

多様な変身立体のための設計支援システム

仲口 健[†] 松田 浩一[†]

変身立体とは、鏡越しに見ると違う形に見える立体である。この立体は、二つの視点から見たときに別の形に見えるように設計されている。本稿では、ユーザがイメージする変身立体を、イメージした位置から見えるように設置できる設計支援システムを提案する。提案システムの特徴は、3次元モデルが生成でき、二つの視点を自由な位置と高さで設定でき、手描きで自由に形を指定できるところにある。本システムでは、(1)二つの視点と立体の位置の入力、(2)二つの形状を手描き入力、(3)二つの形状を用いた柱体の生成、(4)柱体の位置・大きさの調整、(5)二つの柱体の積集合を求める、という五つの手順で変身立体の設計を行う。

1. はじめに

M.C. Escher による立体を用いただまし絵は、脳内では立体としてイメージすることが可能であるにも関わらず、その立体には構造に矛盾が含まれている。このだまし絵は不可能図形と呼ばれ、人間の視覚が解釈した通りには実現が不可能な図形である。

不可能図形に対しては、数学的なアプローチによる解析が行われている。Huffman により線画に対するラベリングによる解析がされた 1)。また、杉原は、線画から3次元復元が可能かを判定し、実現可能であれば立体を生成する手法を提案している 2)。この3次元化された立体を不可能立体とよぶ。不可能立体は、ある特定の視点（以下、錯視視点）から見た断面を不可能図形として知覚することができる。

不可能図形を扱った研究は、CGを用いることにより、その幅を広げており、レンダリング技法や対話的な作品作成が取り込まれるようになった。従来研究には、大きく二つの観点がある。(1)成果物の次元、(2)錯視視点の扱い、である。

(1)成果物の次元、とは、作品のゴールを絵(2D)とするか立体(3D)とするかを指す。前者は、不可能図形としての絵をゴールであり、3次元立体としての成立を条件としない、後者は、不可能図形としての断面を持ちながら、3次元モデルとしても成立する。作成した3次元モデルは、3Dプリンタで実物として出力することができる。

2Dをゴールとする研究では、3次元モデルのデータを持ちつつレンダリングの工夫により不可能図形を表現する。篠原らはレイトレーシングを用いて不可能図形を写実的に表現することが可能なシステムを構築した 3)4)。篠原らのシステムでは、ユーザがプリセットで用意された基本部品を配置し、対話的に面の前後関係を入れ替えて不可能図形の作品を作成することができる。大和田は、対話的に辺の接続関係を変更し不可能図形を作成できるシステムを提案した 5)。Turuno は、テキストの工夫により不可能な物

理的な挙動を表現した 6)。

3Dをゴールとする研究では、錯視視点から見える断面が不可能図形に見えるよう3次元モデルのデータを作成する。杉原は、計算によって求めた不可能立体をさまざま考案している 1)。杜らは、四角柱の自由な配置による不可能立体作成システムを提案している 7)。杜らのシステムでは、マウスのクリックとホイール操作のみによる対話型操作により、ユーザが少数のアクションのみで不可能立体を作成することを可能とした。

(2)錯視視点の扱い、については、不可能立体の視点変化に対する頑強性、視点の数といった観点がある。中津らは、トラス状不可能立体を対象とし、立体を中心とした錯視視点の回転に対して自然な変化となるような3次元モデルの自動生成法を提案している 8)。

杉原は、一つの立体に対して錯視視点を二つ設定する手法を提案している 9)。錯視視点が二つあることで、鏡越しに見ると違う形が現れる。この立体を変身立体とよぶ。断面を二つ入力すると、入力した二つの断面を用いた変身立体の成立を判定し、条件を満たした場合に立体を得ることができる。筆者らは、変身立体の二つの断面をユーザが手描きで入力できるシステムを提案した 10)。入力できる形に制約はあるものの、ユーザに形の自由度を与えている。

