

ファジィ推論を利用した不整地の走行可能性推定に基づく 移動ロボットの進路方向判断手法の構築

田中 佑典 (東京大学) 池 勇勲 (東京大学) 山下 淳 (東京大学) 浅間 一 (東京大学)

1. 序論

近年、自律移動型ロボットに対する関心が高まっている。その中でも、大きな注目を集めているのが無人車両 (UGV: Unmanned Ground Vehicle) である。UGV の活用例としては、災害発生時における捜索、救助活動や耕地での農作業補助など多くの対象が考えられる。UGV の実環境への応用を念頭に置き研究および技術開発を行った例として、DARPA グランドチャレンジがある [1]。ここでは主に UGV の不整地走行が中心的課題として扱われている。

屋外、屋内を問わず不整地の存在する環境下で UGV による作業を行う際には、事故の発生を回避しつつ安全に走行することが重要である。ここでは、UGV は滑落や横転の危険がある不整地は回避し、走行可能な不整地は走破するという判断が求められる。不整地の安全な走行においては UGV 周囲の不整地に対して走行可能性 (traversability) を判断し、これを考慮した上で適切な進路選択を行う必要がある。

移動ロボット周囲の環境に関する安全度を評価し、適切な進路選択を実現する手法として Borenstein らが提案した VFH (Vector Field Histogram) がある [2]。この手法では、レーザレンジファインダ (以下 LRF) あるいは超音波センサによって移動ロボット周囲の物体に関する距離情報を収集し、2 値で表現される格子地図を生成する。このようにして生成された格子地図から各方向に対する安全度を算出し、最も安全な方向へ移動ロボットが進路選択を行う手法である。しかし、この手法では障害物の回避が達成されている一方、傾斜や段差のような地形に対する走行可能性判断には対応不可能である。

これに対して、Ye らは VFH を生成するための情報として、LRF によって移動ロボットの行動環境全域を計測し、高さ地図 (elevation map) が得られたとする前提で走行可能性を判断する手法を提案した [3]。高さ地図とは、環境を 2 次元の格子状領域に分割し、各格子にその地点の高さ情報を与えた地図のことである。この手法では、移動ロボットの行動環境全域に関する高さ情報を統合し VFH を生成するため、環境全域に関する既知の高さ地図が得られない状況は想定されていない。また、環境全域に関する高さ情報を統合していることにより、移動ロボット周囲近傍の不整地に関する地形を考慮し危険回避を行うことが不可能である。

近藤らは、UGV の走行経験を教師データとして学習させ不整地の走行可能性判断を行う手法を提案した [4]。この手法では走行可能性判断のために UGV による不整地走行経験に基づく教師データを用意しなければならない。

