

複数の魚眼カメラを用いた自由視点画像の合成に関する基礎検討 Composition of Free-viewpoint Images using Multiple Fish-eye Cameras

滝川 百亜[†] 近藤 真史[†] 田所 勇生^{††} 鬼頭 優^{††}
佐藤 洋一郎^{††} 河本 崇幸^{†††} 石原 洋行^{†††}

Moa TAKIGAWA[†] Masafumi KONDO[†] Yusei TADOKORO^{††} Yutaka KITO^{††}

Yoichiro SATO^{††} Takayuki KOMOTO^{†††} Hiroyuki ISHIHARA^{†††}

[†] 川崎医療福祉大学 医療技術学部 ^{††} 岡山県立大学 情報工学部 ^{†††} 株式会社システムズナカシマ

1 まえがき

多くの製造用機械が稼働する工場では、場内の作業員の安全確保が求められる。そのため、この種の工場に配置されている監視カメラは、単に防犯上の問題だけでなく、作業員の安全性を確認する意図を持っている [1]。さらに近年では、場内カメラで作業員の動線を解析することで、より安全かつ効率的な人員配置の検討も進められているが、複数のカメラ間を行き交う人物の特定・追跡に係る処理の複雑化 [2]、カメラ配置に依存する死角の不可避などの課題が残されている [3]。

上述の問題に対して筆者らは、天井に格子配置された複数の組み込みカメラを用いてフロア全体の俯瞰画像を高速に合成することにより、人物の特定・追跡に有効なシステムが開発している [4]。しかし、このシステムではカメラが直下のみを撮影しているため、作業員の顔など人物特定に必要な情報を得ることが困難であり、また作業員自身で生じる垂直方向の死角も回避できない。そこで筆者らは、カメラのレンズを魚眼に置き換えることにより、俯瞰画像上における任意の位置・角度における画像、いわゆる自由視点画像を併せて生成・表示可能なシステムの検討を進めているが、あくまでも任意のカメラ位置から見た自由視点画像（以下、カメラ視点画像という）の生成に留まっている [5]。

そこで本研究では、任意の位置・角度に基づいた視点と魚眼画像上の位置関係を定式化し、カメラ位置に限定されない自由視点画像の生成・合成手法を提案する。

2 自由視点型俯瞰画像合成システム

2.1 システム構成

現在開発中の自由視点型俯瞰画像合成システム [5] は、監視フロアの撮像を担うネットワークカメラをクライアント、各種画像の合成を担う汎用 PC をサーバとするクライアントサーバモデルとして構成され、その構成と動作手順を図 1 に示す。クライアントには、魚眼拡張レンズ (VR220) を搭載した Raspberry Pi3 を使用し、撮像した魚眼画像から任意の視点方向に対応する画像（以下、単に視点画像という）を抽出した後、ルータを介した無線通信によりサーバへ画像を転送する。サーバは、有線通信によりルータとの帯域を十分に確保した上で、各クライアントからの視点画像をマルチスレッド処理で非同期的に受け取り、それらを基

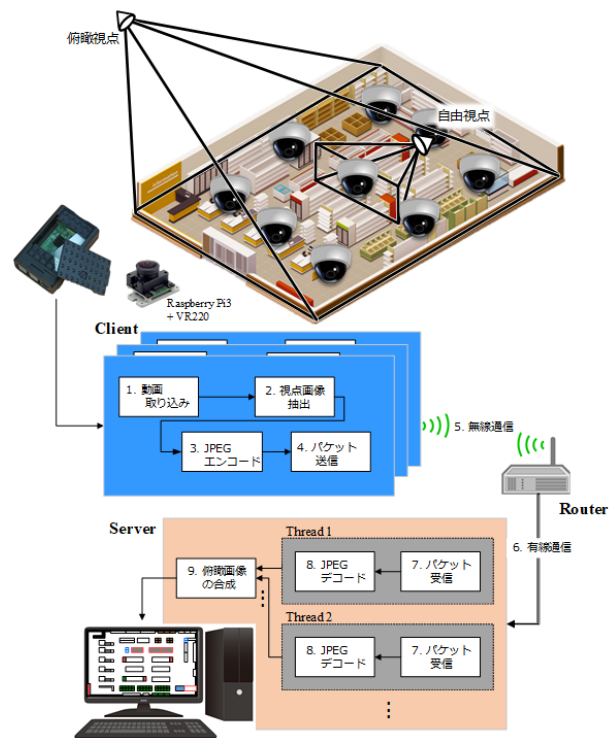


図 1: 自由視点型俯瞰画像合成システム

に俯瞰画像およびカメラ視点画像を生成・表示する。システム全体を通して、汎用的な画像処理には画像処理ライブラリ OpenCV を用いた実装がなされているが、特に俯瞰画像の合成にあたっては、GPU を用いた汎用演算基盤 CUDA を用いて OpenCV のパノラマ合成関数を書き下し、合成に係る処理を全て GPU で処理することにより高速化を図っている。

