

# ファジィ推論を利用した移動ロボットのための不整地の走行可能性推定手法の構築

Construction of Fuzzy Inference-based Terrain Traversability Analysis Method for Mobile Robots

○ 田中 佑典 (東京大)  
正 山下 淳 (東京大)

正 池 勇勳 (東京大)  
正 浅間 一 (東京大)

Yusuke TANAKA, the University of Tokyo, tanaka@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Yonghoon JI, the University of Tokyo, ji@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Atsushi YAMASHITA, the University of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Hajime ASAMA, the University of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

This paper describes a novel rough terrain traversability analysis method for a mobile robot navigation. We focused on the scenario of mobile robot operation in disaster environment with limited sensor data. The proposed method enables mobile robots to analyze terrain traversability of surrounding area and select safe course direction in spite of the limited sensor data acquisition area. Terrain traversability analysis and course direction judgment are realized based on feature value calculation of terrain, fuzzy inference and vector field histogram. The experimental results show that the proposed method can select safe course direction of the mobile robot successfully.

**Key Words:** Mobile robot, Course direction judgment, Terrain traversability analysis

## 1 序論

近年、災害対応活動における移動ロボットの活用に注目が集まっている。災害発生時の移動ロボット運用では、人間が侵入不可能な極めて不安定な領域を移動ロボットが走破しなければならず、不整地走行技術の開発は必須の課題となっている。この中でも不整地領域の走行可能性推定は重要な要素を占めており、DARPA グランドチャレンジにおける技術開発では、無人車両による砂漠地帯での不整地走行が中心的課題として扱われ、様々な研究成果が報告された [1, 2]。しかし、これらの研究では移動ロボットの走行経路が既知という条件が存在しており、災害発生時のような未知環境での移動ロボットの行動を実現するものではない。

屋外、屋内を問わず未知環境内に移動ロボットが存在し不整地上を走行する際には、周囲の不整地領域に対して走行可能性推定を実行し、適切な進路選択を行う必要がある。不整地領域に対する走行可能性推定では、走行不可能な領域は回避し、走行可能な領域は走破するという判断が求められる。これらの判断の下で移動ロボットは適切な進路方向を決定し、行動する。

不整地の走行可能性を推定する手法として、不整地に関する特徴量を算出し線形 SVM (Support Vector Machine) による 2 クラス識別問題へと帰着させる手法が提案されている [3]。この手法では判別器のもととなる教師データを収集する必要があり、人手による判断でこれを与えているため、教師データとしての適切なラベル付けが困難な複雑地形を含んだ環境を対象とした場合には十分な性能を発揮できない可能性がある。

移動ロボット周囲の不整地に関する走行可能性推定と進路方向の決定を行い、行動を実現するための手法として VFH (Vector Field Histogram) によるものが提案されている [4, 5]。これらの手法では、測域センサによって移動ロボット周囲の環境を計測し、高さ地図 (elevation map) を生成している。高さ地図から走行可能性を反映した VFH が生成され、移動ロボットは不整地走行に成功している。しかし、この手法では効果的な VFH 生成のためには移動ロボットを中心として広範囲に渡る高さ地図が必要であるという問題点が指摘されており、センサ情報獲得可能領域が制限される災害環境下での利用には不向きである [6]。

これに対して、筆者らは広範囲に渡る環境地図を必要とせず移動ロボット周囲の不整地に関する走行可能性を推定し、進路方向を決定可能な手法を提案した [7]。この手法では移動ロボット周囲の限定的なセンサ情報から進路方向の決定に成功している一方、進路方向判断が高さ地図をベースに実行されているため、地

図生成に伴い地形情報が欠落してしまう危険性があった。具体的には、走行可能性推定の際に利用する地形特徴量である凹凸と傾斜の 2 値に関して、地図の解像度によっては不整地の特徴を適切に表現することが不可能な場合が存在した。

以上のような問題点をふまえ、本研究では未知環境内に移動ロボットが存在し、センサ情報獲得可能領域が限定されるという制約条件の下で不整地走行を行う際の走行可能性推定と進路方向判断のための手法を提案する。提案手法では教師データを必要とする学習アルゴリズムを利用せず、移動ロボット周囲の限られた領域に関するセンサ情報のみから効果的な VFH を生成し、移動ロボットの進路方向を決定する。ここでは、環境地図生成に伴い地形情報が欠落するという理由から、高さ地図を利用せず、測域センサが獲得した点群データに対して特徴抽出計算を行う。具体的には、処理対象領域の分割と閾値による判断から点群データの選択を行い、各対象領域内の点群データに対して近似平面を算出する。計算された近似平面を利用して複数の地形特徴量を算出する。これらの地形特徴量を基にファジィ推論によって走行可能性推定を行い、VFH を生成する。生成された VFH から移動ロボットの進路方向を決定し、出力する。これらの処理は全て移動ロボット上に搭載された計算機が行い、リアルタイムに実行可能である。

