

光学的計測手法を用いた軍艦島護岸の計測とモニタリング

— UAV・3D レーザ・写真解析・ギガピクセル画像 —

西村正三^{*,**}, 木本啓介^{*}, 味岡収^{*}, 安井伸顕^{*}, 松田浩^{***}

The Measurement and Monitoring at Gunkanjima-Island by Using Optical Measurement Techniques

—UAV・3D Laser Scanner・Photogrammetry・Gigapixel Imaging System—

Shozo NISHIMURA, Keisuke KIMOTO, Osamu AJIOKA, Nobuaki YASUI and Hiroshi MATSUDA

We have studied about the monitoring method using optical measurement techniques for one of the industrial heritages “Gunkanjima-Island” which the collapse is advanced. In this paper, We discussed about the monitoring method with UAV (Unmanned Aerial Vehicle), 3D laser scanner, and Gigapixel imaging system. We measured about the shore protection which is difficult for people to measure directly. In this measurement, we solved the problem by using UAV equipped with a digital camera. It enabled it to measure more safety and more easily to use UAV. On the other hand, we examined the structure managerial system which enables more high-precision and more efficient measurement from a remote location, using Gigapixel imaging system and 3D laser scanner. As a result, we were sure of these methods being sufficiently effective to the monitoring method in “Gunkanjima-Island”.

Key words: Industrial Heritages, Gunkanjima-Island, Optical Measurement Techniques, Monitoring, UAV, Gigapixel Imaging System

1. はじめに

筆者らは、光学的計測手法(3D レーザ, デジタル画像など)を用いて、大規模で劣化の進んだ不整形な構造物のあるがままの状態を捕捉する AsBuild データ取得と破損・損傷図作成への適用性について軍艦島を調査研究対象に検証してきた^{1)~3)}。その成果は以下のように整理される。

・3D レーザ計測は、少ない計測箇所から広範囲のデータが取得可能である。稜線抽出処理を行うことで破損図作成までを支援でき、抽出した稜線データ量は取得点群データの1/100 程度であるにもかかわらず、3 次元形状の再現性も十分あり、今後の利活用の幅が大きく広がることが予想される。また、同手法により崩落した部位の抽出も可能で、変状監視にも活用できる可能性がある。また点群を「球体表示」し、一定方向から光を与えることで球体に陰影が付与され、構造部材や損傷部位が立体的に表現され、結果写真とほぼ同程度の鮮明さで構造物を把握でき、簡易に破損図作成までを支援できる。しかし高密度に 3D レーザで計測しても亀裂幅までは正確には読み取れない。

・デジタルカメラで撮影した分解能以下のひび割れにおい

て、クラックインデックス [CI] という指標を設定することで、ひび割れ損傷図を作成できる。この [CI] は、分解能以下のクラックが CCD に取り込まれた際に各クラックが有する面積といった概念である。また [CI] はクラック幅と明瞭な相関を持つことが実証結果から得られ、クラック毎に [CI] を求めることでクラック幅を定量的に算出し CAD と連携させひび割れ損傷図を作成できる。

しかしこれまではあくまでも島内からの計測であり、軍艦島を波浪から護る護岸については実施していない。これら護岸は、島内の建造物と同様、損傷の度合いが激しく一部には大きな亀裂が入り、島の存続に関わる緊急性の高い問題となっている。3D レーザで計測するには機器を固定させる必要があるが、外海側には固定できる箇所は限られている。そこで予め世界測地系を基準に飛行経路を設定しておくことで自動飛行が可能な UAV (無人航空機) にカメラを搭載して上空からステレオ撮影を行い、この画像と部分的に取得できた 3D レーザ計測結果から写真解析を行うことで護岸の形状モデルの生成、損傷把握の程度、及びその精度について検証した。また従来ひび割れの詳細撮影は、望遠レンズを装着し実施されてきたが、同手法では撮影画角が狭く撮影位置の特定などに課題があった。今回予め設定した撮影範囲内を連続的に撮影し、自動連結 (Stitch) することができるギガピクセル画像撮影システムを用いることでそれらの効率化について検証した。本論文は、これまで調査、計測を実施していない護岸周りの計測手法に焦点を当て、これらの調査手法の有効性について報告する。

原稿受付 2012 年 6 月 18 日

* (株)計測リサーチコンサルタント

(〒732-0029 広島市東区福田 1-665-1)

** 学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程

(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

*** 正会員 長崎大学大学院工学研究科システム科学部門

(〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

2. 3Dレーザを用いた護岸の計測

干潮時の護岸の状況を Fig.1 に示す。干潮時には概ね高さ 10m の護岸が姿を現す。長崎独特の石積護岸は、目地材として俗称「あまかわ」と呼ばれる赤土に石灰と「すさ」を混合させた天川漆喰が使用された護岸であり、それを鉄筋コンクリートで包み込む形で補修、補強がなされてきた。

しかしコンクリートとの境界で破断している部位も多く発生している (Fig.2)。今後護岸修復にあたっては、文化財としての価値やオリジナリティーの観点も含めた調査や修復工事が重要となることから、3D レーザを用いて護岸法線、及び護岸背面 (特に天川) の損傷状況を計測した (Fig.3)。3D レーザ計測を行うことで、損傷状況を 3 次元的に可視化することが可能となる。Fig.4 が計測した 3D レーザデータを断面的に表示したものである。これらのデータは全て座標値を保持しているため、設計当初の断面図と比較することで、護岸の変位・損傷度合いを詳細に確認できる。一方外海からの調査は、これまで計測機器を設置できる場所がないため困難となっていた。Fig.5 は後述する UAV にカメラを搭載し撮影した護岸の一部である。従来船舶を用いた外海からの調査では、亀裂の規模や伸展方向までは把握が困難であったが、UAV を用い俯瞰撮影することで容易にそれらを確認できる。Fig.6 は、上記で紹介した各部位をそれぞれ平面図にプロットしたものである。

