

拡散, 及び, 吸着理論に基づいた染色のビジュアルシミュレーション

森本有紀* 田中正幸† 鶴野玲治‡ 富松潔‡

*九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻

†東京大学工学系研究科システム量子工学専攻

‡九州大学大学院芸術工学研究院

E-mail: reo@den.rcast.u-tokyo.ac.jp

本稿では, 布の織り構造や糸・染料の要素に基づいて物理的に染色をシミュレーションする手法を提案する. 本手法では横糸と縦糸の上下二層のセルを用いた布モデル内において, Fick の第二法則 [1] に基づき, 染料の拡散を表現する. 拡散係数は染色物理の理論に基づいて布繊維の多孔度や拡散経路の屈曲率などの染料や布のパラメータから算出し, 布の織構造の違いや拡散の異方性などによる染色の特徴を表現する. また, 簡単な染色技法を考慮するために, 染料の拡散を防ぐ防染技法のシミュレーションを行う. 結果画像からは本手法により染色独特の多くの特徴を表現できることがわかる.

Visualization of Dyeing based on Diffusion and Adsorption Theories

Yuki Morimoto,* Masayuki Tanaka,† Reiji Tsuruno* and
Kiyoshi Tomimatsu*

*Graduate School of Design, Kyushu University

†Department of Quantum Engineering and Systems Science, The University of Tokyo

E-mail: reo@den.rcast.u-tokyo.ac.jp

This paper describes the method to simulate and visualize dyeing based on weave patterns, the physical factors of threads and dye. We use a Fick's second law for diffusion. We calculate the diffusion coefficient by the porosity, tortuosity and so on based on physical chemistry of dyeing. We describe the cloth model as the 2-layered cellular model. Also our model includes a simple dyeing technique to make dyeing patterns by interrupting diffusion. We can see our method can capture many of the characteristics of dyeing from our result images.

1 はじめに

染色は世界各地で古くから行われてきた繊維を着色する方法である. 紙への液体の拡散とは異なり, 布の構造に影響をうけたかすれや色むらなどの特徴が見られる (図 1). 染色を表現するためには, 布という織構造を持った繊維に対する液体の浸透現象のモデルを扱う必要がある. そのために布構造や材質, 染料, そして染色技法を考慮したシミュレーションの枠組みを提案する. 本手法により図 1 に示すような染色の特

徴であるかすれ・にじみ・まだらなどを表現し, 模様染め技法の表現を行う.

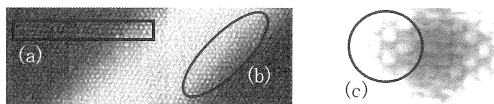


図 1: 染色の特徴. (a) すじ (b) にじみ (c) まだら

2 関連研究

CG(Computer Graphics)における絵画調の技法や手書き調の質感の表現を扱う NPR(Non Photo Realistic Rendering) の分野では、画材のシミュレーションやストローク描画技法の研究などが進められている。そのような研究対象として紙への色の染み込みを表現した水彩画や水墨画の研究などがある。Curtis ら [2] は、水彩絵具を想定し、かすれ、重ね塗り、染み込み、にじみなどの表現を提案している。Cho らは吸収性の高い紙への色素の拡散を想定した格子ボルツマン法を用いて計算し、GPU(Graphics Processing Unit)を用いて描画をリアルタイムに表現する手法を提案している [3]。また、Kunii ら [4] は墨絵の表現において Fick の法則に基づき、陰解法によって拡散の計算を行い、様々な繊維の方向や時間に沿って変化する墨の濃度を考慮した拡散係数を用いて拡散を表現している。染色でもこのような拡散係数の違いは重要である [5]。本研究では染色物理の理論に基づき、拡散係数を求めるためのパラメータを定義する。既存の色素拡散モデルは主に支持体が紙である。紙はランダムに散らばった繊維によって構成され、その構造は 2 次元で表現されることが多い。しかし、布は糸によって構成される織りの構造があり、その構造を 2 次元モデルで表現することはできない。また、既存の色素拡散手法は染色のように布や紙を圧迫した場合などを考慮していない。布を支持体とした描画表現の研究としてはろうけつ染めや油絵の表現手法がある。Wyvill らは与えた蠟の範囲から距離によって蠟のヒビをシミュレートし、ろうけつ染めの表現を行っている [6]。その結果、実際のろうけつ染めの特徴を捉えたらうけつ染め風画像を数秒で作成することができる。また、Drago ら [7] は油絵における柔軟な布のキャンバスの表現を行っており、布の劣化や重力による変形を考慮しながら布を構成する縦糸と横糸の浮き沈みを定式化し、数種類のキャンバスの織り布構造を 3 次元モデルで再現している。しかし、これらの研究では布繊維内での染料の拡散は考慮していない。

