

ロボット遠隔操作のための LiDAR を用いた 全方位 3 次元測距による俯瞰映像上での障害物提示*

粟島靖之** 小松 廉** 藤井浩光*** 田村雄介*** 山下 淳† 浅間 一†

Visualization of Obstacles on Bird's-Eye View by Omnidirectional 3D Ranging Using LiDAR for Remote Controlled Robot

Yasuyuki AWASHIMA, Ren KOMATSU, Hiromitsu FUJII, Yusuke TAMURA, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

Bird's-eye view system is one of image presentation systems for teleoperation. Bird's-eye view image helps an operator to visually recognize surrounding environments because of its high visibility. However, when there are obstacles that are higher than the floor or the ground, there is a problem that their positional appearance is incorrectly shown on bird's-eye view image because of the image distortion. This paper presents a new method to visualize correctly obstacles' positional appearance on the bird's-eye view image by omnidirectional 3D ranging. Specifically, the information of the distance to obstacles measured by LiDAR is superimposed onto the floor or the ground as points with colors obtained by fish-eye cameras. As shown in the experimental results, the image generated by this proposed method can improve the safety and visibility in teleoperation.

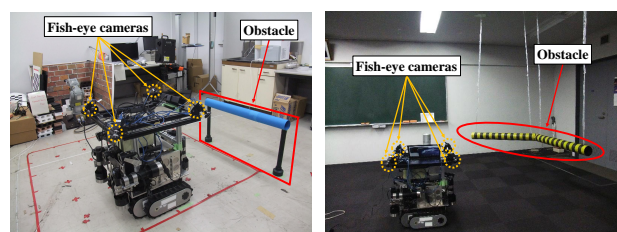
Key words: teleoperation, remote controlled robot, obstacle visualization, lidar, bird's-eye view

1. 序 論

地震や台風、火山の噴火などの自然災害が発生した際に、被害を最小限に抑えるために復旧作業や調査を迅速に行うことは極めて重要である。しかし、災害現場の中には、二次災害の危険性などの影響から、人の立ち入りが困難な災害現場も存在する。そのため、遠隔操作ロボットを用いた復旧作業や調査が要請されている^{1)~4)}。近年、作業効率を向上させるためのロボット遠隔操作の映像提示技術に関する研究が盛んに行われている^{5)~7)}。ロボット遠隔操作における映像提示技術の一つとして、俯瞰映像提示システムがある^{7)~17)}。俯瞰映像提示システムとは、ロボットに複数台の広角カメラを搭載し、それらから取得した映像を処理・統合することによって、ロボットを上空の第三者視点から俯瞰したような映像を疑似的に提示するシステムである。このシステムにより、遠隔地のオペレータがロボットと周囲環境との相対的な位置関係を把握することが容易となり、ロボットの移動時における操作性が向上する⁷⁾。また、ロボットの遠隔操作のみならず、様々な分野において俯瞰映像提示システムの実用化が進展しており、自動車の駐車を支援するシステムであるアラウンドビューモニタ¹⁰⁾や、鉱山機械に用いる全周囲安全支援装置 SkyAngle¹¹⁾など数多くの実用例が存在する。

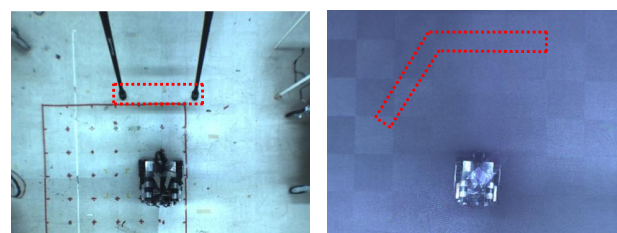
これら従来手法は、ロボットの効率的な移動が求められる災害対応にも有効であると考えられる。その際に解決すべき課題の一つとして、床面より高さのある障害物が俯瞰映像中に映り込む場合に、障害物の位置が俯瞰映像上で不正確に描画されるという問題が存在する。このような障害物の具体例を図 1(a)、図 1(b)に示す。これらの状況において、従来手法¹²⁾により生

成した俯瞰映像を図 2(a)、図 2(b)にそれぞれ示す。図 2(a)、図 2(b)における赤色の破線で囲まれた領域は、床上に障害物が存在しており実際に上空から撮影した場合には俯瞰映像中に障害物が描画されるべき領域である。しかし、図 2(a)では、本来俯瞰映像上で描画されるべきではないポールが映像中に伸長されたように描画されており、障害物の位置が不正確に提示されている。また、図 1(b)に示すように、配管の一部のような魚眼



(a) An obstacle on the floor that is lower than the fish-eye cameras (b) An obstacle in the air that exists at the same height as the fish-eye cameras

Fig. 1 Example situations in which there is the obstacle that is higher than the floor. In this case, the positional appearance is incorrectly shown on the conventional bird's-eye view (Fig. 2(a) and Fig. 2(b))



(a) The obstacle as shown in Fig. 1(a) should be shown in the area encircled by the red broken line. (b) The obstacle as shown in Fig. 1(b) should be shown in the area encircled by the red broken line.

Fig. 2 Bird's-eye view images generated by the conventional method. The positional appearance is incorrectly shown on the images

* 原稿受付 平成 29 年 5 月 15 日
掲載決定 平成 29 年 7 月 31 日
** 学生会員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)
*** 東京大学大学院
† 正 会 員 東京大学大学院

カメラと同等の高さの空中に存在するような障害物が広角カメラ映像に映る場合には、図 2(b) から確認できるように俯瞰映像中に障害物が全く描画されていない。このように従来手法では、環境中に高さのある障害物が存在する場合に、実際に上空の視点からロボットを含む周囲環境を俯瞰した際の映像とは異なる映像が生成されるという課題が残されている。

