

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*

小松 廉** 藤井浩光** 山下 淳*** 浅間 一***

Development of Bird's-eye View System for Teleoperated Robot in Camera Troubles with Arrangement Design of Camera

Ren KOMATSU, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

This paper describes a new method for improving fault tolerance of bird's-eye view systems that are used to teleoperate robots. The bird's-eye view image helps an operator understand the surroundings easily and teleoperate the robot more accurately. The image is created by synthesizing multiple images captured by the cameras that are attached to the teleoperated robot. With a conventional method, if a camera does not work well, blind spots occur in the bird's-eye view image, and it causes difficulties in the teleoperation of the robot. This paper presents a new camera arrangement method so that camera can capture the area required for the bird's-eye view generation in case of camera troubles, and the bird's-eye view image is created by using images captured by only cameras that are not failed. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: camera troubles, fault tolerance, bird's-eye view, teleoperation, camera arrangement

1. 序 論

災害時に遠隔操作ロボットを用いて調査・復旧作業を行うことは、二次災害を防ぐ上で極めて重要である¹⁾²⁾。遠隔操作においては、オペレータがロボットを効率良く操作することが重要であり、操作性を向上させるための研究が盛んに行われている^{3)~5)}。本研究では、遠隔操作ロボットの操作性向上のための技術として俯瞰映像提示システムを取り上げる。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、それらから得られる異なる視点の映像を統合することで、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)。近年、俯瞰映像生成に関する研究は数多くなされておられ^{5)~8)}、既に様々な現場に導入されている。例えば、先行研究⁵⁾においては、建機の遠隔操作における俯瞰映像提示システムの有用性を検証しており、ロボットと周囲物体との位置関係の把握が容易になることで、移動時の操作性が向上することが報告されている。

今後、俯瞰映像提示システムをより多くの現場に適用していくために解決すべき課題の一つに、耐故障性が挙げられる。実際の現場においては、様々な原因により機材が故障するトラブルが想定される。俯瞰映像提示システムでは、複数の広視野角のカメラ映像を統合することで提示映像を生成しているため、カメラが故障した場合、オペレータに提示される映像に欠損が生じることで操作性に大きな支障が生じてしまう。すなわち、俯瞰映像システムを用いた遠隔操作システムにおいて、カメラ故障に対する頑健性を向上させる技術が必要である。

カメラ映像中の視野欠損を修復する問題に取り組んだ研究として、例えば Kawai らは欠損映像の修復を空間と時間的の類

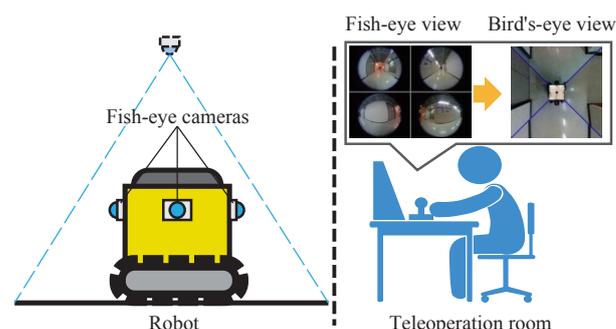


Fig. 1 Concept of bird's-eye view system

似度に基づいて行った⁹⁾。Sato 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¹⁰⁾。これらの手法は、視野欠損による映像の視認性の改善や、視野欠損の直後においては有効であるが、災害対応の現場など様々な環境への適用を考慮した場合、動的な環境への適用には適していない。すなわち、動的環境においてはシステムを構成する機器の一部に故障が生じた場合にも、システムとしての機能の維持が可能であることが重要である。特に、俯瞰映像システムにおいては、カメラの故障時にもロボットの周囲を俯瞰可能である耐故障性を備えた撮像系の構築が必要である。

坂尾らはシステムの耐故障性に関して、設計段階からシステムの構成要素に冗長性を組み込むことが耐故障性を向上させる上で重要であると指摘している¹¹⁾。俯瞰映像提示システムにおいても、搭載する複数台のカメラを用いた冗長系の実現がシステムの耐故障性を向上させる上で有効であると考えられる。本研究では、俯瞰映像提示システムに用いるカメラ群の広角性に着目し、カメラ故障時にも全方位の撮影が可能となるようなカメラ配置法を提案する。隣接するカメラ同士が視野を補い合うようにカメラを配置することで、あるカメラが故障した際にも残りのカメラで視野欠損を補うことが可能となる。

* 原稿受付 平成 27 年 5 月 13 日

掲載決定 平成 27 年 9 月 4 日

** 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 正 会 員 東京大学大学院

また同時に、俯瞰映像を用いた遠隔操作においては、統合された映像から周囲の状況を正確に確認できることが重要である。例えば、複数の映像統合においてカメラ映像の境界におけるテクスチャのずれが大きいと、境界部に映り込んだ物体が分裂したり消失したように見えるという問題が生じる。そこで、故障時にも適用可能であることを考慮して、俯瞰映像生成において異なる配置の異なる台数の複数カメラ映像を用いた境界におけるテクスチャのずれを最小化する映像統合手法も提案する。

