

あみぐるみのための3次元モデリングと製作支援インタフェース

五十嵐 悠紀 五十嵐 健夫 鈴木 宏正

“あみぐるみ”は毛糸を使って作るぬいぐるみであるが、毛糸の編み方によって形状をデザインしていくため、初心者にはデザインすることが困難である。我々は3次元モデリングプロセスにインタラクティブな物理シミュレーションを組み合わせることであみぐるみを効率的にデザインできるモデラーを作成した。本システムは自動で編み目を計算してあみぐるみモデルをシミュレーション結果として提示するため、初心者にも直感的にデザインでき、編み図も容易に得ることができる。また、初めてあみぐるみに挑戦する初心者でも作成手順を容易に理解できるようにするために、製作手順を視覚的に提示する製作支援インタフェースも備えた。あみぐるみ初心者でも容易にオリジナルなあみぐるみを作成できることを確認したので報告する。

This is an interactive design system for creating knitted animals. The user designs a 3D surface model using a sketching interface. The system automatically generates a knitting pattern and then visualizes the shape of the resulting 3D animal model by applying a simple physics simulation. The user can see the resulting shape before beginning the actual knitting. The system also provides a production assistant interface for novices. The user can easily understand how to knit each stitch and what to do in each step. In a workshop for novices, we observed that even children can design their own knitted animals using our system.

1 はじめに

毛糸とかぎ針を使ってぬいぐるみを作る“あみぐるみ”は日本に存在する重要な文化である。あみぐるみは毛糸を筒状に編んでいき、綿を詰めることでできあがる。このため、できあがりの形状を想像しながら編み図をデザインすることが難しく、編み物に長けた人が試行錯誤によって作成した編み図を利用していることがほとんどである。セーターなどの棒針編みに比べると、あみぐるみを自らデザインできる人は限られており、そのため最近では廃れてきてしまっている。

そこで我々は3次元モデリングプロセスにインタラクティブな毛糸のシミュレーションを組み合わせることであみぐるみを効率的にデザインできるモデラーを作成した。本システムは自動で編み目を計算してあみぐるみモデルをシミュレーション結果として提示するため、初心者にも直感的にデザインでき、自動で編み図も得ることができる。また、初めてあみぐるみに挑戦する初心者でも作成手順を容易に理解できるようにするために、製作手順を視覚的に提示する製作支援インタフェースも備えた。これによりあみぐるみ製作初心者にも容易にオリジナルなあみぐるみを作成できることを確認したので報告する。

3D Modeling for Knitted Animal with Production Assistant Interface.

Yuki Igarashi*, Takeo Igarashi†, and Hiromasa Suzuki*. * 東京大学大学院工学系研究科, Dept. of Engineering, The University of Tokyo., † 東京大学大学院情報理工学系研究科/JST ERATO, Dept. of Information Science and Technology, The University of Tokyo./JST ERATO

コンピュータソフトウェア, Vol.26, No.1 (2009), pp.51-58. [研究論文] 2008年3月14日受付.

本論文は以下のように構成されている。まず、次章で関連研究について言及し、3章でモデリング時のユーザインタフェースについて紹介する。4章で実際にあみぐるみを作成する際の支援となるインタフェースについて述べる。5章であみぐるみモデルを構築するためのアルゴリズムを述べて、6章で実際に本システムを用いて作成したあみぐるみを紹介する。最後

