

# 不連続姿勢変化を考慮した、災害対応ロボットの経路計画 手法の開発

## Path Planning Method for Disaster Response Robot Considering the Discontinuous Posture Change

○佐々木大翔\*, 成瀬継太郎\*

○Hiroto Sasaki\*, Keitaro Naruse\*

\*会津大学

\*University of Aizu

キーワード： 経路計画 (path planning), 不連続姿勢変化 (discontinuous posture change), 予測不可能性 (unpredictability)

連絡先： 〒965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀上居合 90 会津大学大学院 コンピュータ理工学研究科 コンピュータ・情報システム学専攻 成瀬研究室 佐々木大翔, Tel: (080) 9014-6910, E-mail: [m5261156@u-aizu.ac.jp](mailto:m5261156@u-aizu.ac.jp)

## 1. はじめに

災害対応ロボットは3次元の複雑な路面である災害現場で、タスクを次々とこなす。ロボットは、この複雑な路面上で安全かつ効率的に経路を計画すべきである。しかし、地面への適応度はまだ高くないと言える。それは、複雑な路面上でロボットがごく短い時間で姿勢を大きく変えたときの影響を考慮しきれていないからだ。本論文では、経路計画の前段階として、シミュレーションソフトウェア「Choreonoid<sup>1)</sup>」内で、Continuous Ramp<sup>2)</sup>を模したモデルを用いて、これらの急激な姿勢変化を観測する。

## 2. 導入

災害対応ロボットのための自動運転システムは、人間にとって危険な環境である災害現場で活動できるように開発される。障害物を避けたり、安定な経路を探索する経路計画手法は沢山の研究者たちによって開発されてきた。ほとんどの場合、平面か、地面の傾斜が滑らかに変化する環境で行われている。しかし、災害現場はとても複雑な環境である。起伏の多い地形、障害物、瓦礫の上を移動する必要がある場合がある。ロボットの姿勢が大きく傾くような地面形状が考えられる。これらのケースでは、ごく僅かな時

間でロボットの姿勢が大きく変わるため、ロボットが斜面に叩きつけられて跳ね、滑り落ちるといった現象が起これ、ロボットの次の姿勢を予測することが困難になってくる。実際、この動きでは沢山の物理現象が働いている。ミクロな視点で見れば、力学に従っているため、決定論的、つまり予測可能である。言い換えれば、考えられる細かな物理現象もすべて用いれば、ロボットの動きを説明することはできる。しかし、すべてのミクロな物理現象を観測し、ロボットの挙動を説明するのはとても困難である。逆に、シミュレーションを用いた検証は決定論的だと言える。なぜなら、シュミレーターで行われる動作はすべて数値計算で行われているからだ。本研究では、このミクロな物理現象によって引き起こされる現象をシュミレーション内で再現するため、ロボットの状態に外乱を加えて検証を行う。沢山の試行を行うことで、各状態の予測不可能性の大きさ、範囲を評価する。そして、この予測不可能性を評価したコスト関数を作成することを最終的な目標としている。この論文ではその一環として、次の時刻におけるロボットの実際の状態と、前の時刻から算出されたロボットの予測状態との誤差を観測し、ロボットの不連続姿勢変化について調べる。不連続な姿勢変化が発生するポイントでの傾斜勾配とロボットの進行方向角度の組み合わせを使用して、ロボットの動作をシミュレートする。その上で、エラーが分析され、その特性が考慮される。

### 3. 関連研究

洞窟内の起伏の多い地形での、安全で効率的な経路計画とナビゲーションを提案した研究がある。<sup>3)</sup>地盤の特性を反映した新しいダイクストラアルゴリズムにより、パスが短く、3次元勾配の変化が少なく、エネルギー消費量が少ない最適なパスプランニングを実現した。ダイクストラアルゴリズムが選択されたのは、地面の状況を考慮してヒューリスティック関数を作成することが非常に困難であったためだ。走行距

離やエネルギー消費量は、地面の特性に依存する。

対して、ヒューリスティックを搭載したA\*アルゴリズムを用いて、経路計画を行った研究も存在する。<sup>4)</sup>その研究では、経路距離が短く、密集した岩や高低変化によるリスクが低い経路計画を実施した。

