

脚車輪分離型ロボットの未知不整地における基本移動制御手法

中嶋 秀朗* 中野 栄二* 高橋 隆行*

The Motion Control Method for a Leg-wheel Robot on Unexplored Rough Terrains

Shuro Nakajima*, Eiji Nakano* and Takayuki Takahashi*

A leg-wheel robot, which has mechanically separated four legs and two wheels, performs high mobility and stability on rough terrain. In this paper, we propose a basic control method for the leg-wheel robot moving on unexplored rough terrains. When moving on a rough terrain, the compliance values and the trajectories of legs are set up in proportion to the environment without using external sensors. And the step axis mechanism that we have developed realizes the stable rolling movement of the robot. The proposed method is evaluated by simulations and experiments. Using this method combined with the predictive event driven gaits, the leg-wheel robot can move on rough terrains in arbitrary directions.

Key Words: Leg-wheel Robot, Motion Control, Rough Terrain, Compliance, Step Axis Mechanism

1. はじめに

低精度な外界認識情報のみに基づいても未知不整地移動を可能とする、脚車輪分離型ロボットの移動制御手法について記述したものが本論文である。

現在、不整地路面を対象とした移動機構の中心は、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。ゆえに多くの研究者により、脚機構を備えたロボットを用いた不整地移動の研究が進められている。

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をとり、脚車輪分離型ロボットを研究開発している。

Fig.1 は、筆者らが不整地移動プラットフォームとして提案



Fig.1 The leg-wheel robot: Chariot III

開発した脚車輪分離型ロボット“Chariot III”である[1]。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。

脚と車輪の機構が分離独立していることにより、屋外作業を例にとると次の運用形態が可能となる。現場まで向かう途中の整備路面を移動する際には、車輪のみを用いる車輪モードで移動する[2]。未舗装路面や、段差などのある路面では、脚と車輪を協調させた脚車輪モードで移動する[3]~[6]。この際、任意の移動方向指示に対応する継続的な移動が可能である[8]~[10]。なお、車輪を通しての路面影響を排除したい場合などには、脚のみによる移動も可能である。

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でき、整備路面では高速に、未整備路面では確実に移動できる。

原稿受付 2004年1月19日

*東北大学大学院情報科学研究科

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

次に、脚車輪型ロボットの研究例をあげると、広瀬らによる文献 [12] や松本らによる文献 [13] がある。これらは車輪が脚先に複合されており、本研究で対象とする脚と車輪を分離独立して装備し、車輪が恒常的に接地している脚車輪分離型ロボットの制御手法とは、特に車輪も脚と同様、断続的に接地する点から異なる。また、大道ら [11] により、脚車輪分離型ロボットが提案されたが、そこでは移動対象路面が既知の場合の基礎的移動方式について述べられている。

それに対して本論文は、未知環境における脚車輪分離型ロボットの移動制御手法に関するものである。対象とする未知環境は、10 [cm] 程度までの障害物が不規則に存在する環境や斜面角度 15 度程度までの路面である。この未知環境を各関節の角度センサと胴体ピッチ、ロール用の姿勢角センサといった内界センサ情報のみを用いて移動する。この理由は、移動ロボットにおいて外界環境認識センサは必須であるとの認識は持ちながらも、できるだけ外界認識センサに頼らずに、または、得られる外界情報が低精度であっても移動できることが実用化への大きな糸口となる、との思想による。ここで、移動経路は人による操縦などで別に指令され、また、Fig. 2 に示す x, y 方向の移動制御は文献 [8] ~ [10] で示した予測型イベントドリブンによる歩容生成手法を用いることを前提とする。

以下、本論文を概説する。

2 章では、脚車輪分離型ロボットの不整地移動時の目標姿勢角の考え方について記述する。

3 章では、車輪機構の制御について述べ、4 章では、胴体ロール角を制御するための、段軸機構について記述する。段軸制御に関連して文献 [7] では、本体ロール角についてスカイフックダンパ理論を適用したアクティブサスペンションを提案している。本論文では、文献 [7] の報告を基に段軸機構を用いた胴体ロール角制御手法について述べる。

5, 6 章では、脚制御について論じる。

従来の多くの研究 [15] ~ [20] では姿勢制御や接地時の脚先力の観点から、脚先位置や力を適切に制御する方法が提案されてきた。一方で、佐野 [21] らは、4 足歩行機械の脚先に、コンプライアンス特性を設定して脚着地のショックを吸収する方法を検討した。また、米田 [22] らはスカイフックサスペンション制御を用いて 4 足歩行機械において移動時の胴体傾斜を抑制した。

本論文で記述する脚制御も、脚先にコンプライアンスを設定することが基本となるが、不整地環境や胴体傾斜角に応じた脚先コンプライアンス特性 (5 章)、および脚先目標位置 (6 章) の簡単な設定・調節手法が新しい内容である。提案する手法は脚車輪分離型ロボットで実現できる静的歩容一般 (クロール、トロット、ペースなど (車輪でも支持しているため、トロット、ペース歩容も静的歩容である)) に対して適用できる。そのうち 6.1 節では、関節角に備えられた角度センサを用いた接地検出手法を提案する。屋外での使用を前提とすると、脚先接地環境は汚泥路面や瓦礫路面など想像以上に劣悪となり、通常用いられているタッチセンサや力センサを脚先に用いると、実用化の際に耐環境性、信頼性向上のために膨大なコストを必要とするためである。

7 章では、3 ~ 6 章で提案した制御手法に対して、シミュレ

ーションを行いその効果を確認をする。8 章では一般的な不整地について本手法を適用し、その効果をシミュレーションと実験により検証する。

2. 脚車輪分離型ロボットの機構と不整地移動時における目標姿勢角の考え方

本論文で対象とする脚車輪分離型ロボットを Fig. 2 に示す。機体の左右に車輪を二つ配し、前後に 3 自由度の脚を 4 脚備える。各関節は Fig. 2 下図に示すように回転する。モータは、各脚に三つと左右車輪、そして、後述する段軸機構の合計 15 個である。機体座標系は図のように機体中心 (重心) にとる。

次に、不整地路面移動時の姿勢角の考え方を記述する。

まず胴体ピッチ角については、Fig. 3 上右側に示すように脚と車輪の支持点から導かれる仮想面 (6.3.1 項参照) に平行になるようにする。この理由は、前後脚の可動範囲を最大とするためである。例えば Fig. 3 上左側に示すように鉛直方向に垂直にピッチ角を設定した場合、前脚の物理的な可動範囲が減少し (図の場合、前脚第 2 節が胴体に干渉し、脚を上げられない)、不整地への対応力が著しく減少するからである。ここで、脚車輪分離型ロボットは一般的に、機体中心に車輪機構があるため通常の 4 脚ロボットに比べて縦長であり、また、機体重心が車輪中心付近となるため、前後方向の静的安定性は十分である。

胴体ロール角に関しては、Fig. 3 下右側に示すように目標角度を鉛直方向に垂直とする。この理由は、脚車輪分離型ロボットの構造上一般的に、縦に比べて相対的に横幅が短く、例えば Fig. 3 下左側のように仮想面の傾斜角に合わせた場合、ロール方向に関しては静的安定性の低下が無視できないためである。

