

# メッシュのスペクトル分解と Functional Mapping を用いた 3次元形状の非剛体マッチングの性能評価

北海道大学大学院情報科学研究科 ○山岡茉莉, 金井理, 伊達宏昭

## 要 旨

人体等の運動物体の3D スキャンでは、スキャンの最中に対象物が動作するため、複数スキャンデータ統合時に非剛体マッチングを用いたデータのレジストレーションが必要となる。本研究では、既に提案されているメッシュのスペクトル分解と Functional Mapping を用いた3次元形状間の非剛体マッチング手法におけるマッチング性能を、分解スペクトル数や初期対応付け方法への依存性の観点から実験的に評価した。

## 1. はじめに

近年、様々な物体計測に非接触 3D スキャンが活用されている。人体等のスキャンでは、スキャン中に対象物自身の変形することも多く、異なるスキャンデータを統合するには計測メッシュ間の非剛体レジストレーションが必要となる。図1に示すように、非剛体レジストレーションでは、ソースとターゲット計測メッシュ間の対応関係の発見(非剛体マッチング)と、その対応付け誤差を最小化する空間変形の発見が必要である。

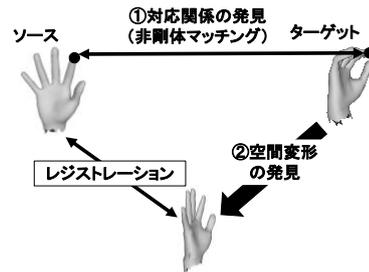


図1: 非剛体レジストレーション

非剛体マッチングの1手法として、Litanyらによるメッシュのスペクトル分解と Functional Mapping に基づく手法<sup>[1]</sup>が提案されている。この手法はスペクトル成分数の制御により対応関係の発見が効率的に行え、かつ多少部分的欠損が存在しても頑強に対応関係を発見できるという利点を持つ。しかし、マッチングの初期対応付け方法や分解スペクトル成分数に依存したマッチング性能評価が十分になされていない。

そこで、本研究では処理が図2で示される先行研究<sup>[1]</sup>において、マッチングの初期対応付け方法や分解スペクトル成分数の違いによるマッチング精度の違いを定量的に評価する。

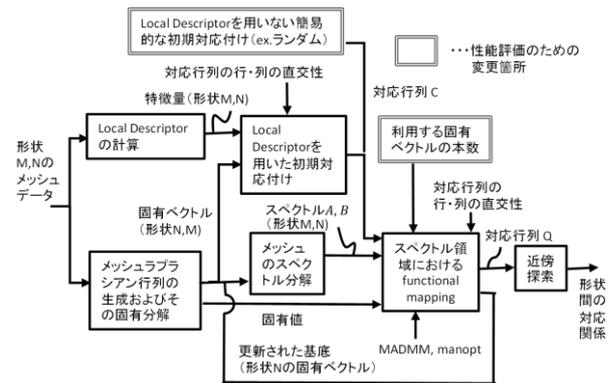


図2: 既存研究の手法

## 2. スペクトル分解と Functional Mapping を用いた非剛体マッチング手法<sup>[1]</sup>

### 2.1 Functional Mapping の概念

2つの多様体  $M, N$  上での妥当な対応点間の写像  $T$  の発見は自由度が高く直接的には求められない。そこで、図3に示すように、多様体上で定義される実関数  $f, g$  間の写像  $T_F$  を発見する問題に変更する<sup>[2]</sup>。そして、実関数  $f, g$  を係数  $\{p_i\}, \{q_j\}$  を用い各多様体上の基底関数  $\{\phi_i^M\}, \{\psi_j^N\}$  の線形和として表すと、写像  $T_F$  の発見は基底関数  $\{\phi_i^M\}, \{\psi_j^N\}$  間の線形変換  $C$  の発見に帰着できる。ただし基底関数は直交基底であることが望ましい。

### 2.2 メッシュラプラシアン行列の生成と固有分解

多様体  $M, N$  が三角形メッシュで表される場合、微分演算子であるラプラシアンをメッシュ上で離散化したメッシュラプラシアン行列  $L$  の固有分解<sup>[3]</sup>により直交基底を作成し、これを Functional Mapping において連続性と直交性を持つ基底関数として利用する。

