

VR 空間における解像度と空間認知の関係性

Relationship between Resolution and Spatial Awareness in VR space

○KIM Joonyoung^{*1}, 山田 悟史^{*2}

Joonyoung KIM^{*1}, Satoshi YAMADA^{*2}

^{*1} 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科

Undergraduate, Dept. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University.

^{*2} 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 准教授・博士（工学）

Associate Professor. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University. Dr.Eng

キーワード：建築；情報；空間認知；VR；解像度；

Keywords: Architecture; Information; Spatial Awareness; VR; Resolution;

1. はじめに

近年の3次元スキャニング技術の精度の進歩は目覚ましい。フォトグラメトリ^{*1)}やLiDAR^{*2)}を用いたスキャニングが代表的であろう。精度だけでなく普及速度も着目すべき速さである。スマートフォンなどの一般的なデバイスでもスキャニング可能になったことから、社会的に急速に普及している。これによりスキャニングを基にした建築物の3Dデータが多く作成され、その活用方法が模索されている。代表的な例には、歴史的価値を持つ建築物の3Dアーカイブが挙げられる^{*3)}。

一方で、VR分野で用いられるゲームエンジン^{*4)}とHead Mounted Display（以下、HMD）の精度と普及も目覚ましい。高い没入感を得られるVR体験が一般的になりつつある。VR空間で利用するコンテンツを販売する市場も拡大している^{*5)}。

上記の3次元スキャニング技術とVR分野の進歩と普及を受けて、スキャニングした建築物のVR空間での活用可能性が模索されている。VR空間という現実と比して極めて少ない制約条件を活かした様々な活用方法が考えられる。多くのユニークな提案¹⁾がある一方で、単純ではあるが、遠隔に存在する、或いは保存が困難な歴史的建築物部をスキャニングしてVR空間で半永久的に体験可能にすることは、効果的な体験であり、新たな歴史の保存方法であると考えられる。

2. 研究の位置付け

上述のようなVR空間の活用の促進には、技術的、或いは人間科学的な研究課題もある。本研究が着目しているのは「空間の解像度」である。空間の解像度は「デバイス側の仕様²⁾」と「人間の空間認知」から適切に設定されることが望ましい。一般に、解像度は高いほど現実

に対して再現度が高く、再現度が高いほど没入感が高いとも言われている。そのため解像度は重要な研究要素であり、デバイスとして研究開発が続けられている。一方、VR空間の解像度を空間認知から設定するために、両者の関係性を提示した研究は少ない。しかし、デバイス開発の適切な目標値の提示を通じた開発支援という意味でも、空間認知と解像度の関係性、適切な解像度を明らかにすることは重要な研究課題である。

関わる研究には横澤³⁾や、BOECKMAN⁴⁾、壺井ら⁵⁾の研究がある。しかし、歴史的建築物の空間の解像度を題材にした研究は筆者が知る限り見当たらない。

本研究はこのような問題意識から、スキャニングを基に作成されたVR空間における建築物の解像度と空間認知の関係性を題材とする。「空間の解像度」では「ポリゴン数」と「テクスチャのピクセル数」の二要因に着目する。「空間認知」においては「連続的な解像度変化に対する空間変化の認識」と、「異なる解像度で再現した空間に対する印象」の二つの観測項目に着目する。上記の二要因と二観測項目の関係性は把握することが本研究の目的である。また本研究の新規性に該当する。

3. 研究概要・方法

3.1. 実験概要

本研究は被験者実験により研究目的を把握する。実験はHMDを装着して実験建築物を閲覧するVR空間の体験として行う。実験建築物は大きく2種類ある。一種類目はポリゴン数とテクスチャのピクセル数を3段階に区分した計6モデルである（以降、前者を「ポリゴン数分割モデル」、後者を「ピクセル数分割モデル」と呼称する）。二種類目は両者を連続的に変化させる2モデルである（以降、「ポリゴン数連続変化モデル」、「ピクセル数連

続変化モデル」と呼称する)。それぞれを体験しながらアンケートに回答して貰う実験である。その結果を記述統計により分析・考察する。詳細を後述する。

3.2. 実験建築物について

実験建築物のデータは、京都市右京区嵯峨に位置している、「愛宕念仏寺」(おたぎねんぶつじ) の 3D スキャンデータ⁶⁾ (図 1) を使用した。点群数は 498,586 点、ポリゴン数は 998,519 ポリゴン、5 枚のテクスチャのピクセル数は 8192×8192 である (JPG 形式)。



