

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 詳細度を考慮したコンピュータグラフィックスにおける質感の表現  |
| Author(s)    | 堤, 孝広   |
| Citation     |   |
| Issue Date   | 2010-03   |
| Type         | Thesis or Dissertation  |
| Text version | author  |
| URL          | <a href="http://hdl.handle.net/10119/8918">http://hdl.handle.net/10119/8918</a> |
| Rights       |   |
| Description  | Supervisor:宮田一乗, 知識科学研究科, 修士  |

# 第 1 章

## はじめに

本章では，研究の背景と目的，そして本論文の構成について述べる．

### 1.1 研究の背景

コンピュータグラフィックス(以下 CG と記す)における質感表現では，表現する物体とその物体を照射する光とのインタラクション，すなわち，物体に入射した光がどのように反射，吸収，屈折するか，を求める必要がある．古典的な質感表現法としては，素材となる写真などの画像データを 3D ポリゴンモデルの表面に張り付けるテクスチャマッピングや，素材の表面の光の反射・拡散・屈折率などの光学的な属性を調整することで行われている．また，光源の入射角と表面の傾きの情報を元に表面に発生する陰影を擬似的に計算するバンプマッピング[1]や，物体表面の凹凸を与えられた画像データなどに基づいて変位させるディスプレイメントマッピング[13]，また，物体への映り込みを画像マッピングで擬似的に表現するリフレクションマッピング[14]，透過した光の屈折を画像マッピングで近似して表現するリフラクションマッピング[15]など，さまざまなマッピング手法が提案されている．さらに，プロシージャル手法で質感データを自動生成し，物体の素材感を表現する手法も多数報告されている[16, 17, 18, 19]．

一方，グラフィックスカードの性能の向上に伴い，リアルタイムでも非常に高品質な映像の生成が可能となっており，リアリティを迫及した映像を生成するために，BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) や

BTF(Bidirectional Texture Function)などを利用して、さらなる豊かな質感表現を試みた手法なども提案されている[2, 11]。また、リアルタイムレイトレーシングの研究開発[3]も盛んになってきており、従来までは複数のレンダリングサーバで分散処理を行い、長時間かけて映像の生成を行っていたものが、リアルタイムでも非常に高品質な映像を得ることが可能となってきている。

グラフィックスカードのメモリの容量も増加の傾向にあるとはいえ、現状では一般的なオンボードメモリの容量は 256MB(NVIDIA 製 GeForce8600GTS 等)～1024MB(NVIDIA 製 GeForceGTX 285 等)となっている。そのため高品質なテクスチャデータやボリュームの大きな BRDF をすべて実装するためには制約のある状態となっている。また、特に対策がなされていない限りレンダリングの構成要素として利用される質感情報はすべて参照される。すなわち、人間が映像を見るときに認識できないところまでも忠実に計算して表現する場合があるため、その部分に対する計算の無駄があると考ええる。このことは、質感表現を行う際に人間の視覚特性とは関係なくすべての要素を均一の粒度で表現していることに問題があると考ええる。

## 1.2 研究の目的

高精細なテクスチャの圧縮や BRDF データの利用など、質感表現の高品質化に関する研究が行われている [6, 20, 21, 22, 23]. 一方で、人間が映像を見たときに受ける印象とは関係なく、細部にまでおよぶ膨大なデータを用いて忠実に計算するため処理の効率が良いとは考えられず、ここに問題点があると考えられる。

人間が目を通して映像を見る際には、そこにある物体のすべてを知覚しているわけではなく、目の分解能力に合わせて物体を見ている。例えば、視認できる線の最小の大きさは、視角で  $0.5^\circ$  までであるとされている [24]. 視角で  $0.5^\circ$  より小さくなるような位置に髪の毛が落ちていたとしても、人間はそこに髪の毛が落ちていることに気が付くことはできない。

一方、CG での物体の表現では、シーン内に存在するすべての物体を忠実に計算して表現している。すなわち、人間が視覚的に認知できない位置の物体も忠実に表現するための計算を行っている。

以上のことから、人間の視覚特性に応じた精度での質感表現を行うことが適切であると考えられる。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は次のようである。

第 2 章では、本論文に関連する研究として、質感表現に関する研究について述べる。

第 3 章では、視覚分析のために行った予備実験について述べる。その後、手法による質感の認識を調べるために行った実験の評価システム、評価実験、実験結果について述べる。

第 4 章では第 3 章の評価実験を踏まえた手法の切り替え方法とその結果について述べる。

第 5 章では本研究の考察と今後の課題を述べる。

# 第 2 章

## 関連研究

本章では、本論文に関連する研究として、CGにおける詳細度を考慮した研究や質感表現に関する研究、また視覚特性に関する研究について述べ、最後に本研究の位置付けを示す。

### 2.1 詳細度を考慮した研究

表示するポリゴンが視点からある程度離れている場合には、ラスタライズ（ポリゴンのような幾何形状を画像に変換する処理）した結果、1ピクセル以下の大きさになる場合がある。したがって、大量のポリゴンメッシュをすべてディスプレイに表示するのは、特にグラフィクスカードの性能が低い場合にはフレームレートを著しく下げるために非効率である。また、インタラクティブにそれらのモデルを編集することを想定した場合、粒度の細かいデータをそのまま編集することは取り扱いが困難である場合がある。これらの問題点を解消するために、ポリゴンメッシュモデルの詳細度を変化させることで、表示に関わる処理の高速化を行う研究がなされている。

詳細度を制御する手法としては、比較的平坦な部分を優先してポリゴンを削減する手法[4, 25]や、視点からの距離を評価尺度としてデータ削減を行う手法などが提案されている [12]。

一方、Sung-Eui らは、大規模なモデルのポリゴン数を減らすことでレイトレーシングによる画像生成の高速化を行う手法を提案した[3]。この手法では、ポリゴンメッシュを一定の大きさのノードに分割し、一つのノードに含まれる複数のポリゴンをひとつのポリゴンに置き換えることでポリゴン数を減少させ、20-1000%の高速化を行っている。

## 2.2 質感表現に関する研究

物体表面の反射率を定義する関数に BRDF がある[2]. BRDF とは物体表面の一点において, 入射光に対する反射光の比率を表したものである. BRDF の求め方も研究されており, マイクロジオメトリから BRDF を求め, 物体表面の質感表現を行う研究がある[5].

物体表面の凹凸の状態をポリゴンメッシュを複雑にすることなく, 高繊細に表現する手法として, バンプマッピングがある[1]. この手法では光源の入射角と表面の傾きの情報を元にして, 表面に発生する陰影を擬似的に計算している. この手法による凹凸画像を図 2.1 に示す.

もう一つの物体表面の凹凸を表現する手法としてディスプレイメントマッピングがある. この手法では, 高さの情報を元に, ポリゴンの各頂点を高さにあわせて変位させることで凹凸を表現している. この手法による凹凸画像を図 2.2 に示す.

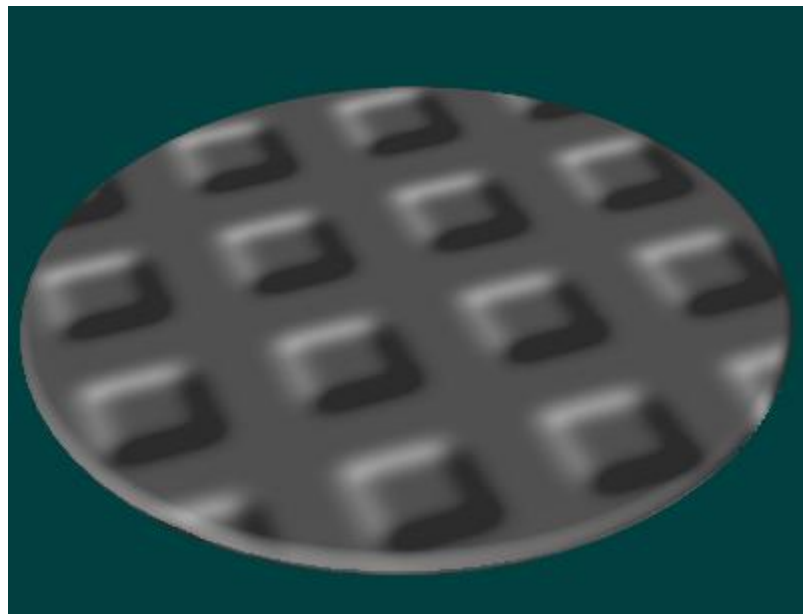


図 2.1 バンプマッピングを用いた凹凸の表現画像

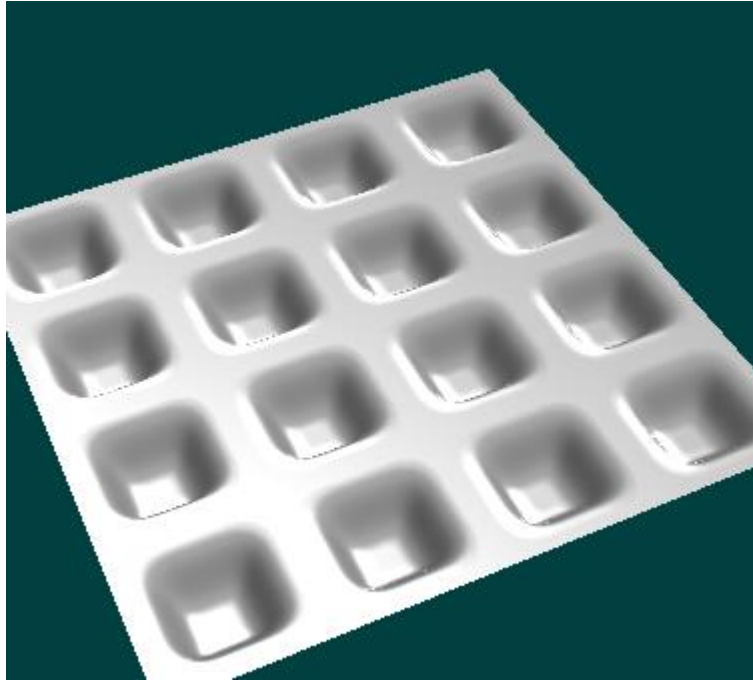


図 2.2 ディスプレイメントマッピングを用いた凹凸の表現画像

Becker らは、ディスプレイメントマッピング，バンプマッピング，BRDF の 3 つの質感表現の手法を滑らかに切り替える手法を提案した[6]．この手法では視点から表面までの距離と視線と表面の角度，凹凸の周期に応じて質感表現の手法を切り替えている．この手法では，切り替えるための閾値 $T$  を式(2.1)として定義している．

$$(2.1)$$

ここで $d$  は視点から表面までの距離， $D$  は凹凸の周期， $\theta_v$  は視線と表面の角度， $\epsilon$  は切り替えに冗長を与える幅である．式(2.1)では距離が近いほど閾値 $T$  が大きくなる．また，角度が $90^\circ$  に近いほど閾値 $T$  の絶対値が大きくなる．閾値 $T$  を条件に使用する質感表現の手法を選択し，閾値 $T$  の値が大きいほど詳細な手法であるディスプレイメントマッピング，小さいほど簡略な手法である BRDF を用いている．この手法では，閾値 $T$  が 3 より大きいならばディスプレイメントマッピング，-3 より小さいならば BRDF，それ以外ならばバンプマッピングとしている．変数とそれによる閾値 $T$  の移り変わりを図示したものを図 2.3 に示す．

