

複数の魚眼カメラの時空間データによる 全方位俯瞰画像生成

佐藤 貴亮^{*1}, Alessandro MORO^{*2}, 山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*1}

A Construction of Bird's-Eye View Images Using Spatio-Temporal Data of Multiple Fish-eye Cameras

Takaaki SATO^{*1}, Alessandro MORO^{*2}, Atsushi YAMASHITA^{*1},
and Hajime ASAMA^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*2}Ritecs

11-5-3 44 Shibasaki, Tachikawa-shi, Tokyo 190-0023, Japan

This paper describes a new teleoperation method to show bird's-eye view images by using spatio-temporal data of multiple fish-eye cameras. In a teleoperation system for a rescue robot, it's important to show all images to an operator even when some of images are not acquired because of camera trouble. This system makes it possible by showing spatio-temporal data of images instead of missing images.

Key Words : Teleoperation, Bird's-eye view, Fish-eye camera

1. 序 論

本研究では、複数の魚眼カメラの時空間データによる全方位俯瞰画像生成手法を提案する(図1)。具体的には、時空間データを用いることで、魚眼カメラの破損等により一部の映像が非表示となった際にも全方位俯瞰画像を生成できる手法を提案する。

近年、レスキューロボットの技術開発が盛んに行われている。レスキューロボットは、災害現場や損壊のある原子力発電施設といった、人の立ち入ることのできない危険な環境下に投入されるロボットである。レスキューロボットをより多様な環境下に対応できるようにすると、災害現場での作業者を減らすことが可能となり、二次災害のリスクを低下できる。リスクの低下を図ることは災害の対応において非常に重要な課題である⁽¹⁾。このため、レスキューロボットの技術開発は必要不可欠である。

これらの技術開発の中でも、遠隔操作型レスキューロボットに関する技術開発が盛んに行われている。レスキューロボットをオペレータが遠隔操作するためには、ロボットのカメラやセンサからの情報がオペレータへ伝達されることが必要不可欠である。この際に伝

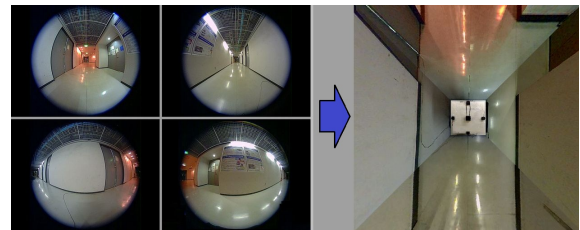


Fig. 1: Proposed method

達される情報の質を高めることで、オペレータが状況を把握しやすくなり、作業の効率化を図ることができる⁽²⁾。このため、情報の質を高めて遠隔操作性を向上することは重要な課題である。

遠隔操作における提示画像に関する基礎的な研究として、死角をなくすための工夫が行われている。文献⁽³⁾では、進行方向に取り付けるカメラ以外にも、カメラをロボットの周囲に取り付け、得られる映像を個々に提示している。この手法では各カメラの映像からロボット進行方向に取り付けたカメラ以外の死角に対応することができる。しかし、各カメラの相対的な位置関係や、ロボットと周囲の環境の相対的な位置関係は把握しにくい。このため、ロボットの全方位の状況の把握が容易でないという問題がある。

また、文献⁽²⁾では、死角をなくすためにロボットの上方にカメラを真下へ向けて取り付け、その映像を提

^{*1} 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) {satoh,yamashita,asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 有限会社ライテックス (〒 190-0023 東京都立川市柴崎町 3-5-11) alessandromoro.italy@ritecs.co.jp

示している。この手法ではロボットの進行方向外の死角に対応することができるばかりでなく、ロボットとその周囲の環境が一面に提示されるため、ロボットと周囲の環境を相対的に把握できる。しかし、この手法では十分な高さからのカメラの撮影が必要となり、ロボットのサイズが高くなる。このため、天井の低い場所ではロボットを投入することができず、対応できる環境が限定されてしまうという問題がある。

