修士論文

人の複数嗜好を抽出するための対話型システムの提案

同志社大学大学院 工学研究科 情報工学専攻
博士前期課程 2009年度 730番

小林　祐介

指導教授　三木 光範教授

2011年1月21日

Abstract

There are many systems using an user's preference in interactive systems, for example interactive genetic algorithm etc. In these previous interactive systems, the systems are performed by user's preference. But, there are several factors in the user's preference. And those factors influence the final user's determin. The other way, the factors have trade-off relations. In such case, we need to consider each factors in same time and make a decision.

Then, in this paper, we proposed the system of using the method for extracting of the user's several factors in the user's preference. In this method, we use 2 steps for extracting of the user's several factors in the user's preference.

The first, we propose the algorithm of extracting the group which has trade-off relation. In this algorithm, user did pair-comparison in AHP, and the system use the concept of antilogy in the result. We can think that the antilogy in AHP is ingenerated by several factors which has trade-off relation. In the way, we can think that the algotithm can extract the group which has trade-off relation.

The second, we propose the algorithm of extracting the degrees of trade-off relation in the group which has trade-off relation. For extracting these degrees, we focus on the relations of the user's preference and design valuable space. We estimate the degree of trade-off relation in the group of the factors which have trade-off relation by using these relations and the result of AHP.

We use the algorithms, and verified the capability by using the evaluate agent in someone's stead. In the result, we checked the antilogy in pair-comparison, and found out to extract the group which has trade-off relation.

目 次

1 序論 **1**

2 多目的対話型遺伝的アルゴリズム **2**

2.1 対話型遺伝的アルゴリズム 2

2.2 多目的最適化問題 2

2.3 多目的遺伝的アルゴリズム 3

2.4 多目的対話型遺伝的アルゴリズム 4

2.5 複数の主観的目的を考慮した MOiGA 4

3 人の複数の嗜好の抽出 **7**

3.1 概要 7

3.2 トレードオフ関係を有している可能性のある箇所の抽出 7

3.3 判断要素の判別手法 13

3.4 複数嗜好抽出シミュレーション実験 15

4 評価値のスケーリングによるアーカイブ個体の評価値の更新 **24**

4.1 世代間の評価値の問題 24

4.2 世代間の評価値スケールを合わせる手法 24

4.3 世代間の評価値スケーリング法の評価実験 25

4.4 実験結果と考察 28

5 結論 **35**

1　序論

対話型遺伝的アルゴリズム（interactive Genetic Algorithm:iGA）[1] は，人の感性情報を用いて最適化を行う手法の一つである．iGA では，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm:GA）[2] における評価の部分を人間が行うことで，ユーザの嗜好や勘といったこれまで数値化できなかった対象に対しても最適解を求めることが可能である．

iGA では，これまでに 3DCG のライティングデザイン[3] や補聴器フィッティングの設計[4]，T シャツのデザイン支援[5]，浴衣のデザイン設計[6]，チャイム音の生成支援[7] といった対象問題に適用され，成果を上げている．

一方で，iGA を利用することで探索過程の途中で得られる情報を基に，ユーザの持つメタモデルを抽出することが可能であると考えている．最終的な解のみに注目するのではなく，これらのメタモデルを抽出することで，ユーザの特性を解析したり，得られたメタモデルを利用して別の問題に適用することで，解の早期発見に繋がると考える．これまでにメタモデルを把握するための子解候補生成方法[8] や，動的にこのメタモデルを変化するケースの検討[9] などが行われてきた．

これら従来の iGA では，ユーザは対象となる解候補を設計者が設定した総合的な 1 つの嗜好に沿う度合いで評価を判断していた．しかし，この 1 つの目的には複数の判断要素が存在し，それらのサブ要素が最終的な解に大きく影響を与える[10]．例えば，その総合的な目的である「好ましさ」には，複数の判断要素が内包されている．また，それらの判断要素の間にトレードオフ関係が存在する場合がある．そのような場合，互いの判断要素が競合するため，同じ程度良い対象でも，全く異なる判断要素で判断している可能性がある．そのため，総合的な嗜好のみを用いて意思決定を行う場合と複数の判断要素を考慮する場合では，結果に大きく差があると考えられる．そこで，本研究では，各判断要素をそれぞれ目的とみなすことで，複数の評価基準を同時に考慮し最適化を行う多目的最適化問題として扱うことを考える．

iGA を多目的最適化問題に適用させた手法として多目的対話型遺伝的アルゴリズム（Multi-Objective interactive Genetic Algorithm:MOiGA）[11] を提案してきた．これまでの MOiGA では，設計者があらかじめユーザの嗜好の目的を設定し，その嗜好を基に最適化を行ってきた．しかしながら一般には，嗜好における各判断要素をあらかじめ決定することは非常に困難である．また，これらの判断要素を提案過程で明確することができれば，ユーザの持つメタモデルを決定することにもつながる．

そこで，本稿では，トレードオフ関係にある複数の判断要素を対話型遺伝的アルゴリズムを利用することで抽出できる可能性について検討する．そのため，複数の判断要素を抽出するためのアルゴリズムを提案する．提案アルゴリズムでは，一対比較を行い，それらの結果を AHP[12] で分析し，矛盾点を探る．この矛盾点を解消する判断要素を見つけることで，その解候補が各判断要素に沿っている度合いを抽出することとする．また，それらの判断基準を基に最適化を行う場合，評価部において世代間の評価値の問題が存在する．その問題を解決するため，世代間の評価値スケールを調整する改良アルゴリズムを提案する．

以上の 2 つの提案アルゴリズムを検討するため，前者では評価エージェントを用いてシミュレーション実験を行い，後者は被験者実験により提案手法の有効性を検討を行う．これらの実験により，複数の判断要素が抽出できる可能性とその結果を基に最適化ができる可能性について検討を行う．

2 多目的対話型遺伝的アルゴリズム

2.1 対話型遺伝的アルゴリズム

対話型進化計算法（Interactive Evolutionary Computation:IEC）の一つである iGA は，GA のうち評価の部分を人間が行うことによって解の探索を進める．その際ユーザがシステムによって提示された個体に与える評価は，ユーザの嗜好を反映したものであるため，人の感性という複雑な構造の解析により適しているといわれている[1)]．そのため，設計デザインなどの最適化問題[4, 13–16)] へと適用されており，ユーザの主観的評価を目的関数とした単一目的最適化問題において良好な解を探索するアプローチとして知られている[1)]．以下に iGA のアルゴリズムを示す．

（1）探索母集団 Q_t を初期化し，t に 0 をセットする．

（2）Q_t をユーザに提示する．

（3）Q_t の評価を行う．

（4）終了条件を満たしていれば，終了する．

（5）Q_t に対して遺伝的操作（選択・交叉・突然変異）を行う．

（6）t に $t+1$ をセットし，(2）に戻る．

また，iGA では一般的に良い適合度を持つ個体の淘汰を防ぐため，エリート保存戦略が用いられている．この戦略では，前の世代で最も良い個体を次世代に提示することで，前の世代と次世代の評価のスケールを揃える役割を担っている．iGA は，これらのメカニズムにより，ユーザの嗜好を基に最適解を導出する．

これまでにも多くの研究においてアルゴリズムの検討が行われている[17–20)]．しかし，従来の iGA の研究の多くは単一目的の対象問題やアルゴリズムのみを扱っていた．実際に人が一つの意思決定を行う際には，競合する複数の判断要素を有する場合がある[10)]．このように複数の属性を考慮して最適化を行う問題として多目的最適化問題がある．iGA を多目的最適化問題へ適用した多目的対話型遺伝的アルゴリズムについて研究が行われている．

2.2 多目的最適化問題

多目的最適化問題とは，複数の評価基準のもとで最適解を求める問題である．これは，n 個の設計変数を扱う k 個の目的関数 $\overrightarrow{f}(\overrightarrow{x})$ を，m 個の制約条件 $\overrightarrow{g}(\overrightarrow{x})$ のもとで最大化（最小化）する問題として式 Fig. 2.1 のように定式化される[21)]．

$$\begin{cases} max \quad \overrightarrow{f}(\overrightarrow{x}) = (f_1(\overrightarrow{x}), f_2(\overrightarrow{x}), \ldots, f_k(\overrightarrow{x}))^T \\ subject \quad to \quad \overrightarrow{x} \in X = \{\overrightarrow{x} \in R^n \\ \qquad\qquad\qquad \mid g_i(\overrightarrow{x}) \leq 0, (i = 1, \ldots, m)\} \end{cases} \tag{2.1}$$

しかし，一般的な多目的最適化問題では，各評価基準がトレードオフ関係にあることが多く，そのような場合には唯一となる最適解は得られない．そのため，多目的最適化では，パレート最適解集合という概念を用いて探索を行う．パレート最適解集合とは，実行可能領域内の他のどの解にも劣らない解集合であり，パレート最適解集合を求めることが多目的最適化の目的である．このパレート最適解集合を導出するために，解の優越関係を用いる．ある解 A が，他の別の解 B と比較して全ての目的関数値が良い場合，A は B を優越するという．また，A が B のいずれかの目的関数値において悪い値をとる場合，A は B に劣らないと表現し，B は劣解であると表現する．各世代において，他のどの解にも劣らない解をその世代の非劣解と呼ぶ[22)]．

多目的最適化により求められたパレート解集合では，精度と多様性が重要な指標となる．精度とは，パレート解集合においてどれほど評価値の良い解が求められているかを測る指標である．精度が良いほど良いパレート解集合であるといえる．また，多様性とは，幅広さと均一性を表す指標であり，幅広く均一に解集合が存在していることが望ましい．これら精度と多様性を同時に満たしたパレート解集合を求めることが多目的最適化問題の目的となる．

2.3　多目的遺伝的アルゴリズム

パレート最適解集合を求めるために GA を多目的最適化問題に適用した多目的遺伝的アルゴリズム (Multi-Objective Genetic Algorithm:多目的 GA) に関する研究が数多く行われている．その理由として，GA が多点探索であり，一度の探索でパレート解集合を求められることがあげられる．

この多目的 GA では非劣解集合を適切に評価し，次世代に残すことが重要となる．このため，非劣解集合を確実に保存するための母集団 (アーカイブ母集団) と交叉・突然変異といった遺伝的操作を用いた探索を行うための探索母集団の 2 つを用いて解探索を行う．これらの 2 つの母集団に対して，適切に適合度を割り当てる必要がある．そのため，解の優越関係を用いて適合度を割り当てるパレート的アプローチが多く提案されている．一般的なパレート的アプローチの多目的 GA 手法として，K. Deb らによる NSGA-II(Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm)[23)] や E. Zitzler らによる SPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm)[24)] などがあり，他にも様々な手法が検討されている[25–28)]．また，手法の研究のみではなく，実問題へも多く適用されている[29,30)]．

本研究では，一般的な多目的 GA 手法である NSGA-II を適用した．アーカイブ母集団を P，探索母集団を Q とし，以下に NSGA-II のアルゴリズムついて述べる．

(1) 探索母集団 Q_t を初期化し，アーカイブ母集団 P_t を空にする．t に 0 をセットする．

(2) 探索母集団 Q_t の評価を行う．(非優越ソート・混雑度距離計算)

(3) 環境選択により P_{t+1} を生成する．

(4) 終了条件を満たしていれば，終了する．

(5) P_{t+1} から，混雑度トーナメント選択により Q_{t+1} を生成する．

(6) Q_{t+1} に対して遺伝的操作（交叉，突然変異）を行う．

(7) t に $t+1$ をセットし，(2) へ戻る．

NSGA-II のアルゴリズムにおいて，非優越ソートと呼ばれる適合度割当方法，混雑度距離計算，混雑度トーナメント選択は NSGA-II 特有の処理であり，これらの処理によって個体の優劣を判定する．この優劣を基に非劣解を適切に保存する母集団として，アーカイブ母集団が存在する．このアーカイブ母集団を利用することにより，良い解の淘汰を防ぎ，解探索を効率的に進めることが可能となる．

2.4　多目的対話型遺伝的アルゴリズム

多目的対話型遺伝的アルゴリズム (Multi-Objective interactive Genetic Algorithm:MOiGA) は，iGA に多目的 GA の手法を適用したアルゴリズムである．従来の MOiGA では，人の嗜好を用いた主観的評価と目的関数を用いた定量的な評価を同時に考慮した最適化を行っている．例えば，A. Brintrup らは，部屋の間取りデザイン問題[31] において，主観的な評価として人の好ましさを用い，定量的な評価として各部屋の面積を用いて最適化を行っている．また，他にも多くの対象問題において研究が行われている[32–37]．

Fig. 2.1 に主観的な評価と定量的な評価を用いた MOiGA のフローチャートを示す．初期化した個

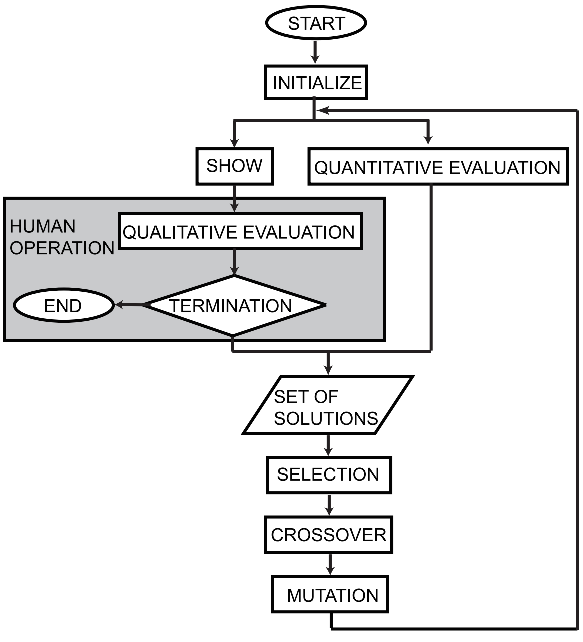

Fig. 2.1　主観的な評価と定量的な評価を扱う MOiGA フローチャート

体をユーザに提示し，ユーザから得た主観的評価と同時に定量的評価に対し最適化を行っていた．

2.5　複数の主観的目的を考慮した MOiGA

2.5.1　複数の主観的目的を考慮した MOiGA 概要

本研究では，主観的評価を一つしか用いない従来の MOiGA とは異なり，ユーザの複数の主観的評価を同時に考慮して最適化する手法を提案する．例えば，人は服を購入する場合,「かわいさ」や「かっこよさ」等の複数の評価基準により購入を検討していると考えられる．この複数の評価基準にはトレードオフ関係が存在する場合があると考えられる．そこで，人の複数の評価基準を同時に考慮