本研究では、冗長性を備えたカメラ配置設計手法と、境界におけるテクスチャのずれを考慮した映像統合手法を組み合わせることで、故障時にも残存する正常なカメラ映像を用いて、現在の周囲状況を確認可能な俯瞰映像提示システムを提案する。第2章では、耐故障性を実現するカメラ配置法について述べる。カメラ故障に備えるために、平常時から隣接するカメラ同士が視野を補い合い、必要な領域を2台以上のカメラで撮影可能なカメラ配置設計手法を提案する。第3章では、カメラトラブル時に正常なカメラに応じて、境界におけるテクスチャのずれが小さい映像を生成可能な映像統合手法について述べる。第4章では、実際のロボットに対して提案手法を適用し有効性を確認する。

2. 魚眼カメラの配置設計

カメラ故障の際には隣接した正常な魚眼カメラが補って必要領域を撮影することで、現在の映像のみを用いて視野欠損の少ない俯瞰映像を提示する。そのために広視野角の魚眼カメラを用いて、平常時から必要な領域を2台以上のカメラで撮影可能なカメラ配置設計手法を提案する。本章でカメラ配置設計手法について詳細に述べる。

俯瞰映像提示システムとは、複数台のカメラで撮影した映像を統合してロボットの周囲全方位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。俯瞰映像生成については3.1節で詳細に述べる。

俯瞰映像提示システムでは、床面領域の全方位を撮影することで欠損視野がない俯瞰映像生成が可能である。本研究では180度以上の視野角を持つ魚眼カメラを想定する。ここで、2台の魚眼カメラを用いて全方位撮影可能な系の構築を行う。2.1節で2台の魚眼カメラで全方位撮影可能となる必要条件について述べる。

全方位撮影可能な系を2つ組み合わせることにより、平常時から俯瞰映像生成に必要な領域を2台以上の魚眼カメラで撮影可能とする。したがって、本研究では4台の魚眼カメラを用いる。2.2節では、4台の魚眼カメラを用いた提案手法でのカメラ配置において、1台のカメラ故障時にも全方位撮影可能となることを述べる。

2.1 2台のカメラで全方位撮影可能となる必要条件

2.1.1 1台のカメラの設置条件

まず魚眼カメラの設置位置と取り付け角度に応じて、撮影可能な床面領域を最大化することを考える。ここでロボットを直方体と近似した場合、魚眼カメラの取り付け箇所には、ロボットの側面に取り付けた場合と、角部に取り付けた場合の2パターンが存在する。

魚眼カメラを側面に設置した場合について、魚眼カメラを高さ h ($0 \leq h \leq H$)、俯角側に α ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) 傾けて設置することで撮影可能な領域を図2(a)および(b)に示す。ここで、

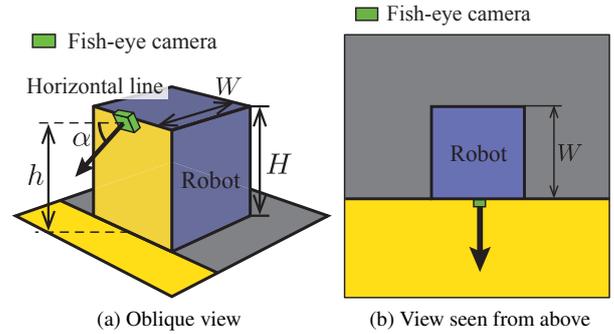


Fig. 2 Area captured by fish-eye camera at side

ロボットを底面が1辺 W の正方形で高さ H の直方体で近似しており、図2(a)ではロボットを斜めから見た時の、図2(b)ではロボットを上から見た時の撮影可能な領域を示す。図2(a)および(b)において、撮影可能な領域を黄色で、ロボットによる遮蔽の影響で、俯角側への傾きによらず撮影不可能な床面領域は一定であり、それを灰色で示す。魚眼カメラを側面に設置した場合は、俯角側に傾けても撮影可能な床面領域が変化せず、俯角側への傾きによらず撮影不可能な領域が大部分を占める。

次に魚眼カメラを角部に取り付けた場合について、カメラを高さ h ($0 \leq h \leq H$)、俯角側に α ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) 傾けて設置することで撮影可能な領域を図2と同様の形式で図3(a)および(b)に示す。図3(a)および(b)において、青色で示す線は魚眼カメラの視円錐と床面との交線である。 $f(\alpha, h)$ は、カメラの位置を床面に垂直に投影した点と、魚眼カメラの視円錐と床面の成す交線との距離を示し、高さ h と傾き α を用いて式(1)のように表すことができる。

$$f(\alpha, h) = \begin{cases} h \tan \alpha & \text{if } \alpha < \frac{\pi}{2}, \\ \infty & \text{if } \alpha = \frac{\pi}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

式(1)より、カメラを角部に設置した場合はカメラの取り付け傾きを大きくするほど広い範囲の床面領域が撮影可能であることが確認できる。また、カメラを側面に設置した場合と比較して撮影不可能な領域を小さくすることができる。すなわち、より広い視野を得るにはカメラを角部に俯角側に傾けて設置する必要がある。

