

UAV-SfMによる三次元復元技術を用いた 集落景観の記録および空間評価の 手法に関する考察

田中 椋¹・毛利 祐輝²・山口 敬太³・川崎 雅史⁴

¹正会員 博士（工学）一般社団法人アーバンデザインセンター坂井
（〒913-0045 福井県坂井市三国町南本町3丁目6-51, E-mail: tanaka@udcs.jp）

²非会員 NTT フィールドテクノ
（〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内2丁目14-15, E-mail: yuuki.mouri.mh@west.ntt.co.jp）

³正会員 博士（工学）京都大学大学院工学研究科 准教授
（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1, E-mail: yamaguchi.keita.8m@kyoto-u.ac.jp）

⁴正会員 博士（工学）京都大学大学院工学研究科 教授
（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1, E-mail: kawasaki.masashi.7s@kyoto-u.ac.jp）

土地固有の集落景観が失われつつあり、速やかな現況調査や変化の把握が必要となるなか、簡便に実施可能な調査記録手法の確立が求められている。本稿では、UAV-SfMによる三次元復元技術に着目し、集落景観の記録・評価手法の精度の検証と有効性について考察を行った。具体的には、構成要素単位、敷地構成単位、集落単位の各スケールでの分析における三次元モデルの活用可能性を示した。また、撮影高度40m、70m、100mで撮影・作成した三次元モデルの分析を通して、UAV-SfMの適切な条件設定と得られた空間情報の活用可能性についての考察を行った。

キーワード: 集落景観, UAV-SfM, 三次元復元技術, 文化的景観

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

近年、人口減少や生活様式の変化に伴い、土地固有の生活・生業と結びついた集落景観は刻々と失われつつある。早い段階で現存する景観の状況を把握し、その変化を継続的に把握していくことが必要となるが、従来の目視調査では集落を構成する要素を一つずつ調査しなければならず、資金や時間、専門性の面で課題があった。

本研究では、集落景観の調査・記録・共有を簡便に行う手法として、UAV-SfMによる三次元復元技術に着目した。UAV-SfMは、UAV（Unmanned aerial vehicle：無人航空機）による空中写真を用いて三次元復元を行うものであり、広範囲を短時間で測量することが可能である。近年ではUAVも一般利用されるようになり、安価で実用性の高い手法としての波及が期待される。

同技術は、様々な分野において活用が進められている。たとえば、土木分野ではダムや堤防、道路といった

大規模な土木・都市構造物の維持管理に用いられている¹⁾²⁾³⁾。また、文化財分野では、UAV-SfMを含む様々な手法で文化財のデジタルアーカイブが作成されている⁴⁾⁵⁾。一方で、地形変化や構造物など多様な要素が混在する集落景観を対象とした精度検証や技術的検討は十分になされておらず、研究の蓄積が課題となっている。

以上の背景から、本研究では、集落景観の簡便な記録・評価手法としてのUAV-SfMの精度と有効性について、基礎的な考察を加えることを目的とする。

(2) 対象地

本研究では、滋賀県東近江市奥永源寺地域に位置する枉葉尾町東部を対象として、UAV-SfMによる三次元モデルの作成を行った（図-1）。奥永源寺地域は琵琶湖へと流入する愛知川の上流に位置する山間集落であり、茶園や石積み、茅葺住宅、谷水利用など、多様な景観資源が残る。しかし、高齢化や人口減少、生活様式の変化に伴ってそれらの資源も失われつつある。