した MOiGA について検討する．

Fig. 2.2 に，複数の主観的な評価を用いた MOiGA のフローチャートを示す．Fig. 2.2 に示すよう

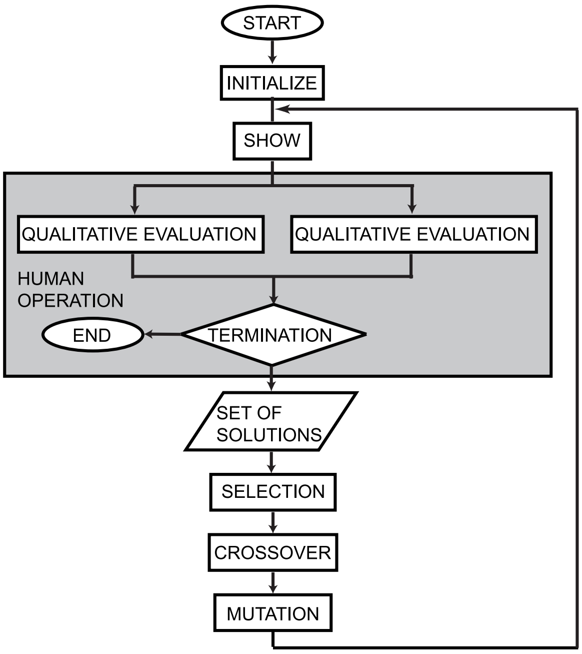

Fig. 2.2　複数の主観的な評価を扱う MOiGA フローチャート

に，提案する MOiGA では，定量的な目的に対しては評価を行わず，ユーザが複数の評価を行う．これにより，ユーザの判断要素を最適化に組み込み，ユーザの主観に合った多様性のある解集合を導出できると考えられる．

2.5.2　複数の主観的目的を考慮した MOiGA の問題

従来の iGA や MOiGA では，設計者が目的を設定し，ユーザは，その目的に沿って評価を行って来た．しかし，あらかじめ設計者が目的を設定するのではなく，探索に従いユーザの複数の嗜好を抽出することで，ユー ザ本人も気づかなかった新たな嗜好が発見できると考えられる．また，設計者はユーザがどのような嗜好で探索を行うのかを調査し，問題を設計する必要があった．この調査や設計には多大な労力が必要であるため，設計者の問題設定負担を軽減させる方法が必要となる．

また，複数の主観的目的を考慮した MOiGA では，最適化の処理において，問題が生じる．従来の多目的 GA では，目的関数が世代間で常に一定であり，アーカイブ母集団に保存される個体は常に良い個体であった．しかし，複数の主観的目的を同時に考慮した MOiGA では人間の嗜好が目的関数となるため，各個体の評価は，その世代での相対的な評価であると考えられる．これにより，世代間での評価値のスケールに差が生じるため，その世代での相対的な評価値を探索全体での絶対的な評価値として扱う必要があると考えられる．そのためには，アーカイブ母集団として保存されている個体を全てユーザに提示し，探索母集団と合わせて相対的に評価を付ける必要がある．しかし，ユーザがアーカイブ母集団に対して毎世代評価を付け直すという作業は，ユーザにとって大きな負担となる．よってユーザの負担とならないアーカイブ母集団の評価値の更新を行う方法が必要となる．

そこで本稿では，以上の 2 つの問題，(1) ユーザの複数嗜好の抽出，(2) 世代間の評価値スケール

の問題を複数の主観的目的を同時に考慮したMOiGAにおける問題であるとし，これらを対象として検討する．

3　人の複数の嗜好の抽出

3.1　概要

人が物事を判断する時，人は総合的な嗜好によって判断している．しかし，その総合的な嗜好には，複数の判断要素が内包されている．それらの判断要素は総合的な嗜好に大きく影響を与えると考えられている[10)]．また，それらの判断要素間にトレードオフ関係を有する場合が存在する．本研究では，トレードオフ関係を有する判断要素を抽出し，その判断要素に対して，解候補がどの程度沿っているかを推定することを目的としている．

そのため，自動的に複数の嗜好を抽出する手法を考案する．しかし，ユーザがどのような判断要素を内包しているかという情報は，ユーザ本人にすらわからない．そこで，まずは，トレードオフ関係にある複数の嗜好が内包する箇所を抽出することを考える．そのため，本研究では，多基準意思決定法（Multi Criteria Decision Making:MCDM）の一つである階層分析法（Analytic Hierarchy Process:AHP）[12)] の一対比較法と AHP における矛盾という概念を用いることによりトレードオフ関係にある複数の嗜好が内包する箇所の抽出を実現する．

また，そのトレードオフ関係を有している可能性のある箇所において，各解候補がどの程度各判断要素に沿っているかを推定する手法を提案する．本手法では，各判断要素間で発生する矛盾の解消を行うことにより，どの程度各判断要素に沿っているかを推定し，評価値を割り当てる．これにより，多目的最適化に各判断要素を組み込むことが可能であると考えている．

3.2　トレードオフ関係を有している可能性のある箇所の抽出

3.2.1　AHP

AHP とは，階層構造を構築し，その中で評価基準や代替案に対して一対比較により評価を行うという特徴を持つ手法である[12)]．AHP は，人間の感性などの数値化できない対象の数値化や最終的な意思決定に使用されている．

Fig. 3.1 に階層構造の例を示す．ここでは，最終目標を Z，評価基準を 1〜m，代替え案を 1〜n で示している．

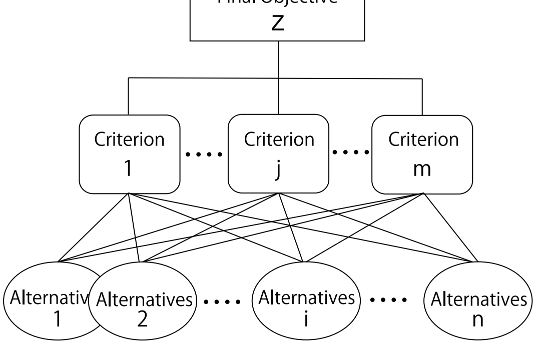

Fig. 3.1　階層構造の例

このような階層構造において，各代替案について評価基準を基に総当たり的に評価を行う．その結果として，代替案 k に対して代替案 j の重要度を比べた一対比較値を w_j/w_k と表す場合，式（3.1）

に示すような一対比較行列を得ることができる．

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \cdots & w_1/w_k & \cdots & w_1/w_m \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_j/w_1 & \cdots & w_j/w_k & \cdots & w_j/w_m \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_m/w_1 & \cdots & w_m/w_k & \cdots & w_m/w_m \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

この一対比較行列 A の行方向に幾何平均を取り，その幾何平均の総和で各行の幾何平均を除することで評価基準の重み E_j を算出することが可能である．式（3.2）に重み E_j を算出する式を示す．

$$E_j = \frac{\sqrt[m]{{}_m\Pi_k w_j/w_k}}{\sum_{j=1}^{m} \sqrt[m]{{}_m\Pi_k w_j/w_k}} \tag{3.2}$$

この E_j と w_j/w_k を基に代替案 i の評価得点 R_i を計算する式を式（3.3）に示す．

$$R_i = \sum_{j=1}^{m} E_j w_j/w_k \tag{3.3}$$

これにより，各代替案を順位付けし，各代替案の中から最終目的を選定する手法である．

3.2.2 AHP における矛盾

3.2.1 節で示した AHP において，一対比較行列の内部に矛盾が生じていないかどうかを確かめる指標として，コンステンシー係数 (constency index:C.I.)[38] が用いられる．ここでの矛盾とは，意思決定者が評価基準 j より評価基準 k を重視し，評価基準 k より評価基準 l を重視しているにも関わらず，結果的に評価基準 l より評価基準 j を重視して一対比較を行ってしまう誤りのことである．相対的な重要度を一対ごとに数値化する手続きの中で，矛盾が起こりえないという保証はない．主固有ベクトル法を用いた場合，C.I. は，式（3.4）によって算出される．λ_{max} は，一対比較行列 A の最大固有値である．一方幾何平均法や調和平均法では，式（3.5）で算出される．

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \tag{3.4}$$

$$C.I. = \frac{\tau - m}{m - 1} \tag{3.5}$$

τ は τ_j の平均である．τ_j は幾何平均法，または，調和平均法について式（3.6）を満たすものである．

$$\tau_j w_j = \sum_{k \neq j} A w_k \tag{3.6}$$

一般的に C.I. が 0.1 以下であれば，一対比較の整合性があるとみなされる．逆に C.I. が 0.1 以上の場合，整合性が無いと判断され，一対比較行列は破棄される．

しかし，本研究では，この矛盾に着目する．この矛盾が発生している箇所を，「意思決定者の複数の嗜好がトレードオフ関係にあるため，矛盾が発生している可能性がある」と考える．この考えにより，一対比較法を用いることでユーザの複数の嗜好が存在する可能性がある箇所を特定することが可能である．

3.2.3　判断要素の存在する箇所の推定アルゴリズム

解候補群を Q，解候補を N とし，以下に矛盾抽出のアルゴリズムついて述べる．

（1）解候補群 Q を初期化する．

（2）Q からランダムに 2 つの解候補 N_i と N_j を取り出す．

（3）2 つの N に対して，ユーザが一対比較を行う．

（4）全ての組み合わせに対して評価を行うまで（2）〜（3）を繰り返す．

（5）（4）までの一対比較の結果を有向グラフとして捉え，ISM により矛盾箇所を抽出する．

（5）において，一対比較の結果をそのまま用いると，矛盾箇所の抽出が複雑となるため，ISM (Interpretive Structural Modeling)[39] を利用する．この ISM により有向グラフを簡略化し，矛盾箇所を抽出することを考える．

3.2.3.1　ISM の概要

ISM[39] は，アメリカのバッテル研究所の Warfeld らにより開発された手法である．システムが n 個の要素 s_1，s_2，⋯，s_n による集合 S と表現される場合，その任意の 2 つの要素 s_i と s_j の間に，ある関係が存在する場合 s_iRs_j，存在しない場合は $s_i\neg Rs_j$ と表現する．このとき，システムは，各要素をノードとし，関係 s_iRs_j を s_i から s_j へと向かう有向グラフとして記述される．Fig. 3.2 に例を示す．

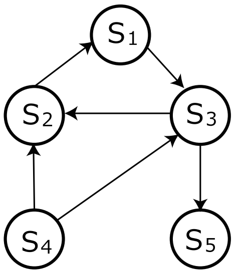

Fig. 3.2　有向グラフの例

このような各ノード間の複雑なエッジを最小限に抑え，システムの全体像・一部分を分析するための手法として，ISM が提案された[40]．

3.2.3.2　ISM のアルゴリズム

ISM では，n 個のノード間の関係を $n \times n$ の隣接行列 A を用いて表現することができる．つまり，隣接行列 A の第 i 行 j 列要素を a_{ij} を式（3.7）で表すことができる．

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & s_iRs_j(s_i\text{と }s_j\text{に関係があるとき}) \\ 0 & s_i\neg Rs_j(s_i\text{と }s_j\text{に関係がないとき}) \end{cases} \tag{3.7}$$

Fig. 3.2 の有向グラフの例に対応する隣接行列 A は，式（3.8）で表される．

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

すなわち，Fig. 3.2 の有向グラフにおいて，ノード i から j に至るエッジがあるとき，第 i 行 j 列要素が 1 となる．

次に，A^2 をブール代数によって考える．ブール代数では，和，積は論理和，論理積で表される．この場合に式（3.8）の A に対して A^2 を計算すると，式（3.9）のようになる．

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

この行列は，Fig. 3.2 の有向グラフにおいて，ノード i から j へ 2 本のエッジを通して到達できるとき，第 i 行 j 列要素が 1 となる．同様にして，A^k では，ノード i から j へ k 本のエッジを通して到達可能であるとき，第 i 行 j 列要素が 1 となる．これにより，ブール演算に基づく式（3.10）は，k 本以下のエッジを通して到達可能であるとき，第 i 行 j 列要素が 1 となる．

$$(A+I)^k = I + A + A^2 + \cdots + A^k \tag{3.10}$$

Fig. 3.2 の場合，式（3.11）から式（3.13）に示すように $(A+I)^3 = (A+I)^4$ となり 3 本以下のエッジで到達可能なノードと 4 本以下のエッジで到達可能なノードが同じとなる．

$$A+I=\begin{pmatrix}1&0&1&0&0\\1&1&0&0&0\\0&1&1&0&1\\0&1&1&1&0\\0&0&0&0&1\end{pmatrix} \tag{3.11}$$

$$(A+I)^2=\begin{pmatrix}1&1&1&0&1\\1&1&1&0&0\\1&1&1&0&0\\1&1&1&1&1\\0&0&0&0&1\end{pmatrix} \tag{3.12}$$

$$(A+I)^3=\begin{pmatrix}1&1&1&0&1\\1&1&1&0&1\\1&1&1&0&1\\1&1&1&1&1\\0&0&0&0&1\end{pmatrix}=(A+I)^4 \tag{3.13}$$