この問題は、従来手法¹²⁾での俯瞰映像生成に用いられているカメラ映像の投影方法に原因がある。具体的には、俯瞰映像を生成する際に、撮像された全ての物体が床面や地面などの同一の平面上に存在するという仮定の下、広角カメラより取得された映像をその平面に対して一様に投影していることである。このような空中に存在する障害物は、配管や倒木などをはじめとして屋内の災害現場に数多く存在する。したがって、この問題点は災害現場をロボットが移動する際に特に深刻であり、実際に災害現場において従来手法の俯瞰映像を用いてロボットの遠隔操作を行った場合には、オペレータが周囲環境を誤認し、ロボットと障害物の衝突を招く危険性がある。以上の問題に対して、本研究では、障害物の位置を俯瞰映像上で正確に提示するシステムの構築を目的とする。

2. アプローチ

本章では、第 1 章で述べた問題を解決するためのシステムにおける要求仕様を明確化した後、その問題に対する関連研究について述べる。続いて、本研究の提案手法の概要を説明し、それら要求仕様との対応を確認する。

2.1 要求仕様

遠隔操作による災害対応ロボットの移動に用いる映像に対して、主に以下の 3 点の要求仕様を設定する。

1. ロボットに対する周囲障害物の位置の正確な提示
2. 障害物のテキスト情報の提示
3. 不確かな情報に関する注意喚起

1 点目については、実際にロボットの上から周囲環境を俯瞰した映像と同様に見えるよう、障害物を俯瞰映像上で正確な位置に提示する。特に、狭路などを通過する際にはロボット前方だけではなく周囲の広い範囲の映像が必要となる。

2 点目については、周囲環境の視認性に優れた映像を提示するため、映像上で障害物そのもののテキスト情報を提示する。これにより、オペレータが障害物の存在のみならず障害物の種類を識別することが容易となり周囲環境の視認性が向上する。

3 点目について、周囲環境には障害物の遮蔽によりセンサなどで測定することができず、俯瞰映像上で正確に描画することが不可能な領域が存在する。また、障害物の背後にロボットが進入することは困難と考えられる。本研究では、オペレータの周囲環境の誤認を最小限に抑え、かつ安全なロボット遠隔操作を実現するため、そのような領域をオペレータが察知できるように映像中で明示する。

2.2 関連研究

俯瞰映像を用いたロボットの遠隔操作における周囲環境の誤認および障害物との衝突の問題に取り組んだ研究として、Uehara らによって、障害物が存在する領域を俯瞰映像中で提示する手法が提案されている¹³⁾。この手法では、複数台のカメラを車両側面に密に配置し、俯瞰映像におけるカメラ同士のオーバーラップ領域へ投影される複数の画像間の画素値の差分から

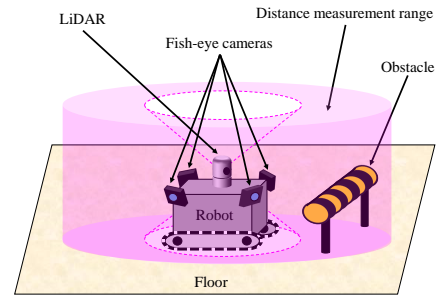


Fig. 3 System configuration diagram in the proposed method

障害物を検出し、障害物が存在する領域を俯瞰映像中で提示している。この手法により、オペレータが周囲環境に存在する障害物の位置を視認することを容易としている。しかし、この手法では、床面の色情報との差分を用いて障害物の検出を行っているため、周囲環境が暗所である場合や、障害物の色が床面の色と酷似しているような場合は正確に障害物を検出することは難しい。また図 1(b) に示すようなカメラと同等の高さの空中に存在する障害物の検出も困難であるため、そのような障害物を映像中で正確な位置に提示することは困難である。

また、Laser Range Finder (LRF) や距離画像センサを用いて床面より高さのある障害物を検出し、その情報を従来の俯瞰映像に重畳表示する手法が提案されている¹²⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。Sato らによって提案された手法¹²⁾では、2次元 LRF を用いて特定の平面上に存在する物体までの距離を計測し、その距離情報をもとにオペレータに障害物の存在を提示している。しかし、物体までの距離を計測する範囲が特定の平面上であるため、障害物の高さや形状などによっては、その位置を正確に描画することは困難である。Awashima らは 3次元測域センサを用いて検出した障害物を俯瞰映像上に提示する手法を提案している¹⁴⁾¹⁵⁾。しかし、この手法では、ロボットの進行方向についての障害物の提示しか行っておらず、ロボットの側面など周囲の障害物との衝突を回避する目的では不十分であった。3次元測域センサをロボットに対して複数台搭載し、それらから計測されるデータを統合することで全方位の障害物を提示する手法も考えられる。しかし、Kinect などをはじめとする 3次元測域センサは太陽光の影響を受けやすいため、屋外の災害現場などで使用した場合には正確な 3次元情報を取得することが困難である。また、複数台の 3次元測域センサを搭載した場合には、各センサの投影光の相互干渉により、計測データに欠損やノイズなどが発生する危険性が存在する上、処理時間やシステムの稼働に要するプロセッサ数の増加など、システムの実装面において大きな課題がある。そのため、屋内および屋外環境におけるシステムの実運用を想定した場合に、そのようなアプローチは有用性が低いと考えられる。

2.3 提案手法の概要

本研究では、実際にロボットの上から周囲環境を俯瞰した映像と同様に見えるような映像を生成する。そこで、障害物全体の 3次元的な測距を行い、そこで取得された距離情報をもとに障害物の位置を俯瞰映像上で正確に提示する手法を提案する。

具体的なシステム構成としては、図 3 に示すように、従来システムで用いられていた複数台の魚眼カメラに加えて、Light Detection and Ranging (LiDAR) をロボットに搭載する。LiDAR

は、複数本のレーザー光を放射状に照射し、Time of Flight の原理を用いることで、屋内外に寄らず、360 度全方位の測距が可能な 3 次元測域センサであり、周囲環境の 3 次元情報を 3 次元点群として取得できる。深度取得可能範囲についても、1 m ~ 100 m と非常に広範囲を測距することが可能であり、屋外の災害現場における大型建機などへの搭載も適当であると考えられる。LiDAR により取得される情報をもとに障害物を検出し、障害物の位置情報を 2 次元点群として従来の俯瞰映像に重畳表示することで位置情報と俯瞰映像を統合し、図 2(a) および図 2(b) の赤色の破線で囲まれた部分のような本来障害物が存在する領域に障害物を提示する。このような 1 点目の要求仕様を満たす映像を提示することで、ロボットの遠隔操作においてオペレータの周囲環境の誤認を防ぎ、ロボットと障害物との衝突を回避することが容易となる。