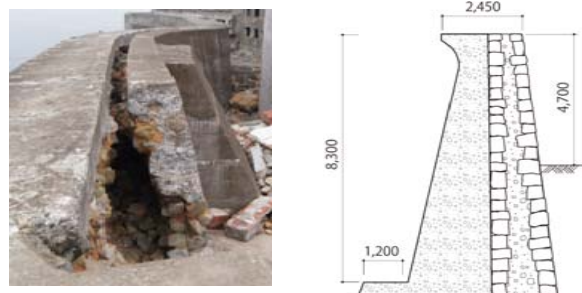


Fig. 2 The Situation of shore protection of Gunkanjima-Island



Fig. 3 The situation of measuring using 3D laser scanner



Fig. 4 The view of the shore protection

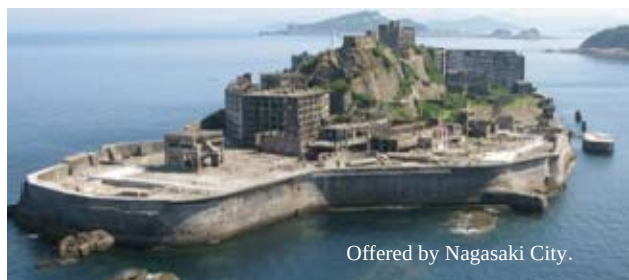


Fig. 1 Situation of shore protection of Gunkanjima-Island



Fig. 5 The picture taken from the sky with a camera loaded onto UAV

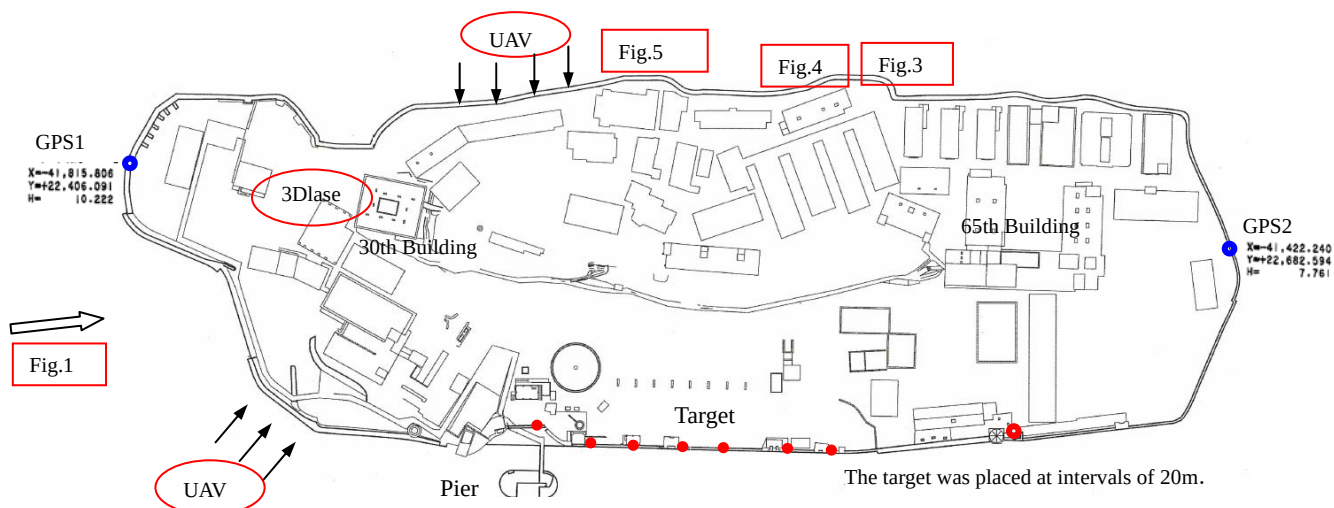


Fig. 6 The plan of Gunkanjima-Island

3. 護岸計測手法検討

護岸延長は概ね 1.2km である。そのうち護岸天端から海側護岸側面延長の 3 割は 3D レーザ計測が可能であった。また 3D レーザを外海側に固定し護岸部分を計測できる箇所は栈橋上に限られ、その計測可能な延長距離は全体の 1 割であった。Fig.7 は護岸天端および栈橋から 3D レーザで計測可能であった部分の一部を示している。計測ができなかった隅角部について UAV を用いた写真解析手法で補完が可能か、またその精度について検証した。

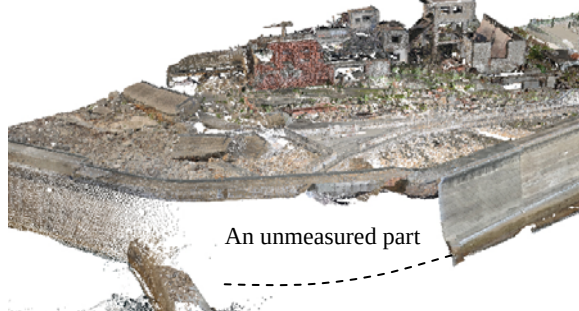


Fig. 7 Only the laser scanning data

3. 1 UAV を用いた外観変状調査

(1) UAV (Unmanned Aerial Vehicle) について

UAV は機体に GPS とジャイロを搭載し、予め飛経路を設定しておくことで自動飛行が可能で対象部位を詳細に撮影することができる。これまでの高度な熟練が必要とされたラジコンヘリ操作と比較し、習得が簡単で調査担当者自らが使用することが可能である。今回用いた機体 (MK-8) の仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of the body

