

伸縮性の小さい薄膜素材による風船形状設計のための 物理シミュレーションを統合したデザインシステム

古田陽介^{†1,†2} 梅谷信行^{†1,†3} 三谷 純^{†1,†2}
五十嵐 健夫^{†1,†4} 福井幸男^{†2}

近年では一般ユーザが、身の回りのものを対話的な操作で簡単に設計できるようにするための研究が盛んに行われている。これらには、スケッチインタフェースと物理シミュレーションを組み合わせたものが多い。本稿では、これらの基本コンセプトに則り、アルミの薄膜を利用した風船のような、伸縮性をほとんど持たない膜状の素材から立体的な形を作るためのシステムを提案する。そのために、目的とする3次元の形を実現するための、2次元の型紙を本システムによって自動生成する。本研究では形状設計システムにDKTシェル要素に基づく有限要素法の物理シミュレーションを組み込み、完成形状の輪郭線の入力と、表面のテクスチャの入力をマウスストロークで対話的に行えるようにした。

A Film Balloon Design System integrated with Shell Element Simulation

YOSUKE FURUTA,^{†1,†2} NOBUYUKI UMETANI,^{†1,†3}
JUN MITANI,^{†1,†2} TAKEO IGARASHI^{†1,†4}
and YUKIO FUKUI^{†2}

It is getting common to study about interactive CAD system that enables novice users design their own daily objects by themselves. Most of these systems combine sketch interface with physical simulation. In this paper, standing on this concept, we propose a system for designing film balloons made with non-stretchy material such as aluminum or plastic film. The 2D pattern is generated automatically by our system. We implemented the system by using a FEM based on DKT shell elements and a sketch interface which enables users design the outline and textures of the assembled model.

1. はじめに

今日では、工業製品や日用品の形状を設計する上で計算機の支援は無くしてはならないものであり、3DCADシステムが形状設計の段階で広く使用されている。さらに近年では、専門的な知識を持たない一般ユーザが、対話的に意図した形状を計算機内に構築するためのユーザインタフェースに関する研究が盛んに行われている。

このようなソフトウェアに関する技術が発展する一方で、さらに最近では光造形法や粉末法を用いた三次元造形装置の低価格化と高性能化により、計算機で設計された形状を、実在する物質として容易に実現できるハードウェア環境も整いつつある。しかしながら、目的の形が定まっても、それを実際にモノとして実現することが困難な場合も多々ある。例えば、風船やヌイグルミのように、薄い素材（2次元空間で形状が定義される素材）を用いて立体的な形を作ろうとした場合、意図した形となる適切な2次元の型紙形状の集合を決定するのは大変難しい問題である。そのため、従来はその設計に制作者の経験と勘が必要とされ、また実際の素材を用いながら度重なる試行錯誤も必要であった。

そこで、製品の試作を行わずCADで設計した部品の挙動を計算機内で評価することが可能なCAEが近年ではものづくりの現場で必要不可欠なものとなっている。現在ではその精度も向上し、試作を全く行わずCAEによる試験のみで評価を行うこともあるなど、その利便性は非常に高い。しかしながら、既存のCAEシステムはCADシステムとは独立したものと存在していることが多く、CAEによるシミュレーションの結果を再度CAD上に反映させるという作業が行いにくいという問題点があった。意匠性が求められる製品の多くは、最初から完成形が決まっていることはまれであり、そのため形状の修正を何度も繰り返し、度重なる試行錯誤によって最終的な形状が決定される。また、場合によっては完全な偶然によって形が生み出されることもある。このような繰り返しのプロセスは製品設計の初期の段階においては非常に重要なものであるが、既存のCAD/CAEシステムはこのような使

