

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26730138

研究課題名(和文)腕脚統合型ロボットの抗重力環境下での最適歩行技術の開発

研究課題名(英文) Optimization of Walking considering Gravity Environment for Integrated Limb Mechanism

研究代表者

田窪 朋仁 (Takubo, Tomohito)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80397695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、抗重力環境下で異なる平面を移動するための異平面移乗アルゴリズムを開発し、異なる平面間の移動を最小歩数で実現できることを示した。また、構造物上の移動で無視することのできない凹凸が存在している問題に対し、障害物を回避し目的位置までの歩行を最小歩数で計画する、歩行探索手法を提案した。さらに、ロボットの外界センサを使った計測ができない死角で障害物と衝突してしまう問題に対し、ロボットの身体情報を用いた周辺環境との接触推定を行う手法を提案し、推定結果を用いたロボットの歩行動作修正アルゴリズムを開発し、有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：The three important technique for walking on the anti-gravitational environment was developed for hexapod robots. First, the transition motion for walking beyond the edge of the structural objects was proposed. The proposed algorithm provides the minimum steps for the walking. Secondly, the foot step planning algorithm for walking through the cluttered environment was proposed. Thirdly, for the problem of the collision with robot body at the blind area of attached external sensors, the adaptive walking motion control method was proposed. The three techniques were implemented to the real hexapod robot and the effectiveness was shown.

研究分野：ロボット工学

キーワード：脚ロボット 知能ロボット 歩行計画 遠隔操作

### 1. 研究開始当初の背景

高所の壁面や天井裏、床下などの狭隘空間の点検作業を人に代わり作業を行うロボットの研究が広く行われている。多くの研究では、様々な作業環境に対応するためのロボットの機構を開発しているが、より多様な環境における移動を発展させるためには、ロボットの歩行に関する知能化が重要な課題となる。ロボットが備えた外界センサによる環境認識結果に基づいた知的な移動を行うロボットの実現は、幅広い点検・保守作業への応用が期待でき、有用な取り組みと言える。

これまで、6脚を有する腕脚統合型ロボットのハードウェア開発と腕脚統合型ロボットの特性を活かした「3次元環境の作業移動」に関する研究に取り組んできており、格子状の壁面や天井などを移動する技術、狭隘空間内の移動技術、接触情報を用いた障害物回避技術などを実現してきた。しかし、腕脚統合型ロボットを橋梁の壁面（抗重力環境）や、天井裏、プラントのパイプなど、危険な場所での人間の代替としてロボットによる点検・保守が求められる領域へ適用していくためには、これまでのような限定された単一の環境だけでなく、抗重力環境を移動する制約条件を満たしつつ、環境の変化に柔軟に適応し、点検のための移動や、保守のための作業技術を実現していかなければならない。

### 2. 研究の目的

これまでの抗重力空間を対象とした研究の多くは、壁面にロボットを保持するための機構の開発が中心であり、外界センサによる環境の計測結果に沿った環境の変化に適応する歩行の安定化制御や最適な経路計画を対象とはしてこなかった。そこで、本研究では、抗重力空間の移動に外界センサの認識情報に従った移動計画も対象にいれ、下記の課題について明らかにする。

- 1) 抗重力環境下における障害物を考慮した歩行の安定性を実現する脚配置計画
- 2) 環境認識結果に基づく異なる移動平面への安定な乗り移りを実現する移動計画
- 3) 未計測障害物衝突時の適応歩行

1)では、抗重力環境下において脚先の配置を環境中の障害物を考慮しながら計画することを目的としており、図1に示すような歩行パターンのモデルをベースとした障害物回避のための脚配置計画を行う。2)では、1)での成果を基に、目的位置までに存在する抗重力環境下での面から面への複雑な移動を実現する移動計画を行う。3)では、これまでの移動手段に加え、外界センサでは計測がしにくい死角に障害物が衝突したとき、衝突場所を推定し回避するための適応的歩行アルゴリズムを開発することで、所望する移動を継続する技術を開発する。

### 3. 研究の方法

抗重力空間での柔軟な移動が可能な腕脚

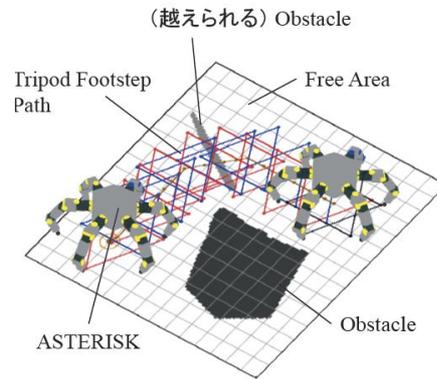


図1 トライポッド歩行のパターンと計画

統合型ロボットの実現に向け、下記の課題に取り組む。

- 1) 抗重力環境下における障害物を考慮した歩行の安定性を実現する脚配置計画

6脚ロボットのトライポッド歩容をベースに、フィールド上にある障害物を回避する脚配置を3本一組で探索していく脚設置モデルを提案し、探索アルゴリズムにより逐次最適な歩行パターンを求める手法を提案する。また、探索手法による脚配置の他に、2足歩行ロボットで提案している脚配置計画を発展させ、数歩先までのローカルな脚配置について逐次線形計画手法に基づくアルゴリズムを開発する。

