「画像の認識理解シンポジウム (MIRU'96)」1996 年 7 月

動きの制約を用いたヒトの手の 3 次元形状モデリング

安室 喜弘　陳 謙　千原 國宏
奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

Abstract: This paper describes a new approach for hand modeling. The hand model is composed by two parts: the surface part and the bone part. The surface part of the hand model is represented by a curved surface which is obtained by fiting a set of curved surface patches to the 3D surface data obtained by measuring a real hand with a laser range finder. The bone part of the model is constructed based on the structure of the bone of human hand and the shape of it controlled by a dynamics model. These bones are used to determine the controlling points of the hand surface in order to generating the shape of the hand.

1　はじめに

近年、コンピュータ等の発達によって、人間の周りの機械類をより利用しやすく、より役に立つものにすることが可能になった。バーチャルリアリティ、マルチメディア、ヒューマンインタフェースなどの研究はこの動きの代表的なものである。バーチャルリアリティとは人工的に合成されたものが現実らしく見え、感じられる仮想環境を作る技術である。この技術を用いて、色々な情報を人間にとって理解しやすく、或いは実感できる形でユーザに提示することが可能になる。このことにより、ユーザは情報のやりとりを相互に円滑に行なうことができる。その中で、ユーザに親近感を感じさせるために、本物そっくりの仮想人間を登場させる必要があり、人間像をリアルに合成する必要がある [1]。一方ヒューマンインタフェースは人間と機械の間の情報のやりとりを如何にして効率良く、理解しやすい形で行えるかを目的とする研究である。その中で、人間の動作を機械に理解させることが非常に重要な課題である。

手は人の体の中でもっとも器用な部分で、その形状や動作による表現が非常に豊富である。従って、人間像の合成や人の動作の認識の中で手は極めて重要な部分である。本研究はヒトの手の形状と運動を自然に再現できる手の 3 次元モデルを提案する。今まで CG による手の像の合成や画像の中の手の動作の認識等、様々な目的で手のモデリングが行なわれてきた [2, 3]。そのほとんどは手を手のひらや指に分解し、それぞれを剛体で表現するものであった。そして手のひらと指の間、或いは指と指の間の関節の角度を変えて手の形や動きの合成を行なってきた。しかし、関節自由度の十分なものはなく、剛体部品で柔軟な皮膚を持つ手をリアルに再現することはできない。

我々は手の姿勢を決める骨格のモデルと手の表面を形成するモデルを用いて手を表現する。研究の主な構成としては、手全体の姿勢決定プロセスと、決定された姿勢における手の表面形状決定プロセスとに分けられる。まず、手の姿勢決定には骨格モデルとしてマルチリンクモデルを構成する。手の姿勢は各関節における相対角をパラメータとして決定する。自然な手の動きを与えるために、この各パラメータは独立に与えるのではなく関節間、或いは指間の相関関係を用いてその値を決定する。

手の皮膚は弾力をもつ表面としてモデリングされ、骨格の構造と肉の厚さなどのパラメータでその表面の形状を決定する。皮膚表面モデルの初期状態として、レンジファインダで実際の手全体の形状を計測した距離データを用いる。この距離データを各リンクに割り当てて姿勢の変化する骨格モデルに追従させながら表面形状を逐次生成する。

2　骨格モデル

剛体マルチリンクモデルを用いて近似する。これは長さ不変の線分で表現されたリンクと回転ジョイントとの組合せで人の手の骨格系を近似したモデルである。手の形状を忠実に再現するために手の骨格に近い形でモデルを構成する。

3D Modeling of Human Hand with Motion Constraints
Yoshihiro Yasumuro,　Qian Chen,　and Kunihiro Chihara
Graduate School of Informarion Science, Nara Institute of Science and Technology

手の骨格系は手首側から指先に向けて階層的な構造をなしていると考えることができ [4]、各リンクの長さは不変なので、リンク間の相対的な姿勢は互いのなす相対角によって決定される。ここでは、各リンクに固定のローカル座標系を設け、ローカル座標系間の変換をオイラー角を用いて記述する。このオイラー角が姿勢を決定するパラメータとなる。

