

# 複数台移動ロボットによる環境計測結果に基づいた 不整地走行のための移動ロボットの進路方向決定手法の構築

田中 佑典<sup>\*1</sup>, 池 勇勳<sup>\*1</sup>, 河野 仁<sup>\*1</sup>, 田村 雄介<sup>\*1</sup>,  
江本周平<sup>\*2</sup>, 板野 肇<sup>\*2</sup>, 村上 弘記<sup>\*2</sup>,  
山下 淳<sup>\*1</sup>, 浅間 一<sup>\*1</sup>

## Construction of Course Detection Method for Mobile Robot on Rough Terrain Based on 3D Environment Measurement by Multiple Mobile Robots

Yusuke TANAKA<sup>\*1</sup>, Yonghoon JI<sup>\*1</sup>, Hitoshi KONO<sup>\*1</sup>, Yusuke TAMURA<sup>\*1</sup>,  
Syuuhei EMOTO<sup>\*2</sup>, Hajime BANNO<sup>\*2</sup>, Hiroki MURAKAMI<sup>\*2</sup>,  
Atsushi YAMASHITA<sup>\*1</sup> and Hajime ASAMA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Precision Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>\*2</sup> IHI Corporation, 1 Shinnakahara-chou, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 235-8501, Japan

This paper describes a novel method for course detection of mobile robot. In this research, we focus on the scene when mobile robot cannot select appropriate course direction by its own sensor measurement. The proposed method uses multiple mobile robots system to perform appropriate course detection. Appropriate course detection is realized by data integration of terrain traversability analysis results from multiple mobile robots. Data integration is executed based on calculated distance between multiple mobile robots and mobile robots' relative attitude. The experimental result shows that the proposed method can decide appropriate course direction of mobile robot in the computer simulation environment.

**Key Words** : Multiple mobile robots, Course detection, Terrain traversability analysis

### 1. 緒 言

近年, 2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故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. 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, 2005 年に開催された DARPA グランドチャレンジでは, 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<sup>(1)</sup>. しかし, 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, ここでの研究成果は災害発生時のような未知環境内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サポートベクトル分類器によって 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<sup>(2)</sup>. これらの手法では, 判別器を構成するための教師データが必要であり, 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. 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) を利用し教師データを生成する手法が提案されている<sup>(3)</sup>. しかし, ここでの対象はある程度整地

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) {tanaka, ji, kono, tamura, yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup> 株式会社 IHI (〒 235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1) {syuuhei.emoto, hajime.banno, hiroki.murakami}@ihi.co.jp

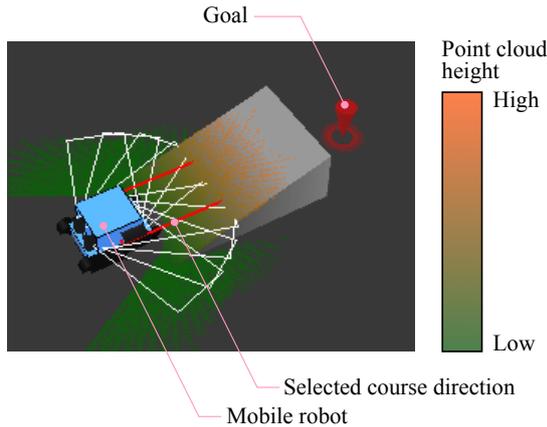


Fig. 1 Scene example of inefficient selection of course direction.

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、効果的な判別結果が得られない可能性がある。

このような従来研究に対して、筆者らは教師データの収集を行うことなく複雑な不整地領域に対する走行可能性推定を実行し、移動ロボットの進路方向を決定可能な手法を提案した<sup>(4)</sup>。この手法では、1台の移動ロボットについて、ロボット上に搭載されたレーザ測域センサを使用して移動ロボット周囲近傍の環境を計測し、計測対象領域の走行可能性推定を実行する。ここでは、移動ロボットの周囲近傍という限定的な領域に関する走行可能性推定結果のみを利用して移動ロボットの進路方向を決定しており、走行可能性推定の対象とならなかった領域の地形構造によっては不適切な進路方向判断がなされる可能性があった。このような問題が発生する環境の一例を図1に示す。図1にはセンサの計測値として獲得された点群データの可視化結果、移動ロボットに設定された目標地点、先行研究<sup>(4)</sup>の手法によって決定される移動ロボットの進路方向が示されている。ここでは、移動ロボットは前方に存在する傾斜領域を走行可能であると判断し、これを走破して目標地点まで到達するための進路方向を選択しているが、傾斜領域の終端は走行不可能な段差となっているため、移動ロボットが最終的に傾斜領域を走破することは不可能であり、ここで決定された進路方向は不適切である。このような状況が発生する原因は、走行可能性推定の対象となる領域の範囲外に存在する段差の情報が考慮されていないことであり、走行不可能な段差の存在も走行可能性推定の際に勘案することで適切な進路方向選択が可能になると考えられる。