### 2.3 メッシュのスペクトル変換

メッシュの各頂点  $i \in [1, n]$  上で定義される  $m$ 次元のベクトル関数  $f$  の値を成分を持つベクトル  $F(n \times m)$  を考え、 $F$  をメッシュラプラシアン行列  $L$  から得られる各固有ベクトル  $\Phi_i(n \times 1)$  に射影してメッシュのスペクトルを算出する。このとき、使用する固有ベクトルの本数を固有値の小さい方から  $k$ 個に限定し、最終的に  $k$ 個のスペクトルからなる行列  $A(k \times m)$  でメッシュを近似する。図4はこの成分数  $k$  の変化に伴う形状の変化を表している。

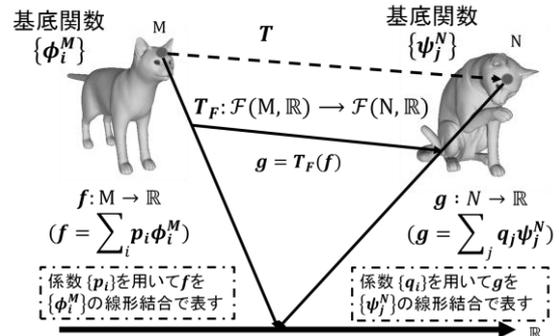


図3: Functional Mapping の概念

### 2.4 最適化による Functional Mapping の導出

Functional Mapping では、2.1の線形変換である対応行列  $C(k \times k)$  を以下の式(1)を用いて導出する。

$$\min_C \left\{ \text{off}(C^T A_N C) + \mu \|A - C^T B\|_F^2 \right\} \quad (1)$$

s. t.  $C^T C = I$

ここで,

$$\|X\|_F^2 = \text{tr}(XX^T) = \text{tr}(X^T X), \text{off}(X) = \sum_{i \neq j} x_{ij}^2$$

$\Lambda_{N(k \times k)}$ : ターゲットメッシュの行列  $L$  の固有値  $k$  個を対角成分に持つ対角行列

$\mu$ : ユーザー指定の正の実数値

$A_{(k \times m)}, B_{(k \times m)}$ : 対応付けを行うメッシュ  $M, N$  のスペクトルである.

この最適化の解は MATLAB での多様体上の最適化ソルバーである `manopt` を用いて求めた.

### 3. 非剛体マッチングの性能評価

#### 3.1 実験に用いたメッシュモデル

非剛体マッチングのベンチマークである TOSCA データセット (3D Deformable Partial Shape Matching)<sup>[4]</sup> を評価実験に用いた. このデータセットは 8 種類の物体とそれらの複数の変形メッシュで構成されており, 変形前後の対応頂点対の Ground Truth も含まれている. この中から 7 種類の物体を実験に用いた.

#### 3.2 評価方法

本実験では, スペクトル成分数  $k$  の変更, また式(1)の最小化において対応行列  $C$  の初期値を ① SHOT 特徴量<sup>[5]</sup> により設定した場合, ② ランダムな数値を成分に設定した場合, の 2 つを比較した.

マッチングの良否は, 以下の式(2)に示される対応付け誤差  $\varepsilon(y)$  と指定された値以下の誤差で対応している頂点数の割合を示す対応率を用いて定量的に評価する.

$$\varepsilon(y) = \frac{\text{dist}(y, y^*)}{|S_N|^{1/2}} \quad (2)$$

$y$ : 対応行列  $C$  から求められたソースメッシュ上の頂点  $x$  に対するターゲットメッシュ  $N$  上の頂点

$y^*$ : 頂点  $x$  に対する  $N$  上の対応点の Ground Truth

$|S_N|$ : ターゲットメッシュ  $N$  の表面積

#### 3.3 評価結果

図 5 のように, 成分数  $k = 10 \sim 100$  の範囲では対応率の著しい変化は見られず, 対応付け誤差が 0.5 以下のものが約 7 割程度であることが分かる. また図 6 より, 条件①によるマッチングの方が, 条件②よりもわずかに優れているがその差は小さいことが分かる. また, 図 7 に示したように, 式(2)においてソース形状とターゲット形状が同一の場合の平均逆変換誤差と非剛体マッチング時の対応付け誤差には正の相関が見られた.

