

マクロ柄を考慮した双方向依存テクスチャの生成とマッピング

Generation and Mapping of Bidirectional Texture with Global Structure

関根 真弘 山内 康晋

株式会社東芝 研究開発センター ヒューマンセントリックラボラトリー

Masahiro SEKINE and Yasunobu YAMAUCHI

HumanCentric Laboratory, Corporate Research & Development Center, TOSHIBA CORPORATION

あらまし 布地や皮革のような素材をCGによって表現しようとした場合、不規則な柄の表現だけではなく、視点や光源の位置に依存して変化する微小な陰影の表現が大変困難である。近年、実写を利用したCGのクオリティ向上に関する研究が広くなされており、視点や光源の位置に依存して変化するテクスチャ（双方向依存テクスチャ）のリアルな表現が課題となっている。そこで本論文では、双方向依存テクスチャの生成を行なうことによって、任意サイズの双方向依存テクスチャを効率よく表現できることを示す。さらに、テクスチャ解析時のサンプル数を低減することによってロバストなテクスチャ生成が実現できるとともに、マクロ柄を有したテクスチャに対しても適用できることを示す。

1. はじめに

近年、3次元コンピュータグラフィックス（CG）技術は、ゲーム業界や映画業界での利用に限らず、ファッション業界や教育機関など様々な分野で広く利用されている。CGの没入感や臨場感は、フォトリアリスティックすなわち実写映像に近いグラフィックス表現によって得られるものである。フォトリアリスティックなグラフィックス表現のためには、3次元物体を眺める方向（視点方向）および光を照射する方向（光源方向）によって変化する3次元物体表面の色や質感の表現が極めて重要となる。

物体表面の光学的な反射特性を表現するモデルとしては、BRDF (Bidirectional Reflectance distribution Function) や BTF (Bidirectional Texture Function) [1] 等がある。これらのモデルは、マクロな素材質感の表現に適している反面、重ね合わされた布繊維や毛の交差、自己遮蔽といった素材特有のミクロな表面質感の表現に対しては、関数モデルの導出が困難であるという問題がある。光源に依存したテクスチャ変化を多項式関数で近似する手法も存在する[2]が、視点を含めた一般的な関数導出には至っていない。一方、視点や光源の位置に依存して変化するテクスチャ（双方向依存テクスチャ）をそのまま保持し、マッピングに利用する方法もあるが、データ量が膨大であるという問題があり、いかに効率よくデータ



図1 双方向依存テクスチャ取得装置

を圧縮できるかが課題となっている。

本論文では、双方向依存テクスチャの生成を行なうことによって、データを効率よく利用することができ、リアルな素材質感の表現が可能になったことを示す。また、取得した双方向依存テクスチャを解析する際に、サンプル数を低減することによって計算時間を短縮でき、その結果、生成のもととなるテクスチャのサイズを大きく確保できるようになったことを示す。また、ロバストなテクスチャ生成手法を適用することによって、マクロな柄を有した素材もうまく再現できるようになったことを示す。

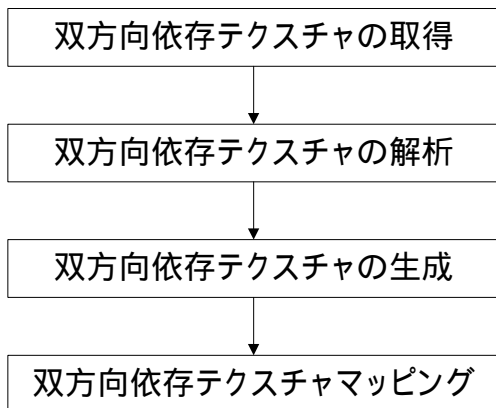


図2 双方向依存テクスチャに対する処理フロー

2. 双方向依存テクスチャの概念

双方向依存テクスチャを3次元モデルにマッピングするまで一連の処理フローを図2に示す。

まず、図1に示すような装置に素材をセットし、デジタルカメラおよびキセノン光源を極座標系で移動させ、様々な条件(図3)のもとでテクスチャを取得する[3]。本論文では、双方向依存テクスチャは、テクスチャに対する視点/光源の極座標方位角およびテクスチャ座標の6次元パラメータでテクセル情報を取り出せるものと定義する。

