

# 脚車輪分離型移動ロボットの不整地移動能力向上 に関する研究～内界センサに基づく脚先反力の設定～

## A Way of Improvement of Mobility for a Leg-Wheel Robot on a Rough Terrain ～ Setting of the Reaction Forces at Its Leg-tips Based on the Internal Sensors ~

高橋 央, 庄司 道彦, 高橋 隆行, 中野 栄二

Hisashi Takahashi, Michihiko Shoji  
Takayuki Takahashi, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 脚車輪型移動ロボット(Leg-Wheel Mobile Robot), 不整地(rough terrain)  
脚先反力(reaction forces at leg-tips), 反力制御(force control), 斜面踏破性(mobility on a slope)

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) 高橋 央, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: hisashi@robotics.is.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 屋外作業の機械化が進み, 土木・建設分野では大小さまざまな作業機械が稼働し, 省力化に役立っている. しかし, 山間部における小規模な工事現場, あるいは林業分野などでは, その作業の多くを未だ人手に依存しているのが現状である.

山間部における機械化が進展しない主たる理由としては, 現用の作業機械で用いられる車輪機構・クローラ機構の移動能力の不足が挙げられる. しかし, このような不整地における作業の機械化は古くから望まれていることである.

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, 脚車輪分離型ロボット(Leg-Wheel

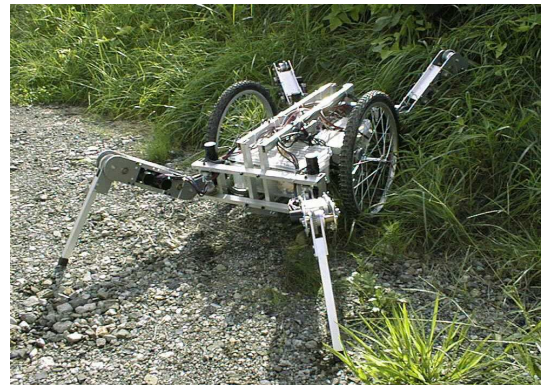


Fig. 1 Leg-Wheel Mobile Robot : Chariot III

Mobile Robot:LWMR)である<sup>1, 2)</sup>(Fig. 1). 脚車輪分離型ロボットは脚機構, 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

体を支持すること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、車輪機構との併用による安定性の向上により、脚機構の制御に要求される地形情報の精確性が緩和される。実際、脚機構および車輪機構にコンプライアンスを持たせることで地面の凹凸を吸収し、地形の事前センシングを必要とすることなく、未知屋外不整地の移動が可能であることが確認されている（脚車輪パッシブコンプライアンス移動方式<sup>3, 4, 5, 6</sup>）。

しかし、これは直進動作においてのみ実証がなされた基礎段階の研究であり、より実用的なものとするためには、何らかの平面移動歩容と組み合わせた上で、アルゴリズムの拡張と検証を進めていく必要があるとされていた。そこで、中野・熊谷らによって予測型イベントドリブン歩容が提案された。<sup>7)</sup> この歩容は平面移動歩容と高い追従性をもつ継続的な移動を可能とすることが、実機によって確認されている。

本研究では、この歩容を用いて移動を行う際の不整地適応性を向上させることを目的としている。ここでは、実際に斜面を含む不整地を移動させた際に生じた問題点に対する対処方法を示す。

## 2. 脚車輪分離型ロボットの機構

脚車輪分離型ロボットは、Fig. 2に示すように独立に制御可能な2つの車輪と3自由度の脚4つで構成されており、本体姿勢を計測するために傾斜角センサが取り付けられている。移動時にはこれら4つの脚がFig. 2に示すような4つの相の遷移を繰り返すことによって本体推進動作を行っている。以降、立脚相にある脚を支持脚、その他の相にある脚を遊脚と呼ぶことにする。なお、説明のため脚にはそれぞれ番号がふってあり、その脚番号を $i$ で表すこととする。また、Fig. 2のように脚の根本を原点とした座標系における脚先位置の