そのため，それ以上のエッジを通して到達可能なノードも同じであることがわかる．これにより，一般に式（3.10）の $k=1,2,\cdots$ を計算し，式（3.14）となる場合，行列 M を可到達行列と呼ぶ．

$$(A+I)\neq(A+I)^2\neq\cdots\neq(A+I)^{r-1}=(A+I)^r=M \tag{3.14}$$

次に，可到達行列 M に基づいてノードの構造を考える．まず，s_i に対してその要素から到達可能な全ての要素の集合 R_i（到達可能集合）と，要素 s_i に到達可能なすべての要素の集合 A_i（先行集合）を定義する．R_i と A_i の共通集合 $R_i{\cap}A_i$ を考え R_i と比較する．

$$R_i\cap A_i=R_i \tag{3.15}$$

式（3.15）を満足する要素 s_i の集合は，これに属さない要素のどれにも到達できない要素の集合である．このような要素の集合をレベル 1 として，以下の手順でに従ってシステムの階層構造を明らかにすることができる．式（3.13）を例に取って考えると，R_i，A_i，$R_i{\cap}A_i$ は Table.3.1 のようになる．

すなわち，式（3.15）を満たす s_i は s_5 である．s_5 に対応する行および列を M より除くと式（3.16）のように表される．

$$M'=\begin{pmatrix}1&1&1&0\\1&1&1&0\\1&1&1&0\\1&1&1&1\end{pmatrix} \tag{3.16}$$

Table 3.1　到達可能集合；先行集合およびその共通集合

i	R_i	A_i	$R_i \cap A_i$
1	1,2,3,5	1,2,3,4	1,2,3
2	1,2,3,5	1,2,3,4	1,2,3
3	1,2,3,5	1,2,3,4	1,2,3
4	1,2,3,4,5	4	4
5	5	1,2,3,4,5	5

式（3.16）での M' に対する R_i'，A_i'，$R_i' \cap A_i'$ は，Table.3.1 から 5 を全て取り除いたものとなる．再び式（3.15）を満たす要素を調べれば，s_1，s_2，s_3 を得る．これがレベル 2 の要素となる．一般には，この手順を繰り返し適用することにより，集合 S を多階層構造レベルに分割することができる．例での $S = s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ はレベル分割の結果，$SH = s_5, (s_1, s_2, s_3), s_4$ と分割され，Fig. 3.3 のような階層構造の有向グラフとして表すことができる．

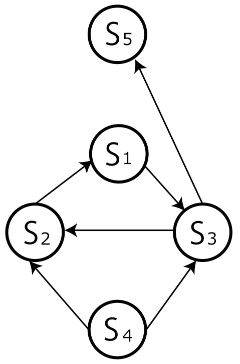

Fig. 3.3　階層型有向グラフ

この例では，s_1，s_2，s_3 は互いに到達可能であり，この関係を強連結関係という．強連結関係を $\Leftrightarrow$ で表すと，これは，同値関係を満たす．

（1）反射律：$s_i \Leftrightarrow s_i \quad i \in (1, 2, 3)$

（2）推移律：$s_i \Leftrightarrow s_j$, $s_j \Leftrightarrow s_k$ なら $s_i \Leftrightarrow s_k \quad i, j, k \in (1, 2, 3)$

（3）対称律：$s_i \Leftrightarrow s_j$　なら　$s_j \Leftrightarrow s_i \quad i, j \in (1, 2, 3)$

この関係により，s_1，s_2，s_3 は同じ性質を持つグループに属するものと考えることができる．したがって，これらを一括して 1 つのノードで表すと Fig. 3.4 のような最小数のエッジをもつ有向グラフで示すことができる．

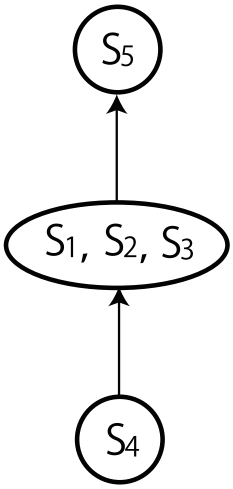

Fig. 3.4　最小数のエッジをもつ有向グラフ

3.3　判断要素の判別手法

3.3.1　概要

3.2.2 項で示したように一対比較の矛盾を利用することで，ユーザの複数の嗜好が存在する可能性がある箇所を特定することが可能である．しかし，実際にその矛盾の発生箇所の中で，それぞれの解候補が判断された要因はわからない．そこで，それらの要因を抽出するための手法を提案する．

本手法では，それぞれの解候補が，2 つの判断要素において，各判断要素で解候補を評価値の良い順番に整列させた場合に，どのような順序になるかを推定するアルゴリズムである．矛盾を解消するエッジの変更により，変更されたエッジ箇所の判断要素は、変更されない判断要素とは異なるという仮定のもと，1 つの判断要素で判断した場合の解候補の評価の順番を推定する．また，本手法では，ユーザが 2 つの判断要素で判断していると仮定する．

3.3.2　判断要素の判別手法

解候補群を Q，矛盾箇所の解候補群を M，解候補を N とし，利用する解候補の数を t とした場合，以下に評価値推定手法のアルゴリズムついて述べる．

(1) 3.2.3 項で示したアルゴリズムを用いて矛盾箇所を抽出する．

(2) (1) で抽出した解候補群 M において，3 つの各解候補 N_i，N_j，N_k をランダムに抽出する．t に 3 をセットする

(3) 抽出した解候補間に矛盾関係が存在するかを調べる．

(4) (3) の結果，矛盾関係がある場合，その矛盾を解消するようにエッジを逆転させ，t に $t+1$ をセットする．矛盾関係が無い場合かつ $t=3$ の場合 (2) に戻る．矛盾関係が無い場合かつ $t>3$ の場合 (5) へ進む．

(5) 矛盾を解消した各解候補群に M の他の解候補 N_I を加え，(3) に戻る．

(6) (3) ～ (5) を解候補群 M の全ての解候補数 t_{max} まで行う．

(7) 解候補群 M の目的関数 f_1 に対して解候補群 Q 全体を考慮した際の ISM によるランクと解候補群 M における ISM によるランクを考慮し，導出した値を評価値として割り当てる．式 (3.17) に評価値導出式を示す．式 (3.17) における $Evaluationvalue$ は推定された評価値を示し，$Value_Q$，$Value_M$ は各解候補群での ISM によるランクを示す．

$$Evaluationvalue = \frac{100}{Value_Q * Value_M} \tag{3.17}$$

(8) (4) において，反転させたエッジ以外のエッジを反転させる．(3) ～ (6) と同様の処理を行う．

(9) 解候補群 M の目的関数 f_2 に対して式 (3.17) に示した評価値導出式を用いて導出した値を評価値として割り当てる．

(10) (2) ～ (6) の処理を全ての矛盾箇所において行う．

上記のアルゴリズムを用いることで，解候補群 Q はすべて 1 つの判断要素で判断した場合の一対比較の結果となる．これらを ISM により分析することで，解候補群 Q は，1 つの判断要素で判断した場合の解候補の評価値の順番とみなすことが可能である．また，(4) において，反転させたエッジ以外のエッジを反転させることで，2 つ目の判断要素のみで判断した場合の解候補の評価値の順番を得ることが可能である．矛盾を解消する例を Fig. 3.5 に示す．Fig. 3.5 において，楕円は解候補を表し，楕円内の数字は解候補の ID を表す．また，矢印の向きが向いている解候補は，向いていない解候補と比較して良い評価を与えられてたことを表す．

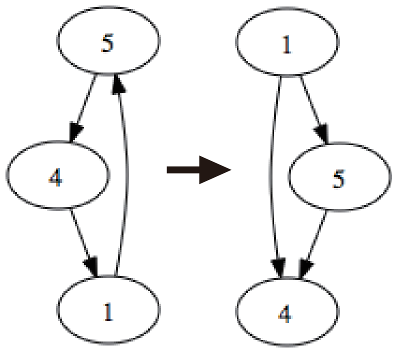

Fig. 3.5 矛盾を解消する例（左：矛盾状態，右：矛盾解消）

以上のアルゴリズムを用いることで，各解候補の各判断要素毎の評価値を割り当てることが可能となる．また，推定した評価値が正確な解候補の順序となっているかを確認し，ユーザによって目的関数空間上での各解候補の評価値の順序を決定できるように，パレートフロントを利用するマッピング[11] を用いて再評価を行う．これにより，ユーザが認識していない判断要素に対して評価を与えることが可能であると考えられる．

3.4 複数嗜好抽出シミュレーション実験

3.4.1 実験概要

本実験では，まず，3.2 節に記した複数の判断要素抽出アルゴリズムを用いて，ユーザの複数の判断要素を抽出できる可能性の検証を行った．その結果を用いて，3.3 節で示した解候補の判断要素の判別アルゴリズムを利用して，各解候補の評価の順番を推定し，それが適切であるかどうかを検討する．

対象問題は，プレゼント包装デザイン問題[11] を用いた．プレゼント包装デザイン問題では，Fig. 3.6 で示すようなプレゼントの箱の色とリボンの色を最適な配色にする問題である．なお，本実験では，プレゼントの箱の色とリボンの色を HSB 表色系[41] で表現した．HSB 表色系は，人間の感性に似た色の表現方法であり，色を色相，彩度，明度の 3 要素で表現する．色相は赤，黄，緑，青，紫の 5 色相を円周上に等間隔に並べた色相環で表すことが可能であり，0.0〜360.0 までの実数値で表現される．明度は明るさや暗さといった色の明暗のことであり，明度が高い程色は明るい色になる．彩度は，色の鮮やかさの度合いを意味しており，彩度が低い程よりモノクロに近づく．明度と彩度に関しては 0〜100 までの実数値で表現される．

本実験では，初期の解候補を 10 個とし，その 10 個を全ての組み合わせで一対比較を行った．その際，ユーザの嗜好を模した評価を行う評価エージェントを用いた．また，10 試行行い，その結果について検討を行った．

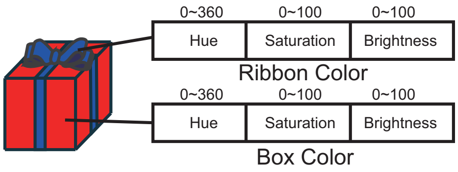

Fig. 3.6 プレゼント包装デザインのモデル

3.4.2 評価エージェント

評価エージェントの仕様は，2 つの目標とする設計変数を持ち，確率的に判断する嗜好が変更される特徴を有する．本実験で設定したエージェントの目標設計変数を Table 3.2 に示す．

Table 3.2 目標設計変数

Design Value	*Object1*	*Object2*
Hue of Box	0	180
Saturation of Box	0	100
Brightness of Box	0	100
Hue of Ribbon	0	180
Saturation of Ribbon	0	100
Brightness of Ribbon	0	100

評価エージェントは，一対比較の際に，どちらの目標で判断するかを決定し，その目標からの設計

変数空間におけるユークリッド距離が近い解候補を選択する．本実験では，目標の変更確率を10%に設定し，選択した解候補には1を，選択しなかった解候補には0という値を付けることで一対比較行列を生成する．

3.4.3　実験結果と考察

3.4.3.1　トレードオフ関係を有している可能性のある箇所の抽出

実験の結果，Fig. 3.7，Fig. 3.9，Fig. 3.11，Fig. 3.13の4つの場合に分類することが可能であった．また，結果の一対比較行列を有向グラフに変換した．しかし，その有向グラフは複雑であり，結果の分析が困難であるため，グラフ理論の一種であるISM[39]を利用し，簡略化した．この際，楕円は解候補を表し，楕円内の数字は解候補のIDを表す．また，矢印の向きが向いている解候補は，向いていない解候補と比較して良い評価を与えられていたことを表す．

- 矛盾が発生しなかった場合の一対比較行列の有向グラフ化した結果をFig. 3.7に示す．また，ISMにより簡略化した一対比較結果をFig. 3.8に示す．

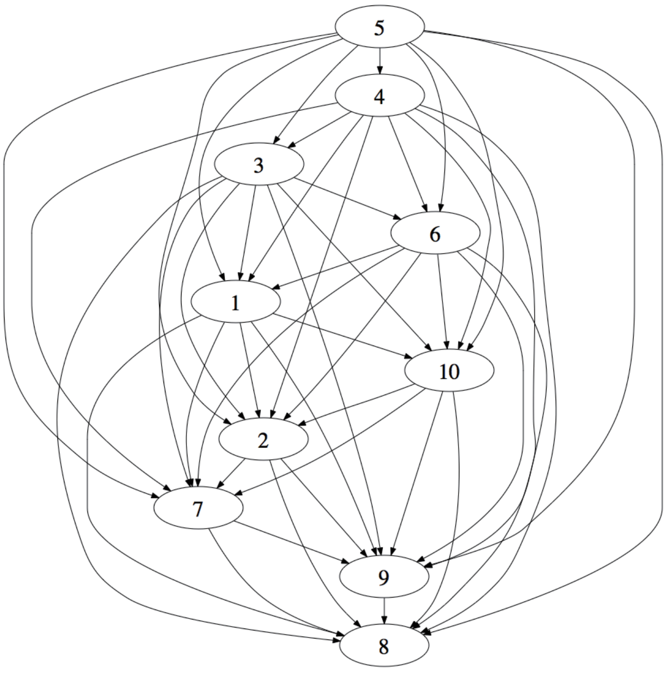

Fig. 3.7　一対比較結果

- 矛盾が発生し，全ての解候補に優越が付けられなかった場合の一対比較行列の有向グラフ化した結果をFig. 3.9に示す．また，ISMにより簡略化した一対比較結果をFig. 3.10に示す．
- 矛盾が発生しているが，発生している解候補群が他の解に優越されている場合の一対比較行列の有向グラフ化した結果をFig. 3.11に示す．また，ISMにより簡略化した一対比較結果をFig. 3.12に示す．
- 矛盾が発生している解候補群が他の全ての解候補を優越している場合の一対比較行列の有向グラフ化した結果をFig. 3.13に示す．また，ISMにより簡略化した一対比較結果をFig. 3.14に

