

# 脚車輪分離型ロボットのクローラ歩容における 脚先コンプライアンス設定法

中嶋 秀朗\* 中野 栄二\* 高橋 隆行\*

## The Set Up Method of Legs' Compliance for Crawl Gait of a Leg-wheel Robot

Shuro Nakajima\*, Eiji Nakano\* and Takayuki Takahashi\*

A leg-wheel robot, Chariot II, has been developed for the purpose of moving on an unknown unexplored rough terrain without using many sensors such as visual and tactile/force sensors that need accurate and complex control and heavy calculations. The robot equips with mechanically separated wheels and legs, which allows to utilize the advantages of two mechanisms. This paper presents a set up method for legs' compliance of the leg-wheel robot to decrease the pitching and rolling movement of its body when moving on unknown unexplored rough terrains. Using the proposed method, the leg's basic compliance is adjusted in proportion to the roughness of the surface when a phase of leg changes from returning phase to supporting phase. The effectiveness of this method is confirmed by simulation and experiments.

**Key Words:** Leg-wheel Robot, Compliance Set Up, Reduction of Pitching and Rolling, Rough Terrain

### 1. はじめに

近年では屋外作業の機械化が進み、例えば土木・建設分野では、大小様々な作業機械が稼働することで、省力化に役立っている。しかし、機械化の広がりは大規模工事現場に限られ、山間部における小規模な工事現場、林業分野などでは多くを人手に依存しているのが現状である。

その主たる理由は、作業機械の移動能力の不足にあると考えられる。現用の移動機構は、車輪機構、クローラ機構が中心である。車輪機構は低コストで、整地における移動効率が高いが、一般にグリップ力・段差踏破能力は低い。クローラ機構は車輪機構に比べれば高い不整地適応性を有し、屋外作業機械としての豊富な実績があるものの、やはりその適用範囲は、連続的に接地点を確保できるような地勢に限られている。

一方、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り、段差の踏破性に優れ、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。このため多くの研究者が、脚機構を備えたロボットによる不整地移動を可能にするべく、鋭意研究を進めている。

脚機構を備えた不整地移動ロボットの代表的なものとして、4脚、6脚および8脚ロボットがある。

特に4脚ロボットは以下のように、多方面から研究が行われている。広瀬らは、移動制御システムの階層構造を提案し、基

礎的制御概念を確立した[1]。佐野らは、3脚支持状態における幾何的矛盾を防ぐ目的で、そのうち1脚にコンプライアンス制御を用い、滑らかな歩行を実現した[2]。安達らは、各脚の力センサを用いて脚の切り替えタイミングを変え、ロボットの重心位置や歩行面の傾斜に対応できる適応歩容を実現した[3]。塚越らは、作業型移動機械を念頭に置き、歩行時の安定性を最大化する歩容を提案した[4]。福岡らは、リズム発生器であるCPGと、姿勢角によるCPG位相の調節、剛性と中立点可変の仮想バネ、ダンパ系という構成要素間の協調により、不整地に適応する動歩行を実現した[5]。

6脚ロボット[6]~[10]、8脚ロボット[11]については、常時静的安定となる脚配置を取り、また、各脚について力センサによる力制御を行うことで、不整地の移動が実現されている。

これに対して、筆者らが提案、開発した不整地移動プラットフォームが脚車輪分離型ロボットである[12]~[17]。脚車輪分離型ロボットは、Fig.1の写真のように、4脚と2車輪を独立した機構として有し、両者を協調しての不整地移動、車輪のみを

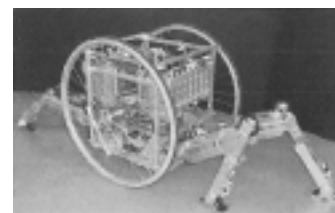


Fig.1 A leg-wheel robot: Chariot II

原稿受付 2003年12月3日

\*東北大学大学院情報科学研究科

\*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

使用しての整地移動を行う。なお、車輪は4車輪でも適用可能である。

脚車輪分離型ロボットで提案する運用形態は以下の通りである。屋外作業現場まで向かう途中の舗装道路などの整備された路面を移動する際には、脚を持ち上げ車輪のみを用いる車輪モードで移動する[13]。舗装されていない路面や、段差のある路面などに差し掛かった際には脚を下ろし、脚と車輪を協調させた脚車輪モード[14]~[17]で移動する。上記の車輪モードと脚車輪モードを併用することで、現在あるインフラを活用することができ、整備路面では高速に、未整備路面では確実に移動することができる。

脚と車輪を協調して、不整地移動を行う利点は大きく2点ある。一つ目は、脚機構と併用して車輪機構で荷重を分担することで脚機構の負担を軽減し、そのエネルギー効率を大きく改善できることである。二つ目は、適切な制御なしには機体を支持し得ない脚機構のほかに、車輪機構によって常に機体を支持しており、ハードウェア自体の安定性が高いことである。機構的な安定性の高さは、脚機構の制御に要求される地形情報の精密性の緩和につながる。外界センサによる環境認識に基づいた不整地移動の困難さを考えると、機構的に安定性を高くすることは、信頼性が重要となる実用化を意識した際に有効な手段であり、今まで外界センサを用いず移動できなかったような路面を、センサを用いず移動できることになる。

本報告では、脚車輪分離型ロボットの基本移動方式[14][15]における脚先コンプライアンスの設定方法について、特に不必要な脚先力の発生による姿勢変化を抑制する観点から述べる。

従来の脚式ロボット[3][7]~[11]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のに対して、本報告では、脚関節に設置された角度センサからの位置情報に基づくコンプライアンス制御を用いることで未知の不整地移動を実現する。また、佐野らは遊脚相と支持脚相が切り替わる脚にコンプライアンス制御を適用することで平面での滑らかな歩行を実現したのに対して、本報告では、各支持脚すべてに脚接地時の位置情報に基づくコンプライアンス制御を適用し、未知の不整地移動を実現する。

提案する脚先コンプライアンス設定法により、例え脚先力や外界環境の正確な情報を用いなくとも、実用に十分な程度に機体の姿勢揺動を抑制できることをシミュレーションおよび実験により検証する。