うち $z$ を脚先深さと呼ぶこととする。

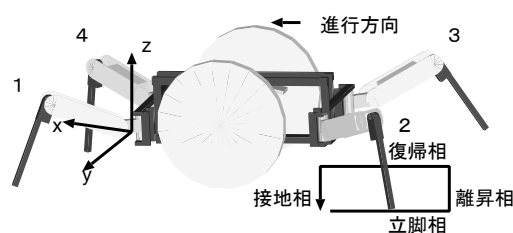


Fig. 2 脚車輪分離型ロボットの脚の動き

## 3. 斜面踏破時の問題点

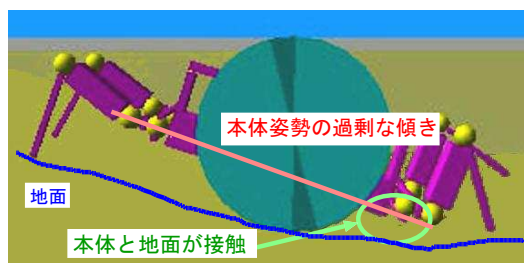


Fig. 3 斜面踏破時の問題点

脚車輪分離型ロボットに斜面を含む屋外不整地を移動させたところ、Fig. 3のように、斜面に対して本体が大きく傾いてしまったことにより、本体後部が地面に接触してしまい継続した移動が不可能となった。この原因は斜面に入ることにより増加した車輪トルクによる反モーメントが本体に加わるためであると考えられる。すなわち脚は各関節にコンプライアンスを持っているため、平地であれば反モーメントはコンプライアンスによって吸収されて大きな問題となることはないが、斜面に進入した場合にはその反モーメントが増大し吸収しきれなくなってしまったのである。そこで、本研究では本体姿勢が地面とほぼ平行を保つように制御することによって、移動が不可能となる上記の問題を回避し継続して移動を行えるようにする。

## 4. 目標脚先反力の設定

本研究では，脚先反力を変更することにより本体姿勢を保つことにする．そこで，最初に目標脚先反力決定までの流れをFig. 4に示す．

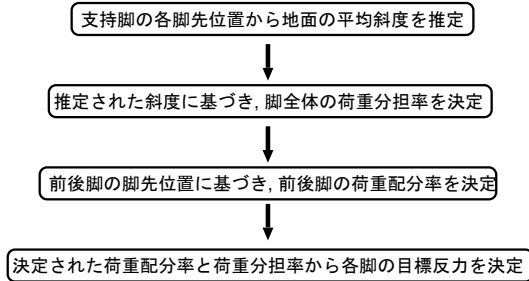


Fig. 4 目標脚先反力決定までの流れ

ここで，荷重分担率( $k$ )とは本体重量のうち脚全体で支える重量の比率を表し，荷重配分率( $\eta$ )とは脚で支える重量のうち前脚と後脚の比率を表している．このうち荷重配分率を変更することによって本体姿勢の制御を行うこととする．以下，Fig. 4の流れにそって説明していく．

### 4.1 斜度の推定と荷重分担率の決定

ここでは，車輪が必ず接地しているという仮定のもとに幾何学的関係から地面斜度の推定を行い，その斜度に基づき脚の荷重分担率を決定する．Fig. 5に示すように脚と車輪の接地点が作る平面の法線ベクトル $n_i$ が存在する．ここで，Fig. 5中の $xyz$ 座標系は $z$ 軸が重力方向， $x$ 軸が本体進行方向を表している．この $n_i$ から $yz$ 平面との角度 $\theta_i$ が求まるので，推定斜度 $\alpha$ は

$$\alpha = \left( \sum a_i \theta_i \right) / n \quad (i: \text{支持相にある脚番号}) \quad (1)$$

