

## 観察に基づく紙の劣化形状モデリング に関する検討

木曾康二 茅暁陽 豊浦正広

CGにおいて物の劣化を表現することは重要である。本研究では紙の劣化の1つであるしわのモデリングを行う。しわの形成過程が詳しく分かっていないので、物理モデルに基づいて再現することは難しい。本研究では Perlin Noise によるしわの疑似的表現法を提案する。Shape-from-shading 法を用いて様々な紙のしわの形状を計測し、形状の周波数特性を分析することにより、紙の種類に合わせて Perlin Noise のパラメータを自動制御できる方法を確立する。

### A Study on Paper Wrinkle Modeling Based on Observation

Koji Kiso Xiaoyang Mao Masahiro Toyoura

Modeling of degradation is an important topic in Computer Graphics. In this paper, we discuss paper wrinkle modeling based on observation. It is difficult to synthesize the images of paper wrinkle through physical simulation since the physical principle behind the phenomenon remains unknown. We propose to model the wrinkles using Perlin noise parameterized by observed shapes of real degraded paper. The shapes are reconstructed with shape-from-shading. Frequency analysis of the shapes gives the parameters of Perlin noise adapted to the different kinds of paper.

## 1. はじめに

現実世界のあらゆるものは時間と共に変化する。変形、変色など経年変化による質の低下を劣化と呼ぶ。CGにおいて物の劣化を表現することは重要である。傷や汚れなどはその物をよりリアルに見せることができるからである。これまで、石の風化や金属のさびなどを対象とした研究が報告されている。本研究では紙の劣化の1つであるしわのモデリングを目的とする。関連研究として、岡らの観察モデルに基づく紙の褪色表現の研究がある[1]。岡らは既存の実験データを基に紙の白色度の減衰と紙が受け取った光の量との関係を明らかにし、光の影響による紙の褪色を再現することに成功した。また、劣化現象ではないが、佐藤らは紙の物理的特性を考慮した対話的なペーパークラフトシミュレーションシステムを提案した[2]。しわは褪色と並んで紙の主な劣化現象の一つである。しかし、しわの形成過程がまだ詳しく分かっていないため、物理モデルに基づいて再現することは難しい。本研究では Perlin Noise によるしわの疑似的表現法を提案する。Shape-from-shading 法を用いて様々な紙のしわの形状を計測し、形状の周波数特性を分析することにより、紙の種類に合わせて Perlin Noise のパラメータを自動制御できる方法の確立を目指す。

## 2. 紙の種類と性質

しわは一般的吸脱湿によってできる。また紙の種類によってしわの形状や特性が異なる。本節ではまず紙の種類及び性質について紹介する[2, 3]。

### 2.1 パルプの種類

紙は植物などの繊維を、網を用いて抄いたものである。この繊維の集合体をパルプと呼び、原料には主に木材を用いる。木材には針葉樹と広葉樹があり、繊維の長さや直径が大きく異なる。平均繊維長は針葉樹で約 3mm、広葉樹で約 1mm、平均繊維直径は針葉樹で約 0.04mm、広葉樹で約 0.02mm である。通常強度を求める場合には針葉樹を、紙表面の滑らかさを求める場合には広葉樹を用いる。

木繊維はリグニンという物質で固められ結合している。パルプを製造するには木繊維を分離する必要がある。繊維の分離方法の違いにより機械パルプ、化学パルプ、古紙パルプなどの種類がある。機械パルプは機械の物理的な力で木材チップを磨り潰し繊維を分離する。平均繊維長が短くなり、紙強度が低くなる。そのため繊維の長い針葉樹を材料に用いる。化学パルプ(クラフトパルプ)は薬品の化学作用を用いて、繊維同士を結合させているリグニンという物質を分解して繊維を分離する。平均繊維長が長く紙強度が高い。また漂白の有無により晒しクラフトパルプと未晒しクラフトパル

プに分かれる。特に強度が必要な場合は未晒クラフトパルプを用いる。針葉樹，広葉樹共に使用する。古紙パルプは古紙をパルプの状態に戻し，インクや不純物を除去したものである。リサイクルを重ねることで繊維が傷つき強度が低下する。針葉樹，広葉樹共に使用するが，新品に比べ若干繊維長は短い。