†1 科学技術振興機構

Japan Science and Technology Agency

†2 筑波大学大学院システム情報工学研究科

Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba

†3 東京大学大学院新領域創成科学研究科

Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

†4 東京大学大学院情報理工学系研究科

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

用には適していない。またその利用の際には数値シミュレーションに関する深い専門知識が要求され、専門知識を持たない一般ユーザの利用はほとんど考慮されていない。

そこで、本論文では一般ユーザが簡単にものづくりを行えるよう支援するための、三次元 CAD システムにシミュレーションを取り入れたシステムを提案する。その例としてユーザが家庭でも簡単に制作をすることが可能な、薄膜素材による風船形状を設計するためのシステムを構築した。本システムの特徴は、従来計算コストが高く対話的なシミュレーションには不向きであった有限要素法の技術を取り込むことで、完成形を予測するのが困難である伸縮性の乏しい薄膜素材によるものづくりの支援を可能としたことである。このシステムでは、完成形状のデザインをユーザが行うタイミングで、その形状を得るための素材の形状を物理シミュレーションを用いて決定する。これにより、実際の素材を用いた試行錯誤を行う必要を無くすことを目的とする。本稿では、提案システムで用いるシミュレーションのアルゴリズム、およびユーザインタフェースの詳細について述べる。

2. 関連研究

一般に、CG の技術は画像や映像を生成するためのものであり、そこで用いられる形状設計技術は実際にものを作るためにはあまり用いられてこなかった。しかし、近年では CG の分野で研究が進められた三角形メッシュ表現による立体形状表現と、それらに関する形状処理の技術、および様々なユーザインタフェースの技術を融合することで、一般のユーザが実在するモノの形状を容易に設計できるシステムの開発が行われるようになってきた。

Mitani らは与えられた密な三角形メッシュモデルから近似的な曲面を持つペーパークラフト用の展開図を作成するシステムを開発した³⁾。また Weyrich らは三次元モデルから浮き彫りを自動的に生成するシステムを開発した⁴⁾。他にも、Mori らによるぬいぐるみの型紙を作成するための研究⁵⁾など、物理的な物体を対象としたモデリングシステムがいくつか提案されている。これらは計算機を用いて現実のオブジェクトの設計を行う際の支援を行うものであり、本研究と共通の目的を持っている。また、Mori らの研究では、布を用いたぬいぐるみの設計にバネマスモデルによるシミュレーションを行っているのに対し、本研究では薄膜の挙動のシミュレーションにより適していると言われる DKT シェル要素を用いた有限要素法解析を用いている。

物理シミュレーションは近年盛んに研究が進められている分野であり、特にゲーム業界においてはすでに一般的なものとなっている。また、シミュレーションを高速に行う技術の進歩と共に形状モデリングと組み合わせて利用しているシステムがいくつか提案されている。

スケッチベースのモデリングシステムに剛体エンジンを組み込んだ例としては、ASSIST⁶⁾ や Phun⁷⁾、キネティックアート・エディタ⁸⁾ があげられる。これらのシステムでは、ユーザがモデルを作成すると即座にシミュレーションが実行され、その結果にそってオブジェクトがアニメーションする。また、プロメテックソフトウェアはモデリングインタフェースに粒子法解析による流体シミュレーションを統合した PhysiCafe を開発している⁹⁾。

剛体物理シミュレーションによる結果をユーザに提示したまま、その結果を直接編集することが可能なものとしては、Popović らによる CG アニメーション生成のためのシステムがある¹⁰⁾。このシステムではユーザは対象となるオブジェクトの状態を対話的に変更することができ、それに合わせてシステムがオブジェクトの初期値や速度といったパラメータを自動で最適化する。また、Justin Needham らはボールの軌跡を予測するデジタルアシスト・ビリヤードシステムを提案している。このシステムではボールの場所とキューの向きを画像解析で求め、ボールを打った際の動きをシミュレーションしその動きをプロジェクトで台に投影するというシステムを提案している¹¹⁾。

