デジタルスタイルデザインに関する研究*

—織物デザイン支援システム—

原 歩 未** 青 山 英 樹***

Study on Digital Style Design
- Fabric Design Support System -

Ayumi HARA and Hideki AOYAMA

During design process in clothing production, states of wrinkles and folds formed on dress according to human posture and movements are an important design element. However envisaging the wrinkles and folds is not easy because fabric states strongly depend on mechanical properties of a fabric. In this paper, a fabric model taking into account slipping of the warp and the weft at the contact point of them is proposed and a fabric simulation system using this model is developed. In addition, the effectiveness of the simulation system based on the proposed model is confirmed by using a θ - ϕ function defined from the fabric state obtained in the fabric simulation.

Key words: digital style design, fabric design, wrinkle, fold, fabric simulation

1. 緒 言

衣服は日常生活において必要不可欠なものであり、そのデザインは多岐に渡る。衣服のデザインは、品質や性能に加えてより多くの人のライフスタイルや好み、要求に適うデザインである必要があり、アパレル生産においてデザイン工程は非常に重要であると言える。ファッションデザイナーは、衣服のデザインをする際に、織物の状態をイメージしている。すなわち、人間の姿勢や動作に連動して形成される織物の動きや織物の皺・ドレープ(たるみデザイン)の状態も重要なデザイン要素となっている。しかし、織物の動き・皺・ドレープの状態は機械的特性に強く依存し、それを想定することは容易ではない。また、デザイナーがイメージする動き・皺・ドレープの状態を形成する織物を選定する作業は、多くの時間と労力を要する。

上記の問題に対して、織物が物体や人間を覆った時の状態を仮想空間で確認し、デザイナーが要求する状態を作ることができる織物を導出するシステムが求められている。導出された織物の織り方や機械特性を決定する布パラメータを同定し、同パラメータに基づいて織物を選定することにより、効率的で間違いのない作業とすることができる。また、同定された布パラメータをもつ既製布がなければ、仕様として提示して発注することも可能となる。

織物シミュレーションに関する研究は、これまで主に、ゲームや映画等のCGアニメーションへの応用を目的として、多くの手法で開発されてきた。例えば、Choi¹⁾らは、質点バネモデルを用いて、織物の伸長や圧縮による曲げを考慮したモデル化手法を提案している。桑水流ら²⁾はひずみと変位の関係から、平織布の普遍的な応力・変形解析を可能とした疑似連続体

モデルを提唱している。Napaporn³⁾らは、織物の破れと破れによって生じるほつれを表現できる織物のモデル化手法を提案している。また、石郷ら⁴⁾は布のサンプルからリアルなアニメーションを出力するため、機械特性と人間の感性を対応付ける研究をしており、シミュレーションには Maya2010⁵⁾による nCloth という布シミュレータを用いている。nCloth は、物性値を変えることで織物の種類によって異なる衣服の挙動を示すことができる。しかし、いずれの研究も、織物のモデリングにおいて、縦糸と横糸が接触点で固定された質点バネモデルを用いており、接触点において生じる滑りやズレが考慮されていない。しかし、この縦糸と横糸の接触点における滑りが織物の挙動やドレープの生成に影響することが十分に考えられ、衣服デザイナーは、より緻密でリアルな織物シミュレーションシステムを求めている。

繊維工学における織物の研究では、川端ら⁶⁾によって、織物の風合いを客観的に評価する計測システム KES(Kawabata Evaluation System)⁸⁾が開発されている。このシステムは、織物の風合いの物理因子となる伸長特性や曲げ特性といった機械特性の値を測定することができる。このような織物の機械特性を示す測定値を織物シミュレーションのパラメータとして用いることにより、織り方や糸の違いによる織物の特徴をより正確に表現することが可能となると考えられる。