$$T(\phi_{eye}, \theta_{eye}, \phi_{light}, \theta_{light}, u, v)$$

次に、取得した双方向依存テクスチャを解析する。解析とは、テクスチャ生成処理に必要な全ピクセル間の誤差を算出することである。論文[4]で紹介した手法(以下、従来手法と呼ぶ)では、ベクトル量子化を行なうことによって、ピクセル間の近似的な誤差を求めていたが、計算時間が膨大であるという問題があった。これは、様々な条件で取得したテクスチャサンプルを全て計算に反映させていたことに起因する。例えば、視点/光源方向それぞれに対して 方向18 サンプル(0~340度まで20度刻み) 方向に8 サンプル(0~70度まで10度刻み) 取得したとすると、視点/光源方向の全組み合わせを考慮したテクスチャサンプルは、16,129 枚になってしまう。ただし、 $\phi=0$ の時は 方向1 サンプルのみを使用している。そのため、テクスチャサンプル数を低減し、効率的に解析を行なう必要がある。解析方法については3章に詳細を示す。

次に、双方向依存テクスチャの生成を行なう。ここでは、取得したテクスチャ(以下、参照テクスチャと呼ぶ)の柄や模様を再現した任意サイズのテクスチャを生成する。従来手法では、Wei[5]やAshikhmin[6]らのテクスチャ生成手法を双方向依存

テクスチャに適用していた。前述のとおり、解析に膨大な計算時間を要していたため、参照テクスチャサイズを小さく抑える必要があり、Wei や Ashikhmin らの手法のようなピクセルベース・テクスチャ生成以外の手法を適用することができなかった。一般に、ピクセルベース・テクスチャ生成は、マクロな柄を持った素材をうまく生成できないという問題がある。素材に依存するテクスチャ生成のロバスト性に関する具体例を図4に示す。図4(a)に示すような細かい柄を持った素材であれば、従来手法でもロバストに生成することができた。しかし、図4(b)に示すようなマクロな柄を持った素材や縫い目の粗い糸糸素材のようなものに対しては、うまく生成することができなかった。そこで4章では、参照テクスチャサイズを大きくすることによって、パッチベース・テクスチャ生成手法も双方向依存テクスチャに適用できるようになったことを示す。

最後に、3次元モデルに双方向依存テクスチャをマッピングする処理を行なう。3次元モデルの頂点ごとに視点/光源ベクトルを求め、それらのベクト

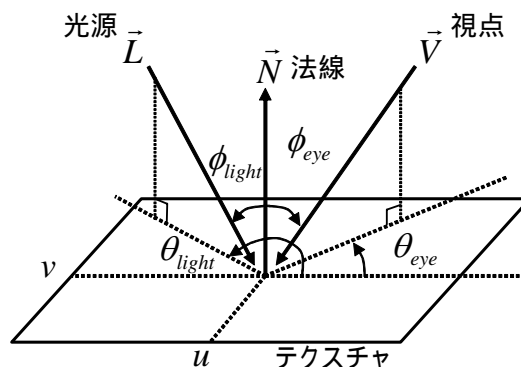
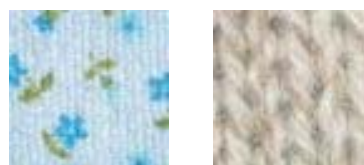


図3 双方向依存テクスチャの取得条件



(a) 従来手法で生成可能だった素材



(b) 従来手法で生成不可能だった素材

図4 素材に依存するロバスト性

最後に、3次元モデルに双方向依存テクスチャをマッピングする処理を行なう。3次元モデルの頂点ごとに視点/光源ベクトルを求め、それらのベクト

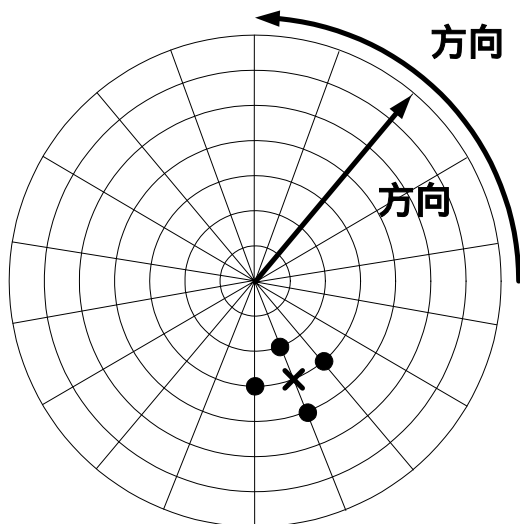


図5 双方向依存テクスチャのサブサンプリング

ルに応じて、双方向依存テクスチャからテクセル情報を取得し、描画処理を行なう。5章では、マッピング処理の詳細と、3次元モデリングソフトでのプラグインによる実現について示す。

