

ハイトマップ及びノーマルマップを用いた擬似凹凸への力覚提示

Haptic rendering for pseudo-roughness using height map and normal map

脇田 航† 三谷 広志† 井門 俊†
Wataru Wakita Hiroshi Mitani Shun Ido

1. まえがき

3DCG において、壁や地面などの微小な凹凸のある複雑な形状を表現するには、通常、多くのポリゴンが必要であり、形状モデリング及びレンダリングに多大なコストが掛かる。その為、ハードウェアの性能に合わせてポリゴン数を抑え、仮想オブジェクトの表面に、実世界の人工物や動植物などの写真を加工した画像をマッピングする手法（テクスチャマッピング）が一般的に用いられている。しかし、テクスチャマッピングのみでは、ポリゴン内部のテクスチャに対して光の反射計算が行なわれない為、例えばレンガのテクスチャの場合、ポリゴン内部のレンガの凹凸具合（陰影具合）を表現することは出来ない。この為、近年、プログラミング可能な GPU(Graphics Processing Unit)の発達に伴い、ノーマルマップやハイトマップなどを用いて、フラグメント単位で光の反射計算を行なう手法がいくつか提案されている[1]~[4]。

一方、バーチャルリアリティの分野において、仮想オブジェクトの形状知覚は重要な課題の一つである。触・力覚レンダリングにおいて、ハイポリゴンの仮想オブジェクトの形状知覚を行なうには、視覚レンダリング同様、多大なコストが掛かる。その為、視覚レンダリングによる擬似的な凹凸への形状知覚に関する研究がこれまでにいくつか報告されている[5][6]。フォースマッピングは、仮想オブジェクトの面法線ベクトルをフォースマップ（ノーマルマップ）で摂動させ、反力の方向を変化させる手法である[5][6]。この手法では、ポインタと仮想オブジェクトの表面が接触しても、実際に面の高さは変化しない。その為、擬似凹凸の高さの違いを明確に感じることは出来ない。一方、ハイトマップを用いた手法[5]では、ポインタと仮想オブジェクトの表面が接触する前に、ハイトマップにより実際に面の高さを変化させることで、擬似凹凸の高さの違いを感じることが出来る。しかし、高さが変化する境界部分の力が感じられない為、勾配の違いを感じることが出来ない。

そこで本研究では、ハイトマップ及びノーマルマップを用いた擬似凹凸への力覚提示手法の提案を行なう。具体的には、テクスチャ、ハイトマップ、及びノーマルマップを仮想オブジェクトに対して UV マッピングし、フラグメント単位で視覚による擬似凹凸表現を行なう。また、ポインタと仮想オブジェクトの表面が接触する前に、ハイトマップに応じて表面の高さを変化させた衝突用ポリゴンを動的に生成し、接触時、ノーマルマップの値に応じて反力方向を摂動させる。これにより、擬似凹凸の高さ及び勾配の違いを感じることが可能となる。また、評価実験において、フォースマッピングのみ、ハイトマップのみ、及び提案手

法との比較実験を行ない、提案手法の有効性の検証を行なう。

2. 事前準備

2.1 ノーマルマップ及びハイトマップの作成

ユーザは予め 3D モデル、テクスチャを用意し、UV マッピングを済ませた状態にしておく。次に、ユーザが用意したテクスチャを元にハイトマップを作成し（図 1(a)参照）、ノーマルマップ（図 1(b)参照）及びノーマルマップに合わせたハイトマップ（図 1(c)参照）に変換する。この 2 つは、衝突判定時に計算で求めても良いが、計算コストを抑える場合は予め作成しておく。ポインタと仮想オブジェクトの表面の交差判定時、この 2 つのマップを用いて、オブジェクト表面の高さ及び法線ベクトルを変化させる（図 1(d)参照）。

