

直線光源による質感を含めた 微小物体のデジタルデータ化手法

邱 雨澄^{1,a)} 西田 拓央^{1,b)} 井尻 敬^{1,c)}

概要: これまで、昆虫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が、標本表面の質感（反射特性）の復元は行われていなかった。そこで本研究では、昆虫標本などの微小物体を対象とし、質感まで含めたデジタルデータ化手法を提案する。具体的には、直線光源環境下にて物体を回転させながらフォーカスブラケット撮影し、深度合成と多視点ステレオ法により精密な3次元形状モデルを取得する。さらに、得られた3次元形状モデルと一連の写真から、モデル表面の各点における1次元反射率レスポンス関数を取得し、その点における Diffuse Color, Specular Color, および Roughness 値を推定する。提案手法の有用性を確認するため、複数の昆虫標本のデジタルデータ化を実施した。結果、光沢のある標本について表面の反射特性まで含めてデジタルデータ化し、リアリティの高いレンダリングが可能になることを確認した。

キーワード: 反射特性計測, 3次元モデリング, 昆虫のデジタルデータ化, 深度合成

Digitization of Small Objects Including Their Reflectance Characteristics using Linear Light Sources

YUCHENG QIU^{1,a)} TAKUHIRO NISHIDA^{1,b)} IJIRI TAKASHI^{1,c)}

Abstract: Many studies have been presented to reconstruct insect specimens' three-dimensional shapes and texture maps. However, their surface reflectance have rarely been reconstructed. In this study, we propose a method for reconstructing 3D shapes and reflectance characteristics of insect specimens. We take multi-viewpoints focus-bracket images of a sample under two linear lights and reconstruct the 3D model of the sample by using a multi-view stereo method. From the 3D model and a series of photographs, we obtain a one-dimensional reflectance response function at each point on the 3D model, and estimate diffuse color, specular color, and surface roughness at the point. To illustrate the feasibility of our method, we performed digitization of multiple insect specimens with specular reflectance on their surfaces.

Keywords: Reflectance measurement, 3D modeling, digitization of insects, focus stracking

1. はじめに

昆虫標本は、長期保存により劣化し、また保存にスペースを要するため、その計測によるデジタルデータ化は非常に重要な課題である。実際、昆虫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。例えば、標本ケースの写真を撮影して保存する手法 [1], [2], [3], 多視点写真よりテクスチャ付き3次元形状モデルを構築する手

法 [4], [5], [6], [7], [8], X線 Computed Tomography と多視点写真より3次元形状モデルを構築する手法 [9] などが提案されている。しかし、これらの既存研究では、形状とテクスチャの復元は行われているものの、昆虫標本表面の質感（反射特性）の復元は行われていなかった。そのため、体表の一部に光沢を有する昆虫標本（図 1a）の質感を正確に表現することは困難であった。

Computer Graphics (CG) 分野では、多様な物体の質感を再現するため、様々な反射特性モデルや、それらの計測手法、レンダリング手法に関する研究がなされている。特に本研究に関連が深いものは、Spatially Varing Bidirec-