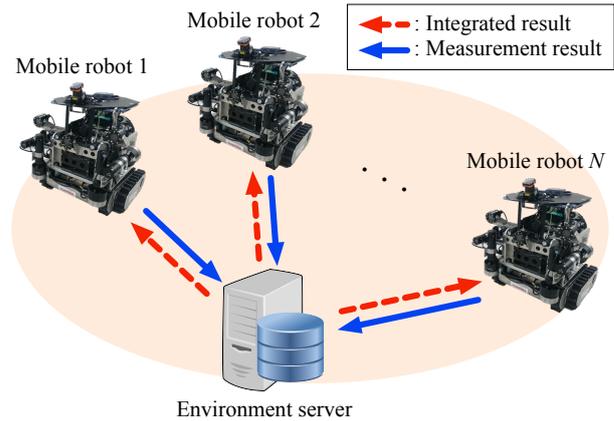


Fig. 2 System configuration.

このような問題点を踏まえ、本研究では環境中に複数の移動ロボットを配置し、各移動ロボットによる環境計測結果を移動ロボット間で共有することにより、1台の移動ロボットでは実現不可能であった適切な進路方向選択を実現するための手法を提案する。本研究の目的は、移動ロボットによる不整地走行を行い目標地点まで到達することを計画する際に、1台の移動ロボットでは適切な進路方向の選択が困難な状況において、複数の移動ロボットによる環境計測結果を共有することにより適切な進路方向選択を実現するための手法の構築とする。

## 2. 提案手法

**2.1 概要** 本研究では、移動ロボット間で環境計測結果を共有するためのシステムとして、図2中に示す環境サーバを用いる。環境サーバは移動ロボット間で情報共有を行う際の情報収集地点および情報中継地点の役割を果たす。

環境サーバと移動ロボットの間でやり取りされるデータの流れを図3に示す。処理の流れとしては、まず各移動ロボットが個別に収集したセンサ情報から走行可能性推定をそれぞれ実行する。続いて、各移動ロボットが算出した、走行可能性推定結果および世界座標系に対する自己位置の情報が環境サーバに対して送信される。環境サーバは各移動ロボットによる計算結果を収集し、収集した情報に基づき走行可能性推定の結果を更新する。更新された走行可能性の推定結果は、各移動ロボットに対して送信され、各移動ロボットはこの推定結果を利用して進路方向の決定を行う。本研究の提案システムにおいて、個々の移動ロボットによる走行可能性推定は先行研究<sup>(4)</sup>の手法によって実行され、VFH (Vector Field Histogram) という形式で処理結果の出力がなされる。ここで、VFHは移動ロボッ

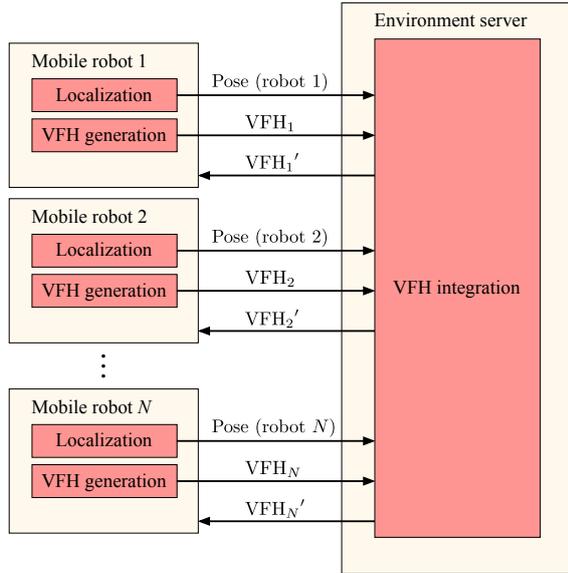


Fig. 3 Illustration of data processing flow.