以上の問題を解決するために、画像処理による疑似俯瞰画像の研究が行われている。文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾は自動車の周囲に複数のカメラを取り付け、これらの画像を俯瞰画像に変換し、統合を行うことで、自動車の全周囲を真上の視点から俯瞰したような画像を提示している。この手法では全周囲を1つの画面で提示できるため、ロボットと周囲の環境の相対的な位置関係を把握しやすい。また、カメラはロボットの周囲に取り付けられるため、サイズが高くならず、多様な環境下に対応できる。

このため、本研究でも移動ロボットの周囲に複数台の魚眼カメラを取り付けて疑似俯瞰画像を生成する。

文献⁽⁶⁾⁽⁷⁾ではカメラの時系列データを用いている。ロボットの前面にカメラを取り付け、GPSを用いて自己位置推定を行う。過去の時系列画像データにロボットのモデルを自己位置推定に基づいて合成し、ロボットを後ろから俯瞰したような画像を提示している。このように、画像データを時系列的に記録していき、そのデータと自己位置推定の時系列データを統合することで画像データを時空間データとして利用できる。

このため、本研究でも時空間データを利用して全方位俯瞰画像を生成する。

上記で紹介した文献は、死角をなくすためのものであり、遠隔操作性の向上を図るものであった。しかし、実際の災害現場では、作業時にカメラや通信ケーブルが破損するトラブルにより、提示画像の一部が映らなくなるといった死角発生リスクも考えられる。本研究では複数の魚眼カメラを使用するが、このように複数台のカメラを用いることでリスクを分散できる。

これに加えて、本研究ではカメラの不具合そのものに対応するために、時空間データを用いて提示画像の非表示部分を補完できる手法を提案する。

以上、遠隔操作性を向上させるためには、提示画像の死角が少ないことや、ロボットと周囲の環境との相対的な位置関係が把握しやすいことばかりでなく、カメラの破損による死角の発生といったトラブルにもロボストに対応できることが重要である。そこで本研究では、これらの要件を満たすために、複数の魚眼カメ

ラを使用して真上からの俯瞰画像を生成して表示し、更に、自己位置推定を行い、これらを時空間データとして利用することで、提示画像の非表示といった死角発生リスクにも対応する。本研究ではこの手法の構築を目的とし、これによって、レスキューロボットの遠隔操作性をより高いものとする。

2. 提案手法

本研究では、位置情報を含む複数の魚眼カメラのデータを用いた全方位俯瞰画像の生成手法を提案する。提案手法の処理手順を図2に示す。全方位俯瞰画像の生成では、初めに、各魚眼カメラから撮影される画像を画像処理して真上からの俯瞰画像を生成し、次に各俯瞰画像の統合を行う。そして、これを全方位俯瞰画像として提示する。この時、提示された画像を時系列データとして扱う。また、自己位置推定を行い、これらのデータを統合することで、全方位俯瞰画像を位置情報を含んだデータとして生成する。この手法によって、カメラの破損等で発生する提示画像の非表示部分に対しても、補完が可能となる。

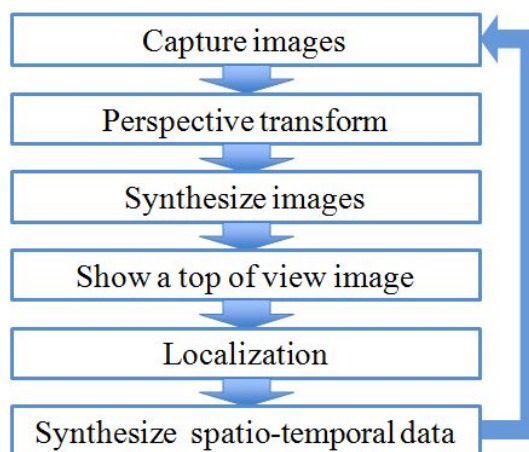


Fig. 2: Procedure

2.1 魚眼カメラ 魚眼カメラは画角が 180° 前後と高く、一度に広い範囲を撮影できるという利点を持ったカメラである。その射影方式は、通常のカメラが透視撮影方式をとるのに対して、魚眼カメラは一般的に画面の中心からの距離と角度が比例する等距離射影方式をとる。レンズの光軸からの距離を y 、焦点距離を f 、半画角を θ とすると、これらは次のように表される。

