

# 安土城の3次元デジタル復元を通じた 高精細版バーチャルリアリティシステムの構築に関する研究

○福田 知弘<sup>\*1</sup> 伴 浩和<sup>\*2</sup>  
八木 克人<sup>\*3</sup> 西家 淳朗<sup>\*4</sup>

キーワード：歴史的建築・都市の復元，バーチャルリアリティ，3次元モデリング，  
統合化，システム設計

## 1. はじめに

本研究は、建築・都市の3次元ビジュアライゼーションをテーマとする。3次元ビジュアライゼーションは現存しない建築・都市の3次元空間を誰もが直感的に体験・理解できる上に、創造的な思考を触発し発展させる可能性を秘める。コンピュータを用いた3次元ビジュアライゼーションは、3DCG (3-Dimensional Computer Graphics) 技術を中心に研究・実用化が進められてきた。近年ではコンピュータ処理能力の向上に伴い、従来のように一定の時間をかけてCG静止画を作成するプリレンダリング手法から、リアルタイムレンダリング手法への移行がPCレベルでも一般的になり、VR (Virtual Reality) と呼ばれる。VRは、ユーザと3次元仮想空間との対話を可能とするため、ウォークスルー、プランの比較、動的シミュレーション等のユーザ操作が即時に実行できるようになってきた。

一方、建築・都市分野において3次元ビジュアライゼーションを行う際の課題として、定義すべきオブジェクトが多くなること、小さいスケールから巨大なスケールまでを同時に扱う必要があることが挙げられる。これらの課題は正確性・写実性の高いリアルタイムレンダリングには特に不利となる。そのため、ジオメトリ (形状) の代わりにテクスチャで表現すること、ビューイングフラスタム内部に含まれるオブジェクトのみ描画対象とすること、LOD (Level Of Detail) 処理によりVR仮想カメラからの距離に応じてオブジェクトの詳細度を変更することなど、描画処理負荷を軽減する工夫がなされてきた<sup>1)2)</sup>。このような手法を駆使しながらVRを構築した事例として、計画中の将来空間の表現したもの、現存する建築やまちなみを表現したもの、過去の建築や古代都市を表現したものがある<sup>3)4)</sup>。一方で、正確性・写実性の高いVRシステムをどのように構築する必要があるか、微妙な質感の表現をどのように可能にするか、という報告はなされてこなかった。

そこで本研究は、高精細なVRシステムを構築するための基礎資料を示すことを目的とした。広域の建築・都市オブジェクトを含む、安土城のVR復元を対象とした。

## 2. VRシステムの構築

### 2.1. 制作対象とフロー

織田信長が築いた安土城 (滋賀県近江八幡市) は、琵琶湖畔に位置し、安土山山頂付近に主要建造物である天主、安土山全域に郭が築かれたとされる。安土山の麓には城下町が開かれていた。そのために、復元の対象としては、大きく、地形、天主、郭、城下町に分けられる。

制作フローは、①調査・企画、②シナリオ制作・ディクション、③現地取材・素材手配、④テクスチャ作成、⑤データモデリング、⑥プログラミング・エフェクト、⑦BGM・サウンドエフェクト・ナレーション、⑧調整・インテグレーションの順とした。

### 2.2. 根拠資料

安土城を復元するための根拠資料として、記録書物<sup>5)6)</sup>の他、特別史跡安土城跡発掘調査報告書をはじめとする発掘調査資料 (滋賀県教育委員会及び近江八幡市教育委員会所蔵)、同時代の様子を描いた図版等を用いた。以下、復元対象別に述べる。

天主は、故・内藤昌氏による復元案<sup>7)</sup>を基に、氏が監修した安土城天主5,6階原寸復元 (安土城天主信長の館) と1/20模型 (安土町城郭資料館) を基に作成した。

郭に存在した建造物の内、本丸御殿と伝秀吉邸は、1/40模型と図面 (滋賀県安土城考古博物館所蔵) を基に作成した。その他施設 (門、櫓など) は、発掘調査資料、同時代の既存城 (金沢城、彦根城など)、および当時の建築様式より推定した。