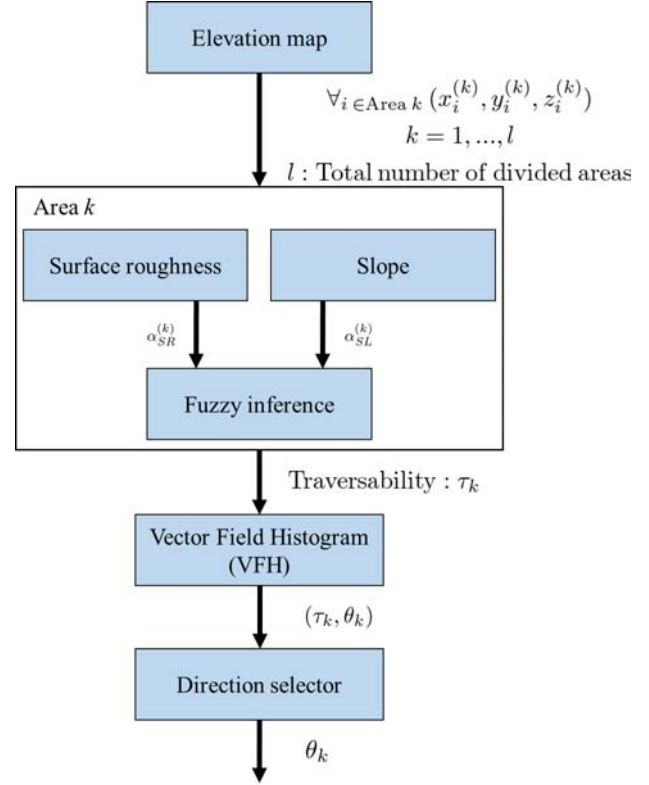


図 1 提案システム

2. 提案手法

2.1 概要

本研究では移動ロボットの行動環境全域に関する既知の高さ地図や不整地の走行データが得られない状況を想定し、移動ロボット周囲の不整地に対する走行可能性を判断する手法を構築する。提案手法では移動ロボット近傍の領域を対象としてセンサ情報により高さ地図を生成する。生成された高さ地図から移動ロボット周囲の不整地に対する走行可能性を判断し、安全性が高いと見込まれる方向を移動ロボットの進路として決定する。この手法の概要を図 1 に示す。

環境に関して生成される高さ地図の様子を図 2 に示す。移動ロボット前方領域の高さ地図に対して複数の等面積矩形領域への分割を行う。分割された各矩形領域に対して、高さ情報から凹凸 (surface roughness) と傾斜 (slope) を算出する。これら 2 つの値を入力として、矩形領域に対する走行可能性をファジィ推論によって求める。矩形領域に対して算出された走行可能性を移動ロボット前方領域に関する VFH として表現し、走行可能性が高くかつ目標地点までの距離が最小となる

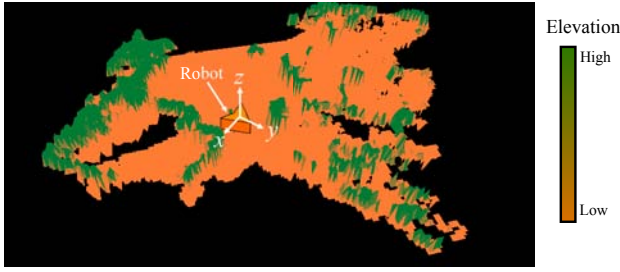


図2 高さ地図

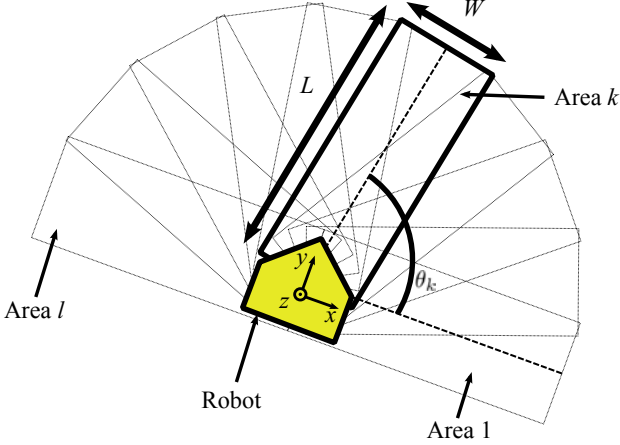


図3 移動ロボット前方領域分割概念図

方向を移動ロボットの進路として決定する。

2.2 領域分割

環境に関して生成された高さ地図に対して、移動ロボット前方領域を図3に示すように地図中の移動ロボット位置を基準とした等面積矩形領域へと分割する。不整地に関する凹凸 $\alpha_{SR}^{(k)}$ と傾斜 $\alpha_{SL}^{(k)}$ の計算、およびファジィ推論は、このようにして得られた矩形領域ごとに行われる。ここで、図3における L は矩形領域の奥行き、 W は矩形領域の幅、 θ_k は矩形領域間がなす角度である。

2.3 凹凸 (Surface Roughness)

矩形領域 k 内に存在する格子全てについて高さ情報の推定標準偏差を算出し、これを凹凸と定義する。凹凸 $\alpha_{SR}^{(k)}$ は次式から求められる。

$$\alpha_{SR}^{(k)} = \sqrt{\frac{1}{n_k - 1} \sum_{i \in \text{Area } k} (z_i^{(k)} - \bar{z}_k)^2}, \quad (1)$$

ここで、 n_k は矩形領域 k に含まれる格子の個数、 $\bar{z}_k$ は矩形領域 k の高さ情報の平均値、 $z_i^{(k)}$ は矩形領域 k 内の各格子が持つ高さ情報である。

2.4 傾斜 (Slope)

