

くまがいまさとし

氏名 (本籍) 熊谷正俊 (宮城県)

学位の種類 博士 (情報科学)

学位記番号 情博第223号

学位授与年月日 平成14年3月25日

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

研究科、専攻 東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) システム情報科学専攻

学位論文題目 脚車輪型移動ロボットの予測的歩容生成に関する研究

論文審査委員 (主査)

東北大学教授 中野栄二 東北大学教授 出口光一郎

東北大学教授 江村超 東北大学教授 内山勝  
(工学研究科) (工学研究科)

東北大学助教授 高橋隆行

## 論文内容要旨

### 1 序論

屋外産業における機械化の進展は製造業のそれと同様に、作業の省力化、生産性の増大など、様々な恩恵を社会にもたらし、その発展を支えてきた。しかしながら、機械化の広まりは屋外産業全体から見れば都市周辺や大規模事業に集中した限定的なものであり、山間部における河川の保全、災害の復旧、林業など、屋外産業はいまだ多くを人手に負っている。それらの領域でも当然、その労働環境の厳しさゆえに機械化に対しては強い要望がある。しかし、経済面での要因だけではなく、そもそもにして作業機械が山岳地形の移動に足るだけの能力を有していないことが、屋外産業への機械の進出を妨げている。

現用の作業機械の主たる移動機構のひとつである車輪機構は、整地での移動効率にすぐれるものの、未整備の地面上では十分なグリップ力を得られないので登坂能力が低く、また、車輪半径の半分程度の段差でもその進行が妨げられてしまう。車輪機構と同様に広く用いられているクローラ機構は、車輪機構よりは高い不整地適応性を有するものの、林野の表土を壊すことを含めて、屋外産業における要求を十分に満たすものではない。

このような移動能力の不足に対する解決のアプローチとしては、ひとつには、特殊車輪、連接台車の使用、あるいは懸架機構の工夫による車輪・クローラ機構の移動能力の向上がある。そしていまひとつは、脚機構の利用である。脚機構は、脚によって移動を行う動物の運動能力を考えれば明らかなように、きわめて優れた運動性能と高い汎用性を持ち合わせており、実用化への期待が大きい。しかしながら、脚機構を実用のもので移動機械を開発するには多数の問題が残されており、特に大きな問題として以下の3つが挙げられる。

1. 車輪機構やクローラ機構に比べてエネルギー消費が大きくなり、単独での長時間の稼働が不可能である。
2. 機体の安定性が制御に大きく依存し、適切な制御には精確な地形情報を必要とするため、現状の計測・制御技術では自然不整地上の運用における信頼性が低い。
3. 複数の脚機構を協調させて目的とする動作を実現する制御手法が、開発の途上にある。

上記の問題のうち1, 2の解決を目的として提案された不整地移動プラットフォームが図1に示された脚車輪型ロボットである。問題1について、一般の脚機構の消費エネルギーの大きさは、機体の荷重をアクチュエータで常に支え続けなければならないことによるものだが、脚車輪型ロボットは脚機構と併用して車輪機構で荷重の

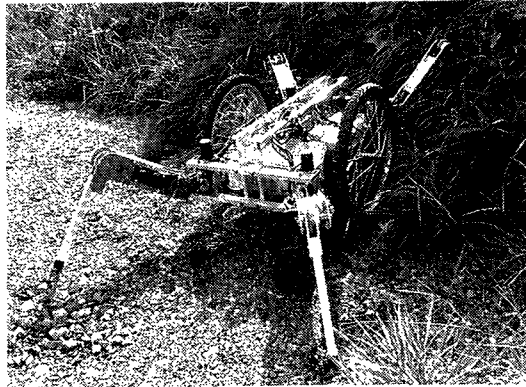


図 1: 脚車輪型ロボット : Chariot III

過半を分担することで、脚機構の負担を軽減し、そのエネルギー効率を改善している。問題 2 について、脚車輪型ロボットの機体は、適切な制御なしには機体を支持しえない脚機構の他に車輪機構によって定常的に支持されているため、機構自体の安定性が高い。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確性の緩和、そして制御の容易さにつながり、現状の計測技術でも未知の屋外不整地の移動が可能である。一方、脚車輪型ロボットについて問題 3 は未検討であり、不整地移動能力に関する検証も、これまでのところ直進動作に限定されている。そこで、本論文は既出の成果をふまえて、不整地上における脚車輪型ロボットの自在な平面動作の実現を目標とした。