2.1 ヒトの手の骨格系について

fig.1 に示すように手掌部の骨格は手根、中手、指骨とから成る [5]。手根は 8 つの手根骨から成り、中手は中手骨、指骨は指節骨 (基節骨、中節骨、末節骨) とから成る。但し、母指の指節骨は 2 つである。

fig.1 手掌部骨格

fig.2 schematic model of a human hand

2.2 リンクの構成及びローカル座標系設定

前節の内容を参考にして fig.2 のようにヒトの手掌部の構成を表現できる。ここでは前節のリンク構成を数学的に表現することを考える。

まず，慣性空間に固定された座標系を考え，単位ベクトルを $\boldsymbol{a}_{-1,1}$,$\boldsymbol{a}_{-1,2}$,$\boldsymbol{a}_{-1,3}$ と表し基本ベクトル系を次のように表す．

$$[\boldsymbol{a}_{-1}]^T = [\boldsymbol{a}_{-1,1}\ \ \boldsymbol{a}_{-1,2}\ \ \boldsymbol{a}_{-1,3}\ \ ] \tag{1}$$

同様に各リンクに対し，指 kのリンク jに固定された座標系を考える。その原点を関節 C_j^kにとる．この基本ベクトル系を次のように表す．5 指のインデックス kを母指から順に、T(Thumb), I(Index), M(Middle), R(Ring), P(Pinky) とする。

$$[\boldsymbol{a}_j^{(k)}]^T = [\boldsymbol{a}_{j1}^{(k)}\ \ \boldsymbol{a}_{j2}^{(k)}\ \ \boldsymbol{a}_{j3}^{(k)}\ \ ] \tag{2}$$

又，各リンクについてベクトルを次のように定義する．

- $\boldsymbol{r}_{-1}$: 手根基準位置の慣性空間からの距離ベクトル
- $\boldsymbol{r}_j^{(k)}$: 指 kのリンク jの関節 $C_j^{(k)}$から関節 $C_{j+1}^{(k)}$への距離ベクトル (リンク座標系表現)

座標変換の際は，3-2-1Euler 角をもちいる．この座標変換は，3 軸まわりにθ_3, 2 軸まわりにθ_2, 1 軸まわりに θ_1 だけ回転させる変換である．これらそれぞれの座標変換行列をそれぞれ，A_1, A_2, A_3とすると、$[\boldsymbol{a}_{j-1}]$ 系から $[\boldsymbol{a}_j]$ 系への座標変換は次のように表せる．

$$[\boldsymbol{a}_j]^T = A_{jj-1}[\boldsymbol{a}_{j-1}]^T \tag{3}$$

ここで，

$$A_{jj-1} = A_1(\theta_{j1})A_2(\theta_{j2})A_3(\theta_{j3}) \tag{4}$$

また、各リンク座標系表現を慣性座標系表現に変換する変換行列は次のように計算できる。

$$A_{j-1}^{(k)} = \prod_{l=0}^{j} A_{ll-1}^{(k)} \tag{5}$$

2.3 座標変換と各関節座標の算出

慣性空間に対して、指 kの関節 $C_{(j)}^{(k)}$の距離ベクトルを$\boldsymbol{x}_j^{(k)}$とする。これらを慣性座標系で表現すると以下のようになる．

$$\boldsymbol{x}_1^{(T)} \quad = \quad \boldsymbol{r}_{-1} + \sum_{j=0}^{3} A_{j-1}^{(T)T}\boldsymbol{r}_j^{(T)} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{x}_1^{(k)} \quad = \quad \boldsymbol{r}_{-1} + \sum_{j=0}^{4} A_{j-1}^{(k)T}\boldsymbol{r}_j^{(k)} \tag{7}$$

$$(k = I, M, R, P)$$

3　姿勢決定プロセス

各関節の動き易さは手の姿勢によって影響を受けることから各々の関節角は独立に値をとれるわけではない。一本の指の関節間にも、指相互の関節間にもそのとり得る相対角には相関があると考える。尤もらしい手の姿勢に基づいた関節角相互の相関関係を拘束条件としてモデルに導入し少ない入力パラメータで自然な手の姿勢を生成するシステムを構築する。

