

紙類包装支援のための折り操作手順設計

Design of Folding Process for Paper Wrapping

松島 健太† 島貫 博† 渡邊 豊英†
Kenta Matsushima Hiroshi Shimanuki Toyohide Watanabe

1. はじめに

これまでに紙を対象とする研究として、折り紙に関する研究が盛んに行われている。しかし、これらの研究では主に折り紙に特有の平坦な折り操作だけが解析され、折り紙を研究対象としているため、物体(オブジェクト)と紙の関係を考慮していない。本研究では、紙類包装支援システムの構築を目指し、オブジェクトと包装紙の関係を考慮した紙の折り操作手順設計手法を提案する。紙類包装に用いられる折り操作を解析することで、3次元空間における複雑な紙の折り操作が実現可能になる。

本稿では、包装の対象となるオブジェクトを一枚の紙を用いて、切らずに包みあげる(不切一枚包装)手順の構成手法を提案する。本手法では、オブジェクトと包装紙の情報から、包みあげた状態を算出し、計算機上にCGで表現する。現実世界の紙類包装の手順を計算機上にモデル化し、内部モデル(Internal model)と呼ばれるオブジェクトと包装紙の変形プロセスが記述されたデータ構造上で紙の折り操作を逐次シミュレーションしていくことによって包装手順は設計される。

本手法にて設計される包装手順から、効果的な包装手順を探索し、包装過程を3次元CGアニメーションで表現することで、紙類包装の支援を目指す。

2. アプローチ

2.1 包装手順の表現

あるオブジェクトを包装紙で包む場合、包装手順は一意に定まらない。実際、同じオブジェクト、包装紙の組合せに対しても、目的によっては異なった手順で包装されることも少なくない。

本手法では、包装過程におけるオブジェクト、包装紙のある状態をステージと定義し、このステージをノードとする木構造(ステージツリー)によって複数の包装手順を表現する。また、各ステージにおけるオブジェクト、包装紙は、CGの基本構造である面、辺、頂点によって構成される。さらに、宮崎ら[1]によって提案された、面の重なり順序を表す面リストを保持する。

構築されたステージツリーを解析することにより、効果的な包装手順を得ることが可能である。さらに、木構造の利用は、包装手順をCGアニメーションで表現するために必要な包装手順履歴の管理にも有効である。

2.2 包装折り

1枚の折り紙から現実世界の折り過程を表現する研究が多く発表されている[1,2]。しかし、折り紙特有の折り操作のみ解析され、包装紙とオブジェクトの関係を考慮してい

ない。本研究の目的である紙類包装を支援するには、オブジェクトと包装紙の関係を解析し、紙類包装に用いられるような折り操作の解析が必要である。

紙類包装に用いられるオブジェクトの各面に沿って包装紙を折り曲げる折り操作を包装折り(wrap-folding)と定義する。包装折りは、オブジェクトと包装紙の状態を解析し、図1の3通りの折り方をする折り操作である。紙を折り曲げる際に、面同士の衝突が発生する場合は、図1(b),(c)のように面を折り込む折り操作である。このような3次元空間を考慮した折り操作は未だ提案されていない。

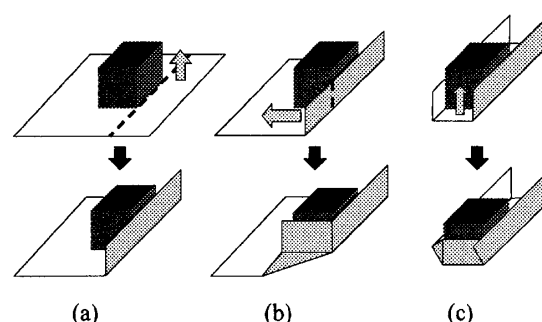


図1 包装折り実行例

3. 包装手順設計手法

3.1 処理手順概要

まず初めに、各ステージが保持する面の中から折り操作を適用する面(折り操作適用面)を決定する。折り操作適用面は、少なくとも一つのオブジェクトの面に対して折り曲げ可能である面に限定する。本手法では、折り曲げ可能である全ての面に対して折り操作が実行され、考えられる全ての包装手順を表現するステージツリーを構築する。次に、実際に折り操作を生成する。折り操作は、折れ線の生成、面の分割、分割面の移動から成る。詳しくは3.3節にて述べる。最後に内部モデルを更新する。内部モデルは、折り操作が生成されるたびに更新される。ステージツリーにおける全ての葉ノードが包装完了状態になったとき、ステージツリーの構築は完了する。

3.2 折り可能性

面の衝突を回避し、物理的に実現可能である折り操作を生成するためには、生成した折れ線に対して折り可能性(fold-ability)が成り立たなければならない。折り可能性とは、与えられた展開図を折ることが物理的に可能であるかどうかのことである。これまでに、与えられた展開図で3次元の紙模型を実際に折ることが可能であるための条件が発表されている[3,4]。しかし、十分条件のみ示されていて、必要条件は未だ示されていない。

†名古屋大学大学院 情報科学研究科 社会システム情報学専攻 渡邊研究室

本手法では、内部モデル上で実際に紙を折り曲げることで、物理的に実現不可能であった場合のみ、生成したステージを破棄する方法をとる。このように、試行錯誤的に実現可能なステージのみを生成していくことにより、構築されるステージツリーが表現する包装手順は全て実現可能であることが保障される。

