

移動ロボットの性能に応じた走行可能性推定が可能な 不整地に対する走行可能性推定および行動生成手法*

田中佑典** 池 勇勳** 山下 淳*** 浅間 一***

Adaptive Traversability Analysis and Behavior Generation Method for Mobile Robots on Rough Terrain

Yusuke TANAKA, Yonghoon JI, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

This paper describes a novel rough terrain traversability analysis and behavior generation method for mobile robot navigation. We focused on the scenario of mobile robot operation in complex environment such as disaster sites. The proposed method enables mobile robots to analyze terrain traversability of surrounding area and select safe course direction. According to the selected course direction, appropriate control input is calculated and mobile robot moves following the calculated control input. Terrain traversability analysis and course direction judgment are realized based on feature value calculation of terrain, fuzzy inference and vector field histogram. Mobile robot's behavior generation is realized based on control method which takes advantage of reference posture tracking. The experimental results show that the proposed method can navigate mobile robot successfully to the target location in complex environment including terrain area.

Key words: mobile robot, fuzzy inference, terrain traversability analysis, course direction judgement, behavior generation

1. 序 論

近年、2011年に発生した福島第一原子力発電所に対する調査活動での移動ロボットの投入を始めとして、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¹⁾。災害対応活動や農業補助といった目的での移動ロボット運用においては、不整地上を移動ロボットが走行する状況が発生するため、不整地走行技術の開発が重要な課題となっている。

移動ロボットの不整地走行技術開発としてこれまでに様々な取り組みがなされてきた。中でも特筆すべきなのは、DARPA グランドチャレンジである。ここでは、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、技術開発が行われた²⁾。DARPA グランドチャレンジでの研究成果は、屋外走行無人車両が大きな注目を集める契機となった一方で、対象が砂漠地帯という比較的単調な環境に限定されており、災害環境に見られるような複雑な不整地環境への対応可能性が不十分であると考えられる。また、DARPA グランドチャレンジでは各無人車両に対して走行経路に関する情報が事前に提供されており、未知環境下での移動ロボットの行動を実現するものではない。

屋内、屋外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、周囲に存在する不整地領域の走行可能性を推定し、滑落や横転の危険がある不整地領域は回避しつつ目標地点まで到達することが求められる。このような不整地領域に対する走行可能性推定の結果に基づき、移動ロボットは適切な進路方向を決定し、行動する。

不整地に関する走行可能性を推定するための手法として、推定対象領域の地形特徴量を算出し、これを入力とした線形

SVM (Support Vector Machine) によって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),4)}。これらの手法では、判別器のもととなる教師データを収集する必要があり、実証実験では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下では十分な性能を發揮できない可能性がある。これに対し、手動での教師データ生成を回避するため、慣性計測装置のセンサ情報から自己管理学習 (self-supervised learning) を利用することで教師データを生成する手法が提案されている⁵⁾。しかし、ここでの対象はある程度整地された平坦な路面と茂み等の草地からなる環境の判別となっており、多数の凹凸や障害物により構成される複雑な地形が対象となった場合には、効果的な判別結果を得るには不十分であると考えられる。

以上のような従来研究においては、特定の移動ロボットのみが運用対象として想定され各手法が実装・検証されている。しかし、本来であれば同一対象環境であっても移動ロボットの不整地走行性能によって走行可能性推定結果は異なるはずである。端的な例としては、不整地走行性能の低い移動ロボットでは走行不可能であると判断された不整地領域が、不整地走行性能の高い移動ロボットにとっては走行可能な不整地領域である場合が考えられる。運用対象となる移動ロボットの不整地走行性能に応じて走行可能性推定結果を適切に変化させ出力することが可能な方法論については、従来手法の枠組みでは未検証あるいは対応不可能となっている。

このような問題点を踏まえ、本研究が達成すべき目的を次のように設定する。

- (i) 複雑な不整地領域に対して、適切な走行可能性推定が実行可能。
- (ii) 移動ロボットの不整地走行性能に応じた走行可能性推定結果を出力可能。
- (iii) 走行可能性推定結果に基づく移動ロボットの行動生成の

* 原稿受付 平成 27 年 4 月 27 日

掲載決定 平成 27 年 7 月 13 日

** 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 正 会 員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

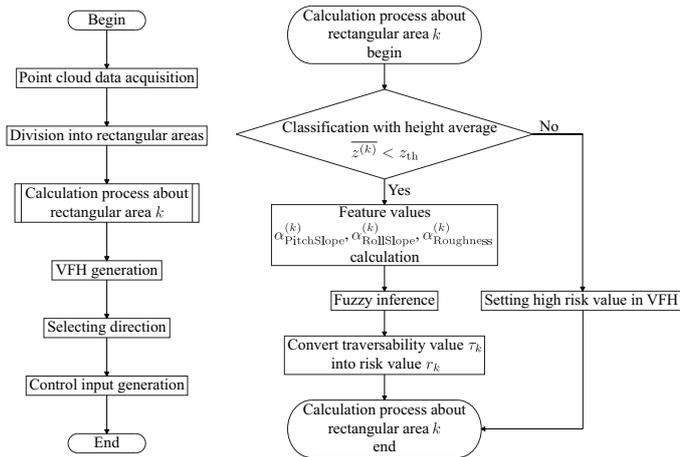


Fig. 1 Flowchart of the proposed method

実現.

