

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 Verification of Automatic Modeling of Smooth Surfaces using Pattern Projection in Photogrammetry

○辻 聖晃^{*1}, 中嶋 響^{*2}, 飯島憲一^{*1}, 北澤誠男^{*3}
Masaaki TSUJI^{*1}, Hibiki NAKAJIMA^{*2}, Kenichi IJIMA^{*2} and Masao KITAZAWA^{*3}

*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 大阪電気通信大学工学部建築学科 准教授

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

Summary: It is well known that it is very difficult to model automatically by photogrammetry the surfaces which have almost the same color information in the area to be modeled, and the reflective and transmissive surfaces. In this paper, the term "smooth surface" is used to refer to surfaces that have characteristics that photogrammetry is not good at, such as those described above. The objectives of this paper are as follows; 1) show that photogrammetric modeling of smooth surfaces is possible by projecting patterns onto smooth objects with a projector; 2) verify the accuracy of the modeling depending on the difference of the projected patterns and to clarify the characteristics of appropriate patterns to be projected on a building; 3) quantify the appropriate pattern. The conclusions obtained are as follows: (1) If a 3D model is constructed by projecting a pattern onto a smooth surface, the model will have irregularities corresponding to the pattern. Therefore, depending on the pattern and roughness of the pattern, a 3D model with low accuracy may be constructed; (2) When a black-and-white image created from white noise is projected, the smoothness is hardly affected by the roughness, and the smooth surface can be modeled with a high accuracy of less than 1/1000.

キーワード: フォトグラメトリ; 3D モデル; 平滑面; 自動モデル化; パターン投影

Keywords: Photogrammetry; 3D model; smooth surfaces; automatic modeling; pattern projection.

1. はじめに

静止画像群の視差情報を用いて 3D モデルを構築するフォトグラメトリ技術は、遺跡調査・文化財調査での活用が急速に進んでいる¹⁾。また近年、建築の分野においても、多方面での活用が検討されている²⁻⁴⁾。筆者らは、建物の建設過程や竣工後の設備更新、用途変更などの建物の経時変化を含む「4D 建物モデル」をフォトグラメトリで作成し、SDGs の達成に向けた、建物資源の効率的な活用や安全管理に役立つための基礎的な研究を進めている^{5,6)}。

フォトグラメトリは、複数の静止画像間で共通するピクセルパターンを分析して画像上に点群を配置し、画像の撮影方向の違いによって生じる視差情報を用いて、空間内の点群 (ポイントクラウド) の座標を推定する技術である。このポイントクラウドにメッシュを張ることによって、対象物表面の 3D モデルを構築することが可能となる。3D レーザースキャンによる 3D モデル構築に比べて、使用するデータ収集機材が安価でよいこと (スマ

ートフォンのカメラでも十分)、CPU パワーを比較的必要としない (建物レベルの 3D モデル構築でもノートパソコンで十分) といった利点がある。一方、3D レーザースキャナや赤外線測距計とは異なり、撮影機材からの距離を直接計測しているわけではなく、あくまでも画像情報だけを用いるため (注: 撮影機材の位置や方向の情報、レーザースキャナ等の直接距離を計測できる機材からの情報の併用は可能である)、モデル化の対象領域内で色彩情報がほぼ同一な面 (同一色の平滑なボードで構成された壁など) や、撮影方向によって領域内のピクセルパターンが異なる反射面や透過面は、フォトグラメトリでの自動モデル化は極めて困難であり、自動的に構築された 3D モデルのポリゴン修正や別途 3D CAD ソフトで作成した 3D モデルとの合成が必要となる。なお、以上に示したような、フォトグラメトリが苦手とする特性を持つ面のうち、対象領域内で色彩情報がほぼ同一な面 (平面とは限らない) のことを、本稿では「平滑面」と呼ぶこととする。

