

計算機によるボクセルを用いた「折り紙建築」モデルの設計手法

三 谷 純[†], 鈴木 宏 正^{††} 宇 野 弘^{†††}

本稿では折り紙建築の形状を計算機で設計する手法を提案する。折り紙建築とは3次元形状をいわゆる「ポップアップカード」で表現する手法であり、紙で作られた3次元形状を2つ折りで平面へ折り畳めるという特徴を持つ。また折り畳み後は、再度開くことで3次元形状を立ち上げることができる。本稿では特に1枚の紙から、切り込みと折り曲げのみで形を作成し、直角に開いたときに立体が立ち上がるものを対象としている。計算機で折り紙建築を表現するために、ボクセル表現を用いている点が本稿で提案する手法の特徴である。まず、ボクセル表現によって折り紙建築の形状データを保持し、コンピュータグラフィックス(CG)で3D表示する手法、および展開図を生成する手法を提案する。その後、ポリゴンモデルからの折り紙建築用のモデル生成について述べる。これは、ポリゴンモデルをボクセルモデルへ変換した後、折り紙建築としての制約を満たすボクセルモデルへ変換する手法、および工作時間を軽減させるために微細な面を省略する手法から成る。これらの手法を用いた折り紙建築モデルの設計支援システムを開発し、実際に作成した折り紙建築の展開図から紙模型を作成することでその有効性を確かめた。

Computer Aided Design for Origamic Architecture Models with Voxel Data Structure

JUN MITANI,[†] HIROMASA SUZUKI^{††} and HIROSHI UNO^{†††}

Origamic Architecture is a piece of folded paper from which a three dimensional structure “pops up” when it is opened. It sounds like the “Pop Up story book”, but its unique feature is that is made by giving only a few cuts to a piece of paper and can be folded it to fit in an envelope. We propose a new method to design Origamic Architecture models with a computer. The voxel model representation is used to express the structure of Origamic Architecture. With this approach, we can easily generate the CG images and the unfolded pattern of Origamic Architecture models. We also propose a method to generate Origamic Architecture models from polygonal models. We implemented a system based on those methods and demonstrated its usefulness for creating Origamic Architectures.

1. はじめに

折り紙建築とは茶谷正洋氏によって命名された紙工作の手法の1つであり¹⁾、ポップアップカードで3次元形状を表現するものである。折り紙建築は「2つ折りに折り畳め、開くと立体形状が立ち上がる」という特徴があり、書籍に折り込まれたりグリーティングカードに使用されたりするなど、身近なところで使われて

いる。しかし、その設計には図形の知識と経験が必要であり、熟練者の手による試行錯誤で行われてきた。

そこで本稿では、計算機を用いて折り紙建築の設計とその展開図の生成、およびCG(Computer Graphics)表示を行う手法を提案する。折り紙建築には180°に開いたときに形が立ち上がるものなど、製作者の創意工夫による様々な種類のものがあるが^{2),3)}、本稿では特に1枚の紙から構成され、90°に開いたときに3次元形状が立ち上がるものを対象とする。

折り紙建築に関する研究は今まであまりなされていないが、茶谷ら⁴⁾は折り紙建築をCGで表示する例を紹介している。しかし、これはあらかじめプログラムされた例題を表示するためのものであり、自由に設計したものを扱うことはできない。Glassner^{5),6)}は、単純なポップアップカードをCGで表示する手法を提案しているが、複雑な形は考慮されておらず、新しい形状を作成するのが困難だという問題がある。

[†] 東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻

Department of Information Engineering, The University of Tokyo

^{††} 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻

Department of Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo

^{†††} エービーネット株式会社システム部

System Division, abnet corporation

現在、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻

Presently with Department of Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo

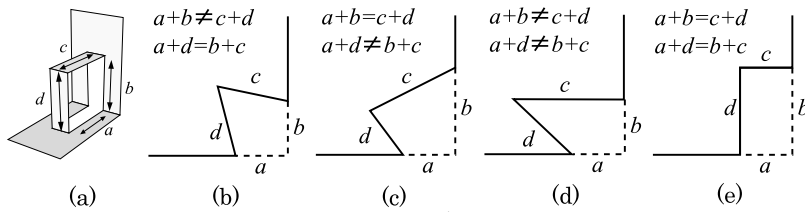


図 1 折り紙建築モデルの側面図

Fig. 1 Side views of an OA (Origamic Architecture) model.

