石垣 BIM の作成のための 3 次元モデルからの石垣のセグメンテーション

板倉 健太1・林 拓哉1・高田 祐一2

1 非会員 ImVisionLabs 株式会社(〒113-8485 東京都文京区本郷 7-3-1

東京大学南研究棟アントレプレナーラボ) E-mail: kentai@imvisionlabs.com (Corresponding Author)

² 非会員 独立行政法人国立文化財機構 奈良文化財研究所 企画調整部文化財情報研究室 主任研究員 (〒630-8577 奈良県奈良市二条町 2-9-1) E-mail: takata-y23@nich.go.jp

従来,石垣の図化は2次元的な図面や写真に依存し,3次元的な情報の欠落や作業の属人性,膨大な労力が課題であった.本研究では,文化財石垣の現況や構造を体系的に記録・管理する石垣カルテの作成作業を効率化することを目的とし,SfM-MVSにより生成された高密度な3次元メッシュモデルから石垣の線 画を作成する手法を提案した.3次元モデルのテクスチャ画像を対象に,Segment Anything Model(SAM)を 用いて石垣ごとの領域を自動的にセグメンテーションし,境界情報を抽出して DXF 形式で出力した.精 度検証として,名古屋城の一部領域で手動による境界線との比較を行った結果,Precision 0.90, Recall 0.79 を達成し,高い精度でそれぞれの石垣がセグメンテーションできていることが確認された.

Key Words: castle, heritage documentation, dxf export, segment anything model (SAM), stone segmentation

1. はじめに

「石垣カルテ」とは、城郭や文化財に用いられる石垣 の現況、構造、損傷状況などを詳細に記録・管理するた めの調査・記録体系であり、文化財としての石垣を保 全・修復・維持管理するうえでの基礎資料として機能す る¹. 具体的な事例として、名古屋城や広島城跡などで 石垣カルテの作成が行われている. これにより、石垣の 現況や変形・劣化の進行状況を的確に把握し、適切な保 存管理計画の策定が可能となる. さらに、定期的な観察 と記録更新を通じて、異常の早期発見や迅速な修復対応 が可能となり、文化財としての石垣を長期的に安定して 保存する体制を構築できる. 名古屋城においてはこれら の情報利用に関する活用計画も策定されている⁹.

しかしながら,従来の石垣調査および記録手法は,主 に2次元図面や平面写真に依存しており,3次元的な構 造物としての石垣の全体像を把握するには限界がある。 特に,石材単位での詳細な情報の取得・管理が困難であ ったため,修復作業や崩落時の対応においては,事後的 かつ断片的な記録に頼らざるを得ない。野口(2022)は, こうした従来の2次元記録手法について,情報密度や自 由視点に限界があることを指摘しており,3次元データ による記録によって自由視点による多角的な閲覧や原資料に触れずとも品質を損なわない高精細記録が可能となる点を強調している.以上のような背景のもと、石垣の3次元的な解析・記録は、今後の文化財保存において極めて重要な役割を担うと考えられる³.

近年, SfM-MVS (Structure-from-Motion Multi-View Stereo) やレーザスキャナ(LiDAR)を活用した高精度な3次元計 測が一般化してきた. 例えば UAV(ドローン)搭載型 LiDAR を用いて、石材採掘跡のある斜面地を高精度に3 次元計測した事例が報告されている 4. このような 3次 元計測によりオルソ画像では把握できなかった石のサイ ズや傾きなど、石材単位の情報の取得が可能となってい る. しかし,現在,LiDARなどのデジタル計測機器の活 用は進んでいるものの,取得された3次元データから石 材一つ一つを判別し線画化する図化作業は依然として人 手に頼っている. 作業には膨大な時間と人的資源が必要 であり、実際にある測量会社では、1日あたり約15平方 メートルの範囲しか石垣の図化が行えないと報告されて いる、このように一面に数千個におよぶ石材の処理には 膨大な時間と労力を要し、さらに作業者による個人差も 避けられない問題となっている. さらに、この図化作業 では3次元情報が二次元図面へと変換される過程で、形 状や奥行きなどの重要な空間情報が失われる.そのため, 刻印,石材の種別,加工痕,矢穴痕跡などの多様な情報 を統合的かつ3次元的に管理するBIM(Building Information Modeling)の考え方を石垣に適用する「石垣 BIM」が提唱 されており,定性的評価にとどまらない,定量的かつ客 観的な記録の構築が求められている⁵.先述したように, 3次元モデルから線画を作成する作業は極めて手間がか かる工程であり,自動化が強く望まれている.石垣の自 動認識においては,石垣は機械部品や建築構造物のよう な明確な立体的形状特徴を持たず3次元モデルから個々 の石を正確に検出することは容易ではない.特に点群デ ータ単体では石材同士の境界が不明瞭であり,その数や 配置を正確に把握することは困難である.