- 2) 環境認識結果に基づく異なる移動平面への安定な乗り移りを実現する移動計画

異なる角度の平面へ移動するためには、平面間の移動を最適にする歩行のアプローチと、目的位置までの移動を各平面で歩数を最小にすることで高速に移動することが求められる。開発したシミュレータ上で6脚ロボットの作業領域解析をすることで、歩行パターンを最小かつ安定に移動可能とする配置を探索するアルゴリズムを開発する。

- 3) 未計測障害物衝突時の適応歩行

小型のカメラや測距センサに頼らず、脚の関節ごとに必ず存在する目標角度に対する誤差を計測可能とする角度センサを用いることで、ロボットに衝突した障害物の位置を推定するアルゴリズムの開発をする。また、推定した障害物を単純な反射行動を利用した回避を行う適応歩行アルゴリズムを開発する。

### 4. 研究成果

- 1) 抗重力環境下における障害物を考慮した歩行の安定性を実現する脚配置計画

トライポッド歩容の3脚交互歩行を2組の三角形形状の交互配置のパターンと考え、目標位置までに障害物と衝突することなく最小の歩数を探索する問題に帰着するモデルを提案した。この歩行モデルを利用することで、探索手法の一つであるA\*アルゴリズムを用いて目的位置までの最適歩行経路を探索することが可能となった。また、図2のよ

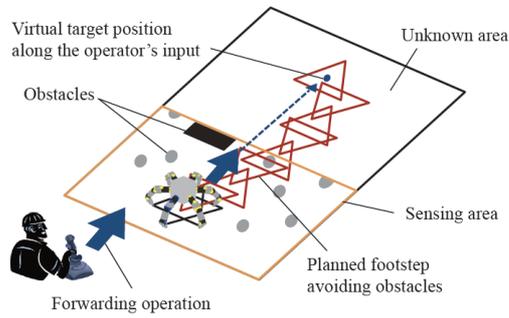


図2 遠隔操作と逐次脚配置計画

うに遠隔操作を行うことを想定した場合、目標位置や移動する方向は逐次変更されると考えられる。この問題に対し、一度探索した情報を再利用することが可能である D\*Lite アルゴリズムを用いることで、高速に歩行計画を修正することが可能となり、実時間の遠隔操作にも適用可能となることを示した。

2) 環境認識結果に基づく異なる移動平面への安定な乗り移りを実現する移動計画

隣接する平面へ移乗する際のキーポイントとなる姿勢の設計手法と、その姿勢を実現するための作業領域の探索手法を提案し、幾何学的に隣接平面へ乗り移り可能な脚姿勢を求めた。ロボットが立っている床面から、床面に対して 90° の壁面に移乗する場合を例にキーポイント姿勢を図3に示す。ロボットの胴体は最終的に乗り移る面と平行になるまで姿勢を変更するものと考え、乗り移る前の姿勢変化と乗り移った後の姿勢変化が対象となる場所でキーポイント姿勢を定義した。このキーポイント姿勢でロボットの脚が双方の壁に接地可能である脚先の作業領域を逐次解析していくことで、最適なキーポイント姿勢を導き出す。図4に脚先の作業領域の一例を示す。作業領域上に複数の接地候補点があるため、接地脚の姿勢が柔軟に変更が可能であると想定し、接地位置を中心とした作業領域が大きく取れる場所を評価値とした最適値探索手法により、脚位置を選定するアルゴリズムを開発した。