3.1　関節自由度

2 節の定式化により、手根の位置、姿勢及び各リンク間の相対的姿勢のパラメータ (オイラー角) を与えると各関節の位置が 3 次元空間で一意に求められる。しかし、ヒトの手を模していることから手首を除く各関節は回転自由度が 2 以下である。ンク固定の座標系基礎モデルの自由度は表 1 に示す通りである。他の文献では掌部の変形を考慮しないものが多いが、ここでは中手骨も可動としこれをもとに掌部の変形を決定する。モデル全体の自由度は手首の並進自由度を含めて 33 である。このモデルにより、母指と他の指先を合わせる等の、従来の手のモデルでは実現できなかった姿勢を表現出来る。

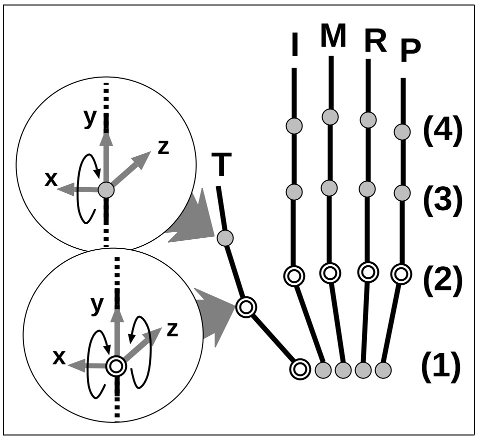

fig.3 骨格モデル

表 1. 各リンク間の基本自由度

	手根 基準点	中手骨 底部	基底骨 底部	中節骨, 末節骨 底部
個数	1	3	5	9
並進	3	-	-	-
回転	3	2	2	1
合計	6	10	10	9

3.2　状態変数

指 $k(k = T, I, M, R, P)$ の第 j リンク (手根部を 0 とする) の底部関節に固定されたローカル座標系を $[\boldsymbol{a}_j^{(k)}]$ とする。$[\boldsymbol{a}_{j-1}^{(k)}]$ 系から $[\boldsymbol{a}_j^{(k)}]$ 系への座標変換における l軸まわり $(l = 1, 2)$ の相対角の定義域を正規化した $[0, 1]$ の連続値 $\theta_{jl}^{(k)}$ を状態変数とする。この状態変数を要素にもつベクトルを状態変数ベクトルとし、$\boldsymbol{\theta}$ と表す。

$$0 \leq \theta_{jl}^{(k)} \leq 1 \tag{8}$$

3.3　基礎入出力方程式

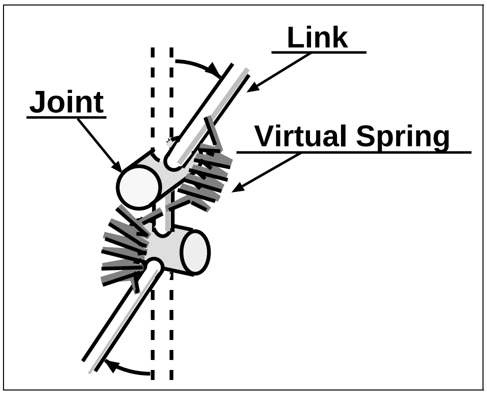

fig.4 仮想的弾性モデル

関節の各自由度に対して、仮想的なバネを設置することを考える (fig.4)。角度変位に伴うこの仮想的なバネの弾性力と入力との平衡状態によって各関節の状態変数は決定されるものとする。これは次式で表される。

$$K\,\boldsymbol{\theta} \;=\; \boldsymbol{\tau} \tag{9}$$

$\boldsymbol{\theta}$: 状態変数ベクトル
$\boldsymbol{\tau}$: 入力トルクベクトル
K : バネの剛性定数行列

K は各バネの剛性定数を要素にもつ対角行列である。このパラメータを個々の関節について設定することによってその関節の剛性すなわち屈曲のし易さが設定できる。

3.4　入力システム

全ての自由度に対応する入力トルク値を与えると、(9) 式により状態変数 $\boldsymbol{\theta}$ は一意に決定する。しかし、尤もらしい姿勢をつくるためにユーザが全ての入力値を設定するのは大変である。ここでは、入力トルクベクトルの一部の値を与えるだけで手全体として自然な姿勢を出力するための入力トルクベクトルを生成するシステムについて述べる。

