

熊本城の再建に関するドローンの活用事例

にしむらしょうぞう やすいのぶあき
西村正三* , 安井伸顕**

Key Word UAV・SfM 解析, UAV・レーザ, 地上型レーザ, 石垣修復支援システム

1. はじめに

熊本城の石垣は、2016 年 4 月に起きた熊本地震により大きく被災し、崩落・膨らみ・緩みなど 517 面に達したと報告されている¹⁾。従来、これらの測量・計測には、トータルステーションによる測量や地上型レーザスキャナ(以下 TLS), 最近ではドローン(以下 UAV) による計測・撮影が行われてきた。そのうち UAV の解析手法としては特に写真測量の発展形である SfM^{注1)} 解析が一般化し、著者らも UAV を用い計測を実施してきた。しかし、SfM 解析は、画像による 3 次元データ取得のため、DSM^{注2)} となり、樹木が繁茂している環境下では DEM^{注3)} の取得は難しく、最近では、航空機 (LiDAR^{注4)}) を軽量化し UAV 搭載可能なレーザ機器 (以下 UAV (LiDAR)) も使用されており、それらを一覧に整理した (表 1, 図 1)。以下では被災した熊本城石垣を事例に、UAV (SfM), UAV (LiDAR), TLS を活用した各事例の課題及び課題解決策について紹介する。

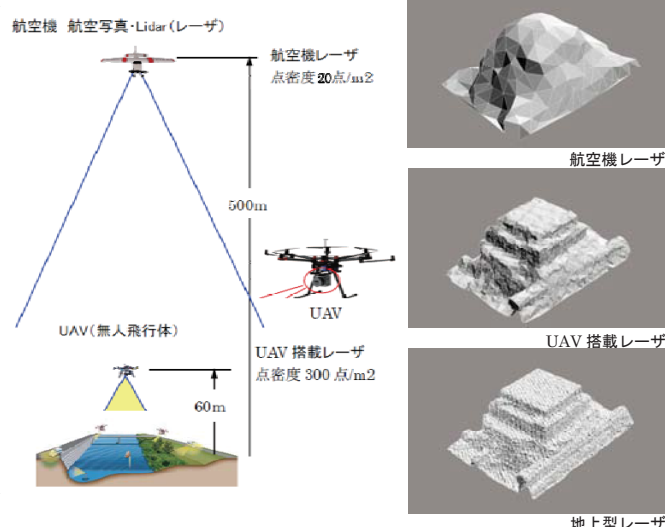


図1 UAVと航空機の高度の差と点密度

表1 地形形状取得技術の比較

	航空機 (LiDAR)	UAV (SfM)	UAV (LiDAR)
計測面積	1~50 km ² (5,000 ha)	0.5 km ² (50 ha)	0.5 km ² (50 ha)
対地高度	500m~2km	10~100 m	10~150 m
飛行速度	40~200km/h	40km/h 以下	40 km/h 以下
航続時間	2~3 時間	短い (30 分)	短い (30 分)
点密度	10~30 点/m ²	—	100~300 点/ m ²
特徴	樹木下の形状が計測可能 広範囲で計測可能	低空から高精細に撮影 SfM で高精細な画像を取得	樹木下の形状が計測可能 極小範囲を超高密度計測可能

注1) SfM : (Structure from Motion) 各写真の特徴点抽出と写真間の特徴点の対応付けを行い 3D モデルを生成

注2) DSM : (Digital Surface model) 植生等を含んだ数値表層モデル

注3) DEM : (Digital Elevation Model) 数値標高モデルは植生等を除去した地表面の地形のデジタル表現

注4) LiDAR : (Light detection and ranging) パルス状のレーザを発光し、対象物からの反射光によって距離を測る

* 株式会社 計測リサーチコンサルタント 取締役 クリエイティブ事業部 部長 博士 (工学)

** 株式会社 計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部 主任 博士 (工学)

2. 熊本城の被災状況

先に紹介したように熊本城の石垣は、熊本地震により大きく被災した。石の崩落は 50 箇所、229 面、被災面積は約 23,600 m² となり、これは石垣全体の約 3 割に達する。石垣の全面復旧には 20 年程度かかると試算されている¹⁾。特に熊本城の石垣は特別史跡の文化財²⁾であり、元の位置に同じ構造で復元することが求められており、そのためにも石垣面の 3 次元計測が重要となる。また計測に当たっては、樹木に覆われた石垣面の計測手法の提案を含め如何に迅速にかつ精度良く計測するかが鍵となる。



