

脚車輪型移動ロボットの階段踏破に関する研究

Passing Over Stairs by Leg-Wheel Mobile Robot

○清水直行, 高橋隆行, 王志東, 中野栄二

○Naoyuki Shimizu, Takayuki Takahashi, Zhi-Dong Wang, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 脚車輪移動ロボット(Leg-Wheel Mobile Robot), 階段(Stairs), 荷重配分(Load Distribution)

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) 清水直行, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: shimizu@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

山間部などの不整地における作業の機械化は古くから望まれているが, 作業現場では未だに多くの作業を人手に頼っている. その理由として, 現用のクローラ機構, もしくは車輪機構を有する作業機械の移動能力の不足が挙げられる.

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, 脚車輪型移動ロボット(Leg-Wheel Mobile Robot:LWMR)である^{1)~3)}(図1はその写真). LWMRは脚機構, 車輪機構を独立に有し, 脚機構を使用している状態でも車輪機構により機体を支持する事が可能であるために, 安定性, 不整地適応性が高く, エネルギー効率にも優れている. また, 制御面においては脚車輪パッシブ混合クローラ歩容(LWPCG), 脚のシフト動作制御^{4)~5)}と呼ばれる手法が開発され, 外界センサに依存しない未知の不整地の移動が可能となった.

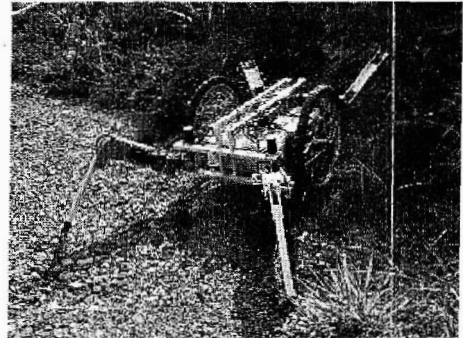


図1 LWMR実験機:ChariotIII

本研究の目的は, LWMR実用化に向けて階段状段差を踏破することである.

LWPCG, 脚のシフト動作制御により, 屋外不整地のある程度の凹凸は踏破が可能となった. 次なる目標としては大規模段差の連続である階段状段差の踏破が挙げられる. 本研究ではその第一段階として, 周期的な連続段差である階段について, 有効で信頼性の高い踏破アルゴリズムを構築する.

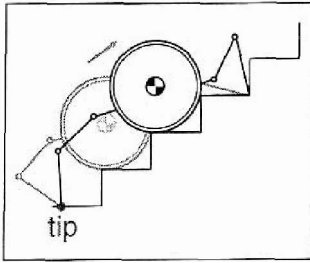


図2 本体移動動作

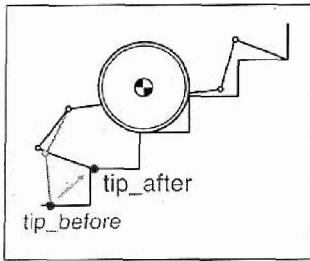


図3 腳踏み替え動作

中野・長坂ら(東北大学 1993)は、脚車輪移動ロボットの脚接地点、本体姿勢、関節への制御入力をオフラインで最適化を行って階段踏破を実現した⁶⁾。しかし、これは特定の階段を対象としたものであった。したがって、本研究ではまず、階段の奥行き、高さのパラメータを与えると安定な荷重配分をリアルタイムに計算しながら踏破する有効なアルゴリズムを作ることを目標とする。

2. 階段踏破の方法

まず、踏破動作を、車輪のついた胴体を1段上に移動する本体移動動作(図2)と、次の本体移動動作のために脚を1段上に踏み替える腳踏み替え動作(図3)とに分類し、1段ごとに両動作を行うこととする。