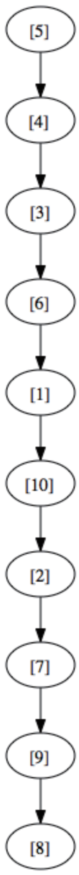

Fig. 3.8　簡略化した一対比較結果

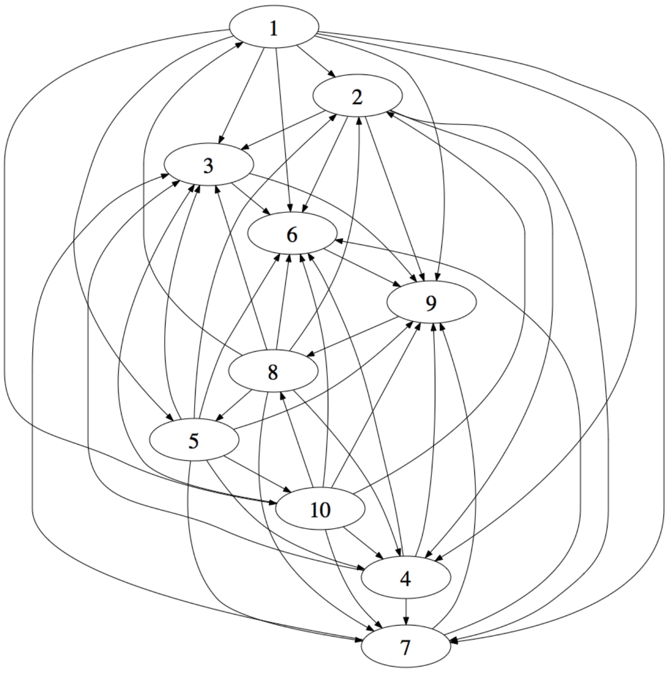

Fig. 3.9　一対比較結果

Fig. 3.10　簡略化した一対比較結果

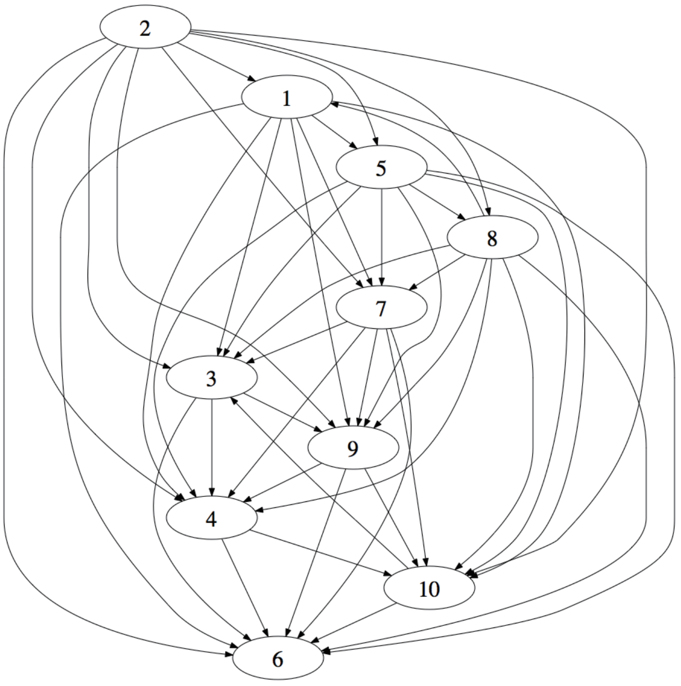

Fig. 3.11　一対比較結果

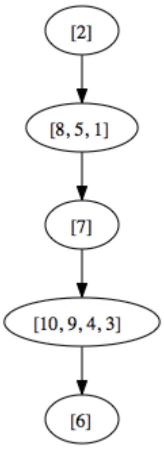

Fig. 3.12　簡略化した一対比較結果

示す.

4 つの結果それぞれについて考察を行う．まず，Fig. 3.7，Fig. 3.8 で示した一対比較結果では，矛盾が発生していないため，嗜好軸の抽出はできない．しかし，この場合は全ての解候補の順位付けが

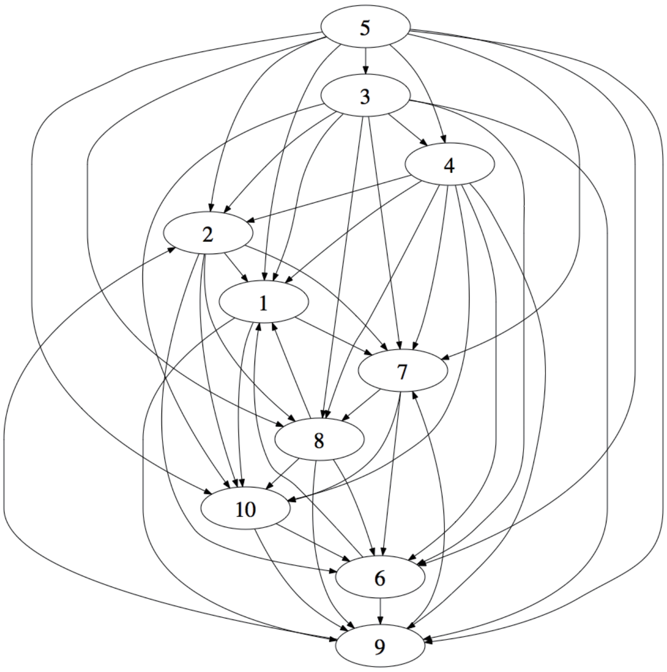

Fig. 3.13　一対比較結果

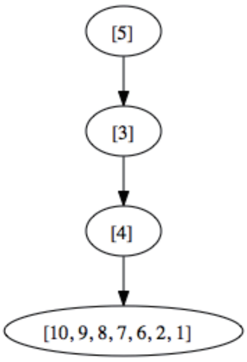

Fig. 3.14　簡略化した一対比較結果

はっきりとできているため，全ての判断要素を内包した総合的な基準で良い順番に並んでいると考えることができる．

次に，Fig. 3.9，Fig. 3.10 で示した一対比較結果では，全ての解候補間で矛盾が発生している．この場合，全ての解候補の間にトレードオフ関係がある可能性があり，全て非劣解として扱うことができる．しかし，この解候補群にどのようなトレードオフ関係があるかはわからない．そこで，一対比較の結果を基にトレードオフ関係の度合いを推定する手法を用いる必要がある．

次に，Fig. 3.11，Fig. 3.12 で示した一対比較結果では，矛盾している解候補群が他の解に優越されているため，その矛盾箇所での嗜好は，優越している解候補の嗜好に内包されていると考えることができる．

次に，Fig. 3.13，Fig. 3.14 で示した一対比較結果では，矛盾している解候補群が他の解候補を優越しているため，その矛盾箇所での嗜好軸は，互いにトレードオフ関係にあると考えることができる．

この矛盾箇所にある解候補群に対して，各判断要素間のトレードオフ関係の度合いを推定する手法を用いる必要がある.

以上より，トレードオフ関係にある複数の判断要素を内包する箇所の抽出は可能であるということがわかった.

3.4.4　判断要素の判別

各解候補がどの程度各判断要素に沿っているかを推定した．Fig. 3.15 に基にした AHP での一対比較の結果を，Fig. 3.16 に ISM により簡略化した結果を示す.

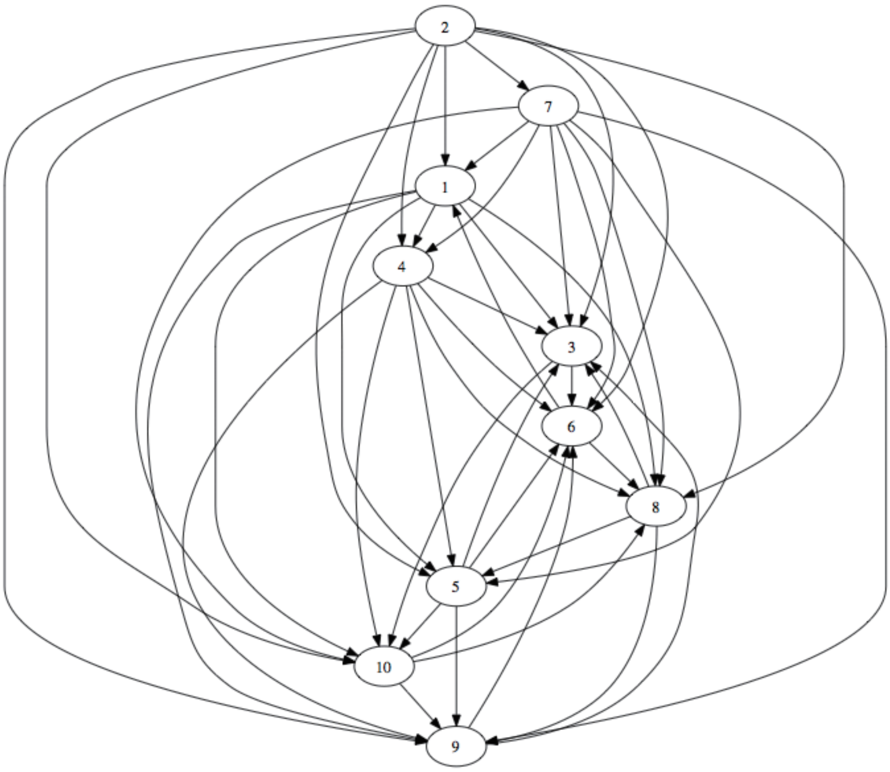

Fig. 3.15　基とした一対比較結果

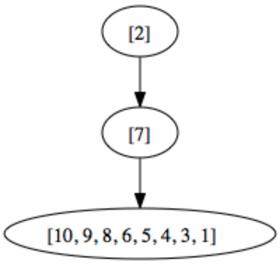

Fig. 3.16　簡略化した基とした一対比較結果

Fig. 3.16 より，解候補 1，3，4，5，6，8，9，10 において矛盾が発生していることがわかる．この矛盾箇所に 3.3.2 項で述べた判断要素の判別手法を適用した場合の Fig. 3.17 に基にした AHP での一対比較の結果を，Fig. 3.18 に ISM により簡略化した結果を示す.

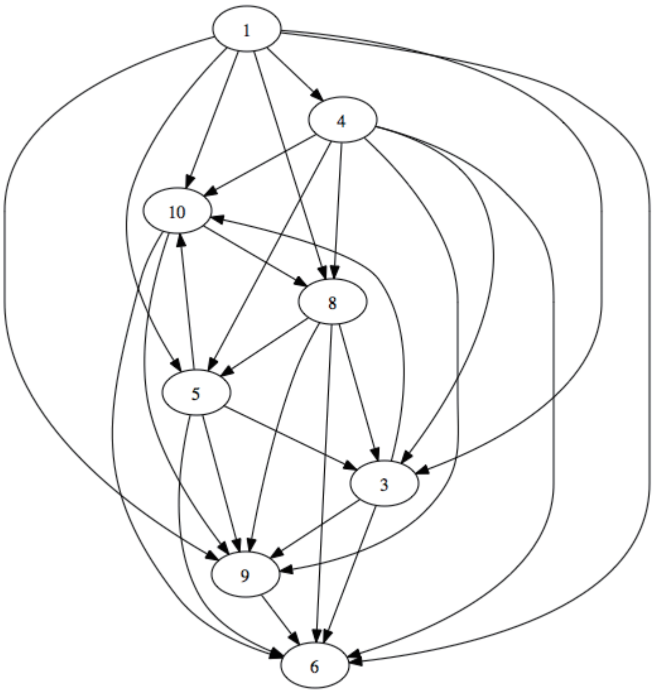

Fig. 3.17　解候補 1，3，4，5，6，8，9，10 における一対比較結果

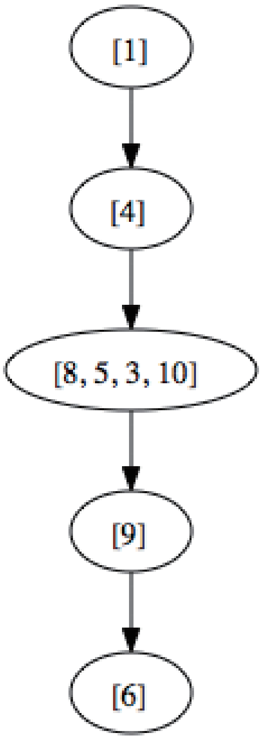

Fig. 3.18　簡略化した解候補 1，3，4，5，6，8，9，10 における一対比較結果

Fig. 3.17, Fig. 3.18 より解候補 8，5，3，10 において矛盾が解消されていないことがわかる．ここで矛盾が解消されていない原因を調査した．Fig. 3.17，Fig. 3.18 の 1 つ前の状態，つまり，エッジを反転させる前の状態を示す図を Fig. 3.19，Fig. 3.20 に示す．