本稿では、ユーザがイメージする変身立体を、イメージした位置から見えるように設置できる設計支援システムを提案する。提案システムでは、以下の(1)~(3)の要件を満たすことを要件とし、錯視視点、立体の配置、形状を自由に決めることができる。

- (1) 3次元モデルを生成すること
レンダリングによる不可能図形ではなく、不可能立体の実物としての利用を志向する。
- (2) 二つの視点が自由に設定できること
従来研究では、あらかじめ決められた視点であることが多い。ユーザが、空間内において錯視視点と立体位置を自由に決められるようにしたい。
- (3) 複雑な断面形状を扱えること

[†] 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

文献 10 における形状の制約を無くし、ユーザが自由に形を決められること。

2. 変身立体の 3 次元モデル作成

2.1 錯視視点と変身立体の配置

本システムでは、変身立体の中心を原点 o に置き、二組の錯視視点 E_α , E_β を任意の位置に設定できる (図 1)．先行研究 10) では、錯視視点 E_α , E_β 、変身立体の中心 o は一直線上に並んでいる必要があった．本システムでは、そのような制約は無く、変身立体 o 、錯視視点 E_α , E_β の組み合わせのように、位置・高さを自由に設定することができる．

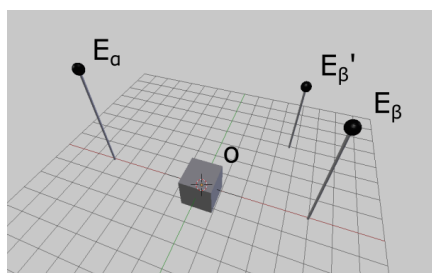


図 1 錯視視点と変身立体の位置関係

2.2 変身立体の作成プロセス

変身立体を作成するためには、二組の錯視視点と錯視視点から見える断面となる形状が必要である．図 2 に、二組の錯視視点 E_α , E_β と原点 o 、錯視視点 E_α , E_β に対応する投影面 P_α , P_β を示す．また、図 3 に、二組の入力形状 A , B を示す．

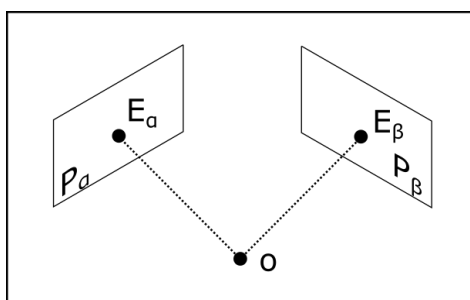


図 2 視点 E_α , E_β と変身立体 o の位置関係



図 3 入力した形状 A , B

以下に、変身立体の作成手順を述べる．

- (1) 前処理 (3.3 節) を施した形状 A , B を底面として柱

体 A' , B' を作成する (図 4)．このとき、柱体は直柱体とし高さは任意の高さを持つものとする．

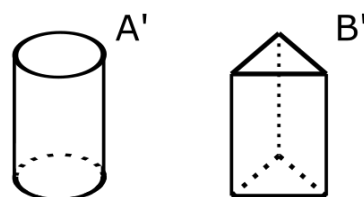


図 4 柱体 A' , B'

- (2) 原点 o に柱体 A' , B' の中心が重なるように配置しそれぞれの底面が錯視視点 E_α , E_β を向くように回転する (図 5)．このとき、錯視視点 E_α , E_β から見える柱体の底面は形状 A , B と同一になるとする．

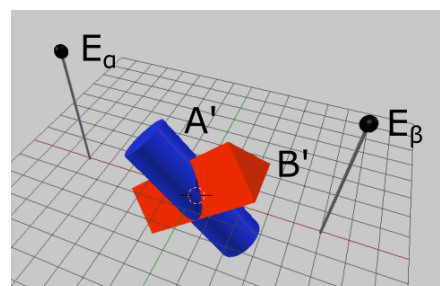


図 5 柱体 A' , B' と視点 E_α , E_β

- (3) (2) で配置した柱体 A' , B' の積集合が変身立体 M となる (図 6)．変身立体 M は視点 E_α , E_β から見たとき形状 A , B を持つ (図 7)．

