

Functional Mapping を用いた 3 次元形状間の非剛体マッチングの研究 - 完全形状と部分形状間の非剛体マッチング -

北海道大学 〇山岡茉莉, 金井理, 伊達宏昭

要 旨

計測中に運動する物体の 3D スキャン等では、複数スキャンデータ統合時に非剛体マッチングが必要となる。本報では、既提案であるメッシュのスペクトル分解と Functional Mapping を用いた 3 次元形状間非剛体マッチングにより、欠損を持たない完全形状と、完全形状から変形した部分形状との間の非剛体マッチングを試み、そのマッチング性能を評価した。

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。この非剛体レジストレーションでは、図 1 のように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。

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^[1]が提案されている。この手法は少数のスペクトル成分により対応関係の発見が効率的に行え、かつ部分的欠損が存在しても頑健に対応点を発見できる利点を持つが、レジストレーションは実現していない。

そこで本研究では、スペクトル分解と Functional Mapping を用いて、図 1 に示す非剛体マッチングと非剛体レジストレーションの実現を目的とする。前報^[2]で変形関係にある完全形状間の非剛体マッチングを行い、手モデルでは変形関係にあるモデル間で精度良くマッチングが行えることが分かった。本報告では先行研究^[1]の Functional Mapping の局在化を用いた非剛体マッチングにより、完全形状と、変形した部分形状との間の非剛体マッチングを試み、そのマッチング性能を評価したので報告する。

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^[1]

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、Functional Mapping では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^[3]。そして、実関数 f, g を、係数集合 $\{p_i\}, \{q_j\}$ 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 の発見は線形和の係数（スペクトル）間の線形変換 C の発見に帰着できる。ただしこれらの基底関数は直交基底であることが望ましく、本研究では 3 角形メッシュの面積を考慮したメッシュラプリアン行列 L の固有分解で作成した直交基底を基底関数 $\{\phi_i^M\}, \{\psi_j^N\}$ として利用する。

2.2 メッシュのスペクトル分解

図 2 に Functional Mapping を用いた非剛体マッチングの処理の概要を示す。多様体を離散表現したメッシュ上の各頂点 $i \in [1, m]$ 上で定義される q 次元のベクトル f_i の値を成分 i に持つベクトル $F_{(m \times q)}$ を考え、 F をメッシュラプリアン行列 $L_{(m \times m)}$ を固有分解して得られる各固有ベクトル $\phi_j^{(m \times 1)}$ に射影しスペクトル $a_j^{(1 \times q)}$ を算出する。ここで、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、行列 $A_{(k \times q)} = [a_1^T, a_2^T, \dots, a_k^T]^T$ でメッシュを近似する。

2.3 Functional Map の局在化

図 3 に示すように、部分形状 M の各固有ベクトル $\phi_j^{(m \times 1)}$

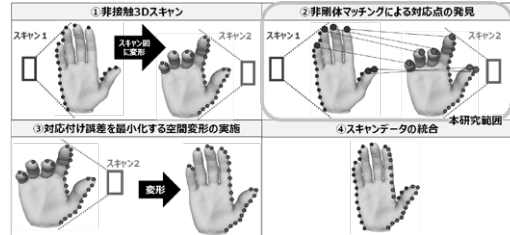


図 1: 研究目的

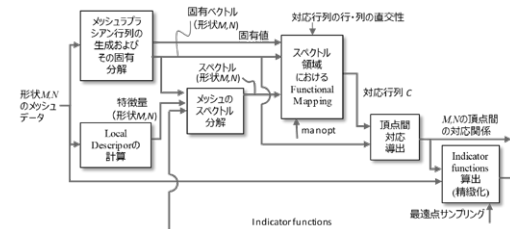


図 2: Functional Mapping による非剛体マッチング処理の概要

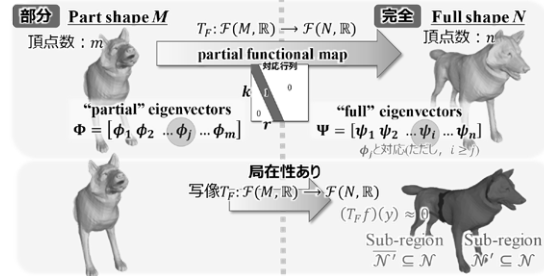


図 3: Functional Map の局在化

は完全形状 N のいずれかの固有ベクトル $\psi_i^{(n \times 1)}$ に対応すると仮定する。このとき $i \geq j$ となり、固有ベクトル間の対応関係を示す対応行列は slanted-diagonal 構造を取るためランク r が完全形状間の対応行列に比べ下がる。この対応行列のランクは以下の式(1)で推定できる。ここで、 λ_i^M は部分形状 M の最小から i 番目の固有値、 λ_j^N は完全形状 N の最小から j 番目の固有値、 k は使用するスペクトル成分数である。

$$r = \max \left\{ i \mid \lambda_i^M < \max_{1 \leq j \leq k} \lambda_j^N \right\} \quad (1)$$

