



# 観測視点・対象運動・投影解像度に応じて計算負荷を削減する パストレーシング型ダイナミックプロジェクションマッピング

羽山大智<sup>1)</sup>, 宮本駿一<sup>1)</sup>, 渡辺義浩<sup>1)</sup>

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 G2-31, hayama.d.aa@m.titech.ac.jp)

**概要:** 高速なプロジェクタとパストレーシングを組み合わせることで、ダイナミックプロジェクションマッピングにおいて写実的な表現が可能である。本稿では、約 1 ms の短時間描画でもパストレーシングのノイズを低減するために、知覚品質が劣化しない条件下で計算負荷を削減し、知覚上重要な領域に計算リソースをより分配する手法を提案する。具体的には、観測視点・対象運動・投影解像度に応じて、局所的に低解像度での計算を行うことで負荷を削減する。

**キーワード:** 拡張現実, 高速プロジェクタ, パストレーシング, 可変レートシェーディング

## 1. はじめに

Nomoto らは人間の知覚積分効果を利用し、パストレーシングをダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) へ導入した [1]。同手法では、高速に実行できる低い samples-per-pixel (spp) のパストレーシングでレンダリングした画像を、高いフレームレートで投影する。これによって、短時間で提示された画像が知覚積分され、低い spp の画像におけるランダムノイズを低減しつつ、運動物体にずれのない投影を実現した。一方、同手法だけでノイズを完全に除去することは難しかった。

また、宮本らはコンピュータグラフィックス (CG) において使用されているノイズ低減やレンダリング高速化の手法に対し、DPM においてフレーム間のシーン変化が小さいことを利用した拡張を行い、Nomoto らの手法へ導入した [2]。具体的には、時間フィルタリング、チェッカーボードレンダリング、ブルーノイズを用いたサンプリングの導入を行った。上記の手法の導入により、ノイズが低減し、投影像の品質が向上した。一方、同手法の導入後も、知覚できるノイズが残っていた。

本稿では更なる知覚品質向上のため、可変レートシェーディング (Variable Rate Shading: VRS) をパストレーシング型 DPM へ導入することを提案する。色や陰影づけを行うシェーディングは、レンダリングプロセスの中でも計算負荷が大きい。そこで、VRS は複数に分割された画面の領域ごとに、シェーディングの密度を適応的に下げることで、負荷を削減する [3]。本稿では、DPM に適した VRS とし、観測視点、投影像の運動や詳細さなど描画シーンの情報、実際の投影解像度を利用し、計算負荷の削減を行う。

## 2. 可変レートシェーディングを用いた計算負荷削減

### 2.1 概要

我々は、DPM 特有の条件を考慮した知覚品質が低下しない解像度判定手法を、従来手法を拡張することによって構築する。また、本手法をパストレーシング型 DPM へ導入し、

計算負荷削減を行う。提案手法では、対象の運動等のシーン内情報を用いたシェーディングレート判定手法である Yang らの手法 [3] に対し、観測位置、投影位置、投影面の関係による見かけ上のピクセルサイズ変化の条件を追加する。また、更なる計算負荷削減のため、中心視野、周辺視野に応じて、シェーディングレートの判定を行う手法をパストレーシング型 DPM へ適用する。なお、本システムではレンダリングにパストレーシングを用いており、シェーディングレートを変更する際には、通常 1 ピクセルごとに射出する光線の間隔を変更することで対応する。そのため、シェーディングレートを変更した際、解像度自体が変化する。

また、VRS では同一のシェーディングレートを適用する領域として主に、画面を格子状に区切り、それぞれ同じ大きさの正方形であるタイルが用いられている。本稿では、タイルの解像度として、前述の 2 つの解像度判定のうち、より低いものを  $x$  軸方向、 $y$  軸方向それぞれ利用する。前述の通り、本稿においてパストレーシングに VRS を導入する場合、タイル内の解像度を  $n \times m$  とするとき、同一の計算結果を適用する  $nm$  個のピクセルを 1 ピクセルとみなす。その中のランダムな 1 点へ光線を射出し、計算する。なお、タイルの解像度は、 $1 \times 1$ ,  $1 \times 2$ ,  $2 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $2 \times 4$ ,  $4 \times 2$  の中から選択を行う。 $1 \times 4$ ,  $4 \times 1$ ,  $4 \times 4$  と判定された場合は、それぞれ  $1 \times 2$ ,  $2 \times 1$ ,  $2 \times 4$  か  $4 \times 2$  を採用する。

