

垂下した布地物体の形状表現

宇田 紀之, 鶴岡 信治, 木村 文隆, 三宅 康二

三重大学 工学部 電子工学科

布地が自重によって垂れ下がる状態をドレープといい、布地の視角的な美しさを決めるひとつのポイントとされているが、その生成メカニズムはまだ十分に解明されていない。本研究では、フラクタル技法を用いて垂下した布地物体の形状近似を試みた。

形状生成アルゴリズムは、まず、不規則なひだの形状を含む座屈曲線を、三角形の再帰分割による修正コッホ曲線によって近似し、次に各座標点を制御点とするベジェ補間によって布地曲面を近似するものである。ひだの変形は、三角形再帰分割における弾性係数やゆらぎ係数によって制御することができ、多様な布地形状の生成が可能である。

本生成モデルは、比較的単純なものではあるが、カーテンやスカートなど表面にひだを含む布地物体のリアルな形状近似を行なうことができた。

A Formability Model of Hanging Cloth Objects

Noriyuki UDA, Shinji TSURUOKA, Fumitaka KIMURA, Yasuji MIYAKE

Dep. of Electronics, Faculty of Engineering, MIE University

〒514 1515, Kamihama, Tsu, Mie (tel:0592-32-1211(3586))

We make proposal of simple formability model which generates 3-dimensional computer graphics image of hanging cloth object. This model conducts buckling curves on several horizontal sections from a modified Koch-curve and makes 3-dimensional form by interpolating lattice points. This modified Koch-curve approximates a deformation of nodes on buckling curve by recursive division of isosceles triangle. Deformation of objects is controlled by changing parameters of elastic rigidity on the recursive division.

This model easily creates realistic drape image like curtain and skirt.

1 はじめに

近年、コンピュータグラフィックスに日常感覚的な要素を取り込むひとつの試みとして、被服をはじめ、カーテンやテーブルクロスなどのさまざまな布地物体の表現に関心が集まはじめた。⁽¹⁾⁻⁽³⁾

しかし、一見単純に見える布地の形状も、粘弾性や形状の多安定性などの諸特徴を考慮した力学量解析や形状の推定は決して容易ではない。通常布地の表面に発生するしわの生成メカニズムについてすらまだ十分な解明がなされていないのである⁽⁴⁾。

本研究では、フラクタル技法を用いた“修正コッホ曲線”を提案し、表面に多様なひだを含む布地物体の形状近似を試みた。表現する布地物体は、カーテンやスカートなど一部分を拘束されて垂れ下がっているものとした。提示した簡単な形状生成モデルによって良好な画像が得られたので、これを報告する。

2 基本モデル

2.1 布地形状近似の要件

垂下した布地が作り出す柔らかな形状はドレープといわれ、布地の視覚的な美しさを決める1つのポイントとされている。ドレープ形状を特徴づけるものとして、ひだの数やエッジの形状が極めて重要な要素と考えられているが、垂下した布地は、わずかの力で幾通りにも変化し、そのおのおのが一定の安定状態を維持するという現象については、ほとんど解明されていないのが実状ようである。

本研究の目的は、精密な力学モデルを構築して布地形状をシミュレートすることではない。与えられた布地の成形条件から、存在可能範囲にいくつかの形状を簡単に生成することのできる近似モデルを検討することである。2次元平面に定義された布地形状（第一次成形）をもとに、いかに布地らしい立体感（第二次成形）を近似するかに主な関心があるといつてよい。そこで表示対象は、表面に布地独自のひだを含み装飾性の高いカーテンやスカートなど一部分を拘束されて垂下している布地物体とした。形状はかなり自由度の高いものと考えられるが、形状近似する場合の基本的な要件を以下にまとめた。

1. 垂下した布地の形状は、独自の装飾性をもち3次元空間の美しさを演出するものであるから、デザイナーの試行錯誤に対応して、部分修正が簡単で形状計算時間の短いものが望ましい。