Body weight	1,260g
Wind velocity	10m/s
Continuation flight time	15min~
Loading weight	1.5kg
Range which can be controlled	1~1,5km
Flight level	~300m

(2) 護岸の撮影条件

基準点がなくとも画像の特徴部分を対応付けることにより、画像座標のみで仮のカメラの位置と傾きを計算し、後に既知点の座標値や 2 点間距離から 3 次元座標に変換できる。護岸の撮影は、事前に設置が容易な護岸天端にターゲット (φ300mm) を 20m ごとに配置し基準尺として用い写真解析を行い、3D レーザとの比較検証を実施した (Fig.8, 9)。飛行時間の観点から搭載するカメラはなるべく軽量であることが望ましいため軽量なミラーレスカメラ (画素数 16MP, 以下 100 万 pixel を MP と記述, 焦点距離: 16mm) を搭載しステレオ撮影する撮影計画とした (Fig.10)。飛行ルートの設定は、飛行中の突風など不測の事態に対処するため構造物から 30m 以上離して飛行する計画とした (Fig.11)。そのため対象面の画像解像度は 10mm/pix 程度となり、捕捉対象のひび割れ幅は壁面の汚損状況の影響も考慮し解像度の 1/2 である 5mm を目標とした⁴⁾。

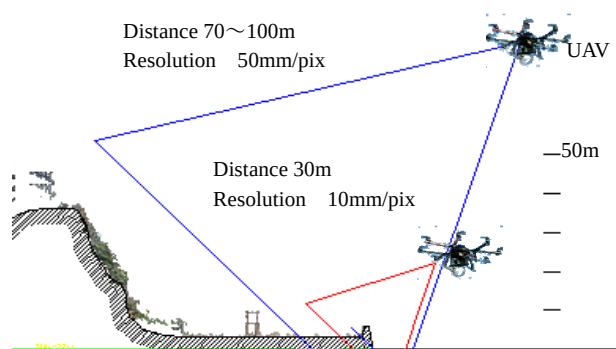


Fig. 8 The flight plan of UAV

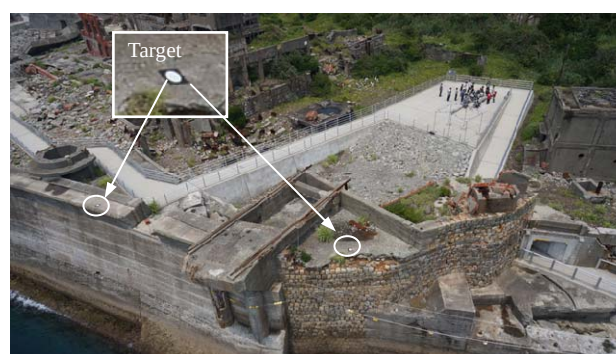


Fig. 9 The picture taken from the sky with a camera loaded onto UAV (12MP)

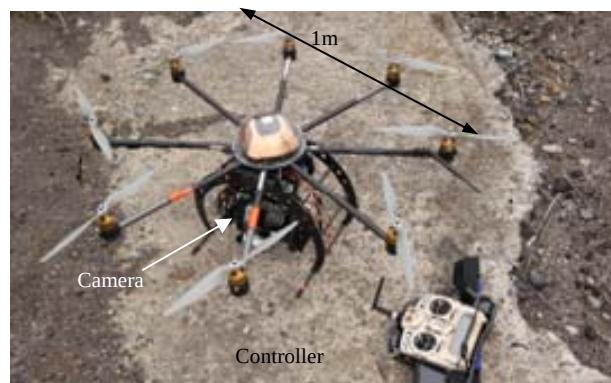


Fig. 10 UAV and controller



Fig. 11 A setup of a flight route

3. 2 デジタル写真解析結果

(1) 概要

デジタル写真測量（画像計測）は左右方向から撮影した最低2枚のステレオ画像を用い、解析後の3Dデータと画像データを用いて、テクスチャ付きの3Dモデルを作成し、パソコン上で計測した結果を任意の視点から3Dとして観測し、視覚的に評価できる。デジタル写真解析・処理の流れをFig.12に示す。

(2) 精度

写真解析ソフトを用いれば対象物にセットしたターゲットの中心（重心）を半自動で算定することで、個人差なく簡単かつ高精度で標定できる。撮影距離に対して、およそ $1/1,000 \sim 1/3,000$ ⁵⁾、すなわち今回の撮影距離 30m でおよそ 30mm 程度の精度で計測が可能となる。

(3) 標定

標定とは、計測対象を撮影した時のカメラの位置と傾きを求める作業であり、通常座標のわかっている基準点を3点以上写しこんで、基準点と画像との対応点を計測して算出する。しかし今回の護岸のように基準点を多く設置できない場合を想定し、画像の特徴部分に対応付けることにより、画像座標のみで仮のカメラの位置と傾きを計算したのち既知点の座標値や2点間の長さを与えて3次元座標に変換することとした。

(4) データ処理

ステレオマッチングで計測される DSM (Digital Surface Model—数値表層モデル) データは、対象物の表面形状をリアルな高密度データ（点群）として得ることができる。

これらの点群データから3DのTIN (Triangulated Irregular Network—不整三角網モデル) モデルなどの面的なデータに変換することが必要である。今回は護岸の天端の輪郭を手動でポリライン化（ブレークライン）して利用した。TINモデルが形成できると、正射画像（オルソ画像）への変換、断面図として簡単に処理できる。撮影条件は距離約 30m、基線長 10m 前後である。この条件では1画素の分解能は、平面方向で約 10mm となる。これらステレオモデル毎の画像を用いて、3D図化とDSM自動生成を行った。また3Dレーザから別途基準点としてモデル毎に約20点程度を加

