

駅改良のための構内における旅客の分布交通量推計手法

柴田 宗典* 石突 光隆* 対馬 銀河*

Estimation Method of Passenger OD Flow in Railway Station for Refinement Planning of Station

Munenori SHIBATA Mitsutaka ISHIZUKI Ginga TSUSHIMA

This study proposes an automatic passenger OD flow estimation method in railway station. The proposed method consists of movie processing applying AI for automatic counting method of cross-sectional flow volume and OD flow estimation model based on cross-sectional flow volume data. This study demonstrates that the developed automatic counting method of cross-sectional flow volume possibly count section flow volume with enough accuracy. Additionally, the developed OD flow estimation model applying Lagrangian relaxation problem can estimate OD flow with enough accuracy. Numerical experiments with use of cross-sectional flow counting data obtained by automatic ticket gate show that the proposed estimation method can be applied to OD estimation survey throughout a day in actual railway stations.

キーワード：駅改良計画，旅客流動調査，分布交通量，動画解析，AI，数理最適化

1. はじめに

駅改良計画を検討する際には、予め駅構内における旅客の分布交通量（何処から何処へ何人の人が移動しているのか）を把握する必要がある。例えば、図1に示す駅において黄色の箇所の混雑が課題となっているケースで、駅構内の分布交通量が把握できていれば、混雑箇所における往來人数（どちらの方向に何人の人が通過しているか。以下、「断面交通量」と呼ぶ。）の内訳を知ることができる。この例では、混雑箇所の断面交通量は乗降旅客（オレンジ色の線）とA線⇄B線の乗換旅客（青色の線）で構成されており、分布交通量から断面交通量の内訳を把握することで、乗降旅客が内訳の多くを占めるケース（図1上側）であれば案A（拡幅）が有力な改良案と判断できる。一方で、乗換旅客が内訳の多くを占めるケース（図1下側）であれば、案Aに加えて跨線橋の増設（案B）により乗換旅客の新たな動線を確認して混雑箇所の解消を図ることも改良案の選択肢と考えられる。このように、駅構内における旅客の分布交通量は、駅改良計画を検討する際に重要な基礎データとなる。

従来は、駅構内でのアンケート調査等による旅客の歩行経路調査や、特定の箇所における断面交通量のカウント調査等により、分布交通量が推計されてきた。このような調査は人手に頼る高コストな調査であるため、限られた日の朝ラッシュ時間帯等の一部の日・時間帯の分布交通量しか推計することができなかった。一方、近年の画像・動画解析技術の進歩は著しく、例えば防犯カメラで得られる動画の解析等のデジタル技術の活用により、

