

肌質感を呈する人工皮膚の開発 (皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価)

白土寛和^{*1}, 野々村美宗^{*2}, 前野隆司^{*3}

Development of Artificial Skin Having Human Skin-like Texture (Realization and Evaluation of Human Skin-like Texture by Emulating Surface Shape Pattern and Elastic Structure)

Hirokazu SHIRADO, Yoshimune NONOMURA and Takashi MAENO

Artificial skin having human skin-like texture is necessary for the development of tactile evaluation systems and for robots that have physical contact with humans. This paper describes a novel type of artificial skin having human skin-like texture and a model of human texture perception. The artificial skin is designed by emulating the surface shape pattern and elastic structure of the human skin. Appropriate wettability and friction property of the artificial skin is achieved by designing the surface shape. Through sensory evaluation, we confirm the artificial skin has human skin-like texture due to its surface shape pattern and elastic structure. In addition, we build a model of skin-like texture perception through multivariate analysis between physical parameters and tactile factor scores. This model can indicate what factor is important for human skin-like texture. From the results, artificial skin having optional skin-like texture can be developed.

1. 緒論

近年, ロボット, 医療機器, 消費財といったヒトと接する人工物を開発するにあたり, 触感を定量的に評価するニーズが高まっている⁽¹⁾⁽⁴⁾. ここで, 触感とは, ヒトが指を接触させることにより触察対象の微細な表面状態を検出する際の, 「つるつる」や「ざらざら」といった定性的な評価を表すものとする. 本研究では, 触察対象として, ヒトの皮膚の質感を模倣した人工的な皮膚(以下, 人工皮膚と呼ぶ)を取り上げることとする. なぜなら, 1つには, ヒトと接するロボットの人間親和性を高めたり, ヒトと同様な把持・操り動作を実現したりするためには, ロボットの皮膚をヒトと同様にする必要があると考えられるためである. 2つめには, 皮膚に塗布して用いるクリームやパウダー, 化粧品, 石鹸といった消費財開発の場において, 触感を定量的に評価するために, 人工皮膚を開発することが重要であるためである. もし, 人工皮膚の触感がヒト皮膚の触

感と異なる場合, 評価された触感が実際のヒト皮膚上における触感とは異なる評価結果となってしまうと考えられる. その理由として, ヒトの触感認識が複数の情報を統合して行われている⁽⁵⁾ことや, ヒトが検出部位との相対的な関係により情報を検出していることが挙げられる. このため, 評価用人工皮膚は, ヒトに対し, ヒトの皮膚と同様の触感を呈することが必要である.

ヒトの皮膚を人工的に開発している研究例として, 再生医療の分野で用いられている人工皮膚が挙げられる. ここでの人工皮膚は, 皮膚代替物として皮膚を再生することを目的としており, 培養表皮や人工真皮など, 皮膚の層別に研究開発が行われている⁽⁶⁾. しかし, 再生医療分野における人工皮膚は, 既存の皮膚との生着を目的としているため, 力学的特性の影響については研究されている⁽⁷⁾ものの, その触感については言及されていない. 人工物でヒト皮膚と同様の触感呈示を実現するためには, ヒトの肌の質感と皮膚の物理特性との関係を明らかにし, ヒト皮膚の触感を呈示させるための人工皮膚の設計目標を明確に定める必要がある.

これらの理由により, ヒト皮膚と同様の触感を有する人工皮膚の開発と, その人工皮膚を用いた触感

*原稿受付 2006年5月16日.

¹慶應義塾大学大学院 [現ソニー(株)]

²花王(株)

³正員, 慶應義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

e-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

の評価を、同時に行うことが望まれている。人工皮膚を開発するためには、皮膚が表面に複雑な“しわ”のパターンを有することを陽に考慮する必要があると考えられる。なぜなら、しわのような皮膚表面の凹凸パターンは、ぬれ性、摩擦特性といった物理特性に影響を及ぼすと考えられ、これらの物理特性は触感に影響を及ぼすと考えられるからである。また、ヒト皮膚の層構造にも着目する必要がある。なぜなら、ヒトの皮膚は、その層構造により、皮膚独特の接触状態を呈すると考えられるからである。

