

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））
研究期間：2019～2019
課題番号：18KK0309
研究課題名（和文）勾配空間およびその一般化空間における光伝搬シミュレーション

研究課題名（英文）Light Transport Simulation in Generalized Gradient-Domain

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） 6,900,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、写実的な画像の生成に使われる、光の伝搬のシミュレーションの発展に取り組んだ。特に、その計算手法として現在注目を集めている、マルコフ連鎖モンテカルロ法に関する課題で、二つの成果が得られた。一つめの成果として、マルコフ連鎖モンテカルロ法において、計算の精度が画像上で不均一になるという根本的な問題を解決した。二つめの成果として、マルコフ連鎖モンテカルロ法におけるさまざまな既存手法を、delayed rejectionという枠組みで複数組み合わせ、光の伝搬のシミュレーションを高速化する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光伝搬シミュレーションは、物体の形状や光源・反射特性などをすべて同時に考慮する必要があり、膨大な計算が必要な問題である。その計算手法の一つとして、マルコフ連鎖モンテカルロ法が、有効なものとして研究されてきている。しかしながら、マルコフ連鎖モンテカルロ法によって生成された結果には、誤差が画像の一部だけ大きくなる（例えば本来より暗いと推定される）など、誤差が画像上で不均一になるという問題があり、根本的に解決は難しいとされていた。本研究の成果の一つにより、マルコフ連鎖モンテカルロ法の利点を保ちつつ、画像上の誤差を均一に保つこと世界で初めて可能にした。

研究成果の概要（英文）：This research project had investigated light transport simulation, which is used to generate photorealistic images. In particular, we have two main results on Markov chain Monte Carlo, which is actively investigated as a method for light transport simulation. The first result is a solution to the fundamental problem of non-uniform error distribution on images generated by Markov chain Monte Carlo. The second result is an application of delayed rejection. This application allows us to efficiently combine various Markov chain Monte Carlo methods in light transport simulation.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：レイトレーシング マルコフ連鎖モンテカルロ

1. 研究開始当初の背景

映像産業やデザインにおいて、写実的な画像を計算するためによく使われるのは、光の伝搬のシミュレーションを計算機上で行い、その結果を画像として出力する手法である。光の伝搬の計算モデルには様々なものがあるが、特によく使われるものが、幾何光学に基づいた定積分による定式化である。この定式化では、画像のある点(ピクセル)に届く光の強さが、その点に届く、ありとあらゆる光の経路に対しての定積分の値として定義される。この定積分の被積分関数は、物体の形状や材質などによって複雑に変化するため、解析的に解けない事が多い。そのため、モンテカルロ法を用いた数値積分(モンテカルロ積分)によって、計算機上で定積分の値を推定する。



モンテカルロ積分による光伝搬シミュレーションでは、画像のピクセル一つ一つに対して数値積分を実行する。したがって、ピクセルの数に比例して計算時間が増える。しかしながら、結果として得られる画像は、上記の左図に示すように、物体の輪郭などを除けば非常に滑らかになることが多い。なめらかな領域にあるピクセルの値は非常に似通っており、そのような領域でピクセルの値を一つ一つ計算するのは無駄であるとも言える。実際に、画像の空間勾配を計算すると、上記の右図に示すように、輪郭などを除いて殆どの値がゼロに近くなるため、なめらかな領域では、ピクセルの空間勾配は単にゼロとしてもよい近似値となる事がわかる。

このようなピクセルの勾配の特徴を利用して、光の強度ではなく、その勾配を直接計算し、計算された勾配から画像を構築する、勾配空間レンダリング(Gradient-Domain Rendering)と呼ばれる手法がある。研究開始当初は、この考え方を「光の強度の勾配をとる」という数学的な演算を一般化し、勾配以外の新たな演算をもとに画像を計算する、一般化勾配空間レンダリング(Generalized Gradient-Domain Rendering)を定式化することを目標としていた。また、空間勾配と、モンテカルロ法の一つであるマルコフ連鎖モンテカルロ法との繋がりについても考察し、実用的な計算手法としてまとめる事も目的としていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光の強度に対しての数学的な演算を考え、例えば、結果として出てくる値がありとあらゆる場合でゼロとなるような演算を導出し、それに基づいた光伝搬シミュレーションの効率的な計算手法を考える事である。また、勾配空間とマルコフ連鎖モンテカルロ法の数学的な結びつきについてより深く考察し、その考察に基づいた光伝搬シミュレーションの手法を開発することも目的とする。いずれの場合でも、光の強度は画面上では区分的になめらかになる場合が多いという特徴に基づき、光伝搬シミュレーションの効率化を目指す。

