

# 不整地走行移動ロボットの位置誤差を考慮したロバストな経路計画

○土居 悠輝, 池 勇勲, 田村 雄介 (東京大学),  
池田 裕樹, 梅村 篤志, 金島 義治, 村上 弘記 (株式会社 IHI),  
山下 淳, 浅間 一 (東京大学),

## Robust Path Planning against Position Error for UGVs in Rough Terrain

○ Yuki DOI, Yonghoon JI, Yusuke TAMURA (University of Tokyo),  
Yuki IKEDA, Atsushi UMEMURA, Yoshiharu KANESHIMA,  
Hiroki MURAKAMI (IHI Corporation),  
Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA (University of Tokyo)

Abstract : We propose a novel path planning method considering errors for off-load UGVs (unmanned ground vehicles) based on 3D terrain map information. Previous studies on path planning of the UGV traveling on rough terrain did not manage position uncertainties caused by GPS and control velocities. The proposed method enables UGVs to generate the robust path in the large-scale terrain map.

### 1. 序論

近年, 災害対応活動に移動ロボットなどのロボティクス分野の技術を活用しようとする動きが生じている. 災害発生時に使用されることを想定したロボットが走破しなければならない環境は人間が侵入不可能であることが多いためロボットを遠隔操作することが一般的である. しかし遠隔操作は時間遅れの発生やロボットに搭載したカメラの視野の狭さなどの問題から困難なことが多い. そのため, 災害対応ではロボット自身が周囲の環境を把握し経路を生成して無人走行を行う完全自律型ロボットが望ましい. 近年では無人自動車の競技大会として DARPA グランドチャレンジ<sup>1)</sup> が開催され未舗装な長距離の不整地環境で無人走行するロボットを様々な研究機関が開発したが, これらは走行経路が既知である前提で無人走行を行っている. しかし完全自律型ロボットが未知の環境で転倒などにより走行不能になることを防ぐためには適切な経路を生成することが極めて重要である.

移動ロボットの経路計画の先行研究として田中ら<sup>2)</sup> は運動モデルを考慮し, 大規模な不整地環境での走行経路を生成する手法を提案した. この手法は探索中に移動ロボットの運動モデルを使用することで実際のロボットの挙動に沿った経路を生成することができる. また最大傾斜角や最小回転半径などの移動ロボットの制約条件を守ることでロボットが転倒する経路を生成しない. しかしこの手法ではロボットの移動の際に生じる誤差を考慮していないためその影響で軌道から外れた場合の安全性については保証していない. 加えてこの手法ではロボットの制御速度をランダ

ムにサンプリングしているため初期位置で静止状態からの速度制御ができないなど, 実際のロボットには対応不可能な制御速度における経路が計画される可能性がある.

災害対応ロボットが実際に走行する環境は基地局を設置できず GPS や Galileo などの GNSS (全球測位衛星システム) から正確な位置情報を取得できない可能性が考えられる. また災害時に移動ロボットが悪路を走行することを考えると, 制御入力に対して移動誤差が生じることは十分に予測できる. そのためもし田中らの手法で生成した経路のすぐ近くに障害物がある場合には移動ロボットが衝突する危険性がある.

誤差を考慮した経路計画の手法として Berg ら<sup>3)</sup> は移動ロボットが障害物と衝突する可能性を計算し適切な経路を選択する手法を提案した. しかし生成された経路が適切であるかを判断する手法のため, 生成された経路が有効でない場合に経路生成のやり直しが何度も生じる可能性があった. また探索で想定されていた環境は小規模なものだった.

以上の問題点を踏まえ, 本研究ではロボットが大規模な不整地環境を走行する際に生じる位置誤差を推定し経路探索に反映することで, よりロバストな経路の生成手法を提案する. また, 提案手法は速度のサンプリングを行う際, 直前の速度を反映させてサンプリング範囲を決定するため実際のロボットが対応可能な制御速度に基づく, より現実的な経路を生成可能である.

