レーザ・全方位カメラを用いた軍艦島の計測とモニタリング

西村正三*,木本啓介*,松田浩**

The Measurement and Monitoring at Gunkanjima-Island by Using 3D laser scanner and Sphere Camera

Shouzo NISHIMURA, Keisuke KIMOTO and Hiroshi MATSUDA

By using 3D laser scanner, we measured and applied the As build data of Gunkanjima-Island that the collapses progress in various industrial heritages. We showed that we can support to draw a damaged plan more easily with the picking out break-lines from the 3D laser data, and monitor the deformation with the 3D laser data measured at two times. In addition, we have developed new inspection system aiming at high resolution photos for specific areas as well as a whole picture of objects such as Sphere-Camera. This is referred to system covering "micro to macro on any objects" It proposes effectiveness of "Detailed image search system by using sphere image" that uses sphere image as an index and applied the possibility in the future.

Key words: Industrial Heritage, Gunkanjima-Island, Laser scanner, Sphere-Camera , Deformation Monitoring

1. はじめに

近代化産業遺産は、製鉄所などの工場設備や鉱山、橋、 ダム,発電所などの建造物,さらには河川や港湾施設など、 産業の発展と社会の近代化を支えた総体を文化遺産として 捉える概念である.しかし、近代化産業遺産に関しては、 関連する法制度、管理体制、修理技術などが、従来の木造 を中心とした文化財建造物と比べて多様であることなどか ら、それらの修理、管理、活用に関する考え方や手法が十 分確立されていないのが現状である¹⁾.また規模が大型で、 老朽化が進んでいるものが多く、調査には危険性が伴う.

そこで従来のような手法で建造物の正確な形状記録や 変状を計測することは困難であり,先端計測技術である3 Dレーザスキャナやデジタル画像などを用いた計測・解析 技術による支援が有用としている²⁾.本論文では,近代化 産業遺産として注目されている端島(以下軍艦島)を例に, 3Dレーザを用いた<u>現場のあるがままの形状を捕捉する</u> AsBuild データ取得手法とモニタリングへの利活用につい て考察した.また構造物を調査するとき多数の写真を撮影 するが,撮影位置に関する情報を付与できないかとの要求 事項も多い.そこでより簡易に監視・モニタリングを行う ための一手法として<u>全方位画像をインデックスとして活用</u> した「全方位画像を用いた詳細画像検索システム」の有効 性と今後の応用可能性について提案する.

2. レーザスキャナ計測の概要と利活用

レーザスキャナはレーザを計測対象に高密度で照射し,

原稿受付 2011年7月12日

**正会員 長崎大学工学部 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

点群情報(座標値と反射強度:x,y,z,i)を取得する機器であ る.高密度で計測された点群は,現状を忠実に再現し構造 物の補修・補強検討の際に有効とされている³⁾⁻⁶⁾.Fig.1 は 点群処理から得られる成果とその処理時間の概要を示した. 通常数箇所から計測した点群の合成・面化処理を経て立面 図などの各主題図の作成や時系列データの差分から変形図 などの作成が行われる.このとき点群密度を上げればそれ なりに成果品質の向上は期待できるが,データ容量は急増 し,その処理時間も増大するため<u>AsBuildを確保したデー</u> <u>夕容量の低減化策</u>などが課題となっている.特に先述した 図面化作業は点群を基に CAD トレースする作業が主体で あり,この省力化・自動化を図るため,構造物の輪郭を抽 出する-稜線抽出のアルゴリズムが種々提案されている⁷⁾.

今後3Dレーザを構造物の変状記録と監視,さらには維持管理に活用していくためには,<u>必要十分なAsBuildデー 夕取得</u>と,データ容量が低減される稜線抽出の利用や構造 物の復元設計と構造性能を評価するためのFEモデル化が 重要になる.





^{*} 非会員 ㈱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)

3. 軍艦島の概要と3Dレーザ計測の経緯

軍艦島は、長崎県南部、長崎半島の西方海上にある面積 6.3haの小島である.日本有数の海底炭田の島として知られ, 開坑は明治初年,以来発展して年産約25万tfの石炭を産 出するまでに達した. 島内に選炭場, 接岸施設など諸施設 のほか、人口約5千人を収容する7~9階建てのアパート 群が建ち並び,当時世界一の人口密度5万人/km²であった. 1974年に閉山し、現在は無人島になり、Fig.3に示すよう にアパート群が廃墟として残っている.長崎市は,2006年 6月に調査を行い、軍艦島の保存に関しては、現状のまま として,自然の風化にまかせ,朽ち果てていく過程をみせ る方針に決定した.筆者らは、平成 21, 22 年度「軍艦島 の鉄筋コンクリート造高層建物群の環境劣化調査と安全性 評価に関する研究」の一環として、3Dレーザスキャナを 用い島内 30 号棟(大正5年:日本最古のRC構造物)を 中心に軍艦島全域の計測及びそのモデル化を行った.

