

多目的最適化問題におけるユーザの主観を反映した パレート解の可視化手法

山代 大輔[†] 吉川 大弘[†] 古橋 武[†]

近年の急速な計算機性能の向上や並列計算技術の発展により、複数の評価項目を持つ解候補(パレート解)が短時間で生成可能となった。このような背景のもと、多次元の評価値空間内にある膨大な解候補の中から、ユーザが求める有益な解の発掘を支援する技術のニーズが高まっている。筆者らはこれまで、パレート解の特徴を把握することを目的に、Fuzzy C-Means (FCM) と Fuzzy Multiple Discriminant Analysis (FMDA) を用いた可視化による解発掘支援技術を提案してきた。本稿では、この解発掘支援における射影軸の意味付けを容易にすることを目的に、ユーザの意図や主観を反映したパレート解の可視化手法を提案する。本稿ではユーザの意図として、各目的関数に対し、ユーザの持つ重要度と、複数の評価関数を統合的に表現するラベルを利用して可視空間を構築する手法を提案する。提案手法は、ユーザが積極的に射影軸の意味付けに関与し、それらを反映した可視化を行うことで、解釈可能な可視空間の構築を可能にする手法である。本稿では、多目的最適化問題の1つである看護師スケジューリング問題において得られた多次元な評価値を持つパレート解に対し、提案手法により可視化を行うとともに、その有効性の検討を行う。

Visualization Method of Pareto Solutions Reflecting User's Subjectivity in Multi-Objective Optimization Problems

DAISUKE YAMASHIRO, TOMOHIRO YOSHIKAWA
and TAKESHI FURUHASHI

Recently, the rapid progress of the performance of computers and the technique for parallel computations have enabled us to calculate and generate a large amount of Pareto solutions in Multi-Objective Optimization Problems. It is, however, difficult to show/select the acquired Pareto solutions with multi-dimension of fitness values effectively. The authors have proposed "Mining of Solutions" technique with visualization to grasp the characteristics of the Pareto solutions. The technique employs the Fuzzy C-means (FCM) for clustering the Pareto solutions and Fuzzy Multiple Discriminant Analysis (FMDA) for acquiring the projection axes. It can visualize the Pareto solutions through the clusters projected onto the visualized space. This paper studies the reflection of user's intention or subjectivity into the visualization result. A user gives the level of importance and variable selection for objective functions, which identifies interpretable clusters and projection axes that reflects his/her subjective view. This paper shows that the proposed method succeeds in providing the user with a new interpretation of the Pareto solutions.

1. はじめに

近年の急速な計算機の発達や、クラスタコンピューティングやグリッドコンピューティングに代表される並列計算技術の急速な進歩により、多目的最適化問題における複数の評価項目を持つ解候補(パレート解)が短時間で生成可能となった。実際、これまで筆者らが取り組んできた看護師スケジューリング問題(Nurse Scheduling Problems: NSP)¹⁾では、12の目的関数が存在し、多目的最適化問題における代表的な手法である

Non Dominated Sorting Algorithm-II (NSGA-II)²⁾を用いると、数万個のパレート解が一回の試行で生成される(パレート解をすべてデータベースに蓄えた場合)。このような背景のもと、複数の評価項目を持つ設計・計画問題において、多次元空間内にある多数の解候補の中から、ユーザにとって有益な解の発掘を支援する技術、いわば解のマイニング(ソリューションマイニング)技術のニーズが高まっている。

これに対し筆者らは、多次元の評価値空間上でクラスタリングを行い、入力変数を線形結合する射影軸を用いた次元圧縮により可視化を行う手法を提案してきた³⁾。射影軸を線形式とすることにより、各変数の意味とその係数の大きさから、射影軸の意味付けが可能