## 2 提案手法

### 2.1 点群データ獲得

移動ロボット上に搭載された測域センサにより周囲の環境に対する点群データを獲得する。このようにして獲得された点群データは、複数回の座標変換を施すことによりロボット座標系  $\Sigma_{\text{robot}}$  の原点に対して  $(x_i, y_i, z_i)$  の形式で表現される点群として処理される。ここで、 $i$  は個別の点群を識別するために付加されるインデックスである。移動ロボット上の測域センサが獲得した点群データの可視化結果に関する一例を図 1 に示す。

### 2.2 点群データ処理領域分割

移動ロボット周囲の環境に関して取得された点群データに対する処理を行うにあたり、移動ロボット前方領域を仮想的な複数の等面積矩形領域へと分割する。この領域分割に関する概念図を図 2 に示す。図 2 における  $L$  は矩形領域の奥行き、 $W$  は矩形領域の幅、 $\theta_k$  は矩形領域の方向ベクトル  $(\cos \theta_k, \sin \theta_k)$  とロボット座標系  $\Sigma_{\text{robot}}$  の  $x$  軸がなす角度である。点群データに対する処理はこれらの矩形領域ごとに行われる。具体的には、高さ情報平均値による処理対象矩形領域の絞り込み、矩形領域内の点群デー

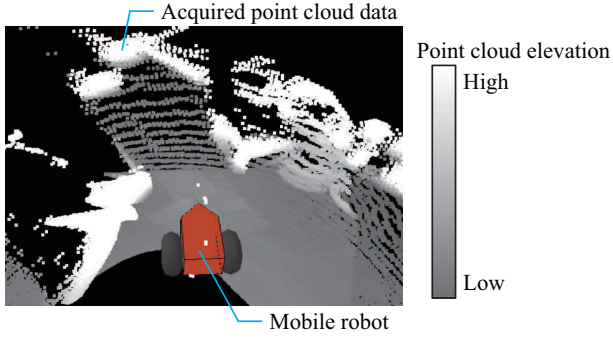


Fig.1 Example of visualized point cloud data acquired by laser range finder.

タに対する近似平面算出, 近似平面を利用した地形特徴量算出, ファジィ推論による走行可能性推定がこれらに相当する.

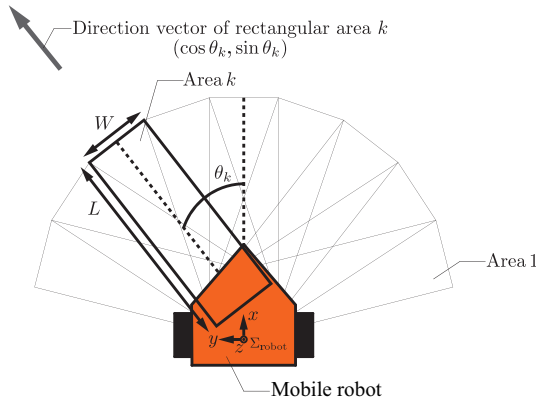


Fig.2 Division of mobile robot anterior region into imaginary rectangular areas.

### 2.3 高さ情報平均値による処理対象矩形領域の絞り込み

矩形領域  $k$  内に存在する点群データの高さ情報である  $z$  座標値  $z_i^{(k)}$  に着目し, これらの平均値  $\overline{z^{(k)}}$  を求める. 提案手法では, 事前に設定された閾値  $z_{th}$  を下回る高さ情報平均値  $\overline{z^{(k)}}$  を持つ矩形領域を走行可能性推定の対象とし, 後の近似平面算出・地形特徴量算出の処理に進む. 高さ情報平均値  $\overline{z^{(k)}}$  が閾値  $z_{th}$  を上回った場合には, 該当する矩形領域は走行不可能であると判断し, VFH 生成の際に大きな正の値として危険度を与える.

