

鉛筆デッサンが表す写実誤りの三次元モデルによる顕在化

松田 憲幸^{†a)} 高木佐恵子[†] 曾我 真人[†] 堀口 知也^{††}
 平嶋 宗^{†††} 瀧 寛和[†] 吉本富士市[†]

Error Visualization for Pencil Drawing with Three-Dimensional Model

Noriyuki MATSUDA^{†a)}, Saeko TAKAGI[†], Masato SOGA[†], Tomoya HORIGUCHI^{††},
 Tsukasa HIRASHIMA^{†††}, Hirokazu TAKI[†], and Fuji'ichi YOSHIMOTO[†]

あらまし 初心者のための鉛筆デッサンの基礎は、対象を見えたまま正確に描きとる写実であり、獲得が難しい技能である。初心者は自己の写実の誤りに気づくことができない、あるいはデッサン画全体に漠然とした違和感を感じることもできて、具体的に写実の何が誤りかを判断できず、同じ誤りを繰り返す。反復練習を指導する教師は、写実の誤りを理解させるため、描く対象と異なった立体物をイメージさせるたとえ（比喻）を用いる。学習者は比喻説明を聞く過程で徐々に、明らかに異なるイメージの写実と感じるようになり、ついに自己の写実の誤りに気づくと考えられる。本論文は学習者の鉛筆デッサン画像に含まれる写実の誤りを顕在化した三次元モデルを構築する手法を検討する。本手法は誤った写実による1枚の画像から、誤りを映し出し、かつ直感的に不自然さを感じさせる三次元モデルを構築する。写実の8種の誤りを対象に、デッサン画像の誤りを特徴づける15個の特徴量を用いて三次元モデルのスケーリング変換を定義した。三次元モデルを表示する顕在化ツールを実装した。学習者が本ツールを用いることで、鉛筆デッサンに含まれる写実の誤りに気づきやすくなると期待できる。キーワード 誤り気づき、鉛筆デッサン、三次元モデル

1. ま え が き

初心者のための鉛筆デッサンの基礎は、鉛筆を用いて画用紙に対象物を見えたまま正確に描く写実である。写実の対象物はモチーフと呼ばれ、写実にはモチーフの形状や陰影を観察する目と、これを描く手の技能が必要と考えられる[1]。写実の熟練には、教師の指導のもとモチーフの写実を繰り返し、誤りを修正する、反復練習が有効と考えられ、小学校の図工や生涯学習の絵画教室などで、複数の学習者を指導する授業が実施される。写実は長期にわたる手と目の鍛錬を要する、習得の難しい技能の一つである。

写実のスキルが未熟な学習者にとって、自己または

他者の写実の誤りに気づくことは容易でない。実際、反復練習において、多くの学習者が、鉛筆デッサンが表す写実の誤りに気づけない、あるいは、画用紙全体に漠然とした違和感を感じても、具体的に写実のどこを、どのように修正すべきかを判断できず、繰り返し同じ失敗を繰り返している。

Perkinson は学習には学習者自身の力で誤りに気づく必要性及び誤り気づきにおける適切な支え（scaffold）の重要性を指摘している[2]。初心者が写実の反復練習の過程で誤りを繰り返す一因として、自分の力で誤りに気づけず、その支えが不十分と考えられる。

写実の反復練習の過程で学習者の誤った写実に対する教師の説明は（1）誤りの説明（2）正解の説明（3）誤りを写し出す比喻説明の3種類に大きく分けられる（1）の説明は「お皿の縦の長さが誤っている」といったように、学習者のデッサンにおける誤り箇所を示す（2）の説明は「正しいお皿の縦の長さは横の3分の2くらいです」など、正しく描くべき位置を示す（3）の説明は「お皿は、丸いお皿というよりはむしろ、ラグビーボールのような形のカラー皿のように描かれています」など、誤ったデッサンを映し出す立

[†] 和歌山大学システム工学部，和歌山市

Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, 930 Sakaedani, Wakayama-shi, 640-8510 Japan

^{††} 神戸大学海事科学部，神戸市

Faculty of Maritime Sciences, Kobe University, 5-1-1 Fukae-Minami-Machi, Higashi-Nada-ku, Kobe-shi, 658-0022 Japan

^{†††} 広島大学大学院工学研究科，東広島市

Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, 739-8527 Japan

a) E-mail: matsuda@sys.wakayama-u.ac.jp

体を示す。

実際の反復練習では、特に(1)(2)だけでは誤りの存在に納得しない場合や同じ誤りを繰り返している場面などで(3)の説明が見られる。例えば、丸皿をモチーフとした鉛筆デッサンの反復練習では、「まるで、つばの広い麦わら帽子のようです」、「このお皿は、実際よりも、もっと上から、まるで立ち上がってのぞき込んだように描かれています」などが見られる。比喻を用いた説明を通して、モチーフを写実して得られた鉛筆デッサンとは逆に、鉛筆デッサンを映し出す立体の感覚(イメージ)を徐々に与えることで、やがてイメージが実際のモチーフと明らかに異なることに気づかせ、ついに自身の写実に誤りがあることに気づかせると考えられる。

