

複数立体により構成する変身立体の作成システム

仲口健[†] 松田浩一[†]

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。このだまし絵を実在する立体として設計した不可能立体が提案されており、その第三代として鏡越しに見ると違う形が現れる変身立体の設計手法が提案されている。変身立体の生成には二つの断面と断面に対応した視点が必要である。一方の視点から立体を見たとき、それら二つの断面のうちのいずれかが見え、他方の視点から見たときには、別の断面が見える。しかし、変身立体は、断面の形状により立体が成立しない場合があり、断面を入力し直す必要がある。そのとき、どのように断面を変えればよいか分からず、特に、複数の立体により変身立体を構成しようとする作品を作ることが困難となる。本研究では、変身立体成立に必要な入力断面の制約条件を明らかにし、入力断面の不具合を自動修正することを可能とする。立体作成におけるプロセスを簡略化することで、提案システムでは、複数立体により構成する変身立体であっても容易に対話的に作成、鑑賞が可能である。

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。このだまし絵を実在する立体として設計した不可能立体が作品として公開されている 1)。

3D CG を用いた不可能立体の表現技法や作成手法についての研究が行われるようになった。篠原らはレイトレーシングを用いて不可能立体を写実的に表現することが可能なシステムを構築し、ユーザが簡単かつ効率的に不可能立体の表現が行うことを可能とした 2) 3)。杜らはマウスによる対話型インタフェースを基本とした不可能立体作成システムを提案し、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 4)。2)~4) では、基本的な立体形状を用意し、それらをユーザが用意された機能を用いて操作する。このとき、操作をしても立体として破綻しないような工夫がされている。これらは、立体としての成立条件を考慮せず一般ユーザでも作品を作ることが可能となるような試みである。

杉原は、不可能立体の第三代として鏡越しに見ると違う形が現れる変身立体の作成手法を提案した 5)。杉原の手法では、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。その一方で、入力した断面により成立しない場合は、断面を新たに入力する必要がある。

筆者らは、第三代不可能立体作成における、筒状の変身立体に特化したアルゴリズムを提案した 6)。提案アルゴリズムでは、ユーザの手描きによる二つの断面を用いて変身立体を作成することができる。また、入力された断面から、必ず立体を生成することが可能である。しかし、入力断面の形状によっては、変身立体として成立させるために入力断面に対して意図しない変形が行われる場合があった。

さらに、提案システムを拡張し、立体を複数組み合わせることで作品を作ろうとしたとき、意図しない変形がされないように留意しながらいくつも描くことは大変な労力であった。

本研究では、従来のアルゴリズム 6) で発生していた、入力断面に対して意図しない変形が発生する原因を特定し、その解決を行う。さらに、意図する変身立体が生成される条件下において編集可能な機能の他、AR による鑑賞機能、3D モデルファイルへの出力機能を組み込むことで、変身立体作成一連の作業を支援するシステムを提案する。

2. 入力断面形状の制約

6) のシステムでは、入力された断面形状に対応した立体の自動生成を可能とした。しかし、入力する断面形状によっては意図しない位置に頂点が移動した状態の変身立体が生成される場合がある。本節では、意図しない変形が行われる原因を明らかにし、解決へのアプローチ方法を述べる。

2.1 制約の理論

6) のシステムでは、入力された二つの断面に対して頂点の対応関係を規定し、変身立体の生成を行う。そのため二つの断面形状に対して同一の分割数でサンプリング処理を行う。

- (1) 二つの断面形状の左端と右端を求める。
- (2) 左端を始点とし、右端を折返し地点として時計回りに断面形状をサンプリングする。このとき、X 軸方向に等間隔に区切り、区切りに最も近い点を採用する。サンプリングされた頂点は番号を用いて対応関係が規定される。

サンプリング処理を施した二つの断面形状 A 、 B を用いて変身立体の生成を行う。断面形状 A 、 B の投影面を面 α 、 β としたとき、投影面と変身立体の位置関係を図 1 に示す。二つの投影面は同一平面上に互いに直交する位置に配置す