このような課題に対しては画像情報と3次元情報を統 合的に活用するセンサーフュージョンのアプローチが有 効である.具体的には LiDAR により取得された高精度 な3次元点群に対して,カメラで撮影した高解像度画像 をマッピングすることで,形状と色・テクスチャ情報を 組み合わせた総合的な解析が可能となる.一方で,異な るセンサの統合ではなく,単一の処理過程において形状 と画像情報が結びつけられている例として,SfM-MVS により生成された3次元モデルが挙げられる.これらの モデルでは,テクスチャ画像と各点の位置情報(XYZ 座 標)が密接に対応づけられており,センサーフュージョ ン的な解析手法を同様に適用することが可能である.

石垣の画像認識においては、各ピクセルのクラス分類 を行う, セグマンティックセグメンテーションではなく, 個々の石材を独立したオブジェクトとして識別できるイ ンスタンスセグメンテーションが必要となる. これは, 石垣の各石材を個別の要素として認識し、それぞれに固 有の ID や属性を付与するためである. インスタンスセ グメンテーションの手法としては、Mask R-CNN®をベー スとした手法が広く知られている. Mask R-CNN を利用 した先行研究として、橋梁下面を UAV にて撮影し、取 得画像から腐食・浮き・ひび割れの検出を行った事例が 挙げられる⁷. Mask R-CNN を用いることで,技術者が手 作業で行う崩壊地判読の効率化を図る研究も知られてい る[®]. また,路面カメラ映像から,積雪区画を Mask R-CNN でインスタンスセグメンテーションし、積雪範 囲のピクセル面積を定量化し、降雪状況の判定に役立て られた事例も報告されている?.

このように、Mask R-CNN はインフラ点検や自然現象 の観測において高い有効性を示している.しかし、モデ ルの学習には大量の教師データが必要であり、アノテー ション作業に多大な時間と労力を要するという課題があ る.特に、石垣のような複雑な構造物では、一枚の画像 に数千個の石材が含まれており、すべての石材の境界を 手作業でアノテーションすることは現実的ではない. 近年では、学習時に存在しないクラスに対しても推論 可能なゼロショット学習と呼ばれる手法が注目されてい る.これは、事前に大量の教師データで学習されたモデ ルを用い、追加のラベル付きデータを用いずに新しいタ スクに対応する点に特徴がある.その中でも Segment Anything Model (SAM)¹⁰は代表的な例であり、多様な画像 対象に対して柔軟なセグメンテーションを実現できる. SAM やセンサーフュージョンを利用した例として、橋 梁の点群や画像から地覆を抽出し橋長や有効幅員を求め た研究¹¹や、導水路トンネルの錆を検出した研究¹³など が報告されている.

センサーフュージョンの手法と同様に点群を2次元平 面へ投影し、画像のように扱うことで解析を行った事例 も存在する. 例えば移動計測車両システム (MMS) など のLiDARデータを用いた樹木認識の事例^{13,14}では、まず 点群データを2次元画像に投影し,投影画像上で画像認 識により樹木を検出した後、得られた検出結果を元の点 群データに逆投影し、3次元空間上で樹木の位置や形状 を特定するワークフローが提案されている. さらに、稲 富・全(2021)は橋梁の3次元点群を複数の投影面で2次 元画像化し、DeepLabv3+によるセマンティックセグメン テーションを適用した上で、逆投影により点群に部材ラ ベルを付与する方法を考案し、限られた点群データ環境 下でも高精度な解析を可能にするアプローチを示してい る 15. このように、2次元画像上で得られた深層学習に よる解析結果を3次元点群へ統合する手法は、多様な応 用分野で有効性が示されている. また, SfM-MVS によ り生成された3次元モデルはテクスチャ画像とXYZ座 標情報が対応付けられているため、同様の解析手法を適 用可能である.

LiDAR や SfM-MVS による 3 次元点群から,自動的ま たは半自動的に建物の図面や BIM モデルを作成する手 法の先行研究も報告されている. Kong ら(2024)は大規模 建物の点群から編集可能な 2 次元図面を迅速に生成すフ レームワークを提案した¹⁰. Fangら (2025)は点群から効 率的に橋梁の BIM モデルを再構築し,BIM モデルとシミ ュレーションの間で情報をやり取りする手法について提 案した¹⁰. しかし石垣のような複雑な形状を有する文化 財を対象に図面の情報を自動的に抽出する手法は非常に 限られている.

そこで本研究では、3次元モデルに付随するテクスチャ画像に対して石垣のセグメンテーションを実施し、それぞれの石垣の境界を抽出する.そして抽出したセグメンテーション結果を3次元モデルのXYZ座標と統合する.さらに、得られた構造情報をDXFなどのCAD互換形式で出力することで、修復計画や文化財記録、建設・土木分野への実務応用を可能とする.これらにより従来の手作業に依存した図化作業を代替し、作業の省力化と

客観性の確保を同時に実現することを目指す.