¹ 芝浦工業大学

^{a)} yucheng.qiu25@gmail.com

^{b)} takuhiro.n22@gmail.com

^{c)} ijiri@shibaura-it.ac.jp

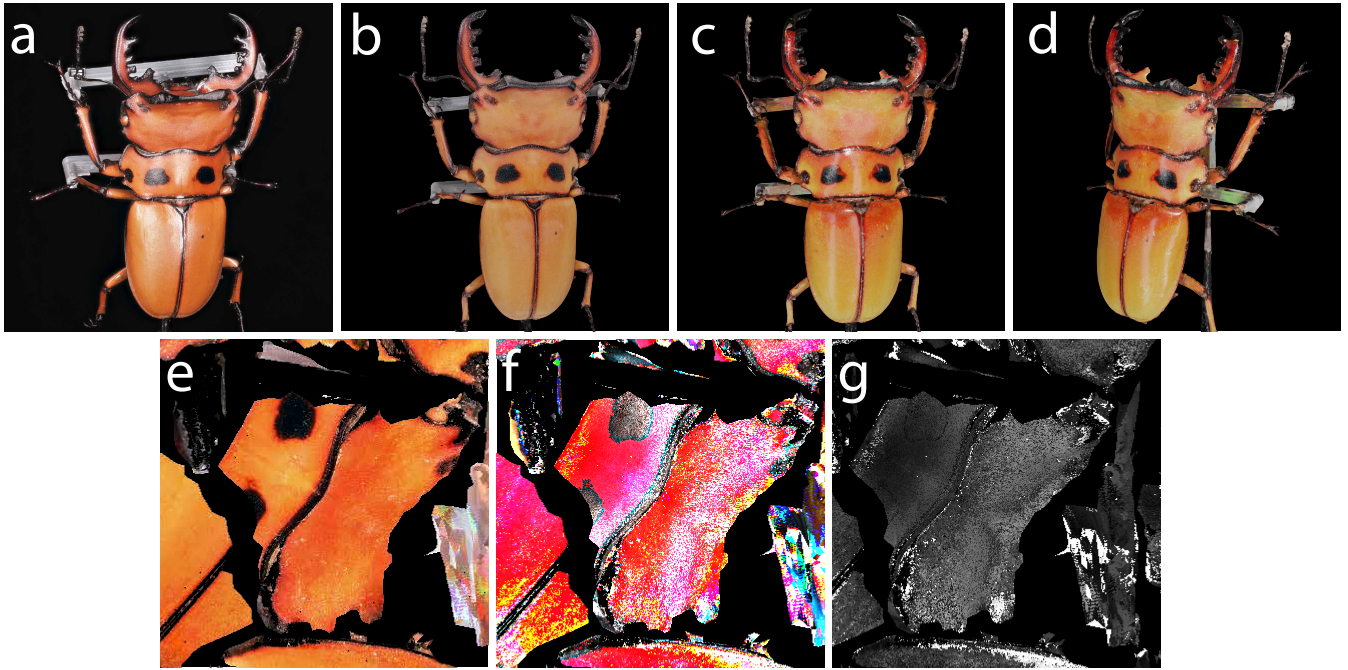


図 1 提案手法によるクワガタ標本のデジタルデータ化。(a) 表面に光沢をもつクワガタの写真, (b) 市販ソフトウェアの Metashape で生成したモデルのレンダリング結果, (c, d) 提案手法により生成されたモデルのレンダリング結果, (e) Diffuse Color マップの拡大図, (f) Specular Color マップの拡大図, (g) Roughness マップの拡大図。

tional Reflectance Distribution Function (svBRDF) モデルである。svBRDF モデルは、位置・入射光方向・反射光方向に依存する反射率の関数である。実際の物体を計測して svBRDF を取得するため、人工的に光源を設置する手法 [10], [11], [12] や、自然光を光源として利用する手法 [13], [14] が提案されている。計測によりこの svBRDF を取得できれば、体表に多様な質感を持つ昆虫標本のより正確なデジタルデータ化が可能になる。

そこで本研究では、昆虫標本のような 1~5cm 程度の微小物体を対象として、その質感を含めたデジタルデータ化手法を提案する。具体的には、まず、撮影環境に直線状の光源を配置し、昆虫標本を回転台上で回転させながら撮影する。この際、微小物体を正確に計測するため、各視点においてフォーカスブラケット撮影と深度合成を実施する。次に、一連の写真に多視点ステレオ法を適用し、3次元形状モデルとテクスチャを復元する。さらに、一連の写真と3次元形状モデルから、テクスチャ画像の各画素における1次元反射率レスポンス関数を作成し、これを用いて各画素の Diffuse Color, Specular Color, および Roughness 値を取得する。

提案手法の有用性を示すため、提案手法により2体の昆虫標本と化石標本のデジタルデータ化を実施した。クワガタ標本の復元例を図1に示す。提案手法を利用すると、質感を考慮しない既存手法 [5] (図1b) に比べ、光沢を含むよりリアリティの高い3次元形状モデルを取得できる (図1c, d)。

2. 関連研究

2.1 昆虫標本のデジタルデータ化

昆虫標本のデジタルデータ化は重要な課題であり、多様な手法が発表されている。例えば、複数の視点から昆虫標本の写真を撮影し、shape-from-focus 法 [4] や、Visual Hull 法 [6]、多視点ステレオ法 [5], [7], [8] を適用することで、その3次元形状モデルとテクスチャを復元する手法が提案されている。一方、X線CTを利用する試みもなされている。Ijiri ら [9] は、昆虫標本をX線CTにより撮影し、得られた3次元画像を領域分割することで精密な3次元形状モデルを復元した。この研究では、複数視点から写真撮影を行うことでテクスチャを復元する手法も提案されている。