## 2.2 紙の種類

紙は複数のパルプを組み合わせられて作られ，種類によってその配合率が異なる。代表的な紙とパルプの割合を以下に示す。

- 上質紙(晒クラフト紙)  
広葉樹晒クラフトパルプ 100%使用
- 未晒クラフト紙  
針葉樹未晒クラフトパルプ 100%使用
- 中質紙  
晒クラフトパルプ 40%以上 70%未満使用，その他機械パルプ，古紙パルプを含む
- 更紙  
晒クラフトパルプ 40%未満使用，その他機械パルプ，古紙パルプを含む
- 再生紙  
古紙パルプを使用

## 2.3 紙の目

紙はその作成行程でベルトコンベア上を一定方向に流される。この時繊維の向きが進行方向に揃う傾向にある(図2)。この繊維の向きを目といい，紙の長辺を目に平行に裁断した場合縦目，直角の場合横目という(図3)。紙の目はしわの方向に影響を及ぼすことが分かっている。

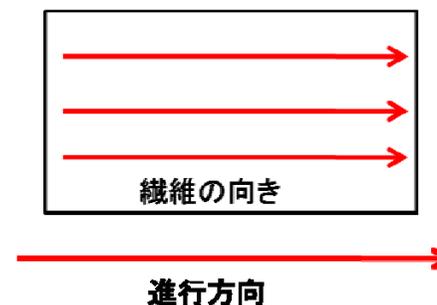


図1 繊維の向き

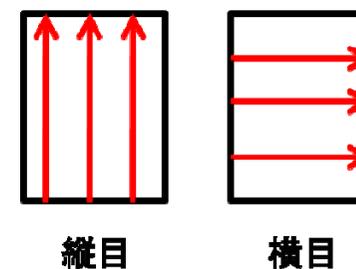


図2 紙の目

## 2.4 しわの原因

紙繊維は吸湿時に伸びるが，縦方向と横方向では伸びる割合が異なる。横方向の伸びは縦方向の20~50倍ある。この変化率の違いと紙の構造的要因がしわの原因である。また，紙の密度の不均一さもしわの一因と考えられる。密度が不均一なため乾燥速度に差が生じ，しわができる。しかし，しわの形成過程が完全に解明されていない。従って，物理法則に基づきしわの形成過程を正確にシミュレートすることは困難である。

## 3. Perlin Noiseによるしわの表現

本研究ではPerlin Noiseを用いてしわを疑似的に表現することを試みる。Perlin Noiseとは波長と振幅が異なる複数のノイズ関数を足し合わせることで，フラクタル性や

ランダム性を持つ波形を表現する手法である[5]。しわをもった紙の3次元形状を表現するためにまず、2次元平面上にランダムな値を高さ(振幅)として与え、ランダムノイズを作成し基底関数とする。次に、基底関数にローパスフィルタを掛けることで、周波数と振幅を変化させた関数を得る。ローパスフィルタのカーネルの大ききでノイズ関数の周波数を制御することができる。また、楕円形のカーネルを使用し、楕円の向きを変えることで、方向によって周波数を変えることができる。このように得られたノイズ関数を足し合わせることでしわを疑似的表現することができる(図3)。

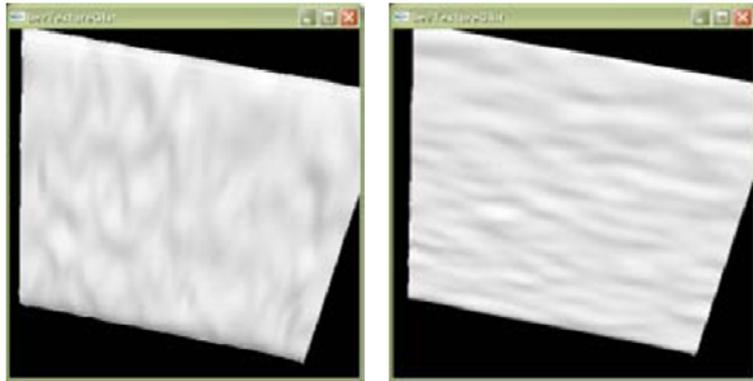


図3 Perlin Noise によるしわの表現

第2節で紹介した通り、紙の種類や性質によってしわの形状や方向が異なる。Perlin Noise においてこのような違いの表現を可能にするためには、まず Perlin Noise の特性と関連づけながら紙の特性を定量的にモデリングする必要がある。そこで、本研究では様々な種類の紙について、実験によりしわを人工的に発生させ、その形状を測定・分析することにより Perlin Noise の設計に利用できるしわの定量的モデルを得る。