風船の設計を対象とした研究としては、浦らによるバルーンアートの支援ツールが挙げられる¹²⁾。このツールはペンシルバルーンと呼ばれる細いゴム風船をひねることで造形を行うタイプのバルーンアートを対象としており、本研究のように膜の貼り合わせによる風船の設計は対象としていない。また風船の膨らみについてはほとんど考慮していないため、場合によっては実現不可能な形状を設計できてしまうことがある。一般に、これまでの研究で用いられてきた物理シミュレーションは近似的なものが多く、シミュレーション精度はそれほど高くない場合が多かったが、本稿で提案するシステムでは、工業製品の解析などにも用いられるシェル要素を用いた有限要素法解析を用いることにより、正確な挙動の予想が困難な伸縮性の乏しい薄膜素材による風船形状の設計を行えるようにした。

3. システムの概要について

本システムでは、薄膜素材による風船を設計対象としている。これはゴムを素材とした風船とは異なり、アルミ箔のような伸縮性のほとんどない素材を貼り合わせて形を作るものであり、通常のゴム風船より耐久性に優れるという特徴がある。また貼り合わせるパーツの形を工夫することで多彩な形状を構築することが可能であるが、通常は膨らませる前の形から膨らませた後の形がどのように変化するのか予測することが難しく、パーツの形状を設計するためには多くの経験と勘が必要とされる。そこで本システムでは、膨らませた後の形をユーザが指定すると、そのパーツの形状が自動で生成される仕組みを取り入れた。なお、

本システムでは簡略化のため、同一形状のパーツを二枚、輪郭付近で貼り合わせ、内部に気体を注入して立体化するもののみを対象とした。



図 1 ゴム風船の例¹⁾(左)と本システムで対象としている風船の例²⁾(中). 本システムでは、右図のように同一形状のパーツを二枚、輪郭付近で貼り合わせた物を対象としている

本システムは膨らんだ後の形状をデザインするための CAD インタフェースに加え、設計されたパーツのシミュレーションを行う CAE としての機能、およびその結果の提示という機能を備える。本システムの概要を以下に示す

(1) 膨らんだ後の風船の輪郭のデザイン

本システムでは膨らんだ後の風船の輪郭をユーザが作図するためのスケッチインタフェースを実装した。この機能を用いてキャンバス上をマウスでドラッグすることで二次元のストロークを生成し、それを風船の輪郭とする。輪郭は 1 つの閉じたストロークで定義される必要があるため、開始点と終了点の間を Ferguson / Coons 曲線によってなめらかに補間する。また、ストロークを構成する頂点数が多いとシミュレーションの初期化に時間がかかるため、ストローク生成後にフィルタリング処理を行い頂点数を間引くこととした(図 2)。本システムでは頂点を間引く閾値を 20px とした。

(2) 輪郭を修正する

本システムでは入力されたストロークを、マウスでつかんで引っ張り形状を修正する「Pull」機能を実装した。このインタフェースには五十嵐らによって提案された二次元形状の対話的な変形手法を用いた¹³⁾。ユーザがマウスを用いてストローク上の一点を選択しドラッグすると、その移動量に応じて操作対象となる曲線の範囲が変化するため、効率的な編集を直感的に行うことが可能である(図 3)。