本研究では、まず、ヒト皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造を模倣することによって、ヒトの肌と同様な質感を呈する人工皮膚を開発する。また、表面凹凸パターンの設計変数を変化させた複数の人工皮膚における物性および触感を解析することによって、人工皮膚がヒトの肌と同様な質感を有することを確認するとともに、人工皮膚における肌質感と表面形状の関係性を明らかにする。

2. 肌質感を呈する人工皮膚の設計

2.1 弾性構造 ヒトの皮膚無毛部構造を図1に示す。図1に示すように、ヒトの皮膚は、非常に薄く弾性の高い角質細胞層の内部に弾性の高い真皮や皮下組織が配されている⁸⁾。本研究において開発する人工皮膚は、ヒト皮膚の多層構造を最も単純化し、最表層の角質層と深部の皮下組織によって構成される2層構造とした。従来研究により、角質層の縦弾性係数が約 $72 \times 10^3 \text{MPa}$ ⁹⁾、皮下組織の縦弾性係数が約 $3.4 \times 10^3 \text{MPa}$ ¹⁰⁾であることが知られている。本研究の人工皮膚の表層は縦弾性係数約 $90 \times 10^3 \text{MPa}$ のポリウレタンゴム (テムコファイン社製プロ 350)、深層は約 $4.0 \times 10^3 \text{MPa}$ のシリコーンゴム (旭化成ワッカーシリコーン社製 SLJ3266 と VP7550 を混合したもの) とした。ポリウレタンゴムは弾性率が比較的大きく、凝着性が比較的小さいこと、シリコーンゴムは配合によって弾性率をある範囲内で任意に定められることを理由に用いた。層の厚さは、表層 0.2mm、深層 10mm とした。表層および深層の厚さは、ヒト下腕部における皮膚の角質層および皮下組織の厚さを参考にして決めた。この試料を用いて予備的な官能評価を行い、この材料構成により皮膚の硬軟感を再現できることを確認した。

2.2 表面凹凸パターン 肌質感の評価に影響を与える皮膚の物理変数として、表面形状、ぬれ性、摩擦特性、弾性、熱伝導性などが挙げられる。ただし、表面形状とぬれ性、摩擦特性は、図2に示す従属関係

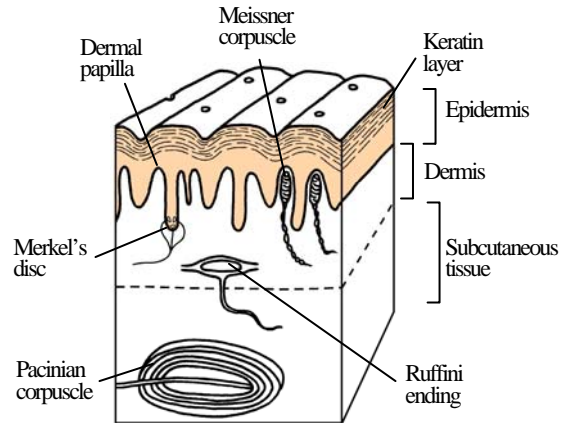


Fig. 1 Human skin structure

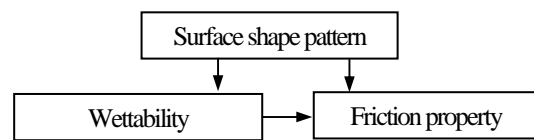


Fig. 2 Subservient relationship of physical properties

を有すると考えられる。相対湿度と摩擦力の関係は、表面の粗滑状態により大きく変化する⁽¹¹⁾。また、ぬれ性は対象の表面形状に依存する⁽¹²⁾。したがって、ヒト皮膚の表面形状を模倣し設計することによって、ヒト皮膚同様のぬれ性および摩擦特性を実現することができると考えられる。また、クーロン力や分子間力といった材料固有の化学的凝着力は、親水性が影響する毛細力に比べ非常に小さいため⁽¹¹⁾、本研究では考慮しないものとする。

