

(26) 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

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 (〒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

COVID-19 の感染状況下では、観光地や商業施設の来訪が減少し経済が大きな打撃を受けた。一方、小売環境としての公共・商業施設内の人の密度は入店意欲等の消費者心理に影響を与えることも考えられる。そのため、行動を制限しないことと、密になるリスクを減らすことの両立が重要視され、人の混雑度合を知る需要が高まった。人感センサ等を使って混雑状況を色分けして可視化する既存技術は、可視化された内容が抽象的で混雑状況を理解し難いという難点があった。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、360°の視野をもつ全天球カメラで移動しながら撮影した現場画像を利用して人の分布を可視化する方法を提案する。SfM により対象空間の3次元モデルを生成し、各画像から機械学習による識別器により人物を抽出する。抽出した人物に対するカメラの視線方向と床面との交点により、人の位置を現場の3次元モデルにマッピングし、実空間での混雑度を可視化した。

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

1. はじめに

(1) 研究背景

近年、COVID-19 の感染拡大により、消費者が密になるリスクを避け、観光地や商業施設を訪れる人が減少し、GDP が下落することで経済が大打撃を受けた。全国の主要駅、観光地である東京駅(東京)、大阪梅田駅(大阪)、栄駅(愛知)、国際通り(沖縄)でも 2022 年 1 月の時点では、感染拡大前と比較して、20%以上の人流が減少している^{1,2,3}。観光地や商業施設などの人の多く集まる施設においては、災害や事故などさまざまな要因により混雑が発生する。たとえば、2016 年 1 月 18 日の関東地域における大雪の際、各路線が運転見合わせや運行制限を実施し、一部駅では駅構内への入場制限が行われるほどの混雑が発生した。また、混雑により来訪者の死亡事故が発生する場合もある。事故の未然防止のために施設やイベントの管理という観点でも混雑への対応は必要であり、利用者が混雑状況を知って混雑を回避したいニーズがあるため、混雑状況を適切に利用者に知らせることが重要である。一方、小売環境としての商業施設内の顧客密度

は消費者心理に影響を及ぼし、入店意欲に影響を与えることも考えられる。店舗内が混雑すると、来店客には他者との空間的な干渉や、商品の閲覧や選択に競合が起きる可能性が生じるため、自らのパーソナルスペースや購買行動を守る努力を強いられることになる⁴。そのため、消費者が自発的に来店時間を分散して商業施設を利用するなどし、購買活動が停滞しないことが社会的にも望ましい。特に、長期化するコロナ禍のような、先の見通しが立ち難い状況では、密になるリスクを低減することと経済活動の継続との両立が重要視されるため、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が高まっている。

(2) 関連事例

人感センサ等を使って混雑状況を色分けして可視化する既存技術は、商業施設内の様子や個別の人の分布を確認できず、抽象的に見る人が混雑状況をイメージし難いという難点があった。また、施設内のモニタカメラの映像を画像処理し、混雑度を可視化する技術があるが、広域なエリアではカメラが複数必要であり、固定視点のた

め一覧性がないという課題がある。画像に映った被写体の物体認識と、その位置を推定する目的で全天球カメラを使用した研究例がある⁵⁾。撮影した画像は高緯度領域で歪みが生じるため、具体的な数値で画像上における物体の位置を推定することが難しいことから、全天球カメラと被写体との位置関係を上から俯瞰した座標としてとらえ、機械学習により認識された物体の画像領域のカメラに対する位置を机上で特定している。

(3) 研究目的

前節で述べたように、過密な混雑の解消やコロナ禍で密になることのリスクの低減のためには、公共性の高い商業施設などにおいては、利用者が自発的に混雑を避けて来訪の機会を調整できる利便性が必要である。そのためには、消費者が現地に赴く前に混雑度合いを把握することが重要となる。そこで本研究では、空間的に施設管理者や現地に赴く前の消費者が施設内の混雑度合いを把握できる情報を提供する。さらに、混雑度合いは日時により変化するため、手軽に更新できる情報とする。