## 2. 脚車輪ロボット (Chariot II)

### 2.1 Chariot II の機構と動力学

脚車輪分離型ロボット Chariot II の概要を Fig. 2 に示す。胴体の左右に大きな車輪を平行に配置し、前後に3自由度の脚を4本持っている。

Chariot II の運動方程式を次の仮定の下で導く。

- 各リンクの重心はリンクの幾何中心にあり、その慣性テンソルは均質分布にしたがって計算できる。

なお、各リンクにおける慣性座標系  $C_i$  はリンクの重心を原点とし、リンクフレーム  $i$  と同じ姿勢のフレームである。

並進運動に関して、ニュートンの式から次式が導かれる。

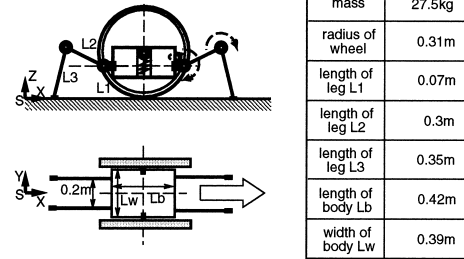


Fig. 2 Parameters of Chariot II

$$\mathbf{IF}_B + \sum_{i=1}^4 (\mathbf{IF}_i + \mathbf{f}_i) + \sum_{j=1}^2 (\mathbf{IF}_{w_j} + \mathbf{f}_{w_j}) + \mathbf{D}_F + \mathbf{w} + \mathbf{E}_F = \mathbf{0} \quad (1)$$

回転運動に関して、オイラーの式から次式が導かれる。

$$\mathbf{IT}_B + \sum_{i=1}^4 (\mathbf{IT}_i + \mathbf{t}_i) + \sum_{j=1}^2 (\mathbf{IT}_{w_j} + \mathbf{t}_{w_j}) + \mathbf{D}_T + \mathbf{E}_T = \mathbf{0} \quad (2)$$

ただし、

$\mathbf{IF}_B$   $\mathbf{IT}_B$ : 胴体の慣性力, 慣性トルク,

$\mathbf{IF}_i$   $\mathbf{IT}_i$ : 第  $i$  脚の慣性力, 慣性トルク,

$\mathbf{IF}_{w_j}$   $\mathbf{IT}_{w_j}$ : 第  $j$  車輪の慣性力, 慣性トルク,

$\mathbf{f}_i$   $\mathbf{t}_i$ : 第  $i$  脚先に作用する反力, その反力により胴体質量中心に作用するトルク,

$\mathbf{f}_{w_j}$   $\mathbf{t}_{w_j}$ : 第  $j$  車輪の接地点に作用する反力, その反力により胴体質量中心に作用するトルク,

$\mathbf{w}$ : ロボットの質量,

$\mathbf{D}_F$   $\mathbf{D}_T$ : 並進および回転運動に関する粘性項,

$\mathbf{E}_F$   $\mathbf{E}_T$ : 並進および回転運動に関する摩擦項.

いま、 $\mathbf{v}_B$   $\mathbf{v}_i$   $\mathbf{v}_{w_j}$  を慣性系であるベース座標系  $\sum S-XYZ$  に関する胴体, 第  $i$  脚および第  $j$  車輪の質量中心の並進速度ベクトルとし、 $\boldsymbol{\omega}_B$   $\boldsymbol{\omega}_i$   $\boldsymbol{\omega}_{w_j}$  をベース座標系  $\sum S-XYZ$  に関する胴体, 第  $i$  脚および第  $j$  車輪の角速度ベクトルとすると、式(1)と(2)の各部分は次のようになる。

$$\mathbf{IF}_B = -M_B \dot{\mathbf{v}}_B \quad (3)$$

$$\mathbf{IF}_i = -M_i \dot{\mathbf{v}}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{IF}_{w_j} = -M_{w_j} \dot{\mathbf{v}}_{w_j} \quad (5)$$

$$\mathbf{w} = \left( M_B + \sum_{i=1}^4 M_i + \sum_{j=1}^2 M_{w_j} \right) \mathbf{g} \quad (6)$$

$$\mathbf{IT}_B = -\mathbf{I}_B \dot{\boldsymbol{\omega}}_B - \boldsymbol{\omega}_B \times (\mathbf{I}_B \cdot \boldsymbol{\omega}_B) \quad (7)$$

$$\mathbf{IT}_i = -\mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i - \boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i) \quad (8)$$

$$\mathbf{IT}_{w_j} = -\mathbf{I}_{w_j} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{w_j} - \boldsymbol{\omega}_{w_j} \times (\mathbf{I}_{w_j} \cdot \boldsymbol{\omega}_{w_j}) \quad (9)$$

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{P}_{C_i}^B \times \mathbf{f}_i \quad (10)$$

$$\mathbf{t}_{w_j} = \mathbf{P}_{C_{w_j}}^B \times \mathbf{f}_{w_j} \quad (11)$$

ただし、

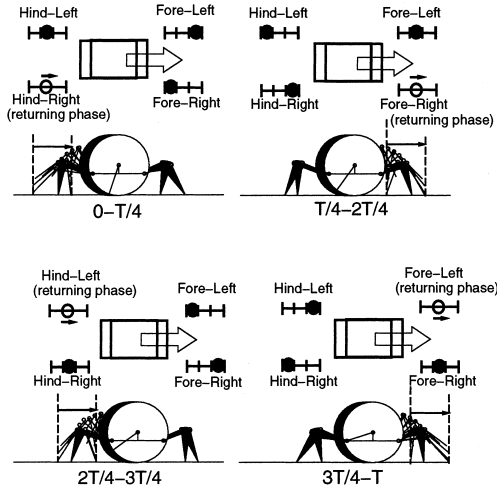


Fig. 3 Clawl gait

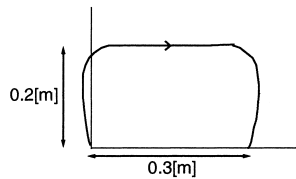


Fig. 4 Planning of a leg trajectory

$M_B, M_i, M_{wj}$  : 胴体, 第  $i$  脚および第  $j$  車輪の質量,  
 $g$  : 重力加速度ベクトル,

$I_B, I_i, I_{wj}$  : 胴体, 第  $i$  脚および第  $j$  車輪の質量中心回りの慣性テンソル,

$P_{Ci}^B, P_{Cwj}^B$  : 胴体座標系における第  $i$  脚および第  $j$  車輪の接地点の位置ベクトル.

