

令和元年5月11日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05308

研究課題名（和文）多体型マルコフ連鎖による超並列光伝搬シミュレーション

研究課題名（英文）Embarrassingly Parallel Light Transport Simulation using Ensemble Markov Chain Monte Carlo

研究代表者

蜂須賀 恵也 (Hachisuka, Toshiya)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：00748650

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,470,000円

研究成果の概要（和文）：光伝搬シミュレーションは、映像産業や建築等で、写実的な画像を生成するための重要な技術であり、その計算効率の向上が多くの応用にとって必要とされている。このようなシミュレーションは、通常、幾何光学に基づいた定積分として定式化され、その解をコンピュータ上で計算する手法として、モンテカルロ法が使われている。本研究では、モンテカルロ法の中でも、優位な手法とされているマルコフ連鎖モンテカルロ法に注目した。特に、マルコフ連鎖が、本質的に逐次的な処理であり、並列計算に本質的に向かないという問題を解決するため、複数のマルコフ連鎖を組み合わせる多体型マルコフ連鎖について研究し、新たな計算手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、光伝搬シミュレーションの計算の高速化に貢献するものである。光伝搬シミュレーションは、映画やCMなどの映像産業、工業デザインや建築の照明計算などで使われており、現代社会には欠かせない技術である。一方で、光伝搬シミュレーションの計算時間は膨大であり、様々な応用で大きな問題となっているため、計算速度の向上が非常に必要とされる技術でもある。本研究では、光伝搬シミュレーションにおける既存の計算手法を学術的に見直し、本質的な計算速度の向上および、近年重要となる並列計算への適合度を向上させた。これにより、光伝搬シミュレーションの各種応用で計算速度の大幅な削減が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Light transport simulation is an important technique for synthesizing photorealistic images. Accelerating the computation of light transport simulation is thus much needed in many practical applications. Light transport simulation is usually formulated as a definite integral derived from geometric optics, and Monte Carlo methods are often used to estimate the solution to this integral. In this project, we focused on Markov chain Monte Carlo methods which are considered to be superior to Monte Carlo methods in many problems. In particular, we were able to remove the fundamental sequential nature of Markov chains, which is not suitable for parallel computation, by developing novel ensemble Markov chain Monte Carlo methods.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：レンダリング マルコフ連鎖 モンテカルロ 並列計算

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

光伝搬シミュレーションとは、物体の形状や材質、光源の明るさなどがデータとして与えられたとき、光が反射・屈折をして伝搬した結果を計算機上でシミュレーションする技術である。光伝搬シミュレーションを行い、カメラや目に届く光の強さを計算することで、コンピュータグラフィックスによる写実的な画像の生成を行うことができるため、近年、映画などの映像産業や工業デザインなどで、重要な基盤技術として使われている。

このようなシミュレーションは、計算機上では幾何光学に基づいた定積分を解く問題として定式化することが可能である。計算のアルゴリズムとして、特に乱数を用いて定積分を計算するモンテカルロ積分が使われているが、中でも近年注目を集めている手法は、マルコフ連鎖モンテカルロ法である。通常のモンテカルロ法では独立した乱数でサンプルを生成するのに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ法は、一つのサンプルを微小に変化させながら、そのサンプルの軌道の履歴をサンプル集合とする。マルコフ連鎖モンテカルロ法は従来のモンテカルロ積分に対して明らかな優位性があり（図1）、盛んに研究が行われている。