2.4 最適化による Functional Mapping の導出

2 つのメッシュ M, N (頂点数 m, n) が変形関係にあるときに、対応点の発見はスペクトル A, B 間で $A = C^T B$ を満たす C を求める問題に帰着できる。ここで C は式(2)の最小化問題の解として与えられ、さらに式(3)の初期値 C^* として用いられる。

$$\min_C \left\{ \text{off}(C^T A_N C) + \mu \|A_r - C^T B\|_{2,1} \right\}, \text{ s.t. } C^T C = I \quad (2)$$

ここで、

$$\text{off}(X) = \sum_{i \neq j} x_{ij}^2, \quad A_r = W_r A, \quad W_r = (I_{r \times r} \mid 0_{r \times (k-r)})$$

$A_{N(k \times k)}$: メッシュ M の L の固有値 k 個を対角成分に持つ対角行列

μ : ユーザー指定の正の実数値

A, B : 各メッシュモデルのスペクトル

$$\|X\|_{2,1} = \sum_i \|x^i\|_2 \quad (x^i: \text{行列} X \text{ の } i \text{ 番目の列}).$$

式(1)の最小化問題の解は MATLAB に実装された多様体上の最適化ソルバーである `manopt`^[4]を用いて求めた。なお、マッチング精度は式(2)の C の初期値として良好な対応関係が与えられるかに依存するため、本手法ではスペクトル算出時の f_i として頂点周辺の局所形状の類似性を符号化できる SHOT 特徴量^[5]を用い、かつ C の初期値を単位行列とした。

2.5 頂点間対応の発見

M, N 間の頂点間対応は最適化問題式(3)の解で与えられる。

$$\min_{C, \Pi} \|C\Phi^T - \Psi^T\Pi\|_F \quad (3)$$

ここで、

$\Phi_{(m \times k)}, \Psi_{(n \times k)}$: メッシュ M, N の固有ベクトルから成る行列

$\Pi_{(n \times m)}$: Ψ^T の列番号選択を表す 2 値行列

$$\|X\|_F = \sqrt{\text{tr}(XX^T)} = \sqrt{\text{tr}(X^T X)}.$$

式(2)の最適化では、まず $C \cdot \Phi^T$ の各列と Ψ^T の各列間のノルムが最小となる対応を k 次元最近傍探索により求め、最適な Π^* を発見し、次に $\|C\Phi^T - \Psi^T\Pi^*\|_F$ が最小となるような C^* を特異値分解で算出する。これを式(3)の目的関数の値が収束するまで反復し、最終的な Π^* がメッシュ M, N の頂点間対応を表した行列となる。

2.6 少数サンプリング点の indicator function による精緻化

式(2)の最適化後、サンプリング点間距離が最大となる最遠点サンプリングを行う。各サンプリング点(点数 l)で式(4)により indicator function の離散表現 $f_j^{\text{ind}} = [f_{1j}^{\text{ind}}, f_{2j}^{\text{ind}}, f_{3j}^{\text{ind}}, \dots, f_{mj}^{\text{ind}}]^T$ を作成する。ここで、 α はモデルの平均エッジ長の逆数、 d_{ij} はサンプル点 j からメッシュ頂点 i までの dijkstra 法で求めた近似的測地距離である。

$$f_j^{\text{ind}} = \exp(-0.5\alpha d_{ij}) \quad (4)$$

さらに、 f_j^{ind} を並べた $F^{\text{ind}} = [f_1^{\text{ind}}, f_2^{\text{ind}}, f_3^{\text{ind}}, \dots, f_l^{\text{ind}}]$ を 2.2 節の F に置き換え、式(2)のマッチング最適化を繰り返す。

3. 完全形状 - 部分形状マッチング精度の評価

3.1 精度検証用メッシュモデル

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^[6]を精度検証に用いた。このデータセットは頂点数 4,344~10,000 の 8 種類の完全形状の物体と、それらの複数の変形した部分メッシュで構成され、変形前後の対応頂点对の Ground Truth も含む。このうち形状 centaur を除いた 7 種類の物体を検証に用いた。処理時間は $k = 50$ の場合、1 モデルあたり 4~10min 程度だった。

3.2 対応付け誤差算出方法

マッチング精度評価では、式(5)の対応付け誤差 $\varepsilon(y)$ を求め、誤差の累積頻度が $\alpha\%$ となるときの誤差値で評価した。ここで、 y は式(3)から求めた部分形状 M 上の頂点 x に対する完全形状 N 上の頂点、 y^* は頂点 x に対する N 上の対応点の Ground Truth 対応点、 $|S_N|$ は完全形状 N の表面積である。

