

# 火縄銃の3次元デジタルアーカイブの構築と コンテンツ開発に関する検討

坂口和弥                      林                      武文

要 旨：堺鉄砲鍛冶屋敷の歴史研究成果の可視化と発信において、3Dデータの活用とコンテンツ開発の経過について述べる。実物の火縄銃を基に、3Dスキャナによるデータ取得と3Dプリンタを用いたレプリカ制作を行い、シンポジウムでの展示と来場者へのアンケートにより有効性の検証を行った。また、その結果に基づいて今後のコンテンツ制作の指針について検討した。

キーワード：デジタルコンテンツ、火縄銃、堺鉄砲鍛冶屋敷、3次元計測、デジタル造形

## 1. はじめに

我が国の各地域には、その地域特有の文化が形成され定着してきたが、近年では人口の流動や高齢化に加え生活様式や価値観の変化により、地域文化は衰退の危機に直面している。この対応策のひとつとして、デジタル技術を用いた保存・継承の取り組みが進められており、とりわけ情報伝達能力や再現性の高さからVR（仮想現実）やAR（拡張現実）技術を用いたコンテンツが注目されている<sup>[1]</sup>。

大阪府堺市は、16世紀の種子島への鉄砲伝来以来、明治期に至る間、根来（和歌山県）、国友（滋賀県）に並ぶ火縄銃の製造拠点であった。関西大学では、2015年度より歴史学の分野で堺市との共同研究調査<sup>[2]</sup>を行ってきたが、2023年度の「（仮称）堺鉄砲鍛冶屋敷ミュージアム」の開館に向け、研究成果の可視化と情報コンテンツの制作・展示による情報発信を行うこととなった。

近年では、文化財や歴史建造物を対象に、3次元計測に基づく3Dデータのデジタルアーカイブ構築と3次元造形技術を用いたコンテンツ開発の試みが進展しつつある。文化財をデジタル化することによってネットワークを通じて離れた場所においても閲覧することが可能となる。特に銃刀法により所持・管理が難しい火縄銃においては、3次元デジタルアーカイブの有効活用が期待される。さらに、デジタルアーカイブを目的に作成された精緻な3Dデータからデジタル造形されたレプリカは、制作時間とコストの削減に加え正確な形状を量産して様々な場所への配布を可能とする。これにより、同じ3Dデータを用いたVRやARコンテンツと連携させた展示も可能となる。さらに、実物の保存状態劣化の回避・盗難防止という従来のレプリカがもたらした効果に加えて、触れることによって見るだけでは伝わらない情報の伝達や教材化することで教育での二次利用といったメリットもある<sup>[3]</sup>。

3Dデータのデジタルアーカイブと3次元造形技術およびVRやARのようなコンテンツ化の技術を組み合わせることにより文化財に対する理解や興味関心の促進が期待され効果的な情報発信ができると考えられる。

本稿では、堺鉄砲鍛冶屋敷の歴史研究成果の可視化と発信において、3Dデータの活用とコンテンツ制作の経過について述べる。3Dデータに基づくデジタル造形とVR/ARを組み合わせたコンテンツ開発に向けた検討として、実物の火縄銃を基に、3Dスキャナによるデータ取得と3Dプリンタを用いたレプリカ制作を行い、シンポジウムでの展示と来場者へのアンケートにより有効性の検証を行った。また、その結果に基づいて今後のコンテンツ制作の指針について検討した。

## 2. 研究背景<sup>[2]</sup>

大阪府堺市堺区、環濠都市区域の北部に位置している井上関右衛門家住宅は、日本で唯一の江戸前期の鉄砲鍛冶の住居兼作業場として2004年に堺市の有形文化財（建造物）に指定された。2014年10月に井上家資料の確認作業が開始され、火縄銃の図面や取引先の名前が記された文書、帳簿類など江戸時代の鉄砲生産に関する資料が多数発見された。その歴史的価値の高さから2015年より堺市と関西大学の共同研究調査が開始され、現在は両者の連携のもと事業を継続している。

堺市は2013年に貴重な歴史・文化資源を未来へ継承するために「堺市歴史的風致維持向上計画」を策定し、2018年に当主である井上修一氏から堺市に主屋等が寄贈され、「歴史的風致形成建造物」として指定された。堺市の鉄砲文化を国際的に発信することを目的に鉄砲鍛冶屋敷整備計画が策定され、現在では「(仮称)堺鉄砲鍛冶屋敷ミュージアム」開館に向けた整備事業が進んでいる。

