

2017 年度 卒 業 論 文

Gregory 曲面を用いたリアルタイム 3DCG における
衣服の大域的シワ表現に関する研究

指導教員：渡辺 大地 准教授

メディア学部 ゲームサイエンス プロジェクト

学籍番号 M0114248

高浦 楓太

2018 年 1 月

2017年度 卒業論文概要

論文題目

Gregory 曲面を用いたリアルタイム 3DCG における
衣服の大域的シワ表現に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0114248

氏
名

高浦 楓太

指導
教員

渡辺 大地 准教授

キーワード

3DCG、服のシワ、クロスシミュレーション、gregory 曲面、
パラメトリック曲面

コンピュータが一般に普及し、3DCG に関する技術は大きく向上した。ビデオゲームや映像作品のなかでも 3DCG が利用されるようになってきている。近年衣服のシワ表現を違和感なく 3DCG 内で表現する必要が出てきた。本論文ではキャラクターの衣服にできるシワに着目した。衣服、物体の形状を 3DCG で表現する方法としてポリゴンメッシュを用いた方法やクロスシミュレーションが挙げられる。しかし一般的に用いられているクロスシミュレーションでは局所的な布のシワの表現に特化しており、大域的なシワを表現することは難しい。本研究では腕を持ち上げた時に肩部分に見られるような一度布が持ち上がりその後隣接した部分の布が持ち上がった部分の内側に入り込むといった形状のシワの表現を主に扱っていく。このようなシワ描画は既存のリアルタイム 3DCG 作品のなかではそもそも表現されていなかったり衣服が盛り上がるだけで盛り上がった部分の内側に布が入り込むといったところまでは表現されていない場合が多い。どちらの場合でも動きが単調に見えてしまい衣服の形状の変化が乏しくなってしまうという問題がある。そのためこの研究では Gregory 曲面を用いてリアルタイム 3DCG のなかでそのようなシワ描画を実現する手法を提案する。その際に Gregory 曲面の形状変化のときに物理的な拘束条件を考慮しないという特性を補うために曲面の形状変化にあわせて両端の制御点を操作した。結果滑らかさを保持したまま、布が持ち上がりその後隣接した部分の布が持ち上がった部分の内側に入り込むといった形状のシワの表現を可能にした。また提案手法でプログラムを実装し、検証を行い、提案手法の有用性を確認した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景・目的	1
1.2	論文構成	3
第2章	シワ表現の解説	4
2.1	服のシワ	4
2.2	シワ表現の解説	6
第3章	Gregory 曲面	8
3.1	パラメトリック曲面	8
3.2	Gregory 曲面	9
第4章	Gregory 曲面を用いたシワの表現の表現手法	13
4.1	シワの形成	13
4.2	曲面の面積の補正	15
4.3	Gregory 曲面とクロスシミュレーションの比較	17
第5章	検証	19
5.1	動作検証	19
5.2	考察	21
第6章	まとめと課題	23
	謝辞	24
	参考文献	25

目 次

2.1	布が重なり合わないシワ	5
2.2	布が重なるようなシワ	5
2.3	重なり合うシワを横から見た図	6
2.4	肩部分にできる服のシワの手書き表現の例	7
3.1	Gregory 曲面	10
3.2	Gregory 曲面	11
4.1	Gregory 曲面	13
4.2	制御点の操作の様子	15
4.3	接続された 2 枚の Gregory 曲面	15
4.4	変形前の曲線 l と変形前の曲線 l'	16
5.1	シワが形成される様子	20
5.2	補正なし	20
5.3	補正あり	20
5.4	変形前	21
5.5	変形後	21

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景・目的

コンピュータが一般に普及し、3DCG に関する技術は大きく向上した。ビデオゲームや映像作品のなかでも 3DCG が利用されるようになってきている。近年アニメを原作としたゲーム作品が多く作られるようになりアニメ内で行われる表現を違和感なく 3DCG 内で表現する必要が出てきた。本論文ではキャラクターの衣服にできるシワに着目した。キャラクターの腕部分によく見られる一度盛り上がった布地の内側に隣接する部分の布地が入り込むような構造になっているシワが表現されている。このようなシワ表現は既存の CG 作品のなかではそもそも表現されていなかったり衣服が盛り上がるだけで盛り上がった部分の内側に布が入り込むといったところまでは表現されていない場合が多い。どちらの場合でも動きが単調に見えてしまい衣服の形状の変化が乏しくなってしまうという問題がある。

物体の形状を 3DCG で表現する方法としてポリゴンメッシュを用いた方法 [1][2] や、ポリゴンメッシュの中でも布の動きなどを制限するための物理シミュレーションとしてクロスシミュレーション [3][4][5][6][7][8] が挙げられる、クロスシミュレーションの多くが布を質点バネモデル (Mass-Spring Model) [9] を用いて仮定されている。これは等間隔に配置された質量を質点を、

質量を持たないバネでつないだものである。各質点について、重力や弾性力などの力を求め、それを基に布の動きを再現している。一般的に用いられているクロスシミュレーションでは局所的なシワの表現に向いているが、質点の数が増えるに連れて計算の量が多くなるという特徴を持つ。クロスシミュレーションは質点を増やすことで布の形状に近似することは可能だが、本研究で扱うシワはアニメや手書き作品の中で描かれるような大域的なシワであるため、クロスシミュレーションで表現するには向いていない。

一方質点バネモデルを用いず 3次元メッシュを別の 3次元メッシュと合成する手法 [2][10][11][12] はメッシュを合成する手法は 3次元形状同士の合成のため、接続部の探索を難しく計算量が膨大になるという特徴がある。

