

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

○栗島 靖之, 小松 廉, 藤井 浩光, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一 (東京大学)

Visualization of Obstacles on Bird's-eye View Using 3D Range Sensor for Remote Controlled Robot

○Yasuyuki AWASHIMA, Ren KOMATSU, Hiromitsu FUJII, Yusuke TAMURA,
Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : This paper proposes a method to visualize areas where tall obstacles are present on the conventional bird's-eye view by using 3D measurement data of nearby tall obstacles. The experimental results showed that the proposed method enabled to render the relative positions of obstacles with respect to the robot accurately on the bird's-eye view image.

1. 序論

世界には地震や台風, 火山の噴火などが頻繁に発生する災害多発国が存在するが, 日本もそのうちの1国である. 災害発生時には, 二次災害の危険性があり, 人が立ち入ることが困難な場所が存在する. そのため, 被災地での遠隔操作ロボットを用いた復旧作業や調査が求められている [1, 2]. 災害被害を最小限に抑えるためには, 遠隔操作ロボットにより復旧作業・調査を効率良く進めることが重要である. 近年, 作業効率の向上のための遠隔操作ロボットの映像提示に関する研究が盛んに行われている.

遠隔操作ロボットの映像提示技術の1つとして, 俯瞰映像提示システムがある [2-8]. 俯瞰映像提示システムとは, 遠隔操作ロボットに魚眼カメラのような広角カメラを複数台搭載し, それらから取得される映像を統合することで, ロボットを上空から眺めたような俯瞰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, ロボットと周囲環境との相対的な位置関係の把握が容易になり, ロボットの移動時における操作性の向上が達成されたという報告がなされている [3, 4]. また, 俯瞰映像提示システムの実用化も進んでおり, 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 [6] や, 鉱山機械に用いる全周囲安全支援装置 SkyAngle [7] など数多くの実用例が存在する.

これら従来手法は, 災害対応用のロボット遠隔操作においても有効であると考えられるが, その際に解決すべき課題がある. 例えばその1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は, ロボットと障害物の相対的な位置関係が不正確に描画される問題が存在する. この問題は, 従来の俯瞰映像では撮像された物体が全て床面上に存在するという仮定の下で俯瞰映像を生成していることが原因である. この問題は, ロボットから障害物まで

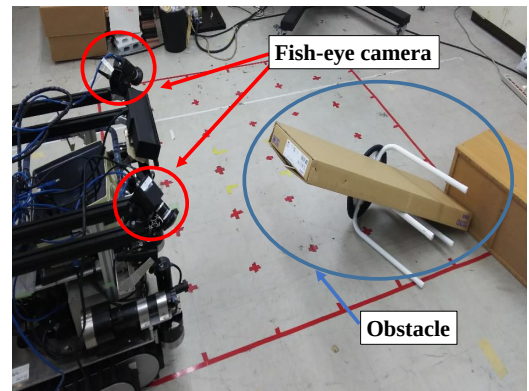


Fig. 1: An example of obstacle with tall protruding elements

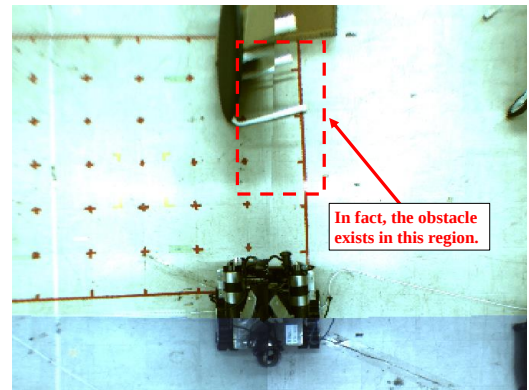


Fig. 2: The bird's-eye view image is generated by the conventional method [3, 4] in the situation of Fig. 1. The obstacle's relative position with respect to the robot is rendered inaccurately.

