

登録有形文化財の再生事業における3Dレーザースキャニング機器利用の有効性

EFFECTIVENESS OF 3D LASER SCANNING EQUIPMENT IN THE RENOVATION OF REGISTERED TANGIBLE CULTURAL PROPERTY

西野雄一郎 — *1 徳尾野 徹 — *2

Yuichiro NISHINO — *1 Tetsu TOKUONO — *2

キーワード：
登録有形文化財, 再生, レーザースキャニング, 3D, VR,
点群データ

Keywords:
Registered tangible cultural property, Renovation, Laser scanning,
3D, VR, Point cloud data

This study clarifies the effectiveness of the use of 3D scanning equipment in the renovation project of a registered tangible cultural property. The subject of the study is the renovation project of Taiyoshi Hyakuban in Nishinari-ku, Osaka City, where the authors assisted in the creation of drawings. The authors compared the labor, skill level, and accuracy of the drawings created for four plans with different surveying and drafting methods. Interviews were also conducted with persons involved in the renovation project. Based on the results, the characteristics and effectiveness of the use of 3D scanning equipment were summarized.

1. はじめに

1-1 研究背景と目的

登録有形文化財をはじめとする歴史的建築物は、経年とともに老朽化し、再生が期待されるものも多い。しかし、規模の大きさや意匠の複雑さなどの特徴から、再生に要する資金の不足や図面化の難しさなどの課題を抱え、再生改修工事を実施できない事例がある。近年では、解体が決まった旧都城市民会館を、3D スキャンで立体的に記録し、デジタルアーカイブとして建築的価値を継承する試みが行われた^{注1)}。このように空間の撮影と測量が可能な3D スキャニング機器を利用して文化財をweb上で公開する動きもみられる¹⁾。3D スキャニング機器の利用が、建物のweb公開やデジタルアーカイブ化だけでなく、改修工事においても有効活用できれば、歴史的建築物の再生・活用が進むと考えられる。

そこで本研究では、登録有形文化財の調査や改修において3D スキャニング機器を利用することの利点と課題を再生事業および改修作業の視点から明らかにすることを目的とする。

1-2 研究方法

本研究は、著者らの研究室が既存建物図面作成を支援した大阪市西成区の登録有形文化財「鯛よし百番」(写真1)の再生事業を対象とする。まず、本再生事業に取り組んだ企業へのヒアリング調査(2021年12月)から、建物の保存・再生事業における3D スキャニング機器利用の有効性を考察する。つぎに、建物の実測調査(2021年6-7月)と3D スキャニング機器を用いた調査(2021年10月)および図面作成に要する時間・難易度・精度を把握し、3D スキャニング機器利用の有効性を考察する。

1-3 鯛よし百番の概要

鯛よし百番は飛田新地にある料亭であり、元遊郭妓楼建築である。木造2階建て、大正11年～昭和3年頃竣工とされ、敷地面積372.92㎡、延床面積576.55㎡(1階290.67㎡、2階285.88㎡)である²⁾。

1951年に建物所有者が変わった際に行われたと考えられる全面改修では、京都の絵師や大工棟梁らの手によって桃山文化を意識した豪華な内装が施され、2階の個室には旅をテーマにした様々な時代・地域の様式が表現された。その後は、宴会場・桃山閣、桃山美術館、料亭百番と名前を変えて使われ、全面改修当時の内装が現在も残っている。遊郭建築の趣を残しつつ時代の変化を現代に伝える近代和風建築として高く評価され、2000年に国の登録有形文化財に指定された。しかし、築100年程度を迎え、襖絵の劣化、雨漏りや床の歪み、欄干など屋内外各部の老朽化がみられる。

1-4 3D スキャニング機器の概要

本研究では、空間の撮影と測量が可能な3D スキャニング機器のうち同種の機器のなかではコスト面で導入しやすいBLK360とMatterport Pro2を使用した(写真2)。Matterport Pro2は写真撮影と同時に赤外線照射による3D スキャンを行う赤外線深度センサー搭載カメラである。赤外線深度センサーは直射日光に弱く、計測可能距離が短い。BLK360はレーザーを照射して物体の座標とRGB情報をもった点群として捉えるカメラを搭載するレーザースキャナである。レーザースキャナは日光に強く計測可能距離が長い。画像の解像度が高いのはMatterport Pro2、計測の可能距離が長く精度が高いのはBLK360、屋外に強いのはBLK360と、特徴が異なる。



