脚車輪分離型ロボットにおいて既に、通常不整地移動に対する通常歩容の制御手法⁽¹⁾⁽²⁾および大小不整地移動に対する大小不整地適応歩容の制御手法⁽³⁾⁻⁽⁶⁾を提案し、論じた。これらの歩容を、地形に応じて適切に選択し、遷移する歩容を「総合歩容」と呼ぶ。

まず、総合歩容を構成する、既に提案した歩容は以下の通りである。

- 通常歩容⁽¹⁾⁽²⁾ (本論文では、脚はトロット歩容)
- 段差上り歩容⁽⁴⁾
- 段差下り歩容⁽⁵⁾
- 乗り越え歩容⁽⁶⁾

実際の不整地では、脚車輪分離型ロボットに対する移動路面地形の規則性を見出すことは困難であるため、各歩容間は相互に遷移できる必要がある。例えば

通常歩容で歩行中に上り段差を検出した場合には、通常歩容→段差上り歩容の遷移が必要になり、上り段差が終われば段差上り歩容→通常歩容の遷移が必要になる。各歩容間の遷移関係を示し、「総合歩容」として提案する歩容アルゴリズムが図2である。

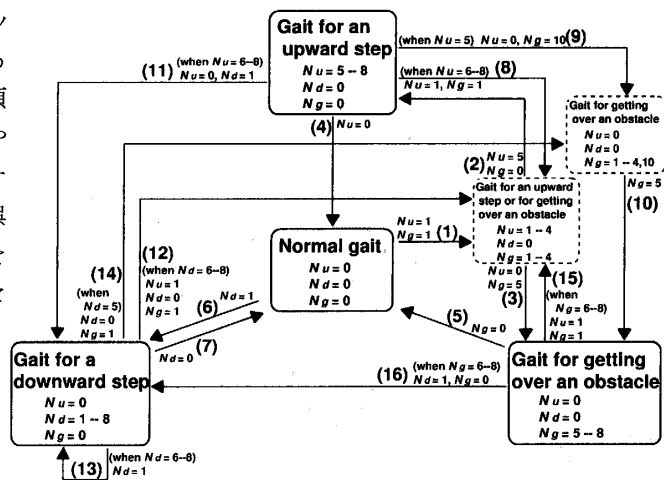


Fig. 2 State transition diagram of the integrated gait for rough terrain

図2で用いている記号の説明をする。 N_u は、段差上り歩容中の状態を表す変数である。段差上り歩容の流れを図3に示すが、図中 (b) で上り段差の始点を検知すると、まず全ての脚を可動範囲の始点に踏み換え(準備踏換: 図中 (c), (d)), 全脚支持歩容で機体を上昇し(図中 (e) ~ (g)), 通常歩容に戻るために脚を踏み換える(終了踏換: 図中 (h))。段差を検出し、準備踏換を開始した状態が $N_u = 1$ であり、各脚が準備踏換をして接地するたびに N_u が1ずつ増す。全ての脚の準備踏換が終わり、全脚支持歩容で機体を上昇している状態が $N_u = 5$ であり、終了踏換を開始した状態が $N_u = 6$ である。終了踏換で、はじめの2脚が接地するたびに N_u は1ずつ増し、 $N_u = 8$ で終了踏換が終わる。次の脚の接地で $N_u = 0$ となり、通常歩容(トロット歩容)となる。

N_d, N_g は段差下り歩容及び乗り越え歩容中の状態を表す変数であり、その値は段差上り歩容の値に準ずる。なお、段差下り歩容において下り段差の始点を探索している状態である「下り段差始点探索動作⁽⁵⁾」時にも上記を準用し、下り段差の検知 ($N_d = 1$) → 準備踏換 ($N_d = 1 \sim 5$) → 下り段差始点探索動作 ($N_d = 5$) → 終了踏換 ($N_d = 6 \sim 8$) とする。

図2の説明をする。以下の閾値の値は、「大きさが車いす程度である不整地移動ロボットにおいて、高さ0.1[m]程度までの凹凸不整地では通常歩容を用い、高さ0.1~0.2[m]程度までの凹凸不整地では大小不整地適応歩容を用いる」という運用方針と、実験的な試行結

