

距離画像による人体の3次元形状の計測とモデリング

内山晋二 加藤博一 佐藤宏介 井口征士

大阪大学 基礎工学部 制御工学科

人体の3次元形状計測を行い、計測値を基にする可動な形状モデルを用いることで、人体を計算機内表現する手法を報告する。人体の対象部位として「足」を選んだ。足の3次元形状計測は、距離画像計測によって行なう。距離画像計測は2.5次元計測であるため、複数方向から計測、融合することで全表面の3次元形状計測を行なう。足の形状モデルは、その内部構造を近似表現することで構築する。足は、「骨」、「筋肉」、「脂肪」、「皮膚」の4要素（材料）から構成されているとする。各構成要素の特性に注目してそれぞれをモデリングし、それらを組合せることで、足の形状モデルを形成する。実際の計測データにこの形状モデルを適用することで、被計測者の形状を動的な状態で計算機内に再構成できる。

Measuring and Modeling 3-D Shape of Human Body Parts Based on Range Imaging

Shinji Uchiyama Hirokazu Kato Kosuke Sato Seiji Inokuchi

Department of Control Engineering,
Faculty of Engineering Science, Osaka University
1-1 Machikaneyama-Cho, Toyonaka City, Osaka 560 JAPAN

This paper describes a method to measure 3-dimension shape of human body parts and to represent them using a movable shape model on a computer. We chose "foot" as an example of a part of a human body. Range image processing is applied for measuring the shape of a foot. As range images are 2.5-dimensional images, the several range images measured from different directions are required in order to get the shape of its whole surface. The model of a foot shape is constructed based on the approximation of its internal structure. We consider a foot as an object made of "bone", "muscle", "fat" and "skin". We model the four elements by paying attention to their nature. To combine them, the model of foot shape is constructed.

1. まえがき

人体の3次元形状の自動計測は、幅広い分野でのニーズを控えている。アパレル産業（下着の型どり、靴のオーダーメイド等）、医療（外科手術のシミュレーション、形状差異の検定等）はもとより、自然なコンピュータ・グラフィックスのための形状入力などが考えられる。さらには、遠隔地間の通信に手・顔の3次元形状を伝えるといった、新たなヒューマンインターフェースなどにも利用可能であろう。今回、人体の対象部位として足を選び、3次元形状の計測方法として、複数方向から距離画像を計測、融合するという方法を用いた。

しかし、計測結果の利用から考えると、計測されたデータが計測装置に依存する数値の羅列では意味がない。そのため、人体の形状モデルとしての計算機内表現が必要である。また、人体の可動性、柔軟性をも表現できる方法がより望まれる。そこで、内部構造を数種類の構成要素で表現する形状モデルを用いて形状表現を行なう。各構成要素は、近似モデルによって表現されている。

足に関してこのモデルを適用し、形状の再構成、変形（曲げ伸ばし）の表現を行った。

2. 人体の3次元形状計測

3次元位置を計測するシステム[1]は、そのセンシング方式によって接触計測法と非接触計測法に大別される。計測をフレキシブルに行なうため、非接触で物体に影響を与えない光学的手法の研究が進められている。本研究では、人体の形状計測に、我々の研究室で開発された液晶レンジファインダ[2]を用いた。液晶レンジファインダは、能動ステレオ法の1つであるコード化パターン光投影法に分類されるものである。

レンジファインダによる計測では、カメラとプロジェクタの共通視野内しか計測されない。そのため、足全体の表面形状の計測を行うためには、複数方向から距離画像計測を行なう必要がある。そこで、レンジファインダを可動装置上に搭載し、四方に配置した計測システムを開発した。

2. 1. 液晶レンジファインダの原理

カメラとプロジェクタを用いて、三角測量の原理により形状の計測を行う手法である。プロジェクタの前に置いた液晶シャッタによってシーンにグレイコードパターンを投影し、空間をコード化する（コード化パターン光投影法）。各パターンの投影されたシーンをカメラから二値画像として入力する。図1.にその原理図を示す。