本研究では手描きならでのシワ線のなかでも腕を持ち上げた時に肩部分に見られるような一度布が持ち上がりその後隣接した部分の布が持ち上がった部分の内側に入り込むといった形状のシワの表現を主に扱っていく。そこでパラメトリック曲面のひとつである Gregory 曲面 [13] を用いてこのようなシワを表現する手法を提案する。パラメトリック曲面とは並列処理に向けた曲面表現であり、その中でも Gregory 曲面は境界線を共有する複数の曲面を滑らかに繋げる処理を行うことも容易である。本研究ではこの Gregory 曲面を用いキャラクターの腕部分にできる折り目を伴う重なり合うシワの形状を 3DCG で再現することに成功した。提案手法でプログラムを実装し、検証を行い、提案手法の有用性を確認した。

1.2 論文構成

本論文では、第 2 章で実際にコンテンツ内で本研究で取り扱うようなシワがどのように扱われているかを紹介し、第 2 章で 3DCG において形状変化や服のシワを表現する手法を解説している、第 4 章で Gregory 曲面と提案手法の解説、第 5 章でこの研究とまとめ今後の課題を述べる。

第 2 章

シワ表現の解説

本研究で扱うシワ線はクロスシミュレーションで表現されるような写実的なシワとは異なる、簡略化された手描き風のシワ線である。この章では、本論文で扱うシワ表現がどのようなものか、どのような時に用いられている表現なのかについて触れ、本研究で追求するものの土台となる部分の解説を行う。

2.1 服のシワ

一般的に日本語ではシワという言葉で一括りにされがちだが、折り目のできるような大きなシワ、折り目のできない程度の小さなシワなど様々であり、英語では前者は「crease」、後者は「wrinkles」、といったように明確に分けて表現されている。以下図 2.1,2.2 は二つのシワを表すものである。



図 2.1 布が重なり合わないシワ



図 2.2 布が重なるようなシワ

このようにシワといっても折り目のつき方や形状は様々である。折り目がないような小さなシワについてはバンプマッピング [14][15] と呼ばれる手法で表現することもできる。バンプマッピングはオブジェクトの面の法線に対する揺らぎを各ピクセルに適用しているのみで、オブジェクトの形状には直接変化を与えていないためオブジェクトの形状変化を伴うようなシワ表現には向いていない。

本研究で扱うシワとは一度盛り上がった布地の内側に隣接する部分の布地が入り込むような構造になっているものである。このようなシワができる条件として布の両端から布の中心部に向かって向かい合うように布地がずれていくことで折り目がつき重なり合うようになるものである。以下図 2.3 は本論文で取り扱うシワの構造を表すものである。

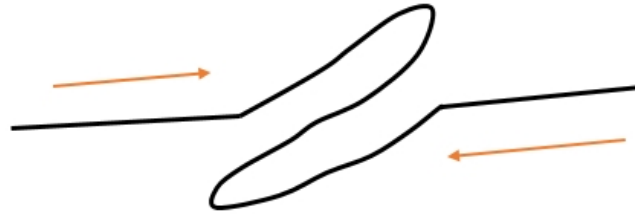


図 2.3 重なり合うシワを横から見た図

2.2 シワ表現の解説

本研究では腕を持ち上げた時に見られる布が持ち上がりその後布の持ち上がった部分の内側に布が入り込むシワに着目し、そのような大域的なシワを 3DCG の中で表現することを目標としている。ここでは本論文で扱うシワ表現がどのようなものなのかを紹介していく。

本論文で扱うシワ表現は主にキャラクターの肩部分に見られるものである。腕を持ち上げた時に見られる布が持ち上がりその後布の持ち上がった部分の内側に布が入り込むように形を成している。

このような表現はアニメ作品内でも数多く見られるものである。以下の図は 2.4 は表現の例である。

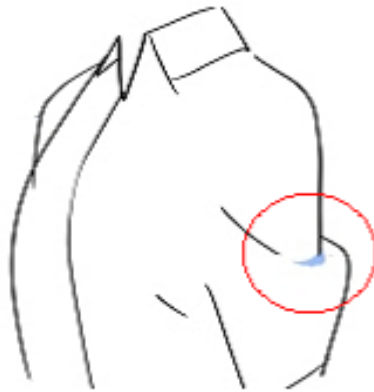


図 2.4 肩部分にできる服のシワの手書き表現の例

キャラクターの腕部分に当たる箇所に布が持ち上がりその後布の持ち上がった部分の内側に布が入り込むように形を成すシワ線を図 2.4 のように表現されることはアニメ作品内でもよく見られる。しかし既存のゲーム作品ではこのようなシワは表現されていなかったり、布の盛り上がり部分ができているだけで内側に入り込んでいる様子がうまく表現しきれていないことが多い。

第 3 章

Gregory 曲面

3.1 パラメトリック曲面

コンピュータグラフィックスにおいて形状を扱う手法を整えることは大切な問題であり、表現手法の構築はその最も基礎となる部分である。曲面を表現する手法としてパラメトリック曲面がある。パラメトリック曲面とは2つのパラメータをもつ関数をもって曲面を表現するというもので、厳密な形状の定義が可能である。自動車デザインのツールとして開発された Bézier 曲面 [16] や NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面 [17]、B-Spline 曲面 [18] などがある。これらパラメトリック曲面は厳密な形状の定義が可能でありながらポリゴンメッシュと比べてデータサイズも小さいというメリットもつ。しかしこれらの曲面では滑らかな曲面を扱うことが出来るが、制御点を介した変形を行うには複雑な処理を行う必要があるため、意図した変形が非常に難しくその一方で曲面を関数で表現するには適しておらず、また曲面同士を滑らかにつなげるためには相当に複雑な処理を行う必要がある。

3.2 Gregory 曲面

Gregory 曲面とは制御点 [13][19] と呼ばれる位置ベクトルによって曲面形状を定義するパラメトリック曲面の一種で、以下の式は $n \times m$ 次の Bézier 曲面の曲面表現式である。

$$\mathbf{S}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) \mathbf{P}_{ij} \quad (3.1)$$

u, v は $0 \leq u, v \leq 1$ の範囲である。また \mathbf{P}_{ij} は Bézier 曲面の制御点を表す。このとき制御点は合計 $(n+1)(m+1)$ 個であり、 u 方向に $(n+1)$ 個、 v 方向に $m+1$ 個ある。また Bernstein 基底関数によって $B_i^n(u)$ と $B_j^m(v)$ は以下のように表される。