しかし、昆虫標本のデジタルデータ化に関する既存研究では、形状とテクスチャの復元は行われているものの、表面の質感(反射特性)については考慮されていない。

2.2 Microfacet モデル

CG 分野において、物体の質感の再現は非常に重要な課題であり、多様な反射特性モデルやその計測方法に関する研究がなされている。不透明物体の表面の反射率は Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) により記述される。さらに、物体表面の位置によって反射特性の変化を記述できるモデル spatially-varying BRDF (svBRDF) も存在する。この svBRDF は表面位置、入射光方向、反射光方向を引数に持つ6次元関数である。本研

究では、等方性反射を仮定することで、svBRDF を簡略化した Microfacet モデルを利用する [15]. Microfacet モデルにおいて、反射率 f_r は、次の通り定義される、

$$f_r = k_d f_{diffuse} + k_s f_{specular}, \quad (1)$$

$$f_{diffuse}(\mathbf{l}, \mathbf{n}) = \frac{c}{\pi}, \quad (2)$$

$$f_{specular}(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{n}) = \frac{D(\mathbf{h})F(\mathbf{v}, \mathbf{h})G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}. \quad (3)$$

ここで、 $f_{diffuse}$ は拡散反射成分、 $f_{specular}$ は鏡面反射成分、 \mathbf{l} は入射光方向、 \mathbf{v} は反射光方向、 \mathbf{n} は面の法線方向、 \mathbf{h} は \mathbf{l} と \mathbf{v} の半角方向である。 c は拡散反射成分であり、複数のモデルが存在するが、ランバート反射を仮定すると $c = \mathbf{l} \cdot \mathbf{n}$ と書ける。また、 G は幾何学的減衰係数、 F はフレネル反射成分である。 D は微小面の法線分布関数 (Normal Distribution Function, NDF) であり、以下の GGX 関数が利用される事が多い、

$$D_{GGX}(h) = \frac{\alpha^2}{\pi((h \cdot \mathbf{n})^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2}. \quad (4)$$

ここで α は、表面の粗さを表す Roughness 値 r により、 $\alpha = r^2$ と定義される。この Roughness 値はテクスチャマップ同様に、レンダリングパラメータとして提供される。

2.3 svBRDF の取得

計測により svBRDF を取得する手法が多く発表されている。Aittala ら [10] は、特定の周波数模様を表示する LCD ディスプレイを光源として利用することで、平面サンプルの svBRDF を取得した。Gardner ら [11] は、直線光源を移動させながら撮影を行うことで、高密度な 1 次元反射率レスポンスを測定し、svBRDF を取得した。この手法では、直交する 2 方向の測定により、平面状のサンプルの法線マップを取得できる。Ren ら [12] は、1 次元反射率レスポンスのアライメントを提案し、手持ちの直線光源による測定を可能にした。

また、光源が未知な環境下で svBRDF を推定する手法も提案されている。Dong ら [13] は、未知の自然照明の中で回転する物体の動画から、表面反射率と環境マップの推定を交互に行うことで、表面反射率と法線マップを取得した。Xia ら [14] は、未知光源下で撮影された物体から、物体形状・表面反射率・環境マップ・表面法線をあわせて推定する手法を提案した。

本研究の目的は昆虫標本のデジタルデータ化であるため、計測時の光源環境は比較的自由に制御できる。そのため、光源推定の必要がなく、明るい光源を利用可能な Gardner ら [11] の手法を応用し、微小物体の質感計測手法を実現する。

3. 提案手法

本研究では、微小な昆虫標本の質感を含めたデジタル

データ化手法の実現を目的とし、写真計測により詳細形状・Diffuse Color マップ・Specular Color マップ、Roughness マップを取得する手法を提案する。提案手法におけるモデル復元の流れは以下の通りである。まず、LED チューブライトと回転台を利用した撮影環境を用意する (3.1 節)。この環境下にて、昆虫標本を 360 度回転させながらフォーカスブラケット撮影と深度合成を実施する。さらに多視点ステレオ法を適用することで標本の 3 次元形状とカメラ位置を復元する (3.2 節)。最後に、得られた一連の写真から Diffuse Color マップ・Specular Color マップ・Roughness マップを取得する (3.3 節)。