## 2.2 Chariot II の基本移動方式 [14] [15]

起伏のさほど大きくない未知の不整地を移動する実用性の高い移動法として, 脚車輪分離型ロボットの脚と車輪を協調させた「脚車輪バッシュ混合クローラ歩容 (LWPCG) 移動法」が提案された. これは, ロボットの脚先と車輪サスペンションに一定のコンプライアンスを持たせ, 脚の歩容にデューティ比 0.75 のクローラ歩容 (Fig. 3) を行う移動法である. 脚先のコンプライアンスは, 3.1 節で述べるように関節サーボ剛性を調整することにより生成し, 車輪のコンプライアンスは胴体と車輪をつなぐバネ機構により生成する. LWPCG では脚先と車輪サスペンションにコンプライアンスを持たせてあるため, 多少の路面の起伏を感知する必要がない. そのため, 信頼性の高い外界センサを搭載する必要がなく, さらに, 脚先軌道を Fig. 4 のように一定に設定しているにもかかわらず, 未知の不整地を移動できる. なお, Fig. 4 の脚先軌道は胴体座標系から見たものであり, 絶対座標系では, 地面に対して脚が垂直に上下する.

LWPCG の特徴は, 従来ならば外界センサを用いて環境認識を行わないと移動できなかった不整地路面を, 外界センサを用いず, かつ複雑な計算を行わずに移動できることである.

## 3. 脚先コンプライアンス設定法

LWPCG では, 脚先と車輪サスペンションに一定のコンプライアンスを与え, さらに Fig. 4 に示すように脚先の目標軌道を一定としている. 脚先反力は目標位置と実際位置の偏差に比例して生じるため, 特に段差に脚が乗り上げる場合など位置偏差が大きくなると, 脚先に大きな力が発生し, 機体が傾くという問題がある. また整地移動の場合であっても, 脚先位置が重心に対して等分布ではないため, 脚先位置に応じた周期的な姿勢揺動が生じる.

そこで本論文では, 起伏のさほど大きくない未知の不整地を移動する場合に, 鉛直方向の脚先コンプライアンスを脚先位置に基づき調節することで, 安定した移動が可能になり, さらに胴体の姿勢揺動を小さくできる手法を提案する. なお本研究では, LWPCG で用いるクローラ歩容の直進歩行を対象にする. また, 多少の胴体姿勢の揺動は許容し, まったく揺動をなくすことは目指さない. これにより, 力センサなどの外界センサ情報にほとんど頼らなくてすむこと, また, 脚先目標軌道の変更を行う必要がなく, 移動中の演算量も少ないことなど, LWPCG の利点はほぼそのまま保たれる.

なお, 水平面方向の脚先コンプライアンスは主に推進力に関係しており, 機体揺動への寄与は小さいことから, 一定としている.

### 3.1 コンプライアンス制御方式

脚先にコンプライアンス特性を持たせるには, ハード的にバネ機構を持たせる方法と, ソフトウェアで脚先剛性を制御する方法がある. 本研究では, 能動的に制御できる後者を用い, 関節サーボ剛性を調節することで脚のコンプライアンスを制御する.

胴体座標系における  $i$  脚の脚先コンプライアンス行列を  $C_f^i$ , 関節空間における  $i$  脚の関節コンプライアンス行列を  $C_j^i$  とする. 脚のヤコビ行列を  $J$ , 剛性行列を  $K$  とすると, 次式の関係がある.

$$C_f^i = J C_j^i J^T \quad \text{or} \quad K_j^i = J^T K_f^i J \quad (12)$$

式 (12) を用いて, 関節コンプライアンスを調整することで, 胴体座標系における脚先コンプライアンスを生成する.

脚の関節角ベクトルを  $\theta$ , 目標関節トルクベクトルを  $\tau_d$  とすると, 脚の制御則は次式となる.

$$\tau_d = J^T K_f J (\theta_d - \theta) + K_v (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (13)$$

ただし, 下付記号  $d$ : 目標値,  $K_v$ : 速度ゲイン行列,  $G(\theta)$ : 重力補償項である.

上記の目標関節トルクベクトル  $\tau_d$  を実現するためには, 高性能な力/トルク制御システムを導入するのが一般的である. 一方, 本報告では, モータのトルク定数および逆起電力定数を基に,  $\tau_d$  はオープンループで制御している. この理由は, 車輪の常時接地を前提とする脚車輪分離型ロボットでは, 脚の制御を過度に正確に行わずとも, 機構的安定性を最大限活用することで移動が実現できるからである. これにより, 力センサの外乱に対する影響の排除や処理負荷の低減を図っている.

### 3.2 基本脚先コンプライアンスの設定

整地を移動する際に、胴体の姿勢の傾きが0となる脚先コンプライアンスを基本脚先コンプライアンスとする。

まず、鉛直方向、ピッチ軸、ロール軸回りの力およびモーメントの釣り合いの式は以下ようになる ( $x, y, z$  軸方向は Fig. 2 参照). 車輪接地摩擦力と水平方向の脚先力がつり合うと仮定し、ヨー軸回りのモーメントは考えない。

$$\sum_{i=1}^4 F_{zi} + \sum_{i=1}^2 F_{zwi} - M_{all}g = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^4 F_{zi}X_i + \sum_{i=1}^2 F_{zwi}X_{wi} = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^4 F_{zi}Y_i + \sum_{i=1}^2 F_{zwi}Y_{wi} = 0 \quad (16)$$

ただし、

$F_{zi}, F_{zwi}$ : 脚  $i$ , 車輪  $i$  の接地点における  $z$  方向力,

$X_i, Y_i$ : 機体中心から脚  $i$  の接地点までの  $x$  方向,  $y$  方向の距離,

$Y_{wi}$ : 機体中心から車輪  $i$  の接地点までの  $y$  方向の距離,

$M_{all}$ : 機体質量,

$g$ : 重力加速度.

