

# ユニット折り紙の対話型モデリングシステム

## Interactive Modeling System for Unit-Origami

田村 友和<sup>†</sup>      高井 昌彰<sup>††</sup>      高井 那美<sup>†</sup>  
Tomokazu Tamura      Yoshiaki Takai      Nami Takai

### 1. はじめに

古くから折り紙に関する研究はよく行われており、中でも仮想空間内に折り紙を再現する研究はとりわけ盛んである[1, 2]。それらの研究目的としては、リアリティの追求や計算コストの軽減、あるいはユーザインタフェースの向上などがあげられる。しかし、従来の研究では不切正方形一枚折り、いわゆる一般的な折り紙がその対象であり、複数枚の折り紙を組み合わせて一つの立体形状を作るユニット折り紙を対象とした研究は未だない。

また、ユニット折り紙特有の難しさのため、ユニット折り紙の扱いに慣れていなければ、基本的な形でさえも組み上げに非常に苦労するという特徴がある。

そこで本研究では、ユニット折り紙のデータ構造を定義し、組み上げに関する処理を実装することにより仮想空間内にユニット折り紙を再現し、さらには組み上げに関してシステムがユーザを補助することでユニット折り紙についての知識がなくても容易に組み上げることが可能となるユニット折り紙のモデリングシステムの開発を目的とした。

### 2. ユニット折り紙について

ユニット折り紙の最大の特徴は複数枚の紙を用いる点である。また、それらを全て同じ形に折ることも特徴としてあげられる。同じ形に折られた折り紙をユニットと呼び、それらを組み合わせることで1つの形を作り上げる。その性質上対称性の高い多面体等の形を作ることが多い。異なる折り方の折り紙を組み合わせる方法もあるが、これはユニット折り紙と区別して複合折り紙と呼ばれる。

本研究では、ユニット折り紙の中でも最も代表的な菌部式ユニットを取り上げる。菌部式ユニットは、プラグと呼ばれる他のユニットに挿し込む部分と、ソケットと呼ばれるプラグを受け入れる部分がある。このプラグとソケットを組み合わせることでユニット同士を結合させて、形を作り上げていく(Fig.1)。

### 3. モデリングシステム概要

#### 3.1 システムの流れ

本システムを起動すると、菌部式ユニットを模したポリゴンが表示される。ユーザはマウスおよびキーボードでユニットを簡単に操作することができ、菌部式ユニットで実現することが可能な任意の形状を対話的に構築することができる。また、本システムは菌部式ユニットで

<sup>†</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科, Graduate school of Information Science and Technology, Hokkaido University

<sup>††</sup> 北海道大学情報基盤センター, Information Initiative Center, Hokkaido University

<sup>‡</sup> 北海道情報大学, Hokkaido Information University



(a)ユニット

(b)結合の様子

(c)多面体

Fig.1 菌部式ユニット

作ることのできる基本的な数種類の形状について、どのようにユニットを組み合わせれば目標の最終形に到達するかを示す機能を有しており、ユニット折り紙に触れたことのない人でも基本的な形状を作ることができる。さらに、必要に応じて undo や redo といった基本的な操作を行うことが可能である。

#### 3.2 データ構造

本システムではユニット折り紙を表現するためにデータ構造を二つ定義する。1つは個々のユニットを表すためのデータ構造で、もう一つはユニットが複数結合した状態を表すためのデータ構造である。このユニットが結合した状態をユニオンと呼ぶ。

システム内部には個々のユニットに対応したユニットデータクラスが定義される。このクラスは自身のユニットの番号と属しているユニオンの番号を持ち、また頂点に関するデータとして各頂点の座標とユニオンの中での頂点番号を保持している。その他にプラグとソケットに関するデータがある。これは結合しているユニットの番号とプラグあるいはソケットの番号を持っており、どのユニットとどのように結合しているかがわかるようになっている。

同様にユニオンデータクラスが定義される。これは自身のユニオンの番号とユニオンを構成するユニットの番号を持ち、他に頂点に関する情報として、各頂点の座標とユニオンを構成する辺や面がどの頂点からなるかという情報も持っている。

#### 3.3 ユニットの組み上げ

ユニットの組み合わせ方は無数に存在し、同じユニットの組み合わせ方で組み上げたとしても、個々のユニットの形状が一意に定まるとは限らない。そのため、運動学を解いてユニットの各頂点を求めることは難しい。そこで本研究では、古田らの提案した手法[3]を用いた。この手法は、面を構成する頂点に網羅的にバネを張り、小さな面のゆがみは許容しつつ、面が大きく歪んでしまった場合にはバネの釣り合おうとする力を利用して頂点を適切な位置へ移動させることにより、複雑な面の配置を実現している。

この手法ではある頂点  $i$  にかかる力  $F_i$  を一般的なバネモデルを簡略化した式(1)で表す。

$$F_i = \sum_j \left( 1 - \frac{L_{ij}}{r_{ij}} \right) r_{ij} \quad (1)$$

式(1)の運動方程式を式(2), 式(3)を用いてオイラー法で数値的に解くことにより頂点の位置の時間変化を計算することができる。

$$v_i(t + \Delta t) = d \left\{ v_i(t) + \frac{F_i(t)}{m} \Delta t \right\} \quad (2)$$