これまで織物シミュレーションにおいて、KES による測定値の使用例は少ないが、D. E. Breen⁹⁾らは織物のパーティクルモデルに対して同測定値を適用し、織物シミュレーションを行っている。しかし、D. E. Breen らのモデルも縦糸と横糸の滑りは考慮されておらず、そのシミュレーション結果は実モデル形状に対して丸みの帯びた形状となっている。また、従来の織物シミュレーション結果は、実際の織物の状態に対して定量的な評価が行われていない。

そこで、本研究では、縦糸と横糸が接触点において、条件に応じて滑ることを許容するモデルを提案し、提案モデルを用いて、織り方や糸の機械特性をパラメータとした織物シミュレーションシステムを構築する。また、織物シミュレーション

* 原稿受付 平成 27 年 2 月 12 日

掲載決定 平成 27 年 4 月 30 日

** 学生会員 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (横浜市港北区日吉 3-14-1)

*** 正 会 員 慶應義塾大学理工学部 (横浜市港北区日吉 3-14-1)

Fig. 1 Mass-spring model

で得られる結果に関して、実際の織物の状態の画像特徴量を基にした評価手法を提案し、提案システムの有用性を検証する。

2. 織物モデル

本章では、織物の縦糸と横糸の接触点における滑りを可能とする縦糸横糸構造を質点バネモデルについて述べる。また、織物の挙動に影響する機械特性のモデル化手法と、測定値を用いた各パラメータの決定法について説明する。

2.1 縦糸横糸構造の構築

従来、質点バネモデルとして構築された織物は、図 1(a)に示されるように、単層の質点モデルとして構築されており、縦糸と横糸の滑り状態をモデル化していなかった。本研究では、織物の縦糸と横糸の接触点における滑りを可能とするため、図 1(b)に示すような縦糸横糸構造を構築した。図 1(b)において、●が縦糸の質点、○が横糸の質点を表している。初期状態において、図 1(b)の座標系に示す z 方向に縦糸と横糸の半径の和の距離だけ離れた縦糸質点と横糸質点をバネで結合する。同バネ力により、縦糸と横糸の接触により生ずる摩擦抵抗力と外力が加わったときに生ずる縦糸と横糸の滑り（ズレ）を表現する。初期値のバネ距離、すなわち自然長は縦糸と横糸の半径の和とし、2点間の距離が自然長より離れたとき、元に戻そうとする力を発生する。縦糸質点 a と横糸質点 b の距離が初期距離 l よりも離れた場合、縦糸質点 a に加わる力は式(1)で求める。このとき、 $k_{contact}$ はバネ定数、 x_{ab} は質点 b から質点 a へ方向ベクトルを表している。

$$f_{contact} = k_{contact} \left(|x_{ab}| - l \right) \frac{x_{ab}}{|x_{ab}|} \quad (1)$$

また、2点間の距離が近づいたときは、縦糸質点と横糸質点の上下関係が逆になることのないように、後述する圧縮特性による力を用いて処理を行う。

2.2 機械特性のモデル化

織物には風合いと呼ばれる独特の性質があり、この風合いが異なることにより、ドレープや印象が変化するとされている。この風合いの物理因子となる機械特性として、重量、厚み、表面特性、伸長特性、曲げ特性、せん断特性、圧縮特性が川端らによって選定されている。

重量は、各質点に総重量を質点数で割った値を配分してモデル化する。厚みは、縦糸質点と横糸質点の距離で表す。表面特性は、テクスチャマッピングによって表現する。伸長特性、曲げ特性、せん断特性、圧縮特性は、それぞれの特性をモデル化したバネでモデル化する。以下、この4つの特性のモデル化方法についてそれぞれ説明する。