ト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<sup>(5)</sup>。提案手法では移動ロボットによる目標地点までの到達を計画する際に、個々の移動ロボットについて出力されたVFH（図3中の $VFH_1, VFH_2, VFH_N$ ）に対して統合処理を施し、複数台の移動ロボットによる環境計測情報に基づく総合的な判断結果として、1台の移動ロボットでは実現不可能だった適切な進路方向選択を実現するためのVFHを出力する（図3中の $VFH_1', VFH_2', VFH_N'$ ）。環境サーバ中に収集された計測情報によって更新されたVFHは移動ロボットに対して送信され、各移動ロボットはVFHの情報に基づき進路方向の決定を行う。

**2.2 個別の移動ロボットによるVFHの生成** 環境中に配置された各移動ロボットは、個別に収集した環境計測の結果に基づき走行可能性推定を実行し、VFHを生成する。VFHの生成は先行研究<sup>(4)</sup>の手法に従い、点群データに対する地形特徴量の算出、ファジィ推論を利用した走行可能性推定という処理を経てVFHが生成される。この時点で生成されるVFHは各移動ロボットのセンサ情報に対応しており、図3中の $VFH_1, VFH_2, VFH_N$ がこれらに相当する。生成されるVFHの例を図4に示す。VFHが持つ情報としては、横軸値が移動ロボットに対する相対的な方向を示しており、縦軸値が対応する方向に関して算出された危険度値となっている。

**2.3 個別に生成されたVFHの統合** 移動ロボットの適切な進路方向判断を実現するために、各移

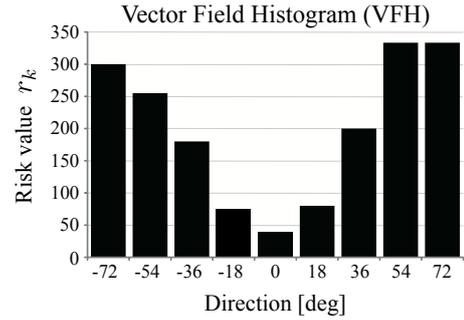


Fig. 4 Example of VFH.

動ロボットによって個別に生成され環境サーバが収集したVFHに対して統合処理を施し、新たなVFHを生成する。ここでは、環境中に移動ロボット1および移動ロボット2の2台の移動ロボットが存在することを想定し、図3の表記に従い、各移動ロボットが収集した計測情報を利用して個別に生成されるVFHを $VFH_1, VFH_2$ と定義し、これらのVFHを統合した結果として各移動ロボットに送信されるVFHを $VFH_1', VFH_2'$ と定義する。VFHの統合で実行される処理は、次の2つに大別することができる。

- (i) 移動ロボット間の距離に基づき、VFHにおける危険度値を重み付ける。
- (ii) 各移動ロボットの位置・姿勢情報に基づき、VFHにおける危険度値を更新する。

(i)の危険度値の重み付けでは、オドメトリやGPSといったセンサ情報を使用して各移動ロボットが算出する自己位置の座標を利用し、移動ロボット間の距離を算出する。環境中に移動ロボット1、移動ロボット2が存在する場合、各移動ロボットは自己位置推定の結果 $x_1', x_2'$ という状態量をそれぞれ算出することができる。状態量 $x_1', x_2'$ を次のように定式化する。

$$x_1' = (x_1, y_1, \theta_1), \quad (1)$$

$$x_2' = (x_2, y_2, \theta_2), \quad (2)$$

状態量 $x_1', x_2'$ の概念図を図5に示す。移動ロボット1、移動ロボット2の間の距離 $L_{12}$ は世界座標系におけるユークリッド距離として定義する。

$$L_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (3)$$

環境中に存在する、ある移動ロボットについて、自分以外の移動ロボットによって生成されたVFH上に表現されている危険度に対して移動ロボット間の距離 $L_{12}$ を利用した重み付けを行う。具体的には、複数のVFHの統合結果として移動ロボット1に送信するための $VFH_1'$ を生成するために、移動ロボット2が生成し

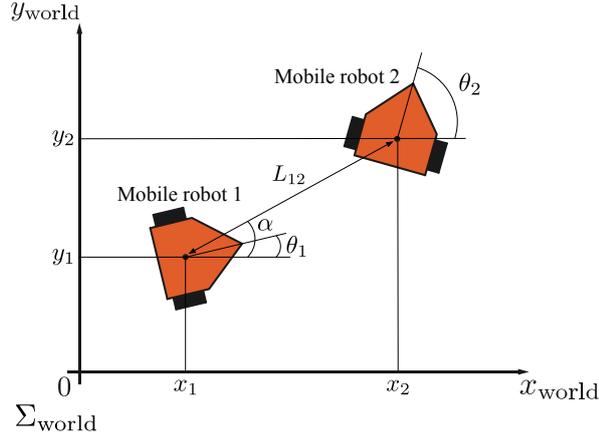


Fig. 5 Illustration of mobile robots' poses.