3. 研究の方法

まず、勾配空間レンダリングの考え方を一般化し、ピクセルの値に対する何らかの数学的な演算をもとに、画像上でのピクセルの値の分布を考慮した光伝搬シミュレーションの効率化について数学的な定式化を行う。そして、その定式化を計算機上で実行するアルゴリズムを開発し、実際に光伝搬シミュレーションの数値実験を行って、従来手法との比較実験で評価を行う。また、基課題で得られていた、マルコフ連鎖モンテカルロ法と、勾配空間レンダリングとの関連について引き続き検討し、いくつかの計算手法を開発し、従来手法との比較実験で評価を行う。

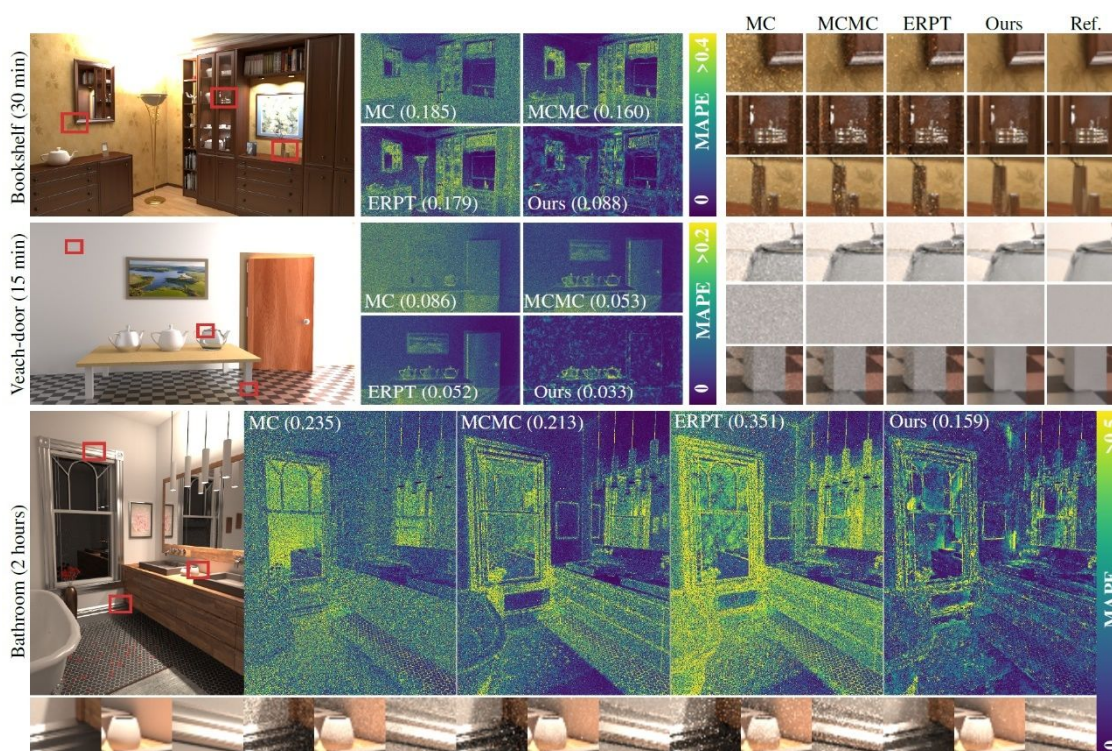
4. 研究成果

研究成果は以下の三つである。一つ目は、勾配とマルコフ連鎖モンテカルロの関連における数学

的な知見を、実用的な数値計算手法に昇華させたものであり、当初の研究目的の一つを達成した。残りの二つは、一つ目の成果から得られた、マルコフ連鎖モンテカルロ法に関する知見と、ピクセルの値に対する演算の(勾配以外への)一般化に関する知見をもとにした成果であり、当初は予見していなかった成果である。研究目的として設定していたもののうち、一般化勾配空間レンダリングの定式化については、一般化した勾配の演算にかかる計算時間と、得られる計算精度の向上のバランスをとる必要があることがわかり、現時点では研究成果としてまとめられないと判断した。しかしながら、期間終了後にも引き続き研究を継続する予定である。