教師の比喻による説明は、言葉によって立体的な特徴を説明するが、これに対し、コンピュータの仮想空間を用いて、視覚的に特徴を見せる方法が考えられる。すなわち、学習者の誤った写実による鉛筆デッサンを映し出す立体物をコンピュータの仮想空間に三次元モデルで表すことで、学習者に誤りの存在を気づかせる、誤りの顕在化である。本論文は、学習者の描いた鉛筆デッサンが表す写実の誤りを顕在化する、三次元モデルの構築について検討する。

平嶋、堀口らは学習者の誤りを不自然な現象に表す Error-Based Simulation を提案している[3],[4]。物理・力学問題の学習者の誤った立式に対して、現象の初期状態が学習者の想定と一致し、かつ、時間経過とともに、明らかに不自然な現象を引き起こす技術である。これを見せることで、学習者に自身の立式に誤りが含まれることに気づかせる。

鉛筆デッサンに含まれる写実の誤りを顕在化するには、学習者の写実の誤りについて、三次元モデルの一方から学習者のデッサンと一致して見え、かつ、異なる視点から明らかに不自然なモデルのあり方が見えなければならない。すなわち、学習者の描画の視線方向から三次元モデルを見たとき、学習者の描いた鉛筆デッサンとして見え、同時に、異なる視点からはモチーフが宙に浮いている、物体同士がめり込んでいるなど、明らかに実世界のモチーフと異なることを視覚的に顕在化する。

対象物の二次元画像から、その正確な三次元モデルを構築するには、通常、一方から対象物を撮影した1枚の二次元画像だけでは対象物の面の凹凸、形状、配置などが一意に定まるとは限らず、複数方向から撮

影した十分な量の画像がある。例えば、Image Based Modeling [5] は対象物を複数方向から撮影した二次元画像をもとに、対象物の形状を同定し、対象物の正確な三次元モデルを構築する手法である。

これに対し鉛筆デッサンの誤り顕在化では、学習者が誤って写実した一方からの1枚のデッサンの画像を用いて、直感的に不自然さや違和感を感じるような、写実の誤りを映し出す三次元モデルを構築する。写像の誤りを反映する対象の三次元モデルは、一般に、一意に定めるべき、正しいモデルが存在するとは限らず、複数の三次元化が考えられる。

本論文では、学習者にとって誤りが顕在化され、かつ、学習者の描画時の視点からモデルを見たときデッサン画と同じように見える三次元化を定義する。まず、実際の写実の反復練習で見られた頻度の高い典型的な誤りを整理し、各誤りについて、デッサン画像の特徴量を整理した。そして各誤りについて、特徴量を用いた、モチーフの三次元モデルのスケーリング変換を定義した。実際に学習者が描いた鉛筆デッサン画像から、三次元モデルを表示するツールを実装した。最後に本ツールを用いて、実際に写実の初学習者が、デッサン画像に含まれる誤りを説明できるか、調査を行った。本ツールを用いた方が、誤りに気づきやすいことが示唆された。

本論文では、特徴点を抽出する画像解析には、単純手法を採用しており、画像解析の精度や描画時の視点から見た誤りを顕在化する三次元モデルのもっともらしさ、ツールの有用性評価については今後の重要な課題である。

本研究は鉛筆デッサンの写実の反復練習における、誤り気づきの支援と位置づけることができる[6]。従来多くの研究は、コンピュータを用いた絵画の描画支援をテーマとしており、油絵や水彩、鉛筆などの描画をシミュレートする手法や、マウスやペンなどの入力インタフェースの研究である[7]~[9]。

2. で目的とする誤り顕在化の概要を、3. で検討した誤り顕在化、すなわち、モチーフの三次元モデルの構築、誤りの解析、誤りを反映する三次元モデルの構築について述べる。4. で誤り顕在化ツールの実装について述べ、5. で総括する。

2. 写実の誤り顕在化

本論文で検討する、学習者の写実の誤りを顕在化するソフトウェアを顕在化ツールと呼ぶ。顕在化ツール

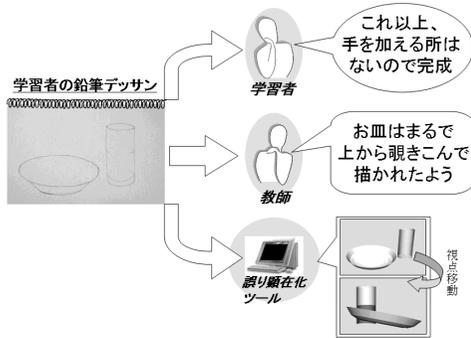


図 1 誤り顕在化の概要

Fig. 1 Error visualization for pencil drawing.