また、宮本らが提案した手法 [2] を、今回の VRS に適した形に拡張し、導入する。加えて、空間フィルタリングも適用する。これにより、更なる計算負荷の削減と知覚品質の向上を試みる。

### 2.2 投影シーン内の情報に基づく計算負荷削減

Yang らはシェーディングレートを低下させる前後の画素値の誤差と物体の速度に基づいた手法を提案した [3]。DPM では物体が運動することから、運動速度が上昇するほど計算負荷が小さくなる同手法は効果的であると考えられる。

一方、DPM においては観測位置、投影位置、投影面の

関係によって観測されるピクセルサイズが変化する。本特性を用いて、実際に観測されるピクセルの大きさを反映するパラメータ  $d$  を計算し、より効果的な解像度判定のため、Yang らの手法の拡張を行う。

提案手法では、タイルごとに  $x$  軸方向、 $y$  軸方向の解像度を以下の式で判定する。

$$S_I = \begin{cases} \text{Full,} & \text{if } \tilde{b}_H(v)\mathcal{E}(I, I^H)d \geq \tau_I \\ \text{Quarter,} & \text{if } \tilde{b}_Q(v)\mathcal{E}(I, I^H)d < \tau_I \\ \text{Half,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

上記の式において、Full は全ピクセル、Half は 1 ピクセルおきに、Quarter は 3 ピクセルおきに計算を行う。タイルについては、 $16 \times 16$  pixels の正方形と設定する。

また、 $\tilde{b}_H(v)$ 、 $\tilde{b}_Q(v)$  は、速度  $v$  に応じて減衰する関数である。解像度判定に速度に対応した関数が含まれているのは、モーションブラーが視覚上発生するためである。モーションブラーとは、運動物体にぼかしがかかることである。視覚上において発生するモーションブラーには、ディスプレイが離散的に映像を切り替えるため、視覚的な持続性によって発生するものがあり、提示映像のフレームレートの増加に伴って同ブラーは減少する。一方、947 fps の高速投影下においても同ブラーが発生するかは不明であった。そのため、高速投影時におけるモーションブラーの発生を検証した。検証については、3 節に示す。

$\mathcal{E}(I, I^H)$  は、タイル  $I$  が半分 of 解像度のタイル  $I^H$  になった際の情報の損失を推定する関数であり、損失が大きくなるほど値も大きくなる。また、 $\tau_I$  は以下の式で表される。

$$\tau_I = t \cdot (I_{\text{avg}} + l) \quad (2)$$

$I_{\text{avg}}$  はタイル内の全ピクセルの輝度の平均であり、 $t$  と  $l$  は、背景や表示内容を基に事前に設定するパラメータである。

前述の通り、DPM による見かけのピクセルサイズが変化する情報を判定に導入し、観測されるピクセルが小さくなる場合に解像度を低下させる。図 1 に示すように、 $l_P$  を投影位置と投影面の距離、 $l_E$  を観測位置と投影面の距離とする。加えて、 $\theta_{P_n}$  を投影位置と投影面を結ぶベクトルと投影面の法線がなす角とし、 $\theta_{E_n}$  を観測位置と投影面を結ぶベクトルと投影面の法線がなす角であるとする。このとき、観測位置、投影位置、投影面の関係性から、見かけ上のピクセルサイズを反映したパラメータ  $d$  を求める。 $d$  を以下の式で定義する。

$$d = \frac{\cos \theta_{E_n}}{l_E} \cdot \frac{l_P}{\cos \theta_{P_n}} \quad (3)$$

$d$  を式 (1) の通り、乗算することで、見かけ上のピクセルの大きさを考慮した解像度の判定が可能となる。なお、正確には各ピクセルの  $x$  軸、 $y$  軸方向の辺の長さの変化による見かけ上の大きさの影響を考慮する必要があるが、本稿では計算の簡略化のために式 (3) を用いて計算を行う。

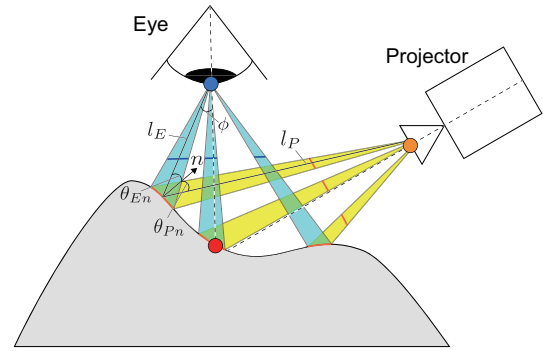


図 1: 観測位置 (青点)、投影位置 (橙点)、投影面 (灰) の位置関係。これらの位置関係に応じて各ピクセルの見かけ上の大きさが異なる。なお、赤点は観測視点である。