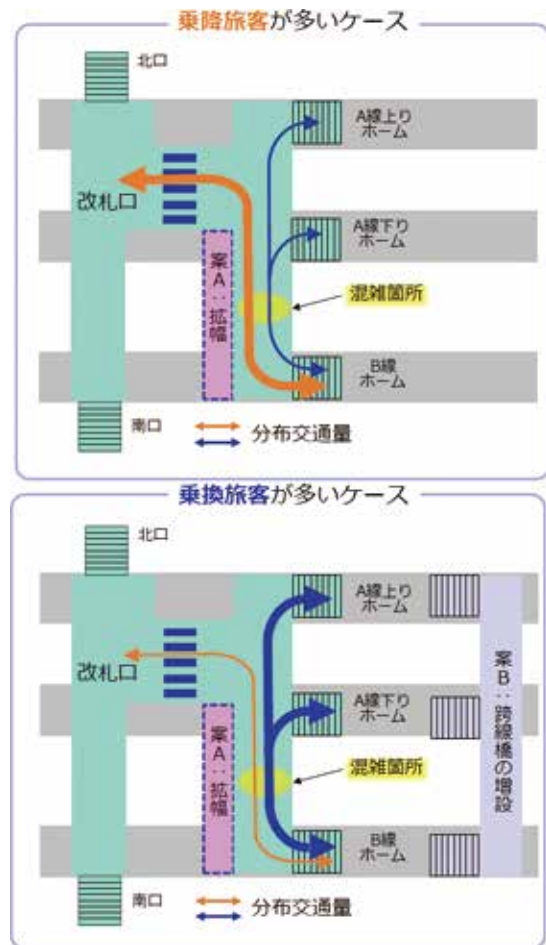


図1 駅改良計画における分布交通量の活用イメージ

分布交通量の把握に係る調査コストの削減に加え、継続的に推計される分布交通量に基づく駅改良計画の適正化も期待できる。将来的には、リアルタイムに断面交通量

* 構造物技術研究部 建築研究室



図2 分布交通量の自動推計手法の概念図

をモニタリングし、随時推計される分布交通量に基づいて旅客を個別に誘導することで、局所的な混雑の解消等による駅施設利用の適正化や、リアルタイムの旅客流動評価を実現できる可能性がある。

そこで本研究では、従来の人手に頼る調査に代わる手法として、Artificial Intelligence（人工知能、以下「AI」と呼ぶ。）による動画解析や数理最適化モデルを活用して駅構内の分布交通量を自動的に推計する手法を提案し、提案手法の適用性を検証することを目的とする。

2. 駅構内における分布交通量の自動推計手法

本研究で提案する分布交通量の自動推計手法の概念図を図2に示す¹⁾。本手法は、防犯カメラ等から得られる動画にAIによる動画解析を適用し、得られた座標データを自動的に処理することにより断面交通量を計測する「①断面交通量の自動計測」と、①で計測された各地点における断面交通量や自動改札機の通過人員データ等から数理最適化モデルにより分布交通量を推計する「②分布交通量の推計」で構成される。

本研究では、提案手法を構成する要素技術である「①断面交通量の自動計測」「②分布交通量の推計」について検討を行うとともに、実駅の自動改札機通過データ等を用いて提案手法全体としての適用性を検証する。

3. 断面交通量の自動計測に関する検討

3.1 被験者実験

防犯カメラ等の動画解析により断面交通量を自動的に計測する手法を検討するために、鉄道総研国立研究所内の駅シミュレータ（模擬駅舎）において、被験者実験を行った。具体的には、駅シミュレータ内に防犯カメラに見立てた8台のビデオカメラを設置した。ビデオカメラの設置位置と設置条件の模式図を図3、図4に示す。ビデオカメラは、2m四方の計測領域の中心を撮影する方

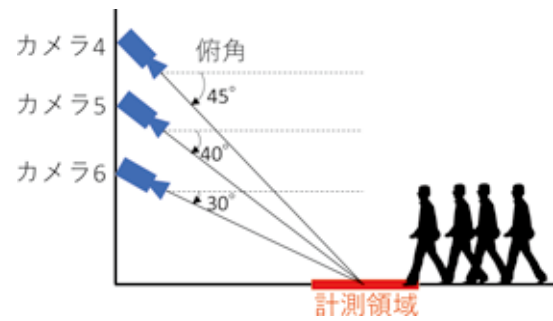


図3 俯角の定義

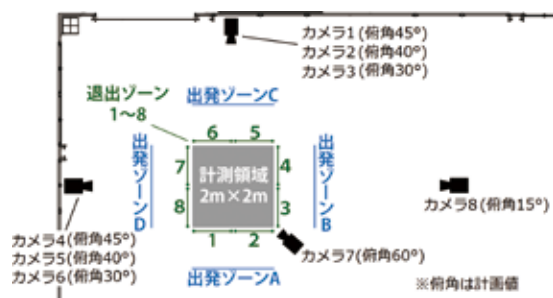


図4 ビデオカメラの設置条件等

向に向けて設置し、俯角を15°～60°の範囲で設定した。動画の出力は704×480pixel, 30frame/sec (fps)である。この実験環境において、最大48人の被験者により駅構内で想定される複数パターンの旅客流動を再現し、ビデオカメラで撮影した。被験者には出発ゾーンA～Dと退出ゾーン1～8を指定し、出発ゾーンから計測領域に直進した後に退出ゾーンに向かうよう教示して、一方向流、対向流、直交流、複雑な錯綜流等の全33パターンの旅客流動を再現した。