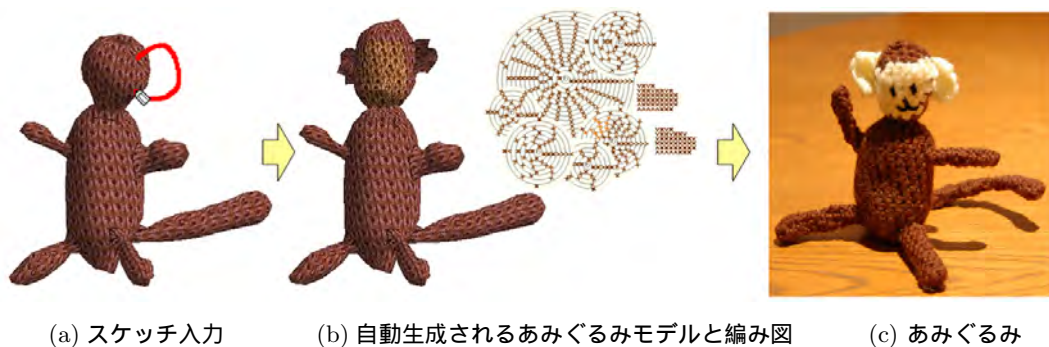


図1 本システムの概要。(a) ユーザはスケッチインターフェースを用いてあみぐるみモデルをデザインする。(b) システムは編み図とその編み図を元に構成できる3次元モデルを提示する。(c) システムが提示した編み図を元に実際に編んだあみぐるみ。

に7章で考察をし、8章で本論文をまとめ、今後の課題にふれる。

2 関連研究

近年、3次元CGをコンピュータの中で扱うだけでなく、手にとって楽しめる作品にするための研究が盛んである。ペーパークラフトのための展開図を作成する研究[1][2]や、ぬいぐるみのための型紙を作成する研究[3][4]が行われている。森らは3次元モデリングプロセスに物理シミュレーションを並行して行うことでぬいぐるみモデルをデザインし、素人でも簡単にオリジナルなぬいぐるみを作成することができるシステムを提案している[5]。本研究では、我々は対象を毛糸に変えることで3次元モデルを構築するアルゴリズムも変更した。また製作支援インターフェースを備えることで製作手順を容易に理解できるようになった。

3 3次元あみぐるみモデルデザインのためのユーザインターフェース

本システムの概要を図1に示す。本システムは図2のように3次元モデリング画面と2次元編み図生成画面から成る。編み図とはあみぐるみを作成するためのパターン図のことで、円状に編み目の記号を並べることで表現される。ユーザはマウスやペンタブレットなどを使ってキャンバスにあみぐるみの概形を描く。システムは入力されたストロークを元に自動で編み図を計算し、その編み図を元に編み上げた3次元形

状を物理シミュレーション結果として提示する。本章ではユーザに提供されているモデリング操作を順に説明する。本システムはモデリングの初心者ターゲットユーザとするため、モデリングの知識や経験がなくとも簡単に3次元をモデリングできるTeddy[6]のユーザインターフェースを利用している。

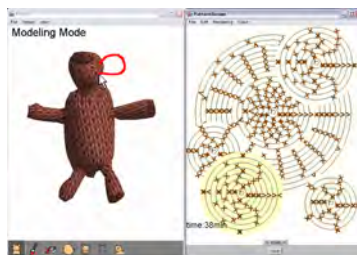


図2 システムのキャプチャ画面

3.1 新規生成

図3のように、システムのキャンバスに作りたいモデルの外形を描くことで新しいモデルと対応する編み図が生成される。形状はあみぐるみのもつ物理的な制約に合うようにシミュレーションで変形するため、形状をたもったモデルを作るためには内部に針金を入れるなどの工夫をすることが必要となる(図4)。編むだけで形状を再現できるような編み図を作成することが将来課題の1つである。また新規生成では、1本の中心線を抽出してモデル化するため、中心線が分岐するような形状を描いたときには期待するものと異なる3次元形状が構築される。このような形状



図3 モデルの新規生成



図4 図3で生成した編み図を実際に編んで針金を入れた例

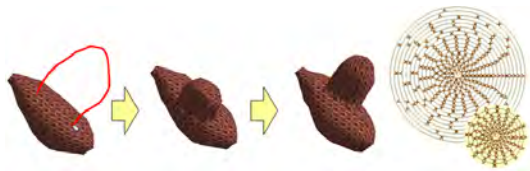


図5 突起生成

をデザインしたい際には次節で述べる突起生成を利用してパーツを追加すると良い。

3.2 突起生成

突起の外形を描くと新たに突起が生成される(図5)。ユーザが新規モデルを生成した後は、入力ストロークの始点および終点がモデル上に乗っている場合は突起生成とみなす。

3.3 平らなパーツ

サルの耳や鳥の羽のような部分では、平らなパーツが使われる。このようなパーツをデザインするには、Flatモードを用いる。このモードでは、入力された輪郭形状に対して、それを外形とする平らなパーツが生成される(図6)。