3.3 包装折りの生成

包装折りは、折れ線の生成、面の分割、分割面の回転から成る。本手法では面同士の衝突が発生する点を衝突点と定義し、衝突点の有無により包装状態を解析する。それぞれの折り操作は各衝突点周りで独立に生成される。また、包装折りの結果、さらに面の衝突が発生する場合、生成したステージは破棄され、再び他の折り操作適用可能面に対して折り操作が実行される。

図2に包装折りのための折れ線の生成例を示す。図2において、 e_n は辺を、 θ_n は面の折る角度を表し、 β_n は衝突点周りに接続するオブジェクトの辺が成す角度を表す。また、 α_n は折り可能性の整合性保持のための折れ線を生成するように、新しく生成される折れ線の角度であり、ある局所点に辺が N 本連結する場合、式(1)によって算出される。

$$\alpha = \frac{2\pi - \sum_{j=0}^{N-1} \beta_j}{2} \quad (1)$$

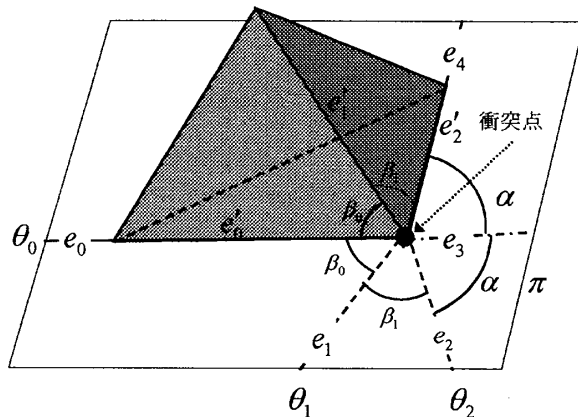


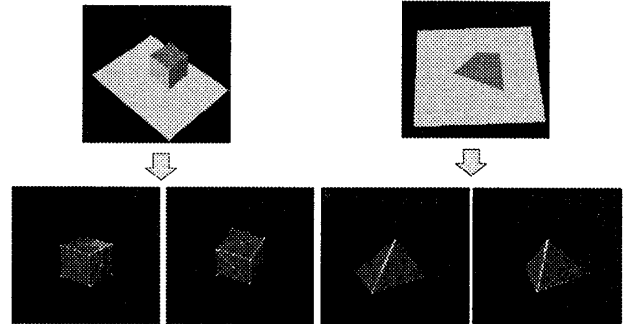
図2 折れ線生成の例

4. 実験

提案した手法により、実現可能な包装手順の設計が可能かどうかを検証した。オブジェクトと包装紙は、立方体を長方形の包装紙で、四面体を立方体の包装紙で包む手順をそれぞれ設計した。図3(a)は立方体を包み込んだ状態を、(b)は四面体を包み込んだ状態である。それぞれの図において、上の状態が初期状態を表し、下の状態は包装過程の最終状態であり、異なる2例ずつ示した。結果、ステージを解析することにより、面の衝突を検出し、随時包装折りによって3次元折り可能性を整合させた折り操作が生成される。包装折りの生成後、面の衝突が検出された場合には生成ステージは破棄される。また、同じオブジェクト、包装紙から複数の包装手順を設計することも確認した。

図3の結果例から、得られた包装完了状態に、オブジェクトが露出している状態、包装紙の裏面が多く露出してい

る状態があることが分かる。これは、本手法では折り曲げる面に最も近いオブジェクトの面の方向にのみ、折り操作が実行可能であるためである。有効な包装手順を設計するためには、包装折りの多様化が必要であり、より現実世界での紙類包装の折り操作に近づける必要がある。



(a) 立方体 (b) 四面体

図3 包装前後の状態例

5. おわりに

本稿では、紙類包装を支援するシステムを構築するための基本的な手法について述べた。そして、包装に用いられる折り操作の形式化と木構造による包装手順の表現方法とその生成手法を示した。これにより、オブジェクトと包装紙の3次元座標情報のみを用いて、実現可能な包装手順を設計可能であることが実証された。また実験結果より、さらに現実性の高い、柔軟な包装手順を設計するためには、包装折りの制約を少なくし、より多様化したステージツリーを構築する必要があることも分かった。

本稿では、主にステージツリーの構築手法について述べてきたが、有効な包装手順を設計するためには、構築されたステージツリーの解析が必要である。また、紙類包装では、包装後のオブジェクトの見た目、バランスなどはオブジェクトの初期位置に関係している。紙類包装を支援するためには、オブジェクトの初期位置も考慮に入れた包装手順の設計手法が必要である。

参考文献

- [1] S. Miyazaki, T. Yasuda, S. Yokoi, and J. Toriwaki. Interactive Manipulation of Origami in 3D Virtual Space. *J. IPS Japan*, Vol. 39, No.9, pp. 1994-2001, 2004.
- [2] J. Kato, and T. Watanabe, H. Hase, and T. Nakayama. Understanding Illustrations of Origami Drill Books. *J. IPS Japan*, Vol. 41, No. 6, pp. 1857-1873, 2000.
- [3] T. Kawasaki. $R(\gamma)=1$. In *Proc. of the 2nd International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, No. 4, pp. 31-40, 1994.
- [4] S. Belcastro, and T. Hull. Modeling the Folding of Paper into Three Dimensions Using Affine Transformation. *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 348, pp. 466-476, 1999.