

## 異なるプラットフォームで効果的な3Dモデルを 表示するためのポリゴンリダクションの方法

水野 志織<sup>†1</sup> 奥本 萌<sup>†1</sup>  
高田 雅美<sup>†2</sup> 城 和貴<sup>†2</sup>

本研究では、効果的に表示できる最小のポリゴン数の定義を行う。近年、文化財のデジタルデータによる保存が行われている。しかし、ポリゴンのデータ量は莫大で、高い処理能力を持った計算機が必要とされる。一般公開を行う場合、処理能力の低い計算機への適用がなされるべきである。そのため、ポリゴンリダクションを用いて莫大なデータ量を少なくする必要がある。この際、適切なポリゴン数に削減すべきである。この数を定義するために、評価実験を行う。この実験結果として、3次元モデルを表示するピクセル数の50倍が最適であることが分かる。

### Polygon reduction for effective 3D model rendering on different platforms

SHIORI MIZUNO,<sup>†1</sup> MEGUMI OKUMOTO,<sup>†1</sup>  
MASAMI TAKATA<sup>†2</sup> and KAZUKI JOE<sup>†2</sup>

In our research, we define the minimum number of polygons for effective rendering. Recently cultural property is preserved in digital data. Since polyangular data is large, a high performance computer is needed. If it is shown to the public, a low performance should be targeted. Therefore, polygons are reduced to a valid number. We try to define the minimum number. As a result, we find that the number of polygon should be 50 times as many as the number of pixels for rendering 3D models.

<sup>†1</sup> 奈良女子大学 理学部

Faculty of Science, Nara Women's University

<sup>†2</sup> 奈良女子大学大学院 人間文化研究科

Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University

### 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) システムとは、みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であることを利用してつくられたシステムである。開発当初は、軍事システムや、飛行機パイロットのフライトシミュレータとして、きわめて狭い分野で発展しており、近年では、ゲームをはじめとし、生産現場や、医療分野において、シミュレータとして利用されている<sup>1)</sup>。また、考古学分野、美術分野では、建築物をデジタル化して保存したものを VR で閲覧可能である。

2008年6月25日、東京ビッグサイトで開催された、「産業用バーチャルリアリティ展」で、日産自動車の VR 活用事例と VR 研究者による今後の展望についての公演が行われている<sup>2)</sup>。企業によって、生産の効率や、低コスト化のため、VR 技術の開発が急ぎ、進められている。VR 開発を促進するためには、限られたデバイスだけでなく、一般のユーザのために使用範囲の拡大が必要とされる。しかし、一般的に普及している PC の処理能力や環境は様々であり、VR 活用に適しているとは言い難い。そのため、利用環境を拡大するためには、処理能力の低いデバイスでも活用できるようにしなければならない。

VR で物体を表現する方法としてポリゴンメッシュがある。ポリゴンメッシュとは、頂点、辺、面から成り、そこから生成される各要素をポリゴンという。そのため、ポリゴンメッシュによるモデルのレンダリングは、分岐の形状を作りやすく、微妙な調整をすることができる。また、データ量を調整することが可能な点において優れている。そのため、多数のポリゴンで描画される物体の場合、ポリゴンを削減することで、処理能力の低いデバイスで表示できるようにすることができる。しかし、ポリゴン数が少なくなることで、物体の表面が粗くなることや、特徴が消えてしまうといった問題が必然的に発生する。ゲームで使用されているポリゴンモデルは単純な構成で表現されており、ポリゴン削減後もテクスチャマッピングを行うことで、粗さを目立たなくすることが可能である。しかしながら、建造物などの実物を3次元形状計測した情報からポリゴンメッシュを用いて表現したモデルは、複雑であるため、テクスチャマッピングでは補いきれない。

そこで、必要最小限のポリゴン数で粗さを出さないために、モニターでの表示に違いが生じないポリゴン数に、ポリゴン削減する必要がある。モニター上の見え方は、解像度に依存する。ゆえに、本研究では、効果的な3次元表現を可能とするために、表示するデバイスの解像度に合わせたポリゴン数を検証する。これにより、汎用的なデバイスでポリゴンモデルを表示する際に、必要最小限のポリゴン数で形成することが可能となる。