ヒトの皮膚表面には、皮溝(sulcus cutis)と呼ばれる種々の深さ、長さの溝が走行している。浅く細い皮溝で囲まれる細かい隆起を皮丘(crista cutis)という。さらに皮丘は幾つか集まり、やや深い皮溝で囲まれる三角形～多角形の皮野(area cutanea)を形成する⁸⁾。このような皮膚の表面形状は、摩擦特性やぬれ性の変数であるため、粗さ感以外の触感にも影響を与えると考えられる。本研究では、皮膚表面の凹凸パターンを単純化し、等間隔に配列した正六角形の集合とした。それぞれの紋様形状を正六角形としたのは、異方性をなくすためおよび設計・加工のしやすさのためである。また、皮膚紋様1つの形状が大きくても数百 μm と微細なため、ヒトが1つ1つの凸部形状を知覚することはほぼ不可能であると考えられる。したがって、皮膚紋様の不規則性は本研究では考慮しないこととした。正六角形で構成された人工皮膚の表面形状を決定するための変数は、凸部幅 a 、溝

深さ d , 溝幅 l , 溝曲率 ρ である。これらの変数より, 溝の流量と溝表面の界面力との関係から近似的に算出した溝特性 $U \equiv d/(a+l)\rho$, 算術平均粗さ R_a , 凸部面積率 S の3つを評価値とした。まず, ヒトの皮膚表面の測定結果を基に, 表面形状の凸部幅 a を 0.6mm , 溝深さ d を 0.2mm として人工皮膚を設計し, 試料 A と名付けた。全体の大きさは $30 \times 80 \times 10\text{mm}$ とした。図 3 に試料 A の模式図を示す。つぎに, 試料 A の3つの評価値を基準とし, B-G の6種類の表面形状を設計, 製作した。製作した試料 A-G の設計変数および評価値を表 1 に示す。表 1 の3つの評価値をみると, 試料 A が設計評価空間のほぼ中央付近に存在している。これより, 試料 A を基準として試料 B-G が設計されていることが確認できた。

3. 肌質感の評価

3.1 方法 SD 法 (Semantic Differential method) による官能評価¹³⁾を用いて, 後述の摩擦計測の際と同じ被験者 12 人に試料 A-G をなぞった際の触感を評価させた。評価は, ヒト皮膚と似ているか否か, および, 触感評価の2種類とした。すなわち, 前者としては, ヒト下腕と触感を随時比較させて, 両者が似ているか否か

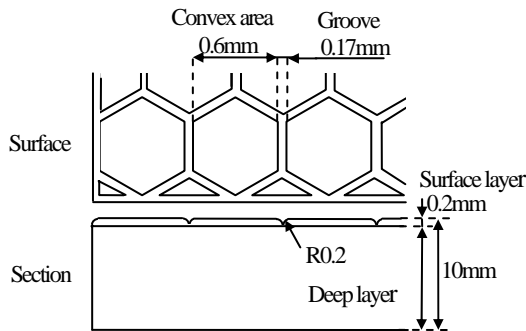


Fig. 3 Frame format of sample A

(以下, 類似度と呼ぶ) を評価させた。後者は, 表 2 に示す無毛部皮膚と 8 つの評価項目による人工皮膚の触感評価である。なお, 8 つの評価項目は, 一般的に皮膚の触感を評価する際に用いられるものである¹⁴⁾。両評価とも, 評価レベルを7段階とした。また, 人工皮膚を含めた装置およびヒト下腕無毛部を幕で隠すことにより, 視覚の影響を排除した。さらに, 被験者に不規則な順序で人工皮膚を呈示することにより, 呈示順番の影響を排除した。

3.2 結果

(a) 皮膚との類似度

製作した人工皮膚におけるヒト下腕無毛部皮膚触感との類似度の結果を図 4 に示す。図 4 における棒グラフの値は被験者 12 人の平均値を, 上下のバーは標準偏差を示す。図 4 より, 試料 A の評価が 2 (かなり似ている) から 0 (どちらともいえない) の範囲にあることがわかる。また, 試料 B-G に関しては, ほぼ全て 0 (どちらともいえない) から -2 (かなり似ていない) の間に評価されている。つまり, 試料 A の近傍で設計パラメータを変化させた試料 A-G の中で, 試料 A の触感が最もヒトの肌の触感と似ていた。以上より, ヒトの皮膚の弾性分布と紋様を模倣して人工皮膚を設計することによって, ヒトの皮膚と類似した触感を呈