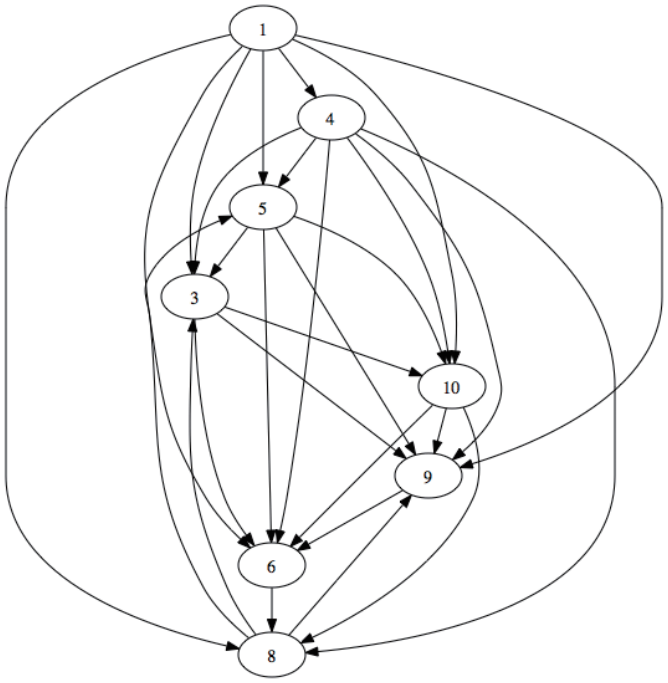

Fig. 3.19　一対比較結果

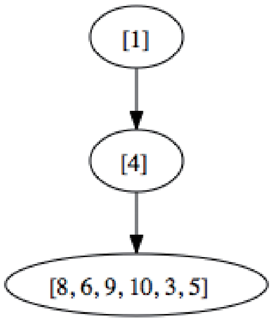

Fig. 3.20　簡略化した一対比較結果

Fig. 3.19，Fig. 3.20 より，解候補 8，6，9，10，3，5 において矛盾が発生していることがわかる．この矛盾を解消するためには，解候補 3，9，6 での矛盾と解候補 8，6，9 での矛盾，解候補 3，6，8 での矛盾，解候補 5，6，8 での矛盾の 4 つの矛盾を解決する必要がある．しかしながら，アルゴリズムでは，1 本のエッジのみを反転させるため，これらの 4 つの矛盾を同時に解消させることができなかったと考えられる．

しかしながら，矛盾箇所における解候補の数が，5 つ以下であれば，1 つのエッジを反転させることで矛盾の解消が可能であると考えられる．矛盾箇所における解候補の数が 5 つの場合の AHP における矛盾を含む一対比較結果の矛盾を解消した結果を Fig. 3.21 に示す．また，ISM により簡略化した結果を Fig. 3.21 に示す．

Fig. 3.21 より，解候補 1 と解候補 3 のエッジを逆転させることで，矛盾が解消していることが分かる．このように，矛盾箇所の解候補の数が 5 つの場合は矛盾を解消させることが可能であることがわかった．

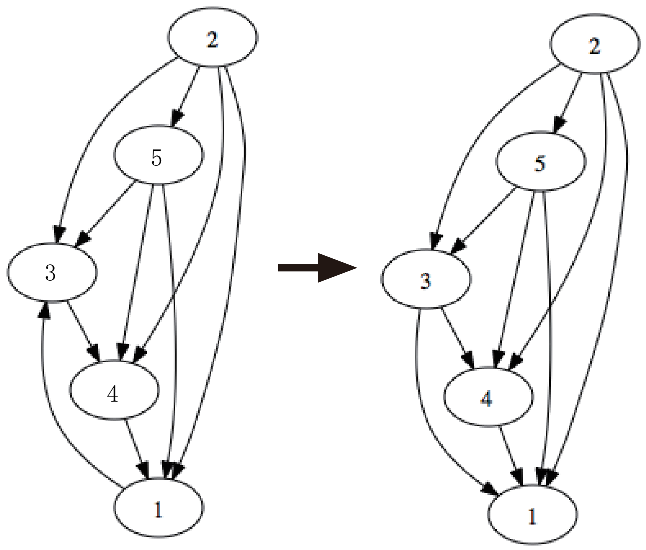

Fig. 3.21　矛盾を解消した一対比較結果（左：矛盾状態、右：矛盾解消）

Fig. 3.21 で示した解候補について評価値を割り当てた場合の結果を Fig. 3.22 に示す.

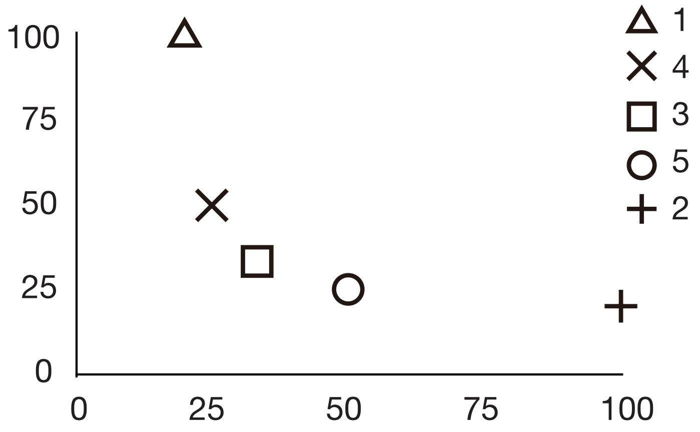

Fig. 3.22　推定した評価値

Fig. 3.22 に示したように評価値をパレートで割り当てることが可能であると確認した。この結果をユーザに提示することにより，パレートフロントを利用するマッピング[11)] を用いることで判断要素毎に評価が可能であるという可能性を示すことができたと考えられる.

4　評価値のスケーリングによるアーカイブ個体の評価値の更新

4.1　世代間の評価値の問題

2.5.2 で述べたように，被験者は前の世代で付けた評価値を意識すること無く，その世代における個体だけを見て評価値を判断するため，その世代に付けられた個体への評価値は一世代の中での相対的な評価値となる．そのため，相対的な評価値を世代全体での絶対的な評価値として扱った際に，満足度の評価が悪くなる場合が存在すると考えられる．探索初期の段階で高い評価を与えられた個体が，最終的な解集合に含まれているという場合が存在し，被験者の満足度を低下させている要因となったと考えられる例を Fig. 4.1 に示す．Fig. 4.1 は，予備実験において，最終的なアーカイブ母集団の満足度が悪いと記述した被験者 A の 1 世代目のアーカイブ母集団の評価値と最終的なアーカイブ母集団の評価値をプロットした図である．これより，1 世代目で保存された最終世代の個体と比較して悪

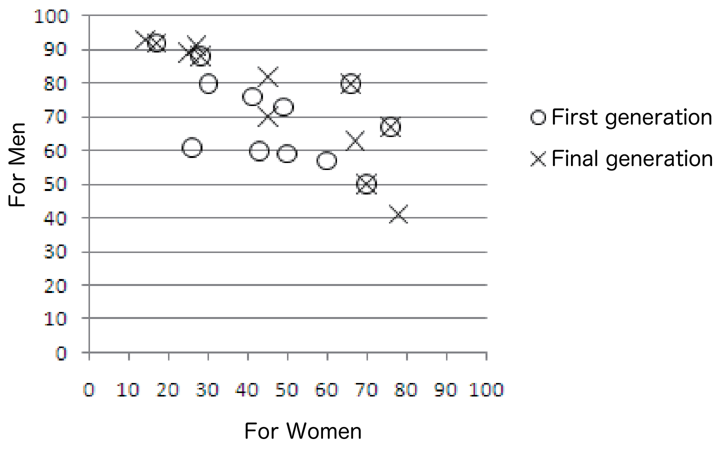

Fig. 4.1　被験者 A の 1 世代目のアーカイブ母集団と最終的なアーカイブ母集団の評価値

い個体が最終的なアーカイブ母集団に含まれていることによって，被験者の満足度が低下しているのではないかと考えることができる．このような傾向が，予備実験において見られた．中でも，マッピングは，他の評価手法と比較してより相対的な評価を行うことができる評価手法であるため，この傾向がより大きいと考えられる．

そこで，このような問題を解決するには，アーカイブ母集団の個体の評価値を探索母集団と同じ基準で評価し，毎世代更新する必要がある．しかし，それには毎世代被験者が，アーカイブ母集団の個体の評価をやり直すという負担がかかるという問題がある．そこで，被験者への負担なく，アーカイブ母集団の個体の評価値を適切に更新する手法を提案する．

4.2　世代間の評価値スケールを合わせる手法

4.1 節で述べた問題を解決するため，本研究では世代間の評価値スケーリング法を提案する．この提案手法では，アーカイブ母集団における各目的評価値が最大の個体を次世代においてユーザに提示し，再度評価を行うことで，この個体の評価値の変化に合わせてアーカイブ母集団内の他の個体の評

価値を更新する．アーカイブ母集団を P，探索母集団を Q とし，各目的関数値 m が最大の個体を I_m としたとき，提案手法のアルゴリズムを以下に述べる．

（1）探索母集団 Q_t を初期化し，アーカイブ母集団 P_t を空にする．t に 0 をセットする．

（2）Q_t を提示する．

（3）Q_t の評価を行う．

（4）スケーリングのため，$t > 1$ の場合，以下の操作を行う．

   (a) $t-1$ 世代目に各目的関数値が最大の個体 $I_{m_{t-1}}$ の評価値と t 世代目のその個体に対してユーザが付けた評価値の変更割合（r）を算出する．

   (b) P_t の目的 m の評価値を r 倍する．

（5）環境選択により P_{t+1} を生成する．

（6）終了条件を満たしていれば，終了する．

（7）P_{t+1} より I_{t_m} を抽出する．

（8）P_{t+1} から，混雑度トーナメント選択により Q_{t+1} を生成する．

（9）Q_{t+1} に対して遺伝的操作（交叉，突然変異）を行う．

（10）Q_{t+1} から目的数だけ個体を削減する．

（11）Q_{t+1} に I_{m_t} を加える．

（12）t に $t+1$ をセットし，(2）へ戻る．

以上のアルゴリズムを用いることでアーカイブ母集団の評価値をユーザが手動で更新するという負担を軽減し，世代間の相対的な評価値を扱うことが可能であると考えられる．

4.3 世代間の評価値スケーリング法の評価実験

4.3.1 実験目的

本実験では，複数の主観的目的を同時に考慮する MOiGA において，提案手法の有効性を検討した．そのため，最も良いとされた評価手法であるマッピングを用いたシステムを使用した[11)]．検討方法として，提案手法を適用したシステム（提案システム）と適用していないシステム（従来システム）を比較した．

4.3.2　実験概要

被験者は 19〜23 歳の日本人（男性 8 名，女性 2 名）であった．実験の終了条件として，終了世代数を 10 世代とした．その 10 世代目に保存されたアーカイブ母集団を被験者に提示し，それを最終的な解集合とした．また，システムの実験順序を順番が重ならないように被験者間でカウンタバランスをとり，全てのシステムの実験終了後にアンケートを実施した．

各被験者に対し，以下のような実験手順で実験を行った．

(1) 実験車が被験者に対して教示を行った．

(2) 被験者は提案システムと従来システムのうち片方のシステムに対して実験を行った．

(3) 被験者は実験後再評価を行った．

(4) 被験者に 1，5，10 世代目のアーカイブ母集団を提示し，評価を行った．

(5) （2）〜（4）を全てのシステムを実験するまで繰り返した．

(6) システムの比較アンケートを実施した．

(7) 被験者に各システムで 10 世代目のアーカイブ母集団を提示し，評価を行わせた．

本実験では，以下の 4 項目について検討を行った．

- 評価値スケーリングの精度
  提案手法による評価値が被験者の嗜好に沿っているかを確かめるため，各システムの実験終了後に 10 世代目のアーカイブ母集団を提示し，そのアーカイブ母集団に対して評価を行わせた（実験後再評価）．この実験後再評価を行った個体と，10 世代目のアーカイブ母集団の評価値とを比較し，被験者の嗜好に合った評価値が付けられているかを検証した．

- 提案システムの探索の進行性
  被験者に対して各システムで 1，5，10 世代目のアーカイブ母集団を提示し，各個体に対して評価を行わせた．この際，10 世代目のアーカイブ母集団が 1，5 世代目のアーカイブ母集団を優越しているかどうかを検証した．また，1，5，10 世代目の全ての個体での非劣解を抽出し，各世代のアーカイブ母集団の含有率を求め，解探索の進行について検証した．そのインターフェイスを Fig. 4.2 に示す．Fig. 4.2 で示したインターフェイスの左側に 1，5，10 世代目のアーカイブ母集団をランダムに提示した．これらの個体に対して被験者は評価を行った．

- 評価値スケーリングにより生成された解の優越性
  各システムの 10 世代目のアーカイブ母集団の優劣を確認するため，10 世代目のアーカイブ母集団を同時に提示し評価を行わせた．そのインターフェイスを Fig. 4.3 に示す．これにより，提案システムと従来システムで生成された 10 世代目のアーカイブ母集団を同じスケールの基で比較を行うことが可能となり，世代間の評価値スケール問題について検討することができた．