### 2.4 点群データに対する近似平面算出

矩形領域上に存在する点群データの平均高さ情報が閾値を下回った矩形領域について, 矩形領域上に存在する点群データに対する近似平面を算出する. インデックス  $k$  を持つ矩形領域に対する近似平面は次の最小二乗計算により求めることができる.

$$(a_k, b_k, c_k) = \arg \min_{(a_k, b_k, c_k)} \sum_{i=1}^{N_k} (a_k x_i^{(k)} + b_k y_i^{(k)} + c_k - z_i^{(k)})^2, \quad (1)$$

ここで,  $(a_k, b_k, c_k)$  は近似平面を定義する要素の組であり,  $(-a_k, -b_k, 1)$  がこの平面の法線ベクトルとなる. また,  $(x_i^{(k)}, y_i^{(k)}, z_i^{(k)})$  は矩形領域  $k$  上に存在する点群でインデックス  $i$  を持つものを表している.  $N_k$  は矩形領域  $k$  上に存在する点群データの総数である.

### 2.5 地形特徴量算出

点群データに対する近似平面算出を行った矩形領域に対して, 複数の地形特徴量を算出する. 提案手法で用いる地形特徴量は近

似平面の法線ベクトル  $(-a_k, -b_k, 1)$  と矩形領域の方向ベクトル  $(\cos \theta_k, \sin \theta_k)$  のなす角によって定義される  $\alpha_{\text{PitchSlope}}^{(k)}$ , 法線ベクトル  $(-a_k, -b_k, 1)$  と矩形領域の方向ベクトルに垂直なベクトル  $(-\sin \theta_k, \cos \theta_k)$  のなす角によって定義される  $\alpha_{\text{RollSlope}}^{(k)}$ , 近似平面と各点群データの距離の分散によって定義される  $\alpha_{\text{Roughness}}^{(k)}$  である.

$\alpha_{\text{PitchSlope}}^{(k)}$  は矩形領域  $k$  上に存在する点群データに対する近似平面の矩形領域ピッチ方向の傾斜 (pitch slope) を表している.  $\alpha_{\text{RollSlope}}^{(k)}$  は矩形領域  $k$  上に存在する点群データに対する近似平面の矩形領域ロール方向の傾斜 (roll slope) を表している.  $\alpha_{\text{Roughness}}^{(k)}$  は矩形領域  $k$  上に存在する点群データに対する近似平面と各点群データの距離の分散をとることにより, 該当矩形領域上に存在する点群データのばらつき, すなわち凹凸度合い (roughness) を表現している. これらを定式化すると, 次のようになる.

$$\alpha_{\text{PitchSlope}}^{(k)} = \left| \arccos\left(\frac{-a_k \cos \theta_k - b_k \sin \theta_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1}}\right) - \frac{\pi}{2} \right|, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{RollSlope}}^{(k)} = \left| \arccos\left(\frac{a_k \sin \theta_k - b_k \cos \theta_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1}}\right) - \frac{\pi}{2} \right|, \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{Roughness}}^{(k)} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (d_i^{(k)} - \overline{d^{(k)}})^2, \quad (4)$$

ここで,  $d_i^{(k)}$  はインデックス  $i$  を持つ個別の点群データと近似平面との距離,  $\overline{d^{(k)}}$  は点群データと近似平面の距離の平均値を示しており, 次の定式化に従う.

$$d_i^{(k)} = \frac{|a_k x_i^{(k)} + b_k y_i^{(k)} + c_k - z_i^{(k)}|}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1}}, \quad (5)$$

$$\overline{d^{(k)}} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \frac{|a_k x_i^{(k)} + b_k y_i^{(k)} + c_k - z_i^{(k)}|}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1}}. \quad (6)$$

### 2.6 ファジィ推論

点群データより算出された各地形特徴量を入力として, ファジィ推論によって矩形領域の走行可能性  $\tau_k$  を求める. 提案手法では, 代表的なファジィ推論モデルである Min-Max-重心モデルを採用した [8].

#### 2.6.1 メンバシップ関数

提案手法では, ファジィ推論に対する入力値が3種類の地形特徴量となっているため, 使用するメンバシップ関数は3種類となる.  $\alpha_{\text{PitchSlope}}^{(k)}$ ,  $\alpha_{\text{RollSlope}}^{(k)}$ ,  $\alpha_{\text{Roughness}}^{(k)}$  の各入力値に対して, 図3に示すメンバシップ関数を使用する. 各メンバシップ関数は1つの実数入力値に対して, 矩形領域の地形特徴量値に関する程度 (メンバシップ度) を出力する. メンバシップ関数を通して, 矩形領域の  $\alpha_{\text{PitchSlope}}^{(k)}$ ,  $\alpha_{\text{RollSlope}}^{(k)}$ ,  $\alpha_{\text{Roughness}}^{(k)}$  の程度がそれぞれ {SMALL, MEDIUM, LARGE} の中から選択される. ここでは各メンバシップ関数について, 1実数入力値に対しメンバシップ関数との交点が2点存在し, 各交点に関して程度と値が割り当てられるため, 結果として, 各メンバシップ関数は程度と値の組をそれぞれ2組ずつ出力することになる.

