(55) 単眼全天球カメラによる自己位置推定と日時変化ごとの人の混雑度合の可視化

村岡　叶夢[1]・窪田　諭[2]・安室　喜弘[3]

1 非会員　関西大学 大学院　理工学研究科環境都市工学専攻（〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: k649080@kansai-u.ac.jp
2 正会員　関西大学 教授　環境都市工学部（〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp
3 正会員　関西大学 教授　環境都市工学部（〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: yasumuro@kansai-u.ac.jp

アフターコロナにおいても，重症化リスクの高い高齢者等への感染対策の継続が重要視され，依然として人の混雑度合を知る需要は高い．モニタカメラで人を検知する技術は，広域においては，カメラの設置台数にコストがかかり，網羅性にも限界があった．本研究では，施設管理の観点から，定期的な警備巡回業務の中で運用することを想定し，移動しながら全天球カメラで撮影した画像を利用して，人の分布を定性的に表示する方法を提案する．SfM に基づくカメラの自己位置推定と，機械学習による人物検出・追跡処理により，施設内のフロアマップ上での人物位置を求め，マッピングをすることで人の分布を定性的に可視化した．マッピングには場所により時間のズレが存在するが，更新された時刻と合わせて可視化することで，混雑分布を把握するのには有用性を示した．

Key Words: *COVID-19, pedestrian crowds, omnidirectional camera, SfM, human detection*

1. はじめに

(1) 研究背景

新型コロナウイルス感染症は，令和５年５月８日に５類感染症に移行し，マスク着用が個人・事業者の判断に委ねられるなど，終息しつつある．コロナ禍では、マスク着用や手指消毒の励行のほか，密になるリスクが高い場所への外出を控えるなどの感染対策が個人レベルで普及し，他の感染症の抑制にも効果があった．しかし，水際対策が緩和され，外国人観光客が増加に伴い，他の感染症が日本国内に持ち込まれるリスクがあることと，高齢化社会により，重症化リスクの高い高齢者が増加することが予想される．2023 年に全国の医療機関(定点)から受けたインフルエンザの報告数は，増加傾向にあり，過去 5 年の平均報告数を上回る週も数多くあった [1]．そのため，アフターコロナにおいても，重症化リスクの高い高齢者や基礎疾患がある人など個人への感染対策を継続する必要がある．一方で，小売環境における店舗内の顧客密度が大きい空間では，顧客間の空間的な干渉や競合など消費者は購買行動を制限される．その結果として，消費者の購買に関する意思決定にネガティブな影響を及ぼし，満足度が低下することが確認されている [2]．したがって，より大きな施設管理の点では，観光地や商業施設など普段から人が多く集まる場所では，現在もソーシャルディスタンスを確保する仕組みが必要不可欠となり，人の集まり易い環境での混雑度合いを，訪れる前に確認出来ることの需要は高い．

(2) 関連研究・事例

消費者が事前に現地の混雑状況を知る身近な手段として，施設内のモニタカメラで人を検知し，可視化する技術が多数ある [3]．しかし，広域においては，複数のカメラを設置し，視野範囲を個々に確認する必要があるため，カメラの設置台数にコストがかかることと，一覧性や網羅性にも限界があった．単眼で広視野の映像から人の分布を可視化した研究例がある [4]．筆者らは，360°カメラで撮影した映像から，SfM (Structure from Motion)に基づく対象空間の 3 次元モデル化と機械学習による人物検出・追跡処理を行い，現場の 3 次元モデルにマッピングすることで，実空間での人の分布を可視化する手法を提案し，原理的な有効性を示した．しかし，この手法では，撮影のたびに対象箇所を 3 次元データ化して人物分布情報を

生成し直すため，システム化において拡張性や継続的な運用に難点があった．また，現場の 3 次元モデルに人の分布を可視化するため，周囲の位置関係がイメージし難く，マップとして使用するには，限界があった．