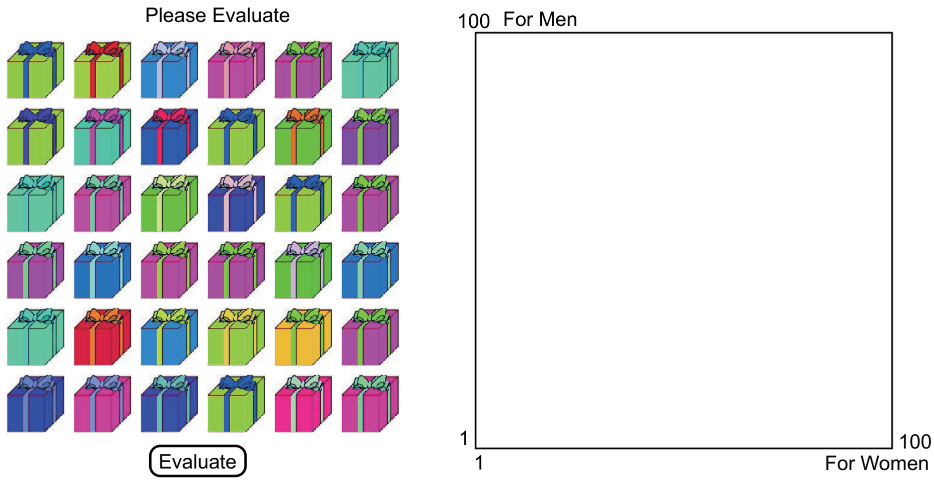

Fig. 4.2　各世代のアーカイブ母集団を提示するインターフェイス

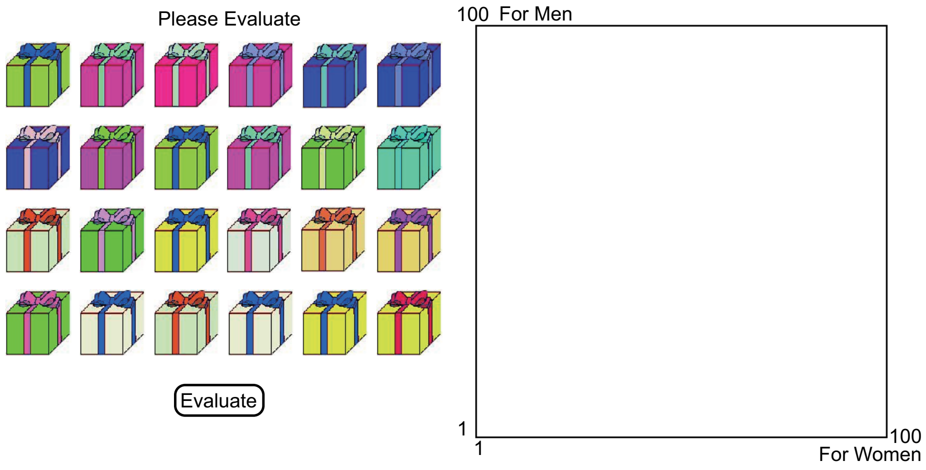

Fig. 4.3　システム比較用インターフェイス

- 実験アンケート
  全ての実験終了後にアンケートを実施し，被験者の嗜好に沿った解集合が生成できているかを検討した．アンケートの内容を以下に示す．
  - 提案システムと従来システムではどちらの方が「男性向けのプレゼント」という目的に沿った解が作成できたか．(*For Men*)
  - 提案システムと従来システムではどちらの方が「女性向けのプレゼント」という目的に沿った解が作成できたか．(*For Women*)
  - 提案システムと従来システムではどちらの方が多様な解集合であったか．(*Diversity*)

4.4 実験結果と考察

4.4.1 評価値スケーリングの精度の検討

実際に提案手法により，被験者の嗜好に合った評価値にスケーリングされているかどうかについて検討する．

実験後再評価によって付けられた評価値と実験中にスケーリングされた評価値との誤差を評価値の誤差と呼ぶ．Fig. 4.4 に被験者 B の評価値の誤差の結果を示す．Fig. 4.4 より，再評価前の評価値と

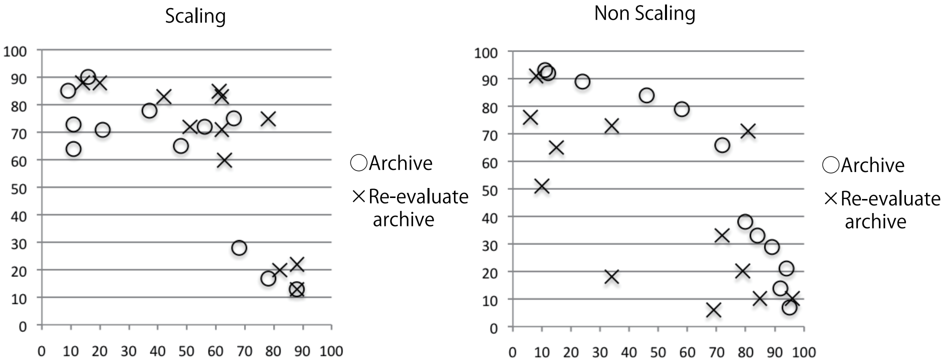

Fig. 4.4　被験者 B の再評価結果

再評価後の評価値に差があることが確認できる．また，提案システムの方が，従来システムより評価値の誤差が小さいことが確認できた．

この際に，被験者間で同様の結果となるのかどうかを，評価値の誤差を定量化することで，検討を行った．誤差を算出する定式を式（4.1）に示す．

$$E = \frac{\sum_{k=1}^{H}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\sum_{j=1}^{M}(f_{k_{i_j}} - f'_{k_{i_j}})^2}}{N * H} \tag{4.1}$$

式（4.1）において，E はシステムの総合的な誤差，H は被験者数．N はアーカイブ母集団サイズ，M は目的数．f は 10 世代目のアーカイブ母集団に付けられた評価値，f' は実験後再評価によりアーカイブ母集団に付けられた評価値をそれぞれ表す．E_{system} の範囲は，0.0〜141.4 であり，値が小さいほど，最終的なアーカイブ母集団に付けられた評価値が正確に付けられている．誤差が 0.0 の時は被験者の嗜好に基づいて付けられた評価とアーカイブ母集団に付けられている評価値が一致していることを表す．

評価値の誤差の結果を Table 4.1 に示す．Table 4.1 での $SystemValue$ は式（4.1）での E_{system} の値を示し，$StandardDeviation$（σ）は，1 個体あたりの誤差の標準偏差を表している．$StandardDeviation$（σ）は式（4.2）により導出する．

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{H}\sum_{i=1}^{N}\left(\sqrt{\sum_{j=1}^{M}(f_{k_{i_j}} - f'_{k_{i_j}})^2} - E\right)^2}{N * H}} \tag{4.2}$$

Table 4.1 より，提案システムの方が，E_{system} の値が小さいことがわかる．また，σ の値も小さいため，被験者の評価と提案手法による評価のばらつきも小さいと考えられる．したがって，提案シス

Table 4.1　評価値の誤差

	scaling	*Non scaling*
System value	16.4177	22.8731
Standard deviation	8.1272	33.9322

テムの方が，従来システムより被験者の嗜好を反映した評価値を個体に付けることができたと考えられる．

4.4.2　探索の進行性の検討

被験者 C の 1，5，10 世代目のアーカイブ母集団全てを再度評価した結果を Fig. 4.5 に示す．なお，ここでは，各世代の非劣解のみを抽出した．Fig. 4.5 では，提案システムで 10 世代目に保存された

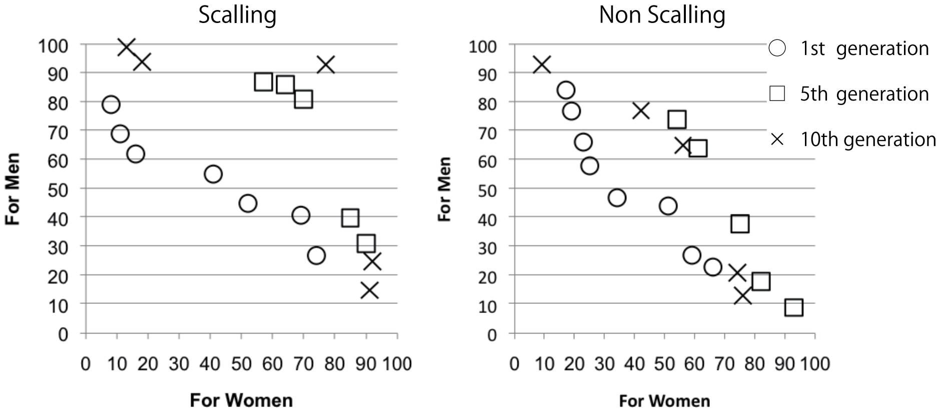

Fig. 4.5　被験者 C の解集合の評価値

アーカイブ母集団の個体が，1，5 世代目のアーカイブ母集団に劣らないことがわかる．逆に，従来システムでは，10 世代目に保存されたアーカイブ母集団の個体が，5 世代目のアーカイブ母集団に劣っていることがわかる．Table 4.2 に全被験者の非劣解として評価された各世代の個体の含有率の平均を示す．Table 4.2 より，提案システムの方が，10 世代目のアーカイブ母集団の非劣解割合が大きい．

Table 4.2　各世代の非劣解の含有率

	1st generation	*5th generation*	*10th generaion*
scaling(%)	15.33	28.50	56.17
Non scaling(%)	19.25	37.57	43.18

これは，従来システムでは，探索初期に個体に対して高い評価値を与えると，その高く評価された個体がアーカイブ母集団に保存されたままになってしまう．このため，探索後半に個体に高い評価値を付けても，前のアーカイブ母集団の個体より劣ってしまい，アーカイブ母集団に保存されないからで

あると考えることができる．そのため，解の収束性は，従来システムより提案システムの方が探索が進行していることがわかった．

4.4.3　解の優越性の検討

各システムの最終的に保存されたアーカイブ母集団に対して被験者に提示し，評価を行った．被験者 D が評価を行った結果を Fig. 4.6 に示す．Fig. 4.6 では，各システムにおける非劣解のみを抽出した．Fig. 4.6 より各目的関数値を最大とする個体の評価は，従来システムの方が良いが，両目的に

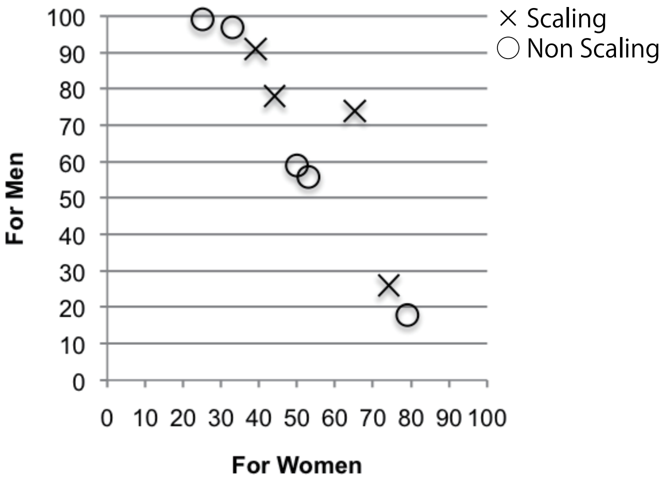

Fig. 4.6　被験者 D のシステム比較結果

沿った解は提案システムの方が多く生成されていることがわかる．提案システムと従来システムの非劣解の含有率の平均を Table 4.3 に示す．Table 4.3 より，両システムにおいて明確な差がないことが

Table 4.3　非劣解の含有率の平均値

	scaling	*Non scaling*
Parcentage	51.05%	48.95%

わかった．

次に，各システムでの非劣解の数に注目する．Fig. 4.4 に，被験者が評価した各システムのアーカイブ母集団の平均非劣解数を示す．Fig. 4.4 より，従来システムの方が提案システムより，非劣解が

Table 4.4　アーカイブ母集団の平均非劣解数と割合

	scaling	*Non scaling*
Average of individual numbers	3.9	4.5
Parcentage of archive	32.5%	37.5%

多く生成されていることがわかる．

これらの結果において，探索途中の非劣解の数が，最終的なアーカイブ母集団の多様性に影響していると考えられる．Table 4.5 に各システムにおける 5 世代目にアーカイブ母集団に保存されていた平均非劣解数を示す．このように，従来手法より提案手法の方が非劣解の割合が少なくなっている．

Table 4.5　5 世代目のアーカイブ母集団の平均非劣解数と割合

	scaling	*Non scaling*
Average of non-dominated solutions numbers	4.2	6.9
Parcentage of archive	35.0%	57.5%

これは，提案システムでは，世代毎にアーカイブ母集団の解が更新される頻度が多くなるため，従来システムより，非劣解の割合が小さくなったと考えられる．そのため，親個体の選択において，同じ個体を選択する確率が大きくなり，その後の交叉において，子個体の設計変数と親個体の設計変数の類似した個体が多く生成されてしまう可能性がある．そのため，被験者間で差が出るが，目的関数空間，設計変数空間に偏りが生じ，多様性を維持することが難しくなったと考えられる．

4.4.4　アンケート結果

アンケートの結果を Fig. 4.7 に示す．本アンケートの結果より，提案システムの方が，従来システ

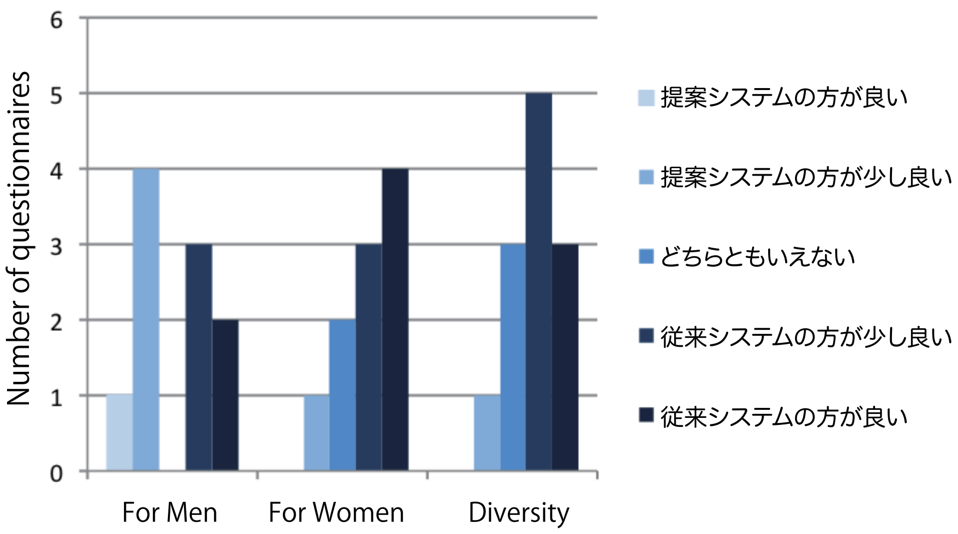

Fig. 4.7　アンケート結果

ムと比較して,「女性向け」,「多様性」の項目において，悪い評価となり,「男性向け」の項目では同等の評価を得ることができた．

「女性向け」,「多様性」という目的に対するアンケート結果が悪くなった原因として，Fig. 4.8 に被験者 E の提案システムと従来システムで生成された最終的なアーカイブ母集団のデザイン，Fig. 4.9 に最終的なアーカイブ母集団の評価値を示す． 提案システムで生成された最終的なアーカイブ母集団