ユーザが与える特定の関節への入力を指示入力とよび、また、自然な姿勢を保つために各関節に対して自動的に生成される入力を内部入力とよぶ。システムに対する入力ベクトルは指示入力と内部入力との和で与えられるものとする ((10) 式)。

$$\tau = \hat{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau}_c \tag{10}$$

$\hat{\boldsymbol{\tau}}$: 指示入力値
$\boldsymbol{\tau}_c$: 内部入力値

3.4.1 内部入力の生成——エネルギ関数

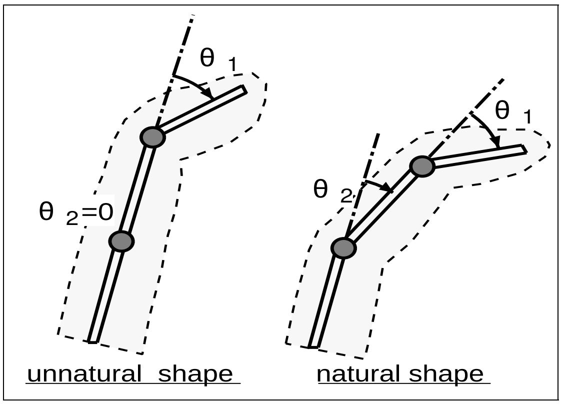

fig5. natural shape

常に手全体が自然な姿勢を保つために内部入力を生成するが、まず自然な姿勢というものを定義する。ここでは、各関節の状態変数 (関節相対角) が独立に変化するものではないと考え (fig.5 参照)、自然な姿勢を状態変数の 1 次従属な関係で表現する。これは異なる状態変数の変位の比を定数で与えることによって以下のように表す。

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\beta}{\alpha} \qquad \alpha, \beta \text{ : 定数} \tag{11}$$

次に、自然な姿勢からの変位Θ_1を次のように定義する。

$$\Theta_1 = \alpha\theta_1 - \beta\theta_2 \tag{12}$$

自然な姿勢、即ち $\Theta_1 = 0$ とするような仮想的な弾性力を生成することを考える。この仮想的な弾性力が内部入力である。内部入力のポテンシャルエネルギ J_1 を次のように 2 次形式で構成する。ここで w は内部入力の強さを表す弾性係数であり、関節を自然な姿勢に拘束する強さのパラメータでもある。

$$J_1 = \frac{1}{2}\, w\, \Theta_1^2 \qquad (w \text{ : 弾性係数}) \tag{13}$$

$$= \frac{1}{2}\, w\, (\alpha\theta_1 - \beta\theta_2)^2 \tag{14}$$

(14) 式に示すようにエネルギ J_1 はシステムの状態変数 θ_1,θ_2 の関数となっている。また、干渉をもたせたい状態変数の組合せ毎にこのようなエネルギを設定し、それらの線形和によって全体のエネルギを構成することができる。このエネルギにより、さまざまな関節間の干渉を考慮した結果の平衡状態を実現できる。

