

産業遺産への 3次元計測技術の応用

Application of 3D measurement technology to industrial heritage

西村正三* (株)計測リサーチコンサルタント**

産業遺産の調査・記録・保存に、近年急速に発展しているICTなど先端情報技術を活用することが重視されている。軍艦島などで実施してきたUAVで撮影した画像から3Dモデルを生成するSFM手法、LiDARを用いた手法、情報の公開手法としてのVR技術などについて紹介する。

キーワード：産業遺産、軍艦島、UAV、SFM、UAV (LiDAR)、VR、AR、MR

I. 軍艦島デジタルミュージアム

1. 概要

軍艦島（正式名称は端島）は海底炭鉱の島として最盛期には 5200 人が暮らし石炭産業で日本の近代化を支えてきたが、1974 年に閉山となり無人島となった。そして 2015 年 7 月「明治日本の産業革命遺産」として世界文化遺産に登録された。筆者は、これまで 3D レーザや UAV など光学的計測手法を用いて軍艦島を詳細に 3D モデル化して、崩壊の過程をモニタリングしてきた^①。一方「軍艦島」への上陸・周遊ツアーを行なっている「軍艦島コンシェルジュ（社長久遠龍史）」は、天候不順などで上陸できない観光客のために「軍艦島デジタルミュージアム」^②を計画、そのうち筆者らは、3D モデルを用いたコンテンツの企画、制作を担当した。

2. 3D モデルの構築

2015 年 9 月のミュージアムオープンにあわせ、新たに 2 機の UAV で空撮を行い、最新の画像解析手法である SFM^③ 技術を用いて、軍艦島の今を約 2000 枚の画像から軍艦島全体を 3D モデルで構築した^④。図 1 に UAV の機器構成と図 2 に軍艦島 3D モデル生成までの過程を示す。図 3 は、見学者が自在に「マッピング・TIN 表示」など切り替えながら、軍艦島全体の 3D モデルを閲覧している状況。図 4 は、SFM で 3D モデルを作成するために、20m の距離から UAV で撮影した煉瓦構造物（第三竪坑捲座跡）の一例である。

