

物理シミュレーションを用いたポップアップカード設計支援システム

-An Interactive Design System for Pop-Up Cards with a Physical Simulation-

飯塚里志† 遠藤結城† 三谷純†‡ 金森由博† 福井幸男†

Satoshi IIZUKA†, Yuki ENDO†, Jun MITANI†‡, Yoshihiro KANAMORI† and Yukio FUKUI†

† 筑波大学 † University of Tsukuba ‡ JST ERATO

E-mail: {iizuka,endo}@npal.cs.tsukuba.ac.jp, {mitani,kanamori,fukui}@cs.tsukuba.ac.jp

1 はじめに

ポップアップカードは、畳まれたカードを開いたときに立体が立ち上がるものであり、その動きを楽しむことができる。ポップアップカードには、1枚の紙に切り込みを入れて90度を開いたときに立体が立ち上がるものと、複数の部品を組み合わせて180度を開いたときに立体が立ち上がるものがあり、それぞれ平坦に折りたたむための幾何的な制約を満たす形状をしている。ポップアップカードを設計するには、この制約に関する知識が必要であり、経験の無い人が手作業でオリジナルのカードを作ることは難しい。特に180度型は複数の部品の組み合わせで全体の形が構成されるため、1枚の紙から作る90度型に比べると、折り畳みと立ち上がりの仕組みを直感的に理解しにくい上、それぞれの部品同士が衝突しないような配置を考える必要がある。これは一般的に試行錯誤を重ねることによって解決されるが、この作業には多大な労力を要する。

このため、近年では計算機を用いてポップアップカードの設計を支援する手法が提案されている[3][4][10]。これらは、ポップアップカードを構成する各部品の動きをそれぞれ解析的に求め、開閉シミュレーションを行うことで部品同士の衝突検知を行っている。しかしこれらの手法は、面の数が多い部品や曲面形状を持つ部品など、その挙動を解析的に求めることが困難な部品を扱うことができなかった。

本論文では簡易な物理モデルを用いて開閉シミュレーションを行い、対話的な操作で直観的にポップアップカードをデザイン可能な設計支援システムを提案する。物理シミュレーションを用いることで、多角錐や円柱のように面の数が多く、ときには紙の弾性を活かした部品など、その挙動を解析的に求めることが困難な部品を扱うことができるようになる。提案システムにより、既存手法よりもさまざまな種類の部品の使用が実現でき、これらの幾何的な制約を考慮した部品編集により、多種類の部品を組み合わせた複雑なポップアップカードを設計できることを示す。

2 関連研究

ポップアップカードに求められる幾何的な制約を理解して、手作業でオリジナルのカードを設計することは困難で

ある。幾何的な制約を満たす形を、計算機の支援によって設計することは有益なアプローチであり、これまでにいくつかのシステムが提案されている。

90度型ポップアップカード。Mitaniら[8]はボクセル表現を用いたポップアップカード設計手法を提案した。この手法では、ユーザが対話的に追加・消去したボクセルモデルの上面および正面の集合によってポップアップカードの形状を設計できることが示されている。また、Hendrixら[5]はユーザが2次元上で展開図編集を行うことでポップアップカードを設計できるシステムを提案した。Liら[7]は入力として与えられた3次元ポリゴンメッシュに対し、自動的にポップアップカードを生成する手法を提案した。

これらの手法は、1枚の紙に切り込みを入れて作成されるという90度型の幾何的な制約を用いて実現しているため、複数の部品で構成される180度型の設計には適用できない。180度型ポップアップカード。Mitaniら[9]は入力として与えられた立体形状の垂直断面を格子状に組み合わせることによる、180度型折り紙建築の設計システムを提案した。この手法では、複数の部品を積み重ねたポップアップカードを設計することはできない。Leeら[6]はV-foldの組み合わせで、180度型ポップアップカードを設計するために必要な幾何学的制約を示したが、対話的な設計手法については触れていない。