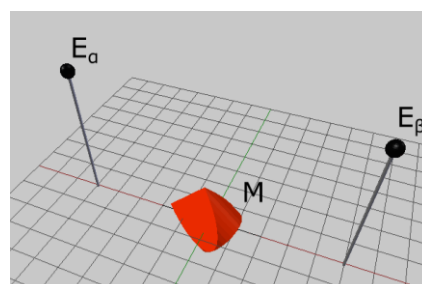


図 6 柱体 A' , B' の積集合

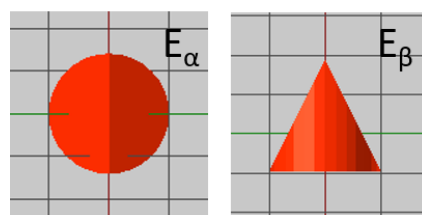


図 7 視点 E_α , E_β から見た変身立体 M

2.3 成立条件

入力した形状を崩さずに変身立体を成立させるために必要な条件を以下に示す.

- (I) 面 P_α において (図 8)
柱体 A' は柱体 B' の底面 H, H' の間に存在し, 柱体 B' の側面 W, W' に接している.
- (II) 面 P_β において (図 9)
柱体 B' は柱体 A' の底面 J, J' の間に存在する.

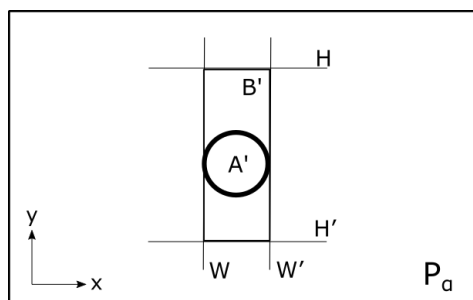


図 8 面 P_α への投影図

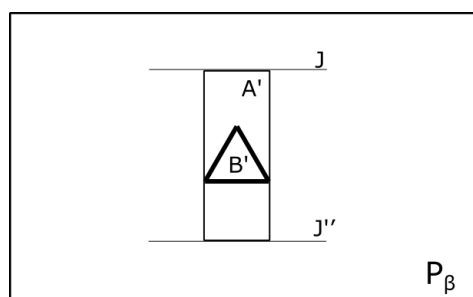


図 9 面 P_β への投影図

3. システムの実装

3.1 設計の流れ

図 10 に提案システムにおける設計手順を示す. 本システムでは, (1)二つの錯視視点および変身立体の位置を入力, (2)手書きにより形状を入力, (3)変身立体の断面を提示し, その可否をユーザに尋ねる. このとき No を選択すれば, ユーザは形状を入力し直すことができる. (4)角度や大きさの調整, (5)プレビューによる結果確認.

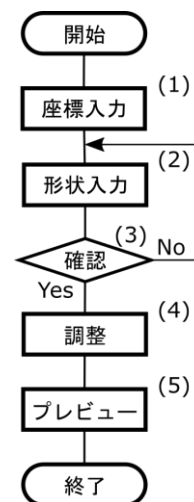


図 10 提案システムの設計手順

3.2 座標入力

変身立体作成に必要な座標の指定を行う. 本システムでは, ユーザが用意したフィールドに, 変身立体の中心 M , 視点 E_α , 視点 E_β の順にマウスによるクリックで入力する. 図 11 では, フィールド上に座標を入力した例を示す.