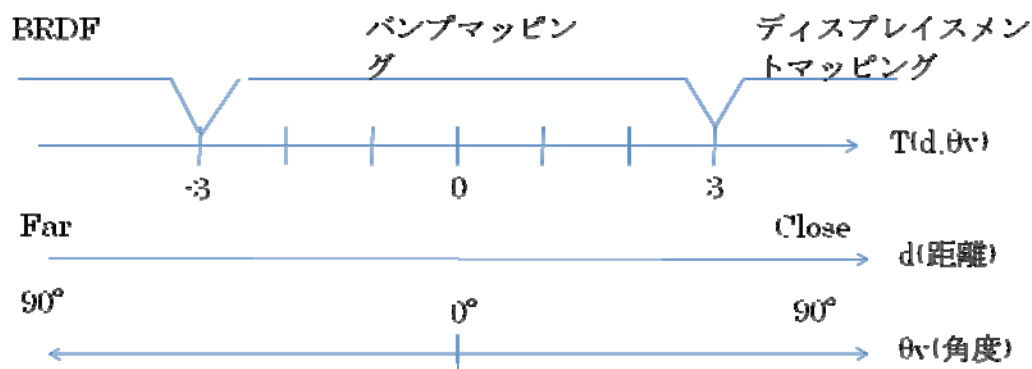
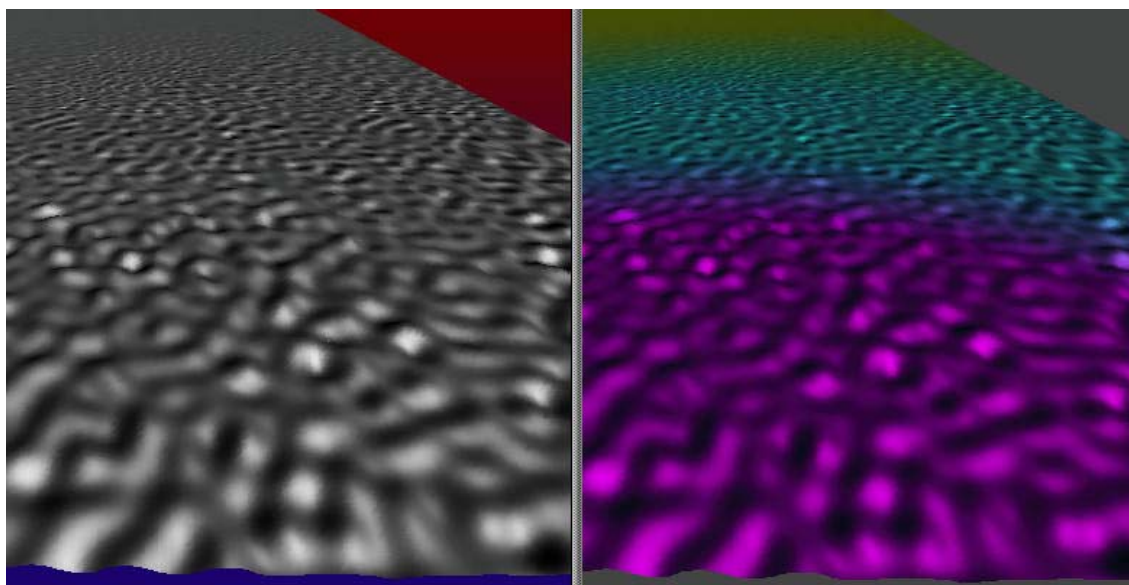


図 2.3 閾値の移り変わり

手法の切り替えの結果の画像を図 2.4 に示す。手前からディスプレイメントマッピング(紫)、バンプマッピング(水色)、BRDF (黄色)と手法が切り替わっている。この手法の問題点として、手法の切り替わりの部分で陰影をつける手法が異なるため、手法間の陰影に差異が生じてしまう場合があるということが挙げられる。



(a)結果画像

(b)各手法に色をつけたもの

図 2.4 手法の切り替えの結果

Olano らは、質感データの簡素化と、詳細度に応じてテクスチャデータへのアクセスの回数を減らす手法を提案した[7]。この手法では、複数のテクスチャ



データを合成することでテクスチャデータの簡素化を行う。また、視点から物体までの距離、大きさ、重要度に応じてテクスチャへのアクセスの回数を制御している。アクセスの回数制御のための一例を図 2.5 に示す。ここでは二つのテクスチャ（青枠：ゴミのテクスチャ、赤枠：ひっかき傷のテクスチャ）を別々にマッピングするのではなく、合成してひとつのテクスチャ（緑：斜めにひっかき傷をつけている）にすることでアクセスの回数を減らしている。なお、この緑枠の画像を一番右の画像のように木目テクスチャにマッピングすることで最終的な質感データを表現している。

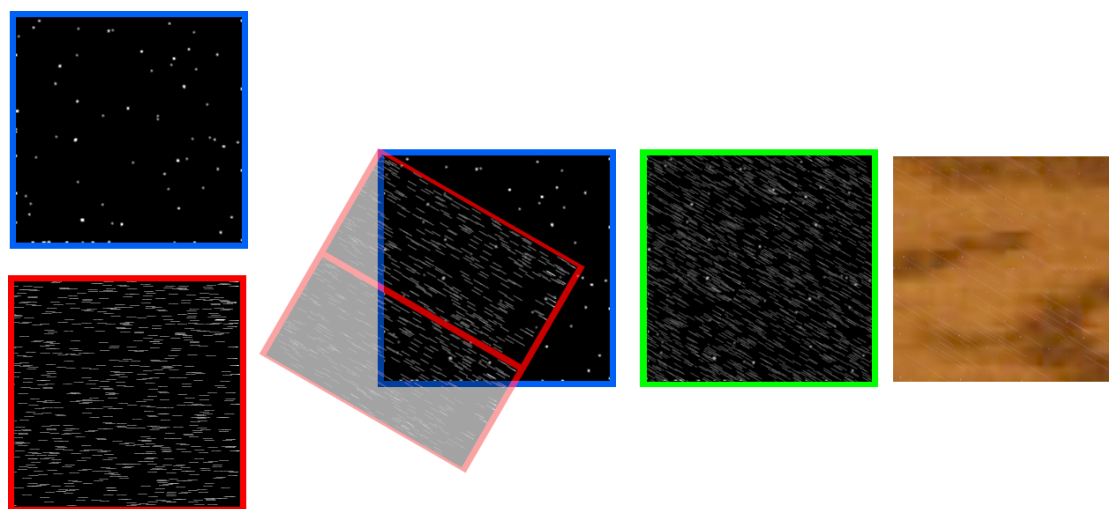


図 2.5 テクスチャの合成

結果画像を図 2.6 に示す。右の画像に向かっていくにつれて簡略化された描画がされている。テクスチャへのアクセスの回数は、左から順に 45 回、23 回、9 回、0 回となっている。実行速度は、左の画像を描画する時間を基準の 1.0 とし、左から順に 1.0 倍、1.8 倍、1.9 倍、2.3 倍となっている。

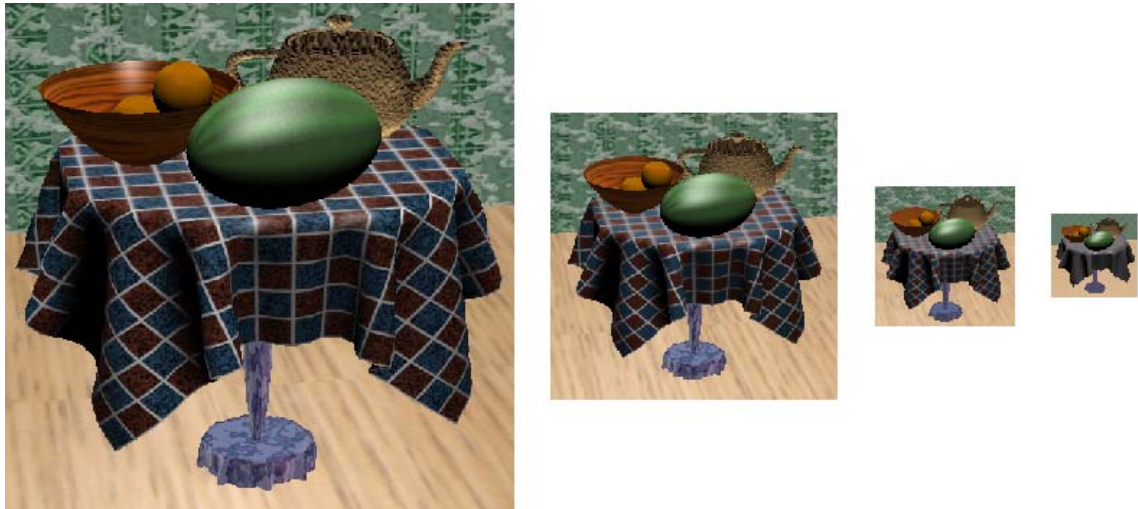
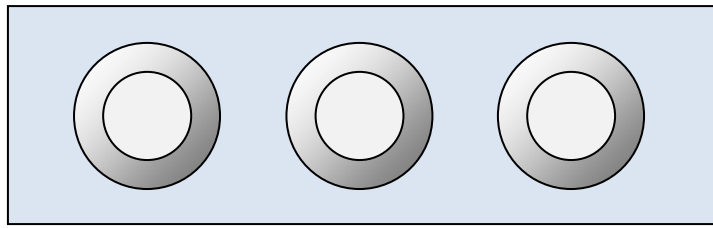
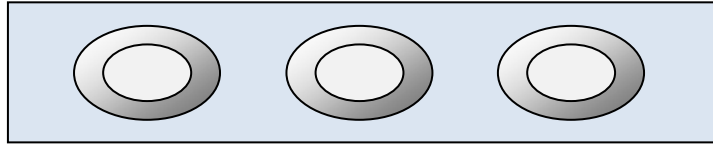


図 2.6 結果画像

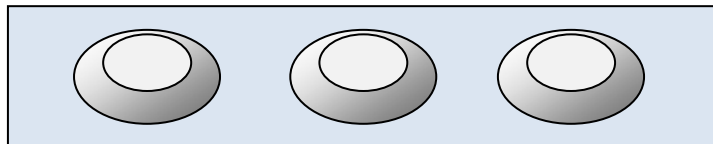
Tatarchuk は、視差と遮蔽を考慮した凹凸の質感表現と、それをバンプマッピングとなめらかに切り替える手法 (Parallax Occlusion Mapping, 以下 POM) を提案した[8]. この手法では、凹凸情報を元に視線と表面の交差する点のずれを考慮している. それにより手前に凸部分があると奥のへこんだ部分は隠れることになり、遮蔽の表現が可能となっている. すなわち、図 2.7 に示すように、視差を考慮しないバンプマッピング(図 2.7(b))に対し、視差を考慮してマッピングのズレを表現する(図 2.7(c))ことで、より自然な凹凸付けを可能にした. 交差する点のずれを求めるためのマッピングの概略図を図 2.8 に示す. バンプマッピングでは視線とポリゴンモデルの交点(図中の P)を計算して凹凸表現をしていたが、この手法では視線と凹凸情報から視差のズレを計算し、そのズレを考慮した表面との交点(図中の P')を求めている. このズレを表現することで、より自然で立体感のある凹凸表現を可能にした.



(a) でっぱりを表した板



(b) (a)を斜めから見た場合



(c) (b)に対し、視差を考慮した場合

図 2.7 視差を考慮した凹凸のマッピング

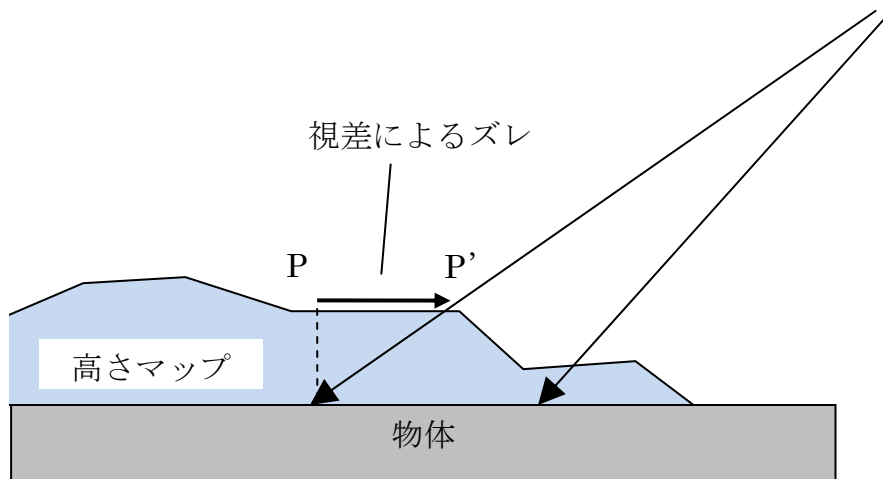


図 2.8 視差マッピング

このアルゴリズムにより，図 2.9 のような画像が得られる．



図 2.9 Parallax Occlusion Mapping による画像

この手法では詳細度に応じて，適応する手法を POM とバンプマッピングと切り替えることで計算効率の向上を試みた．詳細度切り替えの結果を図 2.10 に示す．図 2.10(b)の青色の部分は視差遮蔽を考慮していない部分となっている．