### 4. おわりに

メッシュのスペクトル分解と Functional Mapping を用いた形状マッチングの性能評価を行った. 対応行列  $C$  の初期値として SHOT 特徴量を用いる方が良く, またマッチング精度はスペクトル成分数にあまり影響を受けないことが分かった. 今後としては, 部分形状間の対応関係の導出, SHOT 特徴量以外を用いた初期対応付け等が課題である.

#### 参考文献

- [1] O.Litany et al. : Fully Spectral Partial Shape Matching. : Computer Graphics Forum : 36(2) : pp.247-258 : (2017).
- [2] Marks Ovsjanikov et al. : Functional Maps: A Flexible Representation of Maps Between Shapes. : ACM Trans. Graph : pp.30:1-30:11. (2012).
- [3] M. Belkin et al. : Discrete Laplace operator on meshed surfaces : In Symposium on Computational Geometry : pp.278-287 : (2008).
- [4] A. M. Bronstein et al. : *Numerical Geometry of Non-Rigid Shapes* : Springer : (2008).
- [5] Federico Tombari et al. : Unique signature of histograms for local surface description : ECCV : pp.356-369 : (2010).

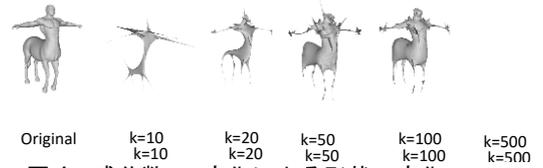


図 4 : 成分数  $k$  の変化による形状の変化

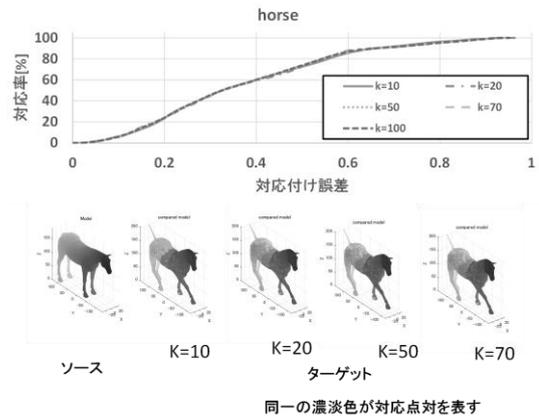


図 5 : スペクトルの成分変化による性能評価

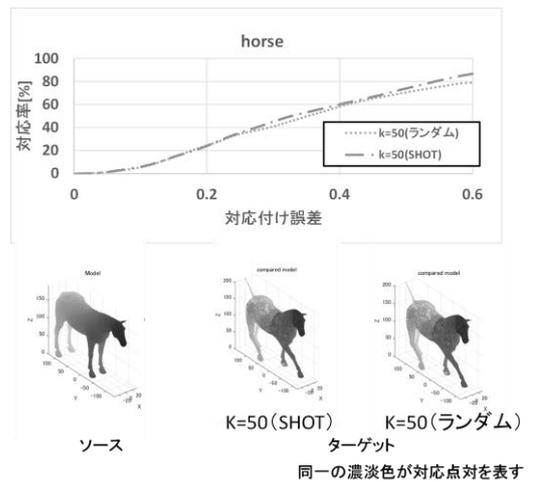


図 6 : 初期対応付けの変更 (ランダム)

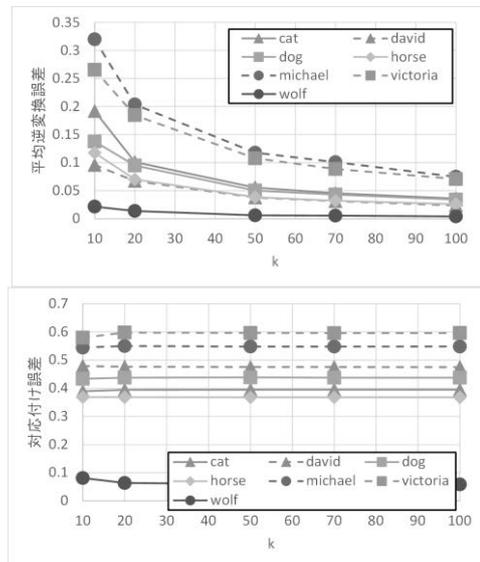


図 7 : 平均逆変換誤差と対応付け誤差の関係