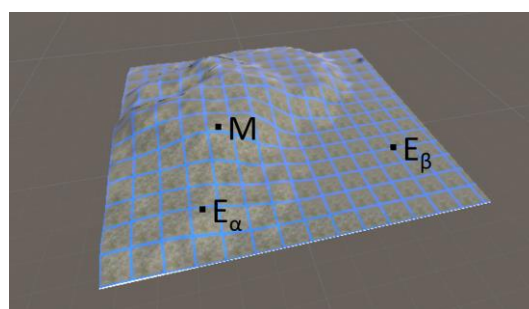


図 11 視点の入力画面

3.3 形状の手書き入力

変身立体作成に必要な二組の形状を, ユーザは画面上の白いキャンパスに一筆書きで入力する (図 12). なお, 入力した線が交差している場合, 形状が破綻する可能性がある.

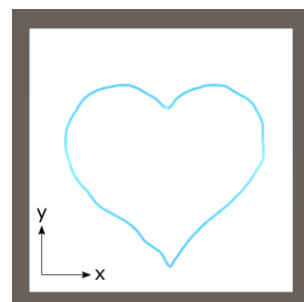


図 12 形状入力の例

入力された形状から柱体を作成する前に, 以下の前処理を施す.

(1) 形状の標準化

入力された形状の中心 C を式(1)にて求め、中心を原点に平行移動する。また、入力された形状 P の x 軸方向の幅が任意の値になるようにすべての頂点 P_i に対し式(2)にてスケール変換する。

$$C = ((W_{min} + W_{max})/2, (H_{min} + H_{max})/2) \quad (1)$$

$$P_i' = \begin{pmatrix} w/(W_{max} - W_{min}) & 0 \\ 0 & w/(W_{max} - W_{min}) \end{pmatrix} P_i \quad (2)$$

ここで、 W_{min} は入力形状の x 座標最小値、 W_{max} は入力形状の x 座標最大値、 H_{min} は入力形状の y 座標最小値、 H_{max} は入力形状の y 座標最大値を示す。また、 $W = 100$ とする。

(2) 平滑化处理

手書き入力により発生した手振れによる歪みを式(3)で補正する。

$$P_i = \frac{1}{3}(P_{i-1} + P_i + P_{i+1}) \quad (3)$$

ここで、 P_i は i 番目の頂点とする。

(3) 頂点数の調整

頂点の密度を均一化するため、(3)を施した形状から式(4)を満たす頂点を削除する。

$$|L_{i-1} - L_i| < S \quad (4)$$

ここで、 L_i は i 番目の頂点とする。本稿では、 $S = 2.0$ とし、式(4)に該当する L_i を削除する。

3.4 柱体の作成

2.2 節(1)に示す柱体の作成を行う。図 13 に柱体作成の例を示す。3.3 節(1)で求めた C から y 軸と平行に h, h' をスワイプして柱体を作成する。ここで h, h' は同一とし、柱体の中心を C とする。

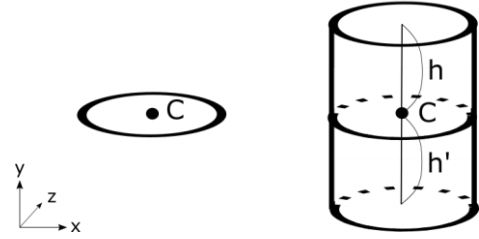


図 13 柱体の作成

3.5 柱体の調整

2.2 節(2)で配置した柱体の位置をユーザが調整する。2.2 節(2)で示す中心は、3.4 節に示す中心 C とする。2.3 節に示した成立条件を満たすように、視点 E_β から見た柱体 B' の位置、向き、大きさを変更する。図 14 に示す調整画面左上のスライダーを用いて各パラメータを設定する。設定項目は(I)左右移動、(II)上下移動、(III)スケール変換、(IV)回転、(V)奥行方向移動の五つである。