(1) 層化マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Stratified Markov Chain Monte Carlo)

マルコフ連鎖モンテカルロ法と勾配の関連に対する知見に基づき、画像上でのサンプル数の層化(均一化)がマルコフ連鎖モンテカルロ法を使うと根本的に不可能であるという問題を解決した。基課題で暫定的な数値実験の成果は出ていたが、本事業の期間中に計算効率が悪く問題を解決し、研究成果をコンピュータグラフィックスの学会である Eurographics (Google Scholar によれば、同分野の引用数の指標で世界3位の論文誌である、Computer Graphics Forum に付随する学会) に投稿し、査読あり論文として採録された。



マルコフ連鎖モンテカルロ法による光伝搬シミュレーションでは、生成された光の経路が画像上でランダムウォークを形成するため、各ピクセルに辿り着く光の経路の数は一定ではなく、従ってピクセルごとの計算誤差が画像上で一定でないという問題がある。本来は、各ピクセルに辿り着く光の経路の数を画像上で均一化し(画像空間における「層化サンプリング」と呼ばれる)、それによって計算精度を均一化する事が望ましい。経路の数が一定でないと、例えば、計算された画像の一部だけが、正しい結果よりも大幅に明るくなるという問題が起こる。しかしながら、マルコフ連鎖モンテカルロ法では、ピクセルごとの光の経路の数を制御することは本質的に不可能であり、層化サンプリング行えないと考えられてきた。

この問題を解決するため、まず、各ピクセルだけを探索するようなマルコフ連鎖を考え、それをピクセルの数だけ用意する。これにより、各ピクセルでの光の経路の数は、そのピクセルに対応するマルコフ連鎖の状態数に正確に一致し、ピクセルごとの独立な制御が可能になる。しかしながら、この方法では各ピクセルで得られた値が任意の未知数でスケールされた値になってしまい、このままでは意味のある値が得られない。そこで、それぞれのマルコフ連鎖を一つのピクセルとその周辺のピクセルを同時に探索するように探索空間を広げ、あるピクセルに対して、複数のマルコフ連鎖による推定が重複するようにする。重複した推定のそれぞれは、任意の未知数でスケールされており、違った値を返すと考えられる。しかし、同じピクセルを推定していることから、本来は同じ値になるべきという条件から、未知数に対する連立方程式が定まる事を発見した。これをすべてのピクセルに対して定義すると、未知数すべての連立方程式を導出することができ、未知数を求める事が可能となる。

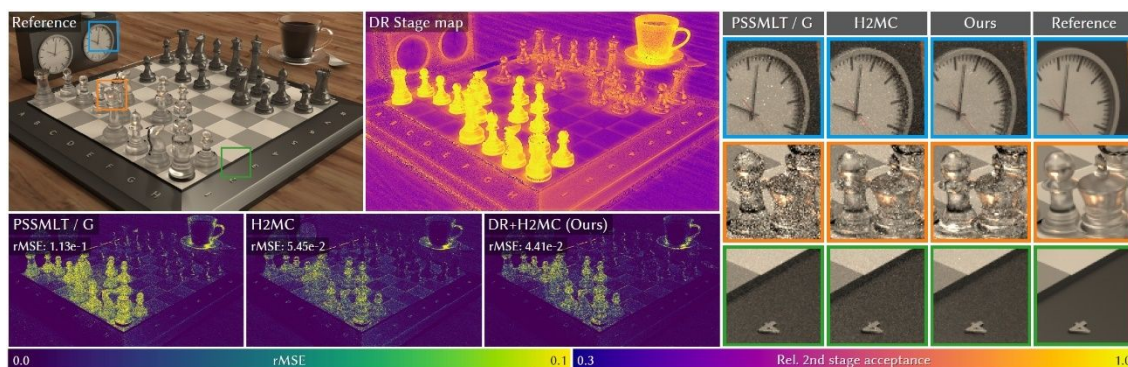
実は、勾配空間レンダリングでは、あるピクセルとそのピクセルの近傍の値の差分に対して、連立方程式を立てている。本研究では、同様な連立方程式がマルコフ連鎖モンテカルロ法に対しても適用できる事を示した。大きな違いは、未知数の間の関係が差分でなく比率によってあらわされることである。したがって、勾配ではなく、対数の勾配（つまり対数の差分 = 比率の対数）を考えれば、同様に差分で連立方程式が定められる。この考え方をもとに、勾配空間レンダリングにおける、勾配からの画像の構築手法を対数の勾配に適用することで、各ピクセルにおけるマルコフ連鎖モンテカルロ法の未知数を求められる。上記の図はその結果の例を示しており、同じ計算時間で、従来のモンテカルロ積分（MC）、従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）、マルコフ連鎖モンテカルロ法を層化サンプリングに近づけるとされている既存の手法（ERPT）、そして層化サンプリングをマルコフ連鎖モンテカルロ法で達成する我々の手法（Ours）を比較すると、我々の計算手法が最も計算精度がよい事がわかる。