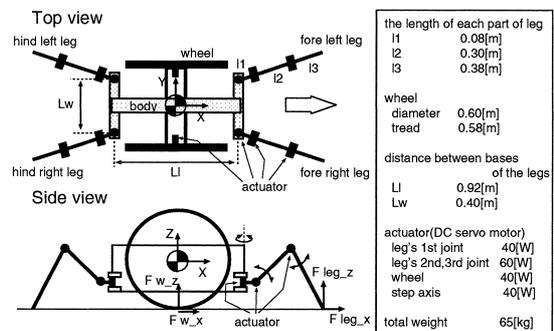


Fig. 2 Parameters of Chariot III

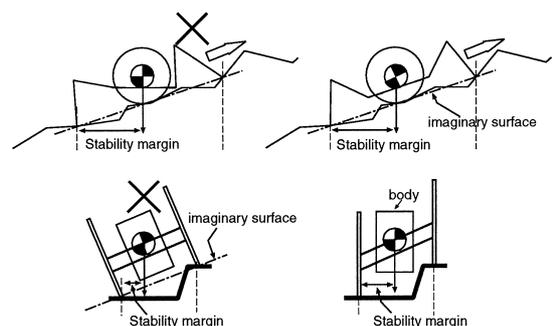


Fig. 3 Outline of the motion control

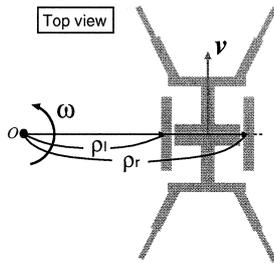


Fig. 4 Control of the wheel angles

以上をまとめると不整地移動時の胴体目標姿勢角は、ピッチ角は路面に平行とし、ロール角は重力に対して垂直とする。

3. 車輪機構とその制御

脚車輪分離型ロボットでは、ハード的な高安定性の実現と、脚のアクチュエータで支える機体荷重を減らすことによる省エネルギー性の実現のために、脚と車輪の両機構で機体を支持する移動手法を用いている。

Fig. 2 に示した車輪機構は、Fig. 5 のスライダ機構とバネにより、本体と連結されている。車輪機構が路面から受ける上下方向の振動は、このバネによるパッシブサスペンションにて吸収される。

脚と車輪で機体を支持する移動手法のため、車輪の回転制御は、脚と協調して行う必要がある。

Fig. 4 はある瞬間の運動をモデル化したものである。このモデルは機体旋回中心を O とした旋回角速度 ω の旋回動作を表しており、このときの左右車輪の回転角度 θ_l と θ_r は、車輪半径を r_w として次式となる。

$$\begin{aligned} \theta_l &= \rho_l \omega / r_w \quad (\text{left wheel}) \\ \theta_r &= \rho_r \omega / r_w \quad (\text{right wheel}) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)の目標回転角度に対して比例ゲイン K_w 、微分ゲイン D_w を用いた PD 制御を行っている。なお、車輪は真横に動くことができないため、脚車輪分離型ロボットの速度指示は、機体の直進速度と機体中心の回転角速度を与えている。

4. 段軸機構とその制御

胴体ロール角を制御する段軸機構 (Fig. 5) を導入する。これは、スライダ機構と車輪機構を回転軸で連結し、モータにより回転角を制御できる機構である。本機構の特徴は一つのモータで胴体ロール角を制御できることである。

段軸機構の制御については、スカイフックダンパ理論に基づく文献 [7] の手法を本機構に応用し、胴体目標ロール角 θ_{dr} を 0 とするため、次式のフィードバック制御を行う。

$$T_{\theta_r} = -K_r(\theta_r - \theta_{dr}) - D_r(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_{dr}) = -K_r\theta_r - D_r\dot{\theta}_r \quad (2)$$

ここで、 T_{θ_r} : 段軸機構モータのトルク、 θ_r : 胴体ロール角、 θ_{dr} : 胴体目標ロール角、 K_r 、 D_r : 角度ゲインおよび角速度ゲインである。

スカイフックダンパ理論とは、仮想的にダンパを介して車体

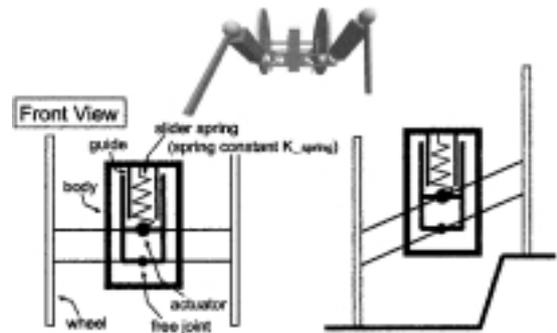


Fig. 5 Mechanism of the step axis

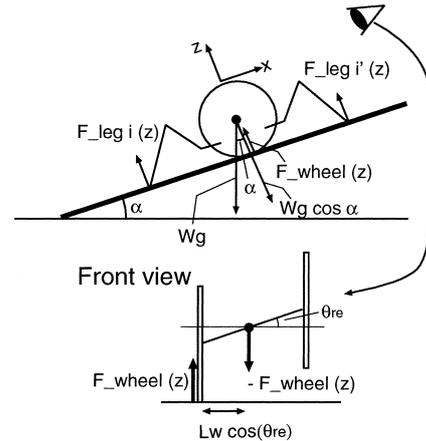


Fig. 6 Maximum torque of the step axis mechanism

を空から吊り下げ、路面と車体との間の振動伝達を減らそうという考え方である。

次に、段軸のトルクと脚先力が干渉して車輪が浮くことを避けるために、段軸にトルクリミットをかける。

許容最大トルクは、機体座標 z 方向の機体支持力のうち車輪負担分をすべて片輪で発生させるときに段軸モータにかかるトルクである。すなわち Fig. 6 に示すように、路面傾斜角が α 、段軸角度が θ_{re} 傾いているとき、段軸の最大許容トルク $T_{\max \theta_r}$ は次式となる。

$$T_{\max \theta_r} = (Wg \cos \alpha - F_{leg z}) \cdot Lw \cos \theta_{re} \quad (3)$$

ここで、 W : 機体質量、 g : 重力加速度、 α : 仮想斜度 (後述)、 $F_{leg z}$: 機体座標系における z 方向の脚全体の脚先力の合計である。

5. 脚先コンプライアンス設定法

脚車輪分離型ロボットは文献 [4] ~ [6] に示すように脚と車輪で安定した機体支持を行い、また、脚と車輪サスペンションにコンプライアンス特性を設定することで路面の高周波外乱を吸収し、不整地移動を実現している (以降、高周波外乱とは 1 周期で進んだ範囲の路面高さの平均値と路面高さとの差による凹凸であり、低周波外乱とは 1 周期で進んだ範囲の路面高さ平均値による凹凸とする)。さらに、文献 [5] では脚先コンプライアンスを調整する手法を提案し、胴体の周期的揺動および不整地

移動時の姿勢角変化を減少させている．上記内容は未知不整地への高適応性を示す結果となり一定の成果を得ることができたが、直進クローラ歩容を仮定しての検証であった．

上記結果を踏まえ、任意方向移動で、かつ支持脚 3 脚または 2 脚の場合の全歩容に対応できる、つまり、脚車輪分離型ロボットの実運用形態全般に適用可能な脚先 z 方向のコンプライアンス設定法を本章では記述する．ただし、脚車輪分離型ロボットの静的安定性が 0 となることを防止するため、前脚または後脚の両脚が同時に遊脚となる歩容は考えないこととする．また、脚先 x, y 方向のコンプライアンスは文献 [4] ~ [6] と同様、一定とする．

5.1 脚先 z 方向の基本コンプライアンス

脚先の基本コンプライアンスを求めるに当たって、重心に関する鉛直方向の力および、ピッチ、ロール軸回りのモーメントの釣り合いの式を以下に導出する．

$$\sum_{i=1}^n F_{leg\ z i} + \sum_{i=1}^2 F_{w\ z i} = Wg \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{leg\ z i} X_{leg\ i} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{leg\ z i} Y_{leg\ i} + T_{\theta_r} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $F_{leg\ z i}$ 、 $F_{w\ z i}$ ：脚 i 、車輪 i の接地点における z 方向力、 $X_{leg\ i}$ 、 $Y_{leg\ i}$ ：重心から脚 i 脚先までの x 方向、 y 方向の距離、 T_{θ_r} ：段軸機構で発生するモーメント（段軸モータは重心に設置）、 W ：機体質量、 g ：重力加速度、 n ：支持脚数である．

