

スクランブル交差点における AI を活用した 複雑な歩行者流動計測に関する研究

宇都宮 優喬¹・田頭 直樹¹・阿部 正太朗²・北川 照晃¹・
山脇 正嗣¹・吉岡 正樹³

¹正会員 株式会社建設技術研究所 国土文化研究所インテリジェンスサービスプラットフォーム
(〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町二丁目 14-5)

E-mail: ytk-utsunomiya@ctie.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 株式会社建設技術研究所 大阪本社都市部 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区北浜道修町 1-6-7)

³正会員 株式会社建設技術研究所 大阪本社道路・交通部 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区北浜道修町 1-6-7)

ボトルネック交差点の渋滞対策として、交通状況調査結果などを用いて信号現示の最適化や右折車線の延伸などのピンポイント対策が行われている。スクランブル交差点は、歩車分離式信号で制御されている。交通量の計測は、様々な方向から色々な動きをする歩行者交通の計測を正確に行うことが課題であった。また、これまでスクランブル交差点の歩行者交通量計測は、人手による計測が一般的であり、その調査や分析には多くの人員やコストが必要であった。そこで本研究では、カメラ画像、AIおよびトラッキング技術を用いて複数カメラから交差点内の歩行者流動を計測する手法を開発した。開発手法を実験フィールドに適用した結果、カメラを跨いだ移動でも移動軌跡が把握可能となり、歩行者交通量・移動軌跡計測の高度化・省力化に有効となり得る可能性を示した。

Key Words: Traffic volume measurement, Artificial Intelligence, Deep Learning

1. はじめに

交通流を制御する交差点は、一般に需要や特性に応じて設計されている。特に、駅前や公共施設などの歩行者横断需要が極めて多い交差点や、歩行者と右左折車両との事故の危険性が高い場合はスクランブル方式が採用されている。スクランブル方式では、全方向の車両通行が停止し、歩行者は交差点内を自由に横断できる。一方で、歩行者の信号待ち時間が長くなること、斜め横断によって歩行者横断距離が長くなるため、歩行者青時間を長くする必要があること、自動車の交差点交通容量が低下することに留意する必要がある¹⁾。

特に、自動車の交通容量低下は、交通量集中による渋滞を誘発する。この様なボトルネック交差点の渋滞対策の1つとして、信号現示の最適化が行われており、近年では、AIが交通量や平均速度のデータから渋滞を予測し、信号を自動制御する取り組みも進められている²⁾。

一方で、信号現示の制御により歩行者横断の青時間が短くなる場合もあり、特に上記のスクランブル交差点に

おいては、歩行者需要が多だけでなく、公共施設などが近傍に立地する場合は子供連れや高齢者等の多様な利用が想定されることから、斜め横断が困難になるなど、歩行者横断に対する影響が生じる可能性がある。

このような信号制御による歩行者横断への影響把握に関しては、対象交差点における横断方向別の歩行者交通量を計測することが多い。これらの計測は、人手観測が一般的であったが、近年はカメラ画像とAIを組合せた調査方法が推進されている。また、継続したデータ取得、単断面の量だけではなく、移動軌跡や属性といった多様な観点でのデータ取得の必要性から、新たな計測手法の開発が進められている。

国内の大学や民間企業では、AIやカメラ画像を用いた人数計測や移動軌跡に関する研究開発が多数実施されている。例えば、高森ら³⁾は、歩行者と自転車の通行者数、通行速度、通行軌跡を計測する手法を開発し、歩行者と自転車の交通状態を簡便に把握している。また、鳥海ら⁴⁾は、YOLOv8を用いて、歩行者および自動車の軌跡を計測し、歩車の錯綜状況を分析している。これらの

研究により、歩行者交通量調査の省力化が期待されるが、カメラ性能や撮影画角の制約から複雑な横断スクランブル交差点などの広域の人数カウントは難しい。

本研究では、通常の交差点と比較し歩行者横断方向がより複雑となるスクランブル交差点における、交差点の横断時間・パターンを計測する手法を検討し、複雑な歩行者流動を計測した。また、本手法を実験フィールドに適用することで、有効性を検証し、今後の課題を整理した。