#### 4. 紙の形状測定

紙の形状は Photometric stereo によって計測する。紙の形状の計測は、Shape-from-shading 法の一つである Photometric stereo[6]によって行う。Photometric stereo は、方向の異なる照明を当てたときに得られる3枚以上の画像から、物体表面で密に法線方向を求める手法である。物体は拡散反射物体である必要があるが、テク

スチャのないような物体に対しても適用可能である。本研究で扱う紙はこれらの条件によく適合する。

図4に示すように、テーブル上に形状計測の対象となる紙と参照球を固定し、カメラで直上から観測する。参照球は完全拡散反射をする単色の球であることが求められるが、今回の実験ではマウスボールを用いた。観測は暗室で行い、テーブルからの光の反射を避けるためにテーブルは暗幕で覆った。

光源位置を変えて3回以上の観測を行う。参照球から計算される光源方向を  $n_1, n_2, n_3, \dots$ 、ある画素での拡散反射係数  $\rho$ 、その画素での輝度を  $I_1, I_2, I_3, \dots$  とすると、その画素における法線方向  $n$  は以下のように書き表すことができる。

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \end{pmatrix}, N = \begin{pmatrix} n_1^T \\ n_2^T \\ n_3^T \\ \vdots \end{pmatrix},$$

$$I = \rho N n,$$

$$\rho = \| N^+ I \|,$$

$$n = \frac{1}{\rho} N^+ I$$

ただし、 $N^+$ は  $N$  の疑似逆行列である。

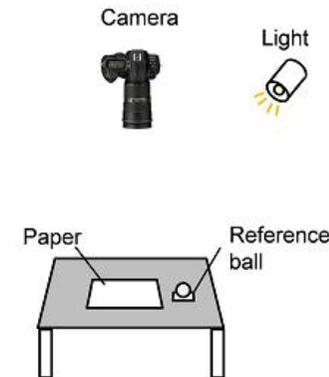


図4 実験環境

$(x_i, y_i)$ における $\frac{\delta z}{\delta x}$ を $p_i$ ,  $\frac{\delta z}{\delta y}$ を $q_i$ と書き表す.  $p_i, q_i$ は $(x_i, y_i)$ での法線を表す.  $(x_i, y_i)$ での高さ $z_i$ を求めるには, 法線を積分すればよい. 図 5 において,  $x_5=x_2=x_4+1=x_1+1$ ,  $y_5=y_4=y_2+1=y_1+1$ であるとすれば,  $z_1, z_2, z_4, z_5$ の間には以下の関係が成り立つ.

$$z_2 - z_1 = p_1$$

$$z_4 - z_1 = q_1$$

$$\begin{aligned} z_5 = z_1 &= (z_5 - z_4) - (z_4 - z_1) = p_4 + q_1 \\ &= (z_5 - z_2) - (z_2 - z_1) = q_2 + p_1 \end{aligned}$$

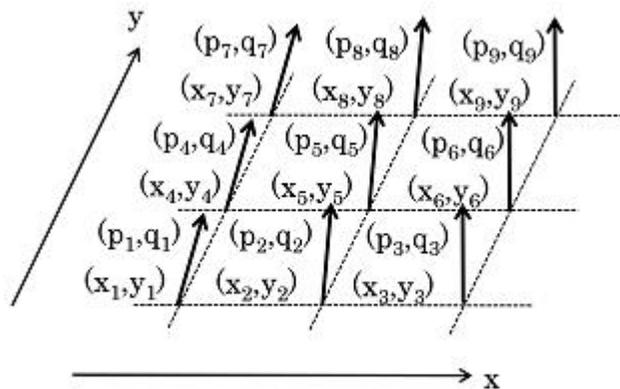


図 5 法線マップからの形状復元

ある点での高さは積分経路に依らず一意に決まるはずである.  $(x_i, y_i)$ を基準点として $z_i=0$ とする. 図中の隣接するすべての高さの関係を書きだすと, 以下の連立 1 次方程式となる.

$$Ax = b$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \\ z_9 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ p_1 \\ p_2 \\ q_1 \\ p_4 \\ q_2 \\ p_5 \\ q_3 \\ q_5 \\ p_7 \\ q_5 \\ p_8 \\ q_6 \end{pmatrix}$$

連立 1 次方程式の解は $A^T A$ が対称行列となることを利用して,  $A^T A x = A^T b$ について共役勾配法などを使って求めることができる.