2. 提案手法

(1) 人物の立ち位置の特定

本研究では、比較的大きな商業施設内等の不特定多数の人が去来する場所で、人の分布を把握する方法を提案する。提案手法の処理手順を図-1に示す。まず、対象現場を移動しながら全天球カメラで動画を撮影し、カメラ内蔵のジャイロセンサにより、画像の縦軸方向が鉛直方向と一致するように天頂補正処理を行っておく。動画フレームから得られた画像群に対し、SfM (Structure from Motion) による現場の3次元再構成処理により、現場空間の3次元形状とカメラの3次元座標を算出する。SfMの入力に使用した各画像に人物検出処理を実施し、幅 W 、高さ H の全天球画像内での人の足元の画素位置を取得する。図-2(右)のように、カメラの鉛直下方向と人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軸を基準とした人の足元の方位角を θ_2 とする。図-2(左)の人の足元の座標 (a, b) とすると、正距円筒図法での画像高さ方向はカメラ座標のY軸に対応することから、 $\theta_1 = \pi a/H$ 、 $\theta_2 = 2\pi b/W$ と算出できる。次に、鉛直上方から俯瞰したX-Z座標平面では、原点から人までの距離を d 、地面からカメラ中心までの高さを h とすると次式で求められる。

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

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

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

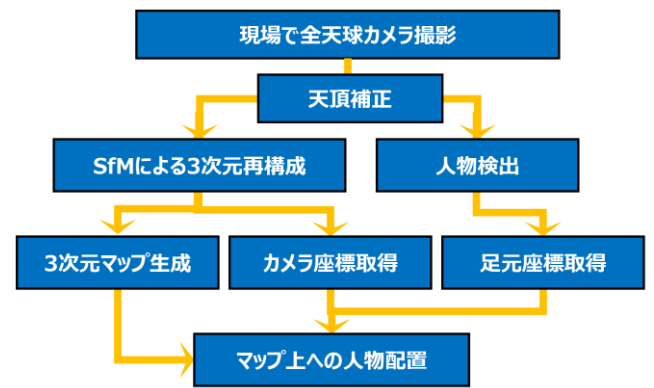


図-1 提案手法による処理手順

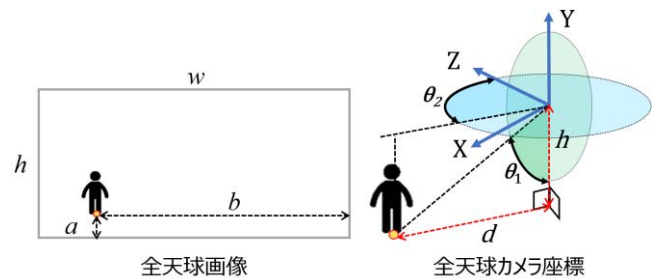


図-2 カメラと人物の位置関係(右)

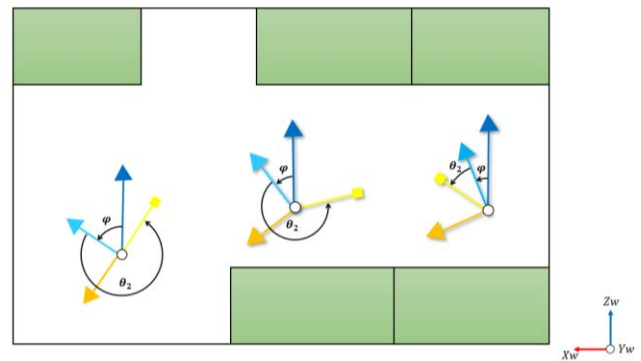


図-3 SfMモデルと各カメラの座標系の関係

SfMで得た3次元モデルにRANSACによる平面あてはめ処理を行い、検出した平面における各点群の Y_w 座標の平均値と取得した各カメラの Y_w 座標の平均値の差をモデル上におけるカメラの高さとする。図-3に、SfMモデルの座標系と各カメラの座標系の位置関係を示す。カメラ座標系のZ軸は水色、X軸は橙色、世界座標系のZ軸は青色、X軸は赤色、人の位置は黄色で表している。3次元モデルの床面上では、図-3のように各カメラ座標系でのY軸回りの回転とX-Z座標での並進移動をさせて、同一の座標系 X_w-Z_w に各撮影地点で検出された人の位置を統合できる。回転行列を $R(\varphi)$ 、カメラの位置座標を (t_x, t_z) とすると次式のようなになる。

