

Title	類推の認知モデルの応用によるリフレクション支援システムの開発
Author(s)	森田, 純哉; 永井, 由佳里
Citation	人工知能学会論文誌, 26(5): 559-570
Issue Date	2011
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/10289
Rights	Copyright (C) 2011 人工知能学会. 森田純哉, 永井由佳里, 人工知能学会論文誌, 26(5), 2011, 559-570. http://dx.doi.org/10.1527/tjsai.26.559
Description	

類推の認知モデルの応用によるリフレクション支援システムの開発

Development of Reflection Support System by Applying a Cognitive Model of Analogical Reasoning

森田 純哉
Junya Morita

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
j-morita@jaist.ac.jp, <http://www.jaist.ac.jp/~j-morita/wiki/>

永井 由佳里
Yukari Nagai

(同上)
ynagai@jaist.ac.jp, <http://www.jaist.ac.jp/ks/labs/nagai/cgi-bin/Japanese/>

keywords: cognitive modeling, learning support, analogical reasoning

Summary

Creative innovation is achieved by observing the features of objects. This paper terms such a skill as “the discovering viewpoints” and proposes a framework for developing them. Our proposal implements the cognitive models of analogical reasoning that have been developed in the field of cognitive science. In the framework of this paper, learners are presented with an example of graphic composition, and they carry out the task by modifying the example. The cognitive models of analogical reasoning compute the similarities between the presented example and the learners’ work. The computed similarities are assumed to be the estimations of the learners’ viewpoints in the task. The learners receive the outputs of computations and reflect on their viewpoints. During the reflection, they look for hidden features in the graphics by manipulating three parameters of the similarity computations (the feature space, the abstractness, and the consistency). We developed a prototype system that implements the above framework, and conducted an experiment in which the developed system was used by the learners. As a result, we confirmed the workability of the system by analyzing the log files obtained in the experiment. Furthermore, we confirmed the effects of learning support on the development of discovering viewpoints by analyzing the subjective evaluations on the learners’.

1. はじめに

何気ない対象の有意意味な特徴を発見することで、創造的成果が導かれるという主張は、一般に広く受け入れられている。日常の対象の特徴を生かす「Found Object」のデザインが知られ[後藤 04]，使い古された技術を転用する「枯れた技術の水平思考」がイノベーションを引き起こすとされる[山下 08]。また、科学における歴史的発見が、既知の事例からの「類推」により導かれることも頻繁に指摘される[Gentner 93a]。本論文では、このような領域一般の創造性に関与する「対象に潜む特徴の発見スキル」を、「発見的観点」と呼ぶ。

発見的観点、あるいはそれと類似したスキルは、「創造的活動の支援」に関わる研究において扱われてきた。そこで、しばしば採用されてきた手法が「事例の利用」である。たとえば、人間にとって意外な事例を提示することで、デザインや発想における気づきを促すシステムが開発されている[Gomes 06, Kojima 08]。一方、「創造性の育成支援」に関する研究では、「メタ認知」や「リフレ

クション（自己の観点への内省）」が注目されてきた。自己と外界を関係付ける新たなパラメータのメタ認知的言語化による発見が報告され[諏訪 05]，メタ認知的言語化を支援するシステムが開発されてきた[古川 07]。

これらの創造的活動の支援や、創造性の育成支援を目指す研究は、「創造性の理解」を目指す研究との連携により進展してきた。たとえば、創造的活動の支援に事例を利用する研究の多くは、認知科学における類推の研究を背景とする。類推は、直面する状況（ターゲット）から、類似する事例（ベース）を想起する推論と定義され[Gentner 83]，創造性の理解を目指す研究において盛んに検討されてきた[Holyoak 95, Kulinski 01]。また、石橋らは、美術教育を対象とし、事例の利用を通したリフレクションの役割を検討した[石橋 04]。彼らは、まず、事例を模写する経験が、後続する制作における独創性の向上に寄与することを確認した。そして、模写の効用を発話プロトコルの分析から探り、模写が自己の観点に対するリフレクションを促すことを示した。

しかし、著者らは、従来の研究における創造性の支援

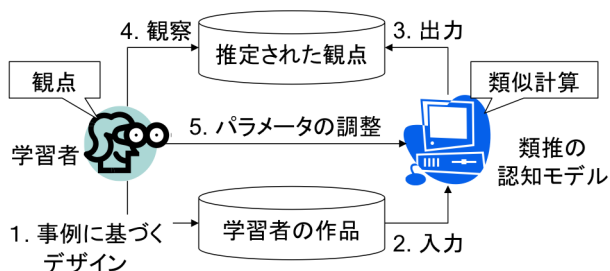


図1 リフレクション支援の枠組み。

と理解の連携は、必ずしも十分ではなかったと考える。これまでの研究において、特に欠けていたのが、「認知モデル」の利用である。認知モデルは、人間の認知の理論を計算機上に具体化し、心理実験をシミュレーションする。多様な実験のシミュレーションにより、認知モデルの修正が繰り返され、理論としての蓋然性が向上していく [Fum 07]。著者らは、認知モデルを創造性の支援に組み入れることは、創造性の理解との連携を強化すると考える。認知モデルの利用により、支援システムの理論的根拠が明確になり、システムの実験的な使用により認知の理論に対する貢献が生じる。

このような考えより、本研究では、発見的観点の育成支援に向けて、認知モデルを組み入れた支援システムの構築を試みた。その際、発見的観点の育成に事例の利用とリフレクションが有効に働くと仮定し、類推の認知モデルを利用したリフレクション支援システムの開発を直接的な目的とした。続く2章では、本研究において用いる類推の認知モデルを、発見的観点の獲得という文脈の中で示し、リフレクション支援の枠組みを示す。3章では、2章において提案されたリフレクション支援の枠組みにしたがったプロトタイプシステムを示し、4章において、プロトタイプシステムを使用する実験により、想定されるリフレクションの生起を確かめる。

2. 認知モデルの利用によるリフレクション

提案するリフレクション支援の枠組みを図1に示す。この枠組みにおいて、学習者は、まず何らかの観点から「事例に基づくデザイン」に取り組む(1)。この課題で制作された学習者の作品が、類推の認知モデルに入力される(2)。類推の認知モデルは、作品と事例との類似を計算することで、「学習者の観点を推定」する(3)。学習者は、推定の結果を観察し、自身の制作に対するリフレクションを行う(4)。また、学習者は、類推の認知モデルに関与する「パラメータを主体的に調整」し、観点の推定を繰り返す(5)。本章では、この枠組みの主要な要素である「事例に基づくデザイン」、「観点の推定」、「パラメータの主体的調整」を説明し、それらを設定した背景を示す。

2.1 事例に基づくデザイン — 類推の理論による体系化

発見的観点の育成に寄与する事例の利用として、本研究では、石橋らが検討した模写 [石橋 04] と類似する状況を設定する。具体的には、学習者にグラフィックデザインの「事例」を提示し、その特徴を流用するオリジナルの「作品」を制作させる。この課題を、本研究は、「事例に基づくデザイン」と呼ぶ。事例に基づくデザインは、学習者の観点により、大きな影響を受ける。どのような事例の特徴に注目し、どのような類似に基づく制作がなされたのかに依存して作品の性質が変化する。このような観点に関わる分析の枠組みは、類推、あるいは広い意味での類似性に基づく推論に関わる研究のなかで繰り返し議論されてきた [Gentner 83, Spencer-Smith 97, Hofstadter 95, Holyoak 89, Indurkha 98, 鈴木 96]。本研究では、事例に基づくデザインに影響する観点を、認知科学における類推の理論に基づいてとらえる。

類推の代表的な理論としては、構造写像理論を挙げることができる [Gentner 83]。構造写像理論は、類推の効用を、ベースとターゲットの相互作用による構造の発見ととらえる。特に、表層的な特徴は類似せず、構造的な特徴のみが類似したベースの利用により、創造的成果が導かれるとする。端的に言えば、構造的な特徴は、複数のオブジェクト（要素）により形成される関係のシステムである。それに対し、表層的特徴は、個別のオブジェクトが持つ特徴である。この理論に従い、これまでに多くの心理学的研究が、類推における表層的特徴と構造的な特徴の役割を検討してきた。そこにおいて、人間は、表層的特徴に惑わされ、構造のみに基づく類推が困難であること [Gick 80, Holyoak 87]、表層的な類似を含む類推に比べ、構造のみに基づく類推を高く評価すること [Gentner 93b, 森田 05] などが示されてきた。