## 5. 計測実験

上質紙 55kg, 90kg, 135kg, 再生紙 55kg, 90kg, 135kg, 更紙 45kg 計 7 種類の紙で実験を行った. ここで紙の重さは, 紙 1000 枚当たりの重量であり, この値が大きい程厚い紙であることを表している.

各紙を十分に湿らせた後, 風の当たらない床の上で自然乾燥させた. この時, 紙の表面を上にしたグループと, 裏面を上にしたグループに分けて行った.

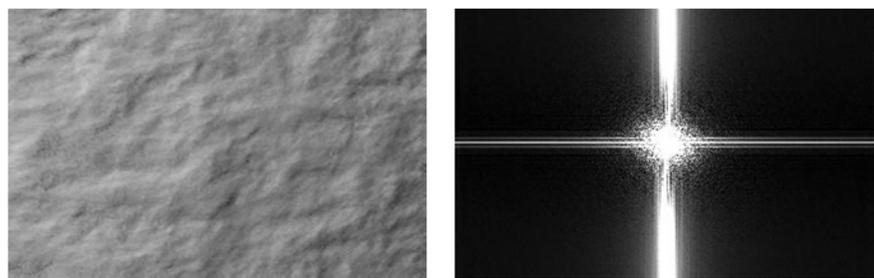
## 5.1 実験結果

上質紙と再生紙で大きなしわが、更紙では細かなしわが見られた。上質紙ではしわの大きさが一定であるが、再生紙ではばらつきがある。これは紙に含まれる繊維の長さが影響したと考えられる。上質紙は繊維長が約 1mm であるのに対し、更紙は 1mm 未満の繊維を多く含んでいる。再生紙は古紙パルプの比率が高いので、パルプの繊維長は正確には分からない。しかし、更紙に比べると長い繊維の割合が高く、繊維長にもばらつきがある。この結果から繊維の長さやパルプの配合比率が、しわの大きさ・形状に影響を与えるといえる。

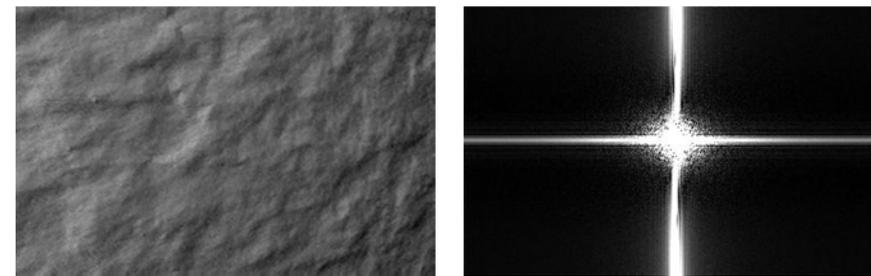
また、紙が厚くなる程しわが少なく、カールすることが分かった。カールは上方に向かって起こり、紙の裏表で違いは見られなかった。同様に形状においても違いは見られなかった。最近の紙は裏表の差が小さくなる様に作られており、今回の実験で紙の裏表は考慮しなくてよいことが確認できた。