## 3. 3Dデータを用いたコンテンツ制作の検討

3Dスキャナと3Dプリンタの技術進歩は、多くの文化財の復元を可能としている。完成したレプリカは博物館やイベント等で展示し来場者が触れる、または利用することで有用性が確認されている<sup>[4-6]</sup>。しかしながら色彩や重さ、質感等の再現は検討の余地を残している。色彩については既にカラー3Dプリンタにより安定した色彩情報の再現が可能だが、高価な装置とランニングコストを要する上に物質特有の光沢やツヤなどの質感の再現が課題として挙げられる。重さに関しても現状の3Dプリンタではプラスチック樹脂を材料としたものが主流であり、実物のそれぞれの素材を扱った3Dプリンタを用いることはやはり現実的ではない。

一方でVR/AR技術を用いた文化財復元の試みもあり、あたかも現地にいるかのような体験を提供できる<sup>[7]</sup>。また仮想空間上で文化財の3Dデータを表示させ様々な材料の反射特性を反映させることも可能であり<sup>[8]</sup>、色彩や質感表現においては有効であるとされる。さらに、異なる感覚情報の付与によるクロスモーダル知覚によって重み、手触り、味覚のような知覚が変わることも報告<sup>[9]</sup>されているため、より実物に近づけた情報呈示を行える可能性もある。

しかしVR/ARは仮想空間上でのインタラクションには、基本的に操作デバイスを手にする必要があるので意図した触覚の呈示は難しい。曾我ら<sup>[10]</sup>の万年筆を対象とした研究では、対象物の形状に合わせてペン型デバイスとしてWiiリモコンとVRを合わせた鑑賞システムを開発したが、やはり重さと形状の触覚知覚を追求する余地がある。

そこで、実物に基づいた火縄銃のレプリカを制作した上でデバイスを組み込む設計を施し、仮想

空間上に測定した火縄銃オブジェクトと同期させる手法を提案することで、火縄銃としての形状の知覚を損なうことなく火縄銃の質感、重さ、使い方を再現した体験コンテンツが開発できると考えられる。

## 4. コンテンツ開発

### 4.1 鉄砲の三次元計測

コンテンツ開発においてインタフェースの役割を果たす実物に基づいたレプリカを作成するために、堺市から貸与された火縄銃（全長：123.4cm、銃身長：90.3cm、口径：1.2cm、銘文：「撰 彦住 井上関右衛門 作」）（図1）を用いた。鉄砲は主に銃身、台木（銃床）、からくりから構成されている。作成にあたってまずは鉄砲を分解し、それぞれの部品の形状を3Dスキャナで計測した。



図1 計測に用いた火縄銃

取得された3次元メッシュデータに対し、CGソフトを用いた整形編集を施し、3Dプリンタで出力して造形作業を行った。測定を含めた制作期間はおよそ2カ月間であった。

### 4.2 からくり等の小型部品測定

からくりとは引き金を引いた動力を利用して弾丸が発射されるまでの過程を動かす仕掛けのことを指す。

これらのからくりを分解したしたものに加え、銃身に付属している尾栓、火蓋などの小型部品を計測した。

測定にはSHINING3D社のEinScan-SE（スキャン精度：0.1mm スキャン範囲：30～700mm）を用い（図2）、測定後は編集ソフトEXScan Sを用いて点群データを編集した（図3）。

測定対象物は鉄や真鍮で構成された金属体であったが経年による酸化が進んでいたため全体の形状を測定することは可能であったものの、一部は金属による反射によって点群データが取得できな



