

バンプマッピングを応用した柔軟な衣服表現法

佐伯 貴利[†] 古川 貴雄[†] 清水 義雄[†] 筒口 拳[‡] 曾根原 登[‡]

[†] 信州大学 繊維学部

[‡] NTT ヒューマンインタフェース研究所

人体の運動によって引き起こされる布の動的な変形を記述する衣服モデルを提案する。衣服の概形は双3次ベジェパッチを用いて表し、布表面の微細な構造はバンプマッピングによって表現する。複数の双3次ベジェパッチを用いて衣服をモデリングする場合、制御点は形状を定義する点とパッチの連続性を保証する点の2種類に分類される。制御点と骨格モデルとの関係についても述べる。また、しわを記述するために3種類の座屈パターンI, Y, Xを導入する。圧縮時の座屈パターンの変化からY, X型の座屈パターンが衣服のような円筒状の物体に現れやすいことを示す。最終的に、人体の運動に伴う衣服の変形と、これら座屈パターンを用いたしわのなどの細かな変形を表現した人の歩行アニメーションを生成する。

Pliable Clothes Representation Using Bump Mapping

Takatoshi Saeki[†], Takao Furukawa[†], Yoshio Shimizu[†],
Ken Tsutsuguchi[‡] and Noboru Sonehara[‡]

[†] Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

[‡] NTT Human Interface Laboratories

A clothes model is proposed to describe cloth dynamic deformation, which is caused by human body motion. Approximate clothes shape can be represented by bi-cubic Bezier patches, and fine structure on the cloth surface can be generated by bump mapping. Where the clothes model is constructed by several patches, control points are classified into two types. One of them is used for shape definition, and others are used to satisfy continuous between the patches. We also describe relation between the control points and the skeletal model. In this paper, we derive three buckling patterns named I, Y and X to describe wrinkles. Changes of the buckling pattern under compression confirm that the patterns Y and X are likely to be formed on a cylindrical object such as the clothes. Consequently, we make human walking animations that represent clothes deformation with human body motion and fine deformation like wrinkles using these buckling patterns.

1. まえがき

CGによる人体表現は産業分野、医療分野、さらに、アミューズメントなど応用は多岐に渡る。特にCGによる人物像表現は、テレプレゼンス、テレイグジスタンスなどのコンピュータネットワークを介したコミュニケーションにおいて不可欠であり、これまでに、顔の表情生成 [1] や髪型の生成 [2]、歩行動作などの骨格運動の生成 [3] などが報告されている。これら、顔の表情や体の運動に加えて、ファッション、すなわち、服飾の要素も人物の個性を表現する上で不可欠な要素と言える。

従来のCGによる衣服形状生成では、衣服の素材となる布のモデリングが重要な課題とされ、幾何的な手法や物理的な手法が提案されている [4]。布のように柔軟な物体のモデリング手法としては、物理モデルを用いた手法が提案されている。これらの手法は、連続体モデルを用いた手法 [5]、連続体弾性理論に有限要素法 (FEM) を適用した手法 [6, 7]、離散的な弾性網モデルを用いた手法 [8-10] に分類される。FEM や弾性網モデルを用いるとリアルな衣服形状を生成できるが、布の異方性や材料非線形性を考慮してモデルを精密にしていくと計算量の増大と数値計算における安定性が問題となる。さらに、布と布、布と衣服との接触や反発、摩擦などの物理現象を記述するモデルの構築そのものが難しい問題となっている。特に、胴体部分の捻りや、肘や膝の曲げなど人体の運動によって引き起こされる衣服のしわを弾性理論に基づく方法によって生成するのは困難である。

本稿では、効率的に衣服形状の概形を与える曲面を生成し、その曲面にバンプマッピングを行うことによりスカートやギャザーや衣服表面のしわなどの衣服の微細な立体形状を表現する方法について述べる。幾何的に正確な衣服形状を生成する手法を追及するのではなく、テクスチャマッピングなどハードウェア化されている機能を利用して高速に衣服を着用した人物像を生成することを目的とする。以下では、骨格運動に基づく衣服形状生成 [13, 14] に用いる人体モデルと衣服モデルについて述べ、衣服表面のしわを生成するための座屈パターンの分類と各パターンの特徴について説明する。さらに、提案手法を適用して人体の運動に伴う動的なしわの変化を表示した結果を示す。