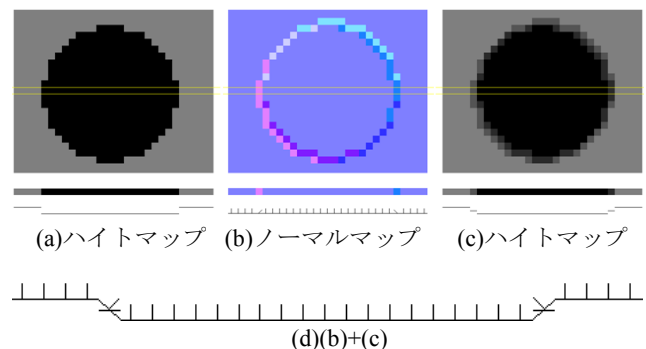


図 1. ノーマルマップ及びハイトマップの作成

2.2 TBN スペースの計算

UV スペースのノーマル値をワールドスペースに変換するには、TBN スペースを計算しておく必要がある。

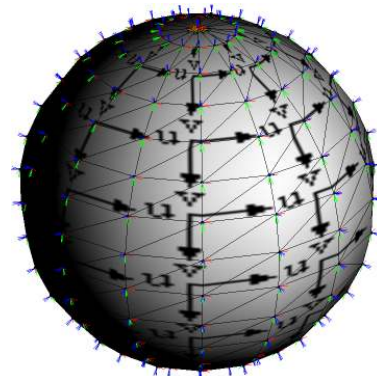


図 2. TBN スペース

†愛媛大学大学院理工学研究科, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

衝突判定時の計算コストを抑える為、モデル読み込み時に各ポリゴンに属する頂点の UV 値及び位置ベクトルから各面の接線ベクトル T 、従法線ベクトル B 、法線ベクトル N を求めておく (図 2 参照)。

3. 擬似凹凸への力覚提示

擬似凹凸への力覚提示を行なうには、まず 3D ポインタと仮想オブジェクトとの交差判定を行ない、擬似凹凸の最大高さを考慮して、接触しそうになったときのオブジェクト表面の UV 値を計算し、UV 値に対応するハイトマップの高さ及びノーマルマップの法線ベクトルを取得する。次に、ハイトマップの高さ及び面法線ベクトル方向に応じて、オブジェクト表面の高さを変化させたポリゴンを複製する。ワールド空間内に複製ポリゴンが存在する場合は、複製ポリゴンと衝突判定を行ない、接触した場合はノーマルマップの法線ベクトルをデバイスの空間座標に合わせて変換し、侵入量に応じて変換した法線ベクトル方向に力を発生させる (図 3 参照)。

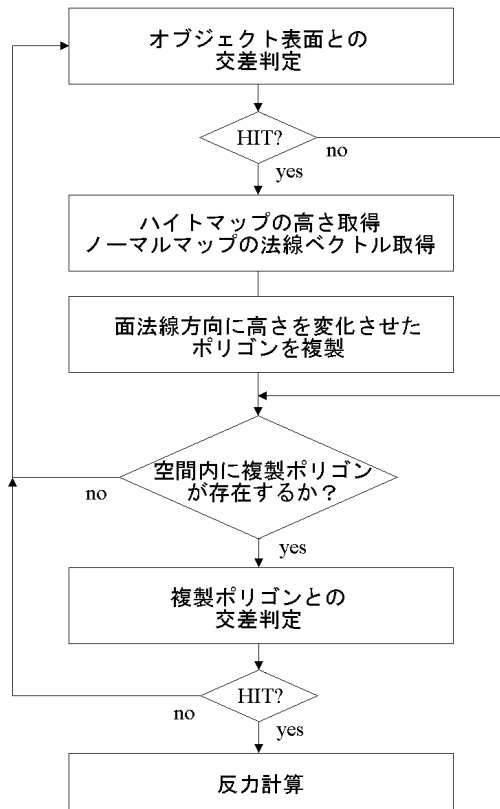


図 3. アルゴリズム

3.1 ハイトマップに応じた複製ポリゴンの生成

3D ポインタとポリゴンとの交差判定アルゴリズムは、Tomas Akenine-Möller の方法[7]を用いた。3D ポインタの方向ベクトルは、判定中のポリゴンの面法線ベクトルの±方向とし、レイとポリゴンが交差した場合、3D ポインタとサーフェスとの距離 d の計算を行ない、擬似凹凸の最大高さ以上の距離 T 以内にポインタが近づいた場合のみヒットしたと判定する (図 4 参照)。

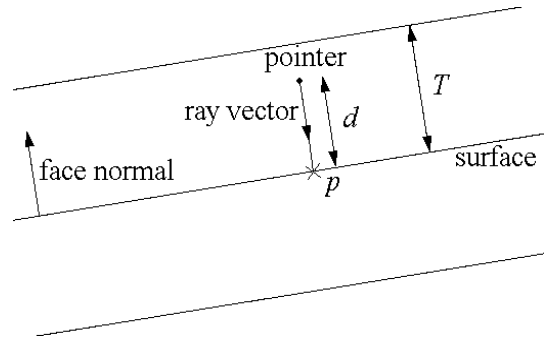


図 4. ポインタとポリゴンの交差判定

ヒットした場合、ポインタとポリゴンの交点座標 p を求め、 p 及び交差したポリゴンに属する各頂点の位置ベクトルから、 p に対応する UV 座標を計算し、その点に対応するハイトマップの値及びノーマルマップの値を取得する。ノーマルマップ値は面の TBN スペースからワールドスペースに変換しておく。また、ハイトマップの値に応じて、面法線ベクトルの±方向に距離 H で移動させたポリゴンを複製する (図 5 参照)。