た  $VFH_2$  に対して重み付けを行い、 $VFH_1$  と重み付けられた  $VFH_2$  を統合することで  $VFH_1'$  を生成する。同様に、複数の  $VFH$  の統合結果として移動ロボット 2 に送信する  $VFH_2'$  を生成するために、移動ロボット 1 が生成した  $VFH_1$  に対して重み付けを行い、 $VFH_2$  と重み付けられた  $VFH_1$  を統合することで、 $VFH_2'$  を生成する。重み付けにおいて使用する重み  $w$  は、次の定式化に従い、算出する。

$$w = \begin{cases} -\frac{1}{L_{th}}(L_{12} - L_{th}) & (0 \leq L_{12} \leq L_{th}) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}, \quad (4)$$

ここで、 $L_{th}$  は移動ロボット間の距離が  $VFH$  の重み付けに与える影響を制御するためのパラメータである。

$VFH$  上に表現されている危険度に対する重み付けは、次の定式化に従う。ここでは、 $VFH_1'$  を生成するために  $VFH_2$  に対する重み付けを行う際の定式化を明示的に示す。

$$\forall \phi \in \text{Direction set in } VFH_2, r_{\phi}^{2'} = w r_{\phi}^2, \quad (5)$$

ここで、 $r_{\phi}^2$  は  $VFH_2$  の縦軸値である危険度であり、移動ロボット 2 周囲近傍の前方領域に関して算出される。 $r_{\phi}^2$  における  $\phi$  は、移動ロボットに対する相対的な方向を示す変数であり、移動ロボットに対して方向  $\phi$  についての危険度  $r_{\phi}^2$  が算出され  $VFH_2$  として表現されることになる。移動ロボット間の距離によって算出された重み  $w$  と  $VFH_2$  中の危険度値  $r_{\phi}^2$  の積をとることにより、 $VFH_2$  中における危険度の値を重み付け、新しい危険度値  $r_{\phi}^{2'}$  を得る。

(ii) の位置・姿勢情報に基づき、 $VFH$  における危険度値の更新を行う処理では、移動ロボットの位置座標同士がなす角を利用して危険度値更新の対象となる方向を選定し、対象となった方向についての危険度値を更

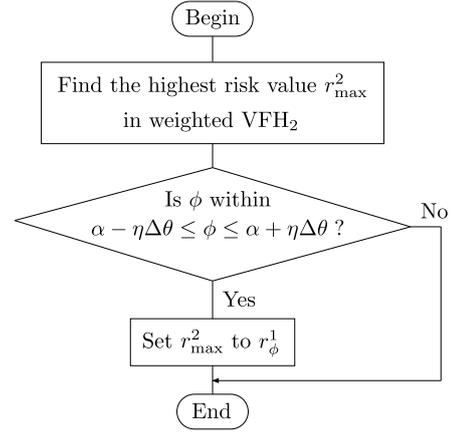


Fig. 6 Flowchart of risk value update.

新する。 $VFH_1'$  を生成する際の、移動ロボットの位置座標を利用した危険度値更新のフローチャートを図 6 に示す。図 6 において、 $r_{\max}^2$  は  $VFH_2$  中で最も高い危険度値、 $\alpha$  は環境中に存在する移動ロボット 1 および移動ロボット 2 の位置座標同士がなす角、 $\eta$  は危険度値更新の対象となる方向を選択するためのパラメータ、 $\Delta\theta$  は先行研究<sup>(4)</sup>の手法によって  $VFH$  を生成する際に設定される角度方向のスライド量を示している。移動ロボットの位置座標がなす角  $\alpha$  は次のように定義される。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (6)$$

また、図 6 における  $\phi$  は  $VFH_1$  の横軸値として表現されている移動ロボット 1 に対する相対的な角度を示す変数である。危険度値の更新処理では、移動ロボット 2 による危険度値の算出が行われた領域の、移動ロボット 1 に対する相対的な存在位置を算出し、 $VFH_1$  において、そのような領域が存在している方向の危険度値を更新することになる。更新する際に用いられる危険度値は、重み付けを施した  $VFH_2$  において最も高い危険度値を示した値を使用する。