類推における構造の重要性が指摘される一方で、事物に含まれる構造が単一ではないことも指摘されてきた。多重制約理論は、構造の多義性を認め、類推における実用論的制約の重要性を論じた [Holyoak 95]。実用論的制約は、個人の目標や個人の置かれた文脈が類推に及ぼす影響を意味する。類推の心理学的研究では、実用論的制約の切り替えにより、類推の結果として発見される構造が大きく変化することが示されている [Spellman 96]。

以上2つの理論をまとめれば、本研究において設定する事例に基づくデザインにおいて、学習者は、表層的特徴や特定の実用論的制約に影響される傾向にあると考えられる。それに対し、本研究において定義される発見的観点は、「多様な構造の発見スキル」と明確にできる。

2.2 観点の推定 — 類推のモデルの利用

類推の認知モデルは、類推のプロセスを、ベースとターゲットの類似から検討する。つまり、ベースの想起に関与する類似、ベースの評価に関与する類似、ベースを利用した推論に関与する類似などの検討がなされてきた。本

研究では、そこで検討された類似計算の手法を、事例に基づくデザインにおける事例（ベース）と作品（ターゲット）の関係に適用する。そのことにより、この課題における学習者の観点を推定する。このような方法は、認知モデルを人間の行動データの分析装置として利用する研究 [Morita 08, 森田 05] を踏襲するものである。

類推の認知モデルが中心的に扱ってきた類似は、前項において述べた構造的類似、およびそれと対比される表層的類似である。類推のモデルにおいて、構造的類似は、抽象性と一貫性の基準により定義される [Falkenhainer 89]。抽象性は、類似計算の対象となる特徴の区別である。オブジェクト単体が保持する特徴（属性的特徴）を用いた計算と、複数のオブジェクト間で形成される特徴（関係的特徴）を用いた計算が区別される。他方の一貫性は、写像に関わる基準である。ここでいう写像は、ベース中の要素をターゲット中の要素へ 1 対 1 に対応づけることを意味する。構造的類似は、ベース中に含まれる関係的特徴を、ターゲット中に含まれる関係的特徴へ写像するものとして定義される。それに対し、属性的特徴を対象とした写像、写像を伴わない類似（ベクトルの内積やコサインによる類似 [Forbus 95, Taylor 09]）は、表層的な類似とみなされる。

さらに、類推の認知モデルは、類似計算における実用論的制約の影響を扱ってきた。類推の認知モデルにおいて、実用論的制約は、特定の特徴に重みを付与することで実装される [Forbus 90, Holyoak 89, Thagard 90]。このような実用論的制約の実装により、目標や文脈による写像の変化がシミュレーションされる。

本研究では、上記のようなモデルを利用することで、事例に基づくデザインにおける事例と作品との類似を計算する。そのことにより、学習者の観pointsの抽象性、一貫性を推定する。また、複数の実用論的制約による類似を計算することで、学習者の観点を構成する特徴の種類を推定する。

2.3 パラメータの主體的調整 — 違和感の利用

図 1 の枠組みの重要な特徴は、類推の認知モデルにより推定された観点を学習者へ提示し、リフレクションの促しに用いさせることである。モデルによる客観的な計算の出力が、学習者の観pointsの相対化を促し、異なる観pointsの探索を導くと考える。また、構造的な特徴への気づきの困難さを指摘する心理学的研究をふまれば、事例と作品との構造的類似は、学習者がそれまでに気づいていなかった特徴の発見を促すものにもなりうる。

しかし、モデルによって推定される観pointsの提示には、「違和感」の生起に関わる問題がある。本研究における認知モデルの利用は、制作された作品（現象）から、その背後にある観points（説明）を帰納的に導出するものである。現象から推定される説明は可能性の 1 つにすぎず、別の説明を除外できない。また、たとえ学習者の意図と整合す

る観pointsが推定されたとしても、一方向的に押し付けられる観pointsの推定に、学習者が抵抗感を抱くことも考えられる。これらの問題から、本研究では、認知モデルによる観points推定の違和感・抵抗感をあらかじめ想定したリフレクションの促しを設計した。

本研究におけるリフレクションの設計では、違和感をネガティブなものとはみなさない。違和感の有効な活用は、自身の観pointsに対する気づきを促し、対象の特徴を新たに発見する契機となることが議論されている [瀬名 06]。しかし、違和感の生起により、システムへの信頼やシステムの使用に関わる動機付けが低下する可能性もある。本研究では、違和感を新たな特徴の発見に転換するために、認知モデルによる観points推定に、学習者が主体的に関与するインタラクティブな状況を設定する。具体的には、観pointsの推定を一方的に学習者へ提示するのではなく、学習者自身に類似計算のパラメータを操作させる。つまり、学習者は自分自身の観pointsに関する仮説に基づき、モデルのパラメータを選択・修正する。その結果として、学習者は、自分の観pointsを明確化する類似、意図したものとは異なるものの新たな特徴への気づきを生む類似など多様な観pointsの推定を受け取る。

なお、学習者によるパラメータの主體的設定を支援環境に取り入れる試みは、マイクロワールドを用いた発見的学習の支援と共通する [大概 93, 新々江 95]。また、自己選択に基づく情報の提示が、学習の動機付けを高めるという議論はなされている [Monty 73]。よって、本研究は、パラメータの主體的調整が、高い動機付けに支えられたリフレクションを導くと考えた。

3. 類推の認知モデルの応用によるリフレクション支援システム

前章の枠組みに従い、発見的観pointsの育成に向けたリフレクションの支援システムを開発した。開発したシステムは、事例に基づくデザインを遂行する環境（制作環境）と類似計算の閲覧とパラメータ調整のための環境（分析環境）からなる。

3.1 制作環境

制作環境の構築において、本研究では、「構成」と呼ばれるデザイン課題を参考にした [三井 96]。構成とは、独立したオブジェクトの組合せからなる視覚表現を制作するものである。構成の作品において、オブジェクトは様々な関係で結びつき、その解釈は多義的である。そのため、構成は、多様な特徴を探索するスキルを育成する題材として適している [木下 01]。

図 2 は、構成課題を参考にした事例に基づくデザイン環境を示す。この環境において、学習者は、右パネルに提示される事例を参考に、左パネルに自身の作品を制作する。作品は、幾何図形（オブジェクト）を平面に配

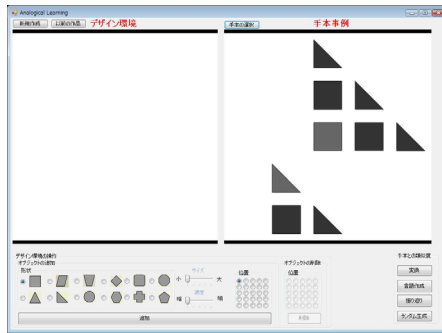


図2 事例に基づく制作の環境。

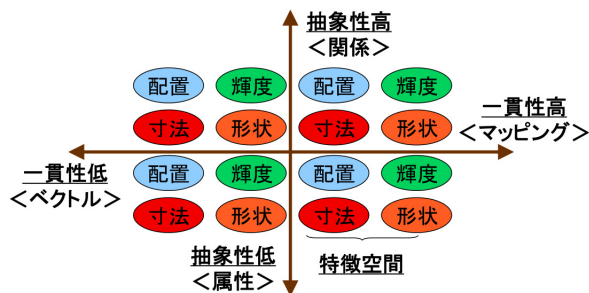


図3 類似計算のパラメータ。

置することで構成される。平面上には、最大で 25 の図形を配置できる。オブジェクトの属性は画面下のメニューによって選択される。ここで選択可能な属性は、縦位置 (5 段階)、横位置 (5 段階)、大きさ (5 段階)、明るさ (5 段階)、形状 (12 種類) の 5 つである。これらは、構成の作品において頻繁に操作される基本的な属性である [南雲 94]。