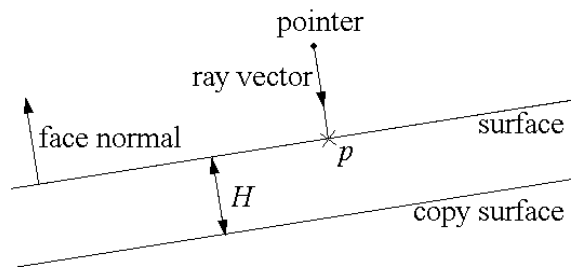


図 5. ハイトマップに応じた複製ポリゴンの生成

3.2 ノーマルマップに応じた反力計算

空間内に複製ポリゴンが存在する場合、複製ポリゴンとの交差判定を行なう。3D ポインタの方向ベクトルは、複製ポリゴンの面法線ベクトルの-方向とし、レイと複製ポリゴンが交差した場合、3D ポインタの侵入量 l の計算を行ない、また、 l 及び任意の堅さ s に応じて、力の強さを計算し、ワールドスペースに変換したノーマルマップの法線ベクトルをデバイス側の空間座標に合わせて反力として出力し、ポインタ位置を変化させる (図 6 参照)。

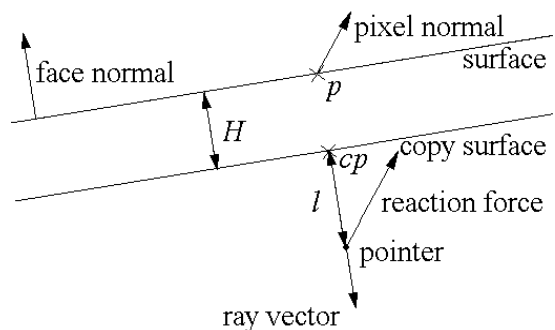


図 6. 複製ポリゴンとの交差判定及び反力計算

4. 評価実験

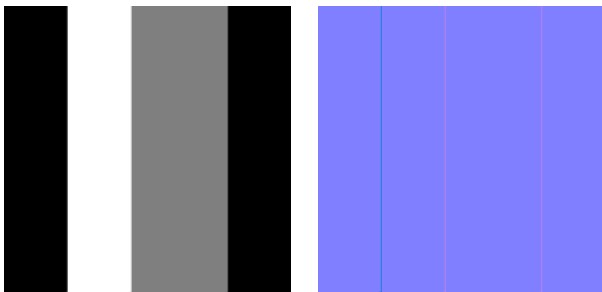
提案手法の有効性を示す為、

- フォースマッピング
- ハイトマップを用いた手法
- 提案手法

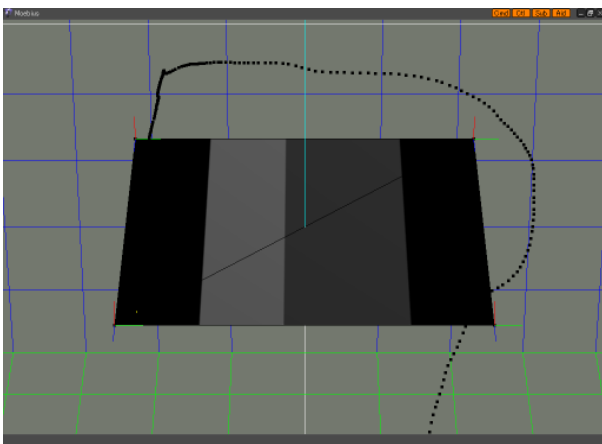
の3つにおいて比較実験を行なった。まず、絶対評価として、図7に示す2ポリゴンの平面モデル(200.0×200.0)において、端から端へ数往復するときのデバイスの空間位置の測定を行った。次に、主観評価として、被験者14名に対し、図8~10のモデルにおいて、それぞれの手法を何度か試してもらった後に、以下の項目について5段階(1:出来ない, 2:やや出来ない, 3:どちらともいえない, 4:やや出来た, 5:出来た)で評価してもらった。