2.1.2 2台のカメラの設置条件

図3(a)および(b)のカメラ1台での撮影範囲を考えると、2台のカメラを対角線上の角部に俯角側に傾けて設置することで、お互いのカメラが相互に撮影不可能な領域を補って、床面領域の全方位を撮影可能であることがわかる。図3(a)および(b)において反対側の角部に設置するカメラから撮影不可能であり、2台で俯瞰映像を生成するために必ず撮影する必要がある床面領域を赤線で囲って示す。2台のカメラの角度を同じとした場合2台のカメラで床面領域を全方位撮影するためには、 $W/\sqrt{2} \leq f(\alpha, h)$ となる必要があるため、カメラの俯角側への傾き α 、高さ h は式(2)を満たす必要がある。

$$\alpha \geq \tan^{-1}\left(\frac{W}{h\sqrt{2}}\right), \quad (2)$$

魚眼カメラの視野角が180度より大きい場合には、式(2)の関係式を満たす α では常に2台のカメラを用いて床面領域を全方位撮影することが可能である。また、式(1)より α が一定の場合カメラの設置高さ h と撮影可能な範囲は比例関係である

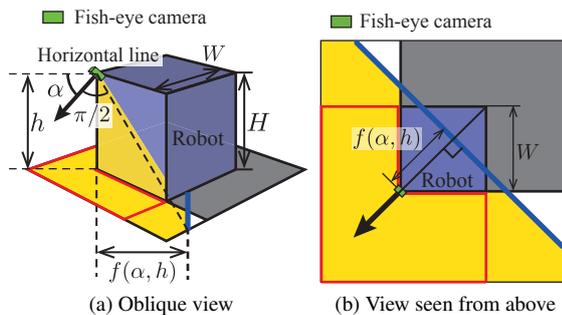


Fig. 3 Area captured by fish-eye camera at edge

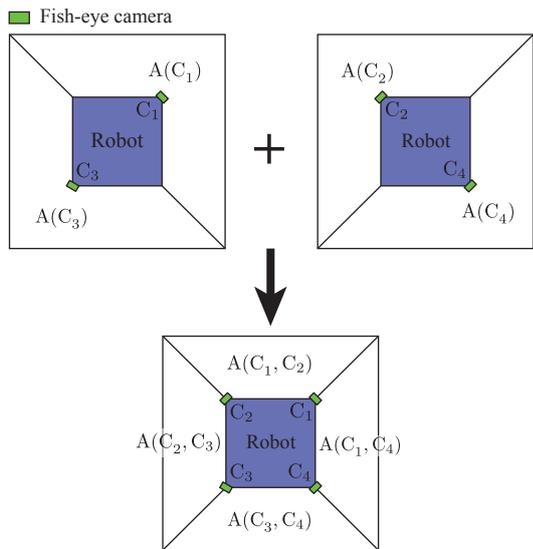


Fig. 4 Multiple camera system

ことが確認できる．したがって、広い範囲を撮影可能とするために、取り付け可能な最も高い位置にカメラを設置することとする．

2.2 提案カメラ配置における視野

2台のカメラをロボットの対角線上の角部に、式(2)を満たす角度で設置することで、全ての床面領域を撮影可能となる．さらに4台のカメラを用いて2台ずつで進行方向に対称に組み合わせることで、平常時から必要な領域を2台以上のカメラで撮影可能となる．2台ずつの2つの系を組み合わせさせた4台のカメラ配置を図4に模式的に示す．カメラを C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) と表すと、図4において、カメラ C_i のみで撮影可能な床面領域を $A(C_i)$ と、カメラ C_i と C_j の2台のカメラで撮影可能な床面領域を $A(C_i, C_j)$ とそれぞれ表す．

提案したカメラ配置を用いることで、カメラ故障時にも視野欠損のない俯瞰映像生成が可能である(図5(a)および(b))．図5(a)および(b)では、カメラ C_3 故障時の撮影可能な床面領域を示しており、図5(a)は提案手法による撮影可能な床面領域を、図5(b)はカメラを側面に設置したシステムによる撮影可能な床面領域を示す．カメラ C_i のみで撮影可能な床面領域を $A(C_i)$ と、カメラ C_i と C_j の2台のカメラで撮影可能な床面領域を $A(C_i, C_j)$ とそれぞれ示し、図5(b)では撮影不可能な床面領域を灰色で示す．提案手法を用いるとカメラ故障時にも全ての床面領域が撮影可能であるが、カメラを側面に設置したシステムにおいては撮影不可能な領域が存在する．従来の俯瞰映像提示システム^{5)~7)}ではカメラを機体の側面に設置してお