[†] 名古屋大学
Nagoya University

となる。文献3)では、Fuzzy C-Means (FCM) と Fuzzy Multiple Discriminant Analysis (FMDA) による可視化手法をパレート解の可視化に用いている。この手法により、把握が困難な多次元の評価値空間内でのパレート解の分布構造や、多次元の評価値同士の関係性が明確となり、得られたパレート解に対する解析が容易となる。また本手法により、解候補を可視化し、ユーザに効果的な情報呈示を行うことで、解候補の選択など、ユーザの意志決定を支援することが可能となる。しかしながら、各射影軸は全ての入力変数の線形結合により同定されるため、目的関数の数が増えるほど、変数と線形結合の係数の大きさからでは、射影軸の意味付けが困難となる場合がある。また、係数の大きな変数のみで意味付けを行い、その変数の数が多くはない場合であったとしても、それにより意味付けされた射影軸が、ユーザにとって解釈が容易な射影軸である保証はない。

本稿では、文献3)の手法による多次元の評価値を持つパレート解の可視化において、変数の重み付けおよび射影軸のラベル付けにより、ユーザの意図や主観を反映した可視化手法を提案する。提案手法では、ユーザが目的関数に対して重み係数を与え、その重み係数を得られたパレート解の評価値と乗算する。その後クラスタリングを行うことで、重み付けされた評価値軸上でクラスタ分割がされ易くなる。さらに、ユーザが射影軸にラベル付けを行うとともに、そのラベルに対し適切な変数の組み合わせを主観的に選択する。ユーザが積極的に射影軸の意味付けに関与することで、ユーザにとって解釈容易な可視空間の構築を可能にする。本稿では、実問題である NSP¹⁾ に NSGA-II を適用した際に獲得されたパレート解に対し、提案手法を用いて可視化を行い、その有効性を検討する。

2. 提案手法

提案手法の要点は、各目的関数に対してユーザが持つ重み係数を設定することで、クラスタリングにユーザの意図を反映させること、および射影軸のラベル付けを行い、かつそのラベルに適した変数を主観的に選択することで、次元圧縮にユーザの主観を反映させることにある。提案手法の流れを以下に示す。

- Step 1: 進化的計算手法によりパレート解を生成する。
- Step 2: ユーザにより、各目的関数に対する重要度(重み計数)を決定する。
- Step 3: 得られたパレート解の各目的関数の評価値と重み係数を乗算する。
- Step 4: 重み付き評価値を要素に持つベクトル表現に

表1 目的関数

Obj_1	1日の各勤務に対する必要な人数
Obj_2	1日の各勤務において必要な看護師のレベル
Obj_3	1日の各勤務においてチームごとの必要な人数
Obj_4	設定された禁止勤務系列
Obj_5	設定された妥協禁止勤務系列
Obj_6	看護師間での夜勤の勤務回数の公平性
Obj_7	看護師間での休日回数の公平性
Obj_8	看護師間での連休回数の公平性
Obj_9	各看護師に対する夜勤の月間規定回数(8回以内)(ただし、準夜勤は3回以上5回以内、深夜勤は3回以上4回以内)
Obj_{10}	各看護師に対する休みの規定回数(2日/週)
Obj_{11}	各看護師に対する土日の連休(月1回以上)
Obj_{12}	各看護師に対する連休(月1回以上)

より各解候補を表し、多次元(評価値)空間上でクラスタリングする。

- Step 5: ユーザにより、射影軸のラベル付けを行い、各ラベルに対する目的関数を選択する。
- Step 6: 各ラベルに対して選択された目的関数のみを用いて、評価値空間を次元圧縮するための射影軸を同定する。
- Step 7: 得られた最大の固有値を持つ射影軸をそのラベルの表す射影軸として用いる。
- Step 8: 2/3個のラベルを選択し、それらの射影軸で形成される可視空間にパレート解を射影する。