近い将来における不整地移動ロボットの実用化を現在の計測・制御技術の延長線上に想定した場合、屋外産業における作業の複雑さから、制御方式としては完全な自律制御よりもオペレータによる操縦を組み合わせた半自律制御（操縦型制御）のほうが実現性が高いと考えられる。操縦型制御による移動機械の運用上、操縦入力への応答性は重要な要素のひとつだが、脚機構を有する移動機械の場合には、脚機構の支持動作が不連続なものであるために、その動作を適宜調整しないかぎり、機体の推進動作は断続的なものとなる。この問題に対して本論文では、予測型イベントドリブン歩容という歩容アルゴリズムを提案し、ある一定の転倒安定性を確保した静歩行による、速度指令ごおりの継続的推進動作を実現している。なお、転倒安定性とは別の観点から、地面の状態が不確かな不整地における機体の支持をより確実なものとするために、地面を離れる脚の数は最小限に抑え、機体は常に 2 つの車輪と 3 本以上の脚による支持のもとで推進動作（クリープ歩容）を行うものとした。

## 2 脚車輪型ロボットの継続的推進動作の実現

脚ロボットに関して複数の脚機構を適切に協調させ、継続的な推進動作を実現してきた研究例は、以下の 3 とおりに大別される。

1. レギュラー歩容の脚の移動量とデューティ比を可変として、任意の速度指令に対応した手法。
2. 転倒安定性、移動速度などの条件に関して最適化された歩容パターンをオフライン演算によって計画する手法。
3. 遊脚動作の開始および終了タイミングを決定する幾つかの簡単なルールに基づき、創発的な歩容パターンの形成を行うルールベースの手法。

1 のレギュラー歩容を用いる手法は、任意の速度指令に対して良好な追従性を有する。しかし、レギュラー歩容はときとして無用の遊脚動作を生じる。脚の上下動作に伴うエネルギー損失を考えればそのような遊脚動作は好ましいものではない。脚の可動範囲が有効に使われ、相遷移頻度の抑えられた歩容パターンは 2 の最適化手法によって実現可能だが、一般に最適化計算は演算量が多く、また、事前に経路情報を必要とする。それゆえ、速度指令が随時変化する操縦型制御には適さない。

そこで本論文では、最適ならずとも準最適な歩容パターンを形成しうるルールベースの歩容アルゴリズムに着目した。3で挙げたルールベース手法の研究例はいずれも6脚ロボットを対象としたものであり、可動限界に近付いた立脚を順次復帰させることで推進動作を継続的なものとしている。しかしながら、本論文で想定しているクリーブ歩容では、これら6脚ロボット用のルールベース手法は十分には機能しない。なぜなら、遊脚数の制限によって、可動限界近傍にある立脚を遊脚化する上での制約が増えるためである。一方、4脚ロボットのクリーブ歩容を対象としたルールベースの歩容アルゴリズムに目を転じると、継続的な推進動作ではないものの、イベントドリブン型のアルゴリズムによって任意の速度指令に対する追従を行った研究例がある。イベントドリブン歩容では、推進動作の障害となるイベント（推進障害イベント——具体的には脚の可動限界到達および安定余裕の低下）の発生に際して、一旦機体を停止させて推進障害イベントからの回復動作（推進回復動作）を行うことで、機体を再び推進動作が可能な状態に回復させている。

