(57) 自然造形模様の投影による SfM 点群データの高精度化に関する一考察

庄司　康太[1]・今井　龍一[2]・中村　健二[3]・塚田　義典[4]・
梅原　喜政[5]・新名　恭仁[6]

[1]学生会員　法政大学大学院　デザイン工学研究科（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: kota.shoji.7h@stu.hosei.ac.jp

[2]正会員　法政大学教授　デザイン工学部（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: imai@hosei.ac.jp

[3]正会員　大阪経済大学教授　情報社会学部（〒533-8533 大阪府大阪市東淀川区大隅 2-2-8）
E-mail: k-nakamu@osaka-ue.ac.jp

[4]正会員　摂南大学准教授　経営学部（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8）
E-mail: yoshinori.tsukada@kjo.setsunan.ac.jp

[5]正会員　摂南大学講師　経営学部（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8）
E-mail: yoshimasa.umehara@setsunan.ac.jp

[6]非会員　アジア航測株式会社（〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺 1-2-2）
E-mail: ysh.niina@ajiko.co.jp

我が国では，i-Construction の推進に伴い，地物の表層を 3 次元的に捉えた点群データの取得機会が増大している．特に，多視点画像から点群データを生成できる SfM が注目されている．しかし，SfM は，形状に特徴がない対象物の場合，高密度な点群データの生成が困難である．

既往研究では，プロジェクタを用いて対象物に模様を投影し，SfM による点群データの生成点数と精度を向上させる手法を提案した．しかし，この手法では，実際に存在しない凹凸が点群データに発生する課題がみられた．そこで，本研究では，高精度な点群データの生成に有効な投影模様を試作し，実証実験により有用性を確認した．その結果，自然造形模様のコルク柄により，ばらつきの少ない点群データを生成可能なことが明らかになった．

Key Words:*point cloud data，i-Construction，pattern projection，SfM，high resolution camera*

1. はじめに

近年，土木工事の現場では，i-Construction [1)]の推進により，点群データの活用が進められている．一般的に点群データは, 地上設置型レーザスキャナ(TLS)や移動体計測車両(MMS)等で取得されるが，機材が高価である．そこで，画像から点群データを比較的安価かつ容易に生成できる SfM（Structure from Motion）と MVS（Multi-View Stereo）技術（以下，単に「SfM」とする．）が注目されている [2)]．SfM は，画像間の特徴的な画素（以下，「特徴点」とする．）を抽出し，画像の撮影位置および姿勢を求めることで対象物の三次元形状を復元する技術である．そのため，新設のコンクリート構造物のような特徴の乏しい対象物への適用は困難である．

この課題を解決するため，佐藤ら [3)]は，プロジェクタを用いて対象物に模様を投影して特徴点を増加させる手法を考案し, SfM によって TLS と同等の点群データが取得できることを明らかにしている．また，補色を用いると点群データの精度が向上することも明らかにしているが，補色以外の色が点群データに与える影響は未検証である．同様に，菅野ら [4), 5)] は，ランダムパターンを対象物に投影し，画像の特徴点を増加させる手法を考案している．ランダムパターンとは，スノーノイズであり，白色と黒色で構成された模様である．実験では，模様を投影しない場合に形状の復元が困難であった壁面に対し，提案手法 [4),5)] を適用して形状を復元できることが示され

た．しかし，菅野らは，実際には存在しない微小な凹凸を構成する点群データが壁面に発生する現象を確認した．そこで，著者らは，模様の輪郭が鮮明になることで特徴点を多く抽出できると考え，自然造形模様であるコルク柄に注目した．コルク柄は，輪郭が鮮明であり，模様の密度も一定である．そして，コルク柄を用いた場合に高精度な点群データを生成できることが示せると，土木構造物へ適用した際にも投影対象物の高精度な復元が期待できる．

