

複数指標を考慮した人流シミュレーションにおける パラメータ影響の可視化手法

森 千紗¹武田 芽依²大西 正輝³伊藤 貴之¹¹お茶の水女子大学²筑波大学³産業技術総合研究所

1. はじめに

大規模な人の移動を必要とする社会実験には莫大なコストがかかるため、現実の人々の行動を再現する技術である人流シミュレーションが人流誘導計画に役立てられている [1]. 例えば、災害時の避難やイベント終了時には混雑が頻繁に発生し、それが歩行者同士の接触につながり移動の安全性が損なわれる可能性がある. このような現象をシミュレーション上で再現し、どのような人流誘導計画が混雑緩和や迅速な移動に効果的であるかを解析することは肝要である. 人流シミュレーションは人流誘導方法を定めるパラメータによって制御され、その結果は混雑度や避難完了時間などのトレードオフ関係にある複数の指標によって評価される. そのため、利用者にとって好ましい誘導方法に最も近いバランスの評価指標値のトレードオフと、それにつながるような人流誘導計画のパラメータ値を解釈することが求められる. そこで本稿では、利用者の選好を表現した評価指標に対するパラメータ可視化手法を提案する. 具体的には、(1) 利用者が興味のある各指標のトレードオフを GUI から選択し、(2) そのトレードオフを最もよく表す単一指標値を線形和によって解析的に計算し、(3) その単一指標値を利用して PCP (Parallel Coordinate Plots) [2] で描画する. この PCP を用いて人流誘導計画のパラメータと利用者の選好を表現する評価指標との関係性を可視化する.

2. 関連研究

PCP とは図 1 (a-2), (b-2) のような可視化手法を指す. 本研究では PCP の軸を各パラメータと各評価指標に対して配置し、それぞれの実験で評価したパラメータの値とそれに対応する評価指標値を線で結ぶことによって、評価指標値に対する各パラメータの密集度合や数値分布を可視化する. ここで、PCP は評価指標値が複数存在する場合であっても適用することができる [3]. 一方で、PCP はパラメータや評価指標の数に比例して軸の数が増加するため、評価指標が多いほど解釈は難しくなる. 特に各評価指標値がトレードオフの関係にある場合、一つの PCP からトレードオフを考慮したパラメータの解釈を行うことは非常に困難であり、それを容易に解決する方法は我々の知る限り今までに提案されていない.

3. パラメータと評価指標の関係性可視化手法

本節では、 D 次元のパラメータ $\lambda \in \mathbb{R}^D$ によって制御される人流シミュレーションの評価指標値 $\mathbf{f} := [f_1, f_2, \dots, f_M] \in \mathbb{R}^M$ と GUI 上での利用者の選好選

択にもとづく単一評価指標値の計算方法を提案する. 本稿では簡単のため $M = 2$ とし、全ての $m = 1, \dots, M$ に対して f_m は最小化したいものとして議論する.

3.1 GUI 上での評価指標選好の選択

評価指標値の個数が単一、つまり $M = 1$ の場合は、単純に f_1 が小さいパラメータ群に着目すればよい. 一方で $M > 1$ の場合は、 \mathbf{f}_i と \mathbf{f}_j の優劣関係が未定義である. 一般的によく用いられる比較方法は支配 (dominance) である [4]. 二次元の評価指標ベクトル \mathbf{f} と \mathbf{f}' で \mathbf{f} が \mathbf{f}' を支配するとき、 $f_1 \leq f'_1$, $f_2 \leq f'_2$ 及び $\mathbf{f} \neq \mathbf{f}'$ が成立する. 特に評価指標値集合 $\{\mathbf{f}_m\}_{m=1}^M$ において、ある \mathbf{f}_i が任意の $m \in \{1, \dots, M\}$ で \mathbf{f}_m に支配されないとき、 \mathbf{f}_i はパレート解であると呼ぶ. 例えば図 1 の (a-1) の黒破線が、本稿の実験で得られたパレート解集合を近似的に結んだ線である. この近似曲線は、観測内にあるパレート解をもとに、以下の関数の係数 a, b を最適化することで求められる.

$$g(f_1) := f_2 = \frac{a}{f_1 + b} \quad (1)$$

ここで a, b の最適化には最小二乗法を適用する. 図からわかるように、各評価指標値のバランスは数多く存在し、適切なバランスは利用者の選好による. よって、利用者は黒破線上の一点をクリックすることで、適切な評価指標値間のバランスを選択する. なお、この近似曲線はパレート解の集合が下に凸であることを仮定している.