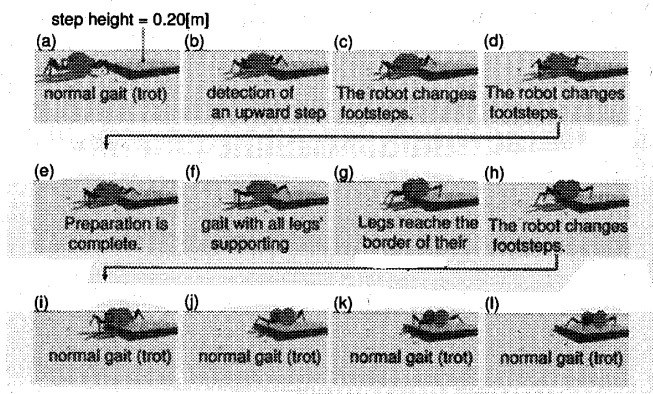


Fig. 3 An image of the gait for an upward step

果から選定したものである。つまり、胴体左右についている車輪の半径に対して0.3程度までの凹凸高さがある通常不整地では、主に脚と車輪のコンプライアンスで路面凹凸を吸収する通常歩容を用い、車輪半径に対して0.3~0.6程度の凹凸高さのある大不整地では、大不整地適応歩容を用いるということになる。なお、各閾値についての選定理由は、それぞれの歩容に関する論文⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾に詳述したので、本論文では省略する。

図中(1)は、通常歩容中に上り段差または凸路面を検知した場合である。段差上り歩容と乗り越え歩容は $N_u, N_g = 1 \sim 4$ まで同じ動作であり、 $N_u, N_g = 5$ になるときの前脚の推定段差高さ H_{ei} ⁽⁴⁾の大小により、どちらかの歩容が選択される。そのため、 N_u と N_g は段差検出時に同時に1となり、 $N_u, N_g = 1 \sim 4$ の準備踏換期間は、 N_u と N_g が同時に進行する。

ここで、上り段差または凸路面の検知は、左右の車輪回転角度の目標回転角度からの偏差の小さい方 Δ_{wmin} が、通常不整地の場合18[deg]以上、大不整地の場合8[deg]以上の時にされる。段差上り歩容と乗り越え歩容の選択閾値 $\Delta_{get\ over}$ は、 $H_e = 0.05[m]$ とした。 $H_e = 0.05[m]$ の理由は、左右どちらかの車輪が0.1[m]の路面上にある場合にはそれにより胴体中心が0.05[m]高くなるため、その状態で0.1[m]の段差があっても $H_e = 0.05[m]$ と認識するからである。

図中(2)は、左右前脚どちらかの H_{ei} が $H_{ei} \geq 0.05[m]$ であり、上り段差と判断し $N_u = 5$ として、段差上り歩容を選択する場合である。このとき、同時に進行していた乗り越え歩容の N_g は0にクリアする。

図中(3)は、両脚とも $H_{ei} < 0.05[m]$ で凸路面と判断し、 $N_g = 5$ として乗り越え歩容を選択する場合である。

図中(4)は、段差上り歩容の終了踏換期間が終了し $N_u = 0$ に戻る場合であり、通常歩容に遷移する。

図中(5)は、乗り越え歩容が終了し $N_g = 0$ となり、乗り越え歩容から通常歩容に遷移する場合である。

図中(6)は、通常歩容中に下り段差を検知して $N_d = 1$ となり、段差下り歩容に遷移する場合である。下り段差は、左右前脚の推定段差高さ H_{ei} のどちらかが $H_{ei} \leq -0.10[m]$ で検知する。

図中(7)は、段差下り歩容が終了し $N_d = 0$ に戻り、段差下り歩容から通常歩容に遷移する場合である。

図中(8)は、段差上り歩容の終了踏換期間中($N_u = 6 \sim 8$)に、上り段差または凸路面を検知した場合である。このときもやはり N_u, N_g の両方が1となり、 $N_u, N_g = 5$ の時点で歩容が選択される。なお、上り段差または凸路面の検知は、(1)と同様 Δ_{wmin} の値を用いて行う。

図中(9)は、段差上り歩容の全脚支持歩容中($N_u = 5$)に推定段差高さの不足を検知して、段差上り歩容から乗り越え歩容に遷移する場合である。このとき、乗り越え歩容の準備踏換動作をするために機体を下ろす状態($N_g = 10$)となり、段差上り歩容は $N_u = 0$ として終了する。機体を下ろし($N_g = 1$)、乗り越え歩容のための準備踏換をして、図中(10)で乗り越え動作($N_g = 5$)に遷移する。

ここで、推定段差高さ不足は、左右の車輪回転角度の目標値からの偏差 δ_{wi} の合計が閾値 $\Delta_{wup} = 30[deg]$ を超過した場合に検知する。

図中(11)は、段差上り歩容の終了踏換期間中($N_u = 6 \sim 8$)に下り段差を検知し、 $N_d = 1$ として段差下り歩容に遷移する場合である。このとき $N_u = 0$ として段差上り歩容は終了する。下り段差は、(6)と同様に推定段差高さが $H_{ei} \leq -0.10[m]$ で検知する。