以上より，本研究の目的は，自然造形模様であるコルク柄の投影が SfM により生成される点群データの精度に及ぼす影響を明らかにすることとした．本論文では，まず，2 章にて，コルク柄を投影した上で SfM により点群データを生成し，既往研究で使用されていた模様を用いた場合の点群データと比較する．また，補色以外の色で模様を作成し投影することで点群データへの影響を検証する．次に，3 章にて，2 章で得られた結果からコルク柄の有用性を考察する．最後に，4 章にて，コルク柄を用いた SfM の土木構造物への適用可能性および課題を整理する．

2. コルク柄を投影した SfM の試行

投影模様による SfM の精度向上を定量的に評価するため，投影する模様の形を変更し生成した点群データの比較と，模様の色を変更し生成した点群データの比較によって，模様が SfM に与える影響を明らかにする．そこで，本研究では，投影する模様のみを変更し，撮影に用いるカメラ，撮影間隔，撮影距離および撮影枚数は一定とする．なお，ランダムパターンは，菅野らが作成した模様を参考に著者らが作成する．

(1) 実験方法

図-1 に本実験のフローを示す．まず，模様を投影した壁面を撮影する．次に，撮影した画像を用いた SfM によって点群データを生成する．最後に，2 種類の模様を用いて生成した点群データを比較する．**図-2** に機材の設置状況を示す．プロジェクタと撮影点は，壁面から 4.0m の距離に設置する．実験パターンは，投影する模様による影響を明らかにするため，蛍光灯を消しプロジェクタによってランダムパターンまたはコルク柄が壁面に投影されている場合と，投影がなく蛍光灯の光で照らされている場合の計 3 種類とする．そして，模様の色を変更した実験で投影する模様は，通常の色に加え，コルク柄を一度グレースケール化し，赤色，緑色，青色および黄色の 4 色にそれぞれ変更した画像である．作成した単色のコルク柄を**図-3** に示す．その後，オーバーラップ率が 90%

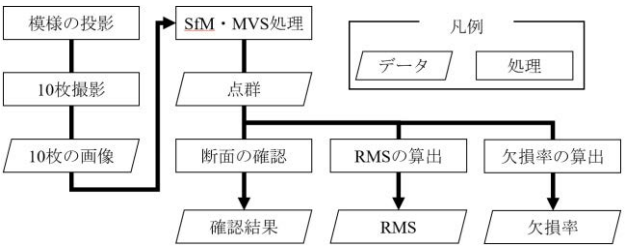


図-1 実験フロー

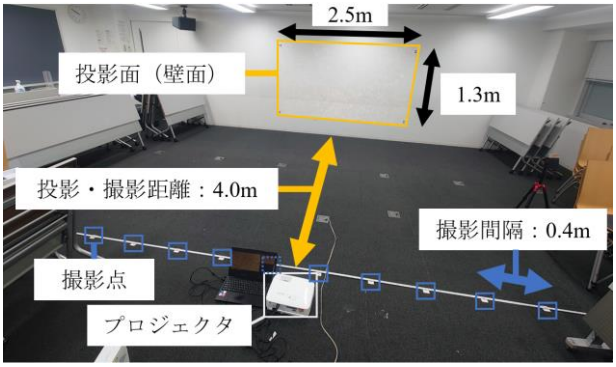


図-2 機材の設置状況

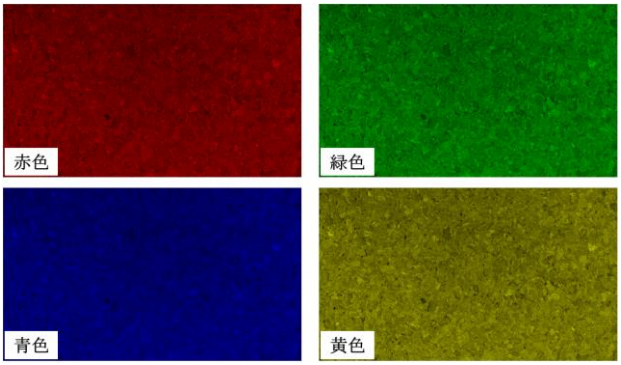


図-3 作成した単色のコルク柄

以上となる 0.4m の間隔で，10 枚の画像を平行撮影する．撮影した画像から点群データを生成する SfM ソフトウェアは，PIX4Dmapper [6]を使用する．