既存の布の質感表現研究では BRDF などを用いた光の反射特性を表現したものなど [8, 9] があるが、本研究では光の反射モデルについては扱わない。Adabala は布の糸を構成する更に細かい繊維の幅やその縫りの強さをパラメータとして与えることによって糸目単位のテクスチャを

作り、WIF(weaving information file)に基づいてマッピングを行うことで布を表現している [10]。本研究ではこの手法を参考にし、レンダリングを行う。

3 染色モデル

本研究における染色モデルでは、布の構造を定義し、染料の量や布の屈曲度や多孔度などの値を与え、拡散の計算を行う。最後に拡散の計算結果と布のテクスチャを用いてレンダリングを行う。以下の節ではこれらの具体的な内容について述べる。

3.1 布構造モデル

布はセルによって表現する(図 2)。本研究では二種類のセルを定義する。一つは布を構成する糸単位でパラメータを設定するための cloth cell である。cloth cell は縦糸/横糸、上糸/下糸などの属性、及びそれぞれの糸の幅を定義する。レンダリングの際には cloth cell で定められた位置情報によって交差する糸毎にテクスチャをマッピングする。もう一つのセルは拡散計算を行うために cloth cell を更に分割した diffusion cell である。染色を詳細に表現するために糸よりも小さな解像度で拡散を行う。

布データを作るには、まず縦糸と横糸の大きさに従って cloth cell を定義し、それを布の大きさの分だけ隙間の大きさをあけて並べ、縦糸と横糸の 2 層分用意する。縦糸、横糸、隙間の大きさは任意に与える。次にユーザは簡単なインターフェースを用いて図 2 の青色部分のように 2 次元で布の織り構造を定義し、それに基づいて 2 層のどの部分が上糸か下糸かを定義する。繊維の方向は横糸なら x 方向、縦糸なら y 方向の 2 方向のみで定義される。

3.2 染料拡散モデル

染料の拡散モデルは布内での染料の拡散が重要な浸染技法の一般的な染色工程に習い、水で湿らせた布での染料の拡散を物理的要素に基づいて表現する。拡散は Fick の第二法則(式 1)を用いて定義する [1]。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (1)$$

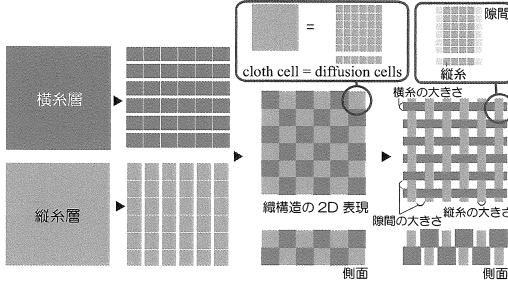


図 2: 布モデル (平織の例).

ここで ϕ は物質の濃度, t は時間, x は位置, D は拡散係数を表す. 本研究では式 1 を式 2 のように離散化する.

$$\frac{\Delta \phi_{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta d} \left\{ D_{i+1/2,j,e} \frac{\phi_{i+1,j,e} - \phi_{i,j,e}}{\Delta d} + D_{i-1/2,j,e} \frac{\phi_{i-1,j,e} - \phi_{i,j,e}}{\Delta d} + D_{i,j+1/2,e} \frac{\phi_{i,j+1,e} - \phi_{i,j,e}}{\Delta d} + D_{i,j-1/2,e} \frac{\phi_{i,j-1,e} - \phi_{i,j,e}}{\Delta d} + D_{i,j,(e+a)/2} \frac{\phi_{i,j,a} - \phi_{i,j,e}}{\Delta d} \right\} \quad (2)$$

このとき ϕ_i は位置 i における濃度, Δx は離散距離である. D は diffusion cell の間で定義されるため, $D_{i+1/2}$ と表す. 拡散は同一層の中で隣接する 4 近傍と異なる層で隣接する一つのあわせて 5 近傍処理によって行う (図 3). 拡散方程式を (式 2) のように変形すると拡散を着目セルと近隣セルそれぞれの間の移動量を考えることができるので, 境界処理や指向性を持った拡散係数による計算に適している. またこの式では理論的に質量が保存される.