図2 測定の様子（左：からくりの測定、右：台木、銃身の測定）

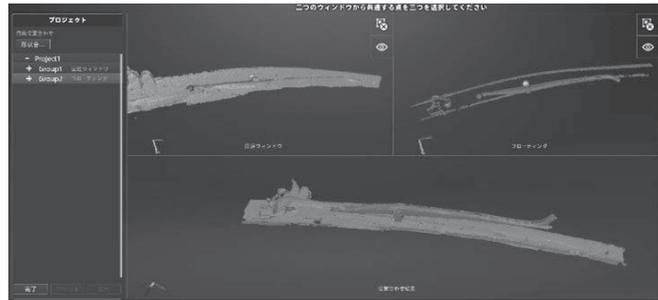


図3 位置合わせ編集

い箇所が見られた。取得できない箇所は穴埋めを行うことで形状を補正し、メッシュデータへ変換した。変換後のメッシュを30～50%削減しobj、stl形式のデータを取得した。CG編集にはAutodesk社の3ds Maxを用い、ポリゴンの削減、不要な形状の削除を行った。さらに本来穴が開けられている部品は形状補正の際に閉じられてしまっているため単純な円柱または直方体を作成し、ブール演算を適用して穴を開けた(図4)。

また、一部が接合されて分解できない部品に関しては、測定データをCGソフト上で各部品に分解した。

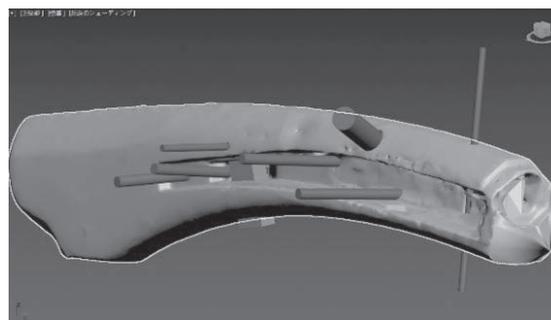


図4 CG編集

#### 4.3 台木、銃身の測定

台木、銃身の寸法はそれぞれ118.5cm、90.4cmあるため、ハンドスキャンが可能な3DスキャナSHINING3D社のEinScanPro(スキャン精度:0.05mm、スキャン範囲:30～4000mm)を使用した。

#### 4.4 データの出力

3DプリンタはUltimaker社のUltimaker S5(xyz:330×240×30mm)を使用した。フィラメントはプラスチック樹脂のPLA WhiteとBreak awayを用いた。台木、銃身は3Dプリンタの出力範囲上、全長を1回の出力で行うことは不可能なため、4～5分割したものを出力し、接着剤で接着することで全長のモデルを再現した(図5、図6)。