2. 研究の方法

(1) 精度検証の項目の整理

集落景観の調査記録手法としての有効性を検証するため、既存の集落景観調査において把握されている景観特性の視点から、本研究における検証項目を整理した。

a) 構成要素単位（形状、素材）

集落景観を構成する要素として、建築物（住居や工場）や石積み、植栽、農地、水路などが挙げられる。特に住居や工場といった建築物や石積みの形態や素材には、土地固有の自然環境の影響や生活・生業上の工夫がみられ、その特徴が記録写真や立面図を用いて示されることが多い。例えば京都府北山の林業景観では、作業場所を確保し、木材を乾燥させる際の日差しを調整するために、軒が深く取られている⁹⁾。

b) 敷地構成単位

住居や工場の敷地内における建築物や中庭、池、植栽等の地物の配置構成には、周辺の地形や日当たり、風向き等が生活・生業に適した条件に調整できるような工夫が、集落内で共通してみられる場合がある。例として、水路の引き込みや屋敷林のある散居集落⁷⁾⁸⁾や水路網のある水郷集落⁹⁾などが挙げられる。典型例の図示には敷地平面図や俯瞰図が用いられる。

c) 集落単位

集落内では、住居、工場、農地等の土地利用分布や敷地間の相互関係、水路ネットワーク等が、地形や生業上の工程といった特定の秩序に従って特徴づけられている場合がある。こうした集落内の有機的な連関やその背後にあるシステムを読み解くためには、集落全域での諸要素の位置関係を把握することは重要な手掛かりとなる。例えば京都府北山の林業景観では、斜面地に並ぶ住居同士が眺望を妨げないように配置されていることを集落全体にわたる立面図を用いて示している¹⁰⁾。

(3) UAV-SfMの使用機材と条件

a) 測量・撮影に使用する機材

容易に運用可能な手法とするため、撮影機材には安価で入手しやすい一般向けの UAV である Mavic 2 Pro を使用した（表-1）。また、空中写真測量では、範囲内に座標が明らかな点を複数用意し、測量精度の向上のための標定点（GCP：Ground Control Point）および検証のための検証点として設定する。本研究では、この両点の測量に CLAS 測位が可能な Cohac ∞ ten を使用した。CLAS 測位とは、準天頂衛星システムみちびきの補強信号を用いてセンチメートル級の測位ができる技術である。Cohac ∞ ten を用いることで1地点あたり数10秒で測位が可能であり、ミリメートル級の精度が必要とされない限りにおいては、GNSS 測位やトータルステーションでの測量に比べて短時間かつ安価な機材で実施できる利点がある。

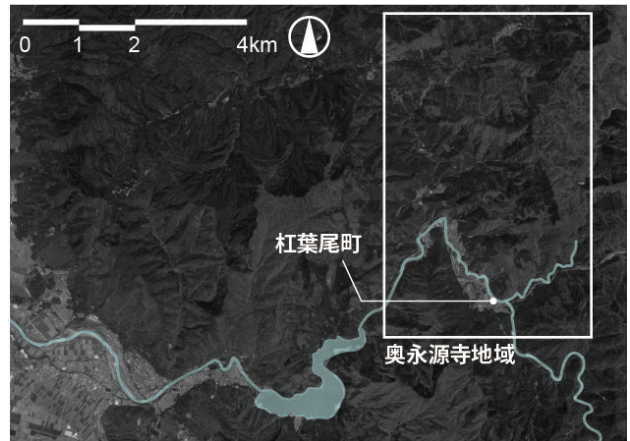


図-1 対象地の位置 (google map に加筆)

表-1 本研究で実施した UAV-SfM の条件

UAVによる空中写真測量の条件			
UAVの機種	Mavic 2 Pro		
OL率/SL率	90%/60%		
ジンバル角度	-60°		
標定点の測量機材	Cohac ∞ ten (CLAS 測位)		
標定点の数	3		
高度 (GSD)	40m (0.98)	70m (1.80)	100m (2.74)
撮影日	2022.05.16	2022.03.30	2022.05.16
対象面積	76000 m ²	152000 m ²	243000 m ²
飛行時間 [※]	約 89 min	約 61 min	約 50 min
SfMの処理・出力条件			
SfMソフトウェア	Pix4D mapper		
出力形式	点群 (.las), 3D メッシュ (.fbx), オルソモザイク (.geotiff)		
ハードウェア/OS	CPU: Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU RAM: 64GB GPU: NVIDIA Quadro RTX 4000 OS: Windows 10 Pro, 64-bit		