3.2 分析環境

分析環境は、学習者が制作した作品を対象に、事例との類似をインタラクティブに計算する。計算される類似には、図 3 に示すパラメータが関与する。図 3 は抽象性と一貫性の 2 軸による 4 つの象限に分けられ、各象限は 4 つの特徴空間を含む。続いて、これらのパラメータを説明し、その後に、分析環境のユーザインタフェースを示す。

§1 特徴空間

このパラメータは、類推のモデルにおける実用論的制約 [Holyoak 95] と対応する。本研究における実用論的制約の実装は、選択された特徴空間に関わる特徴のみを抽出し、類似計算の対象とするものである。抽出可能な特徴空間は、「配置」、「寸法」、「輝度」、「形状」に関するものとする。これらは、制作環境において操作可能なメニュー (縦位置、横位置、大きさ、明るさ、形状) と対応する。これら制作の操作と直結した特徴を抽出する類似度の計算により、制作時の学習者の文脈 (重視した特徴) を推定することができる。

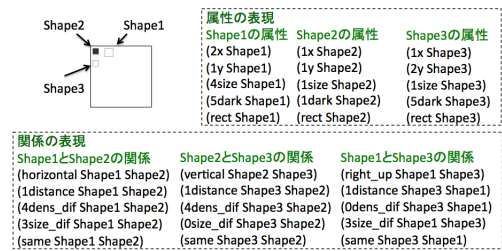


図4 述語論理式によるグラフィックの特徴表現。

§2 抽象性

このパラメータは、類推のモデルにおける抽象性 [Gentner 83] と対応し、特徴の抽出単位を決定する。値は、「属性 (オブジェクト単体が保持する特徴)」、「関係 (2 つのオブジェクトにより形成される特徴)」から選択される。属性、関係に関わる特徴の形成は、先述した特徴空間ごとになされる。以後、寸法に関わる属性と関係を「大きさ (5 段階)」と「大小関係 (5 段階)」、輝度に関わる属性と関係を「明るさ (5 段階)」と「明るさの差 (5 段階)」、形状に関わる属性と関係を「形状 (12 種類)」と「形状の異同 (2 種類)」と呼ぶ。なお、配置に関わる属性と関係は、それぞれ異なる下位空間に分割される。属性については、「縦位置 (5 段階)」と「横位置 (5 段階)」が構成され、関係については、「距離 (5 段階)」と「方向関係 (8 方向)」が構成される。

設定された抽象性と特徴空間の値に基づき、事例と作品が、述語論理式 (特徴を表す「述語」とオブジェクトを示す「引数」の組み合わせ) により表現される。図 4 に単純なグラフィックを対象とした例を示す。

このような式は全てのオブジェクトの属性、オブジェクトペアの関係について構成される。構成される式の数は、属性で $s \times n$ (s は選択された特徴空間の数, n はグラフィックに含まれるオブジェクト数)、関係で $s \times n C_2$ となる。なお、原理的には、2 つのオブジェクト間の関係だけでなく、3 つ以上のオブジェクトの関係も定義することもできる。多数のオブジェクトにより構成される関係は、より抽象性の高い特徴と考えることができる。

しかし、関係に含めるオブジェクト数が大きい場合、構成される式の数が爆発的に増加する。本研究は、学習者がインタラクティブにシステムを用いることを想定し、計算量の少ない 2 つのオブジェクト間の関係のみを類似計算のパラメータとして扱った。また、2.3 において述べたように、本研究では、学習者の志向した類似を正確に推定することではなく、観点に対する気づきを促すことを目指す。そのような目的に対して、多数のパラメータ値を用意することは必ずしも望ましいものではない。

§3 一貫性

このパラメータは、類推のモデルにおける一貫性 [Gentner 83] と対応し、「ベクトル」と「マッピング」を値とする。これら 2 つの値は、類似計算のアルゴリズムを意

味する。

ベクトルによる類似度の数値化は、MAC/FAC (Many are called, but few are chosen [Forbus 95]) における Content Vector Match を参考にする。Content Vector とは、述語の種類を要素とし、その頻度を要素の値とする特徴ベクトルである。たとえば、図 2 における「形状」の特徴は (Triangle : 5, Rectangle : 4) のような Content Vector により表現できる。このような Content Vector をベース (事例) とターゲット (作品) で用意し、その内積を類似度とする。

本研究では、設定された特徴空間ごとに Content Vector を形成し、その内積の平均値をベクトルによる類似度とした。また、内積の算出に先立ち、各 Content Vector を単位ベクトル化する。これにより、ベクトルによる類似度の最小値は 0、最大値が 1 となる。

ベクトルと異なり、マッピングは、ベースとターゲットで、特徴間の画像を出力する [Gentner 83]。マッピングによる類似度は、ターゲットに含まれる特徴数に対する画像に含まれる特徴数の割合により数値化される。写像の形成には、SME (Structure Mapping Engine [Falkenhainer 89, Forbus 90]) に基づくアルゴリズムを利用する。その処理は、以下のステップに示される。

- (1) ベースとターゲットのローカル対応 (述語論理式の対応) を列挙し、単一の「候補リスト」に格納する。
- (2) 候補リストに含まれるローカル対応を、評価値によってソートする。
- (3) 候補リストにおける最上位のローカル対応を、全体対応リストに移動する。
- (4) 3 において移動されたローカル対応と矛盾するローカル対応を候補リストから削除する。
- (5) 3 と 4 を、候補リストが空になるまで繰り返し、一貫したベースとターゲットの写像を構築する。

上記ステップ 1 におけるローカル対応の構築は、述語論理式における述語の共通性に基づく (同じ述語により構成される式同士を対応づける)。ステップ 2 における評価値の設定は、候補リストにおける、ローカル対応の要素 (述語の対応, オブジェクト間の対応, オブジェクトペアの対応) の出現頻度を用いる。また、ステップ 3 において、評価値が同順位のローカル対応が存在した場合、複数の全体対応リストを構成し、最も大きな写像を最終的に選択する。ただし、構成する写像の数に上限を設定し、上限を超えた場合、無作為にローカル対応を選択する*1。

図 5 は、図 4 に示した例をベースとし、構成される写像を図的に説明したものである。上段と下段にはベースとターゲットのグラフィック、およびそれらと対応する述語表現 (関係に関するもの) をネットワーク図として示

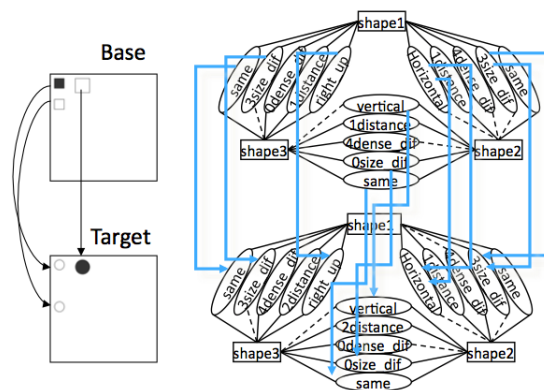


図 5 写像の図的説明。

している。ネットワーク中の楕円のノードは、外側から「形状の異同」、「大小関係」、「明るさの差」、「距離」、「方向関係」に関わる述語を示す。これら述語のノードは引数となるオブジェクトとエッジで結合する。実線のエッジは述語の第 1 引数、点線のエッジは第 2 引数を表す。引数の順序に意味がない述語の場合は、ともに実線で結合する。図中の矢印は、ベースからターゲットへの写像を示す。これらの矢印は、推定されたオブジェクト間の対応づけ (下段左) のもとで、共通する述語のみを結ぶものとなっている。この例におけるマッピングによる類似度は、上段に含まれる述語の数 15 と矢印に結合される述語の数 10 の割合をとることで 0.75 となる*2。

§ 4 ユーザインタフェース

分析環境のユーザインタフェースは、Allegro Common Lisp 8.1 において開発された。そのスクリーンショットを図 6 に示す。このスクリーンショットは、後述する実験で得られたデータに基づくものである。

