

## 仮想空間における折り紙シミュレーション

溝口達也<sup>†</sup> 松原康夫<sup>††</sup>

折り紙は日本に古くから伝わる文化であり、世界各国で親しまれている。また、折り紙をコンピュータ上で行う折り紙シミュレーションというものも存在し、様々な研究が行われている。しかし、現在行われている研究では、折り紙を構成する各面が常に平面であることを前提としており、曲面の表現ができない。このため、形状の表現に曲面を用いている作品の表現が不可能という問題が存在する。そこで本研究では、折り紙シミュレーションにおいて曲面の表現を行う手法を考察する。折り紙を格子状にモデル化することで、曲面の表現を行った。これにより、折り紙シミュレーションにおける表現の幅を広げることが可能であると考える。

### Origami Simulation in Virtual Space

TATSUYA MIZOGUCHI<sup>†</sup> YASUO MATSUBARA<sup>††</sup>

The purpose of this study is to create origami shape that contains a curved surface using origami simulation. Until now, the rigid body origami models have been used as a basis of origami simulation. These models, however, are inflexible and do not allow for three-dimensional manipulation of an object. Therefore, we want to make an origami model which allows curvature. In order to allow for the creation of a curved surface, a new model of origami simulation was created by utilizing grids. The new model could be applicable for creating a curved surface.

### 1. はじめに

折り紙は日本の伝統的な文化である。近年では、日本だけではなく、世界各国で“Origami”の表記で親しまれている遊びとなっている。また、折り紙は幾何学との関連性が知られており、数学や工学の分野で様々な研究が進められ、実生活の中に応用されているものも多い。代表的な研究の一つとして、ミウラ折り<sup>1)</sup>が挙げられる。地図の折り畳み方法として提案されたミウラ折りは、紙の対角線の部分を押し引きするだけで即座に展開・収納が可能であり、また山折りと谷折りの位置が固定されるため破れにくいという特長がある。ミウラ折りの技術は、飲料缶などといった薄肉で軽量の耐圧容器や耐圧ホースなどに利用されている。

折り紙に関する研究の一つとして、コンピュータ上で折り紙を表現する折り紙シミュレーションがある。これにより、折り紙の構造の把握が容易になるだけでなく、複雑な構造の作成の試行錯誤の手間を省くことが可能になると考えられ、様々な研究が行われている。

宮崎らの研究<sup>2)</sup>では、コンピュータ上で折り紙を対話的に操作する手法と、折り紙の形状を記述するためのデータ構造及び形状が変化する際のデータ更新の手法を提案している。

古田らの研究<sup>3)</sup>では、バネモデルを用いた折り紙モデルを提案している。折り紙を構成する各面を剛体とみなし、面を構成する全ての頂点間に網羅的にバネが張られたモデルを作成し、そのバネの力の釣り合いから折り紙全体の形状を求めている。

これらの研究では、実際に研究の手法を使った折り紙シミュレーションのプログラムがWeb上で公開されており、コンピュータ上で折り紙作品を作成することが可能である。しかしながら、いずれの研究も折り紙を構成する各面を平面として扱っているため、曲面を持った折り紙作品を表現することができない。

立川らの研究<sup>4)</sup>では、クロスシミュレーションの技術を応用し、折り紙シミュレーションにおける曲面の表現方法を提案している。しかしながら、折り重なっている状態の紙の変形の再現を不可能という問題が残されているため、折り紙作品を表現することができない。

そこで本研究では、折り紙シミュレーションにおいて、曲面を持つ折り紙作品の表現方法を考察する。

<sup>†</sup> 文教大学大学院情報学研究所

Graduate School of Information and Communications, Bunkyo University

<sup>††</sup> 文教大学情報学部

Faculty of Information and Communications, Bunkyo University

## 2. 折り紙モデルの作成

本研究では、曲面の表現を行うために、折り紙を格子状に分割し、各正方形に対角線を引くことで、モデル化を行った。図1は、その例を示している。

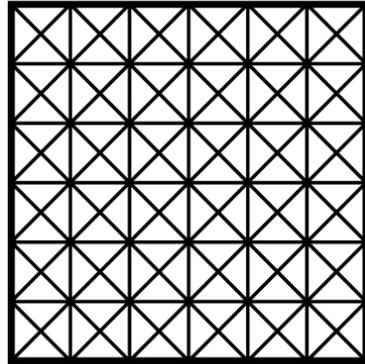


図1 格子状に分割しモデル化した折り紙の例  
Figure 1 Origami model that contains grids.