本稿ではボクセルモデルを用いて折り紙建築モデルのデータを保持することで、モデルの構築と CG 表示、展開図の作成を容易に行えることを示し、折り紙建築モデルの新しい設計手法を提案する。

2. ボクセルモデルを用いた折り紙建築の表現

ボクセルモデルとは 3 次元格子状に配列された単位立方体 (ボクセル) の集合で立体形状を表現する手法であり、CG の世界ではソリッドモデルを表現する際に広く用いられている⁷⁾。ここでは、ボクセルモデルによって折り紙建築の形状データを計算機内に保持し、それを CG 表示する方法を示す。

2.1 対象とする形状と折り畳める条件

本稿では 90° に開いたときに 3 次元形状が立ち上がり、二つ折りに畳める折り紙建築を対象とする。図 1 (a) は最も単純な形の折り紙建築の例で、(b) ~ (e) はその断面である。図中の辺の長さを表すスカラー値 $a \sim d$ について、1 枚の紙から作成できる条件は

$$a + b = c + d \quad (1)$$

で表せ、二つ折りに畳める条件は

$$a + d = b + c \quad (2)$$

で表せる。(b) は式 (1) を満たさないために 1 枚の紙から作成できず、(c) は式 (2) を満たさないために二つ折りに畳めない。(d) はどちらの条件も満たさない。(e) は両方の条件を満たすため、本稿で対象とする形状として妥当であり、断面は式 (1), (2) より、 $a = c$, $b = d$ を満たす長方形となることが分かる。

図 2 は断面が長方形になる形状の例で、(a) は直方体、(b) は四角錐の形が 90° に開いたときに立ち上がる (長方形の側面および四角錐の底面には紙の面が存在しない)。それぞれ文献 1) において、「平折り」「はす斜折り」という名称で紹介されている。これらの基本的な形状を組み合わせることで、より複雑な形を構築することができる。本稿では特に図 2 (a) で示される「平折り」の集合によって表現される形を扱う対象とする。

2.2 ボクセルモデルによる形状表現

折り紙建築の形状が「平折り」の集合から成る場合、

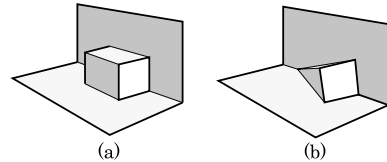


図 2 1 枚の用紙から成り、折り畳める折り紙建築の例

Fig. 2 Examples of the OA made of single piece of paper.

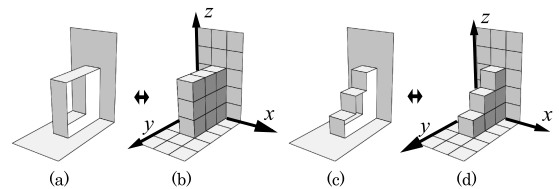


図 3 ボクセル表現と折り紙建築モデル

Fig. 3 Voxel models and OA models.

表現される立体形状は直方体の集合であるため、量子化することでボクセルモデルによって近似的に表現できる (図 3 (b), (d))。また、このボクセルモデルの正面と上面を抽出し、底面と背面となる台紙をあわせれば、ボクセルモデルを折り紙建築として表示できる (図 3 (a), (c))。したがって、ボクセルモデルを用いることにより、対象とする形状データを計算機に保持すること、および折り紙建築モデルを表示することの両方を簡単な実装で行える。図 3 のように座標軸をとると、ボクセルモデルのデータは立体の内外を表す 1 ビットの値 (内部: 1, 外部: 0) を x, y, z の 3 次元に格納した配列

$$\text{cell}[x][y][z] = \{0, 1\} \quad (3)$$

で表現できる。ただし図 2 (a) の平折りの集合で構成されるため、ボクセルモデルは図 3 のような階段形状である必要がある。この条件は次のように表される。

$$\begin{aligned} \text{cell}[x][y][z-1] = 1 \text{ and } \text{cell}[x][y-1][z] = 1 \\ \text{if } \text{cell}[x][y][z] = 1 \text{ (} x \geq 0, y > 0, z > 0 \text{)} \\ \text{cell}[x][y][z+1] = 0 \text{ and } \text{cell}[x][y+1][z] = 0 \\ \text{if } \text{cell}[x][y][z] = 0 \text{ (} x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0 \text{)} \end{aligned} \quad (4)$$

なお、これ以降では式 (4) を折り紙建築制約式と呼ぶ。

2.3 「窓」が存在する形状の表現

折り紙建築制約式を満たすボクセルモデルは図 3(a) の要素から構成される「階段形状」に限定されるため、表現できる折り紙建築の形は大きく制限される。そこで、文献 1) で「窓」として紹介されている図 4(a), (b) のような開口部を持つ折り紙建築も扱えるように拡張する。