ロボットの安全性を考慮して、ロボットの姿勢変化を少なくすることは非常に重要である。ただし、災害現場での活動は、時間的制約および空間的制約があるため、通れる場所にも制限がかかるリスクが存在すると考えられる。したがって、不連続な姿勢変化への対応が必要になる場合がある。

## 4. 手法

### 4.1 環境

実験コストを削減するため、本研究ではコロノイドというシミュレーションソフトウェアをつかって実験する。図1は、そのソフト内でロボットモデルと傾斜モデルを用意したときの図である。

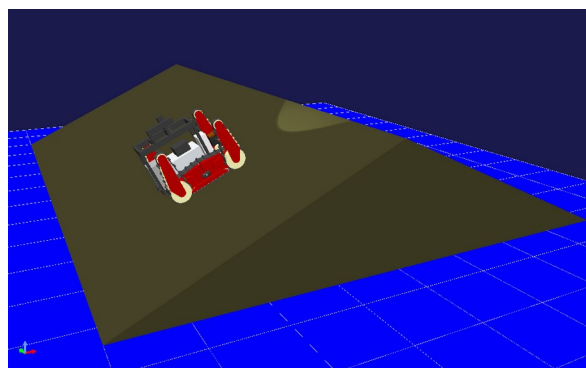


図1: 実験環境

### 4.2 ロボットのモデル

レスキューロボットの移動機構としては、クローラーが一般的である。ロボットモデルは腕のない「アイズパイダー」を用いる。このロボットには、2つのメインの大きなクローラー

がある。その上、メインローラーの前後に「フリッパー」と呼ばれるサブローラーがそれぞれ2つある。図2は、本研究で使用した腕のない「アイズスパイダー」のモデルである。このプロジェクトでは、問題を単純化するために、ロボット本体に装備されているすべてのサブローラーが90度に固定されている。

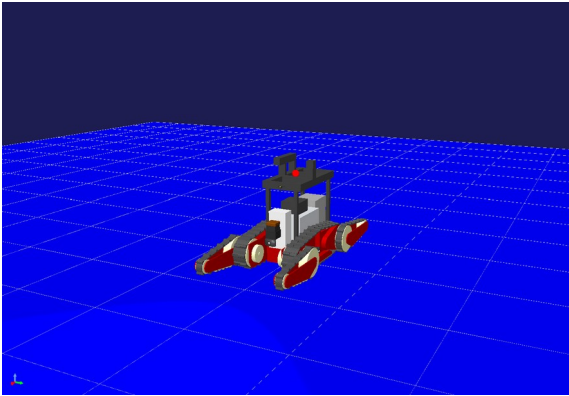


図2: コレオノイド内での、「アイズスパイダー」モデル

### 4.3 アプローチ

山頂を横切るロボットの不安定性はコストとして表される。詳細には、コストを示すために、実際のロボットの姿勢とロボットの予測姿勢との誤差が調査される。姿勢には、ロボットの移動と進行方向の角度（以降、方向角と呼ぶ）の2つの情報が含まれる。実際の姿勢はシミュレーターで計算する。ロボットの予測姿勢は、以下の入力値と定数値で推定される。これらの値は、図3と図4で説明される。

- 入力値
  - 坂の角度 -  $\theta$   
( $\theta = 5, 10, 15, 20, 25$ )
  - 初期段階でのロボットの位置座標 -  $(x, y)^T$
  - 初期段階での方向角 -  $\varphi$   
( $\varphi = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ )
- 定数
  - ロボットの速度 -  $v =$  約 0.3 m/s
  - 計測時間 -  $t = 2$  秒
- 出力値
  - 実際のロボットの位置座標 -  $(x', y')^T$