3. 双方向依存テクスチャの解析

本章では、双方向依存テクスチャの効率的な解析方法を示す。双方向依存テクスチャの解析とは、テクスチャ生成処理に必要なピクセル間の誤差を計算することである。ここでの誤差とは、ある条件でテクスチャを取得した時のピクセル間の誤差の絶対値を全条件にわたって算出し、それら合計によって求めたものである (SAD: Sum of Absolute Difference)。しかし、全テクスチャサンプルを利用してピクセル間の誤差を計算すると、膨大な計算時間を要してしまう。そのため、素材の特性を調べ、その特性によって適用的にサブサンプリングする方法を取り入れた。サブサンプリングの方法は以下のような手順で行なった。

1. ある条件 (eye, eye, light, light) で取得したテクスチャサンプルに注目する。
2. 注目したテクスチャサンプルの近傍の複数サンプルをブレンドし、補間テクスチャを作成する。
3. 注目したテクスチャと補間テクスチャとの誤差 (SAD) を計算する。
4. 1 ~ 3 の処理を全テクスチャサンプルに対して行なう。
5. 3 で求めた誤差の大きな順に取得条件の重要度を順位付けする。
6. 重要度の順位をもとに、サブサンプリングする。

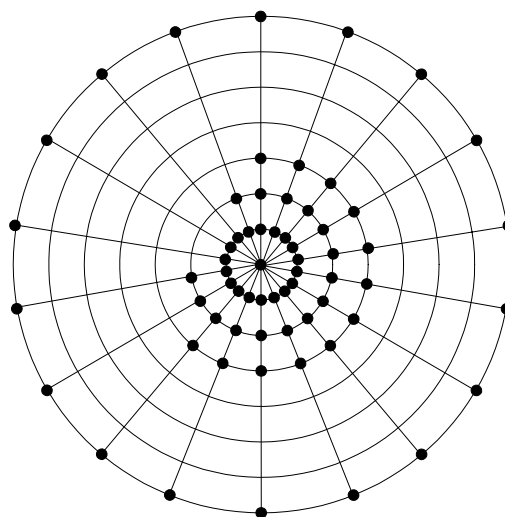


図6 適応的サブサンプリング例

処理2の具体例を図5に示す。これは、視点または光源の位置を示した極座標平面である。x印のついた部分のサンプルに注目した際に、印のついた近傍の複数サンプルをブレンドし、注目サンプルの補間テクスチャを作成している。ブレンド処理では、注目サンプルとの距離に応じた加重平均によって計算を行なっている。

このような処理によって、各テクスチャサンプルの補間による再現性を調べることができる。補間による再現性が高いということは、そのサンプルが素材の双方向依存性を解析する際にはそれほど重要ではないということを示し、逆に補間による再現性が低いということは、そのサンプルが重要であることを意味する。すなわち、素材の双方向依存性が顕著に現れている高周波な部分のサンプルを優先的に抽出しているということになる。

適応的なサブサンプリングの例を図6に示す。これは、図4(b)左側に示した花柄のタオル生地を光源方向のみ変化させて撮影し、サブサンプリング実験を行なったものである。64×64ピクセルのテクスチャサンプル127枚を64枚にサブサンプリングした。その結果、この素材に関しては、light = 0 ~ 30度の部分が特に重要であることが分かった。また、最大の傾きである light = 70度のサンプルについては、これ以上 light の大きなサンプルが存在しないことから、補間による再現性が低いため、重要度が高いという結果となった。

以上のようなサブサンプリングを導入することによって、双方向依存テクスチャの解析に要する計算時間を大幅に削減することができる。図7は、解析時のサンプル数と計算時間との関係を表したグラフ