	点の数	ポリゴン	テクスチャー
「愛宕念仏寺」	498,586	998,519	8192 X 8192

図 1 実験建築物の画像と 3D スキャンデータ詳細表

3.3. 解像度について

・ポリゴン数分割モデル

上記の 3 次元モデルのポリゴン数をモデリングソフトウェア⁷⁾ で修正することで作成した。分割の基準はボクセルを単位とする平均密度とした (以降、分解能と呼称する)。「5mm(High), 50mm(Middle), 100mm(Low)」の 3 段階とした。⁸⁾ 図 2 に分割モデルと数値を示す。

・ポリゴン数連続変化モデル

連続変化モデルの分解能の範囲は 5mm から 125mm とした。下限は分割モデルの下限に少し余裕を持たせた値を採用した。変化幅は最大分解能の 5mm とした。実験では計 25 モデルをキーボード操作により連続的に変化させる実験システムを作成し閲覧して貰った。表 1 に連続モデルの例示と数値を示す。

・ピクセル数分割モデル

上記のテクスチャのピクセル数を写真編集ソフトウェア⁹⁾ で修正することで作成した。ピクセル数は 8192×8192(High), 2048×2048(Middle), 512×512(Low) の 3 段階とした。分割幅はポリゴン数の分割数と予備実験を参考に 1/16 とした。図 3 に分割モデルと数値を示す。

・ピクセル数連続変化モデル

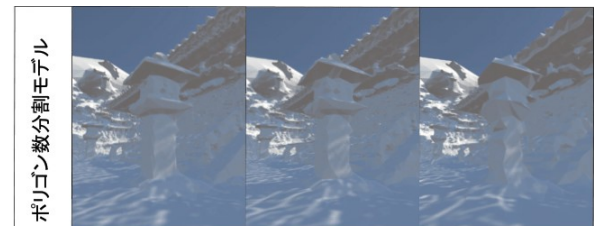
連続変化モデルの範囲の下限は予備実験を参考に 256×256 とした。分割幅も予備実験を参考に面積比 9/16 とした。実験では計 10 モデルをキーボード操作により連続的に変化させ閲覧して貰った。表 2 に連続変化モデルと数値を示す。

3.4. 実験システムについて

実験システムはゲームエンジン¹⁰⁾ を用いて構築した。被験者には HMD を装着して貰い、固定された位置で実験建築物を自由に閲覧して貰う方式とした。連続変化モデルでは、スライダーを表示し、キーボードの左右キーで解像度を操作できるようにした。

3.5. アンケート項目について

まず、空間や環境などの心理・認知を扱った論文⁹⁾¹⁰⁾ を参考に計 50 個の形容詞と表現句を選定した。次に、

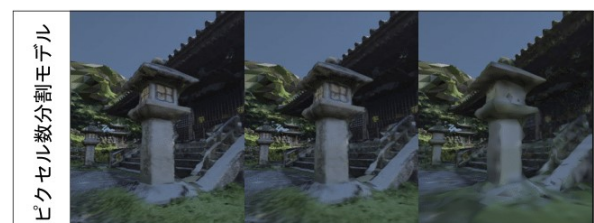


	High	Middle	Low
平均密度	5mm	10mm	100mm
点の数	497,847	322,341	131,964
ポリゴン	998,514	647,409	268,213

図 2 ポリゴン数分割モデル

表 1 ポリゴン数連続変化モデルの詳細表

連続変化モデル	ボクセル平均密度	点の数	ポリゴン	連続変化モデル	ボクセル平均密度	点の数	ポリゴン
モデル1	5mm	497,847	998,514	モデル14	70mm	217,444	438,789
モデル2	10mm	497,798	998,437	モデル15	75mm	198,573	401,242
モデル3	15mm	497,349	997,569	モデル16	80mm	181,938	368,196
モデル4	20mm	494,487	991,867	モデル17	85mm	167,128	338,541
モデル5	25mm	484,176	971,176	モデル18	90mm	154,099	312,452
モデル6	30mm	461,811	926,233	モデル19	95mm	142,346	289,018
モデル7	35mm	429,751	861,892	モデル20	100mm	131,964	268,213
モデル8	40mm	393,140	788,667	モデル21	105mm	122,587	249,468
モデル9	45mm	356,854	716,247	モデル22	110mm	114,153	232,355
モデル10	50mm	322,341	647,409	モデル23	115mm	106,659	217,295
モデル11	55mm	291,150	585,370	モデル24	120mm	99,828	203,746
モデル12	60mm	263,609	530,564	モデル25	125mm	93,754	191,458
モデル13	65mm	239,139	481,953				



