

日本折紙学会 第19期会員特別配布資料

論文：「回転スイープに基づく立体折紙の設計手法」
三谷 純

折り図：「ウマ 1.1」 神谷哲史



**The 19th Year Annual Special Issue
for the Regular JOAS Members**

"A Design Method for 3D Origami
Based on Rotational Sweep" Mitani Jun
"Horse" Kamiya Satoshi

日本折紙学会 会員の皆様

ますますご清栄のことと存じます。

本状をお受け取りになった皆さまは、2008 年 4 月から 2009 年 3 月の第 19 期会員にご登録いただいた方です。日本折紙学会の活動をご支援いただき誠にありがとうございます。

さて、19 期も会員限定配付資料が整いました。楽しんでいただければ幸いです。

第 19 期会員限定配付資料

論 文:「回転スイープに基づく立体折紙の設計手法」三谷 純
折り図:「ウマ 1.1」神谷哲史

2009 年 3 月 25 日

日本折紙学会評議員一同
代表 前川 淳

会員配付資料とは:雑誌「折紙探偵団」にはスペース等の都合で掲載しきれない論文・折図やその他特 に企画された折紙関連グッズなどをお届けできるよう努力いたしております。今後ともご支援賜りますようよろしくお願い申し上げます。

March 25, 2009

To: JOAS members

Re: The 19th year Annual Special Issue for the Regular JOAS Members

Dear JOAS Members,

As usual, we thank you for your cooperation and contributions to the activities of JOAS. As a part of our compliments and as a token of our gratitude, we are sending an annual special issue every year.

In this year, we will send you an article "A Design Method for 3D Origami Based on Rotational Sweep" by Mitani Jun and diagrams, "Horse" by Kamiya Satoshi. We hope that you will all continue to support JOAS.

Thank you.

Maekawa Jun
Chair of the Board of JOAS

回転スイープに基づく立体折紙の設計手法 A Design Method for 3D Origami Based on Rotational Sweep

三谷 純 / Jun MITANI

筑波大学 / University of Tsukuba
mitani@cs.tsukuba.ac.jp

概要

本稿では回転スイープによって生成される立体形状を折紙で作成するための設計手法について述べる。回転スイープは、2Dの折れ線を3D空間内の軸を中心に回転させて立体を生成する方法で、既存のCGやCADソフトで一般に用いられる形状生成操作の1つである。対象とする形状は、2Dの折れ線を軸周りに360/N度 ($N>2$) 刻みで回転させた多面体として表現される。この対象形状を1枚の紙から作成するために、提案手法では隣接する構成面同士の間には適切な大きさの罫 (ひだ) を配置する。Nの値を大きくし、入力として用いる折れ線を細かい線分で表現して滑らかにすることで、近似的に曲面折紙を作成可能となる。本稿では、円柱タイプと円錐タイプという2つの異なるアプローチで、この回転体形状をした折紙を設計する方法を紹介する。円柱タイプは長方形の紙から、円錐タイプは正N多角形の紙から作りだされる。提案手法をPC上に実装し、複数の作品を作ることで、その有効性を確認した。

ABSTRACT

In this paper, a method for designing origami in which shape is based on the 3D geometry generated by the rotational sweep that is commonly used in CG and CAD systems is proposed. The target shape is designed by rotating a two-dimensional polyline around an axis by a unit of $360/N$ degrees ($N > 2$). To make a shape with a single sheet of paper, appropriate flaps are placed in between the constituent polygonal faces that constitute the elements of the target shape. The proposed method generates a crease pattern, i.e. a specification document consisting of mountain/valley fold lines, for folding the origami. Because the shape becomes smoother if we set the input polyline to be finer and N larger, this method can also produce approximate designs for three-dimensional curved origami. This paper describes two principal types of rotational shape origami construction; cylindrical and conical. The origami are folded from a rectangle and a regular N-gon sheet of paper, respectively. The proposed method was implemented on a PC and its validity was demonstrated by constructing several 3D origami.

1. はじめに

折紙は紙を折って形を作る遊びとして、またはアートとして広く親しまれている。近年では折紙の設計に計算機が用いられるようになり、従来では作り得なかった複雑な作品が登場するようになってきた。折紙にはユニット折り、平織りなどと呼ばれるような様々なジャンルがあるが、本稿ではCGやCADソフトで一般的に用いられる回転スイープによって得られる立体形状を紙で作る手法を提案する。対象とする形状は、2Dの折れ線を、3次元空間の軸を中心に360/N度刻み ($N>2$) で回転させてできる軌跡として表わされる。本稿では、図1, 2に示すような、円柱タイプと円錐タイプの折紙作品を作るための方法について述べる。図1は円柱タイプ、図2は円錐タイプであり、(a)が折紙作品の写真、(b)が展開図である (本稿では、山折り線を赤い実線、谷折り線を青い破線で示している)。円柱タイプは長方形の紙から、円錐タイプは正N多角形の紙から作りだす。折紙は正方形の紙から作りだされるべきと考える向きもあるかもしれないが、本稿では1枚の紙を切ったり歪ませたりせずに、折るだけで形を作ることを折紙の最も重要な点であると考えたいとする。

円錐タイプの折紙作品については、過去に作例が存在し、インターネット上で多くの写真を見ることができるが、それらの設計手法について記述された文献は見つけることができなかった。本稿では、2次元の折れ線を入力とし、それを回転させて得られる立体形状を、円柱タイプ、円錐タイプという2つの異なるアプローチで折紙作品とする方法を紹介する。

基本的に、1枚の紙を切ったり歪めたりせずに作れる曲面は「可展面」と呼ばれる錐面、柱面、接線曲面に限られる。これらの可展面は直線エレメントを持ち、ガウス曲率があらゆる個所でゼロであるという特徴がある。一方で、回転スイープで生成される曲面は、図3に示すように、ガウス曲率に正の値も負の値も取り得る。そのため、回転スイープで生成される任意の形状を1枚の紙で作ることは単純ではない。

本稿で提案する手法では、適切な大きさの壁（ひだ）を隣接する多面体の間に配置することで、ガウス曲率がゼロで無い曲面を作ることを実現している。対象形状は、ポリゴンモデル（平面多角形の集合）として表現されるが、入力として用いる折れ線を細かい線分の集合で滑らかにし、回転角度の刻み幅を小さくする（ N の値を大きくする）ことで、近似的に滑らかな曲面を表現できる。

本稿では、一般的な回転体形状の展開図を生成する方法について述べ、円柱タイプ、円錐タイプという2つの特異なケースについて、その展開図を生成する具体的なアルゴリズムを紹介する。実装したシステムでは、ユーザーが画面上をマウスクリックして折れ線を入力する、という単純なインタフェースで様々な形の折紙作品を設計可能となった。折った後の形状は3DCG技術で画面上に表示されるため、実際の紙を折らずに試行錯誤することが可能となっている。

第2章では関連研究を紹介し、第3章では回転体の展開図作成手法に関する前提知識について述べ、第4章で提案手法の詳細を述べる。第5章で結果を示す。第6章でシステムの拡張について述べ、最後の第7章で、結論を述べる。

1. INTRODUCTION

Origami is a form of amusement and art that involves folding paper. In origami, a sheet of paper can be folded to form a variety of shapes. Recently, because it has become common to use computers when designing origami, sophisticated artworks that were previously impossible have been created. While there are various genres in origami, this paper explains a method for designing origami with shapes based on three-dimensional (3D) geometry by means of a rotational sweep that is commonly used in CG and CAD systems. The target shape is designed by rotating a two-dimensional (2D) polyline around an axis in $360/N$ degree ($N > 2$) intervals. Two typical forms of rotationally symmetric origami (*cylindrical* and *conical*) are discussed. Fig. 1 and Fig. 2 show simple examples. Fig. 1 shows a cylindrical-type origami; Fig. 2 shows a conical-type origami. In each figure, (a) is the photo of the origami work made by folding an actual sheet of paper while (b) describes the crease pattern. In this paper, the red solid and blue dashed lines in the various crease patterns denote mountain and valley folds, respectively. The shape of the sheet of paper for a cylindrical origami is a rectangle (Fig. 1(b)), and a regular N -gon for a conical origami (Fig. 2(b)). While it is normally agreed that an origami shape should be designed using just a single square, this restriction was not applied. Instead, in this paper, it was assumed that the most important property of origami making is creating a shape from a sheet of paper without tears and/or distortions.

