

脚車輪分離型移動ロボットにおける段差踏破能力の向上

An Improvement of Ability of Getting over a Step of Leg-Wheel Mobile Robots

○荒井 和哉, 高橋 隆行, 王志東, 中野 栄二

○Kazuya Arai, Takayuki Takahashi, Zhi-Dong Wang, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 脚車輪型ロボット (Leg-Wheel Mobile Robot), コンプライアンス (Compliance), 不整地 (Rough Terrain), 段差乗り越え動作 (Motion of Getting over a Step)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 情報科学研究科 中野研究室 (青葉山キャンパス機械系) 荒井 和哉, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: arai@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在, 車輪式, クローラ式, 脚式などの不整地移動機械の研究は数多くなされている. 特にそのポテンシャルの高さから脚式の不整地移動機械の研究は古くから行われてきた^{1)~3)}. しかし, 実社会で活用できるような不整地移動能力が得られているとは言いがたい.

その理由として脚機構は構造が複雑でコストがかかること, 制御が難しくなることなどが挙げられる. さらに不整地移動の一般的問題として不整地センシングの難しさが挙げられる.

このような現状を打破するために中野らによって開発されたのが, 脚と車輪を独立に有する脚車輪分離型移動ロボット (Leg-Wheel Mobile Robot: LWMR) である^{4)~6)} (Fig. 1). このロボットは, 車輪で本体重量の約半分を支えているため, 脚の垂直方向の荷重分担が軽減され, エネルギー効率に優れている. また, 常に車輪が接地してい

るために脚機構のみのロボットに比べて安定性も高い. そして, 脚車輪パッシブ混合クロール歩容 (LWPCG)^{7)~8)} という移動手法によって未知の不整地を外界センサに依存せずに移動することが可能である. また, さらにLWPCGを改良した周期的コンプライアンス設定移動法という手法が開発され, それにより歩行中の機体の揺動を抑えることも可能となった.⁹⁾

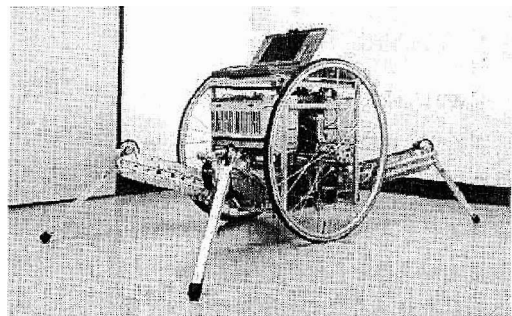


Fig. 1 LWMR実験機 (Chariot II)

1.1 目的

本研究では、このLWMRの実用化に向け、不整地移動能力向上の一環として、段差踏破能力の向上を目的としている。

LWMRでは、脚のみのロボットと比べると、段差踏破のためには車輪が段差を越えるという条件が付加される。Fig. 2のように段差に斜めに進入する状況に、現在組み込まれている歩容を使用すると、前側の2本の脚と片側の車輪が段差に登っても、下側の車輪が登りにくいことが実験により明らかになった。また、その下側の車輪が前進できなくなることによって、左右の車輪の速度差が生じ、より登りにくい姿勢となってしまう。よって本研究では、段差へ斜めに進入した場合の段差踏破能力の向上、特にFig. 2のように下側の車輪が登っていない状態を克服することを目的とする。

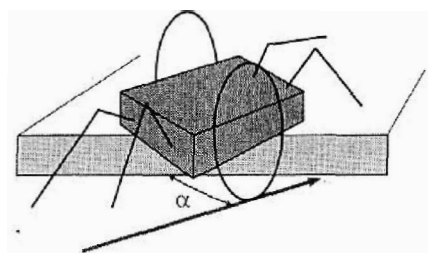


Fig. 2 段差へ斜めに進入する場合

2. LWMRの構成

2.1 LWMRの機構

LWMRは3自由度の脚を4本と、それぞれ独立に駆動する車輪を2つ備えている(Fig. 3, Table1)。各関節と車輪は、DCモータとバックドライバブルなギアトレインで構成され、その回転角度を検出するためにエンコーダが取り付けられている。車輪駆動部は並行リンク機構で本体と接続され、本体は車輪の駆動部からばねで吊下げられている。