の概要を図 1 に示す．顕在化ツールが稼動の前提となる条件，利用の手順，本ツールが対象とする誤りについて述べる．

2.1 条 件

顕在化ツールの利用は，写実が未熟な複数の学習者を対象に写実の反復練習を実施する場面を想定する．反復練習で使用するモチーフは，教師があらかじめ指定する．この場合，モチーフには，直線や楕円といった基本的な幾何形状を含み，かつ，学習者が手軽に準備できるように，身近な物から選ぶ．

顕在化ツールは，あらかじめ，丸皿やりんご，花などのモチーフのための，基本的な三次元モデルを保持しており，教師はそこから利用するモチーフを選択し，大きさを計測して入力する．

以降，本論文では，モチーフとして丸皿とグラスが指定されたものとして説明する．モチーフの例を図 2 に示す．丸皿は上端の形状が真円のものとする．グラスは透明なガラス製とし，写実の対象に楕円図形を増やすため，中程までに水を注ぐ．これらモチーフは，また学習者の真正面に置くものとする．

実際，初心者を対象とする反復練習の授業では，グラス表面の陰影や調子，グラスのとってなどの描画は，難易度が高いために，学習者が描いていても，指導の対象から外している．

2.2 手 順

教師は，あらかじめ，顕在化ツールに対して，写実の反復練習で利用するモチーフを選択し，モチーフの大きさを測定して顕在化ツールに入力する．次に，一斉授業の教室において，学習者の視点とモチーフの位置を測定して入力する．以上の入力値をもとに，顕在化ツールは，内部にモチーフの三次元モデル及び学習



図 2 モチーフの丸皿とグラスの例

Fig. 2 An example of subject for drawing in a class.

者の視点からの二次元画像を生成する．授業で学習者が描き終えた画用紙を真正面からデジタルカメラで撮影する（あるいはスキャナで読み取る）．撮影は，画用紙を壁に貼り，フラッシュなしで撮影した．顕在化ツールは，撮影画像とモチーフの二次元画像を比較して，写実の誤りを反映した三次元モデルを画面に表示する．例えば，丸皿の縦と横の長さの比に応じて，お皿が傾斜したまま，宙に浮いて止まった三次元モデルを構築する．

モチーフの三次元モデルに対して，誤りに応じた変形（スケーリング変換）を加えることで，誤りを反映した三次元モデルを得る．この誤り顕在化を実装した学習ツールを誤り顕在化ツールと呼ぶ．学習者は，誤り顕在化ツールを通して，モチーフの三次元モデルと，写実の誤りを反映した，鉛筆デッサンの三次元モデルについて，任意の視点から閲覧でき，両者を比較できる．

2.3 写実の誤り

誤り顕在化ツールを検討するため，まず本論文で扱う写実の誤りを限定する．誤りは実際の写実の反復練習の現場から選ぶことにした．写実の初心者を対象とした生涯学習学校の授業（受講生 19 名，5 回開催）を調査した [10]．1 名の教師が指摘した誤りより頻度が高かった（誤り 1）から（誤り 8）を抽出した．

- （誤り 1）皿を丸く描きすぎる誤り 楕円形に見える皿の外周を真円のように描きすぎる誤り
- （誤り 2）皿の大きさの誤り グラスに比して皿を大きく描きすぎる誤り
- （誤り 3）グラスの太さの誤り 皿の横幅に比してグラスを太く描きすぎる誤り
- （誤り 4）グラス断面形状間関係の誤り 異なる高さ位置するグラスの各断面形状を同じように描いてしまう誤り
- （誤り 5）グラスの横幅関係の誤り 横幅が均一のグラスを異なる横幅のように描いてしまう誤り

- (誤り 6) 皿のリムの広さの誤り 皿のつばの広さを不自然に描く誤り
- (誤り 7) グラスの傾きの誤り まっすぐ立っているグラスを傾いたように描く誤り
- (誤り 8) 皿の深さの誤り 横幅に対して皿の高さを不自然に描いてしまう誤り

3. 誤り顕在化の方法

誤り顕在化の手順は、次の3手順である。

- (1) モチーフの三次元モデルと画像の構築
- (2) モチーフとデッサンの特徴抽出
- (3) 誤り三次元モデルの構築

以下、順に述べる。

3.1 モチーフの三次元モデルと画像の構築

誤り顕在化ツールは、写実の反復練習によく利用される典型的なモチーフについて、スケールとは独立に基本的な形状の特徴を表した、三次元モデルをもつ。これを基本三次元モデルと呼ぶ。写実でよく使われるモチーフには、丸皿、グラス、りんごなどがある。授業にあたり教師はまず、反復練習に使用するモチーフの基本三次元モデルを選定する(図3の①)。

モチーフの基本三次元モデルの座標ベクトルを S とする。説明を簡潔にするため、三次元モデルは個別のローカル原点を系とする座標で表す。図4で丸皿とグラスの基本三次元モデル $S_{皿}$, $S_{グラス}$ は、それぞれの底の中心点 $O_{皿}$, $O_{グラス}$ をローカル原点とする。また学習者による描画時の視点を zy 平面上の点 V とする。

次に教師は、実際に利用するモチーフの大きさを、定規やメジャーを用いて計測し、値を入力する(図3の②)。計測項目は、基本三次元モデルごとに定めたものであり、皿について $M_1 \sim M_6$, グラスについて M_7, M_8 , 両者の関係について M_9 を計測する。測定