(2) Delayed Rejection

共同研究先の McGill University に在籍する研究者・学生と、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自体についての研究を行った。研究成果は、コンピュータグラフィックスの論文誌である ACM Transaction on Graphics (Google Scholar によれば、同分野の引用数の指標で世界 1 位の論文誌) に投稿し、査読あり論文として採録された。

マルコフ連鎖モンテカルロ法では、光の経路をマルコフ連鎖の状態変数とし、現在の状態に対応する光の経路を一部分変えたもの（例えば少しだけ方向を変えたもの）を生成する。次に、その変更した光の経路と、元となった光の経路の両方を考慮して、マルコフ連鎖の次の状態として、変更した光の経路を採用（accept）するか、それを棄却（reject）して元の光の経路のままにするかを、確率的に決定する。この操作を何度も繰り返すと、マルコフ連鎖の状態の履歴全体が、モンテカルロ積分に使える光の経路のサンプルとなる。

この手法の問題として、もし変更が棄却される事が多いと、マルコフ連鎖の状態として同じものが続き、モンテカルロ積分のサンプルとしても同じものが繰り返され、計算効率が悪くなるというものがある。したがって、変更はなるべく棄却されないものを選びたい。しかしながら、逆に変更が採用されることが多いとしても、ほとんど経路の変更がない場合も考えられ、その場合も同様に効率が悪くなる。したがって、なるべく大きな変更を加えつつ、なおかつそれがほとんど採用されるのが理想的である。