3.2 断面交通量の自動計測手法の構築

3.2.1 計測手法の概要

本研究では、AI人体骨格検出を活用して断面交通量を自動計測する手法を検討する。計測の手順を以下に示す。

① AI人体骨格検出による座標データの取得

AIにより静止画及び動画から人体の骨格を検出する技術であるOpen Pose²⁾を適用し、動画の各フレームにおいて人体の骨格を検出して、骨格の部位の位置座標データと検出精度を意味する「信頼度」を取得する(図5)。Open Poseでは人体25ヶ所のkeypoint(図6)の座標を検出するが、keypointごとに信頼度は異なり、検出されずに信頼度が0となるkeypointも存在する。そこで、試番1～33の全フレーム、全座標点の信頼度の平均値を算出し、最も信頼度が高く、カメラの設置条件による信頼度のばらつきが小さかったkeypoint-1の座標データを用いる。



図5 AI人体骨格検出の出力例

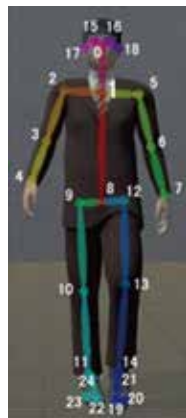


図6 keypoint

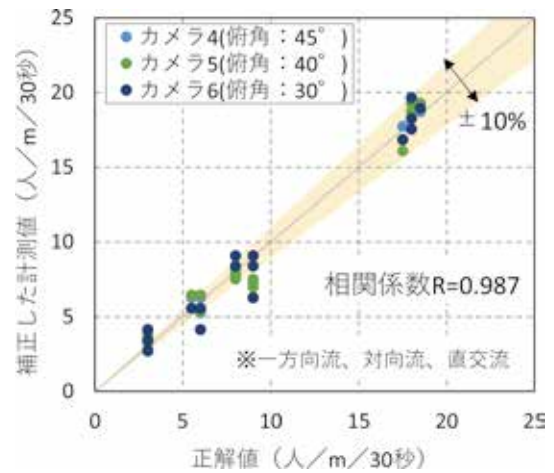


図8 断面交通量の計測精度（補正後）

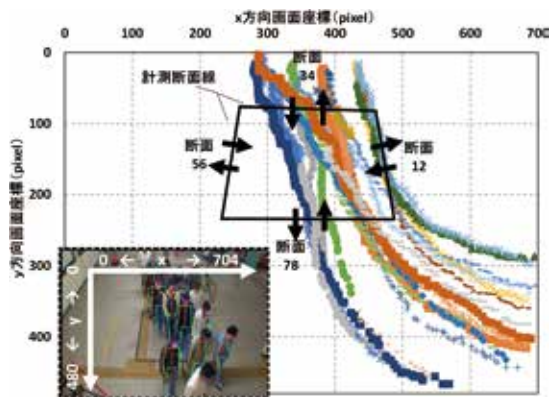


図7 歩行軌跡と計測断面の例

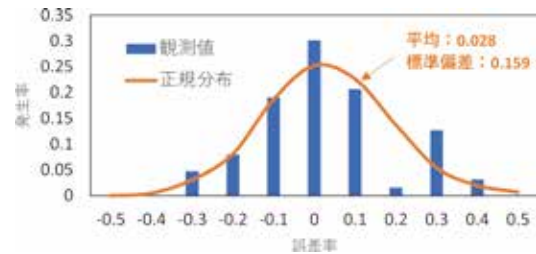


図9 計測誤差の発生分布と対応する正規分布

② 最近傍検索による歩行軌跡の抽出

動画の各フレームにおける keypoint-1 の座標から、最近傍検索により人物の歩行軌跡を抽出し、断面交通量の計測を行う。最近傍検索では、進んだフレーム数 $n \times 1$ フレームあたりの検索距離 ls (pixel) 以下の最近傍の座標を同一人物と見做す。検索は対象フレームの次のフレームから順に、条件を満たす座標が見つかるフレームまで検索を行い、設定した最大フレーム数 n まで検索を繰り返す。最近傍検索を全ての座標で行い、同一人物と見做された座標をつないだ歩行軌跡と、計測領域に合わせて設定した4本の計測断面線の交差数と交差方向から断面交通量を計測する(図7)。本研究では、断面交通量を精度良く計測できる設定値を見出すため、設定距離を3~15pixel、最大フレーム数を1~30の間で変化させて計測精度を比較した。その結果、最も計測精度が良好であった設定距離=10pixel、最大フレーム数=3を設定値として、以降の分析を進める。