- 実際のロボットの方向角 -  $\varphi'$
- ロボットの予測位置 -  $(x'', y'')^T$

予測座標は、以下の2つの式で計算される。基本的にこれらの座標は、傾斜面モデルを平坦化した展開図にプロットされる。

$$x'' = vt \cos \varphi + x / \cos \theta \quad (1)$$

$$y'' = vt \sin \varphi + y \quad (2)$$

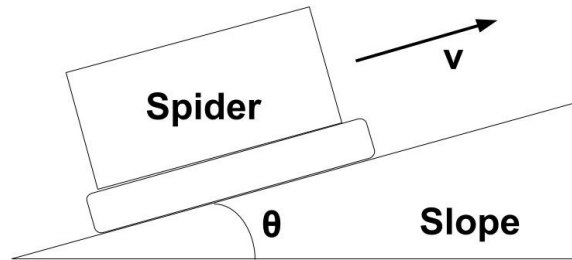


図3:  $v$  と  $\theta$  の定義

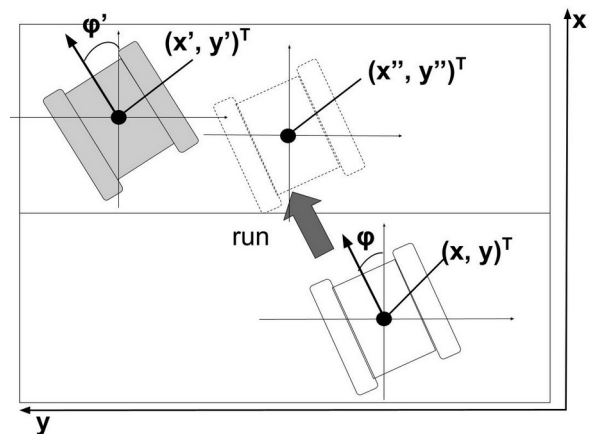


図4:  $(x, y)^T$ ,  $\varphi$ ,  $(x', y')^T$ ,  $\varphi'$  と  $(x'', y'')^T$  の定義

位置誤差は、以下の式(3)より、予測位置と実際の位置の  $x$  座標と  $y$  座標の差を2乗して加算することによって得られるユークリッド距離  $\Delta d$  として表す。

$$\Delta d = \sqrt{(x' - x'')^2 + (y' - y'')^2} \quad (3)$$

方位角誤差は、初期方位角と計測後の方位角の差として表される。以下の式(4)は、それを  $\Delta \varphi$  として表したものである。

$$\Delta \varphi = \varphi' - \varphi \quad (4)$$

## 4.4 計測方法

ロボットが山頂をまたぐ様子を2秒間観測する。各方位角で20個のデータを収集する。測定方法は以下の手順で行われる。

- 山頂に向かってロボットを走らせる。
- ロボットが山頂に到達したときに、ロボットの初期位置と方位角を記録する。
- ロボットが山頂をまたぐ2秒間で、1ミリ秒単位でロボットの位置と方位角を記録する。
- 2秒が経過したら、計測を止める。

## 5. 結果

### 5.1 x, y 座標の誤差

表1, 2は、各傾斜角と方位角における $\Delta d$ を表したものである。加えて、図5は式(3)の結果を棒グラフで表したものである。

表1. すべての坂の傾斜角と、方位角3パターン ( $\varphi = 0, 15, 30$ ) での $\Delta d$ の結果

	$\varphi=0$	$\varphi=15$	$\varphi=30$
$\theta=5$	0.01	0.00	0.01
$\theta=10$	0.02	0.04	0.04
$\theta=15$	0.09	0.09	0.11
$\theta=20$	0.21	0.23	0.26
$\theta=25$	0.75	0.82	0.74

表2. すべての坂の傾斜角と、方位角3パターン ( $\varphi = 45, 60, 75$ ) での $\Delta d$ の結果

	$\varphi=45$	$\varphi=60$	$\varphi=75$
$\theta=5$	0.01	0.01	0.00
$\theta=10$	0.03	0.02	0.01
$\theta=15$	0.08	0.05	0.02
$\theta=20$	0.21	0.13	0.03
$\theta=25$	0.63	0.37	0.18

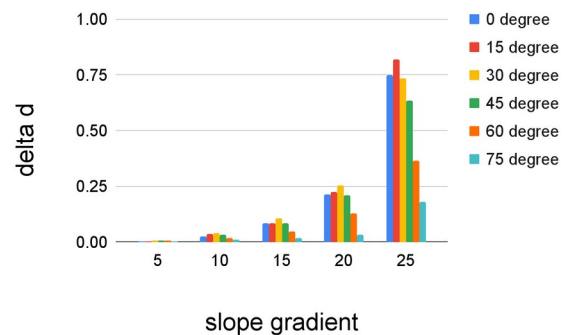


図5. 坂の傾斜角と方位角での $\Delta d$ をグラフで可視化したもの

### 5.2 方位角の誤差

方位角誤差 $\Delta\varphi$ と初期方位角に加わる外乱との関係を図6から図11のグラフに表した。各グラフには5種類の図がある。各図の説明、特に点の色の意味は以下の通りになる。