### 2.3 視野の特性を利用した計算負荷削減

局所的に解像度を変更する手法の中でも、周辺視野における解像度を低下させることで計算負荷を削減する Foveated Rendering が提案されている [4, 5]。これは、観測視点から周辺視野へと知覚可能な空間解像度が低くなる性質を利用している。特に、広視野のディスプレイにおいては、中心視野に含まれる領域が一部に限られるため、同手法の導入によって大きく計算負荷を削減することができる。DPM においても、投影領域は 3 次元の広い範囲であることから、同手法の導入は効果的であると考えられる。本稿では、タイルごとに以下の式で簡易的に解像度判定を行う。

$$S_F = \begin{cases} \text{Full,} & \text{if } \phi \leq \phi_H \\ \text{Quarter,} & \text{if } \phi > \phi_Q \\ \text{Half,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

上記の式において、 $\phi$  は観測位置と観測視点を結ぶベクトルと、観測位置と投影面を結ぶベクトルのなす角であり、図 1 に示す通りである。一方、 $\phi_H$ 、 $\phi_Q$  については、錐体の分布を基に、 $\phi_H = 15 \text{ deg}$ 、 $\phi_Q = 30 \text{ deg}$  と設定する。本判定では、 $x$  軸方向、 $y$  軸方向の解像度が同一となる。

### 2.4 ノイズ低減手法・高速化手法との組み合わせ

更に、解像度だけでなく宮本らの提案 [2] に含まれる高フレームレート性を利用した時間フィルタリングにおける係数やパストレーシングにおける spp、一般的な CG で用いられるノイズ低減のための空間フィルタリングを視野の特性に基づいて設定する。まず、宮本らの提案 [2] を本稿の手法に導入するために、下記の拡張を行う。

最初に、チェッカーボードレンダリングの導入について述べる。本稿の手法では、1 ピクセルとみなされるサイズがタイルごとに異なり、タイルごとの解像度は毎フレーム変化する。そのため、チェッカーボードレンダリングを行う場合、2 フレームにわたって計算が行われないピクセルが発生する可能性がある。これを防ぐため、タイルごとの解像度判定は 2 フレームごとに行うように拡張をする。

次に、ブルーノイズを用いたサンプリングについて述べる。VRS によって 1 ピクセルとみなされているピクセルの



図 2: 提示したシーン. Bunny (手前), Venus (奥) の 2 物体を提示した.

集合のうち, 光線が射出されたピクセルの画像座標に対応するブルーノイズテクスチャの値を使用するものとする.

また, 空間フィルタリングは, 周辺のピクセルの画素値を足し合わせることによってノイズを低減するが, 高周波数成分が失われる. 同問題を回避する方法はあるものの, DPM においてそれらの計算負荷は大きい. そこで, 周辺視野において知覚される空間解像度が低いことを利用し, 周辺視野のみ Poisson Disk Sampling [6, 7] を用いた高速かつ高効率な空間フィルタリングを適用する. これにより, 高周波数成分の損失による知覚的影響を抑える. また, 空間フィルタリングについては, 周辺視野における  $15 \text{ deg} \leq \phi \leq 18 \text{ deg}$  にかけて空間フィルタリング適用前後の画像を線形に合成することで急激な空間解像度変化を簡易的に防ぐ.

一方, 周辺視野は空間解像度とは異なり, 時間的な輝度変化に敏感である. そのため, 時間フィルタリングによる過去フレームの寄与を大きくし, 時間的な輝度の変化を緩やかにする. また, 周辺視野に位置するピクセルでは, 時空間の両方でフィルタリングを行うため, 低い spp でもノイズを大幅に低減することができる. そのため, 観測視点に近い部分での spp を高め, 観測視点から離れた点では spp を低く設定することで, 中心視野における投影像の品質の向上を図る. 一方, 時間フィルタリングを用いてノイズの大幅な低減を行う場合は, 投影ずれや投影像の崩れの問題が発生するため, それらが知覚されない過去フレームの寄与率を実験的に設定する.