(3) シミュレーションと表示

本システムでは形状の設計と評価を効率的に行えるよう、CAD インタフェースと CAE に

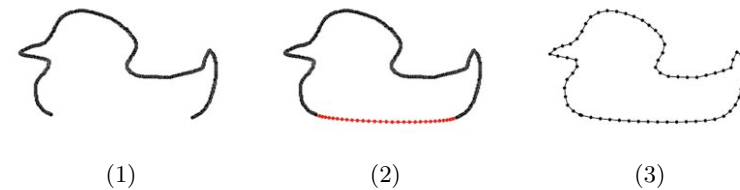


図 2 輪郭のデザインの様子。(1) マウスでストロークを入力。(2) 端を Ferguson / Coons 曲線で補間。(3) 頂点数の削減

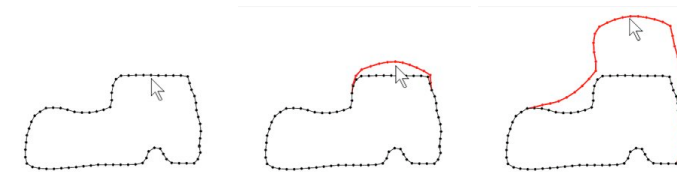


図 3 Pull 機能による輪郭の修正。マウスでストローク場の頂点をドラッグすると、その移動量に合わせて変形する曲線の範囲が広がる

よるシミュレーションが一つのアプリケーションに統合されており、それを用いて風船を膨らませた後の三次元形状を取得・表示したりパーツの形状の修正を行うことができる。型紙の膨らみのシミュレーションには DKT 要素による有限要素法を用いており、パーツの輪郭が生成されると同時にシミュレーションを実行する。膨らんだ後のパーツの型紙の輪郭は、膨らむ前の型紙の輪郭よりもかならず小さな物となる(図 4(1))が、本システムでは膨らみのシミュレーション後にその差分を取得し(図 4(2))、その大きさをもとに膨らむ前の型紙を自動で修正する機能が実装され(図 4(3))、ユーザによって入力された輪郭形状と、膨らませた後の形状の輪郭ができるだけ一致するようになっている(図 4(4))。

本システムによる形状設計の流れは以下のとおりである。

1. マウスストロークによる輪郭の入力
2. マウスストロークから閉曲線を生成し、パーツの型紙の初期形状とする
3. 閉領域を Delaunay 三角形分割し、有限要素法に用いる三角形要素の集合を作成する
4. DKT シェル要素による有限要素法シミュレーションを行い、膨らませた後の立体形状を取得する
5. シミュレーション後の 3 次元座標とパーツの 2 次元座標の対応関係を取得する

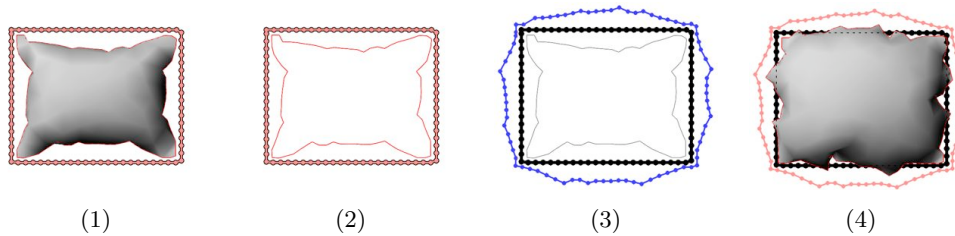


図4 シミュレーションの流れ. (1) シミュレーションを実行. (2) 膨らむ前の型紙の輪郭と、膨らんだ後の輪郭を比較. (3) 差を元の型紙の輪郭に加え型紙を広げる. (4) 再度シミュレーションを行う

6. 型紙座標 i と輪郭座標 i' を比較し、その差から輪郭の移動ベクトル v_i を求める
7. 移動ベクトル v_i と逆向きベクトルを膨らませる前の輪郭座標 i に加え、パーツを拡張する
8. 4に戻る

なお、本システムのシミュレータでは問題の対称性を考慮し片面の膨らみのみを対象としており、もう一方の面の膨らみは座標の Z 軸を反転させることで求めている。

(4) 膜の上に模様を描く

本システムではペイントツールを用いることで、膨らんだ薄膜の上に直接模様を書き込むことができる。描かれた模様はテクスチャ座標を用いることで二次元に展開することができるため、ユーザは膨らんだ後の形状を考慮しながら平面の型紙パーツに模様を書き込む必要はない。

(5) パーツ形状のファイル出力

入力・編集されたパーツの輪郭は、DXF 形式で出力することができ、他のドローソフトで開くことが可能である。また、膜の上に描かれた模様は PNG 形式のラスター画像として出力できる。