次に、移動中の脚の荷重分担率  $k$  を一定として次式を得る. 荷重分担率とは、支持脚全体と車輪全体の機体の荷重を担う分担比のことである。

$$\sum_{i=1}^4 F_{zi} : \sum_{i=1}^2 F_{zwi} = k : 1 - k \quad (17)$$

さらに、姿勢の傾きは0であり、両車輪サスペンションのコンプライアンスは同じであるため、次式が成立する。

$$F_{zw1} = F_{zw2} \quad (18)$$

以上の式 (14)~(18) を満たす力を脚先に発生するものが、基本脚先コンプライアンスである。このとき、支持脚の脚先力  $F_{zi}$  は  $F_{zi} \geq 0$  となる必要がある。本論文では、クローリング歩容による直進歩行を対象としているため、式 (14)~(18) を満たす脚先力  $F_{zi}$  は、必ず  $F_{zi} \geq 0$  となることを付録 A に示した。

式 (14)~(18) を満たす脚先力を Fig. 5 に示す。脚先力は、機体質量に対して正規化したものを表示している。また、遊脚相の際は脚先力は0であり、各脚の位相は Fig. 3 と一致する。また、脚の荷重分担率  $k$  は 0.54 とした。これは、路面と支持点との摩擦係数が 0.3 のときに、0.065 [m] の段差および傾斜角 15 度の斜面を滑りなしで移動できる値であり、詳細は文献 [14] に記述されている。

脚  $i$  のコンプライアンスは式 (14)~(18) で求めた脚先力  $F_{zi}$  と位置偏差  $\delta$  を用いて、式 (19) により求められる。本論文では、実験により  $\delta = 20$  [mm] と設定した。

$$C_i = \delta / F_{zi} \quad (19)$$

ただし、 $C_i$ : 脚  $i$  のコンプライアンス値,  $\delta$ : 脚先の目標位置

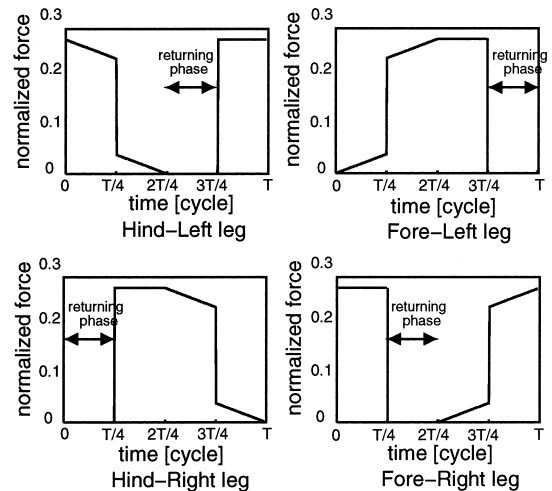


Fig. 5 Force of each leg along the  $z$ -axis

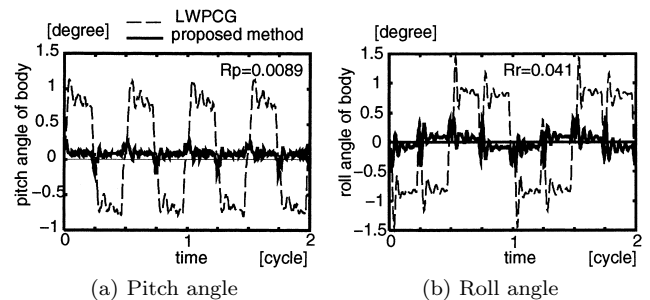


Fig. 6 A result of simulation in case of moving on a plane (a) Pitch angle of the body ( $R_p = 0.0089$ ), (b) Roll angle of the body ( $R_r = 0.041$ )

と実際位置の差,  $F_{zi}$ : 脚  $i$  の鉛直方向力である。

上で求めた基本脚先コンプライアンスを使用した場合の、整地移動時における姿勢角推移のシミュレーションを Fig. 6 の実線で示す。一方、点線は、LWPCG の場合の姿勢角である。Fig. 6 から分かるように、脚先コンプライアンスが一定である LWPCG のときに比べて、基本脚先コンプライアンスを使用する効果は明らかである。なお、以下の議論において LWPCG の場合には、各支持脚の剛性は 2,500 [N/m] で一定とする。また、車輪サスペンションの剛性は 3,100 [N/m] である。Fig. 6 中の  $R_p, R_r$  については後述する。

### 3.3 不整地移動時のコンプライアンス調整

脚が段差などにかかった場合、基本脚先コンプライアンスのままでは、目標脚先位置と実際の位置との偏差の増大により大きな力が発生し、機体が大きく傾く場合がある。

そこで、脚先位置偏差が大きくなったときには、基本脚先コンプライアンスの値を以下のように調整する。なお本論文では、演算量が少ないという LWPCG の利点の一つを最大限活かすために、外界に応じてリアルタイムにコンプライアンスの値を細かく制御することは考えない。さらに、ロボットのトータル信頼性を高めるため、偏差  $\delta$  の値は外界センサに頼らず、内界センサのエンコーダの値により計測する。

脚が段差に乗り上げたときに胴体姿勢の揺動を抑えるために

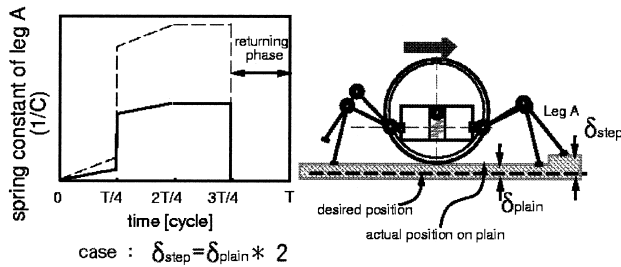


Fig. 7 Example of adjustment of the compliance value when the robot moves on a step

は、整地移動時に発生される力と同じ力が脚先に生じるようにすればよい。すなわち、整地移動時の基本脚先コンプライアンス、段差移動時のコンプライアンスをそれぞれ  $C_{\text{basic}}$ 、 $C_{\text{step}}$  とし、遊脚相から立脚相に遷移した時点での整地と段差における脚先位置偏差をそれぞれ  $\delta_{\text{basic}}$ 、 $\delta_{\text{step}}$  とすると (Fig. 7 右)、各脚が遊脚相から立脚相に変わるタイミングで、

$$C_{\text{step}} = C_{\text{basic}} \left( \frac{\delta_{\text{step}}}{\delta_{\text{basic}}} \right) \quad (20)$$

を満たすようにコンプライアンスを調整する。

例えば、Fig. 7 右のように脚 A が段差にかかり、偏差  $\delta$  が平地の 2 倍のときは、脚 A のコンプライアンスは、Fig. 7 左の実線に示すように、基本脚先コンプライアンスの 2 倍となる (ただし、Fig. 7 には見やすさのため、コンプライアンスの逆数である脚先ばね定数を表示したので、 $1/2$  となっている)。このとき脚 A の鉛直脚先力  $F_{z, \text{legA}}$  は整地移動時と同じになり、他の脚との力のつり合いには影響を及ぼさない。このため、脚 A が段差にかかることによる他の脚のコンプライアンス調整は行う必要はない。つまり、各脚は 1 サイクル中に、立脚相に切り換わる 1 回のみコンプライアンスを調節することで、不整地に対応するのである。

