

脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容*
(第1報, 歩容戦略編)中嶋 秀朗*¹, 中野 栄二*¹Adaptive Gait for Large Rough Terrain of a Leg-wheel Robot
(1st Report, Gait Strategy)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. In this paper, the strategy for the leg-wheel robot moving over large rough terrains is described. First, topographical features are classified for the large rough terrain movement. They are classified into 13 patterns by the combination of terrain surfaces. In order to move over all classified terrains, three gaits are proposed as adaptive gait for large rough terrain. Those three gaits are as follows: 1. Gait for an upward step: the forefoot landing point is higher than contact points with the ground of wheels, and the robot raises the body toward the forefoot landing point. 2. Gait for a downward step: the forefoot landing point is lower than contact points with the ground of wheels, and the robot lowers the body toward the forefoot landing point. 3. Gait for getting over an obstacle: the forefoot landing point is not higher than contact points with the ground of wheels, but the robot raises the body as high as possible.

Key Words: Moving Robot, Motion Control, Robot, Adaptive Gait, Leg-wheel Robot, Mobile Robot, Large Rough Terrain, Gait Strategy

1. はじめに

現在, 移動機構の中心は, 車輪またはクローラである。車輪機構は構造が簡単で, かつ移動効率が高いため, 多くの移動機構で用いられているが, 不整地への適応力が一般に低い。クローラ機構は車輪に比較して高い不整地適応性を有し, 土木建設機械などでの豊富な実績があるものの, やはりその適応範囲は連続的に接地点を確保できる地勢に限られている。

それに対して, 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, 脚機構は構造が複雑であり, 姿勢制御や脚制御が外界認識情報に強く依存するため, 実用化までには至っていない。

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に示すように, 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⁾。

筆者らは, 凹凸高さが $\pm 0.1[\text{m}]$ 程度までの不整地(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(基本移動制御手法)⁽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し, 基本移動制御手法だけでは移動できない。そこで本論文では, 凹凸高さが $\pm 0.2[\text{m}]$ 程度までの不整地(大不整地)を対象とし, 基本移動制御手法による不整地移動能力を拡充するための脚車輪分離型ロボットの歩容戦略と, 歩容戦略を考える上での地形分類に関して記述する。0.2[m]程度までを対象にする主な理由としては, 例えば歩道の高さが0.2[m]程度であり, 0.2[m]程度の凹凸高さに対応できると, 身近な屋外の多くの路面での応用が可能だと考えたからである。一方, 0.3[m]程度の凹凸になると, 身近なという意味での存在頻度は大きく減少するため今後の課題とし, 今回は対象とはしなかった。なお, 0.2[m]の段差を移動するという意味では, ロボットの寸法を大きくするといった方法などでも解決することができるが, ロボットの大きさは, 人が乗れる最小限の大きさの代表例である車いす程度までとしたいため, 移動戦略を

* 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

工夫することで対象とする地形の移動を実現することとした。

すでに大道らによる、脚車輪ロボットとしての歩容戦略に関するもの⁽³⁾があるが、内容は基本的な不整地地形に対するものである。また、地形の分類に関しては、広瀬らによる大局的な立場から地形を分類したもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾などがある。それに対して本論文では、数歩幅以内で移動する範囲の地形形状を体系的に分類し、各地形に対する歩容戦略を論じたものである。地形の分類に関しては、脚車輪分離型ロボットならではの、車輪接地路面高さと同脚接地路面高さの幾何学的な関係から論じたものである。そして、分類した全ての大不整地地形を移動可能とする大不整地適応歩容が3つの歩容戦略からなることを記述する。本論文は、各歩容戦略の大枠的なことを述べたものであり、各歩容間の位置づけを示したものである。各歩容戦略の制御手法の詳細については、別論文で報告する。