項目を表1及び図5、図6に示す。

モチーフの三次元モデル P は、基本三次元モデル S とモチーフの計測値を用いた拡大/縮小のスケールンク変換 R を用いた次式により定義する。

$$P = k_{3D}RS$$

k_{3D} は、計測値 (cm) と対応する仮想空間の距離の比であり、モチーフの三次元仮想空間での大きさを決める。あらかじめ教師により、鉛筆デッサンが画用紙の中央に配置する構図をとると同様に、三次元モデルが画面枠内で見栄えよく配置されるよう調整する。

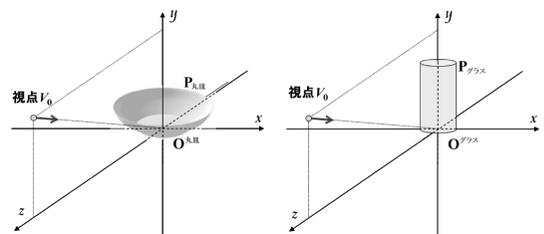


図4 三次元モデル座標とローカル原点

Fig.4 Virtual space and local space for a drawing-subject.

表1 モチーフ及び視点の測定項目と測定値の例

Table 1 Measuring the size of drawing-subject and the distance to learner's viewpoint.

測定項目		記号	例 (cm)
皿	直径大	M_1	31.0
	直径中	M_2	27.0
	直径小	M_3	25.0
	高さ	M_4	4.5
	厚み	M_5	0.1
	糸底の高さ	M_6	0.1
グラス	直径	M_7	12.5
	高さ	M_8	16.5
皿とグラス	中心間の距離	M_9	18.0
視点	皿の中心 (水平)	M_{10}	100.0
	グラスの中心 (水平)	M_{11}	123.0
	皿の中心 (垂直)	M_{12}	48.0

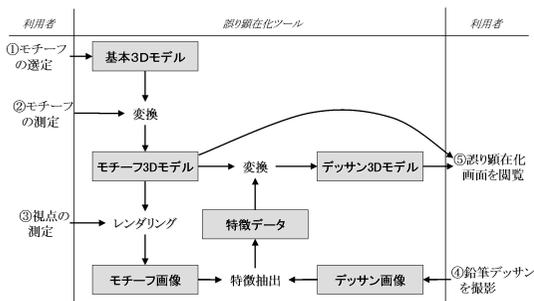


図3 誤り顕在化ツールのデータフロー
Fig.3 Dataflow of error visualization.

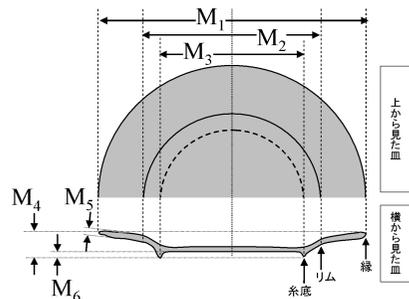


図5 皿の測定
Fig.5 Measuring size of dish.

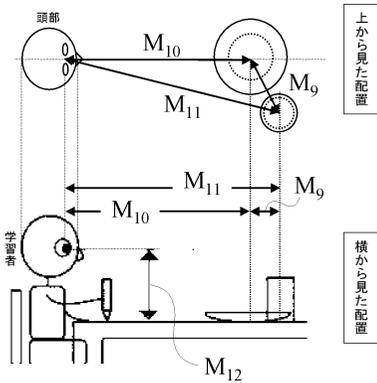


図 6 視点とモチーフの間の測定項目

Fig. 6 Measuring the size of drawing-subject and the distance to learner's viewpoint.

例えば、モチーフグラスの三次元モデル $P_{グラス}$ は、計測値 M_7, M_8 を用いた、次式のスケーリング変換より求める。 S_7, S_8 は、基本三次元モデル $S_{グラス}$ の水平断面の直径と、グラスの高さとする。

$$P_{グラス} = k_{3D} \begin{bmatrix} \frac{M_7}{S_7} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M_8}{S_8} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M_7}{S_7} \end{bmatrix} S_{グラス}$$

教師は、視点とモチーフについて、図 6 に示す項目 $M_{10} \sim M_{12}$ を計測する (図 3 の ③)。これらの値を用いて、モチーフ三次元モデル P より、学習者がデッサンを描いた視点方向からモチーフを見た画像 (モチーフ画像) を、レンダリングアプリケーションにより生成する。

3.2 特徴データ

2.3 で示した 8 個の誤りを特徴づける特徴量を、授業を担当した教師とともに整理した。これを特徴データと呼ぶ (誤り 1) から (誤り 8) の特徴データを表 2, 図 7 に示す。

3.3 特徴抽出

2.3 で調査した教師は、はっきりした強い線で描くよう指導していたことから、3.1 で得たモチーフ画像に対して、単純に 2 値化と細線化処理を施し、特徴データ $F_1 \sim F_{15}$ を得た [11]。更に、学習者の鉛筆デッサンをデジタルカメラ等で撮影した (図 3 の ④) 鉛筆デッサンの画像についても、同様の解析により特徴データ $F'_1 \sim F'_{15}$ を求める。

3.4 誤り三次元モデルの構築

学習者が描いたデッサンの特徴データ $F'_1 \sim F'_{15}$ を、モチーフの三次元モデル P に反映することで、誤りを

表 2 画像から抽出する特徴データ

Table 2 Feature data from pictures.