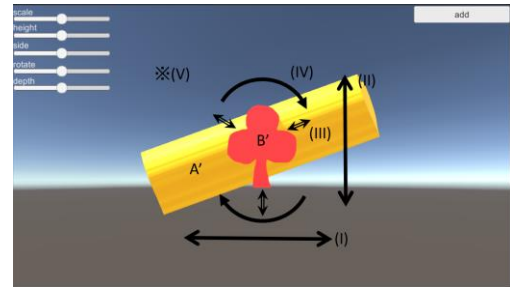


図 14 柱体 B' の調整

図 15 に面 P_β における調整結果を示す。 W, W' は視点 E_β から見た柱体 A' の側面を示しており、柱体 B' の側面と重なっていることがわかる。

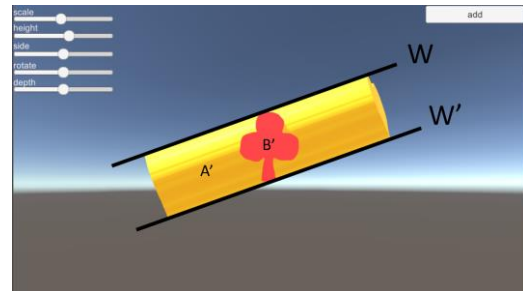


図 15 面 P_β における調整結果

図 16 に面 P_α における調整結果を示す。 J, J' は視点 E_α から見た柱体 B' の底面を示している。変身立体の成立条件(II)にあるように、柱体 A' は柱体 B' の底面 J, J' の間にあることが分かる。

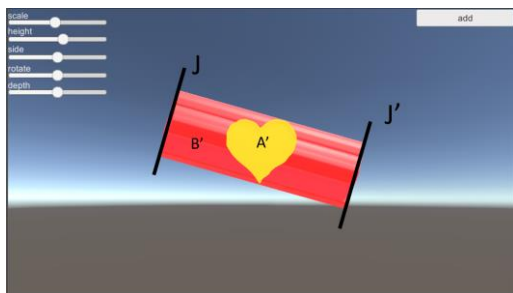


図 16 面 P_α における調整結果

3.6 プレビュー

プレビューでは、指定した二組の錯視視点 E_α , E_β 間を移動しながら変身立体を鑑賞できる. 図 17 に視点 E_α から見た変身立体 M , 図 18 に視点の遷移途中, 図 19 に視点 E_β から見た変身立体 M とその位置関係を示す.

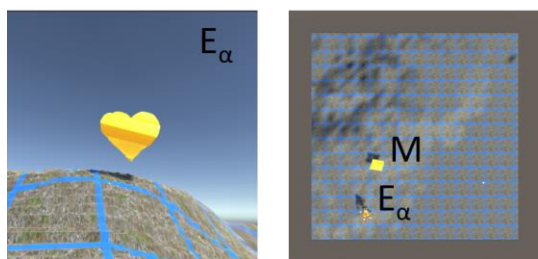


図 17 視点 E_α と変身立体 M

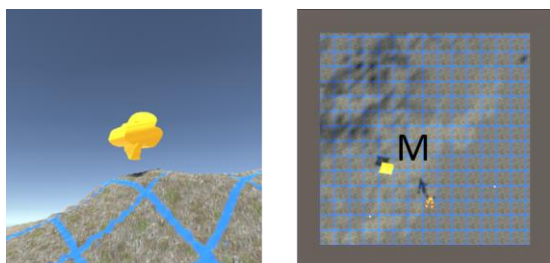


図 18 視点の遷移途中

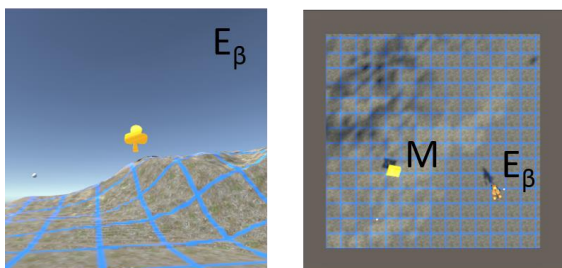


図 19 視点 E_β と変身立体 M

4. 結果

4.1 実装環境

開発環境はゲームエンジン Unity を使用した. フィールド作成には, Terrain ツール, 柱体の調整インタフェースは

Canvas ツールを用いた. 変身立体作成における柱体の作成と集合演算については, Unity に統合されている ProBuilder ツールを用いた.

