

複数台のカメラとレーザ測域センサによる 人工物の幾何情報を考慮した任意視点映像生成

○小松 廉, 藤井 浩光, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一 (東京大学)

Free Viewpoint Image Generation in Man-made Environments Using Body Mounted Cameras and a Laser Rangefinder

○Ren KOMATSU, Hiromitsu FUJII, Yusuke TAMURA,
Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : In robot teleoperation, operators greatly benefit from free viewpoint images of the environment around the robots. In this paper, a novel free view point image generation method is proposed. We use multiple cameras and a laser rangefinder mounted on a robot, and generate images with the assumption that walls are perpendicular to the floor surface. Experimental results show that our system can generate free viewpoint images in real time.

1. 序論

効率良いロボット遠隔操作のためには、オペレータがロボットの周囲環境を正確に把握することが重要であり、オペレータへの映像提示の研究が盛んに行われている [1–6]. オペレータへの映像提示技術の 1 つとして俯瞰映像提示システムがある。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。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。

本研究では、屋内探査ロボットのための映像提示技術を取り上げる。屋内探査においてはロボット移動時の操作性向上に加えて、壁面に設置された標札や案内図などの掲示物をオペレータに提示することが重要となる。例えば、案内図のオペレータへの提示は、ロボット自身の位置特定および全体像の把握のために効果的である。従来の俯瞰映像提示システムでは、ロボットが接地している床面に魚眼カメラ映像を投影することで俯瞰映像を生成している。したがってオペレータは床面の情報は得ることができるが、壁面の高い位置に設置された掲示物を把握することが困難である。

Iwataki らは、床面に加えてロボットを中心とした半球上のドームに魚眼カメラ映像を投影することで、高い位置にある物体も可視化している [6]. このアプローチにおいて、ロボットの近傍では高い位置にある物体が歪んで表示される。屋内調査においてロボットと壁面が接近する際に

は、壁面に設置された掲示物が歪んで表示されるという課題がある。

Ferland らはレーザ測域センサとカメラを 1 台ずつ用いて、床面および壁面の可視化を行った [1]. しかし、可視化の範囲がロボット正面の限られた領域のみであるため、屋内調査において掲示物を探す際には、ロボットの車体を様々な方向へ向ける必要がある。周囲環境の把握が不十分な状態でロボットを移動させる際には、障害物への衝突等の危険が伴うため、ロボットを移動させることなく周囲環境を視認できることが望ましい。

本研究では複数台の魚眼カメラと 1 台のレーザ測域センサを用いた、屋内探査ロボット遠隔操作のための任意視点映像生成手法を提案する。多くの屋内環境において、壁は床面に対して垂直となっている。この特徴を活用し、レーザ測域センサで計測した壁面までの距離を用いて、仮想世界に周囲環境の 3 次元メッシュモデルを構築する。そして魚眼カメラ映像を投影することで、構築した 3 次元メッシュモデルにテクスチャを与える。また、実機実験においてリアルタイムに映像提示が可能であることを示す。

2. 任意視点映像生成の流れ

周囲環境の把握が不十分な状態では、ロボットを移動させる際に障害物への衝突等の危険が伴う。したがって、ロボットを移動させることなく周囲環境の視認が可能な任意視点の映像生成が重要である。

本研究では、映像生成のための仮想的な 3 次元空間 (仮想世界) に、テクスチャを持つ 3 次元メッシュモデルとして周囲環境を構築する (図 1). 図 1 では、仮想世界にありテクスチャを持った 3 次元メッシュモデルを示しており、