インタフェースは、グラフィック表示部と類似度表示部から構成される。グラフィック表示部は、右に事例、左に作品を画像として示す。類似度表示部は、事例と作品の類似度を、複数の領域に分割される積み上げバークラフとして示す。各領域の大きさは、全体の類似度に対する設定された特徴空間の寄与の大きさを示している。

類似度はインタフェース上の計算ボタンを押すことで計算される。類似度の計算は繰り返し行うことができ、計算が終わるごとに、類似度表示部に、見出し付きのバーが追加される。マッピングによる類似度を表すバーには、計算された順序に対応するインデックス番号が付与される (図 6 右 2 本のバー)。それに対し、ベクトルによる類似度を表す棒グラフには、(V) の見出しが付与される (図 6 左 2 本のバー)。表示されるバーの数に制限は設けておらず、何回でも繰り返し類似度を計算することがで

*1 これらの詳細は、学習者による設定が可能なパラメータとした。このパラメータを変更することで、マッピングのパフォーマンス (速度、精度) が変化する。

*2 全体の類似度に加え、各特徴空間ごとの類似度を算出することも可能である。この例では、「形状の異同」=3/3、「大小関係」=3/2、「明るさの差」=0/3、「距離」=1/2、「方向関係」=3/3 となる。特徴空間ごとの類似度は、後述するユーザインタフェース (図 6) において積み上げバークラフの形で示される。

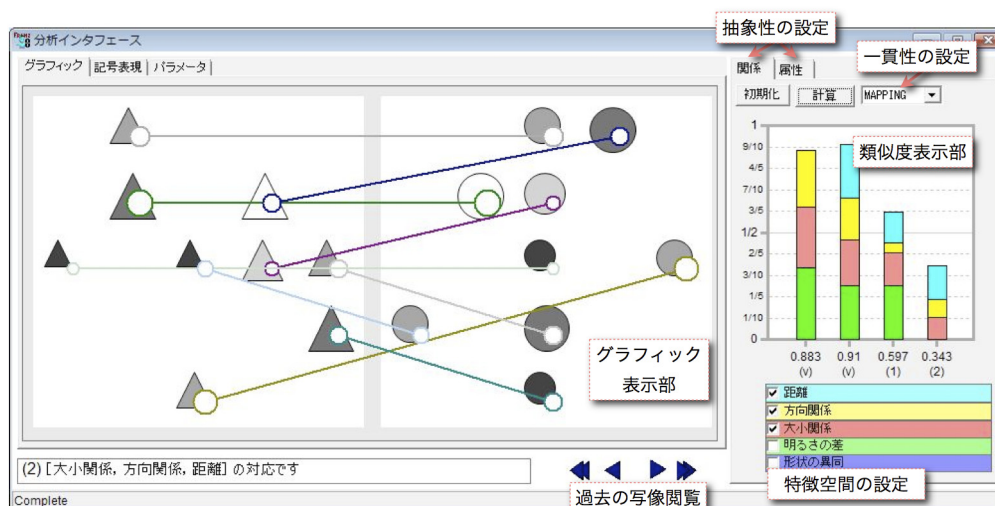


図6 分析環境のインターフェース。点線のボックスは、インターフェースの機能を説明する注釈である。

きる。バーの数が増加し、視認性が悪くなったときには、初期化ボタンによりそれまでの結果を削除することができる。

一貫性のパラメータとしてマッピングを設定した場合、バーとともに、写像の結果がグラフィック表示部に示される。写像は、事例と作品で、対応するオブジェクト同士を結ぶ直線として表示される^{*3}。グラフィックの下部には、現在表示されている写像のインデックス番号、および選択された特徴空間を表すテキストが表示される。たとえば、図6では、「(2) [大小関係・方向関係・距離] の対応です」と示され、画面上の写像が、類似度表示部における(2)のバーと対応することが表される。過去に計算された写像は、左ウィンドウ下に配置される4つの三角形のボタンにより繰り返し閲覧することができる。図6の状態から、(1)のバーと対応する写像を閲覧するためには、左向きの三角形のボタンをクリックする。

類似計算のパラメータは、類似度表示部に配置されるメニューを介して設定される。グラフ下部のキャプションに配置されるチェックボックスは、類似計算に含める特徴空間を決定する。抽象性⁴の設定は、類似度表示部のタブを切り替えることでなされる。計算ボタンの右に配置されるドロップダウンメニューは、一貫性の値を設定する。

3.3 パラメータ設定による観点の分析

分析環境を用いる中で、学習者は、自身の作品が、どのようなパラメータ値において事例と類似するのか、あるいは類似しないのかを検討する。また、マッピングによ

^{*3} 抽象性のパラメータ値として関係を選択した場合、図5のように関係の述語の対応が形成される。しかし、グラフィック表示部では、そのような述語の対応を示さず、個別オブジェクトの対応のみを示した。個別オブジェクトの対応によって、属性による写像と関係による写像の比較が可能になる [Markman 93]。なお、学習者は、インターフェース上の記号表現のタブをクリックすることで、写像に含まれる全てのローカル対応のリストを参照することもできた。

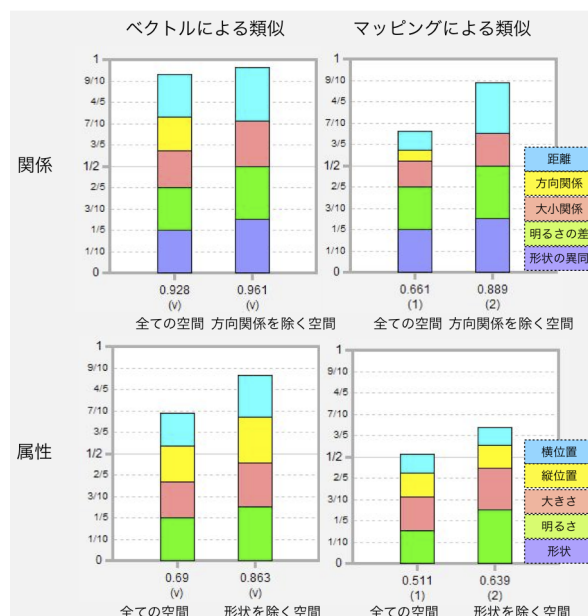


図7 パラメータの設定による類似度の変化。

り推定される写像の観察により、自分がどのように事例を変化させたのかを確認し、自分の意図を再現するパラメータの組み合わせを明確にする。自分の意図しない写像が推定されたときには、その結果を丹念に観察することでグラフィック中の特徴を新たに発見する機会を得る。

以下では、上記のような分析環境の効用を具体的に示すために、可能な観点の分析の例を提示する。

§1 類似度と分析の方針

図7は、図6の作品と事例に対して、分析環境が出力する8つの類似度を示す。図中4つのグラフは図3の各象限と対応し、それぞれのグラフ内に特徴空間を変化させた2本のバーが併置される。空間の設定は、関係(図7上段)と属性(図7下段)で異なる。関係は全ての空間を対象とした類似度(図7左側バー)と方向関係を除く4つの空間を対象とした類似度(図7右側バー)、属性は

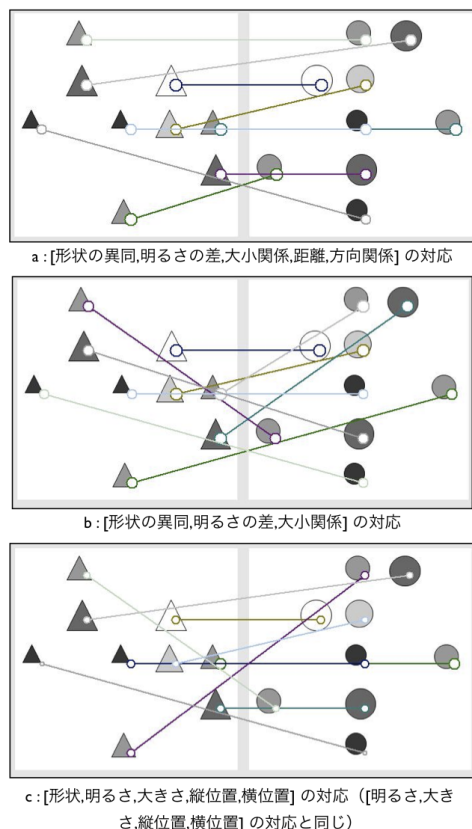


図8 パラメータの設定によるマッピングの変化.