Glassner[3, 4]は、V-foldとsingle-slitと呼ばれる部品について、開閉のシミュレーションに必要な頂点位置の解析的な求め方を示した。Okamuraら[10]はこのGlassnerらの手法をもとに、ポップアップカードの設計を支援するインタフェースを提案し、ユーザテストによりその有効性を示した。彼らのインタフェースでは、V-foldやsingle-slitにもとづく基本部品が予めシステムに準備されており、それを配置、編集することで、180度型ポップアップカードを設計できる。本システムと最も類似したシステムである。しかしOkamuraらは、部品の挙動を解析的に求めており、使用できる部品は5種類だけである。我々のシステムでは、パネマスモデルを用いることで、開閉シミュレーション時の頂点移動を簡単に計算することができるため、異なる形状の部品をシステムに実装することが容易であり、多角錐や円柱のように面の数が多く、ときには紙の弾性を活かした部品など、その挙動を解析的に求めることが困難な部品

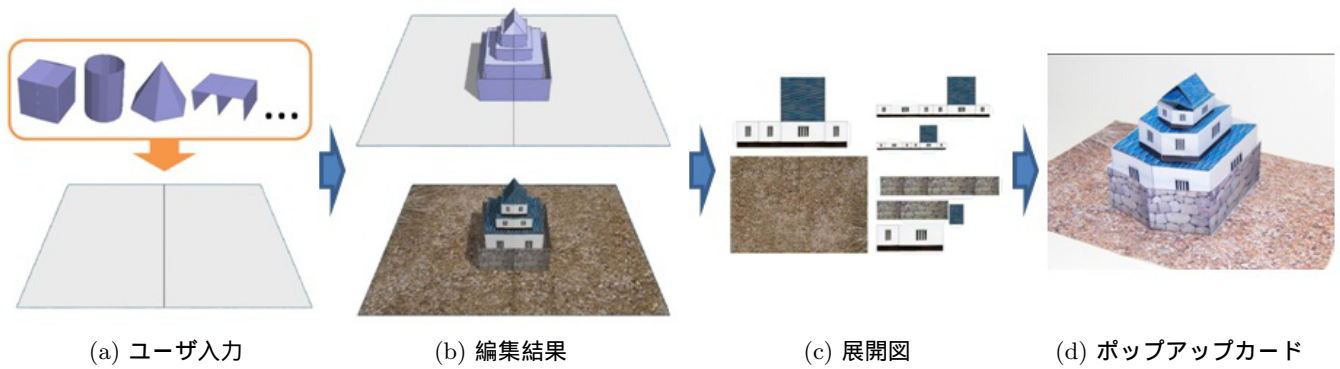


図 1: システム概要 . (a) ユーザは基本部品を台紙に設置していき , 形状・テクスチャを編集する . 編集結果 (b) から自動で展開図 (c) が出力され , これを印刷し組み立てることで実際にポップアップカードを作成できる (d) .

を扱うことができる . 本システムでは , 全部で 14 種類の基本部品が準備され , それぞれの幾何的制約を満たす形状編集が可能である . これにより , 既存手法よりもバリエーションに富んだポップアップカードの設計が可能である .

3 ポップアップ形状の構築

本システムを用いた , ユーザによるカードデザインの流れを図 1 および以下に示す :

1. あらかじめ準備されている基本部品群の中から , 使用するものを選択し , 配置する場所を指定する .
2. 配置した基本部品の位置や形状 , テクスチャを編集する . システムにより可能な編集操作が制約され , 編集後の形も , 折り畳み可能であることが保証される .
3. 開閉の様子をアニメーション表示で確認する . 開閉によって部品が衝突する , または部品が台紙からはみ出す場合には , システムがその旨のメッセージを画面に表示する .
4. 手順 1,2 および 3 を任意の順番で繰り返し , 目的の形を完成させる .
5. 自動生成される展開図を印刷し , 組み立ててポップアップカードを作成する .

ユーザはあらかじめ用意された基本部品を選択して台紙に配置し , その部品に対して , 変形やテクスチャを編集することでポップアップカードをデザインする . 以降では , この形状構築の手法について詳細を述べる .