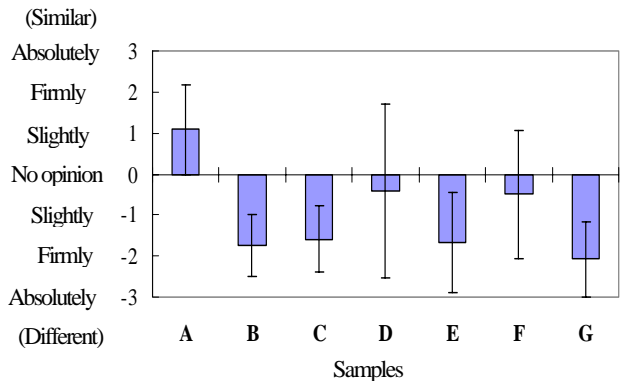


Fig. 4 Similarity of each sample texture to skin texture of a human forearm

Table 1 Surface shape pattern of designed samples

Samples	Design variables				Evaluated values		
	Width of cinvex area (mm)	Depth of groove (mm)	Width of groove (mm)	Curvature of groove (mm-1)	Average roughness (μm)	Rate of convex area	Groove shape property (μm)
A	0.6	0.02	0.17	5	2.9	0.60	5.2
B	1.8	0.02	0.17	5	2.2	0.83	2
C	0.9	0.02	0.28	2	3.0	0.58	8.5
D	0.2	0.02	0.17	5	4.1	0.29	11
E	0.6	0.09	0.17	1	12.4	0.60	110
F	0.6	0.02	0.02	1	2.0	0.93	32
G	-	0	-	-	0	1	0

する試料 A を設計することができたといえる。特に、従来は十分に研究が行われていなかった皮膚溝紋様を考慮することにより、皮膚溝紋様が適切でない場合よりも触感がヒトの肌に近づけられることを明らかにした点が重要である。

(b) 触感因子による比較

人工皮膚の触感に関する SD 法による官能評価結果について述べる。官能評価より得られた結果を標準正規分布と仮定し正規化し、最尤推定法および直交回転の 1 つであるバリマックス回転による因子分析を行った。なお、算出した因子を重回帰分析の説明変数として用いるためには、それぞれの説明変数は無相関である必要があるため、因子回転には直交回転を用いた。因子分析の結果を表 2 に示す。表 2 において、因子 1 から 3 までの累積寄与率が約 0.7 であることより、人工皮膚の触感は 3 つの因子によってほぼ説明できると考えられる。表 2 より支配的な要因を読み取ることに より、それぞれの因子を「粗滑因子」、「乾湿因子」、「硬軟因子」と名付けた。つぎに、抽出した因子によってヒト皮膚および各人工皮膚の因子得点を算出した。一例として、ヒトの下腕無毛部の皮膚触感と最も類似していた試料 A との因子得点を比較した結果を図 5 に示す。図 5 より、粗滑因子と乾湿因子に関して、因子得点の正負がほぼ同じ傾向を示していることがわかる。したがって、人工皮膚の因子得点と皮膚との類似度との間に相関関係があると考えられる。

次節において、物理計測および重回帰分析による肌質感の評価構造のモデル化について述べる。

4. 肌質感評価モデルの構築

4.1 人工皮膚の物性計測 肌質感の評価構造をモデル化するためには、32(b)において算出した触感因子の因子得点と関係のある物理特性を計測しなければなら

ない。本研究では、皮膚との接触の際の知覚に関するある物性として、ぬれ性および摩擦特性に着目し、各人工皮膚試料に対し計測を行った。

(a) ぬれ性

図 2 に示したように、肌質感や摩擦に影響を与えるぬれ性は、表面形状に依存していると考えられる。したがって、製作した人工皮膚を用いてぬれ性を評価し、表面形状との関係を解析した。