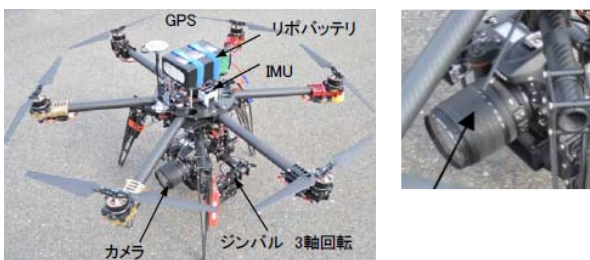


図1 軍艦島 3D モデル生成に用いた UAV とカメラ構成

* SHOZO Nishimura

** Keisoku Research Consultant CO.

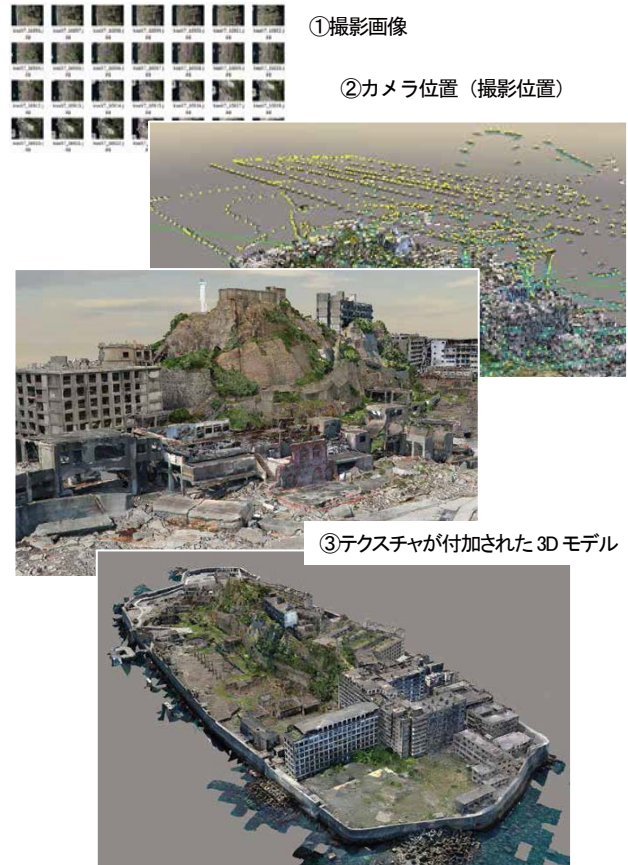


図2 UAV 画像から生成した軍艦島 3D モデル生成



図3 軍艦島 3D モデルの閲覧状況

(マウスであらゆる視点から 3D モデルを閲覧)

3. 3Dモデルの精度とプロジェクションマッピング

ミュージアムは、横 30m×高さ 2.0m の壁面に十数台のプロジェクターを同期させ、約 1mm/pixel の解像度で映像の投影が可能な施設。図 4 に示した高さ 8m の煉瓦構造物の 3D モデルを、高さ 2.0m の壁面に、プロジェクション・マッピングで表現し、そして 3m 離れた位置から鑑賞したとき、破損状況までをきちんと確認できるための解像度を予め検討しておく必要がある(図 5)。人の目の分解能を 0.1mm (30cm 離れ時) と仮定すると、3m の位置では、およそ 1mm を判読できる。壁面でのプロジェクターの解像度は 1mm/pixel であり、煉瓦造を高さ 2.0m の壁面に投影したとき、4mm/pixel の解像度以上の画像を取得する必要がある、そこで Sony-α6000 (焦点距離 19mm) を搭載し、約 19m 離れた位置から連続的に撮影を行うこととした。

4. プロジェクションマッピングにおける再現性

煉瓦構造物の 3D モデルを図 6 に、図 7 に実際のプロジェクション・マッピングの状況を示している(5)。画像からは、煉瓦の組み積み、亀裂の状況、仕上げのモルタルの残存までをきちんと確認でき、モニタリングにも十分活用可能なことが判る。大画面でのプロジェクション・マッピングは、通常の PC 表示には無い、没入感や臨場感及び再現性においてより有効である。UAV で定期的に撮影を行うことで、崩壊過程を正確にモニタリングでき、今後の保存管理への活用も期待される。

5. 作業当時の復元

第四堅坑付近には、現在でも坑口付近の施設が残存し、当時の姿を偲ぶことができる。3Dモデル化したデータを用い、当時の第四堅坑をCGで復元。今後古写真や調査で明らかになったことを復元CG等で再現し、現在見ることができない産炭の一連のシステムについて紹介していく予定である。

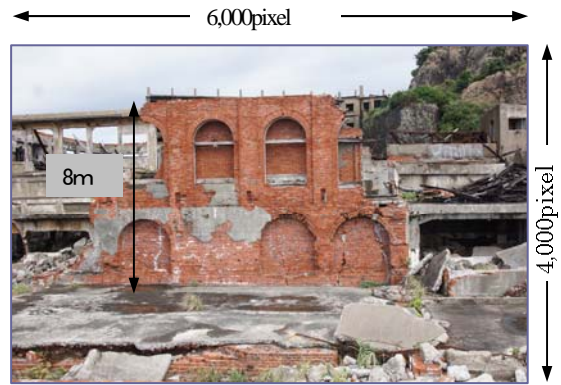


図4 煉瓦構造物(第三堅坑捲座跡)
UAVで撮影した画像 α6000(f:19mm)