2.2 視点画像の生成

魚眼画像から視点画像を抽出するには、画像処理における幾何学変換と同様に逆変換の手続き、すなわち変換後画像（視点画像）から変換前画像（魚眼画像）上の座標を算出した上で、その近傍画素から変換後画像の画素値を生成する（一般的に内挿処理という）手順を経る。以下、2.1 で述べた魚眼レンズ VR220 から得られる魚眼画像を前提として、視点画像の生成手法 [6] を概説する。

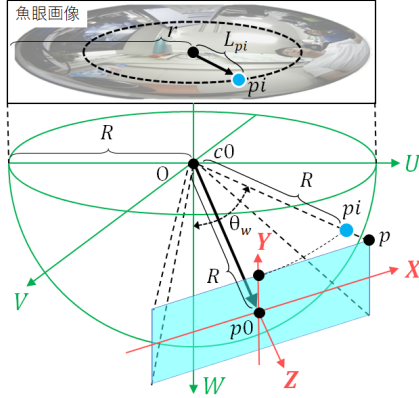


図 2: 魚眼画像と視野モデル

まず、魚眼レンズの視野を図2のように半径 R の半球でモデル化し、カメラは U - V 平面で天井に接するものとする。図中の薄青色の矩形は視点画像に対応する領域であり、以降視野フレームという。視点を表す視線ベクトルは視野フレームの中心 p_0 を通る、かつ Z 軸と一致するものとし、視野フレームは p_0 において半球と接する。したがって、視点 p_0 は X 軸方向の回転角 θ_{zx} と Y 軸方向の俯角 θ_{zy} で定められる。

ここで、視点を鉛直下向きに向けた直下フレームについて考える。このフレーム上の任意の位置(便宜上、図2中ではフレームの対角位置)に点 p を置き、その X および Y 成分をそれぞれ x_p および y_p とすると、 U - V - W 座標系と X - Y - Z 座標系は一致するため、 $p=(x_p, y_p, R)$ となる。したがって、直下フレームごと p を任意の位置に回転した $p'=(u, v, w)$ は、 p を U 軸周りに θ_{zy} 、 W 軸周りに θ_{zx} の順で回転した次式として得られる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{zx} & -\sin \theta_{zx} & 0 \\ \sin \theta_{zx} & \cos \theta_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{zy} & -\sin \theta_{zy} \\ 0 & \sin \theta_{zy} & \cos \theta_{zy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ R \end{pmatrix}$$

次に、点 p に対応する魚眼画像上の点 $p_i=(u_p, v_p)$ を求める。VR220 は画像中心から p_i までの距離 L_{pi} が、レンズの光軸 W と p のなす角 θ_w に比例する、いわゆる等距離射影方式を採用している。ここで、比例係数を ξ とすると、これは rad 当たりの画素数を表し、レンズの最大画角 θ_m 、魚眼画像の半径解像度 r を用いた定数 $\xi=2r/\theta_m$ となる。また、図2より θ_w は u, v に依存することなく $\theta_w = \cos^{-1}(w/R)$ と与えられたため、 $L_{pi}=\xi \cdot \theta_w$ として算出可能となる。したがって、画像中心に対する p_i の方向は (u, v) で決まり、 U - V 平面上における中心 c_0 から点 p までの距離を $L_{uv}=\sqrt{u^2+v^2}$ とすると、 p_i の魚眼画像上における座標 (u_p, v_p) は、

$$\begin{pmatrix} u_p \\ v_p \end{pmatrix} = \frac{L_{pi}}{L_{uv}} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

