

衣服設計のための3次元計測で得られる点群データと 人体の曲率に関する研究

奈良女子大学 今岡春樹

Point Cloud Generation from Stereo Vision and Surface Curvature of the Human Body for Garment Design

by

Haruki Imaoka
Nara Women's University

ABSTRACT

Currently, every industry uses information technology for the design and production of products, and the clothing industry is no exception. Apparel C.A.D. is a common tool for making clothes. It even aims to make best-fitting, comfortable clothes. Since clothes cover the human body, both clothing and the human body are important in this special field. To construct an actual three-dimensional clothing shape, cloth—a two-dimensional object—is cut and sewn, and the produced clothes are worn by the person. Now, we can predict the clothing construction process employing a “garment simulation system.” Although a dynamic garment simulation system is available, a dynamic three-dimensional measuring system has not been developed. From the clothing construction viewpoint, we are interested in surface curvatures, especially the Gaussian curvature of the human body. If we can dynamically display this curvature, more sophisticated garment design will be achieved.

要 旨

情報技術はあらゆる産業の設計と製造に影響を与えている。衣服産業も例外ではなく、現在では全ての衣服産業でアパレルCADを使っている。フィット性の高いそして着心地のよい衣服は永遠の課題である。衣服は人体を覆うものである。衣服の研究と人体形状の研究は表裏一体のものである。2次元の布を裁断し、縫合することで一応の衣服となり、人体に着用されて本来の3次元の衣服となる。このプロセスは「着装シミュレーション」によって予測することができる。動きを含めた着装シミュレーションは既の実現されているが、動く人体の3次元計測は今後の課題である。我々が衣服の立場から人体形状に興味を持つのは、人体表面の曲率、特にガウスの曲率である。この技術の完成により、もう1段階高いレベルの衣服設計が可能になると考えられる。

緒 言

衣服は布から、布は糸から、糸は繊維から構成される。この伝統は長く引き継がれ現在でもその本質は変わっていない。素材方向に向かうと自然科学の領域で、製品に近づくとき能・技術の領域で研究が行われる。川上に比較して川下には演繹的手法である数理よりは帰納手的手法である経験が重視されてきた。このことは科学の唯一性と技術の多様性から見て、きわめて自然な状況であった。しかし、情報技術の進展があらゆる産業分野に影響を与え始め、筆者は30年前、「着装シミュレーション」の研究開発に着手した。大学での専攻は情報系であり繊維系でなかったため、布や衣服について初歩から学ぶこととなった。この研究は数人で行ったが皆情報系で、状況は同じであった¹⁻¹⁰⁾。

布の数理的研究は、ピアス¹¹⁾を至高とし、日

本では呉・篠原(後に高寺・乾)らの研究¹²⁾、川端・丹羽らの研究¹³⁾が光っていた。一方衣服の設計図である衣服型紙(以降型紙)は手書きテンプレートとハンドカッターからCAD・CAMに移行しつつあった。米国ガーバー、仏国レクタラに対抗して、日本では東レ、旭化成が競合していた。

着装シミュレーションでは、型紙、素材、人体を3大要素と呼んでいる。型紙、素材、人体を入力すると、その人体にその素材でできた衣服を着装するとどのような形となるかを計算し表示することができる。3大要素以外に縫合と着付けを指示しないと形が決まらないことが分かってきたので、これらを入力5要素と呼んでいる。着装シミュレーションの本体は「形状予測」であるが、表示では「色柄表示」も重要である(図1)。これ以外に、衣服圧表示¹⁴⁻¹⁶⁾や空隙量表示なども提案してきた。このシステムは既に商用化され多くのユーザーがいる¹⁷⁾。



図1 着装シミュレーションと迷彩柄

着装シミュレーションは2次元型紙から3次元衣服を予測するものであった。その逆に、3次元衣服あるいは3次元人体形状から2次元型紙を作る研究も行ってきた¹⁸⁾。型紙を作成する方法としては、人体寸法計測値から製図によって求める方法と布を人台に沿わせてピン止めしつつ作成するドレーピングによる方法がある。後者をコンピュータで行うようにしたものが「平面展開ソフトウェア」である。任意の曲面を平面に無理なく展開することは不可能であることが分かっている。無理なく平面化できる局面は「可展面」と呼ばれ、特殊で稀な曲面である。これらの理論はガウスによって構築され、「ガウスの曲率」が重要なキーワードとなる。可展面とはガウスの曲率がいたるところゼロの曲面である。なお、平面展開ソフトウェアも日本オリジナルの商用化システムが稼働している¹⁹⁾ (図2)。