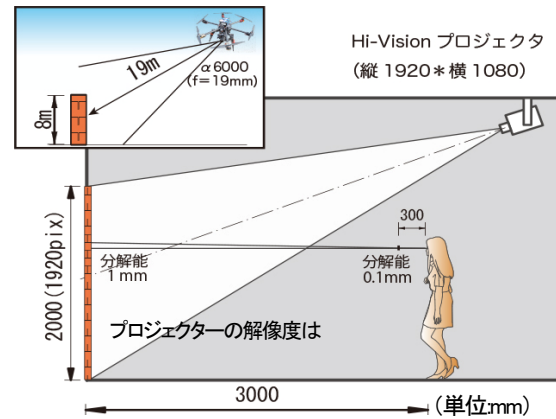


図5 プロジェクションマッピング投影計画



図6 煉瓦構造物の3Dモデル



図7 プロジェクションマッピングの状況 (縮尺1/2表示)

II. UAV (LiDAR) の活用

1. 樹木に覆われた産業遺構調査への活用

UAV による撮影画像を用いた解析手法としては写真測量の発展形である SFM^{注1)} 解析が一般化してきた。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 搭載が可能なレーザ機器 (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 8)。

2. UAV (LiDAR) について

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。市販されている UAV (LiDAR) は表 1 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。データ取得から解析までの流れは同様である (図 9)。以下では Velodyne 搭載の YellowScan について紹介する (図 10)。

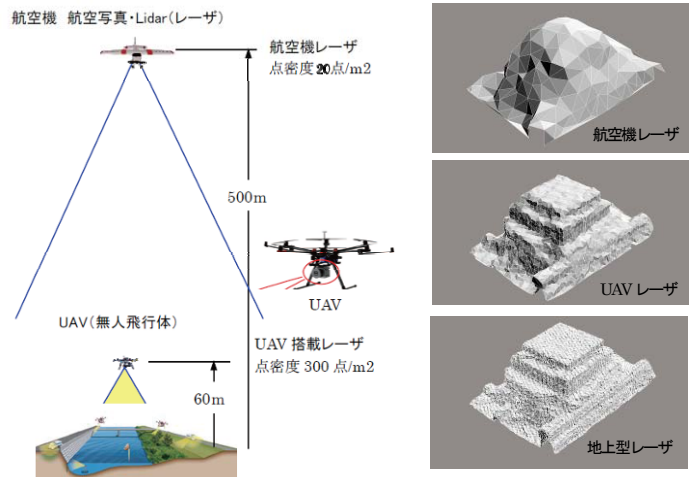


図 8 TLS・UAV・航空機 (LiDAR) と点密度

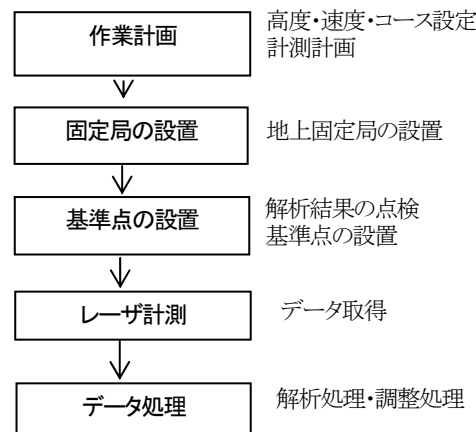


図 9 計測～処理のフロー



YellowScan (IMU レーザスキャナ)

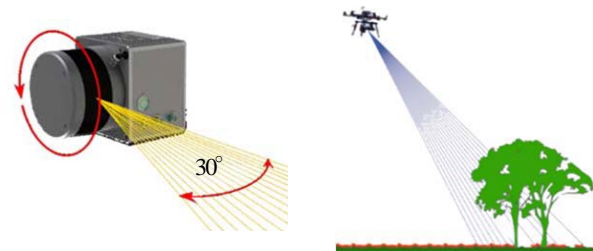




図 10 UAV (LiDAR) YellowScan システム

表 1 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

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

3. UAV (LiDAR) を活用した遺構の計測

樹木に覆われた遺構面を迅速に計測する手法として UAV (LiDAR) を活用した例を紹介する。産業遺産遺構の計測には地上レーザ機器 (TLS) が用いられることが多いが、樹木に覆われた場合、幹の裏側での欠測を補うために、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。一方 UAV (LiDAR) 計測では、上空を移動しながら多方向へレーザを照射することで比較的死角の少ないデータが取得できる。