写真1 鯛よし百番 外観 写真2 3D スキャニング機器

本稿は、参考文献³⁾をもとに新たに考察を加え加筆修正したものである。

*1 大阪公立大学大学院工学研究科 講師・博士(工学)
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

*2 大阪公立大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*1 Lecturer, Graduate School of Eng., Osaka Metropolitan Univ., Dr.Eng.

*2 Prof., Graduate School of Eng., Osaka Metropolitan Univ., Dr.Eng.

両機器とも web サービス・Matterport を利用して、現実空間をデジタルに 3D で再現する 360° コンテンツ（以下、VR コンテンツと呼ぶ）を作成できる（図 1）。この VR コンテンツでは、web 上で視点を自由に動かしながら空間を歩き回るような鑑賞体験が可能である。



図 1 VR コンテンツ（鯛よし百番）

2. 事業面における 3D スキャニング機器利用の有効性

2-1 再生事業の体制

鯛よし百番が不動産会社 S 社やコンサル R 社に新型コロナ禍での集客等について相談したことがきっかけとなり、建物老朽化の問題解決に取り組むことになった。新型コロナ禍による経営悪化から改修投資が難しいなかで、クラウドファンディングによる改修資金集めが構想された。クラウドファンディングにおいて建物の魅力を多くの人に知ってもらうために、VR コンテンツの制作が検討され、web 戦略を担当する C 社、VR コンテンツを制作する E 社が関わることになった。また、古建築の再生実績が豊富な建築設計事務所 M 社が再生事業に参加し、同分野の研究を行う著者らの研究室が参加し、実施体制が構築された。研究室では、大学生が現地で実測調査を行い、文化財修復に関する補助金の申請に必要な平面図および再生事業で修復される顔見世の間と桃山殿の展開図を作成した。

2-2 VR コンテンツを活用したクラウドファンディング

E 社が屋内外 750 m²について建物内部を Matterport Pro2、外部を Leica BLK360 で撮影して VR コンテンツを作成した。VR コンテンツは 1 階を一般公開、2 階を申し込み制による限定公開とした^{注 2)}。

VR コンテンツを用いて行われたクラウドファンディング（2021 年 6 月～8 月）は、建物外部の懸魚、看板や欄干の修復、玄関部「顔見世の間」の改修、客間の「桃山殿」の修復のための資金を確保することが目標であった。表 1 に示す VR コンテンツの閲覧数をみると、5,000 人以上が一般公開部を閲覧し、うち 126 人は限定公開部も閲覧しており、多数の目にとまり興味関心をひいたことが分かる。結果的に 812 人の支援により、当初目標額 1500 万円を上回る 1884 万円が集まった。

表 1 VR コンテンツの閲覧数（2021 年 10 月 29 日時点）

	閲覧者数	閲覧回数
一般公開部(1階のみ)の閲覧	5178 人	6931 回
限定公開部(2階)の閲覧	126 人	225 回

2-3 VR コンテンツの有効性

限定公開部の VR コンテンツ閲覧希望者に対するアンケート結果から、再生事業への感想を表 2 に示す。VR コンテンツは、手が増えられる前に現在の空間を鑑賞したい希望に応え[1]、歴史的価値のある建築の保存・再生を支援する動機になった[2・3]との意見がみられた。これまで遠方居住[4]、個人利用を躊躇うこと[5]、若年者であること[6]などの理由で訪問できなかった人々の建築鑑賞を実現し、また一方で鯛よし百番を知らなかった層にも建築の魅力を伝えることを可能にした[7]。VR コンテンツに建築意匠や細部の解説を加える[8]、再生事業による内装の変化など時代変化を可視化する[9]といったニーズもあり、今後さらなる VR コンテンツの拡充が期待される。

