

遠隔操作ロボットの俯瞰映像提示システムにおける カメラ欠損に頑強な画像統合

小松 廉^{*1}, 藤井 浩光^{*1}, Alessandro Moro^{*1*2}, 山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*1}

Image Synthesis in Camera Troubles for Bird's-eye View System of Teleoperation Robot

Ren KOMATSU^{*1}, Hiromitsu FUJII^{*1}, Alessandro MORO^{*1*2},
Atsushi YAMASHITA^{*1} and Hajime ASAMA^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, School of 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 image synthesis for bird's-eye view systems of teleoperation robots. We take camera troubles into account. Our proposed system provides a bird's-eye view image that makes a navigator understand the surrounding environment easily and teleoperate the robot more accurately. The image is created by synthesizing multiple images captured by the cameras that are attached to the teleoperation robot. If a camera does not work well, there are blind spots in the bird's-eye view image. That means if camera troubles occur, it is hard to teleoperate the robot. Using the synthesis we propose can help the navigator teleoperate the robot in case of camera troubles.

Key Words : Teleoperation, Bird's-eye View, Camera Trouble

1. 序 論

日本は、地震や台風などの自然災害が多い国である。そのため、災害時に迅速に被害状況を調査することは非常に重要である。しかし、災害直後の調査は危険な場合が多く、有人作業では二次災害が起こる場合がある。また、原子力発電所の事故の様に、放射能の影響で人が立ち入ることが不可能な場合もあり、ロボットの遠隔操縦による調査の期待が高まっている^{(1)~(4)}。しかし、遠隔操縦では搭乗操作に比較して周囲環境の把握が困難で、効率が6割程度と低くなることが問題点として指摘されている⁽⁵⁾。この問題点を解決するための技術の1つに俯瞰映像提示システムがある^{(6)~(10)}。

俯瞰映像提示システムとは、遠隔操縦を行うロボットに複数のカメラを装着することで、ロボットを上から眺めたような擬似的な俯瞰映像を提示するシステムである(図1)。これにより、ロボットと周囲物体との位置関係を容易に把握可能となる。佐藤らは、無人化施工における油圧ショベルの遠隔操縦において、4

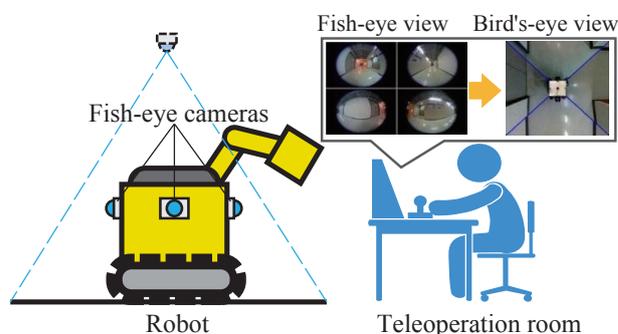


Fig. 1 Concept of bird's-eye view system

台の魚眼カメラを用いた俯瞰映像を提示することで、作業効率・精度がともに向上することを示した⁽⁶⁾。

俯瞰映像提示システムを災害対応など緊急の現場に用いる際に、障害発生時にもシステムの機能維持が可能であること、すなわち耐故障性が重要である。本研究では起こりうる障害としてカメラの故障を考える。例えば、原発内では放射線の影響によりカメラの受光素子が不具合を起こし、映像が撮影できない可能性が想定される。また、落石や操縦ミスによる壁への衝突でカメラが物理的に壊れる可能性や、土石流や火砕流の発生現場では泥や灰がカメラに付着し映像が欠損する可能性も想定される。このような状況において、搭

^{*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) {komatsu,fujii,yamshita,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

乗操作では搭乗者が迅速にカメラの修理・交換を行うことが可能であるが、遠隔操作ロボットは搭乗者がいないため不可能である。さらに、遠隔操作ロボットの作業場は原発内や災害直後の危険な現場など人が容易に近づけない場所が多いため、操縦者はカメラが故障したロボットを遠隔操作して、作業の続行もしくは撤退させる必要がある。よって、カメラの故障時にも遠隔操作が可能となる俯瞰映像を提示することが重要である。

従来の俯瞰映像システムにおいては、カメラ故障時に俯瞰映像が欠損し遠隔操縦に支障が生じるという問題点がある。これは視野の冗長性の不足により、1台のカメラが故障した際に撮影不可能な領域が存在するためである。俯瞰映像提示システムは、車の駐車支援システムであるアラウンドビューモニタ⁽⁹⁾や、鉱山機械用全周囲安全支援装置 SkyAngle⁽¹⁰⁾など数多くあるが、いずれも1台のカメラ故障時に欠損視野が生じる。

映像の欠損部分の補完に関する研究は数多く行われており、Kawaiらは欠損映像の修復を空間と時空間の類似度に基づいて行った⁽¹¹⁾。佐藤らも同様に、過去映像を用いることで俯瞰映像の欠損視野補完を行った⁽⁷⁾。これらの手法は、補完対象となる映像とは違う時刻の映像を用いて補完を行うため、動く物体の存在などの環境の動的変化を補完部で捉えることが不可能である。