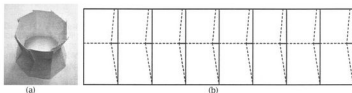


Fig. 1: (a) Photo of the cylindrical-type origami. (b) The crease pattern.

図 1. (a) 円柱タイプの折紙の写真 (b) 展開図

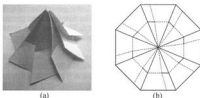


Fig. 2: (a) Photo of the conical-type origami. (b) The crease pattern.
図 2. (a) 円錐タイプの折紙の写真 (b) 展開図

Although some conical-type origami works have been created in the past, and photos of such work can be seen on the Internet [8], no documents that describe a method of designing the shapes, and/or algorithms explaining how to generate their crease patterns, could be identified. This paper presents algorithms for generating the crease pattern of the target shape from an input polyline in two ways, after which examples that were designed using this system will be presented.

Basically, the surfaces that can be made from a single sheet of paper without tears and distortions are limited only to *developable surfaces* such as a cone, cylinder, plane, and tangent developable surfaces. These surfaces contain straight-line elements, and have zero Gaussian curvature. On the other hand, it is possible for surfaces that are generated by rotational sweep to have positive or negative Gaussian curvature, as shown in Fig. 3. Hence, the method required to make an arbitrary shape that is generated by rotational sweep, using a single sheet of paper, is not straightforward.



Fig. 3: From left to right: a surface of negative Gaussian curvature (hyperboloid), a surface of zero Gaussian curvature (cylinder), and a surface of positive Gaussian curvature (sphere). (This image is from Wikipedia [4]).

図 3. 左から右へ、負のガウス曲率を持つ曲面（双曲面）、ガウス曲率がゼロの曲面（円柱）、正のガウス曲率を持つ曲面（球）（Wikipedia[4]より引用）

In the proposed method, appropriate flaps are placed in between the constituent polygonal faces to make it possible to represent surfaces of non-zero Gaussian curvature using a single sheet of paper. Although the target shapes are represented by a set of polygons, the shape approximates a set of curved surfaces by making the generator polyline (input by a user) smoother and the divisor N larger.

In this paper, the concept of making crease patterns used for generalized rotational shape origami is described, and methods for making two standard types of crease patterns (cylindrical and conical), by adopting the general idea behind the method, are proposed. The proposed method enables users to design new 3D origami with a simple interface, such as specifying a generator polyline, by clicking on a screen. This method is applicable for designing paper art objects or industrially useful items such as gift boxes and lampshades. By using the system to visualize the resultant shape as a 3D CG image before folding an actual sheet of paper, the time used for trial and error can be considerably reduced.

In section 2, related studies are introduced. In section 3, the generation of a crease pattern for a rotational sweep object as a preliminary is described. The details of the proposed method are described in section 4. The results are shown in section 5. The proposed system and some extensions are presented in section 6. Finally, conclusions are presented in section 7.

2. 関連研究

紙を折ることで様々な形を作ることができる折紙は、その幾何に関する研究がこれまでに多く行われてきた。近年では折紙がロボットや建築、工業的なパッケージングなどの分野に応用可能であることが明らかになり、科学的な研究テーマとして認識されつつある (Demaine and O'Rourke による文献[2]に、近年の折紙に関する研究に関する、詳細な調査結果がまとめられている)。

複雑な形状を折紙で作成するために、その展開図を計算機で設計するための研究がなされ、いくつかの有用なアプリケーションが存在する。例えば、インターネット上で公開されているアプリケーション "Tess" [1] は、ねじり折りが格子状に規則正しく並んだ造形である「平織り」の展開図を自動生成できる。同じくインターネット上で入手可能な "Tree Maker" [7] は、木構造を入力として、その基本構造を持つ折紙の展開図を自動生成する。これにより、動物や昆虫のような複雑な構造を持つ形でさえも、計算機の支援を得て設計できるようになった。多くの研究が「平坦折り」（平坦に折りたたみ可能な折紙）を対象としており、前述の2つのアプリケーションも平坦折りだけでなく対象としている一方で、本稿は立体的な折紙作品の設計を対象としている。立体的な折紙の設計はそれ自体でも容易ではないが、曲面を持つ立体的な折紙の設計は、さらに問題を難しくする。Huffman [5] や、Fuchs and Tabachnikov [3] によって、曲面折りの数値について研究は行われているが、曲面折りに関する文献の数は多くない。近年では Killian et. al. [6] が曲面折紙の形を計算機内に構築する手法を提案したが、既存の作品をモデル化することを目的としており、新しい作品の設計に用いる方法は提案されていない。本稿で提案する手法は、ポリゴンモデルとして対象形状を表現するが、構成面を小さくすることで、近似的に曲面を持つ折紙作品を設計可能である。

簡によって開発された "Origamizer" は円盤と同相の任意のポリゴンモデルに対して、その形状を折紙で作成するための展開図を生成することができる。多くの3次元形状が円盤と同相のポリゴンモデルで表現可能であるため、このシステムは応用範囲の広さという点で極めて優れたものである。このシステムによって Stanford Bunny や Utah teapot など CG の世界で広く用いられている立体形状を折紙で作成することを実現している[9]。基本的な考え方は、隣接する構成面同士の間を縫を配置し、それを面の後ろ側に隠す、というものであるため、このシステムは本稿で対象とする回転スイープによって得られる形状に対しても有効に機能する。しかし、単純な形状に対しても生成される展開図は複雑になってしまう傾向がある。例えば図4は単純なポリゴンモデルと、Origamizer によって生成された展開図である。得られた展開図を折ると、縫は表面の後ろ側（筒の内側）に隠れるため、対象形状を意図したとおりに折りあげることが可能であるが、もし縫を表側に出してもよいと考えれば、図1,2に示すような単純な展開図でも目的の形を折りあげることが可能である。縫は本質的に不要なものであり、表側に出ることが好ましくない場合もあるが、縫も作品の一部であると考えることができれば、提案手法では単純な展開図で目的の形を表現できるという利点がある。さらに、入力の前線線を描きやすくすることで、滑らかな曲面を持つ作品も少ない労力で作成することができる。

2. RELATED WORK

By folding a piece of paper, various shapes can be produced. Many studies have investigated the geometry of origami. Recently, origami has been recognized as a topic for scientific study since it has wide applications in such fields as robotics, architecture, and industrial packaging (see the recent book by Demaine and O'Rourke [2] for a comprehensive survey).