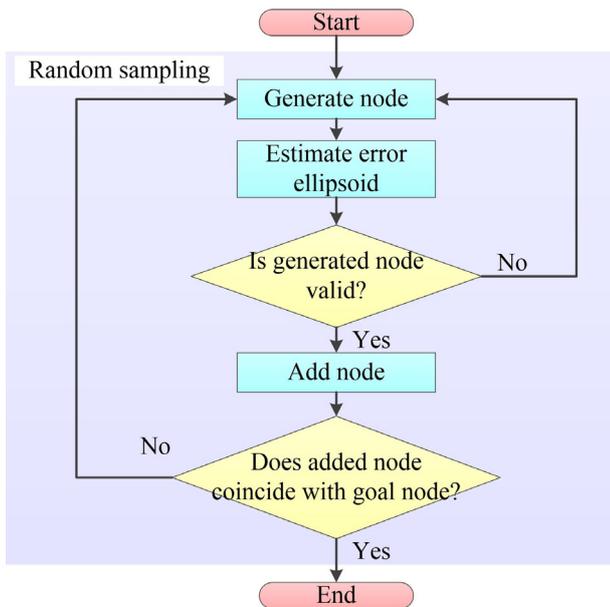


Fig. 1: Flowchart of proposed path planning method.

## 2. 提案手法

### 2.1 問題設定

今回対象としている移動ロボットは4輪自動車である。この移動ロボットにはGNSSが2つ取り付けられているため車両の位置と姿勢を計測可能であると仮定する。先行研究<sup>2)</sup>ではセンシング誤差が生じず、移動ロボットが入力に対して正確に移動するものとして経路生成を行った。しかし、移動ロボットには序論で述べたようにGNSSでのセンシング時に生じる位置と姿勢計測の誤差、制御速度の入力に対して正確に移動しないために生じる移動誤差の2種類の誤差が生じる。本手法ではこの2つの誤差を総称して位置誤差と呼ぶ。移動ロボットには外界情報を取得するためカメラやLiDARなどが搭載されているが今回はこれらで生じる誤差は考慮しない。

本研究では位置誤差の影響で経路から外れた場合も安全性を保障する経路計画手法を提案する。

### 2.2 概要

経路探索手法のフローチャートをFig.1に示す。本研究ではランダムサンプリングに基づく経路探索手法を採用する。このとき探索中に生成されたノードの移動と位置取得時のセンシングで生じる誤差を推定し、マップ上の障害物との衝突検出で誤差楕円体を使用してノードの有効性を判定する。この手順を導入したランダムサンプリングを行うことで位置誤差に対してロバスト性を持った経路を生成する。

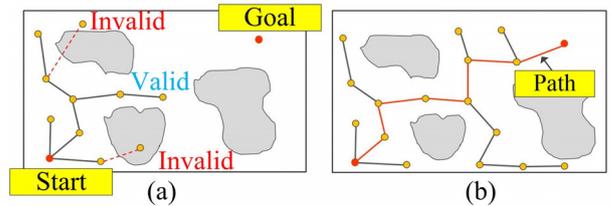


Fig. 2: Concept of random sampling: (a) validity check of nodes and (b) path generation.

### 2.3 ランダムサンプリングによる探索

今回、移動ロボットの経路探索は先行研究<sup>2)</sup>同様ランダムサンプリングに基づいて行う。ランダムサンプリングの概略図をFig.2に示す。ランダムサンプリングとはコンフィグレーション空間内の探索を高速に行うことのできる手法である。まずコンフィグレーション空間内にランダムにノードを生成する。この生成されたノードに対し、空間内の障害物との衝突検出を行い有効であるかどうかを判別していく。その後有効なノード同士を接続していくことでスタートからゴールまでの経路を探索する。このとき衝突検出には衝突検出ライブラリFCL (a Flexible Collision Library)<sup>4)</sup>を使用する。FCLによって環境地図との衝突検出を行うことで有効なノードかどうか判別し、有効なノード同士を接続していく。本研究で探索のプランナは先行研究同様PDST (Path-Directed Subdivision Trees)<sup>5)</sup>を使用する。