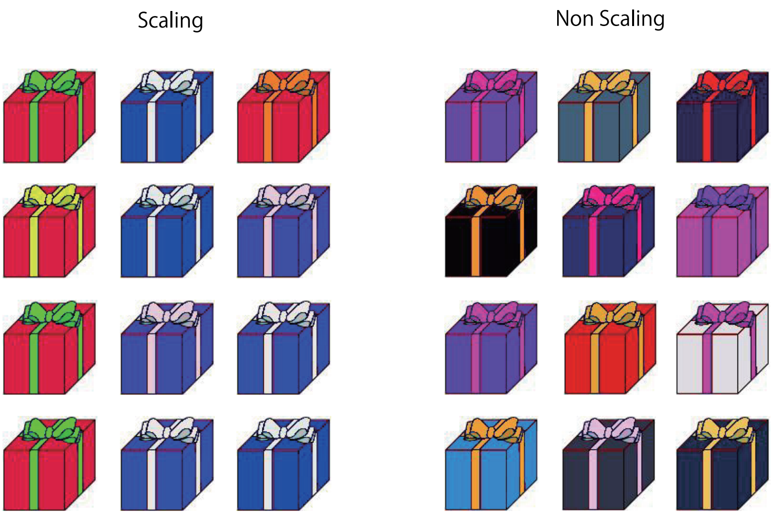

Fig. 4.8　被験者 E の最終的なアーカイブのデザイン

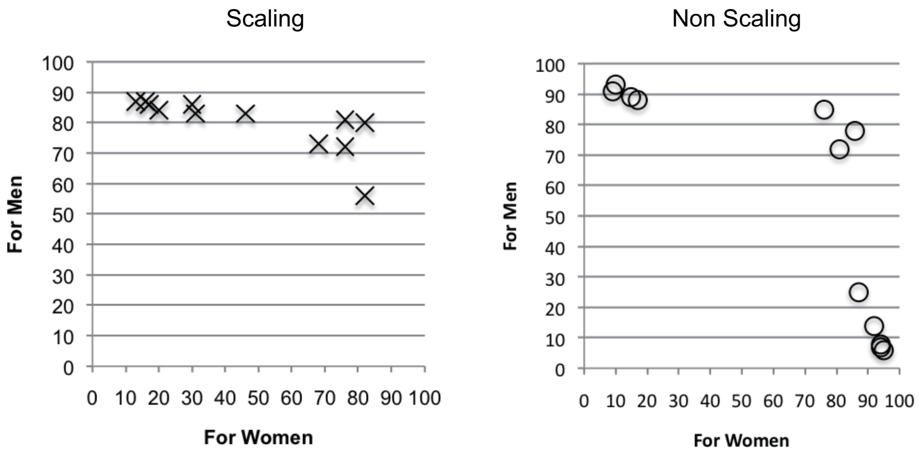

Fig. 4.9　被験者 E の最終的なアーカイブの評価値

は「男性向け」という目的に偏っていることがわかる．また，両目的を満たすような解が多く発生している．この傾向が被験者の 6 割に見られた．また，Fig. 4.8 に見られるように，設計変数空間における多様性についても，2 種類のデザインに偏っていることがわかる．このため,「女性向けのプレゼント」という目的に対して高い評価が与えられる解が生成されても，被験者が，両方の目的を満たすような解に対して，その解よりもより良い評価値を付けたため，アーカイブ母集団には保存されず，淘汰されたのではないかと考えられる．しかし，実際は，淘汰された「女性向け」という目的に対して高い評価を与えられた個体は，両方の目的を満たす個体よりも,「女性向け」という目的において，被験者は良い評価を持っている場合も存在すると考えられる．つまり，被験者が誤って上記のような解に低い評価値を与えた場合，その解は淘汰されてしまったのではないかと考えられる．システムにこのような場合の処理を反映することができず，偏りが生じたため，提案システムでの「女性向けのプレゼント」という目的に沿った解がアーカイブ母集団に保存されなかった．これにより，一方の目的における評価値の高い個体のみが次世代を生成するため，設計変数空間上においても偏りのある次世代が生成されてしまっていると考えられる．

Fig. 4.10 に被験者 F の提案システムと従来システムで生成された最終的なアーカイブ母集団のデザイン，Fig. 4.11 に最終的なアーカイブ母集団の評価値を示す． 両システムを比較すると，従来シ

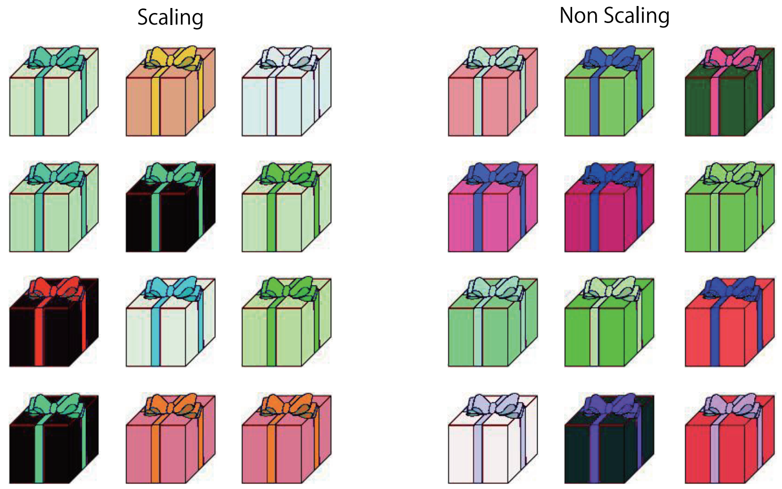

Fig. 4.10　被験者 F 最終的なアーカイブのデザイン

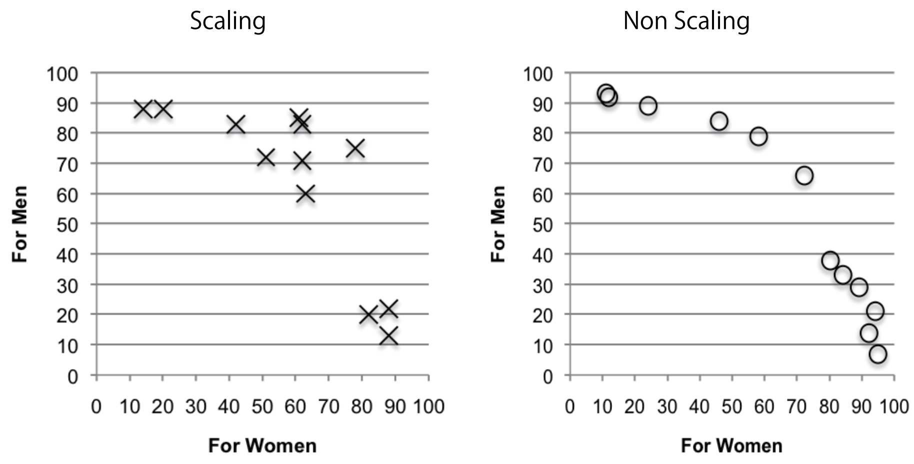

Fig. 4.11　被験者 F の最終的なアーカイブの評価値

ステムの方が多様性は良い．また，提案システムでは，劣解が多くアーカイブ母集団に含まれており，これが「各目的に沿った解が作成できたか」というアンケート結果の低下に繋がったのではないかと考えられる．

4.4.5　解集合の精度と多様性についての検討

4.4.1〜4.4.4 節をふまえて，解集合の精度と多様性について検討を行う．Fig. 4.12 に被験者 G の最終的に保存されたアーカイブ母集団の設計変数空間の分布図を示し，Fig. 4.13 にシステム比較の実験を行った際の目的関数空間の分布を示す． Fig. 4.12 より，従来システムでは，設計変数空間において幅広く解が存在するのに対し，提案システムでは，設計変数空間に偏りが生じていることがわかる．Fig. 4.13 より，従来システムでのアーカイブ母集団は，多様性を有していることが確認できるが，提案システムのアーカイブ母集団では，解がまばらであることがわかる．Fig. 4.13 では，提案

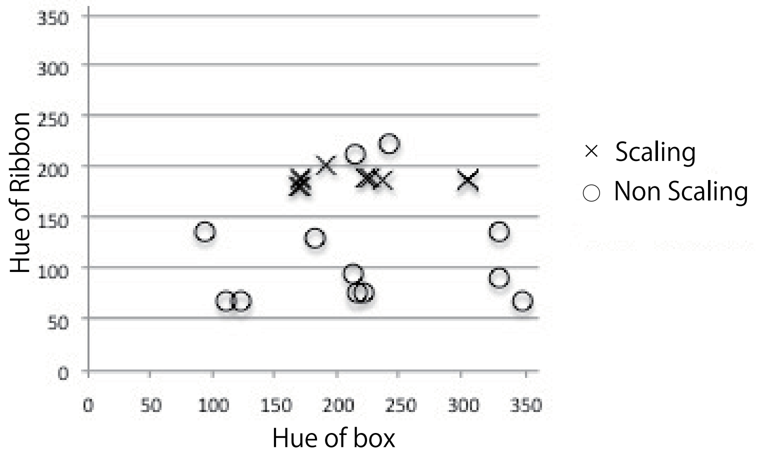

Fig. 4.12　被験者 G のアーカイブ母集団の設計変数空間の分布

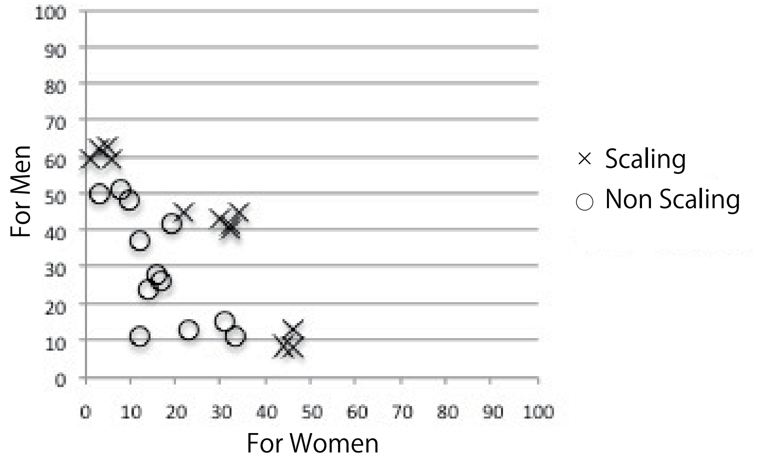

Fig. 4.13　被験者 G のアーカイブ母集団の評価値

システムのアーカイブ母集団が，従来システムでのアーカイブ母集団を優越していることがわかる．つまり，提案システムは，従来システムより良い解集合を得ることができているといえる．

しかし，アンケートによる評価では，被験者 G は，提案システムより従来システムの方が「男性向けのプレゼントに沿った解ができたか」・「女性向けのプレゼントに沿った解ができたか」という項目に対し，良いアーカイブ母集団を作成できたという評価をしていた．これは，被験者にとって，一つ一つの解を比較すると，提案システムの方が良い解を作成できるが，解集合全てを比較すると従来システムの方が良い解集合であるという評価を行っていることに起因すると考えられる．

以上より，複数の主観的目的を考慮した MOiGA では，被験者にとって精度を重視した解集合より，多様性のある解集合の方が良好な解集合であるということがわかった．また，提案システムの方が良かった場合と従来システムの方が良かった場合といった個人差が見られたことがわかった．

5　結論

本研究では，MOiGA において，複数の嗜好を抽出するシステムを考案した．その嗜好を抽出する手法では，トレードオフ関係を有する判断要素を取り扱うことを考えた．そのため，トレードオフ関係が存在する判断要素で判断された可能性のある箇所を AHP における一対比較と ISM による簡略化を用いることで抽出するアルゴリズムを提案した．その提案手法を用いてシミュレーション実験を行った．シミュレーション実験では，2 つの嗜好を持つ評価エージェントを用いた．結果は，4 つの場合に分類できることがわかり，その中でも判断要素の判別手法が必要である場合と必要でない場合が存在することがわかった．

また，抽出したトレードオフ関係を有する可能性のある箇所を分析するために，一対比較結果のエッジを逆転させることで 1 つの判断要素で判断した際の評価値を推定するアルゴリズムを提案した．この判断要素の判別手法を用いることで，矛盾箇所に含まれる解候補の数が 5 つ以下の時は，矛盾を解消させ，目的関数空間上での評価値を推定することが可能であった．しかし，矛盾箇所に含まれる解候補の数が 5 つより多い場合は，1 つのエッジを逆転させるだけでは矛盾を解消させることができない場合が存在することがわかった．

また，抽出した各判断要素を基に最適化を行う際に問題となる世代間の評価値のスケールについて言及し，世代間の評価値のスケールを合わせる手法を提案した．検討方法として，世代間の評価値のスケールを合わせる手法を適用したシステム（提案システム）と適用していないシステム（従来システム）の比較を行った．その結果，解の評価値については，提案システムの方が従来システムよりも正確に評価値を付けれていることがわかった．また，探索の進行に関しても，提案システムは，従来システムと比較して，進行することがわかった．しかし，両システムで生成された解集合には明確な差がみられなかった．また，アンケートの結果に置いても，従来システムの方が提案システムより良い結果となった．その結果において，多様性と精度の面から考察を行った．