また、本研究では、障害物の位置情報を点群として俯瞰映像に重畳させる際に、2 点目の要求仕様に基づいて、それら点群に対して障害物そのもののテクスチャ情報を付与する。具体的には、魚眼カメラ画像座標系と LiDAR 座標系の対応関係を求め、その対応関係を用いることで点群に対して障害物そのもののテクスチャ情報を付与する。

加えて、周囲環境には障害物によって遮蔽されているため 3 次元情報を取得することができない領域が存在する。本研究では、これらの領域を遮蔽領域 (Occluded area) と呼ぶこととする。3 次元情報が欠如しているため提示している情報は不確かであり、そのような領域を俯瞰映像上で正確に描画することは不可能である。また障害物の存在によって、そのような領域にロボットが進入することが可能であるかどうかについても不確かである。したがって本研究では、3 点目の要求仕様に基づいて、情報の不確かな領域に対するオペレータの察知を促すために、鮮明色を用いることで俯瞰映像上で遮蔽領域を明示する。

以上で述べた提案手法により生成される映像は、従来の俯瞰映像が持つ、ロボットの移動面が高解像度である特長を有しており、かつ全方位の障害物の情報をオペレータに対して高速に提示可能である。本研究では、屋内外の災害現場などにおいて、計測データの欠損やノイズなどに対する考慮が不要な簡便かつ実運用性の高い映像提示システムを構築する。

3. 提案手法

本研究では、図 3 に示すように複数台の魚眼カメラと 1 台の LiDAR をロボットに搭載し、それらから取得される魚眼カメラ映像および 3 次元点群を用いて、床面より高さのある障害物を正確な位置に提示することが可能な俯瞰映像の生成手法を提案する。本研究における提案手法のアルゴリズムを図 4 に示す。提案アルゴリズムは、以下の 4 つの処理から成る。

- (i) 初期俯瞰映像の生成
- (ii) 障害物俯瞰映像の生成
- (iii) 遮蔽領域映像の生成
- (iv) 初期俯瞰映像との統合

(i) では従来手法の仮定に基づいて俯瞰映像を生成する¹²⁾。この段階では、撮像された全ての物体が特定の平面上に存在するという仮定を置いており、障害物の位置が正しく描画されていない。本研究では、この俯瞰映像を初期俯瞰映像と呼ぶこととする。(ii) では LiDAR より取得される 3 次元点群と魚眼カメラ映像を用いて生成した障害物のテクスチャ付き点群を

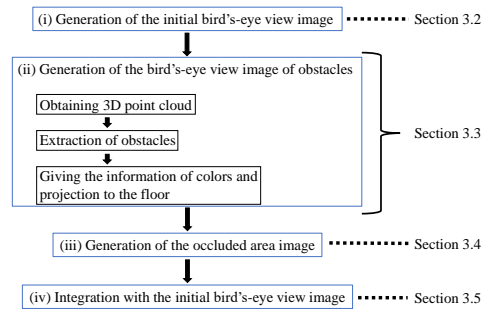


Fig. 4 Schematics of the proposed method algorithm

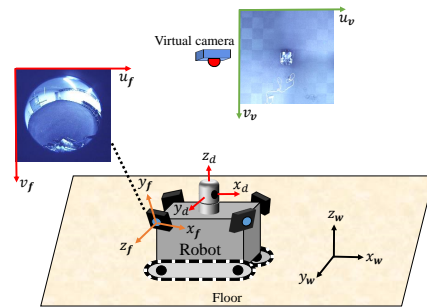


Fig. 5 Each coordinate's system

床面に投影した後、それらを俯瞰視点から眺めた映像を生成する。本研究では、その映像を障害物俯瞰映像と呼ぶこととする。(iii) では、(ii) で生成した障害物俯瞰映像をもとに遮蔽領域を提示した映像を生成する。本研究では、その映像を遮蔽領域映像と呼ぶこととする。(iv) では、(i) の初期俯瞰映像、(ii) の障害物俯瞰映像、(iii) の遮蔽領域映像の合計 3 種類の映像を統合し、2.1 節における要求仕様を満たした 1 枚の俯瞰映像を生成する。以下、これら 4 つの処理について詳細に説明する。

3.1 座標系の定義

本研究では、複数台の魚眼カメラと 1 台の LiDAR をロボットに搭載する。ロボット座標系における点 $\mathbf{P}_w = [x_w, y_w, z_w]^T$ の魚眼カメラ座標系、LiDAR 座標系における表現をそれぞれ $\mathbf{P}_f = [x_f, y_f, z_f]^T$ 、 $\mathbf{P}_d = [x_d, y_d, z_d]^T$ とし、魚眼カメラ座標系においては $\mathbf{m}_f = [u_f, v_f]^T$ と表す。初期俯瞰映像の生成においては、これらの点を俯瞰視点における仮想カメラ画像座標系における点 $\mathbf{m}_v = [u_v, v_v]^T$ に変換する。これらの各座標系の概念図を図 5 に示す。ここで、ロボット座標系の $x_w y_w$ 平面は床面と同一であり z_w 軸の正方向は床面に対して鉛直上向きとする。以降、任意の座標系における点 \mathbf{N} の同次座標系による座標表現を $\tilde{\mathbf{N}}$ とする。

3.2 初期俯瞰映像の生成

本節では、従来手法¹²⁾で提案された、魚眼カメラを用いた初期俯瞰映像の生成手法について述べる。この手法は、魚眼カメラで撮像された全ての物体が床面などの同一の平面上に存在するという仮定の下、魚眼カメラ映像をその平面に透視投影する。その後、視点変換処理を行うことで上空から周囲環境を俯瞰したような映像を生成する。

