

滞在人数を考慮した経路別人数の推定

Route Traffic Flow Estimation by Observing Staying People

清水 仁^{*1}
Hitoshi Shimizu松林 達史^{*2}
Tatsushi Matsubayashi田中 悠介^{*2}
Yusuke Tanaka岩田 具治^{*1}
Tomoharu Iwata澤田 宏^{*1*2}
Hiroshi Sawada^{*1}日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratory^{*2}日本電信電話株式会社 サービスエボリューション研究所
NTT Service Evolution Laboratories

Estimating the number of people traveling by route is an important task in transportation research. We propose a new method that utilizes the number of people staying and passing to estimate the number of people traveling by route with high accuracy. By using artificial data, we demonstrate that the error rate of the proposed method is smaller than the conventional method. In addition, the analysis of real-world data are shown.

1. はじめに

交通分野において、経路を移動する人数を推定することは重要な課題である。推定された経路別人数は、道路や鉄道の設備計画などに利用される。また、経路別人数を人流シミュレータの入力として用いることで、雑踏警備や誘導計画を検討することができる[山下 16]。さらに、経路別人数には起点(Origin)と終点(Destination)に加えて途中の経由点の情報も含まれているため、経路選択モデルの検証に用いることができる[安藤 11]。

既存研究においては四段階推定法[大蔵 93]に基づいて、道路の通過人数を用いて OD 交通量(起点から終点までの交通量)を推定してから経路選択率で経路別の交通量を配分することが多かった[朝倉 94]。しかし既存手法では、経路選択率の推定が困難という課題と、観測できるエッジが少ない場合に精度が悪いという問題があった。

本研究では、通過人数に加えて滞在人数を用いて経路別人数を推定する手法を提案する。提案手法では、移動経路に依存して起点と終点で滞在人数が増減するという関係を利用し、観測された通過人数と滞在人数の両方に整合するような経路別人数を推定する。OD 交通量の推定のプロセスが不要であり、また、解の制約条件が追加されるため、推定精度が向上することが期待できる。通過人数は目視やカメラ[大西 15]やレーザーで観測されるが、建物の出入口や道路以外の空間では境界を判別しづらいため観測が困難となる。一方、滞在人数の観測にカメラを用いる場合には境界を判別しやすいため、通過人数よりも容易に取得できる場合もある。

すでに近年、滞在人数のデータを交通量推定に用いる手法が開発されている[金森 15]。しかし、金森らは交通手段別 OD 交通量を推定することを目的としているのに対して、本研究では歩行者の経路別人数を推定することを目的としている。

2. 問題設定

各記号の定義を表 1 に示す。

表 1: 各記号の定義

記号	説明
G	道路網を表現する有向グラフ $G(V, E)$
L	道路網 G のエッジの数. $\ell \in \{1, \dots, L\}$
M	道路網 G のノードの数. $m \in \{1, \dots, M\}$
r_i	i 番目の経路
K_i	r_i に含まれるノードの数
I	経路の数. $i \in \{1, \dots, I\}$
T	観測時刻の数. $t \in \{0, \dots, T\}$
$Y_{t,i}$	時刻 $t-1$ から t に経路 r_i を移動した人数. 経路別人数.
$X_{t,\ell}$	時刻 $t-1$ から t にエッジ e_ℓ を通過した人数. 通過人数.
$S_{t,m}$	時刻 t にノード v_m に滞在している人数. 滞在人数.
$D_{t,m}$	$S_{t,m} - S_{t-1,m}$. 滞在人数増減.

2.1 道路網と経路

道路網を、交差点をノード集合 V 、道路^{*1}をエッジ集合 E とする有向グラフ $G(V, E)$ で表現する。 m 番目のノードを $v_m \in V$ 、 ℓ 番目のエッジを $e_\ell \in E$ と表記する。時刻 $t-1$ から t までの時間帯にエッジ e_ℓ を通過した人数を通過人数 $X_{t,\ell}$ とし、時刻 t にノード v_m に滞在している人数を滞在人数 $S_{t,m}$ とする。歩行者はノードからノードまで移動するものとし、全ノード間の経路候補を列挙したときの i 番目の経路を r_i とする。 r_i の k 番目の要素 $r_i(k)$ はノードである ($r_i(k) \in V$ 。ただし $k \in \{1, \dots, K_i\}$ とする)。時刻 $t-1$ から t に経路 r_i を移動する歩行者の人数を経路別人数 $Y_{t,i}$ とする^{*2}。本研究ではこの経路別人数 $Y_{t,i}$ の推定を目的とする。