$$y = f \tan \theta \quad (\text{透視撮影方式}) \quad (1)$$

$$y = f \theta \quad (\text{等距離射影方式}) \quad (2)$$

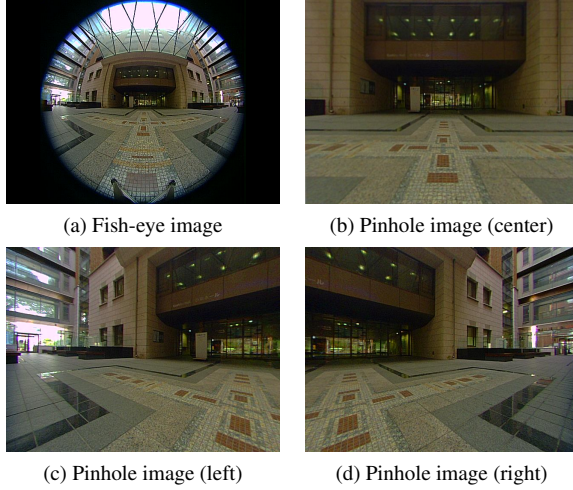


Fig. 3: Fish-eye camera

魚眼カメラにより撮影される画像を図 3(a) に示す. また, この画像を透視撮影方式に変換すると認識が容易になる. その画像を図 3(b) に示す. また, 透視撮影方式に変換する際は変換領域を画像中心以外とすることも可能である. 魚眼カメラの画像の最左部から中心部を領域に含めた画像を図 3(c) に, 最右部から中心部を含めた場合を図 3(d) に示す. このように, 魚眼カメラは 1 つの撮影画像で複数領域の透視撮影画像を得ることができる. そのため, 通常のカメラのように, パンやチルトを制御してカメラの姿勢を変える必要がないという利点がある.

2.2 俯瞰画像の生成 魚眼カメラの画像を透視撮影方式に変換した後に, 真上からの俯瞰画像への変換を行う. 図 4 に俯瞰画像の生成モデルを示す. ワールド座標系 $\mathbf{W} = [x, y, z]^T$ における, 魚眼カメラの撮影位置姿勢の座標系 $\mathbf{P} = [u, v]^T$ を考える. これらの座標は 3×4 行列の透視撮影行列 \mathbf{H} によって関係付けることができる. すなわち, ワールド座標系を含む点行列 $\mathbf{W}_r = [x, y, z, 1]^T$ と, 魚眼カメラの座標系を含む点行列 $\mathbf{P}_r = [u, v, 1]^T$ には次の関係式が成り立つ.

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{H}\mathbf{W}_r \quad (3)$$

また, カメラの投影面が $z=0$ の平面である場合, 上式は次のように成分を省略することができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_r &= \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \mathbf{H}_r \tilde{\mathbf{W}}_r \end{aligned} \quad (4)$$

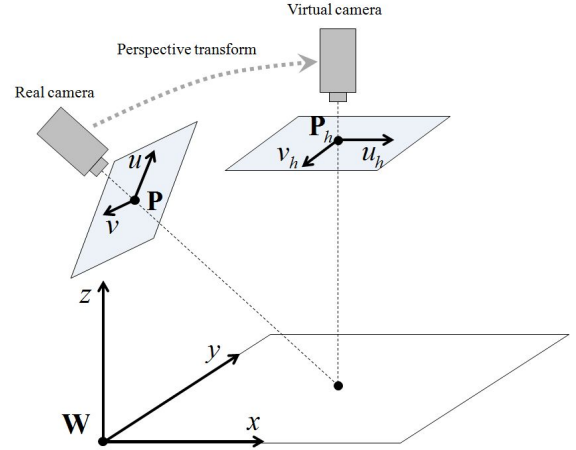


Fig. 4: Perspective transform

上式により, ワールド座標とカメラの撮影画像の座標との関係が決定される. これと同様に, ワールド座標と仮想的な位置姿勢から撮影を行うカメラの座標との関係は, 仮想カメラの座標を含む点行列を \mathbf{P}_h とすると, 次の式で表わされる.

$$\mathbf{P}_h = \mathbf{H}_h \tilde{\mathbf{W}}_r \quad (5)$$

これらの関係から, 実際のカメラの取り付け座標と, 仮想位置に移したカメラ座標との対応関係は, 次の式で表わされる.