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こと⁷⁾や、単色あるいはまだら模様のつく塗料を塗布すること^{8,9)}が有効であるとされている。塗装後一定時間すれば塗膜が昇華して塗装が消える、3D スキャン専用塗料も市販されている。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。また、文化財のように、対象物表面への貼付や塗装が不可能な場合もある。そこで本稿では、平滑面を含む建物のフォトグラメトリによる自動モデル化への適用を前提として、適用対象物の平滑面にプロジェクタによって模様を投影し、フォトグラメトリでは一般に困難な平滑面の自動モデル化を可能とする方法を提示し、その有効性を検証する。著者の知る限り、模様の投影によって平滑面をフォトグラメトリにより自動モデル化する試みは、未だ行われていない。

なお、本稿では対象としていないが、透過面や反射面を持つオブジェクトのレーザースキャンやフォトグラメトリによる3Dモデル構築については、多くの研究がある¹⁰⁾。例えば、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⁾。

本稿の目的は以下に示すとおりである。

1)平滑面を持つ対象物にプロジェクタで模様を投影することにより、フォトグラメトリによる平滑面の自動モデル化が可能であることを示す。

2)投影する模様の違い(パターン、粗度など)によるモデル化の精度を検証し、建物に投影する適切な模様の特徴を明らかにする。

3)適切な模様の定量化を試みる。

2. 模様を投影することによる平滑面の自動モデル化

2.1. 模様を投影しない場合の平滑面とそうでない面のモデル化の違い

平滑面に模様を投影することの有効性を示すため、まずここでは、平滑面を持つ対象物と、そうでない面を持つ対象物について、フォトグラメトリによって構築される3Dモデルの品質の違いを示す。

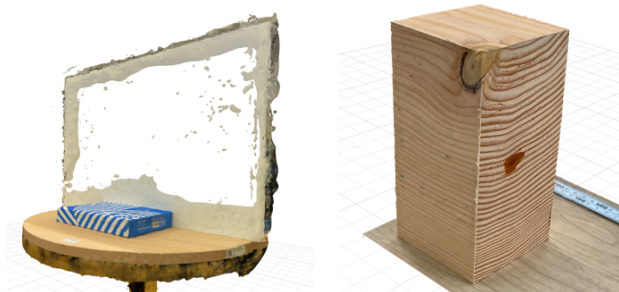
平滑面を持つ対象物としては、図1(a)に示す、スチレンボード(805mm×505mm、厚さ5mm)を机の上に設置したものを取り上げる。平滑でない面を持つ対象物としては、図1(b)に示す木材のブロック(90mm×90mm×180mm)を取り上げる。図1からわかるように、スチレンボードは白一色であり、ピクセルパターンがほぼ認識できないのに対し、木材のブロック表面には、木目模様が表れており、はっきりとしたピクセルパターンが認識できる。この2つの対象物について、iPhone 12で撮影した静止画像群(スチレンボードは24枚、木材ブロックは

41枚)を用いて、フォトグラメトリソフトウェア(MetaShapePro1.7.3)による3Dモデルの構築を行った。3Dモデルの構築に際しては、モデル化領域の調整のみ手動で行い、モデル改善のための調整作業(ポリゴン平滑化、穴埋めなど)は行っていない。図2に、構築された3Dモデルにテクスチャーを貼り付けた画像を示す。図1とほぼ同角度となるようにモデルを回転させている。

図2から、木材ブロックは、表面の微妙な凹凸も再現された極めて精緻な3Dモデルが構築できていることがわかる。一方、スチレンボードは、周囲との境界部のみがモデル化され、それ以外の部分は「穴」となってモデル化できていないことがわかる。このように、ピクセルパターンがほとんど認識できないような、色彩情報が領域内でほぼ同一の面は、フォトグラメトリでの自動モデル化は極めて困難であることがわかる。



(a)スチレンボード (b)木材のブロック
図1 3Dモデル化の対象物



(a)スチレンボード (b)木材のブロック
図2 3Dモデル(テクスチャー貼り付け後)

2.2. 模様を投影する効果

次に、模様を投影することによるモデル品質向上の効果を示すため、図1(a)に示したスチレンボードに小型のプロジェクタ(70lm, 854×480ピクセル、コントラスト比1:800, DLP方式)で模様を投影して静止画像群を撮影し、2.1節と同一条件で3Dモデル化した事例を示す。

投影する模様は、カーペットタイルをiPhone 12で撮影し、これをグレースケール画像に変換したものを使用した。図3(a)に投影した模様を、図3(b)に模様を投影した状態で撮影した画像を示す。スチレンボード全体に図3(a)で示した模様が投影されるように、プロジェクタの