2.2 通過人数と滞在人数の関係

通過人数は、特定の「時間帯」について観測されるが、滞在人数は、特定の「時刻」で観測されるので、対応づけるために、滞在人数増減 $D_{t,m} = S_{t,m} - S_{t-1,m}$ を用いる。ノード v_m に接続する全てのエッジの通過人数を観測できる場合には、滞在人数増減は「ノードに流入する通過人数の和」と「ノードから流出する人数の和」の差と一致する。そのため、滞在人数の観

^{*1} 有向グラフで表現するため同一の道路でも方向別に異なるエッジとする。

^{*2} 歩行には移動時間がかかるため、時刻 $t-1$ から t までの時間帯に所望の移動を完了できるとは限らない。そのため、1 人の歩行者の軌跡が複数の時間帯に分断された複数の移動となる場合がある。

連絡先: 清水仁, NTT コミュニケーション科学基礎研究所, 京都府相楽郡精華町光台 2-4, 0774-93-5112, shimizu.hitoshi@lab.ntt.co.jp

測によって追加される情報がないので推定精度は向上しない。そこで、通過人数の観測が不完全な場合に、滞在人数を利用して精度向上させることを検討する。

3. 手法

3.1 既存手法

通信分野においては、通信リンクの通信量から地点間の通信量を推定するために、交流トラフィック推定技術が開発されている [Zhang 03][植松 15]。我々はこの技術を交通分野に適用した手法を提案した [清水 17]。以下では [清水 17] に沿って既存手法を説明する。

各時間帯の中では、各エッジの通過人数はそのエッジを通過する経路別人数の和となる。すなわち、エッジ e_ℓ を通過する経路 $r_i (i: e_\ell \in r_i)$ を用いて、

$$X_{t,\ell} \simeq \sum_{i: e_\ell \in r_i} Y_{t,i} \quad (1)$$

が成り立つ。ここで、 X と Y の関係を整数行列 $A \in \mathbb{Z}^{L \times I}$ を用いて、

$$A_{\ell,i} = \begin{cases} 1 & \text{エッジ } e_\ell \text{ が経路 } r_i \text{ に含まれるとき} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

と表すと、

$$X \simeq AY \quad (3)$$

が成り立つ。この A をルーティング行列と呼ぶ [Zhang 03]。

各時間帯において通過人数 X が与えられたとき、式 (3) をなるべく満たすように以下の目的関数 (4) を最小化することで、経路別人数 Y を推定する。

$$\sum_{\ell=1}^L \left| \sum_{i=1}^I A_{\ell,i} Y_{t,i} - X_{t,\ell} \right|^2 + \lambda_1 \sum_{i=1}^I |Y_{t,i}|^2 \quad (4)$$

第2項は、登場する歩行者の人数を小さくする目的で、追加している [松村 14]。短距離の移動をする人よりは長距離の移動をする人のほうが出現しやすいという経験則に基づいており、この項を追加することで安定した解を得ることができる。

3.2 提案手法

本研究では滞在人数の観測を利用できるように、上記の既存手法を拡張する。各ノードの滞在人数は、そのノードに到着する人数とそのノードから出発する人数との差だけ増減する^{*3}ため、ノード v_m を先頭または末尾に含む経路 $r_i (i: v_m \in r_i)$ を用いて、

$$D_{t,m} \simeq \sum_{i: v_m = r_i(K_i)} Y_{t,i} - \sum_{i: v_m = r_i(1)} Y_{t,i} \quad (5)$$

が成り立つ。ここで、 D と Y の関係を整数行列 $B \in \mathbb{Z}^{M \times I}$ を用いて、

$$B_{m,i} = \begin{cases} 1 & \text{経路 } r_i \text{ の末尾が } v_m \text{ のとき} \\ -1 & \text{経路 } r_i \text{ の先頭が } v_m \text{ のとき} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

^{*3} 経路の先頭と末尾以外にそのノードが含まれる場合は、そのノードに流入し、かつ、流出するので、滞在人数の増減には影響しない。



図 1: 歩行者道路網の構成。数字はノード ID を表す。四角(緑)のノードは滞在人数を観測した箇所を示す。地図 [OSM] に重ねて位置関係を示している。「駅」は JR 新宿駅、「ビル」は NTT ドコモ代々木ビルを示す。