また、本研究のアプローチとしては、本体移動動

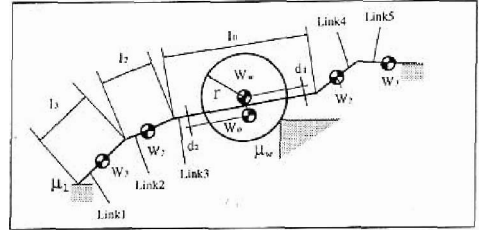


図4 対象ロボットの物理パラメータ

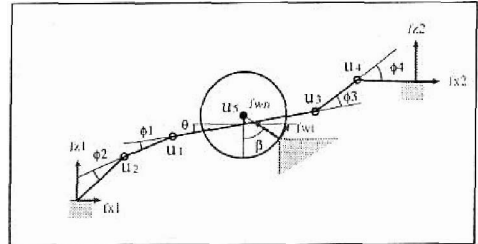


図5 関節角、関節トルク、接地反力および車輪接地角

作中の左右の脚は対称な動作をさせることとする。このようにすることで、ロール軸まわり、ヨー軸まわりのモーメントを発生することがなく、2次元モデルとして扱うことが可能となる。脚の接地点選択に関しては、本体移動動作中に脚の踏み変えを生じることは望ましくないため、脚のストロークが最も大きくなる点を選択する。

3. 一般的な段差踏破モデル

まずLWMRの一般的な段差踏破モデルについて、静的つりあいを保った状態を考える。ただし、各パラメータは図4、図5に示す通りである。

モデルとするLWMR実験機、ChariotIIIのパラメータは以下のようにになっている。

$$\text{リンク重量} : W_0 = 7[\text{kg}]$$

$$W_2 = 3.0[\text{kg}]$$

$$W_3 = 0.50[\text{kg}]$$

$$\begin{aligned}
W_w &= 5[\text{kg}] \\
(\text{総重量} : W_{all} &= 31[\text{kg}]) \\
\text{リンク長} : l_0 &= 0.85[\text{m}] \\
l_2 &= 0.30[\text{m}] \\
l_3 &= 0.35[\text{m}] \\
d_1 &= 0.05[\text{m}] \\
d_2 &= 0.05[\text{m}] \\
\text{車輪径} : 2r &= 0.50[\text{m}]
\end{aligned}$$

ここで、車輪径については、身近な階段パラメータの調査の結果、最も奥行き狭いものでも270[mm]であり、脚踏み変え動作は車輪が段差に乗るので、本体移動動作に比べると安定であると言える。また、ChariotIIIの脚、車輪と地面との静摩擦係数 μ_s 、 μ_w は、屋内での実測値0.6~0.7よりやや小さく見積り、それぞれ0.5として計算する。

水平方向、垂直方向、各リンクについてのつりあいの式は

$$\text{x軸} : f_{x1} - f_{wn} \sin \beta + f_{wt} \cos \beta + f_{x2} = 0 \quad (1)$$

$$\text{z軸} : f_{z1} + f_{wn} \cos \beta + f_{wt} \sin \beta + f_{z2} - (2W_3 + 2W_2 + W_0 + W_w)g = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Link 1} \quad & -u_2 + f_{z1} l_3 \cos(\theta + \phi_1 + \phi_2) \\ & -f_{x1} l_3 \sin(\theta + \phi_1 + \phi_2) \\ & -W_3 g \left(\frac{l_3}{2}\right) \cos(\theta + \phi_1 + \phi_2) = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Link 2} \quad & u_2 - u_1 + f_{z1} l_2 \cos(\theta + \phi_1) \\ & -f_{x1} l_2 \sin(\theta + \phi_1) \\ & -\left(W_3 + \frac{W_2}{2}\right) g l_2 \cos(\theta + \phi_1) = 0 \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Link 3} \quad & u_1 - u_3 - u_5 + (f_{x1} - f_{x2}) \frac{l_0}{2} \cos \theta \\ & + (-f_{x1} + f_{x2}) \frac{l_0}{2} \sin \theta \\ & -f_{wn} d_1 \sin(\beta - \theta) + f_{wt} d_1 \cos(\beta - \theta) \\ & + (W_0 g d_2 - W_w g d_1) \sin \theta = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Link 4} \quad & u_3 - u_4 - f_{z2} l_2 \cos(\theta + \phi_3) \\ & + f_{x2} l_2 \sin(\theta + \phi_3) \end{aligned}$$

$$+ (W_3 + \frac{W_2}{2}) g l_2 \cos(\theta + \phi_3) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Link 5} \quad & u_4 - f_{z2} l_3 \cos(\theta + \phi_3 - \phi_4) \\ & + f_{x2} l_3 \sin(\theta + \phi_3 - \phi_4) \\ & + W_3 g \left(\frac{l_3}{2}\right) \cos(\theta + \phi_3 - \phi_4) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{Wheel} : u_5 - f_{wt} r = 0$$