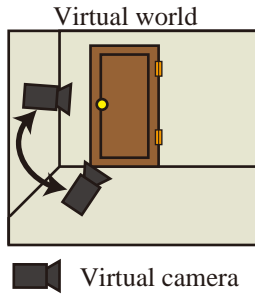


Fig. 1: Concept of free viewpoint image generation

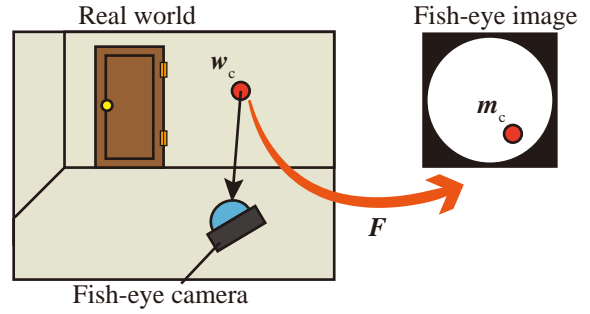


Fig. 2: Projection of a fish-eye camera

仮想世界の任意の位置に設置した仮想的なカメラの映像を射影変換により生成することで、任意視点の映像を得る。

任意視点映像生成の流れを以下に示す。

- 1) 実世界における周囲環境のテクスチャの取得
- 2) 仮想世界における周囲環境の3次元モデルの構築
- 3) 3次元メッシュモデルへのテクスチャの付与

1) において、実世界における周囲環境のテクスチャを魚眼カメラで取得する。

多くの屋内環境において、壁は床面に対して垂直となっている。2) においてこの特徴を活用し、壁面が床面に対して垂直という仮定に基づいて仮想世界に周囲環境の3次元メッシュモデルを構築する。本研究では、周囲環境の3次元メッシュモデルとして壁面と床面のみを扱う。

3) において、仮想世界における周囲環境の3次元メッシュモデルへ魚眼カメラ映像を投影することでテクスチャを与える。

以上により、仮想世界上にテクスチャを持った3次元メッシュモデルを構築することができ、仮想的に設置したカメラから見た映像の生成が可能となる。

3. 魚眼カメラおよびレーザ測域センサのパラメータ推定

3次元メッシュモデルへ魚眼カメラ映像を投影するためには、魚眼カメラの内部パラメータおよび外部パラメータが必要である。また、壁面の3次元メッシュモデルを構築するためにはレーザ測域センサの外部パラメータが必要である。したがって任意視点映像生成のためには、あらかじめ以下の作業を行う必要がある。

- i) 魚眼カメラの内部パラメータ推定
- ii) 魚眼カメラの外部パラメータ推定
- iii) レーザ測域センサの外部パラメータ推定

次節より詳細に述べる。

3.1 魚眼カメラの内部パラメータ推定

魚眼カメラ座標系における3次元位置の同次座標 $\tilde{w}_c = [x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T$ と魚眼カメラ映像上の同次座標 $\tilde{m}_c = [u_c \ v_c \ 1]^T$ の関係は、以下のように表される (図2)。

$$F(\tilde{w}_c) \simeq \tilde{m}_c, \quad (1)$$

ここで、 \simeq は同値関係を表し、 $F(\tilde{w})$ は魚眼カメラの内部パラメータを含む関数である。本研究では、Scaramuzzaらの手法 [7, 8] を用いて、魚眼カメラの内部パラメータを求める。

3.2 魚眼カメラの外部パラメータ推定

ロボットに固定されたロボット座標系における3次元位置の同次座標 $\tilde{w}_r = [x_r \ y_r \ z_r \ 1]^T$ と魚眼カメラ座標系における3次元位置の同次座標 $\tilde{w}_c = [x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T$ の関係は、以下のように表される。

$$\tilde{w}_c \simeq \mathbf{K}_c \tilde{w}_r, \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{K}_c \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ は魚眼カメラの外部パラメータである。本研究では、文献 [4] の手法に基づき床面領域上に設置した既知物体の形状を用いて、複数台の魚眼カメラの外部パラメータを求める。

3.3 レーザ測域センサの外部パラメータ推定

本研究では、計測平面と床面が平行になるようにレーザ測域センサを設置することで、推定すべきパラメータ数を減らす。残りの外部パラメータは、従来手法 [4] を用いて生成した俯瞰映像中の床面と壁面との境界と、レーザ測域センサの計測点群を比較することで推定を行う。