表 2 VR コンテンツ閲覧者の再生事業へのコメント

[1] 今までブログや動画で一部を見ることはありましたが、VR で全体を見れるのは嬉しいです。この夏に改修されるとのことですが、その前の姿を見ておきたかったのでありがたいです。
[2] こちらは以前より気になっておりましたが、まだ一度も訪問したことがありませんでした。VR で拝見しましたが、やはり素晴らしい建造物ですね。後世に伝えたい歴史的遺産だと思います。是非支援させて頂きたいと思っております。よろしく願い致します。
[3] 永年大阪に住んでいましたが その存在さえあまり良く知りませんでした。遊郭の是非はともかく、こんなに美しい建物や調度品を大切に継いで行ってほしいです。
[4] 九州に住んでおり観に行くことが叶わないので、中の様子がどのようになっているのか VR で拝見できるのは凄くありがたいです。クラウドファンディングも是非参加させてください。
[5] いつか行ってみたいと思っていましたが、一人で入れるお店でないので遠慮していました。修復のクラウドファンディングにも微力ながら協力したいです。
[6] 遊廓の歴史を知ることが好きで、いつか鯛よし百番さんにも赴きたいと思っています。高校生なのであまり沢山お金が出せないのが悔しいですが、微力ながら協力させていただきたいです。VR も細部まで建物の美しさが伝えられていて、更に実物を見たいと思いました。
[7] Instagram で本プロジェクトについて知りました。元々遊郭などの建築物に興味があり、現在公開されている異世界のように感じる VR に魅力を感じました。
[8] 建築意匠の詳細な説明がネット上で閲覧できると嬉しいです。
[9] 時代の移り変わり(内装の変化など)がわかる様なものになってほしいです

3. 調査における 3D スキャニング機器の有効性

本章では、既存図面作成に向けた大学生による実測調査、BLK360 や Matterport を用いた調査について、作業時間や作業に要する熟練度を比較することで、各調査方法の特徴を明らかにする。

3-1 調査の手順と作業時間

1) 大学生による実測調査

実測調査では、参加する大学生 10 名のうち 6 名が未経験者であったため、調査可能時間が限られていたことから、調査前に公開された VR コンテンツを参考にして調査の補助となる簡易平面図を作成し、その図面に現地で実測寸法を書き込む方法を採用した。調査では 10 人の学生が 2、3 人のグループに分かれ、コンベックスを用いて担当範囲を実測した。調査終了後、得られた実測値をもとに平面図を作成したところ不明部分があったため 2 回目の調査を行った。加えて、記録のために写真撮影を行い、特に細かな意匠が施された部分は角度を変えて複数枚写真撮影した。

2) 大学生による BLK360 での調査

本研究では、BLK360 をはじめて使用する学生が事前に操作方法を学習し、iPad アプリ CycLone FIEDL 360 に接続して調査を行った。

BLK360 は、水平方向に 2 回 360 度回転してスキャンを行う。1 回目の回転で計測点周囲を写真撮影し、2 回目でレーザーを照射して点群データを得る。その後、次の計測点に移動してスキャンを行うと、アプリ上で 2 つの計測点の位置が照合され、点群データがマッチングされる。採取する点群の密度によってスキャン時間は異なり、本研究で設定した中密度では、1 計測点あたり 6 分程度の時間を要した。点群を採取できない死角が生じないように配慮し、計測点を事前に決定して調査を行った。スキャンを行った計測点を図 2 に示す。



図 2 BLK360 の計測点（網掛け部は調査範囲外）

3) E 社による VR コンテンツ作成調査

2 章で述べたとおり、VR コンテンツ作成にともなって E 社が建物内部を Matterport Pro2、外部を BLK360 で撮影した。Matterport Pro2 は水平方向に 60 度ずつ回転しながら写真撮影と計測を行い、1 計測点あたり 1 分程度の時間を要する。

