

切開辺を含み一方向に折りたたみ可能な立体形状の設計(続報)

加瀬 悠人 Yuto KASE

金森 由博 Yoshihiro KANAMORI

三谷 純 Jun MITANI

概要:本稿は、日本図学会 2014年度秋季大会にて発表した「切開辺を含み一方向に折りたたみ可能な立体形状の設計」によって作成された平坦に折りたたみが可能な多面体モデルについて、折りたたみ過程を確認するための3Dアニメーションを生成した。これは、フォワードキネマティクスとインバースキネマティクスを組み合わせることによって実現される。また、パネルに厚みを加えた際の2つの軸を持ったヒンジモデルと複数の折りたたみ部品を組み合わせたモデルの生成手法について提案する。これらのモデルについて紙と厚みのある素材で試作し、提案手法の妥当性の評価を行った。

キーワード:CG/多面体/折りたたみ/設計

1. はじめに

立体を折りたたむことは、使用しない時に小さい収納スペースに格納し、必要に応じて大きく広げることを実現するために必要な技術である。しかし、折りたたみ可能な立体を試行錯誤で設計するのは容易でない。そこで、既存研究において上下方向に折りたたみと展開が可能な多面体モデルを設計する手法の提案を行った^[5]。本稿では、この研究について新しく提案した手法や改善した手法について述べる。既存研究^[5]では、対象となる多面体モデルは図1に示すように、天頂面と底面が水平であり、側面は水平な辺と垂直面上に位置する辺から構成される。水平な辺はヒンジ構造を持ち開閉角度を変化させることができる。展開(3D形状)時には完全に閉じた状態となり、折りたたみ時および折りたたみ過程の状態では垂直面上の辺が分離する。折りの構造は水平な辺に割り当てられるヒンジ構造のみであるため、折りたたみ可能な立体を制作する問題は、断面から見た2次元平面上での折れ線の折りたたみ問題とみなすことができる。そのため、主に折れ線の折りたたみについての議論が中心となる。設計支援システムでは、多面体モデルの天頂面と底面および断面を構成する折れ線を入力とし、折りたたみ条件^[5]を満たす立体を自動生成する。本研究では、新たに折りたたみ過程のアニメーションの

生成手法を提案する。また既存手法^[5]のモデルに厚みを加えた際に提案した2つの軸を持ったヒンジモデルについての改善を行い、複数の折りたたみ部品を組み合わせることでより複雑な立体形状を生成する手法の提案も行う。

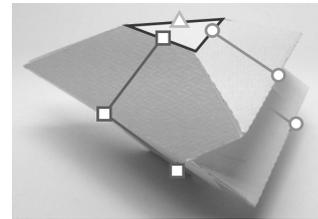


図1 既存研究^[5]で生成される展開時の多面体モデル
(ユーザは天頂面と断面線を入力する。)

2. 関連研究

ものを折りたたむことは、折り紙工学の分野で広く研究がされてきた。例えば、車のエアバッグ^[3]や人工衛星の太陽電池パネル^[8]は通常はコンパクトに折られたまゝ、必要なときに大きく展開する構造が求められる。このような製品に対して折り紙の研究が大きく貢献してきた。

剛体パネルをヒンジにより連結した構造で全体の形状を表現するものを剛体折りと呼び、厚みのあるパネルが歪みなく折り操作を行える形状設計の手法が舘^[6]によって提案された。たとえば、既存の建築物の間を結ぶ折りたたみ可能な仮設空間を作ることが想定されている。この手法は剛体パネルで歪みなく折りたたみできる形を設計できるが、辺の分離を許容していないため、生成可能な形状の自由度が小さい。特に、閉じた立体は切り込みを入れない限り折りたたみできないことがCauchy^[2]によって示されている。本稿で提案する手法は、辺の分離を許容するためより自由度の高い形を扱うことができる。

またヒンジ部分についてローリングジョイントと呼ばれる手法がJeanneauら^[1]によって提案された。この手法はヒンジとなる隣接する2つのパネルの面における形状が円筒形であり、その面に柔軟性のあるバンドを張り巡らす。このバンドを円筒形の面に滑らせることによ

て、パネル同士が接触したままヒンジの角度を変更することができる。本稿で提案する手法は、バンドを用いずパネルと同じ素材で作成するため、バンドの強度や厚さを考慮することなく折りたたみモデルを試作することができる。