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{H}_r \mathbf{H}_h^{-1} \mathbf{P}_h \quad (6)$$

俯瞰画像を生成する際は, ワールド座標系における全ての仮想カメラの位置を同一にする. また, 俯瞰画像を統合する際には仮想カメラの姿勢については個々に決める. それらの際に必要な位置姿勢の条件を次に説明する.

2.3 俯瞰画像の統合 次に, 各カメラの俯瞰画像の統合を行う. 統合のモデルを図 5 に示す. 青い領域は 1 つのカメラが表示すべき領域であり, この領域を含めた赤い領域は仮想カメラによって撮影された領域である. ここで, d_{robot} はロボットの幅である. d_{view} は俯瞰画像システムが提示することのできる最長距離であり, d_{min} と w_{min} は最小距離である. 取り付けたカメラから得られる画像とその撮影モデルを図 6 に示す. 半角 θ_c のカメラが高さ h の位置に, 水平面から α の角度だけ下に向けて取り付けられている. カメラは d_{min} から d_{view} の範囲で, 床面を撮影している. この時, 全方位俯瞰画像を生成するためには, 仮想カメラの位置姿勢と画角が 2 つの条件を満たす必要がある.

まず, 1 つ目の条件は, 全てのカメラの撮影範囲で全周囲が撮影できることである. すなわち, M 台の

カメラを使用するには、次の不等式を満たす必要がある。

$$\theta_h \geq \pi/M \quad (7)$$

次に、2つ目の条件は、ロボットの近傍が死角にならないことである。このためには、次の不等式を満たす必要がある。

$$d_{robot} \geq d_{min} \quad (8)$$

また、図 6 から次の式が得られる。

$$d_{min} = \frac{h}{\tan(\alpha + \theta_c)} \quad (9)$$

以上の関係式から次の式が得られる。

$$\alpha + \theta_c \geq \tan^{-1}\left(\frac{h}{d_{robot}}\right) \quad (10)$$

つまり、2つ目の条件を満たすために、仮想カメラの設定は上式を満たさなければならない。また、仮想カメラの撮影範囲は実際のカメラの撮影範囲内である必要がある。

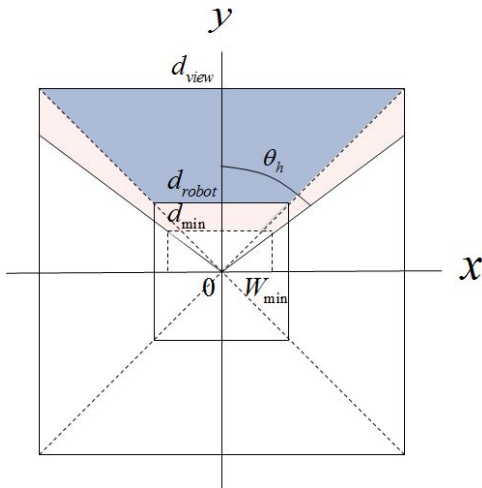


Fig. 5: Top of view image

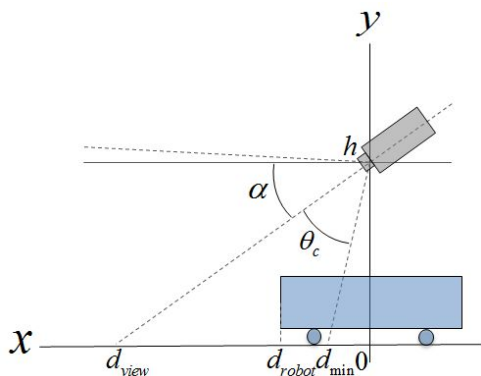


Fig. 6: Virtual camera

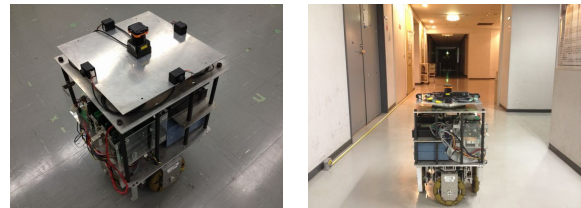
2.4 時空間情報化 デッドレコニングにより自己位置推定を行い、全方位俯瞰画像の時系列データと統合することで、全方位俯瞰画像を時空間データとして扱うことができる。時空間データではデータが作られた時刻や撮影位置等の情報を統合する。