式 (5) で車輪の項がないのは、車軸中心と重心が一致しているからである．

次に、脚の荷重分担率を k 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．

$$\sum_{i=1}^n F_{leg\ z i} : \sum_{i=1}^2 F_{w\ z i} = k : 1 - k \quad (7)$$

式 (7) を式 (4) に代入すると、式 (4)~(6) から未知変数は $F_{leg\ z i}$ と T_{θ_r} の $n + 1$ 個で、式は三つとなる．詳細は省略するが、支持脚数 2 のときはすべての $F_{leg\ z i} > 0$ となる解が必ず存在することが容易に分かる．また、支持脚数 3 または 4 の際には冗長な方程式となるため、解に制限を設ける必要がある．文献 [5] では、不必要な力を発生しない観点から $T_{\theta_r} = 0$ とし、脚先力を求めていた．これは、脚のみによる支持多角形に、重心が入るように遊脚接地点領域を制限 [14] すれば成立するが、脚車輪分離型ロボットのように車輪と脚による支持多角形に重心が入ればよく、かつ全方位移動 [8] [10] を前提とすると、負の脚先力という物理的にあり得ない解が生じる場合がある．そこで本研究では、冗長な脚先力に関する解については、式 (8)、(9) のように前後脚について左右等配分するという条件を加えた．この理由は、任意方向移動に対する対応力を同程度とするために、左右脚の剛性を等しくするためである．

3 脚支持の場合：

$$F_{fl\ z} = F_{fr\ z} \quad or \quad F_{hl\ z} = F_{hr\ z} \quad (8)$$

4 脚支持の場合：

$$\begin{cases} F_{fl\ z} = F_{fr\ z} \\ F_{hl\ z} = F_{hr\ z} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、fl : fore-left leg, fr : fore-right leg, hl : hind-left leg, hr : hind-right leg である．

式 (4)~(9) を満たす脚先力を発生するコンプライアンスを次式で求め、これを脚先 z 方向の基本コンプライアンスとして設定する．

$$C_i = \Delta / F_{leg\ z i} \quad (10)$$

ここで、 C_i ：脚 i の z 方向の基本コンプライアンス、 Δ ：脚先の目標位置と実際位置の偏差の基本設定値（全脚一定）である．

なお、基本コンプライアンスを設定した脚先で生じるロール方向のモーメントについては、式 (6) により段軸トルクで相殺する．

5.2 脚のコンプライアンス調整

Fig. 7 に示すように段差を上る場合に、脚先の目標位置とコンプライアンスを整地移動時と同様に設定すると、上位置の脚先に余分な力が発生し胴体が大きく傾いてしまう．これを防ぐために、段差移動時には脚先目標位置もしくはコンプライアンスを適切に調節する必要がある．

例えば Fig. 7 左で脚先目標位置を調節する場合、余分な脚先力を発生しないためには、脚先が接地した後に脚先接地点から基本設定値 Δ だけ下げた目標位置を設定すればよい．ただしこの場合、脚車輪分離型ロボットは、機体が車輪を通じて常に接地しているがために、機体が段差を上ると Fig. 7 右側のように、 Δ では凹凸を吸収しきれずに最悪の場合脚先が浮いてしまう．Fig. 8 は、Fig. 14 の高さ 0.075 [m] の段差 (A) を、目標位置を上記のように調整し、ペース歩容させたときの左前脚の脚先位

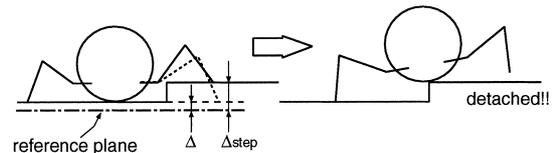


Fig. 7 Adjustment of the leg compliance

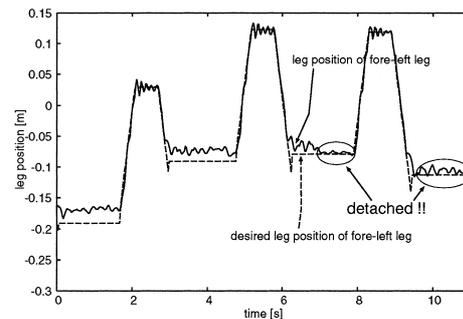


Fig. 8 The fore-left leg is detached when the robot goes up the step with the adjustment of desired leg position

置の推移である。このとき、図中 部分では目標位置と実際位置がほぼ同じとなり、つまり、脚先が浮いた状態になり、脚先力を発生することができず、段差を上げない。

そこで上り段差移動時でも、 z 方向の脚先目標位置は整地時と同じ基準平面（傾き 0 で機体を浮かした状態での車輪最下点を含む鉛直方向に垂直な平面）とし、余分な脚先力の発生を防ぐために、下式に従いコンプライアンスを調整する。

$$C_{\text{step } i} = C_i \left(\frac{\Delta_{\text{step } i}}{\Delta} \right) \quad (11)$$

ここで、 $C_{\text{step } i}$ ：脚 i の調整後の z 方向コンプライアンス、 C_i ：脚 i の z 方向基本コンプライアンス、 Δ ：脚先目標位置と実際位置の偏差の基本設定値、 $\Delta_{\text{step } i}$ ：脚 i が段差に接地したときの目標位置と実際位置の偏差（関節角度センサの値から順運動学で算出する）である。

すなわち、調節後の脚 i のコンプライアンス $C_{\text{step } i}$ は、基本コンプライアンス C_i を調整係数 ($\Delta_{\text{step } i} / \Delta$) 倍したものである。脚 i の調整係数を設定するタイミングは、脚 i が接地し支持相に切り換わるときとする。脚 i が次に接地するまでの期間は、一定の調整係数を用いて調節したコンプライアンスにより、路面の高周波外乱を吸収する。

なお下り段差の場合は、後述するように脚先目標位置は脚先接地位置に対して Δ だけ低い位置に設定するため、コンプライアンスの調整は必要ない。ただこのように設定した場合、機体が下るに伴い前脚の位置偏差が大きくなり、つまり、前脚の脚先力が大きくなって、不安定になることが心配されるが、本論文で対象としている不整地程度であれば、多少の姿勢角変化は生ずるが前後脚のコンプライアンスで分配吸収され、安定に移動できることを確認している (Fig. 15 上段 60 [s] および、中段、下段 20 [s] 付近の姿勢角変化が該当)。ただし、さらに大きな下り段差では、やはり不安定な状態となることがシミュレーション上で確認されており、その場合の制御手法については別の論文で記述する。

6. 脚軌道設定法

本章では、不整地を移動する際の脚車輪分離型ロボットの静的歩容一般に対する脚軌道設定法について述べる。

初めに、基本脚先軌道を機体座標系に対して Fig. 9 のように設定する。脚先軌道は、支持相、および遊脚である離昇相、移行相、接地相に分けることができ、次の特徴を持つ。

- 支持相と移行相では機体座標 z は一定で、また、離昇相と

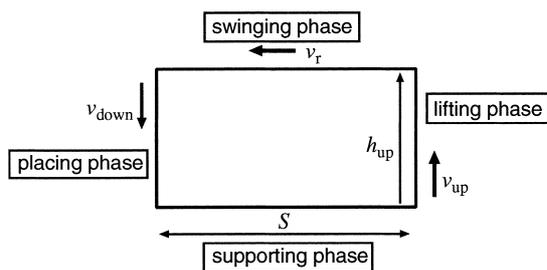


Fig. 9 Leg trajectory

接地相では x, y 座標が一定である。

- 離昇高さは、支持相から離昇相に移行する際の脚先高さから一定高さ h_{up} である。
- 接地相での脚下げ高さ h_{down} は、 δ_h を不整地パラメータ [9] として路面高さに応じて最大 $h_{\text{up}} + \delta_h$ まで可能である (図は $h_{\text{down}} = h_{\text{up}}$ の場合)。
- 支持相、移行相中の x, y 軌道は予測型イベントドリブン方式による歩容生成 [8] [10] による。