3.2.1 魚眼カメラ映像の歪み補正

魚眼カメラは、180 deg 前後の広い画角を持っており一度に広範囲を撮影することができる。魚眼カメラの射影方式は、一般的なカメラの透視投影方式とは異なり、魚眼カメラで撮影された映像は特有の歪みを有する。本研究では、Scaramuzza ら

よって提案された手法¹⁸⁾¹⁹⁾により求まる, 魚眼カメラ座標系における点 $\mathbf{P}_f = [x_f, y_f, z_f]^T$ と魚眼カメラ画像座標系における点 $\mathbf{m}_f = [u_f, v_f]^T$ の関係を用いることで, 魚眼カメラ映像の歪みを除去する. それらの関係は式 (1) で表現され, 魚眼カメラ画像座標系における各点と魚眼カメラ座標系における各方向ベクトルの 1 対 1 対応が関係付けられる.

$$\mathbf{P}_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} u_f \\ v_f \\ f(u_f, v_f) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ここで, 式 (1) の $f(u_f, v_f)$ は魚眼カメラ画像座標系における原点からの距離 $\sqrt{u_f^2 + v_f^2}$ に関する関数であり, a は魚眼カメラ座標系における各点と魚眼カメラ座標系における各方向ベクトルの関係を等式で表現するために設定した定数である. これを用いることで, 魚眼カメラ映像特有の歪みを除去し透視投影映像を生成する.

3.2.2 透視投影変換

魚眼カメラ映像を透視投影映像に変換した後, それらを特定の平面に対して透視投影する. まず, ロボット座標系と魚眼カメラ画像座標系は 3×4 行列の透視投影行列 $\mathbf{H}_{w \rightarrow f}$ により関係付けることができ, 2 つの座標系の間には式 (2) が成立する.

$$\tilde{\mathbf{m}}_f = \mathbf{H}_{w \rightarrow f} \tilde{\mathbf{P}}_w. \quad (2)$$

3.2 節の冒頭で述べたように, 本研究では, 従来手法に従って魚眼カメラに撮像された全ての物体がロボット座標系におけるある平面上に存在するという仮定を置くこととする. 特に, 魚眼カメラ映像を $z_w = 0$ の平面 (床面) に透視投影する場合, 式 (3) に示すように透視投影行列 $\mathbf{H}_{w \rightarrow f}$ の 3 列目の成分を省略することができる.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}}_f &= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}'_{w \rightarrow f} \tilde{\mathbf{P}}'_w, \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, 式 (3) における $\mathbf{H}'_{w \rightarrow f}$ および $\tilde{\mathbf{P}}'_w$ はそれぞれ $\mathbf{H}_{w \rightarrow f}$ の 3 列目と $\tilde{\mathbf{P}}_w$ の 3 行目の成分をそれぞれ省略した行列とする. 式 (3) より, ロボット座標系と魚眼カメラ画像座標系との関係が決定できる.

3.2.3 俯瞰視点への変換

ロボット上空からの視点へと変換するため, ロボット座標系と俯瞰視点の仮想カメラ画像座標系との関係を求める. 2 つの座標系の関係は, 3.2.2 項と同様にして, 式 (4) で表現される.

$$\tilde{\mathbf{m}}_v = \mathbf{H}'_{w \rightarrow v} \tilde{\mathbf{P}}'_w. \quad (4)$$

式 (4) の $\mathbf{H}'_{w \rightarrow v}$ は, ロボット座標系と仮想カメラ画像座標系とを関係付ける透視投影行列 $\mathbf{H}_{w \rightarrow v}$ の 3 列目の成分を省略した行列である. 式 (3), 式 (4) を用いると, 魚眼カメラ画像座標系と仮想カメラ画像座標系との間には式 (5) が成立する.

$$\tilde{\mathbf{m}}_v = \mathbf{H}'_{w \rightarrow v} \mathbf{H}'_{f \rightarrow w} \tilde{\mathbf{m}}_f, \quad (5)$$

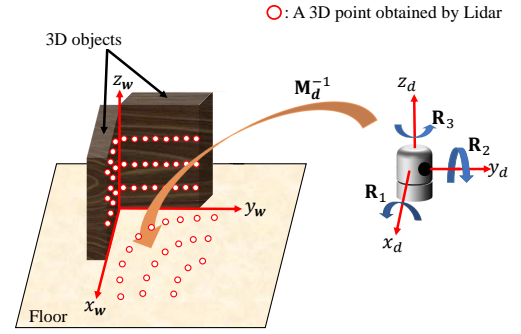


Fig. 6 Finding the extrinsic parameter of LiDAR

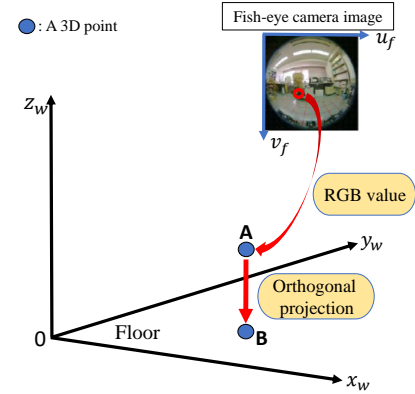


Fig. 7 Giving the color information and the projection of obstacles to the floor

ただし, 式 (5) において $\mathbf{H}'_{f \rightarrow w} = (\mathbf{H}'_{w \rightarrow f})^{-1}$ である. 式 (5) より, 取得された魚眼カメラ映像から上空の仮想カメラから見た映像, すなわち初期俯瞰映像を生成することができる.

ここで, 式 (5) から確認できるように, 俯瞰映像を生成するためには $\mathbf{H}'_{w \rightarrow v}$ および $\mathbf{H}'_{f \rightarrow w}$ を求める必要がある. 本研究では, 文献⁷⁾⁸⁾の手法を参考として, $\mathbf{H}'_{w \rightarrow v}$ および $\mathbf{H}'_{f \rightarrow w}$ を非線形の最適化手法により推定する. 求めたこれらの行列をもとに, 魚眼カメラ映像と仮想カメラ映像の各画素の 1 対 1 の対応関係をあらかじめ取得することが可能である. 本研究では, 計算コストの低減のため, 画像間での位置の対応関係をルックアップテーブルとして保存し合成時に用いることで魚眼カメラ映像から仮想カメラ映像を高速に生成する¹²⁾.