#### 4. シミュレーションおよび実験

本章では、整地路面および段差路面移動における胴体姿勢角の推移を、シミュレーションと実験により把握し、姿勢揺動抑制量を評価する。さらに、不規則凹凸路面 [18] に対して移動時の姿勢角推移をシミュレーションし、抑制量の評価を行う。

##### 4.1 機体揺動抑制評価指標の導入

初めに、機体揺動抑制量の程度を評価する指標として、ピッチ角について以下の評価指標を導入する。

$$\theta_{p, \text{ave}}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \theta_p(t) dt \quad (21)$$

$$Z_p = \frac{1}{n} \int_0^{nT} (\theta_p(t) - \theta_{p, \text{ave}}(t))^2 dt \quad (22)$$

ただし、 $\theta_p$ : 胴体ピッチ角、 $\theta_{p, \text{ave}}$ : 胴体ピッチ角の 1 周期に対する移動平均値、 $T$ : 1 周期に要する時間、 $n$ : 移動に要する周期数である。

$Z_p$  は胴体ピッチ角  $\theta_p$  と  $\theta_{p, \text{ave}}$  との偏差の 2 乗の 1 周期平均である。したがって、 $Z_p$  値が小さいほど 1 周期間の機体揺動が小さいことを意味する。この  $Z_p$  を、LWPCG と本論文で提

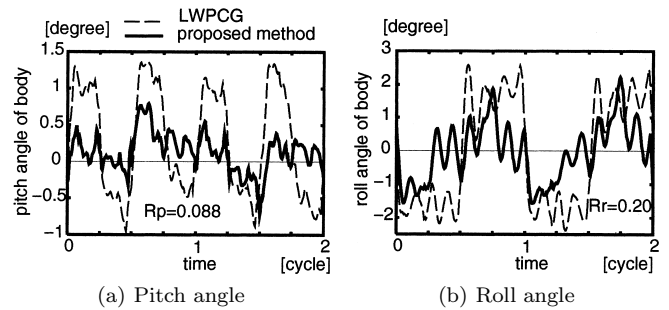


Fig. 8 A result of experiment in case of moving on a plane (a) Pitch angle of the body ( $R_p = 0.088$ ), (b) Roll angle of the body ( $R_r = 0.20$ )

案するコンプライアンス設定法による場合についておのおの計算したものを、 $Z_{pc}$ 、 $Z_{pp}$  とし、さらに、その比を式 (23) のように取り、これを胴体ピッチ角の機体揺動抑制評価指標  $R_p$  とする。よって  $R_p$  の値が 1 より小さい場合に揺動が抑制されたことになる。

$$R_p = Z_{pp}/Z_{pc} \quad (23)$$

ロール角も同様にして、揺動抑制評価指標を  $R_r$  とする。

##### 4.2 整地路面移動時の姿勢角推移

整地路面移動時の時間に対する胴体ピッチ角およびロール角推移について、シミュレーション結果と実験結果を、Fig. 6 と Fig. 8 に示す。実線は本論文で提案した脚先コンプライアンス設定法を用いた場合のデータであり、整地移動であるから基本脚先コンプライアンスが設定される。点線は LWPCG の場合のデータであり、各脚のコンプライアンスは一定である。

Fig. 6 より、LWPCG の一定のコンプライアンスを設定した場合に対して基本脚先コンプライアンスを設定した場合には、図中の評価指標の値からも機体の周期的な揺動が抑えられ、胴体姿勢角が 0 付近を推移していることが分かる。また、Fig. 8 より実機においても評価指標の値は小さく、姿勢揺動が抑制されていることが確認できる。

なお実験データは、シミュレーションデータと比較して抑制量が小さくなっているが、これは、シミュレーションでは遊脚の慣性と各関節部分の摩擦を考慮していないこと、さらに、実機におけるガタなどから生じている。

##### 4.3 段差路面移動時の姿勢角推移

次に、Fig. 10 (a) 上部に示す高さ 0.055 ~ 0 ~ 0.05 [m] の凹段差路面に対する移動を行った。Fig. 10 (a) 上部の路面は移動方向に対する路面高さであり、奥行き方向の路面高さは一定である。ロボットの機体中心を P 点から Q 点まで移動させた。実験の様子を Fig. 9 に示す。移動の際に要した時間は 7 周期であった。

Fig. 10 にはピッチ角推移のシミュレーション結果と実験結果を、Fig. 11 にはロール角推移の結果を示した。Fig. 10 (a) は、移動時の右前脚先コンプライアンスの推移を示したものである。ただし、見やすさのため図にはコンプライアンスの逆数であるばね定数を記載した。Fig. 10 (b) の a 点で前脚が凹路面に達し、b 点で前脚が凸路面に、そして、c 点で後脚が凸路面に達して



Fig. 9 Experimental scene

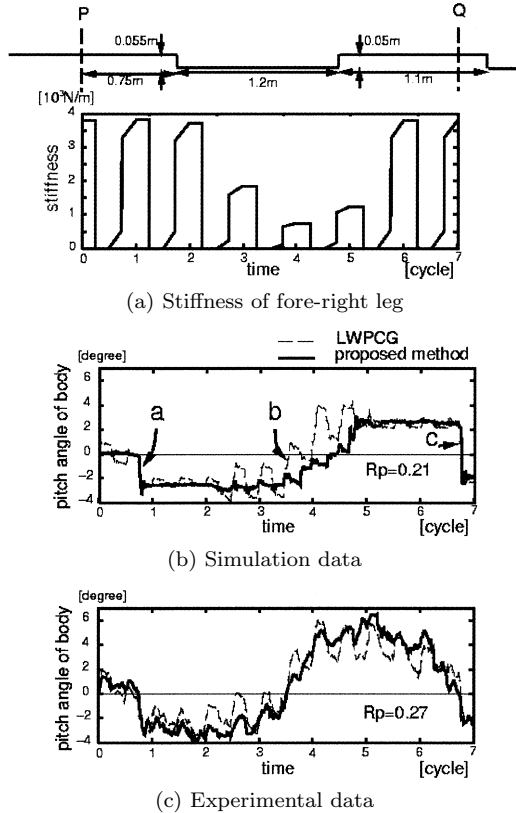


Fig. 10 A result of simulation and experiment when moving on a step (a) stiffness of fore-right leg, (b) simulation data of pitch angle of the body ( $R_p = 0.21$ ), (c) experimental data of pitch angle of the body ( $R_p = 0.27$ )

