

薄い構造を持つ蝶の翅の形状復元のためのテンプレートフィッティング

後藤 竜真

籐本 悠紀

西田 拓央

井尻 敬

芝浦工業大学



図 1 3 体の蝶標本の 3 次元モデリング結果。既存のフォトグラメトリ法では正確な復元の難しい薄い翅の形状が、正確に復元されている。

概要

昆虫標本のデジタルデータ化は、保存により標本が劣化する・保存にはスペースを要するといった課題に対する有効な解決策であり、多くの研究がなされている。しかし、フォトグラメトリに基づく既存手法を翅のような薄い構造を持つ標本に適用すると、法線が真逆を向く頂点が近接してしまうため正確な形状復元が難しいという問題がある。そこで本研究では、薄い構造を持つ標本の復元のためのテンプレートフィッティング法を提案する。具体的には、蝶の標本を複数視点から撮影し、Structure from Motion および Multi-View Stereo により生成した点群データを翅と体に分割する。翅を表す点群について、法線方向に射影し、2 次元上でドロニー三角形分割をすることでテンプレートを生成し、これをもとの 3 次元形状にフィッティングする。体を表す点群については、Ball-Pivoting Algorithm によりメッシュモデルを生成する。提案手法の有用性を示すため、複数の蝶の標本から 3 次元モデルの復元を実施した。結果、既存のフォトグラメトリと比較し、提案手法は穴や欠損のない高品質なモデルを構築できることを確認した。

1 はじめに

昆虫標本のデジタルデータ化は、標本が経年劣化する・保存にスペースを要するといった標本管理における課題に対する有効な解決策のひとつである。また、デジタルデータ化した昆虫標本は、ウェブサイトや仮想空間など、様々なコンテンツに利用できる。こうした需要から、標本のデジタルデータ化について多くの研究がなされている [1, 2, 3]。

本研究では、広く利用される 3 次元モデリング法のひとつであるフォトグラメトリに着目する。この手法は、多視点写真群に対して Structure from Motion (SfM) を適用すること

で写真の位置合わせを行い、Multi-View Stereo (MVS) により 3 次元点群を生成し、この点群をもとに三角形メッシュを生成する。しかし、例えば蝶の翅のように対象が薄い構造を持つ場合、点群からメッシュを生成する過程において、法線が真逆を向く頂点が近接してしまい正確な形状復元が難しいという問題がある。

本研究の目的は、従来法では形状復元が困難な薄い構造を持つ昆虫標本を正確にモデリングできる手法の実現である。このため、フォトグラメトリの過程で得られる点群データを領域分割し、蝶の翅に該当する点群にテンプレートをフィッティングする手法を提案する。これにより、薄い翅を持つ昆虫標本を正しく復元できる。提案手法により 3 体の蝶標本をモデリングした結果（図 1）を見ると、薄い翅に穴や欠損がなく正確にモデリングできていることがわかる。

2 提案手法

2.1 標本撮影と点群生成

本研究では、おおよそ 5~10 cm の蝶の標本を対象とする。まず、標本を回転台上に柄付き針を用いて固定し、台を回転させながら一定の角度ごとに写真を撮影する（図 2a）。各視点において、フォーカスブラケット撮影によりピント位置の異なる写真群を取得し（図 2b），深度合成を適用することで全体にピントの合った画像を生成する（図 2c）。この深度合成は、対象とする標本が比較的小さく、かつ、撮影に利用するマクロレンズの被写界深度が浅いため必要となる。次に、我々は、複数視点より撮影された深度合成画像に対して、SfM および MVS を適用することで、各画像に対するカメラ位置（図 2d）と 3 次元点群データ（図 2e）を取得する。なお、本研究では、深度合成に商用ソフト Helicon Focus を、点群生成に商用ソフト Meshlab を利用した。

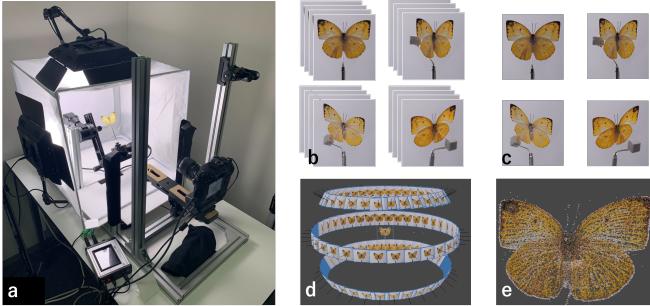


図2 (a) 撮影装置, (b) 複数視点から撮影されたピント位置の異なる写真群, (c) 各視点に深度合成を適用した結果, (d) カメラ位置の復元結果, および, (e) 3次元点群.