位置を調整した。なお、投影する模様の違いや粗度による効果は次章で示す。図 3(c)には、模様を投影して撮影した静止画像群 (14 枚) を画像ソースとして用いて構築したテクスチャー付き 3D モデルを示す。このモデルは、テクスチャーの素材として、模様を投影して撮影した静止画像群を用いているため、3D モデルにも投影した模様がそのまま表れていることがわかる。そこで、図 3(d)には、模様を投影して撮影した静止画像群と模様を投影せずに撮影した静止画像群の両方 (総数 38 枚) を画像ソースとして用いて 3D モデルを構築したうえで、テクスチャー貼り付け時には模様を投影して撮影した静止画像群を無効化して構築されたテクスチャー付き 3D モデルを示す。図 3(c)と図 3(d)の比較より、模様を投影した画像と投影していない画像の両者を用いて 3D モデルを構築し、テクスチャー貼り付けの際には模様を投影した画像を無効化することによって、模様が投影されていないテクスチャーが貼り付けられた 3D モデルを構築することが可能であることがわかる。なお、模様を投影せずに撮影した画像群のみ (22 枚) を使用した場合には、図 2(a)に示すように平滑面に大きな穴が空いたようなモデルが構築される。

図 4 には、図 3(c)および図 3(d)に示した 3D モデルにテクスチャーを貼り付ける前のソリッドモデルを示す。また図 5 には、図 4 に示したソリッドモデルの陰影から判断して、3D モデルの表面に最も大きな応答が生じていると思われる箇所 (図 4 の左上隅部分) を切り出し、これを表面に対して平行な方向から見たものを示す。ただし、図 5 に示したモデルの範囲は、図 4 に示したスチレンボードの全幅の 1/10 である。

図 3(c)より、スチレンボードに模様を投影することにより、図 2(a)に示すような「穴」ができることなく、平滑な面を持った 3D モデルが構築できていることがわかる。一方、図 4 より、スチレンボード表面には、明らかに投影した模様の濃淡に対応する微細な凹凸が生じていることがわかる。

図 5 に示したモデルの凹凸は、モデルの全幅 (スチレンボードの全幅の 1/10) に対して約 1/20 の大きさがある。このことから、モデル化の対象としたスチレンボードの全幅に対しては、約 1/200 の精度で平滑面をモデル化できているといえる。なお、本稿では、この方法で定量化した精度を「平滑度」と呼ぶこととする。

上記のことから、投影する模様のパターンと濃淡が、構築される 3D モデルの品質に影響することが予想される。そこで次章では、平滑面に投影する模様のパターンが、構築される 3D モデルの品質に与える影響を示し、対象物に対して適切な模様の特徴を明らかにする。