3.3 障害物俯瞰映像の生成

3.3.1 3次元点群の取得と障害物の抽出

本研究では, LiDAR を用いることで周囲環境の 3 次元点群を取得する. 周囲環境の 3 次元点群を取得した際には, それらは LiDAR 座標系で表現されている. それゆえ, 障害物の 3 次元点群を抽出するためには, LiDAR 座標系とロボット座標系の関係を求める必要がある. そのため本研究では, 形状が既知の 3 次元物体を用いることで LiDAR のロボット座標系に対する位置と姿勢を示す 4×4 行列の外部パラメータ行列 \mathbf{M}_d を求める. 外部パラメータ行列 \mathbf{M}_d を求める際の概念図を図 6 に示す. LiDAR 座標系をロボット座標系へと変換する際の x_d 軸, y_d 軸, z_d 軸に関する 3×3 行列の回転行列をそれぞれ \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 , \mathbf{R}_3 とし, 3 次元の並進移動ベクトルを $\mathbf{t}_{d \rightarrow w}$ とすると, \mathbf{M}_d は式 (6) で表現することができる. ただし, $\mathbf{0}$ は 3 次元のゼロ列ベクトルを表すこととする.

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3 & \mathbf{t}_{d \rightarrow w} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (6)$$

式 (6) より, $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{t}_{d \rightarrow w}$ が求まれば外部パラメータ行列 \mathbf{M}_d が一意に定まる. まず, LiDAR を床面と平行な平面上に設置することで, z_d 軸の正方向が床面に対して鉛直上向きである条件が成り立つため, $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 = \mathbf{I}$ が求まる. ただし, \mathbf{I} は 3×3 行列の単位行列とする. 続いて, 図 6 に示すように, 形状が既知の 3 次元物体, 具体的には直方体形状の物体を 2 つ用意し, 1 つの物体の一面が $y_w z_w$ 平面と, もう一方の物体の一面が $z_w x_w$ 平面と一致するように配置する. このような環境において LiDAR より取得される 3 次元点群のうち, 特に $x_w y_w$ 平面, $y_w z_w$ 平面, $z_w x_w$ 平面上の 3 次元点群を用いることで, \mathbf{R}_3 および $\mathbf{t}_{d \rightarrow w}$ を推定する. 以上のようにして求めた \mathbf{M}_d を用いることにより, ロボット座標系と LiDAR 座標系が式 (7) で関係付けられ, LiDAR 座標系における 3 次元点群をロボット座標系での表現に変換する.

$$\tilde{\mathbf{P}}_w = \mathbf{M}_d^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_d. \quad (7)$$

このようにロボット座標系での表現に変換した 3 次元点群が得られる. その点群のうち, 高さ方向に $z_w > 0$ の条件を満たす点群のみを抽出することで, 床面よりも上方に存在する 3 次元点群, すなわち障害物の 3 次元点群のみを抽出する.

3.3.2 点群に対するテクスチャ情報の付与と床面への投影

本項では, 3 次元点群に対するテクスチャ情報の付与とそれらテクスチャ付き点群の床面への投影について述べる. 3 次元点群に対するテクスチャ情報の付与とそれらテクスチャ付き点群の床面への投影に関する概念図を図 7 に示す.

本研究では, 障害物の 3 次元点群に対して障害物そのもののテクスチャ情報を付与する. 3.3.1 項で抽出された障害物の 3 次元点群に対して魚眼カメラから得られるテクスチャ情報を付与するために, Scaramuzza らより提案された手法¹⁸⁾¹⁹⁾により, 魚眼カメラのロボット座標系に対する位置および姿勢を示す 4×4 行列の外部パラメータ行列 \mathbf{K} を求める. 魚眼カメラの外部パラメータ行列 \mathbf{K} を用いて, ロボット座標系と魚眼カメラ座標系を関係付けると式 (8) で表現される.

$$\tilde{\mathbf{P}}_f = \mathbf{K} \tilde{\mathbf{P}}_w. \quad (8)$$

式 (7), 式 (8) より式 (9) が得られ, LiDAR より取得された 3 次元点群を, LiDAR 座標系から魚眼カメラ座標系へと変換する.

$$\tilde{\mathbf{P}}_f = \mathbf{K} \mathbf{M}_d^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_d. \quad (9)$$

式 (1) より魚眼カメラ画像座標系における各点と魚眼カメラ座標系における各方向ベクトルの 1 対 1 対応の関係は既に求まっている. したがって式 (1) と式 (9) を用いることで, LiDAR によって取得された障害物の各 3 次元点を通る各方向ベクトルが求まるため, 魚眼カメラ映像から障害物の 3 次元点群に対して障害物そのもののテクスチャ情報を付与する.

続いて, 周囲環境に存在する障害物の位置を初期俯瞰映像上で正確に提示するため, 抽出された障害物のテクスチャ付き 3 次元点群を床面に投影する. 具体的には, 抽出された障害物のロボット座標系における 3 次元点 $\mathbf{A} = [x_w, y_w, z_w]^T$ を点 $\mathbf{B} = [x_w, y_w, 0]^T$ へと正射影変換する. この処理を障害物の全ての各 3 次元点に対して行う.

この処理の後, 障害物俯瞰映像を生成するため, 正射影変換された点 \mathbf{B} を仮想カメラ画像座標系に投影する必要がある. 正射影変換後の点 \mathbf{B} はロボット座標系の点であり, かつ

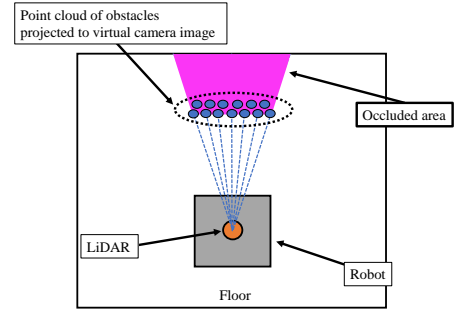


Fig. 8 Distinction of occluded area

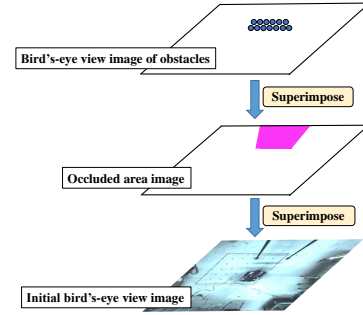


Fig. 9 Integration process

$z_w = 0$ を満たす点であることから, 式 (4) を用いることで点 \mathbf{B} を仮想カメラ画像座標系に投影することで, 障害物俯瞰映像を生成する.