その後、各正方形の頂点のペアを作成した。ペアは、対象となる頂点から一直線上にあり、1ステップで到達できる頂点と、2ステップで到達できる頂点の2種類を作成した。図2は、作成した頂点のペアの対応例を示している。

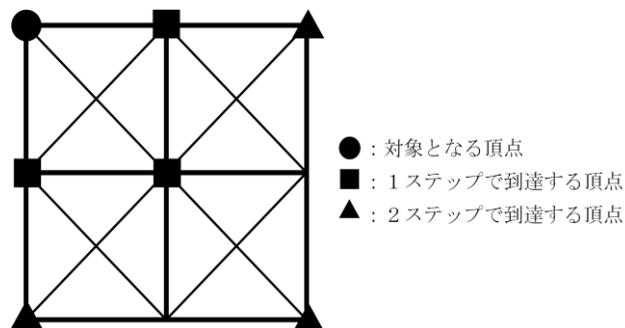


図2 対象となる頂点とペアとなる頂点の対応  
Figure 2 Pairs of vertex.

ペアとなった各頂点間には、一定の距離から変化した場合に元に戻そうとするパラメータ  $\alpha$  と、変化の振動を抑えるパラメータ  $\epsilon$  を与えている。2つのパラメータを与えることで、折り紙モデルの形状を一定に保つことが可能となる。1ステップで到達する頂点とのペアは、紙の伸縮に対する抗力を、2ステップで到達する頂点とのペアは、紙の湾曲に対する抗力を持たせるためにそれぞれ用意した。

今回作成した折り紙モデルでは、格子状に縦20、横20に分割を行い、計400個の正方形の集合として表現した。その後、すべての頂点に対してペアを設定し、各ペアにパラメータ  $\alpha$  及び  $\epsilon$  を与えている。図3は、実際に作成した折り紙モデルである。

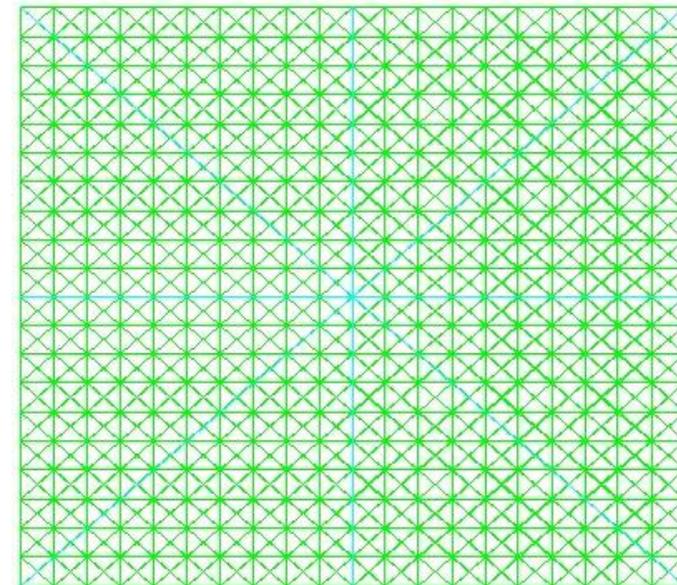


図3 縦20、横20に分割した折り紙モデル  
Figure 3 Origami model that contains 400 grids.