同様に全ての空間を対象とした類似度 (図7 左側バー) と形状を除く4つの空間を対象とした類似度 (図7 右側バー) を示す。また、図8には、マッピングによる類似度 (図7 右列) と対応する写像の結果が示される。

なお、図7における特徴空間の設定は、著者自身の任意な試行錯誤によるものである。特徴空間の組み合わせ数 (25通り) は、網羅的な探索を行うには多い。この探索には、ユーザ自身の主体的、あるいは試行錯誤的なパラメータ設定が必要になる。以下では、まず、全ての空間による類似度 (図7 左側バー) に注目した観点の分析を行う。その後、図7の特徴空間の設定を行った理由を述べ、分析を進める。

§2 抽象性と一貫性の要因

4つのグラフにおける左のバー (全ての空間) に着目すれば、関係が属性に比べ高いこと (抽象性の効果)、ベクトルがマッピングに比べ高いこと (一貫性の効果) がわかる。前者より、事例と作品では属性に大きな差異が存在することがわかる。それに対して、後者の効果は、類似度計算の手法の差異に由来すると推測できる。マッピングによる類似度は、1対1対応の制約が存在するため、ベクトルによる類似度に比べ通常低くなる。よって、この2つは直接比較できず、他のパラメータ (特徴空間・抽象性) との関係の中で一貫性の効果を検討する必要がある。以下では、属性において観察される事例と作品の

差異をより詳細に分析する。その後、一貫性の効果と関係づけつつ、関係における類似度を分析する。

§3 属性における事例と作品の差異

属性の類似度 (図7 下段) において注目すべきは、ベクトルとマッピング (図7 下段・左グラフと下段・右グラフ) に共通して、形状に関わる領域 (紫) が存在しないことである。それに対し、形状に関わる領域は、関係の類似度 (図7 上段) において大きい。

この理由は、事例と作品のグラフィック (図6、もしくは図8) を比較することで明らかになる。事例は全てのオブジェクトが円を形状とするのに対し、作品は三角形を形状とする。つまり、事例と作品では、オブジェクト間の形状が全て同一という関係が共通し、個別のオブジェクトの形状が異なる。形状に関わる領域が属性の類似度に現れない理由は、この形状の不一致を原因とするとみなせる。実際、形状を空間から除いた場合、属性の類似度は、関係の類似度と同等の大きさに向上する (図7 下段・右側バーと上段・左側バーの比較)。これにより、この作品の作者は、形状が全て一致するという事例の関係的特徴に注目し、個別のオブジェクトの形状という属性的特徴を事例からずらしたものと解釈される^{*4}。

§4 関係におけるマッピング

関係におけるベクトルとマッピングを比較すると、マッピングの類似度 (図7 上段・右グラフ・右側バー) は、方向関係 (黄色) の領域が小さい。ベクトルの類似度 (図7 上段・左グラフ・右側バー) において、この傾向はみられない。試行錯誤的に方向関係を除外した類似度を計算すると、ベクトルにおける類似度 (図7 上段・左グラフ・右側バー) はそれほど上昇しないが、マッピングにおける類似度 (図7 上段・右グラフ・右側バー) は大きく上昇する。ここから、方向関係に関わる空間の設定は、ベクトルによる類似度よりも、マッピングによる類似度において大きな効果をもつことがわかる。

この原因は、推定された写像 (図8) から解釈できる。全ての空間を含む写像 (図8a) は、配置の絶対的な座標が近いオブジェクト同士が結びつけられている (例えば、縦1行のオブジェクトが事例と作品で対応付けられる)。それに対し、方向関係を除く写像 (図8b) は、作品におけるオブジェクトの配置を、事例におけるオブジェクトの配置へ、直角に変換させる写像が形成されている (例えば、作品において横5列のオブジェクトが、事例において縦1行のオブジェクトと対応付けられる)。

類似度の値が高い図8bに基づけば、この作品は、事例の配置構造を回転させることを志向して制作されたものと解釈できる^{*5}。そして、そのような回転を実現させる

*4 この制作の意図は、後に示す実験で得られた制作者の内省報告と一致している。

*5 この制作の意図は、後述する実験で得られた制作者の内省報告と一致する。なお、回転された配置と整合しないオブジェクト (作品の縦2行、横2列) について、制作者は、この部分を意図的にずらしたと述べている。

ため、学習者は、方向関係の空間を無視したものと解釈することができる。

§ 5 分析を通したリフレクション

上記をまとめれば、図 6 のグラフィックの制作者は、事例に含まれる形状の属性を変更し、全て同一の形状という関係を保ったまま、配置構造を直角に回転させたと解釈できる。このように、システムを用いることで、作品の特徴や制作の観点に対する分析が可能になる。

しかし、このような分析結果を、学習者は自動的に受け取ることはできない。分析の結果を得るためには、学習者自身の主体的なパラメータ設定が必要になる。そして、そのプロセスは事前に定められたものではなく、制作された作品の特徴や学習者の保持する観点によって大きく変化する。その意味で、ここで示した分析は、唯一の理想的なものではない。

また、分析結果の解釈（リフレクション）についても、学習者が事前に保持する自身の観点に対する意識に依存する。もし、分析から得られる特徴を学習者が事前に意識していたのであれば、これらの結果はユーザの観点を明確化するものになると考える。逆に、学習者が意図せずにこれらの特徴を取り入れたのであれば、学習者がシステムの出力に違和感を抱く可能性は十分に考えられる。本研究では、そのような違和感が、作品に対する新たな特徴の発見につながると考える。

特に、図 8 に示されるような写像の結果は、新たな特徴への気づきを得るために有用と考える。もし、学習者が図 8b の写像を志向していなかった場合、この写像は大きな観点の転換を導くものとみなせる。また、学習者がこのような写像を制作時に志向していた場合、図 8a や図 8b から、作品と事例の新たな類似に気づくことができる。

4. 実 験

2 章において示したリフレクション支援の枠組みの顕著な特徴は、学習者と類推の認知モデルとのインタラクティブな関係にある。このインタラクションの成立には、3.3 の例が示すように、分析環境に対する学習者側からの主体的な働きかけ（パラメータ設定、および出力結果の積極的な解釈）が要求される。本研究におけるリフレクション支援の枠組みでは、学習者による主体的な働きかけを通して、観点に対するリフレクション（観点の明確化、気づき）が導かれると考える。本章では、このようなインタラクティブな関係が、開発されたシステムにおいて実現されることを検討する。

実験の目的として、まず、(1) 本システムの使用により、学習者による主体的な働きかけが生起することを定量的なデータに基づいて示す。さらに、(2) 分析環境を利用することで、観点の明確化や発見と関連した効果が現れることを、定性的なデータに基づいて示す。

実験では、被験者に事例に基づくデザインに取り組ませた。そして、そこでの制作を分析環境を通してリフレクションさせた。その後、別の事例を提示し、再度、事例に基づくデザインを行わせた。実験の最後に、自身の制作した 2 つの作品を自己評価させた。

実験で得られた分析環境の操作ログから (1) の項目を検討する。また、作品に対する自己評価とログの関連を検討することで、主体的な観察の効果を示す。(2) の項目に関しては、リフレクションの内容、および実験後のアンケート結果を示すことで議論する。

4.1 方 法

§ 1 被験者

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科に在籍する大学院生 11 名が実験に参加した。5 名の被験者が情報科学関連の学部を出身とし、別の 3 名の被験者が構成に関する知識を有していた。本研究において提案した枠組み、あるいはその理論的背景（類推のモデル）と直接関連する知識を有するものはいなかった。