3.4 色塗り

それぞれの毛糸のあみ目の色を指定することによって色に変化をつけたデザインもできる(図7)。カラー



図6 平らなパーツの例



図7 色塗りの例

パレットから色を選び、モデルに直接塗ることでの編み目を何色で編めば良いかを編み目パターンへ提示する。

4 あみぐるみ製作支援インターフェース

あみぐるみをデザインし終えたのち、製作支援ボタンを押すことで、どのような手順で製作していけば良いかが示される製作支援モードに移ることができる(図8)。

あみぐるみの円状の各1段における編み目の数を目数というが、これはユーザーにとって重要な情報となる。ユーザが使用する毛糸の太さ(極太, 太, 普通, 細), 使用するかぎ針の号数(5~10号)を入力すると、システムは目数を計算して提示する。(デフォルトでは毛糸の太さ: 普通, かぎ針の号数: 7号が指定されている。)目数の計算が終了したら、製作時間の目安時間と、毛糸の色ごとに何玉必要かなどの情報が提示される。ユーザによって製作時間は異なるため、絶対的な指標には使えないが、どちらのあみぐるみのほうがより簡単かなどを比べる際の相対的な指標には大いに役立つ。

本インターフェースでは、ユーザは1段編むごとに上下キーを用いて編み進めていけば良い。それぞれの目がどのような編み方かわからなくなったときには編み図の上で右クリックすることで対応する目の編み方を説明したイラストが表示される(図9)。

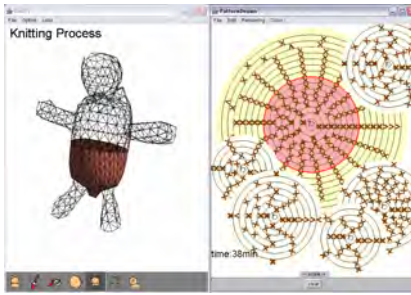


図 8 製作支援インタフェース

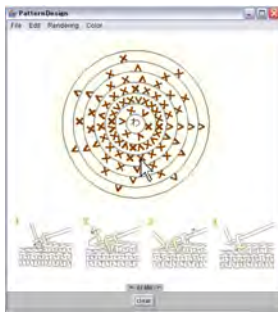


図 9 編み目の上で右クリックするとその目の編み方を提示

5 アルゴリズム

本システムは Java 言語を用いて実装した．展開アルゴリズム，シミュレーションともに家庭などで広く使われている一般の PC 上でリアルタイムに稼動する．

あみぐるみは軸を中心に 1 段ごと円状に編んでいくことを前提としているため，3 次元モデルの形状表現には sweep based model [7] [8] あるいは，generalized cylinder [9] に似た表現を用いている．毛糸をかぎ針で編む編み方は多数存在するが，ターゲットユーザが初心者ということで普通目，増やし目，減らし目の 3 つに限定した．

5.1 新規生成アルゴリズム

ユーザの入力したストロークを元にあみぐるみモデルを構築するアルゴリズムを述べる．まず，ユーザが交差のないストロークを入力する (図 10 a) と始点と終点をつなぎ，閉じた形状を作成する (図 10 b)．ドロネー三角形分割を用いて分割し，得られた三角形を，

2 本のエッジが外周にある三角形 (terminal triangle)，1 本のエッジが外周にある三角形 (sleeve triangle)，エッジすべてが外周にない三角形 (junction triangle) の 3 つに分類する [6] (図 10 c)．その後，内部にあるエッジの中点を結び chordal axis を抽出する (図 10 d) [10]．あみぐるみでは中心軸を 1 本にしなくてはならないので terminal triangle から terminal triangle へのパスをそれぞれ総当りで調べて，一番長いパスを中心軸として抽出する (図 10 e)．中心線が分岐するような形状を描いたときには期待するものと異なる 3 次元形状が構築される．このような形状をデザインしたい際には突起生成を利用してパーツを追加して作ることとする．