なお、絶対座標系に対して垂直に脚を上下させた場合 [14] でも以下の議論はそのまま適用できる。

6.1 接地検出方法

未知の不整地を移動する場合、脚がいつ接地するか分からないため、接地検出機能は必須である。通常用いる代表的なセンサとしては、タッチセンサや力センサがある。屋内環境など比較的使用環境がよい場合には、これらのセンサは正確にその機能を実現し使用実績も申し分がない。ただ、風雨汚泥などの劣悪環境での使用となると、脚先に設置するセンサに必要となる耐環境性、信頼性は大きくなり、その分コストとして跳ね返ってしまう。

そこで、本論文では各関節についている角度センサを用いた接地検出手法を導入し、必要最小限のセンサで未知不整地を移動するというコンセプト実現の手段とする。内界センサである角度センサを使う利点は、地面に直接触ることがないため、劣悪な環境下には置かれぬこと、そして、角度センサは関節を制御する以上必須のセンサであるため、接地検出のために新しいセンサを設置する必要がないことなどである。

一方で内界センサである角度センサを用いる場合の問題点としては、測定対象の直接センシングではなく間接センシングとなるため、路面表面状態により得られるデータ形状が異なり、結果として情報の信頼性が低くなることもある。

そこで、次の考え方にに基づき、単独では信頼性の低い加工情報を複数利用する接地検出手法を用いる。

- (1) 角度センサから得られる接地時の特徴的な 2 次加工情報を複数抽出する。
- (2) 抽出した各情報に対して、ある閾値を越えたら、当該加工情報は接地検出したものとする。
- (3) 複数の加工情報が接地検出したことで、脚の接地検出とする。具体的には本論文では、角度センサから得られる 2 次加工情報として次の四つを用いた。

C_{ave} ：脚先 z 方向の dt_m 時間に対する位置の移動平均値と実際位置との偏差 δ_{ave}

C_{pos} ：脚先 z 方向の目標位置と実際位置の偏差 δ_{pos}

C_{vel} ：脚先 z 方向の速度 v_p

C_{accel} ：脚先 z 方向の加速度 a_p

以下に、各情報が接地検出する流れを記述する。

C_{ave} に関しては、 δ_{ave} は脚先が接地し z 方向に動かなくなるに従い小さくなる。 δ_{ave} が検出閾値 D_{ave} 以下になる割合が、 dt_{ave} 時間中に P_{ave} 以上になると、 C_{ave} は接地検出とする。

C_{pos} に関しては、 δ_{pos} は脚先が接地すると時間とともに増加する。 δ_{pos} が検出閾値 D_{pos} を以上となる割合が、 dt_{pos} 時間中に P_{pos} 以上になると、 C_{pos} は接地検出する。

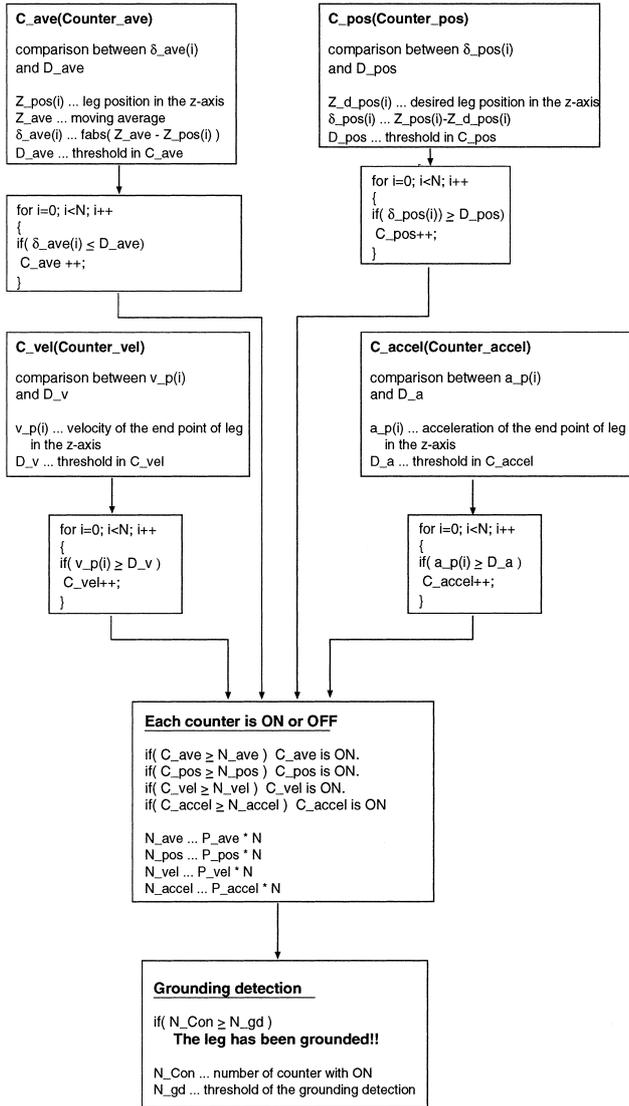


Fig. 10 Flow of the grounding detection

C_{vel} に関しては、 v_p は脚先が接地すると下降方向（負）に対して減速する。 v_p が検出閾値 D_{vel} 以上となる割合が、 dt_{vel} 時間中に P_{vel} 以上になると、 C_{vel} は接地検出とする。

C_{accel} に関しては、 a_p は脚先が接地した瞬間に上昇方向（正）に大きくなる。 a_p が検出閾値 D_{accel} 以上となる割合が、 dt_{accel} 時間中に P_{accel} 以上になると、 C_{accel} は接地検出する。

そして、本論文では上記四つのうち二つ以上が接地検出すると、脚が接地したものとした。上記流れを表したものが Fig. 10 である。

本論文では、脚下降速度 $v_{down} = -0.5$ [m/s] における各パラメータについて、実験的に求め、Table 1 の値を用いた。また、 $v_{down} = -0.5$ [m/s] で脚を下げ続けたときの、固い床面（上段）と、軟かいクッション面（下段）に対する各情報の検出割合の推移を Fig. 11 に示す。固い床面とは、質量が 3.2 [kg] で、直径 6.5×10^{-2} [m]（脚底の大きさと同程度）、高さ 1.2×10^{-1} [m] の鉄の円柱を置いて沈まない面であり、軟かいクッション面

Table 1 Parameters of the leg grounding detection

C_{ave} :	$dt_m = 0.24$ [s]	$dt_{ave} = 0.24$ [s]	$D_{ave} = 0.04$ [m]
	$P_{ave} = 0.5$		
C_{pos} :	$dt_{pos} = 0.24$ [s]	$D_{pos} = 0.03$ [m]	$P_{pos} = 0.5$
C_{vel} :	$dt_{vel} = 0.24$ [s]	$D_{vel} = -0.25$ [m/s]	$P_{vel} = 0.5$
C_{accel} :	$dt_{accel} = 0.24$ [s]	$D_{accel} = 4.0$ [m/s ²]	$P_{accle} = 0.25$