	High	Middle	Low
ピクセル数	8192×8192	2048×2048	512×512

図 3 ピクセル数分割モデル

表 2 ピクセル数連続変化モデルの詳細表

連続変化モデル	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5
ピクセル数	8192×8192	6144×6144	4096×4096	3072×3072	2048×2048
連続変化モデル	モデル6	モデル7	モデル8	モデル9	モデル10
ピクセル数	1536×1536	1024×1024	819×819	512×512	256×256

表 3 17 組の修飾語対

No.	空間の良否	No.	空間の特徴
1	快適---不快	1	弱い---強い
2	安定的---不安定的	2	狭い---広い
3	酔わない---酔う酔わない	3	自然的か---人工的
4	綺麗---汚い	4	涼しい---暖かい
5	満足---不満足	5	淡い---濃い
6	集中---散漫集中	6	地味な---派手な
7	好き---嫌い	7	穏やかな---刺激的な
		8	静的---動的
		9	柔らかい---硬い
		10	暗い---明るい

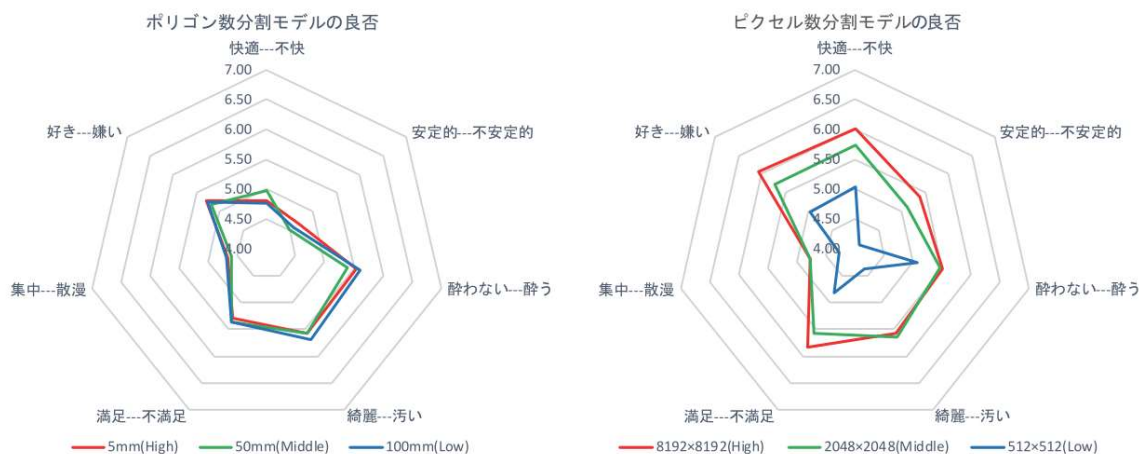


図 4 空間の良否に関する実験結果

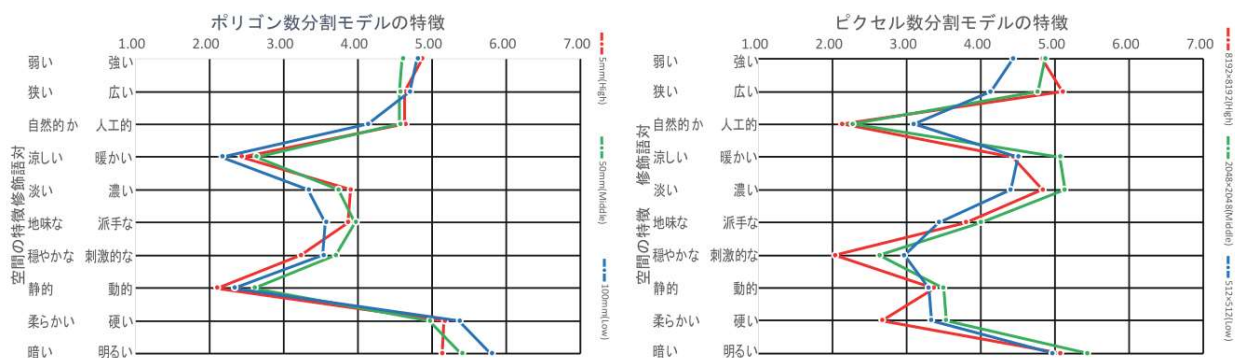


図 5 空間の特徴に関する実験結果

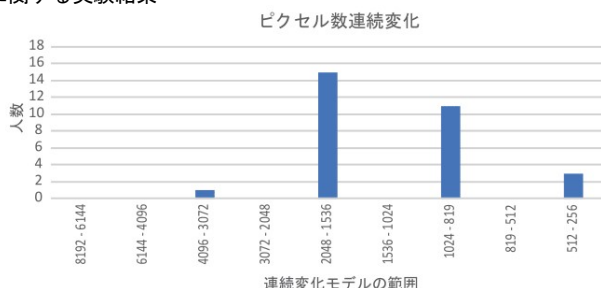


図 6 連続変化モデルの実験結果

建築に関連のある 7 人の予備実験の結果から空間の良否を評価する 7 組と、空間の特徴を評価する 10 組、計 17 組の修飾語対 (表 3) を選定した。7 段階評価とし、空間の良否においては高いほど良い評価とした。

3.6. 実験手順

① HMD を装着して椅子に着座し、順応として簡単な操作が可能な仮想空間を観察して貰う。

・分割モデルの実験

② 被験者にランダムな順番で分割モデルを 1 分回観察して貰う。

③ アンケートに回答して貰う。

④ 現実の室内を 1 分間見渡して休憩して貰う。(VR 酔いなどの有無の確認)

⑤ ②から④を 6 回繰り返す。

・連続変化モデルの実験

⑥ ピクセル数かテクスチャ数の片方を閲覧して、変化したと感じるスライダー位置を探して貰う。