えFig.12の②、③をオルソ画像として重畳し精度検証を行った。画像端部で比較した結果 ± 1 画素の誤差（ズレ）が一部確認され、精度としては、 $\pm 10\text{mm}$ 程度と判断される。

Fig.13は、先に示した3Dレーザでは未計測であった箇所を写真解析で得た3Dモデルを用いて合成した結果を示している。またオルソ画像をもとに一部損傷図を作成した。

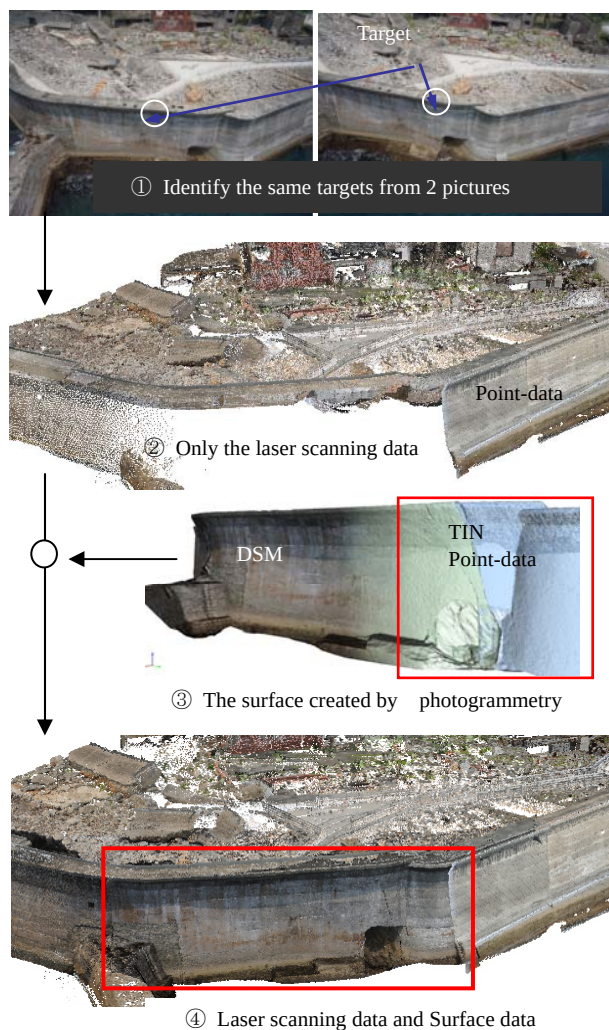


Fig. 12 The flow of analysis using photogrammetry

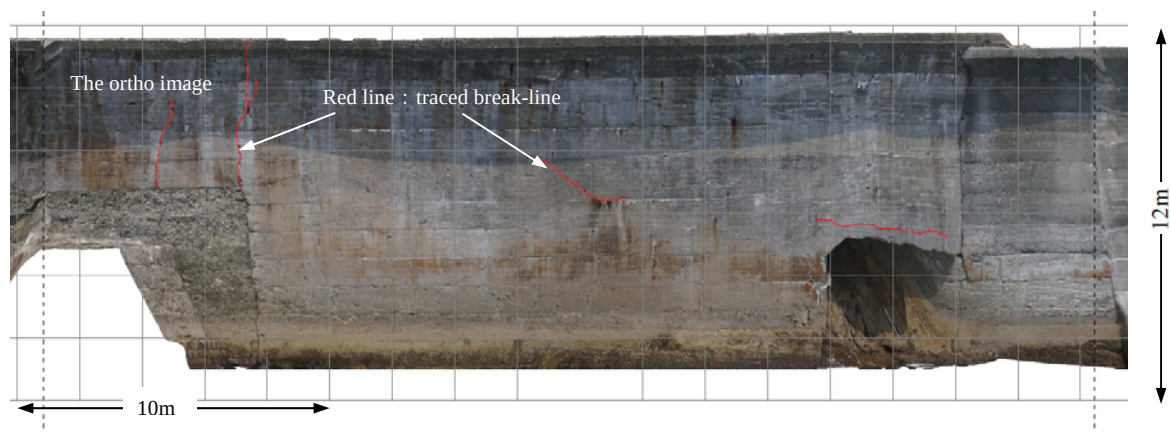


Fig. 13 Created ortho image and traced break-line

4. ギガピクセル画像の活用

4. 1 ギガピクセル画像について

従来壁面に生じているひび割れの撮影は、望遠レンズを装着し行われてきた。しかし望遠レンズを装着すると撮影画角が狭くどこを撮影しているのかが明確でないため撮影に抜けが生じる可能性がある。また膨大な写真の整理と撮影位置の確認に多くの時間と労力を要していた。今回用いたギガピクセル画像撮影システムは、カメラを搭載することのできるモーター付きの雲台で、設定した撮影範囲内をレンズの焦点距離に合わせ自動分割し、所定のラップ率で連続的に撮影するものである。得られた数百枚の画像は専用ソフトで一枚に合成—Stitch 処理され、数十億画素の画像も作成することができる。この合成された画像は単体で数ギガバイトと非常に重いデータとなるが、画像の構造を、高解像度から低解像度の画像までのいくつかの異なる解像度の画像の集合（画像ピラミッド構造）にすることで通常の PC でもストレス無く画像の拡大縮小などの操作が可能となる⁶⁾。Fig.14 にその画像ピラミッドのイメージと各階層レベル (lv) における概略の画素数を示す。

