



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

# 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

宮本駿一<sup>1)</sup>, 野元貴史<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 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-31, miyamoto.s.af@m.titech.ac.jp)

**概要:** 高速プロジェクタとパストレーシングを用いることで、写実的なダイナミックプロジェクションマッピングが実現できる。しかし、動く物体に投影像を重ねるためには逐次描画を行う必要があるが、パストレーシングは確率的な近似を含むため、短時間での描画は誤差を含む問題がある。本稿では、高フレームレート性を利用した処理の高速化による、マッピング像の知覚上の品質向上手法を提案する。

**キーワード:** パストレーシング, 高速プロジェクタ, 投影型拡張現実

## 1. はじめに

プロジェクタを利用した投影型 AR は同時に複数の人間が裸眼で観察可能な拡張現実である。本稿では、同技術のうち、運動する物体に投影像を重ねて投影するダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) に着目する。DPM には、投影システム全体の遅延増大に伴い、投影対象の位置と投影位置にずれが生じ、没入感を損なう問題がある。同ずれを知覚させないためには、投影対象のセンシング、投影像の生成、投影などの処理を 500 - 1000 fps 程度で高速に行い、システム全体の遅延を小さくする必要がある。

一方、コンピュータグラフィクス (CG) の写実的な表現手法として、光線の衝突と反射をシミュレートするレイトレーシングを応用したパストレーシングが注目されている。同手法は、光線の反射方向をサンプリングして、モンテカルロ法で大域照明の計算を近似する。しかし、画素ごとのサンプリング数 samples-per-pixel (spp) が少ない場合は計算が収束せず、レンダリング結果にノイズが生じる。さらに、光線の反射計算は計算コストが高く、spp の増加に応じて計算時間は線形に増加する。そのため、現在のハードウェアの性能では、30 - 60 fps 程度でリアルタイムにレンダリングする場合でも、ノイズがなくなるほど高い spp でパストレーシングを行うことは難しい。

前述した技術を組み合わせ、Nomoto らは人間の時間的な視覚特性を利用し、パストレーシングを用いた DPM を提案した [1]。同手法は、DPM の低遅延の要請を満たすため、低い spp でノイズを含む映像を高フレームレートでレンダリングし、動く物体に追従可能な速度での投影を行う。さらに、物体が運動する場合も、高フレームレートで映像が切り替わることで、ノイズを含む複数の画像が人間の知覚上で積分されることを利用し、マッピング像のノイズを低減した。しかし、ノイズが低減された後でも、まだ知覚できるノイズが残っている問題があった。

以上のように、DPM では通常の液晶ディスプレイよりもはるかに高いフレームレートでレンダリング、映像の投影を行う。この特性は、シーン変化が微小になることによる過去フレームの再利用性の向上、知覚上の投影像の積分効果

といった時間的な効果を及ぼす。これらの特性を利用することにより、CG における従来手法に含まれる時間的な処理を省略することや、時間成分に対して発生する効果を高めることができると考えられる。そこで本稿では、ノイズの低減や処理の高速化のための CG の従来手法を高フレームレート性を利用した手法に拡張することを提案する。

## 2. 高フレームレート性を利用した投影像の品質向上

### 2.1 高フレームレート性を利用した時間フィルタリング

我々は、DPM のための高速な時間フィルタリングを提案した [2]。同手法は、DPM が高フレームレートで投影を行うことから、フレーム間のシーン変化が微小であることを利用する。これにより、フレーム間の画素対応を計算する処理を行わずに過去のフレームのパストレーシングの結果を再利用し、高速にフィルタリングを行う。 $i$  フレームでは、以下の式によりフィルタリングが行われる。

$$\bar{c}_i(X) = \alpha \cdot c_i(X) + (1 - \alpha) \cdot \bar{c}_{i-1}(X)$$

ここで、 $\bar{c}_i(X)$  は  $i$  フレームにおける画素  $X$  の時間フィルタリングによる出力、 $c_i(X)$  は  $i$  フレームの画素  $X$  のパストレーシングの計算結果である。 $\bar{c}_i(X)$  はバッファに保存され、 $i+1$  フレームのフィルタリングに使用される。また、 $\alpha$  は  $0 < \alpha \leq 1$  を満たすパラメータで、小さいほど過去のフレームの寄与が大きくなり、ノイズが減少するが、残像やハイライトの遅れといったアーティファクトが発生しやすくなる。このアーティファクトはフレーム間のシーン変化によって発生するが、同変化は高フレームレートでレンダリングするほど微小になる。そのため、DPM における高フレームレート投影下では、アーティファクトの発生を抑制できる。