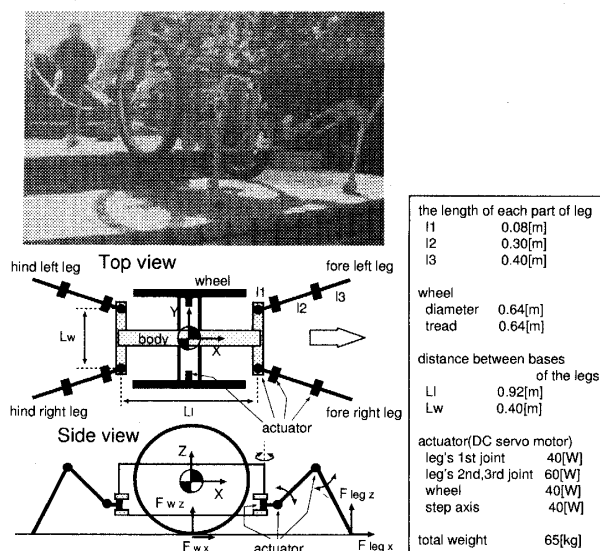


Fig. 1 A leg-wheel robot "Chariot 3"

2. 大不整地適応歩容の考え方

基本移動制御手法⁽¹⁾では、最小限の内界センサから得られる情報だけを使って、未知の不整地を歩行している。実際に装備している内界センサは、各関節軸のエンコーダと本体中央の姿勢角度センサ(ピッチ、ロール)の2種類のみである。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、積雪などさまざまであり、それらの状況を外界センサを使って判断しようとしてもまだまだ精度が低く、ノイズなどによる判断の誤りも多いためである。その一方で内界センサは、外界からの情報を得る外界センサと違って、歩行中にロボット自身が発生している力や

ロボット自身の姿勢を検知しているため、かえって実態を正確、かつ安全にとらえることができる。本研究は、高度な経路選択などは外界センサを用いて行う一方で、基礎的な未知不整地移動能力は内界センサ情報のみで確保するのが不整地移動ロボットの実用化に必要であるという研究思想に基づいている。そのため、現時点では人間が操縦するものとし、物理的な限界によりロボットが移動できないような、例えば壁が前に立ちはだかるような路面の移動は考慮していない。

基本移動制御手法では、コンプライアンス制御をした脚先とサスペンションを持った車輪(メカニカルなコンプライアンス)により、路面の凹凸を吸収することで、外界環境を認識することなく未知不整地の移動を実現した。このとき、脚には Trot 歩容制御⁽²⁾などを行い、また、車輪には回転制御を行い、脚と車輪が図2のように接地し、両機構の推進力を使用する「脚車輪モード」を用いる。図1に示す実験機により±0.1[m]程度までの未知の凹凸不整地上での移動が可能であることを既に検証した。

一方で、脚車輪モードで、より大きな凸路面を移動しようすると胴体が上がらず、また、より大きな凹路面では車輪が浮いて不安定になり、移動することができなかった。移動できない理由は、設定した脚先と車輪のコンプライアンスで吸収できる凹凸レベルよりも実際の凹凸が大きいためである。

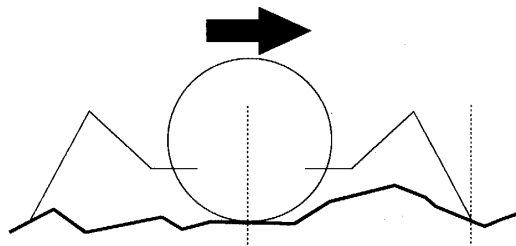


Fig. 2 Leg wheel mode

脚車輪モードにより、凹凸レベルが0.1~0.2[m]程度の大不整地での移動を可能とするには、脚先と車輪に設定したコンプライアンスで吸収できる凹凸程度になるまでは、胴体を地形にあわせて積極的に上下させる必要がある。このとき、外界センサを使わずに地形にあわせて胴体を上下させる必要があるため、前脚に触覚のような機能を持たせ、前脚の接地位置とその時の胴体角度から、移動する路面形状をある程度推定することとする。

また、一般的に大不整地は通常不整地の中に散在するため、ロボットが移動する際には、基本移動制御手法を用いつつ必要に応じて大不整地適応歩容を使用す

ることになる。よって大不整地適応歩容においては、基本移動制御手法との連続性の観点から、変更する必要のない部分は基本移動制御手法を踏襲する。

3. 脚車輪分離型ロボットにおける地形分類

前脚を触覚のように使用して、大まかな地形を推定し、今から胴体が移動する地形にあった歩容戦略を選択する場合、前脚の接地路面高さと同輪(胴体)接地路面高さの関係により大きく3つのタイプの地形に分類できる。つまり、前脚の接地路面高さが車輪接地路面高さに比べて0.1~0.2[m]程度高い場合(図3 Type A-1 路面)、0.1~0.2[m]程度低い場合(図3 Type B-1 路面)、同じ程度(凹凸が±0.1[m]程度以内、図3 Type C-1 路面)の場合である。ここで、前脚の接地点は車輪接地点に対して1.0[m]程度前方であるのに対して、歩幅は0.3[m]程度であり、1歩幅移動しても、胴体は前脚が接地している路面の手前までしか移動しないことから、地形を3つの点(1. 車輪接地点, 2. 前脚接地点, 3. 車輪接地点と前脚接地点の間地点)の相対高さにより分類する。