(a)結果画像(石畳の部分)

(b)バンプマップ部分に色をつけたもの

図 2.10 結果画像

## 2.3 視覚特性について

どのような視覚刺激であっても，さまざまな空間周波数正弦波成分の合成関数として記述することができる．空間周波数とは視野の一定の範囲内のコントラストの周期の数をいう．この空間周波数を用いることで，視覚の識別能力の量的な記述ができ，複雑な視覚刺激に対する応答特性がわかるはずである．そのような目的で空間周波数に対する視覚系の応答特性を求めている[9]．

視覚によるコントラスト感度に関するものとしては，図 11 に示されるような空間正弦波パターンのコントラストを変化させ，縞を知覚することができる最小のコントラスト閾を求めるものがある．縞の空間周波数が  $3\text{-}5[\text{c}/\text{deg}]$  (視野  $1^\circ$  に含まれる周期の数．単位は  $\text{cycles}/\text{degree}$ ) のときにコントラスト閾値は最小となり，空間周波数がそれより高くても低くても閾値は上昇する傾向があるとされている[10]．これまでの研究によれば，視覚系は特定の周波数で感度が最大となるような帯域通過器の性質があるということがわかっている[10]．

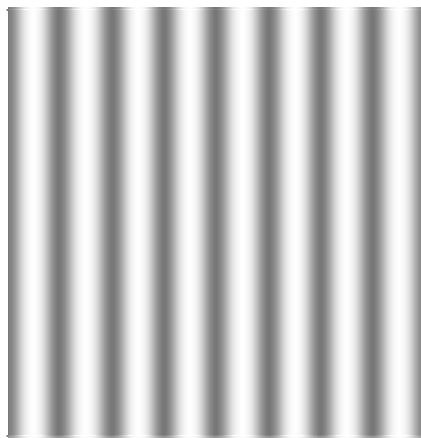


図 2.11 空間正弦波

## 2.4 本研究の位置づけ

本研究では，リアルタイムでの物体表面の凹凸付け手法として用いられている POM とバンプマッピング，ならびに模様付けとしてのテクスチャマッピング

手法の 3 手法を，表現する物体の詳細度に応じて切り替えて適用することを試みる．すなわち，テクスチャマッピング，バンプマッピング，**POM** の順に計算コストが増す各手法を適宜適用することで，効率的な質感表現を試みる．この際に，従来手法では試みられていなかった，2.3 で述べた人間の視覚特性を考慮することとする．

# 第 3 章

## 評価実験

本章では、まず視覚分析のために行った予備実験の評価システム、評価実験について述べる。そして手法による質感の認識の違いを調べるために行った実験の評価システム、評価実験、実験結果について述べる。

### 3.1.1 予備実験

質感表現に詳細度の概念を取り入れるため、前提となる質感表現に関する視覚特性の分析を予備実験として行った。被験者に空間周波数の異なる映像を見せ、視覚系の変化を調べた研究では縞の空間周波数が  $3\text{--}5[\text{c}/\text{deg}]$  のときにコントラスト閾値 (縞を知覚することができる最小のコントラスト) は最小となり、空間周波数がそれより高くても低くても閾値は上昇する特性が見られていた [10]。

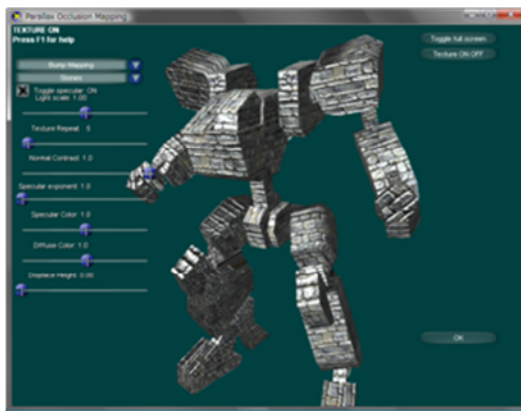
本研究では、CG で制作された画像における質感表現の効率化を目指しており、特に表面の凹凸付けに注目している。凹凸付けに注目した理由は、凹凸が物体の見た目の印象を大きく左右するための視覚的なトリガーであるからである。CG で作成された画像について、視点とモデルの距離を変えて表現した画像を図 3. 1 に示す。



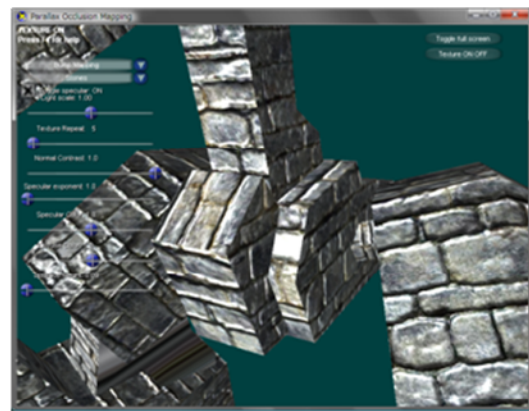
遠距離



中距離



近距離



クローズアップ

図 3.7 CG における質感の違い

この図から、CG 画像においても認識の対象が遠距離に行くほど物体の表面の凹凸感は知覚出来なくなり、さらに遠くなると物体表面の模様に対しては認識しづらくなり、ほとんど単色の表面として認識されることがわかる。

### 3.1.2 視覚分析の評価システム

評価システムは Windows におけるリアルタイムグラフィックス API である DirectX9.0 を用いて実装した。グラフィックスボードには NVIDIA 製 GeForce9600MGT を用いた。質感の表現手法として、テクスチャマッピング、バンプマッピング、ディスプレイメントマッピングの3つの手法を切り替えて評価をするようにした。なお、被験者は図 3.2 に示すように椅子に座り、ディスプレイの中心から 60cm 離れた位置から評価を行う。図 3.3 に評価システムの



スクリーンショットを示す。ディスプレイには解像度 1680×1050 の 20 インチワイドディスプレイを用いた。また、周囲の環境からの光によってもたらされる表示結果への色味の変化などの影響を避けるために、ディスプレイにはフードを被せてある。

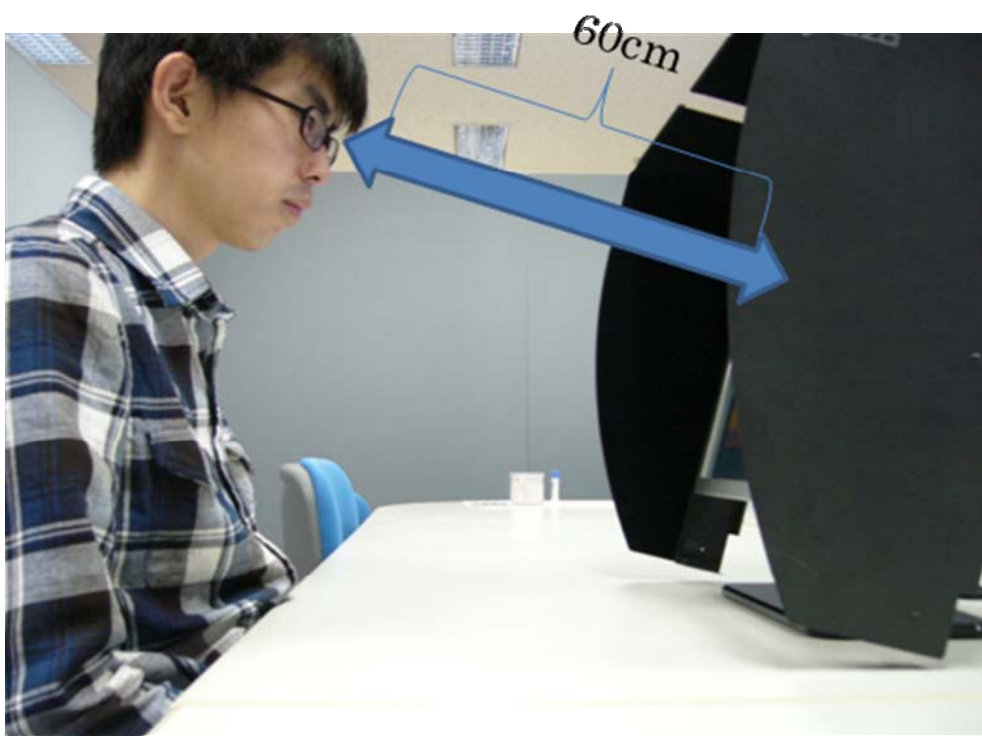


図 3.8 提示方法



図 3.9 評価システムのスクリーンショット

### 3.1.3 予備評価実験 1

空間周波数の変化による、凹凸感の感じ方の変化を調べるための主観評価実験を行った。凹凸感を提示する表現手法による違いも調べるため、表現手法ごとに評価を行った。

実験条件

- 被験者 : 20代 10名
- 実験環境 : 図 3.2 のようにディスプレイから 60cm 離れた位置に座ってもらい評価してもらう。
- 刺激パターン : 空間周波数を次に示す表 3.1 のとおり 10 通りに変化させるようにしたアプリケーションを用いて、縞状のグラフィクスパターンを提示する。
- 表現手法 :
  1. テクスチャマッピング : モデルの表面に空間正弦波パターンの画像を提示する。
  2. バンプマッピング : 空間正弦波パターンの高さの情報をもとに、モデル

の表面に擬似的に影をつける。

3. ディスプレイスメント：空間正弦波パターンの高さの情報をもとに，モデルの表面の高さを変更する。

|                  |      |      |      |      |      |
|------------------|------|------|------|------|------|
| 空間周波数<br>[c/deg] | 0.5  | 1    | 2    | 4    | 8    |
| 縞の単位長さ<br>[mm]   | 10   | 5    | 2.5  | 1.25 | 0.63 |
| 空間周波数<br>[c/deg] | 16   | 32   | 64   | 128  | 256  |
| 縞の単位長さ<br>[mm]   | 0.31 | 0.16 | 0.08 | 0.04 | 0.02 |

表 3.1 空間周波数に対応する縞の単位長さ

### 3.1.4 予備評価実験結果 1

各手法について，物体表面の凹凸を知覚できる空間周波数の上限値を評価した結果を図 3.4 に示す．空間周波数がディスプレイスマッピングでは 54.9[c/deg]，バンプマッピングでは 10.1[c/deg]，テクスチャマッピングでは 1.19[c/deg]の範囲まで凹凸感を感じていたことを確認した。

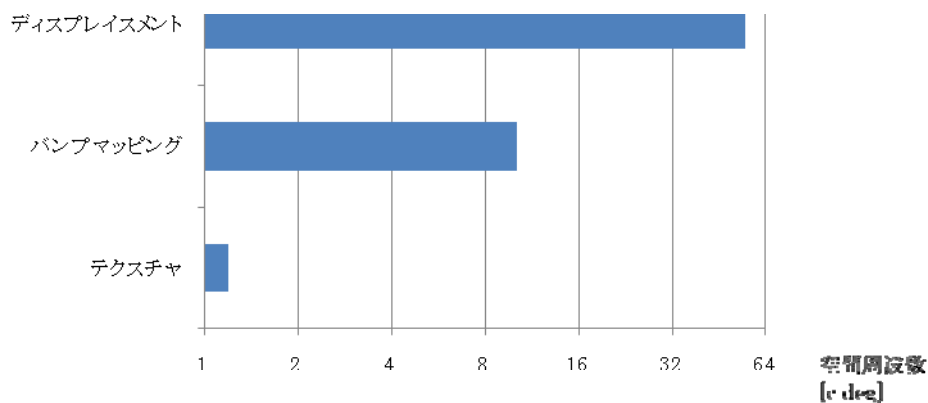


図 3.10 凹凸を感じる空間周波数

### 3.1.5 予備評価実験 2

空間周波数の変化と凹凸量の変化によって、縞の知覚にどのような影響があるのかを調べるための主観評価実験を行った。また質感を提示する環境を異なるものにしたとき、縞の知覚にどのような影響があるのかを、以下に示す3つの条件下において比較を行った。