4. 薄膜のシミュレーション

本研究では風船など伸縮性の少ない薄い材料を表現するために、DKT シェル要素を用いた有限要素法解析を利用した。一般的な薄い材料の計算モデルとしては他にも厚肉シェル要素、薄肉シェル要素、膜要素などが挙げられ、厚肉要素は面外せん断を考慮している分、複雑な材料物性を考慮することができるが、厚さが薄くなると近似精度が落ちてしまう問題がある。また、膜要素は曲げ剛性を持たないため、極端に薄く柔らかい材質には適当なモデ

ルであると考えられるが、曲げに対する剛性を持たないため、風船の淵のような弛んだ部分では計算が不安定になる恐れがある。そこで本研究では、1960 年代に Dhatt¹⁴⁾ らによって提案され後に Batoz¹⁵⁾ によって種々の薄板要素と数値実験によって比較され有効性が示された、DKT シェル要素による有限要素法解析を用いることとした。

キルヒホッフの仮定によると、紙や布やビニールシートなどのように薄い材料は面外せん断歪が無視できる。よって、薄いシェルの歪エネルギーは曲げと面内の歪の和であると考えられることができる。DKT シェル要素はそれら 2 つの歪を表現するために DKT 板曲げ要素と歪膜要素を合わせて作られている。キルヒホッフの仮定を満たすような薄板要素の厳密な定式化には、1 回微分の連続性を持つ C1 級の要素補間が必要となるが、これは非常に煩雑である。そこで要素全体で C1 級を満たすのではなく、要素の離散点でこれを満たすようにすれば、このような要素の煩雑性を、精度を大きく損なうことなく避けることができる。このような条件を離散キルヒホッフ条件と呼び、この条件を満たす角形要素は離散キルヒホッフ三角形要素 (Discrete Kirchhoff Triangle Element)，略して DKT 要素と呼ぶ。本研究では風船の大変形から来る幾何学的な非線形性に対応するために、線形の方程式の離散定式化に、要素の回転を加えて非線形定式化を行った。

ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、板厚 t の線形の板における歪エネルギー U は、変形後の中立面の曲率ベクトルを κ とすると、次のとおりになる。

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \kappa D_b \kappa d\Omega \quad (1)$$

ここで、 D_b はつぎのように求める。

$$D_b = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

本来風船は 2 枚の同じ形をしたパーツによって密閉されているが、問題の対称性を考慮して片側だけの解析を行うこととした。また、張り合わせを行う輪郭部分が、張り合わせ面に垂直な方向には移動しないという固定境界条件を加え、さらに圧力を加えるために 3 角形の法線方向に面積に比例した表面力を与えた。本シミュレーションでは安定性を考慮して、陰解法による動解析を行うこととし、時間積分のアルゴリズムとしては Newmark- β 法を用いている。連立一次方程式を解くソルバーには Minimum Degree 法による Ordering 付

きの不完全 ILU 分解を前処理とした共役勾配法を用いた。

5. 実験と考察

本システムを用い、容易に入手可能なポリ塩化ビニルを用いた風船を作成した。実際の制作過程は以下の通りである。

- (1) システム上で形状を入力・編集する
- (2) シミュレーション結果を確認しながら、パーツの形状を決定する
- (3) 形状を DXF 形式で書き出し、Adobe Illustrator で印刷する
- (4) 印刷した用紙にビニルシートを二枚重ね、パーツの輪郭をマジックペンでトレースする
- (5) ローラー型ホットシーラーで輪郭をなぞり融着させ、余分なシートをはさみで除去する

図5は本システム上で設計した風船の形状とシミュレーションの結果、および自動生成された型紙の輪郭、そして実際に作成した風船の写真である。形状設計から実際に風船を完成させるまでに要した時間はおよそ1時間程度であった。なお、ヤング率 $E = 3400 \text{ MPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、板厚 $t = 100 \mu\text{m}$ として計算した。

風船の型紙のデザインにおいては、輪郭のうち凹型になっている場所は空気を入れ膨らませると周りから圧迫されへこみ幅が狭くなってしまうため、凹部のある場所を開き気味するよう型紙のデザインを行わないとならないという注意点がある。例えば図5における口に相当する部分はそのような設計上の注意が必要な箇所であるが、システムによって自動生成された型紙の口に相当する部分はユーザのデザインよりもかなり開いたものとなっており、その結果膨らませた際のシミュレーション結果や実際に作成したものはほぼユーザのデザインと一致するようになった。