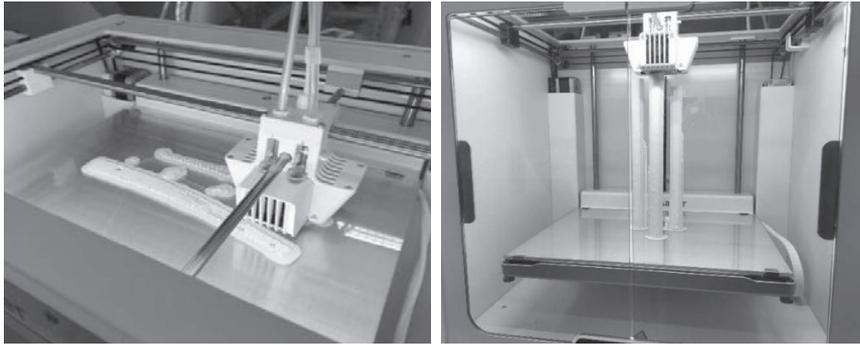


図5 出力の様子

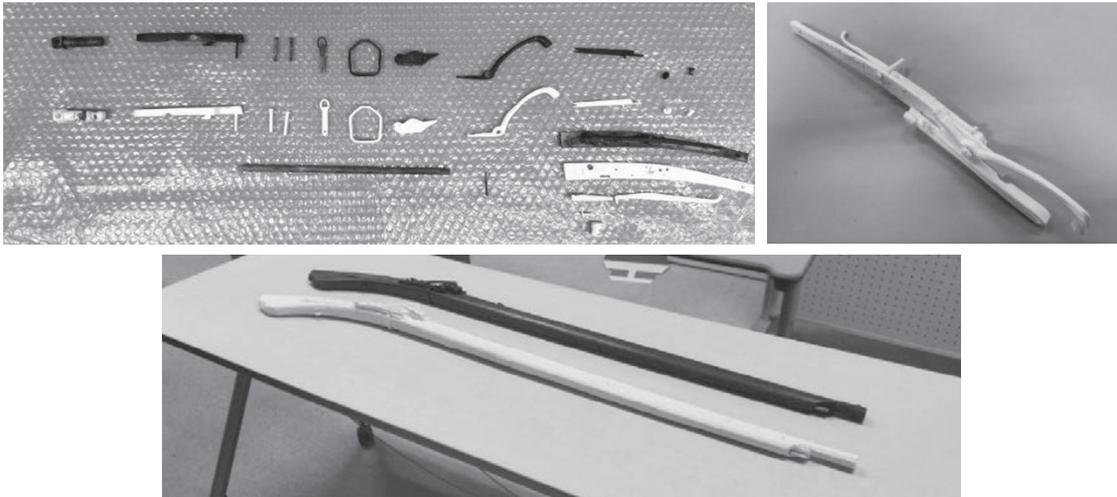


図6 出力したレプリカ（左上：部品、右上：組み立てたからくり、下：全体）

## 5. レプリカの展示

2021年11月14日、堺市と関西大学の地域連携事業として堺鉄砲鍛冶屋敷ミュージアムシンポジウム「よみがえる本物のものづくり空間—井上関右衛門家の魅力に迫る—」<sup>[11]</sup>が関西大学堺キャンパスにて開催された。

コンテンツ制作の途中経過の紹介として、3Dプリンタ出力した火縄銃の展示を行った（図7）。

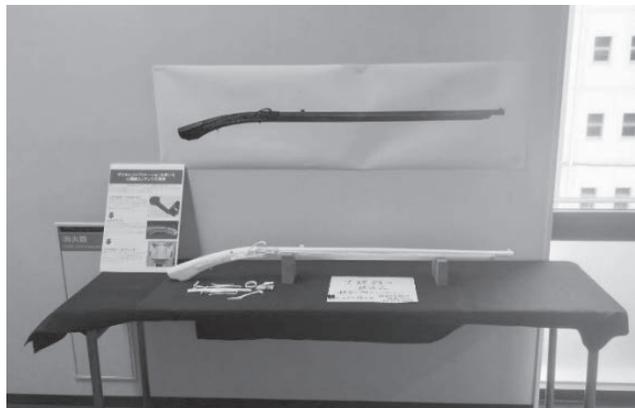


図7 展示の様子

展示には実寸大実物火縄銃の大判写真と、制作過程と3Dスキャナ、3Dプリンタの簡単な説明書きパネル、組み立てたカラクリとは別個で、からくりの各パーツレプリカも展示に加えた。

また来場者は本コンテンツの有用性に関するアンケートに回答した。質問項目は角田らの先行研究<sup>[12]</sup>を参考に構成した。回答には全くそう思わない〈できない〉：1から強くそう思う〈できる〉：5の5段階評価を行った。質問項目は以下の通りである。

- Q1. 堺における鉄砲づくりの歴史についてご関心がありますか。
- Q2. 堺で鉄砲づくりが盛んだった時代の鉄砲の仕組みについてご関心がありますか。
- Q3. 博物館などの鉄砲の展示で、文字の説明だけで実際の大きさを想像することができますか。
- Q4. 博物館などの鉄砲の展示で、文字の説明だけで実際の重さを想像することができますか。
- Q5. 博物館などで江戸時代の鉄砲をご覧になったとき、文字の説明だけで実際の使い方を想像することができますか。
- Q6. 3Dスキャナを使って、実物に則したスキャンデータを得ることができるのをご存じですか。
- Q7. 3Dプリンタを使って、実際に則した模型をつくることをご存じですか。
- Q8. 3Dプリンタ、スキャナを使って文化財を復元することは重要だと思いますか。
- Q9. 3Dプリンタ、スキャナを使って鉄砲の歴史と技術について情報発信することは重要だと思いますか。

## 6. アンケートの結果

シンポジウム参加者の内62名がアンケートに回答した。その中から全ての設問に回答した57名を有効回答数とした。

各質問項目に対し1～5の評定値における回答人数と評定値を回答人数で加重平均したスコア平均の値を表1に示す。質問項目Q1とQ2は堺市の鉄砲文化と鉄砲への関心度合いに関する質問で、スコア平均は4.5と4.4であり、90%以上の回答者が興味をもっているという結果であった。項目Q3～Q5は、博物館の文字展示に対する評価であり、スコア平均は2.0～2.5であり、6～70%以上の回答者が「不十分」と回答している。項目Q6とQ7は3Dスキャナと3Dプリンタの認知度を、またQ8とQ9は3Dスキャナと3Dプリンタを用いた情報発信の意義に関する質問であるが、いずれ