3.4 遮蔽領域映像の生成

本節では遮蔽領域映像の生成手法について詳細に述べる. 遮蔽領域とは, 周囲環境中における障害物によって遮蔽されているため 3 次元情報を取得することができない, または障害物の存在によってロボットが進入することが困難な領域のことである. 3 次元情報が欠如しているため提示している情報は不確かであり, 遮蔽領域を俯瞰映像上で正確に描画することは不可能である. したがって本研究では, ロボットから見て障害物の背後に位置する領域は全て遮蔽領域と判定することとし, 情報の不確かな領域に対するオペレータの察知を促すために, 鮮明な透過色を用いることで俯瞰映像上で遮蔽領域を明示する. 遮蔽領域映像の生成手法に関する概念図を図 8 に示す.

前項において得られた障害物の俯瞰映像をもとに遮蔽領域を提示する. 具体的には, まず, 図 8 に示すように, 障害物の俯瞰映像中において, LiDAR 座標系の原点から見て, 死角となる障害物の背後に該当する領域を遮蔽領域として決定する. 続いて, それらの遮蔽領域に対して鮮明な透過色を用いてマスク処理を行うことにより, 遮蔽領域を明示する. 以上の処理を行うことで, 遮蔽領域が映像中で明示された遮蔽領域映像を生成する. これらの処理は, 本研究で用いられているような放射状レーザを照射する LiDAR を用いて行うことで, コンクリート基礎の網目状鉄筋のような部分的にレーザが通過するような対象に対しても遮蔽領域を提示することが可能である.

3.5 初期俯瞰映像との統合

本項では, 3.2 節, 3.3 節, 3.4 節でそれぞれ生成した初期俯瞰映像, 障害物俯瞰映像, 遮蔽領域映像の 3 種類の映像の統合処理について詳細に述べる. 統合処理の概念図を図 9 に示す. まず, 障害物俯瞰映像を遮蔽領域映像に重畳することで, その 2 種類の映像の統合を行う. 続いて, 障害物俯瞰映像を遮蔽領

域映像に重畳することで得られた映像を初期俯瞰映像に重畳する。以上の処理を行うことで、3種類の映像を統合し1枚の俯瞰映像を生成する。

4. 実験

4.1 実験環境

本実験で使用したロボットおよび魚眼カメラと LiDAR の配置を図 10 に示す。図 10 において、赤色と黄色の実線で囲まれた装置がそれぞれ LiDAR と魚眼カメラである。このロボットは、文献²⁰⁾の災害対応プロジェクトで開発された移動ロボットである。カメラは、Point Grey Research 社の Grasshopper3 GS3-U3-41C6C-C、魚眼レンズは Fujinon 社の FE185C086HA-1 を使用し、LiDAR については Velodyne LiDAR 社の HDL-32e を用いた。魚眼カメラの解像度は $2,048 \times 2,048$ pixel であり、従来研究におけるカメラ配置¹⁷⁾を採用することでロボット上面の角部に4台搭載した。LiDAR は水平方向については 360 度、垂直方向については 41.3 度 ($+10.67$ 度 ~ -30.67 度) の範囲を測定することが可能であり、ロボット上面の中央部に1台搭載した。

同様に、本実験は図 10 に示すような環境で行った。具体的には、屋内においてロボットの前方に障害物を配置した環境で実験を行った。障害物については、配管の一部を模擬したような障害物を2つ作成し、一方の障害物を魚眼カメラと同様の高さの空中に、他方の障害物を一方の障害物とは異なる高さの空中に設置した。配管などは屋内の災害現場に数多く、かつ空中に存在する状況が容易に想定される障害物である。また、第1章で述べたように、魚眼カメラと同様の高さの空中に存在している障害物は、従来の俯瞰映像中においてその位置が全く描画されない。そのため、本研究での提案手法と従来手法を比較した際に、提案手法の有用性の評価が容易である。また、提案手法により生成される俯瞰映像において、オペレータが遮蔽領域内の床面のテクスチャ情報も視認可能であることを示すため、床面上に図 10 に示すような特徴的なテクスチャを有する標識を配置した。

以上の実験環境において、まず、LiDAR より取得される3次元点群のうち、特に $x_w y_w$ 平面、 $y_w z_w$ 平面、 $z_w x_w$ 平面上の3次元点群を確認しながら、3.3.1 項で述べた \mathbf{R}_3 および $\mathbf{t}_{d \rightarrow w}$ を手動で調整し推定することで、LiDAR の外部パラメータ行列 \mathbf{M}_d を求めた。その後、提案手法および従来手法のそれぞれの手法に基づいて俯瞰映像を生成した。これら2つの俯瞰映像を比較することで、本研究における提案手法の評価を行った。

4.2 実験結果

ロボットが障害物と一定の距離を置いた初期位置に存在する状況において、従来手法および提案手法によって生成された俯瞰映像を図 11(a)、図 12(a) にそれぞれ示す。従来手法、提案手法によって生成されたそれぞれの俯瞰映像をもとにロボットを移動させた際の従来手法および提案手法の俯瞰映像を図 11(b)、図 12(b) にそれぞれ示す。また、図 11(b)、図 12(b) の状況において、それらの状況を第三者視点のカメラを用いて撮影した映像を図 11(c)、図 12(c) にそれぞれ示す。

