

紙の劣化のモデリング

岡 敬*,茅 暁陽**,今宮 淳美**

*山梨大学大学院医学工学総合教育部コンピュータ・メディア工学専攻

**山梨大学工学部コンピュータ・メディア工学科

現実存在する全ての物質に備わっている性質として、「劣化」というものがある。その物質をとりまく物理的、また化学的な環境に応じて外見や構成が変化するという性質が「劣化」と呼ばれている。物体をCGで作成する際にその物をよりリアルに見せるためには、このような「汚れ」や「劣化」の表現を欠かすことはできない。しかしながら、このような効果を手作業でCGオブジェクトに追加していくのは大変な時間と手間を要する。そこで、本稿では自動で劣化の処理を行うツールの開発を目的とし、その1例として「紙の劣化」を取り扱う。

Modeling of Degradation expression of the paper

Takasi Oka *, Xiaoyang Mao**, Atsumi Imamiya**

*Yamanashi University medicine engineering synthesis educational part computer and media engineering

**Ymanashi University Department of Computer and Media Engineering

which has the thing "degradation" as character with which all the substances that exist actually are equipped - in order to show the thing with reality, in case the character in which appearance and composition change according to the physical and chemical environment which surrounds the substance creates . object currently called "degradation" by CG It is there. . which is [expression of such , "dirt", and "degradation"] indispensable, however . which requires time and time and effort with serious adding such an effect to CG object by handmade business - In this paper, it is automatic and "degradation of paper" is dealt with as one of them for the purpose of development of the tool which processes degradation.

1. はじめに

全ての物質に備わっている性質として、それをとりまく物理的、化学的な環境に応じて外見や構成が変化するというものがある。そこで、物をCGで作成する際により「らしく」見せるためには「汚れ」や「劣化」の表現は必要不可欠である。

しかし、劣化表現をCGで作成するのは手間と時間のかかる作業であるし、少しだけ違う環境で劣化させ

た結果を得たい場合に1から作り直さねばならない（例えば野外に放置して10年たった紙と、15年たった紙の画像が欲しい場合など）

そこで、CGで作成したオブジェクトに自動で劣化処理を施すツールを開発するのが本稿の目的である。

劣化処理の研究としては、Julie Dorseyらによる「石の風化」の研究 [3] や「金属のさび」の研究 [4] がすでにあるが、本稿では「紙の劣化」のなかでも特に「紙の変色」についての研究を行った。

2. 光による紙の退色

紙は、日光などの光に長時間当たると黄色っぽく変色する。これは、紙の中のリグニンという成分が紫外線によってキノンという物質に変化するからである。[1]

物体の色は光に対する反射率で決定される。例えば、黄色い物体は黄色い波長の光に対する反射率が高いために黄色く見える。

紙が変色するときは、紙の表面の青に対する反射率が大きく低下するため、残った赤と緑が強調され黄色く見えるようになる。[1]

2.1 紙の退色の原理

2.1.1 紙を構成するパルプ

パルプとは木材その他の植物から機械的または化学的処理によって抽出したセルロース繊維の集合体のことであり、紙はこのパルプによって構成されている。

本稿では、紙を構成するパルプの色を求め、それを配置していくことで紙の画像を生成する、という手法をとっている。

図1は代表的なパルプの、各波長の光に対する反射率データを示したグラフである。このデータとCIEの定めるRGB表色系の等色関数から、パルプのRGB値を求めた。

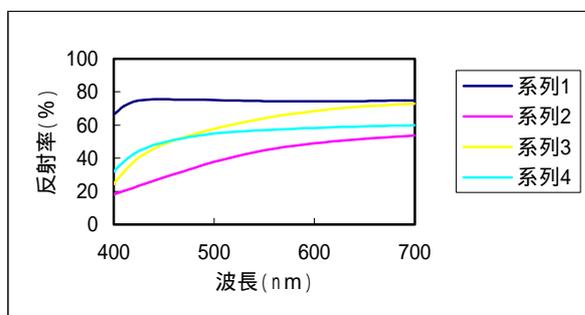


図1. 反射率データ

系列1 = 晒しパルプ 系列2 = 未晒しパルプ

系列3 = 機械パルプ 系列4 = 古紙パルプ

2.1.2. 白色度

製紙業界では通常、白色度と呼ばれる値で紙の白さを表す。[1]