これにより、本研究の目的は、複雑な不整地領域を含む未知環境内の移動ロボット運用において、不整地領域に対する走行可能性推定を実行し、行動を生成するための手法の構築とする。このうち、走行可能性推定結果に関しては、移動ロボット固有の不整地走行性能に応じてその出力結果を柔軟に対応させることが可能な手法の提案を行う。また、本研究における複雑な不整地領域とは凹凸地形や障害物により構成される環境を意味しており、環境内での行動生成は移動ロボットの制御速度値を算出しロボットへの入力とすることで実現される。

2. 提案手法概要

本研究における提案手法のフローチャートを図1に示す。提案手法では移動ロボット周囲近傍の領域を対象として、測域センサの環境計測値である点群データに対して処理を行う。まず、移動ロボット前方領域に存在する点群データを処理の対象とし、これらのうち、閾値を下回る高さ情報平均値を持つ点群データ存在領域を探索し処理対象の絞り込みを行う。絞り込みによって選択された領域内の点群データに対して最小二乗計算による近似平面を算出し、複数の地形特徴量を計算する。計算の結果、出力された地形特徴量をファジィ推論によって統合し、注目領域に対する走行可能性を推定する。推定された走行可能性をVFH (Vector Field Histogram) の形式で表現し、危険度が低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。ここで、VFHは移動ロボットの周囲の環境について、センサ情報から危険度を算出し、これを1次元のヒストグラムとして表現することで、移動ロボットの進路方向を決定するための手法である⁶⁾。決定された進路方向上にサブゴールを設定し、このサブゴールを目標姿勢とした追従制御法によって移動ロボットの行動生成を実現する。

本研究で設定した3つの目的について、提案手法では、(i)に関しては注目領域中のセンサ情報である点群データに対して分布の幾何的形狀を考慮した地形特徴量を計算することにより、複雑な不整地領域の走行可能性推定を実行可能としている。これは、3章の内容と対応する。(ii)に関しては、走行可能性推定の際にファジィ推論を用いることで、移動ロボット固有の不整地走行性能に応じた推定結果を出力可能としている。方法論としては、ファジィ推論におけるメンバーシップ関数の設定を行う際に、移動ロボットの不整地走行性能を考慮したメンバー

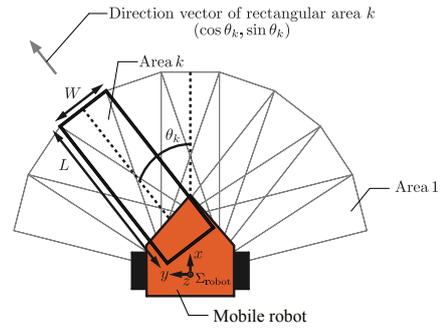


Fig. 2 Division of mobile robot anterior region into imaginary rectangular areas

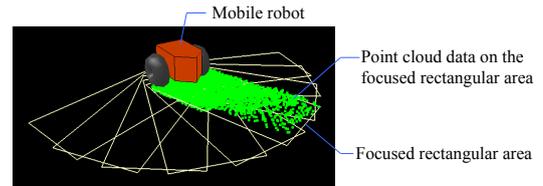


Fig. 3 Visualized point cloud data on the focused rectangular area

シップ関数を設計することで、走行可能性推定結果を適切に変化させることが可能となる。これは、4章の内容と対応する。(iii)に関しては、走行可能性推定結果をVFHの形式で表現し進路方向を決定した上で、対応する方向に目標姿勢を設定した制御速度算出を行うことで行動生成を実現している。これは、5章、6章の内容と対応する。

3. 点群データ処理と特徴抽出計算

3.1 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、対象環境の計測を行い環境中のオブジェクトに関する距離情報を獲得する。測域センサが獲得する距離情報は、複数回の座標変換を施すことによりロボット座標系 Σ_{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データへと変換される。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。提案手法では、このようにして獲得されたロボット座標系 Σ_{robot} における点群データに対して後述の処理を実行し、不整地領域に対する走行可能性推定を達成する。

3.2 点群データ処理領域分割

ロボット座標系における値として表現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に仮想的な複数の等面積矩形領域を設定する。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、 θ_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 Σ_{robot} の x 軸がなす角度である。移動ロボット前方領域に関して注目矩形領域を1つ設定し、注目矩形領域上の点群データを可視化した結果を図3に示す。点群データに対する計算処理はこのように設定された各矩形領域上に存在する点群データを対象として実行される。

3.3 高さ情報平均値による処理対象矩形領域の絞り込み

各矩形領域上に存在する点群データの高さ情報である z 座標値 z_i に着目し、これらの平均値を求める。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を持つ矩形領域を走行可能性推定の対象として判別する。インデックス k を持つ矩形領域 k に関する高さ情報平均値 $\overline{z^{(k)}}$ が閾値 z_{th} を上

回った場合は、該当する矩形領域 k 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。高さ情報平均値 $z^{(k)}$ が閾値 z_{th} を下回った場合は、該当矩形領域 k を走行可能性推定の対象とし、後述の計算処理を行う。

3.4 点群データに対する近似平面算出

高さ情報平均値を利用した判別によって走行可能性推定の対象となった矩形領域について、点群データに対する近似平面を求める。矩形領域上に存在する点群データから近似平面を算出する方法は、次の最小二乗計算に従う。

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

ここで、 a_k, b_k, c_k は近似平面を定義する要素であり、 $(-\hat{a}_k, -\hat{b}_k, 1)$ が近似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 上に存在する点群データでインデックス i を持つものを、 N_k は矩形領域 k 上に存在する点群データの総数を表している。

3.5 地形特徴量算出

矩形領域上に存在する点群データに対して算出された近似平面を利用し、複数の地形特徴量の算出を行う。提案手法において、矩形領域 k に関して算出される地形特徴量は $\alpha_{PitchSlope}^{(k)}, \alpha_{RollSlope}^{(k)}, \alpha_{Roughness}^{(k)}$ の3種類である。