2. 人体モデル

衣服形状生成に用いる人体モデルには図1に示す骨格モデルと皮膚モデルを用いる。この骨格モデルでは20本の骨を16関節で接続している。骨格モデルの動

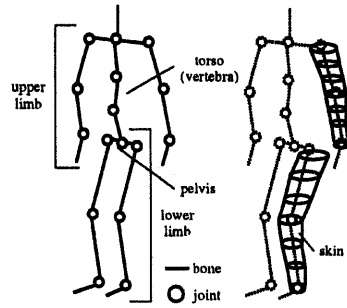


図1: 人体モデル

作は関節角度の時系列データにより表現する。各関節には3自由度を与えて関節角度を $\theta_i(t)$, ($i = 1, 2, 3$) と表す。ここでは、骨格の動作を滑らかにするために、関節角度データには m 次までのフーリエ級数展開 $\bar{\theta}_i(t)$ を用いる。

$$\bar{\theta}_i(t) = \alpha_0/2 + \sum_{n=1}^m (\alpha_{i,n} \cos nt + \beta_{i,n} \sin nt) \quad (1)$$

人体モデルの体型に対応する皮膚形状はベジェ曲面を用いて記述する。双3次ベジェパッチ $F(u, v)$ は次式で表すことができ

$$F(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_{i,3}(u) B_{j,3}(v) P_{i,j} \quad (2)$$

$$(0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1)$$

ここで、 $B_{i,3}$ は Bernstein 関数

$$B_{i,3}(u) = \binom{3}{i} (1-u)^{3-i} u^i \quad (3)$$

であり、 $P_{i,j}$ は制御点と呼ばれる。双3次ベジェパッチでは16点の制御点によってその形状が記述される。

ここでは、図1のように皮膚と骨格の関係を一般化円錐における主軸と表面の関係とみなし、骨格の主軸に対して皮膚表面の形状を双3次ベジェパッチで与える。人体の骨格モデルとパッチの制御点との対応関係を与え、骨格運動に伴い制御点が3次元空間を移動するように設定すれば、骨格モデルの運動に伴った皮膚の変形が表せる。いま、ローカル座標系における一つの制御点の位置を

$$P = [P_x \ P_y \ P_z]^T \quad (4)$$

と表わす。この制御点をもとに新たな制御点 P' を

$$P' = [aP_x \ bP_y \ cP_z]^T \quad (5)$$

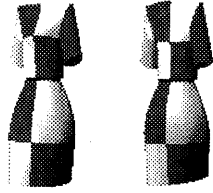


図2: 衣服モデルにおける双3次ベジェパッチの配置

として生成すれば、 a, b の増減により皮膚に対応するパッチを主軸から離したり近づけることができるので、結果として太い腕や細い脚を表現できる。同様に c の増減により骨の長さを変更できるため、 a, b, c を変更することで基準の体型から様々な体型を生成できる。

双3次ベジェパッチを用いて、各部品を骨を単位に独立にモデリングすると、関節部分でパッチの接続が不連続になるという問題が生じる。この問題を避けるために接続部分の制御点を同一にする変換を行う。この変換により骨格モデルの姿勢を変化させても、肘や膝などの関節部分におけるパッチの接続は C^0 の連続性が保証される。

3. 衣服モデル

3.1 制御点の配置と分類

衣服モデルについては、女性のワンピース、ジャケットとスカート、ジャケットとパンツの3種類について考える。これらの概形を表現するために双3次ベジェパッチを図2のようにジャケット部分に12枚、スカート、パンツ部分に8枚を割り当てる。ジャケットの胴体部分は8枚のパッチから構成し、前面と背面にそれぞれ4枚のパッチを割り当てる。腕部については左右それぞれ2枚のパッチで構成する。スカート、パンツ部分についてもジャケットの胴体部分と同様に、前後それぞれ4枚のパッチから構成する。