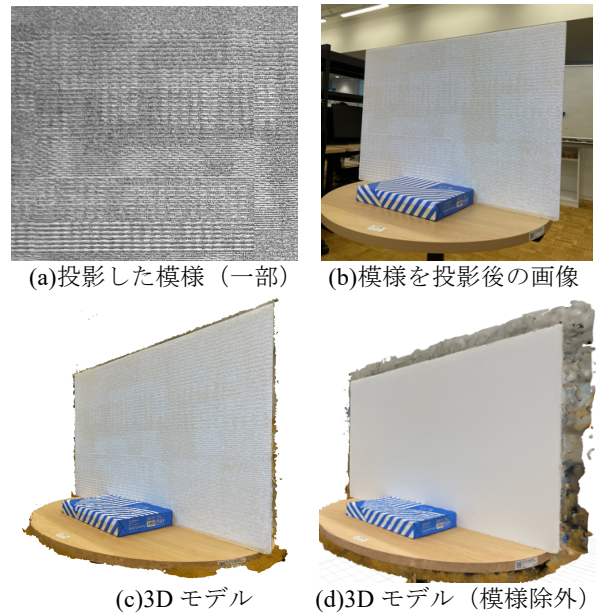


図 3 平滑面を持つ対象物への模様の投影

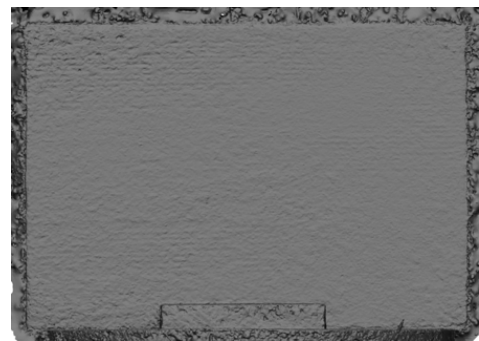


図 4 模様を投影して構築されたソリッドモデル



図 5 モデル化された平滑面の凹凸 (全幅の 1/10)

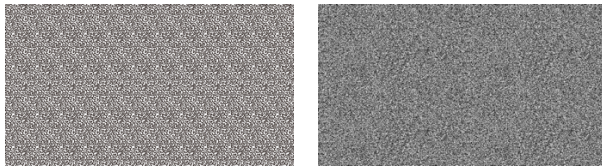
3. 投影する模様の違いが 3D モデルの品質に与える影響

3.1. 模様のパターンの違いが与える影響

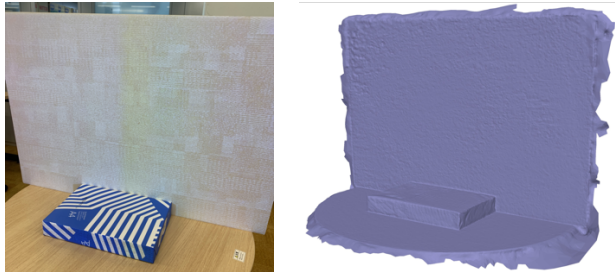
2.2 節で示した予備的に行った検討より、フォトグラメトリにより構築されるソリッドモデルには、投影する模様のパターンに類似した凹凸が生じることがわかった。そこで、模様のパターンによるモデル化の精度の違いを検討するために、以下の 3 種類のパターンを投影したときにそれぞれ構築されるソリッドモデルの比較を行った。

- a)カーペットタイル模様 (図 3(a))
- b)唐草模様
- c)ホワイトノイズ

投影に用いた b)と c)の模様を図 6 に示す。なお、カーペットタイル模様はグレースケール画像、唐草模様とホワイトノイズは白黒画像である。



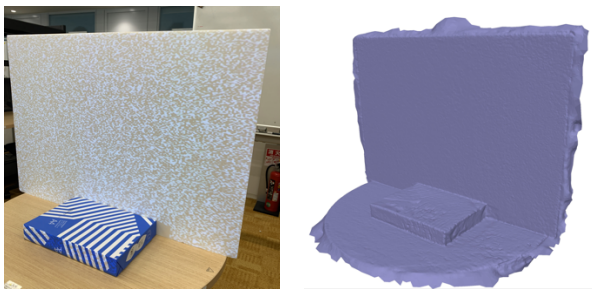
(a)唐草模様 (b)ホワイトノイズ
図6 投影に用いた模様



(a)カーペットタイル模様



(b)唐草模様



(c)ホワイトノイズ

図7 模様が投影された様子とソリッドモデル

a)~c)の3つのパターンのそれぞれについて、オリジナル画像を縮小して繰り返すことにより、粗度の異なる投影用画像を3ないし4種類作成し、これを図1(a)に示したスチレンボードに投影して、2.2で示した手順により3Dモデルを構築した。図7に、それぞれのパターンについて、構築された3Dモデルの平滑度がもっとも良好であった粗度のものを投影した様子の写真と、構築されたソリッドモデルを示す。

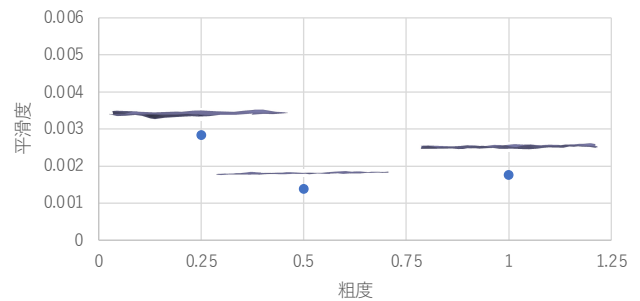
いずれのパターンにおいても、良好な平滑度をもったソリッドモデルが構築できているものの、投影したパターンに類似した凹凸が生じていることがわかる。このことから、模様のパターンの工夫により平滑面の凹凸を完全にゼロにすることは困難であるように思われる。