3-2 作業量の比較

上記の 3 つの調査に要した人数と時間を表 3 にまとめる。人数×時間を作業量とすると、作業量は大学生による実測調査が 48 時間・人、大学生による BLK360 調査が 10 時間・人（75 計測点×6 分=7.5 時間のほか、BLK360 の再起動やバッテリー交換、点群採取の妨げになる家具等の移動などに要した 2.5 時間を含む）、E 社による VR コンテンツ作成が 13 時間・人（VR コンテンツ公開に適した家具配置などを含む撮影時間）となった。大学生の調査を比較すると、BLK360 は作業人数の大幅な削減を可能にし、作業量を約 5 分の 1 に低減した。

また、実測調査では作業者の熟練度が高いほど作業時間が短くなり精度が高くなる。BLK360 や Matterport Pro2 を用いた調査の場合、未経験者でも 1 時間程度の学習で操作方法を身につけることができ、一度覚えればその後の調査の時間や精度は大きく変化しない。E 社による調査では撮影の邪魔になる物の移動が生じることや計測点の事前設定ができないことなどから時間がかかることを考慮しても、大学生による BLK360 での調査と作業量は同程度である。そのため、

表 3 調査方法別の調査時間と作業人数

	人数	時間	人数×時間
実測調査（大学生）	1回目 午前	7	2
	午後	10	3
	2回目	2	2
	合計	-	-
BLK360での調査（大学生）	1	10	10
VRコンテンツ作成（E社）	1	13	13

3D スキャン機器は非熟練者による調査の実施を容易にすると言える。

そのほか、実測調査では寸法の計測漏れや写真撮影不足などで現地を何度か訪問することもあるが、3D スキャン機器は 360 度写真を撮影し、位置情報を取得しているため、再訪問リスクを低減できる。ただし機器の不良や充電切れのリスクはともなう。

3-3 機器導入コスト

3D スキャン機器の利用に際して、本体に加えて、点群データを作成・編集する場合には GPU を備えた性能の高い PC が必要になり、VR コンテンツを作成する場合には iPad 等のタブレット端末と Matterport 等のクラウド契約が必要になる。機器導入コストは、すべて自前で行うと費用が嵩むが、機器レンタルも可能であり、VR コンテンツや点群データ採取を委託する選択もあり、低減可能である。また、近年のスマートフォンやタブレット端末にはレーザー照射による距離測定が可能な LIDAR 機能を搭載したのがあり、これらを利用して簡易な VR コンテンツ作成や点群データ採取が可能である。建築再生事業に求められる図面の精度や VR コンテンツの解像度が高いほど高額な機器が必要になるため、事業の目的や予算に応じた方法を選択することになる。

4. 異なる作図方法による図面の特徴

本章では、以下に示す 4 つの平面図について、作成の手順、手間、精度などを整理し、各図面の特徴を明らかにする。

平面図Ⅰ：BLK360 で得た点群データをもとに作成

平面図Ⅱ：大学生の実測調査をもとに作成

平面図Ⅲ：Matterport Pro2 のデータから自動作成

平面図Ⅳ：設計事務所 M が平面図Ⅱを修正して作成

4-1 平面図の作成手順

4 つの平面図（図 3）は以下の手順で作成した。

1) 平面図Ⅰ（BLK360）

BLK360 で得た点群データは、ソフトウェア（Cyclone REGISTER 360）上において任意の面で切断可能であり（図 4）、FL+1000mm～

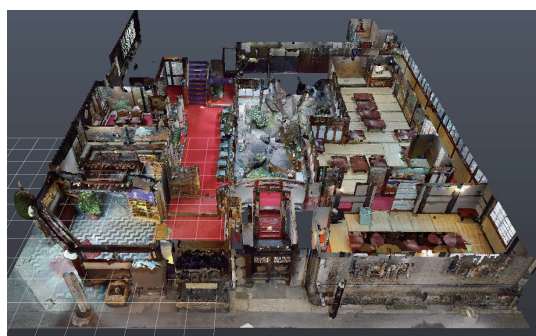


図 4 点群データの平面パース

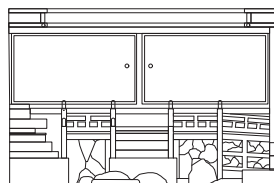


図 5 顔見せの間の展開図

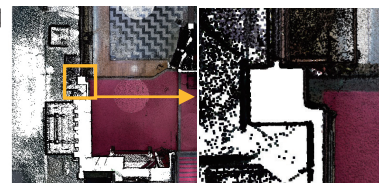


図 6 玄関部分のオルソ画像
(右：柱部分の拡大)