このように双3次ベジェパッチを接続する場合、パッチ間の接続を考慮すると制御点は次のように分類できる。

- (1) 形状を定義する制御点
- (2) パッチの接続を保証する制御点

パッチ境界の接続を C^1 にするために境界の制御点を2枚のパッチを定義する点の midpoint として与えると、(2) の制御点はさらに

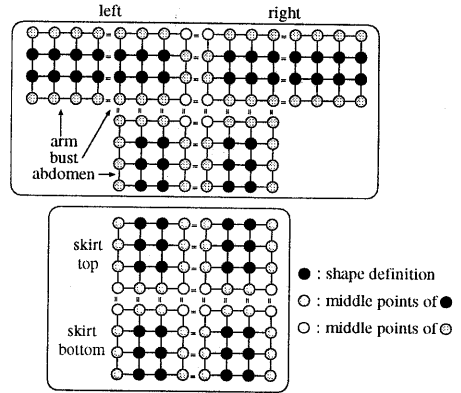


図3: 衣服を構成する制御点の配置

- : 形状を定義する制御点の midpoint
- : パッチの接続を保証する制御点の midpoint

に分かれる。

ジャケットとスカートを構成するパッチの制御点について分類した結果を図3に示す。図3では (a) 衣服形状を定義する制御点列、(b) 制御点列 (a) の midpoint、(c) 制御点列 (b) の midpoint を示している。このように、形状を定義するいくつかの制御点の位置を指定することにより、双3次ベジェパッチ間の接続が保証された衣服形状の生成が可能となる。なお、ワンピース形状を得るにはウエスト部分の接続を C^1 とすればよいので、腹部のパッチとスカート上部の制御点をスカート上下のように決めればよい。さらに、パンツ形状を生成するには、スカート下部の左右のパッチを接続せずに、2本のチューブが形成されるように前後のパッチを接続すればよい。

3.2 制御点と骨格運動の対応付け

衣服形状を定義する制御点と骨格運動の対応付けについては、単一の関節に限定する場合と複数の関節から決定する場合に分けて考える。単一の関節に限定される場合については、人体モデルにおける皮膚のモデリングと同様に、ローカル座標系内で制御点の位置を定義しておけばよい。ローカル座標系は骨格運動によりグローバル座標系内を移動するため、ローカル座標系内に制御点を固定しておけば骨格運動により衣服は変形する。制御点を基準の位置から移動させることで衣服形状のデザインが変更できる。

例えばミニスカートを長くしてニーレングスカートに変更する場合には、制御点が大腿部に相当するロー

カル座標系に限定されるため問題はない。しかし、ミニスカートからニーレングスカート、さらにロングスカートに変更する場合には、図4のように制御点が複数のローカル座標系を移動することになる。

図4の $x_i-y_i-z_i$ 座標系と $x_j-y_j-z_j$ 座標系の間に階層関係があるものとし、それぞれ上位座標系、下位座標系とする。骨の主軸をそれぞれ z_i 軸、 z_j 軸に対応させ、骨の長さ、すなわち、関節間の距離をそれぞれ d_i, d_j とする。具体的には最も短いミニスカート形状から長いロングスカートの形状まで連続的にスカート形状を変化させる方法を示す。つまり、スカートの長さ c が $0 \leq c \leq d_i + d_j$ の範囲で変化する場合に、2つのローカル座標系間で連続的に制御点を移動させる方法を示す。 $c < d_i$ の範囲でミニスカート、 $c = d_i$ のときにスカートが膝丈になるニーレングスカート、 $c > d_i$ の範囲でロングスカートに対応させる。まず、ニーレングスカート形状を定義する制御点を P^i 、ロングスカート形状を定義する制御点を P^j と表し、

$$\begin{cases} P^i = \begin{bmatrix} P_x^i & P_y^i & P_z^i & 1 \end{bmatrix}^T \\ P^j = \begin{bmatrix} P_x^j & P_y^j & P_z^j & 1 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (6)$$

中間形状を表す制御点を

$$P(c) = \begin{bmatrix} P_x & P_y & P_z & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

とする。このときスカートの長さ c の変化に対して、スカートを連続的に変形させる制御点 $P(c)$ は次式で与えられる。

$$\begin{cases} P(c) = A_i P^i + A_j M P^j \\ A_i = \begin{cases} \frac{(d_i + d_j)c}{d_i}, & \left(0 \leq c < \frac{d_i}{d_i + d_j} \right) \\ 1, & \left(\frac{d_i}{d_i + d_j} \leq c \leq 1 \right) \end{cases} \\ A_j = \begin{cases} 0, & \left(0 \leq c < \frac{d_i}{d_i + d_j} \right) \\ \frac{cd_i + (c-1)d_j}{d_j}, & \left(\frac{d_i}{d_i + d_j} \leq c \leq 1 \right) \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 M は P^j を $x_i-y_i-z_i$ 座標系に変換する回転、並進行列を表す。ミニスカートからニーレングスカートの領域 $0 \leq c < d_i/(d_i + d_j)$ では A_i が線形に増大し、 A_j は0をとる。そのため、 P^j は $P(c)$ に影響を与えない。しかし、ニーレングスカートからロングスカートの領域 $d_i/(d_i + d_j) \leq c \leq 1$ になると A_j が線形に増大するためロングスカートの制御点 P^j の影響が次第に強くなる。