本実験は Intel 社製 Core™ i7-6567U CPU (3.30GHz) を使用して処理を行い、統合処理後の俯瞰映像を1枚生成するために要する第3章の冒頭で述べた各処理ごとの計算時間については、(i) は 12 ms、(ii) は 60 ms、(iii) は 30 ms、(iv) は 5 ms であった。

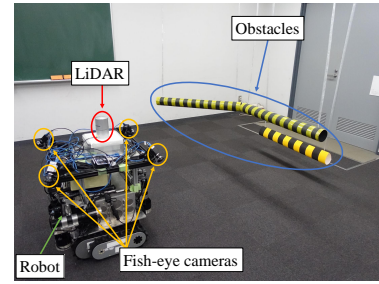


Fig. 10 Experimental environment

4.2.1 提案手法による俯瞰映像を用いた衝突回避

図 11(a) および図 11(b) の従来手法により生成された俯瞰映像では、ロボットの移動前、移動後のいずれの状況においても、ロボットの前方に配置した2つの障害物のうち、ロボットと近接している方の障害物が俯瞰映像中に描画されていない。図 11(b) においては、2つの障害物のうち、ロボットより遠方に存在する障害物の一部が俯瞰映像上に描画されている。これは、図 2(a) で示したような障害物が映像上で伸長されたように描画されるのと同様の現象であるが、図 12(a) および図 12(b) との比較からも分かるように、映像上における障害物の位置は不正確である。また、図 11(c) から確認できるように、図 11(b) に示された状況は、障害物が俯瞰映像中で正確な位置に描画されていないだけでなく、既にロボットと障害物の衝突が発生している状況である。そのため、従来手法による俯瞰映像では、ロボットの移動時においてオペレータが実際には障害物が存在する位置に障害物が存在しないと誤認し、障害物との衝突を招く危険性がある。

それに対して、図 12(a) および図 12(b) の提案手法によって生成された俯瞰映像では、ロボットの移動前、移動後によらず障害物が俯瞰映像中に描画されている。特に、図 12(b) の俯瞰映像では、映像中で障害物までの距離を視認し、障害物の手前でロボットを旋回させていることが確認できる。そのため、実際の現場においても、提案手法により生成された俯瞰映像を用いることで図 11(b) および図 11(c) に示すような周囲環境を誤認し障害物と衝突してしまう危険を回避することができると期待される。また、遮蔽領域を鮮やかな透過色で描画することにより、図 12(a)、図 12(b) のいずれの映像においても、床面上に配置した標識の特徴的なテクスチャ情報を視認することが可能となっている。そのため、提案手法では、オペレータに対してロボットの進入の可否が不明な領域に対する注意喚起を促しつつ、それと同時に周囲環境に関する情報を削減することなく提示することが可能な映像が生成されている。

提案手法により生成された俯瞰映像中で障害物が描画されている位置について、図 12(a) において矢印で示された赤色の点線間の距離を用いて評価を行った。図 12(a) における赤色の点線間の距離は 235 pixel であり、これを実世界での尺度に換算すると 1,198 mm であった。赤色の点線間の距離を実際に計測した値は 1,200 mm であり、図 12(a) におけるピクセル間の距離から換算した距離との差は 2 mm であった。この評価結果から、提案手法によって生成した俯瞰映像では、映像中で障害物を正確な位置に描画することができている。

5. 結論

本研究では、ロボット遠隔操作のための LiDAR を用いた俯瞰映像上で障害物の位置を正確に提示するシステムを構築し

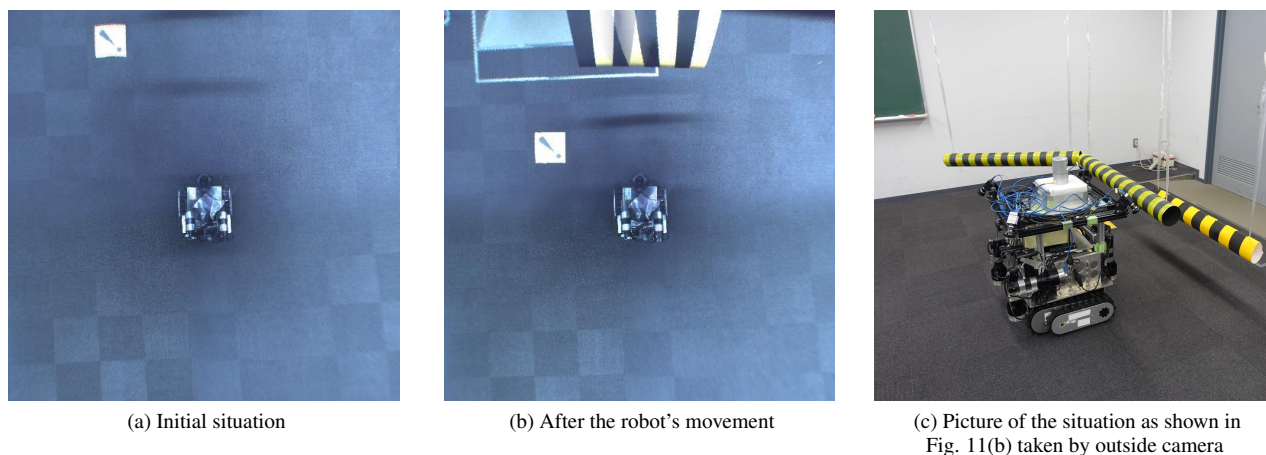


Fig. 11 Bird's-eye view images generated by the conventional method in the situation of Fig. 10