対象	記号	説明
皿	F_1	縁の長軸 (縁内の最長長さ)
	F_2	縁の短軸 (縁内の最短長さ)
	F_3	リムの長軸 (リム内の最長長さ)
	F_4	高さ (上端-下端の垂直の長さ)
グラス	F_5	上端断面の長軸 (上端の最長長さ)
	F_6	上端断面の短軸 (上端の最短長さ)
	F_7	水面断面の長軸 (水面の最長長さ)
	F_8	水面断面の短軸 (水面の最短長さ)
	F_9	底断面の長軸 (底の最長長さ)
	F_{10}	底断面の短軸 (底の最短長さ)
	(F_{11}, F_{12})	上断面の中心座標 (F_5 と F_6 の交点)
	(F_{13}, F_{14})	底断面の中心座標 (F_9 と F_{10} の交点)
	F_{15}	高さ (上端から底の垂直方向の長さ)

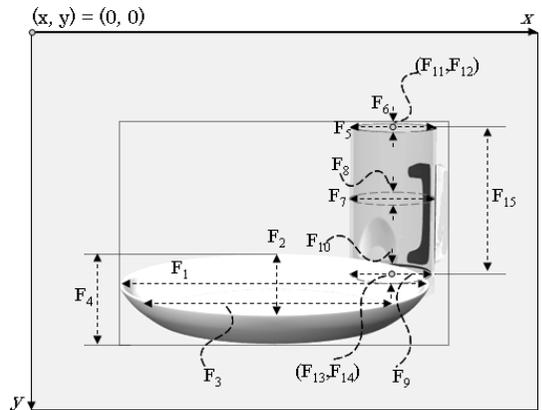


図 7 モチーフ画像の特徴データ

Fig. 7 Feature data of a picture of drawing-subject.

反映した三次元モデル P' を求める (図 3 の ⑤)。誤りを反映するため、誤りごとに特徴データを加味した三次元モデルのスケーリング変換を定義する (注1)。

以下 P を構成する皿を $P_{皿}$ 、グラス $P_{グラス}$ とする。更に $P_{皿}$ のリムより内側を $P_{皿リム}$ 、 $P_{グラス}$ の上端の断面を $P_{グラス上}$ 、水面がつくる断面を $P_{グラス水面}$ とし、その底断面を $P_{グラス底}$ とする。視点 V と仰角はモチーフの測定値、表 1 より設定する。

(誤り 1) 皿を丸く描きすぎる誤り 視点 V から見た皿の長軸と短軸の比が、学習者が描いたデッサン画像の中の長軸と短軸の比に一致するよう、 $P_{皿}$ を x 軸を中心に θ 回転する。このとき、 $P_{皿}$ を横から見ると、傾斜したまま空中に静止する。

(注1): 学習者のデッサン画像に含まれる複数の誤りについて、同時に複数の誤りを顕在化する場合と、一つの誤りごとに顕在化する場合が考えられる。ここでは一つの誤りに限って顕在化する。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{F'_2}{F'_1}\right) - \arcsin\left(\frac{F_2}{F_1}\right)$$

$$\mathbf{P}'_{\text{皿}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{皿}}$$

(誤り 2) 皿の大きさの誤り 皿とガラスの横幅の比の偏り具合に応じて皿を水平面 (xz 平面) 方向に拡大・縮小変換する.

$$\mathbf{P}'_{\text{皿}} = \begin{bmatrix} \frac{F'_1}{F'_5} \cdot \frac{F_5}{F_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{F'_2}{F'_6} \cdot \frac{F_6}{F_2} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{皿}}$$

(誤り 3) ガラスの太さの誤り ガラスの縦の長さに対する横の長さの比に応じて、横方向 (xz 平面) に太く/細くする.

$$\mathbf{P}'_{\text{ガラス}} = \begin{bmatrix} \frac{F'_5}{F'_{15}} \cdot \frac{F_{15}}{F_5} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{F'_2}{F'_6} \cdot \frac{F_{15}}{F_5} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{ガラス}}$$

(誤り 4) ガラス断面形状間の関係の誤り グラスの上端, 水面, 下端の三つの断面について、横軸と縦軸の比の差に応じて、楕円面を x 軸を中心にそれぞれ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 回転変換する.

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{F'_6}{F'_5}\right) - \arcsin\left(\frac{F_6}{F_5}\right)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{F'_7}{F'_8}\right) - \arcsin\left(\frac{F_7}{F_8}\right)$$

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{F'_9}{F'_{10}}\right) - \arcsin\left(\frac{F_9}{F_{10}}\right)$$

$$\mathbf{P}'_{\text{ガラス上}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{ガラス上}}$$

$\mathbf{P}'_{\text{ガラス水面}}, \mathbf{P}'_{\text{ガラス底}}$ は $\mathbf{P}'_{\text{ガラス上}}$ と同様.