2. 対象地点

本研究は、信号現示の見直しを実施した高槻市役所前交差点(大阪府高槻市)を対象地点とした。交差点は、図-1に示す東西方向に主道路となる国道 171 号があり、南北方向に渋滞が頻発していた。また、当該箇所はスクランブル交差点で横断方向が複雑化しており、近傍に高槻市役所が立地していることから、多様な属性の歩行者がみられる。

南北方向の渋滞解消に向けて、高槻市は、道路管理者および交通管理者と協議を行い、その結果、2023 年 5 月に渋滞対策として高槻市役所前交差点の信号現示が変更され、歩行者信号の現示時間が短縮された。信号現示の変更により、南北方向の自動車渋滞は改善の傾向にある一方で、斜め方向の横断者が渡り切れない事象が懸念されている。

3. 提案手法

(1) 提案手法のフロー

図-2に本研究で提案する手法の全体像を示す。①対象交差点を撮影する複数台カメラを設置し、画像を取得する。②AI の一種であり高度な画像解析能力を有する深層学習モデルを用いて画像内の人物を検知する。③画像内の検知物体を追跡する Multiple Object Tracking(MOT)を用いて歩行者をトラッキングする。④カメラ画像内の人物検知の座標(以下、ローカル座標)を鳥瞰画像内での座標(以下、ワールド座標)に変換する。⑤カメラを跨いだ移動の際、ワールド座標の位置関係、移動方向や移動速度から同一人物を特定する。⑥同一 ID のワールド座標を取得することで、交差点内の横断軌跡を取得する。

(1) データ収集

交差点内の歩行者を広域的に把握するため、オクルージョンを考慮し、高槻市役所 6 階の高所からカメラ撮影する。撮影機器を設置する高槻市役所から交差点までは 100m 以上の距離があり、AI による人物検知の精度低下が懸念されたため、図-3に示すように中距離望遠カメラ

4 台を用いた複合撮影を試みた。また、精度確認を目的に 30fps, 1,440×1,080px のビデオカメラでも映像を記録した。中距離望遠カメラは、200 万画素 5-50mm 可変焦点レンズで望遠撮影が可能な ELP 社の ELP-USB8MP02G-SFV を使用する。カメラは、画像保存機能を保持していないため、Raspberry Pi 4 Model B+にカメラを USB 接続し画像を保存する。また、先述したようにワールド座標で同一人物を判定するため、カメラの撮影範囲がラップするようにカメラと三脚を固定する。

撮影期間は、交差点の横断者が多い午後の数時間を対象とし、2023 年 11 月 14 日(火) 14~16 時で撮影を行った。撮影条件は、10fps, 1,280×720px とした。

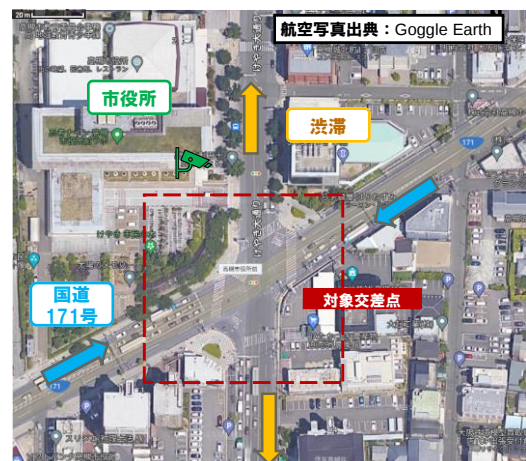


図-1 対象地点

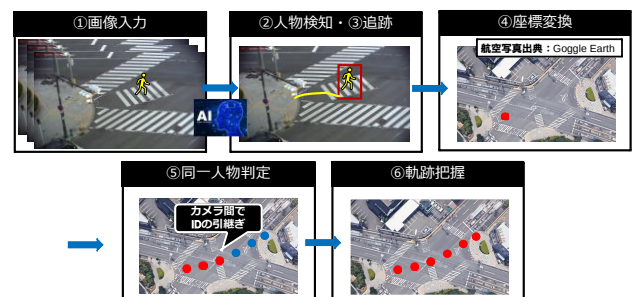


図-2 本手法の全体像



中距離望遠カメラ



ビデオカメラ

図-3 中距離望遠カメラとビデオカメラの違い

(2) AIによる解析とトラッキング

a) 人物検知

カメラ画像内の人物検知は、YOLOv8 公開モデル⁵⁾を使用した。YOLOv8 は、交通量計測や構造物異常検知など多数の開発実績がある。リアルタイムにカメラ画像内の物体を BoundingBox と呼ばれる画像内の座標で出力するモデルであり、物体検出、セグメンテーション、画像分類などのタスクで利用できる。YOLOv8x 公開モデル⁶⁾(以下、人物検知 AI)で人物を検知した結果例を図-4 に示す。