1. 表面に当たる光の強さを半分にする
2. 表面の反射率を半分にする
3. 縞状の周期と格子状の周期

なお、実験の条件は以下のとおりである。

- 被験者、実験環境は予備評価実験1と同様である。
- 刺激パターン：従来のバンプマッピングで得られる凹凸の高さを1、凹凸のない状態を0とし、100段階で調節できるようにしたアプリケーションを用いて縞模様を提示する。空間周波数を表3.1のとおり10通りそれぞれで、どの程度の凹凸量で縞を知覚できるか評価してもらう。

### 3.1.6 予備評価実験結果2

3つの条件それぞれについて結果を述べる。

#### 1. 光の強さが違う場合の縞の認知

各空間周波数について、縞を知覚するのに必要な凹凸量の結果を図3.5に示す。光の強さを半分にすることで、縞の知覚に必要な凹凸の量が $256[\text{c/deg}]$ を除いて全体的に10%増加した。光が弱いときは $2[\text{c/deg}]$ において最小値、強いときは $1[\text{c/deg}]$ において最小値となった。

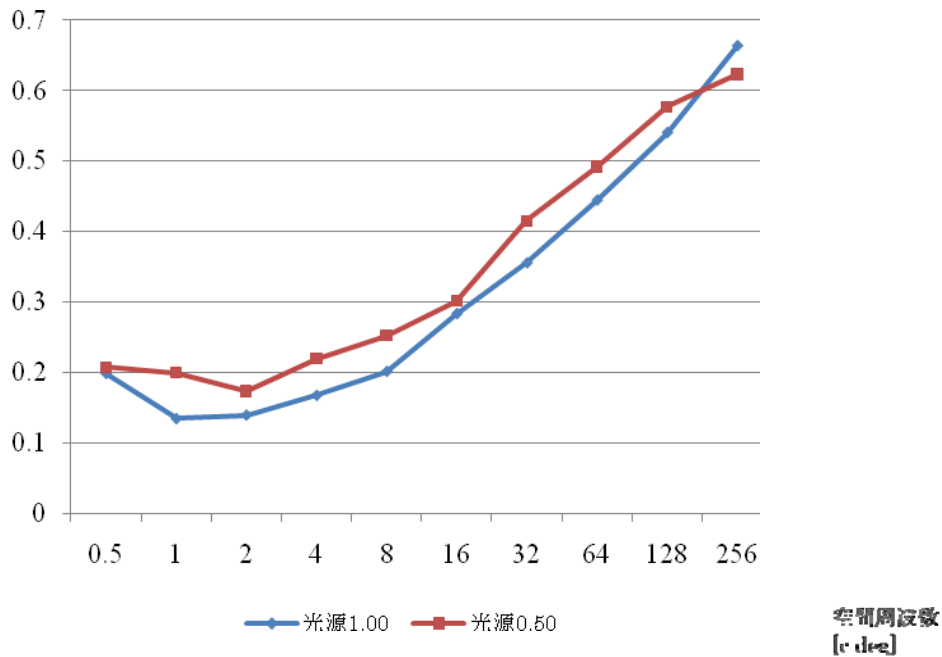


図 3.11 光の強さと縞の知覚

2. 反射率が違う場合の縞の認知

図 3.6 に示すように、8[c/deg]から 64[c/deg]の範囲において、反射率の低いほうが縞を認知可能な凹凸量を 5%多く必要とした。

**凹凸量**

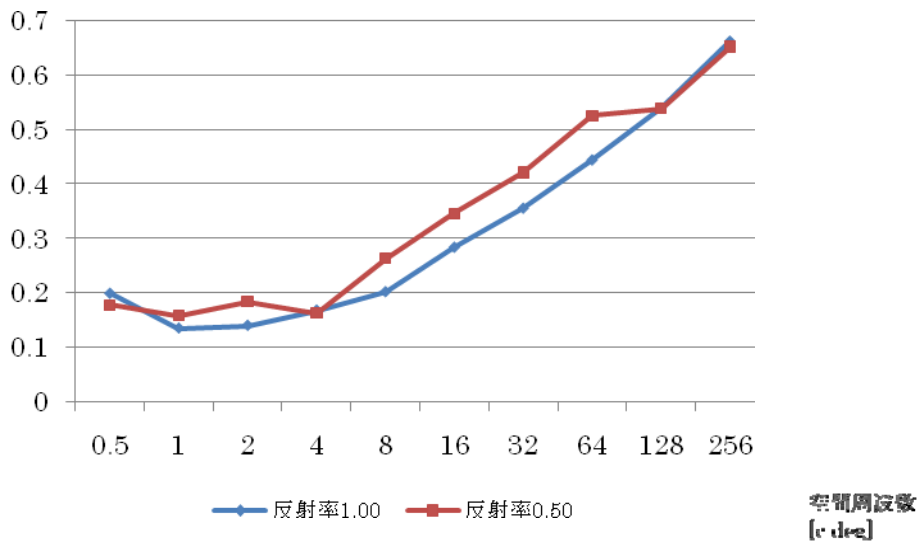


図 3.12 反射率と縞の知覚

### 3. 縞模様と格子模様との認知の違い

図 3.7 に示すように、 $0.5 [c/deg]$ では格子状のほうが認知に必要な凹凸量が小さかったが、それ以外の範囲では逆に凹凸量が多く必要である結果となった。 $8, 16 [c/deg]$ では模様の認知に必要な凹凸の量は縞状よりも格子状の場合に 30% 増加した。

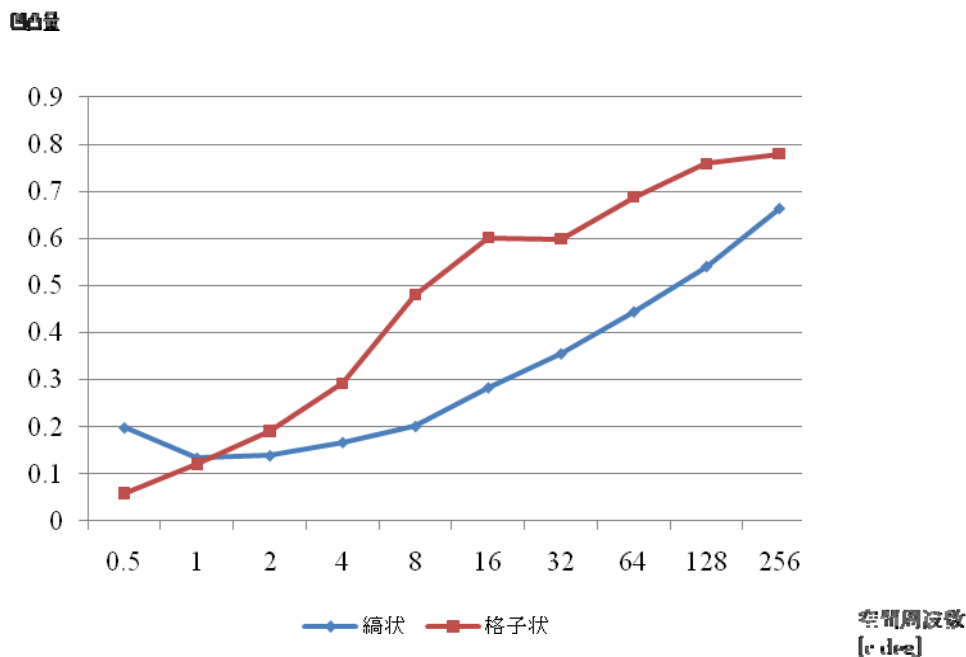


図 3.13 縞状と格子状での模様の知覚

## 3.1.7 予備実験考察

CG における画像の提示においても凹凸を感じるか感じないかの要素に空間周波数の変化が関与している。このこと自体は、関連研究[10]で導き出されていた 2次元パターンに対する知覚実験からある程度の予想がつくものであったが、それを再確認する実験結果となった。

また、縞の認知では空間周波数を変化させていくと、認知できる凹凸の量にピークがあらわれている。すなわち、表面形状の凹凸割合が視覚特性のコントラスト感度に相当しているのではないかと推測できる。このことから質感表現に付与される凹凸の割合によっても、視覚特性は変化すると考える。

## 3.2.1 評価実験

CG 画像の質感表現の手法を途中で切り替えた際、切り替えなかった CG 画像との違いが認識されるのは、どのような条件であるかを調べるための評価実験を行った。

## 3.2.2 評価システム

評価実験に用いる評価システムは Windows におけるリアルタイムグラフィックス API である DirectX9.0 を用いて実装した。グラフィックボードには NVIDIA 製 GeForce9600MGT を用いた。質感の表現方法として詳細度の低い手法から順に、テクスチャマッピング、バンプマッピング、パララックスオクルージョンマッピングの 3つの手法を切り替えて評価するようにした。この 3つの各手法は、ディスプレイメントマッピングのようにポリゴンの頂点を変位させることができなく、切り替わりが滑らかになるため使用した。図 3.8 に評価システムの画面を示す。

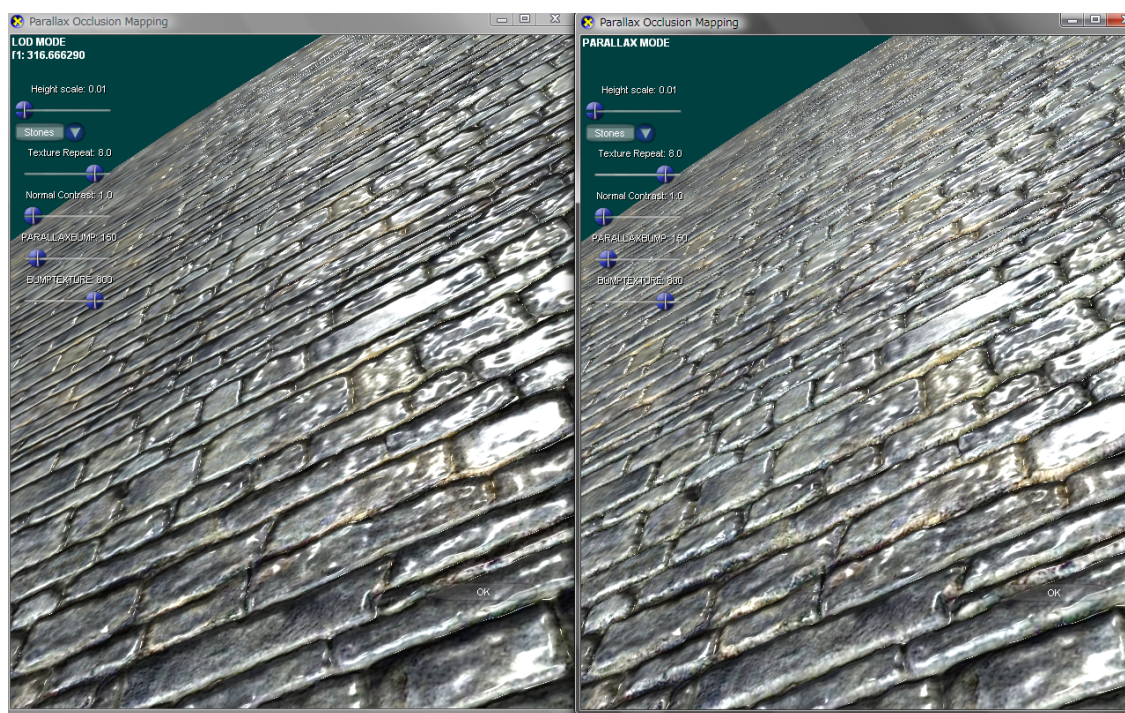


図 3.14 評価システムスクリーンショット

なお評価は図 3.9 に示すように、被験者には椅子に座ってもらいディスプレイから 60cm 離れた位置から行ってもらった。ディスプレイには解像度 1680×1050 の 20 インチワイドディスプレイを用いた。周囲の環境からの光によってもたらされる表示結果への色味の変化などの影響を避けるために、ディスプレイにはフードを被せてある。