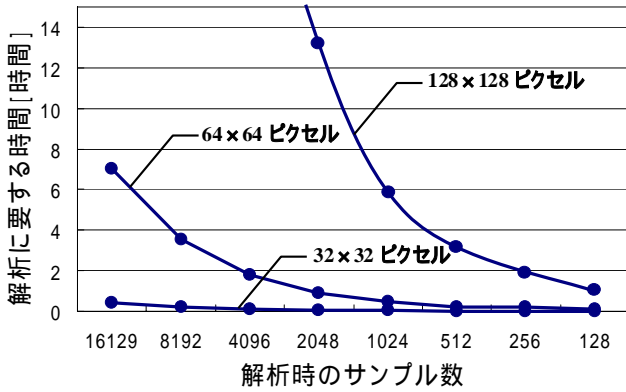
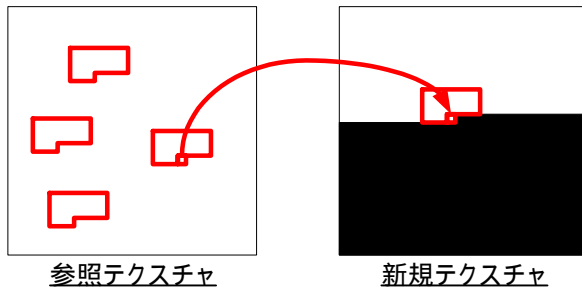
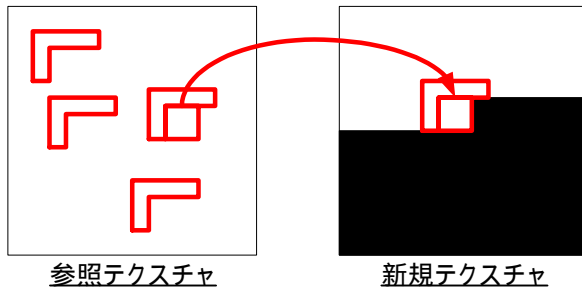


図7 解析時のサンプル数と計算時間



(a) ピクセルベース・テクスチャ生成手法



(b) パッチベース・テクスチャ生成手法

図8 テクスチャ生成手法の基本概念

である。ただし、128×128 ピクセルのグラフは理論値である。少ないサンプル数での精度の良い解析を行なうことによって、参照テクスチャのサイズを大きく確保できるようになることが分かる。

4. 双方向依存テクスチャの生成

本章では、双方向依存テクスチャの生成方法と実験結果を示す。近年、1枚のテクスチャから任意サイズのテクスチャを生成する手法が幅広く研究されており、様々な手法が知られている。その中でも、類似ブロックの探索によって生成する手法に限定すると、大きく分けて2つの手法に分けられる。ひとつは、図8(a)に示すようなピクセルベース・テク

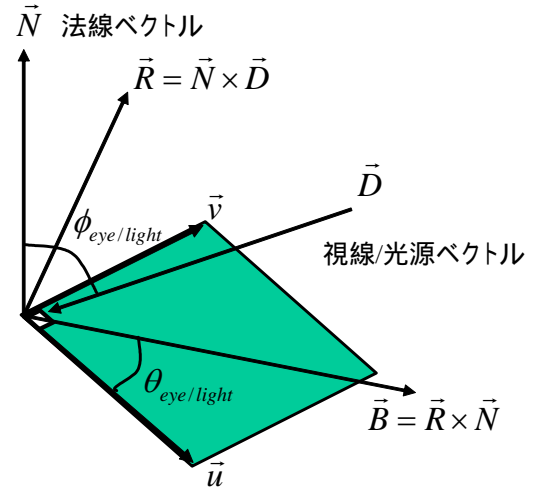


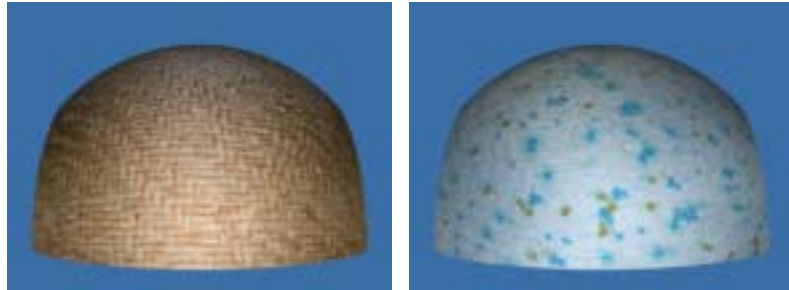
図9 視点/光源ベクトルの算出

スチャ生成手法であり[5],[6]、もうひとつは、図8(b)に示すようなパッチベース・テクスチャ生成手法である[7],[8],[9]。ピクセルベース・テクスチャ生成手法は、違和感のあるエッジを出すことなく細かい模様までを再現できる反面、マクロな柄を持ったテクスチャをロバストに生成できないという問題がある。一方、パッチベース・テクスチャ生成手法は、マクロな柄を持ったテクスチャをロバストに生成できる反面、違和感のあるエッジが発生しやすいという問題がある。