(2) 実験条件

カメラの選定にあたっては，木本ら [7]と織田 [8]の検証内容を参考に，フルサイズセンサを搭載し，8K の解像度で撮影可能な Canon EOS R5 を使用する．模様を投影するプロジェクタは，1080p の解像度で投影可能な BenQ MH550 を使用する．模様を投影する壁面は，**図-2** にあるようなテクスチャの乏しい白色の箇所を選定する．投影する模様は，菅野らが投影したランダムパターンとコルク柄である．ランダムパターンは，スノーノイズであり，40,000(ピクセル/m^2)となるよう作成する．PIX4Dmapper での処理テンプレートの設定は，「3D Models」とする．PIX4Dmapper で生成した点群データは，無償の点群データ編集ソフトウェアである CloudCompare [9]を用いて処理

する．

(3) 評価方法

本実験では，点群データのばらつきの度合い，点群データの欠損度合およびタイポイント数を比較する．点群データのばらつき度合いでは，切り出した点群データの断面を目視により確認する定性評価および点群データから算出する RMS を用いた定量的な評価を実施する．本研究における RMS は, 点群データを近似した平面と個々の点の距離の二乗平均平方根とし，ばらつきのない点群データほど値が小さくなる. 点群データの欠損度合いは，欠損率を用いて評価する．まず，CloudCompare の背景を黒色 (R,G,B=0,0,0）に設定後，点群データを白色 (R,G,B=255,255,255)で表示する．次に，CloudCompare での視点を「Set front view」に固定し，点群の表示画面を画像として保存する．そして，保存した画像中の R,G,B の全てが 0 のピクセル（以下，「欠損ピクセル」とする．）をカウントし，欠損ピクセル数を画像の総ピクセル数で除した割合を欠損率とする．

(4) 実験結果および考察

それぞれのパターンで撮影された画像を用いた SfM により生成した点群データを**図-4** に示す．**図-4** より，投影を用いない蛍光灯のみの場合は, 8K の解像度の画像を使用しても壁面の復元は困難であった．一方，模様を投影した 2 つのパターンでは，壁面の復元ができた．また，**表-1** に投影面から算出した RMS とタイポイント数，**図-5** に投影面の点群データの全体と断面を示す．RMS は，コルク柄を投影した場合が 0.70mm，ランダムパターンを投影した場合が 1.07mm であり，コルク柄を投影した場合の方が小さいことがわかった．一方，タイポイント数は，コルク柄を投影した場合が約 11,000 点，ランダムパターンを投影した場合が約 42,000 点であり，ランダムパターンを投影した場合の方が多かった．

ランダムパターンを投影した場合の点群データは，コルク柄を投影した場合の点群データと比較し，凸凹している箇所が確認された（**図-5**）．これは，ランダムパターンの特徴点が偏っており，特徴点のない箇所で正確性の乏しい点群データが生成されたことが原因だと考えられる．また，点群データの欠損度合いを定量的に比較するため，**表-2** に欠損ピクセル数と欠損率を示す．欠損率は，投影をしない場合に 99.6%であったが，ランダムパターンを投影した場合で 8.3%, コルク柄を投影した場合で 2.5%となり, コルク柄を投影した場合で最も小さかった．

表-3 に投影する模様の色の違いによる点群データの RMS とタイポイント数を示す．通常の色の RMS が 0.70mm に対し，単色の RMS は，赤色が 1.51mm，緑色が 0.80mm，青色が 1.38mm，黄色が 1.53mm となった．したがって，通常色が最も小さくばらつきの少ない点群データであることを確認した．**図-6** に点群データの断面を示す．**図-6** より，RMS が大きい赤色や青色の断面が他の色と比べ凸凹していることがわかる．そして，タイポ