2.5 非表示部分の補完 カメラの破損などにより一部画像が破損した場合は、これらのデータによる補完が可能であれば、死角となった部分を補完する。補完を行う際には、複数時刻のデータを持つ場合がある。この際には最も領域に対する解像度が高く鮮明なデータを用いる必要があるため、最も撮影位置近傍で撮られたデータを利用する。また、非表示部分が発生した際はオペレータが異常を認識するために、手動によるカメラの番号または非表示領域をシステム上で選択する。

3. 実験

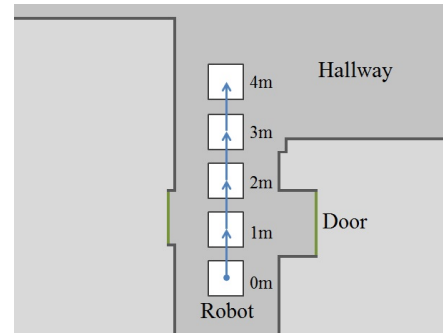
実験では、床面とロボット上面が水平であることを仮定して、地面に対して正しく俯瞰処理を行う。そして、一部映像の映らなくなった場合にも補完による全方位俯瞰画像が生成されることを確認する。また、本実験では自己位置推定を正確に行うため、移動ロボットを手動で特定の距離だけ移動させ、定めた位置での撮影を複数位置で行うことでデッドレコニングを仮定した。

3.1 実験環境 図 7(a) に移動ロボット（全方向ロボット ZEN⁽⁸⁾）に複数の魚眼カメラを搭載した様子を示す。また、図 7(b) に実験の様子、図 7(c) に環境の様子と撮影位置を示す。



(a) ZEN

(b) Environment



(c) Map

Fig. 7: Experimental

移動ロボットには上面の各辺の midpoint にそれぞれ魚眼カメラ（オプト株式会社製 NM33）が取り付けられている。中心には測域センサが取り付けられているが本研究では使用しない。また、処理は PC により行われる。PC はロボット内部に設置されている。本研究ではカメラの台数は $M = 4$ とし、仮想カメラは $\alpha = 90^\circ$ の向きに取り付け、半画角は $\theta_c = 30^\circ$ 、撮影高さは $h = 2.6m$ とした。各カメラの取り付け位置はロボット上面の中心から対称とした。中心面からカメラまでの距離は $22.5cm$ であり、高さは地面から $70.0cm$ 、向きは地面に水平とする。なお、俯瞰画像を生成するために魚眼カメラの透視撮影変換を行うが、その領域は、魚眼カメラの画像の最下部から中心部にかけての領域を使用している。

実験は $0m$ の位置から $1m$ 直進するたび撮影を行い、合計 $4m$ 直進させた。本研究では、進行方向に対して後ろ側に取り付けられているカメラが破損により非表示になるとした場合についての実験を行った。

3.2 実験結果 まず、図 8 に画像を複数提示する従来手法と、提案手法である全周囲俯瞰画像との比較結果を示す。これより、提案手法である全周囲俯瞰画像では、従来手法に比べ、ロボットと周囲の環境を相対的に表示できていることがわかる。

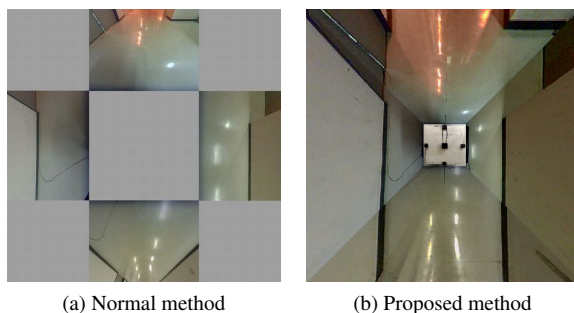


Fig. 8: Bird's-eye view

次に、図 9 に実験結果を示す。縦は項目毎に並べられており、上から 1 番目はロボットの進行方向のカメラの映像である。ただし、左上にはサブ画像として全方位俯瞰画像の映像も示されている。

