

## ポアソン方程式を用いた下半身測定点群からの形状再構築

平岡忠志\*

### 抄 録

人体下半身の3次元測定点群から採寸情報（周囲長，丈）と体積を計算するために，ポアソン方程式を用いて測定点群から形状を再構築した．これは，重み付き最小二乗法により測定点群の各点の接平面を推定し，リーマングラフの最小全域木問題を解くことにより一貫した方向付き点群を決定し，ポアソン方程式を用いて方向付き点群から指示関数を算出し，改良されたマーチンキューブ法により等値面を抽出するものである．この手法を用いて，平成19年度に検討した一般モデルを測定点群に適合させる方法から得た三角形メッシュと比較して，より測定点群に適合した三角形メッシュを再構築できた．

### 1 はじめに

現在，リンパ浮腫患者用のオーダーメイド弾性ストッキングは，大部分を輸入品に頼っているため，高価で入手するまでに時間がかかる．また，採寸にメジャーを使うので精度が低く，着圧も経験と勘に頼っている．そこで，リンパ浮腫患者に安価で性能の良いオーダーメイド弾性ストッキングを迅速に提供するための製造支援システムを開発する．このシステムでは，光切断法により測定点群を取得し，採寸情報（周囲長，丈）を算出し，その結果と多層弾性分布計測装置により測定された皮膚の硬さからストッキングの網目数を算出する．また，医師が治療経過を評価するために，浮腫部分の体積を算出する．

平成19年度に，測定点群から採寸情報と体積を計算する方法について検討した<sup>1)</sup>．(有) デジタルヒューマンテクノロジーのHBMソフトを用いて，一般モデルとして用意した三角形メッシュを測定点群に適合することで測定点群を近似する三角形メッシュを構築し，採寸情報と体積を位相構造により算出した．しかし，三角形メッシュが測定点群へ適合できない部分（足先や踵）があった．これは，特徴点を用いなかったことに原因がある．しかし，非接触人体形状測定装置<sup>2)</sup>は特徴点を取得できない．一方，方向付き点群から形状再構築する問題を，ポアソン方程式で定式化して解く方法がある<sup>3)</sup>．この方法は特徴点を必要としない．また，測定ノイズに対して頑健であり，点群に滑らかに適合し，メモリ使用量が少なく，計算時間も短いことが，様々な測定点群

で実証された．そこで，一般モデルとして用意した三角形メッシュを測定点群に適合する方法をやめて，ポアソン方程式を用いて測定点群を近似する三角形メッシュを構築する．

### 2 方法

ポアソン方程式を用いた形状再構築法は，入力を方向付き点群とし，出力を三角形メッシュとする方法である．非接触人体形状測定装置から得られる情報は点群のみであるので，点群から方向付き点群を推定しなければならない．そこで，まず，測定点群の各点の接平面を推定する．次に，接平面の一貫した向きを決定する．最後に，方向付き点群にポアソン方程式を用いた形状再構築法を適用し，指示関数を算出し，等値面を抽出する（図1）．