図2 熊本城の被災の状況²⁾ および計測対象



図3 樹木に覆われた熊本城の石垣
樹木に覆われた石垣面の計測を如何に迅速にかつ精度良く計測するかが鍵

3. UAV (SFM) 解析, 地上型レーザスキャナ

3. 1 概要と撮影・飛行計画

撮影にはデジタル一眼レフカメラを搭載することの可能な UAV を使用 (図 4 参照)。UAV に軽量なミラーレスカメラ Sonyα7R を搭載し、石垣の組織を把握するために目標解像度を 10mm/pix と設

定。解像度が一定となるよう、20m 程度の距離を維持して撮影する飛行計画とした。

3. 2 UAV 画像データの解析処理

撮影画像を用い SFM 解析を行う。SFM とは、多視点から撮影した画像を元に、対象物の 3D モデルを構築する技術であり、生成した不整三角形網 (以下 TIN=triangulated irregular network) には、3 次元座標とともに高精細な撮影画像がマッピングされた 3D モデルが構築される³⁾。現在 SFM 解析を行うソフトウェアは、数種類市販されている。一般的によく利用される 2 種類 (P,C) のソフトについて纏めた (図 5 参照)。ソフト P は、解析の柔軟性が高いが、構造物のエッジが正確に表現されていない。一方、ソフト C は、稜線を加味し TIN を形成するため、エッジの再現性が高い。石垣の修復検討では、石垣組み積みの再現性・認識度を重視するため、ソフト C を使用した。

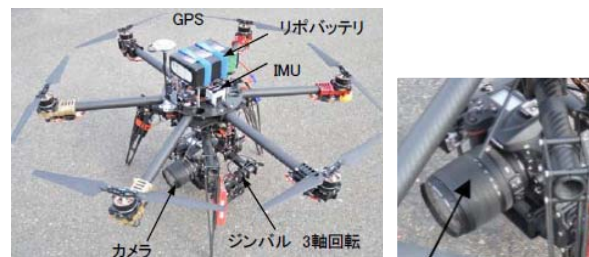


図4 UAV の姿図と機器類の配置

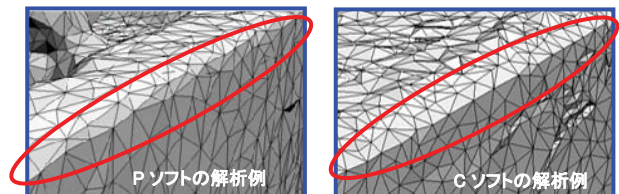


図5 構造物のエッジの再現性比較

4. 宇土櫓石垣への活用

4. 1 解析・検討に用いた情報

筆者らは以前から「石垣修復支援システム⁴⁾」の機能向上を図るため城郭石垣の 3D レーザデータの収集を行っており、震災 10 年前の宇土櫓の 3D 計測データを取得していた。以下では震災で被災した宇土櫓の石垣を、UAV(SFM) で構築した 3D モデル (以下 UAV モデル) と 10 年前 3D レーザで構築した 3D モデル (以下レーザモデル) (表 2 参照) を用いて、地震前後における石垣の変形の進行について比較・検証を行った。

4. 2 3Dモデル生成

(1) UAV(SFM) モデル生成

従来の写真測量では、UAV で取得した膨大な枚数の標定作業を手動で行う必要があり、多大な時間を要していたが、特に石垣など特徴点の多い対象の場合 SFM 解析では容易に奥行きのある面モデル生成も可能である。今回は UAV で撮影した計 100 枚の画像を使用し、SFM 解析で石垣面の精細な 3D モデルを生成した。また一方このデータを用いて石垣の孕みの進行について検討した。図 6 に解析の流れと図 7 に各成果のイメージを示す。算出した特徴点を元に、TIN を構築し、画像をテクスチャとして、マッピングすることで、3D モデルが生成される。このモデルは、PC 上で自由に拡大縮小・移動回転で任意の視点からモデルを閲覧が可能となる。生成したモデルを他 CG ソフト (Autodesk 社 3DSmax を使用) へ移行し、オルソ画像を出力し、損傷調査のベース図を作成する。