表1 アンケートの結果

質問	回答人数					スコア平均
	1	2	3	4	5	
Q1	1	0	1	22	33	4.5
Q2	1	0	3	26	27	4.4
Q3	6	29	13	7	2	2.5
Q4	16	25	15	1	0	2.0
Q5	16	28	10	3	0	2.0
Q6	6	5	3	29	14	3.7
Q7	5	3	1	28	20	4.0
Q8	0	0	7	21	29	4.4
Q9	0	2	3	25	27	4.4

表2 コンテンツ制作に関する自由記述

3Dスキャナ・プリンタによるコンテンツ制作に関する内観報告	
1	鉄砲のように法的な規制もありどこでも展示するのがむずかしい資料を気軽に展示する方法として有効だと思う 彩色や重さなど実物に近づける努力をしてほしい
2	見るだけでなく、ふれて重さ等を感じることができる模型製作は、多くの人に理解をしてもらうのに非常に重要なことと思います。
3	3Dプリンターは思いのほか細部の仕上がりが雑に見えます。 展示に使用するにはもう少し技術進歩が必要かと思いました。
4	ふれて確かめることができることは目のみえない方にとっても、より分かりやすい媒体になると思います。
5	3Dプリンタで復元資料、アナログとデジタルを活用すれば、もっと歴史や堺に興味を持てる授業ができると思いました。

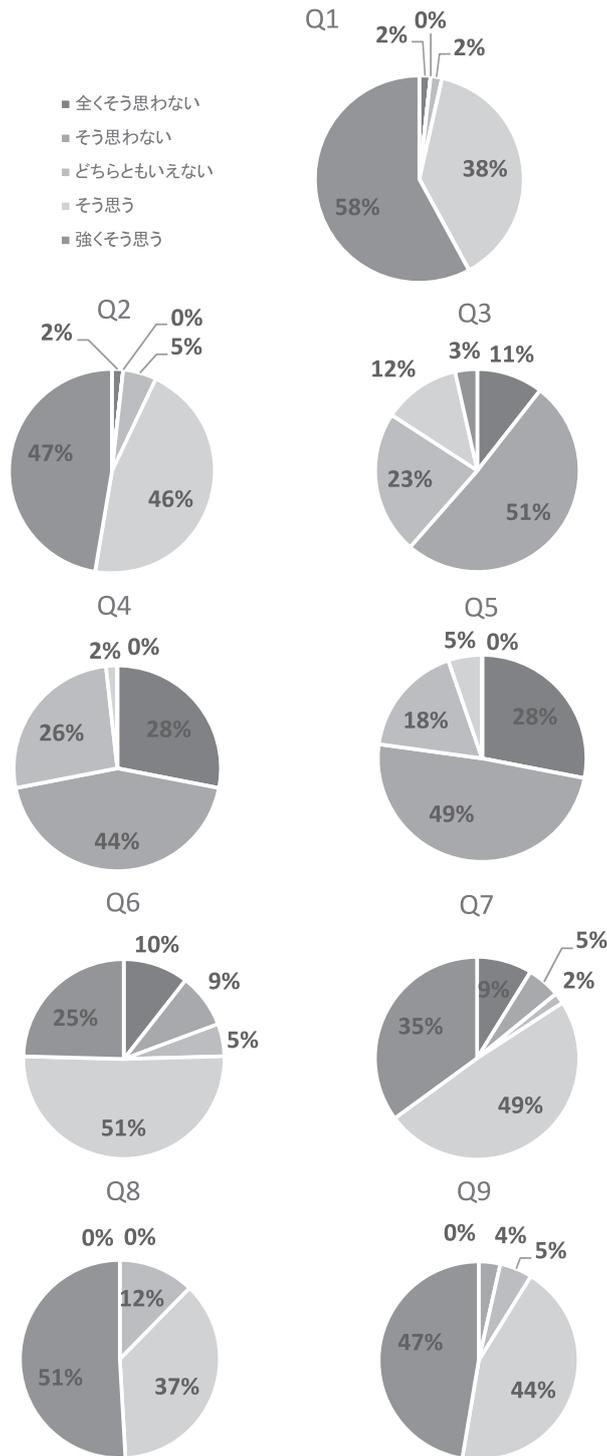


図8 各質問の回答割合

もスコア平均は4以上であり高い評価となった。特にQ8、Q9の「強くそう思う」「そう思う」を合わせたものを肯定的な回答とみなした場合に、回答割合はそれぞれ87.7%、91.2%であり3Dスキャナ、3Dプリンタを用いた文化財の復元及び情報発信は有効であると感じた者が多く見られた。

