

LOD 付き BVH による動的拡散大域照明の高速化手法の提案

2431064 小林千浩 成見研究室

1 はじめに

近年の CG 分野において、リアルタイムかつ高品質な画像生成への要求が高まり続けている。映画やゲーム、拡張現実など、多様な応用分野において、現実に近い見た目を即時に描画する技術は、ユーザー体験の質を大きく左右する。

このようなリアルタイム CG における画質向上の鍵の一つがグローバルイルミネーション (GI) である。GI とは、直接光だけでなく、物体間の反射や散乱などを考慮することで、より自然でリアルな照明効果を実現する技術である。しかし、GI の正確な計算は膨大な計算資源を必要とするため、リアルタイムアプリケーションでは近似的な手法の導入が不可欠となっている。

2 動的拡散大域照明 (DDGI)

Dynamic Diffuse Global Illumination (DDGI) は、Majercik 氏らによって提唱された、「レイトレーシング」と「プローブベースの GI 手法」を組み合わせた手法で、動的な環境でリアルタイムに大域照明を実現可能である [1]。DDGI では、まず空間内に照明情報をサンプリングする「仮想的なセンサー (プローブ)」をあらかじめ配置する。そして、各プローブから毎フレーム一定数のレイを飛ばして照明情報を取得し、それをプローブごとに蓄積・更新していく。ただし、すべてのプローブを 1 フレーム内で完全に更新するわけではなく、複数フレームにわたって徐々に情報を蓄積していくことで、全体として安定した間接照明を実現している。このようにして、1 フレームあたりの計算負荷を抑えながら、時間をかけて照明情報を更新し続けることで、動的なシーンに対しても、正確な GI 表現が可能となっている。図 1 は、シーン内に配置されたプローブ群を示したものである。

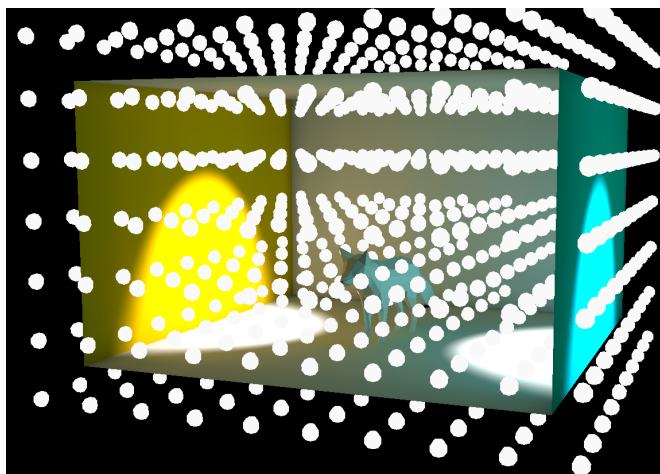


図 1: コーネルボックスに配置されるプローブ群

3 提案手法

DDGI は、レイトレーシングとプローブベース GI の利点を活かし、リアルタイムかつ動的な間接照明を実現する有力な手法である。しかし、その計算負荷は決して小さくなく、特に大規模なシーンやプローブの数が多い場合には、依然としてパフォーマンス上の課題が残る。DDGI の計算コストはプローブ数に比例して増加するが、一方で、カメラから遠くにあるプローブは視覚的な影響度が小さく、必ずしも高精度な照明情報を必要としない場合が多い。

そこで、本研究では、カメラからの距離に応じて、プローブが使用するシーン表現の精度 (Level of Detail, LOD) を動的に調整することで、高速化する手法を提案する。具体的には、距離に応じて粗いモデルから構成された Bounding Volume Hierarchy (BVH) を使用し、遠方のプローブに関しては簡略化されたモデルとの衝突判定を行わせることで、精度と処理速度のバランスを取ることを目的とする。このアプローチにより、シーン全体に多数のプローブを配置しても、近距離の重要な領域には高精度な処理を適用しつつ、遠距離では効率的な簡易処理が可能となり、DDGI のリアルタイム性とスケーラビリティの両立が期待される。

4 既存研究

4.1 Scaling Probe-Based Real-Time Dynamic Global Illumination for Production

Majercik 氏らは、前述の DDGI に対して、「プローブの再配置」や「スリープ状態の管理」などを用いた最適化手法を提案している [2]。これにより、必要な領域のみに計算資源を集中させることで、効率的なプローブ更新を実現している。しかしこの手法では、すべてのプローブに対して共通のシーン構造 (同一 LOD の BVH) を使用しており、プローブごとに異なる詳細度 (LOD) の BVH を選択するようなアプローチはとられていない。

4.2 Signed Distance Fields Dynamic Diffuse Global Illumination

Hu 氏らは、DDGI への Signed Distance Field (SDF) の使用を提案しており、シーンを距離場として表現することで、プローブ配置の最適化や、視覚的なノイズの低減に貢献している [3]。この手法では距離に応じてプローブ密度を変化させる工夫がされているが、SDF に基づく表現であるため、BVH ベースのレイトレーシングとは異なる枠組みであり、本研究のような LOD 付き BVH の活用とは技術的に異なる。

5 アプリケーションの構成

図 2 に、本研究で作成したアプリケーションの構成を示した、黒枠は処理、赤枠はデータ、を表す。全体の動作は以下ようになる。

1. **Ray Trace** (レイ追跡) シーン内に配置されたプローブからレイが発射される。レイは環境内のオブジェクトと衝突し、その「ヒット情報」を取得する。
2. **Blend** (合成処理) 「ヒット情報」は、このフェーズで集約・合成され、放射照度マップにエンコードされる。
3. **Sample** (サンプリング) ライティング計算の際に、「Blend」フェーズで生成された「プローブの放射照度マップ」を参照する。