矩形領域 k の傾斜 $\alpha_{SL}^{(k)}$ は、矩形領域内の各格子が持つ高さ情報を基に平面をフィッティングさせ、得られた平面の傾きとして定義する。矩形領域の高さ情報に対してフィッティングされた平面は次の形で表現される。

$$ax + by + cz + 1 = 0, \quad (2)$$

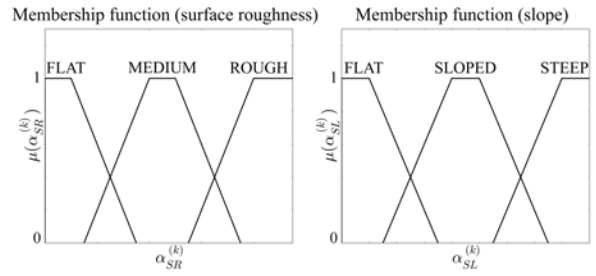


図4 メンバーシップ関数

ここで、 $\mathbf{n} = (a, b, c)^T$ は平面の法線ベクトルであり、 x, y, z は各格子の座標値である。このとき、次の目的関数 f を最小化する係数の組 (a_k, b_k, c_k) を決定することにより、平面のフィッティングを行う。

$$f = \sum_{i \in \text{Area } k} \left(\frac{a_k x_i^{(k)} + b_k y_i^{(k)} + c_k z_i^{(k)} + 1}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + c_k^2}} \right)^2, \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{n}_k = (a_k, b_k, c_k)^T$ は矩形領域 k に対してフィッティングされた平面の法線ベクトルであり、 $x_i^{(k)}, y_i^{(k)}, z_i^{(k)}$ は矩形領域 k 内の各格子の座標値である。この最適解は次の方程式を解くことにより求められる。

$$\begin{pmatrix} \sum_i (x_i^{(k)})^2 & \sum_i x_i^{(k)} y_i^{(k)} & \sum_i x_i^{(k)} z_i^{(k)} \\ \sum_i y_i^{(k)} x_i^{(k)} & \sum_i (y_i^{(k)})^2 & \sum_i y_i^{(k)} z_i^{(k)} \\ \sum_i z_i^{(k)} x_i^{(k)} & \sum_i z_i^{(k)} y_i^{(k)} & \sum_i (z_i^{(k)})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_k \\ b_k \\ c_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_i x_i^{(k)} \\ -\sum_i y_i^{(k)} \\ -\sum_i z_i^{(k)} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

ここで求められた平面の法線ベクトル $\mathbf{n}_k = (a_k, b_k, c_k)^T$ と矩形領域 k の方向ベクトル $\mathbf{d}_k = (\cos \theta_k, \sin \theta_k, 0)^T$ との内積を計算することで傾斜 $\alpha_{SL}^{(k)}$ を求めることが可能である。

$$\alpha_{SL}^{(k)} = \left| \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{n}_k \cdot \mathbf{d}_k}{|\mathbf{n}_k|} \right) - \frac{\pi}{2} \right|. \quad (5)$$

2.5 ファジィ推論

高さ情報を基に計算された2つの値、凹凸 $\alpha_{SR}^{(k)}$ と傾斜 $\alpha_{SL}^{(k)}$ 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を求める。ここ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 (Mamdaniの推論モデル) を使用する [5]。

2.5.1 メンバーシップ関数

ここでは入力値が2種類となっているため、ファジィ推論で使用するメンバーシップ関数は2種類となる。凹凸 $\alpha_{SR}^{(k)}$ と傾斜 $\alpha_{SL}^{(k)}$ の入力に対して、図4に示すメンバーシップ関数を使用する。

各メンバーシップ関数は1つの実数入力値に対して、矩形領域の程度に関するメンバーシップ度を出力する。メンバーシップ関数を通して、矩形領域の凹凸の程度が平坦である方から順に {FLAT, MEDIUM, ROUGH} の中から、傾斜の程度が水平である方から順に {FLAT,

		Surface roughness		
		FLAT	MEDIUM	ROUGH
Slope	FLAT	HIGH	MODERATE	POOR
	SLOPED	MODERATE	LOW	POOR
	STEEP	POOR	POOR	POOR