⑦ 変化したと感じた理由を回答して貰う。

⑧ 他方で⑥⑦を実施する。

⑨ VR 酔いの確認を含む自由回答調査を実施して終了。

4. 実験結果・考察

有効回答数は年齢 20 代の 30 人である。空間の良否に関するポリゴン数分割モデルの結果を図 4 左に、ピクセル数分割モデルの実験結果を図 4 右に示す。空間の特徴の実験結果を図 5、連続変化モデルモデルの実験結果を

図 6 に示す。

・ポリゴン数の実験結果

図 4 左ポリゴン数分割モデルの良好実験結果において、5mm(High), 50mm(Middle), 100mm(Low)の平均値結果に大きな差はなかった。

これは、図 5 左ポリゴン数分割モデルの特徴の結果、グラフでも平均値が大きな差を見せず、図 6 左ポリゴン数連続変化実験結果でポリゴン数分割モデルの中で最も低い解像度である、100mm(Low)に該当する区間 96-100mm での回答者数が最も多いことから、ポリゴン数は人が空間を認識する上で大きな影響を及ぼさないことが分かる。

・ピクセル数の実験結果

図 4 右ピクセル数分割モデルの良好実験結果から 8192 × 8192(High), 2048 × 2048(Middle), 512 × 512(Low)の違 い が 確 認 で き た。特 に 2048 × 2048(Middle)と 512×512(Low)のモデルで大きな差を見せた。

これは、図 5 右ピクセル数分割モデルの特徴結果グラフでも比較的モデル別認識の違いがあり、512 × 512(Low)のグラフが中心数値である 4.00 に比較的最も近い位置にあることが分かる。また、図 6 右ピクセル数連続変化実験結果で 2048×2048(Middle)に該当する区間 2048-1536 での回答者数が最も多いことから、ピクセル数は人が空間を認識するにあたって影響を与えることが分かり、人の認識が大きく変化する最大基準が 2048 × 2048 であることが分かる。

・ポリゴン数実験結果とピクセル数実験結果の比較

まず、図 4 を比較すると、ポリゴンの分割比率がピクセルの分割比率より大きいことを勘案しても、人はポリゴンの変化よりピクセルの変化で認識が大きく変わると判断される。特に、High, Middle のモデルに関して、ピクセル数によって快適度(快適-不快)と安定度(安定的-不安定)と好感度(良い-嫌い)でピクセル数モデルはポリゴン数モデルと大きな差を見せた。