As techniques for designing crease patterns of complicated shapes using computers are being studied, some useful applications have appeared. For example, an application "Tess" [1], which generates crease patterns for an *Origami Tessellation* that involves a twist fold in a repeating pattern, is available on the Internet. An application "Tree Maker" [7], which is also available on the Internet, generates crease patterns of *origami bases* from a stick figure (the "tree"). This application aids designers in the creation of a crease pattern for the basic structure of the target shape. The target shape can be complicated (e.g., shapes of animals, including insects). In contrast with most studies (including the two above-mentioned applications), which focus on flat foldable origami, the target of this present study is 3D structured origami. While designing 3D origami is a difficult feat, designing 3D origami with curved surfaces is even more difficult. Although there are few studies about curved origami, Huffman [5],

Fuchs and Tabachnikov [3] studied the basic theory of curved folding. Recently, Killan et. al. [6] have proposed a method for constructing a curved origami shape using a computer. The method utilized in this paper makes it possible to generate a 3D shape as a set of polygons, which in turn makes possible curved origami with designs created using small polygons.

The "Origamizer", a software program developed by Tachi [10], can generate a crease pattern for an arbitrary polygonal model that has the topology of a disk. The outstanding advantage of his software is its wide applicability as most 3D shapes can be modified so that they have the topology of a disk, simply by adding some cuts. Using this software, Tachi managed to generate crease patterns for very complicated 3D shapes [9]. The basic idea of his approach is to place clearances between each polygon of the unfolded pattern and to construct flaps from it behind the target shape; he called this "tucking". Although the Origamizer works for rotational shapes as well, the generated patterns tend to be overly complicated for a simple model. For example, Fig. 4 shows a simple polygonal model and the crease pattern generated by Origamizer. Though the appearance of the folded origami becomes equivalent to that of the target shape by hiding flaps behind the shape (inside the model), it might be thought that the pattern is too complicated. The method described herein, on the other hand, generates a simple pattern by making flaps placed in the foreground of the target shape as shown in Fig. 1 and Fig. 2. Even though the flaps are essentially unnecessary for representing the target shape, and might be considered obtrusive, this approach results in the construction of 3D curved origami from simple crease patterns.

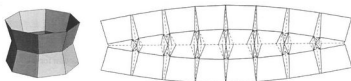


Fig. 4: 3D polygonal model (left) and the crease pattern (right) generated with Origamizer [10].
図 4. 3D ポリゴンモデル (左) と Origamizer[10]で生成されたその展開図 (右)

3. 準備

提案手法の詳細を述べる前に、回転スイープで得られる簡単な形の展開図について述べる。対象形状は、折れ線を $360/N$ 度刻みで回転させて得られるため、3次元形状は台形の集合によって構成される。図 5(a)は、ただ 1つの直線を入力とした、 $N=6$ の場合の最も単純な形状の例。この、6つの台形を持つ形状の展開図は、図 5(b)のようになる。2つの黒い丸は、組み立てるときに互いに貼り合わせる個所であることを示す。

本稿では、回転スイープによって得られる形を 1枚の紙から作るための、異なる 2つのアプローチを述べる。1つ目は、長方形の紙から作るもので、円柱タイプと呼ぶこととする。他方は正 N 角形の紙から作るもので、円錐タイプと呼ぶこととする。円柱タイプの折紙は、対象形状を内包する円柱との隙間を、適切な大きさの襷を配置することで埋め合わせと考えることで実現できる。円錐タイプは、頂角が 360 度の円錐 (つまりは平坦な円盤) に襷を配置し、対象形状との隙間を埋め合わせと考える。例えば、図 5(a)に示す形を長方形から作る場合 (円柱タイプ) と、正 6 角形から作る場合 (円錐タイプ) の展開図はそれぞれ図 6(a),(b)のようになる。形状を作る上で不必要となる、台形と台形の隙間はグレーで表わされており、この部分が襷となる。実際に円柱タイプの展開図を折った後の形は図 7 のようになる。円錐タイプの場合も、襷の形が異なるだけで、基本的には同じような形になる。

図 8(a)に示すように、頂点 P を含む襷は隣接する台形 F_0 と F_1 の間の稜線 AB を中心に自由に回転することができ、面の後ろ側 (筒の内側) に配置することも可能である。しかし、点 P が自由に移動できるのはこのように 1 層だけで構成される場合だけであり、図 8(b)のように複数の層からなる場合は、台形が乗る平面上に位置が拘束される。これは、稜線 AB を中心として点 P を回転させた軌跡と稜線 BC を中心として点 P を回転させた軌跡に共通する点 (交点) が、台形が乗る平面上の 2 点しか存在しないためである。図 8(b)のように、可能な形は 2

通りあるが、一方は他方の鏡像であるため、今後の説明ではこれらは区別せずに一方の形を実現する展開図の生成方法について述べることにする。

回転スイープの軸を 3 次元空間内で垂直に定めると、対象形状を折った後の形を水平面で切断した断面図は図 9 のように表わされる。切断面における壁を含む輪郭線の総延長を Nw 、対象形状に外接する円の半径を r とすると、壁のサイズ b は $b = \frac{w}{2} - r \sin \frac{\pi}{N}$ と表わされる。これは、 $a + 2b = w$ 、 $a = 2r \sin \frac{\pi}{N}$ から導くことができる。

対象形状を円柱タイプで表わす場合、 w は定数となる。

3. PRELIMINARY

Before describing the details of the proposed method, the basic idea of making crease patterns for a simple rotational shape will be explained. Since the target model is generated by rotating a polyline around an axis in $360/N$ degree intervals, the model consists of a set of trapezoids. Fig. 5(a) shows a simple example which is generated with the simplest polyline, which has one line segment, and $N=6$. The unfolded pattern of this model, which has 6 trapezoids, becomes Fig. 5(b). The two dots indicate that the two edges are identified when the design is folded.

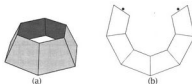


Fig. 5: (a) An example of a simple target shape. (b) The unfolded pattern for (a).

図 5. (a) 単純な対象形状 (b) 展開図

In this paper, two different approaches to construct rotational shapes from a single sheet of paper are proposed. The first involves a rectangle, resulting in origami of cylindrical type. The second involves an N -gon disk, resulting in origami of conical type. We consider that an origami of cylindrical type is made from a cylinder by filling the gap between the target shape and a cylinder by adding adequate flaps. A conical type origami is made using a cone such that the sum of the angles around the apex is 360 degrees (expressed more precisely, it is a “flat disk”). For example, when we consider making the shape of Fig. 5(a) from a rectangle (cylindrical type) and a hexagon (conical type), the pattern becomes as shown in Fig. 6(a) and Fig. 6(b), respectively. The unnecessary area colored in light gray interleaved between two trapezoids is folded as flaps. The folded shape for the cylindrical version is indicated in Fig. 7. The shape for the conical version is almost the same, except for the shape of the flaps.



Fig. 6: Crease patterns of Fig. 5(a). (a) Cylindrical type. (b) Equivalent conical type.

図 6. 図 5(a)の展開図。(a) 円柱タイプ (b) 円錐タイプ



Fig. 7: Folded shape with flaps.
図 7. ひだを配置して折った様子

As shown in Fig. 8(a), a flap that contains a point P in the folded origami can rotate freely, even to the inside of the shape, around the edge AB located between neighboring two trapezoids, F_0 and F_1 . Although the vertex P can move freely when the model has only a single stage, this is not the case when the model has multiple stages, as is shown in Fig. 8(b). The vertex P is restricted so that it lies on the plane that contains one of the trapezoids. This is because there are only two common points between the loci generated by rotating P around the axes AB and BC . Although there are two possible shapes as shown in Fig. 8(b), no effort is made to distinguish between these two in the following explanations because one is simply a mirror symmetric version of the other.