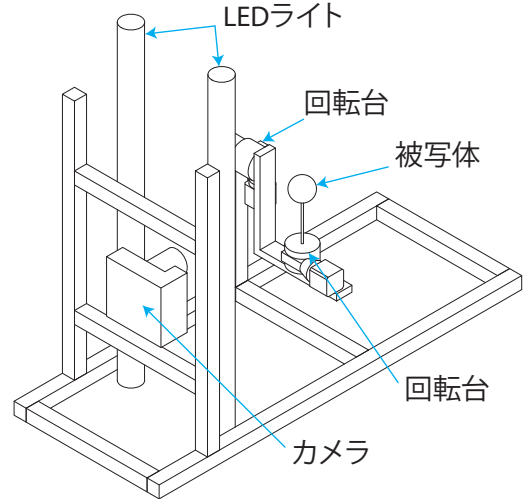


図 2 提案手法の計測環境。

3.1 計測環境

我々の計測環境の模式図を図 2 (上) に示す。LED チューブライトを、カメラの左右に対称に配置し、また、外部からの光の影響を受けないよう、撮影装置全体を卓上暗室の中に配置する。さらに、撮影装置自体による光の反射を抑制するため、撮影装置の骨組みに吸光シートを貼り付ける (図 2 下)。被写体は、モーター制御可能な回転台に固定し、撮影の度に微小角ずつ (本研究では 1° に設定) 回転させな

がら 360° 全方向から撮影を行う。また本研究では、深度合成のため、自動フォーカスブラケット撮影機能を搭載した Olympus OM-D E-M1 Mark II とマクロレンズ Olympus M.ZUIKO DIGITAL ED 60mm F2.8 Macro を使用する。

3.2 前処理: 深度合成と形状復元

本研究では、数センチ程度の小さな昆虫標本を対象とする。その撮影にはマクロレンズが必要となるが、一般的にマクロレンズの被写界深度は浅く、強いピンぼけが生じてしまう。そこで我々は、フォーカスブラケット撮影（焦点を移動させながら複数枚の写真を撮影）と深度合成を実施する。各視点において、カメラの焦点を変化させながら 10-30 枚程度の写真を撮影する。次に、ピントを変化させた一連の写真から画像内のすべての画素にピントが合った画像を合成する（深度合成）。以上より、多視点深度合成画像群を取得する。レンズフォーカスを移動させるフォーカスブラケットは、電動レールを利用してカメラ本体を移動させる手法 [6], [7], [8] より、パースの歪みが少ない深度合成が実現できる。

次に、得られた深度合成画像群に多視点ステレオを適用し、被写体の 3 次元形状モデル・テクスチャマップ・深度合成画像の視点位置を推定する。本研究では、深度合成については市販ソフトウェア Helicon Focus を、多視点ステレオについては市販ソフトウェア Metashape を利用する。

3.3 表面反射特性の推定

前節までに、3 次元形状モデル、テクスチャマップ、多視点深度合成画像、および、各画像の視点位置を取得できている。我々は、これらの情報から 3 次元形状モデル表面の 1 次元反射率レスポンス関数を取得する。今、撮影時の回転角度 θ にて撮影された深度合成画像 $I(\theta)$ を、その視点位置から 3 次元形状モデルに射影する。すると、この画像のみを利用したテクスチャマップを作成できる。これをすべての回転角度に対して行くと、回転角度 θ 毎にテクスチャマップ $T_{u,v}(\theta)$ を生成できる。このテクスチャマップ $T_{u,v}(\theta)$ は、物体表面上の点 (u, v) の上を 2 本の直線光源が回転した際に、カメラから観察できる色・輝度値を表す。本研究ではこれを点 (u, v) の 1 次元反射率レスポンス関数と呼ぶ。図 3 に、鏡面反射を持つ点と持たない点の 1 次元反射率レスポンス関数の例を示す。鏡面反射成分を持たない点では、1 次元反射率レスポンス関数は正弦波の半周期分と似た波形を示す (図 3a)。一方、鏡面反射成分を持つ場合、2 本の直線光源に対応する 2 つのピークが現れる (図 3b)。このピークの形状は、表面の Roughness 値に依存して変化する。

続いて、各点 (u, v) について、Diffuse Color k_d , Specular Color k_s , および Roughness 値 α を、以下の最適化により求める、