但し， $n, a_i$ はそれぞれ支持相にある脚数，重み係数である．

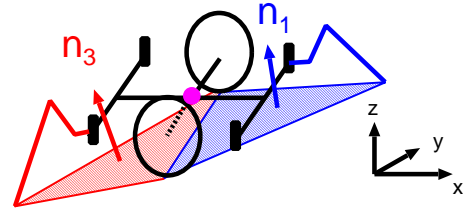


Fig. 5 地面斜度の推定

続いて，推定された斜度をもとに脚の荷重分担率を決定する手順を示す．Fig. 6に斜面移動時に2次元化した機体モデルに働く力を示す．

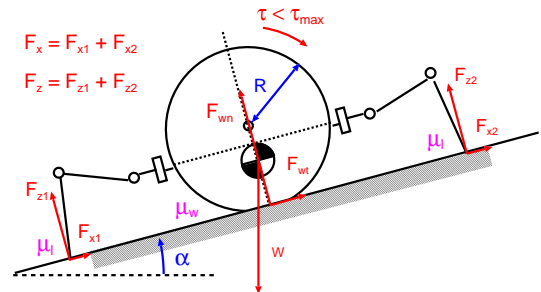


Fig. 6 斜面踏破時の機体モデル

ただし，各変数はそれぞれ以下のようになっている．

- $\mu_1, \mu_w$  : 脚，車輪の摩擦係数
- $R$  : 車輪半径
- $W$  : 機体重量
- $\tau_{\max}$  : 車輪の最大トルク
- $F_x$  : 脚による推進方向の力
- $F_z$  : 脚による斜面鉛直方向の力
- $\alpha$  : 斜度

このとき，機体に働く力と摩擦力の関係から次式が求まる．

$$F_x \leq \mu_1 F_z \quad (2)$$

$$F_x \geq \mu_w F_z + W(\sin \alpha - \mu_w \cos \alpha) \quad (3)$$

$$F_x \geq W \sin \alpha - \frac{\tau_{\max}}{R} \quad (4)$$

ここで，荷重分担率( $k$ )を用いて $F_z = kW$ とし， $\alpha = 12^\circ, \mu_w = \mu_1 = 0.4$ としたときの3式の間関係をFig. 7に示す．

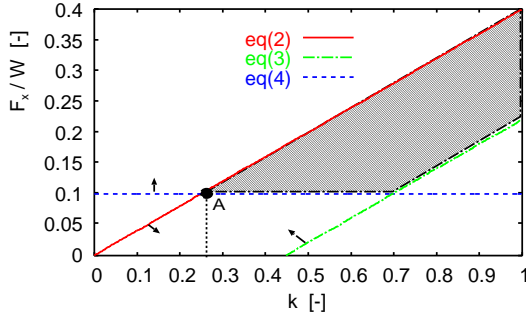


Fig. 7 荷重分担率の設定範囲

図中斜線部分が設定可能な力の範囲であり，荷重分担率が最も小さくなるのは点Aである．ここでは点Aにおける荷重分担率の値に0.1の余裕を持たせた値を目標荷重分担率として設定するものとする．なお，0.1という値は平地における荷重分担率をもとに決めた．こうして得られた斜度と荷重分担率の関係をFig. 8に示す．

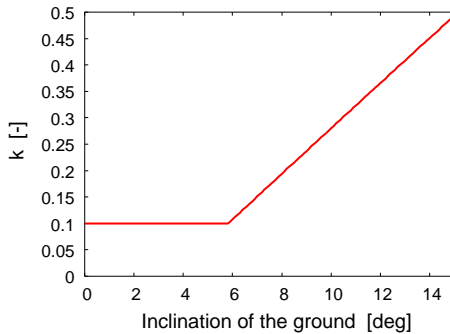


Fig. 8 斜度と荷重分担率の関係

#### 4.2 荷重配分率と目標脚先反力の設定

続いて荷重配分率の決定方法について述べる．基本的な考え方として，Fig. 9に示すように前後脚の脚先深さである $Z_f, Z_r$ が等しくなるように脚先反力の制御を行うことによって本体姿勢と地面を平行に近づかせるようにする．