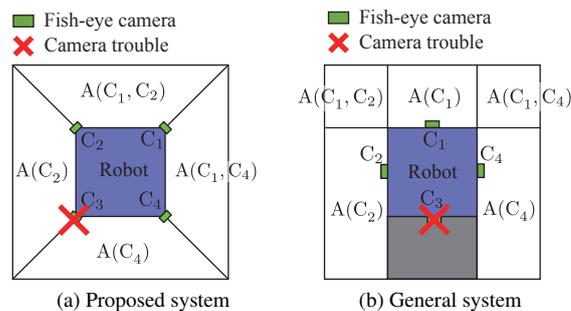


Fig. 5 Area captured by fish-eye cameras

り、カメラ故障時に図5(b)で示すように撮影不可能な領域が存在し、提示する俯瞰映像中に視野欠損が生じてしまう．

3. カメラ故障に備えた俯瞰映像生成

魚眼レンズの歪みにより、俯瞰映像中のカメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれが大きいと、境界部に映り込んだ物体が分裂したり消失したように見えるといった問題が生じる．したがって、故障パターンに応じて俯瞰映像中でカメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化するように統合を行う必要がある．本章では、カメラ故障時にも対応可能な境界におけるテクスチャのずれを考慮した俯瞰映像生成手法について述べる．

3.1節では、俯瞰映像生成の流れを述べる．3.2節では、提案手法である俯瞰映像中で、カメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化する統合手法について述べる．

3.1 俯瞰映像生成の流れ

俯瞰映像生成は以下の通りを行う．

- i) 透視投影変換：魚眼カメラで得られる映像から一般のカメラで得られる映像へ変換することによる歪みの除去
- ii) 視点変換：透視投影映像を上から眺めた映像へ変換
- iii) 部分俯瞰映像統合：複数の上から眺めた映像を回転並進移動により統合し俯瞰映像を生成

i) 透視投影変換では、4台の魚眼カメラで撮影した映像を一般のカメラで得られる映像へと変換を行う．Scaramuzzaらの手法¹²⁾¹³⁾を用いてi)透視投影変換により、魚眼カメラで撮影した映像に含まれる特有の歪みを除去し、透視投影映像を生成する．

ii) 視点変換ではi)透視投影変換で得られた4枚の透視投影映像を、それぞれを上から眺めた映像へホモグラフィ行列 H を用いて視点変換を行う．i)透視投影変換で得られた透視投影映像は、それぞれ異なる角度から撮影した映像となっているため、床面上の物体を撮影した際に撮影角度によって映像中の形状が異なる．ここで、同じ上空からの視点で撮影した映像へと視点変換することで映像中の物体形状が一意に定まるため、iii)部分俯瞰映像統合において回転並進移動を用いて統合可能となる．以後、ii)視点変換で得られる映像を部分俯瞰映像と呼ぶ．本研究では、文献⁵⁾¹⁴⁾の手法を参考に床面領域上に設置した既知物体の形状を用いて、部分俯瞰映像へ変換するためのホモグラフィ行列 H_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) をカメラの台数分求める．

iii) 部分俯瞰映像統合ではii)視点変換で得られた部分俯瞰映像を統合することで俯瞰映像を生成する．本研究ではiii)部分俯瞰映像統合において、カメラ故障を考慮し俯瞰映像中でカメ

ラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化する統合を行う．iii) 部分俯瞰映像統合については，次節で詳細に述べる．

3.2 カメラ故障を考慮した部分俯瞰映像の統合

iii) 部分俯瞰映像統合では ii) 視点変換で得られた部分俯瞰映像を同次変換行列 T を用いて統合することで俯瞰映像を生成し，映像中のそれぞれの領域について担当するカメラを設定することで重複部を削除する．ここで俯瞰映像中でカメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化するように統合を行う．

故障パターンにより俯瞰映像生成に使用するカメラの組み合わせが異なるため，同様に故障パターンによりカメラが切り替わる境界も異なる．したがって，故障パターンに応じて同次変換行列 T を正常なカメラの台数分求める必要がある．3.2.1 項で故障パターンの定義について述べる．3.2.2 項でそれぞれの故障パターンについて俯瞰映像における各カメラの担当領域を設定する．3.2.3 項でカメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化する統合手法について述べる．

3.2.1 故障パターン

本研究では4台のカメラで構成されたシステムを想定しているため，正常時1通り (${}_4C_0$)，1台故障時4通り (${}_4C_1$)，2台故障時6通り (${}_4C_2$)，3台故障時4通り (${}_4C_3$) の合計15通りの故障パターンが想定できる．それぞれの故障パターンを図6に示すように， S_i^N と表す．ここで N は正常なカメラの台数を示す．2台正常時な場合のみ対角線上のカメラ故障時と隣接するカメラ故障時でカメラが切り替わる境界が異なるため，それぞれ S_i^{2d} と S_i^{2n} で分けて表す．