の最短距離が床面からの高さ方向において異なっている場合に顕著である. 具体的な例としては, 図1に示すような

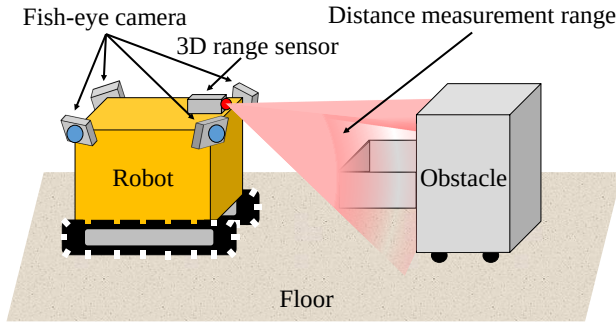


Fig. 3: The distance measurement method in this study

障害物が他の障害物にもたれかかり、空中において障害物がせり出しているような状況が挙げられる。この状況において従来手法により俯瞰映像を生成すると、図2に示すようにロボットと障害物の相対的な位置関係が不正確に描画され、実際の俯瞰視点から障害物を見た映像とは異なる映像が生成される。この問題点は、地震等の発生により転倒物などが散乱した屋内をロボットが移動する際に深刻であり、実際の現場においてオペレータの周囲環境の誤認およびロボットと障害物の衝突を招く危険性がある。

俯瞰映像を用いた移動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対して、複数台の広角カメラより取得される映像間の画素値の差分を用いることで障害物を検出する手法が提案されている [5]。この手法では、複数台カメラを密に配置することで俯瞰映像中にオーバーラップ領域を生成し、そこへ投影される複数映像間の画素値の差分から障害物の検出および障害物の高さを算出する。それらの情報をオペレータに対して提示することで、周囲に存在する障害物の存在の把握を容易としている。しかし、この手法では、障害物の色や大きさ、形状によっては正確な障害物の検出が達成されておらず、図1に示すような空中においてせり出している障害物の正確な検出も困難である。

先行研究 [8] では2次元測域センサを用いることで、床面より高さのある障害物を検出しその情報を俯瞰映像に重畳表示する手法が提案された。この手法では、特定の平面上に存在する立体物を計測することでオペレータに障害物を提示している。しかし、距離を計測した平面以外で、かつロボットの高さよりも低い平面上にロボットとの最近傍点を有する障害物に対しては、ロボットと障害物の相対的な位置関係を正確に描画することが困難であった。

本研究では、床上に存在する物体の3次元計測データを用いることで床上の障害物が存在する領域を俯瞰映像中に提示する手法を構築する。具体的には、図3に示すように複数台の魚眼カメラに加えて3次元測域センサを用いることで、ロボットの高さよりも低い位置に存在する障害物までの距離情報を取得する。その情報をもとに生成した障害

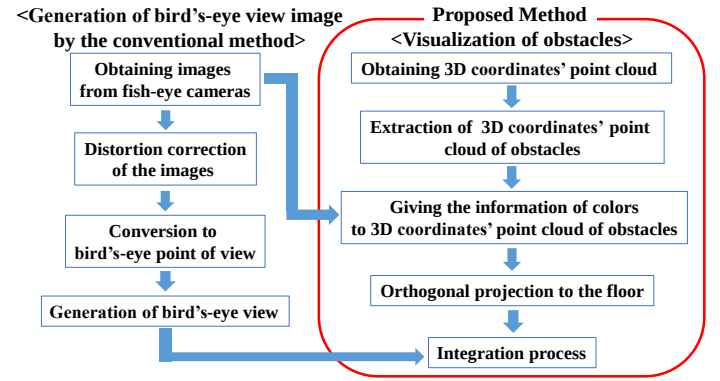


Fig. 4: The algorithm in the proposed method

物の位置情報を、ロボットとの相対的な位置関係が正確に提示されるよう点群として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させる。これにより、図2において赤色の破線で囲まれた本来障害物が存在するべき領域に障害物を提示することができる。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表示させる際に、魚眼カメラ映像中の障害物そのものの色情報を点群に与える。具体的には、魚眼カメラ画像座標系と3次元測域センサ座標系の対応関係を求め、魚眼カメラ映像中の障害物の色を点群に与える。障害物の位置情報を点群として俯瞰映像に重畳表示させることで、ロボット遠隔操作において障害物の正確な位置を視認することが可能となり障害物との衝突回避および周囲環境の把握が容易となる。