b) 属性判定

既往研究⁷⁾にて開発されたカメラ画像から人間の属性(性別・年代)を判定する AI(以下、属性判定 AI)を用いて横断者の属性を計測する。性別は、男性または女性の 2 クラス、年代は、子供、大人および老人の 3 クラスを判定するモデルである。本研究ではファインチューニングは行わず当該モデルを適用し、検知精度を確認する。属性判定 AI の判定結果例を図-5 に示す。

c) トラッキング

トラッキングは、BoT-SORT⁸⁾を使用し、図-6 に示すとおり、同一人物と判定した場合、付与した ID で追跡する。BoT-SORT は、2022 年 6 月にイスラエルのテルアビブ大学の研究チームから発表された物体追跡の手法であり、MOT のベンチマークテストでも高得点を記録している。従来の物体追跡手法は、動画の fps が低いことやオクルージョンにより ID の切り替わりが課題となっていた。一方で、BoT-SORT は、過去の推定値と現在の計測値から将来値を予測するカルマンフィルターの改良版およびカメラの動きに合わせて補正を行うカメラモーション補正が実装され、検知した物体の位置が変化した場合でもトラッキングが維持される特徴がある⁹⁾。

(3) 座標変換

人物検知 AI で検知した人物のローカル座標をワールド座標に変換する。ローカル座標は、身長などによりズレが生じないよう BoundingBox の下辺中央の座標を取得した。3 次元空間を 2 次元平面に投影する射影変換を使用することで、ローカル座標からワールド座標へ変換する。カメラ画像と鳥瞰画像でそれぞれ指定する基準点から(1)式のパラメータを算出し、ローカル座標(x, y)からワールド座標(x', y')を算出可能となる。図-7 に示すとおり、上段の画像で検出した人物のローカル座標を射影変換でワールド座標に変換し、下段の航空写真に描画する。これにより、カメラを跨いだ際の移動も把握することが可能となる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$



図-4 人物検知 AI の検知結果



図-5 属性判定 AI の検知結果



図-6 トラッキングの例

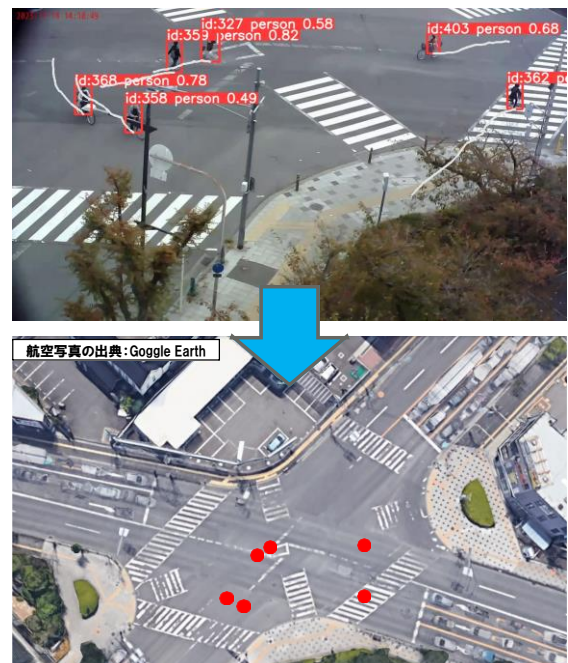


図-7 座標変換の例

(4) トラッキング結果の補正

カメラを跨いだ移動(図-8)および、遮蔽物(信号機や樹木など)によるオクルージョン(図-9)や人物検知 AI の未検知期間の発生により(図-10), 同一人物の ID が切り替わる事象を確認した。これらの課題に対応するため, 下記に示す方法を用いてトラッキング結果を補正する。