白色度とは酸化マグネシウム標準白板の反射率を100%、暗闇の状態を0%として、波長457nmの光に対する紙の反射率を示したもの。本研究では紙が変色するときの白色度の変化データから457nm付近の光に対する反射率の変化を予測し、紙の色を変化させている。

白色度が図2の矢印のように変化するとき、周囲の反射率を のように変化させていく。紙が退色する時は500nm以上では反射率の低下が少なく、457nm付近の低下が一番大きい。そのため、このような変化となる。

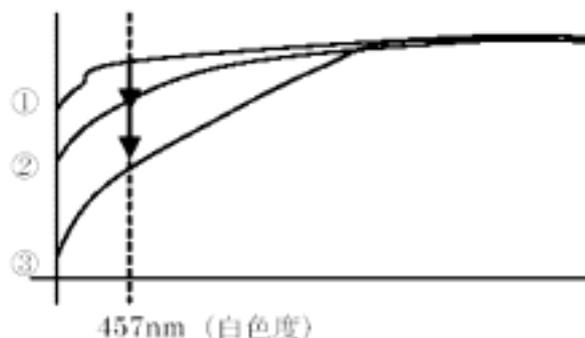


図2. 白色度の変化と反射率データの変化

2.1.3. 光量による退色

[2]によると、「短時間強い光にさらされてうける被害と、長時間弱い光にさらされてうける被害は同程度である」とあるので、既存の資料[1]で時間による関数であらわされている退色の度合いを光の量によってあらわすことが可能となる。

またこのことにより、紙の表面に照射される光量の分布を適用すれば、1画素値ごとに退色の度合いを変えることが可能となる。すなわち、紙の表面の一部分に影（光が当たらない部分）

ができていない場合や、紙表面の凹凸によって光の照射が一様でない場合の紙の退色を再現することが可能となる。

紙が一定時間に受けた照度(Lux)の総量を光の総照射量Hとして定義し、この値によって退色の度合いをあらわす。Hは、照度Lと時間tとの積分によって求められる

$$H = \int L dt$$

* L = 照度
t = 時間

2.2 画像生成アルゴリズム

以下の手順で画像の生成を行う

- 紙を構成するパルプの色を求める
- 実際の紙に含まれるパルプの割合にしたがって紙画像をつくる
- 実際の紙の表面から凹凸の情報を読み取り、生成した紙画像に凹凸をつける
- 白色度の変化にしたがって退色させる

以下で、例として新聞紙の画像生成を行う。

2.2.1 パルプの色を求める

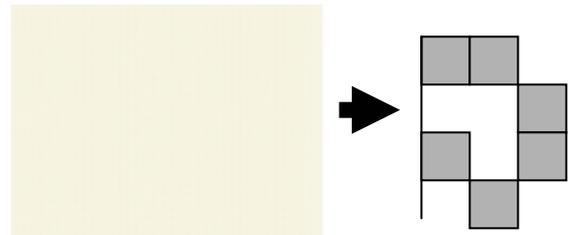
新聞紙は、古紙パルプ約57%、晒しパルプ約43%の割合で構成されている。そこでまず、晒しパルプと古紙パルプの色を求める。(図3)



図3.晒しパルプと古紙パルプの色

2.2.2 紙画像の作成

パルプを配置して、紙を作成していく。2次元平面上に57:43という確率で、晒しパルプと古紙パルプを1ピクセルずつ配置していき、新聞紙の元となる色を作成する。(図4)



作成した紙画像
図4.新聞紙の基本色

2.2.3 紙画像に凹凸をつける

スキャナで取り込んだ、実際の新聞紙の画像から凹凸の情報を読み取り、生成した紙画像に凹凸をつける。(図5)また、今回は新聞紙の画像を生成するので文字のある場所(インクの塗られている場所)も情報として与える。



図5.凹凸と文字情報を与えた画像

2.2.4 退色させる

紙を構成するパルプを、それぞれの変化率にしたがって退色させる。変化率は紙に照射される光の分布と白色度の変化データからもとめる。

図6の上の画像は紙全体に一樣に光が当たった場合の退色の結果であり、下の画像は上方に強い光が当たり、下にいくに従って照射される光量が弱くなっていく状況での新聞紙の退色の様子をシミュレートしたものである。