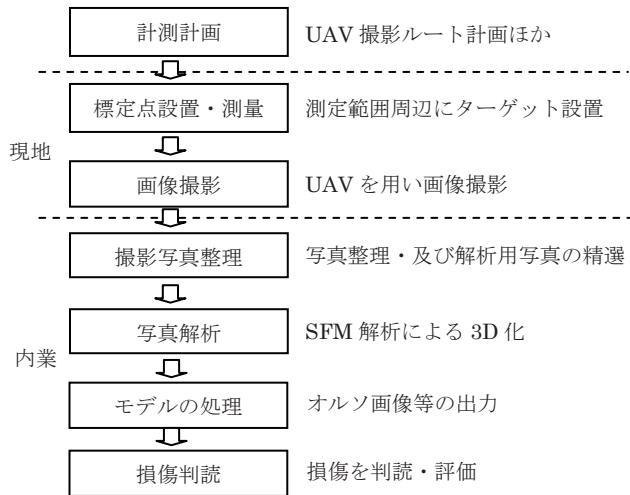


図6 UAV撮影～SFM解析処理作業の流れ

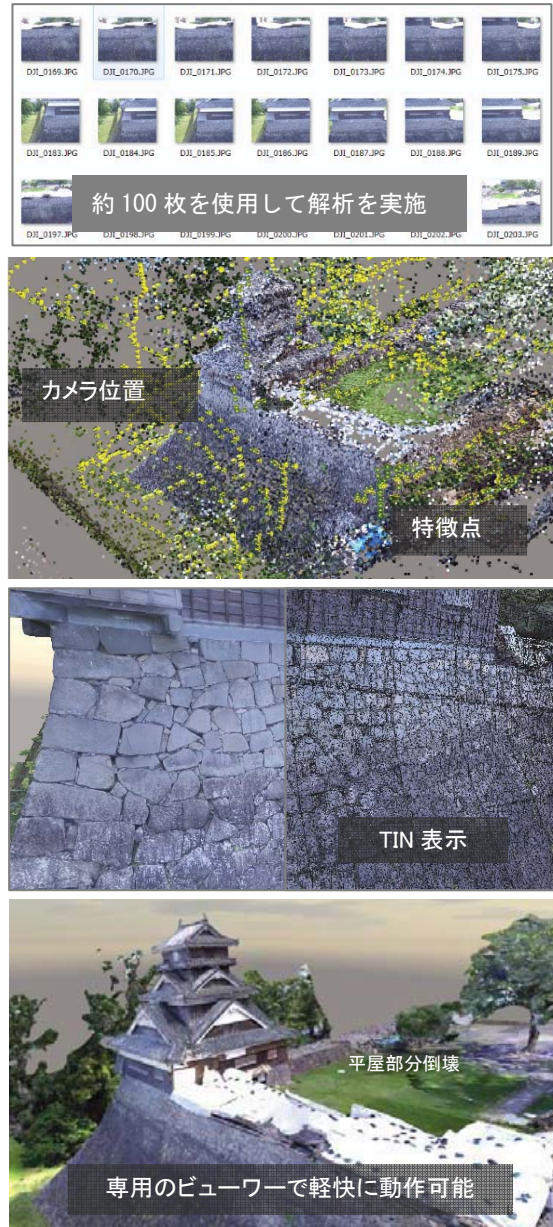


図7 解析処理作業の流れ

表2 解析に使用した情報

3Dモデル解析手法	UAV(SFM)	3Dレーザスキャナ	3Dレーザスキャナ
データ取得日	2016年10月8日 (震災後)		2006月4月18日 (震災前)
データ取得機器1	UAV	TOPCON GLS-2000	RIEGL LMS-Z420i
データ取得機器2	Sony α 7R		
解析ソフト	SFM (ContextCapture)	I-Site	I-Site
写真、3Dデータ提供	清水建設株式会社		リーグルジャパン(株)

(2) TLS レーザモデル生成

3D レーザ計測は、離れた位置から短時間に広範囲の三次元座標及び色情報を取得し、構造物の形状記録、変位計測を短時間で行うことができる。三階建ての「宇土櫓」は、外壁などが破損、平屋部分は倒壊した。その倒壊した平屋部分の漆喰が孕んだ石垣面に垂れ落ちその痕跡を確認できる。