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

このように位置計算処理を行い、3次元モデル上における人の位置を特定する。

(2) 色情報の類似度による人物のトラッキング

移動しながら全天球カメラで撮影している間にも、周囲の人も移動していることが多いため、同一の人が異なる画像フレームにおいて違う場所に観測され、そのままでは実際よりも多くの人物がカウントされてしまう。したがって、画像間で各人物を追跡して同一視するためのトラッキングが必要である。全天球画像では、カメラからの距離によって、画像上での被写体の大きさが大きく変わるため、本研究では、色情報のヒストグラムを用いる。人物検出処理により得た人の領域の外接矩形を人物領域とする。人物領域内のRGB画素値をHSV値へ変換し、H(色相)の正規化ヒストグラムを作成し、各画像間で検出された人物領域のヒストグラム間の類似度にはBhattacharyya距離を用いる。類似度が高いほど、値は小さくなり、完全一致の場合に0、完全に不一致の場合は1となる。ヒストグラム H_1 とヒストグラム H_2 のBhattacharyya距離 $BD(H_1, H_2)$ は次式で算出できる。

$$BD(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{\sum_i^n H_1(i) \cdot H_2(i)}{\sqrt{\sum_i^n H_1(i) \sum_i^n H_2(i)}}} \quad (5)$$

ここで、 $H_1(i), H_2(i)$ はそれぞれ正規化ヒストグラムにおける i 番目のビンの値を表し、 n はヒストグラムのビン数である。これを全ての人物領域の組み合わせに行い、画像間に写る同一人物の情報を統合し、最初に観測された位置のみにマッピングを行う。このように特定した人の位置を3次元マップに表示し、ユーザに提供することで事前に混雑状況を可視化する。

3. 実装と検証

(1) 実験環境と使用機材

本研究では、人通りが多い場として、関西大学千里山キャンパス構内の理工系学舎の1階エントランスフロアを対象として実験を行った。全天球カメラにはTheta Z1 (RICOH社)、SfMにはMetashape Professional (Agisoft社)、人物検出には人の姿勢推定モデルを表示するOpenPose⁹を使用した。また、SfMにより、3次元再構成したモデルと特定した人の位置とを統合して表示するために、フリーソフトCloudCompareを使用した。

(2) 人物の位置情報の統合と表示

図-4に示すように、全天球カメラを頭上に固定し、



図-4 撮影機材(左)と撮影の様子(右)



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。

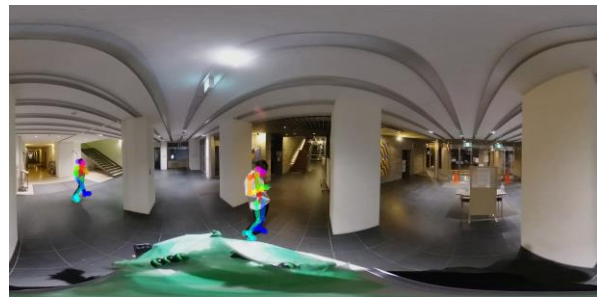


図-6 全天球画像に対するOpenPoseによる人物検出

現場で約1分の動画を撮影した。撮影した動画から1秒ごとに書き出したフレーム画像63枚を用いてSfMによる3次元再構成を行い、各画像の撮影位置における3次元座標を取得した(図-5)。ただし、SfMは原理的に復元結果はスケール不定であるため、実寸と整合させる必要がある。そこで、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3mmとなった。タイポイント数は約3.1万点、ポリゴン数は約260万であり、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RMSE (Root Mean Square Error)はおよそ2.0 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。また、図-6に示すように、全天球画像

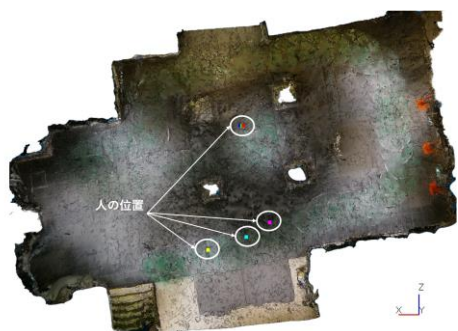


図-7 各画像から検出した人の位置 (人の統合前)