- 赤 - 坂の勾配が5度するとき
- オレンジ - 坂の勾配が10度するとき
- 黄色 - 坂の勾配が15度するとき
- 緑 - 坂の勾配が20度するとき
- 青 - 坂の勾配が25度するとき

誤差が正の値だった場合は、ロボットが右に回転したことを意味する。

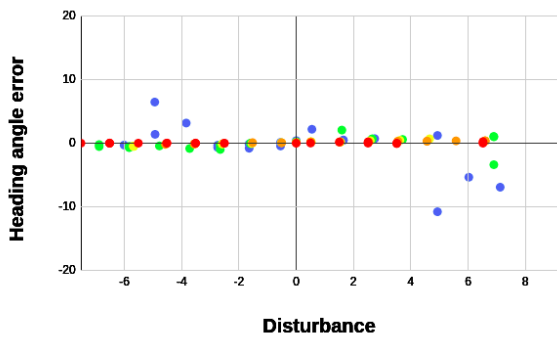


図6. 方位角が約0度の場合の分布と方位角誤差の関係。

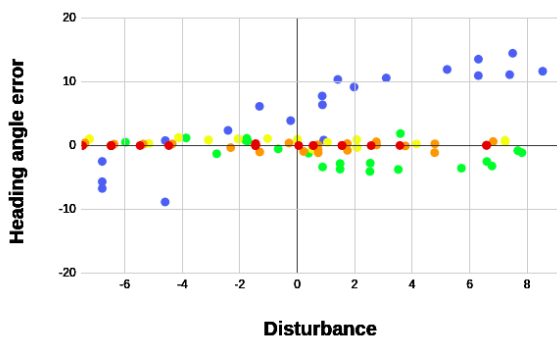


図7. 方位角が約15度の場合の分布と方位角誤差の関係。

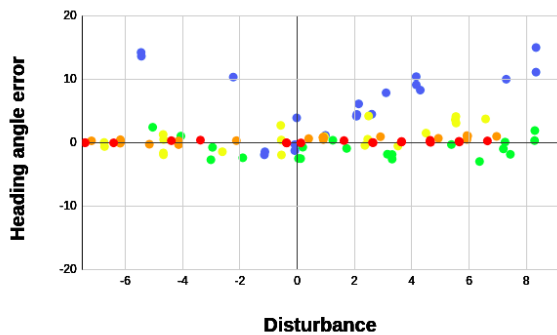


図8. 方位角が約30度の場合の分布と方位角誤差の関係。

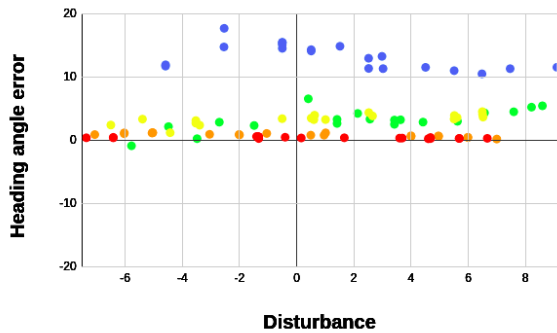


図9. 方位角が約45度の場合の分布と方位角誤差の関係。

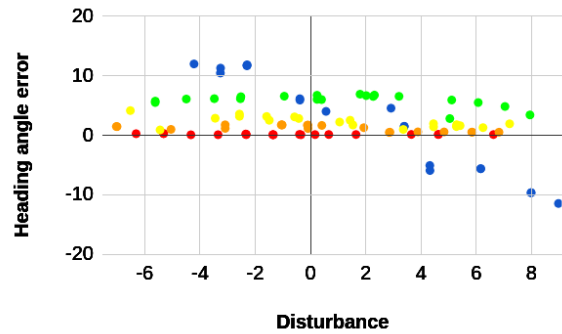


図10. 方位角が約60度の場合の分布と方位角誤差の関係。

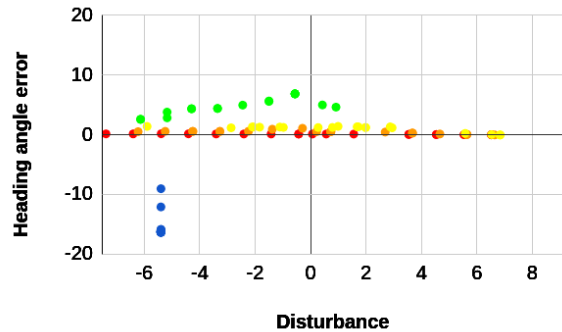


図11. 方位角が約75度の場合の分布と方位角誤差の関係。

## 6. 議論

### 6.1 位置的特性

坂の傾斜が緩やかになるほど、実際の位置は予測位置に近くなった。それとは逆に、坂の傾斜が大きくなるに連れて、誤差は大きくなった。方位角について見ると、15度や30度といった中間の値で最も位置の誤差が大きくなった。他の方位角と比べて、60度や75度で山頂に侵入したときには、誤差は小さかった。検証では、山頂をまたいだときの不連続変化によって、ロボットは姿勢、とくにピッチ角を大きく変化させた。そして、ロボットが下り坂に向かって落ちたとき、前向きのトルクが発生してx方向の正の力が発生したと考えられる。坂の傾斜が大きくなるに連れて、この正方向の力は強くなった。15度や30度の例では、x方向とy方向にず

れが発生し、特にx方向ズレが大きかった。前向きのトルクの影響を強く受けたため、このように誤差が大きくなったと考えられる。それに対して、前向きのトルクの影響をあまり受けない60度や75度の場合は、y方向の誤差のほうが大きかった。

## 6.2 方位角的特性

勾配勾配が5～15度の場合、どのグラフでも誤差は5～-5度の範囲内だった。しかし、勾配勾配が20になると、方位角誤差の範囲が大きくなり、その傾向が現れた。方位角が15度前後から40度前後で誤差が負の値になった。ただし、方位角が40度を超えると、誤差は正の値になり、ロボットは反時計回りに回転した。25度の勾配では、誤差がより顕著に現れた。 $\varphi = 0$ から $\varphi = 15$ では、0から-10までの負の誤差が観測され、後に誤差は正になって増加した。しかし、方向角が30度に近くなるに連れて誤差も減少した。方向角が30度以上の範囲では、60度まで誤差は増加し続けたが、それ以降は減少する結果となった。