染料の拡散は diffusion cell 単位で行う. 本研究の結果画像では diffusion cell とピクセルの大きさを一致させている. 各 diffusion cell には拡散に必要な要素 (縦糸層/横糸層, 繊維/隙間, 上糸/下糸, 位置, 多孔度, 屈曲度) が設定されている. 多孔度は糸における繊維中の隙間の割合を示すものであり, 屈曲度は繊維間の染料の拡散経路のねじれを示すものである. 屈曲度 T の定義は (繊維の通る二点間の直線の長さ ÷ 実際の長さ) であり, 拡散係数と同じく diffusion cell 間で定義される. 屈曲度の値が大きいほど繊維のねじれが小さく, 小さいほどねじれが大きい. 本研究では屈曲度を三つの要素に分けて考える. 一

つは糸の縀りによるもの (τ_1), 一つは織り布の構造による糸の浮き沈みによるもの (τ_2), そして隣接する diffusion cell 間の繊維方向及び多孔度の違いによるもの (τ_3) である. それぞれの値は 0 以上 1 以下の任意の値で与えられる. τ_1 はそれぞれの糸毎に設定する. τ_2 は着目する diffusion cell と隣接セルとの関係において, 同じ層に属し, 繊維が存在し, かつ, 上下の位置が異なる場合, 任意の値を与える. τ_3 は diffusion cell 間での繊維方向の違いや多孔度の違いによって 5 つの場合 (I : 繊維と隙間, II : 隙間と隙間, III : 同一層に属し糸方向に隣接, IV : 同一層に属し糸と垂直方向に隣接, V : 異なる層に属する) において値を設定する. 図 3 はこれらの説明図である. それぞれの屈曲度の要素が重なるほど屈曲度は小さく考えられるので, 最終的な屈曲度 T は全ての diffusion cell において

$$T = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \quad (3)$$

として求める. 拡散係数は Weisz-Zollinger モデル [5] を参考にし, 式 3 に従って定式化したものが式 4 である.

$$D = D_0 P T (\phi_0 / \phi) \quad (4)$$

このとき, P は多孔度, C は染料の濃度, C_0 は平衡状態の染料の量, D_0 は水中拡散係数である. 多孔度は 0~1 の範囲で定義する繊維内の空隙率であり任意の値を与える. ここで実際に C に染料濃度を与えて計算をすると, 染料濃度が高い部分での拡散が起りにくくなり, 計算コストが大きくなる. また, D の値の幅が非常に大きくなり, 計算が安定しない. 従って, 本研究では C は一定値とする. また, D_0 の値は式 [11] を用いて理論的に求めることができる.

$$D_0 = 3.6 \sqrt{76/M} \quad (5)$$

このとき M は染料の分子数である. 染色の特徴の一つである染めむらは拡散係数のばらつきによって起こる. 我々の拡散モデルでは縦糸と横糸の多孔度及び屈曲度を任意に与えた後, 乱数によって糸毎に生じる微妙な違いを表現している.

繊維に吸着できる限界量 V_d は多孔度による繊維の割合から式 3 により定める.