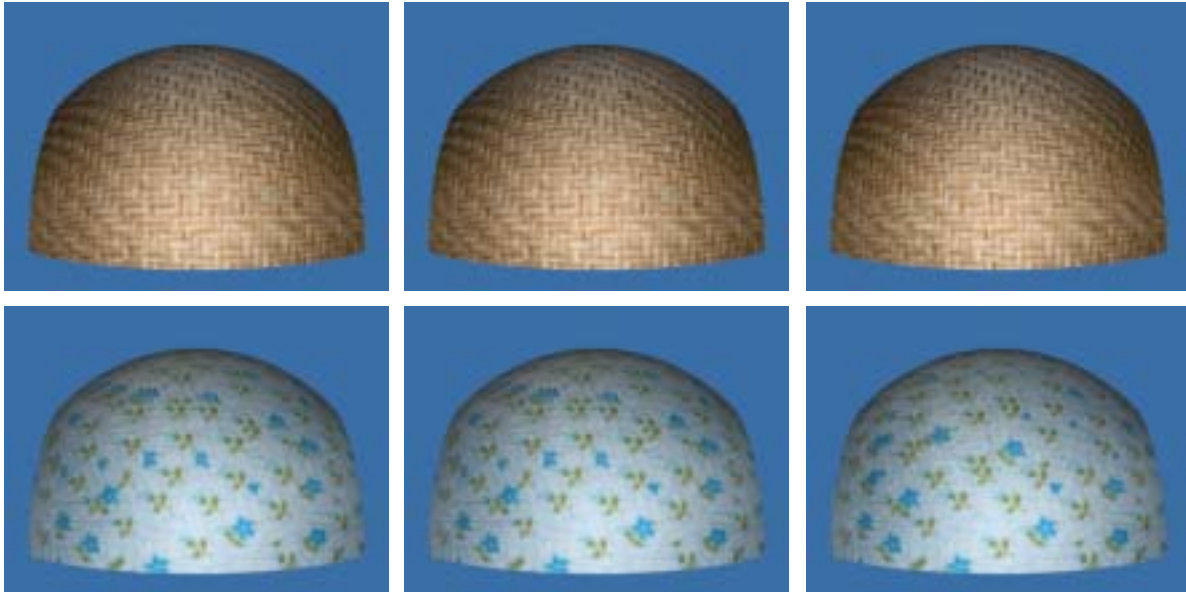
本論文では、マクロ柄素材を考慮したロバストなテクスチャ生成を目的としているため、パッチベース・テクスチャ生成を適用して実験を行なった。その中でも、パッチの境界部分をピクセルベースで再生成する手法として知られている“Hybrid Texture Synthesis”手法[9]を双方向依存テクスチャに適用した。また従来手法と同様にピクセルベース・テクスチャ生成も行なって比較してみた。実験結果を図10に示す。ピクセルベース・テクスチャ生成に関しては、花柄のタオル生地のようなマクロな柄のある素材をうまく生成できないことが分かる。また、パッチベース・テクスチャ生成に関しては、どちらの素材に対してもうまく生成できていることが分かる。図10(c)は、解析時のサンプル数を変化させて、その時の生成およびマッピング結果を比較したものである。ただし、マッピング時には全サンプルを利用している。サンプル数を減らして解析すればするほどピクセル間の誤差の信頼度が低くなるが、生成およびマッピングの精度はほとんど変化しないことが観察できる。



(a) 参照テクスチャ



(b) ピクセルベース・テクスチャ生成およびマッピング結果



(c) パッチベース・テクスチャ生成およびマッピング結果
(解析時のサンプル数を変化: 左から16,129 / 2,048 / 256サンプル)

図10 双方向依存テクスチャの生成およびマッピング結果

5. 双方向依存テクスチャマッピング

本章では、双方向依存テクスチャの3次元モデルへのマッピング方法について示す。

双方向依存テクスチャマッピングで特徴的なのは、入力した3次元モデルの頂点毎に、視点/光源ベクトルに対する方位角を算出しなければならないことである。算出方法を図9に示す。まず、視点あるいは光源方位ベクトル D と頂点の法線ベクトル N とのなす角度から方位角度を求める。次に、視点あるいは光源方位ベクトル D と法線ベクトル N との外積ベクトル R を求め、さらに、ベクトル R と法線ベクトル N との外積ベクトル B を求める。最後に、ベクトル B とベクトル u (テクスチャ u 軸のモデル表面上のマッピング方位ベクトル)とのなす角度から方位角度を求める。

