

フォトグラメトリにおけるモデル化困難物体のモデル化手法

Modeling Methods for Difficult-to-Model Objects in Photogrammetry

○飯島 憲一^{*1}, 辻 聖晃^{*1}, 大塚 康仁^{*2}, 谷輪 祐介^{*2}, 山崎 颯斗^{*2}, 岸本 寛人^{*3}
Kenichi IJIMA^{*1}, Masaaki TSUJI^{*1}, Kojin OTSUKA, Yusuke TANIWA, Hayato YAMAZAKI^{*2} and Hiroto KISHIMOTO

^{*1} 大阪電気通信大学工学部建築学科 教授 博士 (工学)

Professor, Department of Architecture, Osaka Electro-Communication University, Dr. Eng.

^{*2} 大阪電気通信大学工学部建築学科

Undergraduate Student, Department of Architecture, Osaka Electro-Communication University

^{*3} 不二建設

Fujikensetsu Co., B. Eng.

キーワード：フォトグラメトリ, 3D モデル, モデル化困難物体, 投影

Keywords: Photogrammetry; 3D model; hard-to-model object; projection.

1. はじめに

多数枚の静止画像から精緻な 3D モデルを構築できるフォトグラメトリ技術は, 近年建築の様々な分野への適用が試みられている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾. 建築におけるフォトグラメトリでは, 複雑なファサードを持つ建築物や, さまざまな素材や形状のものが混在する都市空間など, 複雑かつ大規模な対象物 (オブジェクト) のモデル化を行うことが多い. このような場合, できるだけ人力によるモデルの修正や, 3DCG ソフトウェアを用いたモデリングによる欠損部の補完などは行わず, フォトグラメトリソフトウェア内で完結するようにモデルの構築が自動化できることが望ましい.

フォトグラメトリでは, 静止画像群を用いたピクセルパターン分析のみに基づき 3D モデルを構築するため, フォトグラメトリに向いている対象物と向いていない対象物がある. 得意な対象物は, ピクセルパターンが分析しやすいようなランダムな模様が表面にあり, かつまた撮影方向によって反射による映り込みや見え方の変化のないマットな表面を持つもの, 例えばコンクリートや木材でできた対象物である. 一方, 不得意な対象物は, 特徴的なピクセルパターンが見られない平滑で単色な表面 (平滑面) であったり, 鏡面など撮影方向によって異なる映り込みがあるもの, ガラスなどの透過物体, 多数の細い部材を組み合わせでできた格段に複雑な構成を持つもの, ほぼ同じパターンが繰り返すものなどである. 建築およびその周辺にある対象物は, フォトグラメトリが比較的得意とする表面でできているものが多いといえる. その一方で, ガラスのような透過面や, 金属板のような反射面, 白壁のような平滑面, 同じパターンの繰り返しなども, 建築を構成する重要な要素であり, このようなフォトグラメトリが不得意とする表面を含む建築物を, 自動的に高精度にモデル化できる

手法があれば, 建築分野におけるフォトグラメトリ技術の利用がいっそう促進されるものと思われる.

フォトグラメトリが不得意とする対象物のモデル化手法については, これまでに多くの研究が行われてきた. 平滑面や透過面に対しては, 対象物に細かい模様を貼り付ける方法⁷⁾や, 単色あるいはまだら模様のつく塗料を塗布する方法⁸⁾⁹⁾が提案されている. しかしながら, 建物のように広大な面積を持つ対象物の全面に模様を貼り付けたり, 塗料を塗布することは現実的ではない. そこで辻らは, 対象物の平滑面にプロジェクタによって模様を投影し, 対象物に模様を貼り付けたり塗料を噴霧したりすることなく平滑面の自動モデル化を可能とする方法を提示している¹⁰⁾. 反射面を持つオブジェクトの自動モデル化については, 偏光フィルタを用いることにより反射光と拡散光を分離する方法が提案されている¹¹⁾¹²⁾.

本稿の目的は, これまでに著者らの研究グループが実施してきた, できるだけ簡易で特殊な機器を使用せずに実施できる, フォトグラメトリによるモデル化困難物体のモデル化手法を取りまとめて広くその情報を公開し, 建築分野におけるフォトグラメトリ技術のいっそうの普及に資することにある.