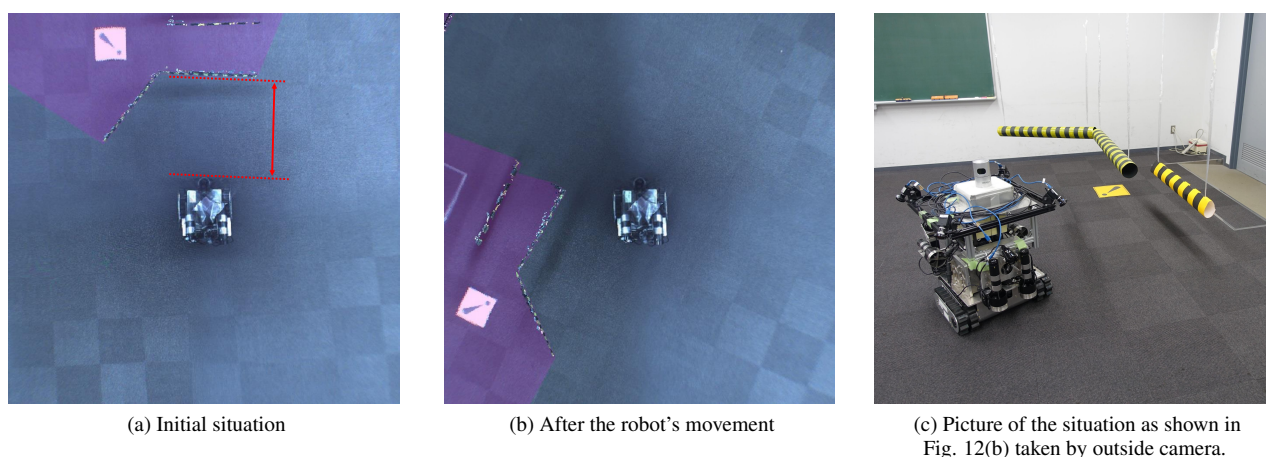


Fig. 12 Bird's-eye view images generated by the proposed method in the situation of Fig. 10

た。LiDARを用いた全方位3次元測距を行うことで得られる計測データを用いることで、映像中で障害物の位置が正確に描画された俯瞰映像を生成することができた。提案手法の有用性を検証するために行った実験では、提案手法により生成した俯瞰映像上において、真値と極めて近い位置に障害物を描画することが可能であった。本提案システムにより、人の立ち入りが困難な屋内の災害現場などにおいて、遠隔操作ロボットを用いた復旧作業や調査などを行う際に、周囲環境の誤認や障害物との衝突を回避することが容易となり、安全なロボット遠隔操作が実現されることが期待される。

屋外の災害現場には、高所に存在する障害物に限らず、溝や窪みといった環境が存在することが想定されるが、それらも遠隔操作ロボットの移動の障害となり得ると考えられる。本提案システムを、そのような環境中の情報も適切にオペレータに提示可能なシステムへと拡張させることが、今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」の成果であり、また、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ものである。

参 考 文 献

- 1) 古田 貴之, 吉田 智章, 西村 健志, 大和 秀彰: 原発内作業・調査ミッション用ロボットの開発と改良, 日本ロボット学会誌, **32**, 2 (2014) 92.
- 2) 大野 和則, 城間 直司: レスキューロボットの遠隔操縦支援技術, 日本ロボット学会誌, **28**, 2 (2010) 160.
- 3) 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.
- 4) Fumitoshi Matsuno and Satoshi Tadokoro: Rescue robots and systems in Japan, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2004) 12.
- 5) Mohammed W. Kadous, Raymond K. Sheh and Claude Sammut: Effective user interface design for rescue robotics, Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-robot Interaction (2006) 250.
- 6) Curtis W. Nielsen, Michael A. Goodrich and Robert W. Ricks: Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation, IEEE Transactions on Robotics, **23**, 5 (2007) 927.
- 7) 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 杉本 和也, 野末 晃, 三村 洋一, 小幡 克実, 山下 淳, 浅間 一: 無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発, 日本機械学会論文集, **81**, 823 (2015) 1.
- 8) 浅利 圭介, 石井 洋平, 本郷 仁志, 蚊野 浩: 鳥瞰画像生成における校正環境の簡易化, 第13回画像センシングシンポジウム予稿集 (2007) IN1-13.
- 9) 小松 廉, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 野末 晃, 三村 洋一, 小幡 克実, 山下 淳: 次世代社会インフラ用ロボット現場検証における無人化施工用俯瞰映像提示システムの適用, 第15回建設ロボットシンポジウム論文集 (2015) 1.
- 10) 鈴木 政康, 知野見 聡: アラウンドビューモニタの開発 (トピックス), 日本機械学会誌, **111**, 1073 (2008) 332.
- 11) 石本 英史, 古渡 陽一, 稲野 慶仁, 川股 幸博, 太田 守飛: 鉱山機械用全周囲安全支援装置 SkyAngle, 日本機械学会ロボティクス・メカト

- ロニクス講演会'14 講演論文集 (2014) 1P1-M04.
- 12) 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 山下 淳, 浅間 一: 複数の魚眼カメラと LRF を用いた重畳型全方位俯瞰画像提示手法の構築, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (2012).
 - 13) 上原 啓, 斎藤 英雄, 山本 恵一, 佐藤 広充: トラック周辺監視のための鳥瞰画像生成と障害物検出, 第 22 回画像センシングシンポジウム講演論文集 (2016) IS2-333.
 - 14) 栗島 靖之, 小松 廉, 藤井 浩光, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一: ロボット遠隔操作のための 3 次元測域センサを用いた俯瞰映像上での障害物提示, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (2016).
 - 15) Yasuyuki Awashima, Ren Komatsu, Hiromitsu Fujii, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: Visualization of obstacles on bird's-eye view using depth sensor for remote controlled robot, Proceedings of the 2017 International Workshop on Advanced Image Technology (2017).
 - 16) Takaaki Sato, Alessandro Moro, Atsushi Sugahara, Tsuyoshi Tasaki, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: Spatio-temporal bird's-eye view images using multiple fish-eye cameras, Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2013) 753.
 - 17) 小松 廉, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一: カメラ配置設計による故障時に備えたロボット遠隔操作のための俯瞰映像提示システムの開発, 精密工学会誌, **81**, 12 (2015) 1206.
 - 18) Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli and Roland Siegwart: A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion, Proceedings of IEEE International Conference of Computer Vision Systems (2006) 45.
 - 19) Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli and Roland Siegwart: A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2006) 5695.
 - 20) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 災害対応無人化システム研究開発プロジェクト 計測・作業要素技術の開発 水陸両用モニタリングデバイスの開発, 平成 23 年度～平成 24 年度成果報告書 (2013).