筆者らは俯瞰映像提示システムにおいて、カメラの配置変更により、1台のカメラが故障した際にも俯瞰映像生成に必要な領域を全方位撮影可能となるように視野の冗長性を設計した⁽⁸⁾。これにより1台のカメラ故障時にも、現在時刻の映像を用いて視野欠損のない俯瞰映像生成が可能となった。筆者らの研究⁽⁸⁾では、1台のカメラ故障時には残りのカメラを活用して俯瞰映像生成を行う。ここで、故障時に俯瞰映像を生成する場合に解決すべき問題がある。故障時に正常時のキャリブレーション結果を用いて俯瞰映像を生成すると、映像中に部分的な歪みが生じる可能性も考えられる。したがって、カメラ故障時には残りのカメラを用いてキャリブレーションを行い、俯瞰映像を生成する必要がある。

本研究では、カメラの故障時にも遠隔操作が可能となる俯瞰映像を提示するシステムを開発する。筆者らの研究⁽⁸⁾で示した視野の冗長性を持った俯瞰映像提示システムにおいて、カメラ故障時の新たなキャリブレーション手法を提案する。提示する俯瞰映像は現在使用可能なカメラを用いたキャリブレーション結果を用いて生成する。例えば、4台のカメラで構成されたシステムにおいて、1台のカメラ故障時には、残りの

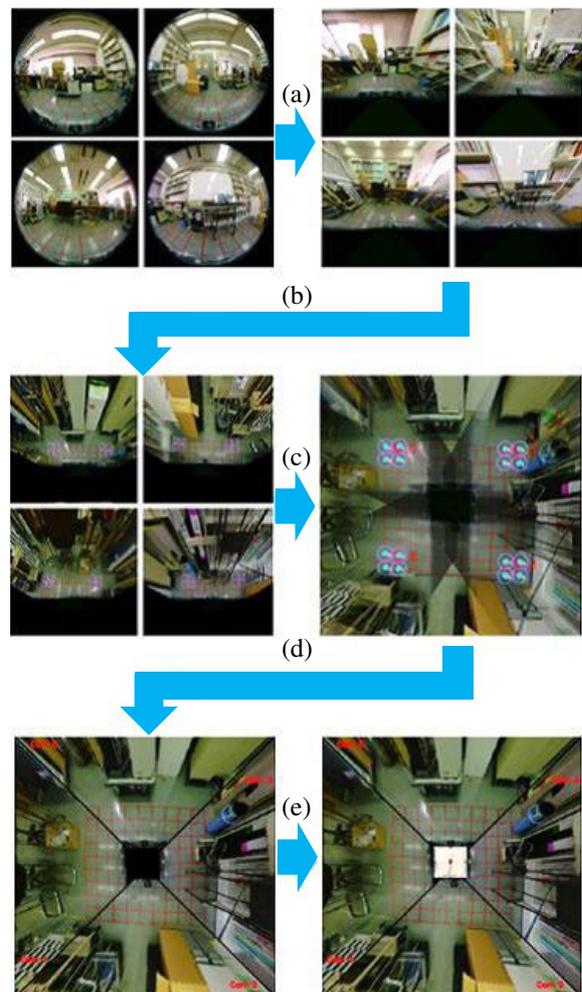


Fig. 2 Flow of generating bird's-eye view

3台のカメラを用いたキャリブレーションにより生成された俯瞰映像を提示する。さらに、故障時のキャリブレーションを新たな射影方式を用いて行うことで、俯瞰映像の歪みを減少させる。これにより、カメラの故障時にも歪みが少なく遠隔操作可能な俯瞰映像を提示する。

2. 俯瞰映像生成

本研究における俯瞰映像の生成手法は、文献⁽⁶⁾に基づいている。俯瞰映像はロボットの4つの側面に異なる向きに設置された魚眼カメラの映像を用いて生成する。俯瞰映像生成は以下のように行う(図2)。

まずは、魚眼カメラの映像に歪み補正を行い、一般のカメラの映像のように引き伸ばす。ここでは、立体射影・等距離射影・正射影モデルなどで表される魚眼カメラの映像を透視投影モデルの映像へと変換する(図2(a))。提案手法では、カメラの故障時に新たな射影方式を用いる。

透視投影モデルに変換された映像をホモグラフィ変

換を用いて上から眺めた部分的な俯瞰映像に変換する。その際に、床面に設置した既知形状のパターンやマーカを用いることで、ホモグラフィ行列の最適化を行う(図 2(b))。

得られた 4 つの俯瞰映像のずれが最小となる位置で統合することで全方位の俯瞰映像を生成する(図 2(c))。その際に、複数のカメラからの映像が得られる部分についてはあらかじめ担当するカメラの領域を設定することで、俯瞰映像中の重複部を削除する(図 2(d))。