2. フォトグラメトリにおけるモデル化困難物体の分類

本稿では, 以下に示すモデル化困難物体について, できるだけ簡易で特殊な機器を使用せずに実施できるモデル化手法を提示する.

(1)平滑面を持つ対象物: 既報¹⁰⁾において, プロジェクタにより 2 次元ホワイトノイズなどの模様を対象物に投影することにより, 平滑面の高精度なモデル化が可能であることを示した. 本稿では, その後に研究を実施した, 一度で

模様を投影できないような広い平滑面にも適用可能な方法¹³⁾について紹介する。

(2)複雑な構成を持つ対象物:高精度なモデル化のために必要な静止画像の枚数も数百枚～数万枚のオーダーとなり、相当に高性能なワークステーションを用いても、長時間(1日オーダー)の演算を必要とする。このような場合に、静止画像群を分割して、部分領域でモデル化を行い、それを合成することで、モデルの品質を落とすことなく、トータルでの演算時間を大幅に減少できる方法について紹介する。

(3)繰り返しパターンのある面を持つ対象物:異なる場所にある同一もしくは類似したパターンを同一のものと誤認する場合がある。本報では、直方体の各面にマーカーを貼付した立体マーカーを用いてこのような誤認を防ぐ工夫¹⁴⁾を紹介する。

なお、透過面や反射面を持つ物体のモデル化については、現在研究を継続中であり、次年度以降の建築学会大会や本シンポジウムにて発表したいと考えている。

3. 平滑面を持つ広い対象物のモデル化

建築スケールの広い平滑面に対しては、1台のプロジェクタで全体に模様を投影することはほぼ不可能である。そこで本稿では、1台の小型プロジェクタで模様を部分的に投影することを、模様を投影させる場所を移動しながら繰り返すことによって、建物スケールの大きさを持つ平滑面の3Dモデルが、フォトグラメトリによって構築可能であることを示す。手順の概要を以下に示す。

(1)対象とする平滑面の一部に、プロジェクタにより模様を投影し、模様の投影されていない周辺部も含めて、通常のフォトグラメトリと同じ方法で撮影する。対象とする平滑面全体を撮影する必要はない。

(2)模様を投影する場所を移動して(1)を実行する。平滑面全体に模様を投影されるように、これを繰り返す。

(3)(1)～(2)で撮影した画像と、模様を投影していない状態で平滑面を撮影した画像をすべて使用して、フォトグラメトリによりソリッドモデルを構築する。その後、必要であればソリッドモデルの表面にテクスチャーを構築する。

手順の有効性を示すために、建物の内壁部分に適用した事例を示す。小型のモバイルプロジェクタを用い、壁面を6分割して2次元ホワイトノイズ模様を投影した。この模様を投影した壁面を、画角を変えて10枚程度をスマートフォンのカメラで撮影し、全部で100枚程度の画像を用いて3Dモデル化を行った。

図2は、投影する模様が濃すぎた(プロジェクタが明るすぎた)事例である。模様を投影している場所がわかりやすいように、画像には枠を書き入れている。投影する模様が濃すぎると、うまく3Dモデルが構築できないことがわかる。これは、模様が投影されている部分の特徴点のみか

らポイントクラウドが構築されてしまい、模様を移動しても、模様が投影された部分は同じ場所であると認識されてしまうことが原因であると思われる。逆に、投影する模様が薄すぎた(プロジェクタが暗すぎた)場合には、壁面の特徴点を抽出できず、一部の壁面に穴が空いたような3Dが構築された。図2は、投影する模様がちょうどよい濃さであった場合であり、壁面まで含めて対象領域全体が適切にモデル化できていることがわかる。



(a)模様を投影している様子 (b)構築されたモデル

図1 投影する模様が濃すぎた場合



(a)模様を投影している (b)構築されたモデル

図2 投影する模様が適切な濃さであった場合

4. 複雑な構成を持つ対象物のモデル化

大規模モデルをモデル分割して、それぞれをモデリングしたものを合成する手法の有用性を示す。検証用モデルは、鉄骨造3階建てであり、フォトグラメトリが不得意な、繰り返しパターンとなる折板屋根が一部に用いられている。