図6.退色させた画像

3. 湿度による紙の形状変化

湿度による紙の形状変化には「カール」「タイトエッジ」「波打ち」という3種類の現象がある。カールは紙全体が丸まってしまう現象、タイトエッジは放湿によって紙が杯状に変形する現象、波打ちは吸脱湿の繰り返しにより紙の表面がぼこぼこになる現象のことを指す。

本稿では、波打ちによる紙の形状変化のモデリングについて研究を行った。

3.1 湿度による形状変化の原理

3.1.1 波打ちの原因

波打ちは、紙を構成するパルプ繊維の吸脱湿時の変化が原因となって起きる現象である。

その現象を説明するのに重要なポイントとなるのがパルプ繊維の横方向と縦方向の脱湿収縮時の変化率の違いであり、通常のパルプ繊維では横方向の変化は縦方向の変化の20～50倍である、とされている。この変化率の違いと、繊維間結合によって形成される繊維構造が波打ちの原因となる。

[5]では乾燥時における繊維の横方向の収縮は、それと交叉している繊維の縦方向の剛性によって妨げられるが、最終的には繊維間結合を通じて縦横ともにある程度の収縮をおこし(図7)、それがシートの収縮として現れるとした。

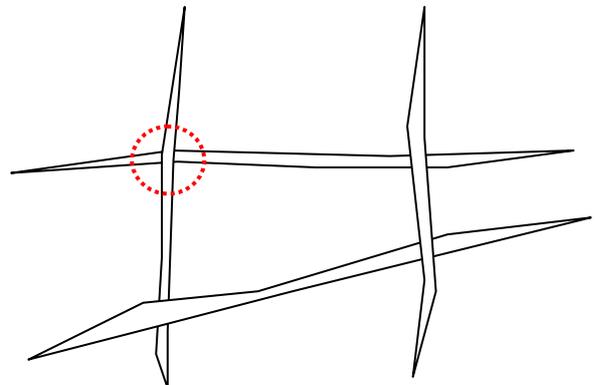


図7.繊維構造

また、洋紙の製作過程においてパルプ繊維をベルトコンベア上で流し乾燥させる工程があるが、このときに紙に含まれるパルプ繊維が一定方向に配列されるような繊維構造が形成される(図8)。こうして作られた紙に吸脱湿を施すと一定方向に流れる波打ちが現れ、紙の繊維構造が波打ちに大きな影響を及ぼすことが確認できた。

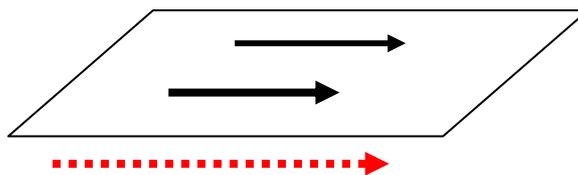


図8 . パルプが紙の流れる方向に並ぶ

しかしながら、繊維構造が波打ちに及ぼす原因が完全に解明されているわけではなく、また物理モデルを作成して計算するには膨大な計算が必要となるため、モデリングの際にはある程度簡略化した手法を考案することが必要となる。

3.2 モデリング手法

紙モデルはベジエ曲面によって作成する。以下の手順でモデリングを行った。

- 紙モデルを、ある大きさのパッチによって分割する
- それぞれのパッチに対して処理を行い、16個の制御点を得る
- すべてのパッチの制御点が求まったら、その制御点を使用して全体の紙モデルを作成する

3.2.1 紙モデルの分割

紙モデルを、パッチによって分割する(図10)。パッチの大きさは任意に変えることができる。

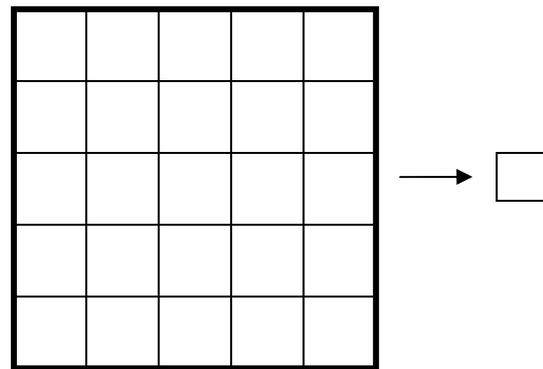


図10 . 紙モデルの分割とパッチ

3.2.2 パッチの制御点計算

ベジエ曲面を描くために、それぞれのパッチごとに16個の制御点の(x, y, z)座標を求める。初期状態のパッチに以下の処理を施すことで座標を求める。初期状態ではパッチは平らな板であり、その制御点はx - y平面に4 × 4で規則的に配列され、z値はすべて0である。