と表すと、

$$D \simeq BY \quad (7)$$

が成り立つ。この B を滞在行列と呼ぶことにする。

各時間帯において通過人数 X と滞在人数増減 D が与えられたとき、式 (3) と式 (7) の両方をなるべく満たすような解を求めたい。そこで式 (4) の代わりに、以下の目的関数 (8) を最小化することで、経路別人数 Y を推定する。

$$\sum_{\ell=1}^L \left| \sum_{i=1}^I A_{\ell,i} Y_{t,i} - X_{t,\ell} \right|^2 + \lambda_1 \sum_{i=1}^I |Y_{t,i}|^2 + \lambda_2 \sum_{m=1}^M \left| \sum_{i=1}^I B_{m,i} Y_{t,i} - D_{t,m} \right|^2 \quad (8)$$

ハイパーパラメータ λ_1, λ_2 は、予備実験で観測との誤差が最小になるように調整した値を用いる。

4. データセット

4.1 道路網

東京オリンピック・パラリンピック 1000 日前「YOYOGI CANDLE 2020」のイベントで、新宿駅南口周辺に歩行者が集まった際に周辺の道路網の通過人数と滞在人数を測定した。道路網は、観測箇所を含む最低限の構造になるように、ノード 10 個、有向エッジ 18 個の有向グラフとした (図 1)。経路 r_i は、同一地点が最大 1 回しか現れない経路に限定して列挙した。今回の道路網では起点と終点によって経路が一意に決まるため、 $Y_{t,i}$ は OD 交通量に対応する。

4.2 人工データ

今回の観測では経路別人数を観測しなかった。そこで、以下の手順で経路別人数が得られる人工データを生成した。時間帯の数 T は 42 個とし、各時間帯に計 500 人が移動開始する。起点の選択確率と終点の選択確率はそれぞれ多項分布に従い、どちらの多項分布も $\alpha = 0.8$ のディリクレ分布に従って生成する。生成する歩行者の起点と終点は選択確率に従って決めるが、起点と終点とが同一ノードとなった場合は、起点と終点の

表 2: 実データの推定の誤差

手法	NAE _X	NAE _D	NAE _X + NAE _D
既存手法	0.013	0.550	0.563
提案手法	0.066	0.000	0.066

選択をやり直した。上記の手順で経路別人数 Y を生成してから、式 (3) と式 (7) を用いて通過人数 X と滞在人数増減 D を求めた。乱数のシードを変えて 100 個のデータセットを作成した。

4.3 実データ

道路網上では全ての有向エッジにおいて 1 分間隔で通過人数を観測した。また、3 個のノード（イベントを観覧できるエリアに相当する）において約 5 分間隔で滞在人数を観測した。通過人数と滞在人数は、2017 年 11 月 29 日の 18 時から 21 時 30 分まで観測した。通過人数と滞在人数の観測間隔を揃えるため、通過人数を合計して 5 分間隔の時系列データを作成した。

5. 実験結果

5.1 人工データ

人工データを用いて経路別人数推定精度の評価を行った。評価尺度として、以下の標準化絶対値誤差 (normalized absolute error, NAE) を用いた。

$$NAE_Y = \frac{\sum_t \sum_i |\hat{Y}_{t,i} - Y_{t,i}|}{\sum_t \sum_i |Y_{t,i}|} \quad (9)$$

ただし、 $\hat{Y}_{t,i}$ は $Y_{t,i}$ に対する推定値である。

通過人数の観測エッジ数は 1 本から 18 本まで変化させた。通過人数の観測対象外のエッジは、ランダムに選択した。また滞在人数の観測箇所は、実データと同一の 3 個のノードとした。図 2 にそのときの NAE_Y を示す。18 本の場合は、滞在人数の観測の有無によって誤差は変わらない。一方、通過人数の観測エッジが 1 本以上欠損している場合は、滞在人数の観測を利用した提案手法のほうが誤差が小さくなった。すなわち、通過人数の観測が不完全な場合には、滞在人数の観測値と整合するように解を求めることで、経路別人数の推定精度が向上すると言える。