窓を持つ折り紙建築のデータを保持するには、式 (3) の形状データに加え、背面 (xz 平面) 上に窓の有無を表す情報があればよい。これは 1 ビットの値 (あり: 1, なし: 0) を x, z の 2 次元に格納した配列

$$\text{isHole}[x][y] = \{0, 1\} \quad (5)$$

で表現できる。以降この配列で表現される窓の情報を窓情報と呼ぶこととする。

あるボクセル ($\text{cell}[i][j][k]$) の正面が境界であるとき ($\text{cell}[i][j][k] = 1$ and $\text{cell}[i][j+1][k] = 0$) に、そこが窓である ($\text{isHole}[i][k] = 1$) 場合には、 $\text{cell}[i][j - (k - h) + 1][h]$ で表現されるボクセルの上面を表示することで (図 5(a)), 図 4 のように窓が存在する折り紙建築を CG 表示できる。ここでの

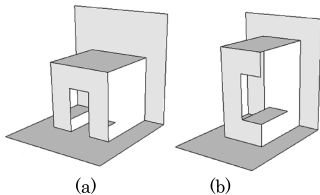


図 4 窓の存在する折り紙建築
Fig. 4 OA model with Window.

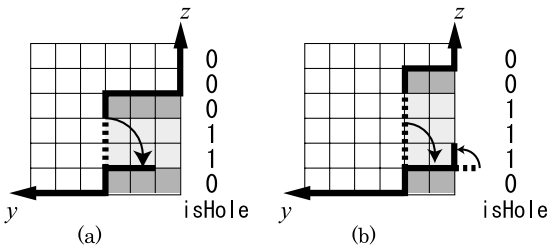


図 5 窓を持つ折り紙建築の CG 表示方法
Fig. 5 CG rendering of an OA which has a window.

h は $\text{isHole}[i][z] = 0$ を満たす、 k より小さい最大の z である。図 5(a), (b) とともに $h = 0$ である。なお、 $j - (k - h) + 1$ がゼロより小さくなった場合は、さらに折り返しを行い、背面の $[i][k - j]$ を表示する (図 5(b))。

2.4 開閉アニメーションの CG 表示

ボクセルモデルは一般に単位立方体の集合で表されるが、この単位立方体の各頂点 (x, y, z) を、次式で変換することで折り紙建築の開閉途中の形状を表現できる。

$$\begin{cases} X = x \\ Y = y - z \cos \theta \quad (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \\ Z = z \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) の θ の値を徐々に変化させることで、折り紙建築の開閉をアニメーションでシミュレーションすることができる。図 6 は CG アニメーションの一部である。

2.5 展開図の生成

ボクセルモデルで表された図 7(a) に示すような折り紙建築に対して図 7(c) の展開図を生成する。対象とする折り紙建築は 1 枚の紙から成るため、折り紙建築の面と展開図を構成する領域は図 7(a) と (b) の $a \sim l$ に示すように、ボクセルの各面と展開図中の正方領域 (セル) が 1 対 1 に対応する。図 7(a) の $a \sim l$ で表される各ボクセルの境界面について、折り紙建築モデル上での隣接セルの有無、およびなす角を調べることで、展開図 (b) 上に現れる山折り線、谷折り線、および切断線を決定することができる。なす角と線種の対応は表 1 のとおりである。表をもとに、対応す

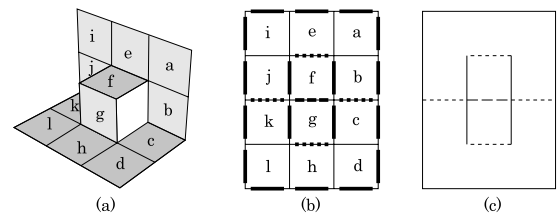


図 7 折り紙建築モデルと展開図
Fig. 7 OA model and unfolded pattern.

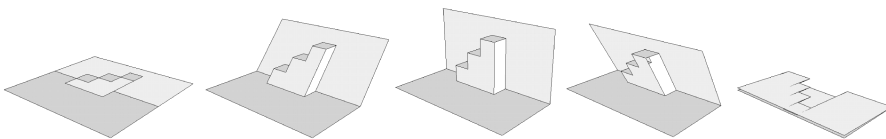
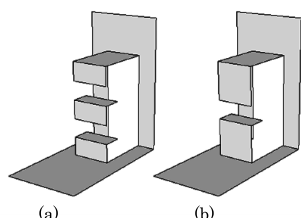


図 6 折り畳み途中の形状表示
Fig. 6 CG animation of folding process.