- 1 太さ・長さともまちまちなパルプ繊維をパッチの中に仮想的に配置し、すべての交点を求める
- 2 交点での収縮時におけるパルプ繊維の縦方向と横方向の比率の差からパルプ繊維がどれだけ収縮したかを計算し、それらをすべて足し合わせてパッチ全体でどれだけ縮んだかを計る。
- 3 パッチの縦の辺と横の辺をそれぞれ縦方向、横方向の収縮値の合計分だけ収縮させる。
- 4 収縮させたことで余った紙の長さ分だけ紙をz方向に盛り上げ、そのときの制御点の値を求める(図11)

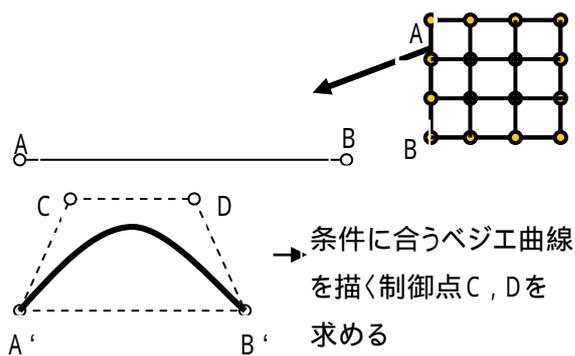
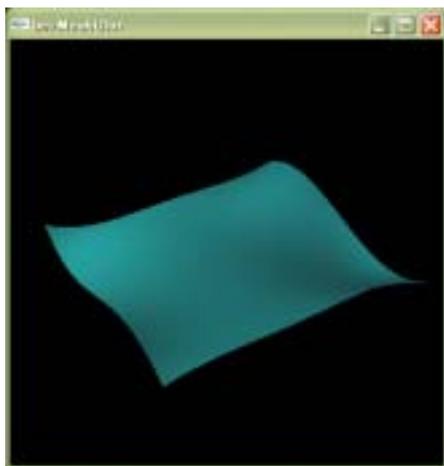


図 1 1 辺の収縮とパッチの隆起

3.2.3 紙モデルの作成

すべてのパッチの制御点計算が終わったら、その制御点を使用し全体で一つのベジエ曲面として紙モデルを作成する。



5 . まとめ

紙の劣化のモデリングとして、色の退色と湿度による形状変化についての手法を提案した。この手法はCGによる映像製作の分野において活用することができるであろう。

6 . 発展と課題

現在は退色と形状変化について別々に処理をおこなっているが、今後は3D空間内で紙の形状に応じた光の当たり方なども考慮し、同時に処理を行う手法を開発すべきであると考えられる。また、パルプ繊維の構成による影響を現在は任意に与えるパラメータによって変化させているが、紙劣化に関する論文調査を進めることによってより正確な変化を得ることのできる手法を確立したい。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、あらゆる面でご支援くださりました日本製紙株式会社の河崎雅行氏に深く感謝いたします。

文献

- [1] 大江礼三郎, 岡山隆之, 松原広明, 花村克幸
「紙の劣化とその対策第二法
機械パルプ含有紙の老化」(1990)
- [2] IFLA
「図書館資料の予防的保存対策の原則」
- [3] Julie Dorsey, Alan Edelman,
Henrik Wann Jensen, Justin Legakis,
Hans Kohling Pederson
「Modeling and Rendering of Weathered
Stone」
- [4] Julie Dorsey, Pat Hanrahan
「Modeling and Rendering of Metallic
Patinas」
- [5] 木島常明
「紙の伸縮安定性に関する研究」

紙の劣化のモデリング

岡 敬*, 茅 暁陽**, 今宮 淳美**

*山梨大学大学院コンピュータ・メディア工学専攻

**山梨大学医学工学総合研究部

現実存在する全ての物質に備わっている性質として、「劣化」がある。劣化とは物質の物理的、または化学的な環境に応じて外見や構成の変化をいう。物体をCGで作成する際その物をよりリアルに見せるためには、このような「汚れ」や「劣化」の表現を欠かすことはできない。しかし、このような効果を手作業でCGオブジェクトに追加するのは大変な時間と手間を要する。そこで、本稿では劣化の視覚効果を自動生成するツールの開発を目的とし、その1例として「紙の劣化」を取り扱う。