## 5.2 スペクトル解析

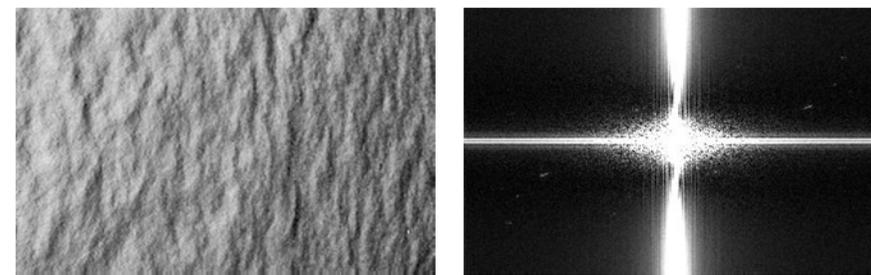
Photometric stereo を用いて上質紙 55kg、再生紙 55kg、更紙 42kg の形状測定を行った。積分によって求めた高さを各画素値に持つ濃淡画像を作成し、そのフーリエ変換の結果を図 6 に示す。すべての紙で縦方向にスペクトルが強く出ている。これは紙の目に沿ったしわが出来ていることを示している。中心付近のスペクトルの広がりを見ると、上質紙と再生紙では同程度の分布であり、更紙では高周波成分を多く含む。これらからしわの大きさの違いが見て取れる。



(a)上質紙



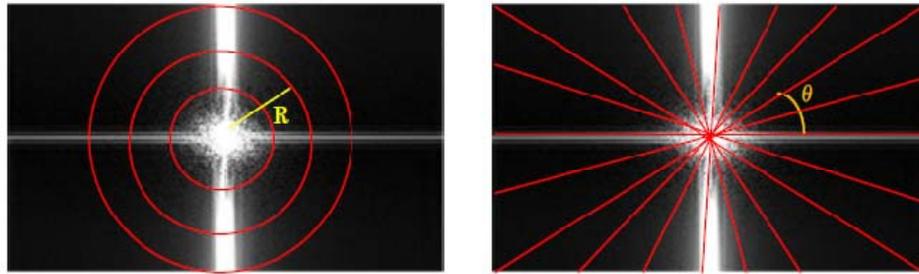
(b)再生紙



(c)更紙

図 6 測定した紙の形状（高さ）（左）とパワースペクトル（右）

第 3 節で述べたように、ローパスフィルタのカーネルの大きさと向きを変化させることにより Perlin Noise の周波数と方向、すなわちしわの大きさと方向を制御することができる。一方、実験で得られたしわの大きさと方向は、下記の方法で求めることができる。図 7 (a)と図 7 (b)に示すように、まずスペクトル画像を半径および角度方向で等間隔に分割し、リング状及び扇形の領域に分割する。半径  $R$  のリング内のパワースペクトルの和は、 $R$  に対応する周波数成分の強さ、角度  $\theta$  の扇形領域内のパワースペクトルの和は  $\theta$  方向の周波数成分の強さを表す。そして、 $R$  が  $0 \sim N$  ( $N$  は画像サイズ)、 $\theta$  が  $0 \sim 2\pi$  までの各領域内のパワースペクトルの和を求め、それぞれに対して、大きいほうから順に複数を選出する。最後に、これらの領域の  $R$  と  $\theta$  の値に基づいて Perlin Noise を作成するためのローパスフィルタカーネルの大きさと方向を決定する。



(a) しわの周波数の検出

(b) しわの方向の検出

図7 スペクトル解析によるしわの特性の検出

## 6. おわりに

本稿は観察に基づく方法を用いた紙の主な劣化現象の一つであるしわのモデリングについて検討を行った。今後は 5.2 節で述べたスペクトル解析によるしわの特性の検出及び検出結果の Perlin Noise 設計への適用について実装を行っていく予定である。

## 謝辞

本稿作成にあたり、紙についての多くの情報を頂きました岡敬さんに深く感謝いたします。

### 参考文献

1. 岡敬, 茅暁陽, 今宮淳美: 「CG による紙の劣化表現」, 第 112 回グラフィックスと CAD 研究報告, 2003 年 8 月
2. 佐藤 崇雄, 藤澤 誠, 三浦 憲二郎: 「物理特性を考慮した紙の 3 次元形状シミュレーション」, グラフィックスと CAD/Visual Computing 合同シンポジウム 2008 予稿集
3. 山内龍男, 「紙とパルプの科学」, 京都大学学術出版会
4. 王子製紙株式会社, 「紙・パルプの実際知識」, 東洋経済新報社
5. K. Perlin, "An image synthesizer", ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 19, Issue 3, pp 287-296, 1985
6. R.J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," Opt. Eng., vol.19, no.1, pp.139-144, 1980.