メッシュ・ネットを利用した3次元足形状計測システムの開発

長谷川辰雄[○](岩手県工業技術センター), 土井章男(岩手県立大学)

小山田耕二(京都大学), 松田浩一(岩手県立大学)

Development of foot 3D-scanner system
with mesh net

Tatsuo Hasegawa, Akio Doi, Koji Koyamada and Koichi Matsuda

ABSTRACT

This paper presents 3D representation algorithm using mesh net that is suitable for measurement of human shape: 'foot'. The stereo matching is simple method to obtain 3D measurements. But stereo matching problem is recognized as the most difficult step in computer vision. We implemented application that measures foot size with mesh net, and developed stereo matching algorithm using thinning and constrained depth first search. The foot is covered with mesh cloth such as tights and is caught by several consumer digital still cameras. Intersections of mesh are used here for the matching point of stereo images. We adopted thinning process to mesh image for searching intersections.

Keywords: Mesh net, Stereo matching, 3D scanner

1. はじめに

人体の3次元形状計測は,CG,アニメーション制作,家具や福祉機器におけるヒューマン・インターフェイスの設計・製造に重要な情報となっている。市販されている人体計測用の3次元形状スキャナー装置は,高額なレーザ装置と高速画像処理装置で構成され,一般ユーザは全体の形状を手軽に求めることが困難である。特に足の計測では,片面だけでなく全体のデータが必要となる。足全体の計測は,ターンテーブルの使用や,カメラ自体を移動する方法があるが,装置自体が大がかりになりコストがかかる。また,撮影方向ごとの片面3次元座標を手作業で張り合わせており,多大の時間を費やしている問題がある。そこで,我々は,オーダーメイド靴の製作のために,足全体を効率的に計測可能な簡易型の3次元足形状計測システムを開発した。このシステムは,メッシュ・ネットに覆った足を8台のデジタルカメラで撮影し,ステレオ計測によって3次元座標を計算する。メッシュ・ネットは画像処理上で明確な情報として捉えることが可能であり,ステレオマッチングで問題となる対応点の誤認識に対して,ロバストなマッチングを可能としている。メッシュ・ネットには配列計算に必要なマークが付与されており,自動でステレオマッチングを行う特徴がある。

2. 処理アルゴリズム

2.1 メッシュ交差点抽出処理

ステレオマッチングはメッシュ・ネットの交差点を対応点とする。交差点の抽出処理の流れをFig.1に示す。デジタルカメラで撮影した8方向の画像に対し,2値化,細線化,メッシュフィルタの順番に処理を行う。

Fig.1 The Image Process flow

2値化処理は,画像の前処理として,ノイズ除去や領域抽出の手法として一般的に用いられる手法である。ここでは,RGBの閾値により2値化を行った。閾値の決定は式(1)により行われる。

$$f(i,j) = \begin{cases} 1 & f(i,j) \geq t \\ 2 & a \leq f(i,j) \leq b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで t はメッシュの画素値を意味する RGB 値を示し,範囲 $[a,b]$ はマークを抽出するための RGB 値を示す。細線化¹⁾は,2値化により抽出されたメッシュ・ネット

部分の画像に対し、線幅が1画素で連結された線画を計算する。この線画は、メッシュ・ネットの骨格画像を意味しており、交差点の座標抽出とそのマッチングの順番を決定するための貴重な情報となる。このアルゴリズムでは、マッチング点を自動的に対応させるため、2次元配列に格納する。格子構造のメッシュ・ネットを前提としているため、2次元の配列化は容易である。これには、メッシュ・ネットの交差点を順番に追跡し、その座標点を特定する必要がある。式(2)に追跡・特定を行うためのメッシュ・フィルタを設計した。

$$g(x,y) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \delta(x+m, y+n) \quad (2)$$

関数 $\delta(x,y)$ は、8近傍に存在する画素数を出力する。このフィルタ処理によって、細線化画像に重み付けを行ったことになる。つまり、フィルタ処理された画像は、この重み情報によってメッシュ交差点を特定することが可能となる。Fig.2にフィルタ処理の結果を示す。Fig2(a)の細線化画像に対して、フィルタ処理を行うとFig2(b)のような画像となる。この画像によって、Table 1に示すように、メッシュ・ネットの種別の特定が可能となる。

(a) Thinning Image (b) Filtered Image
Fig.2 Filter Process

Table 1 Segment type of Filtered Image

種別	フィルタ値
終点	$g(x,y)=1$
線分	$g(x,y)=2$
交差点	$g(x,y)=3$

2.2 2次元配列の構築

ステレオ計測では、左右の対応点を自動的に一致させる必要がある。このために、交差点座標を構造化した2次元配列としてデータ設計を行った。交差点のデータは、上下左右のリンク情報、幹線・支線情報、メッシュ種別などの構造データとして構築した。設計した2次元配列を有向グラフで記述したものがFig.3である。有向グラフは、左右の交差点を順番に一致させるために使用する。

