

矩形選択によるユーザの選好を反映した Parallel Coordinate Plots: 人流シミュレーションでの適用事例

森 千紗* 大西 正輝† 伊藤 貴之*

概要. Parallel Coordinate Plots (PCP) は、科学実験の結果解釈の補助に有効な手法である。実験結果の良し悪しによって折れ線に色をつけ、その色に基づいて解釈を行う。一方で、本稿にて適用事例とする避難誘導の人流シミュレーションのように、複数評価指標が存在する事例では、PCP の適用が容易でない。本稿では、評価指標を 2 軸に割り当てた 2 次元散布図上の矩形選択により、評価指標間の最適なトレードオフを反映した単一評価指標を計算することで PCP の折れ線に色付けをする方法を提案する。また、人流シミュレーションによる避難誘導実験を題材にして、提案手法の有用性を議論する。

1 はじめに

科学実験では多様な実験設定とそれに対する結果を解釈することによって、新たな知見を得ていくことが求められる。実験結果の解釈を支援する手法として、Parallel Coordinate Plots (PCP) [1] や散布図などを多様な設定に対応するように拡張した可視化手法の研究が活発に発表されている。例えば、人流シミュレーションを用いた避難誘導実験では、人流を制御するパラメータと、その結果として得られる混雑度や避難時間のような評価指標の関係の可視化が求められる。このようなパラメータの解釈のための可視化手法として、PCP は非常に有効である。PCP は評価指標が単一であれば、評価指標の良し悪しによって折れ線に色付けをすることで、容易に実験結果を表現できる。一方で、複数の評価指標が存在する場合には、実験結果の解釈がしばしば困難であるという課題がある。本稿では 2 つの評価指標を有する問題において、ユーザの選好を反映した単一評価指標を計算し、単一評価指標の良し悪しによって PCP の折れ線に色付けをする手法を提案する。具体的には、評価指標を各軸にとった 2 次元散布図上にて、興味のある矩形領域を指定により最適な単一評価指標を計算し、その単一評価指標の値によって PCP の折れ線に色をつける方法を提案する。本稿では、人流シミュレーションの制御パラメータ解釈を題材にして、提案手法の適用事例を説明する。

2 ユーザ選好を反映した PCP 描画手法

PCP とは多次元データを折れ線の集合で可視化する手法であり、各折れ線を評価指標値に基づいて

色付けることで視認性を高めている。しかし色付けには単一の評価指標を用いており、複数指標を考慮した PCP の折れ線の色付けは困難である。本節では 2 つの評価指標を単一評価指標に変換することで折れ線に色を付ける方法を提案する。

2.1 問題設定

本稿では、 D 次元のパラメータ $\lambda \in \mathbb{R}^D$ によって制御され、評価指標値が $\mathbf{f} := [f_1, f_2, \dots, f_M] \in \mathbb{R}^M$ である人流シミュレーションを問題として扱う。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 は最小化するものとして議論する。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) [2] である。2 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 $\{\mathbf{f}_n\}_{n=1}^N$ において、ある \mathbf{f}_i が任意の $j \in \{1, \dots, N\}$ で \mathbf{f}_j に支配されないとき、 \mathbf{f}_i はパレート解であると呼ぶ。

2.2 矩形選択による単一評価指標計算と PCP の色相算出

図 1 (左側) 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。なお、近似曲線は下に凸であることを仮定している。この近似曲線は、関数 $g(f_1) := f_2 = \frac{a}{f_1+b}$ の係数 a, b を最適化することで求められる。 a, b の最適化は関数 $g(f_1)$ と観測内にあるパレート解の間の最小二乗法によって行う。最適解が一意に定まる単一目的最適化とは異なり、多目的最適化では最適解が領域 (図 1 だと黒破線で与えられているパレート解集合) として与えられるため、最適解が複数存在しうる。実用的な観点からは、利用者の選好に基づいて適切な各

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* お茶の水女子大学

† 産業技術総合研究所

評価指標値のバランスを選択する必要がある。従来の PCP では利用者の嗜好を色付けに反映することが難いため、我々は新たな色付け方法を提案する。具体的には、黒破線の中で適切なバランスに近い領域を、利用者が矩形で選択する。ここで、矩形が黒破線と2つの交点を持つと仮定する。その上で、興味のある評価指標値間のバランスを数学的に決定することで、各観測間を順位付けする。利用者の嗜好を各目的に対する重みで表現した時に、単一評価指標値 E は以下のように計算される。