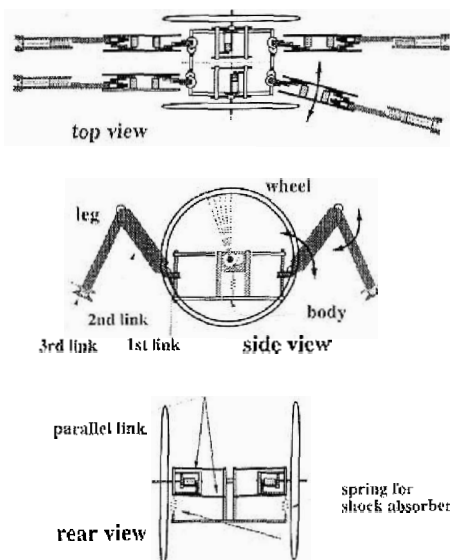


Fig. 3 LWMRの構成

Table 1 LWMRの諸元

寸法	(1000~1800)×600×500 全長×全高×全幅[mm]
重量	43kg (自立動作時)
材質	アルミ合金
移動速度	0.1 m/s
脚	3自由度×4本
車輪	1自由度(回転)×2輪
車輪半径	320mm
トレッド	470mm
制御機器	Transputer T800 UPP(HD63140CP)
制御周期	15ms
センサ	エンコーダ, ポテンショメータ, 振動ジャイロ, 傾斜計
アクチュエータ	DCモータ(24V40W)×14個
アクチュエータ 駆動方式	PWM駆動 PID制御
駆動電源	アクチュエータ:DC24V 制御機器:DC5V

2.2 LWMRの制御法

以下に、現在LWMRに組み込まれている歩容について説明する。

2.2.1 脚車輪パッシブ混合クロール歩容^{7)~8)}

脚車輪パッシブ混合歩容(LWPCG)とは、脚先に一定の大きさのコンプライアンスをソフトウェア的に設けた上で、あらかじめ設定されている一定の脚先軌道を脚がトレースする移動方法である。路面の多少の凹凸は、脚先と車輪のサスペンションのコンプライアンスによって吸収されるため、詳細な地形情報は不要である(Fig. 4)。

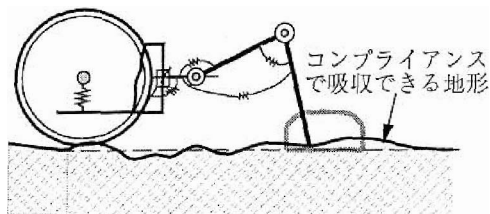


Fig. 4 LWPCG

2.2.2 周期的コンプライアンス設定移動法⁹⁾

周期的コンプライアンス設定移動法とは、基本的にLWPCGと同様の歩容である。しかし、LWPCGは一定のコンプライアンスであったために、各接地点の接地反力の変化による周期的な揺動が発生してしまった。そこで、この歩容では、周期的なコンプライアンスを設定することにより、その揺動を減少させることをしている。コンプライアンスの設定法としては、平地移動時を想定し、

- 機体ロール方向のモーメントのつりあい
- 機体ピッチ方向のモーメントのつりあい
- 脚それぞれの接地荷重の合計が
(機体全重量)×(脚の荷重分担率)
- 遊脚は接地荷重が0

