自然な動きを実現するための
手の3次元モデル

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
○ 安室 喜弘, 陳 謙, 千原 國宏

Abstract: The simulation of hand motion is complicated since there are so many degrees of freedom in a hand. This report describes a new approach for modeling human hands by considering the dynamics and natural constraints of the hand motion. This approach allows to reproduce any hand shape naturally by only giving a few inputs. All parameters needed to reproduce the shape of the hand are determined from those inputs automatically. The hand model is built based on the difitaised 3d shape of a real hand.

1　はじめに

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。従来の手のモデリングの多くは関節の角度を入力し直接その姿勢形状を決定していた。本来手は筋肉の張力による平衡状態で姿勢が決定されると考えられる。そこで、本研究では仮想的なバネの弾性を用いた力学的なモデルを考え、関節の剛性と入力の特性とを独立に設定する。さらに、入力に制約を課すことにより入力数を減らし、かつ自然な手の形状を生成するシステムを提案する。

2　基礎モデル

2.1　状態変数

質量をもたない剛体リンクと回転ジョイントとで表現された剛体多体系モデルを用いて手の骨格系を近似する。関節におけるリンク間の相対角が姿勢を決定する状態変数となる。

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) とし、関節のインデックス(j)を手首側から順に1、2、3、4 (母指は1、2、3) とする。指kにおけるリンク$(j-1)$に対するリンク(j)の関節の相対角を$\theta^k_{(j)}$と表現し、システムの状態変数とする。母指の第1、2関節角及びその他の指の第2関節角はそれぞれx、z軸回りの成分をもち、これら以外の関節ではx軸回りの角度成分のみをもつものとする (Fig.1)。

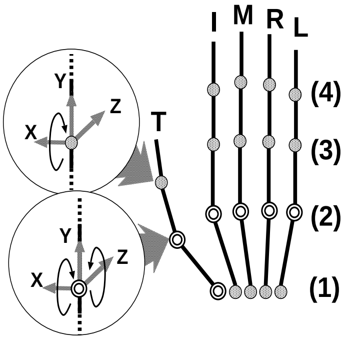

fig.1 骨格モデル

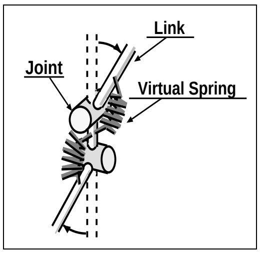

fig.2 仮想的弾性モデル

2.2　基礎入出力方程式

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.2)。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。

$$K\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

$\boldsymbol{\theta}$: 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。

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

2.3 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、(1) 式により状態変数 $\boldsymbol{\theta}$ は一意に決定する。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 ((2) 式)。

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau}_c \tag{2}$$

$\hat{\boldsymbol{\tau}}$: 指示入力ベクトル

$\boldsymbol{\tau}_c$: 内部入力ベクトル

2.3.1 内部入力の生成——エネルギ関数

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、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。

$$\boldsymbol{\Theta} = A\,\boldsymbol{\theta} \tag{3}$$

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。この $\boldsymbol{\theta}$ が 0 のとき自然な姿勢であると定義する。$\boldsymbol{\theta}$ を 0 とするような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。

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2}\,\boldsymbol{\Theta}^T W\,\boldsymbol{\Theta} && (4)\\ &= \frac{1}{2}(A\,\boldsymbol{\theta})^T W (A\,\boldsymbol{\theta}) && (5)\\ &= \frac{1}{2}\,\boldsymbol{\theta}^T A^T W A\,\boldsymbol{\theta} && (6) \end{aligned}$$

従って、各関節の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。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_c &= -\left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right) && (7)\\ &= -\left\{\left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}^T}\right) + \left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right)^T\right\} && (8)\\ &= -(A^T W A)\,\boldsymbol{\theta} && (9) \end{aligned}$$

システムの状態変数は、(10) 式のように、入出力方程式と入力方程式とを連立させ、(13) 式のような線形方程式を解くことにより計算される。

$$\left\{ \begin{array}{lcll} K\,\boldsymbol{\theta} & = & \boldsymbol{\tau} & \cdots \text{入出力方程式} \\ \boldsymbol{\tau} & = & \hat{\boldsymbol{\tau}} - \left(\dfrac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right) & \cdots \text{入力方程式} \end{array} \right. \tag{10}$$

$$\begin{aligned} K\,\boldsymbol{\theta} &= \hat{\boldsymbol{\tau}} - \left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right) && (11)\\ &= \hat{\boldsymbol{\tau}} - (A^{\mathrm{T}} W A)\,\boldsymbol{\theta} && (12)\\ (K + A^{\mathrm{T}} W A)\,\boldsymbol{\theta} &= \hat{\boldsymbol{\tau}} && (13) \end{aligned}$$

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 [2] を参考にした。

3 表面形状モデル

3.1 3 次元形状計測による表面形状表現

手の表面を表現するために手全体の表面形状をレンジファインダを用いて計測した。次に手全体の距離データを各リンクに割り当てて、骨格モデルとの対応をとることによって表面形状モデルとした (fig.3,4,5)。fig.3 は入力のない状態であり、母指と中指のみに指示入力を加えていく様子を fig.4,5 に示している。指示入力のない指の関節も自然さを保ちながら曲がっている様子が再現できている。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提示できた。


fig.3 表面形状 (1)


fig.4 表面形状 (2)

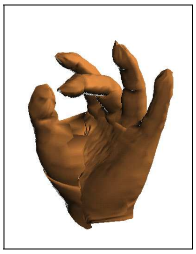
fig.5 表面形状 (3)

4 まとめ

- 手の骨格を模した仮想的な弾性モデルを作成した。
- 手の自然な形状を形成する仮想的な弾性力を導入することによって入力数の減少を図った。
- 手の表面形状をレンジファインダによる 3 次元計測データに基づいて表現した。

参考文献

[1] 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.

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