図3を説明すると、車輪接地点(P1)に比べて前脚接地点(P2)が0.1~0.2[m]程度高い場合をType A路面とし、その中間地点の高さにより、通常の1段段差(Type A-1)、中間地点がA点とB点の間にある2段段差(Type A-2)、凸上り段差(Type A-3)、凹上り段差(Type A-4, A-5)に分類できる。Type A-4とType A-5は、車輪が穴地形に入り、機体が0.1[m]程度下がるか否か、すなわち、穴地形部分が大不整地として影響するか否かで分けた。同様にして、車輪接地点(P1)に比べて前脚接地点(P2)が0.1~0.2[m]程度低い場合をType B路面とし、その中でさらに分類した。また、車輪接地点高さ(P1)と前脚接地点高さ(P2)が同程度(凹凸が±0.1[m]程度以内)の場合をType C路面として分類した。Type B-4とB-5、Type C-2とC-3についても、Type A-4とA-5と同様な基準での分類である。

すなわち上記の分類方法を言い替えると、胴体が今から移動する路面を0.3[m]間隔程度に区分し、それぞれの区間の高さの代表値を一つ選び、それらの相対的な高さにより分類したものとなる。ただし本論文の大不整地では、次の地形は除外した。

1. 段差表面が斜面である地形(斜面ベースの大不整地)
2. 図1の機体座標系z方向において、車輪接地点と、前脚接地点または後脚接地点の高さが0.25[m]程度以上離れる地形

地形1の除外理由は、本論文が脚車輪分離型ロボ

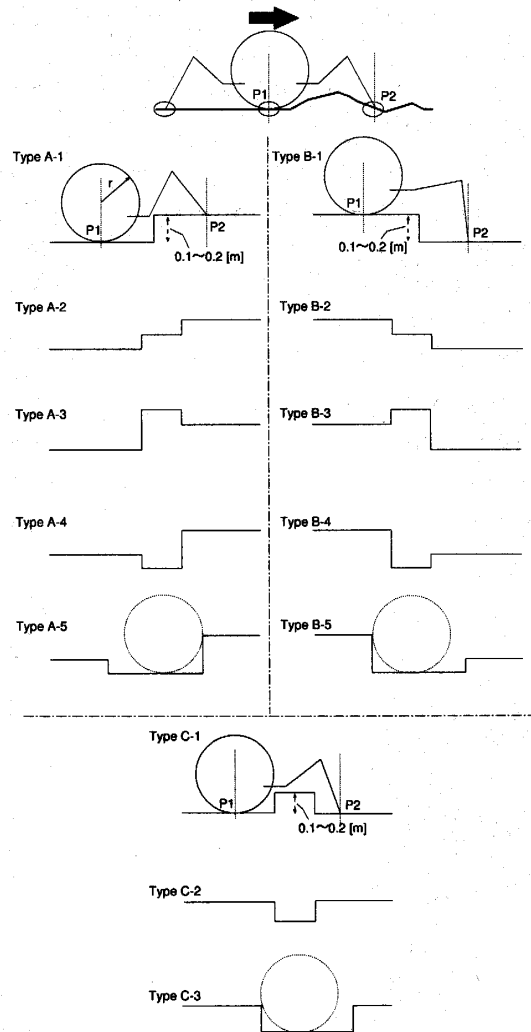


Fig. 3 Classification of large rough terrain

トの大不整地移動を扱う最初のものであり、第一ステップの位置づけにあること、また、特に人工的な屋外不整地においては、段差表面はある程度水平の場合が多いためである。

地形2の除外理由は、図1に示した寸法の場合、移動中に脚の下限を超過し、脚の接地が困難になるためである。

本論文が扱う不整地路面は上記のように、全ての不整地地形を網羅するものではないが、一方で、屋外を含め実際の不整地地形の多くを、本論文で分類した地形に特徴づけることが可能であると考えている。