ここで、イベントドリブン歩容において推進回復動作中に機体の推進動作を停止せざるをえない理由を考えると、それは推進回復動作の実施が推進障害イベントが発生した後だからである。ならば、推進障害イベントの発生を事前に予測し、それに先行して推進回復動作を実施すれば、継続的な推進動作が実現できるのではないかと考えられる。これが本論文の中心をなす概念であり、それを具体化したアルゴリズムが予測型イベントドリブン歩容である。

予測型イベントドリブン歩容は、推進障害イベント発生時間ならびに推進回復動作時間という二つの予測指標に基づいて、脚の動作タイミングを決定する。両者はそれぞれ、現在時刻から推進障害イベントの発生が予測される時刻までの時間、ならびに推進回復動作に要する時間の予測値である。将来の機体移動速度が厳密には予測不可能である以上、推進障害イベント発生時間と推進回復動作時間を正確に予測することも不可能だが、本論文では、予測を行う時点での移動速度が予測期間内において変化しないというモデルを仮定し、両指標の演算を行っている。イベント発生の予測にはより複雑なモデルを使う方法も考えられるが、操縦入力として与えられる速度指令が状況に応じてランダムに変化することを考慮するとその効果は低く、むしろ、シンプルな予測モデルを用いることで予測処理の周期を短くして常に新しい予測情報を得たほうが速度指令の変化への追従に有効である。

脚車輪型ロボットについて本論文で取り扱われる推進障害イベントは、脚ロボットのそれと同様に、脚の可動限界到達（可動限界到達イベント）と安定余裕の低下（安定余裕低下イベント）であり、両イベントにはそれぞれ対になる推進回復動作が定義される。そして、可動限界到達イベントの場合には推進障害イベントの発生時点で直ちに推進回復動作を実行できること、安定余裕低下イベントの場合には推進障害イベントの発生前に推進回復動作が終了していることが、それぞれ推進動作継続の条件となる。この条件を数式で表すと次式のようになる。

$$t_{ei} \geq \begin{cases} t_{ri-1} + t_{\text{offset } i-1} & (i \in (I_M \cap \overline{I_C})) \\ t_{r_{l(i)}} + t_{\text{offset } l(i)} & (i \in I_S) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

ここに、 $t_{ei}$ 、 $t_{ri}$ はそれぞれ推進障害イベント発生時間、推進回復動作時間であり、 $i$ はイベントの予測発生順に各イベントに振られた番号である。 $I$ はイベントの集合を表し、 $I_M$ は可動限界到達イベントの集合、 $I_S$ は安定余裕低下イベントの集合である。 $t_{\text{offset } i}$ はイベント $i$ の推進回復動作が実行可能になるまでの待ち時間であり、本論文で想定したクリーブ歩容のもとでは、遊脚数の制限により複数の推進回復動作を同時に実行できないため、このような待ち時間の考慮が必要となる。なお、 $I_C$ は先行するイベントの推進回復動作によって解消されるイベントの集合、 $l(i)$ は2つのイベントの推進回復動作の対象となる脚が重複する場合により小さいほうのイベント番号を与える関数であり、これらはイベント間の干渉を処理するために設けられた。脚の相は、常に式(1)の条件が成立しているように制御する必要がある。それゆえ、推進回復動作の開始タイミングは、任意の $i$ について式(1)の両辺の間に等号が成立した時点となる。このとき、遊脚が存在しなければ、イベント番号が最小のイベントについてただちに推進回復動作を実施し、遊脚が存在するならば、それを接地させた上で当該の推進回復動作を開始する。

以上に述べた相遷移タイミング決定手法により、速度指令が機体の実現しうる移動速度に比べて小さな場合には継続的な推進動作が実現されるが、それを超えるような過大な速度指令が入力された場合には、機体の動作が速度指令に追従できず、推進動作は断続的なものとなる。本論文ではそのような場合に速度指令を制限する手法についても検討し、脚相遷移タイミング決定手法との併用により、推進動作の継続性を確実なものとしてい