2.2.1 伸長特性

織物に対して糸の方向に引張力を与えた時、質点間が自然

Fig. 2 Modeling of mechanical properties

長より長くなった場合、織物が伸びすぎないように元に戻ろうとする力を生ずる。図 2(a)に示すように、注目する質点が縦糸の場合は上下、横糸の場合は左右に隣接する質点と接続関係を持たせる。質点 i に質点 j から働く力 $f_{stretch}$ は、式(2)に示されるように、質点間の初期距離 L_1 と質点間のバネ定数 $k_{stretch}$ で求められる。 x_{ij} は質点 j から質点 i へ方向ベクトルを表している。

$$f_{stretch} = k_{stretch} \left(|x_{ij}| - L_1 \right) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (2)$$

2.2.2 曲げ特性

織物に対して糸の方向に圧縮力を与えたとき、質点間が自然長より短くなった場合、織物に座屈を生じさせ、ドレープを形成する。図 2(b)に示すように、注目する質点から上下左右斜めの8方向に対して、1つ飛ばした位置にある質点に対し接続関係を持たせる。この接続関係により、接続した2つの質点の間にある質点において座屈が生じる。

質点 i に質点 j から働く力 $f_{bending}$ は、式(3)に示す曲率 c および、曲げ剛性 R 、質点間の初期距離 L_2 を用いて式(4)より求められる。ただし、 $\sin(x) = \sin x / x$ である。

$$c = \frac{2}{L} \operatorname{sinc}^{-1} \left(\frac{|x_{ij}|}{L_2} \right) \quad (3)$$

$$f_{bending} = R c^2 \left(\cos \frac{c L_2}{2} - \operatorname{sinc} \left(\frac{c L_2}{2} \right) \right)^{-1} \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (4)$$

$$\equiv f_b \left(|x_{ij}| \right) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (5)$$

糸方向の圧縮力が座屈荷重に達するまでの圧縮力に対する反力の質点間距離に応じた線型性を表現するために、圧縮力が座屈荷重以下の場合、式(5)における f_b を式(6)の f_b^* と置き換える。 C は曲げ剛性 R に比例する定数である。

$$f_b^* = C \left(|x_{ij}| - L_2 \right) \quad (6)$$

2.2.3 セン断特性

せん断変形とは、縦糸と横糸の交錯角が変角する織物の変形のことであり、図 2(c)のせん断力 F に応じてせん断角 ϕ が変化する。このせん断変形に対する回復力として、質点における糸のモーメント力をモデル化するためにバネを導入する。図 2(d)に示すように、質点 i と i の斜めの 4 方向にある質点 j に働くせん断変形に対する回復力 f_{shear} は、質点間の初期距離 L_3 およびバネ定数 k_{shear} を用いて、式(7)より求められる。

$$f_{shear} = k_{shear} \left(|x_{ij}| - L_3 \right) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (7)$$

2.2.4 圧縮特性

織物が厚さ方向に圧縮された場合、すなわち、図 1(b)に示す織物構造の z 軸方向に力が加わった場合、縦糸質点と横糸質点を繋ぐ接点バネによって反力を生ずる。縦糸質点 a と横糸質点 b の距離が縦糸と横糸の半径の和 l よりも近づいた場合、縦糸質点 a に加わる力 $f_{compression}$ は式(1)と同様に式(8)で表わすことが出来る。このとき、バネ定数は式(1)で定義した $k_{contact}$ とは異なる $k_{compression}$ で与える。

$$f_{compression} = k_{compression} \left(|x_{ab}| - l \right) \frac{x_{ab}}{|x_{ab}|} \quad (8)$$

以上から、式(1)および式(8)から、接点バネによる力 f_c は式(9)として表現できる。

$$\left. \begin{aligned} f_c &= k_c \left(|x_{ab}| - l \right) \frac{x_{ab}}{|x_{ab}|} \\ \text{If } |x_{ab}| > l, \quad k_c &= k_{contact} \\ \text{If } |x_{ab}| < l, \quad k_c &= k_{compression} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.3 KES[®]による測定値を用いたパラメータ決定法

KES とは、生地風の風合いを機械特性から客観的に評価する計測システムである。前述した風合いに影響する機械特性の力学量の計測が可能である。人の風合い感覚から 85% の確かさで力学特性を予測できる。この KES による測定値を用いたパラメータ決定法について説明する。