城下町は、まず明治時代の古地図を基に創建当時に存在した道、寺社を推定した。また、家屋や風俗について、同時代の資料 (一乗谷朝倉氏遺跡、国立歴史民族博物館の中世京都町並復元模型、洛中洛外図屏風など) より推定した。

地形は、琵琶湖を含む約65km四方の範囲を対象とした。精度は、コンテンツの中心となる5km四方 (安土山と城下町を含む) は1mメッシュ (1:1000地形図)、それ以外は30mメッシュ (ASTER GDEM) とした。

### 2.3. 高精細VRシステムの構築1: LODの適用

2.1節で示した制作フローにおいて、データモデリング段階でポリゴンを細かく作りこみ、テクスチャの解像度を上げると高精細なVR表現が可能となるが、リアルタイムレンダリングへの負荷が大きくなる。そこで、本稿ではLOD

技法を用いた。以下に、天主モデルと地形テクスチャの LOD 適用例を述べる。

天主モデルについて、構成する部品の内、瓦は外観を表現する主要要素であり、建築端部においては瓦形状の定義も重要となる。一方で、瓦部材を繰り返して配置するとデータ量が大きくなる。そこで、VR 仮想カメラから天主モデルの重心までの距離において、0~50m の時は、平瓦モデル (74,000 ポリゴン) と丸瓦モデル (168,000 ポリゴン) の両方を描画した (図 1)。50~100m の時は、距離が遠くなるにつれ徐々に丸瓦をフェードアウトした。100m 以遠の時は、平瓦のみを描画した。

地形テクスチャについて、広範囲で解像度の高い表現を実現するためには、地形のテクスチャ素材を繰り返して配置する必要があるが、遠方から地形モデルを眺めた場合には、テクスチャが繰り返されていることが明らかとなりリアリティ表現上の課題が残る。一方で、テクスチャデータ総量は VRAM 値以下とする必要があるため、テクスチャを繰り返して配置しない場合には各テクスチャの解像度を抑制する必要があるが生じ、テクスチャを地形近傍で眺めた場合に十分な解像度が得られない。この矛盾を解決するために、地形テクスチャに LOD 技法を適用し、VR 仮想カメラと地形モデルとの距離 (本研究では 20m とした) に応じてテクスチャを繰り返す場合 (図 2 左) と繰り返さない場合 (図 2 右) とを自動的に切り替えた。

#### 2.4. 高精細 VR システムの構築 2 : 自然物の表現

自然物は、人工物と比較して、曲面要素が多く含まれることや、繰り返しパターンが含まれにくいことにより、リアルタイムレンダリングには一般に不利となる。そこで、この課題解決のため、石垣、光、水面、城下町の集落、田畑、煙、星空について検討した。

石垣は、テクスチャ素材として安土城跡に現存する石垣の一部を使用した。また、石垣に近接して眺める天主台はリアリティ表現を高めるために自然石をポリゴン化した (図 3)。また、石垣の端部は、異なるテクスチャが突き合わせとなるため、石垣の模様が整合するようにマッピングした。

光は 2 つの要素を検討した。一つ目は、自然なシェーディングを表現するために、IBL (Image Based Lighting) 技法を用いて、広範囲にかつ 4 つの時間帯 (朝、昼、夕方、夜) に適用したことである。具体的には現地異なる時間帯に撮影した 600 枚以上の写真を合成して HDR (High Dynamic Range Imaging) 用の空のテクスチャを作成し、そのテクスチャを光源として、各シーンにライティングした。影の表現については、シャドウマッピング技法により生成した影をテクスチャ素材に合成した。二つ目は、天主の最上階において、外光の差込を表現したことである。具体的には、疑似ボリュウムメトリックライティング技法を用いて、別シーンに描画した光の差し込みを表現したモデ

ルをポスト処理で乗算した。さらに、VR 仮想カメラが光の差し込み箇所へ近づくと光の差し込みが穏やかになるよう、距離に応じて制御した。

水面は、反射を表現した。具体的には、反転シーンをオフスクリーンレンダリングした結果をテクスチャ素材として、リアルタイムに生成した波のハイトマップを基に法線マップ化して、それらを合成した (図 4)。

