

環境曝露を考慮したルートプランニング手法の調査

A survey of route planning methods considering environmental exposure

李 令宇

Li Lingyu

岡山大学 太田研究室

Ohta Laboratory, Okayama University

概要 近年、旅行中の環境曝露に関する研究が多く行われている。本稿では旅行中の環境曝露を考慮したルートプランニング手法を調査する。暑熱曝露と大気汚染に関する曝露の軽減を考慮したルートプランニング手法では、熱中症リスクと大気汚染物質の吸入を軽減するルートを生成する。緑地を考慮したルートプランニング手法では緑の景色が豊かなルートを生成する。いずれの手法でも旅行者のニーズに応じて環境曝露を調整したルートを生成した。

1 はじめに

環境曝露とは、大気、水、土壌、植物など、人工的物質または自然物質などの環境要素との接触によって発生する曝露^{*1}を指し、人体に影響を与える。暑熱に関する曝露（暑熱曝露）は熱中症を引き起こす可能性があり、大気汚染物質に関する曝露は呼吸器に悪影響を与える。一方、緑地への曝露は身体的および精神的健康に有益であると指摘されている。本稿では、旅行者に環境曝露を考慮したルートを提案することで旅行中の健康被害の防止と健康増進につながると考え、環境曝露を想定したルート生成手法について調査し、今後取り組む熱中症リスクを減らすためのルートプランニング手法についての研究の方向性について考察する。

2 暑熱曝露の軽減を考慮したルートプランニング手法

2.1 概要

Rußig ら [1] は暑熱曝露の特徴に基づいた 2 段階のルートプランニング手法を提案して暑熱曝露量を軽減させるルートを生成した。彼らはまず、任意の時刻における出発地点から目的地までの暑熱曝露量が最も低いルートを求めた。その後、ユーザが示した条件に合わせてルートにおける暑熱曝露量が最も低くなるような出発時刻を決定した。

2.2 データ収集

地図データとして OpenStreetMap^{*2}のデータを利用した。気象データはドイツ気象局の Rheinstetten にある観測点の気温と湿度データを利用した。より詳しい気温分布を得るために、赤外線サーモグラフィ空撮デー

タセットも利用した。このデータセットは約 25km × 40km の領域内の気温を測定したものであり、解像度は 5,161 × 7,911 ピクセルである。実験で使用した気温データは、空撮データを用いて補正した観測気温である。補正された気温データセットは、赤外線サーモグラフィ空撮データセットのピクセルごとに分割され、各ピクセルに対して補正された気温が算出される。

2.3 ルート生成

道路ネットワークを無向グラフ $G = (V, E, wh)$ とする。ここで、 V は道路上の地点または交差点の集合であり、 E は辺の集合である。 $wh(e, t)$ は時刻 t における辺 e の暑熱曝露量であり、次の式によって定義される。

$$wh(e, t) = \sum_{c \in \text{Intersec}(e)} d_c \cdot h_c(t) \quad (1)$$

ここで、 $\text{Intersec}(e)$ は e と交差するピクセルの集合、 d_c は e とピクセル c が交差する長さ、 $h_c(t)$ は時刻 t におけるピクセル c の温熱指標^{*3}であり、この研究では気温と heat index^{*4}を用いる。辺 e を通過する過程において wh が変わらないと仮定すると、 wh を e のコストとしてダイクストラ法を適用してルートが生成できる。

2.4 出発時刻の決定

一日の中で最も暑熱リスクの高い時間帯は昼頃であり、早朝と夕方の暑熱リスクが低いとされる。そのため、出発時刻を調整することで暑熱曝露を軽減させることが可能になる。Rußig らは 2.3 節のルート生成手法に加えて、次の手法を用いてユーザが設定した条件に合わせた最適な出発時刻を決定した。