上から 2 番目は映像が正常時である場合の全方位俯瞰画像である。図 8(b) 同様にロボットと周囲の環境を相対的に表示している。

上から 3 番目はロボットの進行方向に対して後ろに取り付けているカメラからの映像が非表示となった場合のカメラの俯瞰画像である。このように、遠隔操作を実際に行う際は、一部の映像が失われて死角が発生するといったトラブルが生じる危険が考えられる。

そして、上から 4 番目は非表示となった領域を時空

間データ画像で補完した結果である。なお、補完領域は赤で囲まれた領域である。

横軸は、撮影位置を表し、上記の項目が並べられている。

上から 4 番目の補完結果について、各撮影位置毎での考察を行う。まず、撮影位置 $0m$ の地点では、時空間データは持ち合わせていないので、非表示部分の補完は行っていない。ただし、この撮影位置で静止している途中に一部映像が非表示となった場合には、その空間におけるデータは持ち合わせていることになるので、その場合は補完が行える。

次に、撮影位置 $1m$ の地点では、撮影位置 $0m$ の時空間データによる補完が行われている。ただし、撮影位置 $0m$ の撮影では、一部の領域とロボットの真下は撮影されていないため、この範囲については補完が行っていない。

次に、撮影位置 $2m$ の地点では、撮影位置 $0m$ と撮影位置 $1m$ の時空間データにより、完全に補完が行われている。補完すべき空間に時系列的に複数のデータを持つ場合、全方位俯瞰画像では一般に近い表示領域ほど鮮明であるため、補完の大部分は撮影位置 $1m$ のデータを使用している。また、撮影 $0m$ のデータにより、撮影 $1m$ のロボット真下の範囲を補完している。

最後に、撮影位置 $3m$, $4m$ では、撮影位置 $2m$, $3m$ の場合と同様に、 $1m$ 手前の撮影位置での時空間データによる大部分の補完と、 $2m$ 手前の撮影位置での時空間データによる $1m$ 手前の撮影位置のロボットの真下の部分の補完により、完全に補完が行われている。

以上、複数の魚眼カメラにより、全周囲俯瞰画像が生成されることを確認した。これにより、ロボットと周囲の環境を容易に把握することが可能となった。そして、時空間データを用いることで、一部映像の映らなくなった場合にも補完による全方位俯瞰画像が生成されることが確認された。これにより、ロボットの全方位俯瞰画像を生成することが可能となった。

4. 結論

本研究では、複数の魚眼カメラの時空間データによる全方位俯瞰画像生成手法の構築を行った。複数の魚眼カメラによる全方位俯瞰画像を、自己位置推定結果と統合することで、時空間データとして生成した。このデータを一部映像の映らなくなった領域の補完に利用することで、カメラの破損等による映像非表示にも画像提示が可能な手法を構築した。