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (3.2)$$

ここで、

$$\binom{n}{i} = {}_n C_i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (3.3)$$

は 2 項係数である。また、Bézier 曲面の境界曲線は Bézier 曲線となる。このように Bézier 曲面は複数ある制御点を移動させることで曲面形状を変更できるが、隣り合う複数の曲面を滑らかに接続するためには非常に複雑な計算が必要になってしまう。そのため滑らかさを保ったまま形状を変更するのは容易ではないという特徴がある。この Bézier 曲面を拡張したものが今回使用する Gregory 曲面である。双 3 次 Gregory 曲面は $\mathbf{P}_{ijk} (i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3; k = 0, \dots, 3)$ で表現され、Gregory 曲面表現式は以下のようになる。

$$\mathbf{S}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) \mathbf{Q}_{ij}(u, v) \quad (3.4)$$

図 3.1 は Gregory 曲面の様子である。

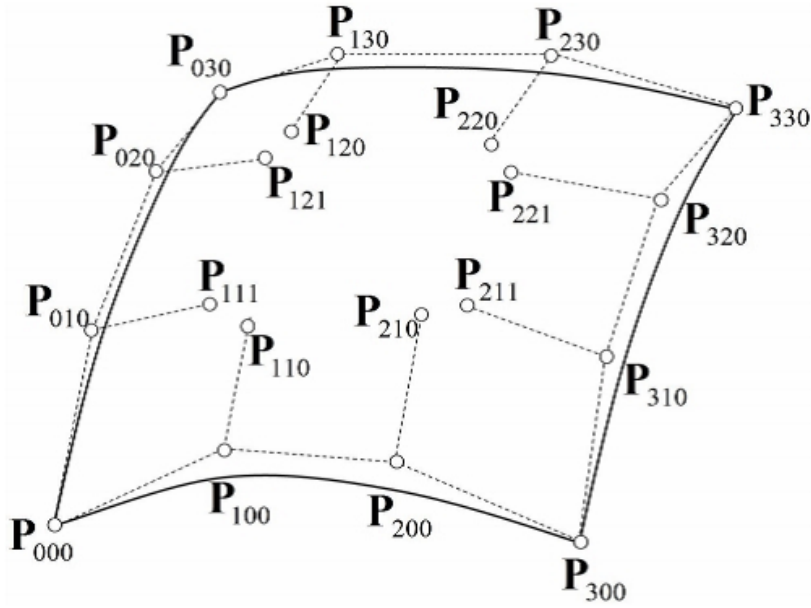


図 3.1 Gregory 曲面

ただし、 $B_i^n(u)$ と $B_j^m(v)$ は式 (3.2) の Bernstein 基底関数である。また、曲面の制御点 \mathbf{P}_{ijk} と \mathbf{Q}_{ij} には、次のような関係がある。

- $i \neq 1, 2$ または $j \neq 1, 2$ のとき

$$\mathbf{Q}_{ij}(u, v) = \mathbf{P}_{ij} \quad (3.5)$$

- $i = 1, 2$ かつ $j = 1, 2$ のとき

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{11}(u, v) &= \frac{u\mathbf{P}_{110} + v\mathbf{P}_{111}}{u + v}, \\ \mathbf{Q}_{12}(u, v) &= \frac{u\mathbf{P}_{120} + (1 - v)\mathbf{P}_{121}}{u + (1 - v)}, \\ \mathbf{Q}_{21}(u, v) &= \frac{(1 - u)\mathbf{P}_{210} + v\mathbf{P}_{211}}{(1 - u) + v}, \\ \mathbf{Q}_{22}(u, v) &= \frac{(1 - u)\mathbf{P}_{220} + (1 - v)\mathbf{P}_{221}}{(1 - u) + (1 - v)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

このとき、 $0 \leq u, v \leq 1$ である。

この曲面式は、以下のような特徴を持っている。

1. Gregory 曲面の境界曲線は Bézier 曲線になる。
2. 曲面上の任意の点が、曲面の制御点で囲まれる領域の内部に存在するという性質を凸閉包性といい、この曲面式は Bézier 曲面と同様に凸閉包性を持つ。この性質によって、曲面間の干渉についてのラフなチェックを高速に行うことが可能である。
3. Gregory 曲面の特別な場合が Bézier 曲面である。具体的には、Gregory 曲面の内部にある制御点、つまり \mathbf{P}_{110} と \mathbf{P}_{111} 、 \mathbf{P}_{120} と \mathbf{P}_{121} 、 \mathbf{P}_{210} 、と \mathbf{P}_{211} 、 \mathbf{P}_{220} と \mathbf{P}_{221} についてそれぞれが等しい時には、Gregory 曲面は Bézier 曲面と等しくなる。

さらに、境界線を共有する 2 つの曲面同士の接続について述べる。接続する 2 枚の Gregory 曲面 $\mathbf{A}(u, v)$, $\mathbf{B}(u, v)$ を図 3.2 で表す。