2. 布地形状は、布地の成形を拘束する3次元条件と布地の材質特性によって決まるが、予期せぬわずかな外力で多様に変化する。従って、形状生成モデルは形状決定に幅をもたせた確率論的なものとする。

3. 布地形状生成モデルは、不規則な変形をもたらす外的力（風や身体動作）や内的力（ヒステリシスや摩擦）の影響を容易に取り込めるものであることが望ましい。

4. 布地曲面は、不規則な変化を含むが決して相互干渉する（曲面が交錯する）ことはない。また、空間的な不連続を含んではならない。

以上のことから、布地形状の生成には、乱数を制御した確率論的フラクタル技法⁽⁵⁾を用いた形状近似モデルが有効であると考えられる。

2.2 垂下した布地の力学モデル

垂下した布地にはさまざまな力学量が複雑に作用しているが、発生するひだの生成メカニズムを単純化して図1のように図式化した。一定の高さにある直線に四角形の布地を吊り下げ、垂下した一辺を直線に平行に圧縮したものとする。吊り下げられた布地の横幅を l とし、上端エッジ曲線の両端点の間隔を l' とする。

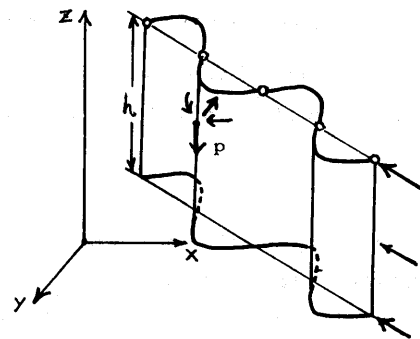


図1：カーテンの形状モデル

布地曲面上の点pには、接線方向に圧縮による座屈力が働くと考えられる。それに重力や布地の

曲げ硬さによる応力が作用しており、それらが均衡して3次元位置が決まるものと考えられる。直線状の物体を圧縮した時にできる座屈曲線は、一般に次のフーリエ級数で定義される。

$$y = a_1 \sin \frac{\pi x}{L} + a_2 \sin \frac{2\pi x}{L} + a_3 \sin \frac{3\pi x}{L} + \dots \quad (1)$$

π に掛かった1,2,3,...,nは正弦曲線の半波形(ひだ)の数を表し、係数 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ はその振幅を示す。また、ひだを発生させる座屈エネルギー B は曲げ硬さの関数として次のように定義する。

$$B = \frac{\pi^2 E L}{L^2} \cdot \left(n^2 + \frac{\beta L^2}{\pi^2 \pi^2 E L} \right) \quad (2)$$

ただし、 $E L$: 曲げ剛性に関する定数
 β : 自重

上端エッジのひだの数や振幅は、カーテンを吊すフックの個数と設置間隔で条件づけられており、曲げ硬さや布地の重さから座屈曲線の形状をある程度予測することができるが、下端エッジでは、変形エネルギーは多方向に発散してしまい、現実には、エッジ形状を設定条件から決定することはほとんど不可能である。ランダムな要素を含ませた曲線生成が必要となる。

上端エッジ曲線が規則的なひだの形状をもつ座屈曲線であるとする、垂下した布地の形状は、ひだ形状を少しずつ崩しながら下端エッジに収束する座屈曲線の積み重ねと考えることができる。

そこで、別個に生成した両端のエッジ曲線を拘束条件として、布地内面座標を補間していくことにした。通常、カーテンやスカートなど垂下させる布地物体には、ダーツや折り返しなどひだの発生を制御する成形加工が施してあり、一度発生したひだは布地内面で比較的安定していることから、この仮説はそれほど非現実的なものではないと考える。

3 座屈曲線の生成

3.1 修正コッホ曲線モデル

座屈曲線を単純に正弦関数で近似する方法では、自重や曲げ硬さによって起こるひだの変形を十分に表すことができなかつた⁽⁶⁾。そこで、三角形によってひだを近似し三角形の再帰的分割によって、ひだの変形を表現することを考えた。