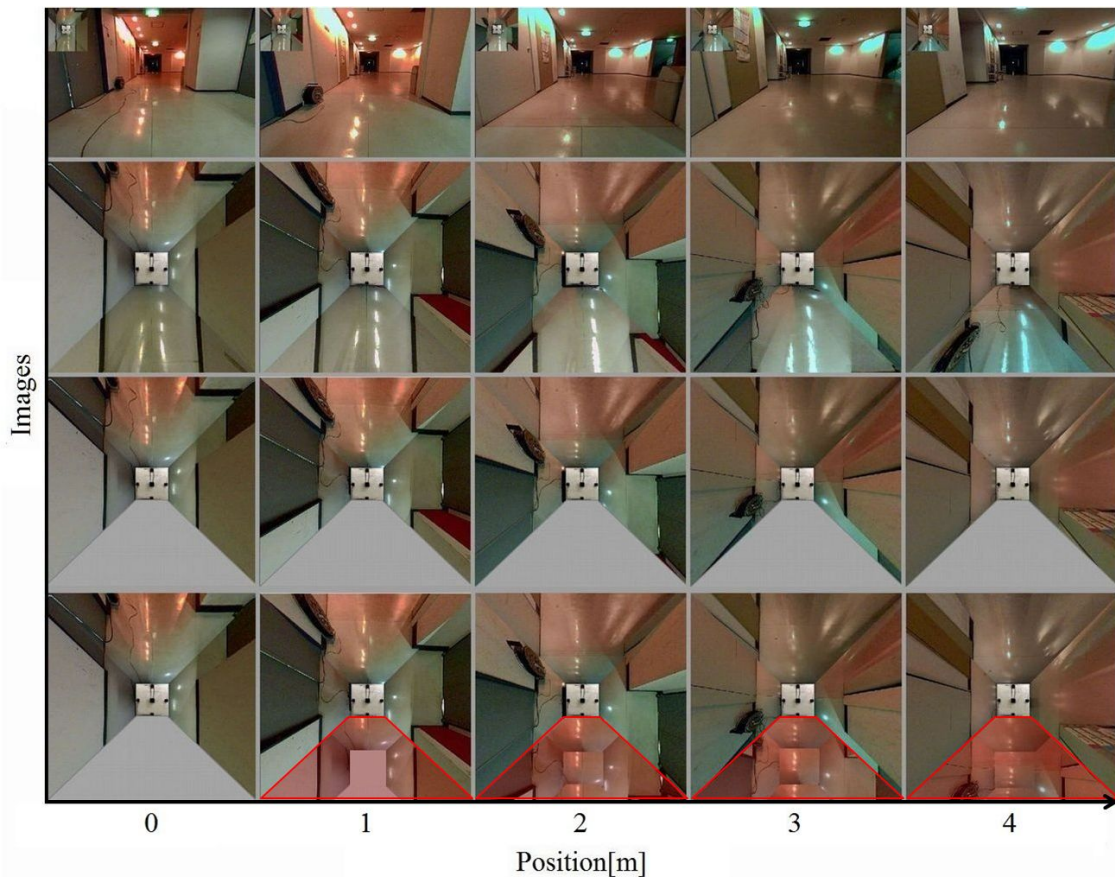


Fig. 9: Result

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」、科研費若手研究 (A)22680017, および科研費基盤研究 (B)24300198 の一部として実施されたものである。

参 考 文 献

- (1) 田所諭, 松野文俊, 大須賀公一, 浅間一, 小野里雅彦, “レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発の現状”, 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概要集, (2006), pp.518–519.
- (2) Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, and Yasushi Hada, “Redesign of Rescue Mobile Robot Quince - Toward Emergency Response to the Nuclear Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011 -”, *Proceedings of 2011 IEEE International Workshop on the Safety, Security and Rescue Robotics*, (2011), pp.13–18.
- (3) Naoji Shiroma, Yu huan Chiu, Tetsushi Kamegawa, and Fumitoshi Matsuno, “Development of Rescue Robotic Systems for Both Daily and Emergency Use”, *Proceedings of the 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation*, (2004), pp.85–86.
- (4) Yu-chih Liu, Kai-ying Lin, and Yong-sheng Chen, “Bird’s-Eye View Vision System for Vehicle Surrounding Monitoring”, *Robot Vision - RobVis*, (2008), pp.207–218.
- (5) Tobias Ehlgen, and Tomas Pajdla, “Monitoring Surrounding Areas of Truck-Trailer Combinations”, *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision Systems*, (2007).
- (6) Masataka Ito, Noritaka Sato, Maki Sugimoto, Naoji Shiroma, Masahiko Inami and Fumitoshi Matsuno, “A Teleoperation Interface using Past Images for Outdoor Environment”, *Proceedings of the SICE Annual Conference*, (2008), pp.3372–3375.
- (7) Shiroma Naoi, Kagotani Georges, Sugimoto Maki, Inami Masahiko, and Matsuno Fumitoshi, “A Novel Teleoperation Method for a Mobile Robot Using Real Image Data Records”, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (2004), pp.233–238.
- (8) Hajime Asama, Masatoshi Sato, Luca Bogoni, Hayato Kaetsu, Akihiro Matsumoto, and Isao Endo, “Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Drive Mechanism”, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995), pp.1925–1930.