本建物をフォトグラメトリで3Dモデル化するに際し、上空からドローンで写真撮影を行った。撮影された写真枚数は340枚である。この340枚の写真から生成された3Dモデルを「分割なしモデル」と称する。

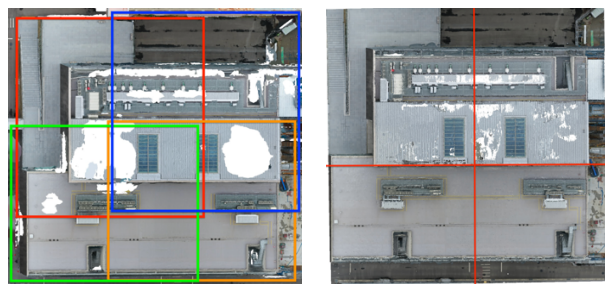
当該建物を撮影した写真を、図3に示すように4つの部分に分類し、それぞれの部分の写真群ごとに3Dモデル化を行い、部分ごとに作成された3Dモデルを全体モデルとして合成する方法を「単純4分割モデル」と称する。

上記の単純4分割モデルでは、分割線近傍で写真枚数が少なくなり、完成モデルの精度が低くなることが懸念されるため、同じ写真が隣り合う分割モデルで重複して採用するような検証を行った。本方法により生成された3Dモデルを「重複4分割モデル」と称する。

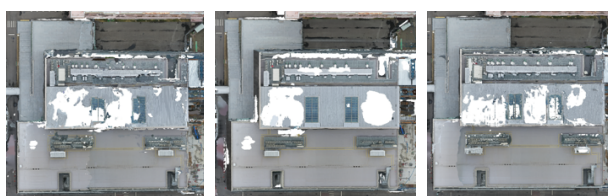
図4に各完成モデルを示す。いずれのモデルにおいても、繰り返しパターンの折板屋根の部分で欠損が生じている。分割なしモデルに比べ、単純4分割モデルは折板屋根中央の欠損が無くなっているが、その両外側での欠損が大きくなっている。分割なしモデルと重複4分割モデルを比較す

ると、欠損量も同程度である。単純 4 分割モデルと重複 4 分割モデルを比較すると、最も重複する部分となる中央で単純 4 分割モデルには欠損が生じておらず、重複させた効果が乏しい結果となった。

表 1 にそれぞれの計算時間を記す。写真枚数が多いほど計算時間が長くなる。分割なしモデルと単純 4 分割モデルを比較すると後者は約 1/3 の時間短縮になった。



(a)単純 4 分割 (b)重複 4 分割
図 3 モデルの分割範囲



(a)分割なし (b)単純 4 分割 (c)重複 4 分割
図 4 生成されたモデル

表 1 計算時間と写真枚数

	分割なし	単純 4 分割	重複 4 分割
左上		1時間1分30秒 (96枚)	1時間11分32秒 (108枚)
右上		42分1秒 (94枚)	54分23秒 (115枚)
左下		39分21秒 (77枚)	1時間15分38秒 (123枚)
右下		34分7秒 (73枚)	59分4秒 (113枚)
合計	5時間42分43秒 (340枚)	1時間56分59秒 (340枚)	4時間20分37秒 (459枚)

5. 繰り返しパターンのある面を持つ対象物のモデル化

繰り返しパターンがある対象物では、写真のアライメントに失敗することが多く、繰り返しパターンを含む部分の 3D モデルが適正に構築できないという問題がしばしば生じる。この問題点を克服するための一つの方法として、各々が異なったビット情報を持つ「マーカー」をオブジェクト周辺に配置し、マーカーの違いによって写真のアライメントの誤りを防ぐ方法があり、多くのフォトグラメトリのソフトウェアには、マーカーを印刷したり、画像に含まれるマーカーを検出したりする機能が組み込まれている。