4. 大不整地における移動戦略

本章では、図3で分類した全ての大不整地路面を移動可能にする大不整地適応歩容の3つの歩容戦略を提案する。

まず、コンプライアンスで吸収できる凹凸レベルま

で、地形にあわせて胴体を上げ・下げする際の目標高さは、図3のうちの代表的な路面である Type A-1, Type B-1 路面のように前脚の接地高さ付近であることが多い。本論文では、存在頻度の多いこれらの地形を戦略の基準とし、胴体を上げ・下げする目標高さは、前脚の接地する路面高さとする。ただしその場合には図4に示すように、

1. 前脚接地地点が車輪接地地点よりも高い位置にあり、それに向かって胴体を上げる場合
2. 前脚接地地点が車輪接地地点よりも低い位置にあり、それに向かって胴体を下げる場合
3. 前脚接地地点が車輪接地地点より高い位置にはないが、胴体を上げる場合
4. 前脚接地地点が車輪接地地点より低い位置にはないが、胴体を下げる場合

と大まかに4つの場合に分けられる。

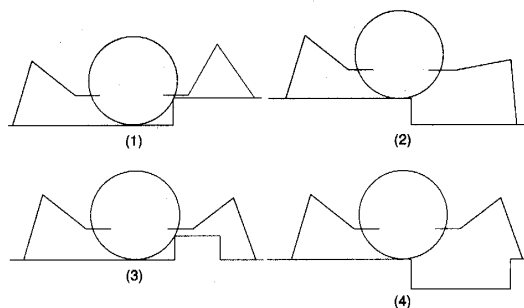


Fig. 4 Four patterns of relation between front leg's position and the target height of the body

図4の(1)~(4)に対応できる歩容戦略を考えた場合、(4)に関しては、穴の奥行きが歩幅以上であり、脚部分の歩容がデューティ比0.5以上であれば、胴体が穴に到達する前に一度は前脚が穴に接地するため、その情報を利用し、(2)に対する歩容戦略の後に(1)で用いる戦略を用いることで移動可能になる。すなわち、図5の(1)~(3)に示す3つの歩容戦略が必要となるのである。

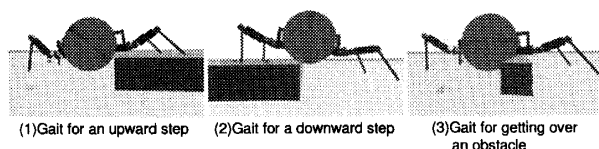


Fig. 5 Three strategy patterns for moving over large rough terrains

ここで(3)に対する歩容戦略は、他の歩容戦略を用いることで移動できないのかという疑問に対しては、否である。その理由を述べると、(3)の凸部分の奥行

きが短い場合には、前脚が遊脚中に凸部分を越えて平坦地に接地し、胴体を上げるべき凸部の高さを認識することができない場合があるためである。つまり、(1)の戦略で必要な胴体を上げる目標位置を必ずしも取得できないのである。なお、(4)の凹部分の奥行きが短い場合には、胴体は穴の底まで入らないため、穴を検知できなくても、基本移動制御手法⁽¹⁾のままの移動が可能である。ただし奥行きが短くても、脚が穴に接地した場合には、深さによっては(2)の移動戦略に遷移する。この場合も含めて胴体が穴の底まで入らない場合は、脚の接地位置から推定される胴体の目標下げ深さと実際に下げる深さは異なる。この問題に関しては、(2)の移動戦略(段差下り歩容)の中で対応することとし、別論文で詳しく述べる。