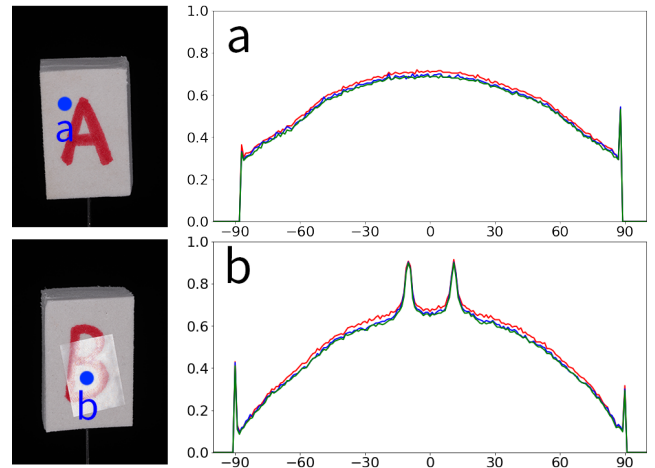


図 3 1 次元反射率レスポンスの例。鏡面反射成分を持つ点 (a) と持たない点 (b) における 1 次元反射率レスポンスのグラフ。利用した物体は、鏡面反射成分を持たないスポンジ状のサンプルに赤の水性ペンで文字 A・B を書き、その一部にセロファンを貼り付けたもの。

$$\min_{n,l,\alpha,k_d,k_s} \int ||L(\theta, n, l, \alpha, k_d, k_s) - T(\theta)||^2 d\theta. \quad (5)$$

ここで、 n は回転軸と直行する平面に射影した際の物体法線 \mathbf{n} の角度 (図 4 上)、 l は着目点を基準とした際のカメラと光源のなす角 (図 4 下)、 $T(\theta)$ は表面上の点 (u, v) において観測される 1 次元反射率レスポンスである。

上式における $L_{u,v}(\theta)$ は Microfacet モデルを仮定した際に計算される表面色であり、Diffuse 成分と Specular 成分に分けられる、

$$L(\theta, n, l, \alpha, k_d, k_s) = k_d d(\theta, n, l) + k_s s(\theta, n, l, \alpha). \quad (6)$$

この Diffuse 成分はランバート反射を仮定し以下の通り定義する、

$$d(\theta) = \cos(\theta + l - n), \quad (7)$$

また、Specular 成分は以下の通り計算する、

$$s(\theta, n, l, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi(\cos(\theta + l - n))^2(\alpha^2 - 1) + 1} \quad (8)$$

この Specular 成分は、GGX 分布関数 (式 4) を利用したマイクロファセットモデル (式 3) において、フレネル反射成分と幾何学的減衰係数の効果は無視 ($F = 1, G = 1$) することで導出される。ここで、本研究の撮影環境では背面に光源を置かないためフレネル反射は無視できる。また、幾何学的減衰は、観察方向・光源方向と物体法線の角度が大きい (浅い方向からの観察・光源) 場合に、大きな効果を持つが、本研究では法線方向に近い角度からの観察・光源配置を仮定している。そのため、この幾何学的減衰係数を無視できる。

本研究では、式 5 に示す最適化問題を θ について離散化し、非線形最小二乗法を適用することで最適解を求める。

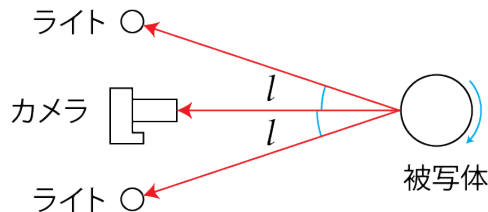
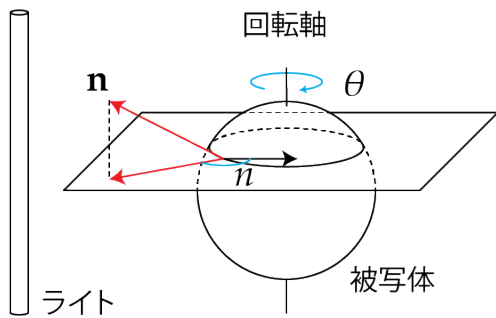


図 4 物体表面における法線方向 n と光源方向 l .