図中(12)は、段差下り歩容の終了踏換期間中($N_d = 6 \sim 8$)に上り段差または凸路面を検知した場合であり、 N_u, N_g を1とし、かつ $N_d = 0$ として段差下り歩容から遷移する。上り段差または凸路面の検知は(1)と同様である。

図中(13)は、段差下り歩容の終了踏換期間中($N_d = 6 \sim 8$)に再度下り段差を検知した場合であり、 $N_d = 1$ とする。連続下り段差では、推定段差高さ H_{ei} が大きく出る傾向があるため、左右前脚どちらかの $H_{ei} \leq -0.05[m]$ で検知する。

図中(14)は、下り段差始点探索動作中($N_d = 5$)に、凸地形が存在し機体が進めなくなり、 $N_g = 1$ として乗り越え歩容に遷移する場合である。このとき $N_d = 0$ として段差下り歩容は終了する。凸地形の存在については、左右の車輪回転角度の目標値からの偏差 δ_{wi} の合計が閾値 $\Delta_{wdown} = 25[deg]$ を超過したときに検知する。

図中(15)は、乗り越え歩容の終了踏換期間中($N_g = 6 \sim 8$)に上り段差または凸路面を検出した場合であり、

N_u, N_g を 1 とする。上り段差または凸路面の検知は、(1) と同様である。

図中 (16) は、乗り越え歩容の終了踏換期間中 ($N_g = 6 \sim 8$) に下り段差を検出した場合であり、 $N_d = 1$ とし段差下り歩容に遷移し、かつ、 $N_g = 0$ とし乗り越え歩容を終了する。下り段差の検知は、(6) と同様である。

3. 総合歩容の特徴

本章では、提案する脚車輪分離型ロボットの総合歩容アルゴリズムの特徴を述べる。はじめに総合歩容アルゴリズムの特徴を列記し、その後それぞれ説明する。

1. 各歩容間の遷移パスが存在する。
2. 移動できない場合には、その地形において移動能力が高い「乗り越え歩容」に遷移する。
3. 「検知」によりある歩容に遷移すると、必ず「動作(進む)」するため、すなわち、ロボットの外界状況が変化するため、2つの検知状態を行ったり来たりして、検知を繰り返し続けるといった永久ループに陥ることはない。

特徴1について記述する。既に述べたが、実際の不整地では、各種の移動路面地形が不規則に出現するため、各歩容間は相互に遷移できる必要がある。図2より、段差上り歩容からは、図中(4)により通常歩容へ、(8)により段差上り歩容または乗り越え歩容へ、(9)により乗り越え歩容へ、(11)により段差下り歩容へと全ての歩容に遷移することが可能である。このうち(4)の通常歩容への遷移は、段差上り歩容が終了したときに自動的に行う。(8)、(11)の各大不整地適応歩容への遷移に関しては、全脚支持歩容で移動した直後の地形に対応するため、終了踏換時 ($N_u = 6 \sim 8$) に遷移の必要性を判断する。(9)の乗り越え歩容への遷移については、全脚支持歩容中に推定段差高さが不足して機体が上れないことに対応するため、全脚支持歩容中 ($N_u = 5$) に遷移の必要性を判断する。このように遷移判定時期を必要な時期に限定し、適正な歩容への遷移を実現する。

同様に、段差下り歩容、乗り越え歩容についても、全ての歩容への遷移パスが存在し、適切な時期に遷移の必要性を判断する。なお乗り越え歩容は、最大限機体を上昇させた状態で一步幅進行し、車輪が接地するまで下げる歩容であり、乗り越え動作中に障害になる路面により移動できない場合には他の歩容でも移動が困難である。そのため乗り越え歩容の全脚支持歩容期間中 ($N_g = 5$) には、他の歩容への遷移はない。

特徴2について記述する。大不整地を移動する際、第一段階では地形に適した歩容が選択される。ただし、段差上り歩容の全脚支持歩容期間もしくは段差下り歩

容の下り段差始点探索動作中に移動が困難と判断すると、その地形について、より移動能力の高い乗り越え歩容に遷移する。図4には、通常歩容からの遷移の場合について示した。ここで、「乗り越え歩容」は移動能力は高い反面、最大限機体を上昇させたりと無駄が多く時間もかかることから、それよりも適した歩容で移動可能であればそちらを用いるべきであること、および、段差上り歩容や段差下り歩容から乗り越え歩容に遷移するような地形の存在頻度は低いと考えられることから、二段階としている。