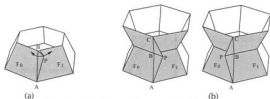


Fig. 8: (a) A flap can rotate when there is only a single stage. (b) A flap is restrained to one of two positions when there are two stages.

図 8. (a) 1 層しかない場合、ひだは自由に回転できる。(b) 2 層から構成される場合、ひだの位置は 2 か所のうちどちらかに拘束される。

When we take the axis of rotational sweep to be vertical, the horizontal cross section of the folded shape becomes as shown in Fig. 9. When we express the total length of the girth of the cross section including flaps as Nw , the size of a flap b at the cross section can be expressed as $b = \frac{w}{2} - r \sin \frac{\pi}{N}$, where r is the radius of the circumcircle, since we have $a + 2b = w$ and $a = 2r \sin \frac{\pi}{N}$. When the target is of cylindrical type, w is constant.

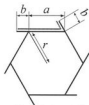


Fig. 9: Cross section of a target shape with flaps.
図 9. 対象形状の断面 (ひだを含む)

4. 提案手法

前章で述べた考え方にに基づき、入力として与えられた 2 次元の折れ線から、円柱タイプおよび円錐タイプの折紙を作る上で必要となる展開図の生成手法について詳細を述べる。

4. METHOD

Based on the idea described in the previous section, the algorithms used to generate crease patterns from an input polyline are introduced for a cylindrical-type origami and a conical-type origami.

4.1 入力

入力は 2 次元の折れ線であり、これは図 10 に示すように、 P_0, \dots, P_{n-1} の n 個の頂点列と $n-1$ 本の線分から構成されるものとする。以降の説明のために、 l_n を n 番目の線分の長さとして定義する。つまり、 $l_n = \|P_n - P_{n-1}\|$ である。対象形状は、入力となる折れ線を y 軸周りに $360/N$ 度刻みで回転させて生成するものとする。なお、円錐タイプのものについては、 P_0 が回転軸に乗っていないという制約がある。

4.1 Input

We assume that the input is a 2D polyline, i.e., a sequence of n vertices, P_0, \dots, P_{n-1} , that has $n-1$ line segments as shown in Fig. 10. For the convenience of later explanation, we define $l_n = \|P_n - P_{n-1}\|$. The target shape is generated by rotating the polyline around the y axis by a unit of $360/N$ degrees. For a conical-type origami, P_0 should lie on the rotational axis.

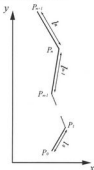


Fig. 10: Input polyline on 2D is defined as a sequence of n vertices, P_0, \dots, P_{n-1} .

図 10. 入力とする 2D の折れ線。 P_0, \dots, P_{n-1} の n 個の頂点から定義される。

4.2 展開図上での頂点の座標

4.2.1 円柱タイプ

図 1(b)に示すように、円柱タイプの展開図では同じパターンが N 回繰り返し現れるので、ここではそのうちの 1 つ (幅が w の長方形に含まれる領域) についてのみ議論する。この展開図を、 x 軸方向に複製を N 個並べれば全体の展開図が得られる。頂点 P_n に対応する、展開図上での点 P'_n の座標値は、以下の式で表わされる。

$$P'_{n,x} = a_n + b_n + \frac{w}{2} + P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N}$$

$$P'_{n,y} = \begin{cases} 0 & (n=0) \\ P'_{n-1,y} + \sqrt{l_{n-1}^2 - \{(a_n + b_n) - (a_{n-1} + b_{n-1})\}^2} & (n>0) \end{cases}$$

$P_{n,x}$ と $P_{n,y}$ はそれぞれ、展開図上の点 P_n の x 座標値、 y 座標値を表わす。 $P_{n,x}$ と $P_{n,y}$ はそれぞれ折れ線の入力で用いられた頂点 P_n の x 座標値、 y 座標値を表わす。 a_n と b_n は点 P_n の乗る水平面上での、図 9 の a と b に対応する。上記の式からわかるように、 $P_{n,x}$ の座標は P_{n-1} から単純に求めることができる。一方で $P_{n,y}$ は 1 つ前の頂点の座標 $P_{n-1,y}$ と線分の長さ l_{n-1} から求めることができる。壁のサイズ b_n は負の値を取れないため、 w は $a_n = 2P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N}$ よりも大きくなくてはならない。つまり、 w の値を最も小さくするには、 $w = \max(2P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N})$ と設定すればよい。

4.2.2 円錐タイプ

円錐タイプについては、基本要素は頂角が $360/N$ 度の二等辺三角形となる。円柱タイプと同様に、全体の展開図は基本要素となる展開図を N 回だけ複製することで得られる。展開図上での座標系を図 12 のように取ると、点 P_n の座標は以下の式で表わすことができる。

$$P_{n,x} = \begin{cases} 0 & (n=0) \\ P_{n-1,x} + \sqrt{l_{n-1}^2 - \left(\frac{a_n}{2} - \frac{a_{n-1}}{2}\right)^2} & (n>0) \end{cases}$$

$$P_{n,y} = \frac{a_n}{2} = P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N}$$

4.1 節で述べたように、入力として与えられる頂点 P_n の最初の頂点は回転軸の上にあり x 座標値はゼロであるから、 P_0 は原点に配置される。 $P_{n,y}$ は $P_{n,x}$ の値から求まり、 $P_{n,x}$ は $P_{n-1,x}$ と l_{n-1} の値から求めることができる。

4.2 Coordinates of vertices on the crease pattern

4.2.1 Cylindrical-type

Since the same pattern appears repeatedly N times (see Fig. 1(b)) in the cylindrical crease pattern, we only have to consider the crease pattern inside a single unit rectangle, a rectangle of width w . Then we can obtain the complete crease pattern simply by repeating the unit rectangle N times in the direction of the x axis. P_n , which is the position in the unit rectangle corresponding to P_n (see Fig. 11), and which is defined using the following equations.

$$P_{n,x} = a_n + b_n = \frac{w}{2} + P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N}$$

$$P_{n,y} = \begin{cases} 0 & (n=0) \\ P_{n-1,y} + \sqrt{l_{n-1}^2 - \{(a_n + b_n) - (a_{n-1} + b_{n-1})\}^2} & (n>0) \end{cases}$$

$P_{n,x}$ and $P_{n,y}$ denote the x coordinate and the y coordinate of the vertex P_n in the crease pattern coordinates respectively. $P_{n,x}$ and $P_{n,y}$ denote the x coordinate and the y coordinate of vertex P_n in the input coordinate system, respectively. a_n and b_n correspond to a and b in Fig. 9 on the cross section at P_n . As described by the above equations, $P_{n,x}$ can be identified simply with $P_{n,x}$. On the other hand,

$P_{n,y}$ is identified with $P_{n-1,y}$ and l_{n-1} . w has to be larger than $a_n = 2P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N}$ for all n because the size of the flap b_n cannot be negative. This means that the smallest value for w is $\max(2P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N})$.

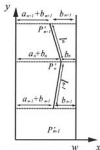


Fig. 11: Coordinates of each vertex in the unit of a crease pattern of cylindrical type.