3.2.2 計測精度の検証

駅構内の階段、エスカレーター昇降口付近等において最も多く発生すると考えられる一方向流、対向流、直交流を正面もしくは背面から撮影したカメラ4~6について、計測値と正解値の関係を図8に示す。ここで「正

解値」とは、ビデオカメラの動画から人手によるカウントで計測した断面交通量を指す。また計測値は、カメラ毎に得られる計測値と正解値の回帰式により、計測値から正解値を推定し、これを「補正した計測値」とする。補正した計測値と正解値との相関係数は $R=0.987$ となっており、概ね $\pm 10\%$ の誤差の範囲で計測できていることが分かる。以上より、俯角が $30^\circ \sim 45^\circ$ のビデオカメラで一方向流、対向流、直交流を対象とする場合に、本研究で構築した手法により、良好な精度で断面交通量が計測できると言える。

ここで、正解値に対する計測誤差の大きさを示す「誤差率 = (補正した計測値 - 正解値) / 正解値」の発生分布と、発生分布から算出した統計量(平均0.028, 標準偏差0.159)に従う正規分布を図9に示す。これより、計測された誤差率の発生分布は概ね正規分布で近似できるため、以降での検証では、平均0.028, 標準偏差0.159の正規分布に従って断面交通量の計測誤差が発生すると想定する。

4. 分布交通量推計モデルの開発

本研究では、防犯カメラ等の動画を解析して得られる駅構内の各箇所の断面交通量データから分布交通量を推計するモデルを検討する。ここで、駅構内の歩行者ネッ

トワークが複雑化すると1つの地点間に複数の経路が存在するケースが想定される。そこで、複雑な歩行者ネットワークにも対応可能な「経路交通量型エントロピー最大化モデル」を開発する。

4.1 モデルの定式化

「エントロピー」とは、統計力学分野においてデータの「ばらつき（乱雑さ）」を示す尺度であり、エントロピーが大きい程、発生しやすい事象であると解釈される。Henk, J. V. et. al.³⁾は、この概念を交通分野に当てはめ、分布交通量を推計する数理最適化モデルである「エントロピー最大化モデル」を開発している。このモデルでは、断面交通量の計測値と推計値が一致するとの制約条件を満たしつつ、出発地点・到着地点間の各交通量の数値の組み合わせの「ばらつき」が最大である状態が、最も発生確率が高い分布交通量であるとして、断面交通量から分布交通量が推計される。ここで*i*は出発地点の番号、*j*は到着地点の番号、*c*はリンク番号、*O_i*は出発地点*i*から出発する全交通量である発生交通量、*D_j*は到着地点*j*に到着する全交通量である集中交通量、*T_{ij}*は地点*i-j*間の分布交通量、*V_c*はリンク*c*の断面交通量、*M_{ij^c}*は地点*i-j*間の交通がリンク*c*を通過する場合に1、通過しない場合に0をとる変数とする。エントロピー最大化モデルは、式(1)～式(4)の数理最適化問題として定式化される。

$$\min_{T_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } O_i = \sum_{j=1}^m T_{ij} \quad (2)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (3)$$

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} M_{ij}^c \quad (4)$$

本研究では、エントロピー最大化モデルを経路交通量推計問題として再定式化する。ここで*k*は経路番号、*f_{ij^k}*は地点*i-j*間の経路*k*の経路交通量とする。分布交通量と経路交通量との間には、式(5)の関係が成り立つ。

$$T_{ij} = \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (5)$$

経路交通量と発生交通量、集中交通量の間には表の整合性を満たすための制約条件は、*O_i* = $\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k$ (*j* = 1, ..., *m*, *k* = 1, ..., *r*), *D_j* = $\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k$ (*i* = 1, ..., *n*, *k* = 1, ..., *r*) である。ここで式(5)を式(1)～式(3)に代入し、式(6)～式(8)の最適化問題を定義する。

$$\min_{f_{ij}^k} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \quad (6)$$

$$\text{Subject to } O_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (7)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (8)$$