1050mm などレベル指定した範囲の点を抽出することで点描による平面図を作成できる。同様に垂直面で切断すれば断面図や展開図を作成できる (図 5)。ただし点描による平面図は、多数の点で構成されるため修正が行いにくいこと、CAD ソフトとの互換性が低いことなどから現状では実用性が低く、線データに変換することが望ましい。そのため本研究では、点描による平面図を真上から撮影したオルソ画像 (図 6) を下敷きにし、CAD でトレースすることで平面図を作成した。基本的には点をトレースして容易に作図できるが、物に隠れるなどで点が採取されなかった箇所や光があたらず暗い箇所は点を判別し難く、推測しながらの作図となり、正確性が下がる。

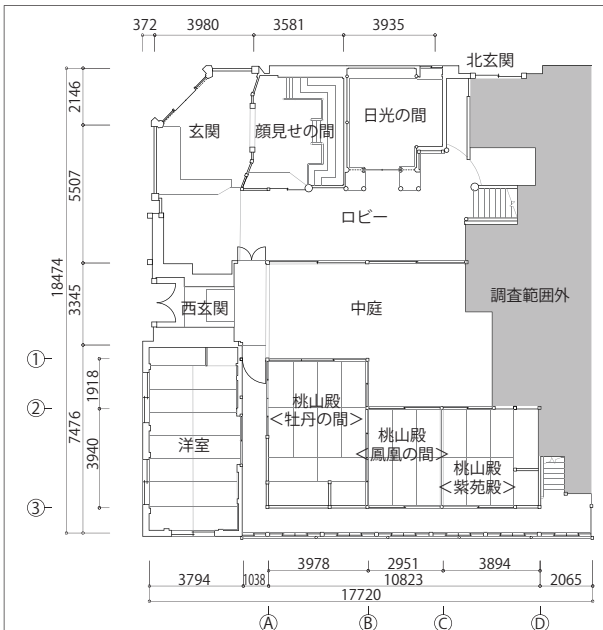
2) 平面図 II (大学生)

大学生が実測調査時に作成した手描き図面を確認しながら CAD で

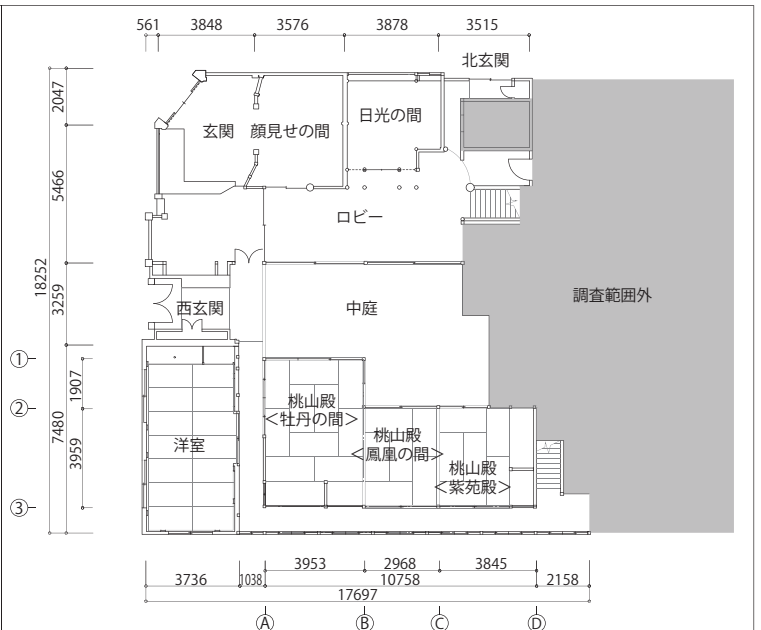
平面図を作成した。複数人での実測調査では、図面表現を統一し、通り芯寸法を測定するよう周知したが、人によって多少の差異があ