- A) 擬似凹凸の高さの違いを感じる事が出来たか
- B) 擬似凹凸の勾配の違いを感じる事が出来たか
- C) 擬似凹凸及び形状を知覚する事が出来たか

文字のモデルは2ポリゴン、レンガのモデルは6ポリゴン、バスケットボールのモデルは420ポリゴンである。テクスチャのサイズは256×256で、擬似凹凸の視覚レンダリングには、ノーマルマッピング用シェーダプログラム(Cg(C for graphics)言語[9]使用)を用いてフラグメント単位でノーマルマッピングを行なっている。また、画面及びカメラ解像度はユーザが自由に変更可能な為、被験者が操作しやすい解像度で実験を行ってもらった。使用したCPUはXeon 2.4Ghz×2, GPUはATI FireGL T2-128M, 力覚提示装置はSensAble Technologies社のPHANTOM Omni[8]である。

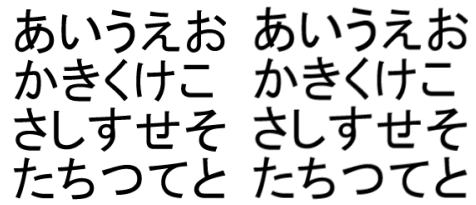


(a)ハイトマップ (b)ノーマルマップ

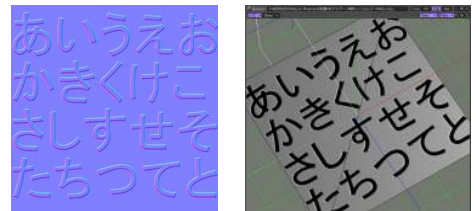


(c)レンダリング

図7. デバイスの空間位置測定

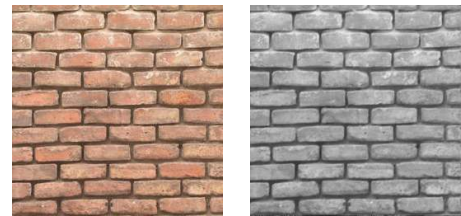


(a)テクスチャ (b)ハイトマップ



(c)ノーマルマップ (d)レンダリング

図8. 文字のモデル

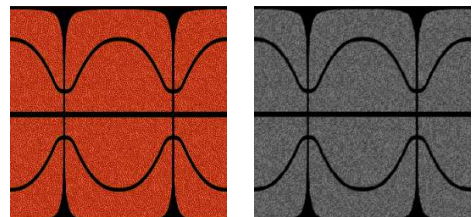


(a)テクスチャ (b)ハイトマップ

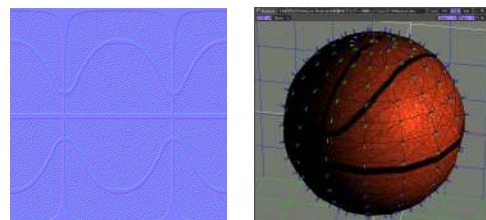


(c)ノーマルマップ (d)レンダリング

図9. レンガのモデル



(a)テクスチャ (b)ハイトマップ



(c)ノーマルマップ (d)レンダリング

図10. バスケットボールのモデル

4.1 実験結果及び考察

図 11 に絶対評価、図 12 にそれぞれの実験用モデルに対する主観評価の結果を示す。

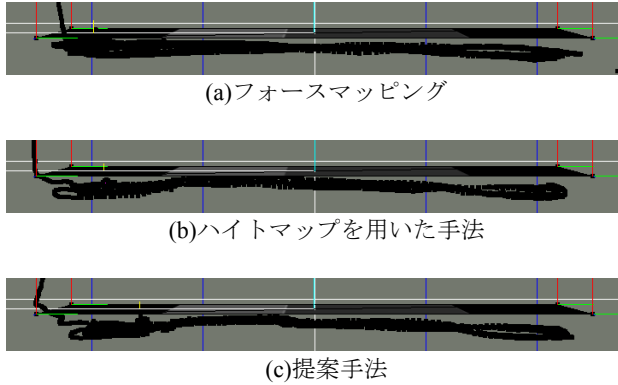


図 11. 絶対評価

図 11 において、フォースマッピングでは高さの変化が見られないが、ハイトマップを用いた手法及び提案手法では高さの変化が見て取れる。

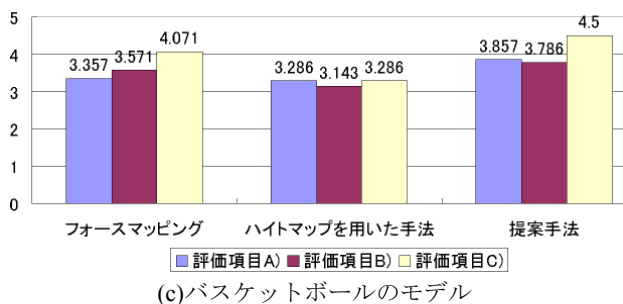
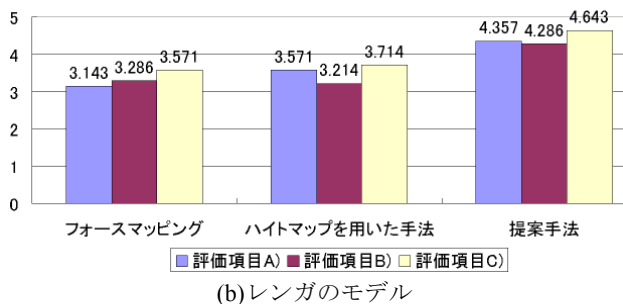
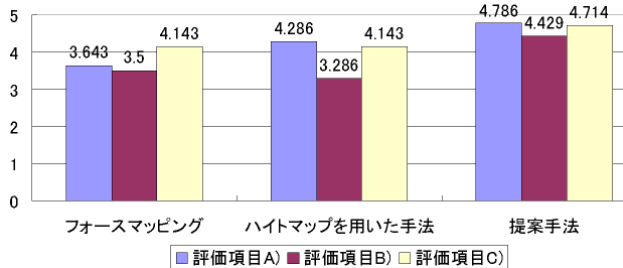


図 12. 主観評価

図 12 において、フォースマッピングでは、実際に高さは変化しないにもかかわらず、被験者は錯覚的にやや高さの違いを感じていることがわかった。ハイトマップを用いた手法では、反力の振動が無い為、勾配の違いはあまり感じられないという結果になった。提案手法では、被験者は高さ及び勾配の違いを大体感じる事が出来、平均的に高い結果となっていることがわかる。

5. むすび

本研究では、ハイトマップ及びノーマルマップを用いた擬似凹凸への力覚提示手法の提案を行なった。具体的には、テクスチャ、ハイトマップ、及びノーマルマップを仮想オブジェクトに対して UV マッピングし、フラグメント単位で視覚による擬似凹凸表現を行ない、ポインタと仮想オブジェクトの表面が接触する前に、ハイトマップに応じて表面の高さを変化させた衝突用ポリゴンを動的に生成し、接触時、ノーマルマップの値に応じて反力方向を振動させることにより、擬似凹凸の高さ及び勾配の違いを感じることが可能となった。また、評価実験において、フォースマッピングのみ、ハイトマップのみ、及び提案手法との比較実験を行ない、絶対評価及び主観評価において提案手法の有効性を示すことが出来た。今後の課題としては、3DCG におけるマテリアルを力覚レンダリング用に拡張し、表面の硬さや摩擦などを考慮したハプティックマテリアルの実装が挙げられる。