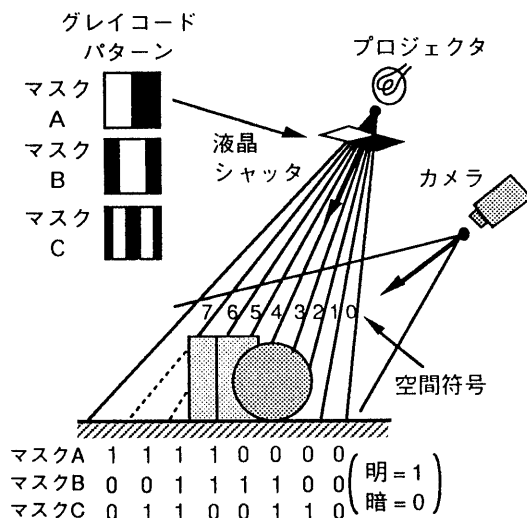


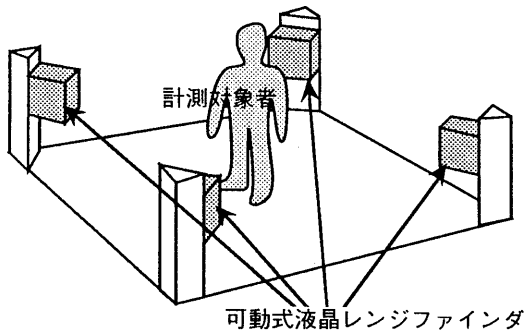
図1. 計測原理図

グレイコードパターンは、液晶素子の細長いストライプシャッタアレイのオンオフの組合せ（マスクパターン）により生成され、プロジェクタにより順次測定空間に投影される。測定空間は各マスクパターンが投影される毎に、照射されて明るい領域“1”とそうでない領域“0”の2つに分けられる。したがって、2進コード化された光パターンをn枚投影するだけで、測定空間を 2^n に分割できる。カメラにより入力され、2値化された画像は、投影パターンに応じた各画素のビットプレーンに挿入される。最後にグレイコードを純2進に変換し、空間コードを得る。空間コードから、シーンの3次元位置を計算する。

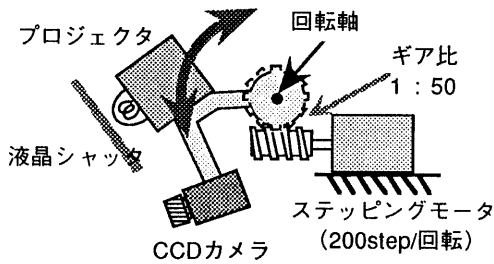
2. 2. 人体用3次元形状計測装置

人体の形状を計測するために、足全体、さらには体幹部といった、細長い広範囲な計測を行うた

めの計測装置を開発した。図2.に装置の概略図を示す。



(a) 計測装置の外見 (4台の(b)を四方に配置)



(b) 可動式液晶レンジファインダのセンサ部

図2. 人体形状の計測装置

これは、液晶レンジファインダをステッピングモータにより駆動可能な装置に搭載し、四方に配置したものである。ここで、計測された複数の距離画像間の座標系の統一が問題となる。そのため、1つの基準物体を用いて、4台のレンジファインダと回転軸のキャリブレーションを行った。これにより、共通の1つの世界座標系上に距離データが得られている。

計測方法は、中央に計測対象となる人に立ってもらい、順次、数回距離画像計測を行う。図3.に、3次元空間中に計測された距離画像各画素の点位置をそのままプロットしたを入力データ示す。2人の計測対象者に対して足の計測を行なった。図3.(a)は全点であるが、(b)は見やすくするため、点数を1/16に減らしてある。



(a) 4方向から計測したA氏の足



(b) 8方向から計測したB氏の足

図3. 計測データ

3. 足の形状モデル

計測データが数値の羅列では意味がない。そのため、人体の形状モデルとしての計算機内表現が必要である。今回、人体の部位の例として「足」

を対象とした。

我々の形状モデルは、足の内部構造を近似表現することに基づいている。まず、内部構造を数種類の構成要素に分け、それぞれの構成要素に対して、特徴を近似表現するモデルを構築する。それらの構成要素モデルを組み合わせることによって、全体を表現する。実際には、「骨」、「筋肉」、「脂肪」、「皮膚」の4構成要素に近似した。この4構成要素の組み合わせによって、足の形状モデルは形成されている。

実際の3次元形状計測データに、この近似モデルをあてはめることによって、人体形状を動きと共に計算機内に再構成する。ただし、ここでいう動きとは「関節の曲げ伸ばしから発する静的な変形」を意味し、人体の動的な運動特性までも意味するものではない。