### 2.4 誤差楕円体を使用したノードの有効性の判定

先行研究<sup>2)</sup>の手法ではランダムサンプリング時、生成されたノードに対して誤差を考慮しておらずロボットが経路から外れることなく正確に次のノードへ移動すると仮定していた。しかし実際の移動ロボットで位置誤差が生じないと仮定するのは現実的ではない。よって本手法では位置誤差によってロボットが正確に移動できないためにずれる範囲を誤差楕円体として表現する。先行研究では障害物との衝突検出にロボットと同等の直方体を使用していたが、この誤差楕円体と障害物との衝突検出を行うことで位置誤差にロバストな経路生成を行う。

誤差楕円体の形及び大きさはロボットの位置と姿勢に関する共分散行列 $\Sigma$ を座標変換して径の長さを求めた後、ロボットが楕円体内に存在する確率から径を拡張して決定する。拡張する大きさは事前に設定した確率から $\chi^2$ 分布に従い求める。本研究ではEKF (拡張カルマンフィルタ)<sup>6)</sup>を使用して、移動ロボットの制御入力やGNSSの観測によって常に変化する共分散行列を計算する。

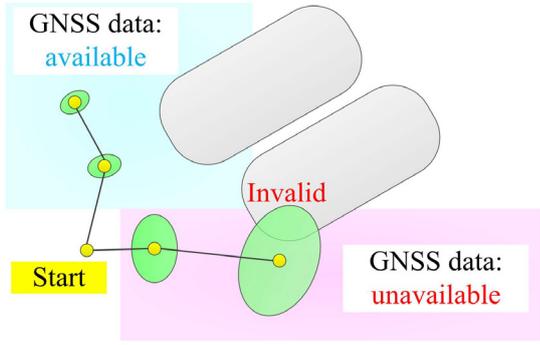


Fig. 3: Transitions of ellipsoids under different GNSS conditions.

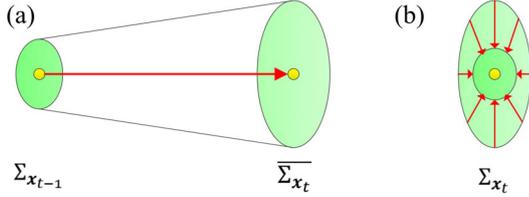


Fig. 4: Changes of ellipsoids by EKF: (a) predict step and (b) update step.

EKF は非線形な運動モデルに従うロボットの位置と共分散行列を推定するための手法で予測ステップと修正ステップに大きく分けられる。このEKFを使用した経路探索手法は複数存在するが<sup>3, 7)</sup>、いずれも障害物の少ない単純なマップでの探索にとどまっている。本研究ではEKFによりロボットの共分散行列を推定し、そこから得られる誤差楕円体と環境マップの3次元空間での衝突検出を行うことで探索を進めていく。EKFによる共分散行列の推定は各ノード生成時に行われる。

Fig.3にGNSSの取得状況による誤差楕円体の変化の概念図を示す。この誤差楕円体を使用して衝突検出を行うことでロボットの移動で生じる誤差と位置取得で生じる誤差の両方を考慮した経路を生成できる。そのため遮蔽物などでGNSSから信号が取得することができない領域が存在する環境での探索を行うことや、移動誤差が異なるロボットに対して適切な経路を探索することができる。

## 2.5 EKF (拡張カルマンフィルタ) による共分散行列の推定

Fig.4にEKFによる誤差の変化の概略図を示す。ロボットの位置、姿勢はセンシングの誤差があるために不確かで図の楕円体内のどこかに存在している。まず前の状態の共分散行列  $\Sigma_{x_{t-1}}$  を元にロボットの移動で生じる誤差に関する共分散行列  $\bar{\Sigma}_{x_t}$  を予測ステップで求める。このとき誤差は蓄積されるため誤差楕円体は大きくなる。この移動の誤差によって増大した共分散行列  $\bar{\Sigma}_{x_t}$  を修正ステップでGNSSの位置観測によって修正する。この修正ステップを