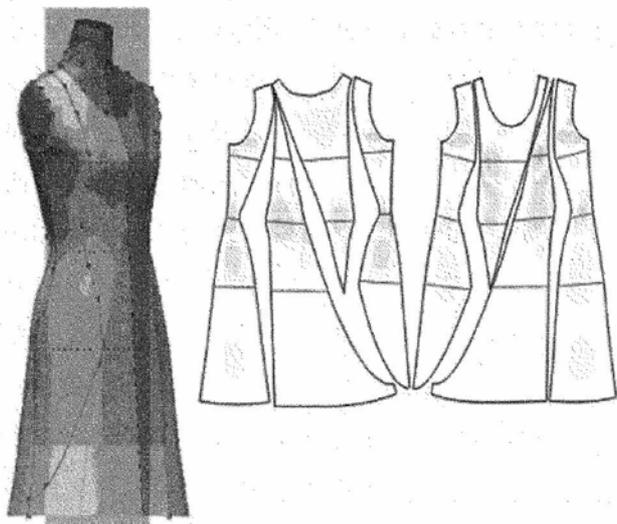


図2 商用の平面展開ソフトウェア

1. 面の曲率

平面上に半径 r の円を描く。この円上の1点に関して、その曲率は $1/r$ で定義される。円の場合至る所同じ曲率であるが、一般の自由曲線では場所により曲率は異なる。この定義は、直線の曲率はゼロであること、半径が小さいほど曲率（曲がり具合）が大きいという直観に沿って

いる。曲線の法線方向を定めて、曲率に正負の符号をつける場合もある。

平面上の曲線に対比して、空間上の曲面（例えば球面）の曲率を定義することは容易ではない。曲面上の注目点について「面の曲率」を定めたい。まず注目点に法線を定める。法線を含む平面で曲面を切断すると断面ができ、この曲率は平面上の曲線の曲率として定まる。切断する方向を変えることで様々な断面ができるが、正負を入れた曲率の最大値と最小値を与えると全ての方向の断面曲率を指定したことになる。つまり、2つの曲率（主法曲率という）によって曲面の近傍形状が定まるので、面の曲率は「2つの値」によって記述できることになる。球面は特殊でどの断面も一定で、最大値=最小値となっている。また、平面もどの断面でも一定でゼロ・ゼロである。

曲率は曲線では1つの数、曲面では2つの数で表示できることが分かった。ガウスの天才は、2つの数をそのまま示すのではなく、積（ガウスの曲率という）と和（平均曲率という）で示すことを提案した。積と和が分かれば元の2つの数が求めることができ、逆もできる。何が天才のメリットであろうか (図3)。