### 2.2 過去のフレームを利用したパストレーシングの計算量低減

4K のように解像度の高い画像をリアルタイムに 60 fps でレンダリングするために、Mansouri はチェッカーボードレンダリングを提案した [3]。同手法は、1 フレームに含まれる画素をチェッカーボードのように 2 つのグループに分割し、毎フレーム片方のグループにのみ陰影付けの計算をすることで、目的の解像度の画像をレンダリングする。ここで、陰

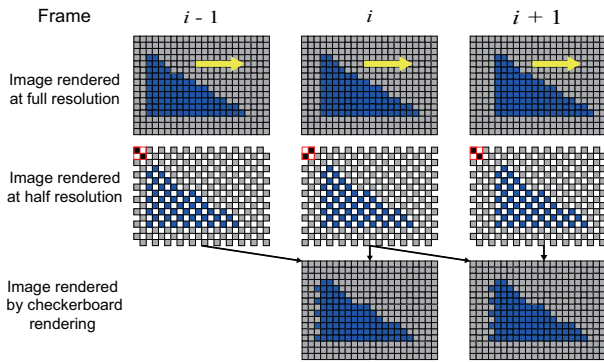


図 1: 本稿で用いるチェッカーボードレンダリング. フレーム間の対応を計算せず、パストレーシングの計算を行っていない画素は全て過去フレームの同一画像座標から補間する.

影付けの計算を行わないグループは、フレーム間のシーン変化による画素位置の対応を表すモーションベクターをもとに補間を行う。現在のフレームと直前のフレームで対応する画素の深度や物体の ID を比較し、シェーディング結果が再利用できる場合は過去のフレームから補間する。遮蔽などにより過去のフレームを参照できない場合は現在フレームの周辺の画素から補間を行う。この補間の処理により、陰影付けの計算量を半減させ、1 フレームあたりのレンダリング速度を向上させる。

本稿では、前述した手法をもとにして、一部の処理を省略した手法を用いる。図 1 に本手法の概要を示す。DPM では、従来よりも非常に高いフレームレートでレンダリングを行う。そのためフレーム間の物体の移動は微小になり、直前にレンダリングしたフレーム内での物体位置の変化量が 1 ピクセル前後にとどまると考えられる。そのため、本稿ではシーン変化の影響を無視してフレーム間の画素の対応の判定を省略し、全て直前のフレームの同一座標の画素より補間を行う。これにより、従来のチェッカーボードレンダリングをさらに高速化する。

### 2.3 ブルーノイズを用いたマッピング像の品質向上

DPM において、運動する実物体以外の床のような物体は、運動物体の移動によって陰影が変化するが、それ自体は静止しているため、注視されづらい。しかし、投影する映像の中で床の占める割合は大きくなる場合が多く、運動する物体と同様にパストレーシングを行うと計算リソースを大きく消費する。本節では、床面に対するパストレーシングを簡略化した上で、ブルーノイズを用いて知覚上での品質を維持することを提案する。

高周波成分を多く含むノイズはブルーノイズと呼ばれるが、ブルーノイズはホワイトノイズと比べて、人間の知覚上ではきれいに見える性質がある。この性質を利用し、パストレーシングのレンダリング画像に含まれるノイズをブルーノイズとして分布させることで、知覚上での画像の品質を向上させることができる。同条件を満たすため、反射方向のサンプリングに乱数値ではなくブルーノイズを用い

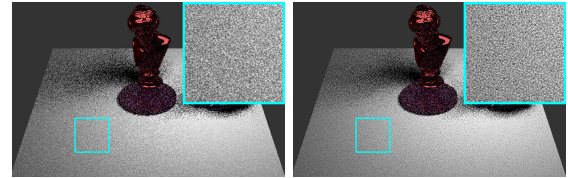


図 2: 床面のサンプリング方法の違いによる変化. 左: 平面光源 (画像右上) から 1 点をランダムにサンプリング. 右: 同光源からブルーノイズスタイルを乱数値として用いてサンプリング.