$\alpha_{PitchSlope}^{(k)}$ は矩形領域 k 上の近似平面に関してピッチ方向の傾斜 (pitch slope) を表している。 $\alpha_{RollSlope}^{(k)}$ は矩形領域 k 上の近似平面に関してロール方向の傾斜 (roll slope) を表している。 $\alpha_{Roughness}^{(k)}$ は矩形領域 k 上に存在する点群データのばらつきを表現している。これらを定式化すると、次のようになる。

$$\alpha_{PitchSlope}^{(k)} = \left| \arccos\left(\frac{-\hat{a}_k \cos \theta_k - \hat{b}_k \sin \theta_k}{\sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2 + 1}}\right) - \frac{\pi}{2} \right|, \quad (2)$$

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

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

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。

$$d_i^{(k)} = \frac{|\hat{a}_k x_i^{(k)} + \hat{b}_k y_i^{(k)} + \hat{c}_k - z_i^{(k)}|}{\sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2 + 1}}, \quad (5)$$

$$\overline{d}^{(k)} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \frac{|\hat{a}_k x_i^{(k)} + \hat{b}_k y_i^{(k)} + \hat{c}_k - z_i^{(k)}|}{\sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2 + 1}}, \quad (6)$$

矩形領域 k に関する地形特徴量 $\alpha_{PitchSlope}^{(k)}, \alpha_{RollSlope}^{(k)}$ を表現した概念図を図4に示す。図4では矩形領域 k に関して算出された近似平面とその法線ベクトル、および矩形領域 k の方向ベクトルが表現されている。 $\alpha_{PitchSlope}^{(k)}$ は近似平面の法線ベクトル $(-\hat{a}_k, -\hat{b}_k, 1)$ と矩形領域 k の方向ベクトル $(\cos \theta_k, \sin \theta_k)$ のなす角より算出される。 $\alpha_{RollSlope}^{(k)}$ は近似平面の法線ベクトル $(-\hat{a}_k, -\hat{b}_k, 1)$ と矩形領域 k の方向ベクトルに垂直なベクトル $(-\sin \theta_k, \cos \theta_k)$ のなす角より算出される。

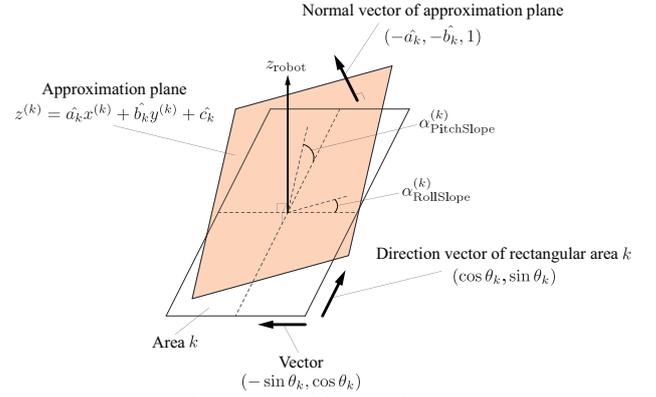


Fig. 4 Illustration of feature values concept

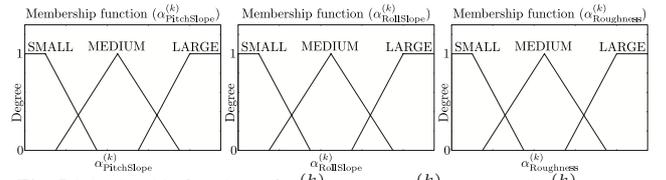


Fig. 5 Membership functions of $\alpha_{PitchSlope}^{(k)}, \alpha_{RollSlope}^{(k)}$ and $\alpha_{Roughness}^{(k)}$

4. ファジィ推論による走行可能性推定

前述の計算処理により算出された3種類の地形特徴量を入力として、ファジィ推論によって各矩形領域に対する走行可能性を推定する。本研究では、地形特徴量の3入力から走行可能性の推定値である1出力を算出可能な方法論としてファジィ推論を採用する。ファジィ推論では、地形特徴量を走行可能性値へとマッピングする際に、if-then ルールが混在していることにより、それぞれ意味合いの異なる3種類の入力値を統合し、その総合的な判断結果として走行可能性値を算出することが可能である。この方法論により、各矩形領域に対する走行可能性を推定する。提案手法では、矩形領域 k に対する走行可能性を τ_k と表現し、代表的なファジィ推論モデルである Min-Max-重心モデルを採用する⁷⁾。

4.1 メンバーシップ関数

提案手法では、ファジィ推論に対する入力値が3種類の地形特徴量であるため、これらに対応した3種類のメンバーシップ関数を設定する。 $\alpha_{PitchSlope}^{(k)}, \alpha_{RollSlope}^{(k)}, \alpha_{Roughness}^{(k)}$ に対して設定されるメンバーシップ関数の概形を図5に示す。各メンバーシップ関数は、3種類の地形特徴量値に関して大きさの程度 (メンバーシップ度) を判断するために用いられる。提案手法では、メンバーシップ度を {SMALL, MEDIUM, LARGE} の3タイプから判断することとし、各メンバーシップ関数を通して、矩形領域について算出された $\alpha_{PitchSlope}^{(k)}, \alpha_{RollSlope}^{(k)}, \alpha_{Roughness}^{(k)}$ の程度がそれぞれ {SMALL, MEDIUM, LARGE} の中から選択される。提案手法において採用したメンバーシップ関数の形状では、1実数入力値に対しメンバーシップ関数との交点が2点存在しており、各交点に関して程度と値の組が割り当てられ、結果として各メンバーシップ関数は程度と値の組を2組出力することになる。

本研究の目的である、移動ロボットの不整地走行性能に応じた走行可能性推定結果の出力は、3種類のメンバーシップ関数の設計変更によって実現可能である。端的な例として、不整地走行性能の高い移動ロボットを運用する際は、3種類のメン