いる。Fig. 10 (a) の脚先ばね定数の推移を説明すると、3 周期目では機体が前傾し脚先の位置偏差  $\delta$  が大きくなったため、そして、4, 5 周期目では凸路面に達し偏差  $\delta$  が大きくなったために、ばね定数を小さく、すなわちコンプライアンスを大きくするように調整している。

Fig. 10, 11 および図中の評価指標の値から、本論文で提案した脚先コンプライアンス設定法を用いるとピッチ角、ロール角ともに胴体姿勢揺動を抑制できることが分かる。特に Fig. 11 から LWPCG では、3, 4 周期目付近で大きく胴体ロール姿勢が傾いている。この理由は、後脚が 0.055 [m]、前脚が 0.05 [m] の凸路面にあり、かつ、車輪は凹路面に接地しているために、脚が突っ張るからである。このとき、突っ張った側の車輪は浮き上がってしまった。車輪が浮き上がると、脚と車輪両方の支持による高安定性の前提が崩れてしまい、場合によっては姿勢制御のために精度の高い脚制御が必要となる。これに対して提案

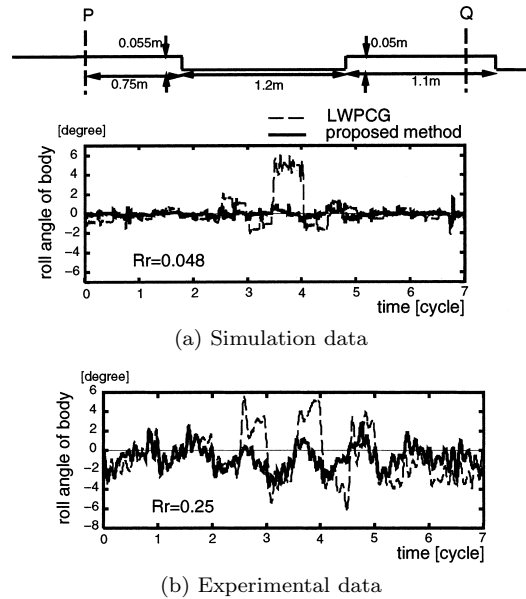


Fig. 11 A result of simulation and experiment when moving on a step (a) simulation data of roll angle of the body ( $R_p = 0.048$ ), (b) experimental data of roll angle of the body ( $R_p = 0.25$ )

した手法では、この急激な姿勢変化が抑制され、車輪も浮き上がることなく安定して機体が支持された。

また姿勢角の推移の様子から本手法は、機体の周期的揺動と脚先路面変化時の急激な姿勢角変化を抑制し、路面に沿った姿勢角変化のみ伴った移動を実現するという特徴があることが分かる。

なお、シミュレーション結果と実験結果の差異は、すでに述べた整地路面移動時と同様である。

#### 4.4 不規則凹凸路面移動時の姿勢角推移

Fig. 12 (a) に示す不規則凹凸路面 [18] に対する移動シミュレーションを行った。Fig. 12 (a) は移動方向に対する路面高さであり、奥行き方向の路面高さは一定である。Fig. 12 (b), (c) には、胴体ピッチ角およびロール角の推移を示す。

ロール角推移の 1~2 周期目で発生している大きな姿勢角の変化は、凹地形により脚先接地路面高さと車輪接地路面高さに差が生じ、脚が突っ張ることが原因である。

Fig. 12 から、本論文で提案する脚先コンプライアンス設定法を用いた場合は、概して地形に沿って姿勢角が変化しているだけであり、周期的揺動および、ロール角の 1~2 周期目で見られるような急激な姿勢角変化が抑制されていることが分かる。これは図中に示した評価指標の値からも確認できる。

以上から本論文で提案する手法は、不規則凹凸路面に対しても有効であることが分かった。

## 5. おわりに

本論文では、脚車輪分離型ロボットの基本移動方式である脚車輪パッシブ混合クローラ歩容移動法の利点を損なうことなく、その欠点を補うための脚先コンプライアンス設定法を提案した。すなわち、整地移動において胴体の傾きをなくす基本脚先コ

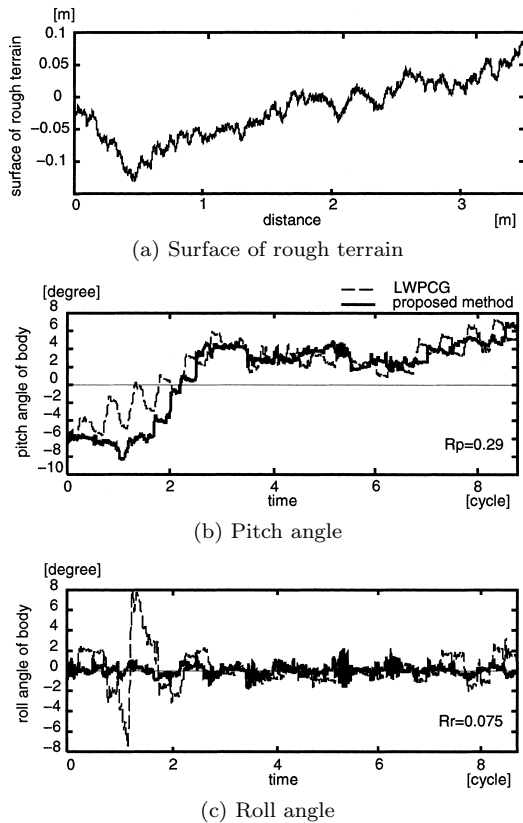


Fig. 12 A result of simulation when moving on an irregular rough terrain (a) surface of the rough terrain, (b) pitch angle of the body ( $R_p = 0.29$ ), (c) roll angle of the body ( $R_r = 0.075$ )

ンプライアンスを導出し、不整地移動時には、各脚が遊脚から立脚になる際に、基本脚先コンプライアンスを調節する手法である。

整地路面、段差路面、不規則凹凸路面移動に対する姿勢角推移データから、この非常にシンプルな設定法を用いることで、胴体の周期的揺動および、脚先接地路面高さと同輪接地路面高さの差から生じる急激な姿勢角変化を抑制し、主に路面に沿った姿勢角変位のみ伴った移動が実現できることを、シミュレーションと実験により検証した。