表 4 平面図 I ~ IV の鳳凰の間における通り芯間寸法

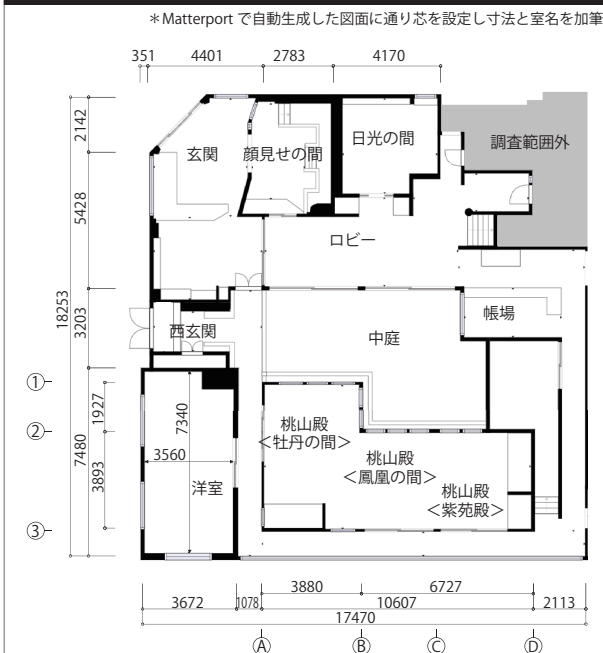
		①-②	②-③	①-③	A-B	B-C	C-D	B-D	A-D
I	寸法	1,918	3,940	5,858	3,978	2,951	3,894	6,845	10,823
	IVとの差	-17	19	2	14	-29	39	10	24
II	寸法	1,907	3,959	5,866	3,953	2,968	3,845	6,813	10,766
	IVとの差	-28	38	10	-11	-12	-10	-22	-33
III	寸法	1,927	3,893	5,820	3,880	-	-	6,727	10,607
	IVとの差	-8	-28	-36	-84	-	-	-108	-192
IV	寸法	1,935	3,921	5,856	3,964	2,980	3,855	6,835	10,799
	IVとの差	0	0	0	0	0	0	0	0
	差の割合	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



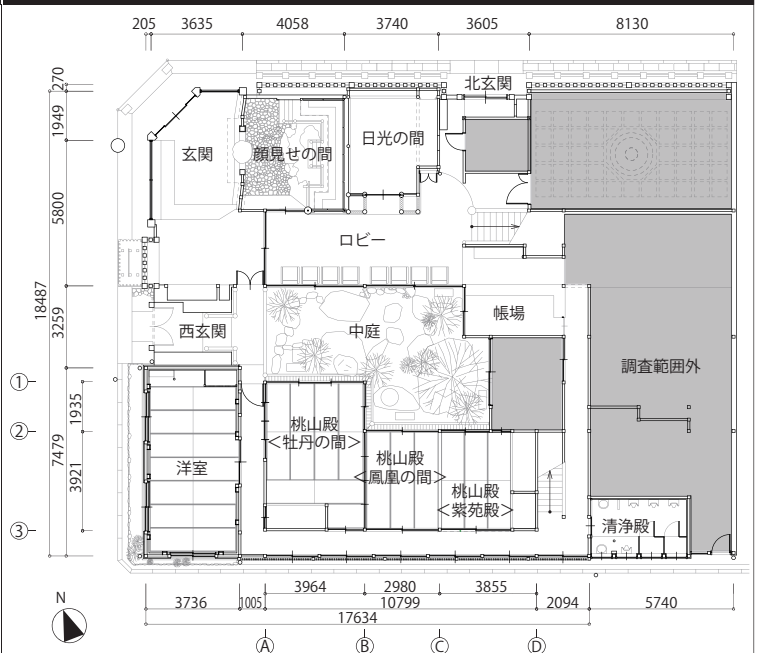
平面図 I (BLK360)