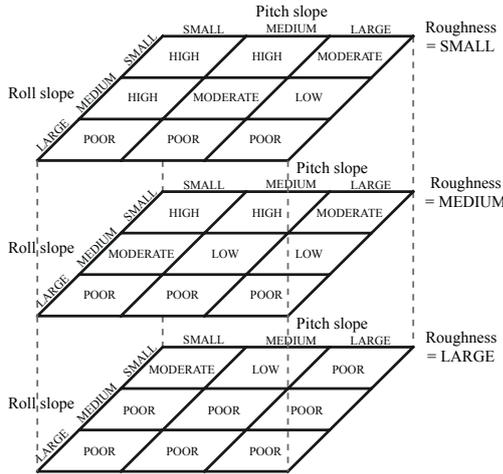


Fig. 6 Fuzzy rule

パーシブ関数それぞれについてメンバーシップ度 {SMALL, MEDIUM, LARGE} の境界値を正方向へ平行移動することにより、移動ロボットの不整地走行性能に応じた推定が可能となる。

4.2 ファジィルール

各メンバーシップ関数による出力値の組に対して、図6に示す規則（ファジィルール）に従い、走行可能性 τ_k のラベル付けを行う。図6では各メンバーシップ関数が出力した3種類の地形特徴量のメンバーシップ度に関する組み合わせ結果に応じて、走行可能性のラベルが選択される際のルールが表現されている。ルール設計方針としては、3種類の地形特徴量について、全てのメンバーシップ度がLARGEと判断された場合は走行可能性のラベルをPOORに、反対に全てのメンバーシップ度がSMALLと判断された場合は走行可能性のラベルをHIGHとする方針を基本としている。異なるメンバーシップ度が混在する部分については、ファジィルールの設計者の経験則に基づき、走行可能性のラベルを決定する。走行可能性のラベル付けでは、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が決定される。メンバーシップ度を決定する前件部（if）では、論理積（AND）を用いることにより値が選択される。走行可能性の判定を行う後件部（then）では、図6のファジィルールに従って判定（程度のラベル付け）が行われる。提案手法では、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。

4.3 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走行可能性値 τ_k へと変換し、出力する。提案手法では、図7(a)に示す出力ファジィ集合を使用し、出力としての走行可能値は合成重心法による非ファジィ化を用いて求める。矩形領域 k に関して求めたファジィデータ $B'(\tau'_k)$ による走行可能性 τ_k の算出は次式に従う。

$$\tau_k = \frac{\int \tau'_k B'(\tau'_k) d\tau'_k}{\int B'(\tau'_k) d\tau'_k}, \quad (7)$$

ここで、式(7)におけるファジィデータ $B'_{\tau'_k}$ は図7(b)において、各メンバーシップ関数による出力結果をファジィルールに従ってプロットした赤色の線になる。

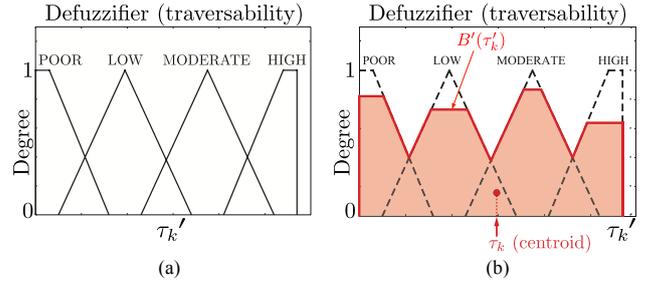


Fig. 7 Defuzzifier and defuzzification

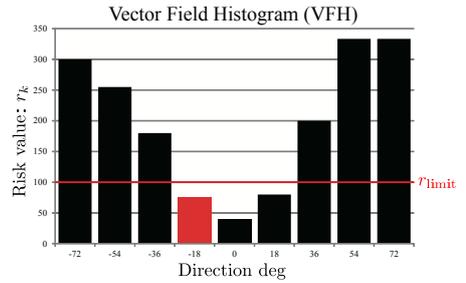


Fig. 8 Example of VFH generated by the proposed method

5. Vector Field Histogram (VFH) の生成

ファジィ推論によって算出された矩形領域に対する走行可能性 τ_k を VFH の形式で表現するにあたり、矩形領域 k に対する走行可能性値 τ_k を危険度値 r_k へと変換する。提案手法では、走行可能性 τ_k の逆数を取り、該当矩形領域に対する危険度 $r_k = 1/\tau_k$ と定義する。逆数による危険度値の定義では、走行可能性が小さく、走行不可能であると判断された領域に対しては非常に大きな危険度が算出され、反対に、走行可能性値が大きく、走行可能であると判断された領域に対しては小さな危険度が算出されることになる。また、高さ情報平均値を利用して処理対象矩形領域の絞り込みを行った際に、点群データの高さ情報平均値が閾値を上回った矩形領域に対しては大きな正の値としての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。提案手法において生成される VFH は、横軸値を各矩形領域の移動ロボットに対する方向、縦軸値を矩形領域が持つ危険度としたものになる。各矩形領域に対して算出された危険度値に対して、該当矩形領域が走行可能であるか否か判断するための閾値 r_{limit} を事前に設定する。危険度閾値の設定では、システム使用者の経験則に基づき、走行可能性判断の境界値を定めることになる。生成された VFH に関して、危険度閾値を下回る危険度を持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 の一例を図8に示す。危険度閾値 r_{limit} は、移動ロボットの不整地走行性能を考慮して値を設定する。端的には、不整地走行性能の低い移動ロボット運用の際には小さな r_{limit} 値を設定し、不整地走行性能の高い移動ロボット運用の際には大きな r_{limit} 値を設定する。

続いて、閾値 r_{limit} を下回る危険度を持った矩形領域を進路方向解の候補とし、進路方向の決定を行う。最終的な移動ロボットの進路方向は、進路方向解の候補となった矩形領域のうち、各矩形領域の短辺中点と移動ロボットが保持する世界座標系 Σ_{world} に対して設定された目標地点とのユークリッド距離が最小となる領域を選択する。