Modeling Paper Wearing

Takashi Oka, Xiaoyang Mao and Atsumi Imamiya

Department of Computer and Media Engineering, University of Yamanashi

All materials change their appearance or properties during the interaction with their environment. Simulating such wearing effects is now recognized to be one of the most important techniques in realistic image synthesis. This paper proposes a new technique for modeling the wearing of paper, particularly, the rumpling of paper as the result of undergoing a process of being repeatedly wet and dried. It is known that the rumpling of paper is caused by fiber's large difference of contraction rates in vertical and horizontal directions. Because of the complex fiber structure, providing a physically accurate simulation to the rumpling phenomena is difficult. This paper presents a semi-physically based model for approximately calculating the local deformation of paper according to the contraction rates of fibers.

1. はじめに

すべての物質に備わっている性質として、それとより多く物理的、化学的な環境に応じて外見や構成が変化するというものがある。物をCG表現する際に、より“らしく”見せるためには、これら「汚れ」や「劣化」の表現は必要不可欠である。

PhotoShopなど、汎用の画像処理ツールを利用して、手作業で劣化効果を作成することも可能である。しかし、このような方法では、手間と時間がかかるほか、物が置かれている特定の環境に合わせて、劣化の経過

を連続的に再現することは不可能である。本研究では劣化効果の自動生成ツールの開発を目的とする。

劣化表現の研究として、Julie Dorseyらによる石の風化[3]や金属のさび[4]にかんする研究がある。また、先行研究として、我々は紙の劣化現象の一つである光による紙の退色について研究をおこなった[6]。本稿では紙の劣化現象のうち、湿度による紙の形状変化についてのモデリング手法を提案する。

2. 湿度による紙の形状変化

湿度による紙の形状変化には「カール」「波打ち」などの現象がある。カールは紙全体が丸まり、波打ちは吸脱湿の繰り返しにより紙の表面がでこぼこになる現象である。本稿ではもっとも代表的な変形現象波打ちに焦点をあて、そのモデリング法を提案する。

波打ちは、紙を構成するパルプ繊維の吸脱湿時の変化が原因となって起きる現象である。繊維は吸湿すると伸張し、脱出時に収縮が起きる。パルプ繊維の横方向と縦方向の脱湿収縮時の変化率の違いが波打ちの原因であるとされている。通常のパルプ繊維では横方向の変化は縦方向の変化の20～50倍である(図1)。この変化率の違いにより、お互い結合されている繊維の構造が乱れ、紙が波打つように変形する。文献[5]では波打ちの原因を次のように説明している。乾燥時における繊維の横方向の収縮は、それと交叉している繊維の縦方向の剛性によって妨げられるが、最終的には繊維間結合を通じて縦横ともにある程度の収縮をおこし、それがシートの収縮として現れる。

縦方向の繊維の伸縮

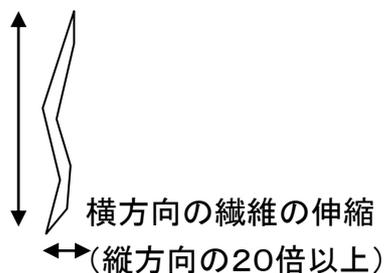


図1 繊維の伸縮

また、洋紙の製作過程においてパルプ繊維をベルトコンベア上で流し乾燥させる工程がある。このときに紙に含まれるパルプ繊維が一定方向に配列されるような繊維構造が形成される。こうして作られた紙に吸脱湿を施すと一定方向に流れる波打ちが現れ、紙の繊維構造が波打ちに大きな影響を及ぼすことが確認できる。

しかしながら、繊維構造が波打ちに及ぼす原因が完全に解明されているわけではない。また繊維の構造や吸脱湿時に起きる一本一本の繊維の変形を正確シミュレートすることは膨大な計算時間を必要とするため、本研究では、簡略化したモデリング法を提案する。

3. 紙の変形のモデリング

3. 1 手順

本研究では紙の形状をベジエ曲面で表し、以下の手順でモデリングを行う。

- ①一枚の平面な紙モデルを3次元空間上に作成し、その上にパルプ繊維をランダムに発生させる。(図2)
- ②紙モデルを指定された大きさのグリッドでセルに分割する。セルごとにy方向の変形を計算することで変形したモデルを得る。