最後に、あらかじめ用意したロボットを真上から撮影した画像を埋め込むことで、より自然な俯瞰映像を生成する(図 2(e))。

3. カメラの配置設計

3.1 視野の冗長系を持つ俯瞰映像提示システム

本研究では、筆者らの研究⁽⁸⁾で示した視野の冗長系を持った俯瞰映像提示システムを扱うため、まずは、カメラ配置による視野の冗長系設計について述べる。

本研究では、ロボット上面の 4 つの角部に対角線方向に向け、さらに俯角側に傾けてカメラを配置する。このようにカメラを設置することで、1 台のカメラで俯瞰映像生成に必要な領域を広く撮影することができる(図 3(a) および (b))。図 3(a) および (b) では 1 台の魚眼カメラで撮影可能な領域を黄色で示している。

1 台のカメラで俯瞰映像生成に必要な領域の半分以上を撮影可能であれば、4 台のカメラを設置することで視野の冗長性を持たせることができ、1 台のカメラ故障時にも全方位の俯瞰映像が生成可能となる(図 4(a) および (b))。図 4(a) および (b) では、カメラ C_1 で見える領域を $A(C_1)$ とし、カメラ C_1 と C_2 の両方で見える領域を $A(C_1 \cap C_2)$ として表している。

3.2 マスク領域の変更による欠損視野補完

第 2 章で述べたように、俯瞰映像中で複数のカメラで撮影できる部分については各々のカメラで担当する領域を決めている(図 5(a) および (b))。図 5(a) および (b) では、カメラ C_1 が担当する領域(マスク領域)を $M(C_1)$ として表している。故障時には、故障したカメラのマスク領域を隣接したカメラが担当することで欠損視野の補完を行う(図 5(b))。

4. カメラ故障時の俯瞰映像生成

4.1 故障パターンに応じたキャリブレーションの使用

カメラ故障時の俯瞰映像の欠損視野補完は、3.2 節のマスク領域の変更のみでも可能ではあるが、この手法では故障時の俯瞰映像は正常時のキャリブレーション結果を用いて生成される。正常時のキャリブレーション

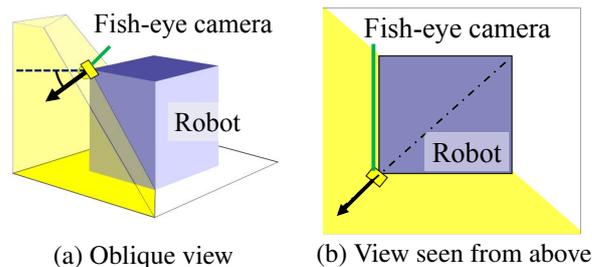


Fig. 3 Field of fish-eye view (corner attached)

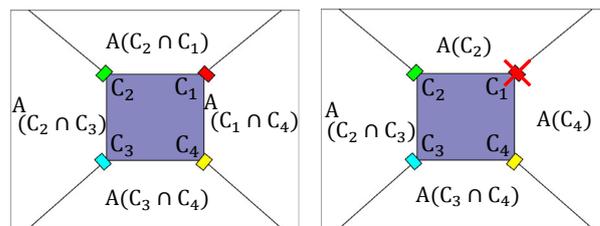


Fig. 4 Fields of View

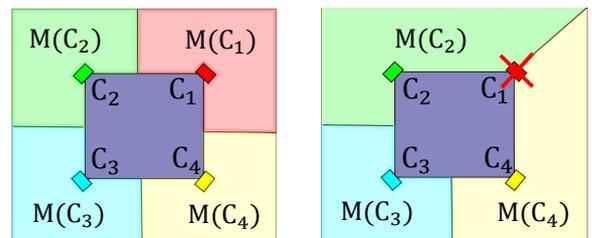


Fig. 5 Mask regions

ションでは、正常時の俯瞰映像が最適になるように設定されているため、故障時にも最適な俯瞰映像が生成されるとは限らない。そのため、故障時の対応としてマスク領域の変更のみでは不十分である。

提案手法ではカメラ故障時の俯瞰映像は、現在使用可能なカメラで行ったキャリブレーション結果を用いて生成する。次から例を挙げて説明を行う。俯瞰映像提示システムがカメラ C_1, C_2, C_3, C_4 の 4 台で構成されているとする。正常時の俯瞰映像はカメラ C_1, C_2, C_3, C_4 の 4 台で行ったキャリブレーション結果を用いて生成する。しかしカメラ C_1 が故障した場合は、カメラ C_2, C_3, C_4 の 3 台で行ったキャリブレーション結果を用いて俯瞰映像を生成する。このように、それぞれの故障パターンに応じたカメラの組み合わせでキャリブレーションを行うことで、現在使用可能なカメラを最大限活用した俯瞰映像生成が可能となる。

現在使用可能なカメラで行ったキャリブレーション結果を用いて俯瞰映像を生成するために、実装の段階ではルックアップテーブル (LUT) を使用する。LUT とはキャリブレーションにより得られた俯瞰映像と、