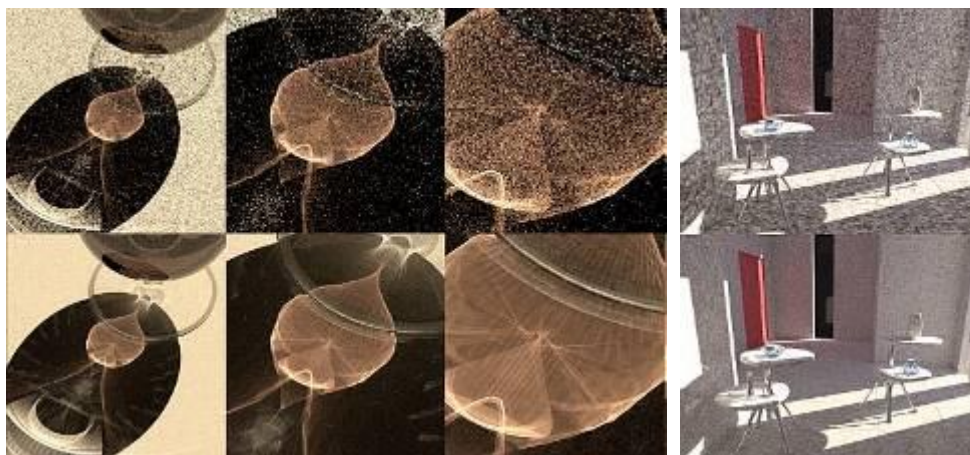


図1. 同計算時間でのモンテカルロ法（上段）とマルコフ連鎖モンテカルロ法の比較（下段）

### 2. 研究の目的

マルコフ連鎖モンテカルロ法は、新たなサンプルの生成が前のサンプルに依存するため、根本的に逐次型のアルゴリズムである。これはメニーコア CPU や GPU などの並列計算機と相反する特徴であり、並列計算による高速化が困難なアルゴリズムである。従って、本研究では、光伝搬シミュレーションでの応用を意識した、並列計算に適したマルコフ連鎖モンテカルロ法について研究を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、単純に既存のマルコフ連鎖モンテカルロ法を、実装の工夫によって並列化するのではなく、並列に走る複数のマルコフ連鎖を統合して扱う、多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づいた手法を開発する。これは理論的な検証だけにとどまらず、応用例として光伝搬シミュレーションによる写実的な画像の生成を扱い、従来の手法に比べて実際に計算効率が向上することを確認する。

### 4. 研究成果

#### (1) 既存の多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法の光伝搬シミュレーションへの応用

新たな多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法の開発を行う基盤として、既存の多体型モンテカルロ法を光伝搬シミュレーションへの応用を行った。この研究成果では、密度推定法および経路積分法を統合する光伝搬シミュレーションの計算モデルを用いている。この計算モデルはモンテカルロ積分によるアルゴリズムのみが存在しており、本研究成果は、このモデルにマルコフ連鎖モンテカルロ法を初めて適用したものである。このアルゴリズムは、マルコフ連鎖間の相互作用はないものの、並列計算に適したモデルで、多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法の有効性を示した（図2）。この成果は ACM SIGGRAPH Asia 2016 で発表済みである。

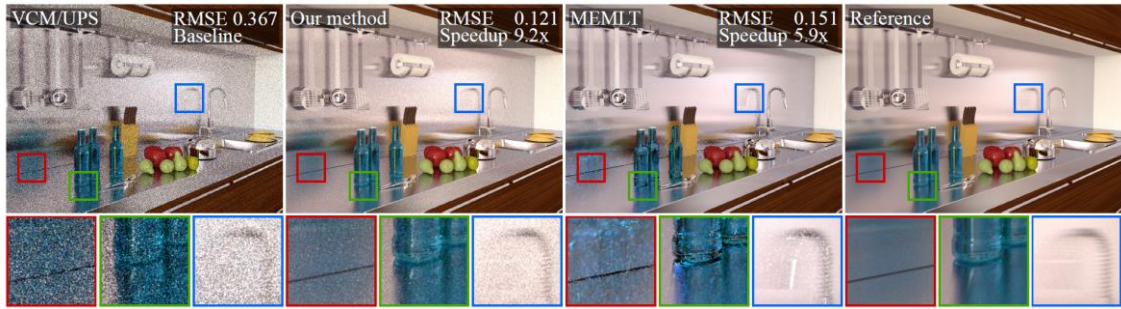


図 2. 同計算時間でのモンテカルロ法 (VCM/UPS)、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MEMLT) および多体型モンテカルロ法 (Our method) との比較

### (2) 勾配空間における光伝搬シミュレーション

(1)の成果は、多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法ではあるが、マルコフ連鎖を計算する処理自体はそれぞれ独立である。本研究の当初の目的を達成するため、多数のマルコフ連鎖間の効率的な連携について検討を進めるうちに、勾配空間における光伝搬シミュレーションとの関連を見出すことができた。それらの知見によって、研究の当初では予期していなかった、勾配空間における光伝搬シミュレーションにおける成果を得ることができた。

通常の光伝搬シミュレーションでは、画像のピクセルそれぞれの値を計算するが、勾配空間での光伝搬シミュレーションでは、隣り合うピクセルの値の差 (勾配) を計算し、その勾配画像から最終的な画像を計算するという、二段階の処理を行う。そのような勾配の計算では、隣り合うピクセルで、計算に使うサンプルに正の相関を持たせると効率が良くなることが知られており (shift mapping)、本来独立している隣り合うピクセルでのサンプル生成に相互作用があると見なすこともできる。これは、後に述べる新たな多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法についての成果において、複数のマルコフ連鎖を連携させる手法として採用することができた。