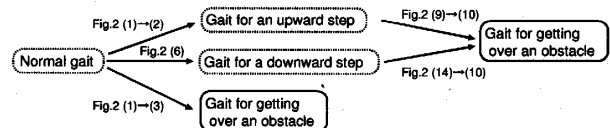


Fig. 4 Placement of the gait for getting over an obstacle

特徴3について記述する。各歩容は、路面の検知 ($N_u, N_d, N_g = 1$) をすると準備踏換をした後に、必ず $N_u, N_d, N_g = 5$ の動作を行う。この場合、ロボットが動作することで外界状況は変化するため、「検知」間で永久ループに陥り停止してしまうということはない。

4. シミュレーション

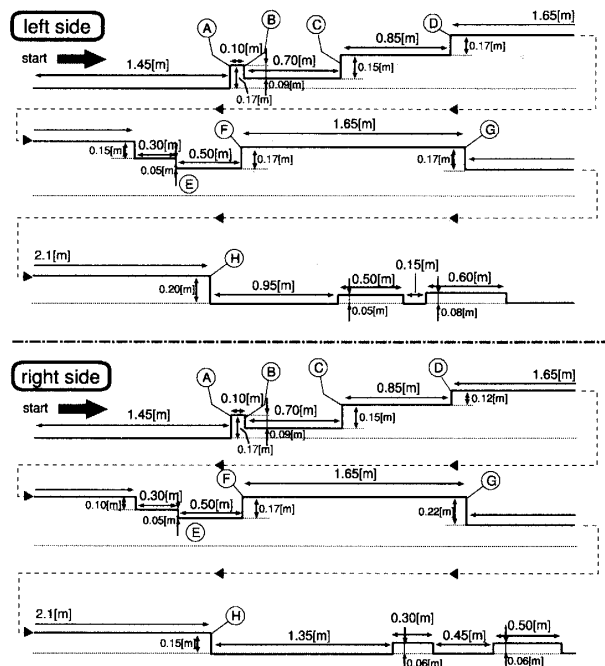


Fig. 5 Surface of the random rough terrain in the simulation

本章では、文献⁽³⁾で分類した大不整地地形や通常不整地が連続的に存在する地形に対して、提案する総合歩容が地形に応じて適した歩容に遷移し、その結果として、高さまたは深さが 0.2[m] 程度までの総合的な不規則凹凸路面の移動を実現できることをシミュレーションにより示す。

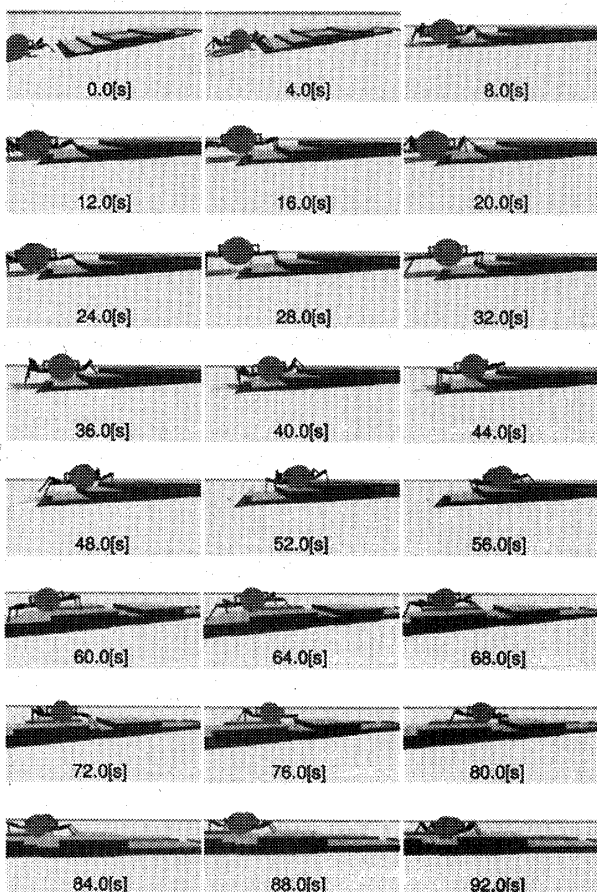


Fig. 6 Scenes in the simulation (1)

以下のシミュレーションおよび実験条件として、文献⁽⁴⁾などと同様に、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 Trot 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。

図 5 に、シミュレーションを行った不規則凹凸路面を示す。図に示すように、胴体中心の左右で地形は異なっている。なお、図の地形は複数の歩容が必要となるような地形を、文献⁽³⁾第 3 章で記述した除外地形を除いて適当に選択したものである。