魚眼カメラで撮られた映像のピクセルごとの対応関係を保存したもので、LUTを用いることで、高速に俯瞰映像を生成することが可能となる。

カメラ故障の全パターンは予め知ることができるため、すべての故障パターンに対して、LUTを用意しておく。例えば、4台のカメラで俯瞰映像提示システムが構成されていると仮定すると、正常時、1台、2台、3台のカメラ故障時が想定される。したがって、組み合わせの数は、正常時 ${}_4C_0$ 、1台故障時 ${}_4C_1$ 、2台故障時 ${}_4C_2$ 、3台故障時 ${}_4C_3$ の和となるため、合計15通りのLUTを用意することで、カメラ故障時にも最適な俯瞰映像を生成可能となる。

4.2 故障時の射影方式変更 魚眼レンズは実世界の物体上の点 (a, b, c) を以下の式に従って、球面上の点 (x, y, z) 、魚眼カメラの映像上の点 $(X, Y, 0)$ へと射影する(図6)。ここで半球は魚眼レンズを表し、半球の半径は正規化して1とする。また、レンズの光軸を z 軸で表し、角度 θ および φ を図6のようにとる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \\ \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \\ \frac{c}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ここで図6の幾何学的関係より、 $\theta = \sin^{-1}(\sqrt{x^2+y^2})$ 、 $\varphi = \tan^{-1}(y/x)$ である。魚眼レンズの特性は $r = f(\theta)$ と表すことができ、以下の代表的なモデルが知られている。

$$r = k \tan(\theta/2), \quad (3)$$

$$r = k\theta, \quad (4)$$

$$r = k \sin \theta, \quad (5)$$

ここで k はレンズの特性を表す定数である。式(3)は立体射影、式(4)は等距離射影、式(5)は正射影とそれぞれ呼ばれている。

第2章で述べたように、俯瞰映像生成の際には、魚眼カメラの映像に歪み補正を行い、一般のカメラの映像のように引き伸ばす。その際に実世界から魚眼カメラの映像への射影を逆にを行い、再投影面に投影することで透視投影モデルの映像への変換を行う。具体的には、まず魚眼カメラの映像に対して球を仮定して、その半球面に映像を投影する。半球面への投影方法は撮影した魚眼レンズの特性に合わせる。その後、球の中心から半球面上の映像を再投影面へ射影することで、

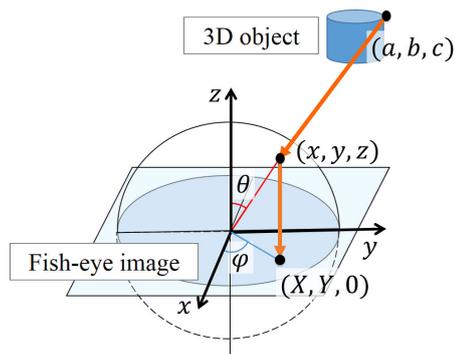


Fig. 6 Projection

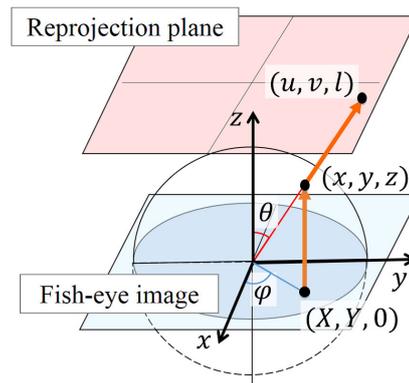


Fig. 7 Reprojection

透視投影モデルの映像へと変換を行う(図7)。図7では、再投影面と魚眼カメラの映像は平行で、その間の距離は l として示す。再投影面の位置を変えることで、1枚の魚眼カメラの映像から仮想的にパン・チルト・ズームを変更した透視投影モデルの映像を取得することができる。ここでは式(6)で表すピンホールカメラをモデルとした透視投影方式を用いる。

$$r = k \tan \theta. \quad (6)$$

透視投影モデルへの変換の際に用いたレンズの特性式 $r = f(\theta)$ により、映像の歪みの取れ方が変化する。撮影されたレンズの特性式を正確に推定することで、歪みの少ない透視投影モデルの映像が取得可能である。従来手法では未知の魚眼レンズのモデルに対しては、魚眼レンズの代表的なモデルである式(3)の立体射影、式(4)の等距離射影、式(5)の正射影の中で、最も変換後の映像の歪みが小さくなるものを使用したレンズのモデルとした。例えば正射影の場合、再投影面上の点 (u, v, l) と魚眼カメラの映像上の点 $(X, Y, 0)$ の対応関係を次式で表す。説明のため $Y = 0$ 、 $v = 0$ とした場合の幾何学的関係を図8に示す。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{u}{\sqrt{u^2+v^2+l^2}} \\ \frac{v}{\sqrt{u^2+v^2+l^2}} \\ \frac{l}{\sqrt{u^2+v^2+l^2}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