2. 実験試料と方法

(1) 対象データについて

本研究では、大阪府大阪市の大坂城および愛知県名古 屋市の名古屋城における3次元メッシュモデルを解析に 利用した.メッシュモデル作成のための画像撮影には、 いずれも高解像度の画像が取得可能なカメラを用いた. 大坂城では、α7 III(ILCE-7M3)(Sony. 日本)およびレンズ FE 28-70 mm F3.5-5.6 OSS を使用して撮影した. 撮影時の設 定は、絞りF22、シャッター速度1/1000秒、ISO感度6400、 焦点距離は35mm換算で64mmであった.名古屋城では, ドローンに搭載した α7R II(Sony, 日本)を用い, 解像度 7952×5304ピクセルの画像117枚を撮影した. これらの撮 影画像をもとに, Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, Russia)を用いて SfM-MVS(Structure from Motion - Multi-View Stereo)により3次元モデルを生成した.本処理では、特 徴点のマッチング, 密な点群の生成, メッシュ化, テク スチャ画像の作成までを一連で実行したのち, OBJ 形式 にエクスポートした.

いずれのモデルにも 4096×4096 ピクセルのテクスチャ 画像を使用し、大坂城モデルには 8枚、名古屋城モデル には 18 枚を割り当てた.テクスチャ画像の形式は PNG である. 最終的な OBJ ファイルサイズは大坂城で約 30 MB、名古屋城で約 900 MB であった.

(2) 解析手法

図-1 は、OBJ 形式で与えられる 3 次元メッシュモデル のテクスチャ画像を対象に石垣を認識し、各石垣の境界 線を DXF ファイルとして書き出すためのフローを示し ている.上段は入力として用いるテクスチャ画像であり、 中段は SAM によってセグメンテーションされた結果を 示す.下段は、各セグメントの境界線を抽出した結果で あり、この情報をもとに DXF ファイルへの出力が行わ れる.以下にそれぞれの詳細を記述する.解析は主に MATLAB 2024b (MathWorks, USA)を利用した.また本解析 に利用した PC の CPU は第 11 世代 Intel(R) Core(TM) i7-11800H @ 2.30GHz である.RAM は 64GB を搭載しており、 GPU は NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU を使用した.

SAM の実行においては計算時間の観点から GPU の利用 が推奨される.

a) テクスチャ画像に対する SAM の実施

SAMを用いることで、OBJファイルに付随するテクス チャ画像に対して自動的に領域分割を実行し、小規模な クラスターを抽出することが可能である. SAM を実行 する上での主要なパラメータ設定を表-1に示す.



図-1 石垣の3次元モデルから境界線を抽出し,DXF形式で 保存するときの流れ

b) 植生の判定と除去

本研究においては植物に該当するクラスターは解析対 象外とする.そのため、テクスチャ画像に含まれる色情 報を利用し、植生と見なされるクラスターを除外する処 理を行った.具体的には、各クラスターを除外する処 の色情報に基づいて植生クラスターであるか否かを判定 した.判定条件としては、RGB 値のうち G(緑)成分が最 大であり、かつ B(青)成分が最小である場合、そのクラ スターを植生と判定して除外した.この判断基準は、植 物が光合成において青色光を最も強く吸収し、緑色光の 吸収は少ないという特性に基づいている.

c) 領域判定

各クラスターが適切に領域を表しているかどうかは、 クラスターの面積および画像全体に対する占有率を基準 として判定する.本研究では、これらの指標に基づき、 解析上不要と判断されるクラスターを除去する処理を行 った.なお、除去の判定に用いる閾値やパラメータにつ いては、表-1に示す設定値に従って調整を行った.これ により、意味的な領域を構成しない過小なクラスターや、 ノイズに起因する領域の除外が可能となる.

d) 領域判定

石垣のクラスターに対して境界線の抽出を行う. まず クラスターごとに、そのクラスター領域をTrueとし、そ れ以外を False とするバイナリ画像を作成する. これに より、各クラスターが個別のマスクとして扱われる. そ して、そのバイナリ画像に対して、境界を抽出する.図 -2では、左がバイナリ画像で右が抽出した境界の領域の イメージを示す. クラスターごとの ID および境界線の 描画順は、RGB チャンネルを用いて PNG 画像として保 存する. 具体的には, Red および Blue チャンネルにクラ スターIDを8ビットずつ分割して格納し、最大で65,025 通りの ID を一枚の画像に保持可能とする.一方, Green チャンネルには、境界線が描かれる順番を記録し、後の DXF 出力やポリライン描画において正確な形状再現を 可能とする. これにより, 図-2 [c]のように各クラスター の情報及びその境界をトレースする順序を保存すること ができる.