城下町の集落は、1000 戸を超える家屋を個別に作成・配置するのは制作上の効率が悪い。そこで、家、庭、道などのオブジェクトをそれぞれ数種類作成し、プロシージャルモデリング技法によりオブジェクトをランダムに配置させ、自然な配置となるように調整した (図 5)。

田畑は、稲穂が風にそよぐ様子を表現した。具体的には、Fur シェーダー技法に、ノイズテクスチャをシミュレーションベースの制御マップを用いてランダムに揺らした。

煙は、城下町の家屋から立ち上る煙を表現して生活感を表現した。具体的には、パーティクル技法により、様々な形状をした煙のテクスチャを用いたビルボードオブジェクトを回転させながらフェードアウトさせた。オブジェクトの向き、速度、描画枚数を制御してランダムかつ動きのある表現とした。



図 1. 天主 (左 : 昼景 ; 右 : 夜景)



図 2. 地形テクスチャ  
(左 : VR 仮想カメラから地形までの距離 0~20m ; 右 : 同 20m 以遠)



図 3. 石垣モデル (左 : 通常の平面ポリゴンにテクスチャマッピングしたもの ; 中 : ポリゴン化した自然石にテクスチャマッピングしたもの ; 右 : 自然石のポリゴン化)



図 4. 水の反射表現 (左: 昼・近景; 右: 夕方・遠景)



図 5. 城下町の表現 (朝)

## 2.5. 構築した高精細 VR システム

2.3~2.4 節では、高精細 VR システムを構築するにあたり特筆すべき点を述べた。結果、内部を含む天主、郭、城下町、地形(地盤、山、内湖など)を含む広大なシーンを一つの三次元仮想空間で作成した。そのため、仮想空間内の移動がシームレスに可能である。構築した VR システムの仕様を表 1 に示す。

表 1 構築した VR システムの仕様

3D モデル	ポリゴン数	約 785.8 万
	頂点数	約 600 万
テクスチャ	枚数	約 1000
	総ピクセル数	約 18.7 億
	データ量	約 3GB
	VR システム実行時の使用 VRAM	約 6.27GB
システム全体	データ量	約 7GB
	フレームレート	30~60fps

## 3. 評価

### 3.1. 評価方法

第 2 章で構築した VR システムの質的評価を行う。被験者は VR の表現水準がわかる者として、VR 制作者 3 名 (30 代男性, 30 代女性, 20 代女性) とした。既往研究<sup>8)</sup>を参考に、評価項目を参照しながら、代表的な VR シーン(静止画)から得られる第一印象や、画像のどの部分を見て何を感じたのかを短文で記述してもらった。代表的な VR シーンとして、天主、郭、城下町、周辺地形を含むもの(以下、全景)、天主外観を中心としたもの(以下、天主外観)、城下町から安土山を眺めたもの(以下、城下町)、大手道から天主を見上げたもの(以下、大手道)の 4 視点場とした。時間帯は、大手道以外は朝、昼、夕方の 3 種類とし、大手道は朝、昼、夕方、夜の 4 種類とした。評価項目と評価内容を表 2、使用した PC とコンテンツ解像度を表 3 に示す。

表 2 評価項目と評価内容(既往研究<sup>8)</sup>を基に一部改変)