取得した点群について、翅と翅以外（胴体や触覚）に異なるメッシュモデル構築法を適用するため、領域分割を実施する。本研究では、手作業で点群を分割するツールを作成し領域分割を実施する。このツールでは、ストロークにより点群を選択する投げ縄ツールや、色により点群を選択するツールを用いて、点群データに異なるラベルを付与できる（図3）。このツールを用いて、標本の点群データを、4個の翅領域、1個の胴体領域、および、それ以外の背景領域に分割する。

2.2 テンプレートフィッティングによるメッシュ生成

前ステップにおいて領域分割された翅を表す点群に対してメッシュモデルを構築する。この点群には、翅の表に対応する点群と裏に対応する部分が近接して存在する、翅の模様に依存して点群が十分密でない部分が存在するという特徴がある。そこで、本研究では、ドロネー三角形分割によりメッシュを生成し、このメッシュを点群にフィッティングすることで、欠損の少ないメッシュモデルを構築する。

まず、翅を表す N 個の3次元点群 \mathbf{p}_i を入力とし、この分散共分散行列の固有値、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$ 、および、対応する固有ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ を取得する（図4a）。次に、対象とする蝶の翅が平面的な構造であることを利用し、点群 \mathbf{p}_i を、2つの固有ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 、を基底とする平面に射影することで平面に近似する。また、テンプレート作成には密な点群が不要であることから、点群を $k\%$ の割合にサンプリングし、2次元点群 \mathbf{q}_j を得る（図4b）。

続いて、この2次元点群に対してドロネー三角形分割を適用し、得られた2次元三角形メッシュの境界辺のうち長さが r 以上のものを逐次的に削除する。この処理は、翅の外形が凹形状を有する場合に、翅の外部に三角形が配置されることを防ぐために必要となる。さらに、2次元メッシュに重心ボロノイ分割法[4]を適用することで頂点分布を均質化し、これを初期メッシュモデルとする（図4c）。

次に、2次元の初期メッシュの各頂点を \mathbf{v}_3 方向（平面射影時の射影方向）に動かすことによって3次元点群にフィッティングする。説明のため、 \mathbf{v}_3 方向を高さ方向と呼ぶこととする。まず、初期メッシュの各三角形（図4d 緑）を高さ方向にスイープした領域を考え、この領域に含まれる点群 \mathbf{p}_i



図3 投げ縄ツールによる点群の領域分割 (a, b) と領域分割結果 (c)。

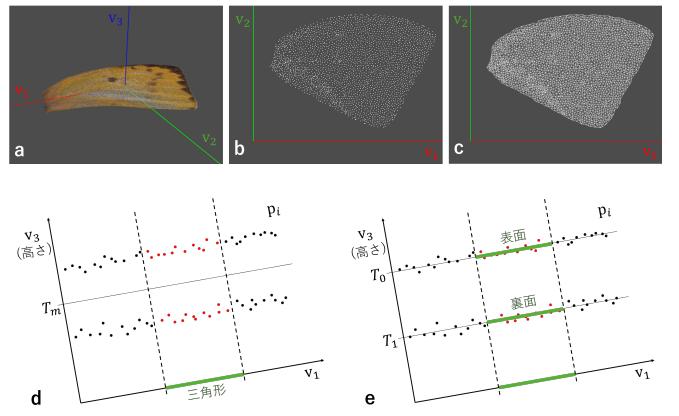


図4 テンプレートフィッティングによるメッシュ構築.