1. 出発地点付近のユーザが示した目的地の条件 (e.g. スーパー) に合致するすべての地点を目的地の候補として取得する。

2. 1 で取得する地点に対し、2.3 節の手法を用いてルートを生成する。各ルートに対し、暑熱曝露量が最も低い出発時刻を決定し、この場合の暑熱曝露量をルートの最低暑熱曝露量とする。

3. 2 で得たルートの中、最低暑熱曝露量が最も低いルートを推薦ルートとする。

*1 曝露：物質や電磁波などが体内に取り込まれること。

*2 <https://www.openstreetmap.org>

*3 温熱指標：人が暑さまたは寒さの感覚を評価する指標。

*4 heat index：気温と湿度を用いて人が感じる暑さを評価する温熱指標である。体感温度ともいう。

表 1: [1] の手法による暑熱曝露量削減効果と距離の増加（最短ルートと比較）

	気温	heat index
暑熱曝露量削減効果があったケースの割合 (%)		
全体	79.70%	80.53%
5% 以上削減	42.72%	45.11%
10% 以上削減	13.81%	16.07%
暑熱曝露量の削減		
平均	4.63%	4.69%
最大	25.97%	26.17%
距離の増加		
平均	5.59%	5.76%
温熱指標の削減量		
平均	2.12°C	2.32°C

2 で出発時刻 t を決定するとき、目的地である施設の営業時間とユーザの滞在時間、およびユーザが設定する時間範囲を考慮する必要がある。すなわち、制約条件は以下の通りである。

$$t \geq \max\{t_{\text{open}}(\ell) - t_{\text{walk}}^{\text{shortest}}(\ell), t_{\text{now}}, t_{\text{earliest}}\} \quad (2)$$

$$t \leq \min\{t_{\text{close}}(\ell) - (t_{\text{walk}}^{\text{shortest}}(\ell) + t_{\text{buff}}(\ell)), t_{\text{latest}}\} \quad (3)$$

ここで、 $t_{\text{open}}(\ell)$ は位置 ℓ にある施設の営業開始時刻、 $t_{\text{close}}(\ell)$ は営業終了時刻であり、 $t_{\text{walk}}^{\text{shortest}}(\ell)$ は歩行による最短移動時間、 $t_{\text{buff}}(\ell)$ は施設での滞在時間である。 t_{now} は現在の時刻、 t_{earliest} 、 t_{latest} はユーザが設定する時刻である。

2.5 評価実験

2.3 節の手法を用いて生成したルートの暑熱曝露量削減効果を評価するために、出発地点と目的地の 1,000 ペアをランダムに生成し、2015 年 6 月 1 日から 8 月 31 日までの期間中からランダムに抽出した 10 個の日付に対し、出発時刻を 7:00, 11:00, 15:00, 19:00, 23:00 に設定し、合計 50,000 ルート生成した。生成したルートと最短ルートと比較した結果を表 1 に示す。結果として、約 80% のケースで提案手法には暑熱曝露量削減効果があった。また、提案手法で生成したルートの温熱指標である気温と heat index はいずれも最短ルートと比べて 2°C 以上低くなった。

また、2.4 節で示した出発時刻決定手法の効果を評価するため、ランダムに 750 の出発地点を生成し、出発時刻の範囲を 8 時から 20 時に設定した。目的地の検索条件を「最も近いスーパー」、「最も近いパン屋」、「最も近い薬局」からランダムに設定し、滞在時間は一律に 15 分とした。生成したルートを最短ルートと比較した結果を表 2 に示す。出発時刻を不変な 2.3 節の手法と比べ、暑熱曝露量の削減効果が顕著に向上したことが分かった。

表 2: 出発時刻の決定による暑熱曝露量削減効果と距離の増加（最短ルートと比較） [1]

	気温	heat index
暑熱曝露量削減効果があったケースの割合 (%)		
全体	68.43%	71.08%
暑熱曝露量の削減		
平均	8.09%	7.73%
最大	62.2%	62.88%
距離の増加		
平均	4.60%	4.72%