まず、初期値として与えた線分 s を底辺にして中点 m から垂線方向に v だけ変位した点 p を頂点とする二等辺三角形を生成する。次に、三角形の両斜辺を底辺にして三角形分割を繰り返すものである。変位置 v を決める係数 r は、再帰分割を繰り返すたびに減衰するものとしておくと、もとの三角形は次第に丸みを帯びたものになってゆく(図2)。第 j 回目三角形分割における底辺の長さ $s(j)$ 、変位置 $v(j)$ は、次式で定義する。

$$s(j) = \sqrt{s(j-1)^2 - v(j-1)^2} / 2^{j-1} \quad (3)$$

$$v(j) = \sqrt{s(j-1)^2} \cdot r(j) \quad (4)$$

ただし、 $r(1) = 1$ 、
 $r(j) = (j-1) \cdot h \quad 0 < h < 1$

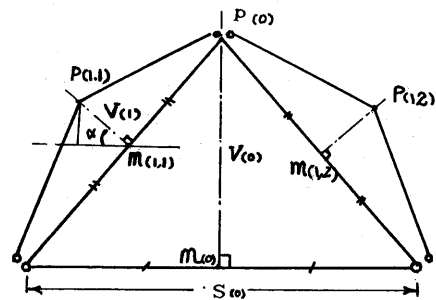


図2：修正コッホ曲線の形状

$m(j)$ を中点とする二等辺三角形の頂点 $p(j)$ の座標 (p_x, p_y) は次式による。

$$p_x = m_x \pm v(j) \cdot \cos \alpha(j) \quad (5)$$

$$p_y = m_y \pm v(j) \cdot \sin \alpha(j) \quad (6)$$

ただし、 m_x, m_y : 中点 $m(j)$ のXY座標、

この曲線生成はコッホ曲線の生成アルゴリズムを応用したもので、「修正コッホ曲線」と呼ぶことにする。

3.2 拘束条件下の座屈曲線

ひだの発生個数や間隔が拘束されている部分に発生するひだ形状はほぼ均一で、座屈曲線は規則的なひだの連続によって定義できるものと考えられる。

発生するひだの数を n とすると、直線 l と座屈曲線との隣合う交点 $i, i+1$ の間隔は l/n 、この交点間にある曲線の長さ、すなわち、ひだの長さは L/n である。交点間隔を底辺とし、ひだの長さの半分を斜辺とする二等辺三角形の垂線の長さを v_0 とする。布地の曲げ硬さは、座屈変形に対してもとの位置を回復する力として作用する。回復幅を g_0 を(9)式で求め、点 p_1 を頂点とする第1回目の三角形を生成する(図4)。

$$s(0) = l/n \quad (7)$$

$$v(0) = \sqrt{L^2 - l^2/n^2} \quad (8)$$

$$g(j) = v(j) \cdot e1 \quad (9)$$

ただし、 $e1$: 曲げ硬さに関する係数

次に、二等辺三角形の斜辺 p_1-i, p_1-i+1 をそれぞれ底辺とする第2回目の二等辺三角形を生成する。交点間に生成した各頂点 p を連結して、ひだの形状を近似するがその長さが L を越えるまで、三角形分割を繰り返す。

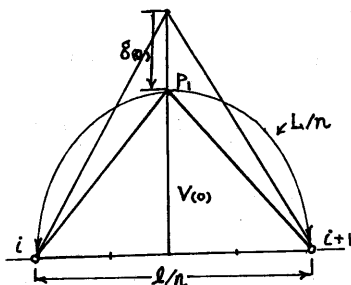


図3：二等辺三角形によるひだの近似

3.3 自由度の高い座屈曲線

拘束条件の弱い場合のひだの振幅や波形は不規則なものとなる。ひだの長さは、実長 L と間隔 l を n 等分する区分点を乱数を用いて前後に移動させ、交点間隔とひだの長さを不規則なものとした。