通して誤差楕円体は縮小し、最終的に得られた  $\Sigma_{x_t}$  を移動後の共分散行列とする。

### 2.5.1 EKF 予測ステップ

予測ステップではロボットの移動で生じる誤差の共分散行列を推定する。ロボットの移動後の位置  $\mathbf{x} = (x, y, \psi)^T$  は速度と角速度の制御入力  $\mathbf{u} = (v, \omega)^T$  に対し、次の運動モデル  $\mathbf{f}$  に従って予測される。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{f}(t) = \begin{pmatrix} x_{t-1} + v_t \Delta t \cos(\psi_{t-1} + \frac{\omega_t \Delta t}{2}) \\ y_{t-1} + v_t \Delta t \sin(\psi_{t-1} + \frac{\omega_t \Delta t}{2}) \\ \psi_{t-1} + \omega_t \Delta t \end{pmatrix}. \quad (1)$$

またこの運動モデルの位置に関するヤコビアン  $\mathbf{J}_x$  と入力に関するヤコビアン  $\mathbf{J}_u$  はそれぞれ

$$\mathbf{J}_x = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_u = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}}, \quad (3)$$

となる。EKF 予測ステップではこのヤコビアンと入力の共分散行列  $\Sigma_{u_t}$  を使用し移動後の共分散行列  $\bar{\Sigma}_{x_t}$  の推定を次のように行う。

$$\bar{\Sigma}_{x_t} = \mathbf{J}_{x_t} \Sigma_{x_{t-1}} (\mathbf{J}_{x_t})^T + \mathbf{J}_{u_t} \Sigma_{u_t} (\mathbf{J}_{u_t})^T. \quad (4)$$

こうして得られた  $\bar{\Sigma}_{x_t}$  はロボットが移動するたびに誤差が蓄積され大きくなる。そのためEKFではセンサ情報から修正ステップを行うことで補正を行う。

### 2.5.2 EKF 修正ステップ

修正ステップでは予測ステップで計算された共分散行列をGNSSによる位置観測からの情報によって修正する。観測で生じる誤差の分散行列を  $\mathbf{Q}$ 、ヤコビアンを  $\mathbf{H}$  とする。 $\mathbf{H}$  は観測値とロボットの状態の関係を定義する行列であり、本研究ではGNSSの観測値はそのままロボットの状態を示しているため単位行列となる。

このとき修正後の共分散行列  $\Sigma_{x_t}$  は次のように計算される。

$$\mathbf{S}_t = \mathbf{H}_t \bar{\Sigma}_{x_t} (\mathbf{H}_t)^T + \mathbf{Q}_t, \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_t = \bar{\Sigma}_{x_t} (\mathbf{H}_t)^T (\mathbf{S}_t)^{-1}, \quad (6)$$

$$\Sigma_{x_t} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t) \bar{\Sigma}_{x_t}. \quad (7)$$

最終的に計算された  $\Sigma_{x_t}$  を移動ロボットの誤差として誤差楕円体を計算し、衝突検出を行う。

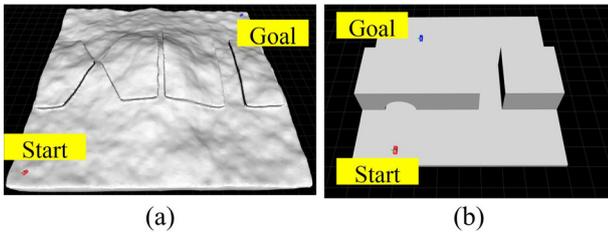


Fig. 5: Simulation environments: (a) map 1 and (b) map 2.

## 2.6 並進速度のサンプリング

ロボットへの入力速度を先行研究<sup>2)</sup>ではあらかじめサンプリング範囲を探索前に定めた正規分布を使用し求めていた。そのため実際のロボットには対応不可能な速度制御を行う経路が生成されてしまった。しかし本手法ではサンプリング範囲と正規分布を固定ではなく前の状態の速度を利用して求めることでこの問題を解決した。

## 3. 経路生成シミュレーション

### 3.1 シミュレーション条件

本手法の有効性を確かめるために経路生成のシミュレーションを行った。実行環境として Intel corei7-6700 (3.40GHz), RAM16.0GB の端末を使用した。