上記から、大不整地適応歩容には最低限3つの歩容戦略が必要となる。それぞれの歩容戦略を次のように定義する。

段差上り歩容 図5(1)で示すように前脚接地地点が車輪接地地点よりも高い位置にあり、それに向かって胴体を上げる歩容

段差下り歩容 図5(2)で示すように前脚接地地点が車輪接地地点よりも低い位置にあり、それに向かって胴体を下げる歩容

乗り越え歩容 図5(3)で示すような前脚接地地点が車輪接地地点より高い位置にはないが、胴体を上げる歩容

5. 各歩容に求められる機能と対象地形

提案した3つの歩容の定義に基づき、図3の不整地路面を、各歩容が移動対象とする路面で分類したのが図6である。ただし、Type C-3 路面は段差下り歩容で穴に入った後、段差上り歩容で穴から出るという2つの歩容を使用するが、分類の都合上、段差下り歩容の欄に入れた。同様に Type A-3 では、はじめに段差上り歩容で移動を試みるが、胴体を上げる路面が、目標高さとなる前脚の接地路面より高いため上ることができずに、乗り越え歩容に遷移する。Type B-3 は段差下り歩容中に凸路面に遭遇し、乗り越え歩容となり、その後、段差を下るために下り段差歩容を用いて移動を達成する。上記のように複数の歩容を用いる場合でも、分類の都合上いずれかの歩容に分類した。また Type C-2 は、車輪が穴に入らないため、基本移動制御手法⁽¹⁾のまま移動可能であり、図6には記していない。なお、各歩容の制御手法および遷移条件等の詳細に関しては、それぞれ別論文に記述するため、本論文では省略する。

本章では、対象とする全ての地形を移動可能とするために各歩容に必要な機能を提案する。ただし、大不整地適応歩容でも基本移動制御手法と同様、ある程度の凹凸外乱を吸収できるように脚先と車輪にコンプライアンス特性を設定する。これにより、段差高さの推定などにおいてもそれほど精度が求められず、各軸の角度センサと姿勢角度センサの2種類の内界センサのみでの判断が可能となる。

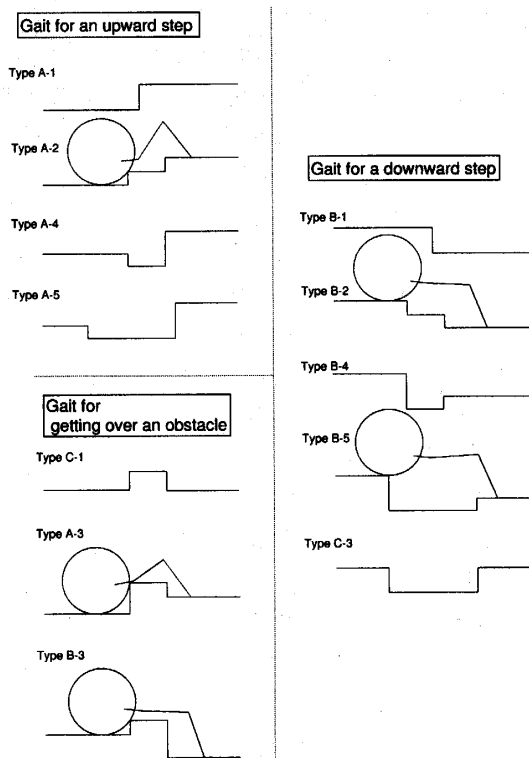


Fig. 6 Targeted rough terrains of each gait

5.1 段差上り歩容

基本機能：前脚接地位置と胴体姿勢角度から胴体を上げる目標高さを判断し、胴体を持ち上げる。安定性、荷重の分散、および省エネルギー性(メカニカルな車輪機構で荷重を分担支持できるため)の観点から脚と車輪での支持を基本とする。この中には、胴体を上げるタイミングを決定するための、段差始点検知機能なども含む。

機能1：Type A-2 路面のように前脚接地路面の高さ(目標高さ)が移動後の車輪接地路面の高さ(実際の高さ)より高い場合には、段差上り歩容中に胴体を上げ過ぎない対策をとる必要がある(上げ過ぎ対策)。

機能2：Type A-3 路面のように前脚接地路面の高さ(目標高さ)が移動後の車輪接地路面の高さ(実際の高さ)より低い場合には、胴体を上げるこ

ができないため、次の歩容戦略(乗り越え歩容)に遷移する必要がある(上げ不足対策)。

なお、Type A-5 のように上り段差の前に穴があっても、深さ 0.1[m] 程度までは基本移動制御手法で対応可能であるため、そのための機能は必要としない。また、Type A-4 路面は車輪が穴にほとんど入らないため、Type A-1 路面と同様である。

5.2 段差下り歩容

基本機能：前脚接地位置と胴体姿勢角度から胴体を下げる目標深さを判断し、胴体を下ろす。安定性、荷重の分散、および省エネルギー性の観点から脚と車輪での支持を基本とする。この中には、段差の発見、段差始点の検知機能なども含む。