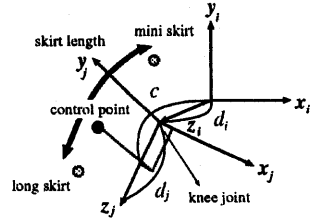


図4: 制御点と骨格運動の対応付け

4. 座屈パターンを用いたしわの生成

4.1 座屈パターン

衣服の表面に現れるしわは圧縮によって生じる曲げ変形、すなわち、座屈現象とみなすことができる。ここでは、図5(a)に示す辺の長さをそれぞれ $2L_x, 2L_y$ とする長方形平面を折りたたむときに生成される形状を座屈パターンとして扱う。以下では、 y 軸方向に圧縮して辺の長さを $2\alpha L_y$ ($0 \leq \alpha \leq 1$) とした場合の座屈パターンを求める。なお、係数 α を圧縮係数と呼ぶことにする。まず、座屈パターンを図5(b), (c), (d)の3種類に分類する。

図5(b)は長方形 $P_1P_2P_3P_4$ が y 軸方向の圧縮により P_5P_6 の部分で折れ曲がるパターンである。図5(c), (d)の座屈パターンについては、領域内の実線が尾根線、点線が谷線に対応する。尾根線の形から図5(a)をI型座屈パターン、(c), (d)はそれぞれY型座屈パターン、X型座屈パターンと呼ぶことにする。

I型座屈パターンでは圧縮により P_5P_6 の部分が z 軸方向に変位する。このときの変位 h_1 は

$$h_1 = \sqrt{1 - \alpha^2} L_y \quad (9)$$

となる。Y型座屈パターンの P_6 と P_7 は圧縮によりI型と同様に z 軸方向に変位し、 P_5 は x, z 軸方向に変位する。 P_5 の変位を図のように w, h_2 を用いて表す。 P_1P_5, P_5P_7 の距離を求めると次の関係が得られる。

$$\begin{cases} w^2 - h_1^2 + h_2^2 = 0 \\ (w - L_x)^2 + (h_1 + h_2)^2 - L_x^2 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

w, h_2 の存在範囲を考慮すると

$$\begin{cases} w = L_x - \sqrt{L_x(h_1 + h_2)^2} \\ h_2 = -(h_1^3 - L_x h_1)/(L_x^2 + h_1^2) \end{cases} \quad (11)$$

が求まる。

$L_x = L_y = 1$ としたときの圧縮係数 α と $w, h_1, h_2, h_1 + h_2$ の関係を図6に示す。 $\alpha = 0$ のときに y 軸方向の圧縮がない平面状態であり、 α が減少すると長方

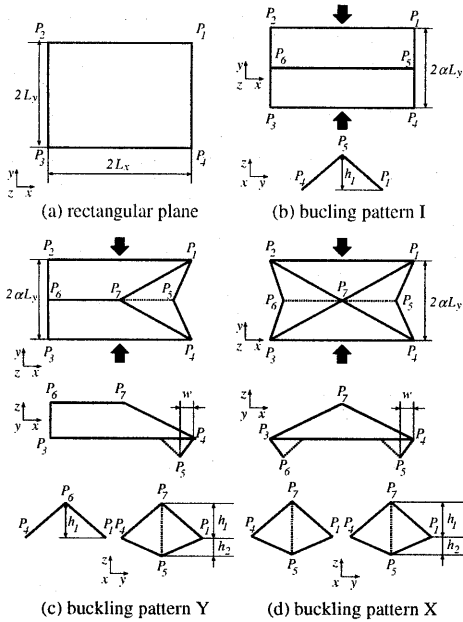


図5: 座屈パターン

服と座屈パターンの関係を考えると、衣服の胸部、腹部や腕部に軸方向に圧縮が加えられた場合、Y型、X型座屈パターンでは円筒を形成するような湾曲が自然に生じることになる。一方、I型座屈パターンでは円筒を形成するような曲げ変形が必要になる。したがって、衣服のように円筒状の物体に現われるしわはI型よりもエネルギー的に安定なY型、X型の座屈パターンになることがわかる。