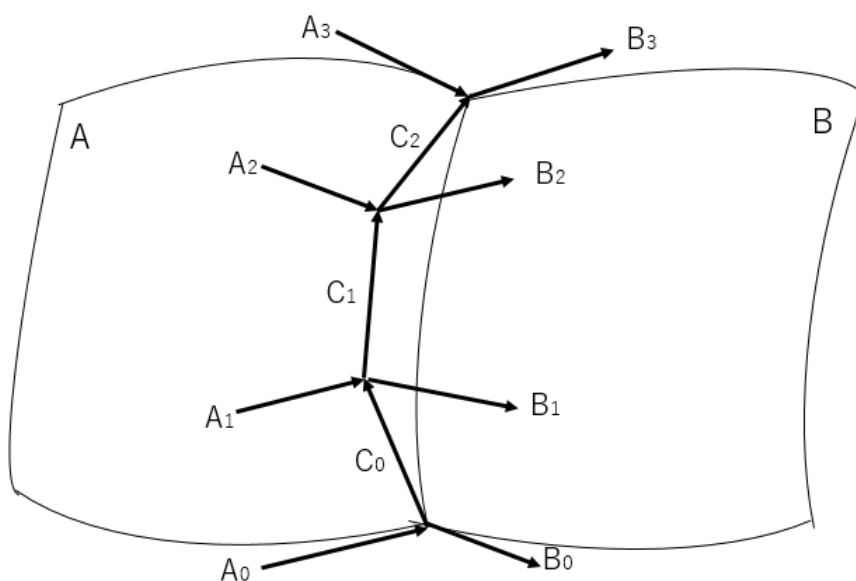


図 3.2 Gregory 曲面

ここで、境界線に隣接する制御点間のベクトルを $\mathbf{A}_i (i = 0, \dots, 3)$ 、 $\mathbf{B}_i (i = 0, \dots, 3)$ 、 $\mathbf{C}_i (i = 0, \dots, 2)$ とすると、

$$\mathbf{A}_1 = \frac{2\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_3}{3}, \mathbf{A}_2 = \frac{\mathbf{A}_0 + 2\mathbf{A}_3}{3} \quad (3.7)$$

と仮定したとき、式 (3.8) によって 2 つの曲面を繋げるような \mathbf{B}_1 、 \mathbf{B}_2 を計算できる。

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_1 &= (k_1 - k_2)\mathbf{A}_0 + 3k_0\mathbf{A}_1 + 2h_0\mathbf{C}_1 + h_1\mathbf{C}_0, \\ \mathbf{B}_2 &= 3k_1\mathbf{A}_2 - (k_1 - k_2)\mathbf{A}_3 + h_0\mathbf{C}_2 + 2h_1\mathbf{C}_1\end{aligned}\quad (3.8)$$

ただし、 k_0, h_0, k_1, h_1 は

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_0 &= k_0\mathbf{A}_0 + h_0\mathbf{C}_0, \\ \mathbf{B}_3 &= k_1\mathbf{A}_3 + h_1\mathbf{C}_2\end{aligned}\quad (3.9)$$

を満たす実数である。

隣り合う Bézier 曲線同士を滑らかに繋げるためには、 u 方向と v 方向同時に両立性補正を行う必要があり、一般的にこのことが形状変形を行う上で大きな制約となっていた。しかし Gregory 曲面は u 方向と v 方向を独立に定義できる。そのため Gregory 曲面同士を接続する場合には一つの方向のみを意識すればよい。曲面同士を滑らかに接続するための計算が単純化するため、Bézier 曲線などに比べて、計算コストを非常に少なくすることができるというメリットがある。そのため本研究では Gregory 曲面を使って一度盛り上がった布地の内側に隣接する部分の布地が入り込むようなシワの表現を行った。

第 4 章

Gregory 曲面を用いたシワの表現の 表現手法

4.1 シワの形成

本手法では Gregory 曲面を 2 枚用いる。2 枚の Gregory 曲面をそれぞれ S^0 、 S^1 とし、それぞれ左面に S^0 、右面に S^1 が対応している。図 4.1 に 2 枚の Gregory 曲面の様子を示す。

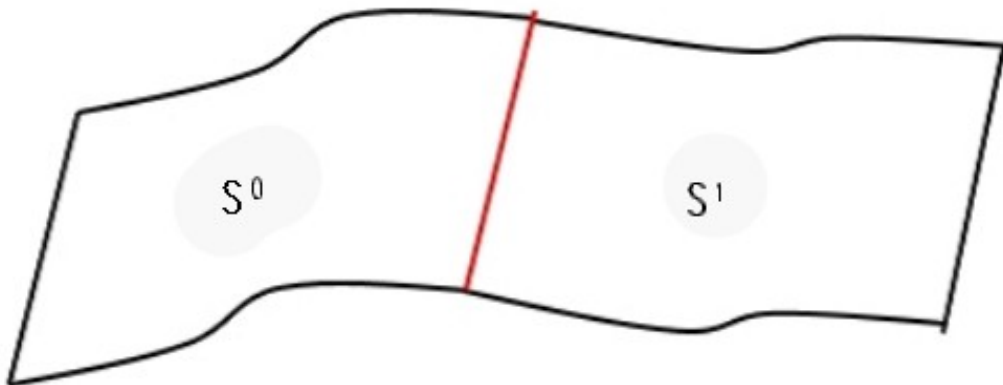


図 4.1 Gregory 曲面

第 2 章で述べたシワの構造の特徴を表現するために曲面 S^0 、 S^1 を以下の順番で形状変形を

行う。

1. 制御点 \mathbf{S}_{200}^0 、 \mathbf{S}_{230}^0 の位置を決定する。
2. 曲面が滑らかになるように各制御点を補正し 2 つの曲面を接続
3. 制御点 \mathbf{S}_{000}^0 、 \mathbf{S}_{010}^0 、 \mathbf{S}_{020}^0 、 \mathbf{S}_{030}^0 、 \mathbf{S}_{300}^1 、 \mathbf{S}_{310}^1 、 \mathbf{S}_{320}^1 、 \mathbf{S}_{330}^1 を移動させる

また曲面 S^0 、 S^1 の制御点を \mathbf{S}_{ijk}^0 、 \mathbf{S}_{ijk}^1 とする。ijk は式 (3.1) と対応するものとする。まず \mathbf{S}_{200}^0 、 \mathbf{S}_{230}^0 の 2 つの制御点の操作することでシワを表現する。