る方法 [4] や、前のフレームをもとにフレーム内で画素値を置換することでブルーノイズとして分布させる方法 [5] が提案されている。これらの手法では、ブルーノイズはあらかじめ計算したものをテクスチャとして読み込み使用する。

本稿では、Georgiev らの手法 [4] を用いて、ブルーノイズを用いたサンプリングを行う。ここで、本節の冒頭で述べたように、同手法を適用する物体は床のような静的な物体に限定する。また、パストレーシングでは光源上の点から明示的にブルーノイズを用いたサンプリングを行って直接光のみの寄与を計算する。これによりノイズの知覚的な品質を維持しつつ光線の反射の回数を減らす。

図 2 に白い床面に対してブルーノイズによるサンプリングを用いた例を示す。ランダムなサンプリングに対し、ブルーノイズによるサンプリングによってノイズが均等に分布していることが確認できる。

また、本稿では、Wolfe らが提案した手法で作成されたブルーノイズスタイルを使用する [6]。同手法で生成したスタイルは、複数枚を系列としてもつことで時間的にもブルーノイズの特性を持つ。DPM では、高フレームレート投影によって連続する投影画像が知覚上で積分されるため、フレーム間の時間的な高周波の変化がビデオレートによる表示以上に知覚しづらいと考えられる。

## 3. 実験

### 3.1 実験条件・システム

提案手法を用いて投影像のレンダリングを行い、処理速度の変化を検証した。また、高速プロジェクタでスクリーンへの投影を行い、品質の変化を確認した。

図 3 左に本実験で用いたシステムを示す。実験に用いた計算機は、CPU に AMD Ryzen 9 3950X 3.5 GHz、GPU に GeForce RTX 3090 を搭載したものである。プロジェクタは 24 bit で最大 947 fps でのカラー投影が可能なプロジェクタ (解像度 1024×768) [7] を用いた。スクリーンと高速プロジェクタは 1 m の間隔をあけて設置した。撮影用カメラは SONY ILCE-7RM4 であり、焦点距離は 48 mm、シャッタースピードは 1/60 秒とした。同カメラを高速プロジェクタの上部に設置し、スクリーンに映る投影像を撮影した。

次節以降のレンダリング速度の計測およびスクリーン投影においてレンダリングしたシーンを図 3 右に示す。このシーンは、拡散反射成分のみをもつ床の上に鏡面反射成分

表 1: 処理速度と計算可能な spp. 最大 spp は 947 fps 以上で計算できる最大の spp を表す. (a) 通常のパストレーシング, (b) ブルーノイズ, (c) 時間フィルタ, (d) チェッカーボードレンダリング, (e) (b), (c), (d) の手法の統合.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
最大 spp	3	3	3	6	6
上記 spp 時のフレームレート	1033	1026	1018	976	951
1 spp 固定時のフレームレート	1620	1615	1580	1960	1925

をもつ Stanford bunny (以下, bunny とする) と, ヴィーナナス像 (以下, venus とする) が配置されているものである. venus は円形のテーブルの上に配置されている. bunny と venus は運動する物体を想定して回転しており, bunny は左右への平行移動も同時に行う. 回転と平行移動の周期は 3.8 秒であり, この運動によってシーンが変化する. 天井には 1 つの正方形の光源が設置されている. また, 前後左右の壁は, 投影像のレンダリング時には描画せず, bunny や venus に間接的にのみ写り込む.

### 3.2 レンダリング速度の計測

提案手法を用いてレンダリングを行った場合における処理速度及び同一フレームレート時の計算可能な spp の計測を行った.