路面に沿った姿勢角変位を伴う移動は、自転車、自動車、鉄道など他の陸上輸送機械において通常に見られるものであり、十分に実用的な範囲である。

また、簡単な手法で胴体揺動が十分に抑制できたことは、脚と車輪を独立して装備した脚車輪分離型ロボット特有の有用性を示唆する結果となった。

ただし、提案した手法は、不整地全体としては水平面であることを前提としており、不整地全体が大きく傾斜している場合の姿勢角は、路面に平行にならずに重力方向に傾斜するという課題がある。また、クローリング歩容による直進歩行という前提のもとで議論を進めた。そのため今後の課題としては、不整地全体が傾斜している場合への本手法の拡張、全方位移動[16]への拡張、そして、デューティ比が0.5であるトロット、ペース歩容[17]への拡張などがあり、それらについては次報告で記述す

る予定である。

## 参考文献

- [1] 広瀬茂男, 福田靖, 菊池秀和: “4足歩行機械の制御システム”, 日本ロボット学会誌, vol.3, no.4, pp.304-323, 1985.
- [2] 佐野, 古荘, 橋口: “コンプライアンス制御機能を有する4足歩行システムに関する基礎的研究”, 日本機械学会論文集(C編), vol.57, no.539, pp.2297-2304, 1991.
- [3] 安達弘典, 小谷内範穂, 中村達也, 中野栄二: “脚に設置された力センサを用いた4足歩行ロボットの適応歩容”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.6, pp.707-717, 1991.
- [4] 塚越, 広瀬: “間歇クローリング歩容の提案とその生成原理”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.2, pp.301-309, 1999.
- [5] 福岡, 木村: “4足ロボットの生物規範型不整地適応歩行 神経-機械カップリング系構成法の提案とビッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.5, pp.569-580, 2003.
- [6] K.K. Hartikainen, A.J. Halme, H. Lehtinen and K.O. Koskinen: “MECANT I: A Six Legged Walking Machine for Research Purposes in Outdoor Environment,” Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Los Alamitos 1992, pp.157-163.
- [7] S.M. Song and K.J. Waldron: Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle. MIT Press, 1989.
- [8] 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, pp.4-23, 1990.
- [9] J.E. Bares and W.L. Whittaker: “Configuration of Autonomous Walkers for Extreme Terrain,” The International Journal of Robotics Research, vol.12, no.6, December, pp.535-559, 1993.
- [10] T. Hori, H. Kobayashi and K. Inagaki: “Force Control for Hexapod Walking Robot with Torque Observer,” IROS'94, pp.1294-1300, 1994.
- [11] J. Bares and D. Wettergreen: “Dante II: Technical Description, Results and Lessons Learned,” The International Journal of Robotics Research, vol.18, no.7, July, pp.621-649, 1999.
- [12] 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”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.4, pp.520-525, 1992.
- [13] 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, vol.58, no.551, pp.2138-2143, 1992.
- [14] Y. Dai, E. Nakano, T. Takahashi and H. Ookubo: “Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment,” ICAR'95, vol.2, pp.911-916, 1995.
- [15] E. Nakano, T. Takahashi, Z. Wang, Y. Dai and S. Nakajima: “A Simplified Cooperational Motion Control Method of a Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment,” Proceedings of The 4th World Multiconference on Systems, Cybernetics and Informatics, SCI'2000, vol.XI, pp.234-239, 2000.
- [16] 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”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.775-783, 2001.
- [17] 中嶋, 高橋, 中野: “予測型イベントドリブン方式による脚車輪分離型ロボットを用いたトロット歩容及びペース歩容の実現”, 第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.228-235, 2004.
- [18] 白井, 谷, 白井, 堀内: “不規則凹凸路面の二次元的統計的モデル化の一方法”, 日本機械学会論文集(C編), vol.56, no.526, pp.64-69, 1990.

## 付録 A. 脚先反力 $F_{zi} \geq 0$ の証明

式(14)~(18)を次の前提に基づき整理する。なお、以下の説明では、Fig. 13に示す胴体座標系を用いる。

前提 1: クローリング歩容を用いた直進歩行を対象とする。クロー

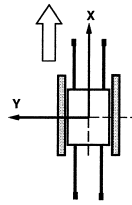


Fig. 13 Assignment of chariot II

ル歩容は支持脚数が3であり、各支持脚を脚1, 2, 3とする。

前提2: 脚車輪分離型ロボットの車輪接地点のX座標は  $X_{wi} = 0$  である。

前提3: 車輪接地点のY座標は  $Y_{w1} = -Y_{w2}$  である。

前提4: 各脚の可動範囲は、互いに衝突することを防ぐため、各1~4脚はそれぞれ胴体座標系の第1~第4象限内に設定される。

式(14)を式(17)を用いて整理すると、式(A.1)となる。

$$F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} = F_{Leg} \quad (A.1)$$

ここで、 $F_{Leg} = k \cdot M_{allg}$  である。

式(15)は、前提2の  $X_{wi} = 0$  より

$$F_{z1}X_1 + F_{z2}X_2 + F_{z3}X_3 = 0 \quad (A.2)$$

式(18)と前提3の  $Y_{w1} = -Y_{w2}$  を式(16)に代入して

$$F_{z1}Y_1 + F_{z2}Y_2 + F_{z3}Y_3 = 0 \quad (A.3)$$

式(A.1)~(A.3)を満たす  $F_{zi}$  が  $F_{zi} \geq 0$  である条件を求める。式(A.1)~(A.3)の連立方程式を解くと、式(A.4)となる。

$$\begin{cases} F_{z1} = (X_3Y_2 - X_2Y_3)F_{Leg}/A \\ F_{z2} = (X_1Y_3 - X_3Y_1)F_{Leg}/A \\ F_{z3} = (X_2Y_1 - X_1Y_2)F_{Leg}/A \end{cases} \quad (A.4)$$