るときの概念図

表-1 SAMにおける主なパラメータとその設定値について

パラメータ	名古屋	大坂	概更
名	城	城	网友
Min	6300	900	セグメントされた各
Object			クラスターに対し
Area			て、面積が所定の閾
			値以下であるものは
			ノイズと判断した.
Max	151200	151200	セグメントされた各
Object			クラスターに対し
Area			て、面積が所定の閾
			値を超過するもの
			は、誤認識の可能性
			が高いと判断し、除
			去対象とした.
Point	48	64	画像の x 方向および y
Grid			方向に沿ってサンプ
Size			リンクするホイント
			数を指定するパフメ
			ーダ. この値を大さ
			く設定することで、
			より尚密度なセクメ
			ノノーション候補が 仕中されるが 同時
			生成されるか, 回時
			に可昇貝仰も増八り ス傾向にある
Saom	04	0.4	る頃间にのる. 木パラメータけ0から
Threshold	0.4	0.4	1の範囲で指定される
mesnote			信頼度の閾値であ
			11. この値以下のス
			コアを有する領域は
			信頼性が低いと判断
			され,除去される.
			一般に、この閾値を
			高く設定すること
			で, 誤検出 (False
			Positive)を抑制するこ
			とが可能となる.
Num	1	2	入力画像を分割する
Crop			数を指定するもので
Levels			ある.たとえば,値
			としてnを指定した場
			合,人力画像は 2 ⁴ (n-
			1)×2^(n-1) 個の領域に
			分割され、それそれ
			の方刮限奥に対して
			一回別に SAM によるて ガメンテーション加
			リアンノーンヨン処理が宝行される こ
			性が大口される・こ
			で 画像全体を一妊
			で処理した場合には
			検出が困難であった
			小さな対象に対して
			も、検出精度の向上
			が期待される.

e) 後処理

上述の方法により、テクスチャ画像から抽出された石 垣のクラスター情報を RGB チャンネルにエンコードし て PNG 画像として保存したのち、対応する 3 次元モデ ルに対して RANSAC (Random Sample Consensus) と呼ばれ る方法を発展させた手法を用いた地表面抽出を実施した ¹⁸⁾. これにより、石垣以外のクラスターを 3 次元的に除 去し、最終的に石垣に限定したクラスターの境界情報を DXF 形式(POLYLINE)にて保存した. これら一連の処理 により、画像上の領域分割結果と 3 次元モデル上の構造 情報を統合的に利用し、石垣の形状を正確に抽出・記録 することが可能となった.

(3) 手動により作成した境界データとの比較による評価

本研究では、名古屋城の一部を切り出したデータに対し て手動で石垣の境界線を作成し、これを正解データとし て用いた.境界線の作成には、Agisoft Metashape Professional を利用した.作成した正解データと提案手法 による処理結果を2次元平面に投影し、それらを比較す ることで、精度の検証を行った.

精度検証の指標として, PrecisionおよびRecallを算出した. Precision は予測結果のうち,正解に該当する割合を示す指標であり,以下の式により定義される.

True Positive (TP)

$Precision = \frac{1}{\text{True Positive (TP) + False Positive (FP)}}$

ここで、True Positiveは、予測データに含まれる正解の 境界の数を表す指標である.本研究では簡便化のため、 予測された境界のうち、正解データの境界との最短距離 が 30 cm 以下であるものを正解とみなし、True Positive と して扱った.これに対し、最短距離が 30 cm を超えるも のは False Positive と判定した.

Recall は,正解データに含まれる境界のうち,予測により正しく検出された割合を示す指標であり,以下の計算式により定義される.

True Positive (TP)

$Recall = \frac{1}{\text{True Positive (TP) + False Negative (FN)}}$

ここで、True Positive は、正解データに含まれる境界の うち、適切に予測されたものの数を表す指標である.本 研究では、予測データの境界との最短距離が 30 cm 以下 である場合に、その境界を適切に予測されたものとみな し、True Positive として判定した.一方で、最短距離が 30 cm を超える境界については、False Positive として扱った.

3. 結果と考察

大坂城および名古屋城の各データに対する解析結果を 表-2 に示す.計算時間は,SAM を用いたセグメンテー ション処理と,その結果を3次元モデル上に反映させ, 最終的にDXFファイルとして出力する一連の処理の2段 階に分けて測定した.これらの処理時間は,SAM にお けるパラメータ設定に大きく依存する.たとえば,より 小さな石材の検出を試みる場合には,処理が細分化され るため,計算時間が増加する傾向にある.

(1) 大坂城のデータ

a) SAM によるセグメンテーションの結果

以下に、テクスチャ画像に対して SAM によるセグメ ンテーション結果の一例を示す. 図-3[a]は入力画像、図 [b]はその検出結果を表しておりそれぞれ異なる石材を 異なる色で可視化している. . 多数の石材が存在する複 雑な領域であるにもかかわらず、大部分の石材が適切に 検出されていることが確認できる.

b) SAM の結果をメッシュモデルに反映させた結果

図4 [a]に, SAM のセグメンテーション結果を反映し たテクスチャ画像とメッシュモデルを重ね合わせて表示 した結果を示す.図-3と同様に,石垣は石材ごとに色分 けされており,セグメンテーション結果が高精度にメッ シュモデル上に反映されていることが確認できる.拡大 表示による確認結果を[b]および[c]に示す.[b]は元のメ ッシュモデル,[c]は SAM のセグメンテーション結果を 反映したメッシュモデルである.一部に小さな石の検出 漏れが見受けられるものの,全体としてはおおむね高い 精度で石材がセグメントされていることが確認できる.