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t) \Delta t \quad (3)$$

ここで,  $L_{ij}$  はバネの自然長,  $r_{ij}$  は頂点  $j$  に対する頂点  $i$  の相対位置,  $d$  は減衰定数,  $m$  は頂点の質量である。

本研究では, 各辺以外にユニット特有の折れ曲がった形状を維持するために Fig.2 で示す場所に, 3つのバネを追加した。

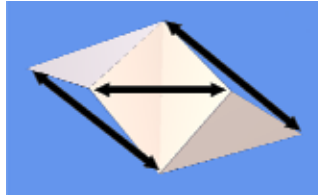


Fig.2 追加したバネの位置

ユニットの組み上げに必要な処理には二つのタイプがある。一つは別々のユニオンやユニットを結合させる処理(Fig.3)であり, もう一つは同じユニオンに属するユニットのプラグとソケットを組み合わせて綴じる処理(Fig.4)である。

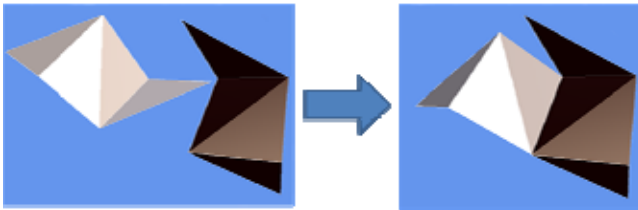


Fig.3 結合させる処理の例

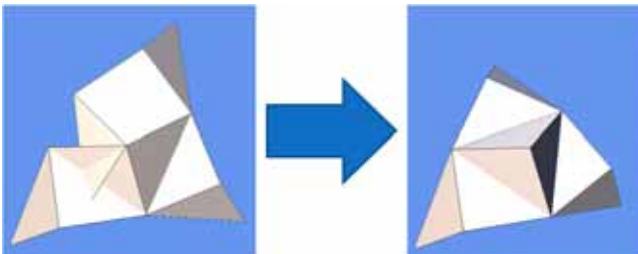


Fig.4 綴じる処理の例

結合の処理を行う場合には, 結合させたいユニットのプラグとソケットを構成する座標がそれぞれ等しくなるように, ユニットの各座標を並進および回転させる。その後, ユニオンの頂点に関するデータや辺, 面のデータを書き換え, バネを張り替える処理を行う。

綴じる処理では, ユニオンに張られたバネが各頂点を適切な位置へ移動させるので, ユニオンの頂点に関するデータや辺と面のデータを更新しバネを張り替える処理を行うだけでよい。

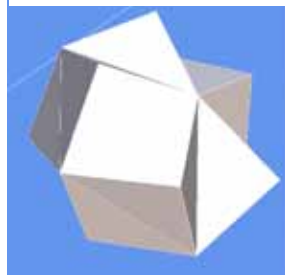
#### 4. システムの実行結果

菌部式ユニットで実際に組むことのできるいくつかの形状を本システムで組み上げた。その結果を Fig.5 に示す。形状 A(Fig.5(a))は使用するユニットの枚数が少なく, 対称性も非常に高いため菌部式ユニットで作られる形状としては基本的なものである。形状 B(Fig.5(b))はユニットの枚

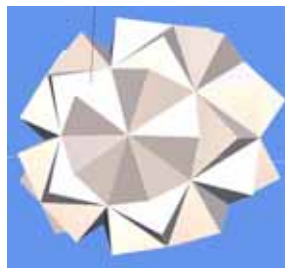
数は少ないが, 形状 A よりも対称性が低い。形状 C(Fig.5(c))は他のどの形状よりも使用するユニットの枚数が多く, 複雑な形状をしている。どの形状についても本システムで再現できていることがわかる。



(a)形状 A (ユニット数 12, 組み上げ時間 1分)



(b)形状 B (ユニット数 15, 組み上げ時間 1分半)



(c)形状 C (ユニット数 90, 組み上げ時間 10分)

Fig.5 システムの実行結果

#### 5. まとめと今後の課題

本稿では, 仮想空間にユニット折り紙を再現するためのデータ構造, 及びユニットを組み上げる手法について述べ, 対話的モデリングシステムの概要を示した。

今後, 任意の 3D モデルデータを入力として与えると, 菌部式ユニットを用いてその 3D モデルの近似形状を作るシステムの開発を目指している。

#### 参考文献

- [1] 三谷純, 鈴木宏正, “折り紙の構造把握のための形状構築と CG 表示”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.1, pp.247-254, 2005.
- [2] 横山卓弘, 高井昌彰, “厚さを持った折り紙シミュレーションとその評価”, 情報処理学会研究報告, Vol.2000, No.115, 2000-CG-101, pp.19-24, 2000.
- [3] 古田陽介, 三谷純, 福井幸雄, “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.