以下本研究で取り扱うシワを表現するために制御点の位置をどのように決定するかを説明する。

制御点 \mathbf{S}_{200}^0 、 \mathbf{S}_{230}^0 について、単位時間 t あたりに

$$(x \text{ 軸方向への移動量}) : (y \text{ 軸方向への移動量}) = 5 : 1 \quad (4.1)$$

の比率で移動する。また今回は z 軸方向への操作は行なわないため制御点の座標の z 成分については初期の状態のままである。

- 制御点 \mathbf{S}_{200}^0 について、 z_{200}^0 を \mathbf{S}_{200}^0 の z 成分を初期値とすると、

$$\mathbf{S}_{200}^0 = \left(t, \frac{1}{5}t, z_{200}^0 \right) \quad (4.2)$$

- 制御点 \mathbf{S}_{230}^0 について

$$\mathbf{S}_{230}^0 = \left(t, \frac{1}{5}t, z_{230}^0 \right) \quad (4.3)$$

となる。制御点 \mathbf{S}_{200}^0 、 \mathbf{S}_{230}^0 の移動の様子を図 4.2 に示す。

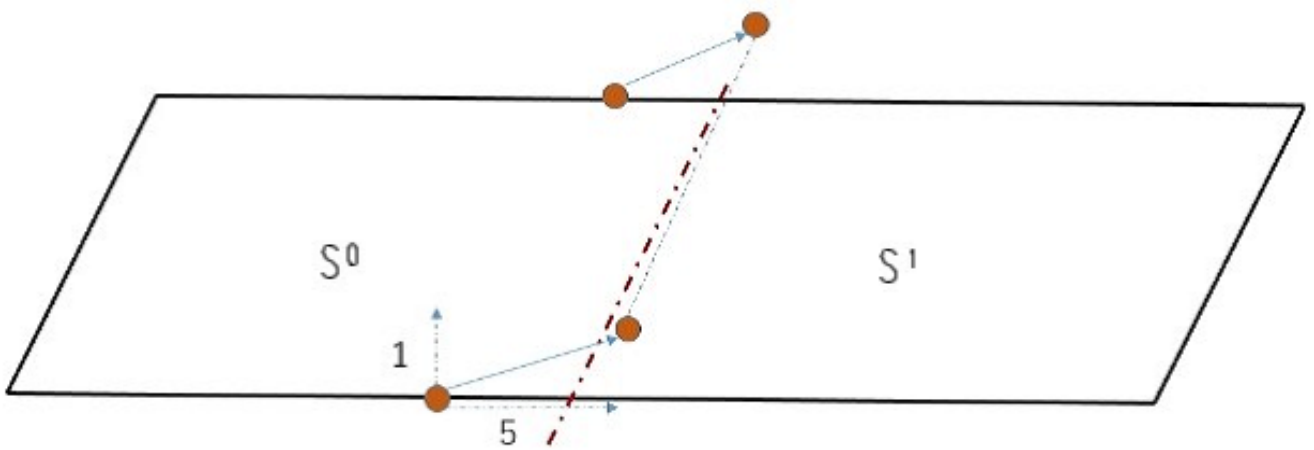


図 4.2 制御点の操作の様子

その後曲面の連続性を保つよう曲面 S^0 、 S^1 の制御点を操作し 2 枚の曲面を接続する。以下図 4.3 は接続された 2 枚の Gregory 曲面である。

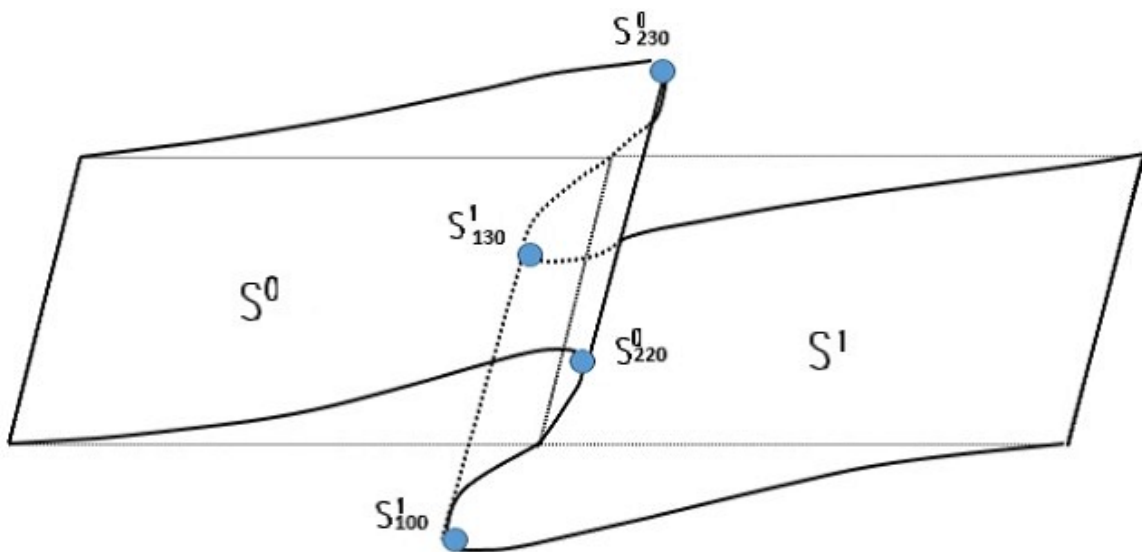


図 4.3 接続された 2 枚の Gregory 曲面

4.2 曲面の面積の補正

4.1 節の操作でシワの形成を行うことができた。しかし 4.1 節の操作のみを行うと曲面の面積が増えてしまう。これは実際の布地に置き換えて考えると、シワを表現することはできているが布

自体の量が増えている、という状況に相当する。曲面の面積が増えてしまうと曲面の模様がある場合その模様が引き伸ばされ本来布の持つ特徴が損なわれてしまう。そうならないように制御点 S_{200}^0 、 S_{230}^0 が移動した分に合わせて、制御点 S_{000}^0 、 S_{010}^0 、 S_{020}^0 、 S_{030}^0 についても移動させることで曲面の面積が変化しないように調整する。