表-2 各データに対して SAM を用いた画像セグメンテーション処理と、その結果を 3 次元メッシュモデル上に反映し、DXF 形式で出力するまでの一連の処理時間を示す結果.メッシュモデルのファイルサイズは OBJ 形式で保存された場合の値である.

データ名	処理時間(秒)	ファイル サイズ	テクスチャ 画像 の枚数
大坂城	6036	26MB	8枚
名古屋城	7912	894MB	16枚



図-3 テクスチャ画像に対して SAM によるセグメンテー ション結果の一例を示す. [a]は入力画像,図[b]はその検出 結果を表している



図-4 SAMの結果をメッシュモデルに反映させた結果

c) 抽出した石の境界を DXF ファイルに変換した結果

メッシュモデルと DXF ファイルを重ね合わせた結果 を図-5[a]に示す.図-5[b]に、石垣ごとに異なる色で示し た様子を示す.また、DXF ファイルのみ表示した様子 を[c]に示す.白色で表示された線画は、DXFファイルに より表現された石垣の輪郭線である.点群データと DXF ファイルが適切に重なっており、空間的な整合性 が保たれていることが確認できる.作成した DXF ファ イルは、点群と同一の座標系に基づく XYZ 情報を保持 しており、精度の高い位置情報の記録が可能である.こ のように、石垣の構造が詳細に再現されており、形状を 高精度に表現できていることがわかる.

しかし、局所的に輪郭が欠損している箇所が存在した. これは該当部分のテクスチャが不鮮明であったことに起 因すると考えられる.実際にメッシュモデル上で該当箇 所を詳細に確認すると、テクスチャがぼやけており、石



図-5 メッシュモデルとDXFファイルを重ね合わせた結果 材の境界が不明瞭になっている様子が確認された.その



図-6 SAMによるセグメンテーション結果を反映したテク スチャ画像を、対応するメッシュモデル上に重ね合わせて 表示した結果



図-7 セグメンテーション処理の結果を拡大表示した ときの様子

結果,画像に基づくセグメンテーションの精度が低下 し、石の検出漏れが生じ、最終的に DXF ファイルにお ける輪郭情報も欠損したと推察される.

(2) 名古屋城のデータ

a) SAMの結果をメッシュモデルに反映させた結果

SAM によるセグメンテーション結果を反映したテク スチャ画像を、対応するメッシュモデル上に重ね合わせ て表示した結果を図-6に示す.石垣部分は、多様な色で 表現されたクラスターとして視覚的に区別されている. さらに、一部領域を拡大して表示した結果を示す.これ より、石材の大部分が高精度にセグメントされているこ とが確認できる.

図-7は、セグメンテーション処理の結果を拡大表示したものである.上段は3次元メッシュモデルのテクスチャ画像を入力とした例であり、下段はSAMによって得られたセグメンテーション結果を色分けして重ね合わせたものである.個々の築石が異なる色で表示されており、全体として石材の輪郭が適切に識別されていることが確認できる.一方で、一部の小さな石材についてはセグメ



図-8 名古屋城のデータを利用して詳細な解析を 行った例.ここでは、先行研究において開発され た成果を引用している⁵.

ンテーションが行われていない様子が見受けられるが, これは事前に設定した面積の最小閾値によって,小領域 が除外された結果であると考えられる.したがって,対 象とする石材の大きさに応じて,閾値パラメータの調整 が必要であることが示唆される.

本研究で提案した石垣セグメンテーションアルゴリズ ムの有効性を確認する事例として、名古屋城のデータを 利用して詳細な解析を行った例を示す.ここでは、先行 研究において開発された成果を引用する 4. ここでは、 個々の築石ごとにセグメント化された外形線データを基 に、3次元 CAD 環境 (Rhinoceros および Grasshopper)上で自 動的に ID を付与した後,各築石の幾何情報(幅・高さ・ 傾き)を抽出した. 築石の傾きに応じて色分け表示を行 うことで、石垣面の膨らみなどの変状を視覚的かつ定量 的に把握することが可能となる [a]. さらに, 個別の築 石に対して刻印や矢穴といった調査情報を付加し、それ らを属性として統合管理することで、分類・表示を行う 機能も実装されている [b]. これにより, 石垣の変状や 施工様式を3次元的かつ定量的に評価できるだけでなく, 従来のPDFベースのカルテ管理では実現困難であった築 石単位の情報蓄積と統合的管理を実現している.