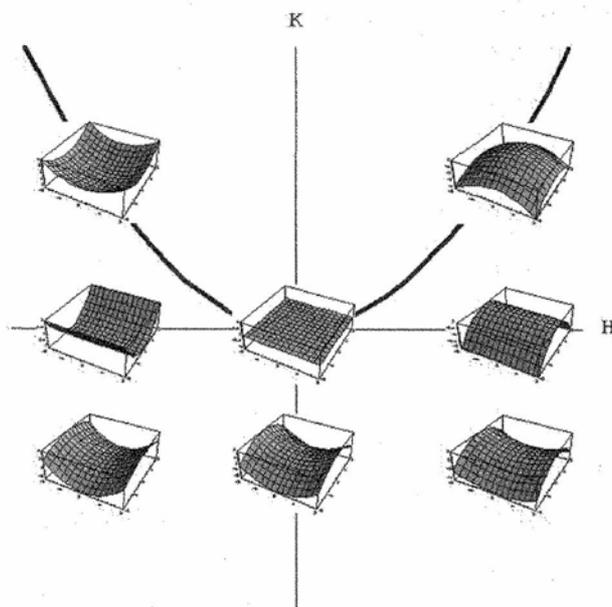


図3 ガウスの曲率Kと平均曲率Hによる形状分類

ガウスの曲率では正負そしてゼロが重要である。まずゼロの重要性から述べたい。曲率がゼロということは普通平面を直観するが、ガウスの曲率はそうではない。例えば円柱のガウスの曲率はゼロである。平面はゼロ×ゼロ、円柱はある曲率×ゼロである。ガウスの天才が円柱は曲がっていないと言う。翻訳すれば平面ゼロ・ゼロから無理なく作れるゼロであると主張した。正負に関しては、曲面の形を表す「凹凸」の直観とも会わない。山も谷も正×正、負×負で共に正のガウスの曲率を持つ。峠が正×負で負の曲率を持つ。人体では頭、指の先、臍などが正、脇、股、指の間、締まったウエストが負の部分である。

2. ガウスの抜群定理とガウス-ボネの定理

ガウスの曲率に関して2つの重要な定理がある。ガウス自身が自画自賛した「ガウスの抜群定理」と「ガウス-ボネの定理」である²⁰⁾。後者は数学の定理の中でも最も美しい定理の一つであると称賛されることがある。2つの定理は共に衣服について本質を教えてくれる。なお、これらのオリジナルは「滑らかな曲面」に対して定義されるが、多面体などの「滑らかでない曲面」でも成立する。

ガウスの抜群定理：“ガウスの曲率は等長変換で不変である”。等長変換とは面を伸縮したりせん断したりしない変形で、曲げたり捩じったりはしてもよい変形操作を言う。衣服は複雑な（ガウスの曲率がゼロでない）人体表面を元々単純な（ガウスの曲率がゼロである平面状の）布帛で覆うように作るのであるから、この定理は重要である。直接には「スイカを風呂敷でせん断しないで覆うことはできない」があり、対偶では「スイカを風呂敷で覆うことができたなら、伸縮やせん断が生じている」という定理である。衣服の世界では伸縮やせん断（アイロン）よりも裁断と縫製（ミシン）を多用する。裁縫は先人の

大いなる知恵である。ガウスの抜群定理は「裁縫の必然的必要性を説明する」。森英恵が若き日に悟った「洋服は和服のように畳めない」はこの定理を被服人として述べたものである。洗濯機の中で衣服が回転しているとき、「ガウスの曲率は変わらずに平均曲率だけが変まっている」という認識と「2つの主法曲率が共に変まっている」という認識のレベルの違いを感じたい。

ガウス-ボネの定理：ガウスの曲率の総和+測地的曲率の総和=360°×オイラー数。この定理は右辺のオイラー数が「同相変換（ゴム変形）不変量」で服種では違うが幅広い形態の変化で不変なので、「保存則」である。ゴムのように伸縮・せん断・曲げ・捩れの変形をしても、穴を開けなければ右辺は一定であるので、左辺の総和量は一定である。人体は球と同相でオイラー数は2である。よって、右辺の720°が不変量である。球は面の境界がないので、面の境界に定義される測地的曲率はない。球ではガウスの曲率は至る所、正で一定であるが、人体では正の場所や負の場所がある。しかし、人体表面のガウスの曲率を集めると球と変わらず720°となる。総和が一定であるので、大きな正の形があればそれをキャンセルする大きな負の形がなくてはならないことになる。ガウス-ボネの定理の多面体バージョンは初等的であり、デカルトが証明したと言われる。なお、平面図形で「多角形の外角の和は一定で360°である」という定理はガウス-ボネの定理の特別な場合（ガウスの曲率がなく、測地的曲率のみが存在しオイラー数が1の場合）である。

3. 人体の3次元計測

人体の3次元計測による人体形状の取得は、「着装シミュレーション」と「平面展開ソフトウェア」と共に必要不可欠である。人体の揺動に耐える高速計測、特徴点に貼られたマーカー計測、多

方向同時計測、隠れ面の補間などの技術的な課題を乗り越え1千万円以下の国産計測装置ボディラインスキャナーがあったが、現在生産中止である。今後レーザーを使ったアクティブ計測ではなくステレオカメラを使ったパッシブ計測に期待している。

3次元計測は、点群の位置情報の取得から始まって、点群の編集を経てポリゴン（多面体）化される。ポリゴンはCG（コンピュータ・グラフィックス）における形状定義の標準であり、多くのソフトウェアやグラフィックス用ハードウェアはこの標準を仮定して作成されている。近年リアルタイム性を要求される分野で、点群そのものを描画できるポイントクラウド（点群）技術が発展してきた。主として動作を伴う3次元計測にその応用範囲がある。