2. 提案手法

本研究では、3次元測域センサから得られる3次元情報を用いて障害物を検出する。検出された障害物を床面に投影した映像と、複数の魚眼カメラから得られる俯瞰映像を統合し、1つの映像として提示する手法を提案する。提案手法のアルゴリズムを図4に示す。

2.1 座標系の定義と問題設定

本研究では、ロボットの操作環境として屋内を想定しており、ロボットに対して魚眼カメラと3次元測域センサを搭載する。ロボット座標系における点 $\mathbf{P}_w = [x_w, y_w, z_w]^T$ の、魚眼カメラ画像座標系、魚眼カメラ座標系における表現をそれぞれ点 $\mathbf{m}_f = [u_f, v_f]^T$ 、 $\mathbf{P}_f = [x_f, y_f, z_f]^T$ とし、3次元測域センサ座標系においては点 $\mathbf{P}_d = [x_d, y_d, z_d]^T$ と表す。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 $\mathbf{m}_v = [u_v, v_v]^T$ に変換する問題を考える。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

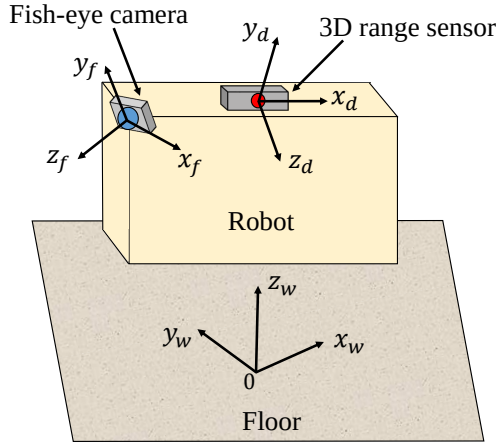


Fig. 5: The conceptual figure of each coordinates' system

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 $\mathbf{N}$ の同次座標表現を $\tilde{\mathbf{N}}$ と表す。

2.2 魚眼カメラ映像の取得と歪み補正

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カメラである。その射影方式は、一般的なカメラは透視投影方式であるのに対して、魚眼カメラはそれとは異なる射影方式であり、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 らの手法 [9, 10] を用いて、魚眼カメラ座標系における点 $\mathbf{P}_f = [x_f, y_f, z_f]^\top$ と魚眼カメラ画像座標系における点 $\mathbf{m}_f = [u_f, v_f]^\top$ の関係を求める。それらの関係は次式で表され、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。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、一般的なカメラで得られる透視投影映像を生成する。ここで、式 (1) の $f(u_f, v_f)$ は魚眼カメラ座標 (u_f, v_f) に関する関数であり、 a は定数である。

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

2.3 俯瞰視点への変換と俯瞰映像の生成

魚眼カメラ映像を透視投影方式に変換した後、それらを俯瞰視点から見た映像へ変換する。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次式が成立する。

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

俯瞰映像生成において、魚眼カメラ映像の投影面をロボット座標系における床面、すなわち、 $z_w = 0$ の平面上であるとした場合、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。これと同様に、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は次式で表現される。

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

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), (4) を用いると、魚眼カメラの画像座標系と仮想カメラの画像座標系との間には次式が成立する。

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

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仮想カメラから見た映像、すなわち俯瞰映像を生成することができる。ここで、俯瞰映像を生成するためには式 (5) の $\mathbf{H}'_{w \rightarrow v}$ および $\mathbf{H}'_{f \rightarrow w}$ を最適化手法などにより求める必要がある。本研究では計算コストの低減のため、魚眼カメラ映像と仮想カメラ映像の各ピクセルの 1 対 1 対応の関係をあらかじめ非線形最適化手法により求め、それをルックアップテーブルとして保存し用いることで魚眼カメラ映像から仮想カメラ映像を生成する。

2.4 3次元座標点群の取得と障害物の3次元座標点群の抽出

本研究では、3次元測域センサを用いてロボットの周囲環境の3次元座標点群を取得する。それらの点群は測域センサ座標系における点群である。本研究では、ロボット座標系で定義される床面に対して高さのある点群を障害物として抽出するため、取得された3次元座標点群を測域センサ座標系からロボット座標系に変換する。測域センサの前