なお、本稿で示した模様の他にも、市松模様、格子模

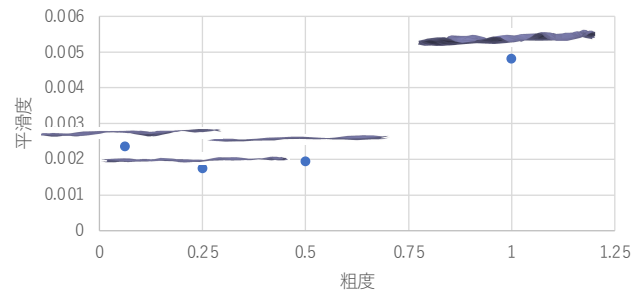
様でも同様の検討を実施したが、構築されたソリッドモデルには、投影した模様に対応する顕著な凹凸が生じたため、このようなランダムさに欠ける単純なパターンを繰り返す模様は、平滑面に投影する模様としては適切ではないと思われる。

3.2. 模様の粗度の違いが与える影響

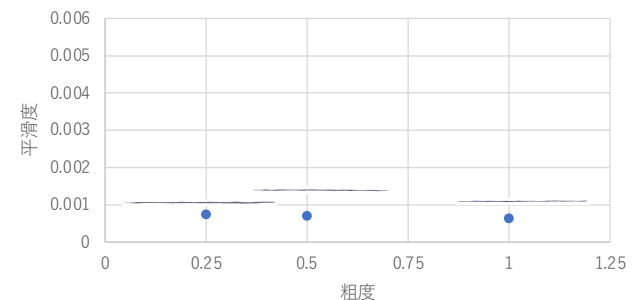
オリジナルの画像の粗度を1とし、これを50%（面積は25%）に縮小して4枚繰り返した画像の粗度を0.5、というように模様の粗度を定義する。また、構築されたモデルの平滑度は、ソリッドモデルの幅に対する凹凸の比率として定義する。平滑度が小さいほどモデル化の精度が高いことになる。3.1節で示した3種類のパターンについて、模様の粗度と平滑度の関係を図8に示す。図中には、平滑度を測るためにソリッドモデルから切り出した部分（スチレンボードの全幅の1/10）も示す。



(a)カーペットタイル模様



(b)唐草模様



(c)ホワイトノイズ

図8 模様の粗度と平滑度の関係

図8(a), (b)より、カーペットタイル模様と唐草模様については、平滑度を最小、すなわちモデル化の精度が最高になるような粗度が存在することがわかる。これに対し、図8(c)から、ホワイトノイズでは、粗度に関わらず

平滑度はほぼ一定であることがわかる。これは、ホワイトノイズが原理的には拡大や縮小に影響を受けないパターンであることと関係があるように考えられる（ただし実際にはデジタル画像であるので、拡大や縮小の影響を受け、縮小した場合にはモノクロ画像ではなくグレースケール画像となる）。平滑度の最小値は、カーペットタイル模様が 0.0014 (1/700) 程度、唐草模様が 0.0018 (1/550) 程度、ホワイトノイズが 0.0008 (1/1250) 程度であり、ホワイトノイズを投影したときに最も高精度のモデルが構築できていることがわかる。

以上の結果から、フォトグラメトリによる平滑面のモデル化には、粗度の影響をほとんど受けず、かつ、1/1000 以上の平滑度が得られて精度も高い、ホワイトノイズ画像を投影することが最も適しているといえる。

4. 投影に適切な模様の定量化の試み

本節では、3 章で示したように、なぜホワイトノイズ画像の投影がフォトグラメトリによる平滑面のモデル化に適しているかを、模様が投影された画像のフーリエ変換による定量化で明らかにできないかどうかを試みる。

