

俯瞰映像提示システムのカメラトラブル時における 視野確保のための複数魚眼カメラ配置設計

Arrangement of multiple fish-eye camera for wide visual field
in camera troubles with bird's-eye view system

○学 小松 廉 (東京大) 藤井 浩光 (東京大)
Alessandro Moro (ライテックス, 東京大)
正 山下 淳 (東京大) 正 浅間 一 (東京大)

Ren KOMATSU, the University of Tokyo, komatsu@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hiromitsu FUJII, the University of Tokyo
Alessandro MORO, Ritecs, the University of Tokyo
Atsushi YAMASHITA, the University of Tokyo
Hajime ASAMA, the University of Tokyo

This paper describes a new camera arrangement method for bird's-eye view systems of teleoperated robots in case of camera troubles. Our proposed system provides a bird's-eye view image that 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. In this paper, a method of camera arrangement that improves reliability of bird's-eye view systems is proposed, and the experimental results show the effectiveness of our proposed method.

Key Words: Camera arrangement, Reliability, Bird's-eye view, Teleoperation

1 序論

災害時に遠隔操縦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]。そこで、効率良くロボットを遠隔操縦するための研究が数多く行われている [3, 4, 5]。本研究では、操作性向上のための遠隔操作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。このシステムを用いることで、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り作業効率・精度がともに向上することが期待される [5]。

災害時には、土砂崩れ・落石によりシステムの一部が故障することが想定できるため、障害発生時にもシステムの機能維持が可能であること、すなわち信頼性が高いことが重要である。例えば俯瞰映像提示システムにおいては、複数カメラの1台が故障した場合に提示する俯瞰映像が欠損し、遠隔操縦に支障が生じる問題点がある。

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 [6]。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 [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捉えることが不可能である。

そこで筆者らは、カメラ1台故障時には隣接した正常なカメラ映像を用いて補完を行った [8]。しかし、文献 [8] の手法をより一般的なロボットに適用するためには、適切な設計手法によりカメラ配置を決定する必要がある。

本研究ではカメラ配置を定量的に評価することで、信頼性の高い俯瞰映像提示システムに最適なカメラ配置設計手

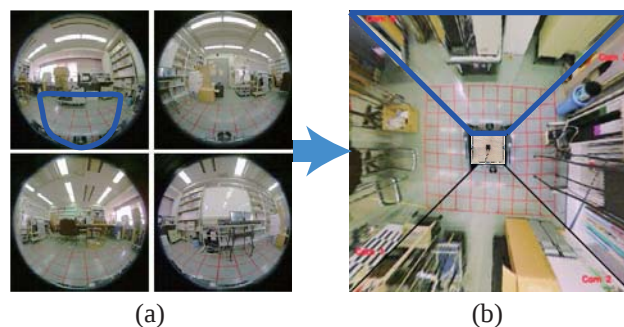


Fig.1 Changing from fish-eye images
to bird's-eye view image

法を提案する。具体的にはカメラの故障を考慮することで、故障時にも俯瞰映像中の提示領域を最大化するカメラ配置を提案する。文献 [8] で述べた補完手法に加えて、本研究で提案したカメラ配置を用いることによって、複数台のカメラが故障した際にも視野欠損の少ない俯瞰映像を提示可能であることを示す。

2 俯瞰映像生成に必要な領域

本研究では、文献 [5, 8] で提案されている手法に基づいて俯瞰映像を生成する。ロボットに取り付けられて魚眼カメラで撮影した映像 (図 1(a)) に対して画像変換を行い、統合することで俯瞰映像 (図 1(b)) を生成する。図 1(a) および (b) では、魚眼カメラの映像と俯瞰映像で対応関係にある領域を青で囲って示している。全方位の俯瞰映像を生成するためには、全方位の床面上の全ての領域を複数のカメラの少なくとも1台で撮影する必要がある。