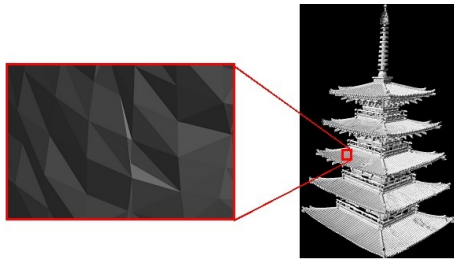


図 1 ポリゴンメッシュを用いてモデリングされた海龍王寺五重小塔

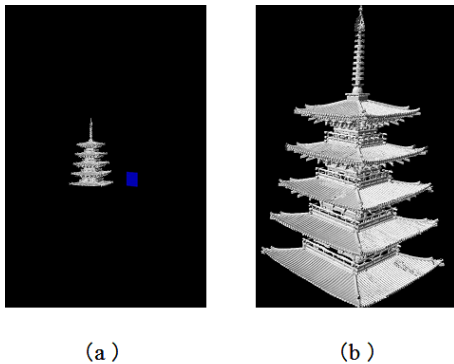


図 2 表示位置が視点から (a) 遠距離の場合と、(b) 近距離の場合の視覚的影響

第 2 章で、ポリゴンによる物体表現について説明する。次に、第 3 章では、本研究で行ったポリゴン削減で使用されているアルゴリズムである Quadric Error Metrics (QEM) 法について述べる。第 4 章では、3 次元形状計測モデルを実際に表示させる実験環境と手順について説明を行う。第 5 章では、実験結果と考察について述べる。

## 2. ポリゴンによる物体表現

ポリゴンとは、3 次元コンピュータグラフィックスにおいて、立体の形状を表現するとき用いられる多角形のことである。この多角形を組み合わせることによって、物体を構築している。これを図 1 に示す。ポリゴンの数は多くなるほど、滑らかな曲面を再現することができる。そのため、3 次元形状計測された実物を、ポリゴンを用いて厳密にモデル化する

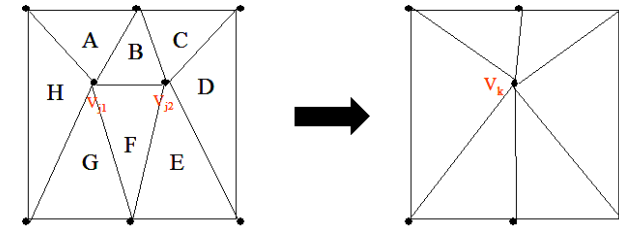


図 3 ポリゴン削減の概略図

ことが可能となる。

多面体の物体の形状を構築する頂点、辺、面の集合のことをポリゴンメッシュという。頂点は、色、法線ベクトル、テクスチャ座標などの、他の情報を伴った、位置の情報を持つ。辺は、頂点間の接続を行う。面とは、閉じられた辺の集合であり、3 角形の面は、3 つの辺を持つ。

微小な 3 角形から構成されるポリゴンメッシュは、視点距離が遠距離での表示の場合と、近距離での場合では、視覚的影響に差が生じる。この例を図 2 に示す。近距離で表示する際、細部まで可視領域となるため、より詳細な描画が必要となる。一方、遠距離での表示の際は、モデルが縮小されるため細部まで確認することはできない。そのため、ポリゴン数を削減したデータを表示しても問題ない。つまり、表示される位置座標により、モデルが目立った粗さが生じることのない適切なデータ量に処理したモデルに替えることで、描画処理の高速化を実現する手法が必要となる。