このようにして求めた6次元パラメータ ($eye,$

$light,$ $light,$ $u,$ v) をもとにテクセル情報をマッピングする。マッピングの際には、解析時に行なったようなサブサンプリングは行なわず、取得した全てのサンプルを利用してマッピングを行なっている。

以上のような双方向依存テクスチャマッピングに関する処理を3次元モデリングソフト 3ds max 5.1™ (オートデスク株式会社) で実現できるようなプラグイン開発を行なった。図11は、そのインターフェースであり、図12はレンダリング結果である。独自ファイルフォーマットであるHDTファイルを読み、マテリアルとして双方向依存テクスチャを割り当てることによって、レンダリング時に上記の計算およびマッピングを自動的に行なう。

プラグインによる開発環境が整ったことにより、建築・ファッション業界における各デザイナー、もしくはゲームクリエイターなどが気軽に利用できるようになり、双方向依存テクスチャを利用したリアルな

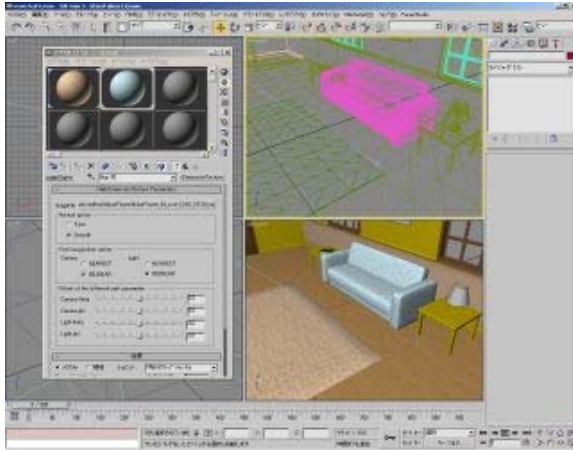


図 1 1 3ds max 5.1™ 向けプラグイン

質感表現を容易に行なえるようになった。

6. おわりに

本論文では、視点および光源位置に応じて変化する素材の表面質感をリアルに表現する手法を提案した。マクロ柄を有した素材の再現を可能にするための双方向依存テクスチャに対する一連の処理を示した。特に、素材の特性を調べて適応的なサブサンプリングを行なうことによる効率的なテクスチャ解析が可能であることを示した。適応的なサブサンプリングを行なうことにより、参照テクスチャサイズを従来手法に比べて大きくすることができた。その結果、パッチベース・テクスチャ生成手法のようなロバストな手法を適用することができ、双方向依存テクスチャを利用したグラフィックス表現の適用範囲を広げることができた。

今後は、3次元モデルにマッピングした際のエッジ部分の微細な凹凸表現やボリューム感の表現を追及していきたいと考えている。また、リアルタイムでのレンダリングを可能にすることによって、インタラクティブ性のある双方向依存テクスチャの表現を可能にしたいと考えている。



図 1 2 プラグインを利用したレンダリング結果

文 献

- [1] Dana, K. J., et al., "Reflectance and texture of real-world surfaces", *ACM Transactions on Graphics* 18(1): pp.1-34, 1999.
- [2] Malzbender, T., et al., "Polynomial texture maps", *ACM SIGGRAPH 2001*, pp.519-528, 2001.
- [3] 竹村 伸太郎他, "異方性反射特性の測定と可視化手法の提案," SICE 第7回パターン計測シンポジウム, pp.29-32, 2002.
- [4] Y. Yamauchi, M.Sekine, S. Yanagawa, "Bidirectional Texture Mapping for Realistic Cloth Rendering", *ACM SIGGRAPH 2003 sketch*, 2003.
- [5] Wei, L.-Y., and Levoy, M., "Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization", *ACM SIGGRAPH 2000*, pp.479-488, 2000.
- [6] Ashikhmin, M., "Synthesizing natural textures", *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.217-226, 2001.
- [7] L.Liang.C.Liu, Y.-Q.Xu, B.Guo and H.-Y.Shum., "Real-time Texture Synthesis by Patch-Based Sampling", *ACM Transactions on Graphics*, 20(3):127-150, July 2001.
- [8] A.A.Efros and W.T.Freeman, "Image Quilting for texture synthesis and transfer", *SIGGRAPH 2001 Conference Proceedings*, 341-346, 2001.
- [9] A.Nealen and M.Alexa, "Hybrid Texture Synthesis", *Eurographics Symposium on Rendering 2003*, 2003.