方床面に置いたチェッカーボードを撮影し特徴点を検出することで、ロボット座標系に対する測域センサの位置と姿勢を示す 4×4 行列の外部パラメータ行列 $\mathbf{M}$ を算出する。それを用いることにより、ロボット座標系と測域センサ座標系を以下の式で関係付けることができる。

$$\tilde{\mathbf{P}}_w = \mathbf{M}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_d \quad (6)$$

式 (6) を用いることで得られるロボット座標系における 3 次元座標点群のうち、ロボット座標系において床面に対する座標値を表す z_w について、 $z_w > 0$ の条件を満たす点群のみを抽出する。これにより、床面より上に存在する 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ことができる。

2.5 点群への色情報の付与

2.4 節で得られた障害物の 3 次元座標点群に対してテクスチャ情報を付与する。2.2 節より、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 の対応関係は求まっているため、測域センサより取得された 3 次元座標点群を魚眼カメラ座標系において表現することができれば、魚眼カメラ座標系において各 3 次元座標点を通る方向ベクトルが求まり、魚眼カメラ映像から障害物の各 3 次元座標点に対して色を与えることができる。まず、魚眼カメラのロボット座標系における位置および姿勢を示す 4×4 行列で表される外部パラメータ行列 $\mathbf{K}$ を Scaramuzza らの手法 [9,10] より求める。魚眼カメラの外部パラメータ行列を用いて、ロボット座標系と魚眼カメラ座標系は次式で関係付けられる。

$$\tilde{\mathbf{P}}_f = \mathbf{K} \tilde{\mathbf{P}}_w \quad (7)$$

式 (6), (7) より次式が成立し、測域センサより取得された 3 次元座標点群を、測域センサ座標系から魚眼カメラ座標系に変換することができる。したがって、式 (1) と式 (8) を用いることで、障害物の各 3 次元座標点に対して魚眼カメラ映像から色を与えることができる。

$$\tilde{\mathbf{P}}_f = \mathbf{K} \mathbf{M}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_d \quad (8)$$

2.6 障害物の床面への投影と従来映像との統合

2.4 節および 2.5 節で抽出した障害物の色付き 3 次元点群を床面に対して正射影変換する。つまり、式 (9) より抽出した障害物のロボット座標系における 3 次元座標点 $[x_w, y_w, z_w]^T$ を、ロボット座標系と同一の $x_w y_w$ 平面上の

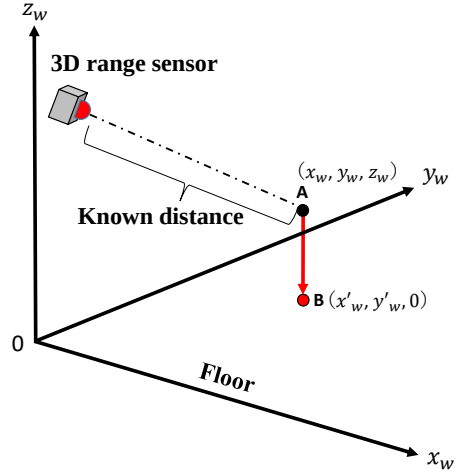


Fig. 6: The conceptual figure in the projection of obstacles to the floor

点 $[x'_w, y'_w, 0]^T$ に正射影変換する。

$$\begin{bmatrix} x'_w \\ y'_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

障害物の床面への投影における概念図を図 6 に示す。3 次元測域センサを用いることで、2.4 節にて障害物の 3 次元座標点の 1 つである点 $\mathbf{A}$ を抽出することができる。そして、2.5 節にて点 $\mathbf{A}$ に対して色情報を与えたのち、式 (9) より点 $\mathbf{A}$ を床面に対して正射影することで正射影変換後の点 $\mathbf{B}$ を得ることができる。続いて、正射影変換後の点 $\mathbf{B}$ を仮想カメラ画像座標系に投影するが、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 $z_w = 0$ 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ができる。その後、これら仮想カメラ画像座標系に投影された色付き点群を俯瞰映像に重畳表示することで俯瞰映像と統合する。