2.3.1 伸長特性

引張試験は、図 3(a)に示す引張・せん断試験機 (KES-FB1) を用いて、微小な引張力に対する生地の挙動を評価できる。式(2)における伸長特性のバネ定数 $k_{stretch}$ [N/m] は、伸長応力と伸長歪の関係の線形で近似して求める。図 4 においてハッチングで示された伸張歪と伸張応力の関係は、同試験機より得られた測定結果を示している。同結果より、伸張歪と伸張応力の関係は非線形であるが、本シミュレーションでは計算の簡単化のために、伸張歪と伸張応力の関係は線形とし、最大伸張歪 ϵ_{max} において伸張応力は f と設定した。最大伸張歪 ϵ_{max} における伸張応力 f による引張仕事量は、図 4 のハッチングで示した引張仕事量と同等とした。これより得られた伸張歪と伸張応力の線形関係より、バネ定数 $k_{stretch}$ は、引張仕事量 WT [N・m/m²] と引張の線型性 LT [-] の値を用いて、式(10)で求めることができる。

$$k_{stretch} = \frac{f}{\epsilon_m} = \frac{2WT}{(\epsilon_m)^2} = 2WT \cdot \left(\frac{F_{max} \cdot LT}{2WT} \right)^2 \quad (10)$$

(a) KES-FB1

(b) KES-FB2

(c) KES-FB3

Fig. 3 KES Tester

Fig. 4 Stretching spring constant

$$= \frac{F_{max}^2 \cdot LT^2}{2WT}$$

このとき、 F_{max} は最大荷重の 490 N/m である。

2.3.2 曲げ特性

曲げ試験は、図 3(b)に示す曲げ試験機 (KES-FB2) を用いて行った。式(4)に示される R は、曲げ剛性 B 10⁻⁴ Nm²/m の値を用いる。

2.3.3 セン断特性

せん断試験は、伸長特性と同様に図 4(a)に示す引張・せん断試験機を用いて行った。綾織物のせん断特性は、正負の領域で特性が異なるため、正負双方向で測定を行い、平均値を用いる。

式(7)に示されるせん断特性のバネ定数 k_{shear} N/m は、式(11)に示されるように、せん断剛性 G N/m・deg より、せん断剛性率 G' N/m を求め導出する。

$$k_{shear} = G' = 57.3G \quad (11)$$

縦糸と横糸の接触による抵抗力の影響は、せん断特性に表れると考えられる。そのため、式(1)の接点バネ定数 $k_{contact}$

Fig. 5 Simulation flowchart

は、縦糸と横糸のせん断剛性を用いて式(12)で表わす。

$$k_{\text{contact}} = S(G'_{\text{warp}} + G'_{\text{weft}}) \quad (12)$$

S は糸の素材や密度に依存する定数である。

2.3.4 圧縮特性

圧縮試験は、図 3(c)に示す圧縮試験機(KES-FB3)を用いて行った。円形平面プローブを用いて布に低速度で圧縮力を加える。式(8)の圧縮特性のバネ定数 $k_{\text{compression}}$ N/m は、圧縮仕事量 $WCN \cdot m/m^2$ と圧縮特性の線型性 $LC[-]$ の値を用いて、式(13)で求められる。

$$k_{\text{compression}} = \frac{P_{\text{max}}^2 \cdot LC^2}{2WT} \cdot CP \quad (13)$$

このとき、 P_{max} は圧縮最大荷重の 49 N/m²、 CP は圧縮面積 $0.2 \times 10^{-3} m^2$ である。

3. 織物シミュレーションシステムの構築

3.1 質点バネモデルにおける力学計算法

1つの質点に着目し、その質点に加わるすべての力を計算する。合力には伸長、曲げ、せん断、圧縮に対する力や減衰力といった布の内部より生じる力と、重力や風力などの外力を含んでいる。