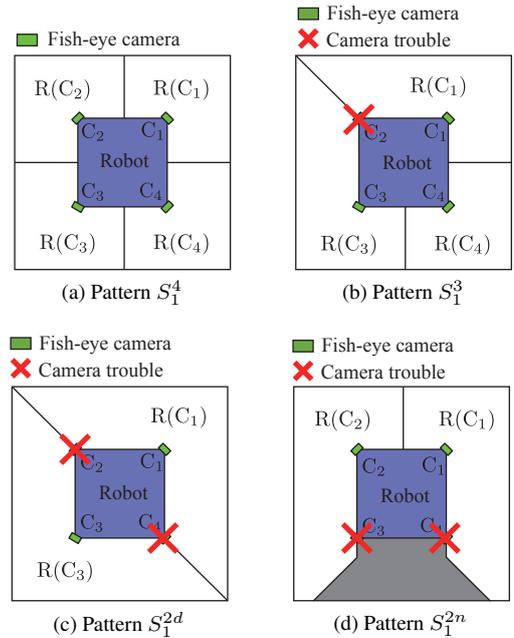


Fig. 7 Cameras in charge

3.2.2 俯瞰映像における各カメラの担当領域

それぞれの故障パターンについて俯瞰映像における各カメラの担当領域を設定する．図7(a), (b), (c) および (d) において，それぞれ S_i^4 , S_i^3 , S_i^{2d} および S_i^{2n} の故障パターンの際にカメラ C_i で担当する領域 $R(C_i)$ を，例を挙げて示している．また

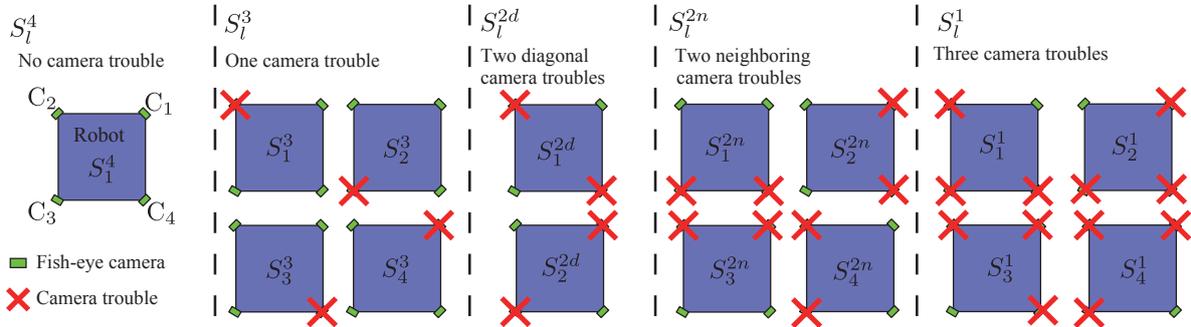


Fig. 6 Camera trouble patterns

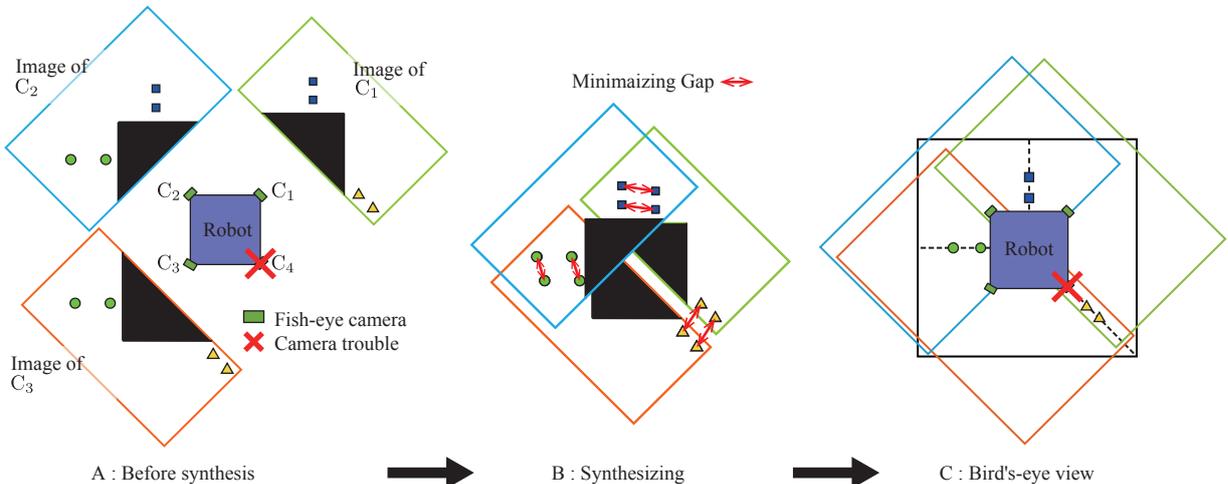


Fig. 8 Synthesis of images

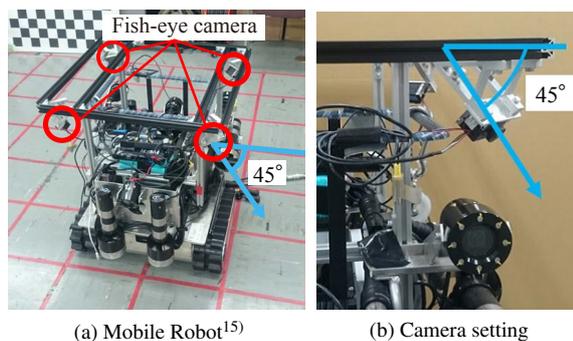


Fig. 9 Experimental system

図 7(d) において、撮影可能な領域の右半分をカメラ C_1 で担当する領域 $R(C_1)$ 、左半分をカメラ C_2 で担当する領域 $R(C_2)$ とし、撮影不可能な領域を灰色で示す。カメラ 3 台故障時には、カメラが担当する領域を設定する必要がなく、正常なカメラ 1 台の部分俯瞰映像を提示することとする。