#### 2.6.2 ファジールール

2つのメンバシップ関数からの出力に対して if-then 形式のルールによってメンバシップ度と走行可能性に関する判定の組を決定する. メンバシップ度の決定である前件部 (if) では, 論理積 (AND) を用いることにより値が選択される. 走行可能性判定を行う後件部 (then) では, 図4に従って判定 (程度のラベル付け) が行われる. ここでは, 走行可能性が低い方から順に {POOR, LOW, MODERATE, HIGH} の判定がなされる.

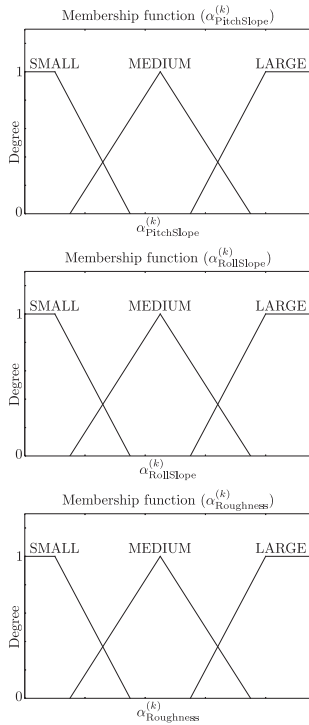


Fig.3 Membership functions for three feature values.

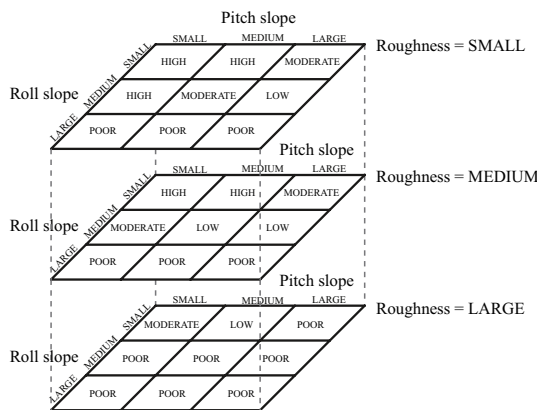


Fig.4 Fuzzy rule of proposed method.

### 2.6.3 非ファジィ化

ファジィルールによって決定された矩形領域のファジィデータ（メンバーシップ度と程度の組）を、出力ファジィ集合を用いて実数値へ変換し、走行可能性として出力する。ここでは、図5に示す出力ファジィ集合を使用し、ファジィデータの重心を出力ファジィ集合の横軸に関して求め、これが矩形領域  $k$  に対する走行可能性  $\tau_k$  となる。

### 2.7 Vector Field Histogram (VFH)

各矩形領域に関して出力された走行可能性値  $\tau_k$  を VFH の形式によって表現する。ファジィ推論の出力として矩形領域ごとに算出された走行可能性  $\tau_k$  の逆数をとることにより、該当矩形領域に対する危険度値  $r_k = 1/\tau_k$  を生成する。また、高さ情報平均値による処理対象矩形領域の絞り込みを行った際に、閾値を上回る高さ情報平均値を持った矩形領域に対しては大きな正の値として危険度が割り当てられているため、これを VFH に反映させる。提案手法では各矩形領域の移動ロボットに対する方向を横軸値とし、危険度を縦軸値とした VFH を生成する。このようにし

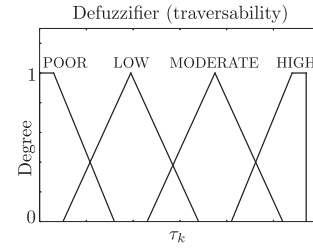


Fig.5 Defuzzifier.