以上 (i)、(ii) の処理により、各移動ロボットが獲得した環境計測情報から個別に生成された  $VFH$  を統合し、移動ロボットによる目標地点までの到達を計画する際の適切な進路方向の決定を実現するための新たな  $VFH$  を生成する。新たに生成された  $VFH$  は、環境サーバから各移動ロボットに対して送信され、移動ロボットは先行研究<sup>(4)</sup>の方法論に従い進路方向の決定を行う。

### 3. シミュレーションによる実証実験

提案手法により、複数の移動ロボットによる環境計測結果を統合し適切な進路方向を決定することが可能か検証を行った。本研究では、環境中に同一の移動ロ



Fig. 7 Mobile robot used in the experiment.

Table 1 Mobile robot's specifications.

Size	690 × 650 × 610 mm
Weight	80 kg
Traversable slope	34 degree

ロボットが2台存在するとし、各移動ロボットと環境サーバを仮想的に実装したシミュレータ内の環境に対して提案手法を適用することでその有効性を検証した。実証実験において想定した移動ロボットを図7に示す。図7に示す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水陸両用移動ロボットであり、不整地走行に特化した仕様となっている。水陸両用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。シミュレーション実験において構築した環境は、図1に示した環境と同一であり、主要な寸法を図8に示す。また、提案手法に対して設定されるパラメータ値を表2に示す。ここで、表2中の  $r_{limit}$  は先行研究<sup>(4)</sup>の手法を利用してVFHから移動ロボットの進路方向を決定する際に用いられる危険度閾値の値である。実証実験では、移動ロボット1が生成したVFH<sub>1</sub>に対して、移動ロボット2が生成したVFH<sub>2</sub>を重み付けて統合することにより、移動ロボット1の適切な進路方向判断を実現するためのVFH<sub>1</sub>'を生成し、その生成結果を確認した。

シミュレーションによる実証実験の結果を図9に示す。図9(a)に示されている移動ロボット1の進路方向選択結果は、図9(d)に示すVFHの出力結果と対応する。また、実証実験において算出された移動ロボット間の距離  $L_{12}$ 、位置座標同士がなす角  $\alpha$ 、VFHの重み  $w$ を表3に示す。移動ロボット1による目標地点までの到達を計画する際に、移動ロボット1が進路方向として決定する方向は、図9(b)、図9(d)中の斜線塗りの長方形によって示されている方向である。図9(b)に示す移動ロボット1の環境計測結果のみを利用して生成したVFH<sub>1</sub>では、移動ロボット1は自身の前方に存在する斜面領域を進路方向として選択しているが、斜面領域の末端が走行不可能な段差となっていることを

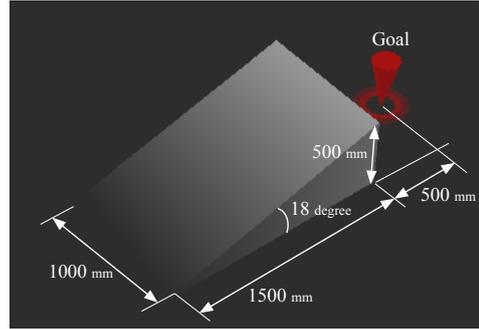


Fig. 8 Experimental environment on the simulator.

Table 2 Parameter values used in the experiment.

$L_{th}$	20 m
$\eta$	6
$\Delta\theta$	18 degree
Risk value threshold: $r_{limit}$	70

Table 3 Parameter values calculated in the experiment.

$L_{12}$	2.06 m
$\alpha$	-60.9 degree
$w$	0.897

考慮すると、これは不適切な進路方向判断である。一方、図9(d)に示す、VFH<sub>1</sub>と重み付けられたVFH<sub>2</sub>との統合により生成されたVFH<sub>1</sub>'では、移動ロボット2による計測結果も勘案することで、最終的に決定された移動ロボットの進路方向は斜面領域終端の段差の存在も考慮されたものとなっている。このことから、提案手法によって複数の移動ロボットによる環境計測結果を統合することで、1台の移動ロボットによる環境計測結果のみでは実現不可能であった適切な進路方向の決定が可能であることが確認できた。