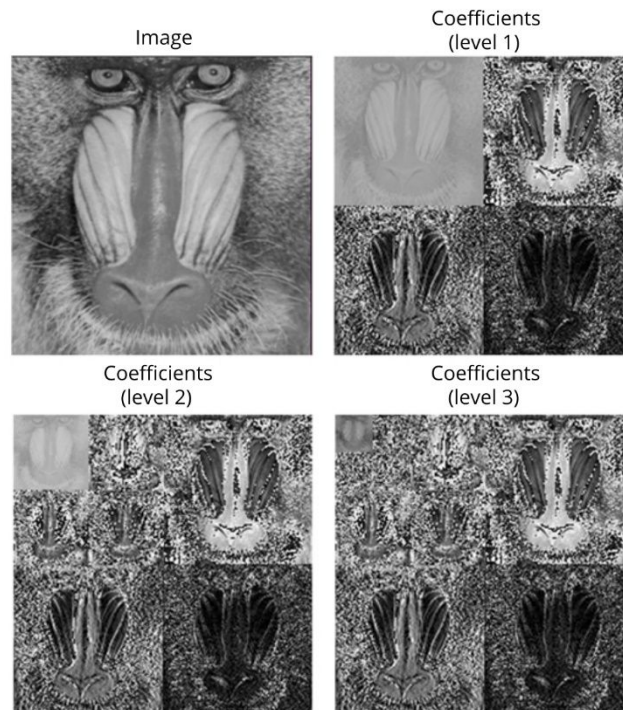


本研究では、Delayed Rejection という考え方をマルコフ連鎖による光伝搬シミュレーションに導入し、この問題の解決方法を提案した。Delayed Rejection とは、変更が棄却された場合、すぐに元の状態に戻るのではなく、さらに別の変更を考えて、それに対する採用・棄却の判断を行い、なるべくすべて棄却されるケースを減らす方法である。本研究では、この考え方を使うと、光伝搬シミュレーションにおけるマルコフ連鎖を多様な形で組み合わせる事が可能となる事を示した。例えば、最初の変更として棄却されやすいが大きな変更を考えて (bold perturbation)、それが棄却されてしまった場合に、採用されやすいが小さな変更 (timid perturbation) を考え、大きな変更と採用のされやすさのバランスを取る、bold-then-timid という方法を提案した。また、最初の変更には計算高速だが棄却されやすい変更を考え、棄却されてしまった場合にのみ、計算に時間がかかるが採用されやすい変更を考え、変更にかかる計算時間のバランスを取る、cheap-then-expensive という方法も提案した。提案手法を使う事で、例えば上記の図に示すように、高速だが棄却されやすい変更 (PSSMLT/G) のみを使った場合や、計算に時間がかかるが採用されやすい変更 (H2MC) のみを使った場合に比べて、同じ計算時間での計算誤差が減り、なおかつ二つの変更を適応的に組み合わせる事が出来ている。

(3) Deep Adaptive Wavelet Network

当初の研究計画には含まれていなかったが、(1)の成果で得られた画像の勾配に関する知見をもとにして、画像解析によく使われるウェーブレット変換を、機械学習を用いて一般化する手法を開発した。研究成果は、コンピュータビジョンの国際学会のWACV (Google Scholarによれば同分野で引用数の指標で世界12位の学会)に投稿し、査読あり論文として採録・発表した。

画像解析によく使われるウェーブレット変換には、Haar や Daubechies などの決まった形式のもの以外に、Lifting scheme という手法を用いて任意に定義する方法がある。Lifting scheme は、入力データを次の三つのステップを繰り返し行う事で変換する方法で、それによって定義されるウェーブレットは、second-generation wavelet とも呼ばれる。Lifting scheme の最初のステップでは、入力データを例えば奇数番目と偶数番目のデータなど2つに分割する。次に、分割されたデータの片方から、もう片方のデータを推定する prediction ステップを行う。最後に、prediction ステップでの推定をもとに、推定に使ったデータを更新する update ステップを行う。update ステップの出力に3つのステップを繰り返し適用し、最終的に一つの値になるまで行ったのち、prediction ステップでの出力すべてと合わせる事で、ウェーブレット変換を行う。



本研究では、prediction ステップと update ステップで行う演算が、逆変換が可能であればどのような演算でもよいという事に注目し、その演算をニューラルネットワークで置き換えた手法を提案した。ここで、ニューラルネットワークによる演算は、学習データセットから、問題依存の損失関数を最小化するように学習させる。それにより、Haar や Daubechies などの入力に依存しない従来のウェーブレットと違い、入力の特徴を適応的に抽出するようなウェーブレットを学習することが可能となった。ニューラルネットワークを使った lifting scheme 自体は既存の研究があるが、本研究では、このニューラルネットワークによるウェーブレット変換をより一般的なニューラルネットワークの構成要素の一部として取り込む方法を開発した。つまり、本研究により、ウェーブレット変換とニューラルネットワークを統合することが可能となった。一般のニューラルネットワークでは、その演算の数学的意味を解釈する事が難しいという問題があるが、本研究により、それを lifting scheme として解釈する事を可能とした。上記の図は、ある画像に対する提案手法での lifting scheme を3回繰り返し適用した結果であり、提案手法のニューラルネットワークにおける演算の一部に直接対応する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 D. Rioux-Lavoie, J. Litalien, A. Gruson, T. Hachisuka, and D. Nowrouzezahrai	4. 巻 -
2. 論文標題 Delayed Rejection Metropolis Light Transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CM Transactions on Graphics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3388538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Gruson, R. West, and T. Hachisuka	4. 巻 -
2. 論文標題 Stratified Markov Chain Monte Carlo Light Transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Graphics Forum	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 A. Gruson, R. West, T. Hachisuka
2. 発表標題 Stratified Markov Chain Monte Carlo Light Transport
3. 学会等名 Eurographics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. X. B. Rodriguez, A. Gruson, L. F. Polania, S. Fujieda, F. P. Ortiz, K. Takayama, T. Hachisuka
2. 発表標題 "Deep Adaptive Wavelet Network"
3. 学会等名 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ノロゼザライ デレク (Nowrouzezahrai Derek)	マギル大学・Department of Electrical and Computer Engineering・Associate Professor	