3. 提案手法

本稿で提案する手法では、まず立体形状の天頂面を多角形で入力する。次に、側面の形状を形成する断面線を天頂面の面と等しい数だけ入力する。これらの情報を元に、折りたたみが可能となるように形状の修正を行い多面体モデルの生成を行う。生成されたモデルに対して求める折りたたみ方法であるか視覚的に確認するために折りたたみ過程のアニメーションを生成する。最終的に、生成された多面体モデルの3Dデータと各辺の折り曲げ方向に関する情報を出力する。また出力されたモデルに対し厚みを考慮したヒンジ位置の設定や、複数の折りたたみモデルを組み合わせてより複雑な折りたたみ形状の生成を行う。

3.1. 折りたたみ方のアニメーション

生成された折りたたみモデルが求める折りたたみ方法であるか試作前に確認することは、試作回数を減らしコスト削減のためにも重要である。そこで、本手法は折りたたみ過程の3DCGアニメーションを生成することにより、視覚的に求める折りたたみ方法であるかどうかを確認することとする。

前の工程^[5]により、展開時と折りたたみ時の各断面線の頂点位置と、その各辺の山・谷の割り当てが既知となる。これらの要素を用いて折りたたみの過程を補間することを考える。アニメーションによって天頂面から底面へ折りたたみ過程を表現するために、各断面線の底面上の点を固定し、また天頂面上の点 P_i は同一平面上に乗るように各 v 座標を定め底面に近づけていく(図2)。この際、天頂面のパネルは変形を許容しないため点 P_i は展開時の位置から底面に対して垂直方向の軸上のみ移動が可能となる。以上の条件から、折りたたみアニメーションを生成する問題は、各断面線の終点(底面上の点)を固定し、始点(天頂面上の点)を垂直方向に移動させる問題と置き換えることができる。この問題を解決するためにしばしばインバースキネマティクス(IK)が用いられる。しかし、本手法では折りたたみ時に各辺が割り当てられた通りの山・谷となることが求められるため、始点と終点の2点により断面線の形状を表現するIKのみによって折りたたみ過程を表現することはできない。し

たがって、各頂点(ヒンジ)に対して折りたたまれる角度(折れ角)を定めることによって始点を底面に近づけていくフォワードキネマティクス(FK)とIKの両方を組み合わせて折りたたむことを考える。

まず、状態 t における各ヒンジの折れ角 $\theta(t)$ を次式のように求める。

$$\theta(t) = (1 - t)\theta_{initial} + t\theta_{folded} \quad (0 \leq t \leq 1)$$

ここで、 $\theta_{initial}$ は各ヒンジにおける展開時の折れ角であり、 θ_{folded} は折りたたみ時の折れ角である。また t は折りたたみ過程の状態であり、展開時に $t = 0$ 、折りたたみ時に $t = 1$ をとる。

次に、求めた状態 t における各ヒンジの折れ角をFKに用いる。ここで、始点が軸上からずれた場合はIKを用いて v 座標を固定したまま軸上に乗るように修正を加える。この操作により各断面線の折りたたみ過程を表現することができる。しかし、状態 t において各断面線の始点は同一平面上にあることが保証されないため、IKを用いて更なる修正を行う。まず、基準となる断面線を1つ選択し、この始点の状態 t における v 座標(高さ)について、他の始点の高さが最も近い状態を選択し、その断面線についてIKを用いて同一平面上に乗るように修正を加える。この操作をすべての状態について行うことにより、折りたたみアニメーションを表現することができる。

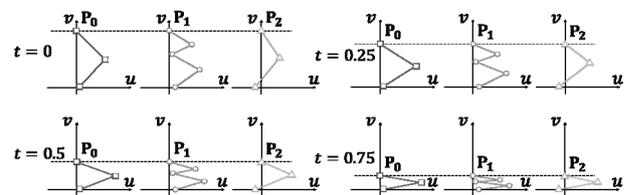


図2 折りたたみ過程のアニメーションの生成方法(各断面線の垂直方向から見た図であり、左上から右下に状態 $t = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ の折りたたみ過程である。)

3.2. 2つの軸を持ったヒンジモデル

厚みのある2枚のパネルを平坦に折りたたむ際に用いるヒンジの一種に、軸を2つもつダブルヒンジがある。このヒンジモデルは隣接する2つのパネルの間に橋渡しをする1つのパネルを持つ(図6)。既存手法^[5]のヒンジモデル(図5)から検証し、下記の点の改良を行った。

(i) 折れ角の回転角度の制限を行った(図4の右図)。既存手法^[5]のモデル(図4の左図)は 0° から 360° まで任意の折れ角で折りたたむことが可能であったが、そのことにより展開時におけるモデルの形状が不安定となった。そこで先行研究^[4]のヒンジの回転軸が1つの場合で求

めたヒンジのなす角を用いることとする (図 3) . このことにより折れ角が展開時と折りたたみ時になす角度内のみで折りたたみを行うことが可能となる.