$$V_d = (1 - P) V_{max} \quad (6)$$

このとき V_{max} は理論上 diffusion cell に保有できる染料量の最大値である. また, 染料の繊維へ

の吸着(定着)については、染色物理に基づいた吸着等温線によって染料濃度からタイムステップ毎の吸着の限界量 A_d を計算する。図 6 (a") (b") (c") は代表的な三つの吸着等温モデルである分配則・フロインドリッヒ型・ラングミュア型の濃度に対する吸着量の振る舞いを表す [12, 13]。フロインドリッヒ型の場合、式 7 によって定義する。

$$A_d = k\phi^b \quad (7)$$

このとき k は実験によって求められる定数であり b は 0.1~1.0 の間の定数である。分配則は式 7 の $b = 1$ の場合である。ラングミュア型の場合、式 8 によって定義する。

$$A_d = \frac{V_d K_L \phi}{1 + K_L \phi} \quad (8)$$

実際の吸着量は任意の吸着係数 D_{ab} により、拡散と同様に式 2 に従って求める。吸着した染料は容易に脱着しないことから、吸着量が V_d 及び A_d を超えない限りは吸着が起こる一方向の拡散として計算する [3]。防染技法を考慮するためには体積率のパラメータ B ($0 < B < 1$) を定義する。diffusion cell が保有できる染料の量 V は、吸着せずに拡散している染料の飽和量 V_u と V_d 、そして体積率 B を用いて式 9 のように定義される。

$$V_u = V_{max} P(1 - B), \quad V = V_u + V_d \quad (9)$$

これらの飽和量の概念図を図 4 に示す。これにより防染部分に染料が入り込まず、染色模様を表現することができる。これは Curtis らの紙面の height field を用いた顔料飽和量を求める方法に似ているが、本手法では多孔度をパラメータとして加え、防染による模様染めのために使用する。実際の染色では、この圧力の分布は作り手の意図によって作られるが、本研究では入力した画像の RGB の平均値を正規化したものを B として用いることによって表現する。

染色で用いられる染料はコロイド溶液の特性を持っているので、布が水平に置かれ濡れているのであれば染料は重力の影響は無視できると考えられる。従って diffusion cell では上下の位置関係は考慮せずに計算を行うことができるので 3 次元空間に配置する必要がなく、糸の隣接関係を考えるのが容易である。本研究で上下の位置関係の違いが考慮されるのはレンダリングのときのみである。

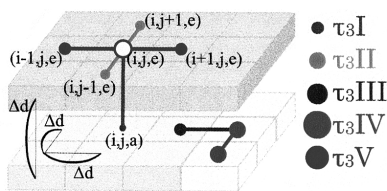


図 3: 染料拡散の計算空間と τ_3 の概念図

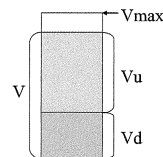


図 4: Diffusion cell における拡散及び吸着の飽和量の関係

3.3 染料と布の視覚化

各 diffusion cell における染料の色は、染料拡散モデルで求めた染料の量に応じて線形補間によって決める。色の値は実際に染色した布から最も明度の高い部分と低い部分の色の値を用いる。また、明度の中間値のデータを追加して補間を行う。布の視覚化は cloth cell 毎に糸の陰影テクスチャをマッピングすることによって行う。テクスチャの生成には、糸の縞りの強さや表面の凹凸の度合いを考慮した糸の陰影テクスチャ生成手法 [10] を用いる。最終的に染料の色と布テクスチャの値は乗算することによってレンダリングを行う。

4 結果

図 5 に多孔度・屈曲度・吸着係数に様々な値を与えてシミュレーションを行った結果を示す。図 5 (a) は他の結果との比較のために用意した布や染料による影響の少ない染色シミュレーションの結果である。図 5 (b) では吸着率が高いために多くの染料が初期の分布付近に残っている。図 5 (d) で見られるまだらの特徴は屈曲度 $\tau_3 V$ の値の調節に加え、布を 2 層モデルにしなければできない表現である。布の 2 層モデルが染色表現に対して有効であるといえる。図 5 (e) は多孔度及び屈曲率をランダムに変えた場合の処理結果である。また、図 5 (f) は体積率をランダムに与えた結果画像であり、同じ設定で糸の幅を狭くしたのが (g) である。(g) では、すじの特徴が見

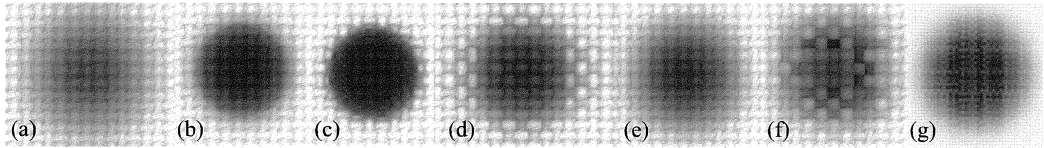


図 5: パラメータ (T, P, D_{ab}) 変化による染色シミュレーション結果の比較.