### 3. 実験結果

作成したモデルを用いて、3種類の実験を行った。第1の実験として、折り紙モデルに力を加え、曲面を持つように変形させた。折り紙モデルを変形させる方法として、折り紙モデルの下に曲面を用意した。その後、その曲面と折り紙モデルと接触させることで、折り紙モデルを変形させている。図4は、その実験結果である。

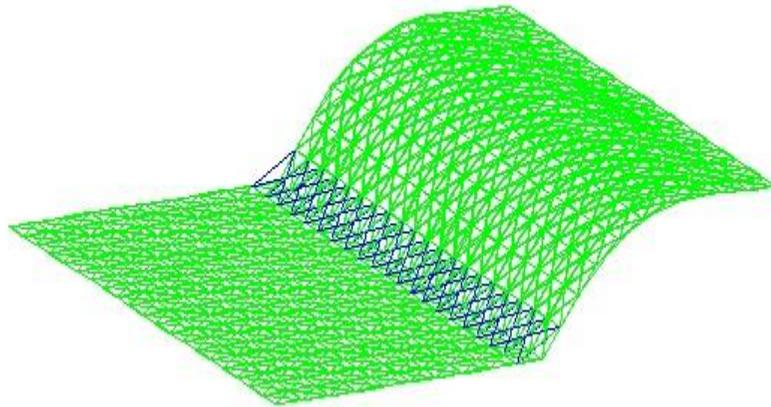


図4 曲面に沿って変形させた折り紙モデル  
Figure 4 Origami model that contains a curved surface.

この実験によって、折り紙モデルが曲面に衝突し、その後曲面に沿って変形していく様子を確認することができた。この結果から、この折り紙モデルを使用することで、折り紙シミュレーションにおける曲面の表現が可能であることが分かった。

第2の実験として、折り紙モデルに力を加え、あらかじめ指定した折り目に沿って2つに折り曲げた。折り紙モデルを変形させる方法として、折り紙モデルの下に平面を用意した。その後、指定した折り目に沿って折り紙モデルが変形するように平面を回転させることで、紙を折り曲げる動作を表現した。図5は、その実験結果である。

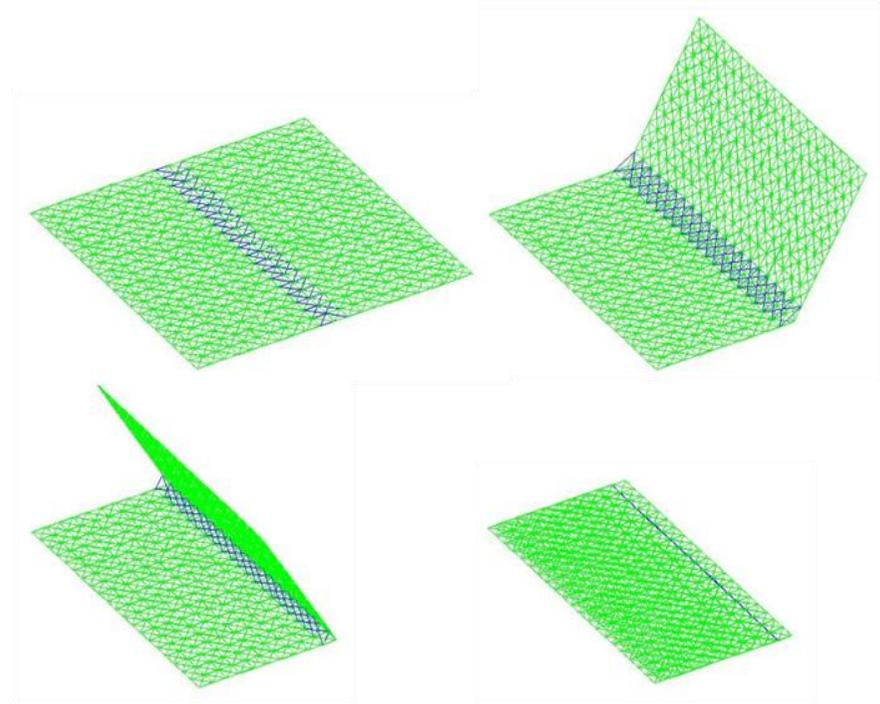


図5 折り紙モデルを折り曲げる様子  
Figure 5 Origami model that is folded once.