a) 撮影範囲の重複による ID の連続性確保

4 台のカメラ撮影範囲をラップするように撮影し, 撮影時刻およびワールド座標の位置が, 連続して一致する場合は同一人物として認識し, ID の引き継ぎを行う。

b) 位置推定による ID の連続性確保

歩道と車道の境界線(以下, 交差点侵入ライン)を越えて歩道に入る前に ID が消失した場合は, 位置推定を連続して行い, 推定時刻と推定位置が一致する新規出現 ID があった場合は, ID の引継ぎを行う。



図-8 カメラを跨いだ事例



図-9 同一人物の ID が切り替わる事例



図-10 AI の未検知により軌跡が途切れている事例

4. 提案手法の精度検証

調査日に取得した画像に対する AI の判定結果と目視確認結果を比較し, 提案手法の精度を確認する。撮影データのうち 10 分間のデータに対して精度を検証した。

(1) 横断人数

人物検知 AI の検知結果と目視確認結果を比較した。なお, 歩行者と自転車の区別はなく人物を認識しているため, 全通行者の合計を示している。表-1 に人物検知 AI の精度を示す。対象時間における横断者数は 146 人, 人物検知 AI の計測結果は 136 人となり, 人物検知 AI の精度は, 95.2%と目視確認結果より少ない結果となった。

表-1 に示す青信号の時間帯別に比較すると, 数人の誤差である。計測結果の乖離が大きい 14 時 10 分頃の画像を確認した結果, 人物検知 AI に検知されずに横断している事例がみられ, その多くが自転車に乗車した人物であった。

未検知の原因として, 図-12 下段のように人間や信号などの遮蔽物によりオクルージョンが発生していること, 人間が自転車と同化していることが考えられる。

(2) 属性判定

カメラで取得した画像に対して, 属性判定 AI の検知結果と目視判定結果を比較した。属性判定 AI の精度評価指標として, 下記の(2)(3)式に示す適合率および再現率を使用した。なお, (2)式の実数の数は, 人手による目視で計測した。

$$\text{適合率} = \frac{\text{AI による検知数 (正解のみ)}}{\text{AI による検知数 (正解・不正解含む)}} \quad (2)$$

$$\text{再現率} = \frac{\text{AI による検知数 (正解のみ)}}{\text{実際の検知数}} \quad (3)$$

表-1 人物検知 AI の検知精度

時刻	横断人数 (人)	
	目視確認結果	AI 判定結果
14 時 10 分頃	34	33
14 時 12 分頃	38	37
14 時 15 分頃	37	34
14 時 18 分頃	37	35
合計	146	139
検知精度	95.2%	

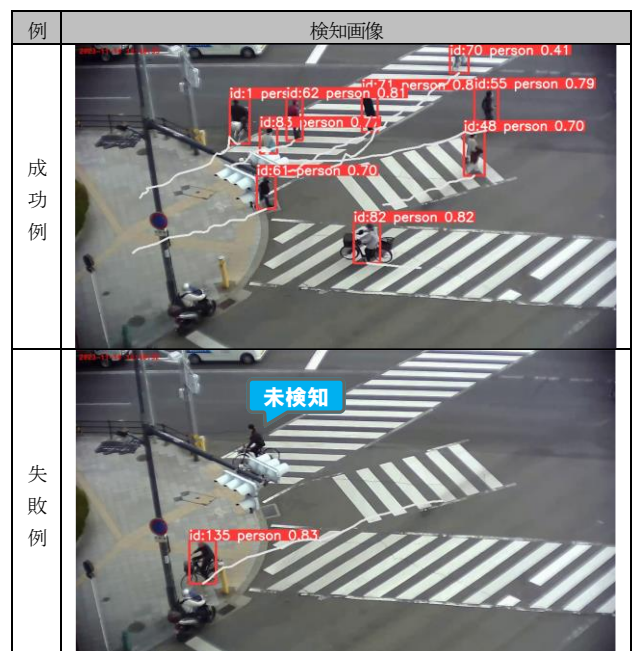


図-12 検知結果画像 (例)