(3) パラメータ調整について

本研究における石垣セグメンテーションアルゴリズム においては、精度や適用範囲に影響を与える複数のパラ メータが存在する.具体的には、検出対象とする領域の 最小・最大面積の設定や、点群生成時のグリッドサイズ の指定などが挙げられる.本章では、これらの主要なパ ラメータについて、実データに基づき調整を行い、比較 検討した結果について述べる.

a) 領域の最大・最小面積について

石垣に含まれる石の大きさ(ピクセル数)を手動で計測 し、セグメンテーション時に指定する最大および最小の 領域サイズの設定に用いた.大坂城では小さな石の大き さが約35×42,名古屋城では約95×75ピクセルである ことが確認できた.同様に大きな石についても手動で領 域サイズを計測し、これらの結果をもとに最小および最 大面積の閾値を設定した.

b) グリッドサイズについて

図-9a に示すように、グリッドサイズの値を小さく設定した場合、小さな石の検出漏れが多く確認された.これを踏まえ、グリッドサイズの値を大きく設定し、より小さな石も検出されるよう調整を行った.図bはこの調整後の結果を示しており、検出された石の数が増加していることが確認できる.なお、本処理はSAMにおけるパラメータ設定に大きく依存し、特に小さな構造物の検出を試みる場合には、処理が細分化されるため計算時間が増加する傾向にある.処理時間の短縮を図る手段とし



図-9 グリッドサイズの値を小さく設定しテクスチャ画像 をセグメンテーションした時の様子.

ては、近年提案された高速セグメンテーション手法である Fast Segment Anything¹⁹の利用も検討可能である.

c) NumCropLevels について

図-10 [a]に示すように、グリッドサイズの値を小さく 設定した場合、小さな石の検出漏れが多く確認された. これを踏まえ、グリッドサイズの値を大きく設定するこ とで、小さな石も検出されるよう調整を行った.その結 果、検出数は増加したが、大坂城の石垣に含まれる一部 の小さな石については、グリッドサイズを大きくしても なお検出漏れが多く見受けられた.

この課題に対処するため、入力画像を複数の領域に分割した上で、それぞれを SAM に入力する手法を導入した.図bに示すように、画像を分割して処理を行うことで、検出精度が向上し、多くの石が正確にセグメントされていることが確認できた.なお、各対象に対して最終的に生成された石垣ポリゴンの数は、大坂城で約 3978 個、名古屋城で約 4772 個であった.各パラメータの概要については、22.a節の表を参照されたい.

- (4) 手動により作成した境界データとの比較による評価結果
- a) Polyline 数の比較



図-10 テクスチャ画像に対する SAM の実行時における, NumCropLevels のパラメータ設定を変更した時の様子.

精度検証に先立ち,正解データおよび予測データに含ま れる Polyline の数を比較した.その結果,正解データに 含まれる Polyline 数は 2796,本手法により生成された予 測データの Polyline 数は 2738 であり,両者の数が近似し

ていることが確認できた.これは、本手法が実際の石垣 に存在する個別の石材を高い再現性で検出していること を示している.

b) 2次元平面への投影結果

正解データおよび予測データを2次元平面上に投影し, その結果を図-11に示した.青色の実線が正解データを, 赤色の破線が予測データを示しており,全体として高い 一致度が確認された.特に,図中右上のように石が整然 と積まれている領域では,正解と予測の境界線がほぼ重 なっており,本手法による自動セグメンテーション結果 が、手動による図化と同等の精度を有していることが示 された.

c) Precision および Recall の評価

予測精度の定量的な評価として、PrecisionおよびRecallを 算出した.本手法により得られた結果は、Precisionが 0.90, Recallが0.79であった.これにより、予測された境 界の約90%が正解データと一致しており、一方で、検出 すべき境界のうち約79%が正しく予測されていることが 明らかとなった.この結果は、石垣における個々の石材 の検出において、本手法が非常に高い精度を保持しつつ も、一部の石を見逃していることを示している.見逃し の多くは小さな石材に起因しており、正解データでは丁 寧に図化されている小石が、本手法では検出されていな いことが確認された.小石の検出には対象の面積が小さ いことに加え、特徴が乏しくなりがちであるため、セグ メンテーションが困難となる.また、検出のためには高 密度な処理が必要となるため、計算負荷も増大する.

このような小石を検出するには、セグメンテーション モデルのパラメータを調整する必要がある.具体的には、 検出対象領域の最小面積の閾値を小さくすることや、グ リッド数を 64 など大きな値に設定することで改善が期 待される.しかし、これによりメモリ使用量が増大し、 計算時間も指数関数的に増加するため、精度と計算コス トとのバランスを考慮したパラメータ設定が求められる. また、精度評価における「正解」とみなす判定基準は結 果に大きく影響を及ぼす要素である.本研究では、境界 の重心間距離が 30 cm 以下である場合を正解と定義した が、この閾値を 40 cm に変更して再評価を行ったところ、



図-11 正解データおよび予測データを2次元平面上に投影 した時の様子.

Precision が 0.95, Recall が 0.94 と,より高い数値が得られた.しかしながら、実際には前述の通り小石の検出漏れが存在しており,Recall が 0.94 に達するとは考えにくい.したがって、このように閾値の設定は最終的な精度評価に大きな影響を与えるため、その選定には慎重な検討が必要である.