表 1 隣接ボクセル間のなす角と線種

Table 1 The angle between neighbor faces and line types.

なす角	90°	180°	270°	なし
線種	谷折り	なし	山折り	切断

図 8 実現不可能な開口部を持つ場合
Fig. 8 Unrealizable cases.

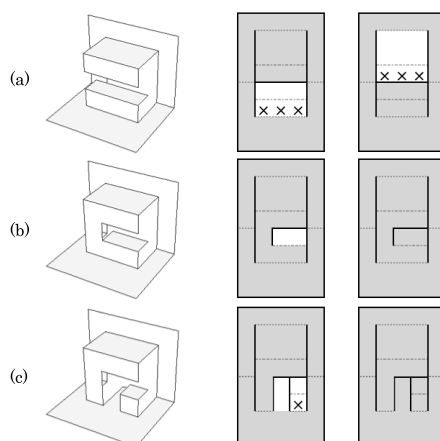
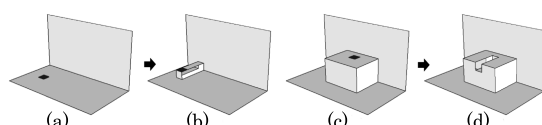
る線分を配置することで展開図を得ることができる。この展開図生成の手法は窓が存在する場合にも有効である。

2.6 折り紙建築として実現できる形の判定

窓を作成することで表現できる形の幅が広がるが、それとともに実際には折り紙建築として工作できない形も作成されうろという問題がある。図 8 は折り紙建築として適切でないものの例である。図 8 (a) には宙に浮いた部分が存在する。(b) は下方と上方から立ち上がっている部分が分離しているため、閉じた状態から開いたときに引き起こされない。これらの形状は折り紙建築として妥当ではないため、計算機内で保持しているデータの妥当性をチェックする仕組みが必要となる。展開図を作成後、次のようなアルゴリズムによって形状のチェックを行うことができる。

- (1) 展開図の各セルについて、以下の方法で巡回を行い、巡回済みのフラグ立てを行う。
 - (a) 展開図の左上隅から開始し、隣接する左、下、および右のセルを再帰的に巡回する。ただし隣接するセルの間に切断線が存在したら巡回しない。
 - (b) 展開図の左下隅から開始し、隣接する左、上、右のセルを再帰的に巡回する。ただし隣接するセルの間に切断線が存在したら巡回しない。
- (2) 展開図の中の正面を成すセルについて、(1)の(a)と(b)のフラグのどちらか一方、または両方が立っていないセルが存在したら折り紙建築として適切でない形状である。

上記のアルゴリズムを適用した例を図 9 に示す。展開図のうち、左側が左上隅から巡回を開始したもの、右側が左下隅から巡回を開始したものである。(a)、(c)は、フラグの立っていない正面のセル(図中×印)が存在するため、適切でない形状であると判定される。

図 9 妥当性の判定
Fig. 9 Validation.図 10 エディタによる編集(黒い四角形はカーソル)
Fig. 10 OA editor (The black square is a cursor).

2.7 エディタの実装

折り紙建築制約式を満たすボクセルと窓情報があれば、それを折り紙建築として作成可能なことを前節までで示した。これらの情報を簡単に作成できれば、一般のユーザでも折り紙建築の設計を行えると考えられる。そこで、対話的かつ簡便なインタフェースで折り紙建築モデルを構築するためのエディタを実装した。エディタでは、カーソルを移動させて、目的位置へボクセルの追加と削除を行える。この操作について、次のような実装を行うことで、生成されるボクセルが十分に折り紙建築制約式を満たすことを保証できる。

- ボクセルの追加操作(図 10 (a) → (b))
 $\text{cell}[i][j][k]$ にボクセルが追加されたときは、自動的に $\text{cell}[i][y][z] = 1$ ($0 \leq y < j$ and $0 \leq z < k$) とする。

- ボクセルの削除操作(図 10 (c) → (d))
 $\text{cell}[i][j][k]$ のボクセルが削除されたときは、自動的に $\text{cell}[i][y][z] = 0$ ($y \geq j$ and $z \geq k$) とする。

エディタはボクセルの編集と窓の指定が行えるようになっており、リアルタイムに CG 表示を行うことで、ユーザは折り紙建築の完成様子を確認しながらモデルを作成してゆけることができる(図 10)。