3.1 建造物の監視計画 (3Dレーザデータ)

「軍艦島」は産業遺産の世界遺産暫定リストに記載され 長崎市の端島・高島炭坑の文化財指定に向けた調査・検討 を進める「端島炭坑等調査検討委員会」(会長 岡田保良国 士舘大学教授)」にて継続審議中である.しかし劣悪な環境 の下、日々劣化が進行しておりこの審議中(3年間)に大 きく形態が変化することも十分考えられた. そこで取得し た3Dレーザデータから効率よく破損図を作成する手法, および2時期にまたがる三次元情報から崩落箇所の抽出と 崩落体積の算出を試行した.これら3Dレーザ計測,画像 情報を用いた構造物の現況把握および監視に向けたフロー を Fig.4 に示す. なお本論文では,紙面の都合から 5.差分処 理について述べる.

3.2 レーザ計測

平成22年2月と10月に3Dレーザによる三次元計測を 行った. 用いた3Dレーザ計測装置は, Fig.2 に示す Riegl VZ-400 であり計測距離は 350mまで可能であり、上部に搭 載した広角カメラで色情報の取得も同時に行った. 計測は 各壁面の点密度が@5~10mm 程度になるように計測した. 高速・広範囲・高精度に計測することができるため計 25 箇所から計測した各々の3Dレーザデータを統合させ、島 内の約8割程度の3次元化を行うことができた.

Riegl VZ-400		
distance	350m	
precision	5mm	OÞ
area	100×360°	
Measurement rate/s	122,000times	
wavelength of the	near-infrared rays	100
laser		
Radiation Angle	0.3mrad ^{*)}	4
measurement	Analysis	
method	corrugation	
*) 0.3m rad = 30mm width at 100m		

 $^{(*)}$ 0.3m rad = 30mm width at 100m

Fig.2 3D laser measuring equipment









panorama of Gunkanjima-Island and the situation Fig.3. of the measurement using the 3D laser



Fig.4 Application of the 3D measured date and monitoring flow

3.3 点群データ差分処理を用いた崩落部位の特定

劣悪な環境の下,軍艦島の炭坑遺産は日々劣化し崩落も 進行している.通常変状箇所の抽出やモニタリングには, 時系列の写真を入念に見比べて実施することが多いが,規 模が大きくなると煩雑な作業となる.そこで今回30号棟 の南西面を対象に3Dレーザで計測した2時期(2010年2 月,10月計測)の計測データを元に,劣化進行の把握が可 能かを検証した.なお3D計測機器は高価であり機器を常 時設置しておくことは費用対効果の観点からも現実的でな い.そこで計測位置をずらして計測した場合においてもデ ータの再現性が図れるかについても検証した.

2 時期の計測箇所を 3m 程度ずらして計測したが, Fig.5 に示す部位①~③において劣化進行(崩落)を把握することができた.

3. 4 部位①詳細検討

大きな台風の襲来を受けていないこの数ヶ月の間にも 数箇所の崩落箇所を確認できた.部位①の窓マグサ(垂れ 壁)の一部が崩落した箇所について詳細に解析検討を実施 した.Fig.6で確認できるように2月の段階で既に鉄筋爆裂 によるひび割れ(幅8ミリ程度)が発生している.

2 月のデータは点群, 10 月のデータは面化処理して重 畳表示したものを Fig7 に示す. この垂れ壁の崩落した部 位寸法は, 1580*150*280mmであり全断面が欠落した.

当該30号棟の南西面の点群は 5mm 程度の点密度で形成されており,全体の点数は約110万点におよび容量は txt 形式で約500MBである.このように2時期のデータを機械的に重ね合わせることで経年変化の比較が可能である.



Part (1) Collapsing at window folder



Fig.5 Southwestern side of 30th building and Picking out collapsing part



Fig.6 Detail pictures of part 1 and 2



Fig.7 Overlapped surfaces with point-clouds

3.5 崩落部位の図面化

Fig.8は、2時期の点群をもとに3D図化して重畳表示したものである.赤が2月、青が10月を示すことから変化のない箇所は紫色表示となる.計測位置が3m程度移動しているにも関わらず描画したラインは概ね同じ形状で抽出され、崩落寸法を図面としても提示する事も可能となる.