2. 提案手法

(1) 提案手法の概要

本研究では，上記の課題を解決すべく，比較的人々が去来する大きな商業施設等の場所において，単眼全天球カメラで警備員等の巡回人員が現場を移動しながら撮影するごとに，人物分布情報を施設内のフロアマップ上に表示・更新し，継続的な運用を可能とする手法を提案する．図-2 に提案手法の処理手順を示す．まず，対象現場を移動しながら全天球カメラで周囲を撮影する．その動画フレームから得られた画像群を入力とし，SfM に基づいて対象の 3 次元再構成を行い，座標系の構築をする．動画には画像の縦軸方向が SfM モデルの鉛直方向と一致するように天頂補正処理をしておく．次に構築した座標系から施設内のフロアマップ画像の画像座標系への座標変換式を算出し，SfM モデルとフロアマップの位置関係の対応付けをする．ここまでは，最初のみ行う事前処理である．人物配置処理では，警備員などが巡回業務で撮影した動画に上記と同様の天頂補正処理をし，その動画フレームには人物追跡処理を，動画フレームから得られた画像群には，人物検出処理を行う．追跡処理では，画像群から人物検出モデルにより検出された複数の追跡対象の人物を，フレーム間で追跡された同じ人物に対して同一の ID を割り振る．その後、フレーム間に写る同一人物の情報を統合し，各画像で検出した人物が新規かどうかを判断する．新規の人物である場合には，その人物が観測された画像を，事前に実施した SfM の画像に追加し座標系を維持して再度 SfM を実行することで，カメラの撮影位置座標を算出する．そして，新規人物の画像上での足元座標を取得し，カメラ座標との関係を基に，SfM モデル上での人物の位置を算出する．こうすることで，一貫した座標系で人物分布を逐次更新することができる．事前に算出した SfM 座標からフロアマップ画像への座標変換により，フロアマップ上での人物位置を算出し，人物の大きさのシンボルを配置する．また，全天球カメラで撮影したデータが入力される度に，フロアマップ上におけるシンボルを削除することで，人の分布を表示するマップを更新する．このように巡回して人物の位置をフロアマップ上に表示し，ユーザに提供することで事前に混雑状況を可視化する．

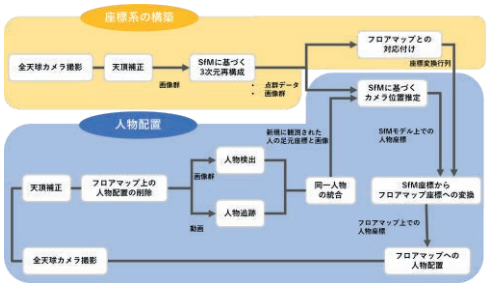


図-1 提案手法による処理手順

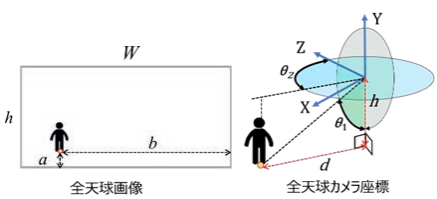


図-2 カメラと人物の位置関係(右)

(2) 人物の立ち位置の特定

フロアマップ上における人物の立ち位置の特定では，まず，図-2 (左) に示すように，幅 W px，高さ H px の全天球画像における人物の足元の画素位置 (a, b) を取得する．天頂補正処理により、全天球画像の高さ方向は，カメラ座標の Y 軸に対応することから，図-2 (右) のように，全天球カメラの鉛直下方向と人物の足元を通る視線方向とがなす角度を θ_1，カメラ座標の Z 軸を基準とした人物の足元の方位角を θ_2 とすると $\theta_1 = \pi a/H$，$\theta_2 = 2\pi b/W$ と算出できる．次に，地面からカメラ座標原点までの高さ h は，対象現場の 3 次元再構成処理で得た点群データに RANSAC [5]による平面推定で検出した地面の点群 Y_w 座標値と各カメラの Y_w 座標の差とする．カメラ座標系の X-Z 平面では，原点から人物までの距離を d とすると，X-Z 平面に投影した人物の位置 (X, Z) は次式で求められる．