マップの外観図を Fig.5 に示す。今回のシミュレーションでは縦 200 m × 横 200 m のマップ 1, 縦 100 m × 横 100 m のマップ 2 の 2 種類のマップを使用した。マップ 1 は幅の狭い 5 m の部分が左と中央の道に存在し、右側の道幅は 16 m と広がっている。また不整地環境を想定し、高さ方向の変化も激しくなっている。マップ 2 は環境中に高さ 7 m, 長さ 30 m のトンネルが存在し、トンネル内では GNSS 信号を取得することができないため EKF の修正ステップが行えないと設定した。またマップ 2 では移動誤差の異なる 2 つの条件のロボットに関して探索を行い、経路生成の違いを検討した。探索のスタートは赤い直方体、ゴールは青い直方体でマップ上に示している。GNSS による位置と角度の取得で生じる標準偏差はそれぞれ位置  $x$  と  $y$  で 1.0 m, 角度で 1.0 deg 生じると仮定した。誤差楕円体の大きさは 95 % の確率でロボットが内部に存在するよう決定した。

## 3.2 結果

### 3.2.1 マップ 1 でのシミュレーション結果

Fig.6 にマップ 1 で先行研究<sup>2)</sup>の手法と本研究の提案手法でそれぞれ 5 回ずつ探索を行い生成された経路を重ね

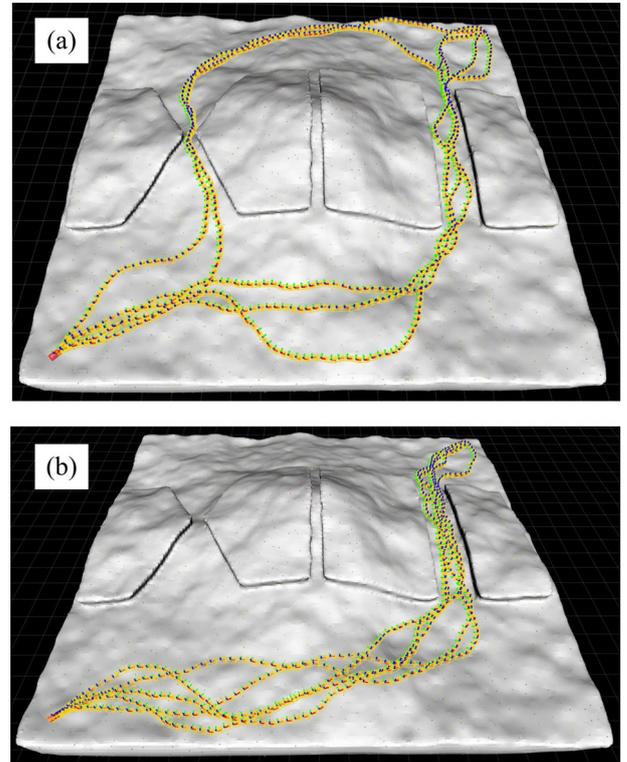


Fig. 6: Generated paths through five repeated experiments on map 1: (a) results of previous research<sup>2)</sup> and (b) results of proposed method.

た図を示す。先行研究の手法で生成された経路を見るとロボットが壁に衝突して走行不能になる危険性のある道幅が狭い道を通る経路が生成された。加えて広い場所でも壁に近く衝突の危険性のある経路も生成された。対して提案手法では左の道や中央の道など危険な道を避け、全ての探索で右の幅が広い道を通る安全な経路を生成した。

また Fig.7 に提案手法で生成された経路と移動ロボットの誤差楕円体を重ねた図を示す。この結果が示すように 3 次元の大規模な不整地で誤差楕円体が衝突しない、障害物からの距離を保った経路を生成することが可能となった。また先行研究同様最大傾斜角や最小回転半径などのロボットの制約条件を守った経路を生成することができた。

Fig.8 に経路走行時のロボットの並進速度を示す。このように本手法では速度の急激な変化を抑えロボットが対応可能な制御速度で走行する経路を生成することが確認できた。

### 3.2.2 マップ 2 でのシミュレーション結果

マップ 2 での経路生成の結果を Fig.9 に示す。このようにマップ 1 同様誤差楕円体がマップに衝突しない経路を生成することができた。また移動誤差の違いによっても異なる結果を示すことが確認できた。マップ 2 に存在するトンネル内部では GNSS による位置情報を取得できず EKF の