ここで、変数 *M_{ij^c}* を、ノード *i-j* 間の経路 *k* を通る交通がリンク *c* を通過する場合は *M_{ij^c}* = 1、それ以外は *M_{ij^c}* = 0 と定義すると、*V_c* は式(9)となる。

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ij}^c \quad (9)$$

式(9)を制約条件に加えると、本問題は式(10)～式(13)の最適化問題として定義できる。

$$\min_{f_{ij}^k} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \quad (10)$$

$$\text{Subject to } O_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (11)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (12)$$

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ij}^c \quad (13)$$

なお、1ODに1経路のみが存在する場合は、式(10)～式(13)において *k* ∈ {*k* = 1} とすることと等価である。

ここで、目的関数である式(10)にラグランジュ乗数を乗じた制約条件式(11)～式(13)を取り込むと、ラグランジュ緩和問題の式(14)が得られる。

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_i, \gamma_j, \beta_c} & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_i (O_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k) \\ & + \sum_{j=1}^m \gamma_j (D_j - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k) \\ & + \sum_{c=1}^p \beta_c (V_c - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ij}^c) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、*λ_i*、*γ_j*、*β_c* はラグランジュ乗数である。本研究では、このモデルを「経路交通量型エントロピー最大化モデル」と呼び、ラグランジュ緩和問題の有力な解法として知られる劣勾配法⁴⁾により最適解の近似解を探索する。

4.2 実駅を対象とした適用性の検証

4.2.1 検証対象

2面4線のホームを有し、自社の2路線が乗り入れるため改札内の乗換旅客が存在する大都市圏のA駅（乗降旅客数：約18,000人/日）、B駅（乗降旅客数：約34,000人/日）を検証対象とする（図10）。それぞれの駅では、出入口、昇降口において防犯カメラもしくは仮設したビデオカメラの動画解析により断面交通量が自動計測されるものと想定する。また自動改札機では、方向別の断面交通量が計測される。