Fig.8 The specification of collapsed part by using picking out break-lines

4. 全方位・詳細撮影システムによる調査手法

4.1 判読可能な画像分解能について

筆者らは、これまでに撮影画角と認識可能な「ひび割れ 幅や部位の判読可能性」について各種調査・研究の中で種々 の検証を行ってきた. Fig.9 は、遠隔からデジタルカメラを 用い撮影したボルトの欠損・錆発生状況の判読と画像分解 能を整理したものであり、径 30mmのボルトを認識するた めの解像度は 3mm/pix が必要であることを示している.

例えば上記の解像度を基準に一眼レフカメラを用いて 軍艦島30号棟(延べ床面積:3,800m²)外壁の破損状況を 撮影記録する場合,個々の画像の画角は5*3.5mの17m², 構造物1棟あたり400枚程度が必要となる.構造物を調査 する際には、このように多数の写真を撮影し調書を作成す ることが行われるが,撮影した写真は撮影位置がわかりに くく、また過去の調査写真と比較するために同じアングル での写真が必要とされることも多い.加えて撮影位置情報 を付与したいとの要求に対し、市販のGPS内蔵のカメラ で撮影することもあるが、位置精度や方位が不明で あり構造物の詳細部位の特定まではできない.そこで <u>全方位画像をインデックスとして活用した</u>「全方位画像を 用いた詳細画像検索システム」を試作するとともに今後の 応用可能性について検討した.



1.5.7 Resolution visionity chait

4. 2 全方位パノラマ画像の概要(Ladybug3)

構造物全体の概要は, 種々の調査で活用されている Ladybug3 (Point Grey Research 社)を使用した^{8,9)}.この機器 は 200 万画素(以下 MP)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る.自動合成されたパノラマ画 像は連続的に表示され任意の方向から構造物の概観を確認 可能である.しかしカメラのCCDサイズは6.9×5.2mm,レ ンズは3.3mm(35mm換算で18mm)と広角なため,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 9).そこでこの解像度不足 を解消するためLadybug3と平行して12MPの一眼レフカメ ラを用いて撮影を行い「全体構造から局所部材までをカバ ーする全方位・詳細撮影」システムを考案した.



Fig.10 Specification of Ladybug3 and Stitching

4.3 全方位パノラマ歩行撮影

撮影は、歩行時の振動を吸収する防振装置にPCと全方 位カメラを搭載した撮影システム(PanoHANDY)を用い た.この装置は歩きながら安定した連続画像をPCで操作 格納しながら全周を見ることができる.GPSと連動させる ことで地図上に歩行経路表示も可能である.また撮影画像 はタブレット型PC(例えばiPad)で、自在に360度パノラマ で確認も可能である.例えば以前撮影したパノラマ画像を 格納し、次回の点検時に現地で崩壊箇所などの確認も容易



Fig.11 Sphere Imaging System

4. 4 詳細確認画像取得(一眼レフカメラ)

ー眼レフカメラ(Nikon D700, 12MP)を用い撮影解像度 が最低 3mm/pix 程度,及び窓枠の1モジュールが1画角と なるよう撮影を行った.必要解像度を満たしつつ,窓枠毎 に撮影を行うことで,解析処理時の効率化を図った.

2種類のカメラ(全方位と一眼レフカメラ)の撮影距離 と解像度の関係を Fig 12 に,また距離 20mに位置する部 位を撮影した各画像の一例を Fig 13 に示す.

全方位撮影は解像度が 25mm/pix 程度であり, 部位の詳 細形状までは確認できない. 一方一眼レフカメラは, 0.6mm/pix と高精細でありひび割れまでが十分確認できる. 距離3mの部位では,全方位撮影は解像度が3mm/pix 程度 であり,鉄筋の爆裂程度までは確認できる. しかし一眼レ フカメラに比べ CCD(撮像素子)サイズが 1/3 程度しかな いため,ダイナミックレンジが小さく,色再現性に劣る. Resolution



Fig.13 Resolution and image acquired with two kinds of cameras

4.5 画像検索システムについて

画像登録・検索システムのイメージを Fig 14 に示す. 4.4で述べたように2種類の各カメラの特徴である画角 と解像度に着目して開発した「画像検索システム」につい て概要を説明する.全方位撮影は意識せずその場の全周囲 の画像が自動・リアルタイムで格納される.一方一眼レフ カメラ撮影は,調査技術者が,これまでの経験・知見を基 に必要十分な解像度で実施される.登録手順は,現地で<u>全</u> 方位画像を拡大表示し,並行して撮影した詳細画像をこの 全方位画像上にインデックスとして登録する.現状は手動 で登録するが,将来的にはカメラに内臓されている GPS や ジャイロ機能で自動登録の可能性も十分にある.このよう に<u>全方位展開画像と</u>詳細画像の双方向の検索が可能な「画 像検索システム」を用意す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.