Fig.3の矢印は追跡を行う方向を示しており、頂点を V 、辺(エッジ)を e とすると、有効グラフは式(3)及び式(4)で定義できる。

$$V' = \{V_{00}, V_{01}, \dots, V_{mn} \mid V_{ij} \in V (i=0, \dots, m, j=0, \dots, n)\} \quad (3)$$

$$E' = \{e_1, e_2, \dots, e_k \mid e_i \in E (i=1, \dots, k)\} \quad (4)$$

Fig.3の二重丸はマーカを意味しており、この点を基準に、最初に幹線上の交差点の追跡を行い、次に支線上の交差点の追跡を行う。この追跡には、8連結のチェーン・コード追跡法を用い、追跡と同時に、交差点の判別を行い2次元配列へ格納する。

Fig.3 Directed graph description

2.3 射影行列による3次元座標計算

3次元座標計算に必要となるカメラの数値モデルをピンホールカメラで定義²⁾した。このモデルはデジタルカメラに使用されているCCDを正確に記述している。3次元空間の点が、射影行列 P によって、ピンホールカメラの投影平面上の点へ投影された場合、3次元空間の点を $\tilde{M}=[X,Y,Z]^T$ 、投影面上の点を $\tilde{m}=[u,v]^T$ とすると、式(5)で記述できる。

$$\tilde{m} = P\tilde{M} \quad (5)$$

射影行列 P は、ランク3の 3×4 行列で式(6)で表される。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1^T & p_{14} \\ p_2^T & p_{24} \\ p_3^T & p_{34} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 P_{34} は物体の拡大・縮小を示すスケールファクターであり、ここでは等倍の1で計算を行った。射影行列は左右2つの画像で存在するため、式(6)を整理すると式(7)で記述できる。

$$\begin{cases} p_1^T M_i - u_i p_3^T M_i + p_{14} - u_i p_{34} = 0 \\ p_2^T M_i - v_i p_3^T M_i + p_{24} - v_i p_{34} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

射影行列 P の自由度は 11 であるから、もし、 n 個の 3 次元点が同じ平面上になければ、 B のランクは 11 である。このような点が 6 箇所あれば、 $6 \times 2 = 12 > 11$ となり、十分な拘束が得られて P を求めることができる。この 6 箇所は、大きさが既知の物体を撮影するキャリブレーション³⁾で決定される。式 (7) を整理して式 (8) で表す。

$$Bp = 0 \quad (8)$$

B 及び p は、それぞれ式 (9)、式 (10) で表される。

$$p = [p_1^T, p_{14}, p_2^T, p_{24}, p_3^T, p_{34}]^T \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & -v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_n X_n & -v_n Y_n & -v_n Z_n & -v_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式 (8) から、射影行列 P は $B^T B$ の最小の固有値に対応する固有値ベクトル⁴⁾として求めることができる。射影行列 P が求まると、ステレオ画像計測における左右 2 つの画像の対応点をそれぞれ $(u, v), (u', v')$ とすると、3 次元空間の点 (X, Y, Z) の射影関係式は式 (11) で記述できる。

$$\begin{bmatrix} p_{31}u - p_{11} & p_{32}u - p_{12} & p_{33}u - p_{13} \\ p_{31}v - p_{21} & p_{32}v - p_{22} & p_{33}v - p_{23} \\ p_{31}u' - p_{11} & p_{32}u' - p_{12} & p_{33}u' - p_{13} \\ p_{31}v' - p_{21} & p_{32}v' - p_{22} & p_{33}v' - p_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - p_{34}u \\ p_{24} - p_{34}v \\ p_{14} - p_{34}u' \\ p_{24} - p_{34}v' \end{bmatrix} \quad (11)$$

$b = [p_{14} - u p_{34}, p_{24} - v p_{34}, p_{14} - u' p_{34}, p_{24} - v' p_{34}]$ とおくと、3 次元空間点 $\tilde{M}$ は、式 (12) のように求めることができる。ここで、 B^+ は一般化逆行列である。

$$\tilde{M} = B^+ b \quad (12)$$

3. 実験結果

3.1 システム構成

本システムのデジタルカメラは、低価格性、高解像度、コンパクト性、PC プログラム制御などを検討し、Cannon 社製の IXY 200 を採用した。このカメラは、USB HUB を経由して PC に接続され、PC からのプログラム命令で順番に 8 方向の撮影を行う。これらのカメラは、パン・チルトが可能な雲台と、三脚によって固定され、任意の方向から撮影が可能である。また、足裏の撮影は、