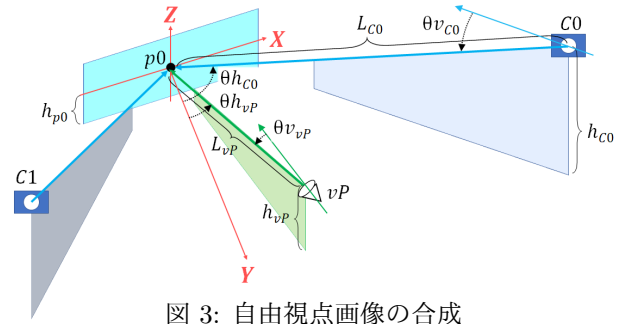


図 3: 自由視点画像の合成

として求まる。以上に基づいて視野フレーム上の座標を順に走査しつつ、適宜内挿処理を施すことにより任意の視点画像を生成することができる。

3 自由視点画像の生成手法

自由視点画像は、スポーツの分野では決定的瞬間のハイライト映像などで実用化されつつある [7]。これらの自由視点映像技術は、監視対象の周囲を多数のカメラで撮像し、それらを連続的に切り替えることで実現している。特にこの種のシステムでは、カメラの視差の影響を極力小さくするため、監視対象とカメラは十分に離れていることが前提となる。しかし、本研究のように俯瞰画像の合成を目的としてカメラを格子配置し、かつ監視対象とカメラとの距離が担保し難い状況下においては、監視対象自体が十分に映り込んでいない等、生成可能な自由視点画像に構造的な限界がある。

そこで本研究では、俯瞰画像と同様に、複数の自由視点画像を合成することで上述の問題の解決を図る。以降、これにより生成される画像を自由視点型俯瞰画像といい、その概要を図3に示す(各視点の高さを Z 軸として、座標系が図2のそれと異なる点に注意する)。カメラが存在しない任意の視点 vP から p_0 を見る場合、複数のカメラ(ここでは C_0, C_1)から p_0 に対する自由視点画像を生成した上で、それらを共通の視線フレーム上の画像と見立てて合成を行う。以下本稿では、 C_0 を例に自由視点画像の生成手法について述べる。

まず、任意の視点 vP およびカメラ視点 (C_0) について、点 p_0 に対する高さ h 、視野フレーム中心 p_0 までの長さ L 、回転角 θh および俯角 θv をそれぞれ定義し、各点の変数名を添え字として区別する。なお、 h_{p0} は視野フレームの高さである。次に、 vP から見ている視野フレームをカメラ視点のそれに合わせるため、視野フレーム上の任意の点 $p=(x_f, y_f)$ を X 軸周りに θ_{vvp} 、 Z 軸周りに θ_{hvp} の順で回転した上で、 p_0 の絶対座標 (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0}) 分だけオフセットを加えることで、移動後の p' に関する空間座標 (x, y, z) を求める。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{hvp} & -\sin \theta_{hvp} & 0 \\ \sin \theta_{hvp} & \cos \theta_{hvp} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{vvp} & -\sin \theta_{vvp} \\ 0 & \sin \theta_{vvp} & \cos \theta_{vvp} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_f \\ 0 \\ y_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{p0} \\ y_{p0} \\ z_{p0} \end{pmatrix}$$

ここで、 vP の絶対座標を (x_{vP}, y_{vP}, z_{vP}) とすると、図3における各点の位置関係より、上式の三角関数群はそれぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\cos \theta_{v_P} &= \frac{L_{v_P}}{\sqrt{(h_{v_P} - h_{p0})^2 + L_{v_P}^2}} \\ \sin \theta_{v_P} &= \frac{h_{v_P} - h_{p0}}{\sqrt{(h_{v_P} - h_{p0})^2 + L_{v_P}^2}} \\ \cos \theta_{h_P} &= \frac{y_{p0} - y_{v_P}}{L_{v_P}} \\ \sin \theta_{h_P} &= \frac{x_{v_P} - x_{p0}}{L_{v_P}}\end{aligned}$$

以上より，任意の視点 vP から見た視野フレーム上の点 p' の空間座標が決まる．続いて，点 p' をカメラ視点 $C0$ から見るため， $C0$ を原点 $(0, 0, 0)$ として考える．まず，改めて $C0$ から点 p' に対する変数を定義し，添え字 d を付して区別する．つまり， $C0$ から p' への回転角を θ_{hd} ，俯角を θ_{vd} ， X - Y 平面における距離を L_{xy} と定める．ここで， $L_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}$ であることから，直線 $C0$ - p' とレンズの光軸 Z とがなす角 θ_z は， L_{xy} と各点の高さより次式で表される（ただし， $\theta_z = (\pi/2) - \theta_{vd}$ である）．

$$\theta_z = \tan^{-1}(\frac{L_{xy}}{h_{C0} - z})$$

したがって、2.2 と同様にして、魚眼画像の中心から p' までの距離を L_d とすると、比例係数 ξ を用いて $L_d = \xi \cdot \theta_z$ として与えられ、結局 p' に対応する魚眼画像上の点 $p_d = (x_d, y_d)$ は、