という4つの条件から4脚の目標接地荷重を求め、その目標接地荷重によりそれぞれのコンプライアンスを設定している。

2.2.3 脚先軌道のシフト動作^{7)~9)}

コンプライアンスで吸収しきれない大きな段差などに対しては、能動的に脚先軌道を上下方向にずらすことで対応する(Fig. 5)。これを脚先軌道のシフト動作という。

脚先の目標軌道と実際軌道の偏差 δ とすると

- δ がある値以下になったら、脚先の目標軌道を下にシフトする
- δ がある値以上になったら、脚先の目標軌道を上にシフトする

ただし、偏差 δ は、内界センサである関節のエンコーダを用いて計測される。

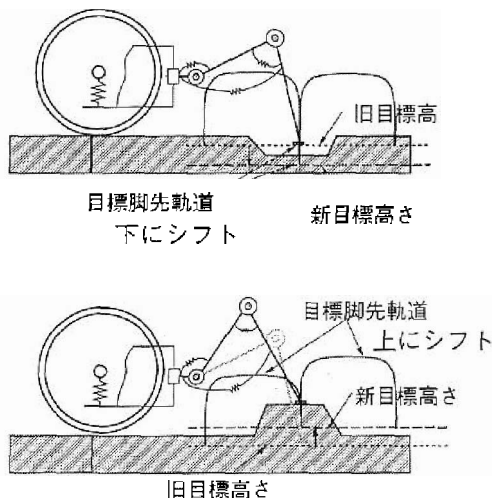


Fig. 5 脚先軌道のシフト

3. 段差踏破のための歩容

本章では段差踏破のための歩容について考える。段差踏破が困難であるのは、下側車輪が登りにくいからであり、下側車輪の荷重を軽減すれば段差を乗り越えやすくなると考えられる。よって、まずはこの仮説を証明するために、段差踏破のための条件を求め、次に段差踏破中の下側車輪

の接地荷重の値を求める。その後、段差踏破のための歩容について考える。

3.1 段差踏破のための条件

Fig.6は、下側車輪に注目した段差越えのモデルである。

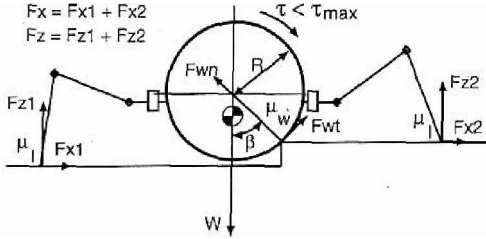


Fig. 6 段差越えのモデル

Fig.6中の記号及び以下の記号を定義する。

- $F_{wtL,R}$: 左右車輪の推進力
- $F_{wnL,R}$: 左右車輪の垂直抗力
- $F_{wzL,R}$: 左右車輪の分担している荷重
- $\mu_{w,j}$: 車輪, 脚の摩擦係数
- Wg : 機体の全重量

続いて、Fig. 7 は、Fig. 6 の段差と車輪の関係を拡大したものである。

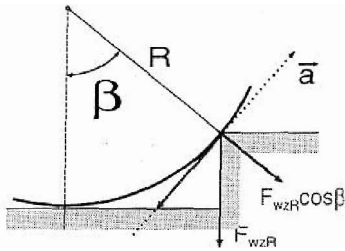


Fig. 7 車輪と段差

車輪の接線方向 \bar{a} 、車輪中心の鉛直方向と段差との角度 β を、Fig. 7 に示すように定義する。 β は、車輪が段差を登っていくにつれて徐々に小さくなり、登りきったところで0となる。また β は、登り始めの時点で最大となる。

以上のことをもとに、段差踏破のための条件を求める。

摩擦による条件から、式(1)~(3)が得られる。

$$F_{wtL} \leq \mu_w F_{wnL} = \mu_w F_{wzL} \quad (1)$$

$$F_{wtR} \leq \mu_w F_{wnR} = \mu_w F_{wzR} \cos \beta \quad (2)$$

$$F_x \leq \mu_l F_z \quad (3)$$

続いて、図中の \bar{a} 方向についての推進力を考えると、段差踏破のための条件は、式(4)となる。

$$F_x \cos \beta + F_{wtL} \cos \beta + F_{wtR} \geq F_{wzR} \sin \beta \quad (4)$$

ここで、式(4)の左辺の各項は、それぞれ式(1)~(3)により最大値が決まっているので、段差踏破のための必要条件として式(5)が得られる。

$$\mu_l F_z \cos \beta + \mu_w F_{wzL} \cos \beta + \mu_w F_{wzR} \cos \beta \geq F_{wzR} \sin \beta \quad (5)$$