シミュレーションの様子を 4[s] ごとに示したものが

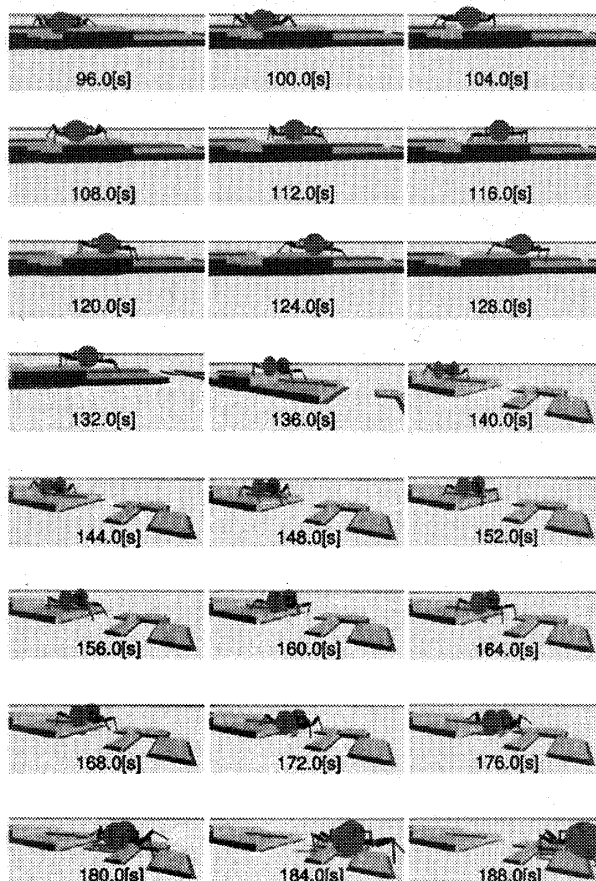


Fig. 7 Scenes in the simulation (2)

図 6、図 7 である。図 5 で示した路面において、地形に応じて適切な歩容を用いながら移動を実現している様子がわかる。そのときの機体の直進目標速度 v_{body} と各歩容の状態の推移 N_u, N_d, N_g を図 8 に示した。また、胴体姿勢角の推移を図 9 に、前脚の機体座標系 z 方向の脚先位置とその目標値の推移を図 10 に、そして後脚の機体座標系 z 方向の脚先位置とその目標値の推移を図 11 に示した。表 1 には、各歩容における推定段差高さ H_e ⁽⁴⁾ の値を示した。図 9 から、胴体ピッチ角は仮想斜度に追従し、かつ、胴体ロール角は 0[deg] 付近を推移し、文献⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾で述べた所望の胴体姿勢角を保ちながら移動が実現できていることがわかる。

ここでは地形に応じた歩容の選択という点に関して、図 2 に示した歩容間遷移の観点から図 8 について説明する。なお、図において N_u, N_d, N_g の全てが 0 のときは、通常歩容が選択されている状態である。

図 8 (1) において、図 5 の ㊸ の凸地形により機体が前進できなくなり、 $N_u = N_g = 1$ となる。準備踏換後の左右脚の段差推定高さ H_{ei} (表 1 の 11.3[s] は左右脚の H_{ei} を平均した胴体の H_e を記載) が、上り段差の閾値 $\Delta_{get\ over} (=0.05)$ 以上のため、段差上り歩容に

Table 1 The value of H_e in the simulation

time	gait	H_e [m]
11.3[s]	gait for an upward step	0.122
40.9[s]	gait for an upward step	0.120
55.2[s]	gait for an upward step	0.091
89.7[s]	gait for a downward step	0.000
98.0[s]	gait for an upward step	0.194
130.9[s]	gait for a downward step	-0.176
168.7[s]	gait for a downward step	-0.124