3.1 基本部品群とその配置

本システムに実装されている基本部品群を図 2 に示す . これらの部品の多くは一般的なポップアップカードによく使用されるものである [1] . それぞれの部品は三角形面ま

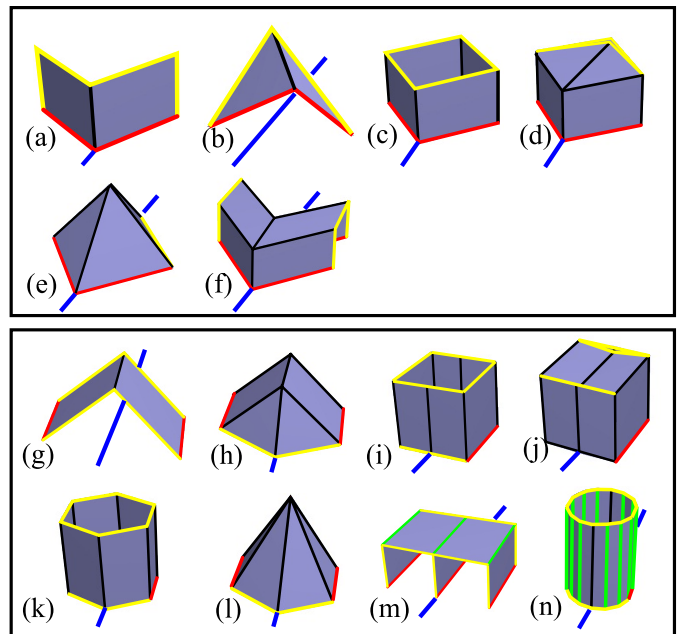


図 2: 提案システムに実装されている基本部品群 . これらの基本部品は台紙への固定の仕方の違いから V-fold 型 ((a) (f)) と parallel-fold 型 ((g) (n)) の 2 種類に分類される .

たは四角形面の集合で表される立体であり , あらかじめ構成面の稜線に対しては次の属性が定義されている :

- 台紙または既に存在する部品に固定する稜線 (図 2 中の赤い辺)
- 折れ曲がる稜線 (図 2 中の黒い辺)
- 折れ曲がるが , 紙の弾性によって広がる力を持った稜線 (図 2 中の緑の辺)
- 部品の縁に対応する稜線 (図 2 中の黄色の辺)

これらの部品は , 設置する際に基準となる折り線 (図 2 中の青い線 , 以降では基準折り線と呼ぶ) に対する固定の仕方によって大きく 2 つに分類される . 本論文ではこれら

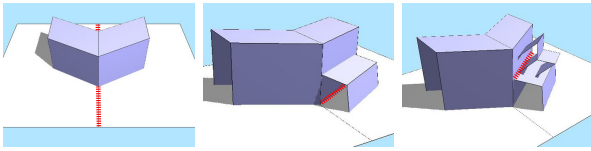


図 3: 部品の設置．部品は基準折れ線上（赤線）に設置される．

を V-fold 型（図 2(a)～(f)）と Parallel-fold 型（図 2(g)～(n)）と呼ぶ．V-fold 型は基準折れ線に対して固定される辺が V 字のように配置され，Parallel-fold 型は固定される辺は基準折れ線に対して平行となる．図 2(a)(c)(d)(g) は Okamura らのシステムにも実装されているが，それ以外は実現されていない部品である．なお，部品 (g) は Okamura らのシステムにおける even-tent と uneven-tent の 2 種類の部品を表している．

ユーザは基本部品群から目的の部品を選択し，続いて基準折れ線を指定して，新しい部品の追加を行う．基準折れ線は，最初の部品は台紙中央の折れ線となるが，それ以降は図 3 に示すように，すでに配置済みの部品と台紙，または 2 つの部品によって構成される折れ線でも構わない．このように基本部品を逐次重ねて行くことで図 1(d) に示すような複雑な形を構築することが可能である．