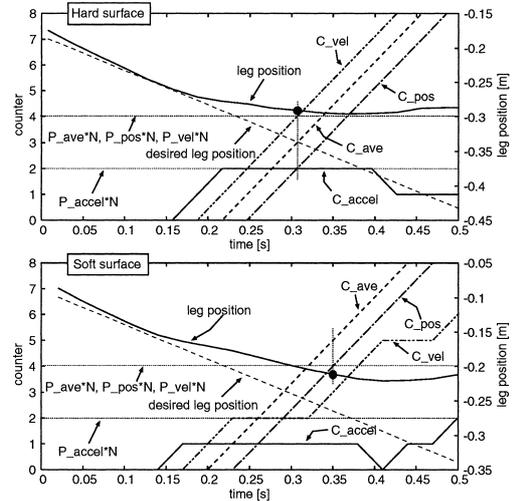


Fig. 11 Experimental data of the grounding detection

とは、 6.0×10^{-2} [m] 程度沈み込む面である。

Fig. 11 の C_{ave} , C_{pos} , C_{vel} , C_{accel} は、0.03 [s] ごとの過去 8 回分 (0.24 [s] 分) について、閾値を超過している回数をプロットしたものである。また、グラフの右下がりの実線は脚先位置、右下がりの点線は脚先目標位置であり、水平な点線は各情報が検出となる割合の閾値 (P_{ave} , P_{pos} , P_{vel} , P_{accel} に相当) である。

脚先位置グラフの●のときに、二つ以上の情報が接地検出し脚の接地検出に至る。固い路面では路面接触から 0.1 [s] 程度で、また、クッション路面ではほぼ沈み込んだ時点で接地検出した。

固い路面では、 C_{vel} と C_{accel} ($P_{accel} = 0.25$ に注意) で接地検出し、クッション路面では C_{ave} と C_{pos} で接地検出していることから、 C_{vel} と C_{accel} は急な脚先位置変化を伴う接地に対して、 C_{ave} と C_{pos} はなだらかな脚先位置変化を伴う接地に対して有効に機能することが分かる。この結果から、例えば C_{ave} と C_{pos} だけの場合は、固い路面での検出が遅れ、また、 C_{vel} と C_{accel} だけの場合は、軟かい路面での検出ができない場合があることが分かる。

6.2 接地検出後の z 方向脚先目標位置の設定

接地検出直後の z 方向の脚先目標位置と脚先位置の偏差 Δ' は、路面状況に依存してしまう。そのため、接地検出後に目標位置を適切な位置に設定し直す必要がある。基本的には接地検出直後の実際の脚先位置 Z_{leg} から基本設定値 Δ だけ下げた位置に目標位置を設定すれば、5 章で求めたコンプライアンスとなり、所望の脚先力となる。ただし、 Δ だけ下げた位置が基準平面より高い場合は、目標位置を基準平面に設定する (5.2 節参照)。上記をまとめたものが次式となる。

$$\begin{cases} Z_{d_{leg}} = Z_{leg} - \Delta & (\text{if } Z_{leg} - \Delta < Z_{ref}) \\ Z_{d_{leg}} = Z_{ref} & (\text{if } Z_{leg} - \Delta \geq Z_{ref}) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 Z_{dleg} : 支持相中の z 方向の脚先目標位置、 Z_{ref} : 機体座標系から見た基準平面高さ、 Δ : 脚先目標位置と実際位置の偏差の基本設定値である。

6.3 仮想斜度に基づく脚軌道調整

6.3.1 仮想斜度

2章で述べた仮想斜度の概念を導入する。鉛直方向に対する胴体姿勢角(ピッチ, ロール)が計測できる場合、Fig. 12に示す車輪接地点と前脚接地点を結ぶ仮想面進行方向の斜度 α_f は次式により近似できる。

$$\alpha_f = \frac{\sum_{i=1}^n \arctan(P_{R_{zi}}/P_{R_{xi}})}{n} \quad (13)$$

ここで、 $P_{R_{xi}}, P_{R_{zi}}$: 姿勢角(ピッチ, ロール)の傾きを0に補正したときの x, z 方向の前脚位置 ($P_R = Rot(\theta_r) \cdot Rot(\theta_p) \cdot P$)、 P : 機体座標系に置く脚先位置ベクトル、 Rot : 回転行列、 θ_p, θ_r : 胴体ピッチ角, ロール角、 n : 前側の支持脚数である。

同様に後脚に対する斜度を α_r とし、二つの平均値に対して1周期 (T) の移動平均を取ったものを仮想斜度 α_{img} (式(14))と呼ぶ。移動平均とする理由は、次の二つである。

- (1) 移動している路面付近の代表傾斜角とする。
- (2) 不連続な脚の接地点情報を連続な傾斜角に変換する。

$$\alpha_{img} = \frac{1}{T} \int_0^T (\alpha_f + \alpha_r)/2 \quad (14)$$

なお、本仮想斜度は平らな斜面の場合には斜面の傾斜角と一致する。

6.3.2 脚軌道調整

2章で述べたように脚車輪分離型ロボットは、前後脚の不整地対応力の最大化のために、胴体ピッチ角度を仮想斜度に合

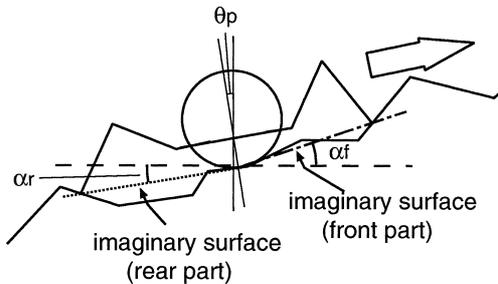


Fig. 12 Angle of the imaginary surface

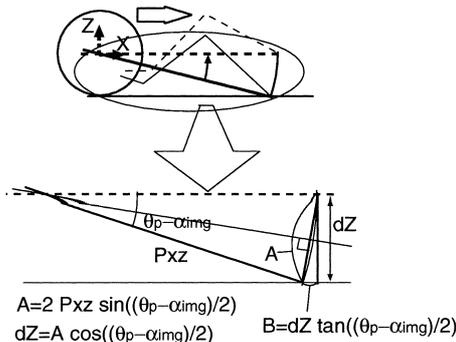


Fig. 13 Adjustment of the supporting leg position based on an imaginary inclination

せ、胴体を路面傾斜に対して平行に保つようにする。

そこで、仮想斜度 α_{img} に対して、胴体ピッチ角 θ_p が一致しないときには、 $\alpha_{img} = \theta_p$ となるように前後の脚軌道を調整する。

Fig. 13は仮想面上から見た図である。機体を仮想面と平行にするためには、仮想斜度 α_{img} と機体ピッチ角 θ_p の差 $\theta_p - \alpha_{img}$ だけ機体を回転させる必要がある。Fig. 13の場合、脚を dZ だけ機体座標 z 方向に下げる。 P_{xz} を機体座標系 xz 平面における脚先までの距離とすると、

$$dZ = 2P_{xz} \cdot \sin \frac{\theta_p - \alpha_{img}}{2} \cdot \cos \frac{\theta_p - \alpha_{img}}{2} \quad (15)$$

となるため、次式のように機体座標 z 方向の脚先位置 P_z を調整する。ここで、 $P_{z_{old}}$ は調整前の脚先位置である。

$$\begin{cases} P_z = P_{z_{old}} - dZ & (\text{front support legs}) \\ P_z = P_{z_{old}} + dZ & (\text{rear support legs}) \end{cases} \quad (16)$$

ただし、上記の調整を行った場合、厳密にはFig. 13に示したBだけ脚接地点の位置がずれることになるが、このずれの量は $B = dZ \tan \frac{\theta_p - \alpha_{img}}{2}$ であり、 $P_{xz} = 1.0$ [m]、 $\theta_p - \alpha_{img} = 0.087$ (= 5 [deg]) のときでも $B = 3.8 \times 10^{-3}$ [m] となり小さいため、脚先 x, y 方向のコンプライアンスで吸収するものとし、本報告では許容している。