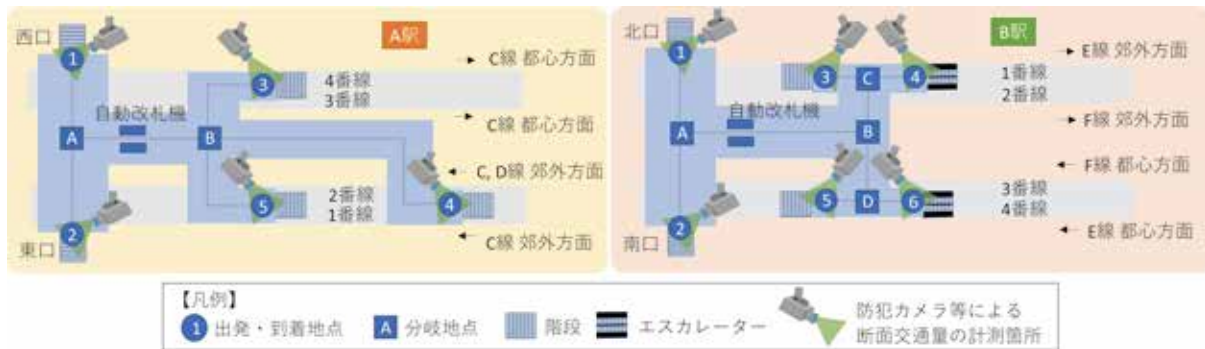


図 10 検証対象駅において想定した歩行者ネットワーク（駅舎等は概略図）

4.2.2 検証方法

本研究では、以下の手順で提案手法全体としての実駅への適用性の検証を行う。

- ① 経路交通量 f_{ij}^* を自動改札データ（方向別通過人員データ）により作成し、検証用の正解分布交通量データとする。
- ② 正解分布交通量データから各地点の発生交通量、集中交通量、リンクの断面交通量を算定する。実際には、これらは防犯カメラ等の動画解析や自動改札機等により計測されるデータである。
- ③ 防犯カメラ等の動画解析により断面交通量が自動計測される箇所では、図9の正規分布に従って計測誤差が発生すると想定し、図9の正規分布に従う乱数により計測誤差を発生させ、上記の手順②で算定した断面交通量に加味することで、3.2節で構築した手法による断面交通量の自動計測値とする。一方、自動改札機で計測される断面交通量は、ほぼ正確な数値であると考えられることから、手順②で算定した断面交通量そのものを計測値として用いる。
- ④ 上記の手順③で算定した計測値を経路交通量型エントロピー最大化モデルに入力し、経路交通量 f_{ij}^* を推計する。正解分布交通量と推計分布交通量とを突き合わせ、推計精度を検証する。

検証手順①では、A 駅、B 駅の自動改札機で 2020 年のある 1 日（平日）に実際に記録された方向別の通過人員データをもとに、以下の仮定等に従って時間帯別の正解分布交通量データを作成する。

- ・ 駅勢圏の状況から出入口の利用者を仮定する。A 駅では出入口の利用者を西口：東口=0.3：0.7、B 駅では北口：南口=0.7：0.3 とする。
- ・ 1 日の時間帯を朝時間帯（時間帯No①～⑩）、夜時間帯（時間帯No②②～③③）、その他時間帯に区分し、入場者・出場者別に方面別の利用率を仮定する（表 1）。
- ・ A 駅の 1、2 番線ホームの 2 つの昇降設備である地点 4、地点 5 の階段の利用者は、改札口からの距離を勘案し地点 4：地点 5=0.3：0.7 と仮定する。

表 1 利用率の仮定（A 駅、B 駅共通）

時間帯	入場（乗車）		出場（降車）	
	都心方面 へ	郊外方面 へ	都心方面 より	郊外方面 より
朝	0.8	0.2	0.5	0.5
夜	0.5	0.5	0.8	0.2
その他	0.5	0.5	0.5	0.5

- ・ B 駅の各ホームの階段とエスカレーターの利用率は階段：エスカレーター=0.4：0.6 と仮定する。
- ・ 同一ホームの昇降設備間の移動はないものとする（A 駅の地点 4・地点 5 間など）

以上の仮定から、自動改札データ（方向別通過人員データ）を按分して分布交通量データを作成し、これを正解分布交通量データとする。なお、自動改札データでは捕捉できない自由通路の通行者数と改札内の乗換旅客数は、入場者数／出場者数に比例していると想定し、乱数により設定する。

4.2.3 検証結果

A 駅では各 33 時間帯、B 駅では各 32 時間帯の正解分布交通量データを作成し、提案手法により分布交通量を推計して、正解分布交通量と推計分布交通量を突き合わせて、推計精度を検証した。ここでは、駅施設のキャパシティを計画する際に分布交通量のピーク値を正確に把握することが重要であるとの観点から、各時間帯において正解分布交通量が最大値をとる出発地点・到着地点間について、正解分布交通量と推計分布交通量を比較する（図 11、図 12）。A 駅、B 駅ともに、断面交通量の計測誤差を加味しても、一日にわたって、概ね良好な精度で分布交通量のピーク値を推計できている。また、図 13 に A 駅の時間帯⑩における正解分布交通量と推計分布交通量の関係を例示する。分布交通量全体も概ね良好な精度で推計できていることが示されている。以上より、開発した手法により、終日にわたって分布交通量を良好な精度で推計できることが分かる。

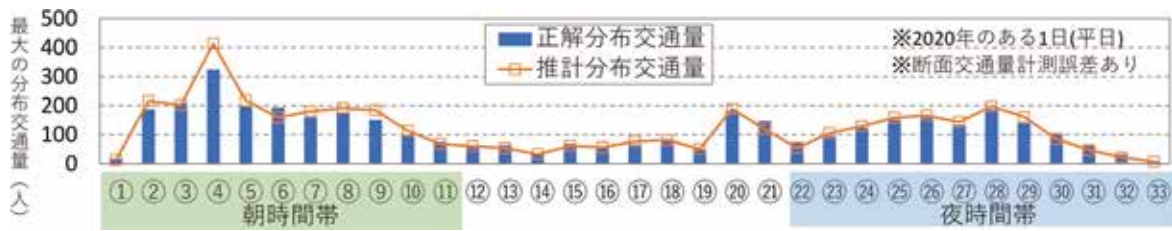


図 11 分布交通量が最大の出発地点・到着地点間における推計精度 (A 駅)