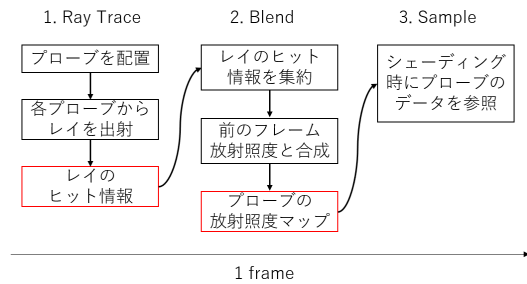


図 2: プログラムの構成とデータの流れ

6 評価および考察

6.1 プロブトレースの速度の評価

プロブトレースにおけるレイトレースの速度を比較する。比較に当たっては、レンダリングするシーン、使用する GPU, LOD 切り替えの閾値、を変えて計測した。GPU は、Nvidia RTX 3080ti, Nvidia RTX 4070, AMD Radeon 780M を使用した。シーンは Sponza と Forest を使用し、総ポリゴン数はそれぞれ 262,267 と 28,834,880 である。また、各プローブにおけるレイ数は 256 とした。表 1 に計測結果を示す。No LOD は、LOD の切り替えを行わない場合のトレース時間である。

表 1: 各種 GPU におけるプロブトレースの時間 [ms]

Scene	LOD Threshold		No LOD
	1	4	
Sponza(3080ti)	1.047	1.181	1.193
Forest(3080ti)	3.183	4.392	4.867
Sponza(4070)	1.783	1.958	1.974
Forest(4070)	4.812	6.088	6.675
Sponza(780M)	47.027	49.387	51.293
Forest(780M)	144.378	183.188	200.427

6.2 参照レンダリングとの比較

参照用にレンダリングした画像と、提案手法を用いて生成した画像との比較を行う。参照画像には、レイトレーシングに使用する BVH の LOD を 0 に固定し、目視で変化を確認できない状態から、さらに 10,800 フレームレンダリングした結果を用いる。一方、提案手法による画像は、LOD 切り替えの Threshold を 1 または 4 に変化させた 2 種類の設定で生成した。図 3 は Forest における参照画像と提案手法による画像である。

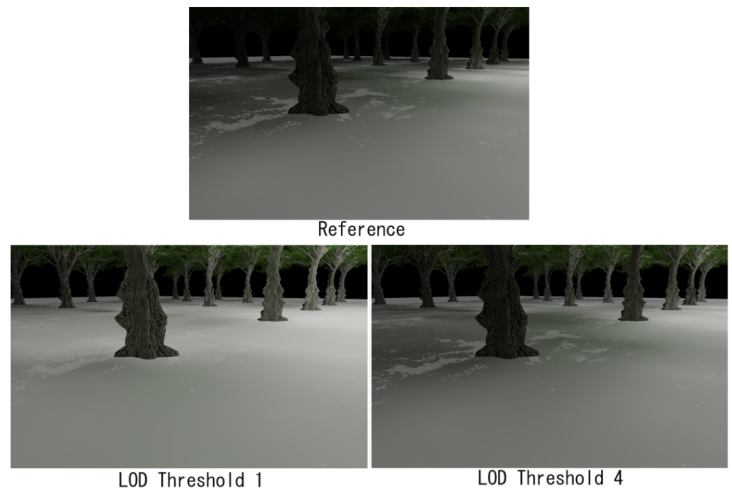


図 3: 参照レンダリングとの比較

6.3 考察

Sponza では、LOD 導入によるレイトレースの高速化率はおおむね 8~13% 程度であったが、Forest では約 28~34% レイトレースの高速化が達成された。これは、Forest シーンが Sponza シーンよりも多くのプリミティブを含むため、トレース時間の減少が顕著に表れたためだと思われる。また、Forest シーンでは、LOD Threshold の設定によって見た目の変化が比較的顕著に現れた。特に Threshold を小さく設定した場合には、木の枝葉による遮蔽が簡略化され、地表面の間接光が広がることで、全体的に明るい印象となった。これは、LOD 切り替えによって枝や葉の密度が低下し、遮蔽サンプリングが粗くなった結果だと思われる。

7 おわりに

本研究では、LOD 付き BVH を使用することにより、DDGI におけるレイトレース処理の高速化手法を提案した。

実験の結果、特に大規模シーンにおいて有効な高速化が確認され、提案手法の有効性が示された。今後の課題としては、LOD 切り替え条件の自動最適化や、画質劣化をより抑えた手法の検討が挙げられる。

参考文献

- [1] Zander Majercik, Jean-Philippe Guertin, Derek Nowrouzezahrai, and Morgan McGuire. Dynamic diffuse global illumination with ray-traced irradiance fields. *Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT)*, Vol. 8, No. 2, pp. 1-30, June 2019.
- [2] Zander Majercik, Adam Marrs, Josef Spjut, and Morgan McGuire. Scaling probe-based real-time dynamic global illumination for production. *Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT)*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-29, May 2021.
- [3] Jinkai Hu, Milo K. Yip, Guillermo Elias Alonso, Shihao Gu, Xiangjun Tang, and Xiaogang Jin. Signed distance fields dynamic diffuse global illumination. *CoRR*, Vol. abs/2007.14394, 2020.