バネの振動に対する減衰力 f_{damper} は、式(14)に示されるように、質点 i の速度 v_i に比例して、逆向きに働く。質点に加わる重力 f_{gravity} は、質点の質量を m_i 、重力加速度を g とすると式(15)で与えられる。また、空気抵抗 f_{air} は、 A を任意定数とし、式(16)のように速度の逆向きに作用する。

$$f_{\text{damper}} = -\rho v_i \quad (14)$$

$$f_{\text{gravity}} = m_i g \quad (15)$$

$$f_{\text{air}} = -A v_i \quad (16)$$

以上より、時刻 t において、質点 i にかかる合力 $F_i(t)$ は、式(17)のように表わされる。

$$F_i(t) = f_{\text{internal}} + f_{\text{damper}} + f_{\text{gravity}} + f_{\text{air}} \quad (17)$$

ベルレ法を用いて数値積分を行い、式(18)より、質点 i の時刻 t における位置 x_i を求める。

(a) Proposed model (b) Choi model

(c) Real model

Fig. 6 Square Table

(a) Proposed model (b) Choi model

(c) Real model

Fig. 7 Ball

$$x_i(t) = 2x_i(t - \Delta t) - x_i(t - 2\Delta t) + \frac{dx}{dt} \Delta t + \frac{d^2x}{dt^2} \Delta t^2 + O(\Delta t^4) \quad (18)$$

その後、他の物体との衝突判定を行う。時刻 t における座標が他の物体の内部に位置していたら、ペナルティ法によって反力を求め、これを合力 F に加えたのち、再びベルレ法で位置を求める。この計算をすべての質点において繰り返すことで、時刻 t での織物全体の形状が決まる。

3.2 シミュレーションの概要

図 5 は、シミュレーションプロセスを示している。最初に織物のパラメータを入力し初期状態を決定する。このとき入力するパラメータは、織物の大きさ、形状、質量、縦糸と横糸の太さ、機械特性としてのバネ定数と曲げ剛性、外力の値である。次に、初期状態で表示された織物に重力や引張力等の外力を加える。加えられた外力によって質点にかかる内力を各特性式から算出し、内外力の合力を求める。この合力をもとに数値積分を行い、微小時間後の質点の位置を算出する。そして、他の物体との衝突判定を行い、衝突のない布の位置を決定する。最後に、テクスチャマッピングで織物の画像を貼りつけて描画出力する。以上の計算をすべての質点で繰り返し行うことでシミュレーションを実行する。

Table 1 Measurement Data by KES

		Stretching property		Bending property	Shear property	Compression property		Weight	Thickness
		$LT [-]$	WTN/m	$B 10^{-4}Nm^2/m$	$G N/m/deg.$	$LC [-]$	$WC N \cdot m/m^2$	g/m^2	m
(1) Plain weave fabric of cotton	warp	0.749	4.62	0.0769	1.44	0.302	0.220	122.1	0.00089
	weft	0.765	9.87	0.0306	1.32				
(2) Twill fabric of cotton	warp	0.587	7.59	0.3575	0.98	0.235	0.251	275.3	0.00121
	weft	0.744	9.85	0.2563	0.90				
(3) Twill fabric of wool	warp	0.599	7.30	0.1110	0.47	0.292	0.275	201.9	0.00116
	weft	0.497	12.40	0.0755	0.42				

Table 2 Parameters using Measurement Data for Simulation

		$k_{stretch}$	$k_{bending}$	k_{shear}	$k_{compression}$	$k_{contact}$
(1) Plain weave fabric of cotton	warp	14554	$0.0769 \cdot 10^{-4}$	82.32	9.969	5284
	weft	7120	$0.0306 \cdot 10^{-4}$	75.83		
(2) Twill fabric of cotton	warp	5453	$0.3575 \cdot 10^{-4}$	55.96	5.275	1931
	weft	6748	$0.2563 \cdot 10^{-4}$	51.76		
(3) Twill fabric of wool	warp	5907	$0.1110 \cdot 10^{-4}$	26.93	7.407	433
	weft	2388	$0.0755 \cdot 10^{-4}$	23.88		