(ii) 橋渡しをするパネルを3つに分割した (図 6の上図) . 既存手法^[5]のモデルは隣接する2つのパネルに橋渡しをするパネルを組み込んで3Dプリンタ等で出力することが前提であった (図 5) . しかしサポート剤を取り除く必要があるため, 橋渡しをするパネルを奥行き方向に対して3等分し, 出力後にこのパネルを組み込むこととした.

(iii) 隣接する2つのパネルに軸となる棒を加え, 橋渡しをするパネルにその棒が入るように十分な大きさの円筒形の穴を設けた (図 6) . (i) と同様にサポート剤を取り除くために, 分割した橋渡しをするパネルの両端に穴を設けた. このとき軸となる棒の長さは3つのパネルを組み込むために橋渡しをするパネルの奥行き方向の長さの1/3以下となる必要がある.

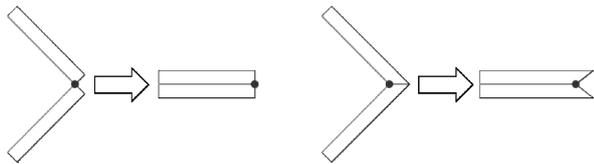


図 3 厚みを加えた際のヒンジの回転軸が1つの場合のヒンジ形状の修正方法 (左図は断面線の垂直方向に厚みを均等に加えた場合であり, 右図は展開時と折りたたみ時にヒンジがなす角度内のみで折りたたまれる. それぞれ左から右のように折りたたまれる.)

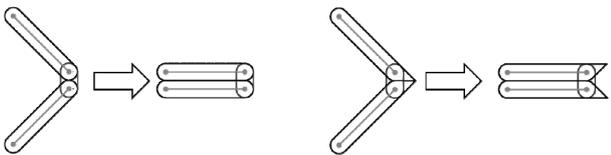


図 4 厚みを加えた際のヒンジの回転軸が2つの場合のヒンジ形状の修正方法 (左図は既存手法^[5]のヒンジ形状あり, 右図は折りたたまれる回転角度を制限した形状である. それぞれ左から右のように折りたたまれる.)

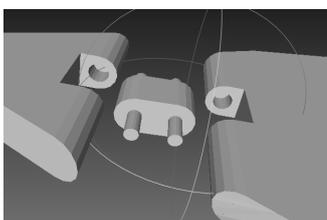


図 5 既存手法^[5]のダブルヒンジを構成するパーツ

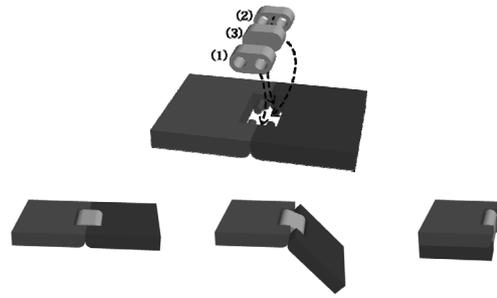


図 6 本研究におけるダブルヒンジを構成するパーツ (上図は組み立て方法であり橋渡しをするパーツを(1)(2)(3)の順で組み込む. 下図は折りたたまれる過程であり左から右のように折りたたまれる.)

3.3. 複数の折りたたみ部品を組み合わせたモデル

先行研究^[5]のモデルは, 入力した天頂面の形状に依存してしまうため生成できる形状に制約があった. 特に, 二股に分かれるような形状を生成することは不可能であった. そこで, 複数の折りたたみ部品同士の1つの面を接続することによってより複雑な形状の生成を行う. この際, 問題となるのが折りたたみ時の部品同士の干渉である. また展開時の部品同士は干渉しないことを前提とする.

本手法では, 折りたたみ時に天頂面または底面と同一平面上になる面同士について接続を行う (図 7) . この手法により折りたたみ時に干渉を起こさず組み合わせたモデルを折りたたむことができる.

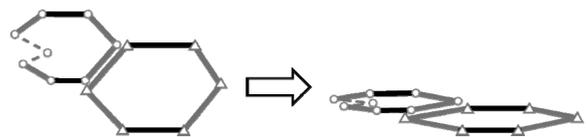


図 7 複数の折りたたみ部品を組み合わせたモデルの模式図 (黒線が天頂面と底面, 灰色の実線が折りたたみ時に天頂面または底面と同一平面上になる面, 灰色の破線は折りたたみ時に同一平面上にならない面である.)

4. 結果

生成された多面体モデルについて紙による試作を行いアニメーションとの比較を行った. さらに2つの軸を持つヒンジモデルについて3Dプリンタで試作を行った.

