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, 淺間 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 *2Ritecs 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

第18回ロボティクスシンポジア(2013年3月14日~15日・山形)

^{*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, yamshita, asama}@robot.t.utokyo.ac.jp

^{*&}lt;sup>2</sup> 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画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の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 バ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 発生のトラブルにも対応する.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.

$$y = f \tan \theta$$
 (透視撮影方式) (1)

$$y = f \theta$$
 (等距離射影方式) (2)



(c) Pinhole image (left)

(d) Pinhole image (right)

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 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.

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{H}\mathbf{W}_r \tag{3}$$

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.

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

$$\mathbf{P}_h = \mathbf{H}_h \tilde{\mathbf{W}}_r \tag{5}$$

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.

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{H}_r \mathbf{H}_h^{-1} \mathbf{P}_h \tag{6}$$

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。 半画角 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 カメラを使用する際には、次の不等式を満たす必要が ある.

$$\theta_h \ge \pi/M$$
 (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.

$$d_{robot} \ge d_{min}$$
 (8)

また、図6から次の式が得られる.

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

以上の関係式から次の式が得られる.

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

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て鮮明 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



Fig. 7: Experimental

移動ロボットには上面の各辺の中点にそれぞれ魚眼 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れられているが 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 $\alpha = 90$ ^oの向きに取り付け,半画角は $\theta_c = 30$ °,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.



(a) Normal method

(b) Proposed method

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 完は行えていない.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 えていない.

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,ロバストに全 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,淺間一,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 In-ternational 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.