3.2 部品の編集

ユーザは，それぞれの基本部品に対して大きさや傾きなどの形状編集および位置の変更を行うことができる．変形のインタフェースは基本的に Okamura らのシステムと同様である．形状編集の際，平坦に折りたたまれる制約条件を満たす操作だけが許容されるため，編集後も折りたためることが保証される．図 4 は図 2(f) に示す基本部品を編集によって形を変えた例である．

また，部品のそれぞれの面のテクスチャを編集することで，作品の見栄えをよくすることができる．本システムでは，選択した面に画像を貼り付ける機能と，選択した部品のすべての面に同じ画像を貼り付ける機能が実装されている．画像に設定された透過度を表す値を読み込み一部を非表示にすることで，部品の構成面を複雑な凹凸の輪郭を持った形にすることも可能である（図 5）．

4 開閉の物理シミュレーション

ポップアップカードは，構築された形状が平坦に折りたたまれ，またそれが立ち上がる様子を見る人に驚きを与える．そのため，折りたたみと立ち上がりの様子を事前に確認できることは重要である．また，個々の部品は折り畳めることが保証された状態で台紙に設置されているが，複数

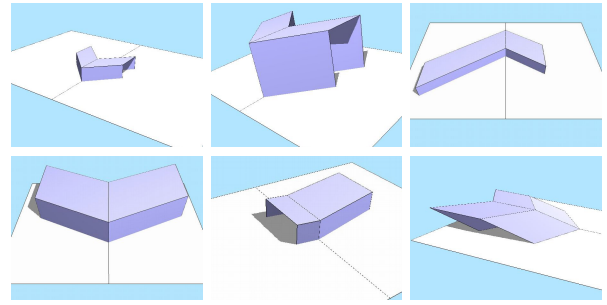


図 4: 部品の編集．ユーザは部品の幅や高さ，奥行き，傾きなどを変えることができる．この例はすべて図 2 の部品 (f) から得られた形状であり，すべて折り畳むことができる．

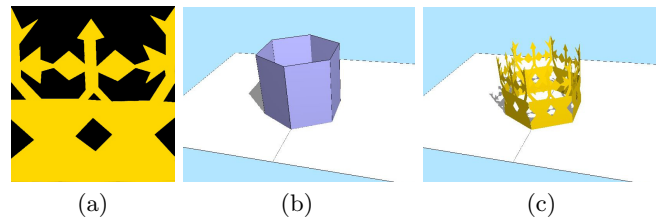


図 5: テクスチャ編集．透過部分（黒色）を含むテクスチャ画像 (a) を基本部品 (b) に貼り付けることで部品の形状を編集することができる．

の部品が組み合わさっている場合，台紙を閉じる際に部品同士が衝突してしまう可能性がある．また，意図せずに台紙から部品がはみ出してしまうこともある．このような問題を事前に確認するためにも，開閉の様子をアニメーションで提示する必要がある．

そこで本システムではバネマスモデルによる物理シミュレーションを用いて開閉時の挙動をシミュレートし，ユーザに提示するとともにエラー検出を行う．図 2(m), (n) のように紙の折り目や弾性を考慮する必要がある部品には，稜線にヒンジバネを適用することで，既存手法では実現されていない円筒などの部品を扱うことができる．

4.1 バネマスモデル

バネマスモデルを用いることで紙の形状が維持できることは Furuta ら [2] によって示されている．彼らは，マウスによる仮想折り紙の対話的操作を表現するためにバネマスモデルを用いている．この手法では，折り紙の面が歪んだり，接続が切れたりすることがないように，バネマスモデルを用いて各頂点座標を修正している．我々はこの手法をポップアップカードの挙動シミュレーションに応用する．

各部品を構成する面は三角形または四角形であるため，それぞれの頂点を図 6 に示すように仮想的なバネでつないだ構造とする．ある頂点が動いたとき，その頂点につながれた別の頂点はそのバネの自然長を維持するように移動することで，構成面が一定の形に保たれる．頂点 i にかかる

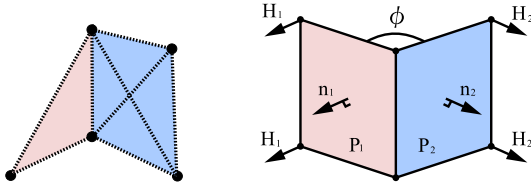


図 6: バネマスモデル. (左)面の各頂点がバネで繋がれ、(右)2つの面が角度を保つようにヒンジでつながれている.