3. 看護師スケジューリング問題

本稿では、多目的最適化問題の例として、NSPに提案手法を適用する。勤務表の制約には、勤務系列、各曜日の割付け勤務、必要人数、および割付け日数などに関するものがある。例えば勤務系列とは、一人の看護師に注目したときの「日勤」→「深夜勤」や「日勤」→「休み」→「準夜勤」のように、複数日にわたる勤務形態の系列のことであり、看護師の健康面や勤務時間に無理のない系列とする必要がある。本稿で対象としたNSPにおける目的関数を表1に示す。進化的計算手法において解候補となる勤務表について、各目的関数に対する違反箇所の数を算出し、その値を各目的関数の評価値として用いる。

4. 実験と考察

4.1 実験内容

本節では、3節で示したNSPにNSGA-IIを適用し、1,000世代演算後に得られた11,529個のパレート解(探索過程において、非劣解である限りパレート解はすべてデータベースに保存)に対して本手法により可視化を行った結果を示し、それらについて考察する。なお用いたNSGA-IIの遺伝的演算パラメータは、交

表 2 各目的関数に対する重み係数
およびクラスタ間散布/クラスタ内散布

目的関数	重み係数	従来手法	提案手法	比
<i>Obj</i> ₁	2	$1.20 * 10^{-4}$	$2.5 * 10^{-6}$	0.013
<i>Obj</i> ₂	4	$3.80 * 10^{-6}$	$1.3 * 10^{-4}$	34
<i>Obj</i> ₃	2	$4.40 * 10^{-5}$	$1.8 * 10^{-4}$	4.1
<i>Obj</i> ₄	3	$5.50 * 10^{-4}$	$1.1 * 10^{-3}$	2
<i>Obj</i> ₅	1	$6.70 * 10^{-5}$	$1.70 * 10^{-6}$	0.025
<i>Obj</i> ₆	5	$2.30 * 10^{-4}$	$1.10 * 10^{-3}$	4.8
<i>Obj</i> ₇	5	$3.05 * 10^{-5}$	$2.2 * 10^{-4}$	7.2
<i>Obj</i> ₈	3	$8.40 * 10^{-6}$	$1.10 * 10^{-5}$	1.3
<i>Obj</i> ₉	4	$3.70 * 10^{-4}$	$1.40 * 10^{-3}$	3.8
<i>Obj</i> ₁₀	2	$4.39 * 10^{-5}$	$1.84 * 10^{-5}$	0.42
<i>Obj</i> ₁₁	1	$1.40 * 10^{-4}$	$2.20 * 10^{-5}$	0.16
<i>Obj</i> ₁₂	3	$1.0 * 10^{-4}$	$6.4 * 10^{-5}$	0.64

又率 0.9 の一点交叉、突然変異率 0.5 の 1ヶ所勤務交換 (同日内の他の看護師の勤務と入れ替える)、個体数 100 である。本実験では、筆者らがこれまで提案してきた可視化手法³⁾を従来手法として、提案手法との比較・検討を行う。また本実験では、獲得されたパレート解における各目的関数の評価値を平均 0、分散 1 に標準化した後、従来手法と提案手法を適用し、可視化を行った。

4.2 目的関数への重み付け

ここでは、各目的関数に対して、ユーザにより重み係数を設定した際のクラスティング結果に対する検討を行う。提案手法、従来手法ともにクラスタ数は 3 とした。本実験で設定した、各目的関数に対する重要度 (重み係数) を表 2 (2 列目) に示す。従来手法では全ての目的関数を等価に扱っているため、各目的関数における重みの値は全て 1 となる。これらの重み係数を用いて多次元評価空間上でクラスティングを行った。表 2 (3, 4 列目) に、各目的関数におけるクラスタ間散布/クラスタ内散布の値を示す。表右の列は提案手法と従来手法との比の値 (提案手法/従来手法) を示す。

クラスタ間散布とクラスタ内散布との比は各クラスタの分離度を示すものであり、この値が大きいことは、互いのクラスタが離れていることを意味する。ユーザにより重要度が高く設定された目的関数 *Obj*₂, *Obj*₆, *Obj*₇, *Obj*₁₀ の比率が大きな値を示していることから、これらの目的関数軸上で、各クラスタが分割されやすくなっていることがわかる。