(誤り 5) ガラスの横幅の関係の誤り ガラス内の水面がつくる断面の横軸を基準に、上断面 $\mathbf{P}_{\text{ガラス上}}$, 下断面 $\mathbf{P}_{\text{ガラス下}}$ を拡大・縮小変換する. ガラスの側壁は各断面を直線でつなぐ.

$$\mathbf{P}'_{\text{ガラス上}} = \begin{bmatrix} \frac{F'_5}{F'_7} \\ 1 \\ \frac{F'_2}{F'_7} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{ガラス上}}$$

$$\mathbf{P}'_{\text{ガラス底}} = \begin{bmatrix} \frac{F'_9}{F'_7} \\ 1 \\ \frac{F'_6}{F'_7} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{ガラス底}}$$

(誤り 6) 皿のリムの広さの誤り 皿縁とリムの長軸の比を基準に $\mathbf{P}_{\text{皿リム}}$ を拡大・縮小変換する. これにより皿のリムの位置が変化し、縁は変化しない.

$$\mathbf{P}'_{\text{皿リム}} = \begin{bmatrix} \frac{F'_3}{F'_1} \cdot \frac{F_1}{F_3} \\ 1 \\ \frac{F'_3}{F'_1} \cdot \frac{F_1}{F_3} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{皿リム}}$$

(誤り 7) ガラスの傾きの誤り デッサン画像のガラスの上断面の横軸と、ガラス上断面と底断面の中心のずれの長さとの比に応じて、上断面 $\mathbf{P}_{\text{ガラス上}}$ を x 軸方向に移動することで、ガラスを傾斜させる. 上断面と底断面の間は直線でつなぐことでガラス表面を形成する.

$$\mathbf{P}'_{\text{ガラス上}} = \mathbf{P}_{\text{ガラス上}} + \begin{bmatrix} \frac{(F'_{11} - F'_{13}) \cdot F_5}{F'_5} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(誤り 8) 皿の深さの誤り デッサン画像の皿の縁の長軸と高さの比に応じて、 $\mathbf{P}_{\text{皿}}$ を y 軸方向に拡大・縮小変換する.

$$\mathbf{P}'_{\text{皿}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{2F'_4 - F'_2}{2F'_1} \cdot \frac{2F_4}{2F_4 - F_2} \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{皿}}$$

4. 実装

実際に学習者が描画したデッサン画像を扱う誤り顕在化ツールの実装例と、実装したツールが実際の学習者の誤り気づきへの効果に関する調査について述べる.

4.1 実装例

図 3 に示した誤り顕在化ツールを試作した. 画面の例を図 8, 図 9, 図 10 に示す. 左にモチーフの三次元モデル \mathbf{P} を、右に鉛筆デッサンの写実の誤りを反映した三次元モデル \mathbf{P}' を表示する.

三次元モデルの記述には VRML2.0 を用いた. ユーザは表示されたモデルを任意の方向から眺めることができる. 同時にあらかじめ設定しておいた視点メニューから視点の一つ選ぶことで、モデルを眺めることができる (図 11).

VRML のビューアには、視点を移動するための機能と、あらかじめ設定しておいた視点を選ぶことで視点を移動する二つの機能がある. ここでは視点メニュー

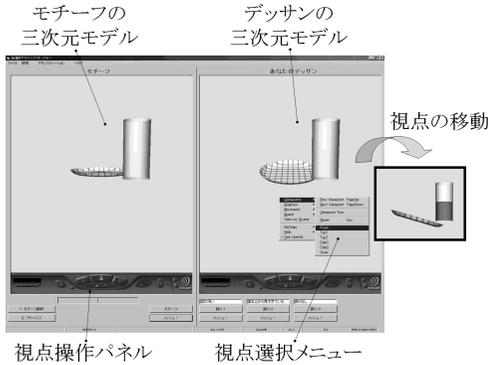


図 8 誤り顕在化ツールの画面例

Fig. 8 A display-example of error visualization tool.

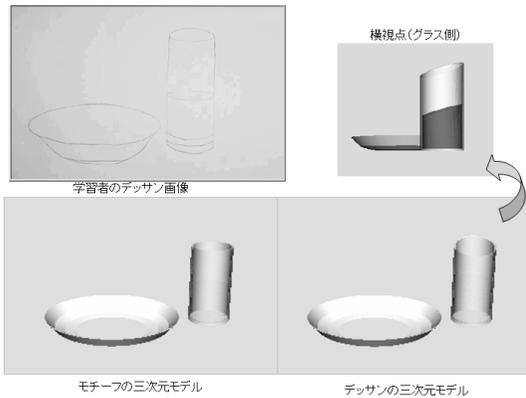


図 9 (誤り 4) の顕在化の例

Fig. 9 An example of error visualization for Error No.4.

に、あらかじめ、 x 軸から皿やグラスを見る横の視点、 z 軸から皿、グラスの上から見る視点、描画時の視点などを設定した。ユーザは任意の視点、あらかじめ登録された視点から三次元モデルを見ることができる。

また画面中の三次元モデルの大きさを変更することで、見えやすい大きさに調節ができる。本実装では、 k_{3D} の値を変更することでこの機能を実現している。

4.2 誤り気づきの調査

実装した誤り顕在化ツールを用いて二つの調査を実施した。まず、本ツールがデッサン画像に含まれる誤りの指摘に貢献するかどうかを調べた。調査では、実際の写実教室で収集したデッサン画像を被験者に見せ、含まれる誤りを指摘し、説明してもらった。被験者は、大学生、大学院生の写実の初心者 18 名である。

被験者に提示したデッサン画像は、2.3 の調査で収集した実際に学習者が描いたデッサン画像について、



図 10 誤りごとの顕在化画面例

Fig. 10 Display-examples of error visualization.