(1) UAV (LiDAR) を活用した製錬所遺構の位置特定

某銅山遺構 (以下遺構) は、斜面に位置し、広範囲で、樹木に覆われ足元が悪い為、現地踏査も容易ではない。そこで上空から地形や遺構の形状を取得できる UAV レーザ (RIEGL) を用いて安全かつ正確に全体概要を把握することが可能かを検証した。計測諸元を表 2 に、また一般的なレーザ点群の解析ソフトである TerraScan を用いた処理の状況を図 11 に示す。

(2) UAV (LiDAR) の取得データ (点群)

図 12 の①②は遺構全体を計測した点群の俯瞰と平面表示である。樹木に覆われており、まず植生を取り除くフィルタリング処理を行い地盤面や遺構のみを抽出する。図 12 の③④は、平面と構造物を拡大して俯瞰表示したものである。図から構造物は 5m×10m、高さ 2.5m の規模で、一部地盤を掘り込んだ形で建設され、また 2箇所に開口部があることが判る。⑥⑦は構造物を断面表示したものである。上空からレーザを多方向に照射することで開口部から入射したデータで内部の壁面形状まで取得できている。壁厚が 300mm であり、2室に分かれていることも判る。

表 2 UAV (LiDAR—RIEGL) 計測諸元

項目	パラメータ設定値
対地高度	50m
対地速度	8m/s (28.8 km/h)
コース数	14
コース間重複	50
パルスレート	550 kHz
ビーム径	1.0 - 2.5 cm
点密度	1,500 / m ²