られる. (e) と (f)(g) を比較すると, 体積率の変化の方が見た目に顕著な影響を及ぼすことがわかる.

図 7 の (a) は吸着モデルを分配則型, (b) はフロイドリッヒ型, (c) はラングミュア型を用いて計算を行った結果である. 図の上段が拡散及び吸着量を表示しているのに対して, 下段では吸着量のみを可視化している. これらの比較により吸着理論によって拡散結果に顕著な違いが起こることがわかる. (b) では広範囲に染料の拡散と吸収が起こっている. (c) では染料濃度が低いときの吸着率が高いため, 初期の染料分布付近に拡散が留まっている.

図 8 は織り布の種類を変えてシミュレートした結果である. 図 5(d) と同様に $\tau_3 V$ の値を小さくすると顕著にまだらの特徴が現れる. その際, 織り布構造が異なると視覚的な違いが明確に表れる. 図 9 は簡単な絞り染め技法をシミュレーションした結果である. 体積率を画像で入力することにより, 防染技法による模様表現を行うことができる.

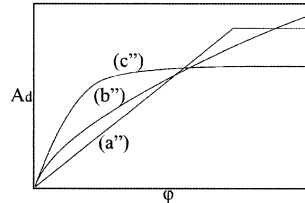


図 6: 吸着モデルの振る舞い.

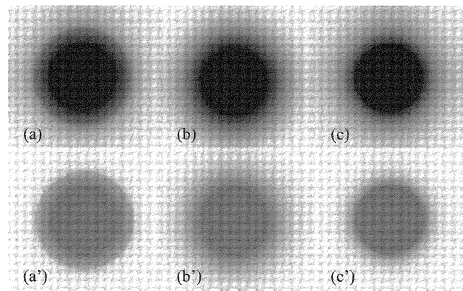


図 7: 異なる吸着モデルを用いたシミュレーション結果の比較.

まとめ

本稿では 2 層の布構造モデルを用い, 染色理論に基づき布や染料のパラメータを考慮した染色のシミュレーションモデルを提案した. 本モデルによって, 織り布構造を考慮し, 屈曲度, 多孔度, 飽和量などの設定によって布への液体拡散の特徴を捕らえることができることを実際の染色との比較によって確認した. また, 防染技法による染色模様の表現手法を提案し, 任意の 2 次元データの入力による直感的な染色技法をシミュレーションすることができた.

今後の課題として染色表現の発展を行うと同時に, 複雑な染色模様生成のための染色ツールや 3 次元における布のモデリングなどの付加が考えられる.

参考文献

- [1] A. Fick, "On liquid diffusion," *Jour. Sci.*, vol. 10, pp. 31–39, 1855.

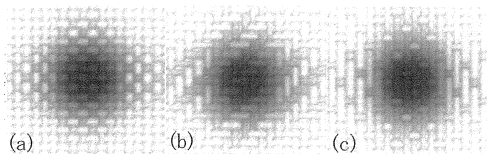


図 8: 異なる布構造へのシミュレーション結果の比較. (a) が平織, (b) が綾織, (c) が縐子織を表す.

- [2] C. J. Curtis, S. E. Anderson, J. E. Seims, K. W. Fleischer, and D. H. Salesin, "Computer-generated watercolor," *Computer Graphics*, vol. 31, no. Annual Conference Series, pp. 421–430, 1997.
- [3] N. S.-H. Chu and C.-L. Tai, "Moxi: real-time ink dispersion in absorbent paper," *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, pp. 504–511, 2005.
- [4] T. L. Kunii, G. V. Nosovskij, and V. L. Vecherinin, "Two-dimensional diffusion model for diffuse ink painting," *Int. J. of Shape Modeling*, vol. 7, no. 1, pp. 45–58, 2001.