4.3 射影軸へのラベル付け

本実験では、ユーザが「毎日の看護の質」、「勤務制約」、「勤務負荷の平等性」というラベル付けを行った。また各ラベルに対応する目的関数を表 3 のように選択した。表中の数字が示されている部分が、各ラベルに

対して選択された目的関数である。4.2 で得られた従来手法と提案手法それぞれ 3 つのクラスタに対して、従来手法により得られた射影軸の固有値と固有ベクトルを表 3 に、提案手法により得られた各ラベルに対する射影軸の固有ベクトルを表 4 にそれぞれ示す。表では、絶対値が 0.3 以上の係数を太字で表示している。

表 3 に示す固有ベクトルの係数により、従来手法における第 1 射影軸は、*Obj*₃, *Obj*₄, *Obj*₉, *Obj*₁₁, 第 2 射影軸は、*Obj*₁, *Obj*₄, *Obj*₅, *Obj*₁₀ からそれぞれ強く影響を受けていることがわかる。また第 1 射影軸の *Obj*₄, *Obj*₉ の係数の値が正を、*Obj*₃, *Obj*₁₁ の係数の値が負を示していることから、第 1 射影軸方向の値が大きくなる程、禁止勤務系列、夜勤の月間規定回数に関する違反個数が多く、1 日の各勤務においてチームごとの必要な人数および各看護師に対する土日の連休に関する違反個数が少ない勤務表 (非劣解) であることを示している。このように従来手法では、各射影軸の意味やクラスタの特徴を把握することは容易とはいえず、特にユーザの求める解の発掘を行う上では必ずしも適切であるとはいえない。

一方、表 4 では、ユーザが軸のラベルおよび対応する目的関数を設定しているため、ユーザにとって軸の意味付けやクラスタの特徴の解釈が極めて容易となる。また従来手法と比較して提案手法では、重要度が高く設定された目的関数について、固有ベクトルの値が大きな射影軸が得られていることがわかる。例えば、従来手法では、重要度を高く設定した *Obj*₂, *Obj*₆, *Obj*₇ の固有ベクトルの値が小さいため、可視化結果からクラスタ単位で *Obj*₂, *Obj*₆, *Obj*₇ に関する特徴を得ることは困難である。これに対し提案手法により得られた射影軸では、ユーザが高い重み係数を設定した *Obj*₂, *Obj*₆, *Obj*₇, *Obj*₉ の固有ベクトル値が大きいことがわかる。これにより、クラスタやパレート解の特徴を把握する上で、ユーザが重要だと思ふ目的関数を基準として解釈を得ることが可能となる。

4.4 可視化結果

4.3 節により得られたそれぞれの射影軸を用いて、1,000 世代までに得られたパレート解の可視化を行った。従来手法により得られた可視化結果を図 1(a)、提案手法により得られた「勤務制約」と「勤務負荷の平等性」の 2 つの軸による可視化結果を図 1(b) に示す。

従来手法においてクラスタで見ると、Cluster3 が第 1 射影軸で右方向、第 2 射影軸が下方向に位置することから、Cluster3 に所属する解候補は他のクラスタと比較すると、(*Obj*₃) チームごとの必要な人数、(*Obj*₁₁) 土日の連休、(*Obj*₁) 各勤務に対する必要な人数、(*Obj*₁₀)

表 3 従来手法により得られた固有ベクトル

	第 1 射影軸	第 2 射影軸
固有値	1.59	0.89
Obj_1	0.020	0.67
Obj_2	-0.10	-0.14
Obj_3	-0.42	-0.037
Obj_4	0.56	-0.35
Obj_5	-0.12	-0.46
Obj_6	0.094	-0.005
Obj_7	-0.19	0.17
Obj_8	-0.091	0.005
Obj_9	0.38	0.15
Obj_{10}	0.095	0.36
Obj_{11}	-0.48	-0.13
Obj_{12}	-0.21	-0.053