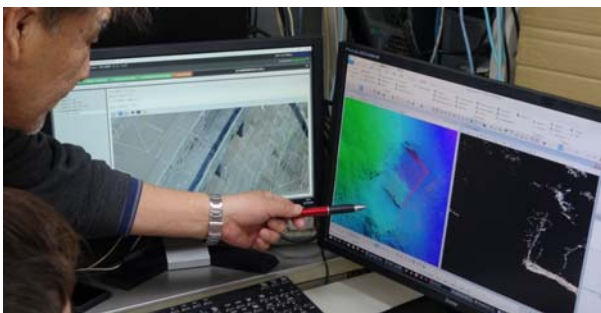


図 11 LiDAR データの TerraScan による解析状況

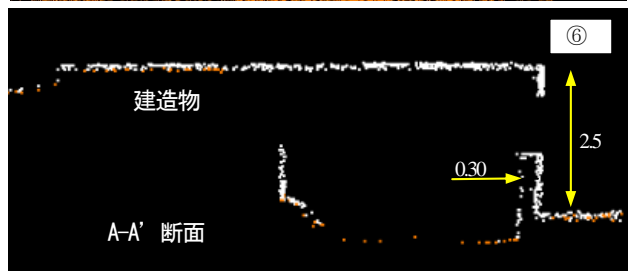
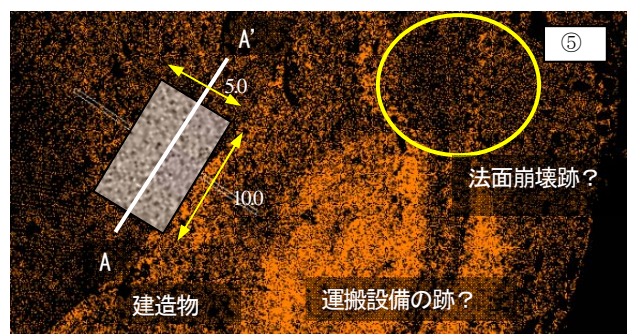
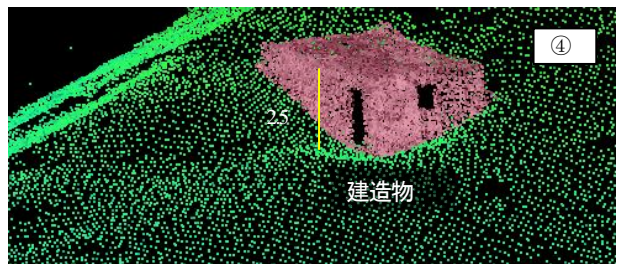
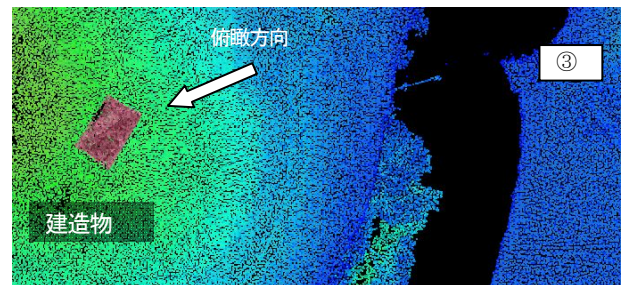
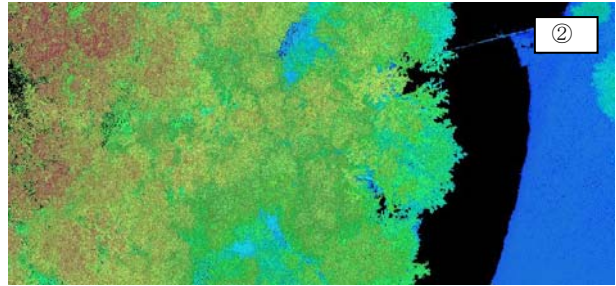
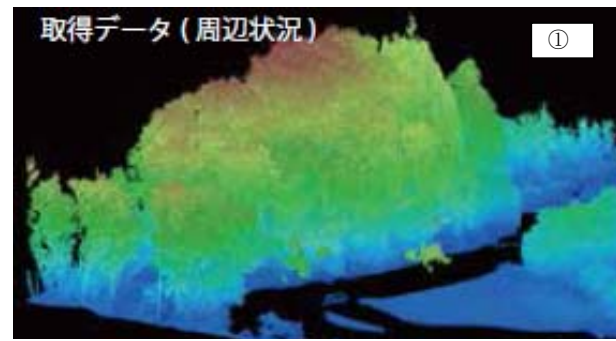


図 12 UAV (LiDAR) を活用した計測と表示例

図 13①はフィルタリング処理した点群から不整三角形網（以下 TIN=triangulated irregular network）を生成しコンタを生成し重畳表示したものである。TIN モデルからは、運搬設備の跡を確認でき、またその路肩の一部には崩壊した箇所があることも判る。過日現地に立ち入り、周辺から写真撮影を行い、SFM 解析でモデル化し、コンタを重畳表示(図 13①)することで、崩壊した法面の崩壊状況などをより詳細に可視化することができ、建造物周辺地盤の管理データとしての活用も期待される。