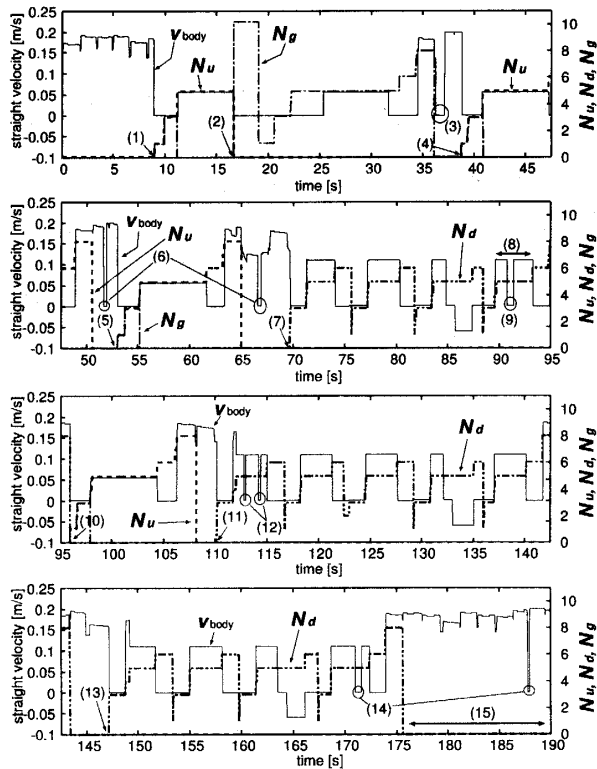


Fig. 8 V_{body} , N_u , N_d , N_g in the simulation

遷移する。これは、図2の(1)→(2)に示す遷移である。このとき、準備踏換期間後に H_e を得るまでは、 N_u と N_g の両方が変化する。11[s]付近で段差上り歩容が選択され、乗り越え歩容の N_g は0にクリアされる。

図中(2)において、上り全脚支持歩容中の左右の車輪角度偏差の合計が閾値 Δw_{up} (=30[deg])を超え、推定段差高さの不足により上れないと判断し、 $N_g = 10$ および $N_u = 0$ として、段差上り歩容から乗り越え歩容に遷移する。

図中(3)では、図5のⓑの凹地形のため、脚で機体を支持する負担割合を示す脚荷重分担率⁽⁴⁾が基本設定値0.5に対して一定以上上昇し、脚先力弛緩動作⁽⁴⁾を行うため、機体を停止させる。

図中(4)では、図5のⓒの上り段差地形により機体が進まなくなり、 $N_u = N_g = 1$ とし、その後、準備

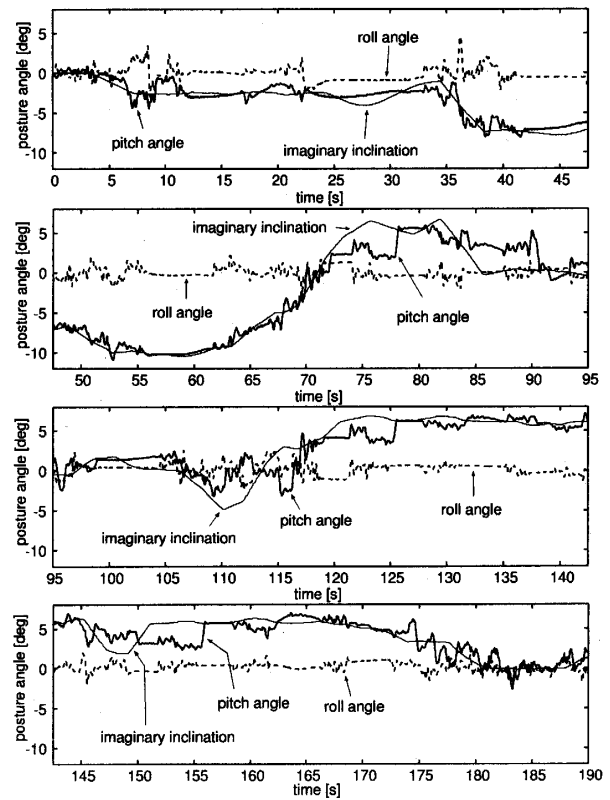


Fig. 9 Body angle in the simulation

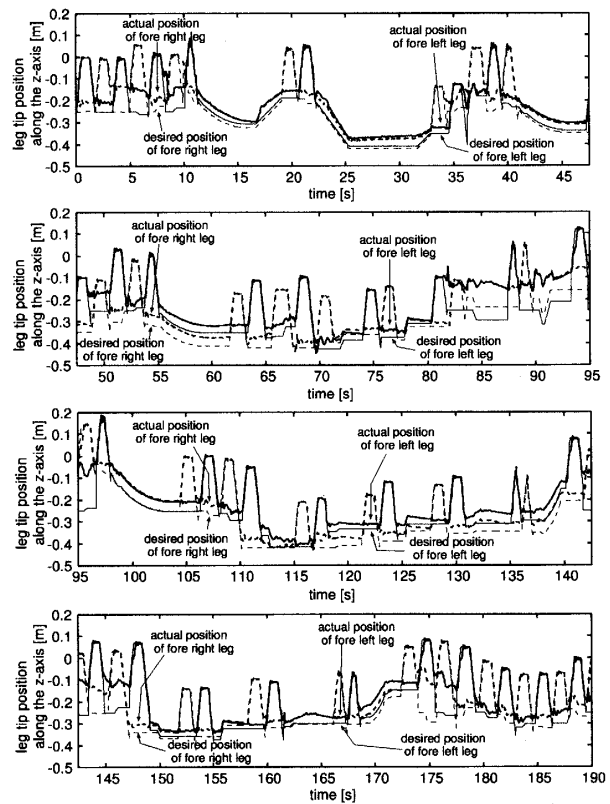


Fig. 10 Leg tip position along the z-axis in the simulation (fore legs)