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

るため、変身立体の頂点 P を共有する断面形状 A、B の頂点の位置関係は点対象となる。

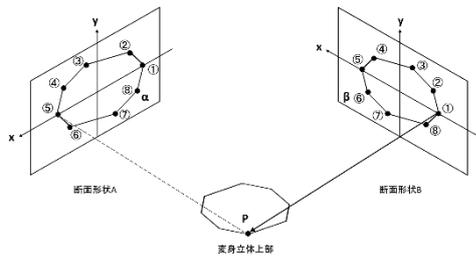


図1 投影面 α β と変身立体の頂点 P の位置関係

図2に断面形状 A、B が入力され、サンプリング処理が行われた例を示す。本処理では X 軸方向に等間隔に区切り、区切りに最も近い点の探索を行う。サンプリングにより得られる点の数は同一であり、一意に対応関係が決まる。このサンプリング点の対応関係を基に変身立体が生成される。

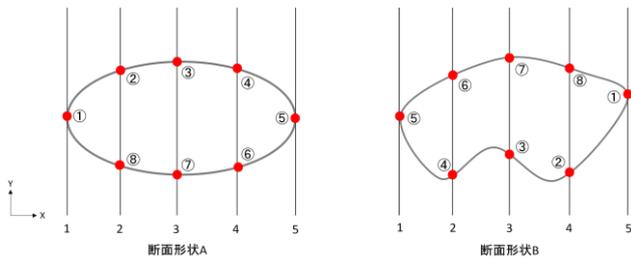


図2 断面形状 A、B の対応関係

図3に意図しない変形が行われた例を示す。その原因は、入力された断面形状の X 軸方向の凹みである。

サンプリング処理は始点から折り返し、折り返しから終点と分けて行う。図3のサンプリング前には、折り返しから終点にかけての X 軸方向の凹みがある。凹み箇所におけるサンプリング前の頂点を X で示す。サンプリングを行う際、等間隔に区切り、区切りに最も近い点の探索を行う。サンプリング前の、折り返し⑤から終点①の間において区切り4に最も近い点が⑥となる。その結果、サンプリング後のような形状になり、入力した断面形状と異なった輪郭となる。その結果、意図しない変形が行われた変身立体が生成される。

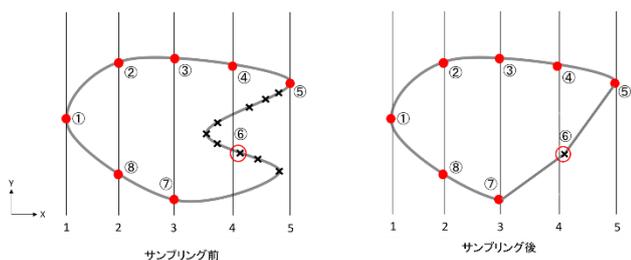


図3 サンプリングの前後

2.2 アプローチ方法

本稿では、意図しない変形が行われた変身立体が生成される問題点の解決策として以下のアプローチをとる。

(I) 凹みの検知、ユーザへの提示

入力された断面に対し凹みの有無の検知を行う。また、検知した場合に(II)の凹みの自動修正の可否をユーザに尋ねる。

(II) 凹みの自動修正機能

凹みの自動修正をユーザが選択肢した場合に、凹んでいる箇所を削除する処理を行う。

(III) 変身立体成立条件下での編集機能

(II)による自動修正結果の調整を行いたい場合、頂点移動による編集を行う。本機能における頂点移動は、意図する変身立体が生成される範囲内に制限する。

2.3 システムの全体像

図4に提案システムの処理手順を示す。6)のシステムでは、断面入力・断面前処理・AR表示の機能のみであった。提案システムでは、断面入力後に、凹みを検知し、凹みの自動修正の可否をユーザに尋ねる。ユーザから入力された断面形状の凹みの検知、自動修正、編集が可能である。それぞれ2.2節の(I)、(II)、(III)と対応する。