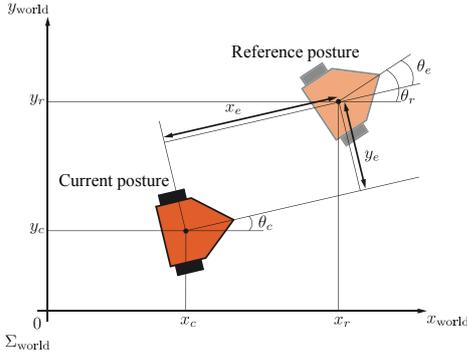


Fig. 9 Illustration of current posture and reference posture

6. 制御入力生成

選択された進路方向への行動生成を達成するために、提案手法では Kanayama らによって提案された目標姿勢への追従を利用した速度制御法を使用する⁸⁾。移動ロボットに対する制御入力は、並進方向速度と回転方向速度から構成され、これらの算出は次の制御方程式に従う。

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + K_x x_e \\ \omega_r + v_r (K_y y_e + K_\theta \sin \theta_e) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

ここで、 K_x, K_y, K_θ は最適化のためのゲインを示しており、 (v_r, ω_r) が目標姿勢 (reference posture) での速度、 (v, ω) が移動ロボットに対して入力される制御速度の値である。現在姿勢 (current posture) と目標姿勢との偏差 (x_e, y_e, θ_e) に関する模式図を図9に示す。図9においては、 (x_c, y_c, θ_c) が現在姿勢を、 (x_r, y_r, θ_r) が目標姿勢を表しており、これらは世界座標系 Σ_{world} に対して定義される値である。

6.1 危険度を利用したゲイン調整

提案手法では、移動ロボットに対する目標姿勢を進路方向として選択された矩形領域の短辺中点上に設定する。この目標姿勢がサブゴールとなり、サブゴールへの到達を目標とした制御速度を式(8)に従い算出する。式(8)の運用においては、各ゲイン値 K_x, K_y, K_θ の決定が問題となる。特に、 K_x は現在姿勢と目標姿勢についてロボット座標系 Σ_{robot} における x_{robot} 軸方向の偏差 x_e に比例して大きな並進方向速度を移動ロボットに与える効果を持っており、VFH中の移動ロボット進路方向が持つ危険度によっては注意深く設定する必要がある。すなわち、危険度が比較的高い領域に進入する際には並進方向速度を小さく抑え、危険度が低い領域に進入する際には並進方向速度を大きく設定するような枠組みがゲイン値 K_x の設定時に必要となる。危険度に応じてゲイン値 K_x を抑制する方法として、提案手法では次式に従いゲイン値の調整を行う。

$$K_x = -\frac{\widehat{K}_x}{r_{\text{limit}}} r_k + \widehat{K}_x, \quad (9)$$

ここで、 \widehat{K}_x は提案手法のアルゴリズムに対して事前に設定される K_x の上限値、 r_k は VFH の情報から移動ロボットの進路方向として選択されサブゴールが設定された矩形領域が持つ危険度、 r_{limit} は VFH に対して事前に設定される危険度閾値である。

このようにして調整したゲイン値 K_x を使用し、式(8)に従う制御入力値が生成され、移動ロボットに対して入力される。入力された制御速度値に基づき、移動ロボットの行動生成を実現する。



(a) PIONEER 3-DX



(b) Amphibious mobile robot

Fig. 10 Two mobile robots used in experiments

Table 1 Mobile robot's specifications: (a) PIONEER 3-DX, (b) Amphibious mobile robot

Category	(a)	(b)
Size	455 × 381 × 237 mm	690 × 650 × 610 mm
Weight	9 kg	80 kg
Traversable slope	13 degree	34 degree

Table 2 Parameters used in experiments on the simulator: (a) PIONEER 3-DX, (b) Amphibious mobile robot

Category	(a)	(b)
Point cloud height threshold: z_{th}	0.04 m	0.4 m
Risk value threshold: r_{limit}	60	85

7. 実証実験

提案手法によって、移動ロボット周囲の環境に関する計測値から獲得された点群データより注目領域の走行可能性を推定し、危険度が低いと見込まれる方向を進路として選択・行動することが可能に検証した。本研究では、不整地走行性能の異なる移動ロボットに対して提案手法の枠組みを適用することにより、適応的に走行結果を変化させることを目的としているため、2種類の異なる移動ロボットを使用した。実証実験において使用した移動ロボットを図10に示す。また、各移動ロボットのサイズ、重量、登坂能力に関するスペックは表1の通りである。移動ロボットの登坂能力については、傾度が一定の斜面に対する走行試験を各移動ロボットについて行い、走破可能な限界傾度を調査した。図10に示す移動ロボットのうち、図10(a)のPIONEER 3-DXは不整地走行に特化した設計がなされておらず不整地領域に対する走行性能が低い移動ロボットである。これに対し、図10(b)に示す水陸両用移動ロボットは福島原発事故に際して原発内部の調査用に開発された移動ロボットであり、不整地走行に特化したものとなっている。実証実験において移動ロボット上に搭載し、想定・使用した測域センサはHOKUYO UTM-30LXであり、これは2種類の移動ロボットについて同一のものである。測域センサは移動ロボット周囲の環境に対する2次元的な計測値を出力するものであるが、これを移動ロボットのピッチ方向に傾けた状態で設置することにより周囲環境の3次元的な計測が可能になる。提案手法に与えるパラメータ値としては2種類の移動ロボットに関して共通の値として、総矩形領域数9、矩形領域の幅 $W = 0.5$ m、矩形領域の奥行き $L = 1.0$ mとした。高さ情報平均値の閾値 z_{th} および危険度閾値 r_{limit} は各移動ロボットに対してそれぞれ異なる値を与えた。実証実験において、各移動ロボットに与えた異なるパラメータ値は表2の通りである。