て得られた VFH に関して、縦軸値があらかじめ設定された危険度閾値  $r_{limit}$  を下回った矩形領域を走行可能であると判断する。提案手法によって生成される VFH の例を図6に示す。安全であると判断された矩形領域のうち、移動ロボットに設定された目標地点と矩形領域短辺中点との距離が最小となる領域を移動ロボットの進路方向として決定する。

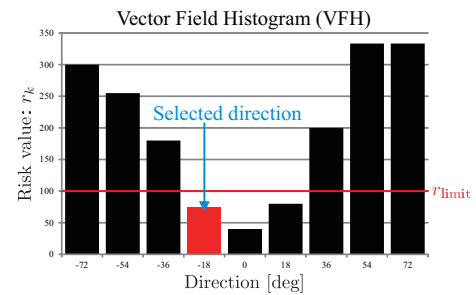


Fig.6 VFH example.

## 3 実験結果

提案手法によって移動ロボット前方に存在する不整地領域の走行可能性を推定し、安全であると見込まれる矩形領域を進路として選択可能か検証を行った。本研究では、提案手法のアルゴリズム実装のために図7に示す PIONEER 3-DX ロボットおよび測域センサ HOKUYO UTM-30LX を使用した。走行可能な地形と走行不可能な地形から構成され、適切な進路方向判断が必要となる環境を2種類構築し、提案手法のアルゴリズムにより選択される進路方向を確認する実験を行った。本実験において与えた各パラメータ値は環境1、環境2共に  $L = 1.0$  m,  $W = 0.5$  m, 総矩形領域数9, 危険度閾値  $r_{limit} = 65$ , 高さ情報平均値に関する閾値  $z_{th} = 0.03$  m である。

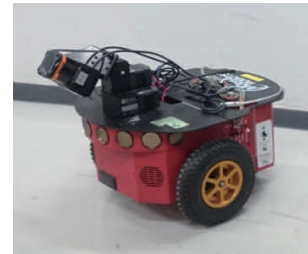


Fig.7 Experimental instruments.

環境1に対する実験結果を図8に示す。図8(a)が実際に構築した環境、図8(b)が獲得した点群データの可視化結果、図8(c)が提案手法によって生成された VFH である。環境1では移動ロボットの前方領域が瓦礫を模したオブジェクトによって塞がれており、走行不可能な領域となっている。この環境に対する提案手法のアルゴリズムによる進路方向判断の結果では走行不可能な領



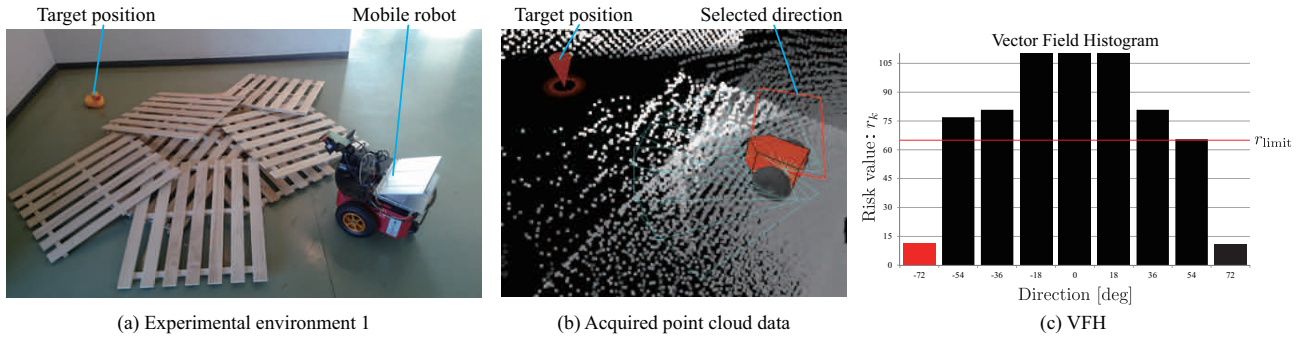


Fig.8 Experimental result in environment 1.