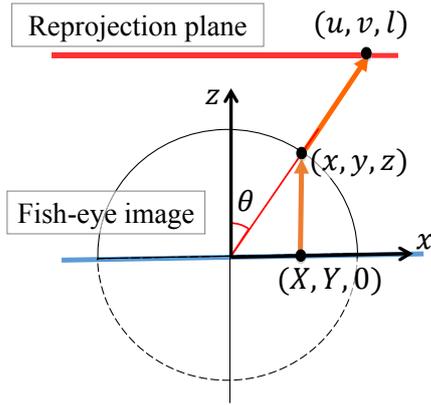


Fig. 8 Previous projection

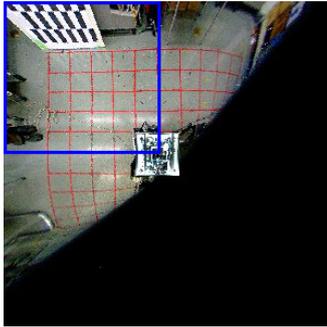


Fig. 9 Bird's-eye view of one camera by previous projection

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kx \\ ky \end{pmatrix}, \quad (8)$$

上で述べた手法により俯瞰映像を生成すると、魚眼カメラの中心部で撮影された映像は歪みが小さく補正されるが、カメラの広角側で撮影された映像の歪みは残ったままである（図9）。図9では、正常時の俯瞰映像生成で使用される部分を青で囲って示した。図9の青で囲ってある部分の歪みが非常に小さいため、すべてのカメラ正常時には従来の射影方式で十分であるが、故障時にはカメラの広角側で撮影された青で囲ってある部分以外の映像も使用する必要があるため、従来手法では不十分である。この問題は他の射影方式である式(3)、式(4)のモデルを用いても同様に生じる。

従来手法の射影方式では、カメラの広角側で撮影された部分から得られた俯瞰映像が歪むことから、故障時には使用した魚眼レンズの特性式として式(3)、式(4)、式(5)のモデルを用いることは不十分である。つまり、故障時には魚眼カメラの中心部で撮影された映像の歪みのみを小さくすることが可能な魚眼レンズの特性式 $r = f(\theta)$ よりも、中心部で撮影された映像の歪みを多少残したとしても、俯瞰映像に使用する部分に応じて、広角側で撮影された部分の歪みも小さく

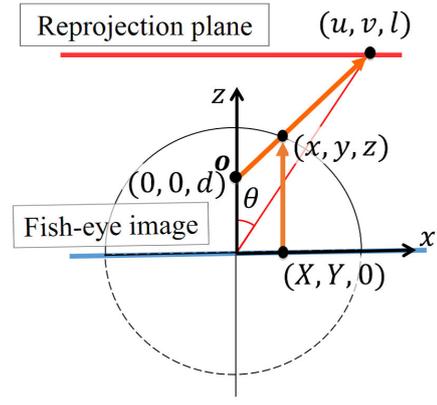


Fig. 10 Proposed projection

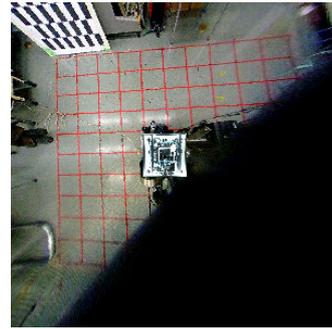


Fig. 11 Bird's-eye view of one camera by proposed projection

くすることが可能な魚眼レンズの特性式を用いる必要がある。そこで提案手法では、魚眼レンズの特性式 $r = f(\theta)$ を代表的なモデルから選択するとともに、新たなパラメータ d を加えることによって、カメラ台数に応じて調節可能なモデルへと拡張する。具体的には、再投影面への射影の際に球の中心ではなく z 軸上の点 $o = (0, 0, d)$ から行うことで、魚眼レンズの特性式の調整を可能にする。例えば魚眼カメラの映像を半球面に映像を投影する際に正射影を用いた場合の、再投影面上の点 (u, v, l) と魚眼カメラの映像上の点 $(X, Y, 0)$ の対応関係を次に示す。説明のため $Y = 0, v = 0$ とした場合の幾何学的関係を図10に示す。

まずは、半球面上の点 (x, y, z) を求める。点 o から再投影面上の点 (u, v, l) への直線は式(9)、球の方程式は式(10)となる。連立方程式(式(9)と式(10))を解くことで s が求まり、半球面上の点 (x, y, z) と再投影面上の点 (u, v, l) の関係がわかる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} u \\ v \\ l-d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1. \quad (10)$$