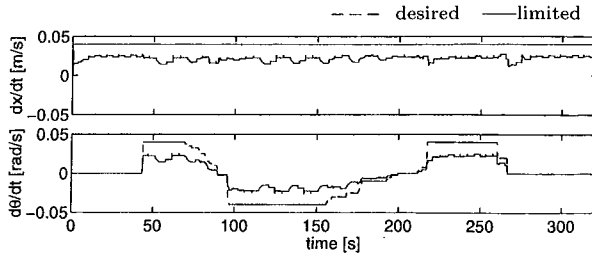


図 2: 移動速度

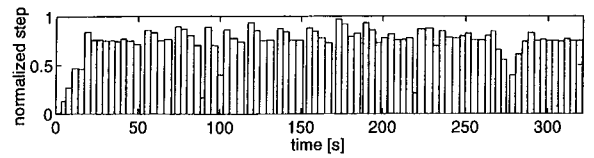


図 3: 無次元化歩幅

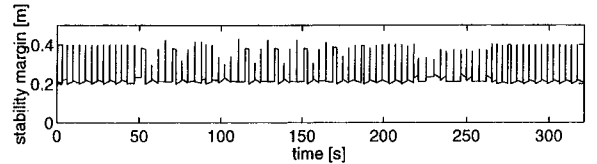


図 4: 静的安定余裕

る。この速度制限手法は、陽には解くことのできない連立不等式を包含しているが、歩容アルゴリズムの制御周期ごとに真の最高速度へと収束する性質を持つ近似的な最高速度の決定法により、繰り返し演算による解探索を行わずとも、速度制限の実施は可能である。よって、相遷移タイミング決定手法とともに少ない演算量で歩容の生成が可能であり、速度指令が変化しても、常にそれに応じた適切な制御を行うことができる。

### 3 実験による検証結果

本論文ではシミュレーションと実験によって予測型イベントドリブン歩容の有効性を検証している。実験は自然不整地で実施し、人間による操縦入力を機体の速度指令として、その速度指令から予測型イベントドリブン歩容による機体動作の生成を行った。図 2はこのときの速度指令と実際の移動速度であり、脚の相遷移と地面の凹凸による変動はあるものの、速度が大幅に低下することはなく、速度制限手法により制限された速度のもとで、機体が継続的な推進動作を行ったことを示している。また、図 3は脚のフルストロークに対して無次元化された一歩ごとの歩幅を表しており、速度指令が大きく変化する場合には歩容に乱れが生じるものの、1周期程度で無次元値にして 0.8 程度の歩幅を持ち、無用な相遷移の抑えられた歩容に収束する性質を示している。図 4は機体の静的安定余裕のグラフであり、予め指定した閾値 (0.2[m]) を下回ることなく、推進動作が実施されたことがわかる。

### 4 結論

以上述べたように本論文では、オペレータの操縦による不整地上での脚車輪型ロボットの巡行動作の実現を目標として、予測型イベントドリブン歩容という歩容アルゴリズムを提案し、無用の脚相遷移を生じることなく、継続的で静的安定余裕の確保された歩容が実現可能であることを示した。この歩容アルゴリズムが機体動作の決定に使用する予測情報の範囲は、予測時点での機体の姿勢と移動速度から一意に予測可能な範囲に限られ、必ずしも最適な歩容パターンの生成を行うものではない。ゆえに速度指令の変化によっては、予測情報と実際の機体動作との間に生ずる誤差のために、脚の相遷移頻度が上昇したり、移動速度が急激に低下したりすることがある。しかし一方で、速度指令が一定かそれに近い場合には、このアルゴリズムには効率的な歩容パターンを形成する作用があり、速度指令が急激に変化した場合でも、速度指令が落ち着き次第、そのような状態に歩容を収束させる性質を持つ。また、上述のように予測範囲を限定することで、このアルゴリズムは短い制御周期で実行することが可能であり、速度指令の変化に際して脚の相遷移頻度の上昇と最高速度の低下が生じている場合でも、そのとき生成される歩容は、その状況に対して取りうる歩容としては予測可能な範囲において適切なものである。つまり、予測型イベントドリブン歩容は、予測可能な範囲で常に適切なタイミングで脚の動作を制御し、その結果、一定かそれに近い速度指令に対しては効率的な歩容パターンが形成され、また、速度指令の変化に対して良好な追従性を有する歩容アルゴリズムであると言える。