参考文献

- [1] Kaneko, T., Takahei, T., Inami, M., Kawakami, N., Yanagida, Y., Maeda, T. and Tachi, S.: Detailed Shape Representation with Parallax Mapping, Proceedings of the ICAT2001(11th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence), Japan, pp.205-208 (2001).
- [2] Manuel, M. O., Gary, B. and David, M.: Relief Texture Mapping, Computer Graphics, (SIGGRAPH'00 Proceedings), pp.359-368 (2000).
- [3] Pawel, W., Alexander, R. and Morgan, M.: Real-Time Collision Deformations Using Graphics Hardware, Journal of Graphics Tools, Vol.10, No.4, pp.1-22 (2005).
- [4] Alan, W. and Fabio, P.: Advanced Game Development With Programmable Graphics Hardware, p.384, A K Peters Ltd (2005).
- [5] Victor, T., Marta, F., Isabel, N. and Eva, M.: Rendering detailed haptic textures, Second Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPHYS 05), Italy (2005).
- [6] Basdogan, C. and Srinivasan, M.A.: Haptic Rendering In Virtual Environments, Virtual Environments Handbook, pp.117-134 (2001).
- [7] Tomas, A-M.: Practical Analysis of Optimized Ray-Triangle Intersection, <http://www.ce.chalmers.se/staff/-tomasm/raytri/>
- [8] SensAble Technologies, Inc.: PHANTOM Omni, <http://www.sensable.com/products-openhaptics-toolkit.htm>
- [9] Randima, F. and Mark, J. K.: The Cg Tutorial: The Definitive Guide to Programmable Real-Time Graphics, p.384, Addison-Wesley (2003).