まず, 2 節で提案した 3 つの手法をそれぞれ用いた場合及び 3 つの手法を同時に用いた際の 1 spp でのパストレーシングのレンダリングのフレームレートを計測した. 次に, 計測したフレームレートが本実験で用いるプロジェクトの最高フレームレートである 947 fps 以上である場合, 947 fps を超える中でフレームレートが最も小さくなるように spp を調整した. この操作により, 同一フレームレートでレンダリングした際のレンダリング画像の品質向上の程度を確認した.

表 1 にそれぞれの 1 spp 時の処理速度および 947 fps でレンダリング時に計算可能である spp を示す. ブルーノイズと時間フィルタリングは通常のパストレーシングに対して 3% 以下の速度低下で実行でき, チェッカーボードレンダリングは通常のパストレーシングと比較して 2 倍の spp が計算可能であった. また, 3 つの手法を統合した場合においても, それぞれの手法を独立に用いた場合と同様に処理時間が変化した.

### 3.3 スクリーン投影

提案手法を用いて投影像をレンダリングし, スクリーンに向けて高速プロジェクタで投影を行った. 比較対象は 3.2 節で用いた 5 通りのレンダリング方法と, 1000 spp のパストレーシングでレンダリングしたリファレンスである. また, 本実験ではリアルタイムでのレンダリングが不可能であるリファレンスとの比較のため, 全てプリレンダリングした映像を読み込んで投影する.



図 3: 左: スクリーン投影のシステム構成. 右: レンダリングしたシーン. 投影像をレンダリングする際には後方と左右の壁は描画せず, 間接光のみを計算する.

スクリーンにレンダリング画像を 947 fps で投影し, 撮影した結果を図 4 に示す. 通常のパストレーシングと比較して, ノイズが低減されていることが確認できる.

## 4. まとめ

本稿では, CG の分野で開発されたノイズ低減技術やレンダリングの高速化の技術を DPM に使用するために拡張した手法を提案した. 拡張に当たり, 過去フレームの再利用性の向上, 知覚上の投影像の積分効果といった DPM の高フレームレート投影によって得られる時間的な効果を用いた. また, 実際に本手法を用いて 947 fps でのレンダリングを行い, 床面のような静的な物体の品質を維持しながら, 投影対象である運動する物体へのマッピング像のノイズを低減した.

## 参考文献

- [1] Nomoto, T., Koishihara, R. and Watanabe, Y.: Realistic Dynamic Projection Mapping Using Real-Time Ray Tracing, in *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*.
- [2] 宮本駿一, 野元 貴史, 渡辺義浩: 高フレームレートの動的投影に向けた時間の再利用によるパストレーシングのデノイズに関する検証, 第 65 回複合現実感研究会, MR2022-4 (2022).
- [3] Jalal El Mansouri, : Rendering Rainbow Six Siege, *Game Developers Conference* (2016).
- [4] Georgiev, I. and Fajardo, M.: Blue-Noise Dithered Sampling, in *ACM SIGGRAPH 2016 Talks* (2016).
- [5] Heitz, E. and Belcour, L.: Distributing Monte Carlo Errors as a Blue Noise in Screen Space by Permuting Pixel Seeds Between Frames, *Computer Graphics Forum*, Vol. 38, No. 4, pp. 149–158 (2019).
- [6] Wolfe, A., Morrical, N., Akenine-Möller, T. and Ramamoorthi, R.: Scalar Spatiotemporal Blue Noise Masks, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2112.09629 (2021).
- [7] Watanabe, Y. and Ishikawa, M.: High-Speed and High-Brightness Color Single-Chip DLP Projector Using High-Power LED-Based Light Sources, *Proceedings of the International Display Workshops*, p. 1350 (2019).