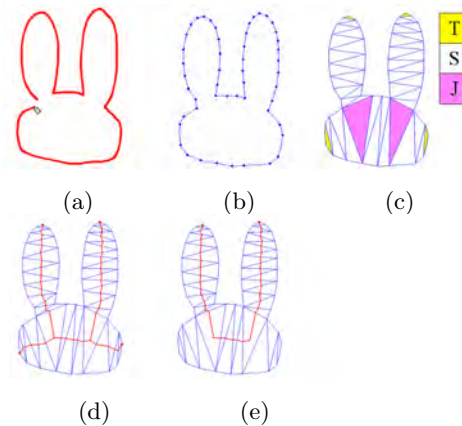


図 10 中心線を 1 本求めるアルゴリズム．

中心軸が抽出されたら，軸上に等間隔に頂点 (v_i) を配置し，頂点 v_i を通り，軸を法線 $(v_{i+1} - v_i) / |v_{i+1} - v_i|$ に持つような平面 (P_i) を貼る (図 11 a)．平面 P_i とユーザの入力したストロークの交差した 2 点の長さを r_i とした際， r_i に比例する個数の頂点列を平面 P_i 上に中心が頂点 v_i になるように円形に並べる (図 11 b)．

次に，平面 P_i と，平面 P_{i+1} 上にある頂点列をつなぐ (図 11 c)．それぞれの頂点数を計算し，頂点数に差がある場合には，増やし目，減らし目の数が均等に割り振られるように図 12 のように頂点同士を接続する．頂点同士を接続する際，パネモデルとして物理シミュレーションに使用するため，普通目，増やし目

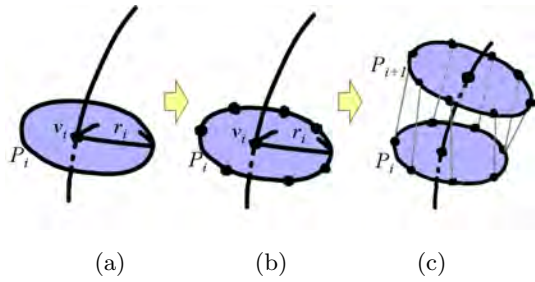


図 11 平面 P_i 上の頂点列と平面 P_{i+1} との接続関係

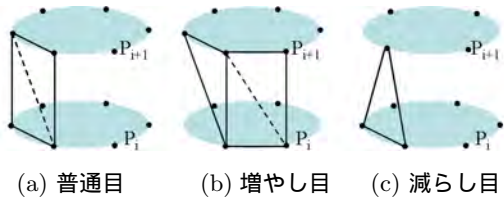


図 12 平面 P_i と P_{i+1} 上の頂点を結ぶ繋ぎ方．破線は仮想エッジ

に関して仮想的なエッジを導入し，三角形メッシュモデルとして構築しておく．平面 P_0 と平面 P_n に関しては中心の頂点のみを持っているので，仮想的なエッジでつないでおく．

5.2 突起生成アルゴリズム

ユーザが新規モデルを生成した後は，入力ストロークの始点および終点がモデル上に乗っている場合は突起生成とみなす．ユーザがストロークを描くと，スクリーンからモデルに入力ストロークを投影して始点・終点の2点を計算する(図13 a)．求めた2点を通り，それらの中点の法線を法線とするような平面を貼る(図13 b)．求めた平面上に始点終点を直径とするような円を描き，それをモデルに投影して頂点を求めることでベースとなる円を得る(図13 b)．次に，ユーザが入力したストロークに沿って，求めたベースとなる円をスイープさせ，一定間隔で断面となる円を作ることで突起を生成する(図13 c)．前述の新規生成アルゴリズムと同様に各平面 P_i 上の頂点列を結び，メッシュを構成する．