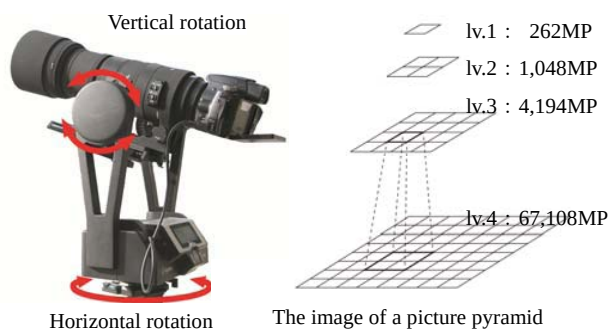


Fig. 14 Gigapixel imaging system

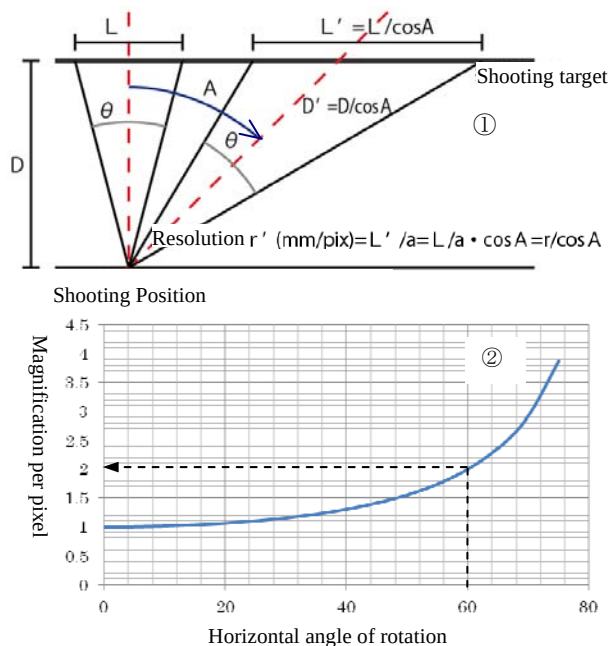


Fig. 15 The relationship between magnification and rotation angle

しかしギガピクセル画像は一点から放射状に撮影を行うため、撮影された画像は球面の一部を切り出した形状となり、画像には歪みが含まれる。歪みは回転角度が大きくなるほど顕著となる。Fig.15①は、対象面に対してカメラを A 度回転した場合は $\cos A$ の逆数倍で表現できることを示し、②は回転角度と単位ピクセルあたりの長さ倍率の関係を示したものである。例えば 60 度の時には 2 倍となり、ひび割れの長さや幅が正確に求められなくなる。このギガピクセル画像から幾何補正処理でオルソ化できれば、正確にクラックの長さなどが算出でき、より有効な活用ができる。以下は、トンネルなど壁面が一樣な場合について幾何補正処理の手法について検討したものである。

4. 2 ギガピクセル画像の幾何補正と精度について

壁面に生じているクラックの長さ、幅が正確に確認できるよう 1m グリッドをチョーキングした。Fig.16 の①は、当該撮影システムで撮影した横 20×縦 10 枚の画像を接合した画像の一部を示したものであり、②は 1m グリッドをもとに幾何補正を行いオルソ化したものである。この幾何補正した画像から、先述したクラックインデックス [CI] を求めた結果、クラック幅 0.6mm を確認できた。このように対象面がフラットであれば容易に補正も可能である。

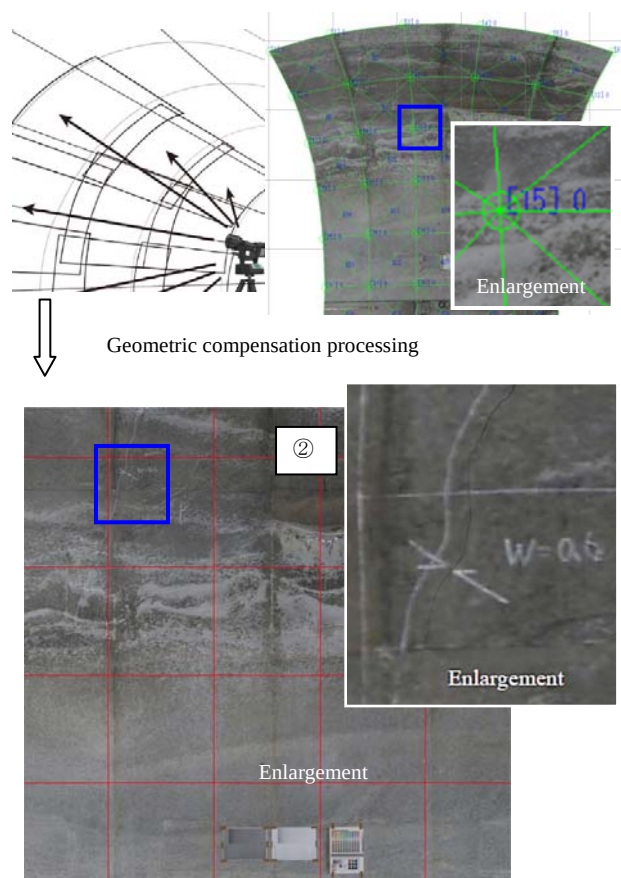


Fig. 16 The picture by which the compositing process was carried out, and the picture by which geometric compensation was carried out

4. 3 精度検証

分解能以下のひび割れ幅の算定については、クラックインデックス〔CI〕という指標を用いることで「ひび割れ幅」を算定することが可能である。〔CI〕は、クラックが CCD に取り込まれた際に各クラックが有する面積といった概念であり、クラック幅と明瞭な相関を持つ³⁾。また〔CI〕は、撮影対象面における解像度や明度（基調レベル）にも影響されるため Table 2 に示す撮影条件で撮影を行った。また撮影に要した時間、精度及びトータル画素数を整理した。精度確認には校正用のクラッケールを貼り付け、0.1mm 以上のひび割れ幅までが確認できるよう実施した (Fig.17)。