制御点 S_{000}^0 、 S_{010}^0 、 S_{020}^0 、 S_{030}^0 の操作について解説する。曲面 S^0 、 S^1 の総面積が極端に変化しないように制御点 S_{000}^0 、 S_{010}^0 、 S_{020}^0 、 S_{030}^0 を移動させていく。制御点 S_{000}^0 、 S_{010}^0 、 S_{020}^0 、 S_{030}^0 の移動量は以下のように求める。

まず変形前の制御点 S_{000}^0 、 S_{300}^0 を結ぶ曲線の長さ l を求め、その後変形後の曲線の長さ l' を求める。 l' の長さから l を引いた分の距離が制御点 S_{000}^0 、 S_{010}^0 、 S_{020}^0 、 S_{030}^0 の移動量となる。以下図 4.4 は曲線 l 、 l' である。

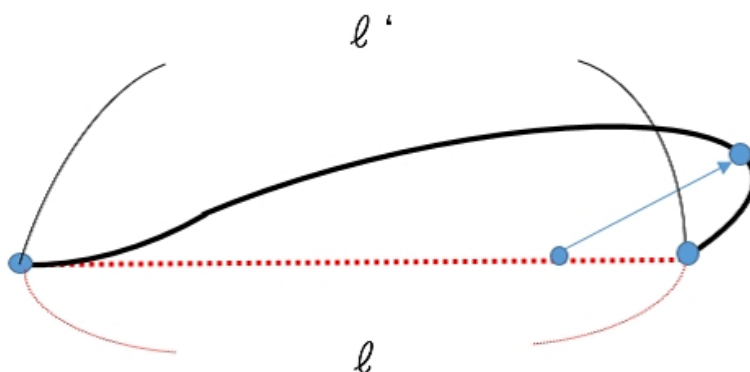


図 4.4 変形前の曲線 l と変形後の曲線 l'

次に曲面の変形後の曲線 l' の長さをどのように求めるかを解説する。まず曲面上のある点がどこにあるかという情報を得るために uv 座標を設定する。この uv 座標は $u = 0, v = 0$ のときは曲面上の左下の端の点を、 $u = 1.0, v = 1.0$ のときは曲面上の右上の点を示すものである。曲面 S^0 について uv 座標で得られる点を $S^0(u, v)$ とする。曲線 l' に対して、100 分割する点を配置する。

この点は曲面上の座標 $(\frac{i}{100}, 0)$ となる。ただし $i = 1, 2, \dots, 100$ である。その各点を結ぶ直線の長さを足し合わせることで、変形後の曲線 l' の長さの近似を求めることが出来る。曲線の長さ l' は以下式 (4.4) になる。

$$l' \cong \sum_{i=0}^{99} \left| \mathbf{S}^0 \left(\frac{i+1}{100}, 0 \right) - \mathbf{S}^0 \left(\frac{i}{100}, 0 \right) \right| \quad (4.4)$$

こうして求めた l' と変形前の曲線 l の長さの差分が制御点 $\mathbf{S}_{000}^0, \mathbf{S}_{010}^0, \mathbf{S}_{020}^0, \mathbf{S}_{030}^0$ の移動する距離となる。制御点 $\mathbf{S}_{000}^0, \mathbf{S}_{010}^0, \mathbf{S}_{020}^0, \mathbf{S}_{030}^0$ について式 (4.4) で得られた距離分 x 軸方向に移動させることにより曲面の面積が増えるという問題を解消する。また曲面 S^1 と制御点 $\mathbf{S}_{300}^1, \mathbf{S}_{310}^1, \mathbf{S}_{320}^1, \mathbf{S}_{330}^1$ についても同様の操作を行うが、このとき制御点 $\mathbf{S}_{300}^1, \mathbf{S}_{310}^1, \mathbf{S}_{320}^1, \mathbf{S}_{330}^1$ は x 軸正方向ではなく、 x 軸マイナス方向となる。

4.3 Gregory 曲面とクロスシミュレーションの比較

近年、衣服のシワ表現としては、クロスシミュレーションが主役になっている。その理由として、各質点に毎フレームごとに働く力や加速度を計算することにより、比較的精密に布の動きや形状変化の様子を表すことができた。従来のパラメトリック曲面では複雑な曲面を表そうとすると、複数の曲面を用意する必要がある。またその複数の曲面を滑らかに接続するには複雑な処理が必要であり、これが動的な変形を困難にしている一因であった。パラメトリック曲面の中でも、Gregory 曲面は滑らかさを保ったまま動的な変形を Bézier 曲面などに比べて簡単に行えられることに加え、質点バネモデルを用いた布シミュレーションでは表現できない、大域的なシワ表現が可能である。これらの特徴をまとめると表 4.1 のようになる。

表 4.1 曲面の特徴

	計算速度	滑らかさ	大域的なシワを表現できるか
Bézier 曲面	○	×	×
クロスシミュレーション	×	○	×
Gregory 曲面	○	○	○

第 5 章

検証

本章では、Gregory 曲面を用いて一度盛り上がった布地の内側に隣接する部分の布地が入り込むような構造になっているシワを表現するプログラムを実装した。このプログラムは、OpenGL をベースとした 3DCG ツールキットである FK Toolkit System[20] を用いた。検証に用いた環境は以下表 5.1 の通りである。

表 5.1 動作環境

CPU	Intel(R) Core(TM) i5-6500 CPU @ 3.20GHz
メインメモリ	4.00GB
GPU	GeForce GTX 960
解像度	1920 × 1200