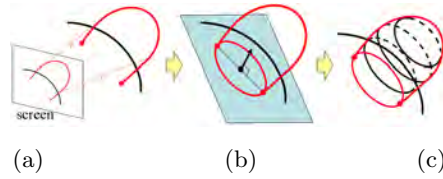


図 13 突起生成アルゴリズム．

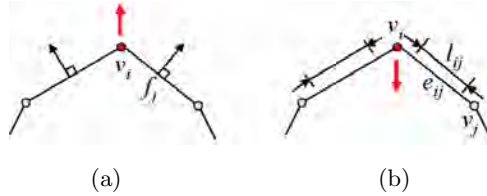


図 14 シミュレーション

5.3 物理シミュレーション

物理シミュレーションには，安価なPC上でリアルタイムな計算を実現するために単純なパネモデルを用いている．3次元メッシュ構築の際に頂点は編み目と対応している．

まず，それぞれの頂点 v_i に対して，物体の内側から外側へ(法線方向へ)膨らみます力 f_i を与え，頂点を移動させる(図14 a)．頂点の変位が閾値以上にまで膨らんだら，膨らまし方向の力をなくし，エッジ e_{ij} に対して毛糸の長さを設定し，パネモデルを用いてそれぞれのエッジの長さ l_{ij} (毛糸の張力)を調整する(図14 b)．この2つのステップを3次元形状が収束するまで繰り返す．

5.4 製作支援インターフェース

パーツを製作する順番は，モデルを作成した際の順番によるものとする．編んだ部分に関してはテクスチャ表示，これから編む部分に関してはワイヤフレーム表示を用いることでどこまで編んだかをわかりやすく可視化している．

また，本システムでは製作時間の提示も行っている．全体の編み目数を N_{stitch} 目，1目を編む時間を W_{stitch} ，色が変更される箇所を N_{change} 回，糸を変えるのにかかる時間を W_{change} とすると，製作時間 T は以下の式で表される．

$$T = W_{stitch}N_{stitch} + W_{change}N_{change}$$

ここで、 W_{stitch} と W_{change} の値にはユーザスタディの結果 (表 1, 2) を用いた。表 1 の平均より、 W_{stitch} を 4.3 秒、表 2 の平均より W_{change} を 55 秒と設定している。また、図 15 は、それぞれのユーザの編んだ目数に対するかかった時間をグラフで表したものである。統計的に論じるにはサンプル数が少ないが、図 15 と表 1 より、編む速さには個人差があるが、1 人に着目した場合ほぼ線形であると考えられる。 W_{stitch} と W_{change} の値は個々に応じて変更することも可能である。使用する毛糸の長さはそれぞれの色の目数と使用するかぎ針の号数に応じて求めている。

表 1 編んだ目数とかかる時間

ユーザ	編んだ目数	時間	1 目あたりの編む時間
User 1	10 目	52 秒	5.2 秒
User 2	16 目	65 秒	4.0 秒
User 3	16 目	70 秒	4.3 秒
User 4	11 目	41 秒	3.7 秒

表 2 毛糸を変えるためにかかる時間

ユーザ	User 1	User 2	User 3	User 4
時間	80 秒	48 秒	50 秒	42 秒

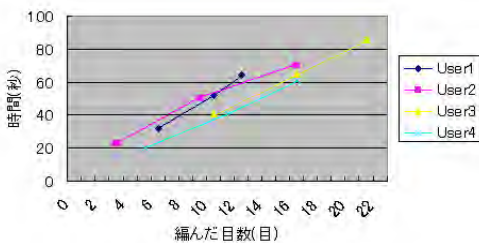


図 15 編むためにかかる時間



図 16 本システムを用いて製作したあみぐるみたち



図 17 ワークショップでのモデリング風景



図 18 ワークショップでのあみぐるみ製作風景

子供たち (10 ~ 14 才) とその親 10 組を対象にユーザスタディを行った^{†1}。会場は日本科学未来館のワークショップ用の部屋を利用し、対象者は同館主催のワークショップとして友の会会員からの公募で募集した。参加者は参加費として 1,500 円を負担した。参加者は、まず午前中に 30 分モデリングの練習をしたのち、30 ~ 60 分程度かけて自由にあみぐるみモデルのモデリングを行った (図 17)。その後、午後には 3 時間ほどかけて実際にあみぐるみを編んだ (図 18)。