Fig.14 Image Search and Link system (Concept)

4. 6 今後のシステムの応用展開について

軍艦島の外周は旧来の天川護岸壁を周囲から鉄筋コン クリートで包み込む形で補修,補強がなされてきた.この 波浪から軍艦島を防御する護岸壁の損傷把握は重要な課題 である.しかし外海からの調査・計測は固定された場所が ないため困難となる (Fig.15).



Fig.15 Situation of shore protection of Gunkanjima-Island

そこで今回紹介した全方位カメラの連続画像と GPS を 基にした最先端の画像処理技術である-Camera Vector Technology (CV 技術)を用いることで動揺する船舶から 撮影した連続画像を基に3次元化も可能となる¹⁰⁾. CV 技 術とその応用イメージを Fig16,17 に示す. この CV 値は, 全方位カメラで連続撮影した各画像の中から多数の特徴点 (200 点以上)を抽出し,その特徴点の動きを動画フレー ムを超えて追跡することで全周画像全フレームの位置・姿 勢を数値化するものである.精度は GPS 精度にも影響され 撮影距離の 1/100 程度と報告されているが,画像から簡易 に寸法を算出することができる.また GPS 支援のマルチビ ーム測深,レーザスキャナそれにCVを組み合わせることでFig.18に示すように水中部から陸上部までの連続した測量・計測が可能となり今後の軍艦島全体の維持管理,保全整備を検討する上で有効なものと考える.



Fig.16 Principle concept chart of CV technology The position information on the camera are obtained by photogrammetry.



Fig.17 Sea shore investigation by Sphere image capturing system (Concept)



Fig.18 Image of measurement from underwater to land

5. まとめ

大規模で劣化の進んだ不整形な構造物に対し,形状をあるがままに取得できる3Dレーザ計測は有効であり破損図 作成までを支援できることがわかった.

一方より簡易に変状を記録,監視する手法としてパノラ マ画像と一眼レフカメラを組み合わせた「全方位・詳細撮 影」を試行した.現場に機器を手軽に持ち込み,現状と以 前撮影した画像とを容易に比較することもでき崩落箇所の 確認が行える.

今後,地域振興を担う観光資源としても,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いため、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、今後もその利活用は色々と展開さ れるものと思われる.また両者の技術を組み合わせること で、より高度な保守点検調査・解析を行うことができる.

建設分野における簡単・高精度な測量・計測に関するニ ーズは潜在的に多いと考えられ、この分野での光学的な計 測手法の応用展開を今後とも進めて行きたい.

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(㈱,全方位カメラ撮 影では㈱ビュープラス様にそれぞれ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

 Shimizu, K. et al.: How to observe and investigate the structures, Modern Industrial Heritage (in Japanese), Gyousei (1998), 13-37.

2) Nishimura, S. et al.: The development of the support system to conserve and repair the heritage with the apply of the techniques that analyze the information (in Japanese). Journal of JST (2006),

 Nishimura,S. et al.:Digital Information Utilization on Preservation Management of Cultural Properties.2002 ISPRS – Corfu, Greece, 2-6,September, (2002) (CD-ROM).

 Matsuda,H. et al.:3-D digital photogrammetric measurement of the structure and 3-D finite element free vibration analysis (in Japanese), Vol.53A, (2007)(CD-ROM).

5) Takahashi, Y. et al. : The 3D measurement of stone bridges and the apply for the 3D FEM models (in Japanese), The 64th Japan Soc. Of Civil Engineers (2009)(CD-ROM).

 Nishimura, S. et al.: System for assisting in restoration of stone walls, using 3D modeling, 22nd CIPA Symposium, October 11-15, (2009), (CD-ROM).

7) Kitamura,K. et al.:Picking out the break lines using the point data from 3D laser scanner in consideration of the measurement at Real environment (in Japanese), The 16th Image sensing Symposium, IS1-08,(2010) (CD-ROM).

8) Hirata, K.et al.: About use of the investigation of the local photograph image that uses the digital technique, JAST Vol.21,(2010) (CD-ROM).

9) Nishimura, S. et al.: Development of On-Board Image

Measurement System for Actual Running and Application to Wall Surface Surveys of Structures, JAST vol.21, (2010) (CD-ROM).

10) ex http://www.topcon.co.jp/positioning/products/product/ 3dscanner/ips2lite.html