5.1 動作検証

まず一度盛り上がった布地の内側に隣接する部分の布地が入り込むような曲面の形状変化が行われたか検証を行った。徐々にシワが形成されていく様子を図に示す。

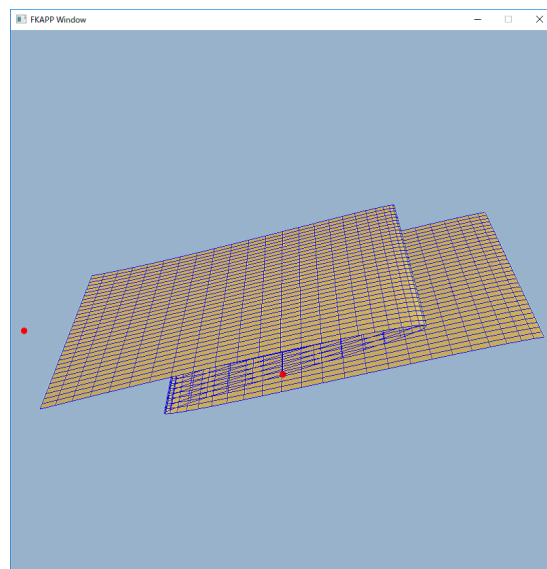
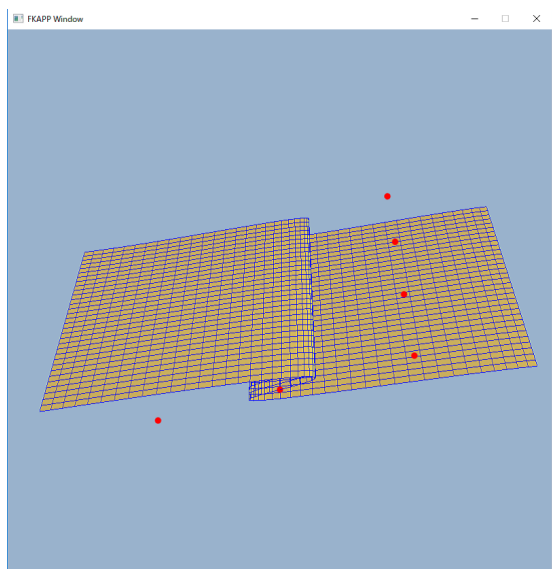


図 5.1 シワが形成される様子

図は面 S^0 が持ち上がり、面 S^0 の持ち上がった部分の下に面 S^1 が入り込んでいく様子である。盛り上がった布地の内側に隣接する部分の布地が入り込むような曲面の形状変化が確認できる。

次に両立性補正についての検証を行った。 \mathbf{S}_{200}^0 、 \mathbf{S}_{230}^0 のによる曲面の変形に対応するように \mathbf{S}_{100}^1 、 \mathbf{S}_{130}^1 の制御点の位置座標を補正する処理をした場合としていない場合を比較した。図 5.2, 5.3 にその様子を示す。

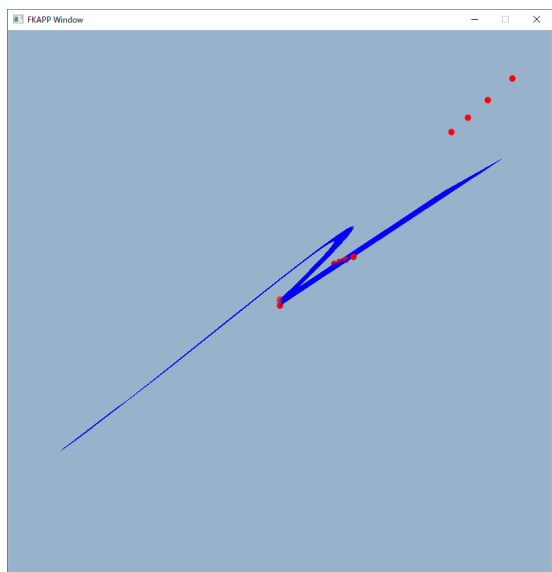


図 5.2 補正なし

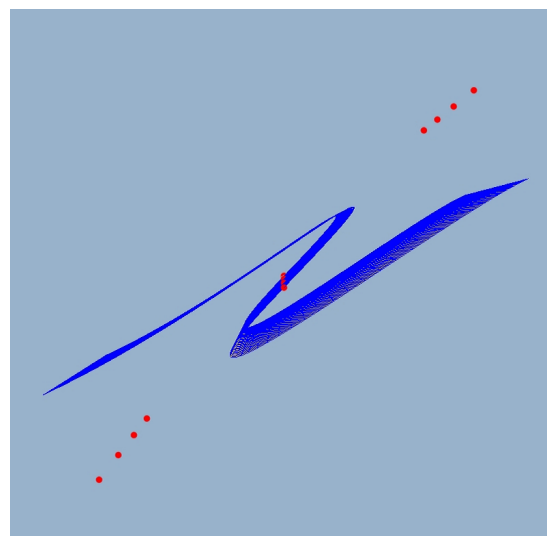


図 5.3 補正あり

制御点 S_{100}^1, S_{130}^1 について、補正を行わなかった場合、2つの曲面の接続部分に不自然な折り目ができてしまっており、滑らかに2つの曲面が繋がっているとは言い難い。しかし補正を行った場合については制御点 S_{200}^0, S_{230}^0 が移動するにつれ面 S_0 が大きく持ち上がっているが、それに対応するように S_1 の形状も変化しているため、2つの曲面の接続部に不自然な折り目がない。2つの曲面 S^0, S^1 が境界曲線を境に滑らかに繋がっている様子が確認できる。次に S_{200}^0, S_{230}^0 と S_{100}^1, S_{130}^1 の移動に合わせて制御点 $S_{000}^0, S_{010}^0, S_{020}^0, S_{030}^0, S_{300}^1, S_{310}^1, S_{320}^1, S_{330}^1$ を移動した場合について検証を行った。