画像制作要因	画像構成要素	評価項目	評価内容
モデリング	形	りんかく面細かさ	輪郭線が滑らか 面の細かさが表現されている 細部までモデリングされている
		広さ	大規模にモデリングされている
レンダリング	光	光源色合い	現実に近い光源(照明等)が設定されている 環境光・間接光が表現されている
	陰影	陰影	曲面の滑らかさが表現されている 現実に近い形(半影)が表現されている
	材質	色 模様 質感	現実に近い色が表現されている テクスチャが表現されている 金属、鏡、ガラスなどが表現されている
	奥行き	ピント かすみ	遠方のぼけが表現されている 遠方のかすみも表現されている
	情景	自然情景	雲・霧・樹木・波・水等が表現されている
	画質	色 エイリアンス	フルカラーで表現されている ジャギー、モアレをなくしている、解像度が高い
イクスプレッショニング	画像合成	色 りんかく 構図	合成された画像の色・陰影・ピントの差が小さい 合成された画像の輪郭が滑らか 合成された画像のスケール・構図があっている
	添景	添景 スケール 奥行き	添景(人物・車等)が表現されている 比較できる対象物が表現されている 奥行きが分かるよう対象物が表現されている
	修飾	時間 動き 演出	時刻・季節・天候・年月が表現されている 水の流れ・波のうねりが表現されている 対象物が際立って見える、光の使い方がうまい、マッピングが単調になっていない
	出力	状態 大きさ 演出	出力方式が良い 画像が大きい 立体的に見える

表 3 使用した PC と解像度

PC スペック	モデル	HP Z820 Workstation
	OS	Windows7 Professional 64-bit
	CPU	Intel Xeon E5-2643 v2 3.5GHz
	メインメモリー	64GB
	グラフィックボード	NVIDIA Quadro K6000 (ビデオメモリー: 12GB)
適用可能な画面解像度	コンテンツ解像度	1920x1080

### 3.2. 結果と考察

図 6 に、4 視点場の各 VR キャプチャ例と被験者 3 名の主な意見を示す。

- ・ 全景では、全体的な絵のまとまりが実現できているなどの肯定的な意見が 8 件あった。一方、安土山に描かれた緑色のテクスチャが不自然であるなどの否定的な意見が 4 件あった。
- ・ 天主外観では、天主や郭が細部まで表現されているなどの肯定的な意見が 8 件あった。一方、昼のシーンで陰と影の整合性が取れていない箇所があるなどの否定的な意見が 8 件あった。陰と影は光の物理量や材質特性を基に一体的に計算されるべきであり、プリレンダリング手法ではグローバルイルミネーション技法により写実的な表現が得られるようになった。一方、本研究が扱うリアルタイムレンダリング手法では、グローバルイルミネーション技法は実現されておらず、2 章で示した通り、陰の表現 (IBL 技法) と影の表現 (シャドウマッピング技法) とに分けてデータモデリングを行う現状がある。そのため、陰と影との整合性が不十分な箇所が発生したと考えられる。




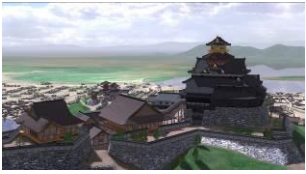


全景	天主外観	城下町	大手道
			
<p>■肯定的意見：8</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>城とそれを囲む街並みが微細に表現されている。</li> <li>昼シーンの田や丘に生えている緑が浅い色、深い色などがきれいに表現されている。</li> <li>朝、夕方シーンはフォグや水面へのうつりこみの具合やバランスがちょうどよく、一際美しい。</li> </ul> <p>■否定的意見：4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>テクスチャに関して、山の面がどこも同じ様に見えるので模型っぽい不自然さがある。</li> </ul>	<p>■肯定的意見：8</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>城全体、石垣は細部までリアルに表現されている。</li> <li>天主と遠景のモデリング、モデルと影の整合性、湖面の反射は良くできている。</li> <li>地形のバランスやモデルと影の整合性が取れているからか、上空から遠くから天主を見下ろすようなロングショットになると一体感が出てくる。</li> </ul> <p>■否定的意見：8</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>樹木や建物の配置が整然としすぎており、模型っぽい感じで不自然さが出ている。</li> <li>昼のシーンは城や木の陰になっている部分がないように思う。</li> </ul>	<p>■肯定的意見：4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>一つ一つの家屋のモデリングはよくできている。</li> <li>家が連なる部分は自然に見える。</li> </ul> <p>■否定的意見：13</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>建物と樹木の配置が不自然。明らかに同じ建物が並んでいる。</li> <li>生活感が感じられない。</li> <li>手前のモデルの荒さが目立つ。</li> <li>湖や川の水際の地形が不自然。</li> <li>影がはっきりと描かれており、画面全体になじんでいない。</li> </ul>	<p>■肯定的意見：7</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>階段一つ一つをテクスチャマッピングの整合性を取りつつ、再現できている点が良いと感じる。</li> <li>瓦など細部までモデリングして再現されているところが、現実感が出てよい。</li> <li>夜のシーンの提灯はとても印象的できれいにみえる。</li> </ul> <p>■否定的意見：3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>空とライティングの整合性が取れていないところが若干目立つ。</li> <li>昼のシーンはテクスチャの解像度の低さが目立つ。特に石垣が平面に見えるため違和感がある。</li> </ul>