3Dスキャナ、3Dプリンタによるコンテンツ制作に関して、自由記述として回答されたものの一部を表2に示す。自由記述においても「3Dスキャナ、3Dプリンタによるコンテンツ制作は有

効だと感じられ、ミュージアム開館に合わせてコンテンツの完成を楽しみにしている」という記述も見られた。

また、記述 4、5 ではユニバーサルデザインでの活用や教材としての利用の提案もあり、本制作においても 3D データを活用することのメリットや有用性を示すことができた。

一方、報告 1、3 のように仕上がりの精度や重さ、色彩などの再現について求められる記述もあり、レプリカの質に対する課題がみられた。

## 7. 今後のコンテンツ制作について

### 7.1 装置

VR/AR を応用した今後のコンテンツの制作の計画について述べる。HMD (ヘッドマウントディスプレイ) は Oculus Quest2 (以降: Quest2) を用いる。Quest2 は VR だけでなくパススルー機能を用いることで HMD を通した AR 表現もできるため、AR コンテンツとしての開発も検討している。開発プラットフォームは、ゲームエンジン Unity を利用する。

### 7.2 インタフェースの設計

仮想空間のモデルとレプリカの動きや姿勢を同期させるためにインタフェースの設計として、Quest2 コントローラを台木部分にはめ込む方法を提案する。この時大きさの関係上コントローラ部分が持ち手部分からはみ出し、手に触れてしまうことが分かっている。またコントローラのトリガーボタンが引き金の役割を果たすが、これらのコントローラの触感が体験時に影響するか考慮する必要がある。

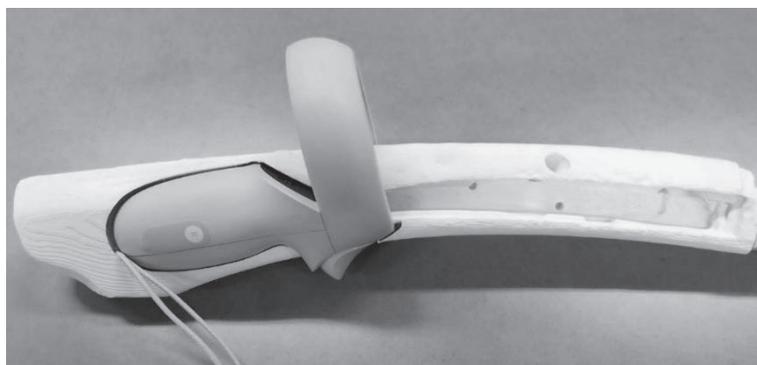


図9 提案インタフェース

### 7.3 火縄銃の CG モデル制作

三次元測定により取得したデータを用いて火縄銃の CG モデルの作成を行った。測定した各々のデータを組み立てることで実際の火縄銃の形状を復元したが、テクスチャにおいては EinScanPro ではデータを取得できず、EinScan-SE においても実物とは異なる色彩のテクスチャが生成されたため、実物をカメラで撮影し、得られた画像データを基にテクスチャを作成した。

### 7.4 撮影、テクスチャ作成

一眼レフカメラ (Canon、マクロレンズ100mm) を使用し、整えた照明 (色温度: 6500K) 環境

で撮影を行った。撮影した画像データのホワイトバランスの統一、撮影環境に依存するハイライトや陰影の除去を目的に Adobe 社の Photoshop を用いて画像編集を行い、3dsmax を用いてテクスチャマッピングを行った。



図10 撮影の様子



図11 テクスチャマップ (火蓋)



図12 引き金 (左から撮影画像、編集後の画像、撮影画像でマッピングしたCGモデル、3Dスキャナで得られたテクスチャ)