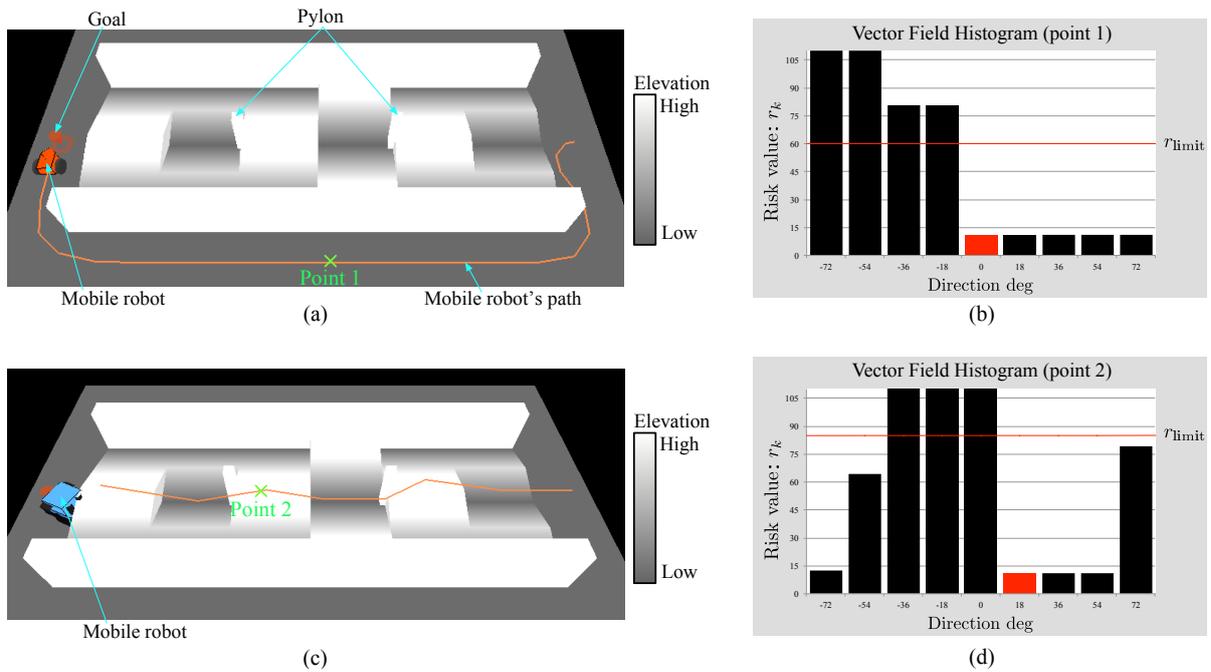


Fig. 11 Experimental results on the simulator with two different robots

7.1 シミュレーションによる実証実験

提案手法の有効性を検証するため、不整地領域を含む実験環境をシミュレータ上に構築し、提案手法による走行可能性推定とそれに基づく移動ロボットの行動生成を行った。対象とする環境は ASTM インターナショナルが定める災害対応ロボットの機能評価用ガイドラインに準ずるものである⁹⁾。この環境中には複数の斜面領域による凹凸地形が形成されており、適切な走行可能性推定と行動生成の判断が要求される複雑な不整地領域となっている。また、シミュレーション実験の環境中には、走行不可能な障害物として柱 (pylon) が2ヶ所設置されている。

シミュレーションによる実験結果を図 11 に示す。図 11 (a), (c) は2種類の移動ロボットに関するシミュレータ上での走行結果を示しており、図 11 (b), (d) はそれぞれシミュレータ上の2地点 (point 1, point 2) において生成された VFH を視覚化したものである。各 VFH において、赤色の長方形領域が移動ロボットの進路方向として選択された方向を示している。不整地走行性能の低い移動ロボットである PIONEER 3-DX を想定した場合、移動ロボットは不整地領域を回避し目標地点まで到達する走行経路を生成したのに対し、不整地走行性能の高い移動ロボットである水陸両用移動ロボットを想定した場合は不整地領域を走破するという判断のもと、目標地点まで到達する走行経路が生成された。図 11 (b) に示す VFH では、走行不可能な壁領域に対して閾値を上回る危険度が算出されており、走行不可能領域であるという判断が適切になされている。また、走行可能な平坦地形に対しては閾値を下回る危険度が算出され、この中から進路方向の選択が行われている。図 11 (d) に示す VFH では、移動ロボット前方の柱を含む領域に対しては閾値を上回る危険度が算出されており、走行不可能領域であるという判断が適切になされている。この結果、水陸両用移動ロボットは走行不可能な柱が存在する領域を回避する行動を生成した。

図 11 (a), (c) に示した各移動ロボットの走行結果について、目標地点までの所要時間を計測した結果を表 3 に示す。不整

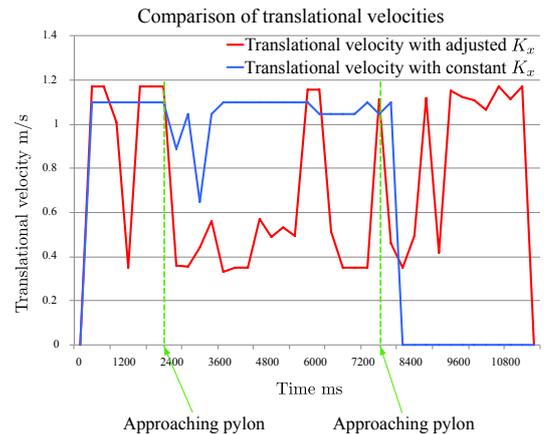


Fig. 12 Comparison of two translational velocities

Table 3 Traveling time to the goal position with different experiments: (a) PIONEER 3-DX, (b) Amphibious mobile robot

Category	(a)	(b)
Results on the simulator	18.7 s	13.0 s
Results with real robots	10.5 s	6.8 s