図 6. 各視点場の VR 画面キャプチャ例と主な評価

- 城下町では、家屋のモデリングの質の高さを指摘するなどの肯定的な意見が 4 件あった。一方、生活感が感じられないなどの否定的な意見が 13 件あった。城下町は、天主や郭と比較すると、VR 制作の優先度が低い対象であり、他の視点場と比較して低い評価となった。生活感を醸し出すためには、人々、小動物、のれんなどの小物類などを配置して雑多な感じを表現する必要があるが、マニュアル配置しており、制作負荷が大きい。自動配置等の検討が求められる。
- 大手道では、瓦や石垣の表現にリアリティがあるなどの肯定的な意見が 7 件あった。一方、空とライティングの整合性が不十分であるなどの否定的意見も 3 件あった。整合が不十分であることについては、VR システム全体で正確性・写実性の高い表現を実現するため、空や石垣は写真をテクスチャ素材として使用しているが、天主や櫓等は写真素材を用いることはできずコンピュータ上で CG として計算しているため、完全な整合を実現するには至らなかったと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の成果を以下に示す。

- 地形、天主、郭、城下町を含む安土城の VR 復元を対象として、正確性・写実性の高い 3 次元ビジュアルイゼーションを行うため、LOD、石垣、光、水面、集落、田畑、煙の各技法について検討した。
- VR 制作経験者による質的評価により、代表的な 4 視点場を対象として、一定の評価を得ることができた。また、課題を抽出することができた。

以上により、高精細な VR システムを構築するための基礎資料を示すことができた。今後の課題として、3.2 節で考

察した、単調なテクスチャ表現の改善、陰と影の整合の検討、写真素材と CG との整合の検討、効率的な生活感の表現などがある。

#### 【謝辞】

安土城の 3 次元デジタル復元プロジェクトに携わった諸氏に、謹んで感謝の意を表す。

#### 【参考文献】

- Lou, C., Kaga, A., Sasada, T.: 2003, Environmental design with huge landscape in real-time simulation system: Real-time simulation system applied to real project, Automation in Construction, 12(5), 481-485
- Pelosi, A.: 2010, Obstacles of utilising real-time 3D visualisation in architectural representations and documentation, Proc. of the 15th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 391-400.
- Hirayu, H., Ojika, T., Kijima, R.: 2000, Constructing the Historic Villages of Shirakawa-go in Virtual Reality, IEEE Multimedia, 7(2), 61-64.
- Liu, Y.T.: 2007, Virtual Chang-an: Towards a better simulation for a disappeared city, The 2007 International Conference on Digital Applications in Cultural Heritage (DACH2007), 509-529.
- 太田牛一: 1997, 信長公記, 新人物往来社.
- ルイスフロイス: 2000, 完訳フロイス日本史<2>, 中央公論新社.
- 内藤昌: 1976, 「安土城の研究」上下 『國華』987, 988 号.
- 榑原和彦, 三宅良司, 塚本直幸, 伴和隆: 1995, 計画/デザインのビジュアル・シミュレーションにおける画像質の評価に関する研究, 土木情報システム論文集, Vol.4, 9-16.

- \*1 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 准教授 博士(工学)
- \*2 近江八幡市 総合政策部 文化観光課
- \*3 凸版印刷株式会社 文化事業推進本部 修士(美術)
- \*4 近江八幡市 安土町総合支所 地域振興課