図13 火縄銃のCGモデル

## 7.5 クロスモーダル知覚を用いた重さ呈示

重さを計測したところ火縄銃は2.48kgであり、レプリカは0.52kgであった。この差分を埋めるためには素材や3Dプリンタの設定等だけでは対応できない。レプリカの中に重りを仕込む方法が考えられるが、からくり等の小規模な大きさでは困難であり、またモデルの形状の特性上、目的の重量まで到達できない点や、継ぎ目部分が脆くコンテンツに使用するほどの強度が得られない点が課題となる。そのためモデルをより補強することが必要となるが外観や質感、形状が実物とかけ離れてくる可能性がある。

そこでVR/AR技術での仮想空間を利用したクロスモーダル知覚による重み情報の呈示を検討している。クロスモーダル知覚とは、ある感覚情報から他の感覚情報を補完する知覚特性であり<sup>[13]</sup>、本研究においては仮想空間上のCGモデルによる視覚刺激と実空間上の出力モデルの触覚刺激に相当する。重さに関連する錯覚現象はsize-weight illusionとmaterial-weight illusionなどが挙げられ、これらの特性を仮想空間上で呈示される視覚情報と、実空間で呈示される触覚情報の相互作用に応用させることでVR/AR上でもさまざまな錯覚現象が報告されている<sup>[14,15]</sup>。

一方で錯覚効果の影響に関しては物を持ち上げる段階に強く作用するが、その後の物を持ち続ける段階では体性感覚情報から把持力の修正を行うことが示唆されており<sup>[16]</sup>、錯覚の影響についても検討する必要がある。

今後はシステムの実装に伴い錯覚の影響度について検証を行い、引き続き効果的な重み知覚の呈示方法を検討する。

## 7.6 鉄砲試射場復元の検討

堺市にある南海電気鉄道南海本線七道駅周辺にかつて鉄砲試射場があったとされる<sup>[2][17]</sup>。当時の風景の再現は難しいが、現存する歴史資料を基に仮想空間上に試射場の環境を復元することで、当時の火縄銃の性能の実態を示すとともに、銃刀法による規制で一般の人々には困難な火縄銃の使い方や射撃体験を呈示することが可能となる。これにより、火縄銃文化の理解を深めるのに有効な手段になりえる。

当時の試射場の風景を表す資料は少なく現在は図14を参考に射撃距離や的の寸法等の復元を試みている。

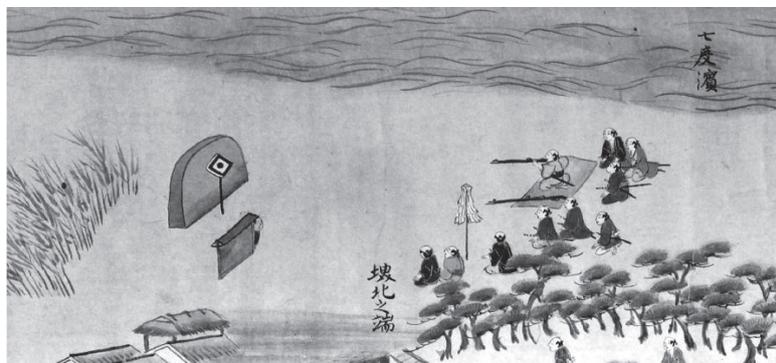


図14 七道浜試射場図（『住吉潮干図』（部分）（阪本龍門文庫蔵）<sup>[17]</sup>）



図15 制作中のコンテンツ（左：標的、右：仮想空間上の鉄砲試射場）

## 8. おわりに

本稿では、堺鉄砲鍛冶屋敷の歴史研究成果の可視化と発信において、3Dデータの活用とコンテンツ制作の検討について述べた。3Dデータに基づくレプリカ制作とVR/ARを組み合わせたコンテンツ開発に向けた検討として、実物の火縄銃を基に、3Dスキャナによる3Dデータの取得と3Dプリンタを用いたレプリカ制作を行い、シンポジウムでの展示と来場者へのアンケートにより有効性を確認した。また、この結果に基づき、今後のコンテンツ制作の指針を示した。

今後は今回得られた指針に基づきコンテンツの制作を進めていく。また、取得した火縄銃の3DデータをWeb等によりデジタルアーカイブとして公開する方法についても検討を加える予定である。

### 謝辞

本研究は、2021年度関西大学なにわ大阪研究センター基幹研究班において、研究テーマ「鉄砲鍛冶屋敷井上関右衛門家に関する堺市との共同調査に基づく鉄砲ならびに「モノ作り」に関する研究」として研究費を受け、その成果を公表するものである。