4. まとめ

本研究では、城郭石垣の効率的かつ高精度な記録を目 的として、SAM を用いた石垣セグメンテーションアル ゴリズムを提案し、その有効性を大坂城および名古屋城 の実データを用いて検証した. 従来, 石垣の図化作業は 手作業に依存しており、取得された3次元データは最終 的に二次元図面として出力される過程で空間情報が失わ れ、また作業の属人性や膨大な時間的・人的コストが課 題であった.実際に、測量会社では1日におよそ15 m² しか図化できないという報告もあり、広範囲にわたる石 垣の調査・記録においては現実的な運用が困難であった. 本手法では、公開されている大坂城および名古屋城の高 密度な3次元メッシュデータに対し、 テクスチャ画像を 入力として SAM を適用し、石材単位のセグメンテーシ ョンを自動化した.各石材の領域抽出においては、適切 なパラメータ設定(領域の最小・最大面積,グリッド数, 画像分割レベル等)を行うことで、対象ごとに検出精度 を高めた.特に、大坂城のように小さな石材が多い箇所 では、画像の分割処理やパラメータ調整により検出精度 の向上が確認された.精度検証においては、名古屋城の 一部領域に対して手動で作成した境界線データを正解デ ータとし、提案手法による予測結果と比較を行った. そ の結果, Precision は 0.90, Recall は 0.79 となり, 検出され た境界線の多くが正解と一致していたことが示された. 一方で、小石の検出漏れにより Recall がやや低下してお り、これを改善するためにはさらに細かいパラメータ調 整や高密度な処理が必要であることがわかった.また, 正解とみなす境界間距離の閾値を 30 cm から 40 cm に変 更した場合には、PrecisionおよびRecallがそれぞれ 0.95お よび0.94と向上することが確認されたが、これが必ずし も実際の精度向上を示すわけではないことから、適切な 評価基準の設定も今後の課題として挙げられる.

画像上でセグメンテーションを実行した後,対応する 3次元モデルに対して RANSAC を用いて地表面を抽出・ 除去することで,石垣以外の領域を取り除いた.しかし, より複雑な地表面形状や起伏が存在するケースでは, RANSAC では対応が困難となる可能性もある.今後の 展開としては,地形の局所的な変動により柔軟に対応可 能な SMRF (Simple Morphological Regressive Filter²⁰) や CSF (Cloth Simulation Filter²¹⁾) などの地表面抽出手法を導入する ことも有効と考えられる.

本手法は、従来の手動による石垣図化作業に代わる自 動化手段として高い有効性を示しており、作業の大幅な 省力化と客観性の向上を実現する可能性を有している. 文化庁が推進する「石垣カルテ」の整備においても、本 手法はその実行可能性を高める有力な手段となり得る. なお、本研究とは別に、手動による図化作業と提案手法 との処理速度を比較する取り組みも進めており、この ような事前検討における試算では最大で777倍の生産性 向上が得られる可能性が示唆されている.このように、 図化作業の効率化は、広範囲にわたる石垣の記録を現実 的な時間と労力で実現するうえで極めて重要な意義を持 つ.

また、本研究で対象とした名古屋城においては、実地 調査や UAV による写真測量により築石の刻印や矢穴痕 の詳細な記録が進められている²⁹. この取り組みは供給 元となった石丁場の特定や築城当時の採石技術の復元に 貢献している. 今後、本研究で抽出された築石の幾何情 報と、こうした歴史的情報とを連携させることで、構造 的・歴史的視点の統合的な石垣解析が可能になると期待 される。例えば石垣のセグメンテーションで石材の寸法 が求められるようになると石丁場の残石の寸法と比較し て類似性を検討することができる.

さらに、本手法は城郭石垣のみならず、石積み擁壁や 敷石道路など他の石造構造物への応用も可能であり、文 化財保全やインフラ管理の分野における革新的な技術基 盤としての展開が期待される.3次元情報の取得から図 面生成、さらには定量的な劣化リスク評価までを一気通 貫で実施可能な本枠組みは、石垣記録のあり方を根本か ら変える可能性を有しており、学術的・実務的の両面で 極めて高い意義を持つ取り組みである.

謝辞:本論文の執筆において名古屋城調査研究センター 大村陸氏および株式会社竹中工務店林瑞樹氏より調査 や論文執筆における貴重なご助言をいただいた.ここ に記して深く感謝の意を表する.