3. 既存の 3D データからの生成

前章では折り紙建築制約式を満たすボクセルデータ

と窓情報が存在すれば、折り紙建築の CG 表示と展開図の作成を行えることを示した．ところで、CG の世界ではポリゴンモデルを用いた 3 次元形状の表現が一般的であるため、これらの既存のデータを活用できれば作業コストを大きく軽減できる．本章では既存のポリゴンモデルから折り紙建築を作成する方法を述べる．

3.1 ポリゴンデータのボクセルへの変換

ポリゴンデータからボクセルを生成する手法には、Chen ら⁸⁾ による高速変換のためのアルゴリズムなどが研究されているが、折り紙建築で扱う形状はその性質から側面の情報を持たず、底面と背面は平面であるという特徴がある．そのため、正面から投影した各セルの奥行き値が取得できれば十分である．OpenGL ライブラリ⁹⁾ を用いて対象とするポリゴンモデルを正面から正射影でレンダリングすると、そのレンダリング結果から各ピクセルごとの奥行きを表す Depth 値を取得できる．そこで本手法では OpenGL を用いて Depth 値の取得を行い、ポリゴンモデルをボクセルモデルへ変換した．

3.2 折り紙建築制約を満たすボクセルと窓情報の生成

前節の手法で得られたボクセルデータは必ずしも折り紙建築制約式を満たさない．そのため、元の形状特徴をなるべく維持しながら制約式を満たす形に変形させ、それと同時に窓情報の生成を行う．具体的には次の a) ~ c) の処理を行った．

a) 微小凹凸の除去

前節で述べた手法で生成したボクセルデータを折り紙建築制約を満たす形状に変換する際、小さな凹凸がボクセルモデルの全体の形状に影響を与えることがあるため、前処理として微小凹凸の除去を行う．そのための手法として、yz 平面による各 x 座標値の断面について、Erosion と Dilation という 2 つのモルフォロジ処理を組み合わせた Opening および Closing 演算¹⁰⁾ を行う．この演算は 2 値画像の特徴抽出などで用いられる集合操作の 1 つで、微小な凹凸を除去する性質を持つ．本手法では演算の構造要素として、対象ボクセルを中心とする 3×3 四方のボクセルを使用した（このサイズを変更することで除去される微小凹凸の程度を調整できる）．この処理によって微小凹凸が除去される様子を図 11 に示す．

b) ボクセル追加による制約充足

a) の処理の後、折り紙建築制約式を満たすように、ボクセルを追加する処理を行う（図 12）．この処理は次式を z の値について降順に行うことで達成される．

$$\text{cell}[x][y][z] = 1 \text{ if } \text{cell}[x][y][z+1] = 1 \quad (7)$$

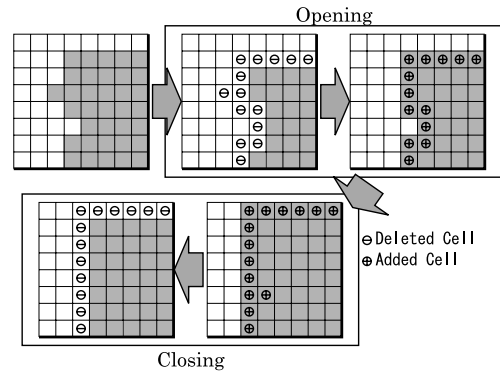


図 11 Opening と Closing 演算による凹凸の除去
Fig. 11 Opening and Closing operation.

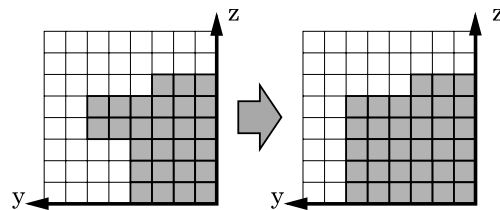


図 12 折り紙建築制約式を満たす形への変換
Fig. 12 Conversion to fill the restrictions.

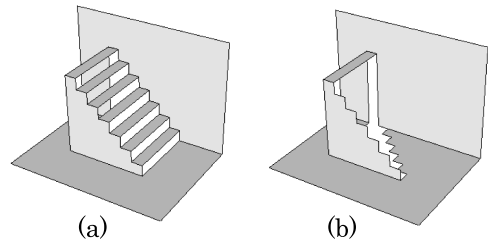


図 13 幅の細い上面の省略
Fig. 13 Clipping the thin faces.

c) 窓情報の生成

b) の処理を行う際に、ボクセルの追加を行った箇所に isHole フラグ（式 (5)）を設定する．フラグを 1 つ立てるごとに前章で述べた形状の妥当性チェックを行い、折り紙建築として不適切な形状になる場合には、フラグ設定を解除する．