第 i 番目の区分点をそれぞれ $l(i), L(i)$ とする。係数 k は、ひだの大きさの不規則性に関する係数である。

$$l(i) = i \cdot l/n + k(i) \quad (10)$$

$$L(i) = i \cdot L/n + k(i) \quad (11)$$

第 j 番目の交点間隔を l_j 、ひだの長さを L_j として、修正コッホ曲線による三角形分割を行う。この時、乱数によって三角形の頂点を垂線からずらすようにしておくと、ひだの波形は予期せぬ方向に変形を示すことになる。係数 f_{ij} はひだのゆらぎに関する係数である。

$m(j)$ を中点とする二等辺三角形の頂点 $p(j)$ の座標 (p_x, p_y) は次式による。

$$p_x = m_x \pm v(j) \cdot \cos(\alpha + f_{ij}) \quad (12)$$

$$p_y = m_y \pm v(j) \cdot \sin(\alpha + f_{ij}) \quad (13)$$

ただし、 m_x, m_y : 中点 $M(j)$ の XY 座標

乱数を用いた座屈曲線生成では、座屈曲線の自己干渉やひだの相互干渉を生む可能性が出てくる。そこで、三角形の再帰分割を2回繰り返した後、干渉チェックを行い、直線 l の交点と生成したすべての頂点を制御点としてB-スプライン補間を行い、座屈曲線を近似するものとした。この処理

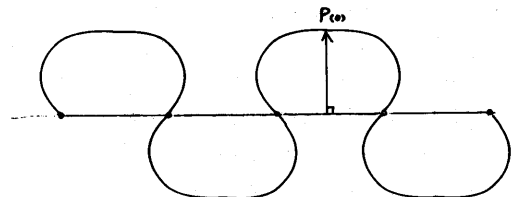


図4：三角形分割による座屈曲線の近似

によって座屈曲線の長さ l は保証されなくなるが、B-スプライン補間による誤差はわずかで形状近似の目的からすれば、許容範囲内であると考える。

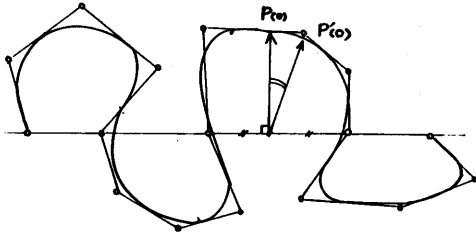


図5：B-スプライン補間

3.4 干渉チェック

座屈曲線を生成する場合注意すべき点は、ランダムな再帰的変形による発生するひだの相互干渉である。相互干渉チェックは、隣合う交点とその間に生成した3個の頂点からなる凸包の交点探索によって行った。ひとつおきにひだを抽出し干渉が無くなるまで、ひだの再生成を繰り返した。

4 布地の曲面形成

まず、布地の垂下長に従い、上端エッジ曲線を $Q(0)$ 、下端エッジ曲線 $Q(m)$ とする $m+1$ 個の座屈曲線 $Q(i)$ を生成する。規則的なひだ形状をもつ上端エッジ曲線は、正弦曲線をあてはめて生成し、他の曲線は乱数を含む修正コッホ曲線に生成する。

次に、生成した各座屈曲線の第 i 番目の座標点を制御点とするベジェ曲線のあてはめによって、上端エッジ曲線と下端エッジ曲線を連結する垂下線の間座標を補間していく(図6)。

中間座標の補間にベジェ曲線を用いた理由は、両端の制御点を必ず通過し、行列 Q_i の各座標に対して強い拘束力を持って、乱数に用いることによって発生する布地内面のねじれやうねりをできるだけ少ないのも緩和することにある。