ただし、 $A = X_1(-Y_2 + Y_3) + X_2(Y_1 - Y_3) + X_3(-Y_1 + Y_2)$  である。式(A.1)は全  $F_{zi}$  が負のときは成立しないため、 $F_{zi} \geq 0$  となる必要十分条件は  $F_{zi}$  の各分子が同符号となることである。以上から式(A.5)または式(A.6)が求める条件となる。

$$\begin{cases} X_3Y_2 \geq X_2Y_3 \\ X_1Y_3 \geq X_3Y_1 \\ X_2Y_1 \geq X_1Y_2 \end{cases} \quad (A.5)$$

$$\begin{cases} X_3Y_2 \leq X_2Y_3 \\ X_1Y_3 \leq X_3Y_1 \\ X_2Y_1 \leq X_1Y_2 \end{cases} \quad (A.6)$$

次に、前提1のクローリング歩行による直進歩行が式(A.5)または式(A.6)を満たしていることを証明する。以下のケースAとケースBを考えれば十分である。

ケース A

支持脚配置が Fig. 14 の場合を考える。Fig. 14 左図は右前脚が立脚相から遊脚相に遷移するときの脚配置であり、右図は右

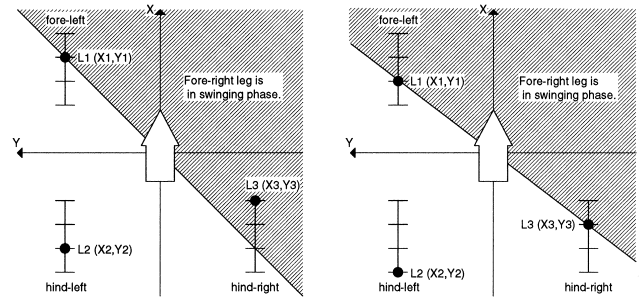


Fig. 14 Legs arrangement of case A

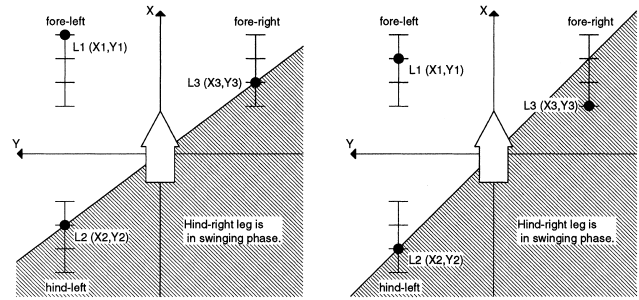


Fig. 15 Legs arrangement of case B

前脚が遊脚相から立脚相に遷移するときの脚配置である。このとき、前提4より次の2式が成立する。

$$\begin{cases} X_1 > 0, & Y_1 > 0 \\ X_2 < 0, & Y_2 > 0 \\ X_3 < 0, & Y_3 < 0 \end{cases} \quad (A.7)$$

$$Y_1/X_1 > 0, \quad Y_2/X_2 < 0, \quad Y_3/X_3 > 0 \quad (A.8)$$

式(A.7)を用いると、式(A.5),(A.6)は

$$\begin{cases} Y_2/X_2 \geq Y_3/X_3 \\ Y_1/X_1 \geq Y_3/X_3 \\ Y_1/X_1 \leq Y_2/X_2 \end{cases} \quad (A.9)$$

$$\begin{cases} Y_2/X_2 \leq Y_3/X_3 \\ Y_1/X_1 \leq Y_3/X_3 \\ Y_1/X_1 \geq Y_2/X_2 \end{cases} \quad (A.10)$$

となる。このうち、式(A.9)の  $Y_2/X_2 \geq Y_3/X_3$  と  $Y_1/X_1 \leq Y_2/X_2$  は式(A.8)より成立不可能である。また、式(A.10)は式(A.8)より、 $Y_2/X_2 \leq Y_3/X_3$  および  $Y_1/X_1 \geq Y_2/X_2$  は明らかであるので、最終的に式(A.11)となる。

$$Y_1/X_1 \leq Y_3/X_3 \quad (A.11)$$

Fig. 14 の斜線部分は左前脚  $(X_1, Y_1)$  を基準として右後脚  $(X_3, Y_3)$  が式(A.11)を満たす範囲を図示したものである。Fig. 14 より右後脚  $(X_3, Y_3)$  は斜線部分に存在しており、式(A.11)が成立していることが分かる。

ケース B

支持脚配置が Fig. 15 の場合を考える。左図は右後脚が立脚相から遊脚相に遷移するときの脚配置であり、右図は右後脚が遊脚相から立脚相に遷移するときの脚配置である。ケース A と



同様にして最終条件式

$$Y_2/X_2 \geq Y_3/X_3 \quad (\text{A.12})$$

が得られる。Fig. 15 の斜線部分は左後脚 ( $X_2, Y_2$ ) を基準として右前脚 ( $X_3, Y_3$ ) が式 (A.12) を満たす範囲である。右前脚 ( $X_3, Y_3$ ) はこの範囲に存在しており、式 (A.12) は成立する。他脚についても同様にして、各脚先の鉛直方向力  $F_{zi}$  は、

$F_{zi} \geq 0$  を満たすことが証明できる。

以上の証明から式 (A.5) または式 (A.6) は、要するに「支持脚が 3 脚のとき、すべての脚について、ある脚の接地点と機体重心を結ぶ線で分けられる二つの領域に対して、他の 2 脚の接地点が別々の領域（境界も可）にあること」であり、この条件を満たす歩容に対して本論文の手法は適用できる。



中嶋秀朗 (Shuro Nakajima)

1973 年 4 月 5 日生。1995 年東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻修士課程に飛び級入学。1997 年同修了。同年 4 月 JR 東日本に入社し、列車制御システムの開発などに従事。2003 年 4 月東北大学大学院情報科学研究科応用情報科学専攻博士課程に入学、現在に至る。不整地移動ロボットの研究に従事。  
(日本ロボット学会学生会員)



中野栄二 (Eiji Nakano)

1942 年 3 月 24 日生。1970 年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専門課程博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。1987 年東北大学工学部教授。1993 年東北大学大学院情報科学研究科教授。現在に至る。この間、1976 年から 1977 年米国スタンフォード大学人工知能研究所客員研究員。不整地移動ロボット、マルチロボット、メッセンジャロボット等の研究開発に従事。工学博士。  
(日本ロボット学会正会員)



高橋隆行 (Takayuki Takahashi)

1961 年 11 月 1 日生。1987 年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了、同年 4 月同大学工学部助手、同大学情報科学研究科講師を経て、2000 年より助教授、現在に至る。博士(工学)。非線形機械の制御、移動ロボットなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会の会員。  
(日本ロボット学会正会員)