建築のような大きなオブジェクトでは、地面に平面マーカーを設置すると、画像の撮影範囲にマーカーが入らなかったり、マーカーの面と撮影面の角度が大きく、マーカーが識別しにくい画像となる場合がある。そこで、立方体の

各面にマーカーを添付した立体マーカーを提案した¹⁴⁾。図 5 に平面マーカーと立体マーカーの比較を示す。



(a)斜めから見た場合 (b)ほぼ水平から見た場合

図 5 平面マーカーと立体マーカー

繰り返しパターンを持つ建物壁面を、立体マーカーを設置した場合と設置しない場合とでドローンにより撮影し、両ケースでの写真のアライメントと構築されたモデルの精度を比較して、立体マーカーの有効性を検証した。対象とした建物の壁面は、ほぼ同形状のパンチングメタルをならべて形作られており、フォトグラメトリが苦手とするファサードとなっている。

撮影は 2 回にわけて実施した。1 回目は立体マーカーを設置せず、2 回目に立体マーカーを設置して同位置を撮影した。なお、経路を設定したドローンによる手動撮影であるため（一部経路は手動操縦）、1 回目と 2 回目とは、各写真の撮影位置は完全には同じではない。

立体マーカーを使用せずに撮影した画像から構築された 3D モデルを図 6 に示す。図中には、アライメントされた写真を四角い枠で示している。このモデルを構築する際の写真のアライメントでは、使用した 59 枚の画像のうち、10 枚で以下の 2 種類のいずれかの失敗が生じた：(a)明らかに誤った位置に写真がアライメントされる(7 枚)；(b)写真がアライメントされない(3 枚)。図 6 では、図中に○で囲んだ箇所に多くの写真が重複してアライメントされているが、実際の撮影はほぼ均等間隔で行っており、□で囲んだ箇所に本来はアライメントされるべき写真が、アライメントされていない。図 7 に、(a)タイプでアライメントを失敗した写真の例を示す。異なる場所を撮影した写真であるが、ほぼ同一に見えるため、同じ場所の写真であると誤ってアライメントされたものと考えられる。この 2 つの失敗が生じた結果、一部の壁面において、画像が 2 重になったような 3D モデルが構築された。

立体マーカーを使用して撮影した画像から構築された 3D モデルを図 8 に示す。図中には、アライメントされた写真を四角い枠で示している。立体マーカーは、20cm 四方のダンボール製立方体の各面に、フォトグラメトリで使用するソフトウェアの標準機能により出力した、それぞれ異なるビット情報を持つ平面マーカーを貼付したものを合計 9 個使用した。ただしそのうちの 3 個は、撮影中に強風により場所が移動したが、今回の事例ではマーカーの位

置が異なる写真も含めて 3D モデルの構築を行った。

このモデルを構築する際の写真のアライメントでは、使用した 94 枚の写真のうち、2 枚がアライメントされなかったが、それ以外のすべての写真が、図 8 でほぼ均等に四角い枠が並んでいることからわかるように、正しい場所にアライメントされていた。ただし、使用したソフトウェアの標準機能であるマーカーの自動検出機能では、立体マーカーは検出できなかった。このことから、立体マーカーはソフトウェア内でのマーカーとしての認識はできなかったものの、写真の撮影場所を特徴づけるための「模様」としては十分に機能しているといえる。