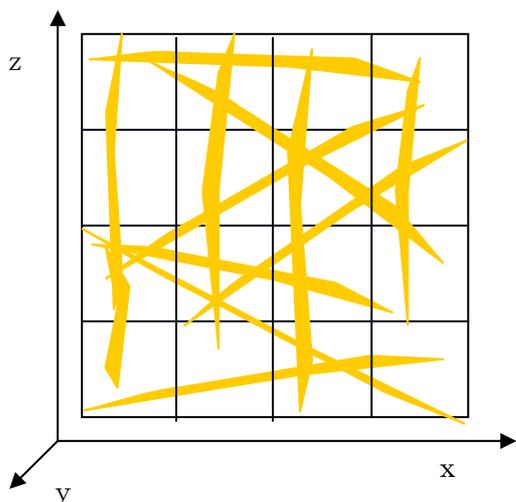


図2 紙モデル

一つのセルについて一つの双二次曲面を定義する。こうすることで、紙モデル全体としてはセルの数だけ山(谷)ができることとなり放湿時の紙表面のでこぼこ感を再現することが可能である。

それぞれのセルについて表層と裏層を定義し、セルを2層で構成する。それぞれの層にパルプ繊維を仮想的にランダムに発生させ、それぞれ異なる繊維構造を構成する。繊維構造から放湿時の収縮量を計算する(計算方法は次項で記述)。このとき表層と裏層では繊維構造が異なるため、それぞれ違った収縮挙動を示す。表層と裏層で収縮量を比較し、多いほうに合わせて $x-z$ 平面上でセル全体を収縮させる。収縮量が少ないほうは余りが出るので余った長さ分だけ y 方向にセルを変形させる(図3)。

3. 2 収縮量の計算

セルが放湿時に収縮する量はセルに含まれる繊維の状態によって決定され、主に繊維の横方向の収縮量がセル全体の収縮量に影響を及ぼす。

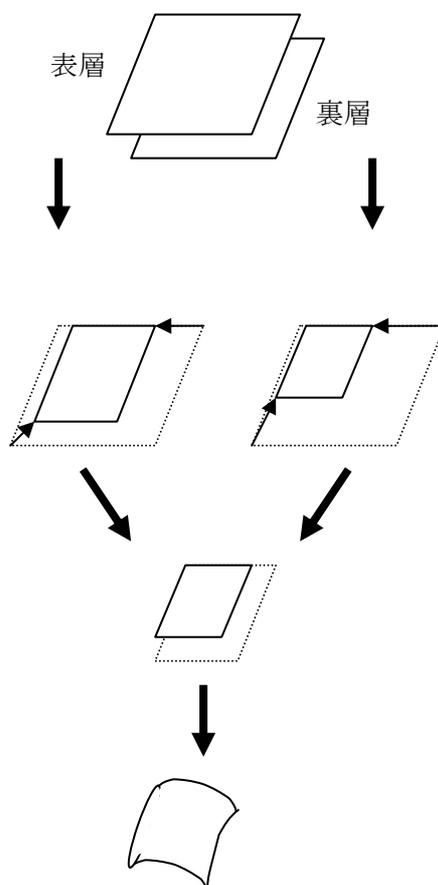


図3 セルごとの処理

図4に示すように、一つのセルの Z 方向の収縮量を求めるのにはまずセル内を Z 軸に平行な線分で等間隔に区切って、繊維の横幅(収縮量)のサンプリングを行う。各線分ごとに、それと交差する繊維について、交差する幅を繊維の横方向に投影し(図5)、それに繊維の収縮率を乗算して繊維の収縮量を求める。一本の線分と交差するすべての繊維のこの収縮量の合計をこの線分上の収縮量とし、すべての線分の収縮量の平均を求めて、セルの Z 方向の収縮量とする。