この実験によって、折り紙モデルが回転させた平面に沿って変形し、2つに折れ曲がる様子を確認することができた。この結果から、折り紙の基本的な操作である、紙を2つに折り曲げる動作を表現することが可能であることが分かった。さらに、別の折り目を用意し、同様に力を加えることで、複数回紙を折り重ねていくことが可能であると考える、さらに実験を行った。

第3の実験として、第2の実験で一度折り曲げた折り紙モデルに別の折り目を指定し、折り紙モデルを折り重ねる実験を行った。折り紙モデルを変形させる方法は、第2の実験で行った方法と同様である。図6は、その実験結果である。

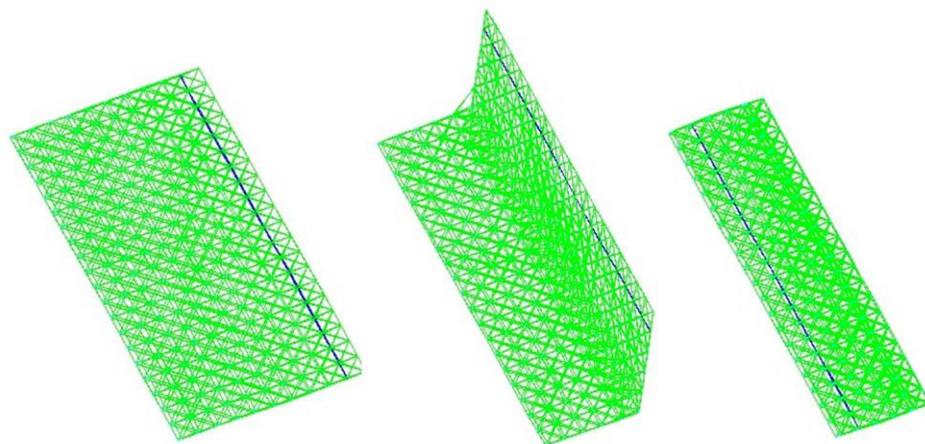


図6 折り紙モデルを折り重ねる様子  
Figure 6 Origami model that is folded twice.

この実験によって、新たに指定した折り目に沿って折り紙モデルが変形し、折り重ねる様子を確認することができた。この結果から、折り紙作品を作成する上で重要な操作である、紙を折り重ねる動作の表現が可能であることが分かった。折り目を変更しながら折り重ねていくことによって、曲面を持った折り紙作品を表現することが可能となるのではないかと考えられる。

今回行った3つの実験結果から、これまで困難であった曲面が表現可能であり、さらに紙を折り重ねることが可能という2つの条件を満たした折り紙モデルを作成することができたと言える。

#### 4. まとめと今後の展開

本研究では、折り紙シミュレーションにおける曲面を持った折り紙作品の表現方法について考察した。曲面を表現するために、格子状に分割した折り紙モデルを作成し、各頂点間にペアの設定を行った。設定したペアには、形状を一定に保つためのパラメータを設定した。その後、作成したモデルを使い、曲面や紙を折り曲げる動作、紙を折り重ねる動作の表現が可能かを調べるための実験を行った。実験の結果から、作成した折り紙モデルを使用することで、曲面を持った状態の表現、紙を2つに折り曲げる動作及び紙を折り重ねる動作が表現可能であることが分かった。

今回提案した手法をさらに応用させることで、今までの折り紙シミュレーションでは表現することが困難であった、曲面を含んだ折り紙作品についても表現可能となり、折り紙シミュレーションにおける表現の幅を広げることが可能であると考えられる。

今後の展開として、提案した折り紙モデルを使用し、実際に曲面を持った折り紙作品を作成したいと考える。

#### 参考文献

- 1) 三浦公亮,ミウラ折り,数学セミナー 48(1), 15-21,2009-01.
- 2) Shinya Miyazaki, Takami Yasuda, Shigeru Yokoi and Jun-ichiro Toriwaki, "An ORIGAMI Playing Simulator in the Virtual Space", The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.7, No.1, pp.25-42, 1996.
- 3) 古田陽介, 三谷純, 福井幸男, "マウス入力による対話的操作を組み込んだ仮想折り紙システム", 情報処理学会研究報告, Vol.2006, No.76, 2006-CG-123, pp.13-18, 2006.
- 4) 立川正人, 渡辺大地, "折り紙シミュレーションにおける曲面表現", 東京工科大学メディア学部 2006 年度卒業論文