3. 1. 「骨」のモデリング

足には非常に多くの骨があり、片足で約34個ある[3]。また、足の指先から踵にかけて骨形状は非常に複雑であり、これも大きな個人差を持つ。そのため、足の骨をそのまま表現するには、外から形状計測するのみでなく、CTスキャナ等による骨測定をも併用しない限り困難である。しかし、これには、計測の容易さ、計測時間等の点で問題があり、また、小数の骨で近似表現することにも問題が少ないと思われる。

1つ1つの骨は、剛体とみなせる。剛体を表現するため、一般化円筒法を用いて体積表現する。骨は、大腿部に1本、すねに1本、足の甲・踵・裏にかけての骨が1つ、指の前部、後部の骨がそれぞれ5本、の計13とする。各指骨は、全体を1つの一般化円筒で与え、関節点をその内部に設けることにより2つの骨として扱う。図4に、実際に計測した足の表面形状データに対して、この骨モデルをあてはめたものを示す。また、2つのくるぶし(内果、外果)の中間に位置する足首の関節と、膝間接、指の骨の中間に位置する指の付け根の関節を、点として与える。指には、他に関節はないものとした。

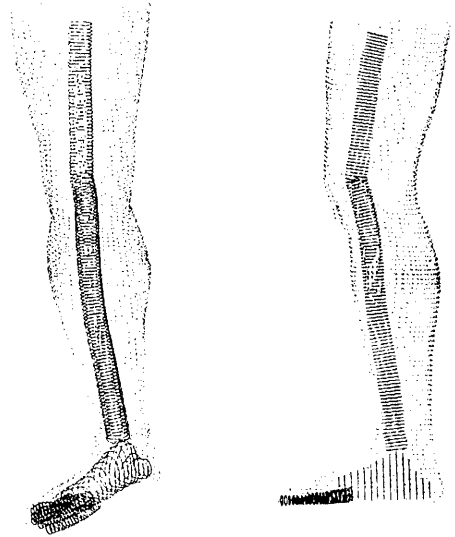


図4. 骨モデル (B氏)

3. 2. 「皮膚」のモデリング

皮膚は、軟組織である。しかも、関節の動きに伴って柔軟に変形、塑逆する。これは、あたかも弾力のある布のような動きをしていると思われる。そこで、皮膚を布状のばねとして近似表現する。この布状のばねを表現するために、以下に示す「弾性網」[4][5]、さらにそれを発展させた「弾性布」[6]を用いる。

皮膚モデルの形状は、表面の計測データを平滑化後、網状の格子点として標本化することにより決定される。そのために、複数の距離画像を1つのボクセルデータに融合し、そのボクセルによって標本化を行なった。

3. 2. 1. 弾性網と弾性布

弾性網とは、図5.に示すようなばねでできた網状のものを想定したものである。格子点が無数の外力により変位すると、各ばねは力を受け、力の釣り合うところで新たな形状が決定される。図6.のように、一般に n 本のばねが、1点 P でつながっているとき、それぞれのばねのばね定数を k_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$)、自然長を d_i 、ばねのもう一方の端点を P_i とすると、点 P に加わる力 F は、式

(1) で計算できる。

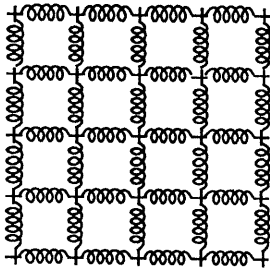


図5. 弾性網

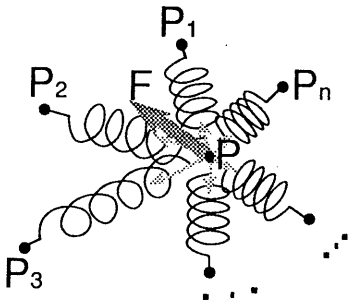
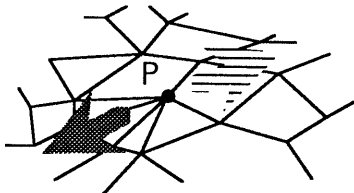


図6. 点Pに加わる力

$$F = \sum_{i=1}^n \left\{ k_i (|P_i - P| - d_i) \frac{(P_i - P)}{|P_i - P|} \right\} \quad \dots (1)$$