4.1.2 次元画像のフーリエ変換

2 次元画像を定量化する方法の一つに、2 次元フーリエ変換がある¹²⁾。画像をフーリエ変換することにより、画像が持つ周期性や対称性をフーリエスペクトルで表現した 2 次元画像を得ることができる。

$N \times N$ ピクセルの画像の第 x 行第 y 列の画素の明るさ（色強度）を $f(x, y)$ で表すと、 $f(x, y)$ の 2 次元離散フーリエ変換 $F(u, v)$ は以下の式で表される。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[-\frac{2\pi i (ux + vy)}{N} \right]$$

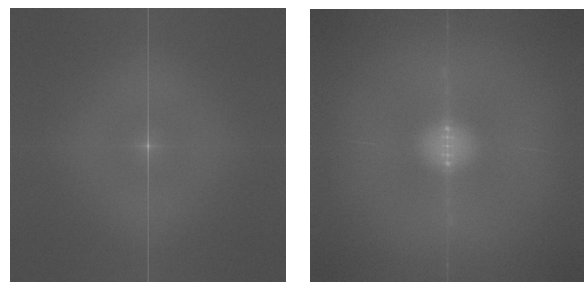
ここで i は虚数単位である。 u と v は画像周波数を表す。 $F(u, v)$ は複素数となり、 $F(u, v)$ の絶対値 $|F(u, v)|$ はフーリエ振幅スペクトル、その自乗 $|F(u, v)|^2$ はパワースペクトル、位相角 $\arg(F(u, v))$ はフーリエ位相スペクトルと呼ばれる。1 次元データのフーリエ変換と同様に、画像のような 2 次元データのフーリエ変換にも、高速フーリエ変換 (FFT) の手法が利用できる。ただし、画素数 N は 2 の累乗である必要がある。画像の FFT が可能な画像処理ソフトは数多く市販・配布されており、本稿の解析では、オープンソースソフトウェアである ImageJ Ver.2.1.0¹³⁾ (MacOS 版) を使用した。

4.2. フォトグラメトリに適した画像のフーリエ変換

まず最初に、平滑面を全くモデル化できなかった静止画像である図 1(a) と、高精度にモデル化 (平滑度 0.005) できた静止画像である図 3(b) のそれぞれについて、スチレンボードに該当する箇所から切り出した同じ大きさ (1024 × 1024 ピクセル) の画像 (以下では「部分画像」と

称する) を 32 ビットグレースケールに変換した画像に対して FFT を行った結果を図 9 に示す。図では 8 ビットグレースケールの濃淡でパワースペクトルが、白いほど大きく、黒いほど小さくなるような対数スケールで示されている。画像の中央に低周波成分、画像の周囲に高周波成分が示されている。なお、投影した模様そのものではなく、模様が投影された画像のモデル化対象領域から切り出した部分画像のフーリエ変換画像を比較するのは、フォトグラメトリでは模様が投影された画像を基に 3D モデルを構築するため、投影された模様のコントラストやフォトグラメトリを行う画像に含まれるノイズの影響も含めて比較を行うためである。

図 9 より、フォトグラメトリでモデル構築ができなかった画像 (図 1(a)) に比べ、模様の投影によってモデル構築が可能となった画像 (図 3(b)) では、より広い周波数領域に画像のパワースペクトルが含まれていることがわかる。これは、切り出された部分画像 (モデル化対象領域) に「適度な乱雑さ」があることを意味している。