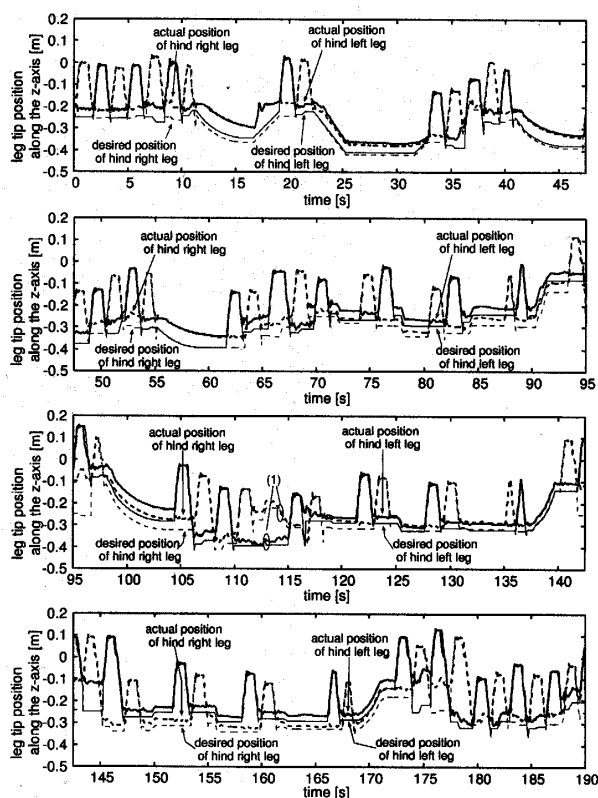


Fig. 11 Leg tip position along the z-axis in the simulation (hind legs)

踏換後の推定段差高さ H_{ei} (表1の40.9[s]の欄参照) が閾値 $\Delta_{\text{get over}} (=0.05)$ 以上のため、段差上り歩容に遷移する ($N_u = 5, N_g = 0$)。

図中(5)では、図5の㊸の上り段差地形により機体が進まなくなり、(4)の場合と同様に段差上り歩容に遷移する。このとき、 $H_e = 0.091$ (表1の55.2[s]の欄) と実際の段差高さに対して低めに出ている理由は、この地点の仮想面は上り斜面であり、そこからの高さは小さくなるからである。

図中(6)は、脚先力弛緩動作によるものである。これは、上り段差が連続し、上り斜面の仮想面に平行に移動するための目標軌道を生成するのに対して、当該路面は水平であるため、脚で機体を支持する負担割合を示す脚荷重分担率が基本設定値0.5に対して一定以上増加した結果動作する機能である。

図中(7)では、図5の㊹の凹路面により下り段差を検知し、段差下り歩容に遷移する。3回目の下り段差始点探索動作にて始点を検知し、図中(8)期間に全脚支持歩容にて穴に下りる。

図中(8)では、前脚はすでに穴の外に出ているため $H_e = 0$ (表1の89.7[s]の欄) となる。その結果、機体の下降量不足となり図中(9)で脚先力弛緩動作に

より機体を下げる。

図中(10)では、図5の㊺の上り段差地形を $N_d = 8$ において検出し、 $N_u = N_g = 1$ とし、準備踏換後の H_{ei} (表1の98.0[s]の欄参照) による選択により、段差上り歩容に遷移する。

図中(11)では、図5の㊻の下り段差地形を検出し、段差下り歩容に遷移する。

(ここで図中(12)では、図11の(1)に示すように、後脚が地面から離れて脚が浮いてしまったため、機体を停止させて、その脚を接地するまで下げている。)

図中(13)では、図5の㊼の下り段差路面により下り段差を検知し、段差下り歩容に遷移する。

図中(14)は、どちらも脚先力弛緩動作によるものである。

図中(15)は、通常歩容 ($N_u = N_d = N_g = 0$) による移動であり、図5の㊽以降の路面のような通常不整地では、通常歩容が選択されていることがわかる。

以上から、文献⁽³⁾⁻⁽⁶⁾で提案した各歩容が適切に選択され、結果として高さまたは深さが0.2[m]程度までの不規則凹凸路面の移動が、総合歩容により実現できることが確認された(除外地形は除く)。