Fig.18 は、横 23×縦 19 枚 (総 437 枚) の画像を合成処理したものである。対象面は、梁、柱型で 30cm 程度の凹凸があるが、今回は簡易に処理を行うため平面と仮定して幾何補正処理を行った。合成処理された画像から対象ひび割れ幅が 0.4mm であることを確認できる (Fig.19)。このように本システムを用いることで、詳細画像を連続的に撮影し、数十億画素の 1 枚の画像が容易に作成される。これまで課題であった膨大な枚数の画像整理と撮影位置の確認作業の省力化が期待できる。

Table 2 The setting conditions of photography

Pixel number (H×V)	3,264×4,912 (16MP)
Imaging device	23.5mm×15.6mm
Object distance	40m~80m
Focal length	750mm
Number of shots	W 23×L 19 (437 shots)
Time	40min
Resolution	0.36mm/pix
Total pixel number	3 billions pixel (61,127×4,9436pix)



Fig. 17 Situation of shooting images using Gigapixel imaging system

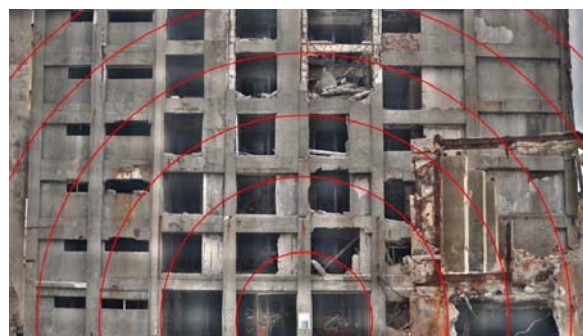


Fig. 18 The result by which geometric compensation was carried out

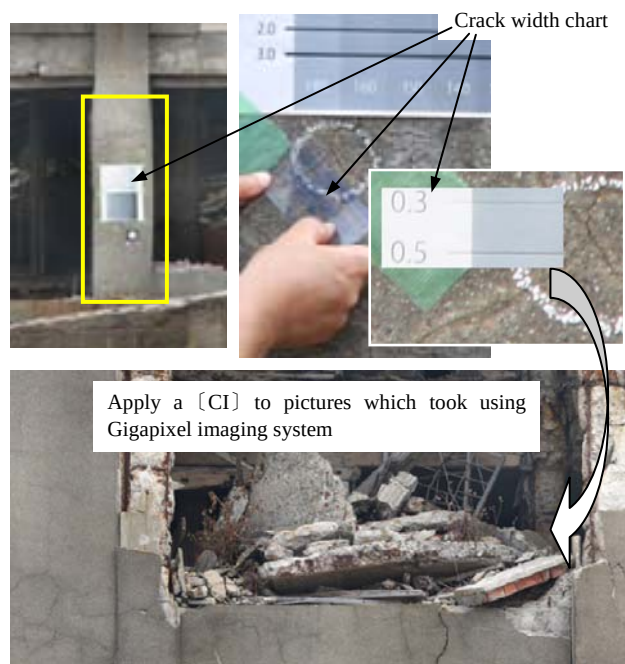


Fig. 19 Investigation of crack width

5. パノラマ画像作成とその有効性について

5. 1 パノラマ画像作成

構造物全体の概要把握にはパノラマ画像が有効とされ全方位カメラ、例えば Ladybug3 (Point Grey Research 社) の撮像機器が多用されることが多い^{7), 8)}。この機器は 2MP のカメラ 6 個で構成され、1 秒間に最大 15 枚の撮影が可能であり、歩行しながらの撮影には適している。

Fig.20 は、筆者らが当該機器を用いて試行したときの状況である²⁾。Fig.21 は、撮影距離における全方位カメラ (Ladybug3) と一眼レフカメラの解像度の比較を示している。全方位カメラは、カメラの CCD サイズが広角なため、撮影距離が 7m の場合の解像度は 10mm/pix 程度となり対象物の詳細把握までは困難となる。