図5 ファジィルール

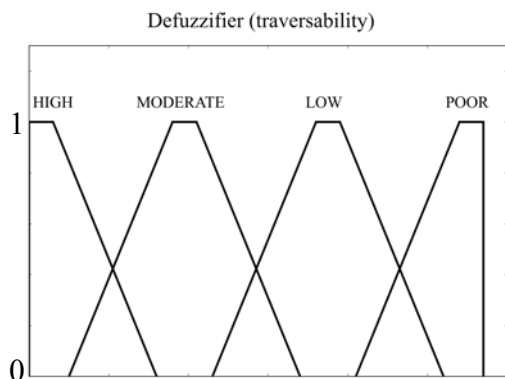


図6 出力ファジィ集合

SLOPED, STEEP}の中から判断される．ここでは各メンバーシップ関数について，1実数入力値に対しメンバー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．結果として，1つのメンバーシップ関数からは程度と値の組が2組出力される．

2.5.2 ファジィルール

2つのメンバー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ーシップ度と走行可能性に関する判定の組を決定する．メンバー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5に示すルールに従って判定 (程度のラベル付け) が行われる．ここでは，走行可能性が高い方から順に {HIGH, MODERATE, LOW, POOR} の判定がなされる．

2.5.3 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，走行可能性に関する出力ファジィ集合を用いて実数値へ変換し，出力する．ここでは，図6の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ることにより，出力値を算出する．

2.6 Vector Field Histogram (VFH)

各矩形領域に関して出力されたファジィ推論による走行可能性を VFH の形式によって表現する．移動ロボット前方領域を矩形領域へ分割し，ファジィ推論の出力から矩形領域ごとに算出された走行可能性のうち，

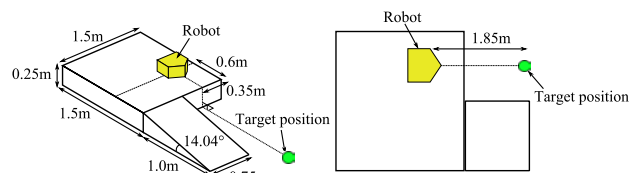


図7 実験1：環境

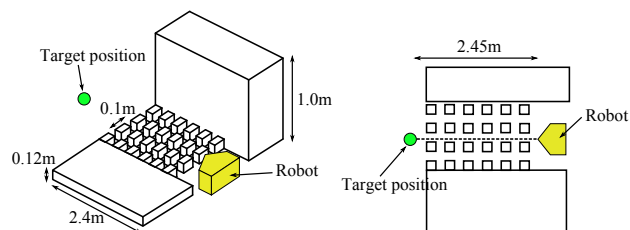


図8 実験2：環境

あらかじめ設定された閾値 τ_{limit} を下回ったものを走行可能であると判断する．走行可能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．

3. シミュレーション実験

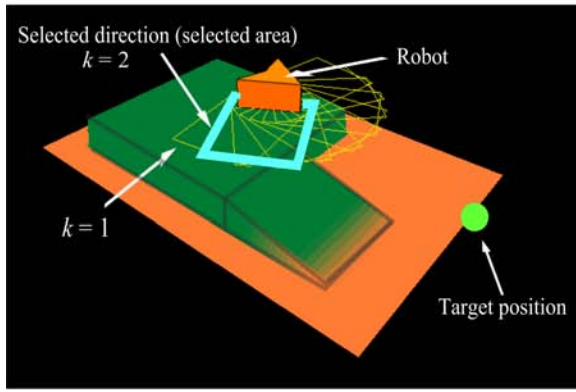
提案手法により移動ロボット周囲近傍の不整地の走行可能性を判断し，安全性が高いと見込まれる矩形領域を進路として決定可能か検証を行った．図7および図8に示すような環境をシミュレータ上で構築し，システムが決定する進路方向を確認する実験を行った．本実験において与えた各パラメータ値は実験1，実験2共に $L = 0.85m$ ， $W = 0.7m$ ，総矩形領域数 $l = 10$ ，走行可能性閾値 $\tau_{limit} = 250$ である．

実験1に関するシミュレータ上の結果を図9(a)に，生成されたVFHを図9(b)に示す．実験2に関するシミュレータ上の結果を図10(a)に，生成されたVFHを図10(b)に示す．与えられた閾値を下回る走行可能性が算出された矩形領域を移動ロボットは安全であると判断し，このうち目標地点までの距離が最小となる矩形領域の方向が進路として選択されることが示された．一方，高低差の大きな段差が存在する矩形領域，小さな凹凸が連続して存在する矩形領域，および侵入不可能な壁が存在する矩形領域は走行可能性が低いと判断され，進路の候補には入らなかった．

