

Visual Simulation of Opal Using Voronoi Tessellation and Ewald Construction

February 2025

Soma Yokota

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	横田 壮真
主 論 文 題 名 : Visual Simulation of Opal Using Voronoi Tessellation and Ewald Construction (ボロノイ分割とエバルトの作図を利用したオパールのビジュアルシミュレーション)				
(内容の要旨) 宝石として利用されるオパールは、遊色効果とよばれる光学現象を発現する．遊色効果は構造色の一つであり、オパール内部の微細な規則構造に起因する．この光学特性から、オパールは古くから宝飾品として利用され、歴史的、芸術的観点から文化財としても評価されてきた．また、オパールはコロイド結晶とよばれる素材に分類されるが、コロイド結晶は特定の可視光を回折する特性をもつことから、量子情報処理や構造色ディスプレイとしての応用が見込まれており、工学的にも高い価値を有している．このように、オパールは産業、人文科学、自然科学の各分野で重要な素材である． 一方で、オパールをコンピュータグラフィックスで写實的に再現する研究は殆ど取り組まれていない．オパールは、直径が数百 nm のコロイドが多数凝集することで構成されており、その内部構造は極めて複雑である．対して、宝飾品に用いられるオパールの大きさは通常数十 mm に達し、コロイド粒子とのサイズ比は 10^5 倍程度に及ぶ．そのため、コロイド一粒ずつの積層情報を現状のコンピュータ上にモデリングすることは、メモリの制約から不可能である．したがって、適切なスケールで内部構造をモデリングする手法が求められる．また、オパール内部で複雑に回折する可視光を効率的に追跡するレンダリング手法も必要である． 本研究は、オパールの物性を調査し、オパールの視覚的特性に貢献する 4 つの要素を特定したうえで、オパールを写實的にビジュアルシミュレーションする手法を提案する．まず、オパールの内部構造を 3 次元ボロノイ図で表現する手法を提案する．ボロノイ図の表現には、符号付距離関数を用いる手法、ボクセルを用いる手法を採用し、それぞれの利点を比較する．次に、これらのモデルに対し、パストレーシング法を用いたスペクトラルレンダリングによって画像を得る．結晶の X 線構造解析で用いられるエバルトの作図に着目し、これを応用して回折を計算する手法を提案する． 本手法が提案する 7 種類のパラメタ値の組み合わせによって、汎用的なオパールのビジュアルシミュレーションが可能であることを示した．また、実物のオパールのパラメタ値を適用し、実物に則した遊色効果の再現が可能であることを示した．				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Soma Yokota
Thesis Title Visual Simulation of Opal Using Voronoi Tessellation and Ewald Construction			
Thesis Summary Used as a gemstone, opal exhibits an optical phenomenon known as ``play of color," a type of structural color caused by the fine regular structure within the opal. Because of this optical property, opal has been used as jewelry since ancient times and has been valued as a cultural treasure from both historical and artistic perspectives. Opal is also classified as a material called colloidal crystal, and this property in particular gives it its high engineering value, with potential applications in quantum information processing and structural color displays. Thus, opal is an important material in the fields of industry, the humanities, and the natural sciences. In contrast, few studies have focused on realistic representations of representing opal using computer graphics. Opal consists of numerous aggregates of colloids, with diameters on the scale of several hundred nanometers, resulting in an extremely complex internal structure. However, opals used for jewelry are usually several tens of millimeters in size, making their scale roughly 10^5 times larger than individual colloidal particles. This significant size disparity poses a challenge, as modeling the stacking information of each colloidal particle is impractical on current computers due to memory limitations. Thus, a method for modeling the internal structure at an appropriate scale is required. In addition, an efficient rendering approach is required for accurate tracking of the complex diffraction of visible light within the opal. This study investigates the physical properties of opals, identifies four key factors that contribute to their visual characteristics, and proposes a method for the realistic visual simulation of opals. First, the internal structure of opal is represented using a three-dimensional Voronoi diagram, where both a signed distance function and a voxel-based approach are utilized to represent the Voronoi diagram, with a comparison between the advantages of each method. Next, spectral rendering using Monte Carlo path tracing is performed to obtain images of these models. A method inspired by Ewald construction from X-ray crystallography is also proposed to compute diffraction. This study demonstrates that the combination of the seven parameter values enables the visual simulation of a wide variety of opals. The parameter values of real opal were applied, and it was shown that it is possible to reproduce play of color in accordance with a real opal.			