力を \mathbf{F}_i とすると、現在時刻 t に対する Δt 秒後の速度 \mathbf{v}_i と座標 \mathbf{r}_i は以下のように算出される.

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \left\{ k (|\mathbf{r}_{ij}| - L_{ij}) \mathbf{r}_{ij} - D \mathbf{v}_{ij} \right\} \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_i(t + \Delta t) = \mathbf{v}_i(t) + \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m} \Delta t \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_i(t + \Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{v}_i(t) \Delta t \quad (3)$$

ここで k はバネ定数, L_{ij} はバネの自然長, \mathbf{r}_{ij} は頂点 j に対する頂点 i の相対座標, \mathbf{v}_{ij} は頂点 j に対する頂点 i の相対速度, D はダンパー定数, m は頂点の質量である. 時間積分にはオイラーの陽解法により数値積分を行う. また, 提案システムでは $k = 8$, $D = 0.02$, $m = 100$ とした.

一方で, 台紙や他の部品に固定された頂点は, その位置から動かないようにする必要がある. これらの頂点は台紙または固定されている面の位置の決定後, 固定されている点の座標に移動させる. この頂点移動にあわせて, 他の頂点がバネによって紙の形状を保つように動き, その結果部品の挙動を再現することができる.

4.2 ヒンジバネモデル

バネマスモデルに基づく物理シミュレーションによって, 台紙を開閉したときの各部品の動きを再現できる. しかし, バネマスモデルは各頂点をつないだすべてのバネが自然長になったとき頂点移動が収束するため, 図 2(m) のような部品では, 台紙を開閉したときに図 7 上段のように, 本来立ち上がるはずの部品が立ち上がらないまま動きを止めてしまう. これは折り線での紙による弾性が考慮されていないためである. そこで本システムでは, 弾性によって広がる力の働く稜線には, それぞれの面同士の角度を一定に保つような力を発生させる (図 6(b)). これをヒンジバネと呼ぶこととする. ヒンジバネによってつながれた2つの面の単位法線ベクトルをそれぞれ $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$, 初期角度を ϕ_0 , その角度を ϕ , ヒンジ定バネ数を k_h とすると, 面 1, 2 に働くヒンジバネによる力 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ は次のように表される.

$$\mathbf{H}_1 = k_h (\phi_0 - \phi) \mathbf{n}_1 \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_2 = k_h (\phi_0 - \phi) \mathbf{n}_2 \quad (5)$$

提案システムでは, $k_h = 0.02$ としている.

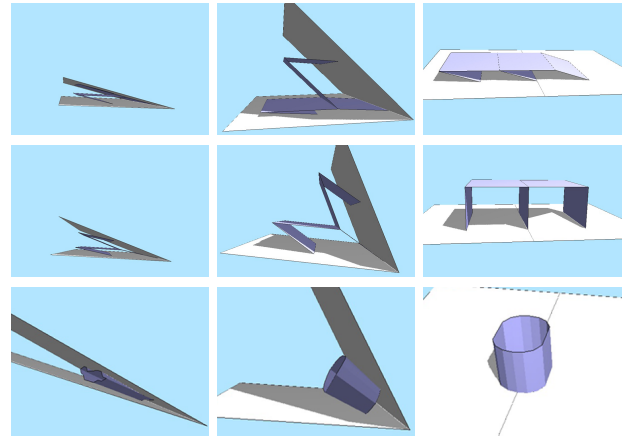


図 7: (上段)バネマスモデルのみの部品の動きと(中・下段)ヒンジの力を加えた部品の動き.