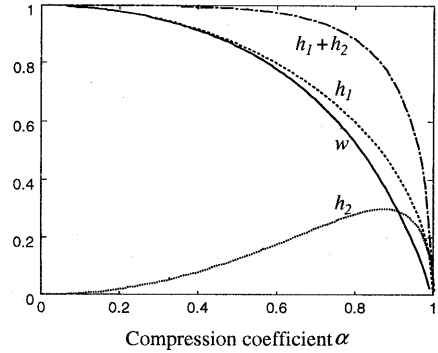


図6: 圧縮係数と座屈パターンの関係

形領域が圧縮されて座屈パターンが現れる。 w, h_1, h_2 のグラフから y 軸方向の圧縮に対して、 P_5, P_6, P_7 は z 軸方向に急激に変位することがわかる。 P_5 については x 軸方向よりも z 軸方向に急激に変位することが確認できる。座屈パターンの厚みを h_1+h_2 とすれば、 y 軸方向を 60% 程度に圧縮した場合でも、長方形を 2 つに折った状態の厚みに近づくことがわかる。

圧縮によって Y 型、X 型座屈パターンが生成されると w は増加して P_5P_6 間の距離は小さくなる。 Y 型、X 型座屈パターンが x 方向に連続するのは以下の場合である。

- Y-Y 型座屈パターン
- Y-X 型座屈パターン
- X-X 型座屈パターン

これら座屈パターンを連続に接続すると、接続部分 では基準面のなす角が $2 \tan^{-1}(w/h_2)$ になる屈曲が生ずる。つまり、Y 型、X 型座屈パターンが生成されると、もとの平面は全体に湾曲することを示している。もちろん I 型座屈パターンの接続ではこのような湾曲は生じない。

胸部、腹部や腕部のように衣服は基本的に平面の布を曲げて円筒を形成している。したがって、円筒を形成するために布を曲げるエネルギーが必要になる。衣

4.2 バンプマッピングによるしわの変形

バンプマッピングを適用するために I, Y, X 型座屈パターンは Gauss 関数を用いて近似することにする。図 7 に近似座屈パターンを示す。完全拡散面からの反

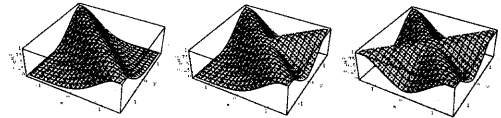


図7: 近似座屈パターン

射光強度 I は、点光源からの入射光強度 I_i 、拡散反射係数 k_d 、光源ベクトル L 、面法線ベクトル n を用いた次式で表せる。

$$I = I_i k_d (L \cdot n) / |L| |n| \quad (12)$$

図 7 の曲面に式 (12) を適用してバンプマッピングを行うことによりしわ状の画像データを生成する。図 8 に本手法を用いて生成したしわの変形例を示す。上下の圧縮に座屈パターンの起伏を対応させることにより、圧縮によってしわが生成される様子を示している。

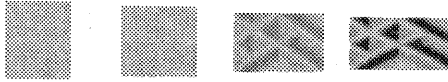


図8: バンプマッピングを用いたしわの表現

5. シミュレーション結果

図9 (a) にはミニスカート, ニーレングススカート, ロングスカートまで連続的にその形状を変更した結果とパンツを生成した結果を示す. このように提案手法により, 膝関節を越えてスカート長が変化する場合にもデザインを連続的に修正できることが確認できる. また, ベジエパッチの接続を変更することにより, パンツ形状を容易に生成できることを示している.

図9 (b) には骨格モデルの歩行動作から生成した衣服形状を示す. 衣服の変形については物理的なモデルを導入していないが, 歩行動作に伴うスカートの変形が表現されている. なお, 衣服の表面にはバンプマッピングを行い, 顔の部分については顔画像データをテクスチャマッピングしている.

図9 (c) は座屈パターンによるバンプマッピングによって生成した膝の裏側のしわを示している. 膝の屈曲が大きくなるとしわが明確に現れるようになっている.