5. 屋外不整地実験の様子

本章では、提案する総合歩容により実際の屋外不整地地形での移動が実現できることを検証した実験の様子について記述する。実験条件はシミュレーションと同様である。

図12に屋外不整地移動実験の様子を示す。紙面の都合上、その一部を示すこととする。

図12(a)は、高さ0.2[m]程度の舗道に上っている様子である。舗道の存在を検知し、段差上り歩容にて舗道に上っている。

図12(b)は、深さ0.1[m]程度の下り段差が2段続く路面を、斜めに下りている様子である。真中の写真では、段軸機構により左右車輪が上下にずれることで、胴体のロール角はほぼ水平を保った状態で段差を下っている。

図12(c)は、深さ0.1[m]程度の階段を下りている様子である。下り段差を検知し、段差下り歩容を繰り返して移動した。

図12(d)は、小さな木や笹などの下草が生い茂る山林を移動している様子である。通常不整地レベルの路面であるため、通常歩容にて移動している。文献⁽¹⁾で記述したように、超音波センサやビジョンなどの外界センサは用いずに、内界センサ情報にのみ基づいて移動しているため、通常問題になる生い茂った草など

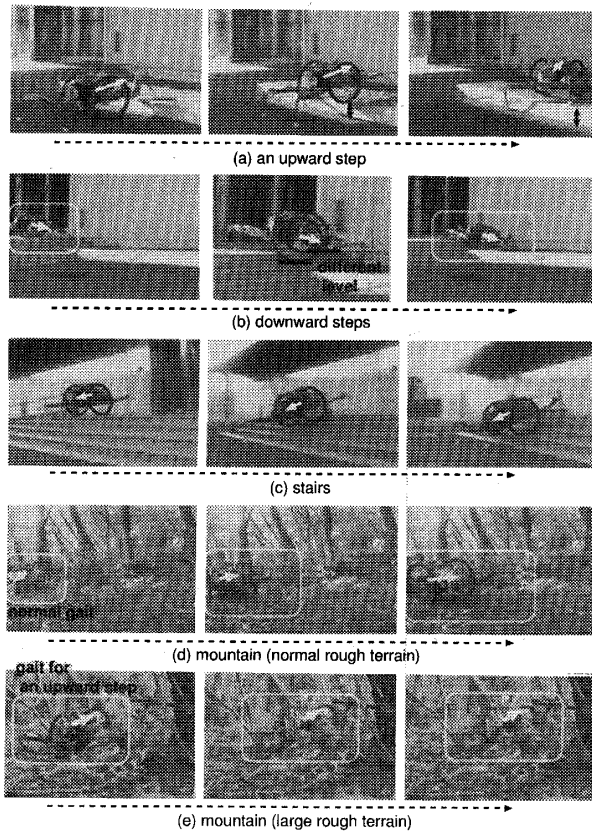


Fig. 12 Experimental scenes

からの外乱情報に左右されずに移動できている。

図 12 (e) は、上記同様山林の大不整地を段差上り歩容にて移動している様子である。通常歩容では移動できない上り段差に類した地形を、段差上り歩容で移動した。

図 12 (a) ~ (e) に示すように、屋外での実験により、実在する屋外不整地地形においても高い移動能力を持つことを検証した。

6. お わ り に

本論文では、脚車輪分離型ロボットの総合歩容について記述した。総合歩容とは、凹凸高さ ± 0.1 [m] 程度までの不整地 (通常不整地) を対象にした通常歩容と凹凸高さ $\pm 0.1 \sim 0.2$ [m] 程度までの不整地 (大不整地) を対象にした大不整地適応歩容を、路面に応じて適切に選択・遷移することで、通常不整地や大不整地が混在する総合的な不整地路面を移動可能にする歩容である。連続不整地上でのシミュレーションと実験を通じて総合歩容を検証し、その移動能力を確認した。

今後の課題を記述する。総合歩容により、未知の不整地での脚車輪分離型ロボットの基礎的な移動能力を確立することができた。総合歩容を構成する各歩容は外界センサレス方式であるため、誤った認識情報に左

右されることは少なく、信頼性は高い。しかしその一方で、外界センサ情報を活用した高度な移動能力 (経路戦略など) を持つことは難しい。そこで今後は、さらなる移動能力の高機能化と高信頼化を達成する目的で、総合歩容に基づく内界センサ情報の上に、外界センサ情報を重ね合わせて用い、総合的に判断するという思想による移動制御手法の提案を行いたいと考えている。

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) 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) 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.
- (8) S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, "MIT Press", (1989).
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.