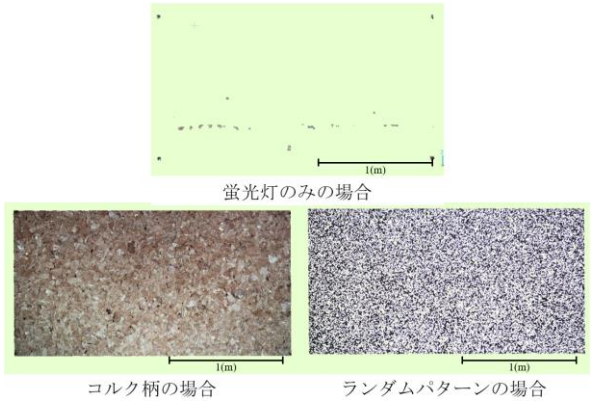


図-4 生成した点群データ

表-1 模様を投影した場合の RMS とタイポイント数

投影した模様 ＼ 比較項目	RMS(mm)	タイポイント数（点）
コルク柄	0.70	10,509
ランダムパターン	1.07	42,428
投影無し：蛍光灯	3.28	11,067

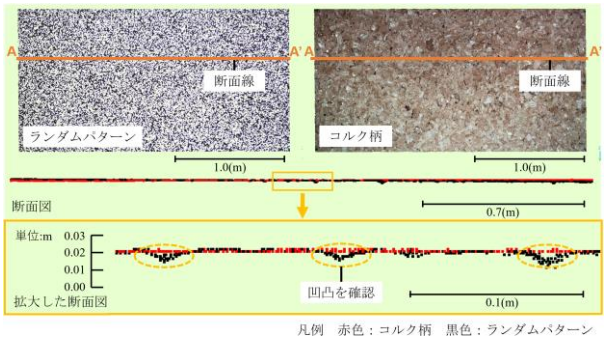


図-5 点群データの断面

表-2 欠損率の算出結果

比較項目 ＼ 投影方法	投影無し	コルク柄	ランダムパターン
欠損ピクセル数（点）	2,259,950	49,148	166,634
欠損率（%）	99.6	2.5	8.3

表-3 色の違いによる RMS とタイポイント数

模様の色 ＼ 比較項目	RMS(mm)	タイポイント数（点）
通常色	0.70	10,509
赤色	1.51	9,200
緑色	0.80	9,687
青色	1.38	9,091
黄色	1.53	9,290

イント数は，通常の色のコルク柄が最も多く，単色の場合は少ない傾向を確認した．これは，ランダム模様が白色と黒色のピクセルで構成された画像であるのに対し，コルク柄は，白色，黄色，茶色，黒色といった様々な色で構成されている違いがあるためだと考えられる．

3. SfM に適した投影模様に関する考察

ランダムパターンとコルク柄を投影した結果を比較すると，RMS はコルク柄の場合に小さな値となった．つまり，コルク柄を投影した場合の方が点群データのばらつきが小さく，高精度な点群データであるといえる．一方，タイポイント数はコルク柄の場合と比較し，ランダムパターンの場合に特徴点が多かったことから，模様が細かいことで，特徴点が多く抽出されると考えられる．そして，ランダムパターンは，白色と黒色とによって構成されているため，似たような模様が多くみられる．そのため，複数の画像間での誤ったタイポイントが結び付けられ，RMS が大きくなったと考えられる．また，コルク柄の色を変更した実験より，コルク柄を単色で投影するより，通常色のまま投影する場合に最も RMS が小さいことがわかった．これは，通常色に白色，黄色，茶色や黒色といった様々な色が含まれていることで，ピクセルの色の境界が明確になり，タイポイントを抽出できたためと考えられる．