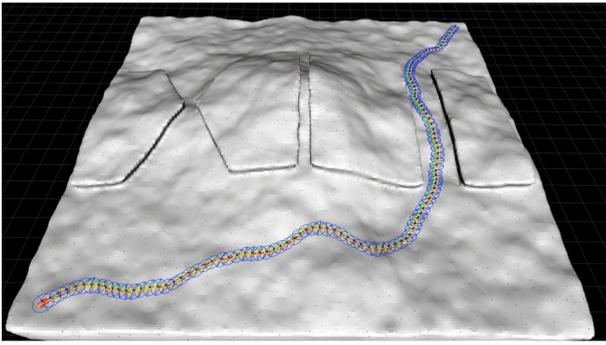


Fig. 7: Generated path depicted with error ellipsoids on map 1.

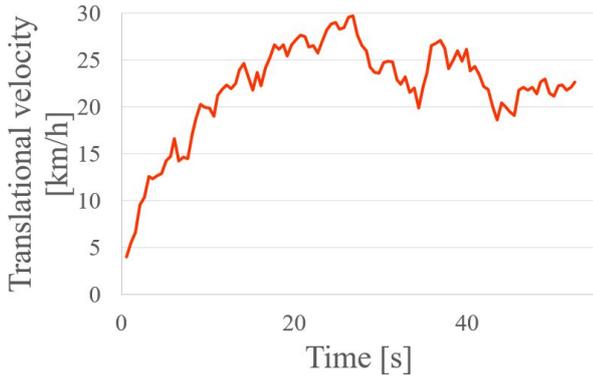


Fig. 8: UGV's translational velocity on generated path.

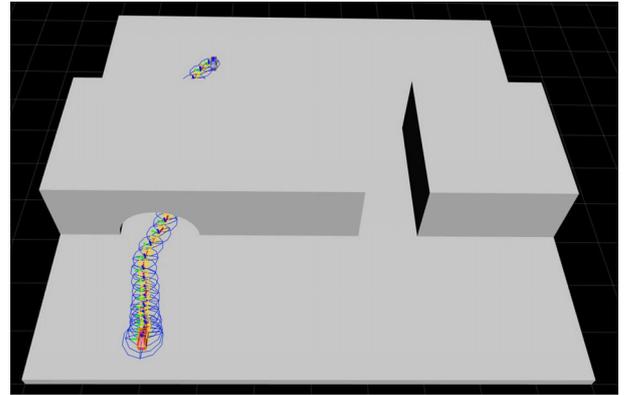
修正ステップを行うことができないため移動で生じる誤差が蓄積していく。そのため Fig.10 が示すように誤差が大きいとトンネル内で誤差楕円体がトンネルよりも大きくなってしまい有効なノードが生成されない。

このように本手法ではロボットの特性に合わせた経路を生成することが可能となっている。

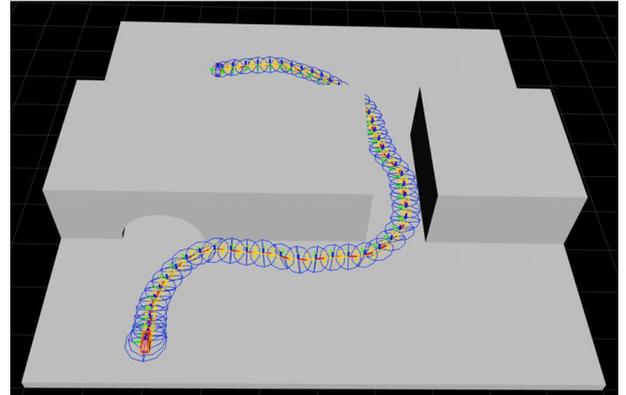
#### 4. 結論

本研究では移動ロボットの位置誤差を考慮することで不整地走行移動ロボットの経路計画においてロバストな経路を生成する手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認できた。また、この手法はマップ2でのシミュレーション結果が示すようにGNSSの取得条件やロボットの移動誤差の設定を変更することで様々な条件に対して適切な経路を生成できる。そのため対象となる移動ロボットの特性を考慮して危険な道を避ける安全な経路の生成が可能となっている。加えて制御速度を直前のロボットの速度を反映してサンプリングすることで、ロボットが対応可能な経路を生成できた。

今後の展望としてオンライン探索による経路生成を考えている。災害などで生じた不整地を対象とした場合、実際の環境が事前に取得していたマップと異なることは十分に



(a)



(b)

Fig. 9: Difference of generated paths depending on error parameters of UGV's movement on map 2: (a) result for small error value and (b) result for large error value.