※ バッテリーの交換に要する時間は除く。

b) 高度・経路の設定

本研究では、40m、70m、100m の3つの高度で撮影・作成した三次元モデルの比較を行った。撮影高度を低くすることで、単位地上面積あたりの画素数を大きくし、より詳細なモデルを作成することが可能となる。しかし一方で、単位地上面積あたりの作業時間やデータ量が大きくなることや、高木などの障害物に UAV の進路を遮られる場合もあることから、必要以上に低空での撮影はかえって効率を下げることとなる。そこで、撮影高度ごとの三次元モデルの比較を通して、調査記録の目的に対して適切な高度設定について考察を行う。

UAV-SfM の条件を決定する指標として、GSD (Ground Sampling Distance: 地上解像度, 単位は cm/pixel) が用いられ、撮影高度やカメラの画素数、ジンバルの角度などによって決定される。公共測量においては、5cm 以内の位置精度を確保するためには GSD を 1cm/pixel 以内に、20cm 以内の位置精度を確保するためには GSD を 3cm/pixel 以内に設定することが標準とされている¹¹⁾。本研究の条件では、3つの高度設定により、GSD がおよそ 1~3cm/pixel での三次元モデルの精度比較を行う。

また、UAVのジンバルを鉛直下方向から30°傾けて設定し、縦横二方向からの往復撮影を行った。これは、建築物等の上部だけでなく各側面の情報も取得できるように撮影するためである。

c) 出力の形式

作成した三次元モデルは、位置座標と色情報を持つ点の集合で構成される点群、テクスチャを張った面で構成される3Dテクスチャメッシュ（以下、メッシュ）、直上からの視点に正射投影したオルソモザイクの3形式で出力した。形式ごとに表現し得る情報の特性が異なるため、分析の目的に応じて使い分けることとした。

3. 景観の記録手法としての精度の検証

(1) 構成要素単位

集落景観を構成する建築物（住居や工場）や石積みなどの形態的な特徴を分析する上では、点群およびメッシュが有効だと考えられる。点群およびメッシュでは、任意の角度から要素の形態を確認することができ、断面形状を確認することも可能である。図-2はある建築物の点群を抽出したものである。本手法では、UAVのカメラを鉛直下方向から30°傾けて設定しているため、屋根形状などの建築物上部の特徴だけでなく、軒の深さや出入り口の位置などの側面の特徴も把握が可能である。ただし、軒下の直下の空間のように、カメラを傾けても撮影できない部分については、点群が欠損している。

点群では、各点が座標情報を持っているため、2点間の座標差を取ることで、寸法を計測することも可能である。その計測精度を検証するため、建築物の壁の長さ4箇所及び石積みの高さ4箇所の計8箇所の三次元点群上の距離と、メジャーあるいはレーザー計測器によって計測した実測値との誤差を測定した（図-3）。撮影高度が高くなるほど、誤差の平均値およびばらつきを示す四分位範囲のいずれも値が大きくなっていることがわかる。この理由として、地上解像度が大きくなると画像から抽出し得る特徴点の精度や密度が低くなることが挙げられる。ただし、撮影高度100mでも平均で6.0cmほどの誤差であり、大まかなスケールや景観特性を把握する上では使用可能な誤差と考えられる。

(2) 集落単位

集落景観を対象としたUAV-SfMでは、広域かつ形状が複雑なモデルとなるため、位置座標に誤差が生じやすい。モデル全体での歪みを計測するため、3つの標定点のほか8つの検証点を設置し、CLAS測位によって計測した座標とモデル上の座標との誤差を算出した（図-4）。その結果、標定点を結ぶ範囲を境界として内外で誤差の

符号が反転しており、モデル全体が盆状に湾曲していることがわかる。また、誤差の絶対値は撮影高度40mが最も大きく、撮影高度が下がるほど誤差および湾曲が大きくなる傾向にある。1枚の画像あたりに撮影できる範囲が狭いため、標定点が映らない画像数が増加し、その間の誤差の累積が大きくなったものと考えられる。