§ 2 材 料

被験者に提示する事例は、図 2 と図 6 における 2 つ事例であった。これらは、グラフィックデザインの専門家によって制作された。

§ 3 手続き

被験者は実験に個別に参加した。実験は以下 5 つのセッションを含んだ。

i. 教 示

被験者には、実験の目的を、「デザイン学習の方法を検討すること」と伝えた。そして、デザイン学習の基礎課題として構成を扱うことを説明した。

ii. プレ制作

デザイン学習における事例に基づく制作の有効性を伝え、制作環境を導入した。制作環境の操作方法を説明した後、事例を提示した。そして、「事例にはデザインを学習する上で注目すべき特徴が含まれている」と伝え、「その特徴を取り入れた美しい作品を制作する」ことを課題として教示した。さらに、「事例を丸写しせず、何らかの特徴を取り入れたオリジナルの作品を制作する」よう注意をうながした。このセッションは 15 分間続けられた。

iii. リフレクション

被験者に、「デザインの学習には、制作の振り返りが有効」と伝え、分析環境を導入した。分析環境の説明は、A4 の教示用紙 6 枚を利用してなされた^{*6}。教示に要した時間は概ね 20 分程度であった。

被験者は、まず、分析環境が事例と作品との類似を計算するシステムであると告げられた。そして、「計算される類似は、制作における観点を推定するものである」と伝えられ、それを観察することで自身の制作の意図を明

^{*6} http://www.jaist.ac.jp/~j-morita/reflection_instruction.pdf を参照。

確にすることができると伝えられた。また、教示用紙には、類似計算のパラメータ（特徴空間、抽象性、一貫性）、ユーザインタフェースの操作方法が記載され、具体的な例（事例・作品ともに2つのオブジェクトを含むグラフィック）を材料として、類似計算の手続きが説明された。ただし、各パラメータの理論的な背景（類推の理論との関連など）は説明されなかった。そのため、被験者はシステムを使用しつつ、自分自身でリフレクションに有用なパラメータを探ることになった。説明の後、被験者は、分析環境を利用し、自身の制作を振り返った。制作の振り返りは60分間続けられ、被験者は、その結果をA4の用紙1枚にまとめた。

iv. ポスト制作

プレ制作とは別の事例が提示され、被験者は、事例に基づくデザインを実施した。事例の提示順序は、被験者間でカウンターバランスをとった。課題の時間はプレ制作と同様であった。

v. アンケート

ポスト制作を追えた後、被験者は、自身の制作した2つ作品を5段階で評定した（1:低-5:高）。評定の基準は、創造性に関する認知心理学的研究 [Finke 92]、創造的デザインの研究 [永井 07] を参考にした。これらの研究では、創造課題における被験者の作品を、実用性（あるいは実現可能性）と独創性によって評価する。この基準を修正し、「美しさ」と「独創性」を評定基準とした。美しさを基準とした理由は、デザイン教育において、構成が美的感覚を向上させる課題とみなされているからである [三井 96]。

また、被験者は、リフレクションに対する分析環境の有用性を5段階（1: 役立たなかった-5: 役立った）で評定し、その評定の根拠を自由記述によって回答した。

4.2 結果

§1 ログ分析

まず、操作ログから、リフレクションにおける類似計算の頻度を検討した。結果、1人当たりの平均で69.81回 (SD 42.69) の類似計算が行われたことが確認された。図9aは、それらの計算でなされたパラメータ設定（一貫性、抽象性）の内訳を示している。計算回数を従属変数とした2要因〔一貫性: ベクトル・マッピング（被験者内）× 抽象性: 属性・関係（被験者内）〕分散分析を行った結果、抽象性の主効果が有意となり ($F(1,10) = 9.29, p < .05$)、一貫性の主効果 ($F(1,10) = 0.38, n.s.$)、一貫性と抽象性の交互作用 ($F(1,10) = 0.31, n.s.$) は有意とならなかった。抽象性の主効果が得られたことから、被験者のリフレクションは、関係を重視したものであったといえる。

さらに、マッピングによって推定された写像の閲覧に関わる分析を行った。図10aは、1人の被験者のリフレクションの開始から終了までの区間において、画面上に表示

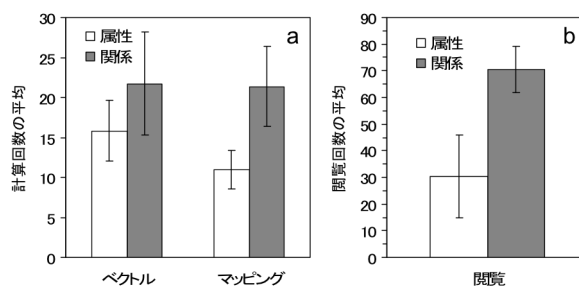


図9 リフレクションにおけるパラメータ設定の内訳 (a: 計算回数, b: 写像閲覧回数)。エラーバーは標準誤差を示す。

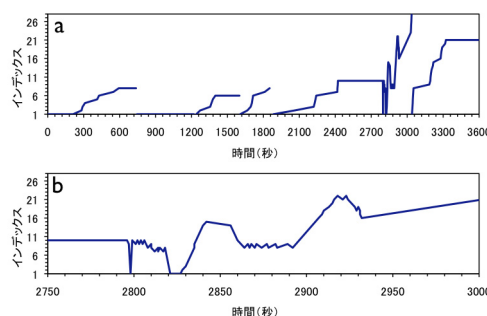


図10 マッピングによる類似計算と閲覧のプロセス。

された写像のインデックス番号の推移を示している。インデックス番号は、計算が繰り返されるか、インタフェース上の右向きの三角形がクリックされた場合に増加し、左向きの三角形がクリックされた場合に減少する。グラフ上で線が途切れている箇所は初期化ボタンがクリックされたことを示している。グラフ中の2,750秒付近から3,000秒付近において、インデックス番号が上下に繰り返し移動していることが分かる。図10bは、この区間のみを抜き出したものである。この図中の2,860秒から2,890秒において、インデックス番号8と9に該当する写像が繰り返し画面上に表示されたことがわかる。ここにおいて、この被験者は、2つの写像の結果を比較しながら閲覧を繰り返したと推測される。

図9bは、そのような写像の繰り返しの観察の頻度を写像閲覧回数（三角形のボタンをクリックした回数）として示している。類似計算の結果を反映し、関係における写像閲覧が、属性における写像閲覧を上回った ($t(10) = 2.61, p < .05$)。また、1回の計算に対して、写像閲覧の頻度は、類似計算の回数の約3倍となった（属性で2.77倍、関係で3.24倍）。この結果は、実験におけるリフレクションが、与えられたパラメータを網羅的に調べるものではなく、推定された写像間の比較などの主体的な観察が含まれていたことを示唆する。

§2 評定の結果

表1は、プレ制作とポスト制作での被験者の自己評定（独創性、美しさ）の平均値を示す。プレ制作とポスト制作の比較を行えば、独創性におけるプレ制作とポスト制

表 1 自己評定の平均値。カッコ内は標準偏差を表す。

	プレ	ポスト
独創性	2.63 (1.06)	2.90 (0.99)
美しさ	2.54 (0.78)	3.00 (0.73)

表 2 操作ログと評定値の相関係数。

	独創性	美しさ	有用性
ベクトル-属性	.031	.424	.339
マッピング-属性	.344	.045	.398
ベクトル-関係	-.037	-.319	-.019
マッピング-関係	.258	.333	.339
属性閲覧	.715*	-.474	.513
関係閲覧	.659*	.149	.139

注. *は 5%水準で有意な相関 ($n = 11$).