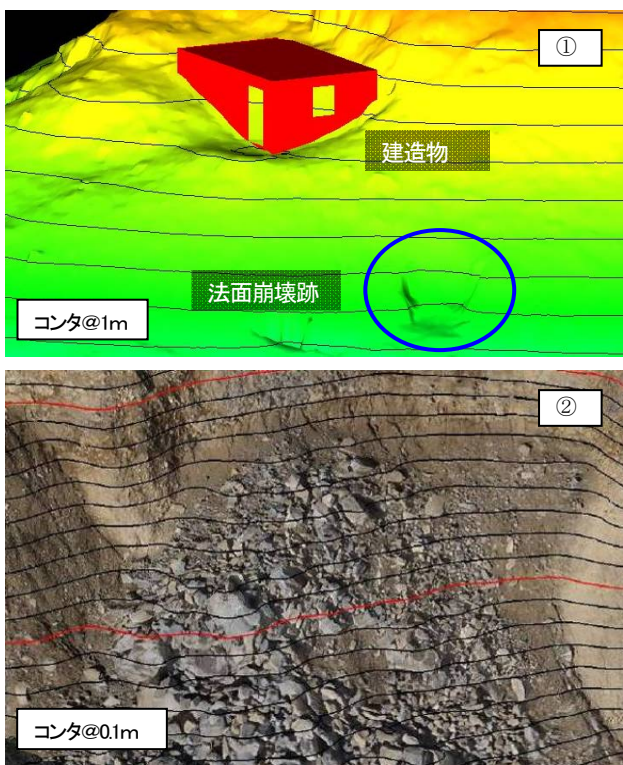


図 13 TIN モデル処理における表示例

Ⅲ. 展示・情報の公開手法について

1. バーチャルリアリティ (VR)

バーチャルリアリティ（以下 VR）は、コンピュータによって作り出された世界である人工環境・サイバースペースを現実として知覚させる技術。CG などを利用してユーザに提示するものと、現実の世界を取得し、これをオフラインで記録するか、オンラインでユーザに提示するものとに大別される。現実世界の対象物に対して、コンピュータがさらに情報を付加・提示するような場合には、拡張現実 (Augmented reality-AR) や複合現実 (Mixed reality-MR) と呼ばれる⁶⁾。

2. AR (拡張現実) の活用

AR コンテンツの活用例として、清水谷製錬所の例について紹介する。清水谷製錬所は、明治・大正期の合名会社藤田組が明治 28 年 4 月に操業を開始した、近代的な銀の製錬所跡である。現在は建物が建っていた石垣が残るだけとなっているが、当時は、機械選鉱場、焙煎室

など 10 棟以上の建物が建ち並んでいた (図 14①)。筆者らは平成 20 年に 3D レーザで地形や石垣の計測を行い、また当時の古写真をもとにそれらの建物の位置や規模を推定し、遺跡全体を 3DCG により復元した (図 ②)。その概要を紹介する「ビデオ」は世界遺産センターで放映されている⁷⁾。3D プリンターで清水谷製錬所の地形模型を製作し (図③)、またこの模型を用いた AR コンテンツ制作を行った (図④)。AR (拡張現実) は、実際には存在しない 3DCG を現実空間の上に重畳表示する最新の技術。この地形模型に iPad をかざすと古写真をもとに作成した建物の 3DCG があらゆる角度から表示される (⑤⑥)。操業時、正に煙突から煙を吐き出し盛況であった様子を鑑賞できる。