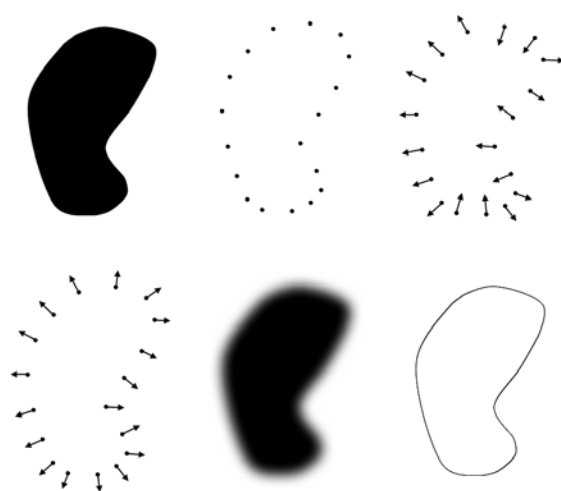


図1 左上から，現物，点群，接平面，方向付き点群，指示関数，等値面（三角形メッシュ）

## 2・1 接平面の推定方法

点群の各点について接平面を推定する．推定対象の点を  $p_j \in R^3, j=1,2,\dots,N$  とし，その単位法線ベクトルを  $n_j \in R^3$  とする．点数は  $N$  である．以下，点  $p_j$  の法線  $n_j$  を求めることを考える．接平面は点  $p_j$  を通り，法線  $n_j$  と直交する．未知数は法線  $n_j$  の  $x, y, z$  座標値の 3 つである．点  $p_j$  周辺の点  $p_i, i=1,2,\dots,N$  を考慮し，接平面と点  $p_i$  の距離の二乗に重みを乗じた和を最小にするように， $n_j$  を推定する<sup>4)</sup>：

$$n_j = \arg \min_{n_j} \sum_{i=1}^N \langle n_j, p_i - p_j \rangle^2 \theta(\|p_i - p_j\|), \quad (1)$$

$$\theta(d) = 2(d/h)^3 - 3(d/h)^2 + 1.$$

ここで， $h$  はサポート半径であり，実験では 10 から 40mm の値を用いた．また， $\theta$  は重みで，ガウス分布に似た多項式を用いる．

ここで，共分散行列  $B^j = (b^j_{k,l})$ ， $B^j \in R^{3 \times 3}$  を

$$b^j_{k,l} = \sum_{i=1}^N (p_{i,k} - p_{j,k})(p_{i,l} - p_{j,l}) \theta(\|p_i - p_j\|)$$

とする．このとき， $k=l=1$  のときは  $x$  座標値を表し， $k=l=2$  のときは  $y$  座標値を表し， $k=l=3$  のときは  $z$  座標値を表す．すると，式(1)は

$$n_j = \arg \min_{n_j} n_j^T B^j n_j$$

となる．よって， $B^j$  の最小固有値に対応する固有ベクトルが求める単位法線ベクトル  $n_j$  である．

## 2・2 一貫した向き決定方法

先ほど求めた法線  $n$  の向きは定まっていない．法線  $n$  をモデルの表の向きとできるだけ同方向にそろえたい．以下のように，Hoppe らはこの問題をうまく解決している<sup>5)</sup>．

最初に，リーマングラフを構築する．もし， $p_i$  が  $p_j$  の  $k$  近傍であるか， $p_j$  が  $p_i$  の  $k$  近傍であればエッジ  $(i, j)$  を追加する．実験では， $k=10$  とした．次に，各エッジにコストを割り当てる．コストは  $1 - \langle n_i, n_j \rangle$  とする．そして，向き決定のための伝達順序を決定する．これは，最小全域木問題を解くことで達成できる．最後に， $z$  値が最小である点に

対応する  $n$  を  $-z$  に向け，その点を起点として，伝達順序の通りに  $n_j$  の向きを決定していく．もし， $\langle n_i, n_j \rangle < 0$  であれば， $n_j$  は  $-n_j$  に置き換える．それ以外なら，そのままである．

## 2・3 ポアソン方程式を用いた形状再構築方法

方向付き点群から等値面（三角形メッシュ）を抽出する．問題は，方向付き点群から計算できるベクトル場  $\vec{V}$  から指示関数  $\chi$  の勾配  $\nabla \chi$  のよい近似を検出することである： $\min \|\nabla \chi - \vec{V}\|$ ．Kazhdan らは，この問題をポアソン方程式として定式化した<sup>3)</sup>：

$\Delta \chi \equiv \nabla \cdot \nabla \chi = \nabla \cdot \vec{V}$ ．より詳細には，

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \chi}{\partial z^2} = \frac{\partial \vec{V} \cdot x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{V} \cdot y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{V} \cdot z}{\partial z}.$$

ここで， $\vec{V} = (\vec{V} \cdot x, \vec{V} \cdot y, \vec{V} \cdot z)^T$  である．ガウス・ザイデル法で指示関数  $\chi$  を求める．指示関数  $\chi$  に適当な閾値を適用し，改良されたマーチンキューブ法により等値面を抽出する．ここで，指示関数  $\chi$  は物体内部で 1，外部で 0 と定義される．その微分は境界で無限の値を持つてしまうので，実装には平滑フィルタを用いる．