図-2 点群による建築の断面（撮影高度40m）

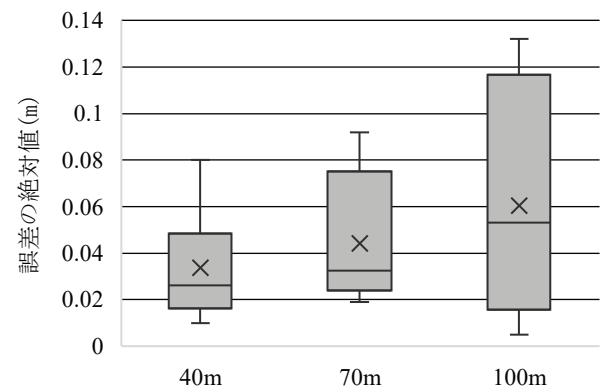
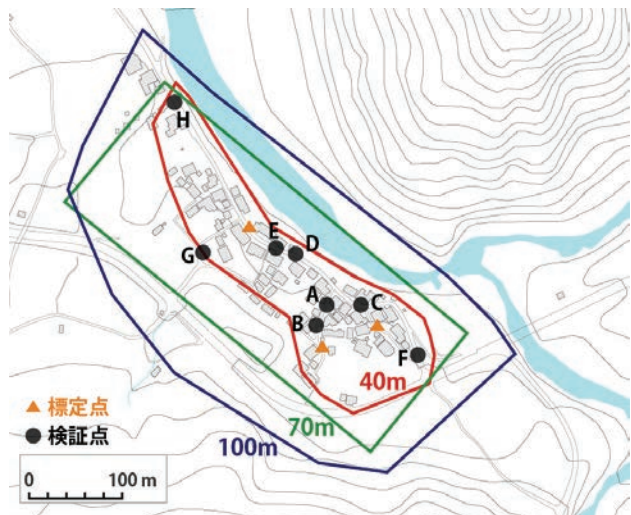


図-3 点群による計測値と実測値との誤差



撮影高度	標定点の内側の誤差					標定点の外側の誤差		
	A	B	C	D	E	F	G	H
40m	0.53	0.27	0.31	0.48	0.42	-1.36	-0.70	-0.51
70m	-0.14	-0.17	-0.09	-0.17	-0.07	0.57	0.20	1.91
100m	0.18	0.06	0.23	0.17	0.17	-0.10	-0.20	-1.52

※四捨五入により小数点第二位までで示した。

図-4 各検証点における座標の誤差と三次元モデルの歪み

4. 三次元空間情報を用いた空間評価の可能性

(1) 構成要素の形態意匠分析

メッシュは要素の外観の再現性が高く、建造物の素材を把握することができる。ただし、撮影高度ごとのメッシュを比較すると(図-5)、撮影高度によって外観の再現性に差異が生じていることがわかる。撮影高度40mでは瓦葺であることが確認でき屋根の線形も直線に近いのに対して、撮影高度70mでは素材感や屋根の線形が曖昧になり、撮影高度100mでは形態・素材の明確な判別が困難である。また、石積みの部分を抽出した場合でも、撮影高度40mでは石の輪郭や積み方も判別し得るのに対し、撮影高度70m、100mでは石積みであるかどうかの判別が付きにくい。すなわち、素材等をメッシュから明確に判断するためには、1程度のGSDの確保が必要になると言える。

(2) 敷地構成分析

オルソモザイクでは正射変換されているため、各敷地における平面配置を把握することが可能である。オルソモザイクから庭の一部を切り出すと、植栽や庭石の位置関係や形状が把握でき、いずれの高度においてもgoogle earthで確認できる航空写真に比べて高精細に確認できることがわかる(図-6)。庭石等の細かな要素までを含めた平面配置を簡便に把握できることは、従来手作業で行う必要のあった調査記録の省力化・継続性に大きく寄与するものといえる。ただし、メッシュと同様に、撮影高度を上げるとオルソモザイクにブレが生じており、撮影高度100mでは要素の輪郭が曖昧になり判別できない要素も生じている。