3.2.3 境界におけるテクスチャのずれを最小化する映像統合

カメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化するために、部分俯瞰映像の統合の際にカメラが切り替わる境界付近にある点を統合点とし、そのずれを最小となるように回転と並進移動を用いて統合を行う (図 8)。図 8 において、丸、三角形および四角形で統合点を示し、A は統合前のそれぞれのカメラから得られた部分俯瞰映像を、B では統合中の様子を示し、C では統合後の俯瞰映像をそれぞれ模式図で示す。図 8 の B において、映像間における統合点のずれを赤色の矢印で示しており、ずれを最小化することで統合を行う。また、図 8 の C において俯瞰映像として提示する部分を黒線で囲って示し、カメラが切り替わる境界を黒色の破線で示す。

故障パターン S_i^N である場合の統合手法を述べる。まずは、正常な N 台のカメラから得られた N 枚の部分俯瞰映像をそれぞれ I_n ($n = 1, 2, \dots, N$) とする。この時に I_n の映像がカメラ C_i から得られたとし、 I_{n-1} と I_{n+1} はカメラ C_i と隣り合う正常なカメラから得られた映像とする。ただし、 $I_{N+1} = I_1$ とする。例えば図 8 のカメラ C_4 故障下においては、カメラ C_1 と隣り合う正常なカメラはカメラ C_2 とカメラ C_3 であり、カメラ C_1 から得られた映像 I_n は、カメラ C_2 およびカメラ

C_3 から得られた映像である I_{n-1} および I_{n+1} と部分的に重複している。 I_n と I_{n+1} 中において、担当カメラが切り替わる境界付近にある床面領域上の点を P_n ($P_n \geq 2$) 点指定して統合点とし、それぞれの部分俯瞰映像座標系での同次座標を m_p^n と m_p^{n+1} とする。ここで、 $n = 1, 2, \dots, N$ であり、 $p = 1, 2, \dots, P_n$ である。

式 (3) と式 (4) で表すように、評価関数 $E(\mathcal{T})$ を最小化する同次変換行列の集合 \mathcal{T}^* を求める。ただし、 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n \mid n \in \{1, 2, \dots, N\}\}$ であり、 \mathbf{T}_n は統合する際に用いる部分俯瞰映像 I_n の座標系から俯瞰映像の座標系へと変換するための同次変換行列である。また、基準とするため I_1 に対する同次変換行列は式 (5) とする。

$$E(\mathcal{T}) = \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^{P_n} \frac{\|\mathbf{T}_n m_p^n - \mathbf{T}_{n+1} m_p^{n+1}\|_2}{P_n}, \quad (3)$$

$$\mathcal{T}^* = \arg \min_{\mathcal{T}} E(\mathcal{T}), \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_1 = \mathbf{E}, \quad (5)$$

同次変換行列は並進移動 2 自由度、回転 1 自由度を持っているため、式 (4) はパラメータ数 $3(N-1)$ の最適化問題となる。本研究では \mathcal{T}^* を求める際に滑降シンプレックス法を用いる。

4. 実験

4.1 実験システム

使用したロボットを図 9(a) に示す。このロボットは文献¹⁵⁾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。また、魚眼カメラは視野角が 180 度であるものを使用した。

ロボットは底辺が 1 辺 600mm の正方形であり、高さは 690mm の直方体で近似できる。提案手法に基いてカメラを設置する傾きを求める。カメラの取り付けには図 9(a) および (b) に示すような治具を用いた。2.1.2 項で述べたように、カメラの設置位置が高いほど広範囲を撮影可能なため、カメラの設置高さは取り付け可能な最も高い位置である 600mm とした。

本研究では、魚眼カメラをロボット上面の 4 つの角部に図 9(a) 中で丸で囲って示した位置に設置した。提案手法に基づく、魚眼カメラの俯角側へ傾きは 35.3 度以上であれば良い。そこで、用いた治具の関係もあり図 9(a) および (b) で示すように俯角側に 45 度傾けて設置した。