しかし通過人数の観測が完全な場合でも誤差は 0.5 程度であり、十分小さいとは言えない。これは問題設定が不良設定問題であり、未知の変数の数に対して制約条件の数が少ないため避けられない誤差が残っていると考えられる。もし各ノードでの出発人数や到着人数などを観測して制約条件を追加できれば、さらに誤差を小さくことができるだろう。

5.2 実データ

実データに対して提案手法を適用して求めた経路別人数 $\hat{Y}$ から、通過人数 $\hat{X} = A\hat{Y}$ と滞在人数増減 $\hat{D} = B\hat{Y}$ 、滞在人数 $\hat{S}_{t,m} = S_{0,m} + \sum_{t'=1}^t \hat{D}_{t',m}$ を求めて、推定結果が観測とほぼ整合していることを確認した (図 3, 4)。一方既存手法では、通過人数の観測には一致するが、滞在人数増減の観測には一致しない推定結果となった。観測との誤差の評価尺度として、式 (9) と同様に NAE_X と NAE_D を定義して、NAE_X + NAE_D を用いると、提案手法は既存手法よりも大幅に推定精度が向上していることがわかる (表 2)。

提案手法で推定した経路別人数を、起点と終点で集計した結果を図 5 に示す。起点、終点、ともにノード ID が 1 または 7 のノードである歩行者が多かった。これらは新宿駅に近

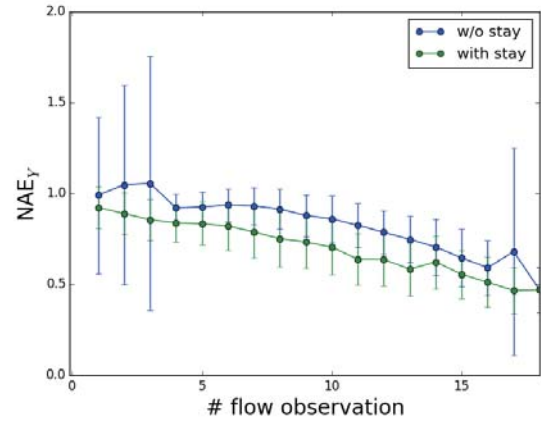


図 2: 滞在人数の有無と推定誤差の関係。横軸は通過人数を観測するエッジの数。縦軸は誤差 NAE_Y。青と緑はそれぞれ、提案手法と既存手法を示す。データセット 100 個について、平均値をプロットした。エラーバーは標準偏差を示す。

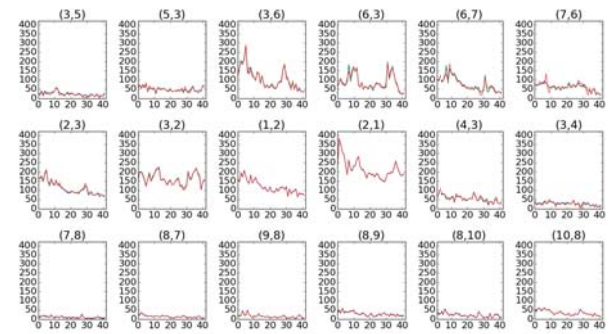


図 3: 通過人数の観測との誤差。青線が観測値 X 、緑線が滞在人数を考慮しない推定値 $\hat{X}$ 、赤線が滞在人数を考慮した推定値 $\hat{X}$ を示す。ただし青線と緑線は重なっているため 1 本に見える。

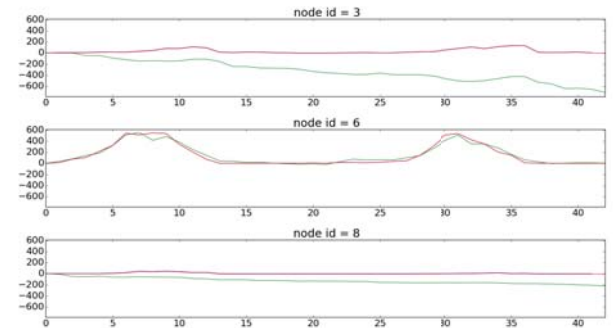


図 4: 滞在人数の観測との誤差。青線が観測値 S 、緑線が滞在人数を考慮しない推定値 $\hat{S}$ 、赤線が滞在人数を考慮した推定値 $\hat{S}$ を示す。ただし青線と赤線は重なっているため 1 本に見える。