図 8 TLS, UAV (SFM) を用いた 3D モデル生成

4. 3 比較検証

震災後の UAV モデルと震災 10 年前のレーザモデルを重ね、その差分値から過去のデータとの変化範囲を黄～赤の暖色で表現し、孕みの進行している箇所を抽出した (図 9 の①②)。またこのデータを元に 3m 毎の石垣断面を抽出し 17 断面を比較し重畳表示した (図 9 の③)。図 9 の④は、石垣面をオルソ画像として書き出し、石垣の変形、孕みの進行具合を抽出した段彩図としている。これらの結果から、石垣面の中央部及び右側に大きな孕みが見られ、特に右側の孕みの大きい位置の詳細断面からは、今回の 2 度の震度 7 の地震により、約 0.5m 程度の孕みが進行したことが明らかとなった。(⑤、⑥)

4. 4 石垣修復検討

石垣修復には、石垣の線形、断面、石材配置検討が必要となる。石垣断面の設定は、石垣の解体調査を行い、裏込層の範囲等の石垣情報を把握したうえで計画を進める必要があるが、今回は石垣外面調査により得られる情報のみであるが、凡その修復範囲を設定することができた。

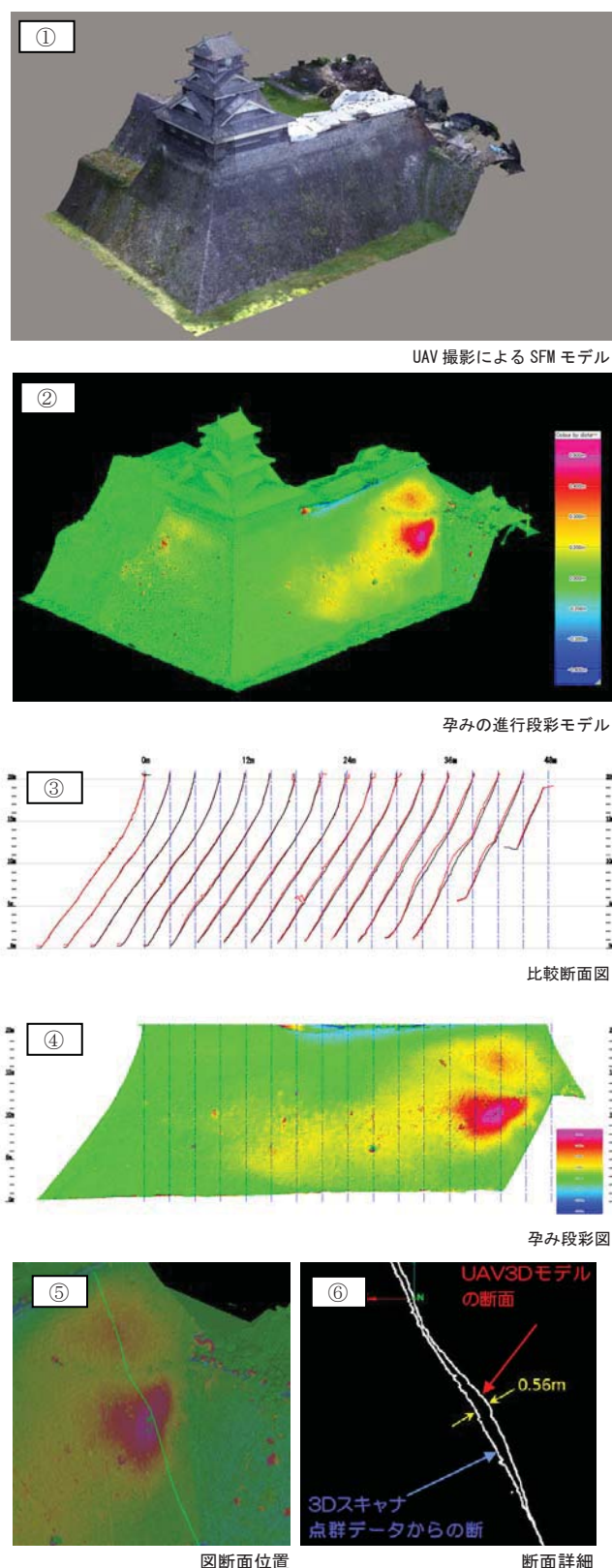


図 9 2 時期の石垣面の断面比較
(2006/4/18 と 2016/10/8 の比較)