弾性網は、網の結合方法、密度が均一である場合には、布状のばねとしてはたらく。しかし、任意の形状の網の場合、その変形は、ばねの張り方に依存する。図7.に、その例を示す。



→ 方向の変形に対してPは変位しやすいが、
 ⇐ 方向の変形に対して変位しにくい。

図7. 弾性網のばねの張り方に対する依存性

複数枚の距離画像から得られる皮膚表面形状データは、3次元空間中に不均一な密度で分布する点の集合である。それを、平滑化後標本化することにより、網の格子点を得る。そのため、均一な網を得ることは難しい。そこで、網の形状に依存せず、布状のばねのはたらきをする弾性体を考案した。図8.にその原理図を示す。

弾性網は、ある格子点Pと連結している格子点 $P_i (i=0,1,2,\dots,n)$ との間に1本のばねを考えたものである。そのため、不均一なばね配置を構成することになってしまう。そこで、 $P_i (i=0,1,2,\dots,n)$ を3次元空間中で補間し、その補間路上の点と点Pとの間に密にばねが存在すると考える。実際には、補間路上に微小な間隔をおいて得られる点を $p_j (j=0,1,2,\dots,m)$ とし、Pと p_j について式(1)を適用する。(これは、補間路上での線積分に相当するものと考えられる。)

次に、1つまたは複数の格子点が、安定状態から外力により変位したとき、次の安定状態を導き出す方法を示す。

- (a)全格子点において加わっている力を計算する。
- (b)その力に応じて各格子点を動かす。
- (c)すべての格子点に加わる力が、0になるまで(a)(b)を繰り返す。

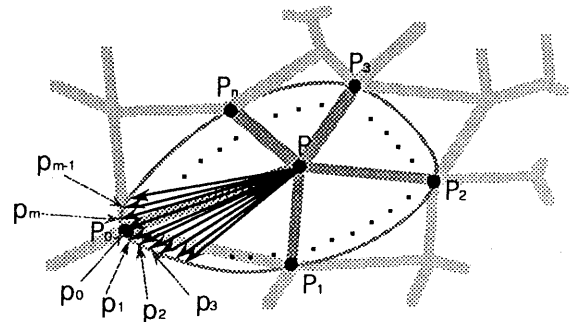


図8. 弾性布

3. 2. 2. 皮膚モデルの形状の決定方法

計測データは、同一世界座標系にある距離画像であるが、互いに独立した2.5次元画像群にすぎない。全体を1つの表面データに変換するために、それらを融合する必要がある。そのため、複数枚

の距離画像を、拡張オクトツリー[7]を用いることによってソリッドモデルへの変換を行なった。カメラ位置から距離画像までの空間には物体が存在しないことを利用して、1つの塊を削りだすように、ソリッドモデルを生成する。拡張オクトツリーでは、得られるボクセルデータに「物体」「空間」「表面」のラベルが付けられているが、「表面」ボクセルには、計測で得られた点位置も格納されている。すなわち、ボクセルデータとして全体形状が得られ、しかもサブボクセル単位の精度を持つ表面データとなる。

また、ボクセルサイズを適当に選ぶことによって、表面を任意の密度で標本化することができる。得られた表面ボクセル内の点位置を、その26近傍に存在する他の表面ボクセル内の点位置と連結することで、網状の皮膚モデルの形状を得ることができる(図9.)。

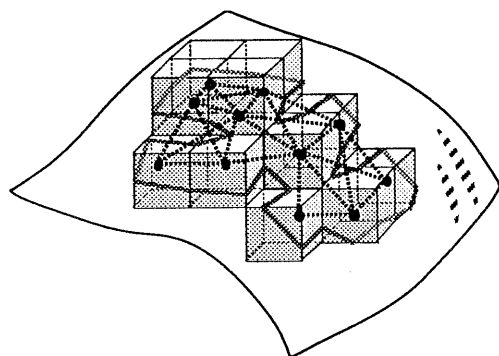


図9. ボクセルによる標本化と連結

実際の計測データから得られた皮膚モデルの形状を図10.に示す。

3. 3. 「筋肉」のモデリング

足の曲げ延ばしは、本来、筋肉の緊張・弛緩によって、骨が関節中心に回転をすることによって起こる。この逆を考え、筋肉の形状変化を、関節の変形角度をパラメータとして膨張収縮する体積体として、表現する。骨の場合と同様に、一般化円筒を用いて、体積表現を行なった。掃きだし面形状を変更することによって、体積体の変形を容