抽出する（図4d赤）。抽出した点群には、翅の表に対応する部分と裏に対応する部分が存在する。そこで、抽出した点群の高さの平均 T_m を計算し、これを閾値として抽出した点群を2分割する（図4e）。更に、2分割した点群それぞれの高さの平均、 T_0 と T_1 、を計算し、三角形の表面の高さ T_0 、裏面の高さを T_1 とする。その後、各頂点の高さ (\mathbf{v}_3 方向の移動量) を、その頂点に隣接する三角形の高さの平均により決定する。また、抽出される点群が不十分な三角形については、点群からは高さを計算できないため、隣接する三角形の高さの平均を利用する。ここで、点群データが持つ法線情報をを利用して表裏判定を行うことも考えられるが、表裏が近接した点群では法線に誤差が含まれる可能性があるため、本研究では位置情報を利用した。

上記のメッシュ生成法において、本研究における実験では、 $k = 1$ 、 $r = 1.50 \times r_0$ を利用した。ただし、 r_0 は、ドロネー三角形分割により得られた三角形メッシュの辺の平均長である。また、胴体領域については、Ball-Pivoting Algorithm[5]を用いてメッシュを生成する。

2.3 テクスチャ生成

メッシュモデル構築後、複数視点において取得した深度合成画像を、SfMにより推定されたカメラ位置よりメッシュモデル上に逆投影することで、テクスチャを生成する。このとき、視点分だけテクスチャが生成されるため、この複数のテクスチャを Graphcut Textures 法 [6] を用いて、継ぎ目が目立たないように統合する。



図5 (a) 対象となる蝶の標本の写真, (b) 提案手法によるモデリング結果, および, (c)Metashape によるモデリング結果.

3 結果と考察

提案手法の評価のため, フォトグラメトリのための商用ソフト Metashape と提案手法のモデリング結果を比較した. 対象となる標本(図5a)を, 3つの仰角(-30°, 0°, 30°)それぞれにおいて, 方位角10°ごとに撮影し(3×36=108視点), 各視点において深度合成画像を生成し, 商用ソフトにより3次元モデルを構築した(図5c). 一方, 商用ソフトより得られる点群データに対して提案手法を適用しモデルを構築した(図5b). 商用ソフトによるモデリング結果では, 翅領域に穴が開いてしまっており, 正しい形状復元ができない. 一方, 提案手法は, ドロネー三角形分割により穴の無いテンプレートメッシュを作成し, これを点群にフィッティングするため, より正確なモデリング結果が得られている.

また, 提案手法の有用性を確認するため, 3体の異なる標本の3次元モデリングを実施した. 結果を図1に示す. これらの例でも, 前述の108視点より写真計測を実施し, 形状とテクスチャの復元を行った. 3体の標本について, いずれも, 翅領域に穴や欠損のないメッシュモデルが構築されることを確認した.

4 まとめと展望

本研究では, 既存のフォトグラメトリ法ではモデリングが困難な昆虫標本の薄い構造を正確に復元するため, 形状復元過程で得られる3次元点群を翅領域と胴体領域に分割し, 翅領域に対してテンプレートをフィッティングする手法を提案した. 提案手法と商用フォトグラメトリソフトのモデリング結果を比較し, 提案手法は標本の翅部分においてより正確な復元を行えることを確認した.

本研究では, ユーザが手動で点群を分割する必要がある. 機械学習による点群領域分割の自動化は将来課題の一つである. また, 本研究では, 薄い構造の復元に注目したが, 昆虫の触覚や脚のような『細い構造』についても, 正確な復元が困難であることが確認されている. 今後, 細い構造についてもテンプレートフィッティングの概念を活用することで正確な復元を目指したい.

謝辞. 本研究は, JSPS 科学研究費(22H03710)の支援のもと実施されたものである.

参考文献

- [1] C. V. Nguyen, D. R. Lovell, M. Adcock, and J. La Salle, “Capturing natural-colour 3d models of insects for species discovery and diagnostics,” *PLoS one*, vol. 9, no. 4, p. e94346, 2014.
- [2] A. Gallo, M. Muzzupappa, and F. Bruno, “3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, no. 2, pp. 173–182, 2014.
- [3] Y. Qiu, D. Inagaki, K. Kohiyama, H. Tanaka, and T. Ijiri, “Focus stacking by multi-viewpoint focus bracketing,” *SIGGRAPH ASIA 2019, posters*, 2019.
- [4] Q. Du, V. Faber, and M. Gunzburger, “Centroidal voronoi tessellations: Applications and algorithms,” *SIAM Review*, vol. 41, no. 4, pp. 637–676, 1999.
- [5] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, and G. Taubin, “The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction,” *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 5, no. 4, pp. 349–359, 1999.
- [6] V. Kwatra, A. Schödl, I. Essa, G. Turk, and A. Bobick, “Graphcut textures: Image and video synthesis using graph cuts,” *ACM transactions on graphics (tog)*, vol. 22, no. 3, pp. 277–286, 2003.