ただし、ポリゴン削減を行う際に目標となるポリゴン数を与えなければならない。一方、モデルの形状に対して適切なポリゴン削減数を決定する基準は明示されていない。これは、従来の手法が、アニメーションなどの比較的単純なモデルへの適応を目指しており、テクスチャマッピングを用いて表示の品質を補うことが可能であったため、データ量を中心に考慮すれば良かったからである。そのため、形状の特徴が著しく欠損しない限り、表示品質が醜悪となることはない。しかしながら、実際の建造物をスキャンして生成したポリゴンメッシュは複雑な構造をしており、テクスチャマッピングでポリゴン削減による粗さを補うことはできない。そのため、ポリゴン削減をする際に、効果的な表示が行える形状を保持するポリゴン数を与える必要がある。

### 3. ポリゴン削減のアルゴリズム

QSlim は, Carnegie Mellon University で行われた Quadric Error Metrics (QEM) <sup>3)</sup> を基本とするポリゴンの簡略化手法のプログラムである. 本章では, QEM 法について説明する.

あるポリゴンメッシュが, ポリゴン頂点集合  $V$  ( $V \in V_i : i = 1, 2, 3 \dots$ ) で表されるとする. このとき, QEM 法によるポリゴン削減は, 以下の手順で行われる.

- (1) すべてのポリゴンの頂点に対して, 4 次対象行列  $Q$  を割り当て
- (2) 稜線の両端点となるポリゴン頂点の組 ( $V_{j1}, V_{j2}$ ) を作成
- (3) すべての組に対して, 適切な位置に頂点  $V_k$  を設定
- (4) 各頂点  $V_k$  におけるコスト  $\Delta V_k$  を計算
- (5) コストの小さい順に並び替える
- (6) 最も小さいコストを持つ組 ( $V_{j1}, V_{j2}$ ) を削除し, 新たな頂点  $V_k$  に置換
- (7) 目標頂点数であれば, 終了
- (8) 頂点  $V_{j1}$  と頂点  $V_{j2}$  に関する組の情報を新たな頂点  $V_k$  に変更
- (9) 頂点  $V_k$  に関するすべての組に対して, 適切な一に頂点を設定し, コストを計算
- (10) 手順 5 に戻る

図 3 は, QEM 法の概念図である.

手順 1 において, 各頂点に割り当てられる対象行列  $Q$  は, その頂点が接する平面  $planes(V_{j1})$  の方程式から得られる.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & q_{1,3} & q_{1,4} \\ q_{1,2} & q_{2,2} & q_{2,3} & q_{2,4} \\ q_{1,3} & q_{2,3} & q_{3,3} & q_{3,4} \\ q_{1,4} & q_{2,4} & q_{3,4} & q_{4,4} \end{bmatrix} = \sum_{planes(v)} K_p \quad (1)$$

ここで, 平面の方程式を

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (a^2 + b^2 + c^2 = 0) \quad (2)$$

と定義すると, 行列  $K_p$  は

$$K_p = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられる. 例えば, 図 3 の頂点  $V_{j1}$  の場合, これに接する平面  $planes(V_{j1})$  には, 平面  $A, B, F, G, H$  が含まれる.

手順 2 における  $V_{j1}$  と  $V_{j2}$  は, 頂点集合  $V$  に含まれる任意の頂点である.

ある頂点  $V_i = [v_x, v_y, v_z, 1]^T$  において, コスト  $\Delta V_i$  を

$$\begin{aligned} \Delta V_i &= V_i^T Q_i V_i \\ &= q_{1,1}x^2 + 2q_{1,2}xy + 2q_{1,3}xz + 2q_{1,4}x \\ &\quad + q_{2,2}y^2 + 2q_{2,3}yz + 2q_{2,4}y + q_{3,3}z^2 + 2q_{3,4}z + q_{4,4} \end{aligned} \quad (4)$$

と定義する. ここで,  $v_x$  は  $V_i$  の  $x$  座標値,  $v_y$  は  $y$  座標値,  $v_z$  は  $z$  座標値である. このとき,  $\Delta V_i$  において,  $V_i$  が未知で  $Q_i$  が既知の場合, 2 次関数の偏微分を行って, 極所解を得る. つまり,

$$\frac{\partial \Delta}{\partial x} = \frac{\partial \Delta}{\partial y} = \frac{\partial \Delta}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