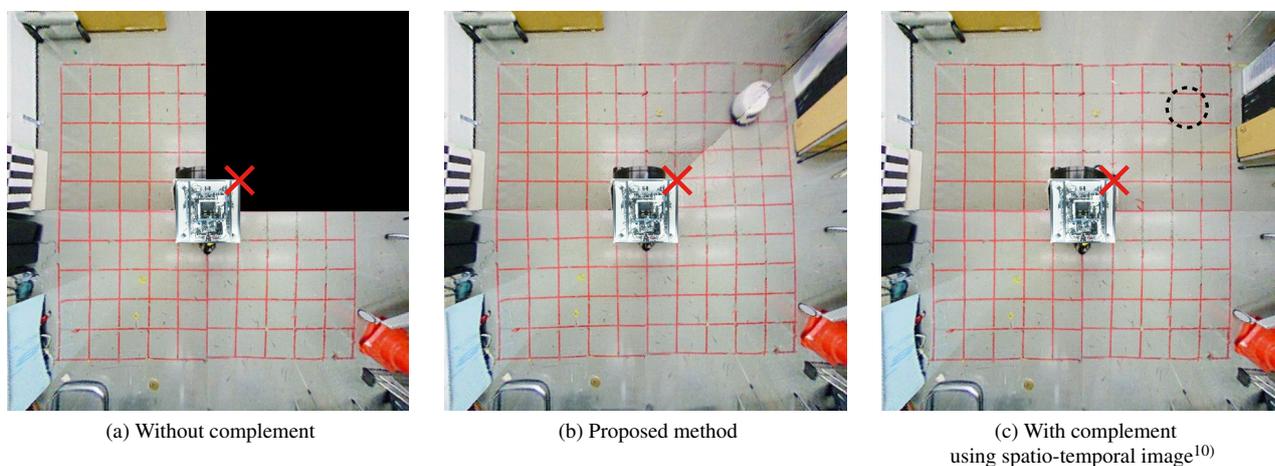


Fig. 10 Bird's-eye view with upper right camera trouble

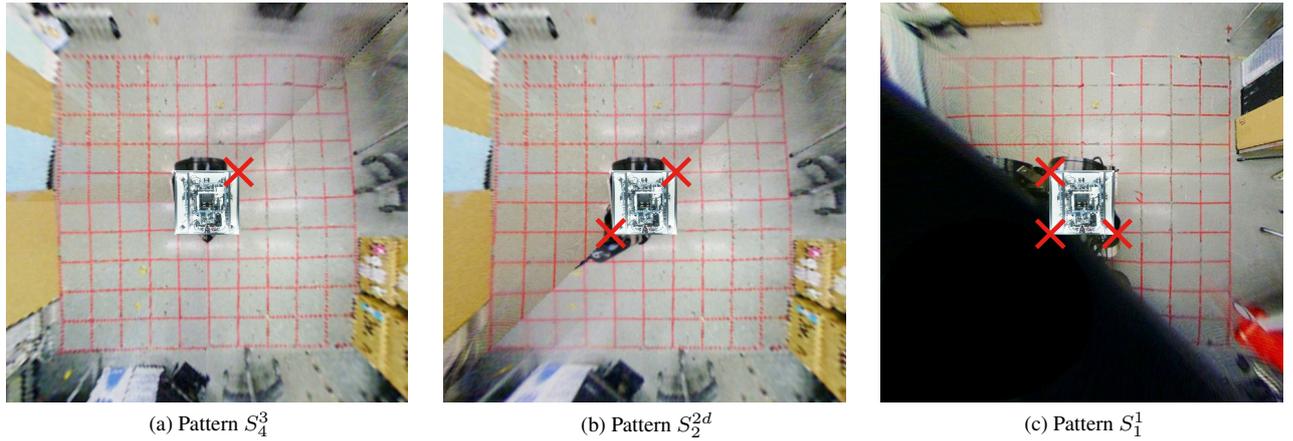


Fig. 11 Bird's-eye view with camera troubles

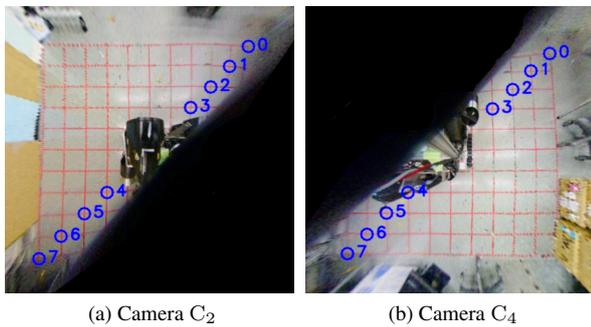


Fig. 12 Using points to synthesize images at S_2^{2d}

4.2 実験結果

4.2.1 動的環境における俯瞰映像

動的環境における右上カメラ故障時の俯瞰映像生成を図 10(a), (b) および (c) に示す。図 10(a) は欠損視野の補完なしの俯瞰映像を、図 10(b) は提案手法による故障パターンに応じた俯瞰映像を、図 10(c) は従来手法¹⁰⁾による過去映像を用いて補完を行った俯瞰映像をそれぞれ示す。図 10(b) および (c) から確認できるように、提案手法ではカメラ故障時にも現在の映像のみを用いて俯瞰映像を生成するため、動く物体の存在を確認可能であるが、従来手法¹⁰⁾では過去映像を用いて補完を行っているため、図 10(c) の中で破線で示した動く物体の存在を確認することができない。

4.2.2 カメラ故障時の俯瞰映像

カメラ 3 台正常時 S_4^3 の俯瞰映像を図 11(a) に、対角線上のカメラ 2 台正常時 S_2^{2d} の俯瞰映像を図 11(b) に、カメラ 1 台正常時 S_1^1 の俯瞰映像を図 11(c) にそれぞれ示す。図 11(a) および (b) から確認できるように、カメラ 1 台故障時および対角線上のカメラ 2 台故障時には全方位の俯瞰映像が提示可能である。