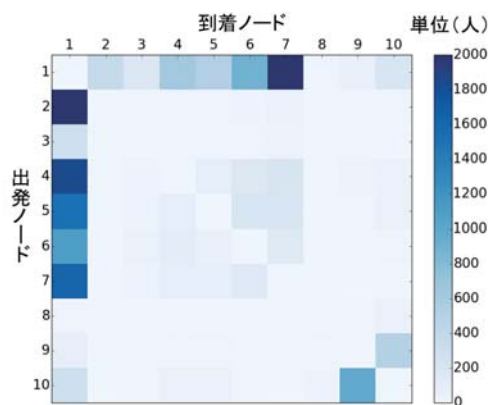


図 5: 歩行者の起点と終点の推定結果. 210 分間の推定結果を経路別に合計した値をヒートマップで表示した.

いノードであり、駅の利用者が多数観測されていると考えられるため、直感と整合した妥当な結果が得られたと言える。

6. まとめ

本研究では、観測データから経路別人数を推定する問題に取り組んだ。滞在行列を用いて滞人数の観測を推定に利用することで、推定精度を向上させられることが人工データの実験によってわかった。また、実データにおいて経路別人数の推定をすることで、イベントを開催した時間帯の人流を分析した。今後は、観測値にノイズが含まれる場合の推定精度に与える影響の調査や、得られた経路別人数をもとに将来の交通量を予測できるモデルの開発に取り組んでいきたい。

謝辞

「YOYOGI CANDLE 2020」のイベントにおける通過人数、滞人数の測定には、株式会社 NTT ドコモの小田哲様、岡田佳之様にご協力いただき実現することが出来ました。ここに深謝します。

参考文献

- [OSM] OSM, : OpenStreetMap: <https://openstreetmap.jp/>
- [Zhang 03] Zhang, Y., Roughan, M., Duffield, N., and Greenberg, A.: Fast accurate computation of large-scale IP traffic matrices from link loads, in *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, Vol. 31, pp. 206–217 ACM (2003)
- [安藤 11] 安藤 正幸, 高山 純一, 中山 晶一郎: 交通流観測結果による Logit 型経路選択モデルの検証, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 67, No. 5, pp. 67.I.435–67.I.453 (2011)
- [金森 15] 金森 亮, 水野 敬太, 野田 五十樹, 中島秀之: 滞留人口データを利用した交通手段別 OD 交通量推計手法の提案, 研究報告知能システム (ICS), Vol. 2015, No. 8, pp. 1–6 (2015)

[山下 16] 山下 倫央, 松島 裕康, 野田 五十樹: 屋外大規模イベントの流動制御に向けた動的群集誘導モデルの構築, 人工知能学会全国大会オーガナイズドセッション「OS-5 交通・移動・物流と AI (2)」 (2016), 1H5-OS-05b-2

[松村 14] 松村 龍太郎, 土屋 利明, 高橋 玲: 2 次計画法による交流トラヒック推定法 (B-14. 情報通信マネジメント, 一般セッション), 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol. 2014, No. 2, p. 344 (2014), B-14-9

[植松 15] 植松 芳彦, 鎌村 星平, 杉山 隆太, 武田 知典, 宮村 崇, 笹山 浩二: 交流トラヒック推定技術の大規模サービス統合 IP 網への適用性, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 98, No. 3, pp. 255–265 (2015)

[清水 17] 清水 仁, 大塚 琢馬, 岩田 具治, 澤田 宏, 上田 修功: 人流シミュレーションにおけるエージェントパラメータの推定, 第 20 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2017) (2017), D2-50

[大西 15] 大西 正輝, 山下 倫央, 星川 哲也, 佐藤 和人: 人の流れの計測とシミュレーションによる避難誘導の伝承支援—新国立劇場における避難体験オペラコンサートを例に一, 人工知能学会合同研究会知識・技術・技能の伝承支援研究会 (2015), SIG-KST-026-06

[大蔵 93] 大蔵 泉: 交通工学., 土木系大学講義シリーズ, 初版, コロナ社 (1993)

[朝倉 94] 朝倉 康夫, 柏谷 増男, 西山 晶造: 観測リンク交通量を用いた道路網交通流の日変動推定とその信頼性分析への応用, 土木学会論文集, No. 482, pp. 17–25 (1994)