とし, 偏微分方程式

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} V_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

を解くことを意味する. ここで, 左辺の行列の一番下の行の値は, 頂点  $V_i$  が同次ベクトルで表されるため, 空になる. この式 6 を用いて, 手順 3 において, 適切な頂点座標を得る. この際, 対象行列  $Q_k$  は,  $V_{j1}$  に対する対象行列を  $Q_{j1}$  と  $V_{j2}$  の対象行列を  $Q_{j2}$  を用いて,

$$Q_k = Q_{j1} + Q_{j2} \quad (7)$$

と表される. 手順 3 において, 式 6 の左辺の行列が逆行列を持たない場合, 頂点  $V_{j1}$  と  $V_{j2}$  の曲線上の適当な場所を頂点  $V_k$  の座標とする.

手順 4 では, 式 4 を用いて,  $\delta V_k$  を計算する.

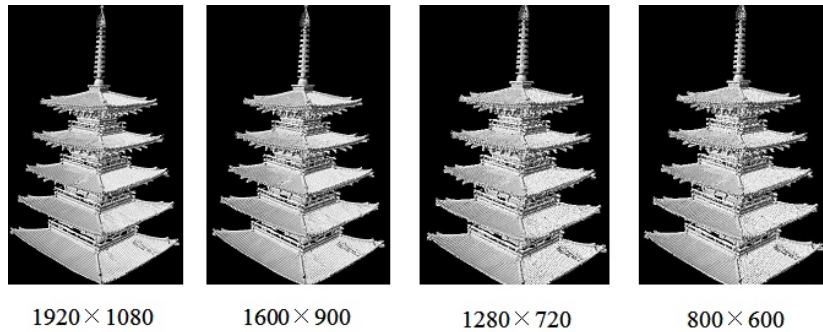


図 4 海龍王寺の国宝五重小塔の各解像度での表示

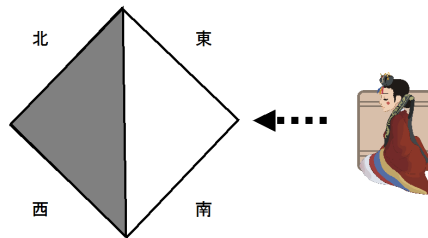


図 5 死角による物体描写の制限

コスト  $\delta V_k$  は、頂点  $V_k$  に接する面を 1 つに統合する場合の誤差を意味する。そのため、手順 5 ではコストの小さい順に並べ替え、手順 6 では最も小さいコスト  $\delta V_k$  となる組  $(V_{j1}, V_{j2})$  を削除し、頂点集合  $V$  に新たな頂点  $V_k$  を加える。

手順 7 では、ポリゴン数を確認し、目標ポリゴン数に満たない場合、手順 8 に進む。

手順 8 と手順 9 では、新たな頂点  $V_k$  と隣接するポリゴン頂点の組を作成し、そのコストを計算する。

#### 4. 3D モデル表示の評価実験

デバイスの処理能力の向上により、複雑構造を持ったポリゴンメッシュを用いたモデリングが可能となっている。しかし、複雑な形状を正確にポリゴンで表現するためには、莫大な

データ量となるため、高性能な計算機を必要とする。そのため、汎用的な計算機での表示させるために、ポリゴンメッシュの簡略化によりデータ量の削減が必要となる。この評価実験は、ポリゴンメッシュの簡略化が必要となる、モニターに表示させる際に表示品質が低下することのない必要最小限のポリゴン数を定義見出すことを目的とする。

評価実験では、奈良県奈良市にある寺院、海龍王寺<sup>\*1</sup> の国宝五重小塔の 3 次元形状計測データを用いる。このデータは、早稲田大学理工学部環境工学科都市計画の中川研究室と、東京大学生産技術研究所の池内研究室、奈良女子大学大学院人間文化研究科複合現象科学専攻城研究室が、2011 年 3 月に合同で次元形状計測を行った際のデータである。この計測では、KONICA MINOLTA 社<sup>4</sup> の非接触 3 次元デジタルライザ vivid910<sup>5</sup> を使用している。vivid910 は、三角測量<sup>6</sup>、光切断方式<sup>7</sup> を採用している。