3. 実験

3.1 障害物提示のための実験システム

本実験で使用したロボットおよび魚眼カメラと 3 次元測域センサの配置を図 7 に示す。図 7 中の破線と実線の丸で囲まれた装置がそれぞれ魚眼カメラと 3 次元測域センサである。カメラは、PointGreyResearch 社の Grasshopper3 GS3-U3-41C6C-C、魚眼レンズは Fujinon 社の FE185C086HA-1 を使用し、3 次元測域センサについては Microsoft 社の Kinect v2 を用いた。魚眼カメラの解

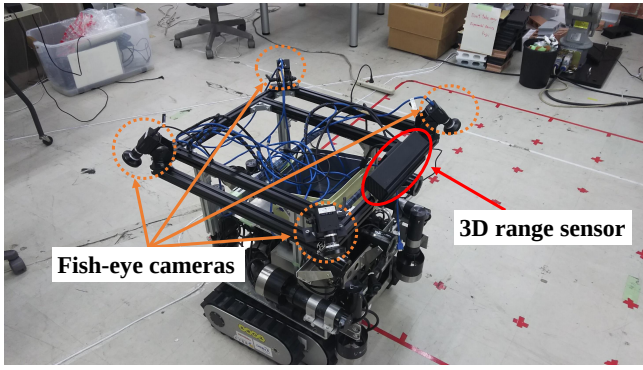


Fig. 7: The experimental system for the visualization of obstacles

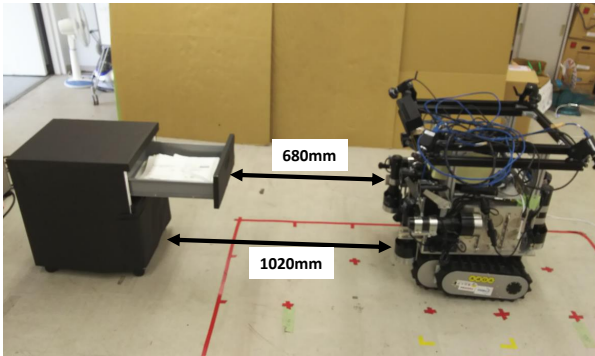


Fig. 8: The experimental situation

像度は $2,048 \times 2,048$ pixel であり、3次元測域センサの深度解像度は 512×424 pixel である。従来研究におけるカメラ配置を採用することでロボット上面の角部に4台搭載した。測域センサについては、ロボットの前方への移動を重視しロボット上面の前方に1台搭載した。全方位への拡張も容易なことから、本実験は1方向に対する提案手法の有用性を確認した。

3.2 実験方法

本実験では、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、地震等の発生により乱れた屋内に存在する障害物の状態を想定して、最上段の引き出しが飛び出しているキャビネットを用いた。また、最上段の引き出しが飛び出しているキャビネットは、第一章で述べたロボットと障害物の最短距離が床面からの高さ方向において異なっており、俯瞰映像中においてロボットとの相対的な位置関係が著しく不正確に描画される障害物である。そのため、本研究手法と従来手法を比較した際の本研究手法の有用性の評価が容易である。実験状況を図8に示す。図8に示すように、キャビネットの引き出

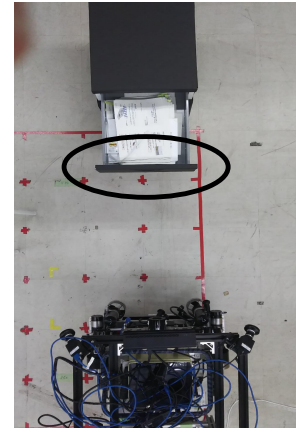


Fig. 9: The image filmed actually from the upper air

しが飛び出している面とロボットの前方の面が向かい合い、ロボットとキャビネット間の距離が最長で1,020 mm、最短で680 mmの位置にキャビネットを配置した。この実験状況において本研究の提案手法に基づいて俯瞰映像を生成した。同様の実験状況において従来手法に基づいて俯瞰映像を生成した。これら2つの俯瞰映像と実際にロボットの上空から撮影した映像とを比較し考察することで、本研究における提案手法の評価を行った。