今回使用した 3 つの質感表現手法について説明する。

1. テクスチャマッピング

モデルに画像を貼り付けることで質感を提示する。

2. バンプマッピング

高さ情報を元にして、モデルの表面に擬似的に影をつけることで質感を提示する。

3. パララックスオクルージョンマッピング

高さ情報を元にして、視差によって生じる遮蔽を考慮することで質感を提示する。

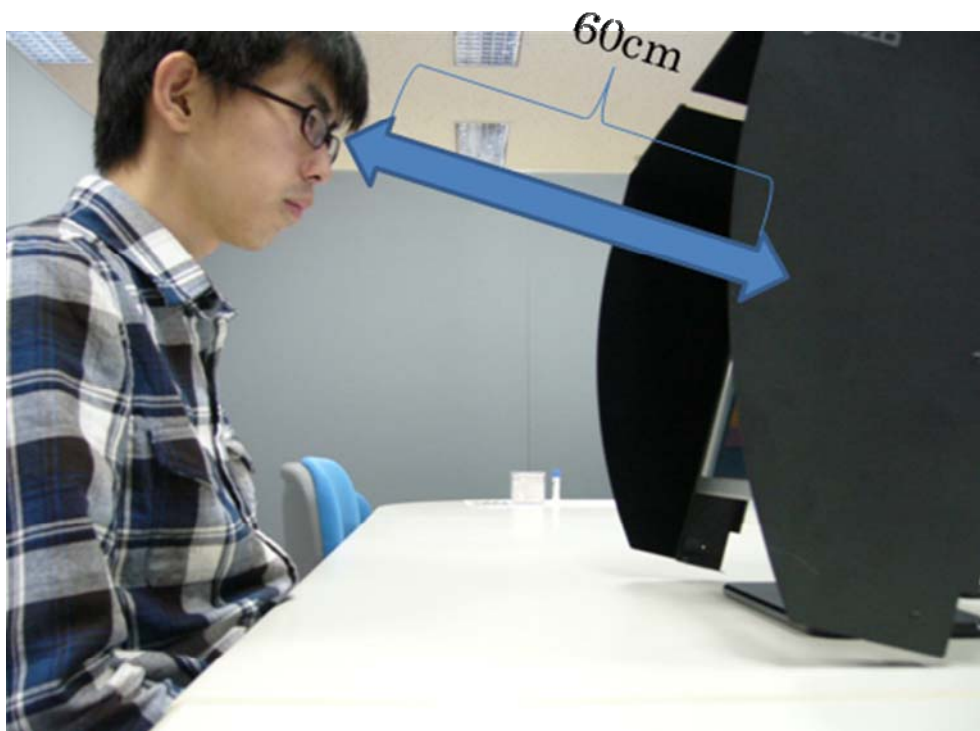


図 3.15 提示方法



### 3.2.3 評価実験手法

パララックスオクルージョンマッピングとバンプマッピング，バンプマッピングとテクスチャマッピングの異なる手法でも同じように認識する閾値の変化を調べるための主観評価実験を行った．凹凸量の与える変化と模様の詳細度の与える変化を調べるため，手法の切り替わりを各条件について評価してもらった．

実験の条件

- 被験者：20代7名
- 図3.9のようにディスプレイから60cm離れた位置から評価してもらう．
- ハイトマップの高さ情報で得られる凹凸の高さを1，凹凸のない状態を0とし，凹凸の高さを0から1まで等間隔に5等分し，それらを凹凸量0, 1, 2, 3, 4, 5とした．模様の細かさは，テクスチャの繰り返しの周期を2, 4, 6, 8, 10回の5段階に調節できるようにしたアプリケーションを用いて画像を提示する．手法の切り替わり場所を決定する値 $S$ を次のように定義した．

(3.1)

$V$  は視点から表面までの距離， $R$  はテクスチャ周期， $D$  は凹凸量である．

ここで， $V$ ， $R$ ， $D$  の値は，最小値から最大値をそれぞれ0から1000の範囲に収まるよう正規化した無単位量として取り扱う．

- 各段階の画像それぞれについて，閾値を切り替えていき，被験者は二つの画像が同じ画像に見えるか否かを評価する．

### 3.2.4 実験結果

実験では，質感表現の各手法を切り替えた画像と，パララックスオクルージョンマッピング手法で固定して表現した画像との違いが認識できない閾値を，被験者の主観評価で求める．模様の周期と凹凸量を変化させた各画像について，評価した閾値の結果を表3.2に示す．表3.2の各閾値は全被験者の評価した値の平均値を示す．

| 周期<br>凹凸量 | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | 129.3 | 197.1 | 260.3 | 326.6 | 391.8 |
| 2         | 133.9 | 199.7 | 261.1 | 329.0 | 393.6 |
| 3         | 133.9 | 200.3 | 265.3 | 329.7 | 393.3 |
| 4         | 134.1 | 199.9 | 266.4 | 331.6 | 396.0 |
| 5         | 134.3 | 200.0 | 265.3 | 331.6 | 395.9 |

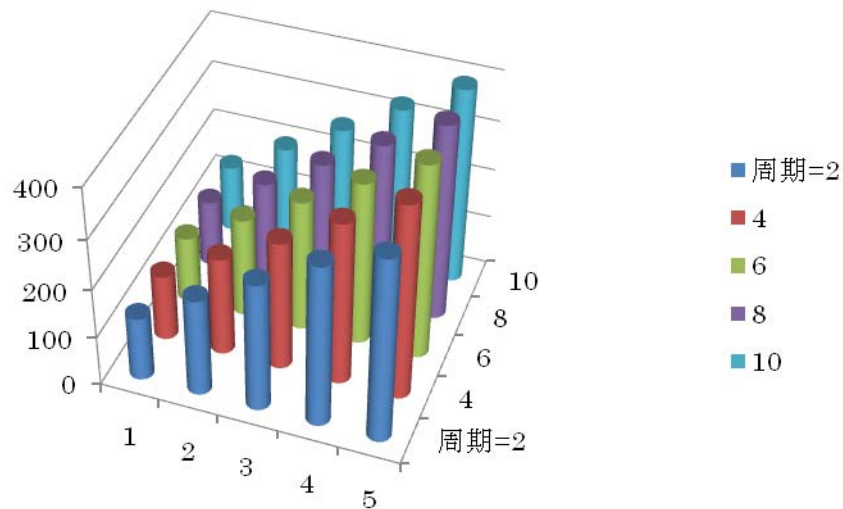


表 3.2 実験結果

凹凸量の変化による閾値の違いを調べるため、周期ごとの結果を以下に示す。

1. 周期 2 回

図 3.10 に周期 2 回での、閾値の移り変わりを示す。凹凸量が 1 のときに 129 と閾値が低かったが、2 以上の凹凸量の場合では閾値が 134 と大きくなった。図 3.11 に切り替わりの場所を図示した画像を示す。

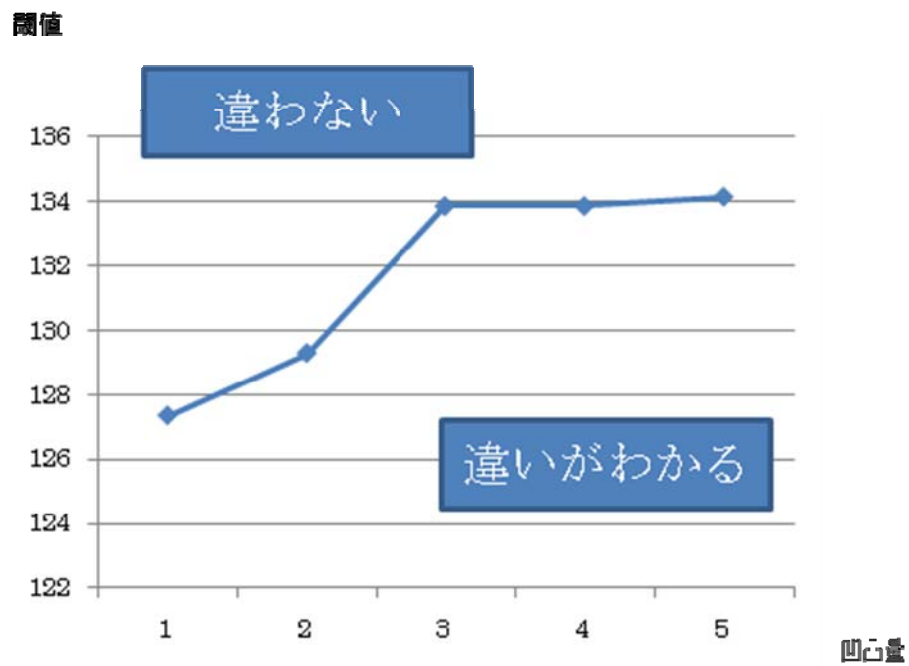


図 3.16 周期 2 回の閾値の結果



図 3.17 閾値 129 での結果画像

## 2. 周期 4 回

結果を図 3.12 に示す。凹凸量 1 のときに閾値 197 と小さく、凹凸量 2 以上ではおおよそ 200 と一定である。

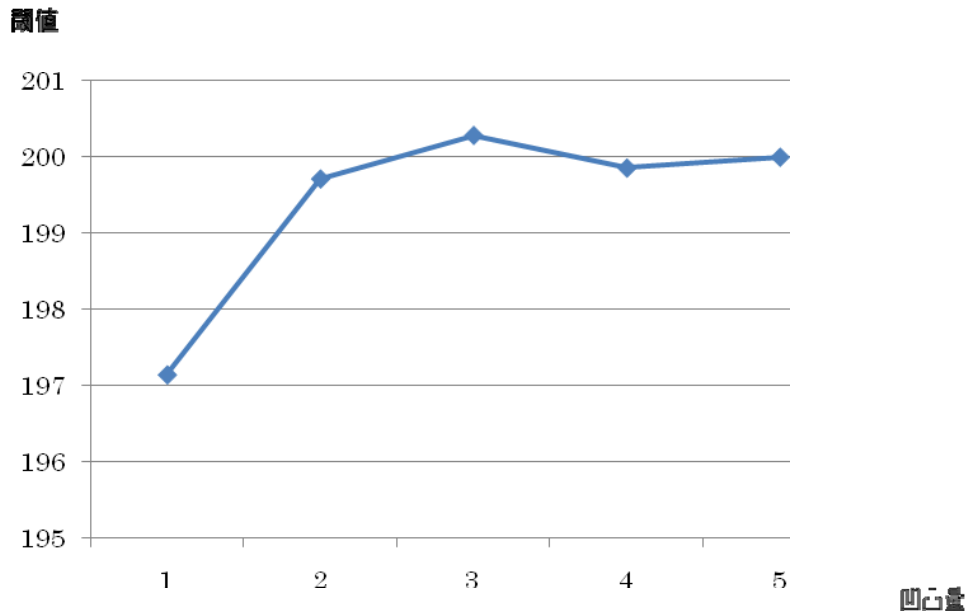


図 3.18 周期 4 回の閾値の結果

## 3. 周期 6 回

結果を図 3.13 に示す。凹凸量が 1 のとき 260, 凹凸量が 2 のとき 261 と小さく、凹凸量 3 以上のときに 265, 266, 265 と大きくなった。

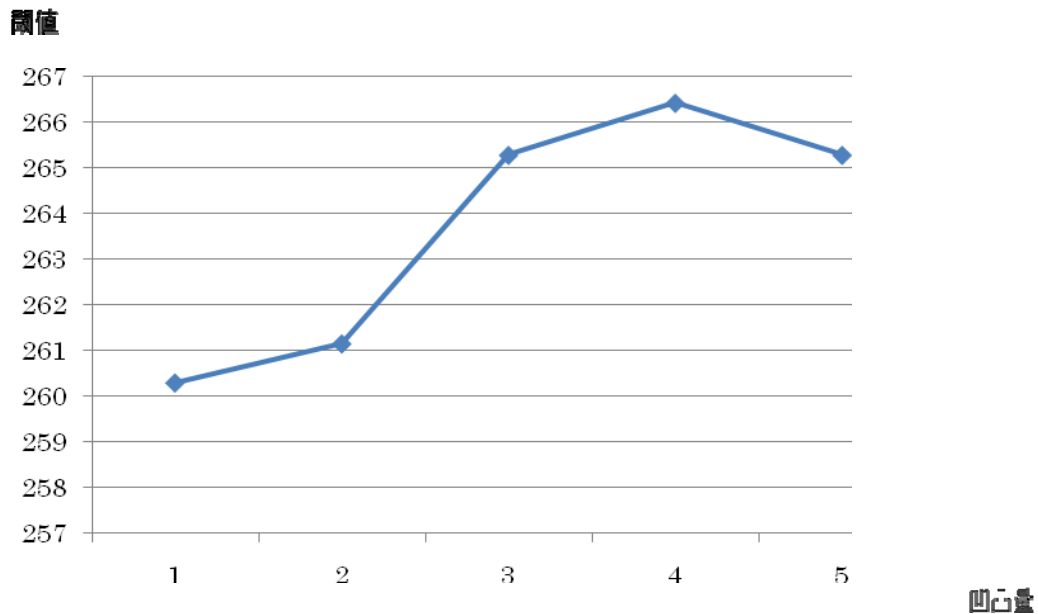


図 3.19 周期 6 での閾値の結果

#### 4. 周期 8 回

結果を図 3.14 に示す. 凹凸量 1 のときに 326 となり, 凹凸量 2 のとき 329, 凹凸量 3 のとき 330, 凹凸量 4 と 5 のとき 331 となった.