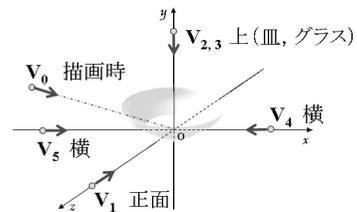


図 11 あらかじめ登録した視点
Fig. 11 Viewpoints presetted.

教師により、あらかじめ (誤り 1)~(誤り 8) を指摘すべき重大な誤りとして含み、かつ、その誤りのみしか含まない画像を 8 枚選定した。

この 8 枚の画像から無作為に選んだ 6 枚を被験者に提示した。3 枚について、デッサン画像のみ提示し、写実の誤りを回答した。残りの 3 枚について、デッサン画像と顕在化ツールを用いて回答した。

被験者の回答が、教師の指摘と一致した場合を正解、一致しない場合を不正解とした。デッサン画像のみと、

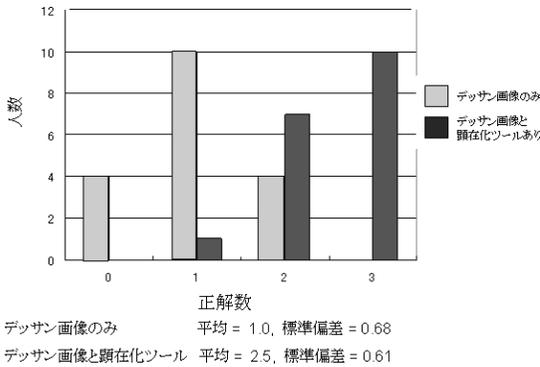


図 12 実験結果

Fig. 12 Result of the investigation.

顕在化ツールを用いた場合の正解数の分布, 及び平均正解数及び標準偏差を図 12 に示す. t 検定の結果, 平均の差は有意であった (両側検定: $t(17) = 2.89, p < .01$).

以上の結果は, 顕在化ツールが学習者によるデッサン画像に含まれる誤り気づきに有用であることを示唆する.

更に, 実装したツールを小学校の図工の一斉授業 (教員 2 名, 2 クラス, 4 年生計 43 名) に導入し利用できるか調査した. 導入期間は 2 クラスともに 2 回 (2 週間) である. 授業は皿とグラスをモチーフとした写実の反復練習を実施する. 描かれたデッサンを撮影し, 顕在化ツールに入力して画面をプロジェクタを通してスクリーンに投影した. 実際の教師の指導にツール画面が利用できることを確認できた. 更に簡便に利用できるものとするには, 学習者の画用紙から画像を取り込む作業の簡易化が挙げられる.

5. む す び

学習者が描いた鉛筆デッサン画像に含まれる写実の誤りをもとに, 誤りを顕在化した三次元モデルをコンピュータ仮想空間に構築する手法を述べた. 実際の写実の反復練習において見られた 8 個の写実の誤りを対象に, 誤りを特徴づけるデッサン画像の 15 個の特徴を用いた三次元モデリングのスケール変換を定義した. また, VRML により三次元モデルを構築する顕在化ツールを実装し, 鉛筆デッサンに含まれる写実の誤りの判断について, ツールを用いた場合と用いない場合を比較し, 用いた方が誤りに気づきやすい傾向を確認した. 鉛筆デッサンだけでは, 写実の誤りに気がつかない学習者が, 本ツールを用いると誤りに気が

つきやすくなると期待できる.

顕在化では, 構築した三次元モデルが描画の視点からみたとき, 学習者の鉛筆デッサン画像と同じように見せる技術が不可欠である. 計測の誤差や画像解析の精度の改良によるもっともらしい顕在化技術の確立は残された重要な課題である. また顕在化ツールの有用性を証明するには, 他の誤り説明との比較が必要である. 更にデッサンを正しく修正するには, 修正の支え [12] を促す手法が必要となる.

謝辞 絵画教育について志磨隆氏, 和歌山市公民館成人学級, 和歌山市立城北小学校, NHK りんくう文化センターの協力を頂いた. 本研究の一部は文部科学省科学研究補助金基盤研究 (B)(2) (課題番号: 163000369) による.