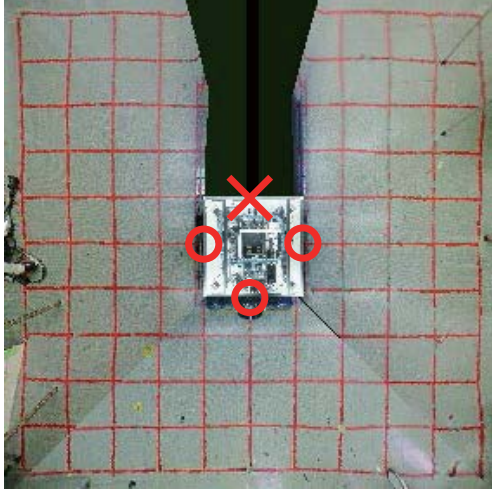


Fig.2 Blind spot in a bird's-eye view image

3 カメラの配置設計

第2章で述べたように、全方位の俯瞰映像を生成するためには、俯瞰映像生成に必要な床面上の全て領域を、少なくとも1台のカメラで撮影する必要がある。カメラが1台故障時に床面上に撮影不可能な領域が存在すると、俯瞰映像中に死角が生じる(図2)。例えば、立方体型ロボットの四方の側面にそれぞれ1台の魚眼カメラが取り付けられたシステムにおいて、1台のカメラ故障時に生成された俯瞰映像を図2に示す。ここで、丸印が正常なカメラを、バツ印が故障したカメラを示している。図2から確認できるように、俯瞰映像中の故障したカメラ側に黒い領域が存在し、死角が生じていることがわかる。本研究では、カメラ故障時であっても俯瞰映像生成に必要な領域をより広く撮影可能とする配置設計を行うことで、より死角が少ない俯瞰映像を提示する。

3.1 カメラ配置の問題設定

カメラ配置の問題設定において、以下の4つのパラメータは所与のものとし、例えば設計者が任意に与えるものとする。

1. カメラの特性・数やロボットの形状・大きさ
2. カメラが設置可能な箇所の候補点
3. カメラの設置向き候補
4. 俯瞰映像で提示する必要がある領域

問題設定は以下とする。提案手法により、カメラが n 台正常時、1台故障時、2台故障時、 $\dots$ 、 $n-1$ 台故障時において、俯瞰映像中の提示領域を最大化するカメラ配置を設計する。その際に、カメラの設置場所、向きともに設計者が与えた候補から選択される。

3.2 カメラ n 台正常時の俯瞰映像の提示率

俯瞰映像中の提示領域を最大化するカメラ配置を提案するために、あるカメラ配置におけるカメラ n 台正常時の俯瞰映像の提示率を定義する。

カメラ N 台で構成されたシステムにおいて、カメラの集合を式(1)と、 N 台のカメラ配置を式(2)とそれぞれ表す。ここで、カメラ c_i の配置、すなわち位置と方向を π_{c_i}

と表し、 $|\mathcal{C}| = |\Pi| = N$ である。

$$\mathcal{C} = \{c_i \mid i \in \{1, 2, \dots, N\}\}, \quad (1)$$

$$\Pi = \{\pi_{c_i} \mid i \in \{1, 2, \dots, N\}\}. \quad (2)$$

カメラ n 台($n \leq N$)が正常に稼働している時、正常なカメラの集合を式(3)と、故障しているカメラの集合を式(4)とそれぞれ表す。ここで、 $|^n\mathcal{C}| = n$ 、 $|\bar{n}\mathcal{C}| = N - n$ である。

$$^n\mathcal{C} = \{c_j \mid c_j \text{は正常}, j \in \{1, 2, \dots, N\}\}, \quad (3)$$

$$\bar{n}\mathcal{C} = \{c_k \mid c_k \text{は故障}, k \in \{1, 2, \dots, N\}\}. \quad (4)$$

カメラ N 台中 n 台が正常である状態は ${}_NC_n$ 通り存在し、状態の集合を式(5)と、各状態を式(6)とそれぞれ表す。

$$^n\mathcal{S} = \{\{^nC_l, \bar{n}C_l\} \mid l \in \{1, 2, \dots, {}_NC_n\}\}, \quad (5)$$

$$^nS_l \in ^n\mathcal{S} \quad (l \in \{1, 2, \dots, {}_NC_n\}), \quad (6)$$

例えば、3台中2台が正常である状態の集合は、

$$\begin{aligned} ^n\mathcal{S} &= \{\{^2C_1, \bar{2}C_1\}, \{^2C_2, \bar{2}C_2\}, \{^2C_3, \bar{2}C_3\}\}, \\ &= \{\{\{c_1, c_2\}, \{c_3\}\}, \{\{c_2, c_3\}, \{c_1\}\}, \\ &\quad \{\{c_3, c_1\}, \{c_2\}\}\}, \end{aligned} \quad (7)$$