図 5.4 変形前

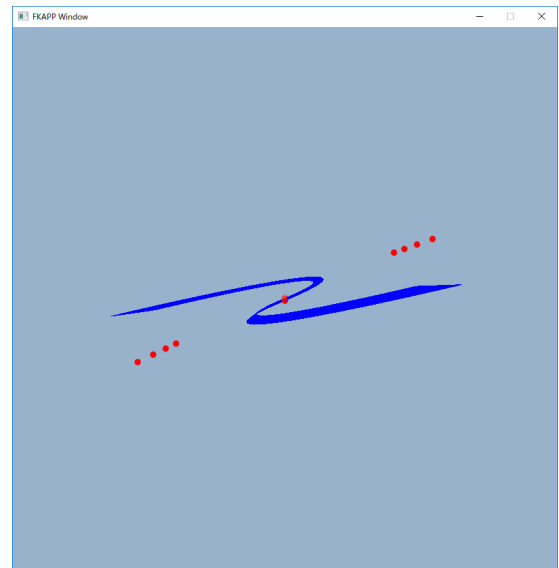


図 5.5 変形後

布にシワができる様子に合わせて両端の制御点 $S_{000}^0, S_{010}^0, S_{020}^0, S_{030}^0, S_{300}^1, S_{310}^1, S_{320}^1, S_{330}^1$ が移動していることが分かる。

5.2 考察

本手法では持ち上がった面 S^0 下に面 S^1 が潜り込む様子を、2つの曲面を滑らかに接続させたまま表現することができた。しかし腕の丸みに沿うように曲面を変形させることは実現できていないため腕部にできるシワとしては不自然に感じてしまう。この問題については用いる Gregory

曲面の枚数を増やすこと、操作する制御点を増やすことなどで解決できると考えられる。

第 6 章

まとめと課題

本研究では、アニメ内で取り扱われているような、シワ表現のなかでも特に腕、肩部分によく見られる度布が持ち上がりその後隣接した部分の布が持ち上がった部分の内側に入り込むといった形状のシワにスポットを当てて研究を行った。

しかし、シワ表現というものは他にも多く存在し、それら全てを網羅し切ることはできていない。本手法を発展させ手描き作品と 3DCG で表現する手法が確立ことによって、実際の作品制作にも良い影響を与えることができるのではないかと考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、暖かい支援、ご指導をいただきました東京工科大学メディア学部の渡辺大地准教授をはじめとする多くの講師、院生の方々に心より感謝致します。また、本研究を進める上で励ましをいただいた研究室のメンバーにも御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 武田巧視. ベクター形式による変位マップアニメーション. 2015 年度卒業論文, 2015.
- [2] 徳山喜政, 今野晃市, 曾根順治. 曲線メッシュをベースにした細分割曲面の局所変形. 芸術科学会論文誌, Vol. 9(1), pp. 1–9, 2010.
- [3] 村上徹, 沼倉有人. CGWORLD +digitalvideo 2015 年 10 月号. 株式会社ボーンデジタル, 2015.
- [4] 堂田卓宏, 河辺郁, 服部元史, 高森年. 時変安定形状を用いてクロス・シミュレーションに演出機能を付加した 3DCG アニメーションシステムの開発. 情報処理学会第 65 回全国大会, Vol. 5N-5, pp. 103–104, 2003.
- [5] 森由有, 青木輝勝, 沼澤潤二. A study on calculation reduction of cloth-simulation for virtual fitting. 情報処理学会第 72 回全国大会講演論文集, Vol. 71, pp. 327–328, 2009.
- [6] 田川和義, 林宏卓, 木村竜吾. 布挙動のシミュレーションと真空実験による評価. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, pp. 263–269, 2003.
- [7] 山田航. 3DCG における大気圧を考慮した濡れた布の挙動の再現. 2012 年度修士論文, 2012.
- [8] 山田航. 弾性バネモデルを用いた布シミュレーションにおける水濡れによる粘着性の表現に関する研究. 2010 年度卒業論文, 2010.

- [9] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko. Stable but responsive cloth. *ACM SIGGRAPH*, 2002.
- [10] A.Khodakovsky, , and P. Schröder. “fine level feature editing for subdivision surfaces. *Proceedings of the fifth ACM symposium on Solid modeling and applications*, Vol. 99, pp. 203–211, 1990.
- [11] H. Biermann, I. Martinand, D. Zorin, and F. Bernardini. Sharp features on multiresolution subdivision surfaces,. *Graph. Models*, Vol. 64, pp. 61–77, 2002.
- [12] T. Kanai, H. Suzuki, j. Mitani, and F. Kimura. Interactive mesh fusionbased on local 3d metamorphosis,. pp. 148–156, 1999.
- [13] H. Chiyokura and F. Kimura. Design of solids with free-form surfacesII. *Computer Graphics*, Vol. 17, pp. 289–298, 1983.
- [14] 井上光平, 浦浜喜一, 兼森渉. 非等方平滑化とバンプマッピングによる油絵風画像の生成. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 12, pp. 1560–1562, 2004.
- [15] Randiama Fernando. GPU Gems リアルタイムグラフィックスのプログラミングのテクニック、ヒント、トリック. 株式会社 ボーンデジタル, 2004.
- [16] 萩原和浩, 加藤誠巳. ベジエ曲面によるメガネの形状表現とそのメガネオーダーメイドシステムへの応用. 情報処理学会論文誌, Vol. 36, pp. 2642–2652, 1995.
- [17] 今野晃市, 千代倉弘明. NURBS 境界 Gregory パッチによる自由曲面形状の内挿方法. 情報処理学会論文誌, Vol. 35, pp. 2203–2213, 1994.
- [18] 主森武. CGWORLD20066 月号. 株式会社ワークスコーポレーション, 東京都渋谷区道玄坂 1-10-8 渋谷野村ビル 7F, 2006.
- [19] 鳥谷浩志, 千代倉弘明. 3次元 CAD の基礎と応用. 1991.
- [20] 渡辺大地. FK Tool Kit System. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>. 参照:2018.01.22.