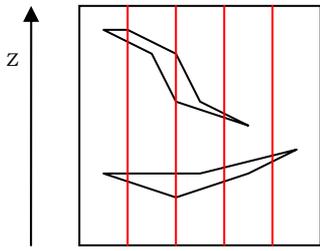


図4 繊維の横幅のサンプリング

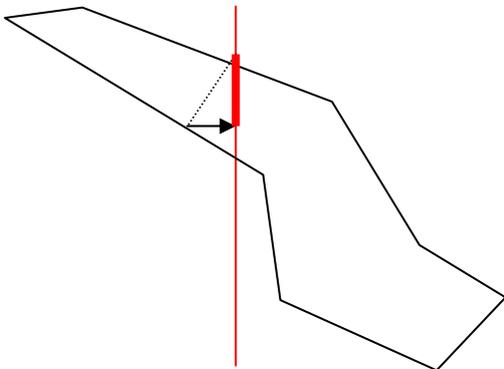


図5 線分と交差する繊維の横幅

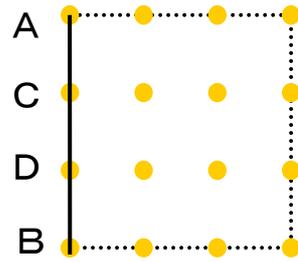


図6 ベジエ曲面を構成するベジエ曲線ACDB

XY平面におけるこの曲線の投影を図7に示す. A, C, D, Bは4つの制御点, l を両端点AB間の距離, s を曲線の長さとする.

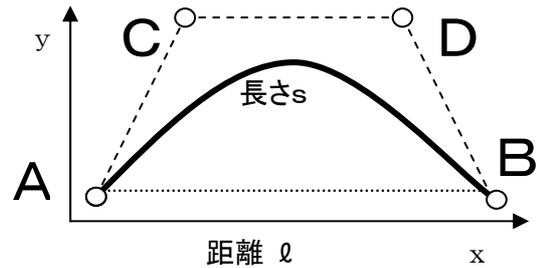


図7 x y 平面上のベジエ曲線

3. 3 ベジエ曲面の制御点

一つのセルは16個の制御点からなるベジエ曲面のパッチする. 制御点の x, z 座標は, セルを $x-z$ 平面上で収縮させてから等間隔に配置することで得られる.

制御点の y 座標はパッチの境界となるベジエ曲線を求めることで計算される. 以下図6に実線で示されているベジエ曲線を例として, 制御点の求め方を説明する.

ここで, AB間の距離 l は紙モデルの2層のうち収縮量が多いほうの層の収縮後の長さであり, 曲線ABの長さ s は収縮量が少ないほうの収縮後の長さである. また, 制御点ABCDの x 座標はAB間の距離 l を4等分することで求めることができ, AとBの y 座標はともに0, CとDの y 座標をともに y_{cd} とすると, ベジエ曲線の定義と曲線の長さなどの条件から y_{cd} を算出することができる.

$t[0:1]$ を媒介変数とするベジエ曲線上の点のXとY座標 $P_x(t), P_y(t)$ は次式で与えられる.

$$P_x(t) = A_x B_0^3(t) + B_x B_1^3(t) + C_x B_2^3(t) + D_x B_3^3(t)$$

$$= \ell t \quad \dots \dots (1)$$

$$P_y(t) = A_y B_0^3(t) + B_y B_1^3(t) + C_y B_2^3(t) + D_y B_3^3(t)$$

$$= y_{cd} (3t - 3t^2) \quad \dots \dots (2)$$

一方、曲線の長さは次式で求められる。

$$s = \int_0^1 \sqrt{p_x^2(t) + p_y^2(t)} dt \quad \dots \dots (3)$$

(3)式に(1)式と(2)式を代入することで制御点CとDのy座標が一意に定まる。

ただし、この式をそのまま解析的に解くことは困難である。ここでは図8に示すとおり、直線分の和として求め、数値的にとく方法をとる。今回は曲線を3分割する手法で数値解法をおこなった(図9)。

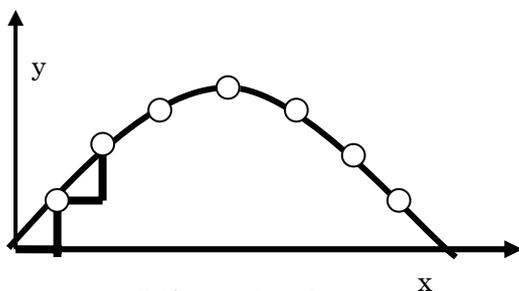


図8 曲線の長さを求める

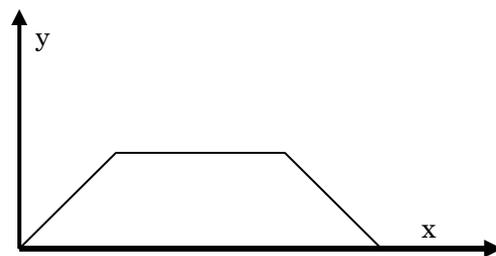


図9 n=3 での(3)式

このとき(3)式は

$$s = 2\sqrt{p_x^2\left(\frac{1}{3}\right) + p_y^2\left(\frac{1}{3}\right)} + \frac{1}{2}p_x\left(\frac{1}{3}\right)$$