3.3 幅の細い上面の省略

座標平面に平行でない面がポリゴンモデルに含まれる場合、本手法では座標平面に平行な面で近似せざるをえないため、非常に多くの面が生じてしまう問題がある．幅の細い面が多数存在する場合、CG 表示ができて実際に工作することが現実的でない場合がある．そこで代替手法として、図 13(a) を (b) に示すような、幅の細い上面を省略した形状で出力し、工作にかかる作業を軽減する．

省略する上面は、幅が閾値（図 13 では 1 ボクセル分）以下であり、省略しても折り紙建築として妥当な形を保つものである。たとえば図 13 (a) のすべての上面を省いてしまうと 90° に開いたときに正面部が立ち上がらない。この妥当性の判定は 2.6 節で用いた手法で行える。図 14 (a) は閾値を 1 ボクセル分に設定した場合の正面図の例である。太線は上面を生成する箇所を表す。b, c, d の列はそれぞれ幅が 1 の上面を持つが、支えを残すために最も高さのある a は省かない。f, g, h の列は上面の幅が閾値より大きいため何も行わない。上面を省略した箇所を CG 表示する際には、本来上面に使用されるべきであった面を図 14 (b) に示すように背面へ移動する。移動先が底面より下に移動するようであれば図 14 (c) のように、再度折り返すことで底面を表示するようにする。これは、2.3 節で述べた窓の CG 表示と同等の方法である。

4. 結果

本稿で提案した手法を PentiumIII 1.2GHz、メモリ 512MB の PC 上に実装した。折り紙建築モデルを対話的インタフェースで生成した結果と、既存のポリゴンモデルから作成した結果をまとめる。

4.1 対話的インタフェースによる作成と教育現場での活用例

2.7 節で実装したエディタを用い、対話的に折り紙建築を作成した結果を図 15 に示す。(a) はユーザが作成したボクセル表現の建築物モデルであり、窓情報の

存在する箇所はボクセルを非表示としている。(b) は (a) のボクセルモデルで表される折り紙建築を CG 表示したものである。(c) は 2.5 節で述べた手法で生成した展開図であり、(d) はその展開図を元に工作用紙で作成した折り紙建築である。ボクセルの解像度は奥行きと高さが 40、横幅が 80 であり、インタラクティブにモデルの構築と CG 表示を行えた。ユーザがモデルの作成に要した時間は 30 分程度である。

また、本稿で提案した手法を実装したシステムを、宮城県仙台市の田子中学校の生徒 300 人に使用していただき、情報教育のツールとしても有効であることが確かめられた。図 16 (a) は中学生の生徒が PC 上で折り紙建築の作品を設計している様子、(b) は生徒作品の一例である。

4.2 既存のポリゴンモデルからの作成

既存の建築物のポリゴンモデルから本システムを用いて折り紙建築模型を作成した結果を図 17 に示す。(a) は入力に用いた建築物のポリゴンモデル、(b) は (a) の前方半分をボクセルモデルに変換し、3.2 節で述べた手法で折り紙建築制約式を満たすように処理したものである。(c) は折り紙建築を CG 表示したものであり、(d) は生成された展開図である。(e) は (d) を工作用紙で作成した作品の写真である。ボクセルの解像度は奥行きと高さが 40、横幅が 80 であり、微小凹凸を除去する処理には 60 ミリ秒、折り紙建築制約を満たすボクセルへの変換と窓情報の生成には 2.5 秒かかった。

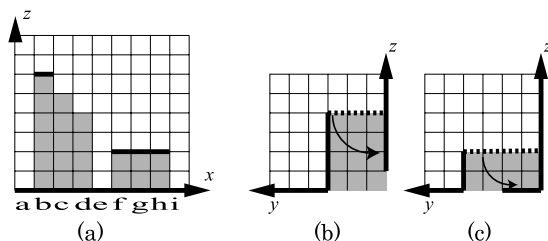


図 14 上面の省略 (a) 正面図、(b), (c) 側面図

Fig. 14 Clipping of upper faces ((a) front, (b), (c) side).



図 16 教育現場での活用

Fig. 16 Practical use in a school.