勾配空間における光伝搬シミュレーションに関する成果としては、従来は経路積分法でのみ実行されていたものを、世界で初めて密度推定法に適用し、それを使った光伝搬シミュレーションの手法を開発した。これら一連の成果では、通常の光伝搬シミュレーションに加えて、煙や雲など光の散乱引き起こす物体 (関与媒質と呼ばれる) でのシミュレーションについても適用し、関与媒質においては必ずしも全ての手法で勾配空間によるシミュレーションが有効でない事を示した (図 3)。これらは Eurographics 2017, SIGGRAPH 2018 など で発表済みである。

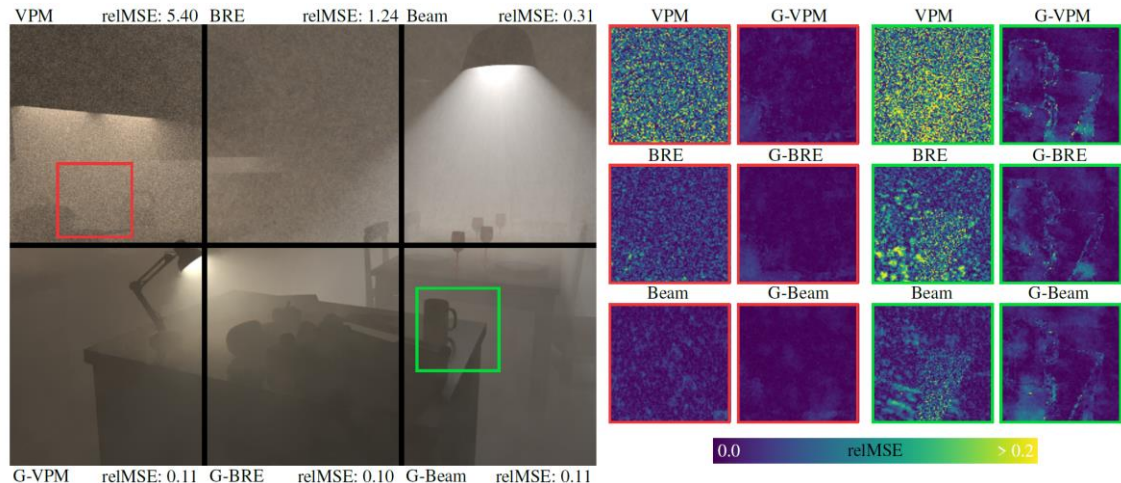


図 3. 勾配空間における関与媒質のシミュレーション誤差の比較。VPM, BRE, Beam はそれぞれのシミュレーション手法を示し、G-VPM, G-BRE, G-Beam が対応する勾配空間での手法を示す。

### (3) マルコフ連鎖モンテカルロ法における状態空間の連結

本研究を通して得られた、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた光伝搬シミュレーションの知見により、従来は組み合わせることが出来なかった複数の状態空間 (パス空間と乱数空間) を統合する手法を開発した。これは、多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法とは直接関連はないが、コンピュータグラフィクスにおける一連のマルコフ連鎖モンテカルロ法を統合する理論的な枠組みを提案するものであり、マルコフ連鎖を自動的にうまく動作する状態空間に誘導することができる (図 4)。この成果は ACM SIGGRAPH 2017 で発表済みである。