また、本システムを用いてデザインした他の作例を図6に示す。赤色で示された線はシステムによって求められた、型紙パーツの輪郭である。

6. まとめと今後の課題

本稿では薄膜素材による風船形状の設計を支援するシステムを作成し、そのパーツの設計の工程をコンピュータ支援によって一般ユーザでも手軽にできるようにした。また、実際の素材を用いて風船形状を作成することで、本システムの有用性を確認した。今後はより多くのユーザを対象とした被験者実験を行うとともに、システムを用いずに風船の型紙を作成し

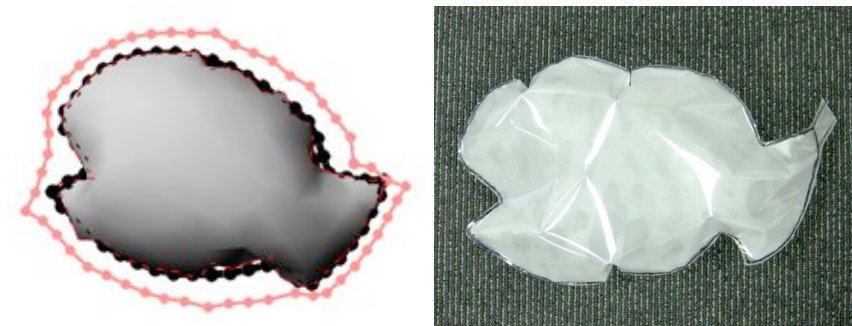


図5 本システムで設計した魚の風船(左)と、ポリ塩化ビニルを用いて実際に作成した物(右)

た場合との結果の比較、またシミュレーションの精度や計算時間の評価も行いたいと考えている。

また、本システムでは同一形状の型紙を二枚貼り合わせて形作る風船の設計に特化したものとなっているが、現実の風船ではさまざまな形の型紙を組み合わせることで多彩な形状を実現することが可能である。そのような形状のデザインもできるよう、システムを拡張したいと考えている。また本システムではポリ塩化ビニルの物性をもとにシミュレーションを行っているが、風船形状に用いられる薄膜素材は他にもアルミ箔や紙など、多くの素材が考えられる。それらの物性をユーザが簡単に指定できるようにし、さまざまな素材を使い分けられることを可能にしたいと考えている。

本研究では一般ユーザがものづくりをすることを支援することを目的とし、CADとCAEを統合したシステムを提案した。本論文ではCAE部にDKTシェル要素を用いた有限要素法解析エンジンを取り入れることで風船のデザインを行うためのシステムを構築したが、今後はCADとCAEをより密接に連携させ、インタラクティブな操作に適した高速なシミュレーションやその結果をユーザが一目で把握可能で元の形状にフィードバックしやすい提示方法を実装したいと考えている。また、他のオブジェクトを設計するためのシミュレーションエンジンの開発も平行して行いたい。

参考文献

- 1) naturebrain, <http://www.flickr.com/photos/nature-brain/504262722/>
- 2) Balloon Maniacs, <http://www.balloonmaniacs.com/>