これにより、各点 (u, v) において、計測された反射率レスポンス $T(\theta)$ をなるべく満たす、Diffuse Color k_d , Specular Color k_s , および Roughness 値 α を推定できる。

ここで、物体表面に対してカメラ・光源が浅い角度に位置する場合、視点位置の誤差に起因する射影誤差が大きくなる。そこで本研究では、1次元反射率レスポンス関数において、着目点の法線方向と観察方向のなす角が $-45^\circ \sim 45^\circ$ の範囲である部分のみを利用して上記の最適化を実施する。

4. 結果と考察

提案手法の有用性を示すため複数物体の3次元形状復元を実施した。図5にスポンジ状の物体の復元結果を示す。この例では、ほぼ鏡面反射成分を持たない工作用スポンジシートを直方体上に切り出し、赤い水性ペンで表面と裏面に「A」「B」の文字を描いた。また、部分的に鏡面反射を与えるためBと描いた面にセロファンテープを貼り付けた(図5a)。図5b-dに、提案手法により復元したモデルについて、角度を変化させながらレンダリングした結果を示す。これより、セロファンテープ部分の鏡面反射が正しく復元されていることがわかる。また、図5gに、復元されたRoughnessマップを示す。このRoughnessマップは、暗いところほど粗さが低く強い鏡面反射を持つことを示している。これより、セロファンテープを貼り付けた部分が強い鏡面反射を持つようにRoughnessマップが推定されていることがわかる。

続いて、提案手法によりモデリングしたクワガタ標本の例を図1に、ホウセキゾウムシ標本・化石標本の例を図6に示す。これらの例では、異なる仰角にて2回転分の写真撮影を実施し得られた写真群から形状を復元した。さらに、

1回転分の写真群を利用し、提案手法により Diffuse Color マップ・Specular Color マップ、Roughness マップの復元を行った。レンダリング結果を見ると、表面の Specular を考慮しない既存手法に比べ、提案手法では物体表面の光沢が再現され、よりリアリティの高い表現を行えていることがわかる。

5. まとめと展望

本研究では、数センチ程度の昆虫標本を対象として、直線光源環境においてフォーカスブラケット撮影を繰り返すことで、標本の形状、Diffuse Color マップ、Specular Color マップ、Roughness マップをデジタルデータとして復元する手法を提案した。提案手法により複数の小型標本のデジタルデータ化を実施し、部分的に異なる反射特性(Roughness 値)を持つ標本をデジタルデータとして復元できることを確認した。

現在の提案手法の課題のひとつは、自己遮蔽である。対象物体に自己遮蔽がある場合、遮蔽部分の1次元反射率レスポンス関数が欠けてしまい、その部分の反射特性を正しく推定できないという課題がある。今後、遮蔽領域についてその周囲の情報を利用することで正しい1次元反射率レスポンス関数を取得できる手法を実現したい。また、撮影環境に回転軸を傾けられる機構を追加し、複数の軸で回転させながら撮影を行うことで、表面の詳細な法線方向の推定も実施したい。

参考文献

- [1] Beth Louise Mantle, John La Salle, and Nicole Fisher. Whole-drawer imaging for digital management and curation of a large entomological collection. *ZooKeys*, No. 209, p. 147, 2012.
- [2] Oleksandr Holovachov, Andriy Zatushevsky, and Ihor Shydlovsky. Whole-drawer imaging of entomological collections: benefits, limitations and alternative applications. *Journal of Conservation and Museum Studies*, Vol. 12, No. 1, 2014.
- [3] Lawrence N Hudson, Vladimir Blagoderov, Alice Heaton, Pieter Holtzhausen, Laurence Livermore, Benjamin W Price, Stéfan van der Walt, and Vincent S Smith. Insect: automating the digitization of natural history collections. *PLoS one*, Vol. 10, No. 11, p. e0143402, 2015.
- [4] Scott S Fisher, Tatsuya Saito, Ian E McDowall, Yuta Nakayama, Mark T Bolas, and Kenji Kohiyama. Micro-archiving and interactive virtual insect exhibit. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX*, Vol. 4660, pp. 375–381. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [5] 邱雨澄, 小檜山賢二, 田中浩也, 井尻敬. 多視点ブラケット撮影による深度合成手法および評価用データセットの構築. *Visual Computing*, 2020.
- [6] Chuong V Nguyen, David R Lovell, Matt Adcock, and John La Salle. Capturing natural-colour 3d models of insects for species discovery and diagnostics. *PLoS one*, Vol. 9, No. 4, p. e94346, 2014.