平面図 II (大学生)



平面図 III (Matterport)



平面図 IV (設計事務所)

図 3 作成方法別の平面図 (S=1/300)

り、全体を統合する手間を要した。また記入漏れがあり、追加の実測調査を行い補完した。記憶が曖昧な箇所は、適宜写真で確認した。

3) 平面図Ⅲ (Matterport Pro2)

Matterport のアドオンサービスを使用し、自動的に作成した。CAD 作業の手間は全くかからないが、15 ドル程度のサービス利用料が必要である。また、自動生成した図面は通り芯が設定されておらず、部屋ごとの寸法が例えば 1F 洋室のように内法寸法(7,340×3,560)として表示される。そのため、図 3 に示した通り芯や寸法が必要な場合には追加の作業が必要になる。また、畳や家具など見え掛かり線がない、壁内部が黒塗りになるなど、図面表現はその他の平面図と異なる。

4) 平面図Ⅳ (設計事務所)

設計事務所 M 社が平面図Ⅱをもとに補足調査や図面表現の調整を行い、作成した。補助金等の各種手続きに使用される申請図である。細部の納まりや図面表現を整理するため専門知識を要する。

以上より、作図の手間や難易度は、従来の実測調査の方法に基づく平面図Ⅱと比べて平面図Ⅰは同程度、平面図Ⅲはきわめて低く、平面図Ⅳは高いと言える。

4-2 平面図の特徴

1) 建物全体

図 3 に示す 1 階平面図について、全図面作成後にあらためて行った実測調査により正確であることを確認した平面図Ⅳを最も精度の高い図面と判断し、各図面の通り芯の芯間距離を比較することから特徴を読み解く。

全体の通り芯間寸法についてみると、南北外壁間の寸法は、平面図Ⅳ：18,487mm(±0・0%)であるのに対して、誤差および平面図Ⅳとの差の割合(差÷18,487×100)が少ない順に平面図Ⅰ：18,474mm(-13mm・0.07%)、平面図Ⅲ：18,253mm(+234mm・1.27%)、平面図Ⅱ：18,252mm(+235mm・1.27%)である。平面図Ⅰ～Ⅲに共通して、平面図Ⅳに対する通り芯間寸法がスパンごとに長短異なる。これは歪んだ既存建物における通り芯の設定による影響を受けており、特に外壁では建物全体の寸法に関わるため、通り芯の位置決定が重要になる。そのほか、平面図ⅠやⅢでは、調査時の機器の精度や配置にも影響を受ける。

寸法の差異が大きい部分は、玄関、顔見せの間、日光の間である。玄関は敷地の隅切り形状を反映した形状であり、柱が多角形であるため特に通り芯の設定がし難かったこと、また顔見せの間の間仕切り壁が角度をふっていること、顔見せの間と日光の間の内装が豊富に装飾され大壁の壁厚を判定し難いことが差異の原因と考えられる。

2) 桃山殿

牡丹の間、鳳凰の間、紫苑殿の 3 つの間からなる桃山殿について、各平面図の通り芯間寸法を表 4 にまとめる。なお平面図Ⅲでは柱の位置が示されておらず、鳳凰の間と紫苑殿を仕切る障子の通り芯を特定できなかった。

1 通り～3 通りの寸法は、平面図Ⅳ：5,856mm であり、各平面図のⅣとの差の割合(差÷5,856×100)は、平面図Ⅰ：0.03%、平面図Ⅱ：0.17%、平面図Ⅲ：0.61%と誤差は少ない。同様に A 通り～D 通りでは、平面図Ⅳ：10,799mm であり、各平面図のⅣとの差の割合(差÷10,799×100)は、平面図Ⅰ：0.22%、平面図Ⅱ：0.31%と誤差は少ない一方で、平面図Ⅲ：1.78%と大きな誤差が生じた。1 スパ