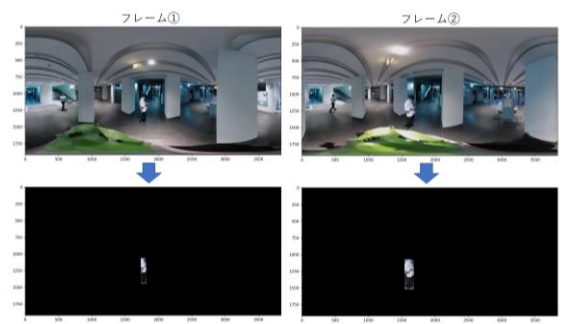


図-8 各画像からの人物領域の取得

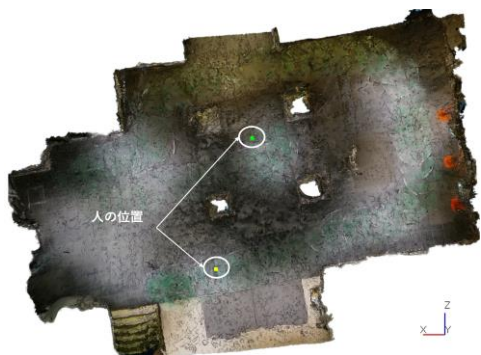


図-9 各画像から検出した人の位置 (人の統合後)

から OpenPose により検出される人物の骨格から右足のかかとの画素位置を抽出した。63 枚の画像の内、4 枚に検出された人を式 (1)~(4)により位置座標を算出し、3次元モデルに表示した (図-7)。この段階で、それぞれの画像について目視で確認したところ、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いることが分かった。4 秒間の撮影で実際に現場にいた人の合計は 2 人であったがマップ上では 6 人の位置が確認されており、次に同一人物の情報の統合処理を行なった。図-8 に示すように各画像で OpenPose で検出された人物骨格の外接長方形を人物領域としてヒストグラムを作成し、撮影順序が隣接する次の画像フレーム内の人物領域の中から類似度が最大となるものを対応付けした。次フレームの人物領域に対して、現フレームの人物領域が複数対応づいた場合は、やはり類似度が高い方を採用した。対応づけされない人物領域については、2 番目に類似度

が高い人物領域を候補として、同様に類似度の高い組み合わせを採用し、同一人物とすることで人の情報を統合した。類似度には下限のしきい値を設け、対応付けされない人物については新規に検出されたものとする。異なる人物間で服の色合いが類似していることや、OpenPose による人物領域の出力に時間的な遅延が生じることから人物領域の範囲も位置ずれ起きることがあり、これら類似度に影響していると考えられる。同一人物の統合処理を行った後、再度 3次元モデルに人の位置を表示した (図-9)。結果として画像ごとに写る同一人物を追跡して統合する処理を行い、マップ上には 2 人の位置でき、正しい人数をマップに表示させることができた。

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移動しながら撮影するだけで、特定した人の位置を現地の 3次元マップに表示させる手法を提案し、実験により有効性を確認した。結果、各画像で検出された人の位置を特定し、正しい人数を 3次元マップに表示することができた。一方、異なる人物間で服の色合いが類似していることや、人物領域のずれが生じることによりヒストグラムの類似度が影響を受けるケースが確認された。今後は、OpenPose の実行環境や人物追跡用の画像フレーム数を増やした実装を検討し、処理全体の自動化と、正確な人物統合の両立させたシステムの実現を図る予定である。

参考文献

- 1) 株式会社 Agoop : 全国主要駅・繁華街エリアにおける人流の動向, <https://corona.go.jp/toppage/pdf/area-transition/20220109_agoop-daytime.pdf>, (入手 2022.6.10) .
- 2) 株式会社 Agoop : 全国主要観光地における人の流れの推移, <https://corona.go.jp/toppage/pdf/area-transition/20220111_kddi.pdf>, (入手 2022.6.10) .
- 3) 株式会社 Agoop : 全国の人口変動分析, <https://corona.go.jp/toppage/pdf/areatransition/20220115_docomo_zenkoku.pdf>, (入手 2022.6.10) .
- 4) 江口里恵, 坪田菜子, 中村佑弥, 福田拓生, 松浦加奈, 三石海都 : 客密度が消費者の来店意欲に及ぼす影響, 千葉貴宏ゼミナール商学論究, 第 3 巻, 2020.
- 5) 増田純也, 横山昌平 : 全天球カメラを用いた机上物体に対する位置推定, 第 12 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2020),
- 6) Z. Cao, et al. : "OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.43, no.1, pp.172-186, 2021.