本報では，Kazhdan らにより実装された Poisson Surface Reconstruction (Version 2) ソフトを利用する<sup>6)</sup>．パラメータは全てデフォルト値を用いる．

## 3 実験結果

抽出された三角形メッシュがどの程度測定点群を近似しているかを調べた．まず，リンパ浮腫患者 (A, B, C の 3 人) を非接触人体形状測定装置で測定して得られた点群に対して，ポアソン方程式を用いた形状再構築法を適用する．同様に，HBM を用いた形状再構築法を適用する．ここで，患者 A, B, C の測定点の数は，それぞれ 33653, 35225, 29634 である．2つの方法から算出された三角形メッシュを 3次元表示することで，三角形メッシュがどの程度測定点群を近似しているかを比較する．また，足を輪切りにすることで，2次元の断面線を比較する．

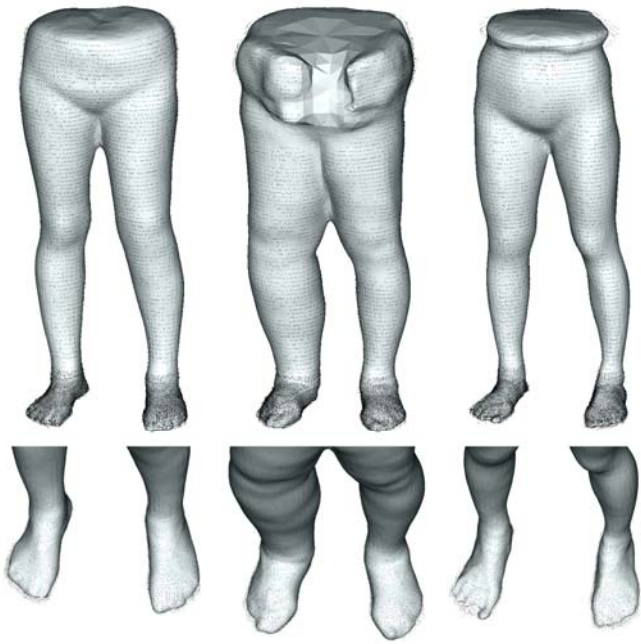


図2 ポアソン方程式を用いた再構築モデル

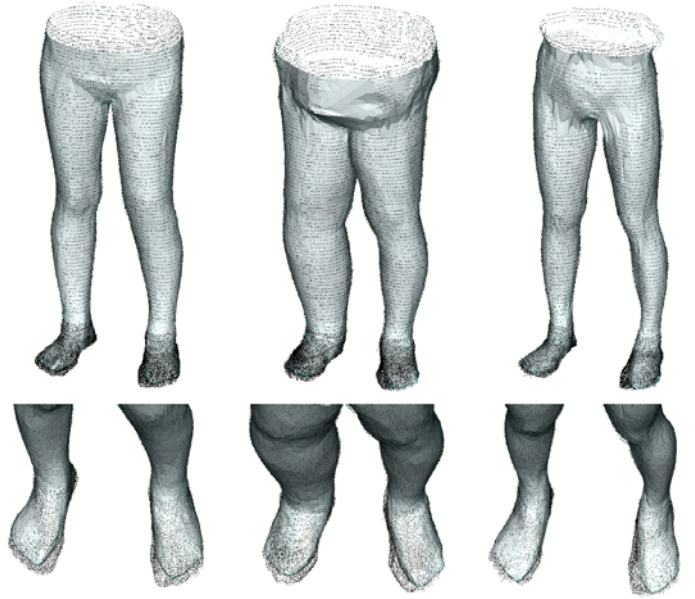


図3 HBMを用いた再構築モデル

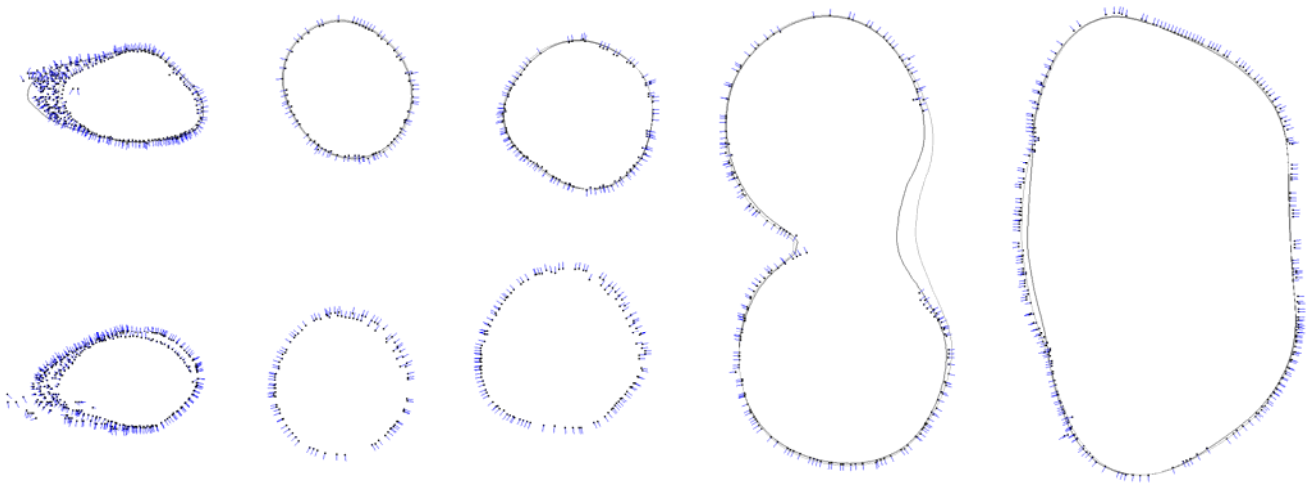


図4 ポアソン方程式を用いた再構築モデルとXY平面との断面

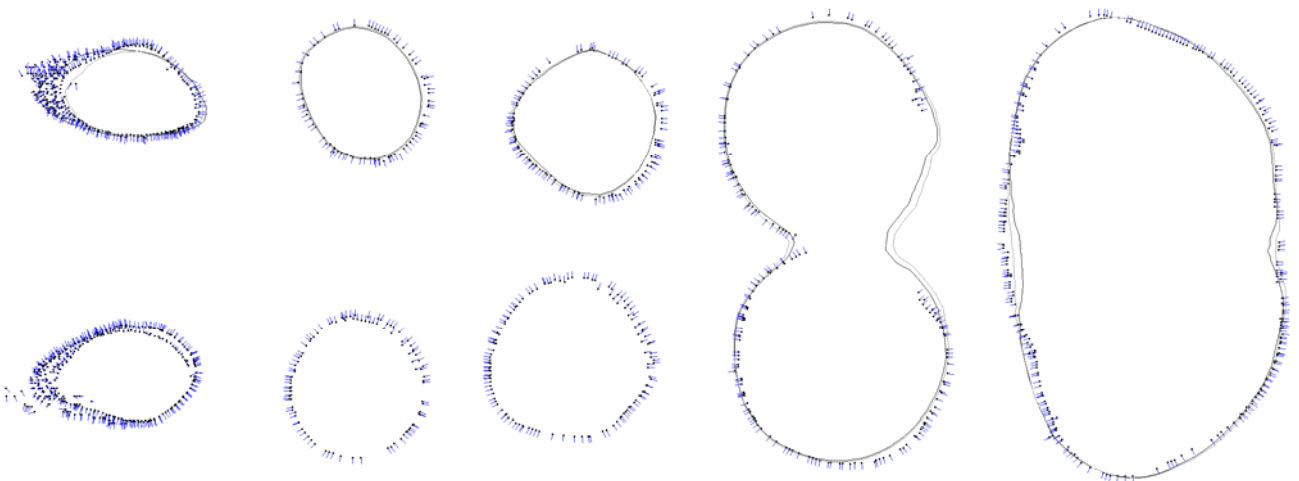


図5 HBMを用いた再構築モデルとXY平面との断面

図2は、測定点群を基にポアソン方程式により再構築された三角形メッシュで、左から患者A, B, Cである。上段は全体であり、下段は足先である。また、図3は、HBMにより再構築された三角形メッシュで、左から患者A, B, Cである。上段は全体であり、下段は足先である。HBMによる方法と比較して、ポアソン方程式による方法は、特につま先辺りにおいて、測定点群と三角形メッシュがうまく適合している。また、見た目に表面の滑らかさもポアソン方程式による方法がよい。しかし、3人の股の間や患者Bの下腹のように、点群が欠落した領域を期待通りに埋めてくれなかった。実際、股の間は分かれているし、下腹にそのような穴はない。