図 11. 展開図の基本要素内での各頂点の座標値 (円柱タイプ)

4.2.2 Conical-type

For a conical-type origami, the shape of a unit becomes an isosceles triangle with an apex angle of $360/N$ degrees. Similar to the cylindrical-type, the whole crease pattern can be obtained by repeating the unit N times around the apex. When we consider the coordinate system shown in Fig. 12, the coordinates of each point P_n are represented by the following equations.

$$P_{n,x} = \begin{cases} 0 & (n=0) \\ P_{n-1,x} + \sqrt{l_{n-1}^2 - \left(\frac{a_n}{2} - \frac{a_{n-1}}{2}\right)^2} & (n>0) \end{cases}$$

$$P_{n,y} = \frac{a_n}{2} = P_{n,x} \sin \frac{\pi}{N}$$

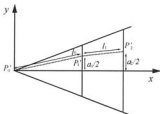


Fig. 12: Coordinates of vertices in the unit of a crease pattern of conical type.

図 12. 展開図の基本要素内での各頂点の座標値 (円錐タイプ)

Since the x coordinate of the first vertex of an input polyline P_0 is zero as described in Section 4.1, P_0 is placed at the origin. $P_{n,x}$ can be identified simply with $P_{n,x}$. On the other hand, $P_{n,y}$ is identified with $P_{n-1,y}$ and l_{n-1} .

4.3 山折り・谷折りの判別

展開図上の折り線に山谷の区別をつけることを考える。図 13 は、折った後の形を表わし、山折りが赤、谷折りが青で示されている。壁の稜線（図 13 中の AB と BC）は山折りであるが、壁と台形の間の稜線（図 13 中の AD と DC）は谷折りとなる。つまり、これらの線の山谷の属性は自動的に定まる。一方で、水平面上に位置する折り線（図 13 中の EB と DF）は鉛直方向に接続する台形間の角度によって異なる。この角度は、入力として与えられた 2 次元の折れ線間の角度から判定可能である。

4.3 Mountain/Valley flags of folding lines

To fold origami correctly, the mountain/valley flag must be set for each folding line on the crease pattern. In Fig. 13, which shows a part of the folded shape, mountain lines and valley lines are colored in red and blue, respectively. The folding lines used for making ridges of the flaps (AB and BC in Fig. 13) are flagged as mountain. On the other hand, the folding lines between a flap and a trapezoid (AD and DC in Fig. 13) are flagged as valley. As a result, the flags of these lines are automatically defined. Contrariwise, the flags of horizontal folding lines (EB and DF in Fig. 13) alter depending on the angle between vertically connected trapezoids. This can be defined by seeing the angle between two connected line segments in the input polyline.

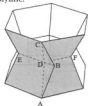


Fig. 13: Flags of folding lines. Mountain lines and valley lines are colored in red and blue, respectively.

図 13. 山折り、谷折りの判別。それぞれ赤、青で示す。

4.4 3D モデルの生成

提案手法では、壁が対象形状の前面に追加されるため、回転スイープによって得られる形と実際に作成される形とに差異がある。そのため、試行錯誤を減らすためにも、事前に完成形を画面で確認できることは重要である。CG や CAD で一般的に用いられる方法で回転スイープ形状を生成した後、各構成面が乗る平面上に壁となる平面多角形を追加することで、完成形の 3D モデルを構築できる。壁のサイズは、第 3 章で述べた b_0 の値を用いねばよく、モデルの生成は容易に行える。

4.4 3D geometric model

The appearance of the folded origami is not actually the same as that generated by rotating the input polyline because additional flaps are placed outside it. Thus, previewing the folded shape is useful in reducing trial and error. To do this, it is necessary to construct a 3D geometric model on a PC. This is achieved by a simple program. After the rotated shape is generated with a common rotational sweep algorithm used in standard CG software, flaps are added so that they lie on planes containing the neighboring trapezoid. The size of a flap is determined by the value b_0 described in the Preliminary section.

5.結果

提案手法を PC 上に実装した。ユーザーは折れ線を入力するだけで、展開図と、実際に紙を折って得られる壁を含む 3D 形状モデルが自動的に生成される。折れ線はアプリケーションのウィンドウ上をマウスクリックによって入力する。得られた結果に満足できれば、ユーザーは展開図を印刷して、折り線に従って紙を折ることで、作品を完成させることができる。円柱タイプと円錐タイプに対して、複数の作品に適用した結果をそれぞれ図 14, 15 に示す。図中、左から順に、入力とした折れ線、生成された 3D モデル、展開図、完成した作品の写真である。図 15(a) の例では N の値を 12 にしたが、それ以外では N を 8 にした。図 14(b) と 14(c) では、目的の形が

適切な放物面および球面になるように、計算によって入力とする折れ線を作図したが、それ以外の例では手作業で折れ線を入力した。

5. RESULT

We implemented the proposed methods using a PC and found that users can design origami shapes by specifying a polyline. The polyline is specified by simply clicking points in the application window. The system automatically generates a crease pattern and a corresponding 3D model based on the algorithms introduced in the previous section. When the user is satisfied with the result, the crease pattern can then be printed and folded. A number of cylindrical- and conical-type are presented in Fig. 14 and Fig. 15, respectively. In the figures, the input polyline, the constructed 3D geometry, the crease pattern, and the photo of the folded origami are shown from left to right. N is set to 8 for all examples except Fig. 15(a), where N is set to 12. The input polylines for Fig. 14(b) and Fig. 14(c) are generated by calculation so that the target shape becomes a mathematically appropriate hyperboloid and sphere. Others are input manually.

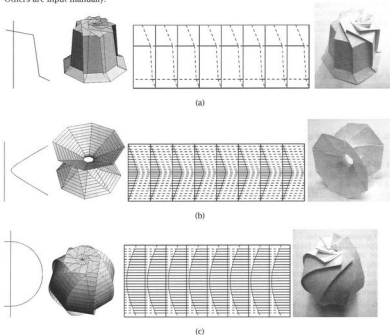


Fig. 14: Cylindrical-type examples: (a) Bell. (b) Hyperboloid. (c) Sphere. From left to right: input, the constructed 3D geometry, the crease pattern, and the photo of folded origami.

図 14. 円柱タイプの例。(a)ベル(b)双曲面(c)球。それぞれ左から順に、入力、3Dモデル、展開図、作品の写真。

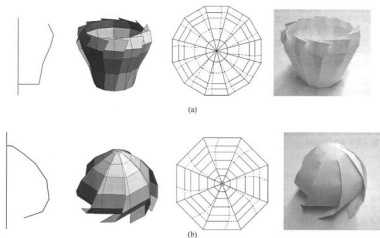


Fig. 15: Conical-type examples. (a) Vase. (b) Chestnut. From left to right: input, the constructed 3D geometry, the crease pattern, and the photo of folded origami.

図 15. 円錐タイプの例。(a)花瓶 (b)栗の実。それぞれ左から順に、入力、3D モデル、展開図、作品の写真。

6. 議論

6.1 近似的な曲面折紙の生成

提案手法で作られる形状は平面多角形（台形）の集合であるが、 N の値を大きくし、入力に用いる折れ線を細かい線分で表現して滑らかにすることで、形状を滑らかにすることができる。 N の値が大きいと、実際に折るのが困難になるが、入力の折れ線を細かくしても、それほど手間は増えない。実際、折れ線の成す角が 180 度に近い場合は、折り線を省略して曲面で近似することが可能となるため、滑らかな折れ線を入力とすることで、折る手間を軽減させることもできる。例として、図 14(b) と 14(c) は、多数存在する水平な折り線を省略して、曲面折紙として折ることができる。

6. DISCUSSION

6.1 Approximation to curved origami

The shapes generated with the proposed method consist of a set of polygons. By making N larger and the input polyline finer, the shape becomes smoother. Although it is difficult to fold the origami by hand if N is large, making the input polyline finer does not change the difficulty significantly. In fact, we can omit the horizontal folding lines if the folding angles are close to 180 degrees. Hence, a smooth input polyline simplifies the folding task. For example, Fig. 14(b) and Fig. 14(c) can be folded without horizontal lines by assuming that the model consists of curved surfaces.