多様性の検討では，提案手法では，探索途中の非劣解の数が多様性維持に影響を与えていることがわかった．また，設計変数空間の多様性と目的関数空間での精度の関係について考察を行い，設計変数空間における多様性がユーザの満足度に影響を与えていることがわかった．

精度の検討では，アーカイブ母集団に保存された解集合の評価値を更新しない場合，どのような問題が発生するかを確認した．また，アンケートの結果から,「女性向け」に対する評価が悪い原因について考察を行った．

両考察を通して，従来手法より良い解が生成できた場合とできなかった場合が存在していたことがわかった．この原因として，解の多様性が関係していることがわかり，複数の主観的目的を考慮した MOiGA にとって，ユーザは解の精度より多様性を重視する傾向にあるということがわかった．

以上の結果から，今後は，嗜好軸を抽出する手法においては，実験参加者による実験を行い，エージェントではなく，人を対象とした場合のアルゴリズムの有効性を検証する必要がある．また，本稿の実験では，判断要素の判別手法を用いた際に，5 つ以上の解候補が含まれる矛盾箇所において，矛盾を解消することができなかった．そのため，より適した矛盾を解消する手法を考案する必要があると考えられる．また，実際にユーザが使用することを考え，負担の伴わない評価方法に関して検討が必要である．また，評価値を推定する際の推定式に関しても検討が不十分であるため，より適した推

定式を考案する必要があると考えられる．次に，評価値のスケーリング手法においては，解の設計変数空間上の多様性を考慮した探索について検討を行う必要があると考えられる．また，ユーザが評価値を付け間違えた場合等のヒューマンエラーについても対策が必要であると考えられる．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，ご指導頂きました同志社大学理工学部三木光範教授および生命医科学部廣安知之教授に心より感謝いたします．

廣安知之教授は，多目的最適化の研究をしたいという私の意向を汲んで，多目的最適化の研究をさせてくださいました．また，研究を進めていく中で適切なご指導をいただいたおかげで，研究生活を円滑に進めることができました．本当にありがとうございました．

三木光範教授は，私が研究室に所属してから，研究生活を送る上ですばらしい環境を与えてくださいました．この研究室で 3 年間研究することができ，とても幸せに感じます．本当にありがとうございました．

指導院生である同志社大学生命医科学部研究員の田中美里さんには，研究について，ミーティングの場のみでなく，個人的にも適切なアドバイスをいただきました．私が研究を円滑に進めることができたのも，田中さんの指導があったからであります．本当にありがとうございました．

同じ研究グループである同志社大学理工学部の佐々木康成先生，吉見真聡助教，同志社大学大学院工学研究科の野田徹さん，同志社大学大学院生命医科学研究科の米田有佑さん，同志社大学理工学部の本田さんには私の研究についてアドバイスをいただき，ありがとうございました．研究グループの仲間に恵まれ，すばらしい研究生活を送ることができました．

本論文の執筆に際して，指導・チェックしてくださった同志社大学大学院生命医科学研究科の米田さん，宮部さん，ありがとうございました．お二人の指導のおかげで，本論文を執筆することができました．

最後に，知的システムデザイン研究室のみなさん，医療情報システム研究室のみなさんには，数多くの貴重なご意見をいただきました．また，皆さんのおかげですばらしい環境の中で研究生活を送ることができました．この場を借りて感謝いたします．ありがとうございました．

参考文献

1) 高木英行, 畝見達夫, 寺野隆雄. インタラクティブ進化計算，遺伝的アルゴリズム 4. 産業図書, 2000.

2) D. E. Goldberg. In *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesly, 1989.

3) H. Takagi, K. Aoki, and N. Fujimura. Interactive ga-based design support system for lighting design in computer graphics. pp. 533–536. Int'l Conf. on foft ComputingIizuka, Fukuoka, Japan, 1996.

4) 渡辺芳信, 吉川大弘, 古橋武. 一対比較評価による対話型遺伝的アルゴリズムに関する一提案. 日本機械学会, pp. 06–30, 2006.

5) 山川望, 廣安知之, 三木光範. 対話型遺伝的アルゴリズムを用いたデザイン支援システムの構築. pp. 193–194. 日本機械学会 第 19 回計算力学講演会, 2006.

6) 三木光範, 菅原麻衣子, 廣安知之. 対話型遺伝的アルゴリズムを用いた浴衣デザインシステム. 人工知能学会全国大会論文集, No. 21, pp. 1E2–5, 2007.

7) 三木光範, 織田博子, 菅原麻衣子, 和氣早苗, 森下千春, 廣安知之. 対話型遺伝的アルゴリズムを用いたサイン音系列生成システム. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 10, No. 2, pp. 243–251, 2008.

8) 松村冬子, 廣安知之, 三木光範, 佐々木康成, 大向一輝, 武田英明. 選好商品のクラスタリングに基づく嗜好の変化の検出. 情報処理学会 論文誌　数理モデル化と応用（TOM）, Vol. 3, No. 1, pp. 25–35, 2009.

9) 伊藤冬子, 廣安知之, 三木光範, 横内久猛. 対話型遺伝的アルゴリズムにおける嗜好の多峰性に対応可能な個体生成方法の検討. 人工知能学会 論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 127–135, 2009.

10) M. Zeleny. Multiple criteria decision making. 1982.

11) 小林祐介, 廣安知之, 佐々木康成, 田中美里, 三木光範, 横内久猛. 多目的対話型遺伝的アルゴリズムにおける評価部の検討. 第 2009-MPS-76 巻, pp. 1–8. MPS76, 2009.

12) T. L Saaty. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980.

13) S. CHO. Emotional image and musical information retrieval with interactive genetic algorithm. In *IEEE Workshop Human Supervision and Control in Engineering and Music*, Vol. 92, pp. 702–711, 2004.

14) H. Kim and S. Cho. Application of interactive genetic algorithm to fashion design. In *engineering Applications of Articial Intelligence*, Vol. 13, pp. 635–644, 2000.

15) S. Cho and J. Lee. A human-oriented image retrieval system using interactive genetic algorithm. In *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS PART A: SYSTEMS AND HUMANS*, Vol. 32, pp. 452–458, 2002.

16) S. Cagnoni, A. B. Dobrzeniecki, R. Polic, and J. C. Yanchd. Genetic algorithm-based interactive segmentation of 3d medical images. In *Image and Vision Computing*, Vol. 17, pp. 881–895, 1999.

17) J. C. Quiroz, S. J. Louis, A. Banerjee, and S. M. Dascalu. Towards creative design using collaborative interactive genetic algorithms. In *Evolutionary Computation*, pp. 1849–1856, 2004.

18) A. Amamiya, M. Miki, and T. Hiroyasu. Interactive genetic algorithm using initial individuals produced by support vector machine. In *THE SCIENCE AND ENGINEERING REVIEW OF DOSHISHA UNIVERSITY*, Vol. 50, pp. 34–45, 2009.

19) H. Tomioka, M. Miki, and T. Hiroyasu. Validity of the consensus building system using a parallel distributed interactive genetic algorithm. In *Optimization Symposium*, Vol. 6, pp. 19–24, 2004.

20) H. Takagi, K. Aoki, and N. Fujimura. Interactive ga-based design support system for lighting design in computer graphics. Proceedings of Int ’l Conf. on Soft Computing, pp. 533–536, 1996.

21) 坂和正敏. 離散システムの最適化. 森北出版, 2000.

22) 三宮信夫, 喜多一, 玉置久, 岩本貴司. 遺伝アルゴリズムと最適化. システム制御情報ライブラリー 17. 朝倉書店, 1998.

23) K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab, and T. Meyarivan. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. In *KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India*, 2000.

24) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. In *Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich*, 2001.

25) D. A. V. Veldhuizen, J. B. Zydallis, and G. B. Lamont. Considerations in engineering parallel multiob jective evolutionary algorithms. In *In IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 7, pp. 144–173, 2003.

26) A. J. Nebro, J. J. Durillo, F. Luna, B. Dorronsoro, and E. Alba. A cellular genetic algorithm for multiobjective optimization. In *Proceedings of Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICso 2006)*, pp. 25–36, 2006.

27) 渡邉真也, 廣安知之, 三木光範. 近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化. 情報処理学会論文誌「数理モデル化とその応用」, 第 43 巻, pp. 183–19, 2006.

28) N. Keerativuttitumrong, N. Chaiyaratana, and V. Varavithya. Multi-objective co-operative co-evolutionary genetic algorithm. In *Lecture Notes in Computer Science*, No. 2439, pp. 288–297, 2002.

29) 渡邉真也, 榊原一紀. 単目的最適化問題における多目的化とその有効性. 情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」, 第 46 巻.

30) S. Obayashi and D. Sasaki. Multiobjective aerodynamic design and visualization of supersonic wings by using adaptive range multiobjective genetic algorithms (chapter 13). In *Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms, World Scientific Publishing, New Jersey*, 2004.

31) A. M. Brintrup, H. Takagi, A. Tiwari, and J. Ramsden. Evaluation of sequential , multi-objective , and patallel interactive genetic algorithms for multi-objective optimization problems. *Journal of Biological Physics and Chemistory*, No. 6, pp. 137–146, 2006.

32) A. M. Brintrup, J. Ramsden, H. Takagi, and A. Tiwari. Ergonomic chair design by fusing qualitative and quantitative criteria using interactive genetic algorithm. In *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, No. 12, pp. 343–354, 2008.

33) B. Michael and N. M.Dimitri. Supersonic business jet design and requirements exploration using multiobjective interactive genetic algorithms. In *SAE Tech Pap Ser (Soc Automot Eng)*, pp. 3398–4015, 2005.

34) K. Raffi, H. Takagi, and M. A. Alice. Optimized design of mems by evolutionary multi-objective optimization with interactive evolutionary computaion. In *in Proc. Genetic Evol. Comput Comf., Seattle, WA*, pp. 1030–1041, 2004.

35) R. Patrick, K. Joshua, and V. K. Devireddy. Using interactive archives in evolutionary multi-objective optimization: A case study for long-term groundwater monitoring design. In *Environ Model Softw*, Vol. 22, pp. 683–692, 2007.

36) K. Joshua and R. Patrick. A framework for visually interactive decision-making and design using evolutionary multi-objective optimization (video). In *Environ Model Softw*, Vol. 22, pp. 1691–1704, 2007.

37) T. Tyni and J. Ylinen. Evolutionary bi-objective optimisation in the elevator car routing problem. In *European Journal of Operational Research*, Vol. 169, pp. 960–977, 2006.

38) K. NISHIZAWA. Estimation of unknown comparisons in incomplete ahp and it's compensation. *Report of the Research Institute of Industrial Technology, Nihon University*, No. 77, pp. 1 – 10, 2005.

39) A. Mandal and S. G. Deshmukh. Vendor selection using interpretive structural modelling (ism). *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 14, No. 6, pp. 52 – 59, 1994.

40) R. H. Watson. Interpretive structural modeling-a useful tool for technology assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 11, No. 2, pp. 165 – 185, 1978.

41) 財団法人日本色彩研究所. デジタル色彩マニュアル. 株式会社クレオ, 2004.

付 図

2.1 主観的な評価と定量的な評価を扱う MOiGA フローチャート 4
2.2 複数の主観的な評価を扱う MOiGA フローチャート 5
3.1 階層構造の例 7
3.2 有向グラフの例 9
3.3 階層型有向グラフ 12
3.4 最小数のエッジをもつ有向グラフ 13
3.5 矛盾を解消する例（左：矛盾状態，右：矛盾解消） 14
3.6 プレゼント包装デザインのモデル 15
3.7 一対比較結果 16
3.8 簡略化した一対比較結果 17
3.9 一対比較結果 17
3.10 簡略化した一対比較結果 18
3.11 一対比較結果 18
3.12 簡略化した一対比較結果 18
3.13 一対比較結果 19
3.14 簡略化した一対比較結果 19
3.15 基とした一対比較結果 20
3.16 簡略化した基とした一対比較結果 20
3.17 解候補 1，3，4，5，6，8，9，10 における一対比較結果 21
3.18 簡略化した解候補 1，3，4，5，6，8，9，10 における一対比較結果 21
3.19 一対比較結果 22
3.20 簡略化した一対比較結果 22
3.21 矛盾を解消した一対比較結果（左：矛盾状態、右：矛盾解消） 23
3.22 推定した評価値 23
4.1 被験者 A の 1 世代目のアーカイブ母集団と最終的なアーカイブ母集団の評価値 24
4.2 各世代のアーカイブ母集団を提示するインターフェイス 27
4.3 システム比較用インターフェイス 27
4.4 被験者 B の再評価結果 28
4.5 被験者 C の解集合の評価値 29
4.6 被験者 D のシステム比較結果 30
4.7 アンケート結果 31
4.8 被験者 E の最終的なアーカイブのデザイン 32
4.9 被験者 E の最終的なアーカイブの評価値 32
4.10 被験者 F 最終的なアーカイブのデザイン 33
4.11 被験者 F の最終的なアーカイブの評価値 33
4.12 被験者 G のアーカイブ母集団の設計変数空間の分布 34

4.13 被験者 G のアーカイブ母集団の評価値 34

付 表

3.1 到達可能集合；先行集合およびその共通集合 12
3.2 目標設計変数 15
4.1 評価値の誤差 29
4.2 各世代の非劣解の含有率 30
4.3 非劣解の含有率の平均値 30
4.4 アーカイブ母集団の平均非劣解数と割合 30
4.5 5 世代目のアーカイブ母集団の平均非劣解数と割合 31