実験環境として CPU は Intel(R) Core(TM) i5-2500K CPU @ 3.30GHz、メモリは 4.00GB、マザーボードは H67H2-M4v1.0、キャッシュは L1 Data が  $4 \times 32$  KBytes, L1 Inst が  $4 \times 32$  KBytes, Level1 が  $4 \times 256$  KBytes, Level3 が 6 MBytes の計算機を用いる。モニターには、FLATRON E2240 を使用する。解像度は、 $1920 \times 1080$ ,  $1600 \times 900$ ,  $1280 \times 720$ ,  $800 \times 600$  の 4 種類を対象とする。モデル表示には、東京大学生産技術研究所開発のプログラム Alignment.exe を用いる。表示させるファイル形式は、ply ファイルである。ply ファイルには、3 次元頂点情報と接続情報などの、表面の連続を表したデータが含まれている。図 4 は、各解像度で表示させた 3 次元形状計測物体である。

海龍王寺の五重小塔のポリゴンメッシュは、4 方向のデータが存在する。しかしながら、モニター上に表示されるデータは、それらのうちの 1 方向もしくは 2 方向である。具体的に示した例が図 5 である。この図 5 では、4 角形の建造物である五重小塔を南東の角を正面に表示している。この場合、北西側は、画面上に表示されない。つまり、実際に見ることのできる部分は、前面のみで、背面を表示する必要性はない。そのため、本評価実験では、背面を 1 つのポリゴンで構成されたポリゴンモデルを用いて行う。

解像度から画面のピクセル数が得られる。さらに、五重小塔のポリゴンモデルの表示面積から、表示に使用されているピクセル数を算出することができる。ここで求められたピクセル数を、その解像度で表示させるポリゴン数の基準値とする。この基準値に対して、 $1/10$ ,  $1$ ,  $10$ ,  $40$ ,  $50$ ,  $60$ ,  $100$  倍のポリゴン数となるように、QEM 法を用いてポリゴン削減を行う。

\*1 奈良県奈良市法華寺北町 897 眞言律宗海龍王寺。

海龍王寺五重小塔の表示品質は、視覚的に評価を行う。五重小塔を構成する部分として、壁面と屋根、屋根を支える組物、双輪などがある。壁面は平面であるため、モデルの認識の際重要となる突出した特長は認められない。一方で、屋根と組物、手すりは複雑かつ特徴的である。そのため、これらの部分の特徴が失われた場合、表示の品質の低下に直結する。以上の理由により、本実験の評価を行う際は、屋根と、組物、手すりに注目する。屋根においては、瓦模様が角ばり方、凹凸に対する乱れ、先端部分の明確さを確認する。組物と手すりにおいては、輪郭に滲みや、著しい欠損について着目し、評価する。

## 5. 実験結果と考察

表 1 に、各条件におけるポリゴン数を示す。また、表 2 に、注目すべき部分のみを切り出した画像を列挙する。

1920 × 1080 の解像度で表示を行った結果について評価する。小塔の描画に利用されているピクセル数を基に作られたポリゴン数は、156072 である。この 10 分の 1、1、および 10 倍の画像において、形状を認識することが困難である。これは、表示するポリゴン数が不足しているため、全体的に粗さが目立つ状態になっていることが原因である。つまり、10 分の 1、1、および 10 倍のポリゴン数へのポリゴンリダクションでは、実用的な物体を構成することができない。基準値の 40 倍の小塔に関して、これよりも倍率が低い画像と比べて小塔の形状が認識ができる。しかしながら、屋根の凹凸部分の曲線が乱れており、屋根の先端が不明確である。また、組物や手すり部分に欠損箇所が見られ、全体的形状がに滲んだ印象を受ける。一方、50 倍では、40 倍で見られた組物と手すりの欠損や、小塔の輪郭が明確に表示されている。また、ポリゴン削減処理を施していないモデルと比較し、形状の表示は劣らない。さらに、倍率を 60 および 100 に変更してみたが、50 のときと同等の結果が得られている。