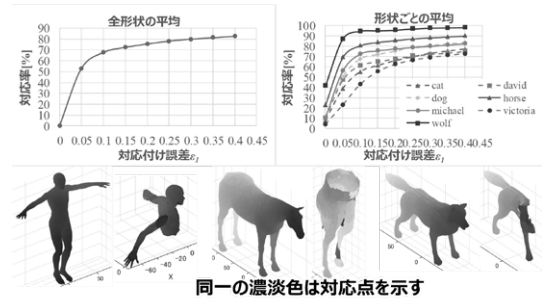
$$\varepsilon(y) = \frac{\text{dist}(y, y^*)}{|S_N|^{1/2}} \quad (5)$$

3.3 マッチング精度比較結果

図 4 に $k = 50$ のときの各形状におけるマッチング結果例を示す。SHOT 特徴量計算時のサポート球半径 R_{shot} は各メッシュの平均エッジ長 \bar{e} の 5 倍とした。形状によってマッチング精度に差がでており、データセット内全形状のマッチング精度の平均は対応付け誤差 0.2 以下で誤差の累積頻度が 75% であった。また、主に左右の間違いなどで対応付け誤差が大きかった。

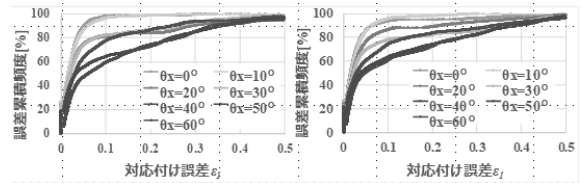
4. 手モデルでのマッチング実施結果

次に、スキャン間に変形を伴う物体間のマッチングを想定し、指の屈曲変形を伴う一方向からのスキャンデータを想定した掌および手の甲の部分手モデル(頂点 5,858~7,550)と完全形状の手モデル(頂点数 13,431)間のマッチング結果例を図 5, 6 に示す。本マッチングでは R_{shot} は $3\bar{e}$ とした。



同一の濃淡色は対応点を示す

図 4: TOSCA データセットでのマッチング結果例 ($k = 50$)



(a) 初期対応点を与えない場合 (b) 初期対応点 (5 点) を与えた場合

図 5: 対応付け誤差と誤差累積頻度

完全形状	手の甲			
手の甲側の部分形状	初期対応点を与えない場合	$\theta_x = 0^\circ$	$\theta_x = 10^\circ$	$\theta_x = 20^\circ$
	初期対応点を与える場合	$\theta_x = 0^\circ$	$\theta_x = 10^\circ$	$\theta_x = 20^\circ$

同一の濃淡色は対応点を示す(甲側のメッシュの色が透けた状態)

図 6: 手モデルでのマッチング結果例

図 5 は、式(2)での初回のマッチング最適化において、初期対応点を与えない場合と、部分形状上のランダムな 5 点の SHOT 特徴量を、完全形状上の真の対応点の SHOT 特徴量と同じ値とし、初期対応点を与えた場合との比較である。屈曲角が 10° 以下であれば初期対応点を与えなくても、対応付け誤差 0.2 以下の対応点对が 90% 以上となった。また、初期対応点を数点与えることで、屈曲角 20° まで、上記と同様の精度で対応付けが行えた。図 6 は対応頂点对を同一の濃淡色で示したもので、指の先端付近で対応付け誤差が大きくそれ以外では小さいことが分かる。

5. おわりに

メッシュのスペクトル分解と Functional Mapping を用いた非剛体形状マッチングを用いて完全形状と部分形状間の非剛体マッチングを行った。初期対応点無しであれば屈曲角 10° 以下、また初期対応点を 5 点与えることで屈曲角 20° でも一部領域を除き妥当なマッチングが実現できた。今後は、実スキャンデータを用いたマッチングとパラメータの調整などによるマッチング精度向上を行う。

参考文献

- [1] O. Litany et al.: Fully Spectral Partial Shape Matching. : Computer Graphics Forum : 36(2) : pp.247-258 : (2017).
- [2] 山岡茉莉他.: 「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とその設計応用に関する研究」.: 2019 年度精密工学会春季大会学術講演論文集. pp.864-865. (2019).
- [3] Marks Ovsjanikov et al.: Functional Maps: A Flexible Representation of Maps Between Shapes. : ACM Trans. Graph : 31(4) : pp.30:1-30:11. (2012).
- [4] N. Boumal et al.: Manopt, a Malab Toolbox for Optimization on Manifolds. : Journal of Machine Learning Research : 15. : pp.1455-1459. : (2014).
- [5] Federico Tombari et al.: Unique signature of histograms for local surface description. : Proc. ECCV : pp.356-369 : (2010).
- [6] A. M. Bronstein et al.: Numerical Geometry of Non-Rigid Shapes : Springer : (2008).