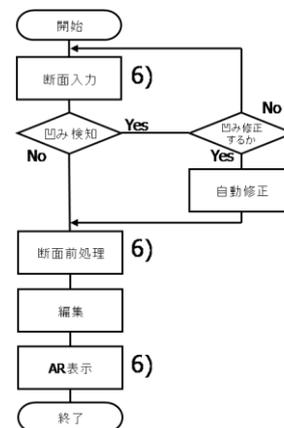


図4 提案システムの処理手順

3. 実装方法

本節では、断面形状の凹みの検知、自動修正、編集機能の実装方法について述べる。

3.1 凹み検知

(1) 描き順を右回りに統一

前提条件として、描き順は右回りにしている。そのため、

入力された断面形状が左右どちらの向きで入力されたのかを符号付面積（式(1)）によって検知し、左回りの場合にはデータを並び替える。ここで、式(1)において $S > 0$ のとき左回りの場合となるため頂点を入れ替える。

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times D_j \quad (1)$$

ここで、 \times は外積、 D_i は n 個の頂点を持つ断面の i 番目の頂点座標、 $j = (i+1) \% n$ とする。

(2) 凹み位置の特定

以下では、折り返し地点から終点における凹みの判定方法について述べる。

折り返し地点から終点においては、点の x 座標は単調減少するはずであるが、 x 座標が増加している場所があれば、凹みが存在している（図 6(c)と(b)の間）。

3.2 凹み修正

図 5(a)から図 5(b)の方向に、図 5(c)よりも大きい x 座標を探索し、図 5(b)までの点の x 座標を全ての図 5(c)の x 座標と同一にする。図 5 右図は、処理を施して凹みが無くなった結果を示している。

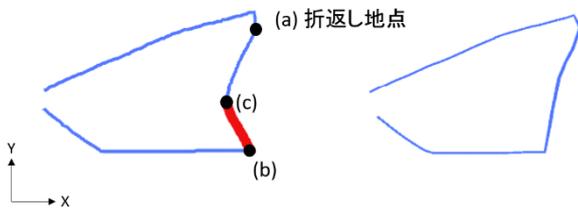


図 5 自動修正の前後

3.3 編集

ユーザは生成した変身立体を対話的に編集することができる。図 6 に編集画面を示す。編集画面では左側に入力した二つの断面形状が表示され、右側に生成される変身立体がリアルタイムに表示される。表示される変身立体は 180 度回転させて確認することが可能であり、鑑賞する二つの視点から変身立体を確認することができる。

頂点の移動機能では、意図する変身立体が生成される条件下において頂点の移動を行うことができる。移動したい任意の頂点上にマウスポインタを置くと図 6 左上のように補助線が表示される。頂点はこの補助線上でのみ、ドラッグすることによって移動することができる。頂点の移動が終了し、ドロップすると同時に表示されている変身立体が更新される。

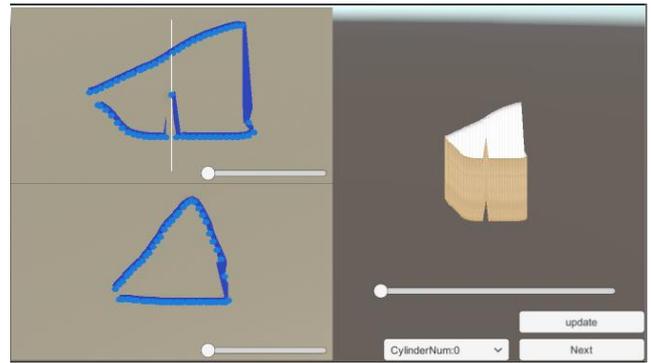


図 6 編集画面

4. 実行結果

4.1 入力する断面形状とアウトプット

図 7 に断面形状の自動修正の有無による比較結果を示す。図 7 左上が入力した断面形状であるのに対し、図 7 左下が自動修正を行わない場合の出力結果である。また、図 7 右側は自動修正した断面形状とその出力結果である。図 7 左側に示される自動修正を行わない場合は、入力断面形状に対し意図しない変形が行われた立体が生成されている。自動修正を行った場合は、図 7 右側に示すとおり、意図した立体が生成されていることが分かる。