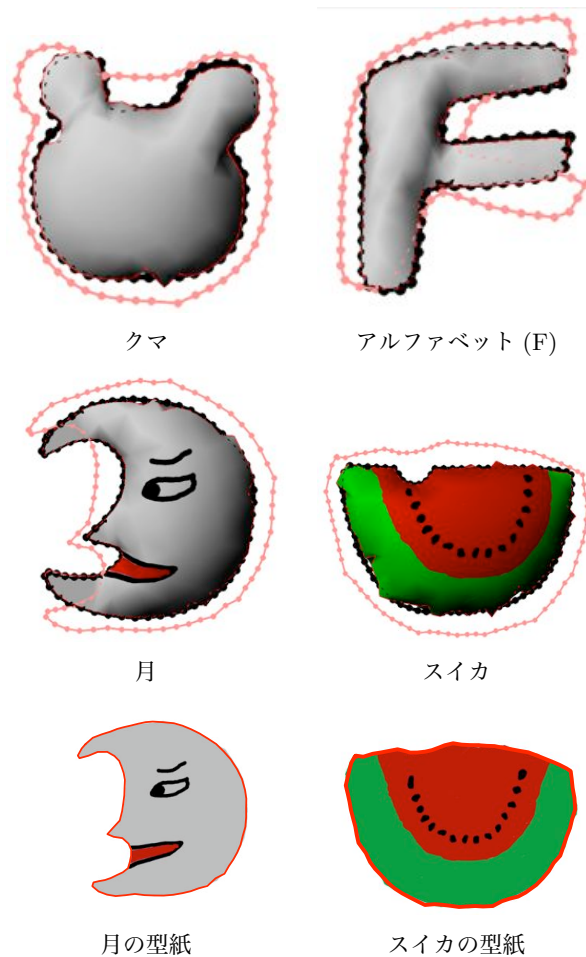


図 6 他の作例

- 3) Jun Mitani and Hiromasa Suzuki, "Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding", ACM Trans. Graph., Vol.23, No.3, pp.259-263, 2004.
- 4) Tim Weyrich, Jia Deng, Connelly Barnes, Szymon Rusinkiewicz, and Adam Finkelstein, "Digital bas-relief from 3D scenes", ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), Vol.26, No.3, August 2007.
- 5) Yuki Mori and Takeo Igarashi, "Pillow: interactive pattern design for stuffed animals", In SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Sketches, p.74, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- 6) Christine Alvarado and Randall Davis, "Resolving ambiguities to create a natural computer-based sketching environment", In SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Courses, p.24, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- 7) Emil Ernerfeldt, "Phun", <http://www.phunland.com/wiki/Home>
- 8) 古田 陽介, 三谷 純, 五十嵐 健夫, 福井 幸男: "剛体シミュレーションエンジンを統合したキネティックアート・エディタ", 第 8 回 NICOGRAPH 春季大会, 東京 東京国際展示場, 2009 年 3 月 20 日
- 9) プロメテック・ソフトウェア株式会社, "Physicafe", <http://www.prometech.co.jp/physicafe/>
- 10) Jovan Popović, Steven M. Seitz, Michael Erdmann, Zoran Popovic, and Andrew Witkin, "Interactive manipulation of rigid body simulations", In SIGGRAPH '00: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.209-217, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- 11) Matthew Straub, Justin Needham, "Digitally assisted billiards", [http://www.prism.gatech.edu/gtg279x/Digitally Assisted Billiards/Welcome.html](http://www.prism.gatech.edu/gtg279x/Digitally_Assisted_Billiards/Welcome.html)
- 12) 浦正 広, 遠藤 守, 山田 雅之, 宮崎 慎也, 安田 孝美, "バルーンアートの構造解析と作成支援ツールの開発" 第 8 回 NICOGRAPH 春季大会, 東京ビッグサイト, 2009 年 3 月 19 日
- 13) Takeo Igarashi, Tomer Moscovich, John F. Hughes, "As-Rigid-As-Possible Shape Manipulation", ACM Transactions on Computer Graphics, Vol.24, No.3, ACM SIGGRAPH 2005, Los Angeles, USA, 2005.
- 14) Dhatt, G.: Numerical Analysis of Thin Shells by Curved Triangular Elements Based on Discrete Kirchhoff Hypothesis. Proc. ASCE, Symp. on Applications of FEM in Civil Engineering, Vanderbilt Univ., Nashville, Tenn., 13-14, 1969.
- 15) Batoz, J.-L., Bather, K.-J., and Ho, L.W. : A study of three-node triangular plate bending elements. Int. J. Num. Meth. Engrg. 15, 1771-1812, 1980.