これらの力をそれぞれの面の頂点に加えることで, 各頂点の移動を修正する. これにより, 部品の各面が初期角度に近づくように移動するため, 部品の折り目の弾性を考慮した部品の挙動を再現することができる (図 7 中段). また, これを応用することで円筒状の部品を扱うことも可能となる. 円筒型部品に対しては, 通常のパネに加え, 間に1つの頂点を挟んで隣接する2頂点間にもバネをつなぎ, 隣り合う面同士をヒンジでつなく. このヒンジには初期角度として180度が与えられている. これにより, 隣り合う面同士が水平になろうとする力が加わるため, 紙の弾性を表現することができる. この手法を用いた円筒の挙動を図 7 下段に示す. この円筒は, 円を14分割した近似的なものであり, 正確に円形状を表しているわけではない. しかし, この円筒は実際の円筒に近い動きを示し (図 7), 出力された展開図を用いて円筒状のポップアップカードを作ることができる (図 9 下段).

4.3 エラー表示

前述のシミュレーションモデルにより, 台紙を開閉したときの各部品の挙動をシステム上で再現できる. これを用いて部品同士が衝突したり台紙からはみ出したりしないかを判定する. 本システムにおいて部品同士の衝突判定は, 部品の各辺が他の部品の面を貫通しているかで判断する. また, はみ出し判定は台紙を閉じたとき, 単純に部品の各頂点座標が台紙の内側にあるかで判断する. この結果をシステムがメッセージとして提示することで, ユーザは部品の衝突やはみ出しを避けながら設計することができる.

5 結果

本システムはライブラリとして OpenGL, GLUT を用いて C++ 言語で実装した. 図 9, 10 は提案システムを用い

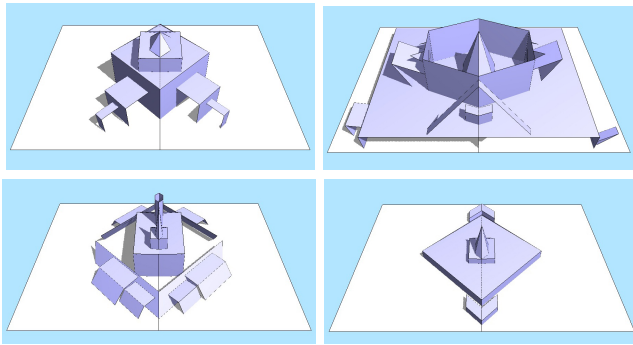


図 8: 4 人の被験者が設計したポップアップカード。

て設計したポップアップカードの例である。これらの設計には約 10 分から 20 分の作業時間を要した。ただし、テクスチャはあらかじめ用意されていたものを用いた。図 9 上段は図 2(g),(i),(j) の部品を用いて設計したポップアップカードである。この例では部品を 4 段積み重ねることで、立体的な城を表現している。図 9 中段は円筒と V-fold から構成されるポップアップカードである。この例ではピサの斜塔を表現するため、円筒が少し傾けられて設置されている。このような設計も本システムを用いて実現でき、実際に傾きがある円筒をもつポップアップカードが作成できているのがわかる。図 9 下段では、8 つの部品を組み合わせることでポップアップカードを設計している。これらの例では既存手法で示されていない部品がそれぞれ使用されている。つまり、これらは既存手法では設計できなかったが、提案システムによって初めて設計できるようになった作品である。

一般ユーザが提案システムを使用して、どの程度の作品を作れるか調べるために、4 名の被験者を対象にユーザテストを行った。10 分程度の説明の後、テクスチャを使用せずに自由に作成するように指示した。その結果できた作品が図 8 である。設計に要した時間はすべて 15 分程度であり、どの作品も問題無く平坦に折りたためることがシミュレーションで確認された。

6 まとめ

本研究では、物理シミュレーションを用いた対話的なポップアップカード設計支援システムを提案した。本システムでは、パネマスモデルやヒンジパネモデルによる物理シミュレーションを行うことで、既存手法では示されていない様々な部品の挙動のシミュレーションが可能となり、多数の基本部品の準備を実現できた。また、それぞれの部品の制約を踏まえた設置・編集機能により、ユーザはポップアップカードの幾何的制約をほとんど意識することなくポップアップカードを設計することが可能である。