(a)図 1(a)より切り出し (b)図 3(b)より切り出し
図 9 スチレンボード部分の部分画像の FFT 画像

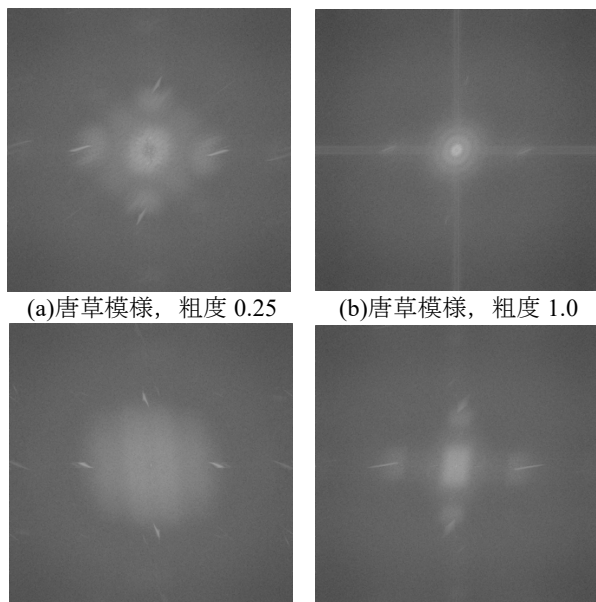
次に、模様のパターンや粗度の違いが FFT 画像にどのように反映されるかを見てみる。図 10 に、唐草模様の粗度 0.25 (平滑度 0.0018) と粗度 1.0 (同 0.0048)、ホワイトノイズの粗度 0.25 (同 0.0008) と粗度 1.0 (同 0.0007) をそれぞれ投影した画像から、上記と同様の方法で部分画像を切り出し、FFT を行った結果を示す。

唐草模様で平滑度の良好な粗度 0.25 のもの (図 10(a)) と平滑度が劣る粗度 1.0 のもの (図 10(b)) を比較すると、平滑度の良好な粗度の模様を投影した部分画像の方が、より広い周波数領域に画像のパワースペクトルが含まれていることがわかる。

ホワイトノイズを投影した部分画像の FFT 画像 (図 10(c), (d)) にはやや違いがみられるものの、平滑度はほぼ同等であった。一方、唐草模様で粗度 0.25 の場合の FFT 画像 (図 10(a)) とホワイトノイズで粗度 1.0 の場合の FFT 画像 (図 10(d)) には、中央部以外にもパワースペクトルの大きな広い領域が見られるという共通の特徴があるものの、平滑度には有意な差が見られた。

以上のことから、模様を投影した部分画像の FFT 画像

は、その画像がフォトグラメトリに適した画像であるかどうかの一つの判断基準にはなるものの、FFT 画像の特徴と構築された 3D モデルの精度との間に定量的な関係性を見出すことは、今回の検討の範囲内では困難であると思われる。



(c)ホワイトノイズ, 粗度 0.25 (d)ホワイトノイズ粗度 1.0
図 10 模様のパターンと粗度が異なる画像の FFT 画像

5. 結論

フォトグラメトリでの 3D モデル化が困難とされている平滑面に対して、プロジェクタにより模様を投影することにより、高い平滑度で 3D モデル化が可能となることを示した。得られた結論は以下の通りである。

(1)模様を平滑面に投影して 3D モデルを構築すると、3D モデルには模様のパターンに対応した凹凸が生じる。このため、模様のパターンや粗度によっては、精度の低い 3D モデルが構築される可能性がある。

(2)ホワイトノイズから作成したモノクロ画像を投影した場合には、粗度にほとんど影響を受けずに、平滑度が 1/1000 以下の高精度で平滑面のモデル化が可能である。

なお、模様を投影した画像と投影していない画像の両者を用いて 3D モデルを構築し、テクスチャー貼り付けの際には模様を投影した画像を無効化することによって、模様が投影されていないテクスチャーが貼り付けられた 3D モデルを構築することが可能である。

今後の検討課題としては、建物のような巨大な対象物への適用可能性の検討や、必要な投影画像の明るさの定量化が挙げられる。

[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) 辻聖晃, 北澤誠男, 飯島憲一, 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 2 変形前後の 3D モデルからの残留変形量推定), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.153-154, 2021 年
- 7) <https://oakcorp.net/agisoft/faq/>
- 8) <https://tascube.com/archives/654>
- 9) <https://www.3dscanstore.com/blog/3d-scanning-reflective-objects>
- 10) 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
- 11) S. K. Nayar, X. S. Fang, and T. Boulton: 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
- 12) 岡部弘高, 石田謙司, 瀧正二, 原一広: 顕微鏡画像の波数解析, 九大中央分析センターニュース 11, No.4, pp.2-8, 1994 年
- 13) <https://imagej.nih.gov/ij/>

謝辞 本研究は、大阪電気通信大学情報学研究所の特定共同研究助成による。また、長谷川薫氏(ドローンアーキテクチャー)、辻奈津子氏(同)より有用な助言を得た。