## 6.3 失敗例

勾配25度の斜面をロボットが75度の方位角で進入し、ロボットは山頂を横切ったが、2つのメインクローラが斜面に接触し、ロボットは左折した。その結果、山頂地点を通過した時点で、方位角は約70度に収束。図11のグラフで点が左下にあるのはそのためである。

また、 $\varphi=75$ 付近、 $\theta=20$ の場合、例えば、 $\varphi=81$ で山頂を横切ろうとしたとき、ロボットの胴体の下端が山頂の先端に接触し、山頂のラインに沿って進んだ。その結果、ロボットの中心座標が山頂の座標に到達できなかった。一方、 $\varphi=77.5$ の場合は、本体下部が山頂でつかえ、両方のメインクローラが斜面の表面に接触していないため、ロボットはそれ以上動くことがで

きなかった。中心座標は山頂の座標に少し到達したが、ロボットは頂上の手前で後退した。

## 7. 結論

本研究では、レスキューロボットの不連続な姿勢変化を、実際のロボット競技で使用されるタスクに関連した環境で調査した。山頂を横切る動きを観察し、不連続な姿勢変化とロボットの挙動を調べた。坂の勾配とロボットの進行方向の角度の組み合わせによって、誤差の特徴が異なることがわかった。これらの結果をヒューリスティック関数の評価項目に加え、シミュレーション環境での経路計画に研究を拡張する。シミュレーション検証が完了したら、実際のスパイダーで検証するシステムの開発を行う。

## 参考文献

- 1) S. Nakaoka, "Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework", 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 79-85, 2012, doi: 10.1109/SII.2012.6427350.
- 2) Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Continuous Pitch/Roll Ramps1
- 3) SANTOS, Alexandre S., et al. "Path planning for mobile robots on rough terrain", Proc. 2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE), pp. 265-270, 2018.
- 4) JEDDISARAVI, Kossar; ALITAPPEH, Reza Javanmard; GUIMARÃES, Frederico G. "Multi-objective mobile robot path planning based on A\* search", Proc. 2016 6th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), pp. 7-12, 2016.