4. 任意視点映像生成手法

任意視点映像生成手法は大きく2つに分けることができる。

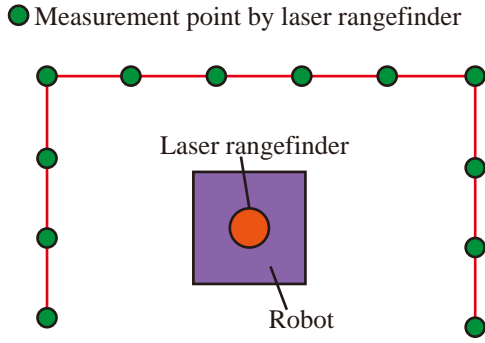


Fig. 3: Generation of wall mesh model (top view)

- 周囲環境の3次元メッシュモデルの構築
- 魚眼カメラ映像の3次元メッシュモデルへの投影

次節より詳細に述べる。

4.1 周囲環境の3次元メッシュモデルの構築

本研究では、周囲環境の3次元メッシュモデルとして壁面と床面のみを扱う。床面については、ロボットは常に接地しているという仮定に基づき、ロボットの接地面を床面として3次元メッシュモデルを構築する。

壁面については、まず測域センサの計測点群を走査方向に順に繋ぐことで、レーザ測域センサを設置した高さにおける壁の形状を得る(図3)。ここで、壁面が床面に対して垂直という仮定を用いると壁面の3次元メッシュモデルを構築することが可能となる。壁面の高さはロボットの周囲環境に応じて与えることとする。

4.2 魚眼カメラ映像の3次元メッシュモデルへの投影

魚眼カメラの内部パラメータと外部パラメータに基づき、魚眼カメラ映像を周囲環境の3次元メッシュモデルへと投影する。はじめに、1台の魚眼カメラ c_i における3次元メッシュモデルの3次元位置 w_r への投影を述べる。3次元メッシュモデルの3次元位置 w_r におけるテクスチャ情報 $I_{c_i}(w_r)$ は、 w_r と対応する魚眼カメラ映像上の座標 m_{c_i} の画素値から得ることができる。 w_r と m_{c_i} の関係は、式(1)および式(2)を用いて以下のように表される。

$$F(\mathbf{K}_{c_i} \tilde{w}_r) \simeq m_{c_i}. \quad (3)$$

複数台の魚眼カメラ映像の投影において、同じ3次元位置に対して複数台の魚眼カメラからテクスチャが得られる場合がある。魚眼カメラは広角側の歪み補正が困難であるため、本研究では、魚眼カメラの中心部から得られる画素値を優先的に用いることとする。また、テクスチャを得る

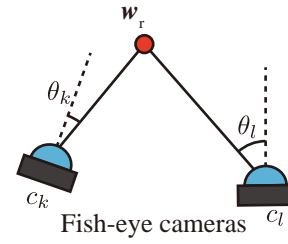


Fig. 4: Angle from optical axis

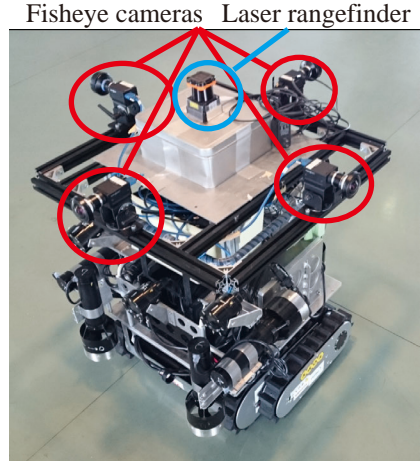


Fig. 5: Camera arrangement

ために使用する魚眼カメラが切り替わる領域においては、魚眼カメラ2台分の画素値を合成してテクスチャとする。具体的には魚眼カメラ c_i への入射角 θ_i に基づき、3次元メッシュモデルのテクスチャ情報を決定する(図4)。入射角 θ が最も小さくなる魚眼カメラを c_k 、2番目に小さくなる魚眼カメラを c_l とすると、テクスチャ情報 $I(w_r)$ は以下のように表される。