5. UAV (LiDAR) の活用 (樹木に覆われた石垣)

5. 1 UAV (LiDAR) について

UAV にカメラを搭載し SFM 解析を用いた手法では、手前の樹木が阻害となり地表面の形状まで得られない。一方上空からのレーザ計測は、樹木の枝葉の間をレーザが通過することで、樹木下の地形の形状取得が可能である。現在市販されている UAV (LiDAR) は表 3 に示すように Riegl を搭載した高価なものから Velodyne 搭載の廉価なものがある (図 11)。データ取得から解析までの流れは同様である。以下では Velodyne 搭載の YellowScan について紹介する (表 4、図 12)。

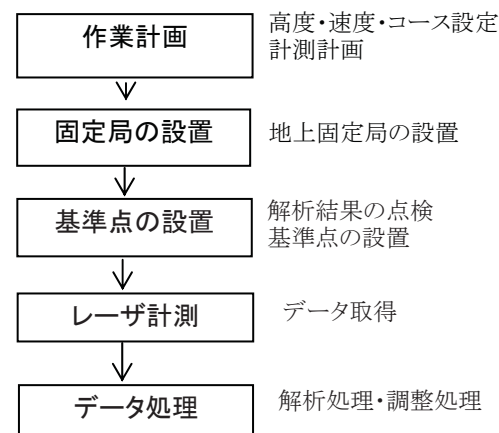


図 11 計測～処理のフロー

表 4 YellowScan の仕様

YellowScan Surveyor	
最大レンジ	100m
視野角	360°
測定数	30 万ショット/秒
GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou
重量	1.5kg (バッテリー含む)



YellowScan (IMU レーザスキャナ)

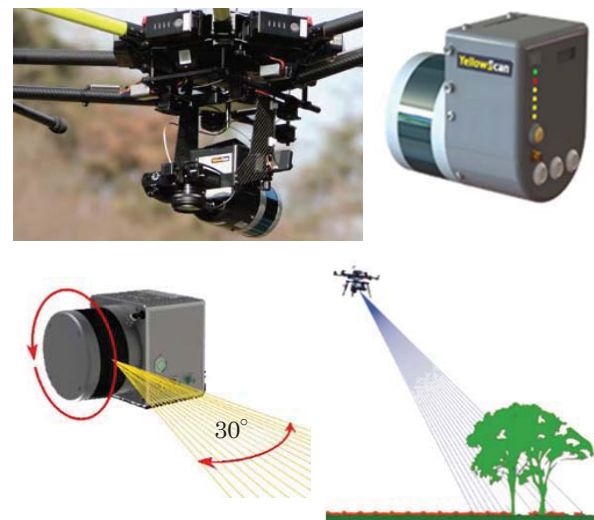


図 12 UAV (LiDAR) YellowScan システム

UAV (LiDAR) は、GNSS/IMU と LiDAR センサ、データロガーで構成されている。実機による航空レーザ、移動計測車両に搭載する (MMS) などと同様

表 3 UAV (LiDAR) の比較

レーザセンサ			
UAV (LiDAR)			
メーカー	Velodyne Lidar	RIEGL mini VUX-1	RIEGL
形式	ALS-16	Mini VUX-1UAV	VUX-1UAV
重量 (g)	830	1,550	3,650
測定誤差 (mm)	30	15	10

5. 2 UAV (LiDAR) を活用した石垣の計測

樹木に覆われた石垣面を迅速に計測する手法として UAV (LiDAR) を活用する例を紹介する。石垣面の前面が斜面で樹木に覆われた場合は、TLS が用いられることがあるが、樹木の幹の裏側での欠測発生により、複数回の機材移動が必要となり、効率のよい現地作業は難しい。UAV (LiDAR) 計測では、TLS の計測密度には及ばないが、上空を移動しながら多方向へレーザを照射することが可能なため、比較的死角の少ないデータが取得でき、石垣面の凹凸も取得データから確認できる。

図 13 は UAV (LiDAR) を活用し前面に樹木が覆っている状況での計測例を示したものである。植生を取り除くフィルタリング処理を行うことで、必要な斜面や石垣面のみを残すことが可能である。(①、②) また UAV (LiDAR) では広範囲を一度に取得することができるため周辺地形を含めた地形データ作成することが可能である。