なお、調整タイミングについて本論文では、支持脚が切り変わった0.6[s]後に調整量 dZ を計算し、その後0.3[s]間で等分量ずつ脚先目標位置をずらしている。上記具体的値は、5.2節のコンプライアンス調整時期と重ならず、かつ、急激な姿勢変化にならないように実験的に求めたものである。また、リアルタイムに本軌道調整を行わない理由は、本軌道調整は路面凹凸の低周波成分に対応するためのものであり、高周波成分はコンプライアンスで吸収しているためである。

7. シミュレーションによる機能確認

3~6章で導入した移動制御手法の有効性を確認するために、Fig. 14に示した路面(両側段差A, 片側段差B, 斜面Cを含む)に対してクロール, トロット, ペース各歩容についての

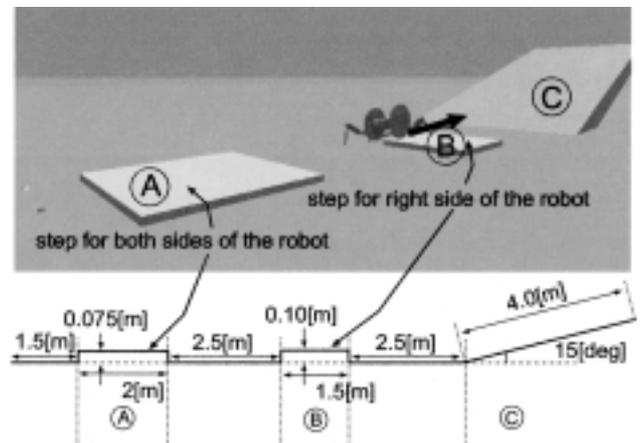


Fig. 14 The ground surface of the simulated terrain

Table 2 Setting of Chariot III

$K_w = 125[\text{Nm/rad}]$	$D_w = 20[\text{Nm/rad/s}]$	(cf. section 3)
$K_r = 3000[\text{Nm/rad}]$	$D_r = 200[\text{Nm/rad/s}]$	(cf. eq(2))
$h_{\text{up}} = 0.2[\text{m}]$	$ v_{\text{up}} = v_r = v_{\text{down}} = 0.5[\text{m/s}]$	$S = 0.3[\text{m}]$ (cf. Fig.9)
straight velocity of the body (except for section 8)		
0.06[m/s] (crawl gait)	0.18[m/s] (trot, pace gait)	
cycle time of walking		
6.6[s] (crawl gait)	3.3[s] (trot, pace gait)	
$k = 0.5$	(cf. eq(7))	
$\Delta = 0.029[\text{m}]$	(cf. section 5)	
$K_{\text{spring}} = 7500[\text{N/m}]$	(cf. Fig.5)	
the coefficient of friction = 0.5 (setting in simulation)		
The surface is hard.		
The environment is unknown for the robot.		

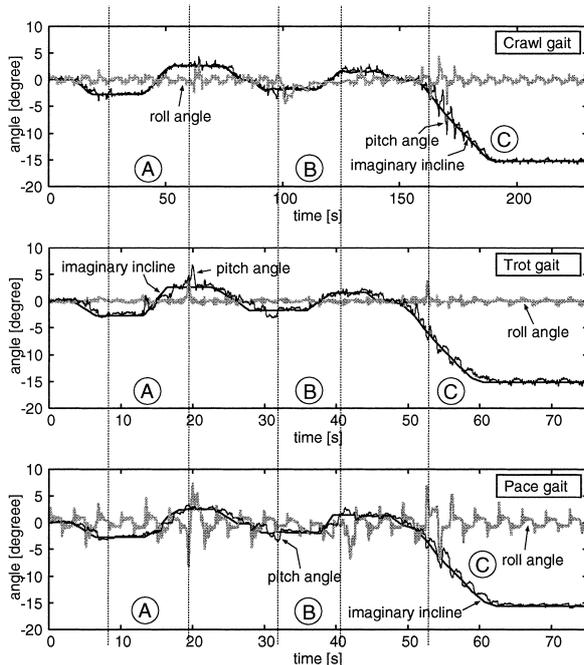


Fig. 15 A result of the simulation

シミュレーションを行った。シミュレーション条件は、実機の設定条件 (Table 2) に準じるものとし、ODE (OpenDynamicsEngine) を用いて実施した。なお、各歩容とも路面環境は未知である。

クローラ、トロット、ペース歩容それぞれの時間に対する姿勢角 (ピッチ, ロール角) 変化と仮想斜度の推移を, Fig. 15 上, 中, 下段に示す。Fig. 15 の (A), (B), (C) は, 機体中心位置に対して, Fig. 14 の (A), (B), (C) と対応している。Fig. 15 より各歩容全体を通して, ピッチ角が仮想斜度に沿って変化しており, 進行方向については機体が路面とほぼ平行なまま移動していることが分かる。グラフ中, 例えばトロット (中段), ペース (下段) の 5 [s] 付近で仮想斜度とピッチ角が負へ傾いている (本体が後ろに傾く) が, これは高さ 0.075 [m] の段差に前脚がかかり, 仮想斜度が傾きつつあることを意味する。また, ロール角は左右路面高さが異なる段差 (B) があるにもかかわらず, 始終傾き 0 を中心として推移していることが分かる。

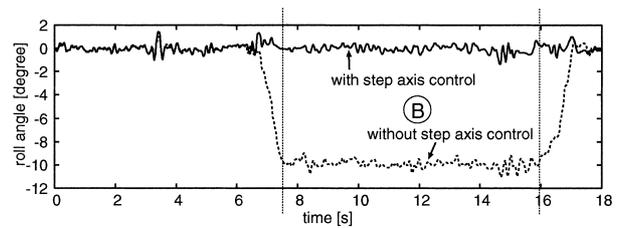


Fig. 16 The effectiveness of the step axis control

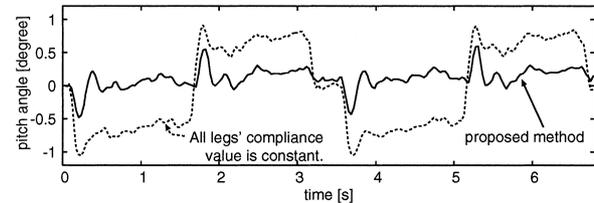


Fig. 17 The pitch angle moving on a plane with crawl gait

次に, 前章までに導入した各制御手法が有効に機能しているか順を追って見ていく。

7.1 段軸制御

Fig. 15 から, 段軸制御により, 路面形状にかかわらずロール角は 0 付近に制御されていることが分かる。片側段差に機体右側が乗り上げる (B) 期間も, ロール角はその前後とほぼ同様に 0 を中心として推移している。ペース歩容で振幅が大きい理由は, 支持脚が片側だけとなるために脚で発生するロール方向のモーメントが大きくなるためである。ただし, 式 (2) の K_r を大きくすることで, 振幅の絶対量は小さくできる。

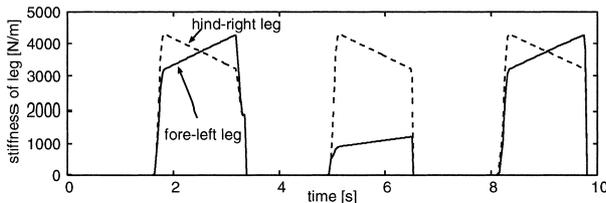
Fig. 16 には, 段軸制御した場合と, 段軸角の目標値を平常時の値に固定した場合 (段軸機構がない場合と等価) の (B) 路面移動時のロール角推移 (トロット歩容で実施) の比較を示した。段軸機構がない場合は, 胴体ロール角が路面 (B) に沿って大きく傾いており, この結果からも段軸制御の有効性が確認できる。