3.3 実験結果

実際にロボットの上空から撮影した写真を図9、従来手法により生成した俯瞰映像を図10、本研究の手法により生成した俯瞰映像を図11に示す。図10の従来手法により生成された俯瞰映像では、図9の実際にロボットの上空から撮影した映像中の黒色の実線で囲まれた部分に存在するキャビネットの飛び出している引き出しが正確な位置に描画されていない。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は障害物が存在する位置に障害物がないと誤認し、障害物との衝突を招く危険性がある。それに対して、図11の本研究手法により生成された俯瞰映像では、赤色の実線で囲まれた部分にキャビネットの飛び出した引き出しが正確な位置に描画されている。本研究手法による俯瞰映像では、ロボットと障害物の相対的な位置関係を俯瞰映像中に正確に描画することができており、オペレータの周囲環境の誤認および障害物との衝突を回避することが可能となる。

4. 結論

本研究では、災害発生時に遠隔操作ロボットを用いた被災地の屋内環境調査において、周囲環境の誤認および障害

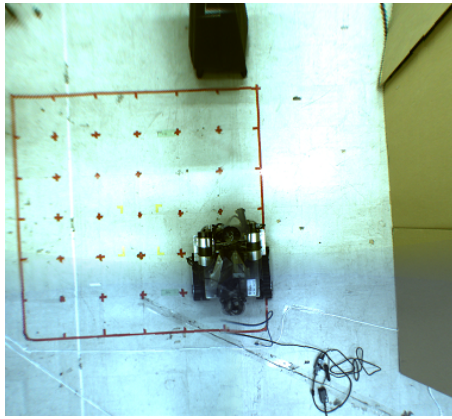


Fig. 10: The bird's-eye view image generated by the conventional method [3,4]

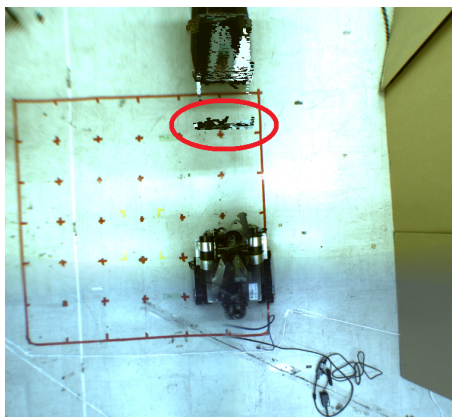


Fig. 11: The bird's-eye view image generated by the proposed method

物との衝突を回避することが可能な映像提示手法を提案した。3次元測域センサにより取得される距離情報をもとに生成された障害物の位置情報と複数の魚眼カメラにより生成される俯瞰映像を統合し1つの映像として提示した。これにより、俯瞰映像上でロボットと障害物の相対的な位置関係を正確に提示することができた。提案手法により、災害発生時に被災地の屋内を遠隔操作ロボットを用いて調査等を行う際に、周囲環境の誤認および障害物との衝突を回避することが容易となる。本研究では、1方向に対してのみ提案手法の有用性を確認したが、今後は提案手法の全方位への拡張を行うことでより周囲環境の視認性に優れた映像の提示手法を構築する。

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] 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, Vol. 32, No. 2, pp. 92-97, 2014.
- [2] 大野和則, 城間直司: “レスキューロボットの遠隔縦支援技術”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 2, pp. 160-163, 2010.
- [3] 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, Vol. 81, No. 823, 14-00031, pp. 1-13, 2015.
- [4] 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, P1-12, pp. 1-2, 2015.
- [5] 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, IS3-33, pp. 1-7, 2016.
- [6] 金岡晃廣, 高野照久, 菅原大輔, 大谷荘太郎, 鈴木政康, 知野見聡, 大泉謙: “アラウンドビューモニタの開発 (特集: Safety Shield コンセプトに基づく安全新技術)”, 日産技報, No. 63, pp. 37-41, 2008.
- [7] 石本英史, 古渡陽一, 稲野辺慶仁, 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, 1P1-M04, pp. 1-2, 2014.
- [8] 佐藤 貴亮, 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, pp. 2433-2436, 2012.
- [9] Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli and Roland Siegwart: “A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion”, *Proceedings of the IEEE International Conference of Computer Vision Systems*, pp. 45-52, 2006.
- [10] 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*, pp. 5695-5701, 2006.