つまり，前後脚の配分率を変更することでFig. 10に示すように本体にモーメント $M$ を生じさせ，本体姿勢角を制御する．

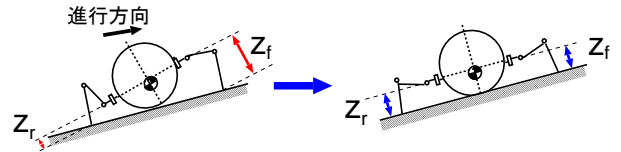


Fig. 9 対処方法

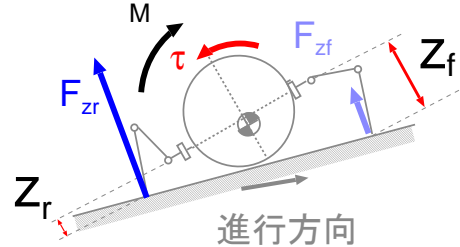


Fig. 10 対処方法

上記の脚先反力の設定法をブロック線図で表すとFig. 11 のようになる．

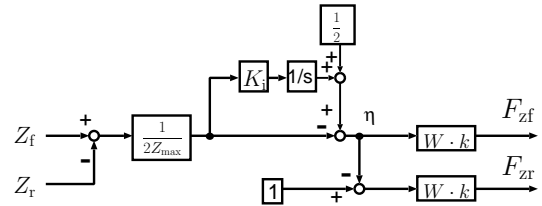


Fig. 11 目標脚先反力決定におけるブロック線図

このとき，前後脚の目標脚先反力 $F_{zf}, F_{zr}$ は次式で表される．

$$F_z(i) = \frac{\eta_{\{f,r\}} \cdot k \cdot W}{n_{\{f,r\}}} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (5)$$

$$\eta_r = -Z_{\text{diff}} + \left(\frac{1}{2} + K_i \int Z_{\text{diff}}\right) \quad (6)$$

$$Z_{\text{diff}} = \frac{Z_{\text{max}} - (Z_f - Z_r)}{2Z_{\text{max}}} \quad (7)$$

但し，

$Z_{\{f,r\}}$  : 前,後脚の脚先位置(z方向)

$Z_{\text{max}}$  :  $Z_f - Z_r$ の取り得る最大値

$k$  : 脚の荷重分担率

$W$  : 本体重量

$\eta_{\{f,r\}}$  : 前後脚の荷重配分率

$n_{\{f,r\}}$  : 前後脚の支持脚数

であり，脚番号 $i = 1, 4$ のときは添字f,  $i = 2, 3$ の

ときは添字<sub>r</sub>を用いることとなる．

## 5. 脚先反力の制御

脚先反力の制御方法だが，本研究では各関節の持つコンプライアンスから脚先反力を推定することで行う．

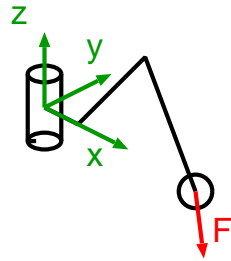


Fig. 12 脚の座標系と脚先反力

今，Fig. 12に示すよう脚の根本を原点とするような座標系を考える．このとき推定脚先反力 $F$ は

$$F = J^t^{-1} \tau \quad (8)$$

但し，

$$\tau = K_j d\theta \quad (9)$$

$$K_j = \begin{pmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{pmatrix} \quad (10)$$

であり，

$\tau$  : 各関節のトルク

$K_j$  : 関節剛性行列

$J$  : ヤコビ行列

$d\theta$  : 各関節の目標値との誤差

となっている．制御したい力の方向は $z$ 方向であるため， $xy$ 方向への非干渉化を行う．目標脚先反力を $F_{zref}$ とし推定値との偏差を $dF_z = F_{zref} - F_z$ とする．また， $xyz$ 座標系で考えると脚先位置の偏差と脚先反力の間には次の関係がある．

$$F = K_c dx \quad (K_c = J^t^{-1} K_j J^{-1}) \quad (11)$$

この式を要素で書き直すと，

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ dF_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

$dF_z$ に対して $dx = dy = 0$ となるような $F_x', F_y'$ を算出し，

$$dF = \begin{pmatrix} F_x' \\ F_y' \\ dF_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