と表すことができる。

あるカメラ配置 Π において、状態 nS_l で提示可能な俯瞰映像の面積を $A(\Pi, ^nS_l)$ と、全方位俯瞰映像の面積を A_{all} とそれぞれ表す。あるカメラ配置 Π における n 台のカメラ正常時の俯瞰映像の提示率 $^nV(\Pi)$ を式(8)で表す。

$$^nV(\Pi) = \min_{^nS_l \in ^n\mathcal{S}} \frac{A(\Pi, ^nS_l)}{A_{all}}. \quad (8)$$

3.3 カメラ n 台正常である確率

俯瞰映像中の提示領域を最大化するカメラ配置を提案するために、カメラ N 台で構成されたシステムにおいて、カメラ n 台が正常である確率を求める。

まずは、時刻0で稼働を始めた1台のカメラが時刻 t で正常である確率として信頼度 $R(t)$ を定義する。ここで、 $(0 \leq R(t) \leq 1)$ である。信頼度 $R(t)$ は、同じ種類のカメラを複数用意し、各時刻において正常なカメラの台数を測定することで統計的に求めることができる。例えば $R(t_m) = 0.9$ の場合、時刻0に正常であったカメラが時刻 t_m に1割の確率で故障していることを示す。信頼度 $R(t)$ は、故障率 $\lambda(t)$ を用いて式(9)と表すことができる。

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right), \quad (9)$$

ここで故障率 $\lambda(t)$ は、時刻 t まで動作してきた機器が引き続き単位時間内に故障を起こす確率を示す。

カメラ1台の信頼度 $R(t)$ を求めることで、同じ種類のカメラ N 台を組み合わせたシステムの信頼度が定義できる。時刻0で稼働を始めたシステムにおいて、時刻 t でカメラ N 台中 n 台が正常である確率、信頼度 ${}^NR^n(t)$ を式(10)と表す。

$${}^NR^n(t) = {}_NC_n [R(t)]^n [1 - R(t)]^{N-n}. \quad (10)$$

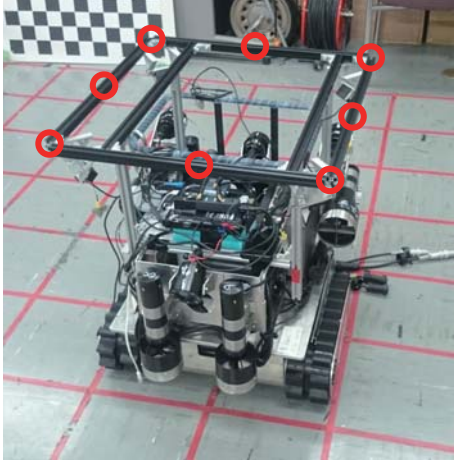


Fig.3 Mobile Robot [9]

3.4 カメラ配置設計の定式化

3.2 節, 3.3 節で定義した, カメラ配置 Π のシステムにおいて, n 台正常である時の俯瞰映像の提示率と確率を用いて評価関数の定式化を行う. 時刻 t でカメラ配置 Π のシステムが提示可能な俯瞰映像の提示率の期待値を式 (11) と表す.

$${}^{\Pi}E(t) = \sum_{n=1}^{|\Pi|} {}^{\Pi}R^n(t)^n V(\Pi), \quad (11)$$

したがって, システムを長時間使用して, カメラが 1 台, 2 台, $\dots$, N 台と故障した際に, 提示可能な俯瞰映像の提示率の期待値を最大化する最適なカメラ配置 Π^* は式 (12) で求めることができる.

$$\Pi^* = \arg \max_{\Pi} \int_0^{\infty} {}^{\Pi}E(t) dt. \quad (12)$$

3.5 カメラ配置設計手法

本研究では, カメラの設置場所, 向きともに設計者が与えた候補から選択することで, 有限の範囲から準最適解を求める. ロボットに設置するカメラの数が N , カメラの設置場所の候補数を N_{pt} , カメラの向きの候補数を N_{dir} とすると, $N_{pt}N_{dir}$ C_N 通りの中から最適なカメラ配置 Π^* を求める必要がある. 本研究では, 以上の候補に対して全探索で評価を行い, 候補中で最適なカメラ配置 Π^* を求める.

4 実験

4.1 実験システム

使用したロボットを図 3 に示す. このロボットは文献 [9] 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. すなわち, 災害対應用ロボットとして, このロボットの形状と大きさが十分想定され得るため, このロボットを用いて, カメラの配置設計を行うことは有用である.