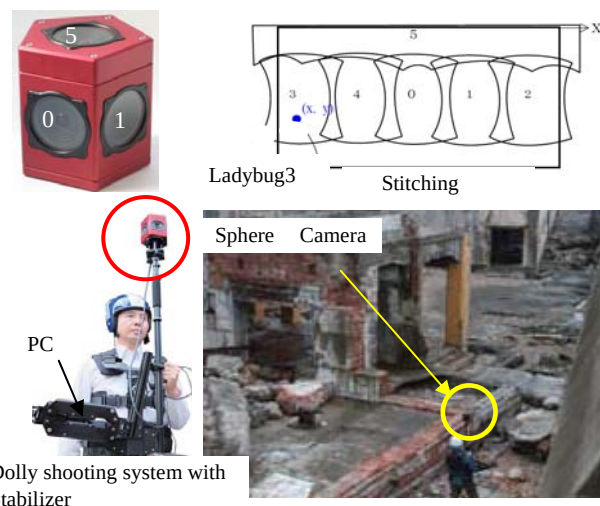


Fig. 20 Sphere Imaging System with Ladybug3

またラジコンヘリにこの全方位カメラ (Ladybug3) を搭載しパノラマ撮影した事例はあったが解像度の点から応用が制限的であった。一方, UAV は操作性が高く機体を上空でホバリングさせながら回転させて撮影することが可能であり, より高精細な全方位パノラマ撮影を行うことができる。大縮尺デジタル画像に加えてこの全方位パノラマ画像の活用について検討した。UAV に搭載したカメラで撮影した全方位パノラマは, 高品位な画像を提供することが特徴である。今回は上空 1 箇所から 15 枚の撮影を行い自動連結で 1 枚のパノラマ画像を作成した。この画像の操作性について Fig.22 の①～④に示す。ユーザーが, パノラマ写真上でマウスをクリックしポインタを動かすことで, 上下 (仰角・伏角)・前後・左右へと視野を移動させたり, ズームアップやズームアウトが可能である。Fig.22 の③, ④から詳細部位まで確認できることが判る。また先に示したギガピクセル画像撮影システムは, ノーダルポイント (交点) を不動にすることはできないが, 自動設定で雲台を回転させることができ地上からの詳細なパノラマ画像を撮影するのに好都合な機器である。UAV, ギガピクセル画像撮影システムの 2 種類の手法で作成したパノラマ画像は, 崩落が進行している部位の位置やその形態をわかりやすく可視化した画像であり, 今後の点検管理に果たす役割は大きい。

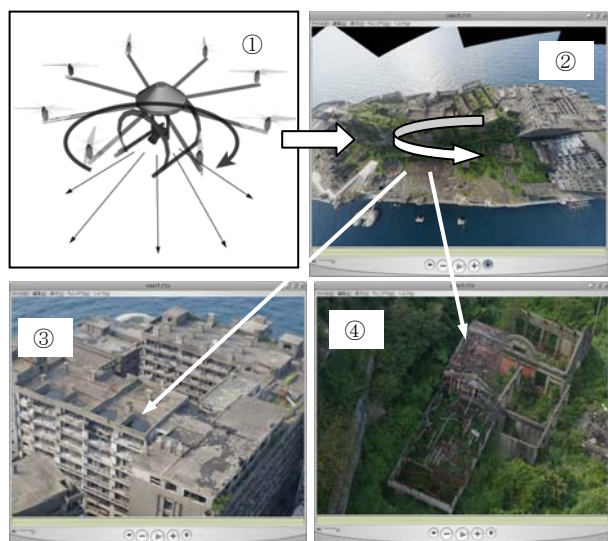
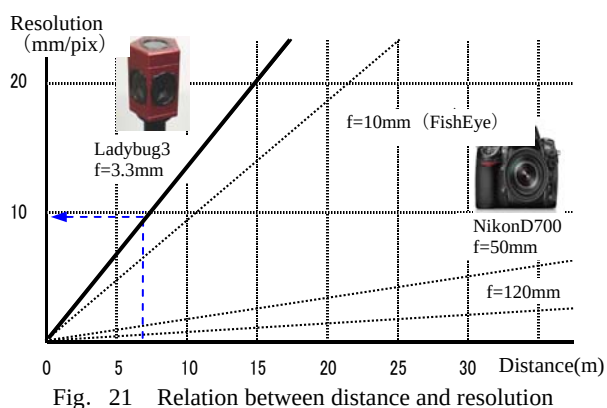


Fig. 22 The panoramic radiography system from the sky

5. 2 画像検索システムについて

筆者らはこれまでに5.1で述べた 2MP の全方位カメラと望遠レンズを装着した一眼レフカメラの画角と解像度に着目し「画像検索システム」を開発し報告した²⁾。今回ギガピクセル画像撮影システムで生成した高精細パノラマ画像 (以下本システムパノラマと称する) を連携させ機能向上を図った。Fig.23 にそのシステムの概要を示す。Fig.23 の①は本システムを用いた撮影状況と②はその画像の一部である (2012 年 6 月撮影)。一方 Fig.23④は凡そ 2 年前の 2010 年 10 月に撮影したパノラマ画像である。図中赤枠部分の詳細画像⑤は別途一眼レフカメラで詳細撮影したものである。以下は機能追加した画像処理¹⁰⁾について紹介する。本システムパノラマの一部を⑤と合致できるようにまず幾何補正・膨張縮小処理を施したものが③である。その後⑤と③を用い, 差分, 二値処理から崩落進展範囲を抽出, 粒子解析で面積算出 ($4,620 \text{ cm}^2$) を行い図化・グラフ化したものが⑥⑦である。このように全方位パノラマ画像と詳細画像の双方向の検索が可能な「画像検索システム」に一連の画像処理・解析機能を向上させることで画像整理作業とモニタリングへの効率化が期待できる。従来は多くの紙資料などを現場に持参しての点検が余儀なくされたが, 軽量の端末装置で迅速に以前の詳細画像⑤を表示し, 現状の損傷状況②との比較, 照合までをストレスなく行える。