4.2 入力する形状とアウトプット

先行研究 10)では, 入力形状に対して変身立体が成立しない場合, 成立条件を満たす形状に自動修正する. 自動修正された場合の例を図 20 に示す.

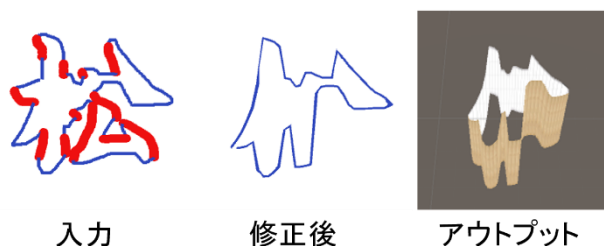


図 20 形状の自動修正

本システムの変身立体作成手法では, 図 20 と同様な形状を入力した場合, 図 21 のようになり, より複雑な形状に対応できていることが分かる.

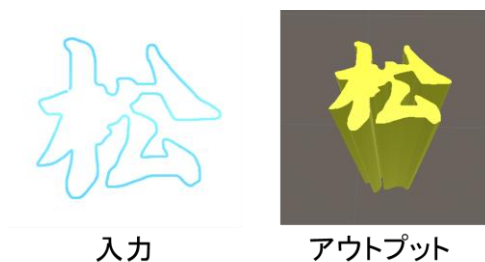


図 21 複雑な形状の入力

4.3 設計例

図 22 に地形にすべり台を加えた例を示す. 滑り台の上の視点を E_α , 下の視点を E_β , その間を γ とし, 変身立体 M を設置した. 図 22 -図 25 に視点 E_α , E_β , γ から見た変身立体 M を示す.