4.1.1 カメラの配置決定

提案手法に基づいてカメラの配置を決定する. まずは 4 つのパラメータを設定する. 俯瞰映像提示システムを構成する要素に基づいて, カメラの画角・数・故障率, ロボットの形状・大きさを設定する. 図 3 のロボットの形状は, 1 辺 600mm の立方体と近似する. 使用するカメラは, 魚眼カメラで画角は 180 度とする. カメラの台数は, 俯瞰映像提示システムを扱った文献 [5, 7, 8] に基づいて 4 台とする. カメラの故障率 $\lambda(t) = 1$ とする.

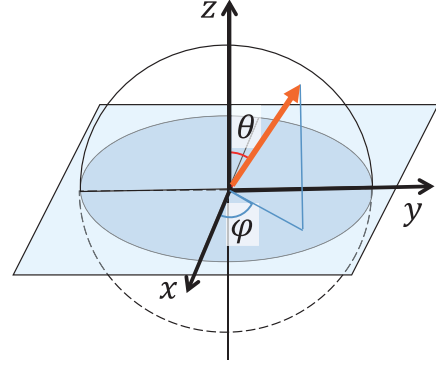


Fig.4 Polar coordinate

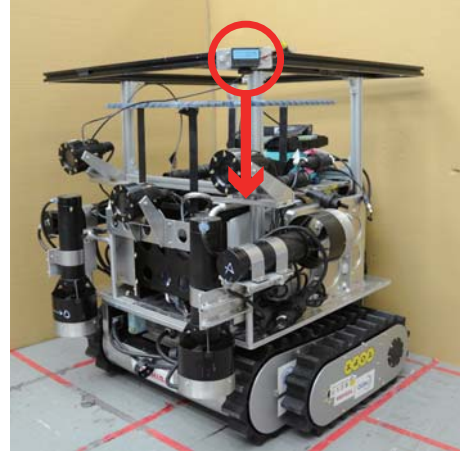


Fig.5 Camera installation

図 3 に示すロボットの表面で, カメラの設置可能な箇所はロボット上部に設置したフレームのみである. そこで, カメラの設置場所の候補点を図 3 に赤で囲って示す. 候補点は上面の角部の 4 点に加えて, 上面の各辺の中点の計 8 点を選択した. 図 4 で示す極座標系において, カメラの向きを (θ, φ) で表すと, カメラの設置向きの候補の集合 $\mathcal{P}$ は以下のように表される.

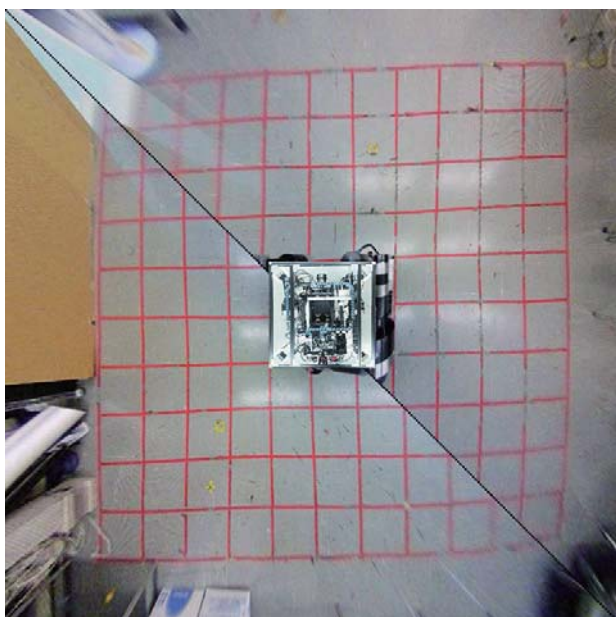
$$\mathcal{P} = \{(\theta, \varphi) \mid \Theta \times \Phi\}, \quad (13)$$

$$\Theta = \left\{ \theta \mid \theta = \pi \frac{p}{N_{\theta}}, p \in \{1, 2, \dots, N_{\theta}\} \right\}, \quad (14)$$