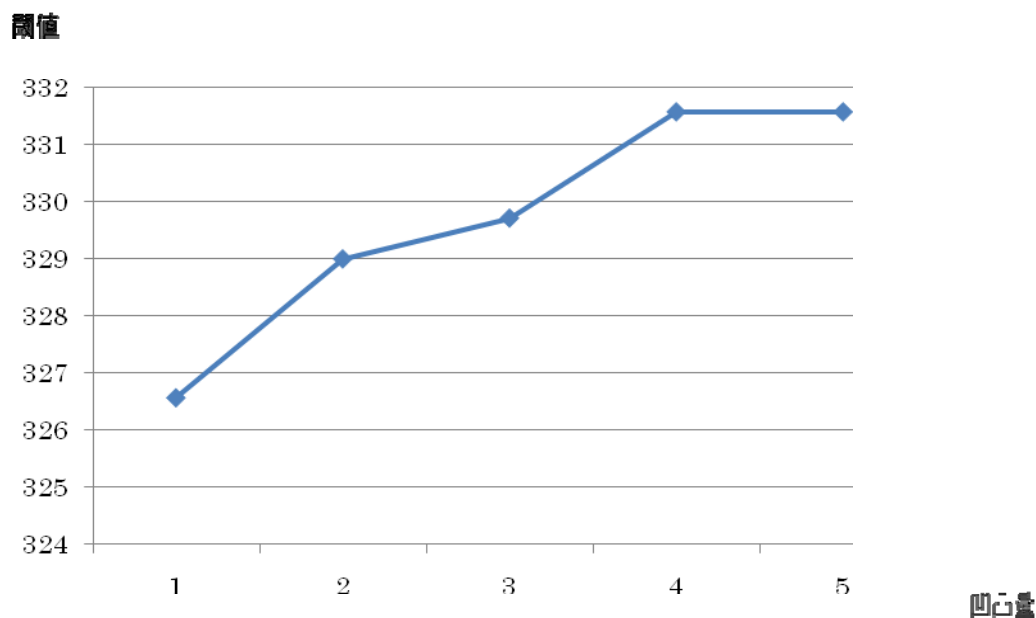


図 3.20 周期 8 での閾値の結果

#### 5. 周期 10 回

結果を図 3.15 に示す. 凹凸量 1 のとき閾値が 370, 凹凸量 2 以上のときは閾値が 39 となった. また, 閾値の最小値と最大値の差が 25 とすべての周期の中で最大となった.

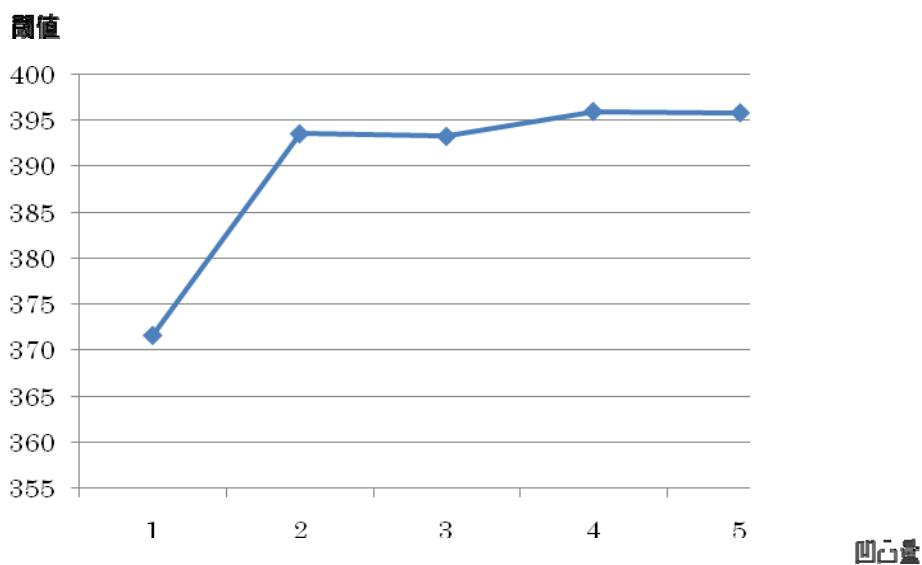


図 3.21 周期 10 での閾値の結果

## 6. 凹凸量 0 の場合

凹凸量が 0 の場合はパララックスオクルージョンマッピングとバンプマッピングは同一の結果画像となる。したがって、この条件下ではバンプマッピングとテクスチャマッピングの手法間について違いがあるかどうかを評価した。結果を図 3.16 に示す。周期が 2 増えるごとに、閾値がおよそ 65 増えている。

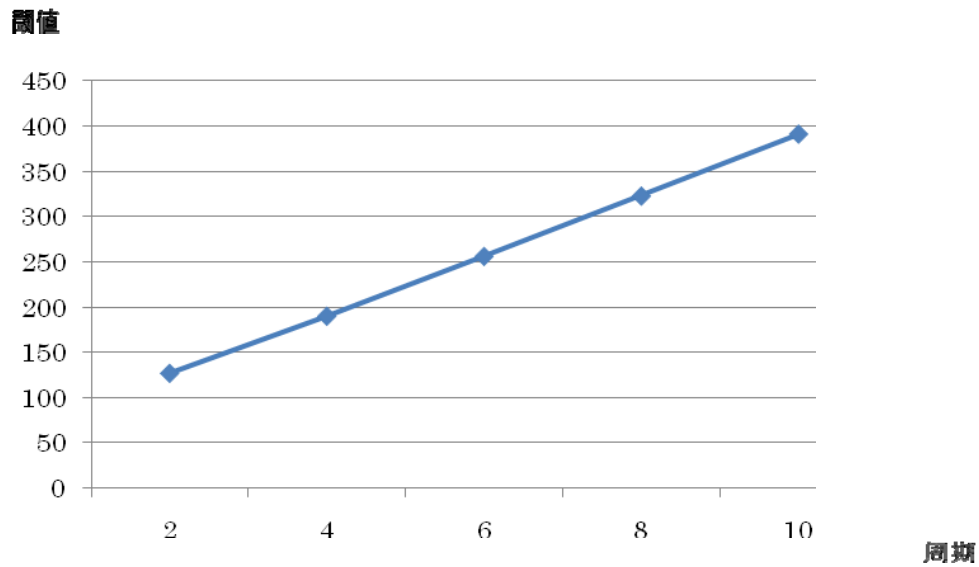


図 3.22 バンプマップとテクスチャマップの閾値の切り替わり

以上の評価実験の結果を用いて、第 4 章で述べるように視覚に応じて質感表現の手法を切り替えるための閾値を決定する関数を求める。

# 第 4 章

## 結果と考察

本章では，質感表現手法の切り替えの閾値関数を第 3 章の評価実験から導き出すとともに，実際の表現結果を示す．また，計算の効率化の実験結果と考察について述べる．

### 4.1 結果

実験結果の表 3.2 から，各凹凸量で場合わけをし，周期を変数とした閾値  $T$  を決める式(4.1)を定義する．また，グラフ化したものを図 4.1 に示す． $R$  は表面の模様の周期， $D$  は凹凸量である． $R, D$  それぞれの最小値を 0，最大値を 1000 とした．閾値  $T$  は値が小さいときに詳細度が高いことを意味し，値が大きくなるに従い詳細度は低くなる．

$$\begin{aligned} T(R) &= 0.331R + 59.5 & (D = 0) \\ T(R) &= 0.327R + 64.7 & (D = 200) \\ T(R) &= 0.325R + 68.8 & (D = 400) \\ T(R) &= 0.324R + 74.0 & (D = 600) \\ T(R) &= 0.327R + 69.0 & (D = 800) \\ T(R) &= 0.327R + 69.0 & (D = 1000) \end{aligned} \tag{4.1}$$

式(4.1)を用いて手法の切り替わりの位置を決めるようにした．この結果を用いて求めた画像を以下に示す．またパララックスオクルージョンマッピングのみを用いた場合と，本手法を用いた場合での FPS(Frame Per Second, 毎秒に描画される画像の枚数を示す)の結果を示す．