図 11(c) から確認できるように、カメラ 1 台で広範囲の状況を把握可能な俯瞰映像を提示可能である。したがって、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り、耐故障性の面から見て極めて有効である。

4.2.3 俯瞰映像中の境界におけるテクスチャのずれの評価

部分俯瞰映像を統合する際に、カメラの故障パターンに応じた提案手法を用いる場合と、故障パターンに応じずに常にカメラ 4 台正常時 S_4^4 の同次変換行列 T を用いる場合を、俯瞰映像

Table 1 Evaluation of average pixel error pixel

Pattern	S_1^4	S_l^3	S_l^{2d}	S_l^{2n}
Proposed method	1.4	4.4	10.5	1.5
Using T at S_1^4	1.4	6.1	14.7	1.9

中の境界におけるテクスチャのずれを平均ピクセル誤差を用いて比較することで提案手法の有効性を示す。

3.2.3 項で述べたように、部分俯瞰映像を統合する際にはカメラの故障パターンに応じて、カメラが切り替わる境界付近の点を指定して統合を行う。ここでは、各境界付近で 4 点指定することで統合を行った。図 12(a) および (b) では、故障パターン S_2^{2d} を例として、統合する際に用いた点を示す。図 12(a) はカメラ C_2 より、図 12(b) はカメラ C_4 より得られた部分俯瞰映像である。図 12(a) および (b) において、統合する際に用いた点を青色の線で丸く囲って示し、数字で点同士の対応関係を示した。

カメラ 4 台正常時 S_4^4 、カメラ 3 台正常時 S_l^3 、対角線上のカメラ 2 台正常時 S_l^{2d} および隣接するカメラ 2 台正常時 S_l^{2n} において、統合に用いた点について統合後の統合に用いた点のずれを平均ピクセル誤差で評価した (表 1)。表 1 では、上段に提案手法による統合後の統合に用いた点のずれを、下段に S_1^4 で用いた同次変換行列による統合後の統合に用いた点のずれを平均ピクセル誤差で示した。表 1 ではそれぞれの故障パターンの平均を示しており、例えばカメラ 3 台正常時 S_l^3 には、 $l = 1, 2, 3, 4$ の 4 つの故障パターンの平均を示した。なお、評価に用いた俯瞰映像の大きさは $952\text{pixel} \times 952\text{pixel}$ である。

表 1 より、提案手法を用いることで、カメラ 3 台正常時 S_l^3 には統合後の統合に用いた点のずれが 6.1pixel から 4.4pixel へ、対角線上のカメラ 2 台正常時 S_l^{2d} には統合後の統合に用いた点のずれが 14.7pixel から 10.5pixel へ、隣接するカメラ 2 台正常時 S_l^{2n} には統合後の統合に用いた点のずれが 1.5pixel から 1.9pixel へ、それぞれ小さくなっていることが確認できる。したがって、提案手法が俯瞰映像中の境界におけるテクスチャのずれを小さくするのに有効であると考えられる。

5. 結論

本研究では、災害時に想定されるカメラ故障の際にもロボット遠隔操作が可能となる俯瞰映像提示システムを開発した。提案したカメラ配置設計手法により、平常時から俯瞰映像生成に

必要な領域を2台以上のカメラで撮影可能となった。さらに提案した映像統合手法により、俯瞰映像中でカメラが切り替わる境界におけるテクスチャのずれを最小化した映像を提示可能となった。

本システムにより、カメラ故障時にも残りの正常なカメラを最大限活用することで、視野欠損の少ない俯瞰映像生成が可能である。1台のカメラ故障時、または対角線上の2台のカメラ故障時において、全方位の俯瞰映像を提示することが可能である。したがって本手法は、俯瞰映像提示システムの耐故障性向上において極めて効果的である。

本研究ではカメラの台数を設計者が与えた。またカメラの配置設計の際に、カメラの解像度や俯瞰映像中の歪みを考慮していない。したがって、カメラの台数も提案可能な手法への拡張や、カメラの解像度や俯瞰映像中の歪みを考慮可能な配置設計手法への拡張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、およびJSPS特別研究員奨励費269039の助成を受けた。また、システムの構築にあたりAlessandro Moro博士の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) Fumitoshi Matsuno and Satoshi Tadokoro: Rescue robots and systems in Japan, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, (2004), 12.
- 2) 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.
- 3) Mohammed Waleed Kadous, Raymond Ka-Man 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 鈴木 政康, 知野見 聡: アラウンドビューモニタの開発(トビックス), 日本機械学会誌, 111, 1073, (2008), 332.
- 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, (2014), 1P1-M04.
- 8) 小松 廉, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 山下 淳, 浅間 一: 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, 第20回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, (2015), 497.
- 9) Norihiko Kawai, Kotaro Machikita, Tomokazu Sato and Naokazu Yokoya: Video completion for generating omnidirectional video without invisible areas, Information and Media Technologies, 6, 1, (2011), 158.
- 10) 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.
- 11) 坂尾 知彦, 近藤 伸亮, 南都 寛, 梅田 靖, 富山 哲男: 細胞型機械の研究(第1報)-細胞型自動倉庫の開発-, 精密工学会誌, 65, 5, (1999), 673.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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).