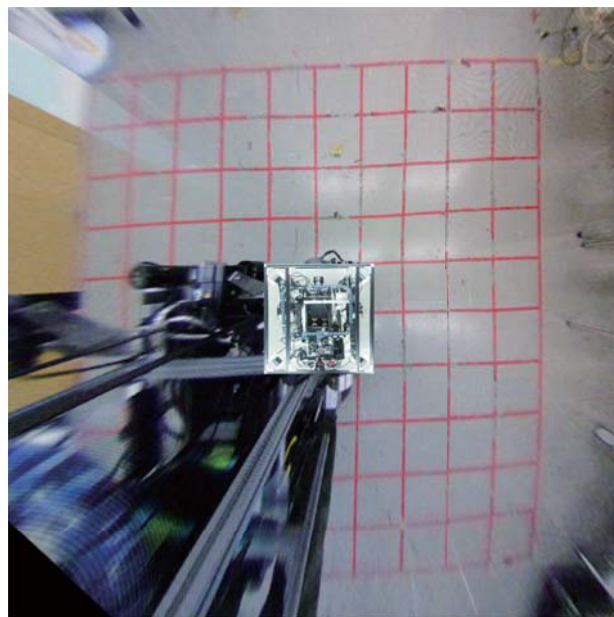
$$\Phi = \left\{ \varphi \mid \varphi = 2\pi \frac{q}{N_{\varphi}}, q \in \{0, 1, \dots, N_{\varphi} - 1\} \right\}, \quad (15)$$

ここで, $N_{\theta} = 4$, $N_{\varphi} = 8$ とする. したがって, $\theta = \pi$ における重複を除いた 25 通りをカメラの設置向きの候補とした. 図 4 で示す極座標系では, x 軸, y 軸, z 軸とロボットの各辺が平行となるように設定されており, z 軸は鉛直上向きを示す. 俯瞰映像で提示する必要がある領域はロボットの中心として, 床面上の 1 辺 6000mm の正方形の領域を選択した. 上記の条件で, ${}_{8,25}C_4 = 64,684,950$ 通りのカメラ配置に対して全探索で評価を行い, 候補中で最適なカメラ配置 Π^* を求める.

求めたカメラ配置 Π^* では, 4 台のカメラをロボット上面の 4 点の角部に鉛直下向きにそれぞれ取り付ける. 1 台のカメラの取り付けを図 5 に示す. 図 5 では, カメラの



(a) Bottom right and upper left camera troubles



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

Fig.6 Bird's-eye view with camera troubles

設置位置を赤で囲って示し、カメラの設置向きを赤の矢印で示している。

4.1.2 カメラ故障時の俯瞰映像

提案したカメラ配置において、カメラ故障時に生成した俯瞰映像を示す。右下および左上カメラ故障時の俯瞰映像を図 6(a) に、右下、左下および左上カメラ故障時の俯瞰映像を図 6(b) にそれぞれ示している。図 6(a) から確認できるように、対角線上に位置する 2 台のカメラ故障時において、全方位俯瞰映像を生成可能である。また、図 6(b) から確認できるように、俯瞰映像中の左下の領域にロボット自身により遮蔽された死角が生じているが、少なくとも 1 台のカメラが正常に機能することで、極めて広い領域を把握可能な俯瞰映像が提示可能であることがわかる。

5 結論

本研究ではカメラの故障を考慮しカメラ配置を定量的に評価することで、故障時にも俯瞰映像中の提示領域を最大化するカメラ配置を提案した。実際のロボットを用いて実験し、複数台のカメラが壊れた際にも視野欠損の少ない俯瞰映像を提示可能であることを示した。したがって、文献 [8] で述べた補完手法に加えて、提案手法によりカメラ配置を設計することで、俯瞰映像提示システムの信頼性を向上させることができる。

本研究では、解像度などを考慮せずに理想的なカメラを用いた配置設計手法を提案した。したがって、より現実に近いカメラの配置設計に適用可能な手法への拡張が今後の課題である。

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。

References

- [1] Fumitoshi Matsuno and Satoshi Tadokoro, "Rescue robots and systems in Japan", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 12–20, 2004.
- [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*, vol. 32, no. 1, pp. 37–41, 2014.
- [3] M. 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*, pp. 250–257, 2006.
- [4] Curtis W. Nielsen, Michael A. Goodrich and Robert W. Ricks, "Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 927–941, 2007.
- [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*, vol. 81, no. 823, pp. 1–13, 2015.
- [6] 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.
- [7] 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*, pp. 753–758, 2013.
- [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, pp. 497–504, 2015.
- [9] 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.