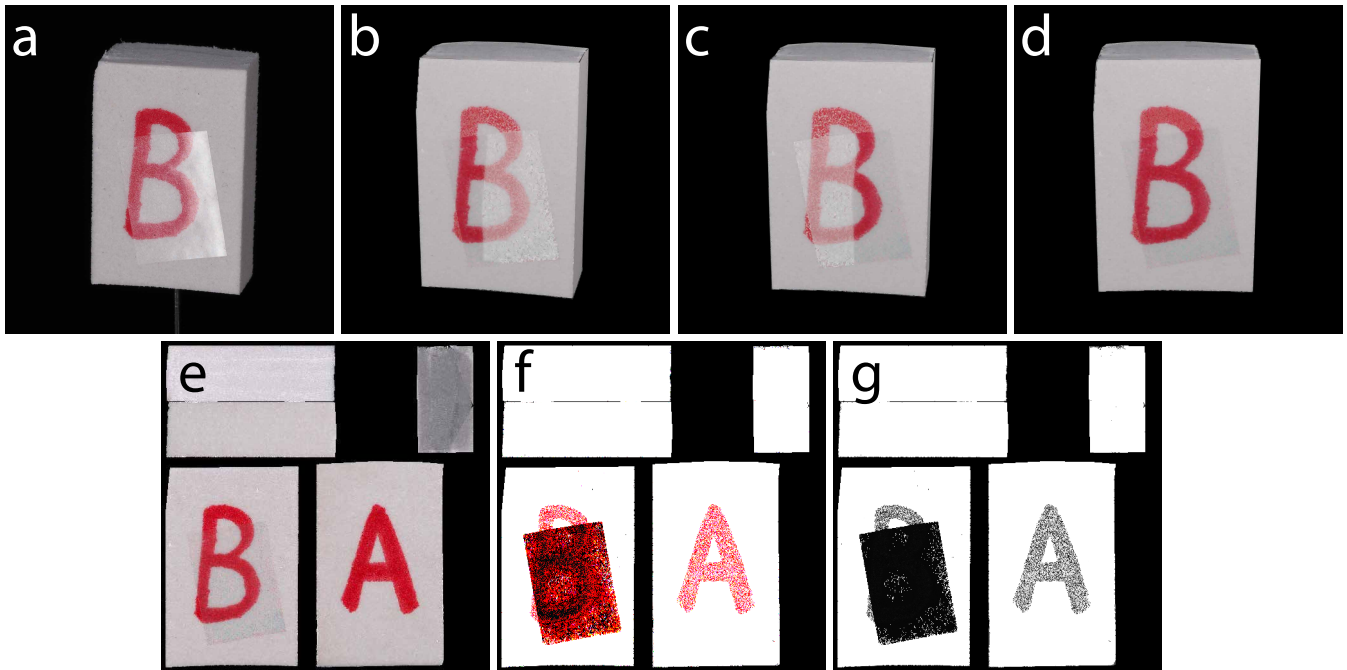


図 5 スポンジ状のサンプルの写真 (a), 提案手法により復元されたモデルのレンダリング結果 (b, c, d). また, 提案手法により生成されたテクスチャマップは, Diffuse Color マップ (e), Specular Color マップ (f), Roughness マップ (g) を示す.

- [7] Bernhard Ströbel, Sebastian Schmelzle, Nico Blüthgen, and Michael Heethoff. An automated device for the digitization and 3d modelling of insects, combining extended-depth-of-field and all-side multi-view imaging. *ZooKeys*, No. 759, p. 1, 2018.
- [8] Fabian Plum and David Labonte. scant—an open-source platform for the creation of 3d models of arthropods (and other small objects). *PeerJ*, Vol. 9, p. e11155, 2021.
- [9] Takashi Ijiri, Hideki Todo, Akira Hirabayashi, Kenji Kohiyama, and Yoshinori Dobashi. Digitization of natural objects with micro ct and photographs. *PloS one*, Vol. 13, No. 4, p. e0195852, 2018.
- [10] Miika Aittala, Tim Weyrich, and Jaakko Lehtinen. Practical svbrdf capture in the frequency domain. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 110–1, 2013.
- [11] Andrew Gardner, Chris Tchou, Tim Hawkins, and Paul Debevec. Linear light source reflectometry. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 22, No. 3, pp. 749–758, 2003.
- [12] Peiran Ren, Jiaping Wang, John Snyder, Xin Tong, and Baining Guo. Pocket reflectometry. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 30, No. 4, pp. 1–10, 2011.
- [13] Yue Dong, Guojun Chen, Pieter Peers, Jiawan Zhang, and Xin Tong. Appearance-from-motion: Recovering spatially varying surface reflectance under unknown lighting. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 33, No. 6, pp. 1–12, 2014.
- [14] Rui Xia, Yue Dong, Pieter Peers, and Xin Tong. Recovering shape and spatially-varying surface reflectance under unknown illumination. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 35, No. 6, pp. 1–12, 2016.
- [15] Michael Ashikmin, Simon Premoze, and Peter Shirley. A microfacet-based brdf generator. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 65–74, 2000.