4. 点群データからの曲率計算

ガウスの曲率は滑らかな曲面上で定義される。ポリゴン（多面体）では頂点に集中したガウスの曲率（欠損角という）が計算される。その頂点が統治する面積として、その頂点を含む三角形の $1/3$ の面積を合計し、欠損角を統治面積で除することでガウスの曲率を算出する。

点群データから直接計算する場合は、まず注目点に対する近傍点を距離指標によって定める。近傍点群から 3×3 の分散共分散行列を求め、最小固有値に対応する固有ベクトルを法線の推定値とする。ワールド座標系を固有ベクトルで定まる局所座標系に変換して、2次曲面としてフィッティングする。こうして2つの主法曲率を求め、最終的にガウスの曲率と平均曲率を求める。図4にガウスの曲率を順位で明度表示したものを示す。絶対値表示も可能であるが、順位表示は明るさの一樣分布であるので強弱が明瞭である。

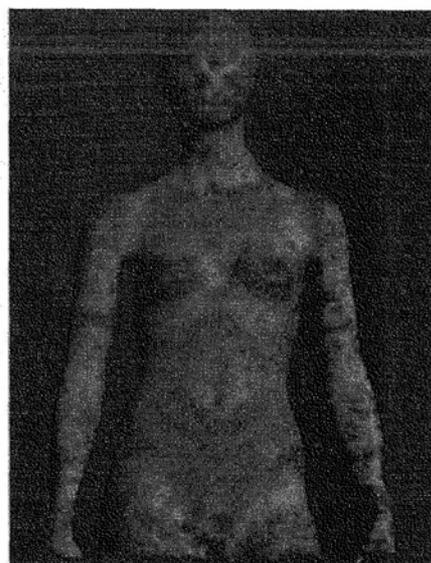


図4 点群の計算から求めたガウス曲率の明度表示

5. 動きを捉えるリアルタイム表示

先に着装シミュレーション技術を紹介した。着装シミュレーションには図5に示す静的なシミュ



図5 i-Designerによる静的シミュレーション結果
株式会社テクノア提供

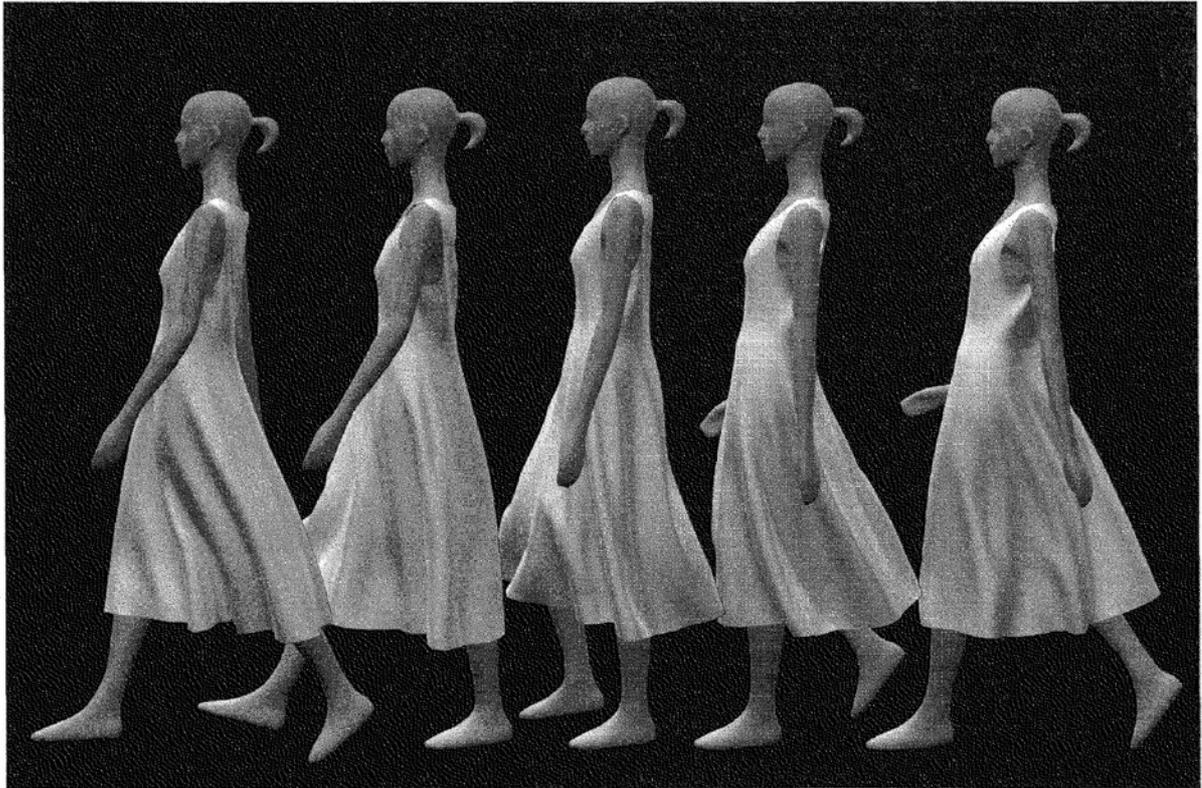


図6 DressingSimによる動的シミュレーション結果：デジタルファッション株式会社提供

レーション¹⁷⁾を行うものと図6に示す動的なシミュレーション²¹⁾を行うものがある。人間は動作を行うので、衣服設計は人の動作解析と連動する必要がある。しかし、服種によって標準となる静止ポーズがある。例えば背広は直立で腕を下ろす、シャツは直立で腕を水平にするなどである。研究の進め方として、標準静止ポーズから始め、徐々に動作を取り入れることが自然である。