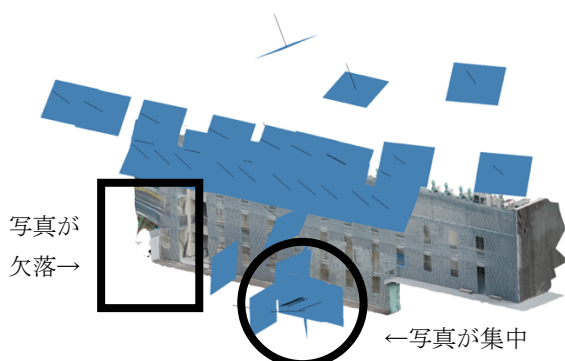


図 6 立体マーカーを使用せずに撮影した写真のアライメント状況と、構築された 3D モデル



図 7 アライメントに失敗した写真の例

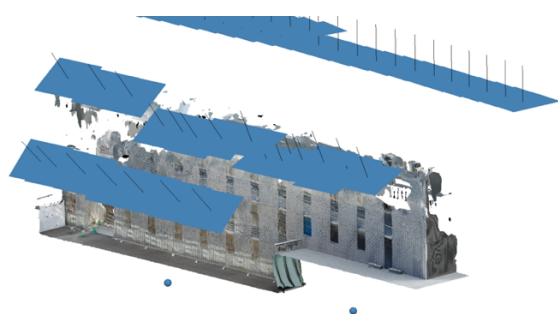


図 8 立体マーカーを使用して撮影した写真のアライメント状況と、構築された 3D モデル

6. さいごに

フォトグラメトリによる 3D モデル化が困難とされている物体について、できるだけ簡易で特殊な機器を使用せずに実施できるモデル化手法を紹介した。

(1)平滑面に対しては、ホワイトノイズなどのランダムな模様を投射することで、高精度なモデル化が可能となる。

(2)大規模なモデルに対しては、モデルを分割して 3D モ

デルを作製し、最後にそれを合成することで、計算時間を大幅に短縮できる。

(3)繰り返しパターンを持つモデルに対しては、立体マーカーを使用することで、アライメントの失敗を防ぐことができる。

【参考文献】

- 1) 野口淳：三次元データの可能性-活用と課題-，奈良文化財研究所，デジタル技術による文化財情報の記録と利活用 2，pp.59-70，2020 年
- 2) 井上和哉，福田知弘，矢吹信喜，道川隆士，Ali Motamedi：フォトグラメトリによる Diminished Reality を用いた構造物解体撤去後の景観検討システム，日本建築学会近畿支部研究発表会報告集，pp.153-156，2016 年
- 3) 坂上肇，池田雄一：建築工事における 3 次元点群データの活用と効果の検証 その 2 新築工事における検証事例，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1025-1026，2016 年
- 4) 近藤広隆，太幡英亮：フォトグラメトリを用いた空間の調査に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.577-578，2019 年
- 5) 飯島憲一，北澤誠男，辻聖晃，永野康行：フォトグラメトリにより作成した 4D 建物モデルの活用に関する研究（その 1 撮影方法とモデル品質の関係），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.151-152，2021 年
- 6) 藤山真美子：ドローンによる都市・建築のフォトグラメトリがもたらす空間デザインの可能性，第 4 回建築ドローンシンポジウム，建築会館，2023 年 8 月 4 日
- 7) <https://oakcorp.net/agisoft/faq/>
- 8) <https://tascube.com/archives/654>
- 9) <https://www.3dscanstore.com/blog/3d-scanning-reflective-objects>
- 10) 辻聖晃，中嶋響，飯島憲一，北澤誠男：フォトグラメトリにおける模様の投影による平滑面の自動モデル化の検証，第 44 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，pp.197-202，2021 年 12 月
- 11) I. Ihrke1, K. N. Kutulakos, H. P. A. Lensch, M. Magnor, and W. Heidrich：Transparent and Specular Object Reconstruction, *COMPUTER GRAPHICS forum*, Vol.29, pp.2400-2426, 2010
- 12) S. K. Nayar, X. S. Fang, and T. Boult：Removal of Specularities using color and polarization, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (New York, NY, USA), pp. 583-590, 1993
- 13) 辻聖晃，飯島憲一：フォトグラメトリにより作成した 4D 建物モデルの活用に関する研究 その 3 模様の投影による平滑な壁面の自動モデル化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.15-16，2022 年
- 14) 飯島憲一，辻聖晃：フォトグラメトリにより作成した 4D 建物モデルの活用に関する研究 その 4 立体マーカーを用いた繰り返しパターンを持つ建物壁面の効率的モデル化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.17-18，2022 年

謝辞 本研究は、2022 年度文部科学省デジタル活用高度専門人材育成事業として採択された「デジタルと専門分野の掛け合わせによる産業 DX をけん引する高度専門人材育成事業」の一部として、大阪電気通信大学情報学研究所との共同研究により実施したものである。ここに記して謝意を表する。