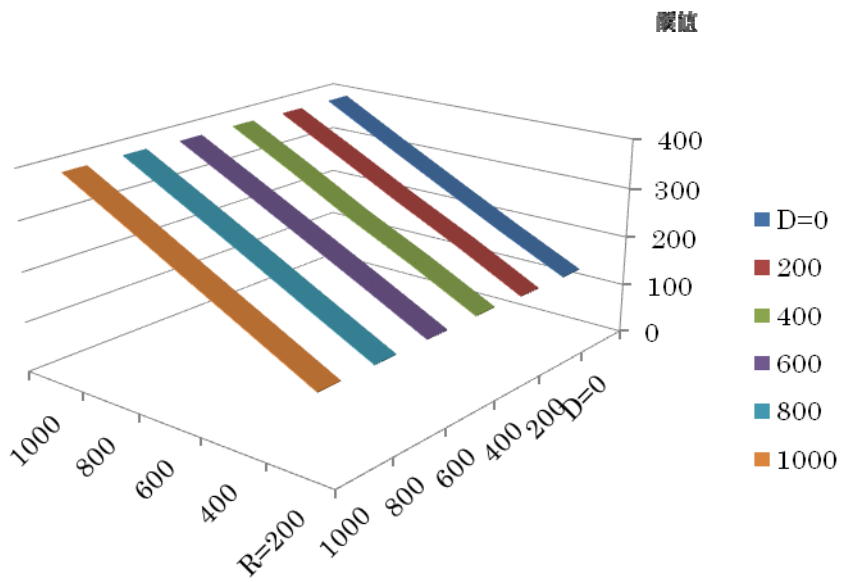


図 4.23 式 4.1 のグラフ

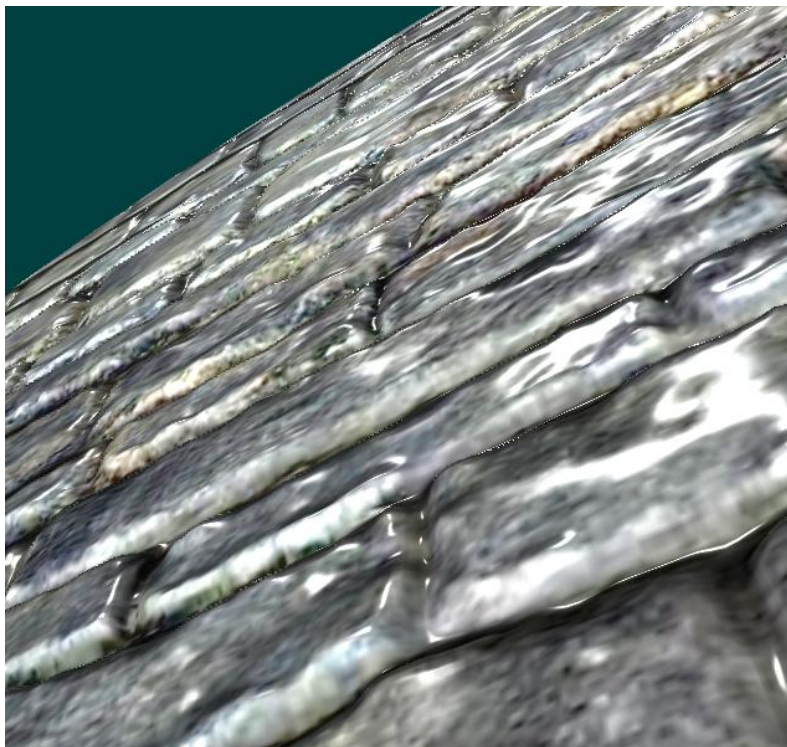


図 4.24 R=200,D=200 の結果



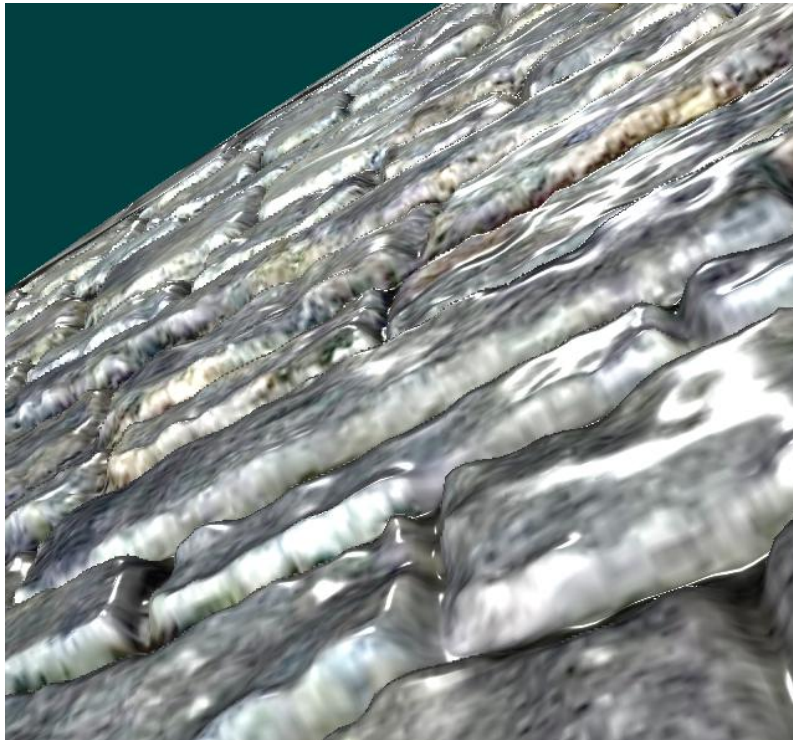


図 4.25  $R=200, D=400$  の結果

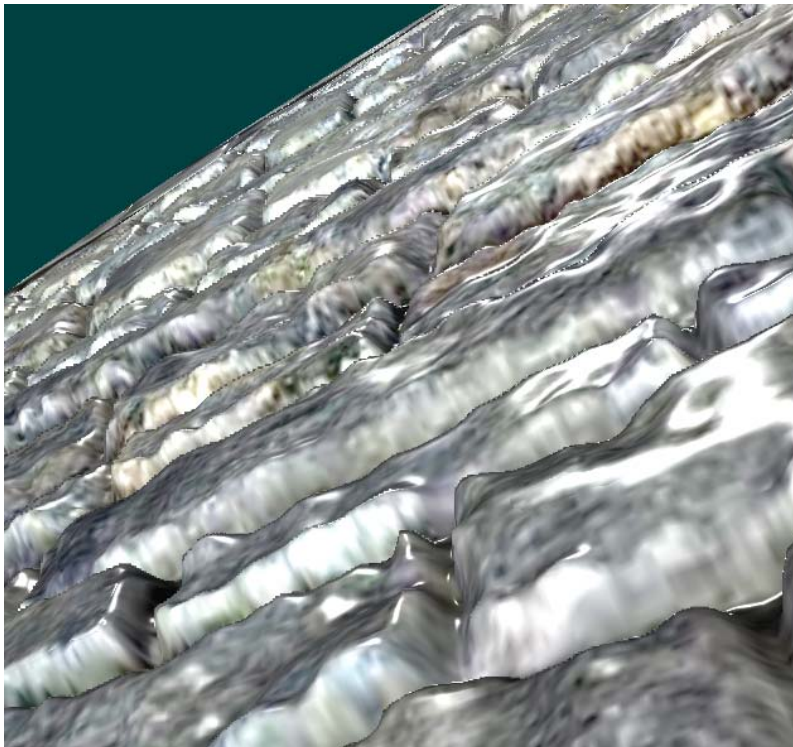


図 4.26  $R=200, D=600$  の結果

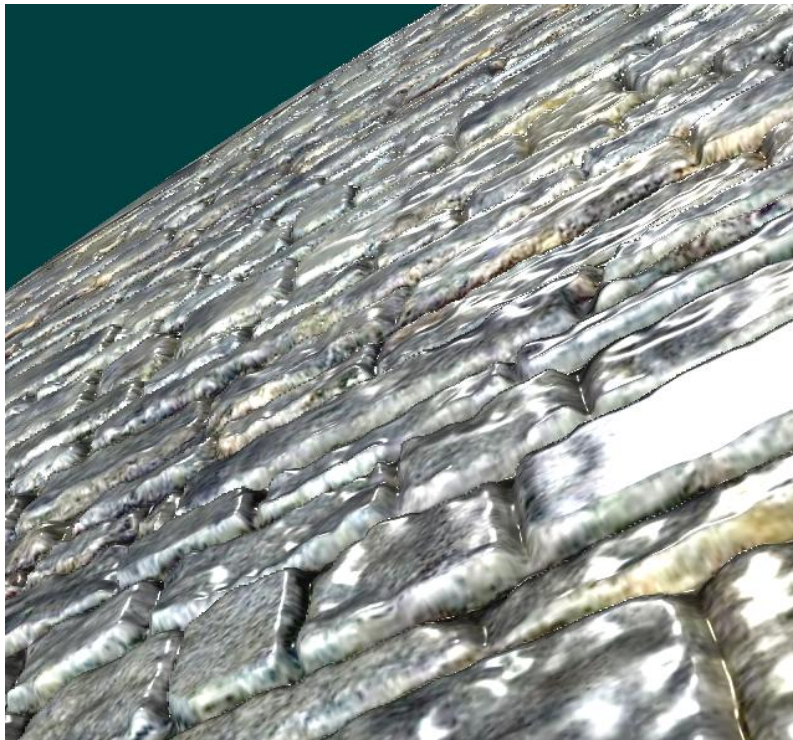


図 4.27  $R=400, D=400$  の結果

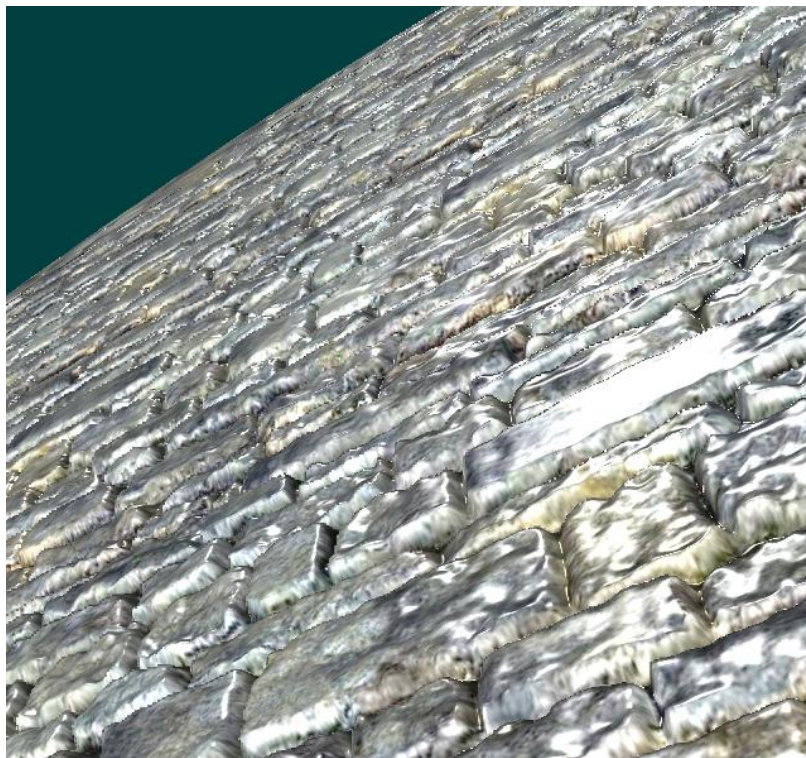


図 4.28  $R=600, D=600$  の結果

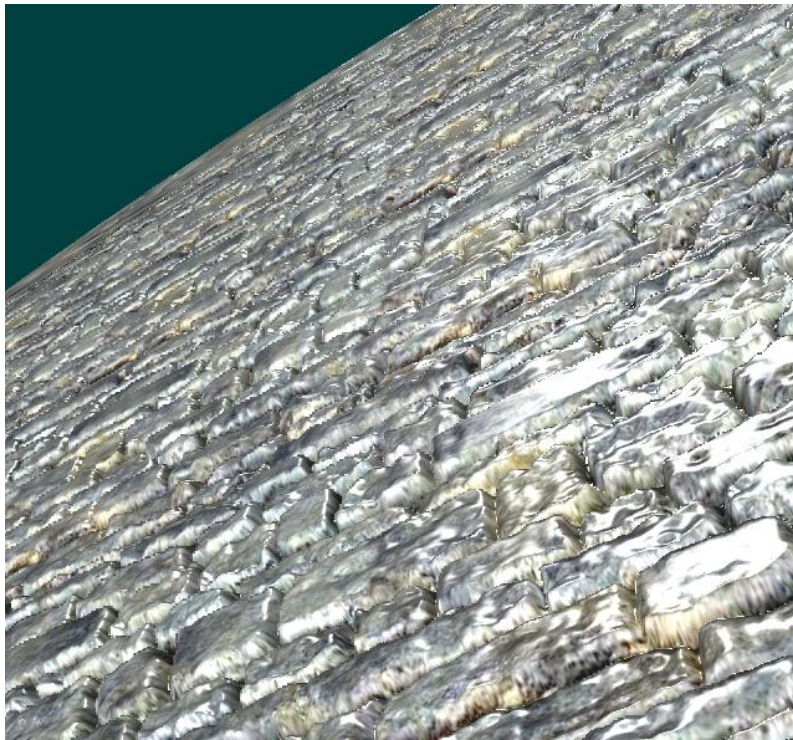


図 4.29  $R=800, D=800$  の結果

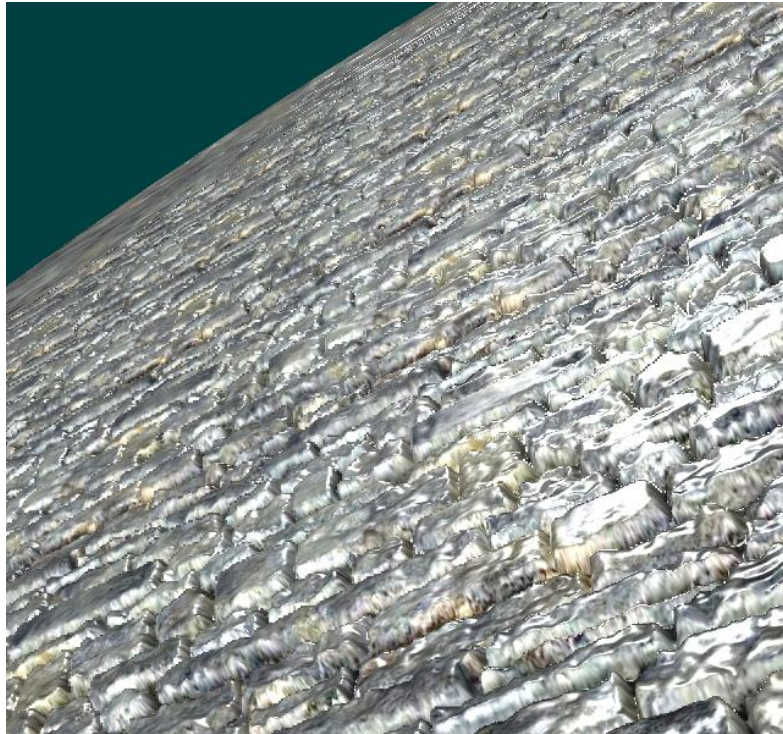


図 4.30  $R=1000, D=1000$  の結果



図 4.31 石垣模様,  $R=1000, D=1000$

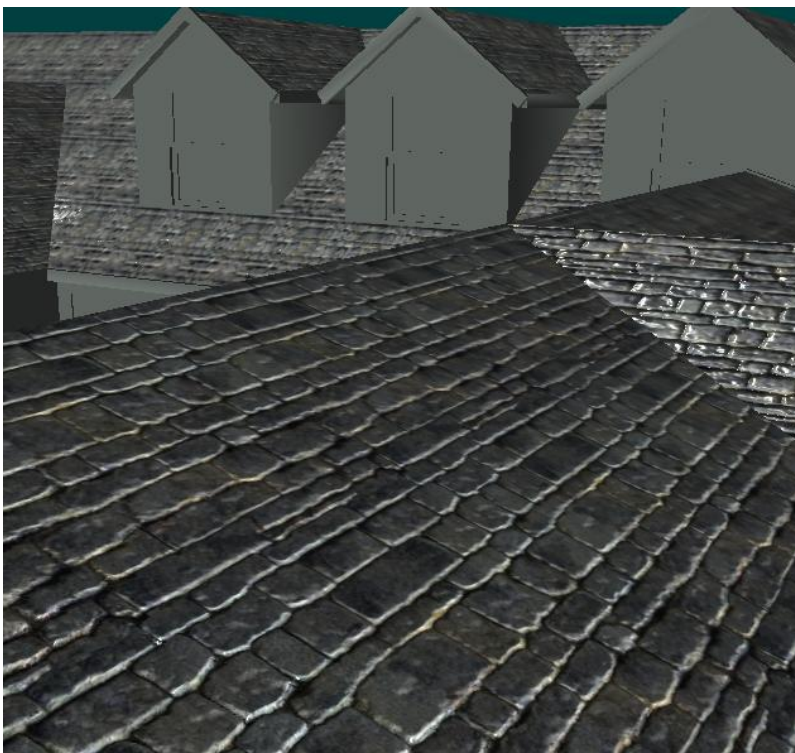


図 4.32 家の屋根,  $R=200, D=200$

|              | Parallax(FPS) | LOD(FPS) |
|--------------|---------------|----------|
| R=200,D=200  | 41.3          | 40.7     |
| R=200,D=400  | 45.5          | 45.5     |
| R=200,D=600  | 49.5          | 48.5     |
| R=200,D=800  | 51.4          | 51.4     |
| R=200,D=1000 | 54.3          | 53.3     |
| R=400,D=200  | 37.8          | 37.9     |
| R=600,D=200  | 34.9          | 32.9     |
| R=800,D=200  | 32.9          | 31       |
| R=1000,D=200 | 32            | 31       |

図 4.33 各条件での FPS 比較

|              | Parallax | LOD  |
|--------------|----------|------|
| R=200,D=200  | 15.5     | 17.4 |
| R=200,D=400  | 16       | 18.4 |
| R=200,D=600  | 16.9     | 18.8 |
| R=200,D=800  | 17.4     | 19.4 |
| R=200,D=1000 | 15.5     | 19.4 |
| R=400,D=200  | 15.5     | 19.4 |
| R=600,D=200  | 16.4     | 18.4 |
| R=800,D=200  | 14.6     | 18.4 |
| R=1000,D=200 | 14.6     | 17.4 |

図 4.34 屋根のモデルでの FPS 比較

## 4.2 考察

実験結果から、各周期において凹凸量が大きくなるほど閾値が大きくなっている。このことから凹凸量が大きくなるにつれて、簡易化した結果画像とそうでない結果画像の違いに気が付きやすくなる、ということがわかる。

模様を石垣模様に変更した図 7 では、石畳のときに比べて切り替わりがわかりやすくなっている。これは石垣模様の凹凸の変化が石畳の凹凸に比べて大き

いからであると考える。また図 8 の家の屋根のモデルでは図 8 では切り替わりがわからず、また FPS も向上している。すなわち、本手法は複雑なモデルであるほど効果があると考えられる。また、図 1 1, 1 2 からパララックスオクルージョンのみを用いて描画したときと、本手法を用いて描画したときの FPS について比較を行った。実験で用いた板状の簡易なモデルでは FPS に違いはほとんど見られなかったが、複雑な形状である家の屋根のモデルを用いて比較した場合には全体的に 1 割程度の FPS の向上が観察された。

各周期において、凹凸量が 3 以上での増減に関しては、閾値はほぼ変わらないという結果が得られた。このことから、凹凸量が一定以上に増加しても、認識には影響がなくなるのではないかと考えられる。また、凹凸量が 1 と 2 の間の閾値に大きな差があることから、凹凸量 2 以上のものと比較して凹凸量 1 では表現手法が切り替わる距離は小さくなる。すなわち、凹凸量が低い質感データでは、比較的近い距離のみパララックスオクルージョンで表現すれば十分であることがわかる。

図 3.15 から、周期が 10 回のときは凹凸量の変化による閾値の変化量が 25 であり、10 回より小さな周期の変化量(3 から 7)と比べると大きかった。このことから、表面形状の詳細度が上がると凹凸量の変化の量による認識の差が大きくなることがわかる。これは形状が細くなることで表面の質感が詳細まで認識することができなくなり、その結果として手法の違いを認識できなくなる範囲が広がったと考えられる。

## 第 5 章

# おわりに

本章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

### 5.1 まとめ

本論文では、人間の視覚特性に合わせた CG による質感表示の手法について述べた。

第一章では、研究の背景および研究の目的について述べた。第二章では本研究に関連する研究として、CG における詳細度を考慮した研究、質感表現に関する研究、ならびに視覚特性に関する研究について述べた。第三章では、本研究の予備実験として視覚分析のための実験と主観による評価実験について述べた。空間周波数の変化によるコントラスト閾値の変化に注目して、CG 画像での凹凸量の変化に対する認識の変化を異なる質感表現の手法を用いて予備実験を行った。結果から、質感表現に付与される凹凸の割合によっても、視覚特性は変化することを確認した。評価実験では視覚が質感手法を切り替えた場合と、切り替えなかった場合の違いをどの程度認識するか主観による評価で調べた。模様の細かさと凹凸量を変化させて実験を行い、これらの要素がどのように認識に影響を与えるのか実験した。第四章では第三章で得られた結果に基づき、表現手法の切り替えの閾値を決定するための関数を求めた。実験の結果から、各周期において凹凸量が大きくなるにつれて、質感表現の一部を簡易化した生成画像とそうでない生成画像の違いに気が付きやすくなると考えられる。また、模様が細かくなると、手法の違いによる生成画像の違いを認識できなくなる閾値の範囲が広がることを確認した。

## 5.2 今後の課題

本研究では、模様周期と、凹凸量、視点と表面までの距離に応じて閾値を求めている。しかし視覚特性は物体表面の反射輝度によっても変化することがわかっている。本研究の予備評価実験でも光源の強度によって縞模様の認識に差が出ることがわかった。したがって、閾値の算出に用いる要素に輝度をいれることで、より視覚特性に適した質感表現を行うことができると考える。

実装上の問題点として、DirectX9 での実装では、手法の切り替えを行うピクセルシェーダでの分岐のオーバーヘッドが大きく、処理の新たな負荷を与えてしまう。この分岐のオーバーヘッドは DirectX10 以降の API では軽減されることが予想され、さらなる計算の効率化が図れる。また、DirectX11 からは、詳細度に応じてポリゴンを詳細化するテセレーション機能がハードウェアとして実装されることが発表されている。したがって、テセレーション機能を活用した質感の詳細度制御が可能になると考える。

いっぽう、手法の切り替えの要素の一つとして視線と法線の角度も考えられる。これは、表面に対して垂直に視線が近づくにつれて高さを認知しにくくなるからである。しかし視線と法線のなす角はモデルの形に左右されるため、起伏の激しい細かな表面であると手法の切り替えが頻発してしまう。そのためこの問題を避ける方法を考える必要がある。

以上、本論文では視覚特性を考慮した質感表現の切り替え手法を提案した。本論文で得た知見をもとに、ディスプレイメントマッピングなどのさまざまな表現手法を含め、物体の詳細度を考慮した質感表現への展開を期待したい。