(3) 集落全体の構造分析

広域な三次元形状の復元が可能なUAV-SfMの利点として、個別要素の特徴を把握できるだけでなく、それらの集落全体における位置関係や地形との関わりを把握できる点が挙げられる(図-7)。

点群やメッシュを用いることで、任意の位置で集落全体にわたる断面を把握することが可能である。紅葉尾

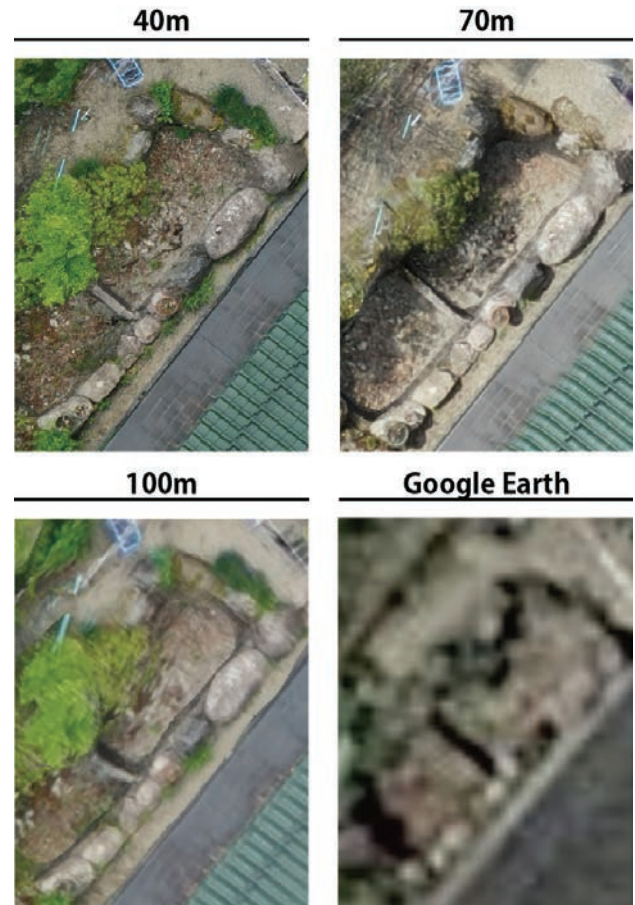


図-6 庭のオルソモザイクの比較 (撮影高度：40m, 70m, 100m)



図-5 建築および石積みのメッシュの比較 (撮影高度：40m, 70m, 100m)



図7 集落全体の三次元モデルの俯瞰図



図8 集落全体の断面図（上段：河川に水平方向，下段：河川に垂直方向）

町東部の河川に沿った断面では、トタンを被せた茅葺を含む平入入母屋造の家並みが連続していることがわかる

（図-8）。また、河川に垂直方向の断面では、河川から15mほど上がった緩傾地に茅葺き屋根住宅を含む住居が並び、その上側に農地、国道421号、山林が分布していることがわかる。このような家並みや地形断面に応じた土地利用の図示には、複数の要素の位置関係や形態を把握する必要があり、従来は十分な調査や描画のための技術が必要であった。三次元モデルを活用することで、専門技術がなくても、簡便に任意の断面を図示することが可能である。

(4) 眺望景観分析

三次元モデルでは、従来の二次元の図面と異なり、自由な視点の設定が可能である。これにより、任意の視点場からの眺望を再現し、可視領域・不可視領域を把握することができる（図-9）。これは、土地固有の眺望景観特性の分析のみならず、それを踏まえた景観のシミュレーションにも活用が可能である。例えば、構造物の建設・改修・解体に伴う景観の環境影響評価が挙げられる。前章で示したとおり、UAV-SfMでは地形だけでなく建築物や木々などの要素も含めた三次元形状や位置座標が、センチメートル級の精度で把握できる。そのため、従来