さらに $F_{wzR} + F_{wzL} = F_{wz}$ (車輪の荷重分担) とすると、式(6)が得られる。

$$\mu_l F_z + \mu_w F_{wz} \geq F_{wzR} \tan \beta \quad (6)$$

ここで、式(6)より、 β が大きいほど、つまり上り始めほど厳しい条件であることがわかる。また、その β の最大値は、幾何学的な条件より、式(7)と求まる。

$$\beta = \arccos \frac{R}{R-h} \quad (7)$$

よって、式(6)、(7)より、Fig. 8 が得られる。

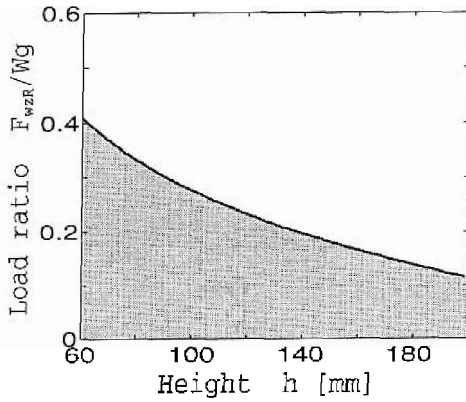


Fig. 8 段差高さとして下側車輪の接地荷重

Fig. 8の縦軸は段差高さ、横軸は、下側車輪の接地荷重を機体の全重量で割ったものである。ある高さの段差を踏破するためには、下側車輪の接地荷重がこのグラフの下側の領域にあることが、必要な条件となる。

3.2 段差踏破中の接地荷重の計算

段差踏破中の接地荷重を計算するために、機体をFig. 9のようにモデル化する。機体についているばねの端点が各脚・車輪の6つの接地点であると、このモデルをある路面に置いたときに、どのような状態で安定となるかを求めることで、各脚・車輪の荷重を求めることとする。(Fig. 10)

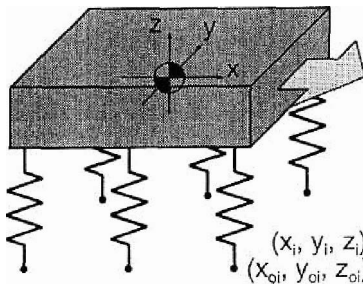


Fig. 9 接地荷重を計算するための機体モデル

計算時の仮定は以下のようになり、これらの

仮定から連立方程式を立てることで、各接地点の荷重を求める。

- その状態で静止しているとする
- 各接地点の路面高さが与えられているとする
- 座標系は、機体に固定の機体座標系と、外界に固定の基準座標系の二つ (Fig. 11)
- 機体座標系は基準座標系からピッチ方向に θ 、ロール方向に ψ 傾いている
- 路面から重心位置(座標原点)までの高さを z_{cog} とし、これは未知数となる
- 機体座標系において、接地点の x, y 方向は目標値通りであり、 z 座標のみが変化し、路面に追従する
- 機体座標系での z 座標の目標・実際位置との偏差とコンプライアンスにより、各接地荷重が求まる

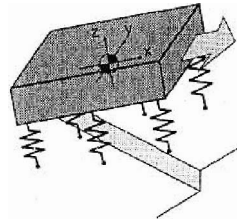


Fig. 10 機体モデル

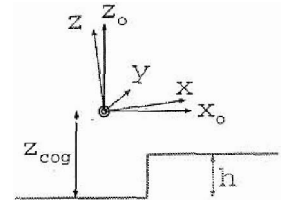


Fig. 11 座標系

以上の仮定より、以下を用いて連立方程式を立てる。なお添字の i は各接地点の番号、 w は車輪であることを示す。

- f : 接地荷重
- x, y, z : 接地点座標(機体座標系)
- x_0, y_0, z_0 : 接地点座標(基準座標系)
- k : コンプライアンスの逆数
- z_d : z の目標値(機体座標系)