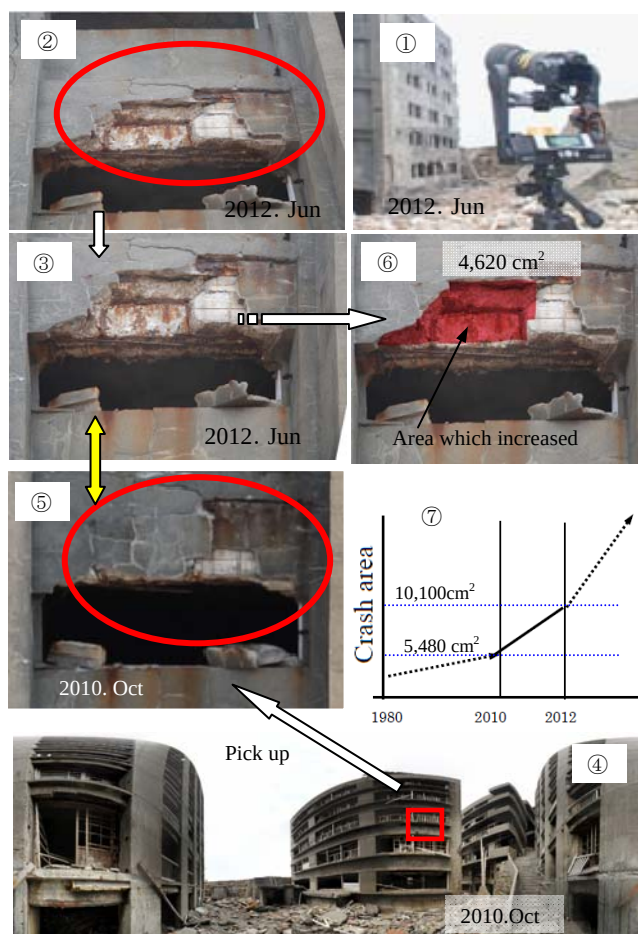


Fig. 23 Example of Image searching system

6. おわり

本論文では、崩壊が進行している近代化産業遺産である軍艦島を外海から調査することのできる UAV を用いた外観変状調査などについてその適用性を検証した。

・簡易に設置した基準尺ターゲットと別途 3D レーザ計測で得たポイントを標定要素に加えることで、デジタル写真解析を行うことができ護岸全体の 3D モデル化ができた。

この 3D モデルに UAV から詳細に撮影した画像をマッピングすることで任意の箇所からその損傷状況を確認することができ、またそのオルソ画像から護岸の損傷図までを作成できる。加えて UAV は、飛行ルートを予め設定しておけば同じルートを反復して撮影でき、上空から建造物や護岸の経年変化の状況を同じ箇所から撮影することで、正に空中からのモニタリングへの活用性が高い。

・望遠レンズを装着し損傷部位を詳細に撮影する場合、膨大な写真整理と撮影位置の確認作業に労力を要する。今回ギガピクセル画像撮影システムを用いることでそれらの効率化について検証した。島内の建物にあっては、ギガピクセル画像撮影システムで得られた膨大な画像を自動でステッチし数 10 億画素の画像を作成でき管理が容易にできる。

しかし当該画像は、撮影位置から回転角度が大きくなると歪みが増大し画像品質に大きく影響を与える。今後は撮影装置と 3D レーザの形状データから、幾何補正処理を行うことでモニタリングにも活用可能なオルソ化についてのシステム化を行っていく必要がある。

・カメラを搭載した UAV は上空で機体を安定させて回転でき、高精細なパノラマ撮影を行うことができた。この上空からのパノラマ画像と地上からのギガピクセル画像撮影装置で撮影した 2 種類の全方位パノラマ画像は、崩壊が進行している部位の位置やその形態をわかりやすく可視化し、またその操作性も良いため今後の点検管理に果たす役割は大きい。

・その他本論文では紙面の関係から割愛したが、3 種類の 3D レーザを用いて同一箇所を計測しその機器による性能を比較検証した結果、点密度に配慮すればいずれの機種においても崩壊進行箇所を確認できた。保存対象として考えられる構造物 (例えば 30 号、日給社宅その他) の変状監視モニタリングの一手法にもなる。

上記に示したように今後、軍艦島のモニタリング手法を検討していくうえで十分な活用手法が見出された。

軍艦島を始め近代化産業遺産がますます注目をあびることになると思われるが、老朽化が進んでいる構造物が多く大規模な補修、補強の機会が増えるものと考えられる。

しかし文化財であるがゆえに調査や監視方法に制約があり (なるべく非破壊・非接触であること)、他の構造物と同様の調査、監視が行えないこともある。

以上のことから、3D レーザ計測や UAV、ギガピクセル画像撮影システムで撮影したデジタル画像を用いた光学的な計測は、非接触で 3 次元形状、詳細画像取得が行えるという利点から、有効な手段であると考えられる。

謝 辞

軍艦島上陸に当たっては長崎市企画財政部世界遺産推進室の方々に便宜を図っていただきました。

3D レーザ計測では、リーグルジャパン(株)の松田重雄様に、UAV 操作では(株)快適空間 FC の益田俊信様に協力いただきました。紙面を借りて深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Nishimura, S. et al.:The Measurement and Monitoring at Gunkan-jima-Island by Using 3D Laser Scanner (in Japanese), *J.JSEM*, **11**-3 (2011), 221-228.
- 2) Nishimura, S. et al. : The Measurement and Monitoring at Gunkan-jima-Island by Using 3D Laser Scanner and Sphere Camera (in Japanese), *Proceedings of JSEM Annual Conference on Experimental Mechanics*(2011), 163-168.
- 3) Nishimura, S. et al.:The Measurement and Draw Damaged Plans at Gunkan-Island by Using 3D Laser Scanner and Digital Camera (in Japanese), *Journal of JSPRS* (2012), 46-53.
- 4) *A Techniques of Concrete Diagnosis*, Japan Concrete Institute (2000), 90-95.
- 5) *Theory and Practice of Digital Photogrammetry*, JSPRS. Japan Association of Surveyors (2004), 18-20.
- 6) Atsumi, M.: Stochastic Selective Attention and its Shift on the Visual Attention Pyramid, *Proc. of 14th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision* (2009), 463-468.
- 7) Hirata, K. et al.: About Use of the Investigation of the Local Photograph Image that Uses the Digital Technique, *JAST* **21**(2010) (CD-ROM).
- 8) Nishimura, S. et al.: Development of On-Board Image Measurement System for Actual Running and Application to Wall Surface Surveys of Structures, *JAST* **21**(2010) (CD-ROM).
- 9) Nishimura, S. et al.: Development of a Hybrid-camera System for Bridge Inspection, *IABMAS2012*.
- 10) Ex : <http://www.anfoworld.com/IDP.html>