#### 4. 結 言

本研究では、移動ロボットによる不整地走行を行い目標地点までの到達を計画する際に、環境中に複数の移動ロボットを配置することで、1台の移動ロボットでは実現不可能だった適切な進路方向選択を実現するための手法を構築した。提案手法では、環境中の各移動ロボットが取得する環境計測結果を統合することにより、複数の環境計測情報を勘案した総合的な処理結果を算出する。具体的には、各移動ロボットが収集した環境計測結果に基づき個別に生成されるVFHを、移動ロボット間の距離を利用したVFHの重み付け、および各移動ロボットの位置・姿勢情報を利用したVFHにおける危険度値の更新という方法論により統合する

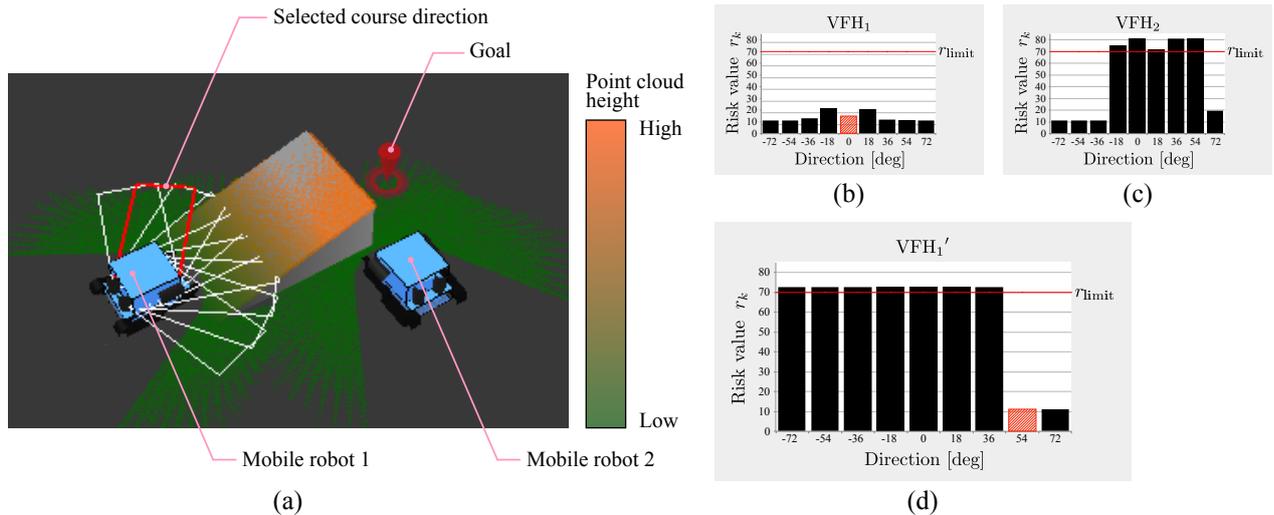


Fig. 9 Experimental result: (a) visualized experimental result on the simulator, (b) generated VFH from mobile robot 1's measurement, (c) generated VFH from mobile robot 2's measurement, (d) integrated VFH.

ことで、総合的な処理結果としてのVFHを生成する手法である。ここで生成されるVFHは、移動ロボットによる目標地点までの到達を計画する際に、1台の移動ロボットでは出力不可能である適切な進路方向選択を実現するものとなっている。

実証実験では、シミュレーション環境中において複数台の移動ロボットを配置し、各移動ロボットによる環境計測結果を仮想的に実装された環境サーバ中で統合することで最終的な出力としてのVFHを生成した。実験結果から、移動ロボットによる目標地点までの到達を計画する際に、1台の移動ロボットでは実現不可能だった適切な進路方向の決定が提案手法によって可能となることが示された。

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、多様な対象環境中での提案手法の有効性検証が必要である。特に、提案手法を実環境において実行した場合には、様々な外乱により実行結果にばらつきが生じることが想定されるため、外乱による不確実性も織り込んだ形へと提案手法を拡張していくことが重要である。また、提案手法において使用される各種パラメータ値はシステム使用者が経験則に従い事前に設定するものとなっているため、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とともに、システムを実機に対して実装し、実環境に対する有効性の検証を進める計画である。

## 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。

## 参考文献

- (1) S. Thrun, M. Montemerlo, and A. Aron, "Probabilistic Terrain Analysis For High-Speed Desert Driving", *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, (2006), pp.16–19.
- (2) 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, (2013), pp.1117–1123.
- (3) 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), pp.1217–1222.
- (4) 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), pp.3965–3970.
- (5) 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, (1991), pp.278–288.