まず、力のつりあいより、式(8)が得られる。

$$\Sigma f_i + \Sigma f_{wi} = Wg \quad (8)$$

モーメントのつりあいより、式(9)、(10)が得られる。

$$\Sigma f_i x_{oi} + \Sigma f_{wi} x_{owi} = 0 \quad (9)$$

$$\Sigma f_i y_{oi} + \Sigma f_{wi} y_{owi} = 0 \quad (10)$$

コンプライアンスと荷重の関係より、式(11)、(12)が得られる。

$$f_i = k_i(z_i - z_{di}) \quad (11)$$

$$f_{wi} = k_w(z_{wi} - z_{dw}) \quad (12)$$

そして、機体姿勢角と接地点の関係より式(13)～(15)が得られる。

$$z_i = \frac{z_{oi}}{\cos \theta \cos \psi} - \frac{x_i \tan \theta}{\cos \psi} - y_i \tan \psi \quad (13)$$

$$x_{oi} = \frac{1}{\cos \theta} x_i - z_{oi} \tan \theta \quad (14)$$

$$y_{oi} = \frac{1}{\cos \psi} y_i + x_i \tan \theta \tan \psi - \frac{z_{oi} \tan \psi}{\cos \theta} \quad (15)$$

式(11)もしくは式(12)と、式(13)～(15)は、それぞれ接地点の数だけあるので、合計27の連立方程式となり、これを解くと各接地点の接地荷重が求まる。

以上の式により、現在組み込まれている歩容で120[mm]の段差に斜めに進入して段差踏破不能となった状態、つまりFig. 2のように前側の2脚及び片側の車輪が段差の上ののっている状態での下側車輪の接地荷重を求めたものがFig. 12である。

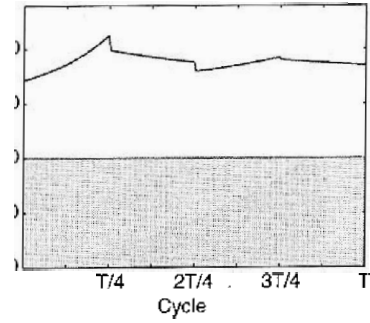


Fig. 12 段差踏破中の下側車輪の接地荷重

Fig. 12の横軸は歩容1周期中の時刻であり、脚位置・コンプライアンスなどが変化する。一方縦軸は、下側車輪の接地荷重であり、その時刻の脚位置・コンプライアンスによって求めたものである。また、図中のハッチングされた領域は、先に求めた段差踏破のための必要条件である。段差踏破のためには、下側車輪の接地荷重がその領域に入っていることが必要であるが、現在組み込まれている歩容では段差踏破には至らないことがわかる。よって、下側車輪の接地荷重を減少させる何らかの方法が必要である。

3.3 段差踏破のための歩容

前節までにより、段差踏破のための歩容としては、下側車輪の接地荷重を減少させる必要があることが明らかになった。一方、LWMRの特徴として、機構及びその制御法により、詳細な地形情報を必要とせずに未知不整地の移動が可能であるという点が挙げられる。本研究でもこの利点を損ないたくないため、段差踏破のための歩容としては、周期的コンプライアンス設定移動法に近い歩容が望ましい。そこで再び、周期的コンプライアンス設定移動法について考える。

周期的コンプライアンス設定移動法については、2.2.2節において述べているが、この歩容の特徴をもう一度示すと、以下ようになる。

- 1) 脚先は一定軌道をトレース
- 2) 平地移動時を想定して各接地点の目標接地荷重を決定する
- 3) 以下の4つの条件により4脚の目標接地荷重を決定する
 - (a) ピッチ方向のモーメントのつりあい
 - (b) ロール方向のモーメントのつりあい
 - (c) 脚それぞれの接地荷重の合計が
(機体全重量)×(脚の荷重分担率)
 - (d) 遊脚は接地荷重が0
- 4) 左右車輪の接地荷重は $f_{w1} = f_{w2} = W_w g / 2$
 $W_w = (\text{機体全質量}) \times (\text{車輪の荷重分担率})$
 g は、重力加速度

しかし、この歩容では120[mm]の段差踏破には至らなかったため、どこかを変更する必要がある。上述の(a)~(d)までの4つの条件は踏破したいと考えるので、残る条件を変更して、段差踏破中に、下側車輪の接地荷重を小さくすることを考える。