6.2 変曲点

図 8(b) に示すように、壁の位置は 2 通りの選択肢がある。どちらを選ぶかは、壁の大きさがゼロ（図 11 中の θ の値がゼロ）の場所で切りかえることができる。このような場所を「変曲点」と呼ぶこととする。この変曲点での壁の位置の切り替えにより、同一の入力から異なる完成形を得ることが可能となる。例えば図 16(b) と 16(d) は図 16(a) と 16(c) に対して壁の位置を変更したものである。

基本的に、壁の干渉を避けるために、入力とする折れ線の頂点の y 座標 (回転軸方向) の値は単調減少または単調増加である必要がある。つまり、 $P_{n-1,y} \leq P_{n,y}$ ($1 \leq n < N$) または $P_{n-1,y} \geq P_{n,y}$ ($1 \leq n < N$) でなくてはならない。図 17 は、この条件を満たさないために、壁の干渉が起こった様子を表わす。干渉の様子がわかりやすいように、壁の面に着色してあるが、赤い面が青い面を突き抜けていることがわかる。しかしながら、変曲点であれば壁のサイズがゼロになるために、入力とする折れ線の向きを反転させることが可能である。このことにより、作成可能な形状のバリエーションをさらに増やすことが可能となる。例えば図 18 のような作品も実現可能である。

6.2 Turning points

As indicated in Fig. 8(b), the flaps can be positioned in two ways. A particular choice can be switched at the point where b_n (in Fig. 11) is zero. This is called the *turning point*. If we see the flaps as part of the design, this choice can add variations to the shapes obtained from the same input polyline. For example, Fig. 16(b) and 16(d) shows variations of Fig. 16(a) and 16(c), respectively. The position of the flaps located on the upper half of Fig. 16(a), and the position of flaps located on the middle two stages of Fig. 16(c) are flipped.

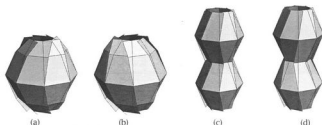


Fig. 16: Flaps on the upper half of (a) are flipped in (b). Flaps in the middle two stages of (c) are flipped in (d).

図 16. (a) の上半分のひだの位置を反転させたものが(b). (c) の中段のひだの位置を反転させたものが(d)。

Basically, the coordinates of the y axis (the axis of rotation) of the vertices of the input polyline have to be monotonically increasing or decreasing, i.e. $P_{n-1,y} \leq P_{n,y}$ ($1 \leq n < N$) or $P_{n-1,y} \geq P_{n,y}$ ($1 \leq n < N$), in order to avoid penetration of the paper. Fig. 17 shows an example in which there are penetrations. The polygonal faces of generated shapes are colored so that the penetrations can be seen clearly. It can be seen that the red face penetrates the blue face. However, the direction of the input polyline along the y axis can be flipped at the turning point without penetrations because the width of the flap at that point becomes zero. This fact increases the number of possible variations in the design. For example, a shape such as Fig. 18 is possible.

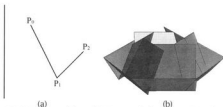


Fig. 17: (a) Input polyline. (b) Generated shape from (a) with $N=6$.

図 17. (a) 入力とした折れ線. (b) $N=6$ で生成された形。

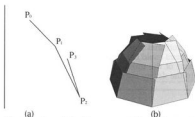


Fig. 18: (a) Input polyline. The direction of the line segment (along the y axis) is changed at P_2 . (b) Generated shape from (a) with $N=8$.

図 18. (a) 入力とした折れ線。折れ線の y 軸に沿った進行方向が P_2 で反転している。(b) $N=8$ で生成された形。

6.3 回転軸の横断

回転スイープによる形状生成では、入力とする折れ線は軸のどちらか一方に存在することが一般的であり、折れ線が回転軸を横切ることが許容されることは一般的でない。しかし、本稿で提案したシステムではこれが許容され、図 19 に示すように軸を横切る折れ線に対しても妥当な折紙作品を作ることができる。軸を横切る地点では、図 11 中の a_n の値がゼロとなっており、構成面が干渉することは無い。この事実は、興味深い形を作ることが可能とし、さらに実際に形を折るときにはこの地点で紙同士が重なりあって、より形状として安定したものになる。この特徴は、図 14(a), (c) の作品に使われている。

6.3 Crossing the axis of rotation

Generally speaking, the input polyline should be located in one side against the axis of rotation, i.e. the polyline should not cross the axis, when the rotational shape is designed. However, this becomes possible in the proposed system. As shown in Fig. 19, the cylinder closes where the polyline crosses the axis because the value of a_n (in Fig. 11) becomes zero. This makes it possible to design interesting shapes. Furthermore, a shape with this closing makes the model more stable. This scheme is used in the examples shown in Fig. 14(a) and 14(c).

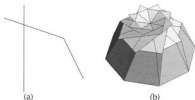


Fig. 19: (a) Input polyline that crosses the axis. (b) Generated shape from (a) with $N=8$.
図 19. (a) 入力とした折れ線。(b) $N=8$ で生成された形。

7. 結論

本稿では、回転スイープによって得られる形状をした折紙作品を作るための手法について述べた。この手法を PC 上に実装し、複数の作品を作ることによって、その有効性を確認した。さらに、曲面折紙を近似的に作れることを示し、「変曲点」によって壁の位置を変えたり、入力となる折れ線の向きの変更を許容できることを示した。提案手法は、アート作品や箱、ランプシェードなどの工業製品的设计に応用することも可能であると考えられる。

7. CONCLUSION

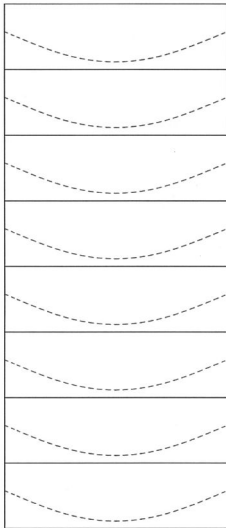
In this paper, a method for rotational origami has been proposed and details regarding how to generate the crease pattern from an input polyline have been described. Additionally, a system that implements the proposed method was developed and the validity of the proposed method was evaluated by presenting some origami models designed with the system. Furthermore, it was shown that approximated curved origami could be designed by making the input polyline smooth. It was also shown that, by taking account of the turning points, additional variations could be generated. This method will be applicable to the design of paper art objects or industrially useful items such as gift boxes and lampshades.