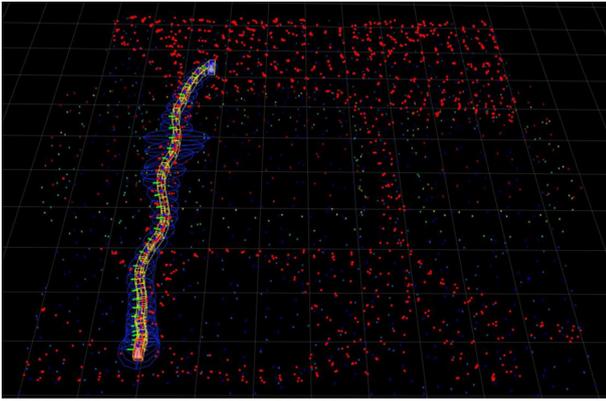
起こり得る。よって走行中にその様な状況が発生した場合にも対応できるオンライン探索による経路生成を導入する。そして実際の移動ロボットで不整地走行実験を行い本手法の有効性の評価をしていきたい。

#### 謝辞

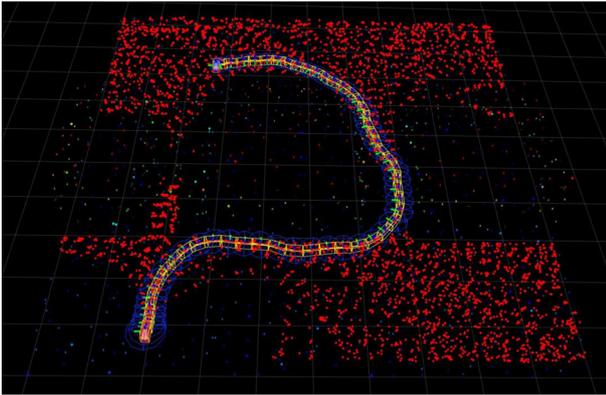
本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施した。

#### 参考文献

- 1) "DARPA Grand Challenge", <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>
- 2) 田中 佑典, 池 勇勲, 田村 雄介, 木村 麻衣, 梅村 篤志, 金島 義治, 村上 弘記, 山下 淳, 浅間 一, "3次元環境地図を用いた不整地走行無人車両の経路計画," 第22回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 203-204, 2017.
- 3) Van Den Berg J., Abbeel P. and Goldberg K., "LQG-MP: Optimized Path Planning for Robots with Motion Uncertainty and Imperfect State Information," the International Journal of Robotics Research, Vol. 30, Issue 7, pp. 895-913, 2011.



(a)



(b)

Fig. 10: Difference of generated nodes depending on error parameters of UGV's movement on map 2: (a) result for small error value and (b) result for large error value.

- 4) "FCL: A Flexible Collision Library", [http://gamma.cs.unc.edu/FCL/fcl\\_docs/webpage/generated/index.html](http://gamma.cs.unc.edu/FCL/fcl_docs/webpage/generated/index.html)
- 5) Ladd A. M. and Kavraki L. E., "Fast Tree-based Exploration of State Space for Robots with Dynamics," Algorithmic Foundations of Robotics VI, Springer Berlin Heidelberg, pp. 297-312, 2004.
- 6) Greg W. and Gary B., "An Introduction to the Kalman Filter," Proceedings of ACM SIGGRAPH, Course 8, 2001.
- 7) Pepy R. and Lambert A., "Safe Path Planning in an Uncertain-configuration Space Using RRT," Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5376-5381, 2006.