ワークショップに参加した子供たちはあみぐるみを初めて作る子供たちばかりであったが、「楽しかった」

6 結果

図 1 (c)、図 16 は本システムを利用して作成したあみぐるみである。このように素人でも手軽にあみぐるみをデザインし作成することができる。

また、本システムの有効性を確かめるため、一般の

^{†1} 日本科学未来館 7 階交流サロン 友の会イベント「コンピュータを用いたあみぐるみ製作ワークショップ」2007 年 9 月 22 日開催。

「わくわくした」といった意見が多く得られた。アンケート結果を表3に示す。また、「世界にひとつだけのおみぐるみができてうれしい」「コンピュータをこうやって使うのは面白い」といった意見もあった。反対に、「難しかった」「一度描いたあとに修正したい」「円や直線が書ける機能が欲しい」などの意見もあったため、今後の課題としたい。

表3 ユーザスタディアンケート結果

項目	使いやすい	普通	使いにくい
システム全体	5人	4人	1人
回転操作	9人	1人	0人
突起生成	6人	4人	0人
マウス操作	5人	5人	0人

7 考察

本システムは、3次元モデリングと物理シミュレーションの融合により、モデリング時のユーザ入力は自由にできる反面、システムは「おみぐるみに適したモデル」しか作成することができない。よって、ユーザがおみぐるみにならないような入力ストロークを描いた場合、その入力ストロークから判断して1本の毛糸で作成できる範囲のモデルを返すこととなり、必ずしもユーザの意図を反映したモデルがモデリングできるとは言えない。

本研究においてシミュレーションは、ユーザの入力に対して、おみぐるみの制約を付加するものであり、シミュレーションの結果は当然入力された形とは異なったものとなる。この差は、ユーザの入力が1本の直線的な軸を持つ場合に最小となり(図19(a))、反対に、軸が曲線的である場合には、無理やり伸ばしたものにすることで(図19(b))大きくなる。これは、現実世界のおみぐるみ作成でも曲がったおみぐるみは作れないことから事情は同じである。

一方、シミュレーションの精度という観点考えると、実際のおみぐるみに対して単純なバネモデルを用いているために精度が良いとはいえない。しかし、手で作るおみぐるみにおいては、同じ編み図からでも

個人差等によって同じ形状が作られるとは限らず、そのバラツキも大きいので、シミュレーションの精度を闇雲に上げることも意味がない。ユーザースタディー等を通じ、シミュレーション結果に対する大きな不満は得られなかったことから、ユーザがこれらのシステムの特徴を理解して使用することによって、シミュレーションの精度の問題は回避できると考える。

現段階ではユーザへのフィードバックとして異なる形状の場合にもそのまま提示しているが、今後は針金なしで曲がった形状が作れるような編み図を生成できるようにアルゴリズムを改良していく予定である。たとえば、図19(b)のように軸は1本であるが曲線的である場合には、カーブの際、外側に相当する部分を太い幅(2段ないし3段)で、内側に相当する部分を細い幅で(1段)で編むような編み図を自動で生成することで、内部に針金を入れることなく曲がった形状のおみぐるみを編むことができると考えられる。手動でこのような編み図を作成するのは非常に困難であるため、今までにないおみぐるみの形状を作り出せる可能性がある。

また、複数の軸を持つ場合には、システムが自動で判別して、主となる軸には本論文で記載した「新規生成」を、枝となる軸部分には「突起生成」を分類して順に適用すればある程度は解決すると考えられる。



図19 入力ストロークとおみぐるみモデルの誤差

また、おみぐるみモデルと実際に製作したおみぐるみとの定量的な類似度の評価は、おみぐるみの性質上正確に行うことは困難である。図1に示したおみぐるみモデルと実際に製作したおみぐるみのサイズの比較を表4に示す。比はそれぞれ頭を1としたときの他の体の部位を比率で表したものである。この結果よ