ンごとに平面図Ⅳとの差の割合を確認すると、1%以上の誤差がいずれの図面でも確認された。平面図ⅠとⅡでは、スパンごとに正と負の誤差が生じ、全体としては大きな誤差にならなかった。これは歪んだ既存建物における通り芯の設定位置に誤りがあったことに原因があると考えられる。対して平面図Ⅲではいずれのスパンにおいても負の誤差が生じ、全体として誤差が大きく生じた。その原因は機器の性能や図面の自動生成の過程にあると考えられる。

5. まとめ

建築再生事業、実測調査、図面精度の面から 3D スキャニング機器(BLK360 と Matterport Pro2) 利用の特徴と有効性をまとめる。

- ・事業面では、3D スキャニング機器は、調査とともに VR コンテンツを作成することができ、関係者間での現状共有を容易にし、再生事業の円滑化を図る。

また、様々な理由で訪れることが困難な建築であったとしても、空間のつながりや大きさを感じられる鑑賞を可能にし、web 上で歩き回って雰囲気を感じてもらうことで再生事業の共感者・支援者を獲得することができる。

- ・実測調査では、調査にかかる人員を低減し、非熟練者であっても 1 時間程度の事前学習によって機器操作が可能である。また、物理的な接触が不要なため歴史的な建築や内装を破損する危険性が低い。ただし、機器のほかソフトウェアやタブレット端末などが必要である。

- ・図面の精度は、機器の特性によって異なり、誤差が BLK360 では建物全体 0.07%、桃山殿 0.22%であり大学生の実測調査と同等以上、Matterport Pro2 では建物全体 1.27%、桃山殿 1.78%であった。特に有効な点は、点群データを活用すれば 1 回の調査で断面図や展開図などの図面も作成可能であること、Matterport の web サービスを利用することで平面図が作図手間ゼロで自動生成されることである。ただし、自動生成図面は柱の位置や真壁/大壁の判断ができないといった課題があり、再生事業においては簡易な検討図面としての利用にとどまる。また、歪んだ既存建物における的確な通り芯の設定を 3D スキャニング機器を用いた図面作成において実現することが課題である。

- ・熟練者(専門家)による図面は、3D スキャニング機器による図面より正確であり、登録有形文化財の申請や各種補助金獲得において重要な役割をもつ。

以上より、3D スキャニング機器は、登録有形文化財など歴史的な建築の再生を検討し、事業を進める上で多様な有効性をもつと言える。近年は技術開発によって機器の性能向上と低廉化が進んでいる。一部のスマートフォンにはレーザー照射による距離測定が可能な LIDAR 機能が搭載され、3D スキャニング機器は身近な存在になっている。今後さらに機器利用が容易になり、有効性が高まることで、歴史的な建築の再生が進むことが期待される。

謝辞

調査にご協力をいただいた再生事業関係者の皆様に心より感謝申し上げます。なお、実測調査やデータ作成に際して、大阪公立大学建築計画・構法研究室の学生の協力を得ました。また本研究の一部は同研究室の渡邊裕隆さんの卒業論文に基づいています。ここに記

して謝意を表します。

注

- 1) 都城市公式 HP 「旧都城市民会館の 3D デジタルアーカイブプロジェクトを紹介します」（閲覧 2023 年 1 月 30 日）など
(<https://www.city.miyakonojo.miyazaki.jp/soshiki/78/217435.html>)
- 2) 鯛よし百番 VR プロジェクト HP にて VR を閲覧可能
(https://micro-heritage.jp/project_hyakuban/)

参考文献

- 1) 林正樹：デジタルアーカイブとしての Matterport と 3D モデル公開，独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所，奈良文化財研究所研究報告，第 33 冊，pp.181-186, 2022.3.30
- 2) 吉里忠史，橋爪紳也，加藤政洋：飛田百番 遊郭の残照，創元社，2004.1
- 3) 布施和樹，徳尾野徹，石山央樹，西野雄一郎：登録有形文化財の保存・再生における 3 次元レーザースキャナーの有効性と課題，日本建築学会大会学術講演梗概集，建築計画，pp.37-38, 2022.7

[2023 年 2 月 1 日原稿受理 2023 年 5 月 8 日採用決定]