となる。以降、水平方向の力のつりあい式(1)、垂直方向の力のつりあい式(2)、式(3)~式(8)を加えて得られる、内力項の消えた式(機体の段差まわりのモーメントの式)の3つを機体のつりあい条件式と呼ぶことにする。

また、各接地点の力の条件は

$$\text{後脚の静摩擦条件} \quad |f_{x1}| \leq \mu_l f_{z1} \quad (9)$$

$$\text{前脚の静摩擦条件} \quad |f_{x2}| \leq \mu_l f_{z2} \quad (10)$$

$$\text{車輪の静摩擦条件} \quad |f_{wt}| \leq \mu_w f_{wn} \quad (11)$$

$$f_{z1} \geq 0 \quad (12)$$

$$f_{z2} \geq 0 \quad (13)$$

$$f_{wn} \geq 0 \quad (14)$$

と表される。

式(1)と式(2)を車輪の荷重について解くと

$$f_{wt} = -(f_{x1} + f_{x2}) \cos \beta + \{W_{all} - (f_{z1} + f_{z2})\} \sin \beta \quad (15)$$

$$f_{wn} = (f_{x1} + f_{x2}) \sin \beta + \{W_{all} - (f_{z1} + f_{z2})\} \cos \beta \quad (16)$$

であるので、

$$f_x \equiv f_{x1} + f_{x2} \quad (17)$$

$$f_z \equiv f_{z1} + f_{z2} \quad (18)$$

とおくと、式(9)~式(14)を満たすような f_{x1} 、 f_{x2} 、 f_{z1} 、 f_{z2} 、 f_{wt} 、 f_{wn} は次の式を満たす。

$$|f_x| \leq \mu_l f_z \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & | -f_x \cos \beta + (W_{all} - f_z) \sin \beta | \\ & \leq \mu_w \{ f_x \sin \beta + (W_{all} - f_z) \cos \beta \} \quad (20) \end{aligned}$$

f_z [N]

図6 脚の垂直荷重 f_z と水平荷重 f_x の関係

これらを図示すると図6のようになる。

式(19)を描いたものが直線OP, 直線OQであり, 式(20)を描いたものが直線AS, 直線ATである。

ハッチングされたエリアのうち, 機体のつりあい条件式の残りの1つである段差回りのモーメントのつりあい式を満たし, かつ脚・車輪の静摩擦条件式(9)~(11)を満たすものが可能な荷重配分である。

4. 後脚と車輪のみによる踏破

4.1 階段踏破の可否の指標

階段踏破に際して, 前脚, 後脚, 車輪のすべてを用いることで, 脚の各関節のトルクの負担を減少させたり, エネルギー効率を上げることが可能であることが判明しており, 現在その手法について検討中であるが, パラメータの数が多く, それらを決定する指標を見出せていない。したがって, ここでは前脚の接地反力を0とした踏破, すなわち, 後脚と車輪のみによる踏破を考える。このようにすることで, 図6に機体の段差まわりのモーメントのつりあいの直線が陽に現れる(図7)。

前述したとおり, ハッチングされたエリアとモーメントのつりあい式が交われば, 必要な条件を全

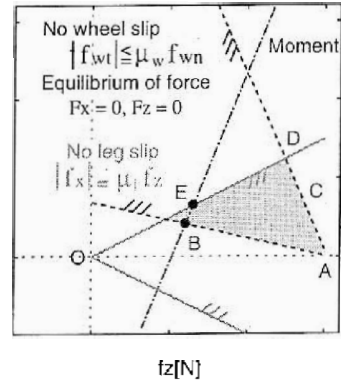


図7 脚の垂直荷重 f_z と水平荷重 f_x の関係

て満たす荷重配分の解が存在するということがあり, 踏破が可能ということになる。これを言い換えると次のようになる。後脚の水平方向の荷重 f_x と垂直方向の荷重 f_z との間に

$$\mu \equiv f_x / f_z \quad (21)$$

で表される指標 μ を導入すると, 段差まわりのモーメントのつりあいの直線と, 車輪の摩擦限界の直線の交点である荷重配分点Bにおける μ の値が,

$$\mu \leq \mu_l \quad (22)$$

の関係を満たす範囲に存在すれば, 踏破が可能である。

4.2 1段踏破までの過程

高さ200[mm](車輪半径の80%), 歩行き270[mm]の階段を対象として1段踏破までの荷重グラフの変化の様子を図8~図11に示す。図8は登り始め, 図9, 図10は途中経過, 図11は登り終わりの荷重グラフである。これらのグラフより, 脚の負担すべき荷重は段差登り始めが最も大きく, 登るにしたがって小さくなっていくことがわかる。この傾向は階段パラメータを変更した場合にも変わらない。