ぬれ性の評価は、水滴と表面とが成す接触角によって評価する Droplet 法を用いて行った⁽¹⁵⁾。すなわち、ぬれ性は固体基質面上に投下した水滴の形状によって評価できる。本研究では、親水度 W を

$$W \equiv \cos \theta \tag{1}$$

と定義した。ここで、 θ は、基質表面と水滴との三相界面線における接触角である。各人工皮膚表面に約 5mm^3 の水滴を形成し、接写カメラにより水滴と表面の接触角 θ を観測した。その後、式(1)を用いて親水度 W を算出した。表面溝形状の評価値の 1 つである溝特性 U と親水度 W との間の相関係数は 0.99 であった。したがって、溝形状を設計することにより、人工皮膚のぬれ性を制御ができることが明らかになった。すなわち、ヒトの皮膚表面形状を模倣することによって、ヒト皮膚上のぬれ性を再現することができる。

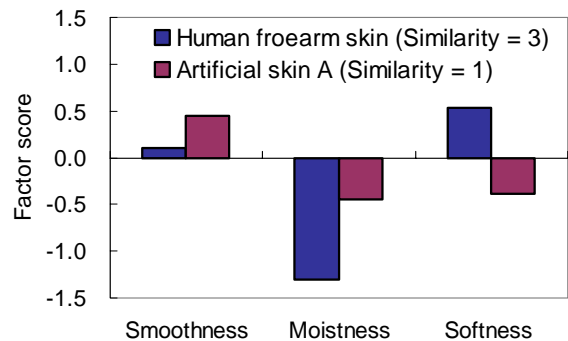


Fig. 5 Comparative example by tactile factor score

Table 2 Factor analysis results about evaluation of tactile texture

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Independent factor	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Smooth - Rough	0.87	0.14	-0.04	0.22	Smooth		
Coarse - Fine	-0.73	0.13	-0.07	0.45	Fine		
Slippy - Sticky	0.61	-0.02	0.12	0.61	Slippy		
Clammy - Creamy	-0.03	0.82	-0.01	0.33		Clammy	
Moist - Dry	0.35	0.62	-0.03	0.49		Moist	
Soft - Hard	-0.03	0.00	1.00	0.01			Soft
Plump - Slim	0.12	-0.26	0.23	0.86			
Supple - Sagging	0.40	0.03	-0.24	0.78			
Characteristic values	2.54	1.79	1.27		Smoothness	Moistness	Softness
Comulative contributing rate	0.32	0.54	0.70				

(b) 摩擦特性

製作した人工皮膚を指でなぞった際の摩擦計測を行うために、図6に示す装置を作成した。図6の装置は、ひずみゲージを接着した2枚の板ばねを垂直および水平方向に設置することにより、人工皮膚をなぞった際の力を垂直および水平方向に分離して計測するものである。計測装置の時間分解能は1msecである。また、キャリブレーションを行った結果、法線方向は0.20N以下、接線方向は0.08N以下の誤差で線形性および再現性があることを確認している。本研究では、実際の触感評価時の摩擦特性を計測するため、31項で述べた官能評価と同時に摩擦測定を行った。官能評価と同様の被験者12人に示指腹部で横向きになぞらせた。この際、指は拘束せず、被験者のなぞり速度および押し込み量を任意とした。被験者は、なぞり速度および押し込み量を適切な値に調整しながら、人工皮膚の触感を認識するための横なぞり運動を行っていると考えられる。

横なぞり運動の際の力を水平方向と垂直方向に分離して計測した。その結果を用いて、水平力と垂直力の比の絶対値がほぼ一定となった際の比率の平均値を算出した。その結果の一例を図7に示す。図7より、試料の種類にかかわらず、被験者によってその水平力と垂直力の比の平均値が大きく異なることがわかる。これは、被験者によって触感を評価する際のなぞり方が大きく異なることが原因であると考えられる。なぞり方による摩擦特性の多様性を活かすため、各試料をなぞった際の水平力と垂直力の比率間のユークリッド距離15を判定基準とした階層クラスター分析を行い、被験者を3つのクラスターに分けて解析を行った。クラスター内の平均比率の大きい組からHigh, Middle, Lowと各クラスターを名付けた。そして、各組の動摩擦係数をそれぞれ μ_{high} , μ_{middle} , μ_{low} とし、試料A-Gについてそれぞれの動摩擦係数を算出した。

算出した各組の動摩擦係数 μ_i を従属変数、凸部面積率Sおよび親水度Wを独立変数として、各変数を正規化した後、重回帰分析を行った。各重回帰式は85.0%信頼区間において有意判定された。算出した標準偏帰係数の絶対値を図8に示す。図8より、被験者のなぞり方に起因した摩擦特性の違いによって、摩擦現象に対する各物理変数の影響の大きさが異なると考えられる。