とおくと，各関節に付加するオフセット角は

$$\theta_{offset} = K_j J^t dF \quad (14)$$

となる．このときのブロック線図をFig. 13に示す．

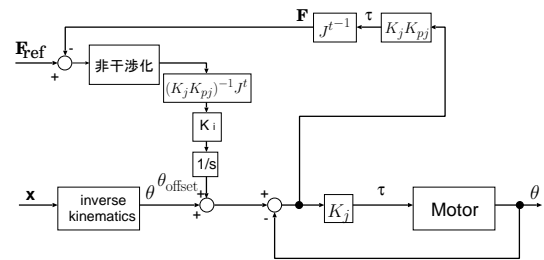


Fig. 13 脚先反力制御のブロック線図

## 6. 実験結果

上で提案した手法の有効性を確認するため，平均斜度が10[deg]程の屋外不整地において実験を行った．このときの各脚の脚先深さをFig. 14に示す．

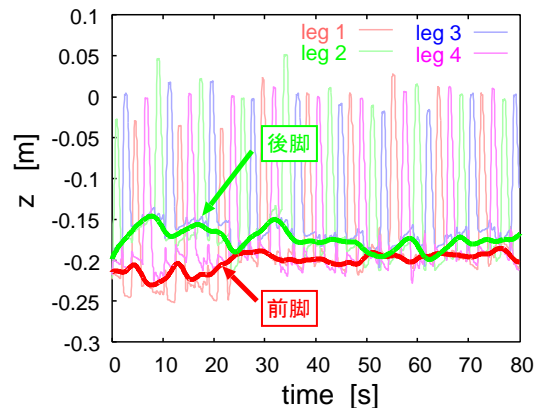


Fig. 14 実験結果(脚先位置)

このグラフからわかるように，前後の脚先深さがほぼ等しくなり本体が地面とほぼ平行になって移動を行っていることがわかる．また，このときの本体姿勢角と地面の推定斜度をFig. 15に示す．

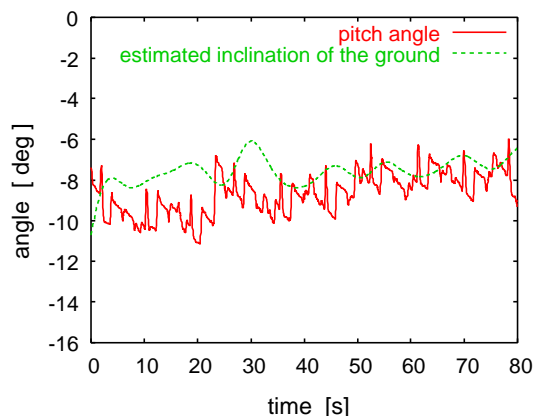


Fig. 15 脚先反力(本体姿勢角と地面の推定斜度)

このように，斜面において生じた本体姿勢の過剰な傾きによって継続した移動が不可能となる問題を回避し，本体姿勢角が地面の推定斜度に対してほぼ等しくなり本体と地面が平行を保ちながら移動を行うことが可能となった．

## 7. おわりに

本研究では，斜面を移動する際に問題となっていた車輪の反モーメントによる本体姿勢の過剰な傾きに対して，脚先反力を変更することによってその姿勢を地面と平行に保ちつつ移動ができるようにした．

今後はより多様な地形に対して適応性を高めていく予定である．

## 参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 中野栄二：走行ロボットの走行制御装置，特願平7-289966 (1995)
- 4) Yu-Jie Dai ,Eiji Nakano ,Takayuki Takahashi ,Hi-roki 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) 中嶋，中野，大久保，高橋，戴：脚車輪分離型ロボットによる不整地移動時の姿勢揺動抑制に関する一手法，第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.219-220，1996．
- 7) 熊谷，高橋，王，中野：予測型イベントドリブン歩容による脚車輪分離型ロボットの継続的推進動作日本ロボット学会，Vol.19，No.6，775/783 (2001)