## 論文審査結果の要旨

自然環境を作業領域とする屋外産業の機械化を進めていくことを現状の計測制御技術の延長上に想定した場合、その作業内容の複雑さから、作業機械の制御方式としては現用の作業機械と同様、オペレータによる操縦型制御が適当であると考えられ、作業の効率的な遂行および危険の回避のためには、操縦下にある作業機械の速やかな追従が求められる。しかし、現用の移動機構を上回る不整地適応性を持つものとして期待されている脚機構を使用する移動機械では、複数の脚機構の動作を適宜協調させないかぎりには、その推進動作は断続的なものとなり、操縦入力に対する継続的追従は不可能である。この問題に対し、本研究では四脚二輪を有する脚車輪型移動ロボットを対象として、並進および旋回速度成分からなる任意の速度指令に対して良好な追従性を示す歩容アルゴリズムを提案し、問題の解決を図っている。本論文は、これらの研究成果についてまとめたもので、全5章からなる。

第1章は緒言であり、従来型の歩容アルゴリズムの問題点について検討し、本研究の中心をなす基本概念を提示している。この基本概念とは、機体の推進動作が不可能となる脚配置状態の発生をイベントとして捉え、そのようなイベントの発生を予測し、事前に回避することで推進動作継続性の維持を図るというものである。

第2章では、機体推進動作の障害となるイベントのうち、脚の可動限界到達時に推進動作が継続不可能となり、速度指令への追従が妨げられることのないように、脚の動作タイミングを予測的に決定する手法を提案している。この手法は、脚の可動限界到達イベントの予測発生タイミングと、可動限界からの復帰動作に要する時間の予測値の比較により成り立つ。また、速度指令が過大で脚の動作タイミングの制御のみでは推進動作の継続性が維持できない場合には、速度指令に制限を課し、機体の実現可能な範囲内での最高速度で速度指令への追従性を保証する速度制限手法を提案している。両手法の併用により、脚車輪型移動ロボットは不整地上での継続的推進動作が可能であり、また、一定の速度指令に対しては脚の上下動作頻度の抑えられた効率的な歩容が生成されることをシミュレーションで確認している。これらは脚車輪型移動ロボットを不整地上で自在に効率よく運用する上で重要な成果である。

第3章では、第2章で提案した脚動作タイミング決定手法ならびに速度制限手法をもとに、閾値以上の転倒安定性を保証するための拡張を施した手法を提案している。その効果についてもシミュレーションによる検証を行い、第2章で実現した速度指令への追従性を損なうことなく、転倒安定性の向上が可能であることを確認している。第2章および第3章で提案したアルゴリズムの使用により、脚車輪型移動ロボットは不整地上で転倒安定性の確保された継続的な推進動作を任意の速度指令に対して実現することが可能である。これは今までにない発想に基づく成果であり、不整地移動機械の発展に大きく寄与するものである。

第4章では、第2章および第3章で提案した手法を実験により検証している。実験は自然不整地上で行われ、脚車輪型移動ロボットはオペレータによって操縦されている。この実験結果は、第2章および第3章で提案した手法を用いることで、オペレータの操縦による脚車輪型移動ロボットの自在な運用が自然不整地上で可能であることを示している。

第5章は結論であり、本論文について総括し、今後の展望について述べている。

以上要するに本論文は、自然不整地上での脚車輪型移動ロボットの運用において良好な操縦性を実現するために、速度指令追従性の低い従来のイベントドリブン型歩容アルゴリズムに代えて、推進動作の妨げとなるイベントの事前予測によって、速度指令追従性の大幅な向上が可能であることを示したものであり、不整地を作業領域とする屋外産業の機械化の実現ならびに情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。