図10. 皮膚モデルの形状

易に実現できる。

現在のモデルでは、ふくらはぎに1本の筋肉を与えている。図11.に示すように、骨モデルに接し、掃き出し面は、すねの骨の掃き出し面と平行で楕円である。そして、楕円の長径・短径を関節角の関数とすることで、筋肉の膨張収縮を表現する。

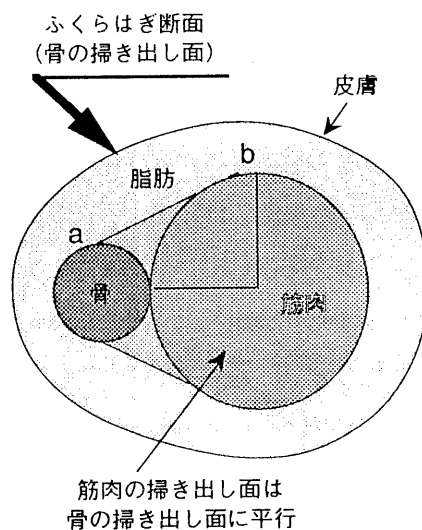


図11. 筋肉モデルの掃き出し面

自然体(直立姿勢)が各部に無理な力が加わることのない最も安定な状態と考え、計測姿勢での

状態を、初期状態とする。初期状態での筋肉モデルの掃きだし面形状は円とする。骨モデルと皮膚モデルとの距離を利用して、円の直径を決定する。図12のような方法で、くるぶしから膝までの各軸上での直径を決定する。くるぶし位置を0、膝位置を1としたとき、0.75の位置での骨モデル-皮膚モデル間距離から脂肪の最小厚を引いたものを最大直径とする。それを基に数箇所の直径を求め、3次スプライン補間することによって、筋肉モデル全域の掃きだし面直径を決定する。

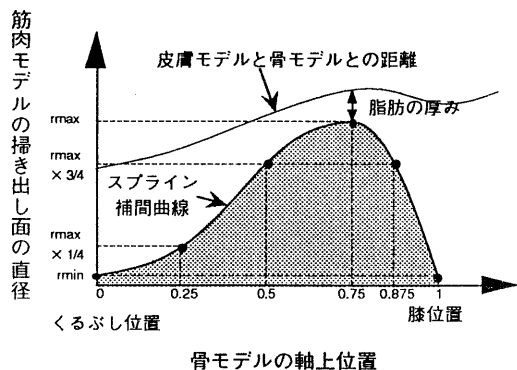


図12. 掃きだし面の直径

関節角の変形に伴う、掃きだし面の変形は、角度に比例して楕円の長径短径と変化させるという方法をとっている。

3. 3. 「脂肪」のモデリング

脂肪は皮膚と骨、筋肉の透き間を埋める弾性体として表現する。皮膚の弾性布の各格子点と骨、筋肉モデルとの間をばねで連結することにより、脂肪を柱状のばねとして表現する。皮膚モデルの各格子点から、骨、筋肉モデルの表面上の一番距離の短い点を探し、格子点とその点とを結ぶことにより脂肪の柱状のばねを得る。しかし、骨モデルと筋肉モデルとは、接している構造となっている。そのため、このまま上の処理を行なうと骨モデルと筋肉モデルの間の「溝」のところで、不連続になってしまう。そのため、図11.中のa-b間を直線で結んだ溝を埋める曲面を考え、この曲面への最短距離にある点も計算している。計測姿勢で

ある初期状態でこの処理を行なう。ここで、骨モデルおよび肉モデルは、自然スプライン曲線である軸上に、離散的な掃きだし面によって表現されている。すなわち、骨表面、筋肉表面が直接表現されているわけではない。骨モデルを例にとると、図13.に示す方法で骨表面上の点を得ている。