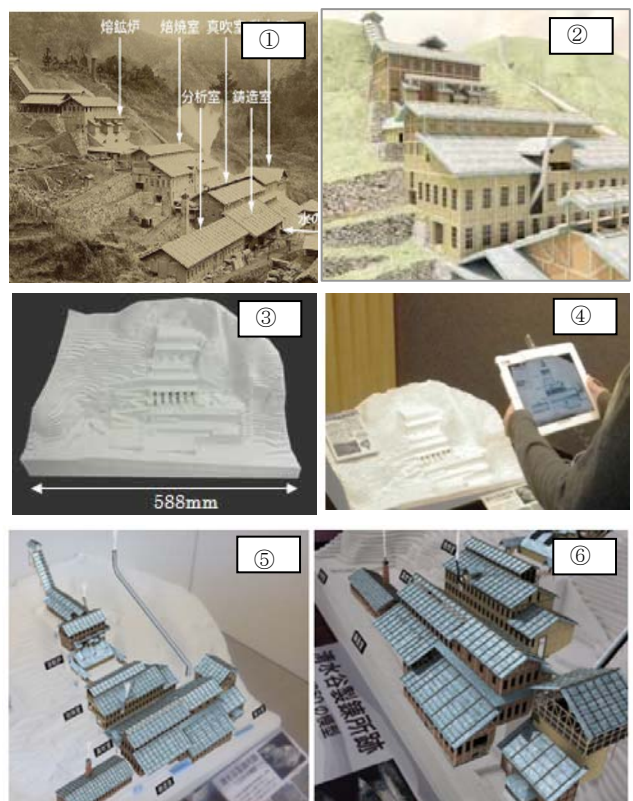


図 14 模型の上に当時の建物群を AR で再現

3. MR (複合現実) の活用

MR は、現実の世界にリアルタイムで映像を合成する技術。MR システムを軍艦島で試行した例を図 15 に示す。体験者はヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着することで、3D モデル化した軍艦島を仮想体験できる。姿勢センサーで、リアルタイムに HMD の位置を高速に検出、体験者の視点に追従した自由な角度からの観察が可能。先述した UAV や地上で詳細に撮影した画像を SFM で詳細に 3D モデル化すれば、近接目視とほぼ同等の画像レベルで損傷状況なども確認できる。光学的計測手法を用いた調査と 3D モデル化に加え、MR を用いた再現システムを併用することで、近接目視に近い調査・記録を安全に実施できる。



図 15 3Dモデルの中をMRで自由に体感している状況

4. VR (360度パノラマ画像) の活用

3DCGを作り込んで実写に近いVRを構築するには大変なコストがかかるが、360度パノラマは実写であり、比較的簡単に高いリアリティを実現できる。現在ゲームに広く活用されているVRシステム (ex: Oculus-Rift) を用いた例を図16に紹介する。当該機器は広視野角、頭の動きに表示が追従するヘッドトラッキングといった特徴を持つVRに特化したHMDと、VR映像を計算・出力するPC (ソフトウェア) を組み合わせたシステム。



図 16 全方位画像をVRシステムで表示

IV. まとめ

産業遺産の調査は、「①物の調査」と「②情報の収集」が重要である。そして「物の保存」は必ず「情報の保存」を伴わなければならない。そのうち本論文では特に、「①物の調査—形体 (空間情報)」の調査手法として、ICT技術である UAV 画像の SFM 解析, LiDAR のデータの処理・解析結果を示し、3Dモデル化などを行うことで、近接目視に近い調査・記録を安全に実施できることについて示した。また取得した形体「空間情報」は、「人が理解できる情報に整理」されてこそ、意味を持つことになると考え、展示・情報の公開手法として「VR, AR, MR などの可視化, 情報公開手法」について紹介した。そしてこれら ICT 技術を用いれば、3Dモデルに、例えば当時の採鉱から製錬, 精錬, 運搬設備に至る「生産の全体システム」を判りやすく紹介できるコンテンツ作成も可能であることを示した。

紹介した軍艦島, 石見銀山 (清水谷精錬所) など当時の人々が、知恵と工夫と技術を駆使し、これら産業遺産に込めた人々の意気込みなどを「次の世代に伝えていく」ためにも、現在我々が保有している ICT 技術を活用して、調査・記録・保存し、そして情報公開していくことは重要であると考え。また「①物の調査」に留まらず 今後は「②情報の保存」に技術史, 産業史, 社会・経済史, 経営史など歴史学の立場の人々との共同研究にも挑戦したいと考えている。

<参考文献>

- (1) 西村正三他：軍艦島の調査・検証からみた今後のインフラ構造物調査への提案, 日本実験力学学会誌「実験力学」, Vol.12, No.3, 2012年, pp.147-158,
- (2) 軍艦島デジタルミュージアム公式HP (<http://gdm.nagasaki.jp/>)
- (3) 鳥居秋彦ほか：画像の認識・理解シンポジウム, MIRU2011,2011
- (4) 西村正三：地形表現とその周辺 その23, 「軍艦島—近代化産業遺産の可視化表現」, 測量, 2016年
- (5) <http://www.krcnet.co.jp/topics/topics90.html>
- (6) PANOPLAZA「VR・AR・MRの可能性」, https://www.panoplaza.com/basic/vr-basicknowledge/about_vr/vr-ar-mr/ (閲覧日 2017年2月20日)