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

$M = 2$ のとき $E = w_1 f_1 + w_2 f_2$ を考えると、 $w_2 \neq 0$ で $f_2 = -\frac{w_1}{w_2} f_1 + \frac{E}{w_2}$ のように変形できる。これは図 1 (左側) の空間内における紫色の直線である。ここで、黒破線と2つの交点 $(a, g(a))$, $(b, g(b))$ ($a < b$) を持つ矩形領域を選択したとする。平均値の定理から $g'(c) = \frac{g(b)-g(a)}{b-a}$ を満たすような $a < c < b$ なる c の存在が保証されるため、2つの交点 $(a, g(a))$, $(b, g(b))$ を結ぶ直線と同様の傾きを持つ接線を計算できる。ここで接点を $(c, g(c))$ とすれば、 $-w_1/w_2 = g'(c)$ 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。各観測に対して式 (1) を得られた w_1, w_2 で計算し、 E の値を計算する。 E の値に基づき、PCP の色相を算出する。

3 人流シミュレーションでの適用例

本稿では、避難誘導シミュレータの制御パラメータとそれに対応する評価指標が計算されたデータセットを用いて、PCP により可視化した事例を示す。

3.1 可視化に用いるデータセット

歩行者シミュレータ CrowdWalk [3] 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あらかじ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 f_1 (混雑度) と f_2 (全体の避難完了時間) である。なお、可視化時には f_1, f_2 ともに $[0, 1]$ に正規化しているため、 E の範囲は $E \in [0, 1]$ となる。今回は $E \in [0, 0.05]$ を PCP の可視化対象として用いた。本稿で提案する可視化手法は、(1) 評価指標値散布図とパレート解近似曲線、および (2) パラメータと評価指標値の関

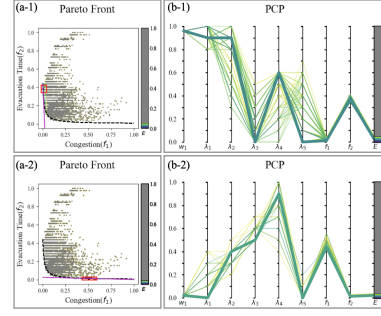


図 1. 提案手法を用いた可視化例。(上) 混雑度を重視した場合。(下) 避難完了時間を重視した場合。(左側) 実験で得られた評価指標値の散布図。黒破線は実験で得られたパレート解集合を近似的に結んだ線である。 E の値が低いほど濃青、 E の値が高いほど黄色に近づくように色相を変えている。(右側) 矩形領域内の観測の PCP。軸は左側から重み w_1 、パラメータ λ 、評価指標値 f 、単一評価指標 E である。色相は左の図と同一である。

係性を表す PCP, の2画面で構成される。図 1 (左側) は f_1 の重み w_1 を計算するために用いられる。利用者が近似曲線上の矩形領域を選択すると、前節の説明通り w_1, w_2 が計算され、図 1 (右側) にあるように PCP の各折れ線の色付けがなされる。

3.2 可視化結果

図 1 に可視化結果を示す。図 1 (右) にある PCP の線の色は、矩形領域内の観測の中で最大の E を E_{\max} 、最小を E_{\min} 、としたときに、 $E > E_{\max}$ と $E_{\min} > E$ の場合は灰色、 $E_{\min} \leq E \leq E_{\max}$ 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。図 1 (上) は混雑度 f_1 を重視した矩形領域、図 1 (下) は避難完了時間 f_2 を重視した矩形領域を選択した場合の可視化結果である。図 1 (右上) の折れ線が存在する範囲を確認すると、 λ_1 が高い値に集中していることがわかる。このことから、混雑度の減少には、避難開始時刻に時間差を設け、動線に十分なキャパシティを持たせることが有効であることがわかる。一方で避難完了時間を重視した誘導では、 λ_1 が低い値に集中していることがわかる。このように、異なる嗜好では異なるパラメータ傾向が見られるため、多様なトレードオフに対して適切な色付けが必要となる。以上により、多様なトレードオフに対して適切に色付けを与えられることを示した。

4 むすび

本稿では、ユーザの嗜好を反映した PCP の色相算出手法を提案した。現時点の実装は評価指標を2個に限定している。今後はより多くの評価指標に対して手法を拡張することを目指したい。

参考文献

- [1] J. Heinrich and D. Weiskopf. State of the Art of Parallel Coordinates. *Eurographics (state of the art reports)*, pp. 95–116, 2013.
- [2] S. Watanabe. Python Tool for Visualizing Variability of Pareto Fronts over Multiple Runs. *arXiv preprint arXiv:2305.08852*, 2023.
- [3] T. Yamashita, T. Okada, and I. Noda. Implementation of simulation environment for exhaustive analysis of huge-scale pedestrian flow. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 6(2):137–146, 2013.