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \frac{L_d}{L_{xy}} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

として求めることができる．ただし， $L_{xy} = 0$ の場合には， $L_d/L_{xy} = 1$ となる点に注意する．また，このときの視野フレーム上の任意の点 (x_f, y_f) が取り得る座標の範囲は，水平視野角および垂直視野角をそれぞれ θh_m および θv_m とすると以下の通りに定められる．

$$\begin{aligned} -(\tan(\frac{\theta h_m}{2}) \cdot x_{vP} - x_{p0}) &\leq x_f \leq \tan(\frac{\theta h_m}{2}) \cdot x_{vP} - x_{p0} \\ -(\tan(\frac{\theta v_m}{2}) \cdot y_{vP} - y_{p0}) &\leq y_f \leq \tan(\frac{\theta v_m}{2}) \cdot y_{vP} - y_{p0} \end{aligned}$$

4 実装と評価

以上に基づいた自由視点画像生成手法を文献 [5] のシステムに実装し、その評価を行った。実験環境は文献 [5] のそれと共通であり、そのレイアウトを図 4 に示す。ただし、クライアントのカメラには VR220 を用い、動画撮像時の最大解像度である $1920 \times 1080(16:9)$ を勘案し、クライアントで生成される視点画像の解像度は $640 \times 360(16:9)$ と定めた。魚眼画像と視点画像の解像度が既知となるため、視野フレームの水平および垂直視野角はそれぞれ 74° および 46° として一意に決

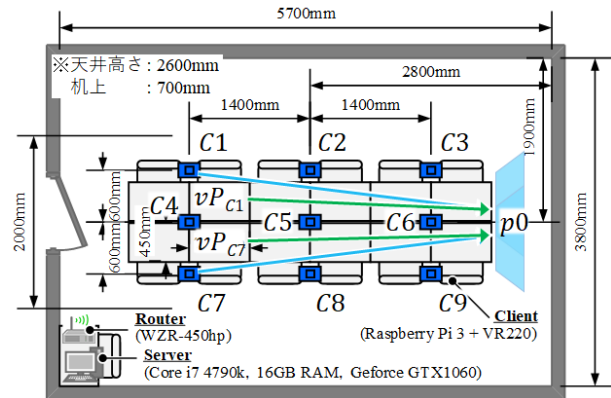


図 4: 実験環境 (川崎医療福祉大学 8015 演習室)

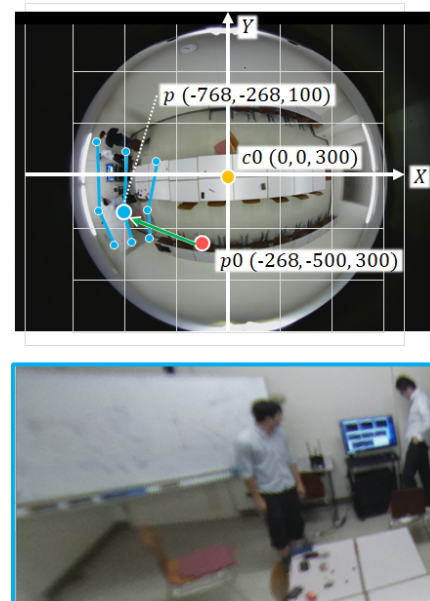


図 5: 自由視点画像の生成

まり, さらに視野フレームの幅と高さをそれぞれ f_w および f_h とすると,

$$\begin{aligned} f_w &= 2R \times \tan(74^\circ/2) \quad , \quad R = \frac{640}{2 \times 0.753} \doteq 424.97 \\ f_h &= 2R \times \tan(46^\circ/2) \quad , \quad R = \frac{360}{2 \times 0.424} \doteq 424.53 \end{aligned}$$

となる。したがって、本研究では半球の半径 R の値を 425 として扱うものとする。また、VR220 の最大画角 $\theta_m = 220^\circ$ であるため、魚眼画像の半径解像度 $r = 540$ より、比例係数 $\xi = (2 \times 540) / \text{rad}(220) \cong 281$ となる。

まず、3章で述べた提案手法を確認するため、図4中央のカメラC5を用いて自由視点画像の生成を行った結果を図5に示す。図上部はC5より得られた魚眼画像上に各視点座標および想定される視野フレーム(青線)をプロットしたものであり、図下部はこれにより得られた自由視点画像である。この結果より、カメラ位置に限定されることなく任意の視点画像を生成できていることが分かる。