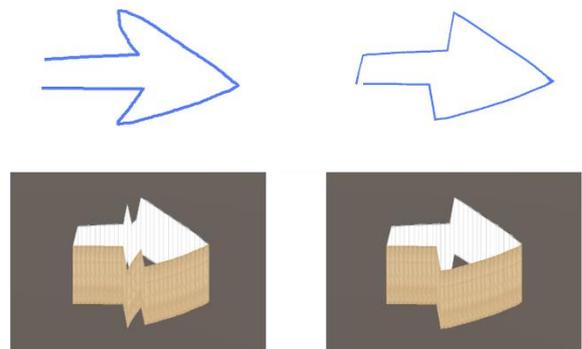


図 7 自動修正との比較

提案システムでは、複数立体により構成する変身立体を作成、鑑賞することが可能である。図 8 に入力した断面形状を示す。ここでは、外向きの矢印と内向きの矢印の断面形状を複数入力した。

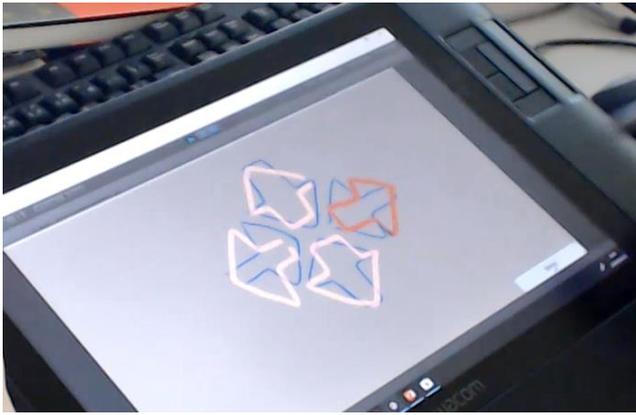


図 8 入力した断面形状

変身立体を鑑賞する二つの視点を視点 1, 2 とする。図 9 と図 10 に視点 1, 2 から見た立体を示す。図 9 は外側を向く矢印, 図 10 は内側を向く矢印が見える。同一の立体を見ているのにも関わらず、違う断面形状の立体に見えることから変身立体であることが分かる。図 11 に視点 1, 2 とは違う視点から見た立体を示す。視点 1, 2 以外の視点から見た場合、また違う断面形状が見えることが分かる。

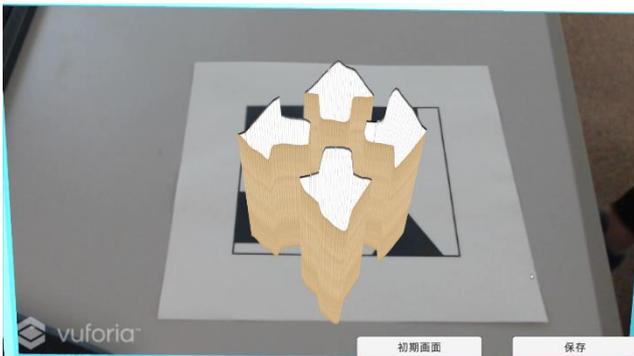


図 9 視点 1 における立体

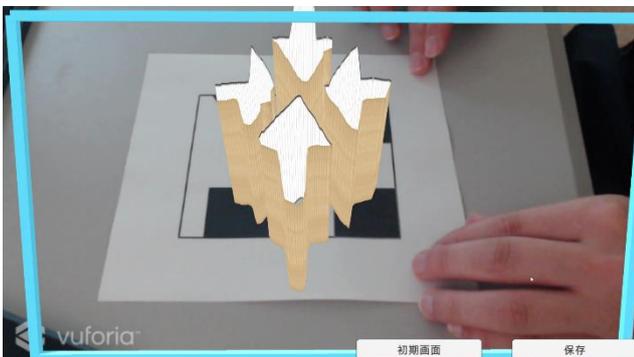


図 10 視点 2 における立体



図 11 別視点における立体

4.2 3D プリンタによる立体化

作成した変身立体を物理的に造形するために、3D プリンタを用いた。図 12 左側の断面形状は作成した変身立体の側面の一部であるが、上下の凹凸があることがわかる。3D プリンタで出力する都合上、立体下部の上下の凹凸は不要であるため、図 12 右側に示すように立体下部を最下部に高さを合わせた。