4.1. 折りたたみ過程のアニメーション

3.1節の手法によって生成された折りたたみ過程のアニメーションは図 8のようになった. 図 8の3Dモデルについて展開図を生成し, 紙による試作を行った結果アニメーション

メーションと同じように折りたたまれることが確認できた (図 9) .

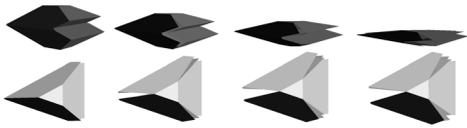


図 8 生成された折りたたみ過程のアニメーション (上図は側面方向から見た図であり, 下図は天頂面方向から見た図. それぞれ左から状態 $t = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ の折りたたみ過程である.)

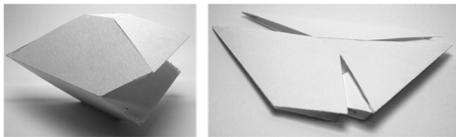


図 9 紙による試作品 (左図: 展開時の形状, 右図: 折りたたみ時の形状)

4.2. 2つの軸を持ったヒンジモデルの試作

先行研究^[4]のモデルについて3Dプリンタによる試作を行った (図 10) . 3. 2のヒンジに2つの軸を持つ手法を用い, 展開時に直径が9.0cm, 高さが5.0cm, 厚さが0.5cmの立体模型を試作した. この結果2つの軸によって自由に折れ角を変更ができ, 立体全体の大きさを直径12.0cm, 高さ1.0cmの平坦に折りたたまれる様子が確認できた.

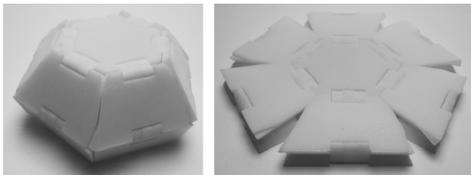


図 10 2つの軸を持ったモデルの試作例 (左図: 展開時の形状, 右図: 折りたたみ時の形状)

4.3. 折りたたみ部品を組み合わせたモデルの試作

先行研究^[5]で生成した2つのモデルを組み合わせて二股に分かれる形状を生成し, 紙による試作を行った (図 11) . この結果, 2つの部品が干渉を起こさずに折りたたまれることが確認できた.



図 11 二股に分かれる形状の紙による試作 (左図: 展開時の形状, 右図: 折りたたみ時の形状)

5. 終わりに

本研究では, 平坦に折りたたみが可能な立体形状の設計をするためのアニメーションの生成手法と2つの軸を持ったヒンジモデル, 複数の折りたたみ部品を組み合わせた形状の生成の提案を行った.

今後の課題としては, 天頂面が凹形状のモデルに対して折りたたみ可能とすることである. 本手法の場合, 側面が展開時よりも折りたたみ時の方が外側に広がる. このため天頂面を凹形状とすると折りたたみ時に干渉が発生してしまい, 新たな定式が必要と考えられる.

参考文献

- [1] Jeanneau, A., Herder, J., Laliberte, T. and Gosselin, C., “A COMPLIANT ROLLING CONTACT JOINT AND ITS APPLICATION IN A 3-DOF PLANAR PARALLEL MECHANISM WITH KINEMATIC ANALYSIS”, *ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (2004)*, 689-698.
- [2] Cauchy, A. L., “Sur les polygones et le polyheders”, *XVIIe Cahier IX (1813)*, 87-89.
- [3] Lang, J. R., “Airbag Folding”, <http://www.langorigami.com/science/technology/airbag/airbag.php>, (参照 2015/3/20).
- [4] 加瀬悠人・三谷純・福井幸男・金森由博, “折りたたみ可能な切開辺を含む軸対称形状の設計”, *芸術科学フォーラム2014 (2014)*, 55-58.
- [5] 加瀬悠人・三谷純・金森由博, “切開辺を含み一方向に折りたたみ可能な立体形状の設計”, *日本図学会2014年度秋季大会 (2014)*, 155-160.
- [6] 館知宏, “四辺形メッシュに基づく剛体折紙デザイン手法”, *シミュレーション*, 29巻3号(2010-9), 24-29.
- [7] 館知宏, *折紙の数理とその応用 (シリーズ応用数理3)*, 共立出版 (2006), 172-177.
- [8] ミウラ折りラボ, “ミウラ折り公式サイト”, <http://www.miuraori.biz>, (参照 2015/3/20).

著者紹介

かせ ゆうと : 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1-1,

kase@npal.cs.tsukuba.ac.jp

かなもり よしひろ : 筑波大学システム情報系

みたに じゅん : 筑波大学システム情報系