表 4 提案手法により得られた固有ベクトル

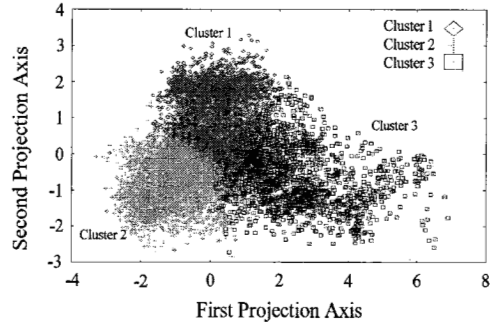
	毎日の看護の質	勤務制約	勤務負荷の平等性
Obj_1	0.10	×	×
Obj_2	0.89	×	×
Obj_3	-0.07	×	×
Obj_4	×	-0.69	×
Obj_5	×	-0.04	×
Obj_6	×	×	0.52
Obj_7	×	×	0.80
Obj_8	×	×	0.03
Obj_9	×	-0.71	×
Obj_{10}	-0.45	0.10	0.16
Obj_{11}	×	×	0.26
Obj_{12}	×	×	0.023

休みの規定回数に関する違反個数は少なく、(Obj_4) 禁止勤務系列、(Obj_9) 夜間の月間規定回数、(Obj_5) 妥協禁止勤務系列、に関する違反個数が多いという特徴を持つパレート解であったと考えられる。

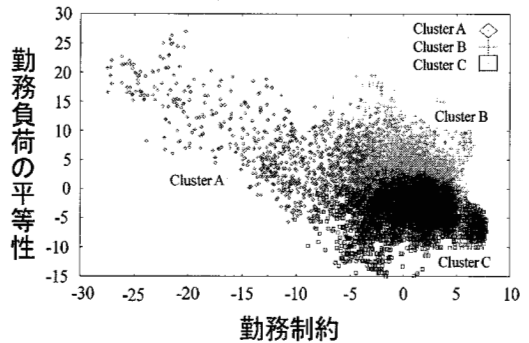
図 1(b) から、ClusterC が、「勤務制約」軸で右方向、「勤務負荷の平等性」軸で下方向に位置することから、 Obj_4 、 Obj_9 、 Obj_6 、 Obj_7 に関する違反個数が少なく、このユーザの求める解候補は ClusterC に多く存在していると考えられる。固有ベクトルの正負が一致したことは偶然ではあるが、従来手法と比較して、提案手法による可視化により、クラスターや解候補の意味付けが容易となることがわかる。

5. おわりに

本稿では、多目的最適化問題において得られた多次元の評価値を持つパレート解の可視化について、変数の重み付けおよび射影軸のラベル付けにより、ユーザの意図や主観を反映した可視化手法を提案した。提案手法では、各目的関数に対してユーザが持つ重み係数を設定することで、クラスタリングにユーザの意図を反映させ、射影軸へのラベル付け、およびそのラベル



(a) 従来手法



(b) 提案手法

図 1 可視化結果 (1,000 世代)

に適した変数を主観的に選択することで、次元圧縮にユーザの主観を反映させている。このように、ユーザが積極的に射影軸の意味付けに関与することで、ユーザにとって解釈容易な可視空間の構築を可能にしている。本稿では、実問題である NSP に NSGA-II を適用した際に獲得されたパレート解に対し、提案手法を用いて可視化を行い、その有効性を検討した。

参考文献

- 1) 上野 尚樹, 古橋 武, “看護師長の作成手法を取り入れた看護師勤務表作成支援システム”, 第 14 回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, pp.174-177, 2004.
- 2) Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal and T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II,” IEEE Trans. on Evolutionary Computation, Vol.6, No.2, pp.182-197, 2002.
- 3) 山代 大輔, 吉川 大弘, 古橋 武, “多目的最適化問題におけるパレート解の可視化に関する一考察 - ソリューションマイニング 技術の開発 -, ” 第 16 回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, pp.293-297, 2006.