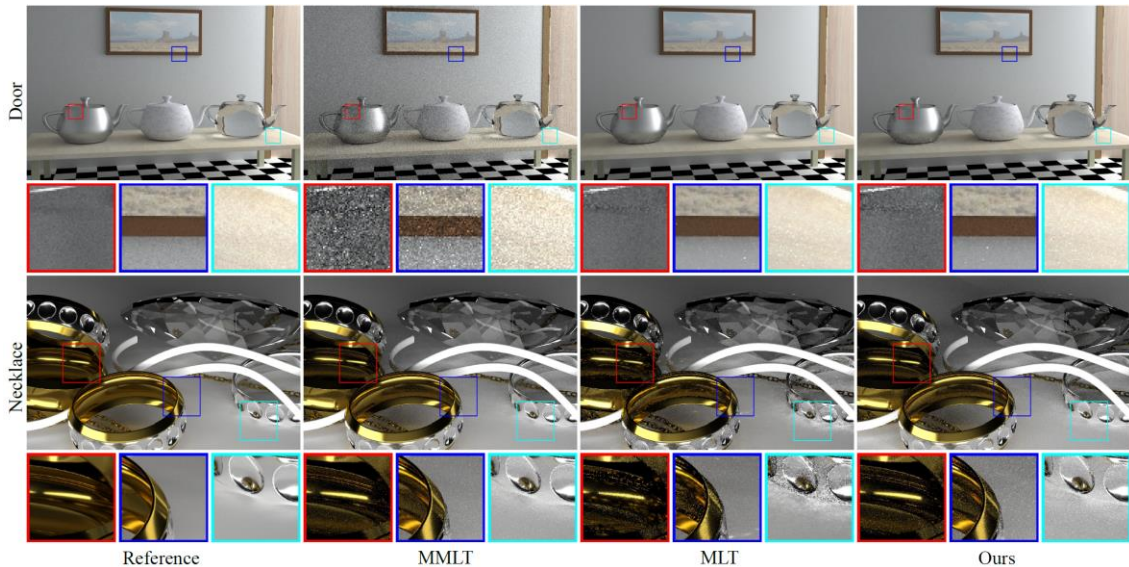


図4. 同時間での乱数空間のみ (MMLT)、パス空間のみ (MLT)、および結合空間(Ours)での結果

#### (4) 多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法による層化サンプリング

これらすべての知見を活かし、当初の目標であった新たな多体型マルコフ連鎖モンテカルロ法を、特に層化サンプリングと組み合わせることで実現した。従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法では、計算する領域のある部分ではサンプルが偶然まったく生成されないという事が起こりうる。これは、光伝搬シミュレーションへの応用においては、画像全体が均一に計算されないという事を意味し、画像全体での誤差の分布が不均一になるという問題があった。通常のモンテカルロ法では、計算領域を小さな領域の集合に分け、それぞれを個別にサンプリングする、層化サンプリングと呼ばれる手法で解決できる。しかし、マルコフ連鎖モンテカルロ法では層化サンプリングは行えないことが知られている。そのため本質的にマルコフ連鎖モンテカルロ法では解決できない問題とされていたが、本研究ではそれを初めて解決した。

具体的には、層化サンプリングと同様に計算領域を小さな領域の集合に分け、それぞれでマルコフ連鎖モンテカルロ法を行う。この時、小領域は互いに重なるようにする。次に、計算結果の整合性を保証するため、重なった領域では計算結果が同じになるという性質を利用して、多数のマルコフ連鎖による計算結果を整列させる。この整列の処理は、これまでこの研究プロジェクトで得られた勾配空間でのレンダリングの知見によって、対数勾配空間でのレンダリングと定式化できることを発見した。それにより、マルコフ連鎖同士の連結は、対数勾配空間でのポアソン方程式によって行える事も判明した。これにより、光伝搬シミュレーションへの適用でも、従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法に比べて、優位性を示すことができた (図5)。この成果は、コンピュータグラフィクス分野での論文として発表予定である。



図5 : 同計算時間での層化サンプリングがない従来の MCMC と、我々の手法 (Ours) の比較

今後の展望として、光伝搬シミュレーション以外の問題へ適用し、より一般化された手法としてまとめた研究成果を発表したい。特に、マルコフ連鎖モンテカルロ法による層化サンプリングの実現は、他の問題でも大きなインパクトを持つものであると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① Gruson, A., Hua, B. S., Vibert, N., Nowrouzezahrai, D., Hachisuka, T. "Gradient-domain volumetric photon density estimation". ACM Transactions on Graphics (TOG), 37(4), 82. 2018. doi:10.1145/3197517.3201363.

- ② Hua, B. S., Gruson, A., Nowrouzezahrai, D., Hachisuka, T. "Gradient-domain photon density estimation". Computer Graphics Forum (Vol. 36, No. 2, pp. 31-38). 2017. doi:10.1111/cgf.13104
- ③ Otsu, H., Kaplanyan, A. S., Hanika, J., Dachsbacher, C., Hachisuka, T. "Fusing state spaces for Markov chain Monte Carlo rendering". ACM Transactions on Graphics (TOG), 36(4), 74. 2017. doi:10.1145/3072959.3073691
- ④ Šik, M., Otsu, H., Hachisuka, T., Křivánek, J. "Robust light transport simulation via Metropolised bidirectional estimators". ACM Transactions on Graphics (TOG), 35(6), 245. 2016. doi:10.1145/2980179.2982411

[学会発表] (計 5 件)

- ① Gruson, A. "Gradient-domain volumetric photon density estimation". ACM SIGGRAPH 2018.
- ② Gruson, A. "Gradient-domain photon density estimation". Eurographics 2017.
- ③ Otsu, H. "Fusing state spaces for Markov chain Monte Carlo rendering". ACM SIGGRAPH 2017.
- ④ Šik, M. "Robust light transport simulation via Metropolised bidirectional estimators". ACM SIGGRAPH Asia 2016.

[その他]

研究代表者のホームページ : <https://www.ci.i.u-tokyo.ac.jp/~hachisuka/>

## 6. 研究組織

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。