機能1：Type B-2 路面のように前脚接地路面高さ(目標高さ)が移動後の車輪接地高さ(実際の高さ)より低い場合には、段差下り歩容中に胴体を下げ過ぎない対策をとる必要がある(下げ過ぎ対策)。

機能2：Type B-5, C-3 路面のように前脚接地路面深さ(目標高さ)より胴体の必要下降量(実際の高さ)が大きい場合には、車輪が接地するまで胴体を下げる必要がある(下げ不足対策)。

なお、Type B-4 路面は車輪が穴にほとんど入らないため、Type B-1 路面と同様である。また分類上は段差下り歩容対象路面に分類したが、Type C-3 路面では段差を上る際に、段差上り歩容も必要となる。

5.3 乗り越え歩容

基本機能：必ずしも前脚が路面の凸部分に接地するとは限らず、胴体を上げる目標高さを得ることができない。そのため、凸路面では胴体を最大限上げた後に前に移動し、その後、車輪が接地するまで胴体を下ろす。この中には、凸路面の始点検知機能なども含む。

機能1：Type A-3 の路面では、段差上り歩容の目標高さが低いため、胴体が上がらない。そのため、段差上り歩容で移動不可能な場合に、乗り越え歩容に遷移する必要がある。

機能2：Type B-3 の路面では、段差下り歩容中に車輪が凸部分にあたり移動できない。そのため、段差下り歩容で移動不可能な場合に、乗り越え歩容に遷移する必要がある。(実際には段差下り歩容のうち、下り段差の始点を検出する段階での機能である。下り段差始点検出機能などの段差下り歩容の詳細については別の論文にて詳細に記述する。)

なお、Type A-3, Type B-3 路面はいずれも凸部分に乗り上げ後、段差下り歩容が必要となる。

5.4 共通機能 屋外も含めた実際の不整地地形では図7に示すように、段差がなだらかな場合(図7(a)), 左右の路面高さが異なる場合(図7(b)), そして、段差に対して斜めに進入する場合(図7(c))が存在する。そのため、各歩容に対してこれらの路面に対応できる移動機能も必要となる。

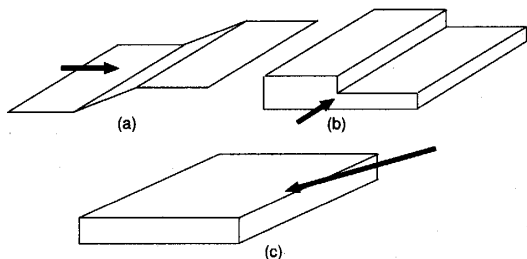


Fig. 7 Rough terrain

以上をまとめると、図3で示した路面の移動のためには、3次元的な不整地の移動を考慮した3つの歩容戦略の基本形と、推定した地形と実際の地形の誤差が大きい場合に対応できる機能が必要であることになる。

6. おわりに

本論文では、脚車輪分離型ロボットが大不整地を移動するための歩容戦略について記述した。そのためにまず、対象とする移動路面を体系的に分類した。実在する不整地の多くを、図3で分類した不整地のいずれかに特徴づけることが可能であると考えている。そして、分類した地形を移動可能とするための3つの歩容戦略を提案した。さらに3つの歩容戦略で、分類した全ての地形を移動可能とするために必要となる機能を整理し、記述した。本論文で提案する、3つの歩容戦略からなる大不整地適応歩容を用いることによって、多くの実在する不整地を、脚車輪分離型ロボットは移動可能となる。

なお、本論文の位置づけは、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地形を体系的に分類し、分類した全ての大不整地地形を移動するために必要となる3つの歩容戦略を示すことである。そのため、本論文で提案した3つの歩容戦略の詳細についてはそれぞれ別の論文に記載し、報告する予定である。また、3つの歩容戦略からなる大不整地適応歩容と基本移動制御手法⁽¹⁾を総合的に融合した歩容に関しても、あらためて別の論文に記述する。

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) Hirose, S. et al., *The Basic Study of the Intelligent Gait Control for Quadrupedal Walking Vehicle*, "Keisoku Jido Seigy Gakkai Ronbunshu (Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers)", vol.18-2, (1982), pp.193-200.

(5) Hirose, S. et al., *The Gait Control System of the Quadruped Walking Vehicle*, "Journal of the Robotics Society of Japan", vol.3, no.4, (1985), pp.304-323.