7.2 脚先コンプライアンス

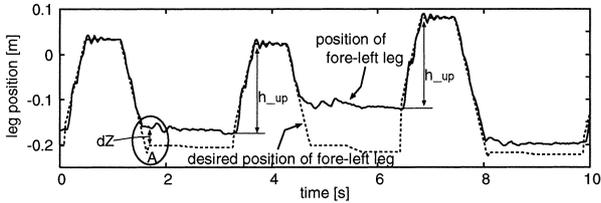
Fig. 17 は, Fig. 15 の上段 (クローラ) のピッチ角推移 0~1 周期分を拡大したものである。点線は, コンプライアンスを全脚常時一定 (式 (7) による脚先力 ($k = 0.5$) の合計を支持脚で等配分し, 式 (10) によりコンプライアンスを求めたもの) にしたときのピッチ角推移である。この結果から, 式 (4)~(10) により求めた基本コンプライアンスを設定することで, 整地歩行時に余分な姿勢揺動が生じないことが分かる (なお, 周期的に出るピークは脚が接地したときのものである)。

次に Fig. 18 に Fig. 15 中段 (トロット) の 0~10 [s] における左前脚と右後脚の脚先剛性 (上段) と左前脚の脚先位置の推移 (下段) を示す。脚先コンプライアンスは脚先剛性の逆数であるが, 直感的に分かりやすいため脚先剛性を示した。2~3 [s] 付近の左前脚の剛性は右上がり, 後右脚の剛性は右下がりとなっているが, これは式 (5) による。

また 5~6 [s] 付近では, Fig. 18 下段の脚先位置が示すように左前脚が 0.075 [m] の段差に乗り上げるため, 脚先コンプライアンスが調整され, 左前脚の剛性が約 1/3.5 倍となっている (な

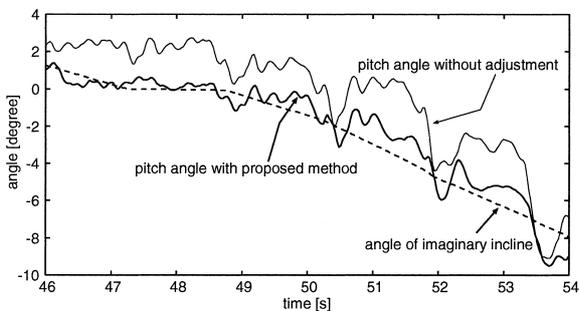


(a) Stiffness of legs

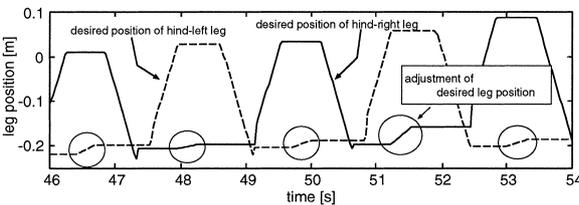


(b) Leg position of fore-left leg

Fig. 18 Stiffness of legs



(a) Pitch angle of the body moving into the slope



(b) Adjustment of leg position

Fig. 19 Pitch angle of the body moving into the slope ©

お、3.5 [s] 付近で脚先剛性が一瞬階段状になっているが、支持脚が入れ替わるときに短期間 4 脚支持となったからである。

7.3 z 方向脚先軌道

Fig. 18 下段 A は接地相から支持相に切り換わった時点である。このとき接地検出後の脚先目標位置を現在位置から dZ 下げた位置に設定し直していることが分かる。

次に、Fig. 19 には Fig. 15 中段 (トロット) の 46~54 [s] における胴体ピッチ角と仮想斜度 (上段)、および左前脚と右前脚の目標位置の推移 (下段) を示した。この部分は 15 度の斜面への移行部分である。胴体ピッチ角を仮想斜度に合わせるべく、図下段の の部分で前脚目標位置を上げていることが分かる。

Fig. 19 上段の細実線は、仮想斜度に基づく脚先位置調整を行わない場合のピッチ角推移であり、調整を行わない場合には仮想斜度への収束が遅れ、結果として Fig. 3 左上図のように脚の可動範囲が制限されることになる。

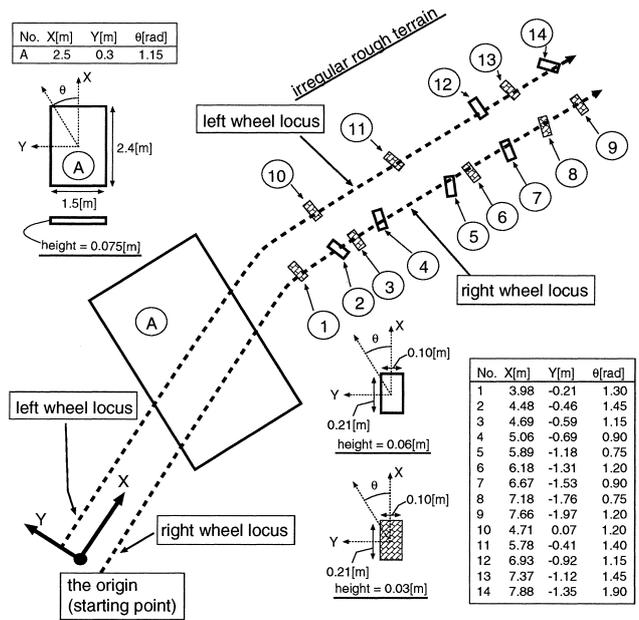


Fig. 20 The surface of the irregular rough terrain

8. 不規則不整地での検証

7 章では、代表的地形におけるシミュレーションにより、提案した移動制御手法について各機能とその有効性を確認した。本章では、一般的な不規則不整地を対象に本論文の手法を用い、その有効性をシミュレーションと実験により検証する。なお、シミュレーションおよび実験条件は Table 2 と同様であり、路面環境は未知である。

8.1 シミュレーション

不規則不整地路面を Fig. 20 に示す。比較的大きな段差 A と障害物 ①~⑭ が Fig. 20 表中の (x, y) 位置に角度 θ 回転させて置いてある。

Fig. 20 の曲線 (点線) は、脚車輪分離型ロボットの左右車輪の路面接地点軌跡である。ロボットは原点から出発し、高さ 0.075 [m] の段差 A に対して、斜め進入し、斜め進出する。その後、右回りに旋回し (19~22.5 [s])、高さ 0.06 [m] および 0.03 [m] の障害物が不規則に連続する地形を前進する。前進時の速度は 0.18 [m/s]、旋回時の速度は推進方向 0.14 [m/s]、右回転方向 10 [deg/s] である。

上記移動をトロット歩容で行った際の、シミュレーションの様子を Fig. 21 に、そして、胴体ピッチとロール角および仮想斜度の推移を Fig. 22 に示す。また、図中には後述する実験結果との比較のため、 ± 0.7 [deg] の直線を点線で入れてある。

Fig. 22 より、次のことが分かる。

- 7.5 [s] または 17 [s] 前後の段差 A に対する斜め進入進出の際にも、ロール角は 0 付近で安定している。
- 21.5 [s] 以降の不規則凹凸路面でも、ロール角は 0 付近で安定している。
- 段差路面 A に対する斜め進入~乗り越え~斜め進出の際にも、ピッチ角は仮想斜度にほぼ追従している。
- 21.5 [s] 以降の不規則凹凸路面移動時には、路面凹凸高周波