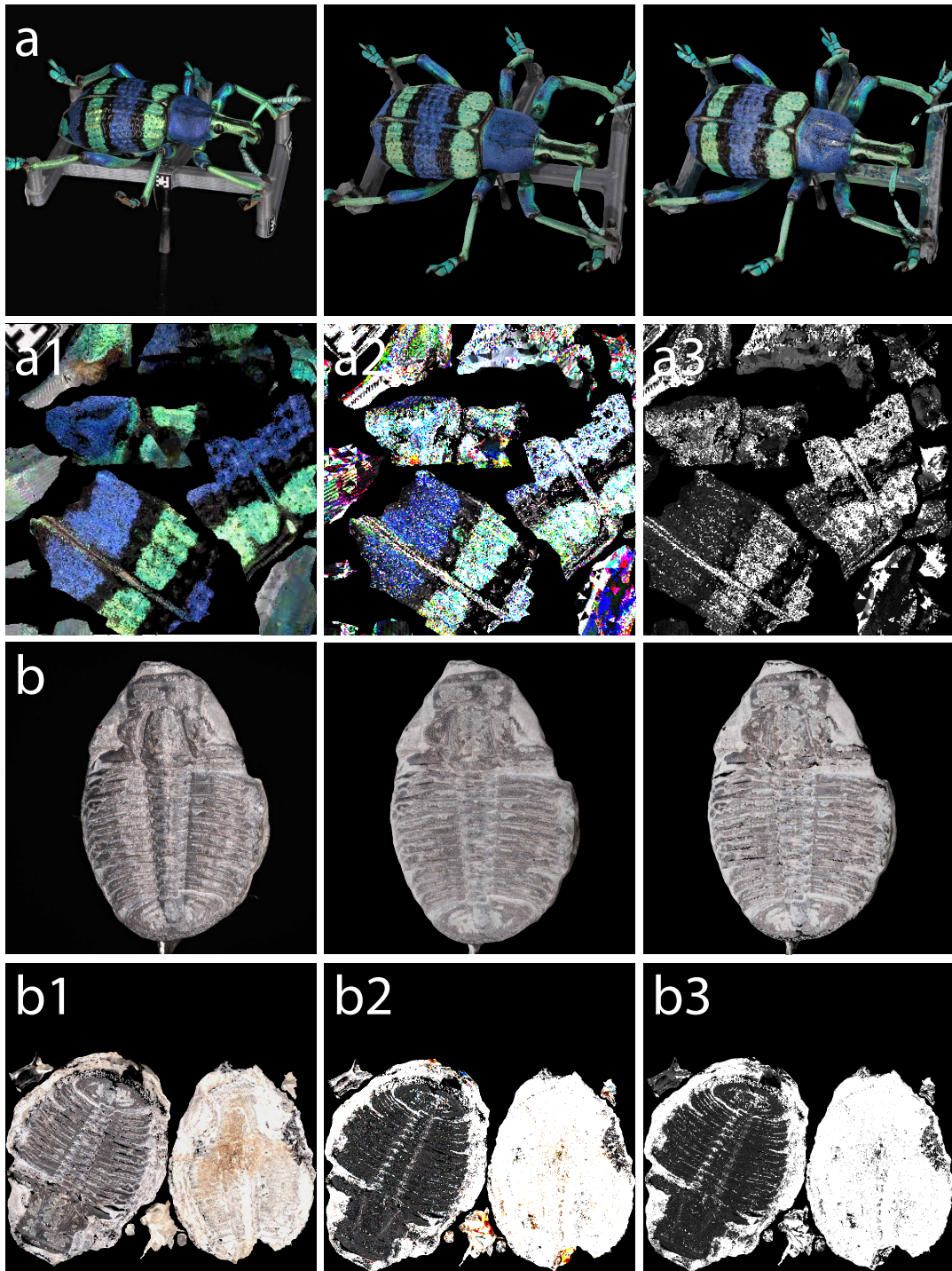


図 6 ホウセキゾウムシの標本 (a), 化石標本の復元例 (b). 各行について、左から写真、市販ソフトウェア Metashape により復元された鏡面反射を含まないモデルのレンダリング結果、提案手法により復元されたモデルのレンダリング結果である。また、各モデルについて、Diffuse Color マップ (a1, b1), Specular Color マップ (a2, b2), Roughness マップ (a3, b3) を示す。