1920 × 1080 以外の解像度である、1600 × 900、1280 × 720、800 × 600 の 3 種類においても、各倍率における描画能力は、1920 × 1080 の場合と同様である。

表 1 各解像度におけるポリゴン数

	1/10 倍	1 倍	10 倍	40 倍	50 倍	60 倍	100 倍
1920 × 1080	15604	156072	1560719	6242877	7803599	6216389	15607198
1600 × 900	10939	109441	1094308	4377238	5471549	6565857	10943098
1280 × 720	6798	68004	680037	2720159	3400199	4080236	6800398
800 × 600	3659	36616	366169	1464677	1830849	2197020	3661697

一般的に普及している計算機は処理能力が低いいため、操作性を高めるためには、ポリゴンメッシュを削減することで、データ量を極力少なくする必要がある。評価実験の結果から、描画に利用されるピクセル数の 50 倍が、効果的に表示できる最小のポリゴン数である。

## 6. ま と め

本研究では、表示の際、ポリゴン削減によるポリゴンメッシュの粗さが形状に影響を与えることのない、最小限のポリゴン数の定義している。これは、テクスチャマッピングにより、ポリゴンメッシュの粗さを補うことの出来ない複雑な形状を持った物体を、効果的に表示することを目的としている。汎用的な計算機で 3 次元データの利用を対話的速度で行うため、データを最低限に抑え、粗さを目立たせることなくポリゴンメッシュを表示できる。実験では、3 次元形状計測機器によって実際に測定された海流王寺五重小塔のデータを使用し、表示に用いるピクセル数と表示されるモデルのポリゴン数の関係について、4 種類の解像度を用意して評価した。評価実験より、ポリゴン削減によるポリゴンメッシュの粗さが形状に影響を与えることのない、最小限のポリゴン数は小塔の表示に用いるピクセル数を 50 倍したものであることが分かる。