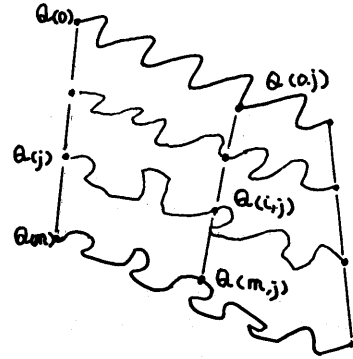


図6：布地の曲面形成

5 表示例

表示する布地物体は、200x200cmのカーテンと2枚はぎのフレアスカートとし、スカートは、3次元空間に設定したダミー台に被着するものとした(図7)。

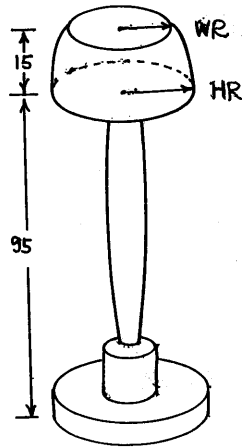
図8はランダムなひだを含むカーテンである。図9は、ランダムを含まない規則的なひだをもつスカートである。生成したスカート形状に格子模様のテクスチャーをマップして右の画像を作成した。布地表面のひだの重なりや潰れをかなりリアルに表現できたと考える。

6 むすび

布地表面に発生するひだを近似する方法として"修正コッホ曲線"を提案し、垂下した布地形状の生成を試みた。このモデルは、正確な力学モデルに基づくもではないが、比較的簡単にリアルな布地形状を生成できることを確かめた。ファッションイメージを表現するツールとして今後の検討を重ねていきたい。

[文献]

- 1). Jerry Weil: "The Synthesis of Cloth Objects"
Proc. of SIGGRAPH'87, pp49-54, 1986
- 2). Demetri Terzopoulos, John Platt, Alan Barr
and Kurt Fleischer: "Elastically Deformable
Models", Computer Graphics, vol.21, pp205-214,
1987
- 3). 安居院猛, 大川雅弘, 中島正之: "拘束条件の強
い布地物体の表現", 電子情報通信学会春期全国
大会予稿集, vol.2, pp285-286, 1987
- 4). 須田紀子, 大平通泰: "布地のドレープ性につい
て", 繊維製品消費科学, vol.15, pp146-169, 1982
- 5). 鶴岡信治, 鈴木紀夫, 木村文隆, 横井茂樹, 三宅
康二: "フラクタルを用いた物体の材質感表現",
第1回NICOGRAPH論文集, pp107-113, 1985
- 6). 宇田紀之, 鶴岡信治, 木村文隆, 三宅康二: "布地
物体の材質感表現", 第3回NICOGRAPH 論
文集, pp192-199, 1987



ウエスト周: 60 (WR:9.5)
ヒップ周: 85 (HR:13.5)
原丈: 15 (原下:11.0)

図7: ダミー台

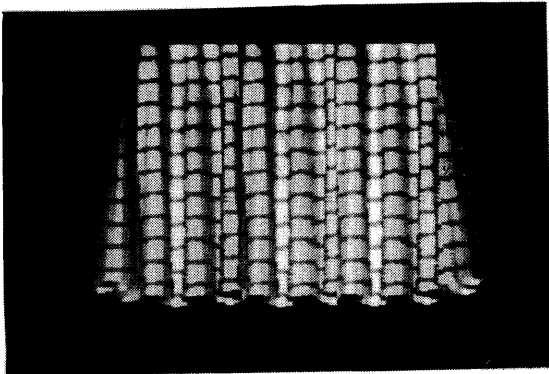


図8: カーテン形状

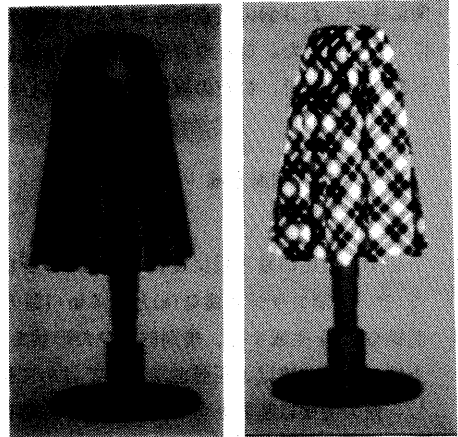


図9: スカート形状