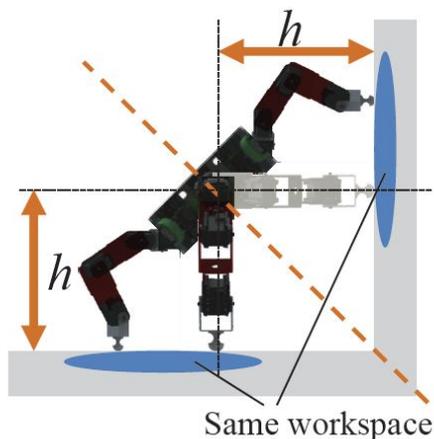


図3 異平面移乗時のキーポイント姿勢

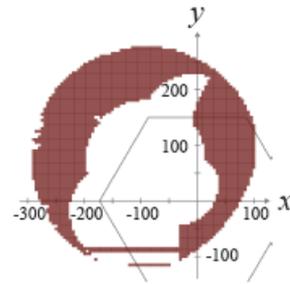


図4 脚の平面上の作業領域解析

提案手法は、異なる角度の壁面間での歩行パターンを自動的に探索可能であり、シミュレーションにより有効性が示された。

3) 未計測障害物衝突時の適応歩行

ロボットが障害物と衝突するとき、図5に示すように、脚と衝突する場合とロボットの本体に直接衝突する場合の2つに分けられる。この2つの状態を、動力学シミュレータ上のロボットで図6に示すように様々な条件で衝突実験を繰り返すことで、各足に加わる力が理想的な歩行状態と異なる情報を蓄積することができる。その情報に基づき、サポートベクターマシンと呼ばれる機械学習手法により衝突場所を推定するデータベースを構築することで、衝突場所を推定する手法を提案した。衝突状態をロボットの理想的なモデルから計算する手法で推定する手法よりも、シミュレーションにより学習された衝突推定アルゴリズムの方が高精度に衝突位置を推定することが可能となった。また、推定された衝突位置に擬似的なポテンシャル場を与えることで、障害物を受動的な行動変容で避けることのできる手法を提案し、実ロボットによる実験で有効性を示した(図7)。

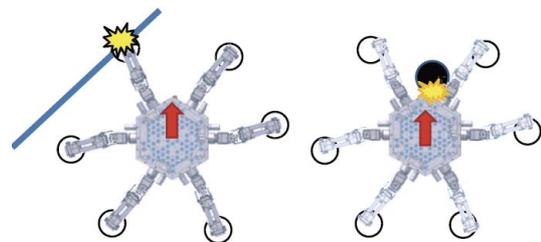


図5 衝突位置の判定例

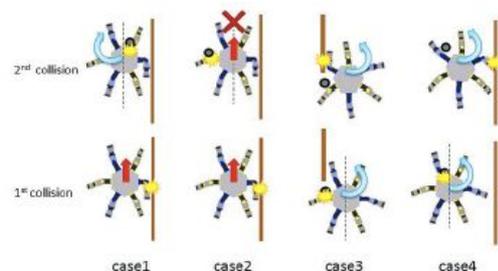


図6 様々な衝突例

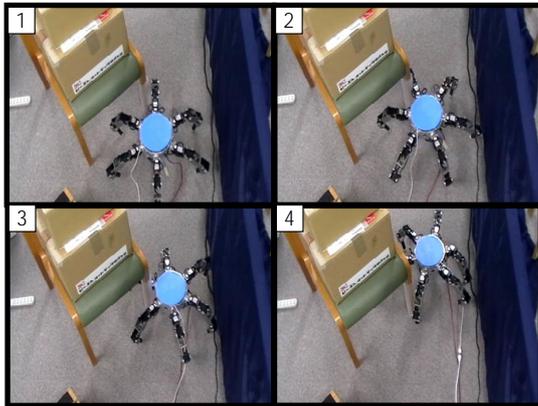


図7 実ロボットでの障害物回避

講演会 2015 (ROBOMECH2015),  
2A2-N06、2015年5月18-19日、京都  
市勤業館「みやこめっせ」(京都府・京都  
市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田窪 朋仁 (TAKUBO, Tomohito)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80397695

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2件)

Tomohito Takubo, Keishi Kominami,  
Kenichi Ohara, Yasushi Mae, Tatsuo Arai,  
"Collision Avoidance Using Contact  
Information with Multiple Objects by  
Multi-Leg Robot", Journal of Robotics  
and Mechatronics, Vol. 28, No. 1, pp.  
17-30, Apr. 2016, DOI: 10.20965, 査読  
有

Daiki Kobayashi, Tomohito Takubo,  
Atsushi Ueno, "Model-Based Footstep  
Planning Method for Biped Walking on 3D  
Field", Journal of Robotics and  
Mechatronics, Vol. 27, No. 2, pp.  
156-166, Apr. 2015, DOI: 10.2096, 査  
読有

### 〔学会発表〕(計 4件)

新 裕哉, 市川 優里, 上野 敦志, 田窪 朋  
仁, "6脚ロボットの遠隔操縦システムの  
ための脚配置計画", ロボティクス・メカ  
トロニクス講演会 2016  
(ROBOMECH2016), 1A2-07A3, 2016  
年6月9-10日、パシフィコ横浜(神奈  
川県・横浜市)

新 裕哉, 田窪 朋仁, 市川 優里, 上野 敦  
志, "6脚ロボットによる異平面移乗動作、  
第16回計測自動制御学会システムイン  
テグレーション部門講演会(SI2015)、  
1D3-6, 2015年12月15-16日、名古屋  
国際会議場(愛知県・名古屋市)

Yuya Atarashi, Tomohito Takubo,  
Atsushi Ueno, "Footstep Planning for  
Tripod Gait in Obstacle Environment",  
The 26th 2015 International  
Symposium on Micro -  
NanoMechatronics and Human Science  
(MHS2015), MP2-2-1, 2015年11月  
23-25日、名古屋大学(愛知県・名古屋  
市)

新 裕哉, 田窪 朋仁, 上野 敦志, "障害物  
環境下におけるトライポッド歩容の脚配  
置計画", ロボティクス・メカトロニクス