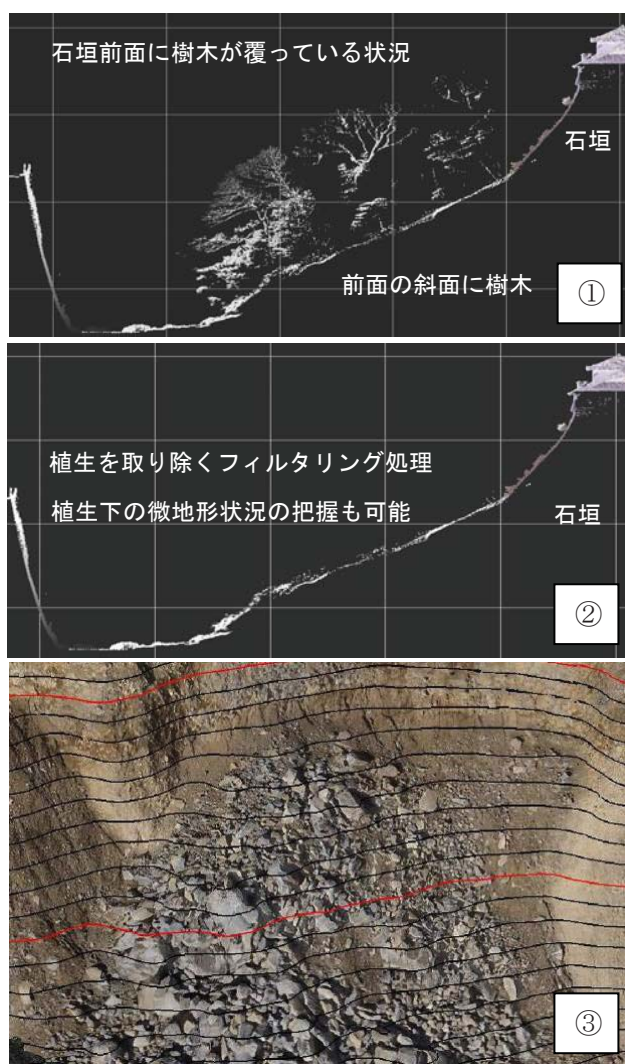


図 13 UAV (LiDAR) を活用した計測と表示例

図 13 の③は取得したデータから作成した地形コンターと取得点群を重畳表示したものである。このデータを活用することで、崩壊した石材や背面の裏込層の崩壊状況をより正確に把握でき、植生下の微地形状況の把握も可能であり、石垣を含めた周辺地盤の管理データとしての活用も期待される。

UAV (LiDAR) は、その機動性により平常時ばかりでなく緊急災害時を含めた様々な場面での利用が期待される。データの精度、運用の利便性の面から効率的で有益な測量手法の一つに発展することは容易に想像できるが、法律やガイドラインに従った機材運用での安全確保も発展に欠かせない重要な要素と考える。

6. まとめ

近年わが国では数年おきに大災害が発生し、その対策としての「防災・減災・救済」が国を挙げての喫緊の課題であり、特に UAV が、その中で重要な役割を担い始めている。熊本城の石垣で紹介した地震前後における 3 次元データを活用した解析は、常日ごろからインフラ構造物や文化財建造物の 3 次元データを取得しておくことの重要性について改めて検証できた好事例として紹介したものである。

UAV で撮影した画像をもとに SfM で解析することで、あるがままの 3D モデルとして形状を容易に再現できる。そのとき SfM 解析で 3D モデルを作成するには UAV 画像にこだわる必要は無く、地上から撮影したオーバーラップした画像があれば可能であり、例えば地域の NPO 等と連携を図ることで「地産地消によるインフラ点検」ができ、地方のインフラ長寿命化に大きく貢献する可能性がある。また、画像や 3 次元計測にて記録を残すことで、データを持ち帰ってからの状況把握がより理解しやすくなる、そのため目視点検のばらつきの解消にもつながり、より正確な判断、記録保存に貢献するものと考ええる。

<参考文献>

- 1) 熊本城の石垣に関するシンポジウム配布資料 2017/1/31 : 熊本大学百周年記念館
- 2) 熊本城復興を支援するみんなの会:「ブルーシートのかかっていない被災直後の熊本城 2106 年 4 月 16 日撮影」, 2016. 11
- 3) 鳥居秋彦ほか: 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU2011), (2011)
- 4) 一般財団法人国土技術研究センター:
<http://www.jice.or.jp/review/awards/manufacturing/02nd>
(2017 年 2 月 2 日現在)