個々の関節の内部入力はその関節の状態変数で、エネルギ関数の偏微分をとることによって求められる。関節 1 に生成する内部入力は、次のように求められる。

$$\tau_{c1} = -\left(\frac{\partial J_1}{\partial \theta_1}\right) \tag{15}$$

$$= -w\alpha(\alpha\theta_1 - \beta\theta_2) \tag{16}$$

以上のような定式化をシステム全体の状態変数について行なう。まず、自然な姿勢からの変位 $\boldsymbol{\Theta}$ を行列 A を用いて次のように表現する。 A は異なる 2 つの状態変数の比を成分にもつ行列である。

$$\boldsymbol{\Theta} = A\,\boldsymbol{\theta} \tag{17}$$

内部入力のポテンシャルエネルギ Jを行列 Wを用いて次のように構成する。行列 Wは、内部入力の弾性係数を成分にもつ対角行列である。

$$J = \frac{1}{2}\,\boldsymbol{\Theta}^T W\,\boldsymbol{\Theta} \tag{18}$$

$$= \frac{1}{2}(A\,\boldsymbol{\theta})^T W (A\,\boldsymbol{\theta}) \tag{19}$$

$$= \frac{1}{2}\,\boldsymbol{\theta}^T A^T W A\,\boldsymbol{\theta} \tag{20}$$

従って、自然な姿勢をとるための各関節に生じる力 (内部入力) はポテンシャルエネルギ Jを状態変数ベクトル $\boldsymbol{\theta}$で偏微分をとることによって次のように計算できる。

$$\boldsymbol{\tau}_c = -\left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right) \tag{21}$$

$$= -\left\{\left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}^T}\right) + \left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right)^T\right\} \tag{22}$$

$$= -(A^T W A)\,\boldsymbol{\theta} \tag{23}$$

システムの状態変数は、(24) 式のように、入出力方程式と入力方程式とを連立させることによって (27) 式のような線形方程式を解くことにより計算される。

$$\left\{\begin{array}{lll} K\,\boldsymbol{\theta} & = \boldsymbol{\tau} & \cdots \text{入出力方程式} \\ \boldsymbol{\tau} & = \hat{\boldsymbol{\tau}} - \left(\dfrac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right) & \cdots \text{入力方程式} \end{array}\right. \tag{24}$$

$$K\,\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\tau}} - \left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right) \tag{25}$$

$$= \hat{\boldsymbol{\tau}} - (A^{\mathrm{T}} W A)\,\boldsymbol{\theta} \tag{26}$$

$$(K + A^{\mathrm{T}} W A)\,\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\tau}} \tag{27}$$

尚、行列 K,A,Wの要素はヒューリスティックに決定したが、A については文献 [4] を参考にした。

4　表面形状決定プロセス

4.1　皮膚モデル

手の表面形状は、制御点によって形状が決定される滑らかな曲面パッチで表現する。この曲面の制御点の位置は骨格モデルから魚の骨状に突き出た枝のモデルで決定する。

各リンクの骨格モデルにあらかじめ枝を配置し、その先端を制御点とする。枝の配置及び長さは初期姿勢において実測した 3 次元形状の距離データをもとに設定する。制御点は、隣接する制御点との距離に比例した弾性力を受けるものとする。また枝自体もその根本における回転変位に対して弾性を有するものとする。すなわち、制御点が隣接する制御点と骨格モデルとに対して仮想的にバネを介して連結されているモデルである。各部のバネの剛性を適当に与えてやることにより皮膚の伸縮の分布をモデルに採り入れることができる。すなわち、指の関節周りの変形し難い箇所の設定や、指の腹側と背側の肉厚の変化の違いなどが再現可能となる。このモデルは、指等が曲がるなどの変化に対応して皮膚表面の制御点の位置が決定し、自然に表面形状が形成されるものである (fig.6)。