地領域を回避するという行動を生成した PIONEER 3-DX の場合は、水陸両用移動ロボットによる走行結果と比較して目標地点までの所要時間が長くなっている。これは、不整地領域を走破し、目標地点まで迅速に到達する能力を有する水陸両用移動ロボットの行動生成結果を考慮すると、妥当な結果である。このことから、提案手法によって移動ロボットの不整地走行性能に応じた効率的な行動生成が実現されたことが確認できた。図 11 (c), (d) に示した水陸両用移動ロボットを想定したシミュレーション実験において、式 (9) によるゲイン調整を行い生成された並進方向速度、および式 (9) を使用せずに一定値としてゲイン K_x を与え生成された並進方向速度を比較した結果を図 12 に示す。この際に与えたパラメータ値としては、式 (9) に

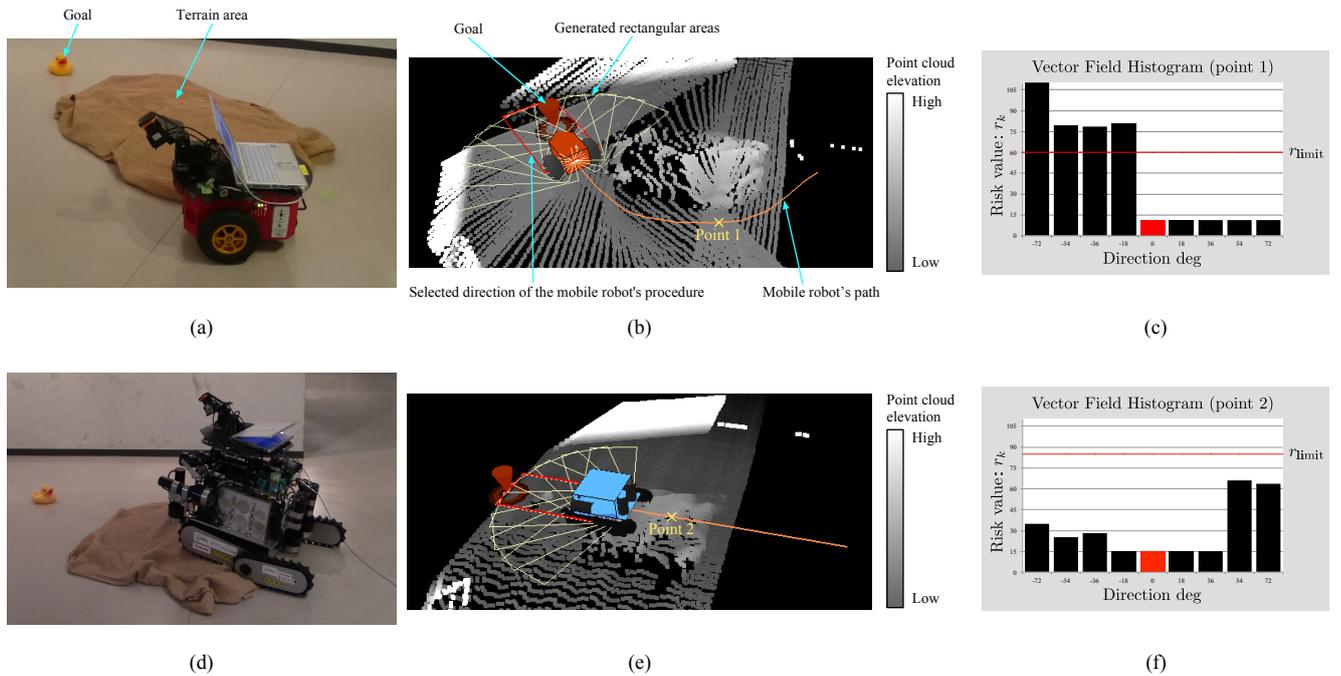


Fig. 13 Experimental results in the real environment with two different robots

従うゲイン調整を行う場合の \widehat{K}_x が 1.0, ゲイン調整を行わず一定値としてゲインを与えた場合の K_x が 0.8 である. 図 12 から, 提案手法によるゲイン調整を行った場合, 障害物である柱に移動ロボットが近づく瞬間に並進方向速度が低下していることが分かる. これは, 柱が存在する領域の危険度を反映したゲイン調整により, 危険度の高い領域を走行する際に並進方向速度を抑制する効果が働いたためである. 一方で, ゲイン調整を利用しない場合の並進方向速度の変動は少なく, 柱が存在する領域に近づいた際の減速が十分に行われないことが分かる.

7.2 実機を用いた実証実験

シミュレーション実験に続き, 提案手法の有効性を実機を用いた実験により検証した. 実験環境として, 平地と不整地領域 (terrain area) からなる環境を構築し, 移動ロボットによる走行を行った. 実機実験における環境中には移動ロボットの不整地走行性能によって走行可能・不可能が分岐するような不整地領域が設置しており, 提案手法によって不整地領域に対する適切な判断結果を出力可能であるか検証した.

実機による実験結果を図 13 に示す. 図 13 (a), (d) は実験環境と環境中での移動ロボットの様子を示しており, 図 13 (b), (e) は移動ロボットが保持する世界座標系において測域センサによる計測結果と移動ロボットの走行結果を可視化したものである. また, 図 13 (c), (f) では図 13 (b), (e) 中の 2 地点 (point 1, point 2) における VFH の生成結果をそれぞれ示している. 図 13 (c) から, PIONEER 3-DX を使用した場合は, 走行不可能な不整地領域に対して閾値を上回る危険度が算出されているのに対し, 走行可能な平地領域に対しては閾値を下回る危険度が算出されている. これは, PIONEER 3-DX の不整地走行性能を鑑みると, 妥当な推定結果となっている. 一方, 水陸両用移動ロボットを使用した場合は, 図 13 (f) の VFH では不整地領域に対しても閾値を下回る危険度が算出されており, 該当領域が走行可能であるという判断のもと, この方向を進路として選択し不整地領域を走破するという行動が生成されている. これも, 不整地領域を走破することが可能な水陸両用移動ロ

ボットの不整地走行性能を考慮すると, 妥当な推定結果となっている.