3.2 利用者の評価指標選好にもとづく単一評価指標の計算

単一評価指標値 E の計算とは、以下のような $\{w_m\}_{m=1}^M$ を求めることを指す.

$$E = \sum_{m=1}^M w_m f_m \text{ subject to } \sum_{n=1}^M w_n = 1 \quad (2)$$

一般的にも成り立つが、 $M = 2$ のときについて $E = w_1 f_1 + w_2 f_2$ という値を考えると、 $w_2 \neq 0$ で以下のように変形できる.

$$f_2 = -\frac{w_1}{w_2} f_1 + \frac{E}{w_2} \quad (3)$$

これは図 1 の (a-1), (b-1) の空間内における紫色の直線である. ここで、前節で GUI 上から選択された点で E が最小値 (最善値) を取るときを考える. 近似曲線が下に凸であるため、GUI 上で選択された点を接点とする接線を取る w_1, w_2 を選択すると、GUI 上で選択された点上で E の値が最小値を取る. よって、GUI 上で選択された点を $(f_1, g(f_1))$ とすると、 $-w_1/w_2 = g'(f_1)$ と $w_1 + w_2 = 1$ を連立方程式として解くことによって (w_1, w_2) を得る.

Visualization Method for Parameter Effects in Pedestrian Flow Simulation Considering Multiple Indicators: C. Mori, M. Takeda, M. Onishi, T. Ito

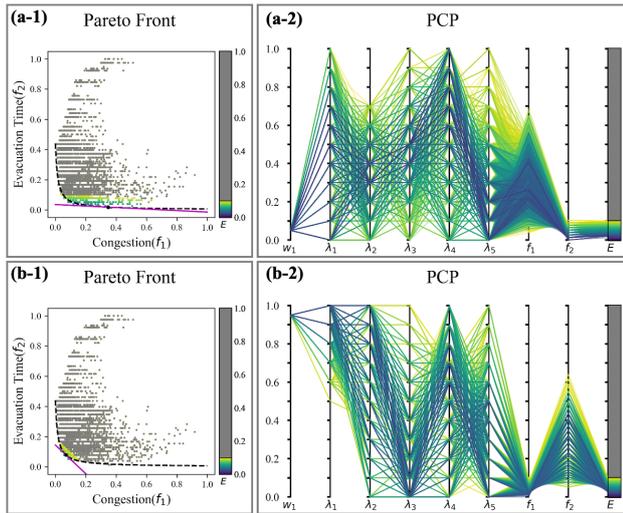


図 1: 提案手法を用いた PCP の可視化例。上側は $w_1 = 0.05$, 下側は $w_1 = 0.95$ を用いた。左側: 実験で得られた評価指標値の散布図。黒い破線は式 (1) にもとづいて近似されたパレート解である。色付けは紫色の接線をもとに式 (2)・(3) から得た E の値によって色相を変えている。濃い青に近づくほど E の値が良く、黄色に近づくほど E の値が悪い。右側: 左の図で灰色以外に着色された観測の PCP。色相は左の図と同一である。

3.3 単一評価指標値とパラメータの関係の可視化

本稿で提案する可視化手法は、(1) 評価指標値散布図と式 (1) に基づいたパレート解近似曲線及び (2) パラメータと評価指標値の関係性を表す PCP の 2 画面で構成される。画面 1 (図 1 左側) は式 (3) の w_1 を計算するために用いる。利用者は画面 1 の近似曲線上の一点をクリックすることで、評価指標値間のトレードオフを選択し、それにもとづいて w_1 の計算と単一評価指標値の色付けがなされる。そして、画面 1 で計算された w_1 と式 (2) を用いて、各観測の単一評価指標値 E を得る。図 1 にあるように、この値の優劣にもとづいて両画面の色相が変化する。画面 2 (図 1 右側) は単一評価指標が利用者の指定した範囲内にある観測に関して、PCP により可視化している。軸は左側から重み w_1 , パラメータ λ , 評価指標値 f , 単一評価指標 E である。