値が共通している要素									
糸の幅 / 隙間 $D_0 / \Delta t / IV$ $\Delta d / \tau_2 /$ 初期染料量 染料の分布 diffusion cell の数		8/2 (pixels) (図 5(g) では 2/1, 図 9(b) では 4/1) 1.93 (mm^2/h) / 0.0005 (h) 0.05 (mm) / 0.47 (ratio) / 1.0 (ratio) / 1.0V 直径 30(pixel) の円内 ※ 200*200*2 (図 9(b) では 800*600*2)							
図毎に異なる値を持つ要素	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>V</i>	τ_1	<i>P</i>	D_{ab}	吸着モデル	織構造
図 5(a)	1	1	1	1	1	0.5	0	図 6(a")	平織
図 5(b)	1	1	1	1	1	0.5	0.01 D_0	図 6(a")	平織
図 5(c)	0	0.05	1	0	1	0.5	0	図 6(a")	平織
図 5(d)	0.005	0.005	0.005	1	1	0.5	0	図 6(a")	平織
図 5(e)	1	1	0	1	0.5 r	0.5	0	図 6(a")	平織
図 5(f)	1	1	0	1	1	0.5 r	0	図 6(a")	平織
図 5(g)	1	1	0	1	1	0.5 r	0	図 6(a")	平織
図 7(a)	1	1	1	1	1	0.5	0.01 D_0	図 6(a")	平織
図 7(b)	1	1	1	1	1	0.5	0.01 D_0	図 6(b")	平織
図 7(c)	1	1	1	1	1	0.5	0.01 D_0	図 6(c")	平織
図 8(a)	0.01	0.01	0.01	1	1	0.5	0	図 6(a")	平織
図 8(b)	0.01	0.01	0.01	1	1	0.5	0	図 6(a")	綾織
図 8(c)	0.01	0.01	0.01	1	1	0.5	0	図 6(a")	縹子織
図 9(b)	1	1	0	1	1	0.5 r	0	図 6(a")	平織

表 1: 図 5 から図 9 で用いたパラメータの値. r は 0.5~1.0 の糸毎にランダムな値である. 図 9 を除き, 全ての結果画像はタイムステップ 5000 回の拡散処理を行っている. この処理には 6 分程度の計算時間を要する. ※図 7 及び 9(b) ではシミュレーション中, 初期の染料量を維持する.

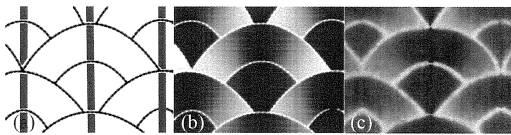


図 9: 染色技法のシミュレーション. 染料の分布を (a) の赤い部分, 防染部分を (a) の黒い部分で与えると (b) のような結果画像が得られる. (c) は実際の染物である.

- on Rendering, pp. 178–185, Eurographics Association, 2003.
- [9] Y.-Q. Xu, Y. Chen, S. Lin, H. Zhong, E. Wu, B. Guo, and H.-Y. Shum, “Photorealistic rendering of knitwear using the lumislice,” in *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 391–398, ACM Press, 2001.
- [10] N. Adabala and N. Magnenat-Thalmann, “A procedural thread texture model,” *J-J-GRAPHICS-TOOLS*, vol. 8, no. 3, pp. 33–40, 2003.
- [11] B. R. van den, “Human exposure to soil contamination: a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values (partly revised edition),” *RIVM Rapport*, vol. 725201011, pp. 321–340(20), 31 December 1994.
- [12] I. Langmuir, “The constitution and fundamental properties of solids and liquids. part i. solids,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 38, pp. 2221–2295, 1916.
- [13] T. Vickerstaff, *The Physical Chemistry of Dyeing*. London: Oliver and Boyd, 1954.
- [5] B. S.-H., “Diffusion/adsorption behaviour of reactive dyes in cellulose,” *Dyes and Pigments*, vol. 34, pp. 321–340(20), August 1997.
- [6] B. Wyvill, K. van Overveld, and S. Carpendale, “Rendering cracks in batik,” in *NPAR '04: Proceedings of the 3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, pp. 61–149, ACM Press, 2004.
- [7] F. Drago and N. Chiba, “Painting canvas synthesis,” *Vis. Comput.*, vol. 20, no. 5, pp. 314–328, 2004.
- [8] N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann, and G. Fei, “Visualization of woven cloth,” in *EGRW '03: Proceedings of the 14th Eurographics workshop*