また、図 5 のポリゴンとピクセルの空間特徴に関するアンケート結果で、静的-動的と暗い-明るい部分でポリゴンのモデルがピクセルのモデルより比較的大きな変化を見せたため、活動性(静的-動的)と明暗度(暗い-明るい)ではポリゴンのモデルがピクセルモデルより比較的大きく作用すると判断できる。

連続変化モデルの実験で実験者が応答した区間を累積グラフで視覚化した。また、実験者が変化を感じた部分(要素)に対して回答を受けた結果、お地蔵、灯籠、扉などの順で回答を受けた。特にお地蔵の顔、灯籠の屋根、扉の格子部分などを識別を基準に回答した実験者が多いことから見て、全体的な建物モデルよりは部分的な要素がより重要に作用すると見る。

6. まとめ

今回の研究を通じて、人が VR 空間で空間を認識する時、ポリゴンの影響は少なくピクセルの影響が大きいことが分かった。だが、ポリゴンとピクセルの複合的なモデルに対しては基準が正確ではないため、今後の課題とする。

【注釈】

- * 1) 複数枚の写真から 3D イメージを作る手法
 - * 2) 「光検出と測距」ないし「レーザー画像検出と測距」
 - * 3) gluon の「中銀カプセルタワービル」3D デジタルアーカイブプロジェクトなど
 - * 4) Unity や Unreal Engine など
 - * 5) meta quest
 - * 6) この実験建築物はフォトグラメトリで作成された市販の 3 次元モデルである。SONY カメラで Reflex 25mm レンズを用いた撮影した約 250 枚の画像から写真測量ソフトウェアを使って作成された 3 次元モデルである。
 - * 7) Blender
 - * 8) Adobe Photoshop 「5mm」は国内の複数の会社が 3D スキャナービスのデバイスとして採用している 3D スキャナーの最大分解能 7)を参照した値である。50mm と 100mm は「3 次元点群データを活用した情報化施工の応用に関する研究」のレーザスキャナ搭載型 UAV (ドローン) 8)の計測誤差の許容範囲の上限と下限を参照した値である。
 - * 9) Adobe Photoshop
 - * 10) Unity ゲームエンジン
-

【参考文献】

- 1) Steam 「Steam store」URL : <https://store.steampowered.com/> (23 年 9 月)
- 2) VRonWEBMEDIA 「【2023 年 6 月版】最新 VR ゴーグル・VRHMD・XRHMD・MR グラス購入・比較ガイド」URL : <https://vron.jp/2023/02/09/hmd-guide-2023/> (23 年 9 月)
- 3) 横澤 一彦：多解像度モデルによる視覚的注意と視覚探索の分析, NTT 基礎研究所, 1994
- 4) KYLE JASON BOECKMAN "The Resolution and Performance Effects of Three-Dimensional Display Rotation on Local Guidance and Spatial Awareness Measures", ILLINOIS UNIV AT URBANA, Master's thesis, 1998
- 5) 壺井雅史：立体映像の解像度認知に関する主観評価実験, NTT ドコモ, 電子情報通信学会, 2008.
- 6) Sketchfab 「Japanese temple raw scan」URL : <https://sketchfab.com/3d-models/japanese-temple-raw-scan-5c7748e47cb441d1bb0c511622d9997e> (23 年 9 月)
- 7) NAVVIS 「【技術ブログ】NavVis VLX の点群密度」URL : <https://navvis.kke.co.jp/news/%E3%80%90%E6%8A%80%E8%A1%93%E3%83%96%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%80%91navvis-vlx%E3%81%AE%E7%82%B9%E7%BE%A4%E5%AF%86%E5%BA%A6/> (23 年 9 月)
- 8) 中原匡哉：3 次元点群データを活用した情報化施工の応用に関する研究, 関西大学大学院総合情報学研究科, 関西大学審査学位論文, 2020
- 9) 武田紀子：室内視環境要素に対する人の印象評価, 名古屋工業大学博士論文, 2012.
- 10) AHN MIN SUN "The Study on the Differences of Space Design Recognition System.", Crafts and Design the Graduate School Seoul National University, Doctor of Design thesis, 2017.