魚眼カメラの映像を半球面に映像を投影する際に正

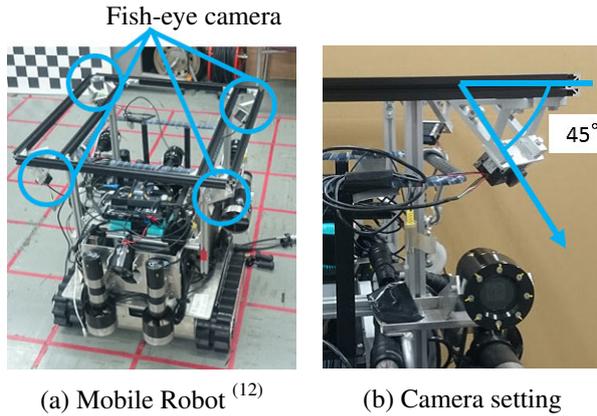


Fig. 12 Experimental system

射影を用いるため、魚眼カメラの映像上の点 $(X, Y, 0)$ と半球面上の点 (x, y, z) の関係は式 (11) となる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kx \\ ky \end{pmatrix}, \quad (11)$$

提案した射影方式により、 $\boldsymbol{o} = (0, 0, d)$ と再投影面までの距離 l の変更により、魚眼レンズの特性式 $r = f(\theta)$ をカメラ台数に応じて調整することができる。

本研究では、故障時の俯瞰映像生成の際に提案した射影方式を用いる。カメラ故障時は広角側で撮影された映像も使用するため、使用する部分の映像の歪みが小さくなるように現在使用可能なカメラ台数に応じて $\boldsymbol{o} = (0, 0, d)$ と l を調節する (図 11)。

5. 実験

5.1 実験システム 使用したロボットを図 12(a) に示す。このロボットは文献 (12) 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。つまり、災害

対応用ロボットとして、このロボットの形状・大きさが十分想定され得るため、このロボットを用いてカメラ故障時の欠損視野補完を行うことは有用である。提案手法に基づいて、魚眼カメラをロボット上面の4つの角部に図 12(a) 中で丸で囲って示した位置に装着した。今回使用したロボットでは、図 12(b) で示すように魚眼カメラの向きを俯角 45 度とした。また、魚眼カメラの視野角は 180 度である。

5.2 実験結果 5.2.1 項では、1 台のカメラ故障時に欠損視野を補完できることを示す。さらに、カメラの故障台数が増えた際にも、現在使用可能なカメラを最大限活用した俯瞰映像生成が可能であることを示す。

5.2.2 項では、故障パターンに応じたキャリブレーションにより俯瞰映像を生成することで、故障した際の提示する俯瞰映像の歪みを減少させることが可能であることを示す。

5.2.1 故障時の俯瞰映像生成 4 台の魚眼カメラを用いた正常時の俯瞰映像を図 13(a) に示す。また、右上カメラが 1 台故障した場合の補完前の俯瞰映像を図 13(b) に、右上カメラが 1 台故障した場合に欠損視野を補完した俯瞰映像を図 13(c) にそれぞれ示す。

また、図 13(a), (b) および (c) を比較すると、カメラ故障時の補完なしでは俯瞰映像の欠損部が大きい。提案手法で補完することで全方位の俯瞰映像が提示可能であることが確認できる。

故障台数が増えた際の俯瞰映像を示す。対角線上の右上および左下の 2 台のカメラが故障した場合の俯瞰映像を図 14(a) に、隣接した左下および右下の 2 台のカメラが故障した場合の俯瞰映像を図 14(b) に、左下、右下および右上の 3 台のカメラが故障した場合の俯瞰