図-13 に示す交差点④を撮影したカメラを対象に精度を検証した。表-2 および図-14 に示すとおり、男性および大人が判定されることが多く、未検知や誤検知が多数発生している。これは、既往研究⁷⁾において整理されている教師データに偏りがあること、カメラと撮影対象の距離が離れていること、教師データに含まれているカメラ画角とは大きく異なることが要因であると考える。

(3) 横断パターン

対象箇所は、スクランブル交差点であり横断方向が複雑化しているため、図-13 に示す番号を用いて①→②などと移動を定義する。計測精度は、各横断パターンの AI 計測結果を分母、目視確認結果を分子とした精度の平均で確認する。表-3 に示すとおり、目視確認結果と AI 計測結果では、最大 6 人の誤差であり、精度は 91.7% と横断人数の多寡は計測ができています。計測誤差は、人物検知 AI の未検知やオクルージョンによる ID の消失が原因であると考えます。表-3 に示すとおり、②→④および④→②の斜め横断が多いことを確認した。これは、北東側(②→④の方角)に高槻市駅が存在しており、人の移動が多いことが要因として考えられる。

(4) 横断時間

平均横断時間は、誤差が少ない事例もみられる一方で、最大 11 秒の差が生じている。最大横断時間は、12 秒の差が生じている。精度は、表-3 に示すとおり平均横断時間で 78.5%、最大横断時間で 80.9%という結果となった。横断時間の乖離は、目視では横断開始の判断基準となる静止および移動の区別が判断しやすいが、AI 計測では BoundingBox の位置座標の揺れが速度変化として現れること、交差点内の内側で信号待ちをする人が多くいたため、交差点侵入ラインを車道寄りに設置したことが要因と考えられる。改善方法としては、歩道から交差点侵入ラインまでの移動時間を推定すること、信号現示状況の活用などが挙げられる。

目視確認結果と誤差が生じているが、図-15 および図-16 に示すとおり、カメラを跨ぐ移動であっても軌跡を把握しており、②→④および④→②の斜め横断で横断時間が長くなる傾向を確認した。以上より、本研究で提案した手法によってスクランブル交差点における複雑な歩行者流動を計測できる可能性を示したと考える。



図-13 交差点の番号

表-2 属性判定 AI の検知精度

属性判定 AI	検知精度(対象人数)	
	適合率	再現率
男性	62.2% (23/37)	57.5% (23/40)
女性	56.5% (13/23)	41.9% (13/31)
子供	0% (0/36)	—
大人	97.1% (34/35)	50.7% (34/67)
高齢者	50.0% (2/4)	100% (4/4)



図-14 検知結果画像 (例)

表-3 横断パターン・横断時間計測の検知精度

横断パターン		横断人数 (人)			平均横断時間 (秒)			最大横断時間 (秒)		
		目視	AI	差	目視	AI	差	目視	AI	差
①	②	16	10	6	14	12	2	21	17	4
	③	11	10	1	16	12	4	29	26	3
	④	5	4	1	12	6	6	9	7	2
②	①	3	1	2	14	11	3	20	11	9
	③	13	14	1	14	13	1	34	27	7
	④	17	18	1	15	14	1	34	22	12
③	①	8	9	1	16	13	3	21	19	2
	②	24	26	2	14	11	3	23	21	2
	④	4	1	3	7	6	1	7	6	1
④	①	14	17	3	22	11	11	25	15	10
	②	28	24	4	21	19	2	41	41	0
	③	3	5	2	8	7	1	8	8	0
精度		91.7%			78.5%			80.9%		