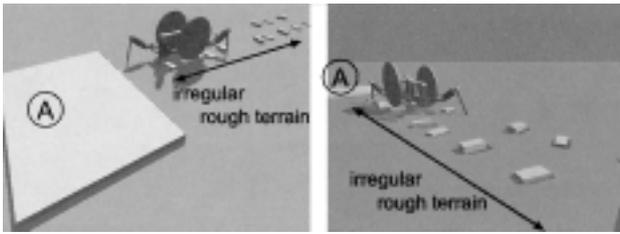


Fig. 21 Scenes in the simulation

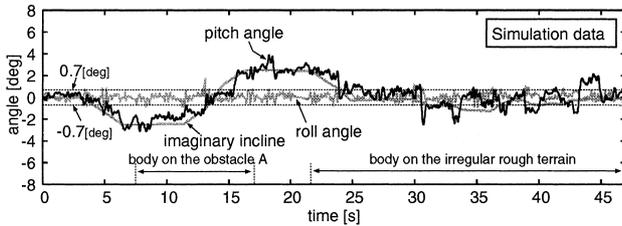


Fig. 22 Pitch and roll angles of the body in the simulation

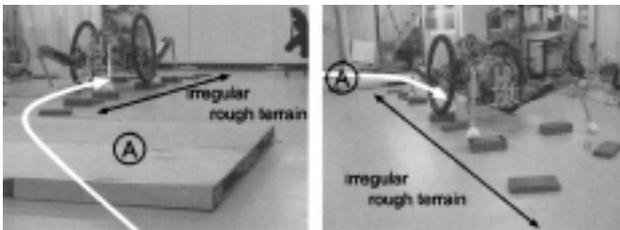


Fig. 23 Experimental scenes

成分を脚と車輪サスペンションのコンプライアンスで吸収しているため、その影響は特に仮想斜度に対する胴体ピッチ角の変位として現れる。ただし、最大2度程度であり、実用上大きな問題とはならない。

- 21.5 [s] 以降の不規則凹凸路面移動時には、胴体ピッチ角は仮想斜度との変位を生ずるものの、仮想斜度を中心として推移しており、路面凹凸高周波成分の影響を除けば、仮想斜度にほぼ一致する。

以上のことから、本移動制御手法は一般的な不規則不整地に対しても有効に機能し、2章に記述した胴体姿勢角を実現しつつ、不整地を移動できることが確認できた。

8.2 実験

実験機 Chariot III (Fig. 1) を用いて、提案した移動制御手法の実機における有効性を確認した。併せてシミュレーションの妥当性も検証するため、実験路面を Fig. 20 と同様に作成し、実験を行った。なお、実機の設定条件は Table 2 である。

Fig. 23 に実験風景、そして Fig. 24 に胴体ピッチとロール角および仮想斜度の実験結果を示す。

実験結果からも、ピッチ角は仮想斜度に沿って変化すること、および、ロール角は路面状況にかかわらず0を中心として通常 ± 1.5 [deg] (最大 4 [deg]) 程度以内に収まっていることが分かり、本制御手法の有効性が検証できた。

Fig. 22 のシミュレーション結果と姿勢角推移の傾向は、次に述べることを除いてほぼ一致しており、シミュレーションの妥当性も確認できる。

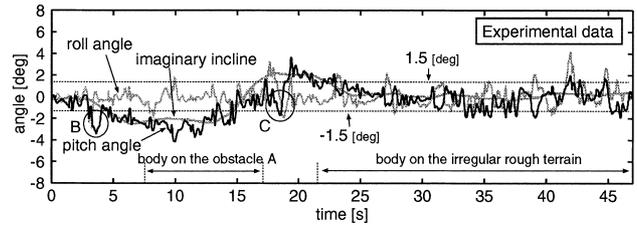


Fig. 24 Pitch and roll angles of the body in the experiment

実験時のロール角変位の振幅については、Fig. 22 のシミュレーションに対して大きくなっている。この理由は、実機の段軸機構部分に存在するガタおよび車輪に用いているマウンテンバイク用タイヤ表面の変形とゴム弾性に関するモデル誤差や慣性モーメントのモデル誤差などによると考えている。

また、Fig. 24 B, C 点のピッチ角が沈み込む理由は、B 点では、後脚が接地する前に前脚が A に接地し、また、C 点では機体が A から降りるときに後脚が接地する前に、前脚が路面に接地することにより、前脚が時間的に早く路面と衝突し機体を後傾させるからである。B と C でこの影響が大きい理由は、路面変化の影響がロボットに現れる最初の場面であるため、今までの脚接地位置と路面変化後の脚接地位置の差が最大となるからである。B と C 点の後では、6.3.2 項による軌道調整が行われるため、路面変化後の接地位置との差は小さくなり、この影響は小さくなる。なお、シミュレーションでこの影響がほとんど見られない理由は、実験時に比べて、接地と同時に接地検出に至るため、衝突の影響が生じる前に、5.2 節のコンプライアンス調整が行われること、および、脚関節の摩擦を考慮していないことなどによると考えている。

9. おわりに

本論文では、脚車輪分離型ロボットの未知不整地における基本移動制御方式について提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験により検証した。本論文で記述した内容は、「脚と車輪サスペンションにコンプライアンス特性を持たせることで路面外乱を吸収して移動する」という基本的な考え方で屋外環境を移動するための、車輪機構制御手法、段軸機構制御手法、脚先コンプライアンス設定法、および、脚先軌道設定法である。これにより、平均胴体ピッチ角を本論文で導入した仮想斜度とほぼ同じとし、かつ、平均胴体ロール角を0付近に保つ未知不整地移動が実現できることを確認した。

本論文による車輪制御、段軸制御および機体座標 z 方向についての脚制御と、文献 [8] ~ [10] による x, y 方向の脚制御を融合することで、クロール、トロット、ペース各歩容について任意方向への未知不整地移動が可能となる。

なお、本論文では対象移動路面の不整地程度を一定範囲と仮定したため、より大きな不整地路面に対する移動制御手法に関しては別論文に記述したい。

参考文献

- [1] 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.
- [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, pp.2138-2143, 1992.
- [3] 中野: 走行ロボットの走行制御装置, 特願平 7-289966, 1995.
- [4] Y. Dai, E. Nakano, T. Takahashi and H. Ookubo: “Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment,” Proc. of 7th Int. Conf. on Advanced Robotics, Spain, Sep., vol.2, pp.911-916, 1995.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 上野, 王, 高橋, 中野: “アクティブサスペンションを用いた脚車輪型移動ロボットの不整地適応性の向上”, ロボティクスメカトロニクス講演会'99, 2A1-43-103, 1999.
- [8] 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.
- [9] 熊谷, 高橋, 庄司, 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不整地移動”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.3, pp.400-410, 2004.
- [10] 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ベース歩容の実現”, 第 9 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.228-235, 2004.
- [11] 大道, 井辺: “(技術報告) 脚車輪型移動装置の開発 (その 1)”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.3, pp.244-251, 1984.
- [12] 広瀬, 竹内: “ローラウォーカー: 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案”, 日本機械学会誌 (C 編), vol.62, no.599, pp.242-248, 1996.
- [13] 松本, 梶田, 西郷, 谷: “動的軌道制御間の連続性を考慮した 2 足歩行型脚車輪ロボットの高速階段昇降制御”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.94-101, 2000.
- [14] 広瀬, 福田, 菊池: “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.
- [15] 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.
- [16] 安達, 小谷内, 中村, 中野: “脚に設置された力センサを用いた 4 脚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.
- [17] H. Lehtinen: “Force Based Attitude and Altitude Control of a Walking Machine on Soft Terrain,” '93 ICAR, pp.495-500, 1993.
- [18] 榊原, 菅, 細田, 服部, 藤江: “4 脚歩行機構のための低衝撃足先軌道”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.6, pp.662-671, 1990.
- [19] 米田, 飯山, 広瀬: “4 足歩行機械の間欠トロット歩容”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.6, pp.881-886, 1996.
- [20] 塚越, 広瀬: “間欠クローラ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.301-308, 1999.
- [21] 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.
- [22] 米田, 飯山, 広瀬: “4 足歩行機械のスカイフックサスペンション制御”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.7, pp.1066-1071, 1994.



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)



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)



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)