4.2 肌質感—表面形状の関係解析 触感因子を介した多変量解析を行うことにより、表面形状の物理特性と肌質感の関係について明らかにする。この関

係解析により、肌質感を有する人工皮膚を開発する際の重要な要素が明らかになるため、任意の触感を有する人工皮膚の開発へと繋がると思われる。

皮膚類似度を従属変数、各試料とヒト皮膚との触感因子得点の差を独立変数とし、重回帰分析を行った。その結果、

$$(\text{類似度}) = -1.92(\text{粗滑}) - 1.36(\text{乾湿}) - 0.27(\text{硬軟}) + 2.79 \quad (2)$$

となり、95.0%信頼区間で有意判定された。試料の物理変数と触感因子得点間の相関係数を算出した。

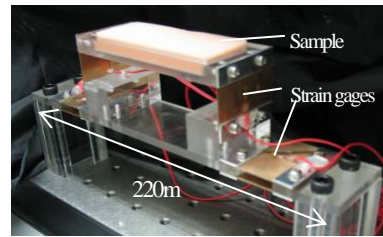


Fig. 6 Friction measurement device

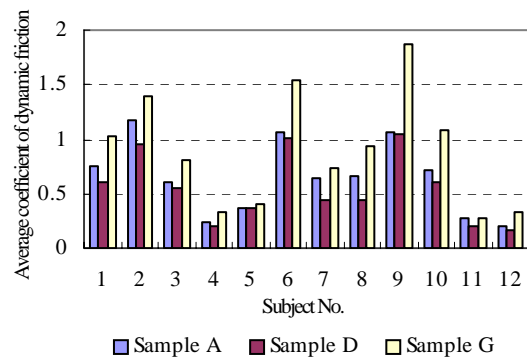


Fig.7 Example of inter-subject variance of coefficient of dynamic friction

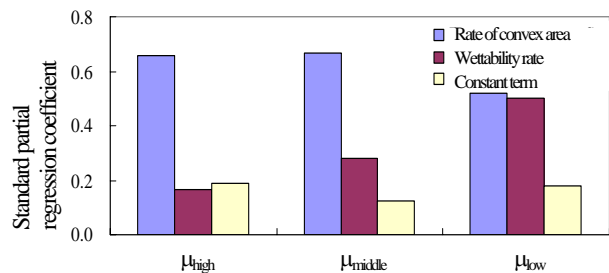


Fig. 8 Influence of surface shape and wettability to each coefficient of dynamic friction

Table 3 Correlation coefficients between physical parameters and tactile factors

	Tactile factor		
	Smoothness	Moistness	Softness
Average roughness	-0.65	-0.42	0.48
Wettability rate	-0.69	-0.13	0.37
Coefficient of dynamic friction (High)	-0.12	0.94	0.02
(Middle)	0.11	0.87	-0.28
(Low)	0.20	0.82	-0.35

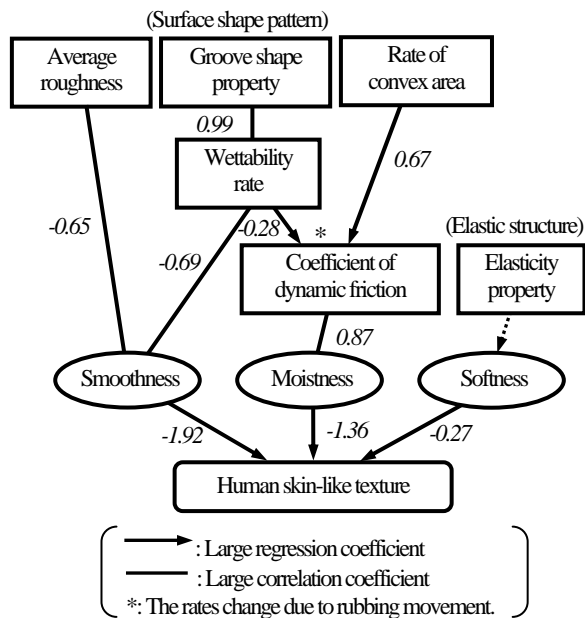


Fig. 9 Evaluation model of skin-like texture from physical parameters

物理変数として、算術平均粗さ R_a 、親水度 W および各組別の動摩擦係数 μ を用いた。結果を表 3 に示す。95.0%信頼区間にて有意判定された係数を灰色で示す。表 3 より、算術平均粗さと親水度が粗滑因子と、全ての組の動摩擦係数が乾湿因子と、高い相関関係をもつことがわかる。