図 13 (b), (e) に示した各移動ロボットの走行結果について, 目標地点までの所要時間を計測した結果を表 3 に示す. 不整地領域を回避し目標地点まで到達した PIONEER 3-DX の場合は, 不整地領域を走破し目標地点まで直線的に移動した水陸両用移動ロボットの場合と比較して所要時間が長くなっている. 実機実験においても, 提案手法により移動ロボットの不整地走行性能に応じた効率的な行動生成が実現されたことが確認できた. このことから, 提案手法では不整地走行性能の異なる移動ロボットに対して, 各移動ロボット固有の不整地走行性能に応じた走行可能性推定結果を出力可能であり, 生成された走行可能性推定の結果をもとにして行動生成を実現するための進路方向判断が可能であることが示された.

8. 結 論

本研究では, 複雑な不整地領域を含む未知環境内での移動ロボット運用において, 不整地に対する走行可能性推定と進路方向判断を実行し, 行動を生成するための手法を構築した. 提案手法では, 移動ロボット上に搭載された測域センサによる環境計測値から複数の地形特徴量を算出し, これらをファジィ推論への入力とすることで不整地領域に対する走行可能性推定を実行した. 推定された走行可能性に基づき VFH を生成し, VFH から移動ロボットの進路方向を決定した. 選択された進路方向への移動ロボットの行動生成に関しては, 目標姿勢への追従を利用した制御入力生成手法を利用した. この際, VFH 中の値に応じて適切な制御入力が生成されるため, 不整地領域の走行可能性に応じた行動生成が可能となった.

実証実験では, 不整地走行性能の異なる複数の移動ロボットを用いたシミュレーション実験・実機実験によって提案手法の有効性を確認した. 実験結果から, 凹凸や障害物による複雑な不整地領域に対して, 提案手法により移動ロボットに固有の不整地走行性能に応じた走行可能性推定を実行し, その結果に基

づいた適応的な行動生成が可能であることが示された。

本研究で設定した3つの目的と、ここまでの成果を対応付けると次のようになる。(i)については、提案手法によって、シミュレータ上に構築した災害対応ロボットの機能評価用環境および実環境中に構築した不整地領域に対して適切な走行可能性推定が実行可能であった。このような環境は、従来研究では見られなかった凹凸地形を含んでいるため、実証実験結果によって提案手法による複雑地形への対応可能性が実証された形となっている。(ii)については、異なる不整地走行性能を持つ2種類の移動ロボットを用いた実験結果によって実証された。具体的には、不整地走行性能の低い移動ロボットでは不整地領域を走行不可能と判断し、回避行動を選択するのに対し、不整地走行性能の高い移動ロボットでは不整地領域を走行可能であると判断し、走破するという、異なる判断・行動結果を生成することが可能であった。(iii)については、走行可能性判断結果からVFHを生成し、VFHの情報をもとに制御速度を算出し移動ロボットに対して入力することにより実現できた。制御速度算出の際のゲイン値決定に関して、走行可能性推定結果を反映した調整を施すことにより、適切な減速を行いつつ目標地点までの行動が達成できた。

今後の展望としては、本研究において行った実証実験とは異なる対象環境での提案手法の有効性検証、さらに多様な移動ロボットを用いた提案手法の適用可能性検討等が必要である。特に、災害現場を想定した複雑な不整地領域が存在する環境中では、最小二乗法による近似平面算出が不安定となる恐れがあるため、外れ値やノイズに対してロバストな近似平面算出方法を適用する必要がある。また、本研究ではフェジールールによる走行可能性のマッピングを固定し実証実験を行ったが、異なるマッピング方式での動作検証を行い、フェジールールの妥当性・適応性を検証していくことも必要である。実証実験では、移動ロボットの行動生成結果について、ある地点を選択し走行可能性推定結果の精度・妥当性を検証したが、今後は、移動ロボットの行動生成中に連続的に生成されるVFHについて、様々な局面を抽出し、各局面において精度の良い走行可能性推定が実行できているかという点についても検証を進めることが

重要である。提案手法においては計算処理の実行中に使用される各種パラメータ値をシステム使用者が事前に設定し、動作させている。システム使用者の経験則に基づいたチューニングが必要であるという点で、提案手法は汎用性の低さが課題となっており、今後は、これらパラメータ値の設計指針を明らかにし、システムを運用する際の参考とする枠組みの構築を目指す。

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。

参 考 文 献

- 1) 浅間 一: 災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築, 日本ロボット学会誌, **32**, 1 (2014) 37.
- 2) S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L. E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. V. Niester, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge, *Journal of Field Robotics*, **23**, 9 (2006) 661.
- 3) A. Y. Hata and D. F. Wolf: Terrain Mapping and Classification Using Support Vector Machines, *Proceedings of the 6th IEEE Latin American Robotics Symposium* (2009) 1.
- 4) 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*, **79**, 11 (2013) 1117.
- 5) K. M. Wurm, R. Kummerle, C. Stachniss, and W. Burgard: Improving Robot Navigation in Structured Outdoor Environments by Identifying Vegetation from Laser Data, *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2009) 1217.
- 6) J. Borenstein and Y. Koren: The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **1**, 3 (1991) 278.
- 7) E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers Control and Science*, **121**, 12 (1974) 1585.
- 8) Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi: A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot, *Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **1** (1990) 384.
- 9) ASTM International: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Crossing Pitch/Roll Ramps, <http://www.astm.org/DHS/E2827.pdf> (2011) (reference 2015. 1. 15).