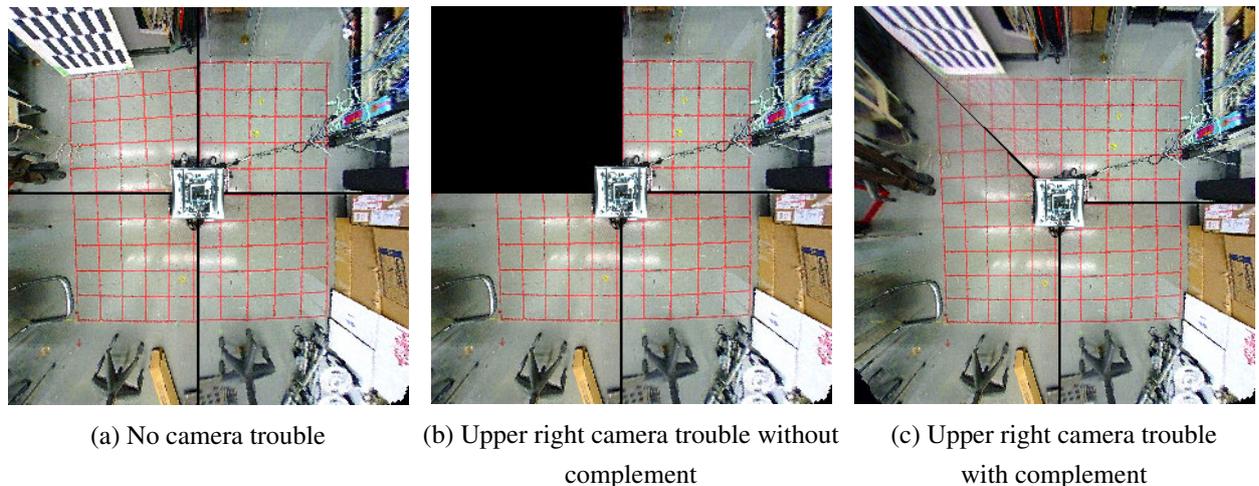
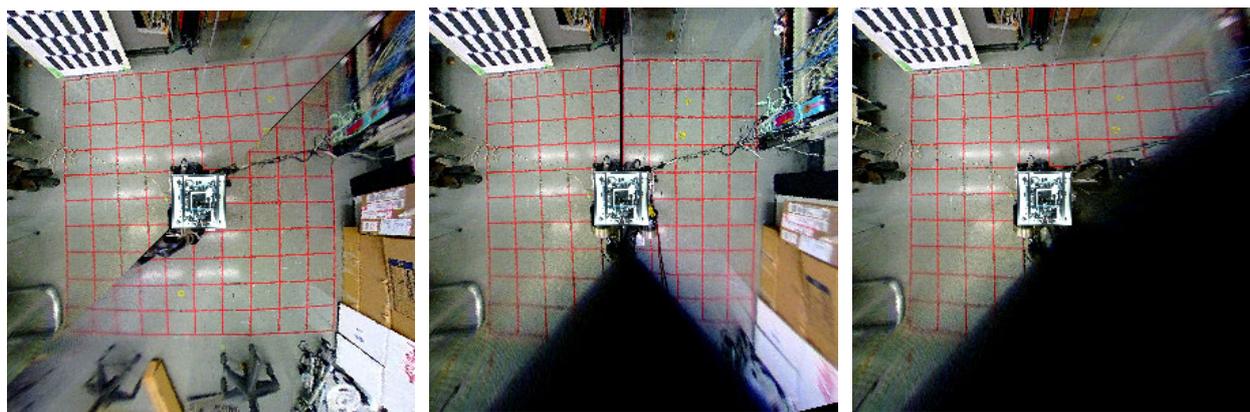


Fig. 13 Generating bird's-eye view



(a) Upper right and bottom left camera troubles

(b) Bottom left and bottom right camera troubles

(c) Bottom left, bottom right and upper right camera troubles

Fig. 14 Bird's-eye view with camera troubles

映像を図 14(c) にそれぞれ示す．図 13(a) で示す 4 台のカメラ正常時から，図 13(c) で示す 1 台のカメラ故障時の映像，図 14(a) および (b) で示す 2 台のカメラ故障時の映像，図 14(c) で示す 3 台のカメラ故障時の映像へ順を追って故障箇所が増えていくが，いかなる状況であっても現在使用可能なカメラを最大限活用した俯瞰映像生成が可能であることがわかる．また，今回使用したロボットのように前後が交換可能であると仮定すると，1 台のカメラが残りさえすれば進行方向の視野が確保可能な俯瞰映像が提示可能である．つまり，1 台のカメラが残りさえすればロボットを遠隔操作可能な俯瞰映像が提示可能であり，耐故障性の面から見て非常に有効である．

5.2.2 故障パターンに応じたキャリブレーションの使用 カメラの故障時にも，正常時のキャリブレーション結果を用いて俯瞰映像を作成する従来手法と，故障のパターンに合ったキャリブレーション結果を用いて俯瞰映像を作成する提案手法で映像の歪みの違いを評価する．これにより，故障パターンに応じたキャリブレーションを用いる有効性を確認する．

実験環境の床面に正方形の格子模様を用意し，俯瞰映像中の模様の形状により歪みの評価を行う．1 つの正方形に対してベクトル v_1, v_2 を定義し，2 つのベクトル間の角度を ψ とする（図 15）．そして，俯瞰映像中で確認できるすべての正方形に対して $|v_1|, |v_2|, \psi$ の平均値および標準偏差を求めることで俯瞰映像の歪みの評価を行う．この際，欠損部がある正方形については標本数に加えないことにする．

対角線上の左上および右下の 2 台のカメラが故障した際，従来手法を用いて生成した俯瞰映像を図 16(a) に，提案手法を用いて生成した俯瞰映像を図 16(b) に

Table 1 Evaluation of distortion

	Previous method $n = 83, \bar{n} = 17$		Proposed method $n = 81, \bar{n} = 19$	
	mean	s.d.	mean	s.d.
$ v_1 $ [pixel]	18.1	± 2.5	19.1	± 1.0
$ v_2 $ [pixel]	19.8	± 2.1	20.3	± 1.0
ψ [deg]	91.3	± 5.5	89.5	± 3.1

それぞれ示す．図 16(a) は従来手法において，魚眼レンズのモデルとして最も変換後の歪みが小さくなるものとして立体射影を用いた．図 16(b) は提案手法において，カメラの広角側で撮影された歪みも小さくなるものとして，魚眼カメラの映像を半球面に映像を投影する際に正射影を用いて，右上のカメラに対して $o = (0, 0, -0.36)$, $l = 4.0$ と，左下のカメラに対して $o = (0, 0, -0.39)$, $l = 3.7$ とパラメータを設定した．