文 献

- [1] R.D. Reyna, How to Draw What You See, Watson-Guptill Publications, 1970.
- [2] H.J. Perkinson, Learning From Our Mistakes: Reinterpretation of Twentieth Century Educational Theory, Greenwood Press, 1984. (邦訳: 誤りから学ぶ教育に向けて, 平野智美, 五十嵐敦子, 中山幸夫, 勁草書房, 2000)
- [3] T. Hirashima, T. Horiguchi, A. Kashihara, and J. Toyoda, "Error-based simulation for error-visualization and its management," International Journal of Artificial Intelligence in Education, vol.9, pp.17-31, 1998.
- [4] 平嶋 宗, 堀口知也, "「誤りからの学習」を指向した誤り可視化の試み," 教育システム情報学会誌, vol.21, no.3, pp.178-186, 2004.
- [5] P.E. Debevec, C.J. Taylor, and J. Malik, "Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach," Proc. 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques SIGGRAPH '96, pp.11-20, 1996.
- [6] N. Matsuda, S. Takagai, M. Soga, T. Hirashima, T. Horiguchi, H. Taki, T. Shima, and F. Yoshimoto, "Tutoring system for pencil drawing discipline," Proc. ICCE 2003, pp.1163-1170, 2003.
- [7] 市野順子, 田野俊一, "デザイン描画を支援するユーザインタフェース," 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.10, pp.1693-1709, Oct. 1999.
- [8] 尾畑貴信, 萩原将文, "感性を反映できるカラーポスター作成支援システム," 情処学論, vol.41, no.3, pp.701-710, 2000.
- [9] B. Gooch and A. Gooch, Non-Photorealistic Rendering, AK Peters Ltd., 2001.
- [10] 川西英彰, 合田隆三, 丸山依子, 曾我真人, "デッサン学習支援システムプロジェクトにおけるアドバイス生成部について," 信学技報, ET2001-118, March 2002.

- [11] 高木佐恵子, 松田憲幸, 曾我真人, 瀧 寛和, 志磨 隆, 吉本富士市, “初心者のための基礎的鉛筆デッサン学習支援システム” 画像電子学会誌, vol.32, no.4, pp.386-396, 2003.
- [12] 堀口知也, 平嶋 宗, “誤りの修正を支援するシミュレーション環境—誤り原因の示唆性を考慮した error-based simulation の制御” 人工知能誌, vol.17, no.4, pp.462-472, 2002.

(平成 19 年 4 月 2 日受付, 8 月 24 日再受付)



松田 憲幸 (正員)

1992 関西大・工学。1997 大阪大学大学院博士後期課程了。同年, 阪大産業科学研究科助手。1998 カナダ・サスカチュワン大客員研究員。2000 和歌山大システム工学部助手。2005 同大准教授, 現在に至る。博士(工学)。学習者モデルに興味をもち, 知的 CAI システムの研究に従事。1999 年度人工知能学会研究奨励賞, 2003 年度人工知能学会研究会優秀賞受賞。人工知能学会, 教育システム情報学会, 日本教育工学, IAIED 学会各会員。



高木佐恵子

1996 お茶の水女子大・理卒。1998 同大学院理学研究科修士課程了。2000 東京工業大学大学院情報理工学研究科博士後期課程了。同年和歌山大学システム工学部助手。2006 同大講師, 現在に至る。博士(工学)。画像生成に関する研究に従事。ACM, 情報処理学会, 画像電子学会, 芸術科学会各会員。



曾我 真人 (正員)

大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程物理学情報工学分野了。博士(工学)。現在, 和歌山大学システム工学部准教授。インターネット, VR, マルチメディア技術を取り入れた学習支援環境やヒューマンインタフェース等の研究に従事し, これまでに, リモート望遠鏡システムの開発, 惑星系シミュレータ, 天体情報提示システムなどを開発してきた。現在は, デッサン学習リアルタイム診断助言システムの研究開発を通じて, スキル学習支援全般に興味をもっている。情報処理学会, 人工知能学会, 教育システム情報学会各会員。



堀口 知也 (正員)

1987 早大・理工・電気卒。1989 同大学院修士課程了。1997 大阪大学大学院博士課程了。同年, 神戸商船大学講師。2001 同助教授。2003 神戸大学海事科学部助教授。工学。知識工学の教育応用に興味をもち, 知的学習支援, 情報可視化システムの研究に従事。1996 年度人工知能学会研究奨励賞, 2002 年度人工知能学会研究会優秀賞受賞。情報処理学会, 教育システム情報学会, 日本認知科学会, 日本教育心理学会, IAIED 各会員。



平嶋 宗 (正員)

1986 阪大・工学, 1991 同大学院博士課程了, 同年大阪大学産業科学研究科助手, 1996 同講師。1997 九州工業大学情報工学部助教授, 2004 より広島大学大学院工学研究科教授。人間を系に含んだ計算機システムの高度化に興味をもち, 特に知的学習支援システムの研究に従事している。工学。人工知能学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会, 日本教育工学学会, 日本教育心理学会, IAIED, ICCE 各会員。



瀧 寛和 (正員)

1978 阪大・基礎工卒, 1980 同大学院基礎工学研究科博士前期課程了。同年三菱電機入社(財)新世代コンピュータ技術開発機構を経て, 1998 より, 和歌山大学システム工学部教授。工学。知識システム, エキスパートシステム, ユビキタスコンピューティング技術などの研究に従事。情報処理学会, 電気学会, 人工知能学会, IEEE 各会員。



吉本富士市 (正員)

1966 岡山大・工・電気卒。明石工業高等専門学校, 和歌山大学教育学部を経て, 現職は和歌山大学システム工学部教授。工学(京都大学)。コンピュータグラフィックス, 画像処理, 数値計算などの研究に従事。スプライン関数とその応用(教育出版)などの共著書。情報処理学会, 芸術科学会各会員。