本研究を進めるにあたって、火縄銃の貸与と情報提供、コンテンツの展示と評価アンケート実施の協力をいただいた堺市文化財課の関係者各位とシンポジウム開催にあたって協力をいただいた関係者各位、来場者の皆様に感謝の意を表す。

### 参考文献

- [1] 国土交通省 観光庁 観光資源課：最先端ICT（VR/AR等）を活用した観光コンテンツ活用に向けたナレッジ集，国土交通省（2019）.  
〈<https://www.mlit.go.jp/common/001279556.pdf>〉（：2021.11.27 アクセス）
- [2] 堺市・関西大学なにわ大阪研究センター：堺鉄砲鍛冶屋敷井上関右衛門家資料調査報告書一蔵のとびらを開いてみれば―（2019）.
- [3] 佐野宏一郎，赤津將之，鈴木奈津，濱松佳生，山岸公基：陸前高田市文化遺産調査における3D機器の活用―向堂観音堂十一面観音菩薩坐像のレプリカ作成の事例を通して―，次世代教員養成センター研究紀要，Vol.4，pp.199-204（2018）.
- [4] 輪田慧，鳥越俊行，今津節生：九州国立博物館における新しい文化財展示の試み，映像情報メディア学会誌，Vol.64，No.6，pp.774-777（2010）.
- [5] 山岸公基，青木智史，大山明彦，金原正明，小山聖美，馬場翔子：先進機器を用いた文化財調査と

その教育的活用 ― 次世代教員養成に向けた新たな取り組み ―, 次世代教員養成センター研究紀要, Vol.1, pp.145-153 (2015).

- [6] 高橋等, 大石義, 吉野亜湖, 内藤旭恵, 陽東藍: 近代茶業遺産のデジタルアーカイブに関する研究 ― 3Dプリンタによる梨地塗高蒔絵天目茶碗の再現 ―, 静岡産業大学情報学部研究紀要, Vol. 20, pp.43-53 (2017).
- [7] 奥村茜, 寺田楽, 林武文: 高松塚古墳 VR 体験コンテンツの開発, なにわ大阪研究, Vol.3, pp.9-21 (2021).
- [8] 清原裕介, 林武文: 文化財のデジタル化における源氏絵鑑賞コンテンツの開発と有効性の評価, 電気学会論文誌C, Vol.141, No.12, pp.1417-1423 (2021).
- [9] 鳴海卓志: クロスモーダル知覚のインタフェース応用, 映像情報メディア学会誌, Vol.72, No.1, pp.2-7 (2018).
- [10] 曾我麻佐子, 鈴木卓治: 蒔絵万年筆のVR鑑賞システムの開発と博物館における運用, 人文科学とコンピュータシンポジウム (2018).
- [11] 堺市・関西大学: 堺鉄砲鍛冶屋敷ミュージアムシンポジウム「よみがえる本物のものづくり空間―井上関右衛門家の魅力に迫る―」(<https://www.kansai-u.ac.jp/naniwa-osaka/>) (2021.12.1 アクセス).
- [12] 角田哲也, 大石岳史, 池内克史: 高速陰影表現手法を用いた飛鳥京MRコンテンツの開発とその評価, 映像情報メディア学会誌, Vol.62, No.9, pp.1466-1473 (2008).
- [13] S. Shimojo and L. Shams: Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol.11, No.4, pp.505-509 (2001).
- [14] 金載然, 洪性寛, 佐藤誠, 小池康晴: SPIDERを用いたsize-weight illusionの検証, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, No.3, pp.347-354 (2002).
- [15] 鳴海拓志, 伴祐樹, 藤井達也, 櫻井翔, 井村純, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.17, No.4, pp.333-342 (2012).
- [16] A. Gordon, H. Forssberg, R. Johansson and G. Westhng: Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip, *Experimental Brain Research*, Vol.83, No.3, pp.477-482 (1991).
- [17] 住吉如慶: 住吉潮干図 (江戸前期), 「龍門文庫複製叢刊19」, 公益財団法人 阪本龍門文庫 (1987).

(さかぐち かずや 関西大学大学院総合情報学研究科)

(はやし たけふみ 関西大学総合情報学部教授)