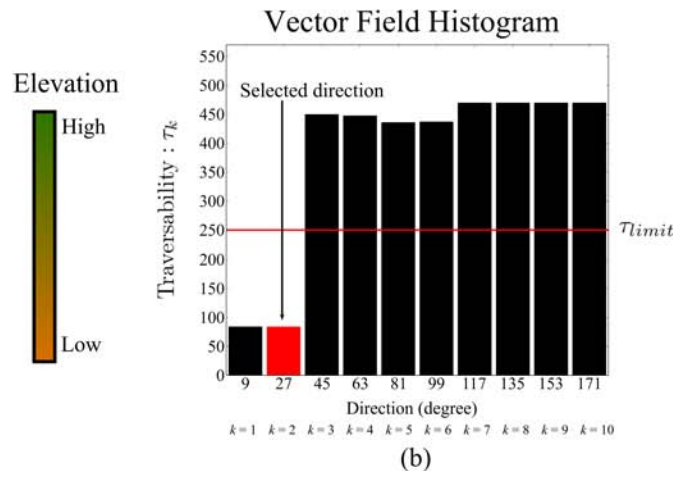
4. 結論

移動ロボット近傍の不整地に関する高さ地図を生成し，移動ロボット前方に対して凹凸と傾斜の2つの値を求めた．凹凸と傾斜をファジィ推論に対する入力とし，ファジィルール，非ファジィ化の過程を通して得られた矩形領域に対する走行可能性をVFHの形式で表現することにより，安全性が高いと見込まれる進路方向の判断が可能であることが示された．

今後の展望としては，より複雑な環境へのシステムの適用検討，大域的経路生成とのシステム統合等が考えられる．特に，計測が困難な障害物を含む環境では

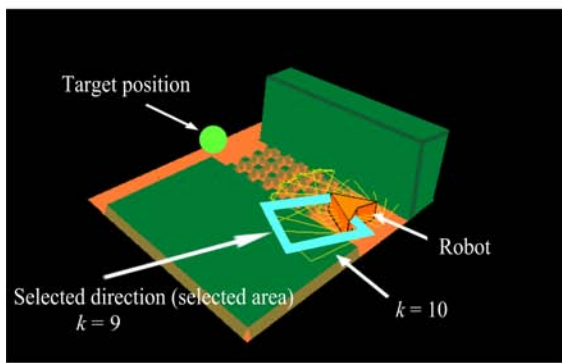


(a)

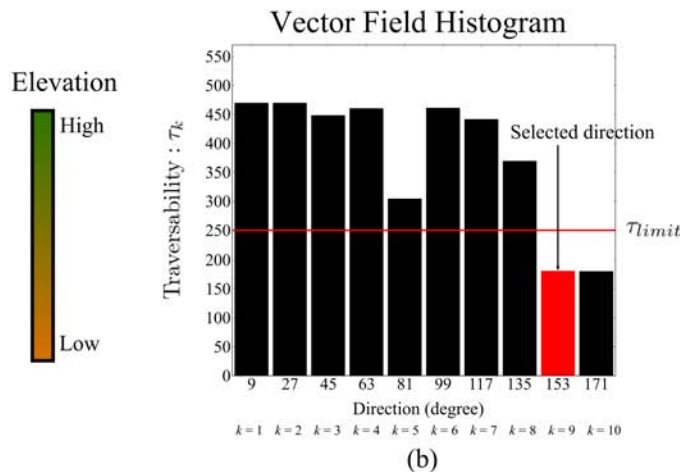


(b)

図 9 実験 1



(a)



(b)

図 10 実験 2

センサデータの欠落により凹凸や傾斜の算出が容易ではない。このような状況下でも安定的に振る舞うことが可能な計算法と計測法の確立が必要である。今後の研究では、さらに複雑化された環境下でも安全な経路選択をロボットに行うことが可能な手法の確立に取り組む計画である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] J. Borenstein and Y. Koren: "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278–288, 1991.
- [3] 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.
- [4] 近藤正人, 須永賢治, 深澤友輔, 小林祐一, 金子透, 平松裕二, 藤井北斗, 神谷剛志: "無人車両の走行経験を利用した LRF 情報にもとづく走行可能性推定," 第 14 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 1647–1652, 2013.
- [5] 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.