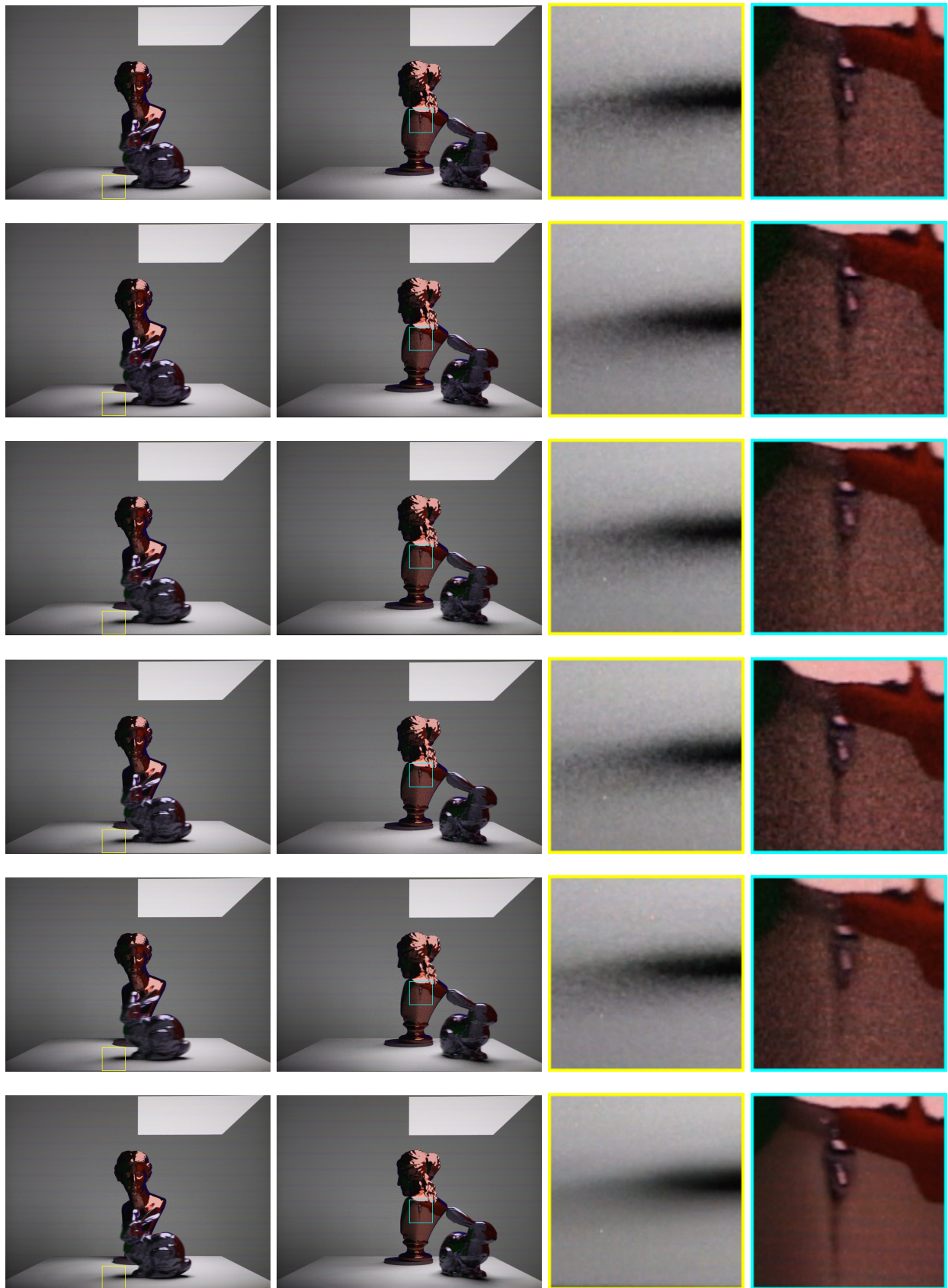


図 4: スクリーンに投影した映像を撮影した結果. 上段から順に, 通常のパステレーシング, 2.1 節の時間フィルタ, 2.2 節のチェッカーボードレンダリング, 2.3 節のブルーノイズサンプリング, 3 つの手法の統合, 1000 spp で計算したリファレンスの結果を示している.