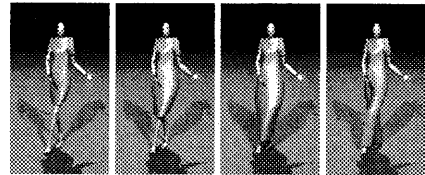
6. むすび

本稿では, 衣服を着用した人物像生成のための骨格運動に基づく衣服形状モデリング手法と, バンプマッピングを用いた衣服表面のしわの表現を方法について述べた. 提案手法では, 幾何モデルを記述するデータが少いためレンダリングを高速に行うことができる. また, 衣服表面のしわのモデルとして I, Y, X 型座屈パターンを示し, その特徴について述べた. しかし, 座屈パターンの選択とその配置方法, 表面積保存など幾何的な拘束条件は満たされていないなどの課題が残されている.

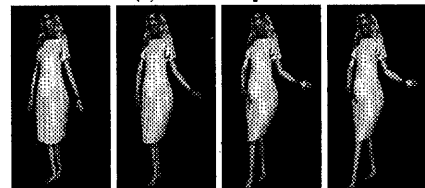
参考文献

- [1] 長谷川 修, 森島 繁生, 金子 正秀, “「顔」の情報処理,” 信学論 D-II, vol. J80-D-II, no. 8, pp. 2047-2065, 1997-08.
- [2] 酒井 文騰, 三枝 太, 森島 繁生, “ヘアスタイルモデリングツールの開発,” 信学'97 春大, D-12-191, 1997-03.
- [3] 筒口 拳, 末永 康仁, 渡部 保日, 下原 勝則, “3次元シーン内の人物歩行動作生成システム,” 情処論, vol. 38, no. 4, pp. 787-796, 1997-04.
- [4] H. N. Ng and R. L. Grimsdale, “Computer Graphics Techniques for Modeling Cloth,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 16, no. 5, pp. 28-41, Sept. 1996.

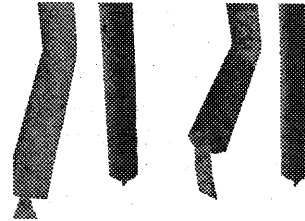
- [5] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer, “Elastically Deformable Models,” Computer Graphics, vol. 21, no. 4, pp. 205-214, July 1987.
- [6] H. Okabe, H. Imaoka, T. Tomiha and H. Niwaya, “Three Dimensional Apparel CAD System,” Computer Graphics, vol. 26, no. 2, pp. 105-110, 1992.
- [7] J. W. Eischen, S. Deng, and T. G. Clapp, “Finite-Element Modeling and Control of Flexible Fabric Parts,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 16, no. 5, pp. 71-80, Sept. 1996.
- [8] M. Aono, “A Wrinkle Propagation Model for Cloth,” Computer Graphics International Proc., Springer-Verlag, pp. 95-115, (1990)
- [9] M. Carignan, Ying Yang, N. M. Thalmann, D. Thalmann, “Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes,” Computer Graphics, vol. 26, no. 2, July 1992.
- [10] 坂口 嘉之, 美濃 達彦, 池田 克夫, “仮想服飾環境 PARTY — 動的変形可能な布のための数値計算法 —,” 信学論 (D-II), vol. J77-D-II, no. 5, pp. 912-921, 1994-05.
- [11] T. L. Kunii and H. Gotoda, “Singularity Theoretical Modeling and Animation of Garment Wrinkle Formation Process,” The Visual Computer, vol. 6, pp. 326-336, 1990.
- [12] R. Barzel, “Physically-Based Modeling for Computer Graphics,” Academic Press, 1992.
- [13] Takatoshi Saeki, Takao Furukawa and Yoshio Shimizu, “A dynamic clothing simulation based on skeletal motion of human body,” Proceedings of International Conference on Virtual Systems and Multimedia, pp. 117-122, 1996.
- [14] 花里 高宏, 筒口 拳, 古川 貴雄, 曾根原 登, 清水 義雄, “双3次Bezierパッチの適応的分割を用いた衣服形状生成,” 情処研報グラフィクスとCAD, no. 86, pp. 61-66, 1997.



(a) Skirts and pants.



(b) Clothes deformation with walking.



(c) Wrinkle deformation.

図9: 衣服形状の変更と歩行による衣服の変形