3 緑地を考慮したルートプランニング手法

3.1 概要

Ludwig ら [2] は Dresden と Heidelberg の道路における緑地率を計算し、サイクリストと歩行者に対して緑地率の高いルートを生成し、最短ルートと比較することでそのルートの特徴を分析した。

3.2 データ収集

地図データとして OpenStreetMap のデータを利用した。道路の緑地率を計算するために、Dresden 市の 3D レーザスキャンデータおよび Heidelberg 市の Sentinel-2 衛星画像データを利用した。道路勾配のサイクリストと歩行者への影響を評価するために、openrouteservice^{*5}が提供する勾配データを利用した。

3.3 ルート生成

道路の緑地率を評価するために、地図をグラフ化した後、3D レーザスキャンデータと衛星画像データを利用してグラフの中の道路エッジ周辺 30m 範囲内の植生の割合を計算し、道路エッジの Green Index とする。これを利用して道路エッジ i のコスト w_i を次の式で算出する。

$$w_i = d_i + \frac{(1 - g_i) \cdot w_g + s_i}{2} \cdot d_i \quad (4)$$

ここで、 d_i は道路エッジ i の通行時間、 g_i は道路エッジ i の Green Index、 w_g は Green Index の重視度を調整する係数である。 s_i は道路の勾配に関する値である。勾配が大きいくほど、 s_i も大きくなる。ルート生成には A* アルゴリズムを用いる。

3.4 評価実験

実験では、まず生成したルートと最短ルートの通行時間を比較した。歩行とサイクリングの出発地点と目的地をそれぞれ 3,000 ペア生成し、各ペアに対して最短ルートと w_g が 0.1 から 1.0 の範囲で設定された 10 本のグリーンルートを生成した。結果として、自転車の場合、生成したグリーンルートの所要時間は最短ルートに比べて最大 21% 長かった。徒歩の場合、生成したグリーンルートの所要時間は最短ルートに比べて最大 16% 長かった。しかし、いずれの場合も所要

^{*5} <https://openrouteservice.org>

表 3: 歩行者の速度と肺気量 [3]

性別	年代	歩行速度 (m/min)	肺気量 (L/m ³)
男性	Youth	111.1	9.2
	Middle aged	82.2	9.2
	Older	48.6	8.9
女性	Youth	101.4	8.2
	Middle aged	75.6	8.1
	Older	42.6	7.8

時間が 1% 増加するごとにルートの Green Index が 3.39%(Dresden 市) および 5.26%(Heidelberg 市) 増加したことも分かり、生成したルートは若干遠回りをするものの、緑地率の高いルートであることを示した。

4 大気汚染を考慮したルートプランニング手法

Zhong ら [3] は歩行者の PM2.5 に関する曝露を抑えるルートプランニング手法を提案した。この手法では、オーストラリアの Environmental Protection Agency が設置した PM2.5 観測点の観測データ、ポータブル端末 AirBeams で収集した PM2.5 データ、交通量データ、気温、湿度、気圧などの気象データを用いて XGBoost モデルを訓練し、メルボルン中心部のリアルタイム PM2.5 分布を予測する。予測値に基づいて次のように道路 i のコスト W_i を算出し、ダイクストラ法を用いてルートプランニングを行う。

$$W_i = w \times \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} + (1-w) \times \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (5)$$

ここで、 w は PM2.5 の重視度を調整する係数である。 D_i , D_{\min} , D_{\max} はそれぞれ道路 i の長さ、道路の最小の長さ、道路の最大の長さである。 E_i , E_{\min} , E_{\max} はそれぞれ道路 i を走行した場合の PM2.5 吸入量、すべての道路における最小 PM2.5 吸入量、すべての道路における最大 PM2.5 吸入量である。 E_i は次の式によって算出する。

$$E_i = \frac{D_i}{V_j} \times R_j \times C_i \quad (6)$$

ここで、 V_j と R_j はそれぞれ歩行者の速度と肺気量であり、 C_i は道路 i における PM2.5 濃度である。歩行者の速度と肺気量は年代と性別によって表 3 により決める。