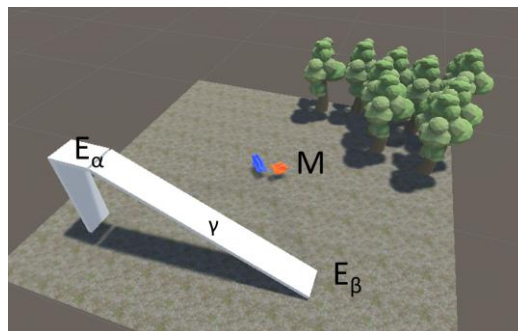


図 22 設計の例

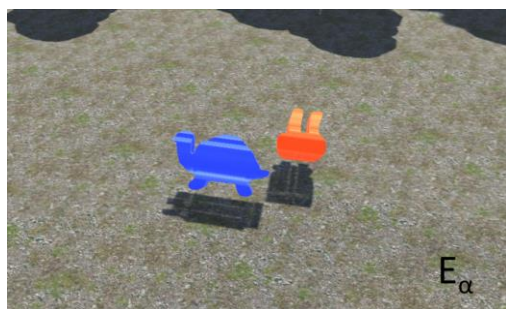


図 23 視点 E_α から見た変身立体

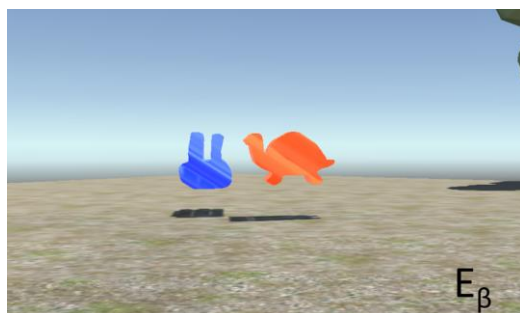


図 24 視点 E_β から見た変身立体

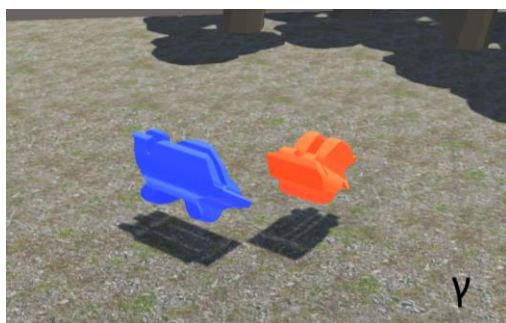


図 25 視点 γ から見た変身立体

4.4 考察

提案システムの特徴として、入力した形状が変身立体として作成される際、形状のスケールが変更される (3.3 節 (1)). また、入力する視点と形状によっては顕著にスケールが変更される. 3.4 節の調整の際、柱体 B' を回転させることによってある程度大きさの調整ができるが、ユーザが入力した形状に対して向きが変わるため、その判断はユーザに託される.

本システムでは自由に変身立体の鑑賞視点を設計できるが、二組の視点の位置関係によって変身立体が成立しない場合がある (図 26). 図 26 では、視点 E_α , E_β の位置が近く、柱体 B' の底面が柱体 A' の側面にめり込んでいる. この場合、変身立体の成立条件(II)を満たさないため、変身立体が成立しない.

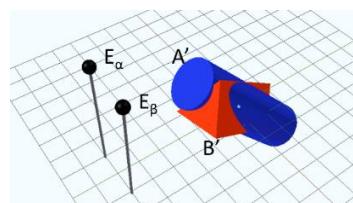


図 26 変身立体が成立しない例

5. おわりに

本稿では、ユーザがイメージする変身立体を、イメージした位置から見えるように設置できる設計支援システムを提案した. ユーザは、(1)二つの視点と立体の位置の入力、(2)二つの形状を手描き入力、(3)二つの形状を用いた柱体の生成、(4)柱体の位置・大きさの調整、(5)二つの柱体の積集合を求める、という五つの手順で変身立体の設計を行うことができる. 提案システムにより、3次元モデルの生成、二つの視点の自由な設定、手描きによる自由な形状の入力、を実現した.

参考文献

- 1) D. A. Huffman: Impossible objects as nonsense sentences, Machine Intelligence, Vol. 6, pp. 295-323(1971).
- 2) 杉原厚吉: へんな立体, 誠文堂新光(2007).
- 3) 篠原祐樹, 宮下芳明: 不可能立体のレイトレーシング, インタラクシオン2009論文集(2009).
- 4) 篠原祐樹, 宮下芳明: 不可能立体の写実的表現手法の提案, 情処研報2009-HCI-132, Vol.2009, No.19, pp.95-102(2009). 図 22
- 5) 大和田茂, 藤木淳: アート表現としてのインタラクティブ不可能物体立体視, 映像情報メディア学会技術報告 32(14), 43-46(2008).
- 6) S. TSURUNO: Natural Expression of Physical Models of Impossible Figures and Motions, International Journal of Asia Digital Art & Design, pp. 88-95(2015)
- 7) 杜紹春, 松田浩一: 非直角のトリックを用いた不可能立体の3次元モデル作成システム, 電子情報通信学会 HCGシンポジウム, IV-2-5(2012).
- 8) 中津加奈, 森谷友昭, 高橋時一郎: 錯視立体を用いたトーラス状不可能図形のアニメーション手法, 画像電子学会論文誌, Vol. 45, No. 3(2016).
- 9) K. SUGIHARA: Ambiguous Cylinders: a New Class of Impossible Objects, Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, Vol. 25, No. 4(2015).
- 10) 仲口健, 松田浩一: 複数立体により構成する変身立体の作成システム, 情報処理学会, エンターテインメントコンピューティング2018, pp. 86-90(2018).