衣服と動く人体との関係は、運動追従性と呼ばれ3つのモードがあるとされる²²⁾。人体と衣服の間の空隙が大きければゆとりがあるので人体は自由に動ける。これがゆとりモードである。空隙が少なくなってくると衣服は動作にともなわずれる。これがずれモードである。タイトフィットしている状況では動作に伴って布が伸びることになる。これが伸張モードである。静的シミュレーションでは、ゆとりモードの空隙量と伸張モードの衣服圧を視覚化することが

できる。動的シミュレーションでは、ずれモードも観察できるが視覚化は難しい。

衣服は人体を覆うもので、人体が動くことを強く意識した場合、まず人体の動きを観察することから始めることになる。既に述べたように衣服にとっての人体への興味は曲率特にガウスの曲率である。

最終的にはリアルタイムでガウスの曲率の変化が見えることが望ましいが、そのためにはまず、形とテクスチャーのリアルタイム計測とリアルタイム表示である。計測に関してはレーザーを用いたアクティブ計測では時間の制約を突破できないので、パッシブなステレオカメラ方式のみが可能性を秘めている。表示に関してはポリゴンにする時間はないので、点群そのもののレンダリングが有力である。実際に、リアルタイムの計測・表示は点群処理に限定されている。最近では廉価な計測センサーがゲーム用のインターフェースとして発売され、話題を呼んでいる²³⁾。

6. 結 語

衣服分野の情報化はCAD・CAMに始まり、CG分野へと拡張してきた。衣服用CG分野の歴史は30年余りであるが、その流れを解説してきた。着装シミュレーションや平面展開プログラムが新しい衣服設計技術として登場してきたが、衣服設計の本質はガウスの曲率にあることを明らかにした。ガウスの曲率は面に分布しているので、これを捉えるには視覚化が必要であり、しかもリアルタイム性が要求されることを示してきた。なお、今後の技術発展の方向について考察すると、注目すべき研究が幾つか出始めている。

本解説では、面曲率の重要性を強調してきた。さらに動きを含めた研究を行うということは、必然的に面が動くことを数理的に扱うことになる。まだ、応用分野ではないが、曲率流の理論²⁴⁾が基礎理論としての資格を有していると思われる。