作の差は有意とならず ($t(10) = 0.447, n.s.$), 美しさにおける差は有意傾向となる ($t(10) = 2.19, p < .10$). また, 分析環境の有用性の評定の平均は 3.81 (SD 0.83) となり, 中間点に比べ高い評定が得られた。

表 2 は, ログ分析によって得られた分析環境の使用状況に関わるデータと評定値の相関係数を示す。なお, 独創性と美しさの自己評定については, プレ制作からポスト制作への変化 (ポスト制作- プレ制作) を相関係数の計算に用いた。表より, 2 種類の写像閲覧回数 (属性閲覧, 関係閲覧) と独創性の変化に有意な相関が観察できる。ここから, 分析システムによって計算される写像を多く閲覧することが, ポスト制作における独創性の自己評定を向上させることが示唆される。

§ 3 リフレクションの内容に関する分析

アンケートにおける分析環境の有用性評定に対する自由記述, およびリフレクション中に記述された文章の内容を検討した。

まず, 有用性の評定の根拠を問う自由記述において, 「計算結果から自分の制作したものの特徴が分かった」, 「何かを意図して手本からデザインを行なうが, (分析環境を用いることで) 自分の気がつかなかった類似や, その類似度を見つけることができると感じた」, 「無意識的に空白部分を気にしていて関係を見ていることに気がついた」などの報告が得られた。

さらに, リフレクションにおいて記述させた文章には, 以下のように, システムの出力と対応付けて, 自分の作品の特徴を分析する記述が得られた。

- 分析インタフェースを使って気がついたこと。無意識にしていたらしい特徴。1 まとまりの図形間の距離を気にしていたようだ。大きさは全部同じにするとか黒をベースにして少し薄い色を混ぜるとかは気にせずまねしていた。
- 総合的に評価されたそれぞれの要素オブジェクトの対応は完全一致であった。横位置, 縦位置, 大きさ, 明るさ, 形状の 5 つの属性においては, 横位置, 縦位置, 明るさにおいて見本と一致しているが, 形状に関しては 0.56, 大きさについては出力結果がなかった。対応付けられた要素オブジェクトの数はそれぞれ

れ 5/9, 4/9, 0/9, 2/9, 1/9 で, 総合的な判断結果では完全対応となった。以上の結果から私は制作において要素オブジェクトの大きさを考慮に入れずにいたことがわかった。また総合的にみて自分が意図したとおりにそれぞれの要素オブジェクトが対応すると評価された。

上記 2 つの自由記述データは, とともに 2.3 節において期待した観点の明確化や特徴の発見を含むものである。1 番目の事例については, 制作時には明確ではなかった特徴 (大きさを同じにする, 黒をベースにして薄い色を混ぜる) の流用言及している。2 番目の事例については, 各特徴空間ごとの類似度の計算を通して, 制作時に「大きさ」を見落としていたことに気づいている。

4.3 考 察

実験における被験者のリフレクションは, 写像の繰り返し的な閲覧を含むものであった (図 9b)。このような閲覧の傾向は, パラメータ値の異なる写像を比較するものと解釈できる (図 10b)。ここから, 実験における被験者のリフレクションは, 単純な類似計算の繰り返しではなく, 計算結果の主観的な観察を含むものであったと考えることができる。

このような繰り返し的な写像の閲覧は, プレ制作からポスト制作への独創性に関わる自己評定の向上と関連した (表 2)。この結果に対して, 2 つの指標が, 課題に対する熱心さを単純に反映したという解釈も成り立ちうる。ただし, パラメータを網羅的に探索する計算の繰り返しではなく, 繰り返し的に写像を閲覧する行為との関連が有意となったことには意味がある。このことは, 主体的に写像結果を比較する行為が, 被験者にとって意味のあるリフレクションを導くことを示している。

自由記述データからは, 分析環境の利用による観点の明確化, 特徴の発見と関連する記述が得られた。このような記述は, 全ての被験者から得られたものではない。また, 教示の内容を踏まえれば, 被験者が観点の明確化や特徴の発見が生じたと主張することは, 驚くべき結果でない。しかし, オブジェクトの大きさの一致など, 作品の具体的な特徴に触れつつ, 気づきを報告するリフレクションの記述は, 教示の効果のみで導かれるとは考えづらい。これらの記述は, 本研究で構築されたシステムの使用によってもたらされたものとみなせ, 本研究の枠組みの実現性を支持するものといえる。

さらに, 著者らは, 実験において観察されたリフレクションの傾向は, 認知科学における類推の研究とも整合すると考えている。図 9a は, 関係による類似計算が多くおこなわれたことを示し, 図 9b は, マッピングによる写像の閲覧が, 多数回繰り返されたことを示した。このようなパラメータ選択の傾向は, 2 章で導入した言葉を用いれば, 構造的類似 (関係の写像) を重視したものといえる。そして, 類推に関する研究では, 人間が類推

の評価において構造的類似を重視することを示している [Gentner 93b, 森田 05]. 特定のパラメータ設定に対する方向付けの教示を行っていないことを踏まえれば, 本研究の結果は, 類推の評価と同様の傾向が, 類推のモデルを利用したリフレクションにおいても成り立つことを示唆するものといえる. ただし, この結果については, 大学院生の被験者が, 何らかの既存の知識によって, 「関係」や「マッピング」とラベル付けられた類似性を重視した可能性は残る. この結果の一般性に関しては今後さらに検討すべきと考える.

今回の実験には, 別の数多くの課題も残されている. まず, 今回の実験において検討した指標は主観的なものであり, 分析環境を用いたリフレクションの客観的効果は示されていない. また, 実験において設定した自己評定の基準は, 一般的な創造性評価における基準を参考にしており, 本研究の背景となる発見的観点との関連は明確ではない. 領域一般的な発見的観点を育成を論じるためには, 構成課題とは別の転移課題の設定も必要になるだろう.

5. お わ り に

本研究では, 発見的観点育成に向けて, 類推の認知モデルを組み入れたリフレクション支援の枠組みを提案することを目指した. 構築された支援システムは, 類推の認知モデルによる計算結果を, 学習者が主体的に観察することを仮定した. 実験では, そのような主体的な観察が, 実際に生起し, リフレクションの主観的効果と関連することが確かめられた. また, 観点の明確化や新たな特徴への気づきなど, 仮定されたリフレクションの効果についても, 少数の事例のみによってではあるが, 定性的に確認することができた. これらの結果より, 提案する枠組みの実現性が示されたと考える.

本研究の新規性は, 類推の認知モデルを発見的観点の育成に向けたリフレクションの枠組みに組み入れたことにある. 冒頭で述べたように, 創造的活動の支援や創造性の育成支援に関わる研究は, 創造性の理解を目指す研究との連携によって進展してきた. だが, 過去の研究において採用された手法は, 認知科学において開発されたモデルと必ずしも整合するものではなかった.

著者らは, 創造性の育成支援に認知モデルを利用することは, システムの理論的根拠を明確にし, 認知科学領域に対する新たな知見を導くと考える. 実際, 本研究において構築されたシステムは, 2章において示された類推研究の知見を直接的な背景とする. システムに組み入れられるモデルは, 学習者との相互作用が可能な程度的高速化が図られている. また, 本研究の実験で得られた結果の一部は, 認知科学的な研究の知見と整合するものであった. 今後, 構築されたシステムを使用する大規模な実験を実施することで, 発見的観点の育成に関与する

要因の更なる理解が促され则认为る.

なお, より一般的な学習支援の研究に目を向ければ, 認知モデルを利用した支援システムの開発は, 過去にもなされている. たとえば, 熱力学の設計を対象とする CyclePad [Forbus 99] は, 本研究と同様, 類推のモデル (MAC/FAC, SME) を組み入れ, 学習者の行動を診断する. また, 代数や幾何学の領域を対象とする Cognitive Tutor [Anderson 95] は, 認知モデルの代表的なアーキテクチャである ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational) に基づく. Cognitive Tutor は, 対象領域の問題を解決するモデルを用いて, 学習者の行動をトレースし, その結果に基づくヒントを生成する.

本研究による従来の枠組みの発展は, パラメータの主体的な調整機能にある. 本研究の枠組みにおいて, 学習者は自らの意志で主体的にパラメータ空間を探索する. 実験の結果は, このような主体的な観察の枠組みを設定することが妥当であることを示している. 著者らは, このような学習者の主体的なリフレクションが, 発見的観点の育成における重要な要因になると考えている. 今後, システムのユーザインタフェースを改善することで, 主体的なリフレクションをさらに支援することができると考えている.

謝 辞

本研究で用いた構成の事例は佐野宏太郎氏に作成いただきました. ご協力に感謝いたします.