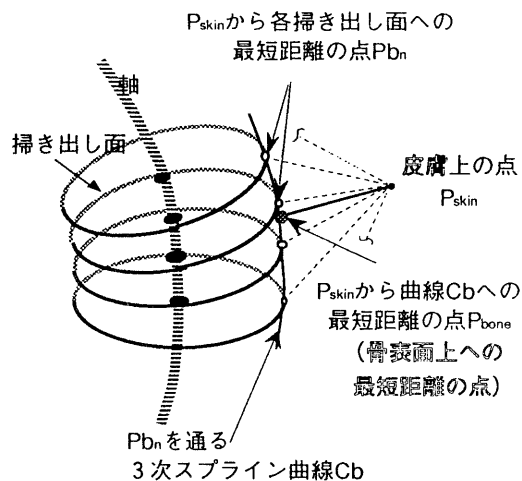


図13.皮膚上の点から骨モデルへ下ろす線

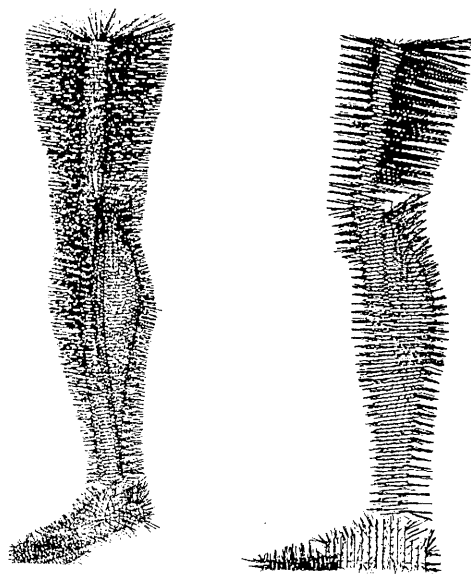


図14. 骨、筋肉、脂肪モデル

皮膚表面上の点を P_{skin} とする。 P_{skin} から骨の一般化円筒の離散的な各掃き出し面上における最短

距離の点を見つける。それを Pb_n とし、それらの点を3次スプライン補間して得られる曲線 Cb を考える。そして、 P_{skin} から Cb への最短距離の点を見つける。そうして得られた点を骨表面上の最短距離の点とし、脂肪のばねの骨側の端点とする。

図14.に、実際に得られた骨、筋肉、脂肪のモデルを示す。

3. 4. 足の形状モデルの変形

3. 1. から3. 3. により、足の形状をモデリングできた。この形状モデルを、関節点にて変形させる。その変形の方法を、次に示す。

- (a) 曲げる部分、方向、角度を指定。
- (b) 指定部分を、関節点中心に微小回転。
- (c) 回転角に応じて、筋肉を変形。
- (d) 皮膚、脂肪を、かかる負荷に応じて変形。
- (e) (b),(c),(d)を、指定角度になるまで、繰り返す。

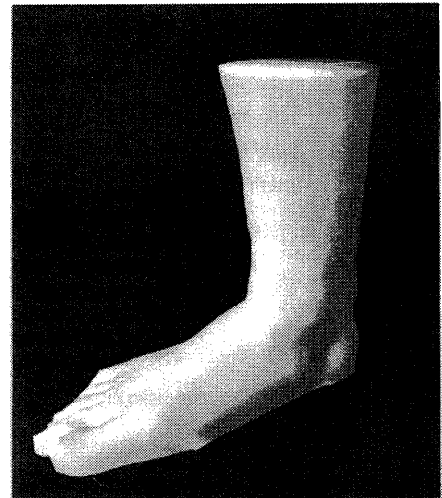
以上の方法により、モデルを変形させることができる。その際、(c)で問題となることは、筋肉モデルの回転角依存の変形係数の設定の問題である。現在、長径短径は回転角に比例するとみなし、経験的な値を与えている。また、(d)で皮膚モデル、脂肪モデルのばね定数の設定の問題がある。皮膚モデル、脂肪モデルのばねの形状は、つり合いの位置のみで決まる。すなわち、絶対的なばね定数は意味をなさず、相対的なばね定数の違いだけが形状に影響する。現在、全ばねは同じばね定数を持つものとしている。