### 3. 高速投影時における動的物体の知覚品質調査

#### 3.1 概要

高速投影時においても, 視覚上にモーションブラーが発生することを確認できれば, 動的物体の速度に応じて空間解像度を低下させる手法を導入することが可能であると考えられる. そこで, 予備実験としてパストレーシングを用いたレンダリング画像を連続的にスクリーンに 947 fps で投影し, 対象物体の移動時と静止時の知覚品質の調査を行った. また, 評価については著者 1 名で行った.

本実験において提示したシーンを図 2 に示す. 2 物体は, 動的, 静的状態のどちらか一方の同じ状態を適用することとした. また, Bunny の素材は反射特性が異なる 4 種類の素材を用いた. 一方, Venus は 1 つの素材を用いた. 更に,

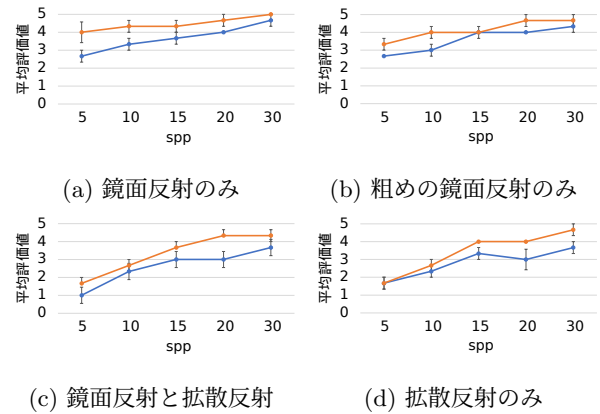


図 3: 知覚品質評価の結果. グラフはそれぞれ静的 (青線), 動的 (橙線) 状態の評価値である. グラフごとに Bunny の素材が異なる.

spp として 5, 10, 15, 20, 30 の 5 種類を用意し, 40 通りのシーンをリファレンスと比較した. リファレンスについては 1000 spp で描いた静止画像とした. 動的状態では, Bunny を 1 m/s 程度で左に平行移動させ, Venus はその場で回転をさせた. また, 投影画像は事前にレンダリングを行った.

リファレンスに対するノイズを 5 段階「5: 全く見えない, 4: 見えるが気にならない, 3: 見える, 2: よく見える, 1: 非常によく見える」で評価した. このとき, Bunny を注視するようにした. 静的状態におけるすべての組み合わせの評価をランダムな順で行った後, 動的状態における評価を同様にして行い, これを 3 回繰り返した. このとき, リファレンスについては別の液晶ディスプレイにて任意のタイミングで確認できるようにした. また, スクリーンとプロジェクタは 1 m 程度離し, 観測位置はプロジェクタの真横とした.

#### 3.2 結果

図 3 のように, 全ての条件下において動的状態は静的状態の評価値以上となる結果を得た. また, 低い spp の条件下において, 拡散反射成分を含む素材は鏡面反射成分のみを含む素材よりも評価値が低くなる傾向が確認できる. 上記の結果より, 高速投影下においても視覚上のモーションブラーが発生していると考えられる.

### 4. 提案手法を導入した投影像に関する実験

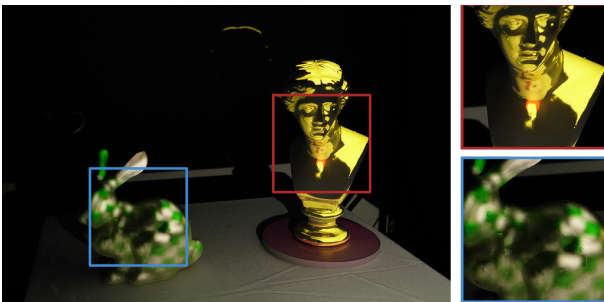
#### 4.1 概要

2 節で提案した手法による投影像の確認を行った. 本実験において, 対象物体は Bunny と Venus の 2 種類とした. レンダリング時に使用する視点は, 再帰性反射材をつけたメガネを装着し, メガネの位置姿勢によって推定した. また, 眼球の動きにより, 実際の視点と推定方向にずれが生じるため, 赤点を注視し, それらを一致させた.

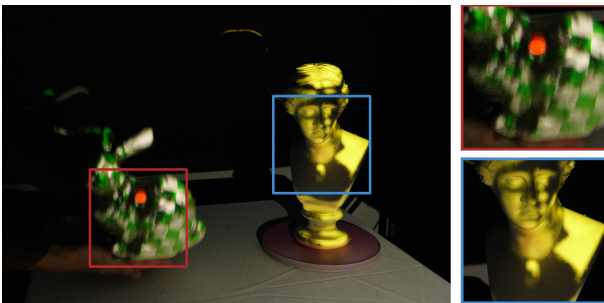
また, 本実験においては, 対象物体から約 1 m 以内で観測を行った. spp 等の設定を表 1 に示す. spp は, 投影シーンほぼすべてが  $\phi < 30 \text{ deg}$  に含まれる状態で, レンダリング速度が 1000 fps を超える値に設定した. 式 (2) について,  $t = 0.0762$ ,  $l = 0.363$  とした.

