

審査の結果の要旨

氏 名 大津 久平

本論文は「Bridging Different Spaces in Light Transport Simulation (異なる空間を繋ぐ光輸送シミュレーション)」と題し、英文7章より構成される。本論文は、コンピュータグラフィックスにおける光輸送シミュレーションに関するもので、異なる空間を繋ぐというテーマの元、大きく分けて3つの手法について詳しく述べられている。それぞれ、異なる光輸送シミュレーション手法を機械学習により繋ぐ手法、マルコフ連鎖モンテカルロを用いた光輸送シミュレーションにおける異なる状態空間を繋ぐ手法、コンピュータグラフィックスで使われる3原色空間とスペクトル空間を繋ぐ手法である。

第1章「Introduction」では、本論文の動機と提案の概要について述べている。光輸送シミュレーションに基づくコンピュータグラフィックスの現状と課題について議論し、特に計算効率と正確性の二つの側面から、本論文の提案がどのようにそれらを改善するかについて概説している。

第2章「Theory of Light Transport」では、光輸送シミュレーションの基本的な定式化について解説しており、特にKajiyaによるレンダリング方程式に理論的な枠組みを扱っている。

第3章「Numerical Solutions of Light Transport」では、本論文の提案の基礎でありレンダリング方程式の数値解法である、モンテカルロ積分およびマルコフ連鎖モンテカルロ法について概説している。

第4章「Bridging Strategy Spaces of Light Transport Simulations」では、二つの異なる数値解法の計算結果の重み付き和を取ることで、単一の手法を用いた場合よりも計算誤差を小さくする事ができる機械学習の手法を提案している。一般に、光輸送シミュレーションの数値解法には、それぞれ計算効率が良い・悪い入力データのタイプが存在し、計算効率を上げるためには入力データに応じて適切な解法を選ぶ必要がある。ところが、そのような選択には解法の技術的な特性の理解が必要であり、主なユーザーとなるアーティストにとっては難しいタスクである。提案手法では、あらかじめ様々な入力データにおいて二つの異なる数値計算手法を使った場合の計算誤差を求め、さらに重み付き和を取ったときに誤差が最小となるような重みを求めておき、入力データと重み付き和の関係を機械学習のアルゴリズムであるregression forestによって学習する方法を提案している。新たな入力データに学習した結果を用いて二つの異なる数値計算

手法を組み合わせた場合、単一の手法を同じ総計算時間で実行したときよりも誤差が小さくなる事を示した。

第5章「Bridging State Spaces of Markov Chain Monte Carlo Rendering」では、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた光輸送シミュレーションにおける異なる状態空間を繋げる枠組みを提案している。そのような状態空間には、光の経路の情報を直接記述するpath spaceと、モンテカルロ法を使って光の経路を生成する際の空間であるprimary sample spaceとがある。コンピュータグラフィクスにおいて、マルコフ連鎖モンテカルロに基づく既存の手法はどちらか片方の状態でのみ定式化されている。それぞれの状態空間に基づいた手法は、得意とする入力データのタイプが異なるため、それらの手法を組み合わせる枠組みとして、二つの異なる状態空間を統合する事が求められていた。第5章では、その問題を初めて理論的に解決する方法として、空間を行き来する事が可能な写像をマルコフ連鎖モンテカルロ法に適用している。この新たな定式化によって異なる状態空間で動作する手法を組み合わせる事で、様々な入力データに対して計算誤差が大きく変動しないような数値計算手法を提案した。

第6章「Bridging Chromatic Spaces For Spectral Reflectance Reconstruction」では、コンピュータグラフィクスで一般に使われる3原色の色空間モデルと、スペクトル反射率の色空間モデルを繋げる手法を提案している。3原色の色空間モデルは、デジタル画像などを格納・表示する際に広く使われている。このようなデータを光輸送シミュレーションに入力として使う際に問題となるのが、正確な光のシミュレーションには波長ごとの光の強度（スペクトル）を計算する必要があるのに対して、3原色モデルからはスペクトルを推定する事は一般に不可能とされている事である。そこで第6章は、多くのスペクトルは適切な基底の元では3次元空間で精度よく近似する事ができるという色彩工学における知見に基づき、そのような基底の3次元空間と3原色の空間を繋げる手法を提案している。これにより、測定スペクトルのデータセットから基底を前計算し、実行時に3原色から基底空間へ変換を行うことで、3原色からスペクトルの精度良い構築が可能となる事を示した。

第7章「Conclusion」は本論文をまとめ、主な貢献について述べている。以上のように、本論文が提案する3つの枠組みにより、光輸送シミュレーションに関わる様々な空間を繋げる事ができた。この研究成果は、単に様々な既存の計算手法を統合できる枠組みを提案するだけに留まらず、実際の数値計算における有用性も示しており、情報工学に関する研究的意義と共に、情報工学における創造的実践に関して価値が認められる。

よって本論文は博士（情報工学）の学位請求論文として合格と認められる。