地面に水平に鏡を置いて撮影した。8 方向のうち、2 方向の実験画像を Fig. 4 に示す。実験対象物の足型は石膏で作成し、網タイツを被せて、透明のアクリル板の上に配置した。このアクリル板は、足裏と足表が、1 枚の画像中で明確に分離して撮影できるように、70mm の高さに設定した。また、メッシュ交差点を順番に自動追跡するために、追跡開始点を示す赤色の円形マーカを数カ所に添付している。

(a) Angle1 (b) Angle2
Fig. 4 Samples of Input image

3.2 画像処理

実験によって撮影された 8 枚の画像は、Fig.1 に示した順番で処理が行われる。画像処理のプログラムは、Visual C++ v6.0 で作成し、Pentium III 1GHz, Windows2000 上で実験を行った。Fig.5 に実験結果を示す。Fig.5 (a) は入力画像、Fig.5 (b) は背景除去と 2 値化によりメッシュ・ネット画像を抽出した結果である。Fig.5 (c) は、細線化、メッシュフィルタ処理及び交差点抽出アルゴリズムを適用して、交差点を抽出した結果である。

Fig. 5 Result of Intersection Extraction

上記の処理によって、8 枚の画像に対して交差点を抽出し、3 次元座標計算を行った。これを 3 次元 CG によ

るポリゴンシェーディング表示した結果を Fig. 6 に示す。使用したメッシュ・ネットは格子構造であるため、4 角形ポリゴンで直接ポリゴン化ができる。表示用に開発した 3 次元表示ソフトウェアは OpenGL で構築し、市販 CAD である LightWave3D 用のデータを出力することが可能である。3 次元計測の精度は、ノギス及び市販の 3 次元計測器を使って計測した結果と、本手法で計算した結果とを比較して精度を求めた。10 箇所測定地点で直線の空間距離を計測し、比較を行った。その結果、最小値：0.02mm、最大値：1.7mm、平均：0.76mm の結果を得た。この精度は、オーダーメイド靴作成に十分である。

Fig. 6 Reconstruction of whole of the foot

3. おわりに

足計測における一般的考慮点は、可能な限り瞬間的に撮影しなければならない点である。人は数秒間でさえ、静止することが難しく、画像にブレを生じる場合があり、計測精度に大きく影響する。しかし、PC プログラムによる 8 台のカメラシャッター制御は、同時シャッターが不可能な仕様であるため、カメラを切り替えながらシャッター制御を行った。1 台当たり 1～2 秒程度の切り替え時間を要するため、8 台すべての撮影には約 16 秒程度と長時間となっている。しかし、最近では、同期信号に対応した工業用カメラが高解像度化されているため、これを用いることで改善できる。また、日本の靴は、その大きさが JIS で規格化されており、足の長さを表す足長と、足の横幅の周囲長を表す足囲で決められている。オーダーメイド靴作成のための測定箇所においても、足囲長は、個人に適合した靴を作成する上で重要な情報となっている。足の寸法計測⁵⁾の箇所を示した図を Fig. 7 に示す。足囲は、靴職人によって測定されているのに対し、本システムでは、マッチングの基準点になるマーカを、あらかじめ足囲上に 2 箇所配置して、足囲を求めるために必要な足囲面を抽出した。これを Fig. 8 に示す。

足囲面は、2 点のマーカ間の最短距離にある計測点を結んで作成した。計測点の解像度は、メッシュ格子の大きさで示すことができ、5～10mm である。足囲の計算は、各計測点間の距離の和によって求められるが、この解像度では、正確な足囲は計算できない。この問題については、今回抽出した足囲面の情報から、足囲長の近似曲線を計算し精度を評価する予定である。

Fig. 7 Measurement of the foot

Fig. 8 The Surface of Foot circumference

参考文献

- 1) 鈴木 智：細線化アルゴリズムの高速化に関する考察，情報処理学会論文誌，Vol. 29, No.10(1988)，pp. 925-932.
- 2) J. Aloimonos: Perspective approximations. Image and Vision Computing, No.8(1990)，pp.177-192.
- 3) R.Y. Tsai: An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami(1986)，pp.364-374.
- 4) 徐 剛，辻三郎：3 次元ビジョン，共立出版，1998，pp.79-82.
- 5) 持丸正明，河内まき子：足のサイズの測定法，産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ，<http://www.dh.aist.go.jp/NIBH/NIBH/ourpages/foot/j-footdim.html>.