り多少ずれはあるものの、比率はほぼ等しくできていると考える。この過程で考えられる誤差は、ユーザの技術力の差が大きく影響する。かぎ針で編む際にどのくらいの強さで毛糸を編んでいくか、また一定の力で編めるか、などによってできあがる編み目の形状は必ずしも正方形に近い編み目になるとは限らず、そのような理由によって最終的な形状がシミュレーション結果と大きく異なることが多い。そのため、現在の実装では正確なシミュレーション結果よりも、安価なPC上でリアルタイムな計算を実現することを重視している。機械編みを利用することで製作段階での誤差が縮まることから、本システムによるアウトプットを機械編みへの入力とする実験も行いたいと考えている。

表 4 あみぐるみモデルとあみぐるみのサイズ比較

モデル	頭	腕	足	座高
あみぐるみモデル (画面上の実寸(参考)) (比)	25mm 1	20mm 0.8	23mm 0.92	75mm 2.72
あみぐるみ (実寸) (比)	45mm 1	40mm 0.89	45mm 1	110mm 2.44

8 まとめと今後の課題

3次元モデリングプロセスにインタラクティブな物理シミュレーションを組み合わせることであみぐるみを効率的にデザインできるモデラーを作成した。本システムは自動で編み目を計算してあみぐるみモデルをシミュレーション結果として提示するため、初心者にも直感的にデザインでき、自動で編み図も得ることができる。また、初めてあみぐるみに挑戦する初心者でも作成手順を容易に理解できるようにするために、製作手順を視覚的に提示する製作支援インタフェースも提供している。本システムはシミュレーションとモデリングの融合を示す一つの実例としてデザインしており、その有用性が示せたと考える。

今後は編み始めてから大きさがずれてきたときにも対処できるようにサイズを途中で変更できるような機能を含めるなど、初心者ならではの動作に応じたわ

かりやすいインタフェースを目指す。また、現在は3次元の構築に単純なパネモデルを用いているが、毛糸の素材による違いなども表現できるようシミュレーション部分を強化して行く予定である。かぎ針では編みぐるみのほかに帽子やバッグ、テーブルクロス作りなどが盛んなのでこれらにも対応していきたい。

謝辞

ワークショップを行うにあたってご協力いただいた日本科学未来館のスタッフに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] J. Mitani, and H. Suzuki. Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2004)*, Vol. 23, No. 3, pp.259–63, 2004.
- [2] I. Shatz, A. Tal, and G. Leifman. Paper craft models from meshes. *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics (Proceedings of Pacific Graphics 2006)*, Vol. 22, No. 9, pp. 825–34, 2006.
- [3] D. Julius, V. Kraevoy, and A. Sheffer. D-charts: quasi developable mesh segmentation. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2005)*, Vol. 24, No. 3, pp.981–90, 2005.
- [4] Y. Mori, and T. Igarashi. Pillow: Interactive pattern design for stuffed animals. In DVD publication at SIGGRAPH 2006 Sketches, 2006.
- [5] Y. Mori, and T. Igarashi. Plushie: An interactive design system for plush toys. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2007)*, vol. 23, No. 3, Article No. 45, 2007.
- [6] T. Igarashi, S. Matsuoka, and H. Tanaka. Teddy: A sketching interface for 3d freeform design. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1999*, pp.409–16, 1999.
- [7] D. -E. Hyun, S. -H. Yoon, M. -S. Kim, and B. Juttler. Modeling and deformation of arms and legs based on ellipsoidal sweeping. *Computer Graphics and Applications*, pp.204–212, 2003.
- [8] S. -H. Yoon, and M. -S. Kim. Sweep-based freeform deformations. *Computer Graphics Forum*, 25(3): 487–496, September 2006(Eurographics).
- [9] E. B. Saff, and A. B. J. Kuijlaars. Distributing many points on a sphere. Springer-verlag new york, volume 19, number 1, 1997.
- [10] L. Prasad. Morphological analysis of shapes. *CNLS Newsletter*, 139: pp.1–18, 1997.