図4は、患者Aの測定点群をポアソン方程式により再構築した三角形メッシュ、Z1とZ2の2つのXY平面との断面である。Z1との断面線は黒で、Z2との断面線は灰色で示す。加えて、 $Z1 \leq z < Z2$ の空間内の点とその法線ベクトルも示す。点は黒丸で、法線ベクトルはその点から伸びる灰色の直線で示す。図4には、5つの断面図があり、Z1とZ2の値は左から、50と60, 250と260, 450と460, 650と660, 750と760mmである。ここで、座標軸について説明する。Z軸は床に垂直に立っており、向きは足首から腰に向いており、原点は床表面である。今回、X軸・Y軸については関係ないので説明しない。左から3つめまでの断面図は右足と左足が分かれている。断面線は右足のみ描いている。ここで、上側は右足であり、下側は左足である。図5は、患者Aの測定点群をHBMにより再構築した三角形メッシュ、Z1とZ2の2つのXY平面との断面である。その他は図4と同様である。図4と図5の測定点群と断面線の適合度を比較すると、ポアソン方程式による再構築モデルの方が良いことがわかる。また、滑らかさもポアソン方程式による方法がよいことがわかる。

最後に計算時間について比較する。患者Aの測定点群を用いた。接平面推定の計算時間は13秒、向き

決定の計算時間は7秒、ポアソン方程式による形状再構築の計算時間は7秒、合計28秒であった。一方、HBMによる形状再構築の計算時間は65秒であった。実験に用いた計算機はXeon3.2GHzのPCである。

#### 4 まとめ

人体下半身の3次元測定点群から採寸情報（周囲長、丈）と体積を計算するために、ポアソン方程式を用いて測定点群から形状を再構築した。この手法を用いて、平成19年度に検討した一般モデルを測定点群に適合させる方法（HBMを利用する方法）から得た三角形メッシュと比較して、より測定点群に適合した三角形メッシュを再構築できた。

今後、股の間の測定点群欠落領域を埋めるため、その補間方法を検討していく。

#### 参考文献

- 1) 平岡忠志:「測定点群を基にした採寸ソフトの開発」, 徳島県立工業技術センター研究報告, Vol.17, pp13-19(2008)
- 2) 香川敏昌, 細束正一, 松浦良彦, 大恵俊一郎, 小川洋司:「非接触人体形状計測装置の開発」, 徳島県立工業技術センター研究報告, Vol.17, pp7-12(2008)
- 3) Michael Kazhdan, Matthew Bolitho and Hugues Hoppe, "Poisson Surface Reconstruction", Eurographics Symposium on Geometry Processing, pp61-70(2006)
- 4) Marc Alexa, Johannes Behr, Daniel Cohen-Or, Shachar Fleishman, David Levin and Claudio T. Silva, "Point Set Surfaces", IEEE Visualization, pp21-28(2001)
- 5) Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchampy, John McDonaldz, Werner Stuetzlez, "Surface reconstruction from unorganized points", ACM SIGGRAPH, pp71-78, (1992)
- 6) Poisson Surface Reconstruction (Version 2)  
<http://www.cs.jhu.edu/~misha/Code/PoissonRecon/>