$$d = h \tan \theta_1 \quad (1)$$

$$X = d \sin \theta_2 \quad (2)$$

$$Z = d \cos \theta_2 \quad (3)$$

図-3 に，SfM モデルの座標系と各カメラの座標系の位

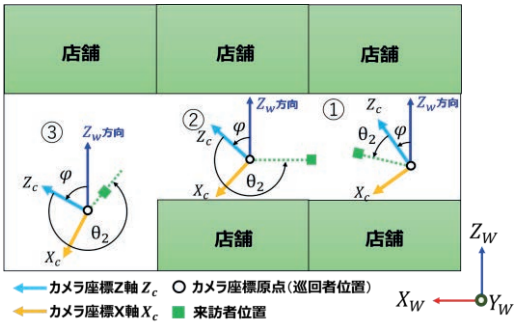


図-3 SfM モデルと各カメラの座標系の関係

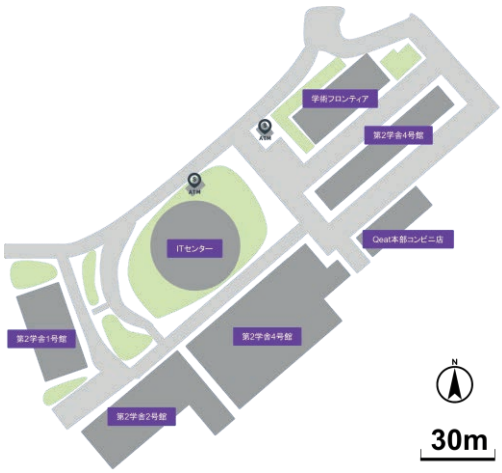


図-4 フロアマップの例（関西大学）

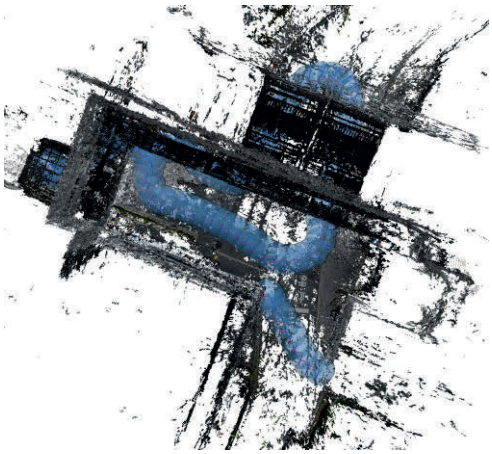


図-5 3次元モデルとカメラ撮影位置：
青い球体が撮影位置を示す．

置関係を示す．①から③の座標系の原点はSfMにより算出したカメラ座標系であり，巡回者の位置でもある．
カメラ座標の Y 軸と SfM モデルの Y_w 軸も天頂補正処理により対応していることから，SfM モデル座標系の X_w-Z_w 平面では，カメラ座標系での Y 軸回りの回転 φ と並進移動により，各撮影地点で検出された人物の位置をは同一の座標系に統合できる．SfM より得た回転行列を $R(\varphi)$，カメラの位置座標を (t_x, t_z) とすると SfM モデル上における人物の位置 (X_w, Z_w) は次式のように算出できる．

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Z_w \end{bmatrix} = R(\varphi) \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_z \end{bmatrix} \tag{4}$$

次に，**図-4** が示すような施設のフロアマップ画像の座標系 X_m-Z_m 平面と SfM モデル座標系の X_w-Z_w 平面は先ほどと同様に，SfM モデル座標系での Y 軸周りの回転 φ_w と並進移動により，SfM モデル上における人物の位置はフロアマップ上での位置に変換することができる．拡大・縮小行列を S，回転行列を $R(\varphi_w)$，X_m-Z_m 平面における SfM モデル座標系の原点座標 (m_x, m_y) 人物の位置 (X_m, Y_m) は次式のように算出できる．

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Z_m \end{bmatrix} = S \cdot R(\varphi_w) \begin{bmatrix} X_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \end{bmatrix} \tag{5}$$

このように位置計算処理を行い，フロアマップ上における人の位置を特定する．

3. 実装

(1) 実験環境と使用機材

実験環境には，より多くの人で混み合う商業施設を想定し，関西大学千里山キャンパス構内のコンビニエンスストア前を対象とした．全天球カメラには Theta X (RICHO 社)，SfM には全天球画像を使った SfM が可能である Metashape Professional (Agisoft 社)，人物検出モデルには YOLOX[6]，人物追跡には motpy[7]を使用し，カルマンフィルタに基づく追跡処理を行った，対象現場のフロアマップへの人物の位置表示には画像処理のライブラリである OpenCV を使用した．

(2) 座標系の構築

図-5 に示すように，現場で撮影した 91 枚の画像を用いて SfM に基づく 3 次元再構成を行い，座標系を構築した．SfM の復元結果は原理的にスケール不定であるため，現場で数か所の実寸を測定し，SfM の 3 次元データに対してスケール調整を行ったところ，誤差の平均値はおよそ 0.05m となった．タイポイント数は約 4.7 万点であり，画像群から推定された特徴点を元画像に再投影した際の誤差 RMSE (Root Mean Square Error) はおよそ 3.0 pixel の精度で再構成できていることから，概ね正確な 3D 形状を成していると考えられる．そして，SfM モデルの座標系とフロアマップの座標系の対応付けを目視で行い，フロアマップの座標系への座標変換行列を算出した．

(3) フロアマップへの人物配置

対象現場で全天球カメラを携行し，巡回者が時間別に約 25 秒間の撮影を 3 回行った．それぞれの動画より得た画像を入力として，図-6 に示すように，YOLOX による人物検出を行った．検出された人物が，動画を入力とした motpy により，以前の画像フレームから追跡がされている場合には，既出の人物情報に統合した．追跡されておらず，新規に観測された人物であった場合には，その観測された画像を SfM モデルの座標系でカメラの位置推定を行い，カメラ座標を算出した．その人物の足元座標とフロアマップへの座標変換式から式 (1)～(5) により，