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Anderson 95] Anderson, J. R., Corbett, A. T., Koedinger, K. R., and Pelletier, R.: Cognitive tutors: lessons Learned, *The Journal of the Learning Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 167–207 (1995)
- [Falkenhainer 89] Falkenhainer, B., Forbus, K., and Gentner, D.: The structure-mapping engine: Algorithm and example, *Artificial Intelligence*, Vol. 41, pp. 1–63 (1989)
- [Finke 92] Finke, R. A., Ward, T. B., and Smith, S. M.: *Creative cognition: Theory, research, and applications*, MIT Press (1992)
- [Forbus 90] Forbus, K. and Oblinger, D.: Making SME greedy and pragmatic, in *Proceedings of the 12th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 61–68, Lawrence Erlbaum (1990)
- [Forbus 95] Forbus, K., Gentner, D., and Law, K.: MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval, *Cognitive Science*, Vol. 19, pp. 141–205 (1995)
- [Forbus 99] Forbus, K., Whalley, P., Everett, J., Ureel, L., Baher, J., and Kuehne, S.: CyclePad: An articulate virtual laboratory for engineering thermodynamics, *Artificial Intelligence*, Vol. 114, pp. 297–347 (1999)
- [Fum 07] Fum, D., Missier, F. D., and Stocco, A.: The cognitive modeling of human behavior: Why a model is (sometimes) better than 10,000 words, *Cognitive Systems Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 135–142 (2007)
- [古川 07] 古川 康一, 諏訪 正樹, 加藤 貴昭: 身体スキルの創造支援について, *人工知能学会論文誌*, Vol. 22, No. 5, pp. 563–573 (2007)
- [Gentner 83] Gentner, D.: Structure mapping: A theoretical framework for analogy, *Cognitive Science*, Vol. 7, pp. 155–170 (1983)
- [Gentner 93a] Gentner, D. and Jezierski, M.: The shift from metaphor to analogy in western science, in Ortony, A. ed., *Metaphor and thought (2nd ed.)*, pp. 447–480, New York, NY: Cambridge University Press (1993)

- [Gentner 93b] Gentner, D., Rattermann, M., and Forbus, K.: The role of similarity in transfer: Separating retrievability for inferential soundness, *Cognitive Psychology*, Vol. 25, pp. 524–575 (1993)
- [Gick 80] Gick, M. L. and Holyoak, K. J.: Analogical problem solving, *Cognitive Psychology*, Vol. 12, pp. 306–355 (1980)
- [Gomes 06] Gomes, P., Seco, N., Pereira, F. C., Paiva, P., Carreiro, P., Ferreira, J. L., and Bento, C.: The importance of retrieval in creative design analogies, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 19, No. 7, pp. 480–488 (2006)
- [後藤 04] 後藤 武, 佐々木 正人, 深澤 直人: デザインの生態学 - 新しいデザインの教科書, 東京書籍 (2004)
- [Hofstadter 95] Hofstadter, D.: *Fluid Concepts and Creative Analogies*, Basic Books, New York (1995)
- [Holyoak 87] Holyoak, K. J. and Koh, K.: Surface and structural similarity in analogical transfer, *Memory & Cognition*, Vol. 15, pp. 332–340 (1987)
- [Holyoak 89] Holyoak, K. J. and Thagard, P.: Analogical mapping by constraint satisfaction, *Cognitive Science*, Vol. 13, pp. 295–355 (1989)
- [Holyoak 95] Holyoak, K. J. and Thagard, P.: *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*, The MIT Press, Cambridge, MA (1995)
- [Indurkha 98] Indurkha, B.: On creation of features and change of representation, *Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society*, Vol. 5, No. 2, pp. 43–56 (1998)
- [石橋 04] 石橋 健太郎, 岡田 猛: 創造のための「芸術作品の知覚」経験: 模倣に焦点をあてて, 認知科学, Vol. 11, pp. 51–59 (2004)
- [木下 01] 木下 武志, 河野 とも江: ベーシックデザインにおける色彩構成課題の提案, 山口大学工学部研究報告, Vol. 51, pp. 93–99 (2001)
- [Kojima 08] Kojima, K. and Miwa, K.: A System that Facilitates Diverse Thinking in Problem Posing, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 18, pp. 209–236 (2008)
- [Kulinski 01] Kulinski, J. and Gero, J. S.: Constructive representation in situated analogy in design, in *Proceedings of the CAAD Futures 2001*, pp. 507–520, Kluwer Academic Publishers (2001)
- [Markman 93] Markman, A. B. and Gentner, D.: Structural alignment during similarity comparisons, *Cognitive Psychology*, Vol. 25, pp. 431–467 (1993)
- [諏訪 05] 諏訪 正樹: 身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語, 人工知能学会誌, Vol. 20, pp. 525–532 (2005)
- [三井 96] 三井 秀樹: 美の構成学 バウハウスからフラクタルまで, 中央公論新社 (1996)
- [Monty 73] Monty, R., Rosenberger, M. A., and Perlmutter, L. C.: Amount and locus of choice as source of motivation in paired-associate learning, *Journal of experimental psychology*, Vol. 97, pp. 16–21 (1973)
- [森田 05] 森田 純哉, 三輪 和久: 計算機モデルによる Open-end な状況での認知の分析, 人工知能学会論文誌, Vol. 20, pp. 306–317 (2005)
- [Morita 08] Morita, J.: Computational Analysis on Graphic Generation: Effects of surface and structure similarity, in *Proceedings of the 30th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 1765–1770 (2008)
- [永井 07] 永井 由佳里, 田浦 俊春, 原川純一: 創造的デザインプロセスをもたらす思考の広がり方の分析方法論の試行, デザイン学研究, Vol. 54, No. 3, pp. 39–46 (2007)
- [南雲 94] 南雲 治嘉: 視覚表現-コンピュータ時代のベーシックデザイン, グラフィック社 (1994)
- [大槻 93] 大槻 説乎: 発見的学習とその支援環境, 人工知能学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 411–418 (1993)
- [瀬名 06] 瀬名 秀明, 梅田 聡, 橋本 敬: 境界知のダイナミズム (フォーラム共通知をひらく), 岩波書店 (2006)
- [新ヶ江 95] 新ヶ江 登美夫, 竹内 章, 大槻 説乎: 実験環境における発見的学習の支援, 人工知能学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 373–382 (1995)
- [Spellman 96] Spellman, B. A. and Holyoak, K. J.: Pragmatics in analogical mapping, *Cognitive Psychology*, Vol. 31, pp. 307–346 (1996)
- [Spencer-Smith 97] Spencer-Smith, J. and Goldstone, R. L.: The dynamics of similarity, *Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society*, Vol. 4, No. 4, pp. 38–56 (1997)
- [鈴木 96] 鈴木 宏昭: 類似と思考 (認知科学モノグラフ 1), 共立

出版, 東京 (1996)

- [Taylor 09] Taylor, E. G. and Hummel, J. E.: Finding similarity in a model of relational reasoning, *Cognitive Systems Research* (2009)
- [Thagard 90] Thagard, P., Holyoak, K. J., Nelson, G., and Gochfeld, D.: Analog retrieval by constraint satisfaction, *Artificial intelligence*, Vol. 46, pp. 259–310 (1990)
- [山下 08] 山下 貴史: 3 分でわかるラテラル・シンキングの基本, 日本実業出版社 (2008)

[担当委員: 柏原 昭博]

2010 年 8 月 1 日 受理

——著 者 紹 介——



森田 純哉 (正会員)

2000 年創価大学文学部卒業。2006 年名古屋大学大学院人間情報学研究科博士後期課程修了。博士 (学術)。現在、北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教。様々な場面における人間の自由な思考を、情報処理アプローチに基づいて分析することに興味がある。また、最近では、感性や美意識などの問題にも取り組む。日本認知科学会、Cognitive Science Society, 日本デザイン学会各会員。



永井 由香里

武蔵野美術大学修士、千葉大学博士後期課程修了。博士 (学術)。PhD in Computing Sciences (シドニー工科大学)。文科省在外派遣 Creativity & Cognition Research Studios, Loughborough University (英国) 客員研究員、筑波技術短期大学講師等を経て、2004 年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教授 (現、教授)。デザインにおける創造性の研究に従事するとともに、認知プロセスの理解に基づいたデザインを实践。The Design Society, Design Research Society Fellow, ACM, Cognitive Science Society, 日本デザイン学会各会員。