本稿では、3 次元形状計測から制御点としてのデータ構造をもった表面上の点群を生成する過程について述べ、生成した点群を用いて姿勢決定プロセスの出力結果を示す。

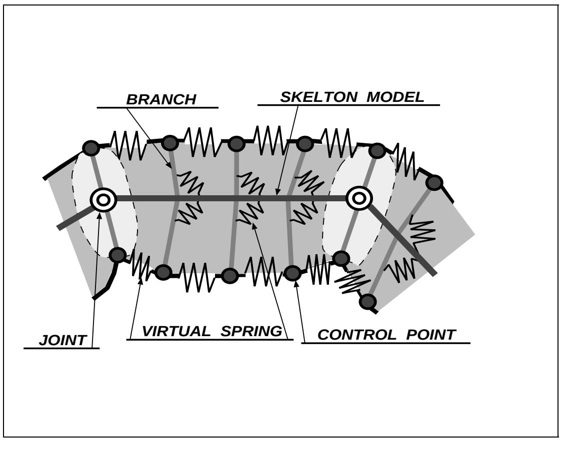

fig.6 skin model

4.2　3 次元形状計測による表面形状の生成

皮膚モデルを構築するために、実際の手の 3 次元形状計測を行なった結果をもとに表面形状データを作成した。

4.2.1　レンジファインダによる 3 次元形状計測

手の表面を構築するために実際の手の複製を石膏で作成し、レンジファインダを用いてこの複製像の形状計測を行なった。計測には平行スキャン型のレーザレンジファインダ (クボタ製 CUBIST) を用い、手の平側と手の甲側との 2 つの計測データを得た。剛体変換によってこの二つのデータの位置合わせを行ない、統合することによって全体の距離データとした (fig.4)。計測の際にはマーカとなる突起を 9 箇所設け、この同一マーカの座標の自乗誤差が最小となるように剛体変換のパラメータを決定した。

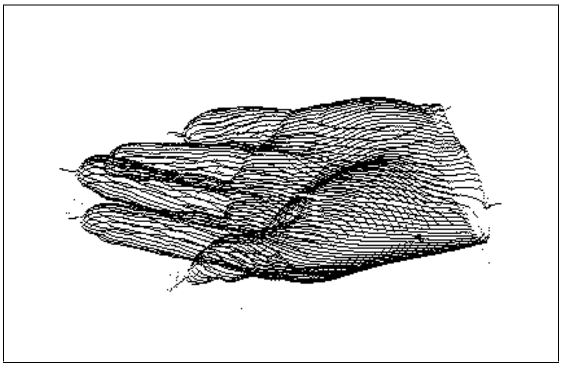

fig.6 3 次元形状計測結果

4.2.2　骨格モデルと表面形状データとの対応

形状計測によって得られた手の表面上の点群と、骨格モデルとの対応をとる必要がある。これは皮膚が骨の動きの影響を受け、変形する様子を制御するために不可欠な要素である。

まず、計測点群中において関節の位置を決めることによって、骨格と表面の点群との位置関係の設定を行なった (fig.7)。

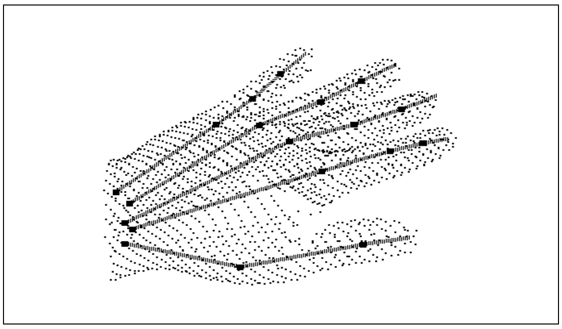

fig7. 骨格モデルの配置

4.2.3　表面形状データの整列化

形状計測による表面上の点群データは 2 つの計測結果をつなぎ合わせたものであるため、計測時のスキャンラインは位置合わせの際に 3 次元的にその方向がず

れている。また、各スキャンライン上で、手の表面上に存在する計測点の個数も不規則となっている。

表面形状を変化させ再構成するためには、表面上の各箇所を指定できなければならない。このためには、整列した構造のデータとして表面上の点群を用意する必要がある。ここではまず手全体で、骨を横切る約50の断面を設定し、各断面の十分近傍にある点をその断面上に投影した。次に、断面上に投影された点群を5指それぞれの骨に最も近傍の点の集合に分類した。各断面において各骨に属するグループ内で定数個 (10点) の点を含む点列を線形補間により生成した。

このようにして表面上の点は断面、骨の属性によってグルーピングされたことになる。掌部の表面の点群では、グループ中の点列の端点に近くなるほど隣の骨のグループに近い位置に存在するデータ構造になっている。生成した点列 (全体で4000点) を用いて手全体の表面形状をワイヤフレーム表示したものを fig.8 に示す。