図9 三次元モデルによる任意の視点場からの眺望景観の例

用いられてきたCG画像やフォトモンタージュに比べて、現実に即した影響評価を正確かつ簡便に行うことが可能である。

5. おわりに

本研究では、UAV-SfMによる三次元モデルが、景観構成要素の形態・素材、敷地構成、集落断面の把握等、様々なスケールでの分析に活用可能であることを示した。特に、ジンバルを傾け、二方向からの往復撮影を行うことで、要素の側面までモデル化でき、素材の判断や断面図の作成に有用であることを示した。本研究で用いた手法では、UAVにMavic Pro 2、標定点の測量にCohac∞ten

を用いることで、120分程度で一集落の測量・撮影が可能である。これは、簡便かつ実用性のある手法として、景観の調査記録の省力化および空間情報の活用に寄与するものと言える。

また、素材や平面配置の調査では1~2cm/pixel程度のGSDを確保が望ましい一方で、センチメートル級での寸法や地形の計測を目的とする場合は3cm/pixelでも対応可能であることを示した。カメラの画素数やPCの処理能力といった性能上の課題は技術の発展とともに改善されるものであり、今後更に高い高度設定でも十分に高精度な三次元モデルの取得が可能になると考えられる。しかし、早急に調査・評価手法の確立・普及が求められるなか、本研究はその実装に向けた基礎的な検討として有用と言える。一方、軒下など空中写真では観測しきれない部分が生じるなどUAV固有の課題もあり、これらは今後、SLAM等の他技術との組み合わせを検討する必要がある。

また、調査の目的ごとの詳細な精度検証や、定期的な調査によるモニタリング手法、UAV-SfMの特性を活かした景観分析手法としての発展可能性については、今後更なる研究の継続の必要性が高い。

参考文献

- 1) 檀寛成, 稲津直毅, 尾崎平, 窪田諭, 安室喜弘: 構造物の維持管理における空撮用UAVの最適飛行計画, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.74, No.2, pp.159-166, 2018.
- 2) 早川健太郎, 黒台昌弘, 笠博義: 建設分野におけるUAVの活用事例とUAV画像による3次元モデリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.38, No.3, pp.213-218, 2018.
- 3) 金子俊幸, 井下恭次, 神田康嗣, 大竹臣哉: 海岸保全施設の維持管理へのUAV計測の適用性について, 日本水産工学会誌, Vol.56, No.2, pp.121-131, 2019.
- 4) 金田明大: 文化財分野におけるデジタル技術の活用 [3] 3次元技術等によるデジタル技術の導入, 奈良文化財研究所研究報告, Vol.21, pp.13-20, 2019.
- 5) 木本啓介, 西村正三, 松田浩, 出水亭: 軍艦島3Dプロジェクト3D計測技術を活用した文化財の記録, 計測と制御, Vol.59, No.7, pp.476-480, 2020.
- 6) 国立文化財機構奈良文化財研究所文化遺産部景観研究室編: 京都中川の北山林業景観調査報告書, 京都市文化市民局文化芸術都市推進室文化財保護課, 2019.
- 7) 原田佳苗, 佐藤布武: 散居集落における周辺資源活用の変容と課題—山形県置賜地方飯豊町を事例として—, No.88, Vol.805, pp.921-931, 2023.
- 8) 黒野弘靖, 菊地成朋: 類型比較を通してみた砺波平野における村落構成の共通原理—砺波散居村における居住特性の分析 その5—, No.66, Vol.547, pp.157-161, 2001.
- 9) 鈴木尚美子, 畔柳昭雄: 水網集落における水利用形態と建築空間に関する研究—滋賀県高島市の2集落を対象として—, No.72, Vol.611, pp.7-14, 2007.
- 10) 国立文化財機構奈良文化財研究所文化遺産部景観研究室編: 京都中川の北山林業景観調査報告書, 京都市文化市民局文化芸術都市推進室文化財保護課, 2019.
- 11) 国土交通省国土地理院: UAVを用いた公共測量マニュアル(案), p.25, 2017.