提案手法の PM2.5 吸入量の削減効果を評価するために、実験を行った。出発地点と目的地の 4 ペアを設定し、最短ルートと PM2.5 吸入量が最小のルートを生成した。各ルートの距離と PM2.5 の吸入量を表 4 にまとめる。表 4 より、生成ルートの距離が若干増加したが、10%以上の PM2.5 削減効果があったことが分かる。

5 考察

文献 [1] では、ルート生成のみならず出発時間も考慮して暑熱曝露の特徴に則したルートプランニング手法

表 4: ルートの距離と PM2.5 吸入量 [3]

ID	ルートタイプ	距離 (m)	距離の変化	PM2.5 (μg)	PM2.5 の変化
a	最短ルート	1599.11	-	0.98	-
	PM2.5 吸入量最小ルート	1601.27	0.14%	0.87	-11.22%
b	最短ルート	1373.44	-	0.88	-
	PM2.5 吸入量最小ルート	1374.93	0.11%	0.78	-11.36%
c	最短ルート	1374.95	-	0.86	-
	PM2.5 吸入量最小ルート	1421.10	3.36%	0.74	-13.95%
d	最短ルート	1272.23	-	0.81	-
	PM2.5 吸入量最小ルート	1466.20	15.25%	0.69	-14.81%

を提案した。しかし、湿度の分布を考慮していないため、温熱指標の算出に改善の余地がある。[2] の手法では衛星画像データなどのリアルタイムデータを利用して緑地率の評価を行い、道路勾配データも利用して実用的なルートプランニングを実現した。[3] の手法では XGBoost モデルを利用して道路レベルの PM2.5 濃度分布を求めた。しかし、算出される PM2.5 濃度分布の範囲が町の中心部のみであるため、郊外などそれ以外のルートを通行する旅行者の利用には適さない。

私は熱中症リスクを減らすためのルートプランニング手法を提案したいと考えており、そのためには暑熱曝露に関する精度の高いリアルタイムデータ (eg, 数値気象予報データ、ポータブル端末データ) が必要である。また、旅行者の移動においては、複数の環境要素による複合曝露の影響を受ける。例えば、緑地への曝露は暑熱曝露削減の効果がある。しかし、これまで複合曝露を取り上げた研究は少ない [4]。そのため、暑熱曝露と緑地を考慮した熱中症予防効果があるルートプランニング手法を提案したい。具体的には、衛星画像データなどを用いて道路の緑地率を算出し、緑地率と暑熱曝露の削減量の関係性を評価したいと考えている。

6 まとめ

本稿では環境曝露を考慮したルートプランニング手法を調査した。適切なルートプランニング手法を利用すれば、旅行者のニーズに応じて環境曝露を調整したルートを推薦できることが示されているため、今後複合曝露を考慮したルートプランニングへ発展させたい。

参考文献

- [1] Joachim Rußig and Julian Bruns, Reducing Individual Heat Stress through Path Planning, GI-Forum 2017, Volume 5, Issue 1, pp. 327-340, Österreichische Akademie der Wissenschaften, 2017.
- [2] Christina Ludwig *et al.*, Comparison of Simulated Fast and Green Routes for Cyclists and Pedestrians, International Conference on Geographic Information Science, pp. 3:1-15, 2021.
- [3] Richard O. Sinnott and Zhong Siqi, Real-time Route Planning to Reduce Pedestrian Pollution Exposure in Urban Settings, 10th IEEE/ACM International Conference on Big Data Computing, Applications and Technologies, pp. 1-10, 2023.
- [4] Age Poom *et al.*, Environmental exposure during travel: A research review and suggestions forward, Health & Place, Volume 70, 102584, Elsevier, 2021.