$$I(w_r) = \alpha I_{c_k}(w_r) + (1 - \alpha) I_{c_l}(w_r), \quad (4)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (\theta_l - \theta_k \geq \theta_{th}) \\ \left(1 + \sin\left(\frac{\theta_l - \theta_k}{2\theta_{th}}\pi\right)\right)/2 & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (5)$$

ここで θ_{th} は、魚眼カメラ2台分のテクスチャをブレンドする範囲を決めるパラメータである。

5. 任意視点映像提示実験

5.1 実験環境

4台の魚眼カメラとレーザ測域センサを移動ロボットに設置した(図5)。魚眼カメラは、全周囲の床面と壁面を撮影可能となるように設置した。

本研究では、カメラはPoint Grey Research社のGrasshopper3 GS3-U3-41C6C-Cを、魚眼レンズはFujinon社の

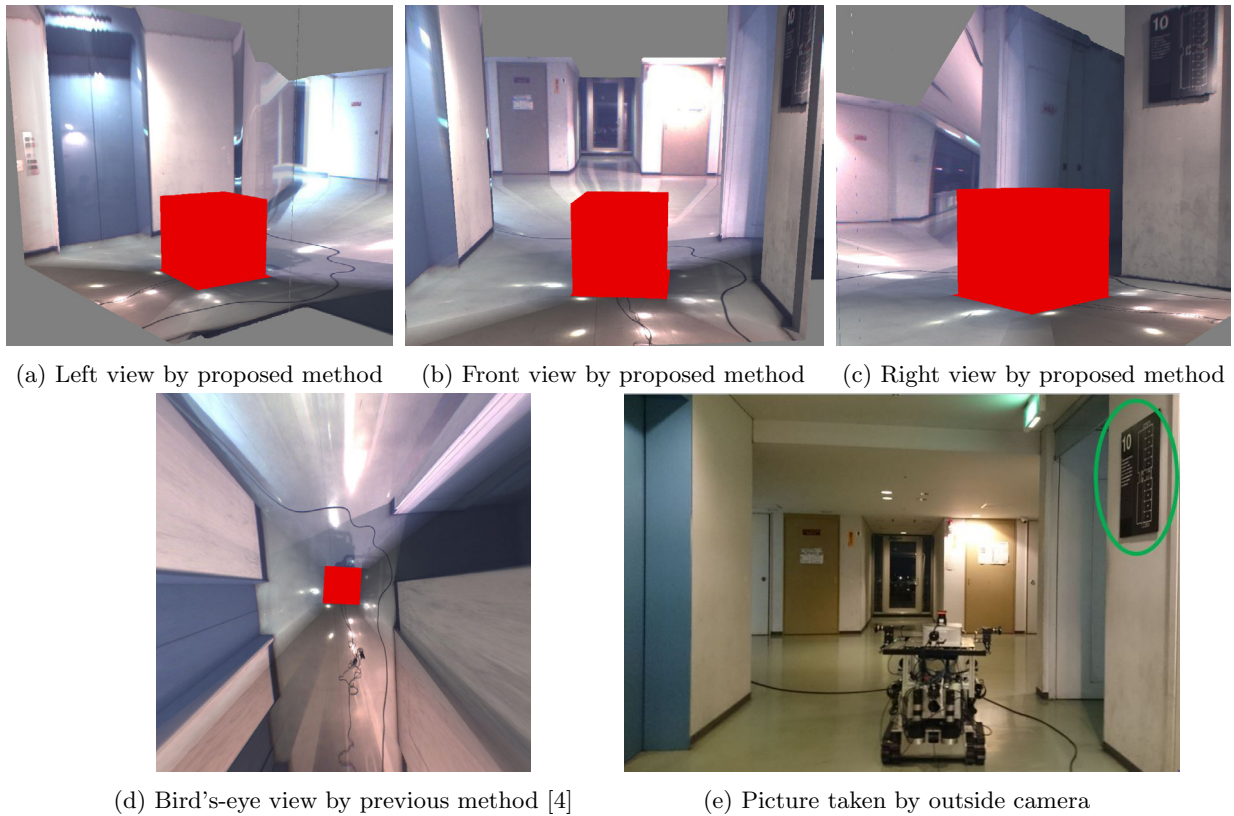


Fig. 6: Result of free viewpoint image generation

FE185C086HA-1 をそれぞれ用いた。また、レーザ測域センサは北陽電機株式会社の UTM-30LX を用いた。

本研究では、リアルタイムに映像生成を可能とするために、シェーダ言語 (GLSL) を用いて魚眼カメラ映像の 3 次元メッシュモデルへの投影を行った。

仮想世界の壁面の高さは、実験環境に応じて 2.6 m とした。

5.2 実験結果

ロボットの左側、正面、右側へと視点を変えた提案手法による任意視点映像を図 6(a)、図 6(b) および図 6(c) にそれぞれ示す。従来手法 [4] による俯瞰映像を図 6(d) に示す。本手法においては、床面のみの 3 次元メッシュモデルに魚眼カメラ映像を投影することで、図 6(d) に示す上から擬似的な眺めたような俯瞰映像の生成が可能である。また、移動ロボットは赤色で示している。環境の外部に設置したカメラで撮影した写真を図 6(e) に示す。

図 6(a)、図 6(b) および図 6(c) で示すように、提案手法を用いてロボットを移動させることなく任意視点映像生成が可能であることがわかる。また、図 6(e) 中に緑色の丸で囲った案内図が、図 6(d) で示す従来手法 [4] による俯瞰映像では表示されていないが、図 6(c) で示す任意視点映像では歪みなく表示されていることが確認できる。

また、提案手法において任意視点映像を 20 fps のリアルタイムで提示可能であることが確認できた。

6. 結論

本研究では、屋内探査ロボット遠隔操作のための任意視点映像生成手法を提案した。屋内環境の特徴を活用することで、複数台の魚眼カメラと 1 台のレーザ測域センサを用いて全方位の任意視点映像生成を可能にした。実験では、リアルタイムに生成した任意視点映像を用いて壁に貼付された案内図を確認できることを示した。

今後の展望として、魚眼カメラ映像中の床面と壁面との境界を直線検出等で取得することで、レーザ測域センサを用いずに複数台の魚眼カメラのみで全方位の任意視点映像生成を可能にすることが挙げられる。

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] F. Ferland, F. Pomerleau, C. Le Dinh, and F. Michaud, “Egocentric and Exocentric Teleoperation Interface using Real-time, 3D Video Projection”, *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 37–44, 2009.
- [2] C. W. Nielsen, M. A. Goodrich, and R. W. Ricks, “Ecological Interfaces for Improving Mobile Robot Teleoperation”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 927–941, 2007.
- [3] B. Keyes, R. Casey, H. Yanco, B. Maxwell, and Y. Georgiev, “Camera Placement and Multi-Camera Fusion for Remote Robot Operation”, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 22–24, 2006.
- [4] 小松 廉, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一, “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”, *精密工学会誌*, vol. 81, no. 12, pp. 1206–1212, 2015.
- [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] S. Iwataki, H. Fujii, A. Moro, A. Yamashita, H. Asama, and H. Yoshinada, “Visualization of the Surrounding Environment and Operational Part in a 3DCG Model for the Teleoperation of Construction Machines”, *Proceedings of the 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 81–87, 2015.
- [7] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, “A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion”, *Proceedings of IEEE International Conference of Computer Vision Systems*, pp. 45–52, 2006.
- [8] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, “A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras”, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5695–5701, 2006.