基本部品はある程度の形を変更できるが、構成面の形を

大きく変えることは難しい。そこで、本システムでは値を持ったテクスチャを用いることで、構成面の形の外観を変更できるようにした。しかしながら、この形状の変化は物理シミュレーションには反映されないため、衝突判定などは元の形状に対して行われてしまうという問題がある。また、部品が衝突した場合は、その旨のメッセージを表示するだけで、衝突が及ぼす形状変形は実現されていない。今後の展望として、構成面の形を考慮した部品の衝突判定および、衝突後の変形をシステムに組み込みたい。

参考文献

- [1] Elements Of Pop Up: A Pop Up Book For Aspiring Paper Engineers.
- [2] FURUTA, Y., KIMOTO, H., MITANI, J., AND FUKUI, Y. 2007. Computer model and mouse interface for interactive virtual origami operation (in Japanese). *IPSJ Journal* 48, 12, 3658-3669.
- [3] GLASSNER, A. 2002. Interactive pop-up card design, part 1. *Computer Graphics and Applications, IEEE.*, 22, 1, 79-86.
- [4] GLASSNER, A. 2002. Interactive pop-up card design, part 2. *Computer Graphics and Applications, IEEE.*, 22, 2, 74-85.
- [5] HENDRIX, S. L., EISENBERG, M. A. 2006. Computer-assisted pop-up design for children: computationally enriched paper engineering. *Adv. Technol. Learn.*, 3, 2, 119-127.
- [6] LEE, Y. T., TOR, S. B., SOO, E. L. 1996. Mathematical modelling and simulation of pop-up books. In *Proc. of Computers & Graphics 1996*, 20, 1, 21-31.
- [7] LI, X. Y., SHEN, C. H., HUANG, S. S., JU, T., HU, S. M. 2010. Popop: Automatic Paper Architectures from 3D Models. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of Siggraph 2010)*, 29, 4, article 111.
- [8] MITANI, J., SUZUKI, H. UNO, H. 2003. Computer aided design for origamic architecture models with voxel data structure (in Japanese). In *Proc. of Transactions of Information Processing Society of Japan*, 44, 5, 1372-1379.
- [9] MITANI, J. and SUZUKI, H. 2003. Computer aided design for 180-degree flat fold origamic architecture with lattice-type cross sections (in Japanese). *Journal of graphic science of Japan*, 37, 3.
- [10] OKAMURA, S. and IGARASHI, T. 2009. An Interface for Assisting the Design and Production of Pop-Up Card, In *Proc. of Smart Graphics 2009*, 68-78.



図 9: 提案システムによるポップアップカード作品例．上から順に城，亀，ピサの斜塔をモデルとした作品であり，左から提案システム上のスクリーンショット，展開図，作成されたポップアップカードである．

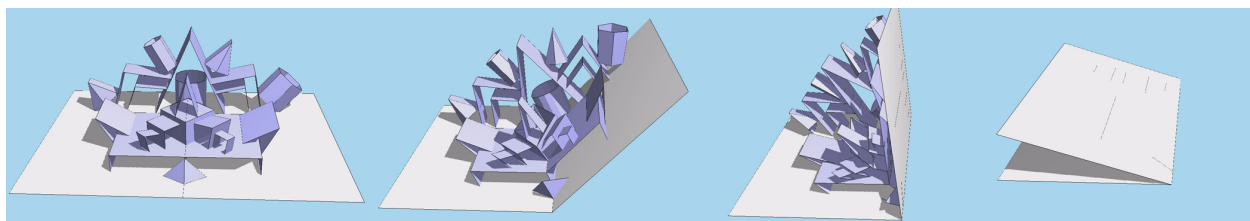


図 10: 複雑な構造をしたポップアップカードの開閉シミュレーション．