以上の多変量解析より構築された肌質感と表面形状の関係モデルを図 9 に示す。図 9 より、表面形状の各評価値が親水性や摩擦特性に影響を及ぼし、各物性が粗滑感や乾湿感と相関を持つことがわかる。これらの触感評価を総合してヒトは肌質感を認識すると考えられる。また、図 9 のモデルは、肌質感に関する触感因子の感覚量を基に人工皮膚表面形状の設計変数を考察する際の指針となり得る。

5. 結論

本研究では、まず、ヒト皮膚の層構造および表面紋様を模倣した人工皮膚を設計・製作した。次に、人工皮膚の触感をヒト肌と比較することによって、ヒトと類似した紋様を有する人工皮膚の触感が最もヒト肌の触感と近いことを明らかにした。また、設計変数を変化させた人工皮膚を用いて、肌質感と表面形状の関係

を明らかにした。すなわち、表面形状によってぬれ性を制御できることや、なぞり方によって摩擦特性が大きく異なること、皮膚の触感が粗滑、乾湿、硬軟の 3 つの因子によって表されることを明らかにした。

参考文献

- 1) M. Lee, Tactile Sensing: New Directions, New Challenges, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 7 (2000), pp. 636-643
- 2) H. Shinoda, Artificial Skin for Soft Machines, *Journal of the Robotics of Japan*, Vol. 19, No. 7 (2001), pp. 814-817
- 3) M. Tanaka, Development of Tactile Sensor for Monitoring Skin Condition, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 108 (2001), pp. 253-256
- 4) N. Hirao, Psychological Effects of Skin Care. From the Perspectives of Somatosensory Function, Emotional Response and Skin Care Condition, *Journal of Society Cosmetic Chemists Japan*, Vol. 36, No. 1 (2002), pp. 1-9
- 5) H. Shirado, T. Maeno, Modeling of Texture Perception Mechanism for Tactile Display and Sensor, *Virtual Reality Society of Japan*, Vol. 9, No. 3 (2004), pp. 235-240
- 6) K. Kawai et al., New surgical treatment in the twenty-first century. Regeneration medical treatment. Novel development of artificial skin, *Gendai Iryou*, Vol. 36, No. 1 (2004), pp. 57-62
- 7) R. Ootsuka et al., Effect of environment on the mechanical properties of artificial skin, *Proceedings of the JSME Welfare Engineering Symposium*, (2003), pp. 219-220
- 8) S. Ikeda et al., *Standard Skin Science* (in Japanese), (2001), pp. 3-10, Igaku Syoin
- 9) Y. Matsumoto et al., Uniaxial tensile of horny layer, epidermis and dermis of guinea pigs, *Proceedings of Japan Mechanical Engineering Congress 2003*, Vol. V (2003), pp. 39-40
- 10) T. Maeno et al., Relationship between Structure of Finger Tissue and Location of Tactile Receptors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 63, No. 607 (1997), pp. 881-888
- 11) M. Sherge, S. Gorb, *Biological Micro- and Nanotribology*, (2001), pp. 7-76, Springer
- 12) P. Gennes et al., *Gouttes, bulles perles et ondes* (Japanese edition), (2003), pp. 213-225, Yoshioka syoten
- 13) E. Masuyama, *Sensory Evaluation* (in Japanese), (1989), pp. 12-49, Kakiuchi Syuppan
- 14) M. Egawa et al., Skin Surface Friction and Sensory Evaluation, *Journal of Society Cosmetic Chemists Japan*, Vol. 37, No. 3 (2003), pp. 187-194
- 15) B. Song et al., A Generalized Drop Length-Height Method for Determination of Contact Angle in Drop-on-Fiber System, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 197 (1998), pp. 68-77