4. 提案システムの評価

4.1 シミュレーション結果

提案システムを用いて、シミュレーションを行った結果について述べる。本研究では、プログラムはC++言語により構築し、OpenGLを用いて描画した。本研究で提案した織物シミュレーション手法の有用性を検証するため、(1)従来研究と本研究の比較、(2)本研究手法によるシミュレーション結果と実織物の形状の比較を行った。今回使用したパーソナルコンピュータのプロセッサは、Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1230 v3 @ 3.30GHz 3.30 GHzである。

従来研究と本研究の比較において、従来研究として利用目的が類似している Choi モデル¹⁾を採用し、4 角形テーブルおよび球体に織物を被せたシミュレーションを行い、実織物形状の比較を行った。本研究手法によるシミュレーション結果と実織物の形状の比較において、種類の異なる 3 種類の織物に対して、提案モデルにより各織物の測定値を用いて円テーブルおよび 4 角形テーブルに織物を被寄せたシミュレーションを行い、実際の布の状態と比較を行った。いずれも、安定した結果を得るまでに約 10 時間要した。

提案手法が、布の縫い合わせに対する適用を確認するため、衣服モデルとして T シャツモデルを構築し、衣服シミュレーションを行った。

4.1.1 従来モデルと提案モデルの比較

テーブルと球体に対して織物をかぶせた状態をシミュレーションした。図 6(a), (b)に示されるように、4 角形テーブルの

角のドレープの状態に関して、Choi モデルはテーブル形状に沿って垂れており、提案モデルはテーブル形状より張り出した形状になっている。また、布の辺の部分の状態に関して、Choi モデルはピンと張っており、提案モデルは緩やかに波打った状態になっている。テーブルの淵の部分の状態に関し、Choi モデルでは淵に沿って直角に折れているが、提案モデルの方は緩やか曲げられた形状と成っている。図 6(c)は実際の織物の状態を示しているが、提案手法の織物状態は、従来モデルより実形状に類似した状態となっていることがわかる。

図 7(a), (b)は、それぞれ、球体に織物を被寄せたときの提案手法モデルと Choi モデルによる織物形状シミュレーション結果を示している。同図(c)は、実織物を球体に被寄せた状態を示している。図 7(b)に示されるように、Choi モデルは織物が球体を覆い被している部分において細かいひだのような状態が生じており、実織物の形状と比較すると不自然である。それに対し、提案モデルは実織物の形状に類似した結果となっている。以上より、提案モデルでは、縦糸質点と横糸質点の 2 重構造にしたことで、厚みのある緩やかな皺が作成され、従来モデルよりも実モデルに類似した結果が得られた。

4.1.2 種類の異なる織物の比較

(1)綿の平織物、(2)綿の綾織物、(3)ウールの綾織物の 3 種類の織物に対して、KES で測定し、測定値を用いてテーブルクロスシミュレーションを行った。表 1 は、それらの布の縦糸、横糸の測定結果を示している。表 2 は、2.3 節で述べたパラメータ決定法より算出した各特性パラメータを示している。90 cm×90 cm の正方形の織物を 60 cm×40 cm の長方形の

テーブルに被せた状態のシミュレーション結果を図 8(a), (b), (c), それらの実モデル状態を図 8(A), (B), (C)に示す。

表 1, 表 2 より, 平織物より綾織物の方が曲げ硬い性質であることがわかる。図 8(a)の平織物のシミュレーション結果と図 8(b)の綾織物シミュレーション結果を比較すると, シミュレーション結果は, 実モデルである図 8(A)と図 8(B)で表されているテーブルの角において綾織物の曲げ硬い状態を表している。表 1, 表 2 より, 綿よりウールの方がせん断方向に伸びやすく, 接触点において滑りやすい性質であることがわかる。綿のシミュレーション結果である図 8(b)とウールのシミュレーション結果である図 8(c)を比較すると, 図 8(c)に示されるウールの結果は, 図 8(C)に示される実モデルと同様に, 垂れやすく角で丸みのあるドレープを生じている。