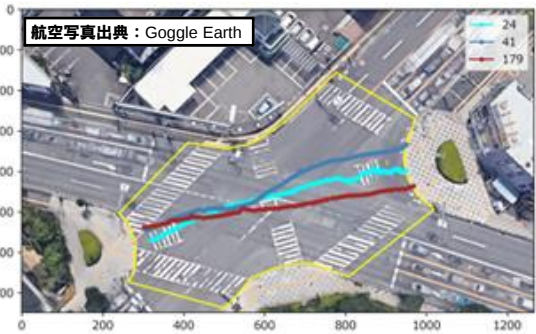


図-15 横断時間が 30 秒以上の歩行者の移動軌跡



図-16 図-15 の ID24 の歩行者の移動事例

5. おわりに

本研究では、交差点の横断時間計測における高度化・省力化を目的に、人物検知 AI およびトラッキング技術を用いた複数カメラの移動軌跡の計測手法を開発した。また、高槻市役所前交差点を対象とした実証実験を実施することで、その有効性を検証した。結果として、目視確認結果とのズレは生じたが、一定程度の精度は確認でき、現地での人手による交通量計測と比較して、調査時間やコストは削減できる可能性を示したと考える。本手法でスクリーニングした結果を目視確認することで、さらに計測結果の精度を高められると考える。ただし、本稿では 10 分程度の撮影データを用いたが、信号現示時間は曜日や時間帯によって変わる可能性もあるため、中期の検証が必要である。

今後は、AI の精度向上と併せ、カメラの設置高さが低い地点や歩行者交通量が多い地点などでの検証を実施する。属性判定 AI は、既往研究の AI モデルを使用した。が、車いすや白杖の方などのクラスを追加することにより高度な分析結果を得られると考える。本技術は、人間以外の移動軌跡把握にも適用可能なため、車両や野生動物の動線把握、建設現場での工事車両や工程管理などへの適用を検討する。さらに、計測した移動軌跡をデジタルツインで数値化することにより、現実に近い形で移動軌跡をサイバー空間上で確認することが可能となる。

謝辞：本研究は、カメラの設置や現場管理などにおいて高槻市にご理解およびご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 一般社団法人 交通工学研究会：平面交差の計画と設計 基礎編—計画・設計・交通信号制御の手引—, 2018.
- 2) AI を使い信号制御, 都内の渋滞対策 警視庁が全国初導入 (2024 年 2 月 10 日閲覧) : <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUE279YP0X20C23A9000000/>.
- 3) 高森秀司, 吉田龍人, 堀井大輔, 菊池恵和, 大久保順一: AI による人流解析結果を介した歩道空間の特性把握の可能性に関する研究, AI データサイエンス論文集, 4 巻, 2 号, pp.121-127, 2023.
- 4) 鳥海梓, 柳田温哉, 大口敬: 物体追跡技術を用いた街路の無信号交差点周辺における歩車錯綜の試行的分析, 生産研究, 76 巻, 1 号, pp.87-93, 2024.
- 5) Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A.: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 779-788, 2016.
- 6) YOLOv8: <https://docs.ultralytics.com/ja/tasks/detect/>.
- 7) 木村拓憲, 山脇正嗣, 西牟田祐介, 早見俊紀, 小川明人, 上野亜耶: 物体検知技術を活用した公共空間利用状況解析に関する研究, AI・データサイエンス論文集, 4 巻, 3 号, pp.83-89, 2023.
- 8) BoT-SORT: <https://github.com/NirAharon/BoT-SORT>.
- 9) Nir, A., Roy, O., Ben, B.: BoT-SORT: Robust Associations Multi-Pedestrian Tracking, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1-12, 2022.

AI-based Research on Measuring Complex Pedestrian Flow at Scramble Intersections Research on Complex Pedestrian Flow Measurement at Scramble Intersections

Yutaka UTSUNOMIYA, Naoki TAGASHIRA, Shotaro ABE,
Teruaki KITAGAWA, Masashi YAMAWAKI, Masaki YOSHIOKA

To address congestion at bottleneck intersections, pinpointing measures such as optimizing the signal indications and extending the right-turn lane have been implemented using the results of intersection traffic condition surveys. Scramble intersections are controlled with separate signals for pedestrians and vehicles. The challenge for traffic volume measurement has been to accurately measure pedestrian traffic, which moves in various directions. In the past, pedestrian traffic volume at scramble intersections was generally measured manually, which required a large number of personnel and costs for investigation and analysis. In this study, we developed a method to measure pedestrian traffic at intersections from multiple cameras using camera images, AI, and tracking technology. The developed method was applied to an experimental field, and the results showed that it can be used to measure pedestrian traffic and movement trajectories even when pedestrians move across cameras, and that it has the potential to be an advanced and labor-saving method for measuring pedestrian traffic and movement trajectories.