## 参 考 文 献

- [1] BLINN, J. F. 1978. "Simulation of Wrinkled Surfaces". In Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 286-292.
- [2] Kelly Dempski, Emmanuel Viale., "Advanced Lighting and Materials with Shaders", pp.87-88, 2005.Wordware Publishing, Inc.
- [3] Sung-Eui Yoon, Christian Lauterbach, Dinesh Manocha., "R-LODs:Fast LOD-based Ray Tracing of Massive Models", The Visual Computer(Pacific Graphics) ,Tech.Report.2006.
- [4] Hoppe, H., "Progressive meshes," In Proc. of SIGGRAPH '96, pp.99-108, 1996.
- [5] Blinn, J. F., "Models of light reflection for computer synthesized pictures," In Proc. of SIGGRAPH '77, pp.192-198, 1977.
- [6] B. G. Becker and N. L. Max. Smooth transitions between bump rendering algorithms. In Proceedings of SIGGRAPH93, ACM Computer Graphics Proceedings, Annual ConferenceSeries, pages 183-190, August 1993.
- [7] Olano, M., Kuehne, B., and Simmons, M., "Automatic shader level of detail," In Proc. of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware, pp.7-14, 1993.
- [8] Natalya Tatarchuk,"Dynamic parallax occlusion mapping with approximate soft shadows",Proceedings of 2006 symposium on Interactive 3D and games.
- [9] 大山 正, 今井 省吾, 和気 典二, "新編 感覚・知覚心理学ハン

- [10] Campbell, F. W. and Robson, J. G., "Application of Fourier analysis to the visibility of gratings," *Journal of Physiology*, 197 (3), pp.551-566, 1968.
- [11] Ma, W., Chao, S., Tseng, Y., Chuang, Y., Chang, C., Chen, B., and Ouhyoung, M., "Level-of-detail representation of bidirectional texture functions for real-time rendering," In *Proc. of the 2005 Symposium on interactive 3D Graphics and Games (I3D '05)*, pp.187-194, 2005
- [12] Hoppe, H., "View-dependent refinement of progressive meshes," In *Proc. of SIGGRAPH '97*, pp.189-198, 1997.
- [13] R.L.Cook, "Shade Tree", *Proc. of SIGGRAPH '84*, pp.223-231, 1984
- [14] J.F.Blinn, M.E.Newell, "Texture and Reflection in Computer Generated Images", *Communications of the ACM*, Vol. 19, No.10, pp.542-547, 1976
- [15] A.Vlachos, J.L.Mitchell, "Refraction Mapping for Liquids in Containers", *Game Programming Gems*, pp.594-599
- [16] D.R.Peachey, "Solid Texturing of Complex Surfaces", *Proc of SIGGRAPH '85*, pp.279-286, 1985
- [17] K. Perlin, "An Image Synthesizer", *Proc. of SIGGRAPH '85*, pp.287-296, 1985
- [18] K.Miyata, "A Method of Generating Stone Wall Patterns", *Proc. of SIGGRAPH '90*, pp.387-394, 1990
- [19] Kaisei Sakurai, Kazunori Miyata, Naoki Kawai, Kazuo Matsufuji, "Procedural Modeling of Leather Texture with Structural Elements", *Proc. of Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, pp.1-8, 2009
- [20] M.Colbert, S.Pattanaik, J.Krivanek, "BRDF-Shop: An artistic tool for Creating Physically Correct BRDFs", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.26, Issue 1, pp.30-36, 2006
- [21] H.W.Jensen, Steve Marschner, Marc Levoy, and Pat Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface Light

- Transport”, Proceedings of SIGGRAPH'2001, pages 511-518
- [22] Jason Lawrence, Aner Ben-Artzi, Christopher DeCoro, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Ravi Ramamoorthi, Szymon Rusinkiewicz, “Inverse Shade Trees for Non-Parametric Material Representation and Editing”, ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp.735-745, 2006
- [23] X. Sun, K. Zhou, Y. Chen, S. Lin, J. Shi, B. and Guo, “Interactive relighting with dynamic BRDFs”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol.26, Issue 3, 27, 2007
- [24] Hecht, S., Mintz, E.U. “The visibility of single lines at various illuminations and the retinal basis of visual resolution.” Journal of General Physiology, 22, pp.593-612
- [25] M. Garland, P.S. Heckbert, “Surface Simplification Using Quadric Error Metrics”, Proc. of SIGGRAPH '97, pp.209-216