以上より, 測定値を用いることで, 織り方や素材等の織物の種類による実モデルの特徴が示されていることがわかる。

4.1.3 衣服モデルの作成

織物モデルを自由にカットし, パターンを作成して, 仮想的なバネで縫い合わせることで衣服モデルを構築した。

身丈 32 cm, 身幅 28 cm, 袖丈 10 cm の T シャツモデルに対して, 袖を一体にした表と裏の 2 つのパターンと, 袖を別にした表と裏, 右袖, 左袖の 4 つのパターンを作成し, 人体モデルに着用させたシミュレーション結果を図 9 に示す。一般的な実際の T シャツは後者のように袖を分割したパターンを用いている。織物のパラメータはいずれも, 表 2(2)で示した綿の綾織物の測定値を用いた。図 9(a)の 2 つのパターンによる T シ

ャツは, 袖の下部分が尖って不自然な形状であるのに対し, 図 9(b)の 4 つのパターンによる T シャツは, 袖が腕に沿って丸く, 実際の T シャツに近い形状を示している。

身丈 32 cm, 身幅 28 cm, のトップ及び, 半径 48 cm の全円スカートのドレスモデルに対して, トップとスカート部分が同一素材のパターンと, 異素材のパターンを作成し, 人体モデルに着用させたシミュレーション結果を図 10 に示す。前者の織物のパラメータは, トップとスカートの両方において, 表 2(2)で示した綿の綾織物の測定値を用い, 後者は, トップ部分は表 2(2)で示した綿の綾織物, スカート部分は表 2(3)で示したウールの綾織物の測定値を用いた。図 10(a)のスカートは, はりがあり広がった形状を示しているのに対して, 図 10(b)のス

Fig. 14 θ - ϕ function graph

Fig.15 Analysis result by Fourier transform

カートは細かなドレープを形成し、しなやかな形状を示している。これは図8と同様、織物の素材による特性の違いが表れているためである。

以上より、複数のパターンを作成し、それぞれ織物パラメータを設定して縫合することで、幅広い衣服シミュレーションが可能であることが示せた。よりリアルな結果を得るためには、実際の衣服と同様のパターンを作成することが必要である。

4.2 画像特徴量による評価

シミュレーション結果の定量評価を行うにあたって、画像から特徴抽出を行う。大竹ら¹⁰⁾は、アパレル製品画像検索のための類似度推定モデルの作成に、 θ - S 関数¹¹⁾を用いてスカート形状の輪郭線の抽出を行っている。 θ - S 関数は、図11に示すように、輪郭の始点Sにおける接線と輪郭追跡点Pにおける接線とのなす角度 θ を求め、横軸を点Sからの輪郭の長さ、縦軸を θ とした関数曲線を求めるものである。しかし同関数は、始点の位置や画像の縮尺によって関数曲線が変化するため、今回のようなシミュレーション結果と物理実験結果との比較評価には適さない。そこで、本システムの結果を定量的に評価するために、 θ - ϕ 関数を定義する。

4.2.1 θ - ϕ 関数による特徴抽出

θ - ϕ 関数は、図12に示すように、特徴抽出したい形状を x - y 座標系に配置し、座標の中心から等角度に引いた分割線と形状とが交差した点における接線の傾きを求める。縦軸を分割