$$\dots \dots (4)$$

となり、(1)式と(2)式を代入することにより

$$y_{cd} = \sqrt{\frac{9}{4} \left\{ \left(\frac{1}{2}s - \frac{1}{12}\ell \right)^2 - \frac{1}{9}\ell^2 \right\}}$$

$$\dots \dots (5)$$

を得る。AB間の距離 ℓ と曲線ABの長さ s を(5)式に代入することで制御点C、Dのy座標値を求めることができる。

4. 作成結果

提案手法をOpenGLにて実装し、作成した結果を図10に示す。なお、繊維構造に合わせて紙の収縮量を計算する部分の実装がまだ完成していないため、紙の収縮量に関してはランダムで数値を与えることで処理を行った。

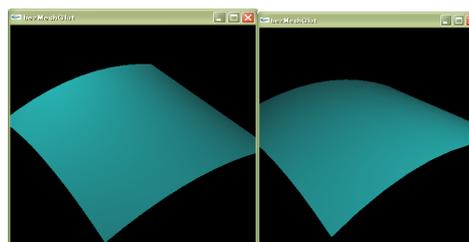


図10 セルの変形

図10は一つのセルの収縮後の形状変化を表示したものである.このようなセルをつなぎ合わせて最終的な紙画像を得る(図11, 12).

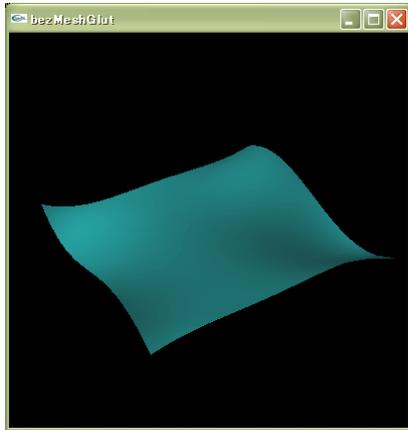


図11 紙の変形のモデリング結果

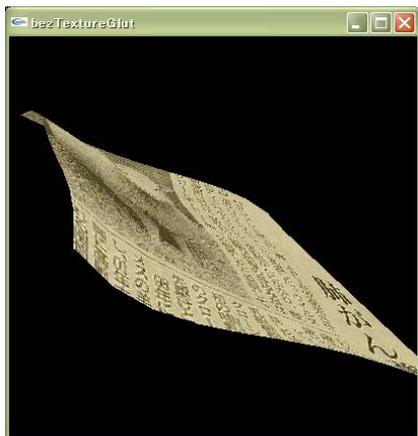


図12 紙画像をテクスチャマッピングした結果

5. まとめと今後

湿度による紙の形状変化のモデリング法について提案と一部の実装をおこなった.今後の研究課題としては繊維構造に合わせた収縮量の計算の部分の実装,セル同士の結合方法の考案,画像合成技術への応用などが挙げられる.

参考文献

- [1] 大江礼三郎, 岡山隆之, 松原広明, 花村克幸: 「紙の劣化とその対策第二法 機械パルプ含有紙の老化」, 日本農学図書館協議会会報, No. 67, 1990.
- [2] エドワード. P. アドコック, 木部徹: 「IFLA図書館資料の予防的保存対策の原則, シリーズ本を残す9」, 日本図書館協会, 2003.
- [3] Julie Dorsey, Alan Edelman, Henrik Wann Jensen, Justin Legakis, Hans Kohling Pederson, “Modeling and Rendering of Weathered Stone”, In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, PP. 225-234, ACM SIGGRAPH, 1999.
- [4] Julie Dorsey, Pat Hanrahan, “Modeling and Rendering of Metallic Patinas”, In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.387-396, ACM SIGGRAPH, 1996.
- [5] 木島常明: 「紙の伸縮安定性に関する研究」, 東京大学博士論文, 1979.
- [6] 岡敬, 茅暁陽, 今宮淳美: 「CGによる紙の劣化表現」, 第112回グラフィクスとCAD研究報告, 2003年8月.