8. REFERENCES

- [1] Bateman, A.: Tess, <http://www.papermosaics.co.uk/software.html>.
- [2] Demaine, E.; O'Rourke, J.: Geometric folding algorithms, Cambridge university press, 2007.
- [3] Fuchs, D.; Tabachnikov, S.: More on Paperfolding, *The American Mathematical Monthly*, 106(1), 1999, 27-35.
- [4] Gaussian Curvature, http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_curvature, English Wikipedia.
- [5] Huffman . D. A.: Curvature and Creases: A Primer on Paper, *Transactions on Computers*, C-25(10), 1976, 1010 – 1019.
- [6] Kilian, M.; Flory, S.; Chen, Z.; Mitra, N. J.; Sheffer, A.; Pottmann, H.: Curved Folding, *ACM Transactions on Graphics*, 27(3), #75, 1-9, 2008.
- [7] Lang, R. J.: TreeMaker, <http://www.langorigami.com/science/treemaker/treemaker5.php4>,
- [8] Flickr: curved fold, <http://www.flickr.com/groups/783444@N25/>
- [9] Tachi, T.: 3D Origami Design based on Tucking Molecule, *The Fourth International Conference on Origami in Science, Mathematics, and Education*, to appear.
- [10] Tachi, T.: Origamizer, <http://www.tsg.ne.jp/TT/software/index.html#origamizer>

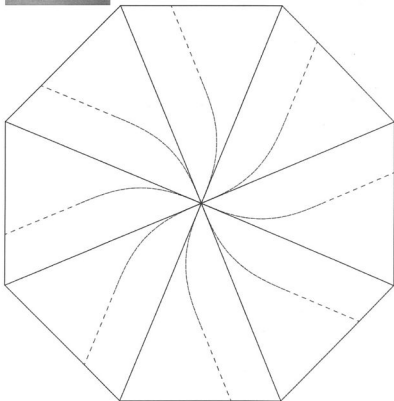
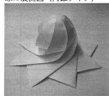
Crease pattern of the Origami Sphere (cylindrical type).

球の展開図（円柱タイプ）



Crease pattern of the Origami Sphere (conical type).

球の展開図（円錐タイプ）

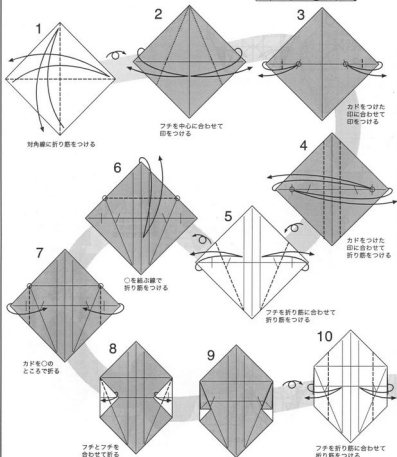
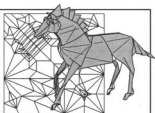


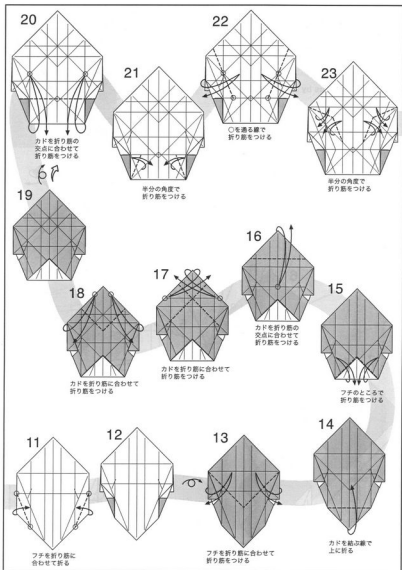
ウマ 1.1

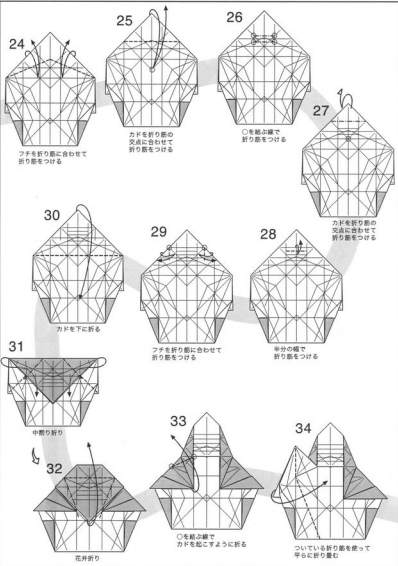
Horse

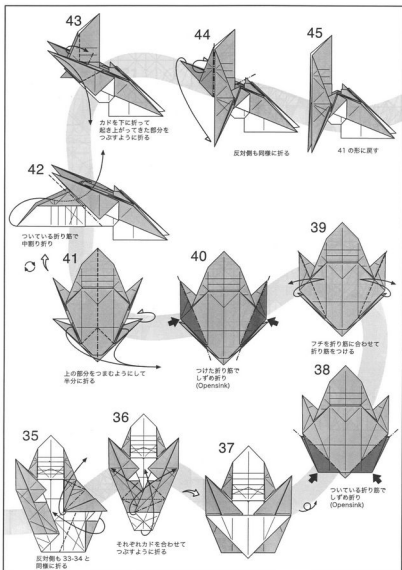
神谷哲史

Model & Diagrams by Kamiya Satoshi







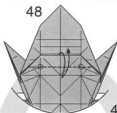


46



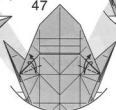
フチを反対側に折って
折り筋をつける

48



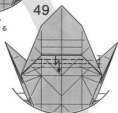
○を結ぶ線で
折り筋をつける

47



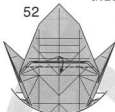
フチを折り筋に合わせて
折り筋をつける

49



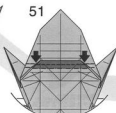
1/3の幅で段折り

52



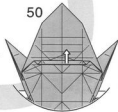
フチを下に折る

51



つけた折り筋で
段しずめ折り
(Opensink)

50



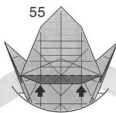
戻す

53



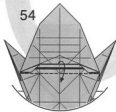
カドを斜めに折る

55



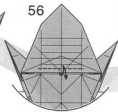
フチを内側に押し込む
(Closedsink)

54

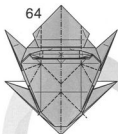


フチを下に折る

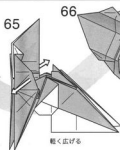
56



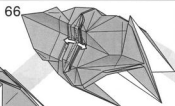
フチを折り筋に合わせて
折り筋をつける



45 の形のような
形に折り畳む



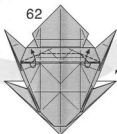
軽く広げる



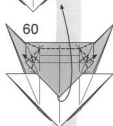
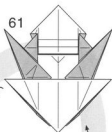
ヒダをずらして引き出す



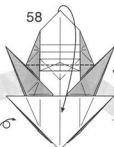
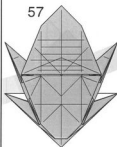
起こしたフチを広げて
つぶすように折る