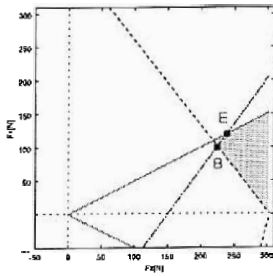
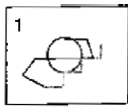


図8 $f_z - f_x$ の関係(1)

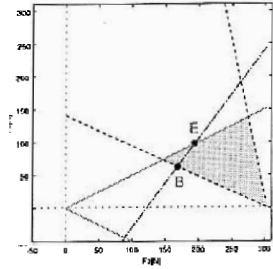
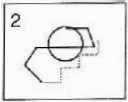


図9 $f_z - f_x$ の関係(2)

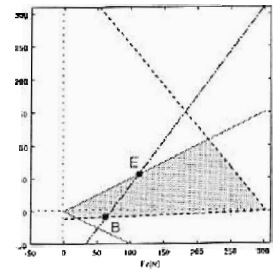
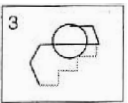


図10 $f_z - f_x$ の関係(3)

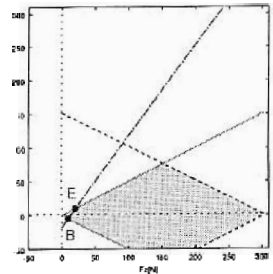
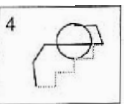


図11 $f_z - f_x$ の関係(4)

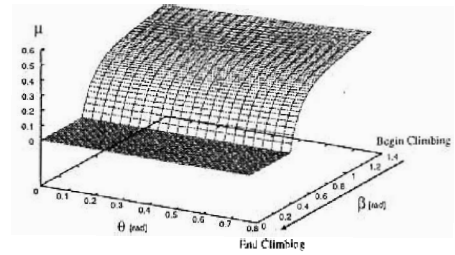


図12 ボディ姿勢 θ , 車輪接地角 β と μ の関係

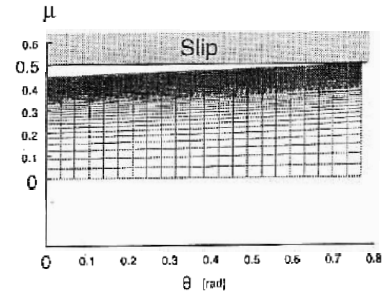


図13 ボディ姿勢 θ , (車輪接地角 β)と μ の関係

また、実際の荷重配分点として、脚が最も滑りにくい点、すなわち μ の絶対値が最小となる点を選択することにした場合の、1段階破までの履歴を調べたものを図12、同じグラフを視点を変えたものを図13に示す。図12において、横軸は機体姿勢 θ 、縦軸は脚の垂直方向の荷重に対する水平方向の荷重の比 μ 、奥行き方向は図5で定義されている車輪接地角 β である。したがって、踏破動作は β が最大値から0になるまでで表される。また、機体姿勢 θ については可動範囲内で自由に選択できるため、パラメータとして変化させて、それによる μ への影響を調べた。

図12では途中から μ の値が0となっているが、図10、図11からわかるように、脚が水平方向の力を出さなくてもよい荷重配分が存在するようになるため、その荷重配分点を選択されたことによる。

図12、図13より、脚の摩擦係数が静摩擦係数0.5

よりも小さい、すなわち脚の滑らない本体姿勢が存在し、対象とする階段は踏破可能であることがわかる。

5. おわりに

本研究では、階段踏破アルゴリズムの本体移動動作について力学モデルを考えた、最も簡単に扱える例である、後脚と車輪のみによる階段踏破の荷重分担の方法について述べ、階段踏破の不可不可の見極め方について述べた。

今後の予定としては、実機ChariotⅢにこの手法を適用し、その有効性を示すことを考えている。

参考文献

- 1) 中野栄二：走行ロボットの走行制御装置，特願平7-289966 (1995)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) E. Nakano, S. Nagasaka: Leg-Wheel Robot : A Futuristic Mobile Platform for Forestry Industry, Proceeding of IEEE International Workshop on Advanced Robotics, 109/112 (1993)