線と接線とのなす角 θ 、横軸を分割線の角度 ϕ とし、式(19)で補正した θ - ϕ 関数曲線を求め、形状特徴を抽出する。

$$\theta'(\phi) = \theta(\phi) - \phi \quad (19)$$

このとき、形状の縮尺は θ - ϕ 関数曲線に影響しない。

4.2.2 θ - ϕ 関数曲線結果と解析

綿の綾織物に対して KES で測定を行い、測定結果を用いてシミュレーションを実行した。図13(a)は、直径48 cmの円形テーブルに90 cm×90 cmの綾織物を被せた際の提案モデルのシミュレーション結果を、図13(b)は実モデルの状態を示している。座標を128分割し作成した θ - ϕ 関数曲線を図14(a)、(b)に示す。これらをフーリエ変換した結果を図15に示す。両者の相関は0.86となり、実モデルとの高い類似性が確認できた。

5. 結 言

本研究では衣服デザインのための織物シミュレーションとして、縦糸と横糸の接触点における滑りを考慮した織物モデルと織物の機械的特性の測定値を使用したシミュレーション手法を提案し、提案手法を用いた基礎システムを構築した。本研究は以下の様にまとめられる。

- (1) 質点バネモデルにおいて、縦糸質点と横糸質点の間にバネを導入した縦糸横糸構造を構築することで、接触点における滑りを考慮した織物モデルを提案した。
- (2) 風合いの物理因子となる、重量、厚み、表面特性、伸長特性、曲げ特性、せん断特性、圧縮特性の7つの機械特性のモデル化を行った。各特性に対して、KESによる測定値を用いたパラメータ決定法を提案した。
- (3) 提案モデルを用いて、内外力の力学計算や衝突判定を行う織物シミュレーションシステムを構築した。
- (4) 結果から、従来モデルと比べ、提案モデルは、実モデルに類似した自然な挙動を確認できた。また、測定値を用いることで織物の織り方や素材による違いが示されていることが確認できた。
- (5) θ - ϕ 関数による画像特徴量に基づいた評価結果から、提案モデルの実モデルに対する高い相関が得られ、本システムの有用性が示せた。
- (6) 複数のパターンを用いた衣服モデルや、異素材の組み合わせによる衣服モデルを人体が着用したシミュレーション結果から、システムの高い汎用性が示せた。

今後の展望としては、織物の選定作業を支援するために、回帰的に機械特性値等のパラメータを導出できる「織物パラメータ同定システム」の開発が挙げられる。

参 考 文 献

- 1) Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko: Stable but responsive cloth, ACMSIGGRAPH, (2002) 604.
- 2) 桑水流理, 吉川暢宏: 平織布の弾性理論(第一報, 疑似連続体モデル), 日本機械学科対論文集 (A 編), **68**, 672 (2002) 95.
- 3) 桑水流理, 吉川暢宏: 平織布の弾性理論(第二報, 有限要素定式化), 日本機械学科対論文集(A 編), **68**, 672 (2002) 102.
- 4) METAAPHANON Napaporn, 坂東洋介, 陳炳宇, 西田友是: ほつれを伴う布の破れのシミュレーション, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム予稿集, **24** (2009) 1.
- 5) 石郷絵美, 饗庭絵里子, 中村祐介, 石田適志, 長田典子:

- 布の物理特性と感性的特徴を利用したカーテンアニメーションの質感表現, 映像情報メディア学会技術報告, **1**, 8 (2012) 147.
- 6) 「Autodesk Maya 2010」 <http://me.autodesk.jp/wam/maya/docs/Maya2010/index.html>, (2015/02/12 参照).
- 7) 川端季雄: 風合い評価の標準化と解析(第二版), 日本繊維機械学会, (1980) 25.
- 8) KES カートテック社
<http://www.keskato.co.jp/>, (2015/02/12 参照).
- 9) D. E. Breen, D. H. House, M. J. Wozny: Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles, Proceedings of SIGGRAPH'04 (July 24-29) 365.
- 10) 大竹敦, 高寺政行, 清水義雄: 感性情報を用いたアパレル製品画像検索システム, 映像情報メディア学会技術報告, **25**, 64 (2001) 41.
- 11) 白井良明, 谷内田正彦: パターン情報処理, オーム社, (1998), 47.