図-6　全天球画像に対する YOLOX による人物検出

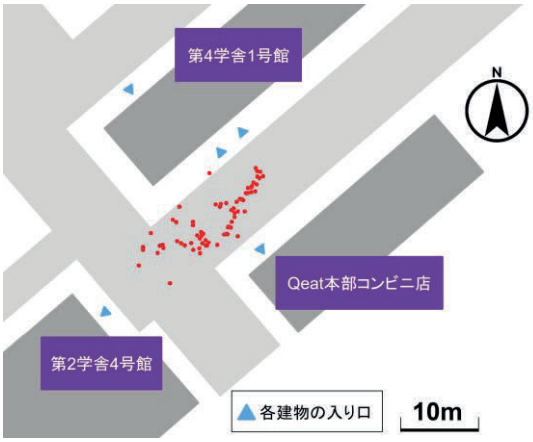


図-7　人物配置：12:00 PM 頃

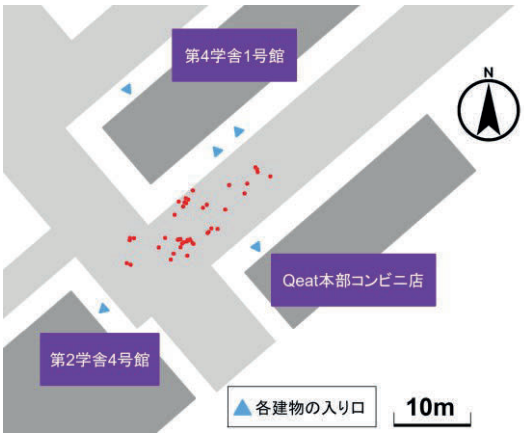


図-8　人物配置：2:30 PM 頃

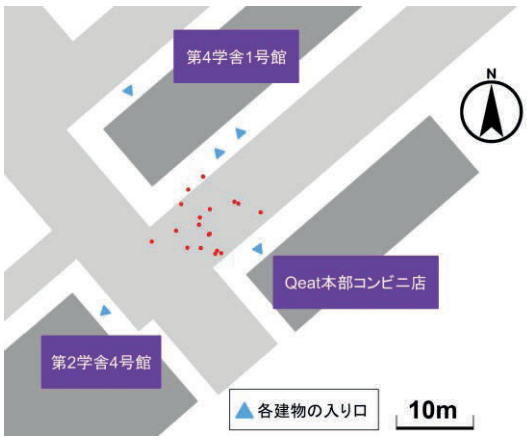


図-9　人物配置：4:00 PM 頃

人物の位置座標を算出し，フロアマップ上に表示した（図-7，8，9）．フロアにマップされた人物の位置は，概ね元の画像と正しく対応づいており，建物との位置関係も確認できた．人が重なり合い密集する場所では，オクルージョンが懸念されたが，体の一部でも YOLOX が人物検出を可能であることと，移動しながら撮影をしているため，オクルージョンにより死角となっている人物が別の撮影位置では観測され，マッピングされるケースが多くあり，人の分布を定性的に可視化することができた．また，昼食時に混み合う 12:00 PM 頃（図-7）は，店舗の入り口付近では密接するような極めて混雑があり，授業の休み時間（図-8）の多くの人が移動する，授業中の空いた状況（図-9）など，混み具合の程度の変化を確認することができ，来訪者等が人の存在分布の傾向を知るのに，有効性があることを示した．

4.　おわりに

本研究では，360°の視野をもつ全天球カメラで現場を歩きながら撮影するだけで，巡回のたびに現場のフロアマップに人物の分布をマッピングし，更新できる手法を提案し，実験によりその有効性を確認した．今後は，オンライン処理により，リアルタイムにマッピングを行う方法を検討するとともに，利用者が Web 上で人物の分布を表示したマップを閲覧できるシステムの構築をする予定である．

参考文献

1) 厚生労働省 国立感染症研究所:IDWR 感染症週報 <https://www.niid.go.jp/niid/images/idsc/idwr/IDWR2023/idwr2023-20.pdf>, (入手 2023.6.5)
2) Eroglu, Sevgin A., Karen Machleit, and Terri F. Barr, "Perceived Retail Crowding and Shopping Satisfaction: The Role of Shopping Values," Journal of Business Research, 58 (8), 1146-1153, 2005.
3) 米司他：「駅構内モニタカメラを用いた混雑度可視化技術」，情報処理学会デジタルプラティクス，Vol.8, No.2, 152-159, 2017.
4) 村岡他：「単眼全天球カメラを用いた自己位置推定と人の位置情報のマッピング」，土木学会論文集, Vol. 79 No.22, 22-22017, 2023.
5) M. A. Fischler, R. C. Bolles : Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. of the ACM, Vol 24, pp 381-395, 1981.
6) Z. Ge, S. Liu, F. Wang, Z. Li, J. Sun : YOLO X: Exceeding YOLO Series in 2021, arXiv preprint arXiv: 2107.08430, 2021.
7) motpy - simple multi object tracking library : <https://github.com/wmuron/motpy> (入手 2022.10.26)