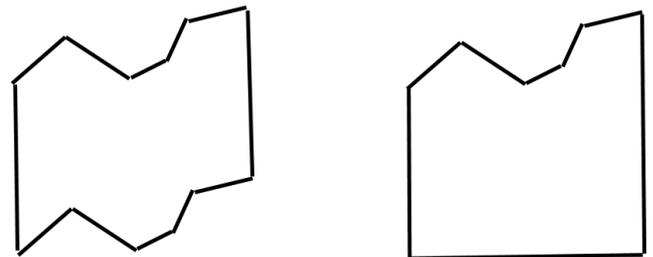


図 12 筒下部の補正

提案システムで作成した 3D モデルには厚みが無い。本稿では、モデリングソフト Blender で厚みをつける処理を行い、3D プリンタで出力した。

図 13 に視点 1 から見た立体, 図 14 に視点 2 から見た立体を示す。AR を用いた鑑賞方法と同様な断面形状の物体が存在していることがわかる。図 15 に鏡越しで見た立体を示す。鏡越しで見ることにより同時に二つの視点から立体を見ることができる。手前の立体と鏡に映った立体が違う断面形状をしていることから、変身立体として成立していることが分かる。

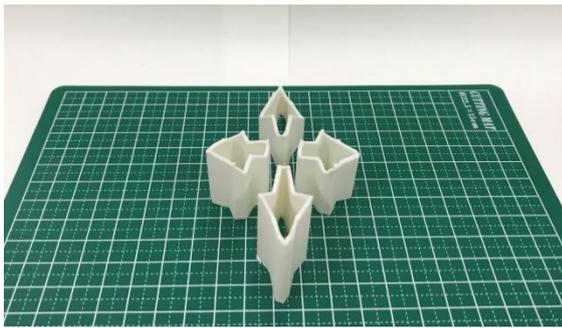


図 13 視点 α における立体

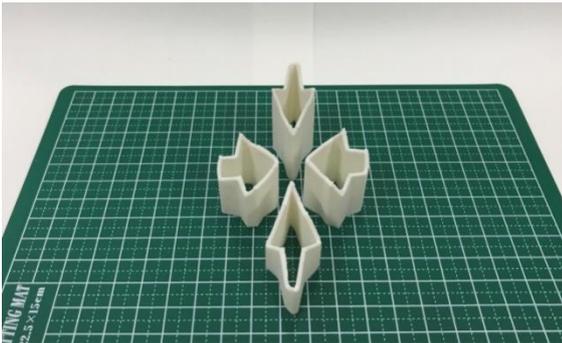


図 14 視点 β における立体

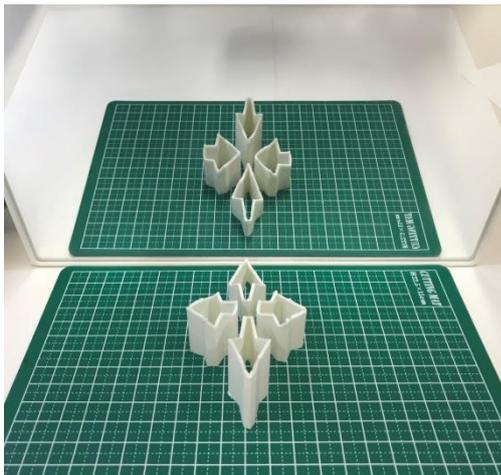


図 15 鏡を通して見た立体

参考文献

- 1) 杉原厚吉:へんな立体, 誠文堂新光(2007).
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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).
- 5) K. SUGIHARA, "Ambiguous Cylinders: a New Class of Impossible Objects," Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, Vol. 25, No. 4, 2015.
- 6) 仲口健, 松田浩一:立体成立を保証した不可能立体作成システムの試作, 情報処理学会, 5ZC-03(2018).

5. おわりに

本稿では, 複数立体により構成する変身立体の作成システムを提案した. 提案システムでは, 入力断面に対して意図しない変形が行われる問題点を, 断面形状を自動修正するアルゴリズムを用いることにより解決した. また, 意図する変身立体が生成される条件下においての編集機能を用いることによって, 自動修正した断面形状をユーザが修正することを可能とした. これらにより変身立体の作成プロセスを簡略化したことで, 複数立体により構成する変身立体を容易に作成することを可能とした.