4. 適用例

4.1 可視化に用いるデータセット

歩行者シミュレータ CrowdWalk [5] を用いて避難誘導シミュレーションを実施する。人流誘導方法を定めるパラメータはそれぞれ、 λ_1 が避難開始の時間間隔、 λ_2 と λ_3 が異なる 2 つの分岐路における混雑の少ない経路への誘導割合、 λ_4 と λ_5 が地下への誘導割合である。それぞれのパラメータは $[0, 1]$ になるように正規化されている。実験では各パラメータに対して $\{k/10\}_{k=0}^{10}$ を取りうる値とした。よって、今回の実験では $11^5 = 161,051$ 通りのパラメータに対して予めシミュレーションを実行し、それぞれのパラメータに対して評価指標値を得た。

今回の実験で考慮した評価指標値は以下の 2 つである。

1 つ目の評価値 f_1 は混雑度である。 n 番目の避難者の局所的な人口密度を ρ_n , 過密の閾値 θ^p (地上 2.17/地下 1.08), 避難時間 $T[\text{min}]$ を用いて、 $f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \mathbb{I}[\rho_n > \theta^p]$ によって計算する。ただし、 \mathbb{I} は指示関数である。2 つ目の評価指標 f_2 は全体の避難完了時間である。 n 番目の避難者の出発時刻 $t_n^{(d)}$, 到着時刻 $t_n^{(a)}$, 最後に避難を完了した避難者 N を用いて、 $f_2 = t_N^{(a)} - t_1^{(d)}$ によって計算する。なお、可視化時には f_1, f_2 ともに $[0, 1]$ に正規化している。よって、 E の範囲は $E \in [0, 1]$ となる。可視化に際して E の範囲を指定する必要があるため、今回は $E \in [0, 0.1]$ を PCP の可視化対象として用いた。

4.2 可視化結果

図 1 に可視化結果を示す。右側にある PCP の線の色は、 $E > 0.1$ の場合は灰色、 $E \leq 0.1$ の場合は 0 に近いほど濃青に近づくように色相を設定している。上側は避難完了時間 f_2 を重視した $w_1 = 0.05$, 下側は混雑度 f_1 を重視した $w_1 = 0.95$ の場合の可視化結果である。 λ_1, λ_2 は上下で出現するパラメータ値に違いがある。 λ_1 は下側で 1 に近い値に集中しており、 λ_2 は、上側で低い値に集中していることがわかる。このことから λ_1 は混雑度、 λ_2 は避難完了時間に大きく関わるパラメータであると考えられる。このような線の存在する範囲の違いから、各シナリオにおけるパラメータ重要度がわかる [6]。 λ_1, λ_2 以外に関しては線の存在する範囲に違いは見られないが、色相差に注目すると、下側では λ_3 が低い値を取るべきであり、両者ともに λ_5 は低い値を取るべきである、と解釈することができる。紙幅の都合上、他の w_1 値の可視化結果は省略するが、同様の分析を多様なトレードオフに関して可能にするのが提案手法の利点である。

5. まとめ

本稿では、利用者の直観にもとづく複数評価指標のバランスを解析的に考慮した重要パラメータの可視化手法を提案した。今後は、PCP の視認性向上のための手法提案や重要度計算を交えたより定量的なパラメータの分析を検討している。

参考文献

- [1] 山下倫央, 大西正輝. オリンピックのための情報処理: 2. オリンピックにおける人の流れの解析. 情報処理, Vol. 55, , 2014.
- [2] J. Heinrich and D. Weiskopf. State of the art of parallel coordinates. *Eurographics*, 2013.
- [3] M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, and Y. Takeshima. EVOLVE: A visualization tool for multi-objective optimization featuring linked view of explanatory variables and objective functions. In *International Conference on Information Visualisation*, 2014.
- [4] S. Watanabe. Python tool for visualizing variability of pareto fronts over multiple runs. *arXiv:2305.08852*, 2023.
- [5] Tomohisa Yamashita, Takashi Okada, and Itsuki Noda. Implementation of simulation environment for exhaustive analysis of huge-scale pedestrian flow. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 2, pp. 137–146, 2013.
- [6] S. Watanabe, A. Bansal, and F. Hutter. PED-ANOVA: Efficiently quantifying hyperparameter importance in arbitrary subspaces. *arXiv:2304.10255*, 2023.