4. 結果

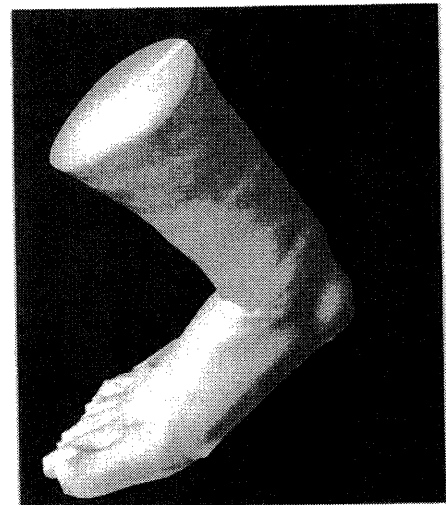
図15.に、A氏の足の形状モデルの変形の様子を示す。皮膚表面をサーフェス表示してある。(a)が計測姿勢での形状である。(b)は、足首関節で前方に20度回転、爪先の5関節それぞれで前方に20度回転して新たな形状をなしたモデルの変形結果である。こちらのモデルは、すねの下半部しか形状をなしていないため、ふくらはぎ筋肉モデルは挿入されていない。

図16.に、B氏の足の形状モデルの変形の様子を示す。こちらは、筋肉の変形模様を示すために、ワイヤーフレーム表示してある。骨、筋肉、脂肪

の各モデルを表示し、皮膚モデルは見やすくするため表示していない。足首関節で20度、ふくらはぎが前後方向に膨らむ方向に回転させた結果である。



(a) 計測姿勢 (初期状態)



(b) 変形結果

図15. 結果 (A氏) サーフェス表示

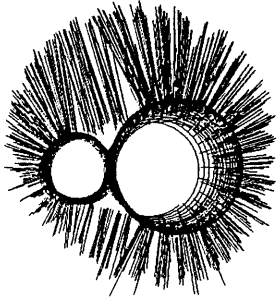
5. まとめ

距離画像の計測、融合によって人体の3次元計測を行ない、内部構造の近似表現による近似モデルを用いて再構成を行なう手法について報告を行

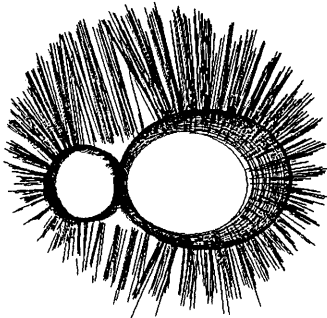


(a) 初期状態 (横)

(b) 変形結果 (横)



(c) 初期状態 (上)



(d) 変形結果 (上)

図16. 結果 (B氏) ワイヤフレーム表示

なった。今回報告した計測装置は、人体用に開発したものである。しかし、現状のシステムでは、計測時間が長いという難点を抱えている。現在、8枚の距離画像の計測に約3分かかっており、被験者がほぼ動かずに計測できる限界に近いと思われる。しかし、これは計測装置が試作機であるため、高速に計測できるという距離画像計測の本来の特徴が活かされていないためである。これと同程度の計測であれば、本来、20秒程度で十分に行なえると思われる。

形状モデルによる再構成に関しては、全体的に見て、良好な再構成が行えていると思われる。しかし、筋肉モデルの変形に関しては、定量的な測定を行なわなければ、現実に近いモデルは得難いであろう。今回報告したモデルをベースに、さらなる改良を加えていきたい。

また、手など他の部位へのモデルの適用、他の人体の構成要素(靭帯、腱等)の追加、など、これからの展望として考えられる。

参考文献

- [1]井口, 佐藤: “三次元画像計測”, 昭晃堂(1990)
- [2]佐藤, 井口: “液晶レンジファインダ”, 電子情報通信学会論文集, Vol.J71-D, No.7, pp.1249-1257 (1988)
- [3]森, 小川, 他: “解剖学1”, pp.146-164, 金原出版(1981)
- [4]安居院, 他: “テクスチャマッピングのための複雑な3次元形状の表現”, 電子情報通信学会創立70周年記念総合全国大会論文集, pp.6-308 (1987)
- [5]内山, 他: “距離画像計測による足の3次元形状モデリング~人体の動的形状モデルの構築~”, 第34回システム制御情報学会研究発表講演会, pp.227-228, 3040 (1990)
- [6]内山, 他: “距離画像計測による足の3次元形状モデリング~布状ばねモデルによる皮膚表現~”, 第33回自動制御連合講演会, pp.491-492, 3072 (1990)
- [7] Sakaguchi, et.al: "Generation of 3-D Models Based On Image Fusion of Range Data", Proc. of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, 147-150 (1990)