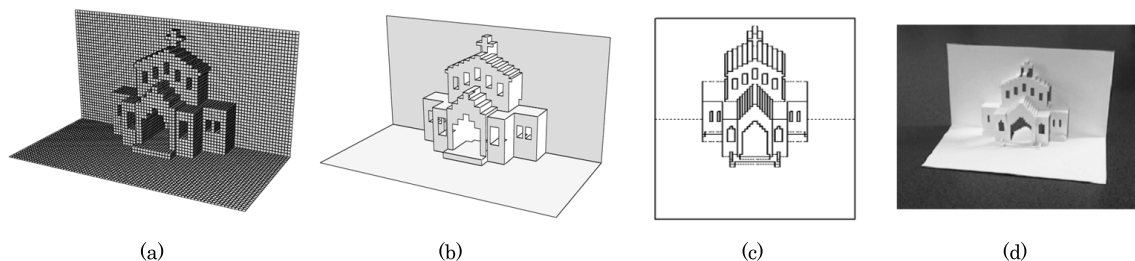


図 15 対話的な折り紙建築の作成

Fig. 15 OA model constructed interactively.

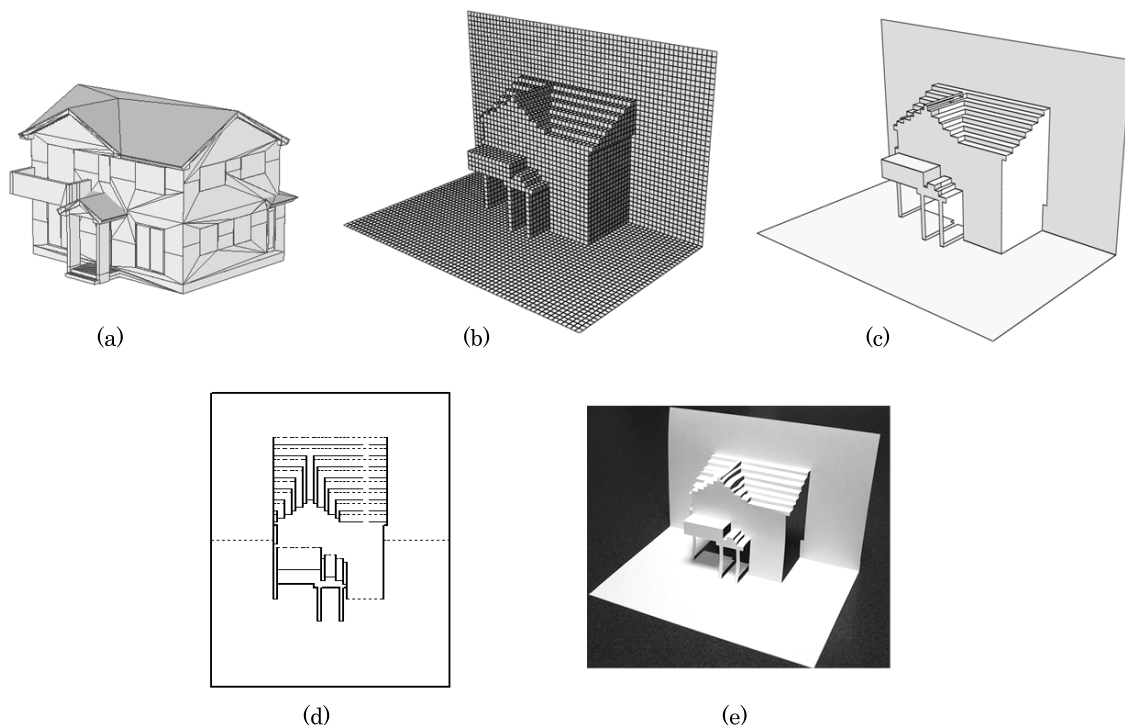


図 17 ポリゴンモデルからの作成
Fig. 17 OA model generation from a polygon.

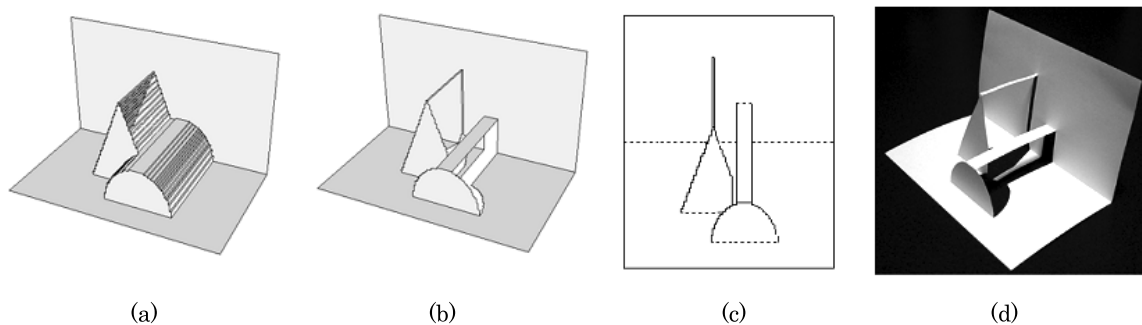


図 18 幅の細い上面の省略
Fig. 18 Clipping the thin faces.