以下に示すものが、それぞれの条件を変更した場合の計算結果をまとめたものである。

- 『左右車輪の接地荷重は $f_{w1} = f_{w2} = W_w g / 2$ 』という条件の変更
 - 任意な値に変更すると、脚に負の目標接地荷重が設定されるため、不可能である。
- 『平地移動時を想定する』という条件の変更
 - 下側車輪の目標接地荷重を任意な値に変更すると、脚に負の目標接地荷重が設定されるため、不可能である
- 『脚先は一定軌道をトレース』という条件を変更
 - ・ 脚先目標位置の x 座標のみを変更する

- 段差踏破可能な荷重配分にできる x 座標の値を求めると、脚の可動限界を越える値になってしまうため、不可能である
- ・ 脚先目標位置の y 座標のみを変更する
 - 段差踏破可能な荷重配分にできる可能性がある

以上のことから、脚先の y 方向目標位置を変更することにより段差を踏破することを考える。

3.4 脚先の y 方向目標位置の変更

前節で述べた、脚先の y 方向目標位置の変更を Fig. 13 に示す。この図は機体を上から見たものである。

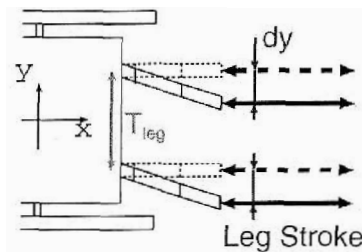


Fig. 13 脚先の y 方向目標位置の変更

従来の歩容では、Fig. 13 中の点線の軌道を通っていたのに対し、脚先の y 方向目標位置を変更したものは、実線の軌道となる。この変更を行ったときに、下側車輪の接地荷重がどうなるかを調べる。

変更量 $dy = 50, 100, 150$ [mm]の3種類として、高さ120[mm]の段差に斜めに進入した状態、つまりFig. 2と同様の状態の下側車輪の接地荷重を計算したものが、Fig. 14である。ここで、機体構造により、 dy のとりうる最大値が制限されることに注意が必要である。

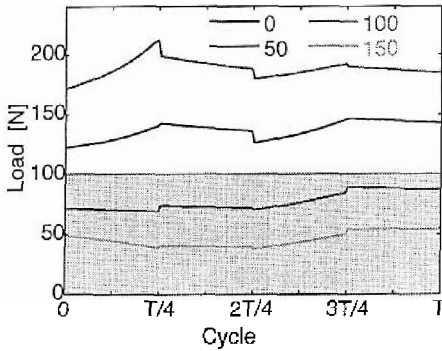


Fig. 14 下側車輪の接地荷重

Fig. 14 は、Fig. 12 と同様の計算をしたものである。上から、 $dy = 0$ つまり周期的コンプライアンス設定移動法と同じものから、 dy を50, 100, 150[mm]とするにつれ、下側車輪の接地荷重が減少する。結局、 dy を100[mm]とすれば、120[mm]の段差を踏破することが可能であると言える。

4. 踏破不能であることの判断

前章により、現在組み込まれている歩容では、120[mm]の段差を斜めに進入して踏破することは不可能なことが明らかになった。そして、段差へ斜めに進入した場合の対処法を示した。

よって、本研究では、現在組み込まれている歩容で段差に進入し、その段差を踏破不能であると判断すると、段差踏破のための歩容へ移り、その段差を登りきった後に、再びもとの歩容へ戻ることとする。

そこで本章では、踏破不能な状態であることを判断する手法について述べる。

4.1 判断法

段差にさしかかった後に、その段差が踏破不能であることを判断する方法について述べる。Fig. 15 は、120[mm]の登り段差に進入角 $\alpha = 45[\text{deg}]$ でFig. 2 のようにさしかかったときの左右の車輪

の移動距離であり、図中の(B)期間が、段差踏破不能となっている期間である。

右側の車輪が下側、つまり登れない方の車輪である。(B)期間では、下側の車輪の前進が止まってしまい、左右の車輪に速度差が生じていることがわかる。よって、その左右の速度差を利用して、段差踏破不能な状態であることを判断する。具体的には、一定時間の左右車輪の移動距離の差が、ある閾値を越えると踏破不能であると判断し、その時間は1/2周期、閾値は、目標速度でその時間に進むべき距離の10%、と実験的に決定した。