近年急に成長した研究がAR(拡張現実)である。入店すると試着ブースがあり、在庫はないのに自分の動きに仮想衣服を重ねた画像が鏡に映される技術²⁵⁾である。

着装シミュレーションでは衣服圧を色で表示することができる。ARでも衣服圧の視覚表示は可能であろう。しかし、本当に触ることのシミュレーションは難しい。この分野は、触感センサーと触感ディスプレイの研究²⁶⁾があり、大きな期待を持っている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 今岡春樹, 岡部秀彦, 赤見仁: コンピュータによるドレープ現象の構造解析. 繊維高分子材料研究所研究報告, 142, 57-61(1984)
- 2) 今岡春樹, 岡部秀彦, 西川茂ら: 面要素を用いた衣服立体性の予測. 繊維高分子材料研究所研究報告, 142, 73-80(1984)
- 3) 岡部秀彦, 今岡春樹, 別所康男: パターン立体形状予測システムの構築について. 繊維高分子材料研究所研究報告, 142, 87-96(1984)
- 4) 岡部秀彦, 今岡春樹, 赤見仁: 3次元CAD/CAMのための衣服型紙とその自動有限要素分割. 繊維学会誌, 42, 4, T231-239(1986)
- 5) 岡部秀彦, 今岡春樹, 渋谷惇夫ら: 計算機による平面型紙から立体衣服構造への変換 - 縫製と着付けのシミュレーション. 繊維学会誌, 44, 3, 129-136(1988)
- 6) 今岡春樹, 岡部秀彦, 赤見仁ら: 織物の変形解析. 繊維学会誌, 44, 5, 217-228(1988)
- 7) 今岡春樹, 岡部秀彦, 赤見仁ら: 織物の二次元を例とした変形予測法. 繊維学会誌, 44, 5, 229-237(1988)
- 8) 今岡春樹, 岡部秀彦, 赤見仁ら: 衣服立体形状予測法. 繊維学会誌, 45, 10, 420-426(1989)
- 9) H.Okabe, H.Imaoka, T.Tomiha, H.Niwaya: Three Dimensional Apparel CAD System. *Computer Graphics*, 26, 2, 105-110(1992)
- 10) H.Imaoka: Three Models for Garment Simulation. *Int. J. of Clothing Science and Technology*, 8, 3, 10-21(1996)
- 11) P.H.Dastoor: FREDERICK THOMAS PEIRCE: HIS LIFE AND CONTRIBUTIONS TO TEXTILE SCIENCE. *J. of the Textile Institute*, 77, Issue 6, 426-436(1986)
- 12) 篠原昭: 衣服の幾何学, 光生館(1997)
- 13) 丹羽雅子編著: アパレル科学, 朝倉書店(1997)
- 14) 庭屋晴夫, 今岡春樹, 渋谷惇夫ら: 布の接触圧の予測法. 繊維学会誌, 46, 6, 229-236(1990)
- 15) 庭屋晴夫, 今岡春樹, 渋谷惇夫: 衣服圧分布の予測法と表示法. 繊維学会誌, 52, 2, 76-81(1996)
- 16) 庭屋晴夫, 今岡春樹, 渋谷惇夫: 姿勢の変化にともなう衣服圧分布の予測. 繊維学会誌, 52, 5, 248-252(1996)
- 17) 株式会社テクノア: <http://www.i-designer-web.com/>, 2012.11.18確認
- 18) 今岡春樹, 渋谷惇夫, 相坂登: 力学的平面展開手

- 法による自動型紙作成法. 繊維学会誌, 45, 10, 427-434(1989)
- 19) デジタルファッション株式会社 : http://www.digitalfashion.jp/new/product/dressingsim_lsx/index.html, 2012.11.18確認
- 20) 今岡春樹, 増田智恵 : 裁縫の曲率的解釈と縫合の式. 日本繊維製品消費学会誌, 37, 8, 422-429 (1996)
- 21) デジタルファッション株式会社 : http://www.digitalfashion.jp/new/product/fashion_show/index.html, 2012.11.18確認
- 22) 原田隆司 : 着ごちと科学, 裳華房(1996)
- 23) Microsoft Corporation, <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>, 2012.11.18確認
- 24) 儀我美一, 陳 蘊剛 : 動く曲面を追いかけて, 日本評論社(1996)
- 25) 例えばジェイ・ライン株式会社 : http://www.j-line.co.jp/service/tryon_ar.php, 2012.11.18確認
- 26) K. Sato, K. Kamiyama, H. Nii et al.: Finger-Shaped GelForce: Sensor for Measuring Surface Traction Fields for Robotic Hand, *IEEE Transactions on Haptics*, 3, 37-47 (2010)