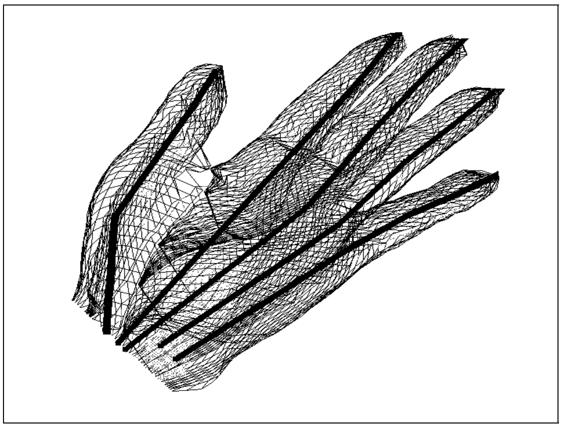

fig8. 生成した表面形状

4.2.4　出力結果

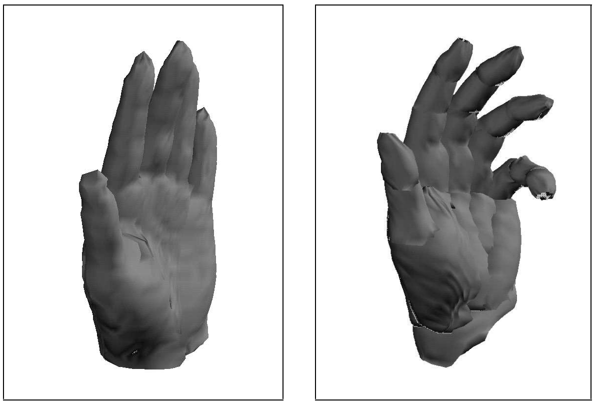

fig9. 出力結果例　　fig10. 出力結果例

生成した点列を用いて、表面形状を再構成した出力例を示す。ポリゴン数約8000、計算機は SGI Indigo2 で、逐次入力値を与え実時間で再現できた。

fig.9 は、入力のない状態、fig.10 は小指の第1,2関節のみに入力を加えた状態である。fig.10 では、小指の第3関節も自然に曲がり、他の指も特に入力値を指示していないが自然な姿勢を再現できている。

5　まとめと今後の課題

指の動き、掌部の形状を表現するために十分な自由度を有する骨格モデルを作成した。手の姿勢を表現するための状態変数は増加したが、少ない入力数で常に自然な姿勢を生成するように状態変数を決定するシステムを構築した。この際に力学的な弾性力エネルギの観点を導入することによって、自然な姿勢を実現する力の平衡状態を動的に実現する手法を提案した。

また、3次元形状計測により得られた距離データをもとに、骨格に追従して表面形状を再構成するための点列を生成し、手の3次元再構成像を実時間で生成した。

今後は、本稿で提案した骨格の動きに対して弾性を有した柔軟な皮膚モデルを、作成した表面形状の点列を用いて、構築する予定である。

参考文献

[1] Karanshar Singh, Jun Ohya, Rochrad Parent:“Human Figure Synthesis and Animation sor Virtual space Teleconferencing”,Proceefings fo Virtual Reality Annual International Symposium 1995(VRAIS’95), pp.118-126,1995.

[2] 亀田 能成, 美濃 導彦, 池田 克夫 :“シルエットを利用した手指の三次元形状推定法”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU’92),pp.239-246,1992.

[3] James J,Kuch, Thomas S.Huang :“Vision Based Hand Modeling and Tracking for Virtual Teleconferenceing and Telecollaboration”, Fifth International Conference On Computer Vision, pp.666-671,1995.

[4] Jintae Lee, Tosiyasu L.Kunii:“Constraint-Based Hand Animation”, Springer-Varlag, Models and Techniques in Computaer Animation,Tokyo, pp.110-127, Jan.1993.

[5] Kahle, Leonhardt, Platzer, 越智 淳三訳 :“解剖学アトラス第3版” 東京文光堂本郷.