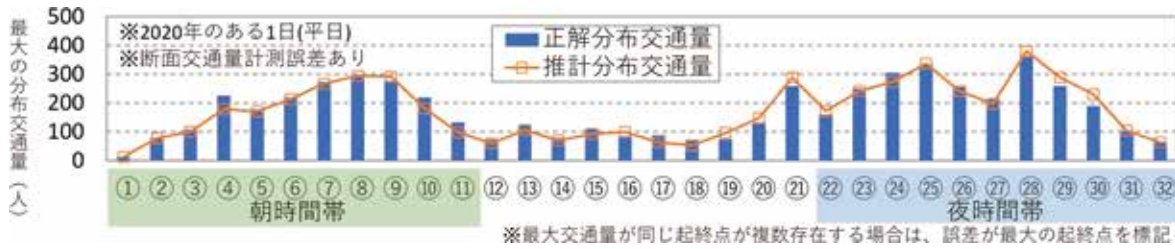


図 12 分布交通量が最大の出発地点・到着地点間における推計精度 (B 駅)

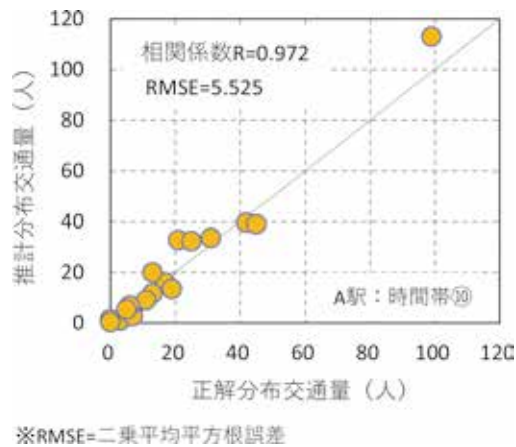


図 13 正解分布交通量と推計分布交通量の関係 (A 駅：時間帯⑩)

5. まとめ

本研究では、駅改良計画を検討する際の基礎データとなる駅構内における分布交通量の把握について、アンケート調査やカウント調査等の従来の人手に頼る調査に代わる手法として、AIによる動画解析と数理最適化モデルにより分布交通量を自動推計する手法を提案し、提案手法の実駅への適用性を検討した。断面交通量の計測では、動画に対してAI人体骨格検出と座標処理を行うことで自動的に断面交通量を計測する手法を開発し、良好な精度で断面交通量が計測できる条件等を示した。自動計測した断面交通量から分布交通量を推計するモデルについては、複雑なネットワークにも対応可能な「経路

交通量型エントロピー最大化モデル」を開発した。更に、大都市圏に実在する2駅を対象として、分布交通量の推計精度の検証を行った結果、断面交通量の計測誤差を加味しても、終日にわたって良好な精度で分布交通量が推計できることを確認した。以上より、本研究で開発した手法を駅構内における分布交通量調査に適用できることが示された。

本手法により、駅構内の分布交通量の把握に係る大規模調査のコスト削減等が期待できるため、今後は、実駅で取得したデータによる断面交通量の計測精度の向上や旅客分布推計システムの開発等を行い、本手法の実駅での導入を目指す。

文献

- 1) 柴田宗典, 石突光隆, 対馬銀河: 断面交通量に基づく OD 交通量推計モデルの比較分析, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.24, pp.57-64, 2020
- 2) Zhe C., Tomas S., Shih-En W., Yaser S., "Realtime Multi-Person 2 D Pose Estimation using Part Affinity Fields", 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1302-1310, 2017.
- 3) Henk, J.V. and Luice, G.W., "The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts", Transportation Research, 14B, No.3, pp.281-293, 1980.
- 4) 宮本裕一郎: 数理最適化入門 (3) ラグランジュ緩和と劣勾配法 (チュートリアル): 応用数理, 23 巻, 3 号, pp. 129-134, 2013