図 16(a) および (b) に対して $|v_1|, |v_2|, \psi$ の平均値および標準偏差を求めた結果を表 1 に示す．表 1 において n は正方形の標本数であり， \bar{n} は欠損部がある正方形の数である．表 1 から確認できるように，提案手法である故障パターンに応じたキャリブレーションを用いた場合では，従来手法である正常時のキャリブレーションを用いた場合と比較して $|v_1|, |v_2|$ および ψ の標準偏差がそれぞれ半分程度に小さくなっている．よって，故障パターンに応じたキャリブレーションを用いることで俯瞰映像の歪みが小さくなることがわかる．これにより，カメラの故障時に故障のパターンに合ったキャリブレーション結果を用いて俯瞰映像を作成する提案手法の有効性が確認された．

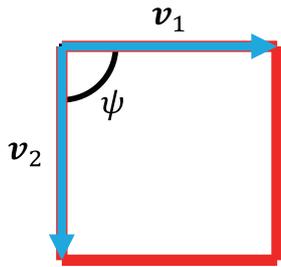
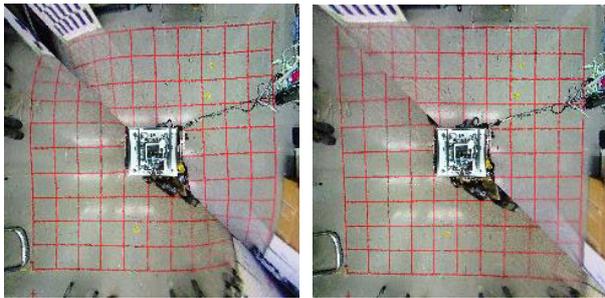


Fig. 15 Definitions of v_1 , v_2 and ψ



(a) Previous method (b) Proposed method

Fig. 16 Bird's-eye view by two cameras

6. 結 論

本研究では、カメラの故障時にも遠隔操作が可能となる俯瞰映像を提示するシステムを開発した。筆者らの研究⁽⁸⁾で示した視野の冗長系を持った俯瞰映像提示システムにおいて、カメラ故障時には俯瞰映像生成の際に、射影方式の変更を行うことで魚眼レンズの特性式 $r = f(\theta)$ をカメラ台数に応じて調節可能なモデルへと拡張し、故障パターンに応じたキャリブレーションを用いた。提案手法により、カメラの故障時にも歪みが少ない俯瞰映像を提示することが可能となった。

本システムにより、カメラが1台、2台、3台と故障しても、現在使用可能なカメラを最大限活用した俯瞰映像生成が可能である。さらに、1台のカメラが残りさえすれば、進行方向の視野が確保可能な俯瞰映像が提示可能であるため、災害時対応など緊急の現場でこのシステムを用いることは、耐故障性の面から見て非常に有効である。

今後の課題は、使用環境によるカメラの故障率や使用用途などを考慮して、カメラの配置と台数を定式化し評価関数を作成することで、状況に応じた最適なカメラ配置と台数を求めることである。また、本研究の手法は俯瞰映像に必要なすべての領域を常時複数台のカメラで取得可能である点も特徴的である。この点を用いて、俯瞰映像生成と同時に、ステレオ視を用いた障害物検知などを行うことでさらに耐故障性を高めていくことが今後の展望である。

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) 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, vol. 32, no. 1, pp. 37–41, 2014.
- (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, vol. 28, no. 2, pp. 160–163, 2010.
- (3) 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.
- (4) 吉田 貴: “無人化施工におけるテレロボティクス”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 6, pp. 585–587, 2012.
- (5) 山口 崇, 吉田 正, 石松 豊: “遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する実態調査”, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, vol. 59, no. 6, pp. 373–374, 2004.
- (6) 佐藤 貴亮, Alessandro Moro, 藤井 浩光, 杉本 和也, 野末 晃, 三村 洋一, 小幡 克実, 山下 淳, 浅間 一: “無人化施工における疑似俯瞰映像提示システムの開発”, 第19回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 346–352, 2014.
- (7) 佐藤 貴亮, Alessandro Moro, 山下 淳, 浅間 一: “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”, 第18回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 367–372, 2013.
- (8) 小松 廉, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 山下 淳, 浅間 一: “俯瞰映像提示システムにおける魚眼カメラの広角性を利用した欠損視野の補完”, 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, IJ1-06, pp. 1–4, 2014.
- (9) 金岡 晃廣, 高野 照久, 菅原 大輔, 大谷 莊太郎, 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.
- (10) 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, IP1-M04, pp. 1–2, 2014.
- (11) N. Kawai, K. Machikita, T. Sato and N. Yokoya: “Video Completion for Generating Omnidirectional Video without Invisible Areas”, Information and Media Technologies, vol. 6, no. 1, pp. 158–171, 2011.
- (12) 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.