図-7 にコルク柄を用いて生成した点群データを示す．**図-7** より，点群データの欠損箇所が確認できる．コルク柄は自然造形模様のため，大小さまざまな大きさの図形によって構成されている．その中の一部の大きな図形の内部で点群データの欠損がみられた．この箇所は色が均一であり，特徴点となるようなピクセルごとの色の違いが見られない箇所であった．コルク柄を投影した場合の欠損率は 2.5%なので，本検証で用いたコルク柄を立体物に投影すると，大きな図形の箇所の点群データが欠損し，エッジの表現が不正確になる可能性がある．これらを踏まえると，欠損率を低下させ，密度の均一な点群データを生成できる模様を考案する必要があると考える．

4. おわりに

本研究では，自然造形模様であるコルク柄を投影模様として用いた実験により，投影模様が SfM に与える影響を検証した．実験結果より，8K の解像度の画像を使用した SfM であっても復元が困難であった壁面に対し，コルク柄の投影により高精度に復元可能であることが明らかとなった．また，複数の色が使用された模様は，単色の

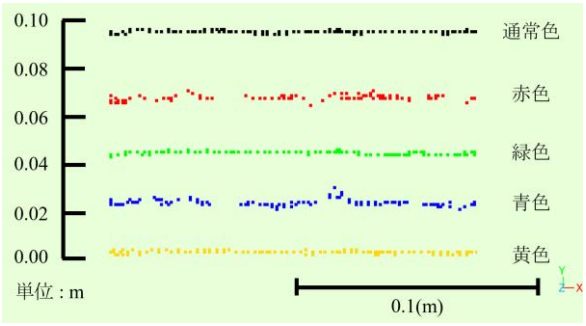


図-6 模様の色の違いによる点群データの断面

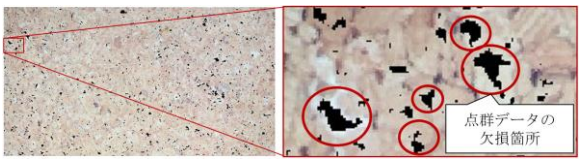


図-7 生成した点群データ

模様に比べ高精度な点群データを生成可能なことが明らかとなった．すなわち，コルク柄の模様を複数の色で表現することで，より高精度に点群データを復元できる可能性がある．一方，コルク柄を投影した際に，点群データの欠損が見られたため，土木構造物に本手法を適用した際に，計測誤差が大きくなる可能性がある．

今後は，特徴点を抽出しやすい特性を踏まえ，より欠損の少ない点群データを生成可能な模様を考案する．そして，大型供試体を使用した実証実験により構造物への適用可能性を検証し，有用性を明らかにする予定である．

参考文献

1) 国土交通省：i-Construction～建設現場の生産性革命～，<http://www.mlit.go.jp/common/001137123.pdf>，（入手 2023.6.12）．
2) 岡野和行：SfM を用いた 3 次元計測，砂防学会誌，72 巻 6 号，pp.67-71，2020
3) 佐藤紗希，今井龍一，中村健二，塚田義典，新名恭仁：SfM の特性を活かした高精度点群データの生成実験，第 77 回土木学会年次学術講演会概要集，77 巻，2022.
4) 菅野美紀，冨永泰正，邵万朋，砲崎賢一，荒木俊輔：コンクリート建築物壁面の SfM 計測の品質向上手法の提案と評価，2021 年度精密工学会秋季大会学術講演会，pp.622-623，2021.
5) 菅野美紀，砲崎賢一，冨永泰正，荒木俊輔：ランダムパターン投影による SfM 三次元計測の精度向上手法，日本建築学会技術報告集，29 巻 71 号，pp.533-537，2023.
6) PIX4D：PIX4D ソフトウェア，<https://www.pix4d.com/jp/pricing>，（入手 2023.6.12）．
7) 木本啓介，松田浩：中小橋梁の点検における SfM 活用方法の比較・検証，実験力学，17 巻 4 号，pp.290-297，2018.
8) 織田和夫：解説：Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整，写真測量とリモートセンシング，55 巻 3 号，pp.206-209，2016.
9) CloudCompare：Open Source Project，<https://www.danilgm.net/cc/release/>，（入手 2023.6.12）．