参考文献

- 2) 特別史跡名古屋城跡保存活用計画 第6章保存, URL: https://www.city.nagoya.jp/kankobunkakoryu/cmsfiles/co ntents/0000105/105368/6shou.pdf, 最終閲覧日 2025 年5 月9日

- 野口淳:文化機関における3次元計測・記録データの管理・公開の意義と課題.カレントアウェアネス/ 国立国会図書館関西館図書館協力課編,(351),pp18-22,2022.
- 4) 高田 祐一: UAV-LiDAR による小豆島加藤家石丁場の高精度地形計測,小豆島石丁場調査委員会 2023, 『小豆島石のシンポジウム 2023 資料集「日本遺産の石の島,新たな発見と保存をめざして!」』小豆島石丁場調査委員会, pp. 20-25, 2023.
- 高田 祐一, 大村 陸, 林 瑞樹:城郭石垣の記録・管理 における技術革新:石垣 BIM の開発と実験的応用.名 古屋城調査研究センター研究紀要, pp.149-158, 2025.
- He, K., Gkioxari, G., Dollar, P. and Girshick, R.: Mask R-CNN, Proc. ICCV2017, pp.2961-2969, 2017.
- Montes, K., Taher, S. S. A. D., Dang, J. and Chun, P.-J.: Semi-autopilot UAV flight path control for bridge structural health monitoring under GNSS-denied environment, *Artif. Intell. Data Sci.*, Vol. 2, No. 2, pp. 19-26, 2021.
- 叶井 和樹,山根 達郎,石黒 聡士,全 邦釘: Semantic Segmentation を用いた斜面崩壊領域の自動 検出,AI・データサイエンス論文集,Vol. 1, No. 1, pp. 421-428, 2020.
- 立石 良,西嶋 音々,東川 創,牧野 幹太: Mask R-CNN による道路カメラ画像の路面積雪判定モデル, AI・データサイエンス論文集, Vol. 5, No. 3, pp. 376-381, 2024.
- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P. and Girshick, R.: Segment Anything, arXiv:2304.02643 [cs.CV], pp. 1-14, 2023.
- 11) 板倉 健太,林 拓哉,上脇 優人,全 邦釘:セマンディックセグメンテーションやセンサーフュージョン を利用した橋梁の構造情報の推定のための点群処理 手法の開発,AI・データサイエンス論文集,Vol. 5, No. 3, pp. 10-21, 2024.
- 12) 板倉健太,林拓哉,斎藤嘉人,全邦釘:センサーフ ュージョンを利用した 3 次元点群からの錆の検出, Jxiv, doi: https://doi.org/10.51094/jxiv.1160.
- 13) Itakura, K. and Hosoi, F.: Three-dimensional tree

monitoring in urban cities using automatic tree detection method with mobile LiDAR data, *Artif. Intell. Data Sci.*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-10, 2021.

- 14) Itakura, K., and Hosoi, F.: Automated tree detection from 3D lidar images using image processing and machine learning. *Appl. Opt.*, Vol. 58, No. 14, pp. 3807-3811, 2019.
- 15) 稲富 翔伍, 全 邦釘:点群の画像化とディープラーニ ングを用いた橋梁点群のセグメンテーション, AI・ データサイエンス論文集, Vol. 2, No. 2, pp. 418-427, 2021.
- 16) Kong, Q., Liao, L., and Yuan, C.: Rapid generation of editable engineering drawings from 3D point cloud reconstruction for large-scale buildings. *J. Building Eng*, 63, 105486, 2023.
- 17) Fang, Y., Mitoulis, S. A., Boddice, D., Yu, J., & Ninic, J.: Scan-to-BIM-to-Sim: Automated reconstruction of digital and simulation models from point clouds with applications on bridges. *Results Eng.*, 104289, 2025.
- 18) Torr, P. H., and Zisserman, A., MLESAC.: A new robust estimator with application to estimating image geometry, Comput. Vis. Image Und., Vol. 78, Issue 1, pp. 138-156, 2000.
- 19) Zhao, X., Ding, W., An, Y., Du, Y., Yu, T., Li, M., ... & Wang, J.: Fast segment anything. arXiv preprint arXiv:2306.12156, 2023.
- 20) Pingel, T. J., Clarke, K. C., & McBride, W. A.: An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, Vol. 77, pp.21-30, 2013.
- 21) Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G.: An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing.; Vol. 8, No. 6, 501, 2016.
- 22) 大村陸,浅岡優,高田祐一,田ロ一男,二橋慶太郎, 井口喜景,小山圭嗣:西尾市前島石丁場跡調査報告. 名古屋城調査研究センター研究紀要. pp.119-148.2025.

Segmentation of Stone Walls from 3D Models for Stone Wall BIM Creation

Kenta ITAKURA, Takuya HAYASHI, Yuichi TAKATA

Traditionally, the mapping of stone walls has relied on two-dimensional drawings and photographs, which present challenges such as the lack of three-dimensional information, dependence on individual skills, and significant labor demands. This study aims to enhance the efficiency of creating "Ishigaki Karte" for systematically recording and managing the current state and structure of cultural heritage stone walls. We propose a method to generate line drawings from high-density 3D mesh models created using Structure-from-Motion Multi-View Stereo (SfM-MVS). By applying the Segment Anything Model (SAM) to the texture images of the 3D models, we automatically segment individual stone wall regions and extract boundary information, which is then exported in DXF format. To verify accuracy, we compared the automatically generated boundaries with manually delineated boundaries in a selected area of Nagoya Castle. The results showed a precision of 0.90 and a recall of 0.79, confirming that the segmentation of each stone wall was achieved with high accuracy.