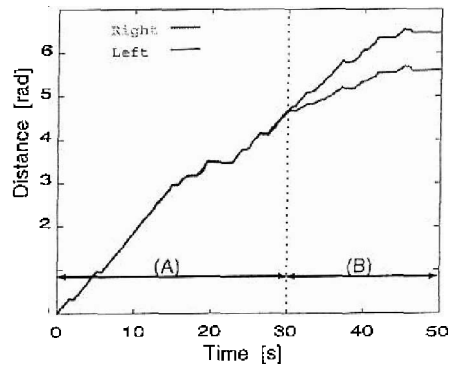


Fig. 15 段差踏破不能な状態での左右車輪の移動距離

4.2 判断アルゴリズムの検証

次に、事前に段差踏破中の左右車輪の移動距離のデータをとっておき、そのデータから段差踏破不能かどうかを判断するアルゴリズムの検証を行う。Table 2, 3にその結果を示す。

Table 2 $\alpha = 45[\text{deg}]$ のデータでの検証

	データ1	データ2	データ3
判断時間[s]	0.805	2.160	0.770
失敗回数	1回	0回	0回

Table 3 $\alpha = 60[\text{deg}]$ のデータでの検証

	データ1	データ2	データ3
判断時間[s]	2.280	1.505	1.640
失敗回数	0回	0回	0回

Table 2, 3は、それぞれ3回ずつの移動距離のデータをもとに判断アルゴリズムの検証を行っており、そのアルゴリズムは前述したようなものとなっている。判断時間とは、Fig. 15 での(B)期間に入ってから、それを判断するまでの時間を表す。一方、失敗回数とは、Fig. 15 での(A)期間に、誤って段差踏破不能な状態であることを判断してしまった場合の回数を表しており、各データともに(A)期間は約30[s]ほどである。

4.3 考察

Table 2, 3にある通り、判断する反応は良いものの、間違った判断をしてしまうことがある。よって、段差踏破のための歩容としては、少々の判断ミスがあっても問題のない歩容であることが望ましい。

前章で示した対処法は、周期的コンプライアンス設定移動法から脚先目標位置を変更しただけである。よって、平地において誤って段差が存在すると判断してもそのまま周期的な歩容を継続することが可能であり、融通が効く歩容であると言える。

5. おわりに

本研究では、上り段差へ斜めに進入した場合についての対処法として、脚先の y 方向目標位置を変更することを提案した。また、その提案した方法について、静力学的な計算において120[mm]の段差に対し、その有効性を示した。

今後は、実機にこの手法を適用し、その有効性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 馬場賢二, 牧野洋一, 金子俊一, 本多庸悟: 傾斜センサを用いた4脚歩行ロボットの歩行制御, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 563/564 (1992)
- 2) C.A.Klein, K.W.Olson and D.R.Pugh: Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicles over Irregular Terrain, The International Journal of Robotics Research, Vol.2, No.2, 3/17 (1983)
- 3) 米田完, 飯山浩幸, 広瀬茂男: 4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 ~その21 力情報を用いた歩容制御, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 575/578 (1992)
- 4) 中野栄二: 走行ロボットの走行制御装置, 特願平7-289966 (1995)
- 5) 中野, 木村, 野中: 脚車輪分離型ロボットの開発および車輪走行時の胴体揺動抑制, 日本機械学会論文集(C編), vol.58, no.551, 2138/2143(1992)
- 6) 木村, 中野, 野中: 脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作, 日本ロボット学会, Vol.10, No.4, 520/525 (1992)
- 7) Yu-Jie Dai, Eiji Nakano, Takayuki Takahashi, Hiroki Ookubo: Cooperational Motion of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment, Proceeding of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, Sep.27-29 (1995)
- 8) Y.Dai, E.Nakano, T.Takahashi, H.Ookubo: Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment, ICAR '95, vol.2, 911/916 (1995)
- 9) 中嶋 秀朗, 中野 栄二, 大久保 宏樹, 高橋 隆行: 脚車輪型移動ロボットの不整地適応性向上に関する研究, 日本機械学会[No.98-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会'98講演論文集 (1998)