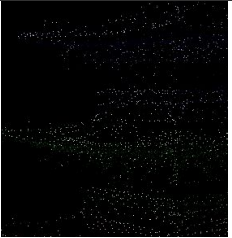
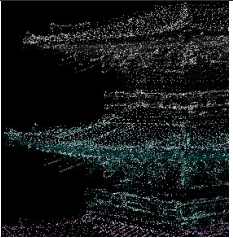
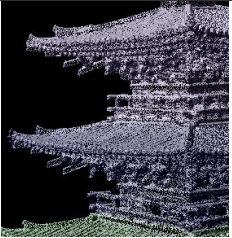
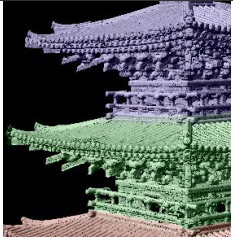
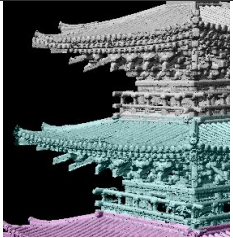
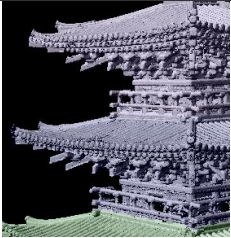
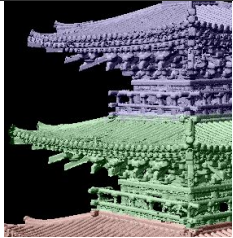
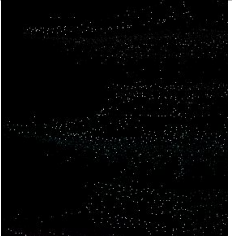
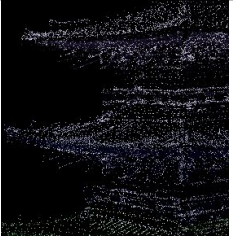
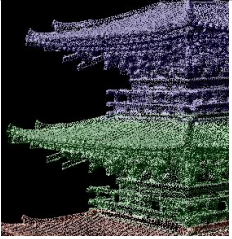
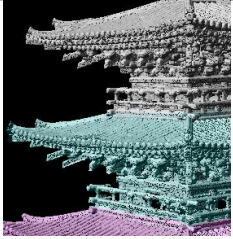
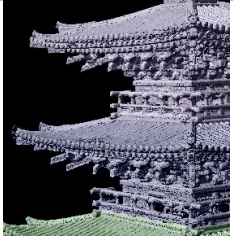
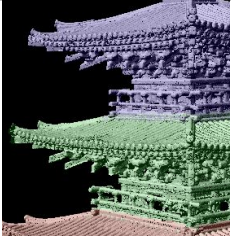
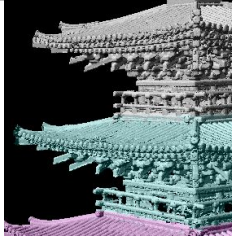
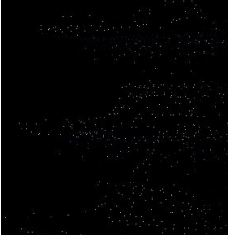
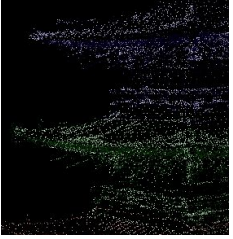
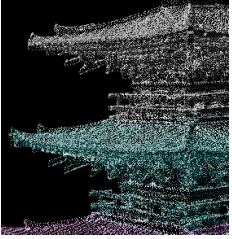
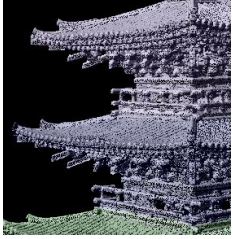
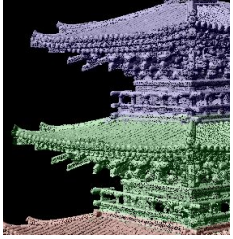
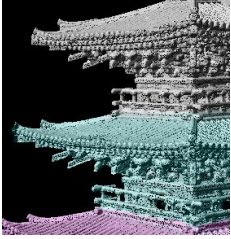
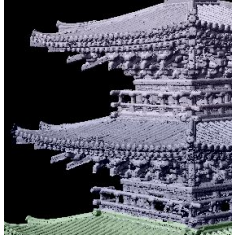
近年、タブレット端末やパソコンの機能をベースとしたスマートフォンの普及が拡大している。そこで、本研究で定義したポリゴン数がスマートフォンでも適応できるか検討する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 田崎 三郎：マルチメディア社会の発展とルール パーチャル・リアリティの世界、TECHNICAL REPORT OF IEICE. FACE 95, pp.33-38 (1996).
- 2) 3D& パーチャルリアリティ展：入手先(<http://www.ivr.jp/>) (参照 2011-06-24).
- 3) Michael Garland, Paul S. Heckbert.: Surface simplification using quadric error metrics, *SIGGRAPH '97 Proceedings*, pp.209-216 (1990).
- 4) KONICA MINOLTA：入手先(<http://www.konicaminolta.jp/>) (参照 2011-11-02).
- 5) KONICA MINOLTA：3D スキャナ (3 次元デジタルライザ), vivid910, 入手先(<http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/3d/vivid910/index.html>) (参照 2011-11-02).
- 6) 上浦 正樹, 田中 修三, 姫野 賢治, 元田 良孝, 石井 一郎：最新測量学 第 2 版, 森北出版株式会社 (2005).
- 7) 吉澤 徹：最新 光三次元計測, 朝倉書店 (2006).



表 2 実験結果

	1/10 倍	1 倍	10 倍	40 倍	50 倍	60 倍	100 倍
1920 × 1080							
1600 × 900							
1280 × 720							
800 × 600	