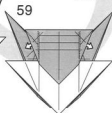
隙間を広げて
フチを起こすように折る



左右で段折りしながら
カドを上にする

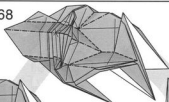


カドをついている折り筋で
下に折る



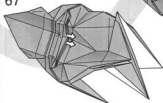
後ろの紙を引き出す

68



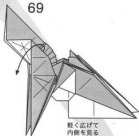
平らに折り畳む

67



残りのヒダも同様に引き出す

69

軽く広げて
内側を見る

73



72



かぶせ折り

70



かぶせ折り

74

かぶせるように
隙折りしながら
折り畳む内側のヒダを
引き出して広げる

71

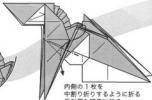
内側のヒダを
引き出して広げる

75

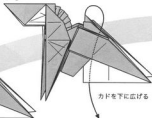


途中の図

77

内側の1枚を
中折り折りするように折る
反対側も同様に折る

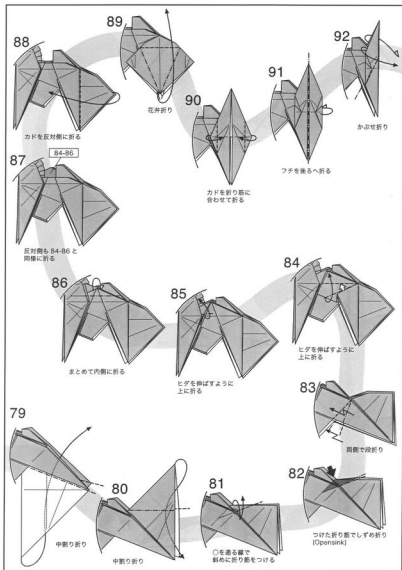
78

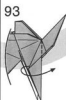


カドを下に広げる

76







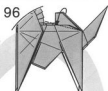
カドを反対側へ折る



カドを裏側へ折り込む



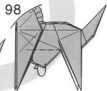
反対側も 93-94 と
同様に折る



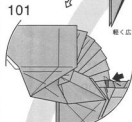
カドを内側へ折り込む



中割り折り
反対側も同様に折る



カドを内側へ折り込む



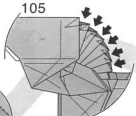
たてがみの部分を
しずめるように折る



途中図
③の部分
押し込むように折る



途中図 2



残りの部分も
同様に折る



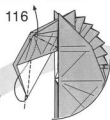
114

反対側も 108-113 と
同様に折る



115

カドをずらすように折る



116

両側でつまむように折り
花弁折り + 中割り折り



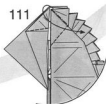
113

カドを上にする



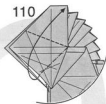
112

内側の紙を引き出す



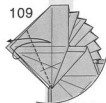
111

カドをつまむように折る



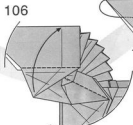
110

つけた折り筋を使って
花弁折りするように折る



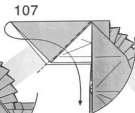
109

フチを折り筋に合わせて
折り筋をつける



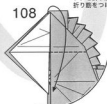
106

閉じる



107

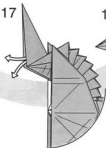
中割り折り



108

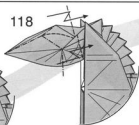
カドを下に折る

117



内側の紙を引き出す

118

両側で段折りするように
折り畳む

119

フチを広げて
つぶすように折る

120



カドを上折る

121

フチをかぶせるように
折る

125



段折り

124



カドを後ろへ折る

123

内側を広げて
つぶすように折る

122



中割り折り

126

フチを後ろへ
折り込む

123-126

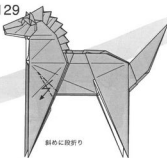
127

反対側も 123-126 と
同様に折る

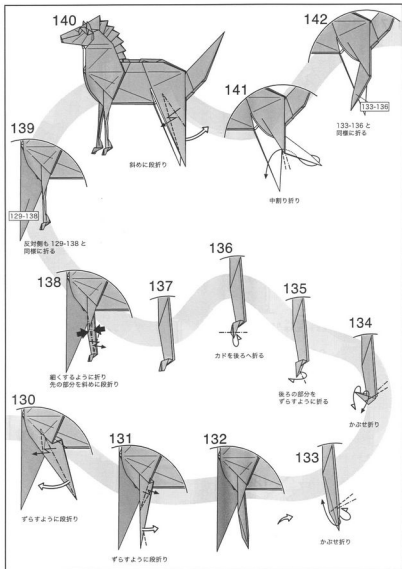
128



129



斜めに段折り

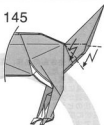




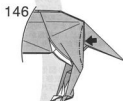
縮くように折り
先の部分を斜めに段折り



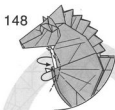
反対側も 140-143 と
同様に折る



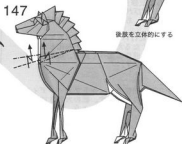
両側で段折り



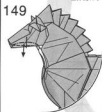
後頭を立体的にする



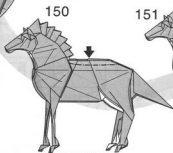
フチを折り込むようにして
立体的にする



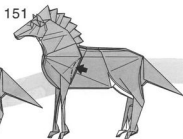
両側で段折り



段折り
反対側も同様に折る



体を立体的にする



フチを丸く折って立体的にする
反対側も同様に折る

この作品は、2008 年 5 月の関西コンベンションで発表した作品、「馬 1.0」のマイナーチェンジ版です。

■ 1.0

「過剰ニセ吉野馬。吉野一生さんの名作、馬へのオマージュとして制作しました。特徴的なたてがみの構造を残しつつ、基礎構造を22.5度ベースで小松風構成してあります。この場合たてがみとの接続が大きな問題となりますが、最終的には放射状のヒダの根元を一点にまとめて、90度まで扇状に広げた上で接続しています。本当は調整不足で少し誤差があるのは秘密。」(web サイトより)

という事で、たてがみと耳、蹄と足の折り方やポーズ等が吉野馬っぽくなっています。

ちなみに実はこの作品は、関西に行く待ち時間(深夜から始発まで4時間ほど)+移動時間(在来線6時間ほど)で構想から完成まで一気に走り放った神速創作だったりします。

■ 1.1

さて、今回折り図化している1.1はこの1.0から頭部を中心に改修をしています。具体的には、

- ・たてがみの「背びれ」化
- ・頭を少し小さく。あわせてデザインも調整の2点です。

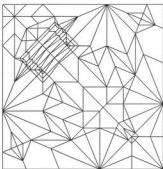
この2つは同時に行い、1.0に比べてたてがみに使う紙の量が多くなるため同時に小顔化も実現しています。結果、前作に比べて動的、攻撃的なイメージになっています。

■ 紙について

薄い紙から厚めの紙でウェットフォールディングまで対応しきれる作品です。紙の大きさに合わせて厚みも調整すると良いでしょう。例えば、サンタ・リタ 120 の広告の作品は全紙の「きぬもみ」から切り出した約80cmの紙から折っています。

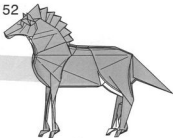


馬 1.0

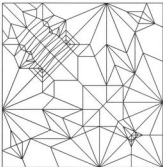


馬 1.0 展開図

152



完成



ウマ 1.1 展開図

第 19 期 日本折紙学会会員特別配布資料（非売品）2009 年 3 月 25 日発行

著 者	三谷 純／神谷哲史	発行	日本折紙学会
発行者	前川 淳	〒113-0001	東京都文京区白山 1-33-8-216
編 集	山口 真／おりがみはうす	TEL & FAX	: 03-5684-6080
		webman@origami.gr.jp	

©Mitani Jun / ©Kamiya Satoshi, Special edition of magazine for the JOAS member, Published on 25, March, 2009 by Japan Origami Academic Society, 1-33-8-216 Hakusan Bunkyo-ku 113-0001 Tokyo JAPAN / Publisher : Maekawa Jun / Editor : ORIGAMIHOUSE

●本誌の無断転載及び複製を禁ず