図 6: 自由視点型俯瞰画像の合成結果

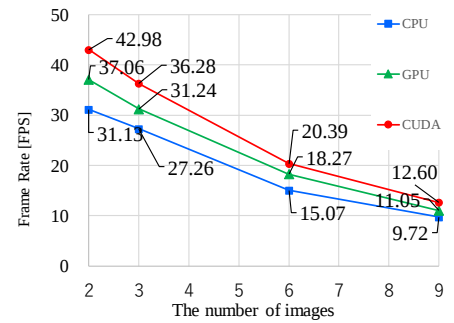


図 8: 合成枚数とフレームレートの関係



図 7: 俯瞰画像の合成結果

次に、図 4 に示した各視点に対応する自由視点型俯瞰画像の合成結果を図 6 に示す。図 6 のインターフェースは、今回再実装した文献 [5] のそれから本実験に関連するデザインのものに限定したものであり、各ピクチャーボックスの右上に付したラベルは対応するカメラを表す。図 6 より、C1 および C7 の自由視点画像を基に、C1 + C7 のラベルを付したピクチャーボックス上に自由視点型俯瞰画像として合成されていることが分かる。ここで、C5 の自由視点画像は、C5 の位置から同様に p_0 を見た場合のカメラ視点画像であり、これは C1 + C7 の合成画像と凡そ一致している。この事実は、C5 が存在しない場合でも他のカメラを用いて補間・生成可能、すなわち監視フロアにおける任意の位置からの視点画像を自在に生成できることを示唆している。

続いて、文献 [5] と同様に 9 台のカメラを用いて俯瞰画像の合成を行った結果を図 7 に示す。このとき各カメラは直下を見下ろした視点画像、すなわち $vP=C\#$ として自由視点画像を生成することとなる。図 7 より、文献 [5] のそれと同様の俯瞰画像が適切に合成されており、既存システムと同等の機能が実現されていることを確認できる。また、クライアント (カメラ) 台数を 1~9 台まで変動した際の合成に係るフレームレートの評価結果を図 8 に示す。凡例は、OpenCV のパノラマ合成関数を CPU で処理した場合 (CPU)、幾何変換のみを GPU で処理する gpu オプションを有効にした場合 (GPU)、合成に係る関数群を全て CUDA 実装した場合 (CUDA) の 3 つの合成手法に対応しており、

GPU に処理を譲渡することによりフレームレートの改善効果を期待できる。これは文献 [5] と同様の値・傾向を示しており、自由視点画像の生成に係るフレームレートへのオーバーヘッドは軽微と考えられる。

5 あとがき

本研究では、魚眼カメラの設置位置に限定されない任意視点の画像生成手法を提案するとともに、複数の視点画像を合成することで俯瞰画像と自由視点画像を同時に提示可能なシステムを開発した。今後としては、人物や物体の追跡・解析技術を実装し、俯瞰画像と自由視点画像とで情報を共有・連動するなど、死角のない防犯システムとして更なる高機能化を図る予定である。

謝辞 本研究の一部は、岡山県「平成 30-31 年度次世代産業研究開発プロジェクト創成事業費補助金」の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] 青嶋 稔, “工場内市場の事業開発シナリオ,” 知的資産創造, No.6, pp.30-35 (June 2017)
- [2] 季沢 亜土里, 他, “複数の監視カメラからの画像を用いた工場内での人の動き分析に関する研究,” 情報処理学会 第 74 回全国大会講演論文集, pp.431-432 (Mar. 2012)
- [3] 飯野 晋, 他, “複数カメラの視野間を移動する人物の追跡手法,” 第 16 回情報科学技術フォーラム, pp.259-260 (Sept. 2017)
- [4] 田所 勇生, 近藤 真史, 他, “複数の組み込みプロセッサと GPU を併用した俯瞰画像合成システムの開発,” 第 17 回情報科学技術フォーラム, pp.119-120 (Sept. 2018)
- [5] 鬼頭優, 近藤真史, 他, “複数の魚眼カメラを用いた自由視点型俯瞰画像合成システムの開発,” 第 18 回情報科学技術フォーラム, pp.245-246 (Sept. 2019)
- [6] 床井浩平, “全方位画像から VR 的ビューを表示する仕組み,” CQ 出版 Interface, Vol.44, No.7, pp.38-44 (July 2018)
- [7] 鶴田 徹, 他, “自由視点映像生成技術による 5G ネットワーク映像ソリューション,” FUJITSU, Vol.69, No.6, pp.30-36 (Nov. 2018)