表 1: 視野の特性に基づいた時間フィルタリング係数, 空間フィルタリング, spp の設定

角度 $\phi$ [deg]	$0 \leq \phi < 15$	$15 \leq \phi < 30$	$\phi \geq 30$
時間フィルタリングの係数 $\alpha$	0.2	0.1	0.05
空間フィルタリング	適用しない	適用	適用
spp	18	18	2



(a) 静的状態. 2 物体が静止している.



(b) 動的状態. Bunny が運動している.

図 4: 投影時の様子. 赤点が観測視点である.

本実験では CPU に Intel Core i9-13900K, GPU として Nvidia GeForce RTX 4090 を搭載した計算機を用いた. また, トラッキングには 500 fps で駆動する OptiTrack を使用し, 投影には 947 fps, 解像度  $1024 \times 768$  のカラー投影が可能な高速プロジェクタ [8] を用いた. 図 4 の撮影には, Sony  $\alpha$  7R IV を用いた. 撮影時の設定は, ISO が 2500 であり, 絞りが  $f 8.0$ , シャッタースピードが  $1/40$  秒とした.

#### 4.2 結果

投影時の様子を図 4 に示す. (a) では特に中心視野において高品質な描画がされている. (b) では, 時間フィルタリングと物体の運動による解像度の低下によって, 中心視野においてもぼやけが生じているが, 知覚できなかった. 一方, 両方の状態で中心視野でのノイズは知覚可能であった. 更に, 周辺視野では中心視野以上のちらつきが認識された.

#### 4.3 考察

宮本らの手法 [2] において, レンダリング速度が 1000 fps を超える spp は, 4 節の計算機を用いた場合はおよそ 14 spp

となる. 提案手法では, 中心視野に更に多くの spp を割り当てることが可能となっており, 知覚品質は向上したと考えられる. 一方, 周辺視野においてちらつきが観測されたことから, DPM の高速投影における時間的な輝度変化に対し, 投影ずれ等の問題が知覚されないレベルでの時空間フィルタリングによるノイズ低減では不十分であったと考えられる.

#### 5. まとめ

本稿では, 知覚品質を低下させずに計算負荷を削減する手法を提案した. また, 947 fps の高速投影時においてもモーションブレイクが発生することを確認した. 更に, 提案手法の投影像において, 領域ごとに異なる解像度で描かれていることを確認した. 今後の課題として, 最適な spp の配分を行う手法の開発や, 高精度アイトラッカーの導入, 被験者実験による詳細な品質の調査がある.

#### 参考文献

- [1] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, Yoshihiro Watanabe. Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing. In *SIGGRAPH Emerging Technologies*, 2020.
- [2] 宮本駿一, 野元 貴史, 渡辺 義浩. 高フレームレート性を利用した投影型 AR のための知覚品質向上. 第 27 回バーチャルリアリティ学会大会, 1D5-4, 2022.
- [3] Lei Yang, Dmitry Zhdan, Emmett Kilgariff, Eric B. Lum, Yubo Zhang, Matthew Johnson, and Henrik Rydgård. Visually lossless content and motion adaptive shading in games. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Vol.2, No.1, 2019.
- [4] Brian Guenter, Mark Finch, Steven Drucker, Desney Tan, and John Snyder. Foveated 3D Graphics. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.31, No.6, 2012.
- [5] Okan Tarhan Tursun, Elena Arabadzhyska-Koleva, Marek Wernikowski, Radosław Mantiuk, Hans-Peter Seidel, Karol Myszkowski, and Piotr Didyk. Luminance-contrast-aware foveated rendering. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.38, No.4, 2019.
- [6] Robert L. Cook. Stochastic sampling in computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, Vol.5, No.1, pp.51–72, 1986.
- [7] Robert Bridson. Fast poisson disk sampling in arbitrary dimensions. In *ACM SIGGRAPH Sketches*, 2007.
- [8] Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa. High-speed and high-brightness color single-chip DLP projector using high-power LED-based light sources. In *The International Display Workshops*, 2019.