図 18 は 3.3 節で述べた幅の細い上面の省略を行った様子である。ボクセルの解像度を高めて斜線部と曲線部の近似精度を高めた場合でも工作にかかる手間を大幅に軽減できる様子を確認できる。

5. 結 論

平折りと窓の集合で表現される折り紙建築について、ボクセルを用いることでデータの保持、CG 表示、および展開図の生成を容易に行えることを示した。また、ポリゴンデータをボクセルデータに変換し、折り紙建築制約式を満たすように変換を行うことで、既存のボ

リゴンモデルから折り紙建築を生成する手法も提案した。本稿で提案したこれらの手法を PC 上に実装し、実際に折り紙建築の作品を作ることでその有効性を示した。

6. 今後の展望

本研究で提案した手法を用いることで、一般ユーザが折り紙建築の設計を容易に行えるようになった。しかしながら、本手法で作成できる折り紙建築の形状は平折りと窓の集合で表現できるものに限られているため、よりバリエーションに富んだ作品を作れるように

するための改良が望まれる。従来の人の手による折り紙建築には曲線を含むものや、用紙を切り抜いたパーツを組み合わせることで、 180° に開いたときに形が立ち上がるようにしたものなど、多くの趣向を凝らした作品が見られ、これらを本稿で提案したボクセルデータによる形状表現で扱うのは難しい。より自由度の高い作品を作れるようにするには、ボクセルデータとは異なる、新しいデータ構造の考案が必要であろう。

謝辞 本研究の一部は情報処理振興事業協会 (IPA) の委託により財団法人ソフトウェア工学研究財団 (RISE) が実施した平成 13 年度「高度情報化支援ソフトウェアシーズ育成事業」での支援を受けて行ったものである。また、宮城県仙台市の田子中学校では、折り紙建築の作成を授業の中で行っていただき、評価をしていただいた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 茶谷正洋：折り紙建築虎の巻，彰国社 (1985)。
- 2) 中沢圭子：折り紙建築グリーティングカード集，彰国社 (1994)。
- 3) 茶谷正洋，中沢圭子：折り紙建築京の旅，彰国社 (1994)。
- 4) 茶谷正洋，中村倭文夫，安藤直見：事例パソコン折り紙建築と折り紙，講談社 (1987)。
- 5) Glassner, A.: Andrew Glassner's Notebook, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.22, No.1, pp.79–86 (2002)。
- 6) Glassner, A.: Andrew Glassner's Notebook, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.22, No.2, pp.74–85 (2002)。
- 7) Kaufman, A., Cohen, D. and Yagel, R.: Volume Graphics, *IEEE Computer*, Vol.26, No.7, pp.51–64 (1993)。
- 8) Chen, H. and Fang, S.: Fast voxelization of three-dimensional sythetic objects, *Graphics Tools*, Vol.3, No.4, pp.33–45 (1998)。
- 9) Board, O.A.R.: OpenGL リファレンスマニュアル第 2 版，ピアソン・エデュケーション (1999)。
- 10) 間瀬 茂，上田修功：モルフォロジーと画像解析，電子情報通信学会誌，Vol.74, No.2, pp.166–174 (1991)。

(平成 14 年 9 月 26 日受付)

(平成 15 年 3 月 4 日採録)



三谷 純

1975 年生。2000 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程修了，同博士課程進学，2003 年精密機械工学専攻へ転専攻，現在に至る。コンピュータグラフィックスおよび計算機を用いたペーパークラフトの設計支援に関する研究に従事。精密工学会，日本図学会会員。



鈴木 宏正 (正会員)

1957 年生。1986 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了・工学博士。1987 年東京大学助手 (教養学部)，1988 年同講師，1989 年同助教授。1994 年同工学系研究科精密機械工学専攻助教授，2003 年同教授，現在に至る。この間，機械設計 CAD のための製品情報モデリングや形状モデリングに関する研究に従事。2000 年より (株) エリジオン取締役を兼業。精密工学会，ACM，IEEE 等の会員。



宇野 弘

1964 年生。1987 年中部大学土木工学科卒業。2000 年 4 月エービーネット株式会社入社，2000 年 5 月同取締役就任，現在に至る。