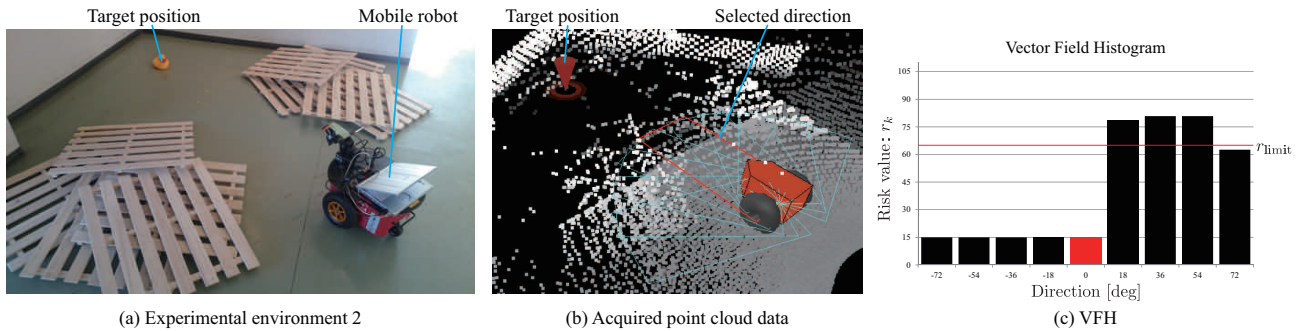


Fig.9 Experimental result in environment 2.

域を回避する進路が選択された。環境 2 に対する実験結果を図 9 に示す。図 9 (a) が実際に構築した環境、図 9 (b) が獲得した点群データの可視化結果、図 9 (c) が提案手法によって生成された VFH である。環境 2 では移動ロボットの前方向領域は瓦礫によって塞がれておらず、平地となっているため走行可能な領域となっている。提案手法のアルゴリズムによる進路方向判断の結果、移動ロボット前方の走行可能な平地領域は危険度が低くなり、進路として選択された。平地領域の脇に設置された瓦礫に対しては高い危険度が割り当てられており、進路方向として選択されることはなかった。

#### 4 結論

本研究では、移動ロボット上の測域センサにより獲得された点群データから移動ロボット前方領域に対する走行可能性を推定し、進路方向を決定するための手法を提案した。提案手法では、推定対象となる移動ロボット前方領域に関して仮想的に生成される矩形領域内に存在する点群データのみを利用しており、移動ロボットを中心として広域に渡る環境計測や、既知の環境地図を必要としない。この点で、提案手法は災害発生時を始めとした複雑かつ未知の環境に対して適応可能である。実験結果から、適切な進路方向判断が必要となる不整地存在環境において提案手法によって走行可能な不整地を進路として選択可能であることが実証された。

今後の展望としては、進路方向の選択後に移動ロボットを行動させる方法論の構築、大域的経路生成手法とのシステム統合等が考えられる。特に、生成された VFH から移動ロボットに対する制御入力を算出し、行動させるための方法論の構築は今後の主要な課題の一つである。そのため、今後の研究では障害物回避や不整地走行で利用される各種制御入力生成手法の実装・改良と本研究における提案手法への組み込み、さらに、より複雑な環境下での提案手法の有効性の検証に取り組む計画である。

#### 謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム (ImPACT) 「タフ・

ロボティクス・チャレンジ」の援助を受けた。

#### References

- [1] S. Thrun, M. Montemerlo, and A. Aron, "Probabilistic Terrain Analysis For High-Speed Desert Driving", *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, pp. 16–19, 2006.
- [2] C. Crane, D. Armstrong, R. Touchton, T. Galluzzo, S. Solanki, J. Lee, D. Kent, M. Ahmed, R. Montane, S. Ridgeway, S. Velat, G. Garcia, M. Griffis, S. Gray, J. Washburn, and G. Routson, "Team CIMAR's NaviGATOR: An Unmanned Ground Vehicle for the 2005 DARPA Grand Challenge", *Journal of Field Robotics*, vol. 23, no. 8, pp. 599–623, 2006.
- [3] 須永 賢治, 小林 祐一, 金子 透, 平松 裕二, 藤井 北斗, 神谷 剛志, "屋外不整地環境における無人車両のための走路判別", *精密工学会誌*, Vol. 79, No. 11, pp. 1117–1123, 2013.
- [4] C. Ye and J. Borenstein, "A Method for Mobile Robot Navigation on Rough Terrain", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3863–3869, 2004.
- [5] C. Ye and J. Borenstein, "Navigating a Mobile Robot by a Traversability Field Histogram", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, part B: Cybernetics*, vol. 37, no. 2, pp. 361–372, 2007.
- [6] S. Choi, E. Kim, and S. Oh, "Real-Time Navigation in Crowded Dynamic Environments Using Gaussian Process Motion Control", *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3221–3226, 2014.
- [7] Y. Tanaka, Y. Ji, A. Yamashita, and H. Asama, "Fuzzy Based Traversability Analysis for a Mobile Robot on Rough Terrain", *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015.
- [8] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers Control and Science*, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588, 1974.