

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：32660

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2022

課題番号：19KK0115

研究課題名（和文）A New Expression of Three-dimensional Light Flow in Architectural Spaces and its Visual Interpretation in the Context of Human-centric Lighting Design

研究課題名（英文）A New Expression of Three-dimensional Light Flow in Architectural Spaces and its Visual Interpretation in the Context of Human-centric Lighting Design

研究代表者

吉澤 望（YOSHIZAWA, Nozomu）

東京理科大学・理工学部建築学科・教授

研究者番号：40349832

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：1) Volume Photon Mapを生かした光場の3次元可視化手法Photon Flowを算出するためのRadianceの拡張プログラムを開発した。Photon Flowおよびスカラー放射照度の概念を応用して複雑な鏡面反射特性を持つ昼光導入装置において簡易に日射取得効果を計算する手法を提案した。2) Photon Flowを通して物理的光場を予測できる条件とその限界を明らかにした。3) 光場の実測を通して、Photon Flowによる光場の表現が光源位置を含めた光場を直感的に把握しやすいことなどを示した。4) Photon Flowの算出プログラムを公開する準備を終えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Volume Photon Mapを生かした光場の3次元可視化手法Photon Flowを開発し、また建築光環境の昼光計算において世界的なデファクトスタンダードになっているフリーソフトであるRadianceに組み込むことにより、誰でもが比較的容易に新たな光環境記述手法を用いて建築光環境を検討・設計できるようになるための基礎を築いた。また建築熱環境における複雑な鏡面反射特性を持つ昼光導入装置を備えた空間における日射取得効果を正確かつ容易に予測できるようになった。これらの開発には若手研究者も関わっており、今後の日本における光環境シミュレーションの普及と発展に資するものと考えている。

研究成果の概要（英文）：1) We developed an extended program for Radiance to calculate the three-dimensional visualization method: Photon Flow, which utilizes Volume Photon Map. We also proposed a simplified method for calculating the solar radiation effect for complex daylighting systems with specular reflection characteristics, by applying the concept of Photon Flow and Scalar Irradiance. 2) We clarified the conditions and limitations for predicting the physical light field through observing the Photon Flow. 3) Through actual measurements of the light field, we demonstrated that the representation of the light field using Photon Flow is intuitive and easy to understand the position of the light source and the whole light field. 4) We have completed preparations to make the Photon Flow calculation program publicly available.

研究分野：建築光環境

キーワード：光場の可視化手法 物理的光場 Volume Photon Mapping Photon Flow 日射取得効果

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、地球環境問題への対処の点から、建築分野においては省エネルギー性能の向上が急速に図られてきた。最近では、建築環境の快適性、知的生産性、さらには健康面への影響を考慮に含めることによって、より **Human-centric** な発展を目指すフェーズに重点が移りつつある。昼光利用は、省エネルギー性能・快適性・健康いずれにも深く関わるため、その重要性が改めて見直されてきているが、常に変動し続ける昼光の影響を考慮しながら、最適な昼光導入装置を設計するためには、**BIM (Building Information Modeling)** と結びついた光・熱環境シミュレーション技術の活用が必須になりつつある。しかしながら環境シミュレーション技術、特に光環境シミュレーションについては、**CG(Computer Graphics)**の発展を主導してきた欧米に日本は後塵を拝しており、設計段階における環境シミュレーション技術の活用の点でも中国を始めとするアジア諸国の中で遅れを取る状況となっていた。

(2) 昼光照明環境シミュレーションのデファクトスタンダードとなっている **Radiance** は1990年代に **Lawrence Berkeley National Laboratory** で開発された。ただし **Backwards Raytracing** (視点から光線を追跡するアルゴリズム) をベースとするアルゴリズムのため、昨今の昼光導入装置において欠かせない鏡面反射計算を不得手としていた。一方、**Photon Mapping** は、光源から小分けされた放射束を持つ粒子(**photon**)を多数放出し、この粒子がモデル内の面と衝突した際にその座標や放射束の情報が記録される **Photon map** を用いて最終的なレンダリングを実行する大域照明計算のアルゴリズム (1995、**Henrik Wann Jensen**) で、複雑な形状の鏡面反射成分の計算を得意とする。本国際共同研究の海外共同研究者 **Dr. Roland Schregle** によって2015年に **Photon Mapping** アルゴリズムが組み込まれたことにより、**Radiance** においてもミラーやレンズを用いた複雑な昼光導入装置の計算が可能となった。

(3) 2018年 **Radiance Workshop** で、研究代表者は **Photon Mapping** アルゴリズムを応用して、空間内に層状に配置した不可視フィルターでフォトンをつまえることにより、3次元の光の流れを可視化するアイデアを発表したが、その場で **Dr. Roland Schregle** から共同研究の申し出を受け、今回の国際共同研究を立案することになった。さらに **Dr. Roland Schregle** の属する **The Lucerne University of Applied Sciences and Arts(Hochschule Luzern, HSLU)**は、昼光導入装置の光学特性を測定してシミュレーション用の反射モデル **BSDFs(Bidirectional Scattering Distribution Functions)** を作成する目的に特化した **Goniophotometer** を保持しており (日本には該当する装置が存在しない)、この装置で測定されたデータを活用しながら、本研究で提案する光の流れの3次元表現手法が建築光環境評価・設計において有効なツールとなることを検証していくこととした。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の主たる目的は、①**Volume Photon Map** アルゴリズムを用いた新たな光環境の3次元記述手法 (**Physical Light Field** の記述手法) を確立すること、②本記述手法により人が認識する光場 **Light Field** を従来よりも正しく予測できることを被験者実験を通して明らかにすること、③最新の昼光導入装置を備えた空間での検証を通して新たな昼光照明設計のためのツールとしての有効性を立証することにあつた。

(2) **Volume Photon Map** を応用し光の流れの3次元表現を確立することの意義は以下にある。  
①新たな昼光照明設計手法の確立：従来の光環境設計は、窓などの光源から放たれた光が最終的に伝達された結果である照度分布・輝度分布の情報をもとに検討されていたが、空間内の光の流れを可視化することにより、光が空間内に広がっていく経緯が一目で掴めるようになり、設計過程において昼光導光装置の効果を直感的に把握できるようになる。また、そもそも **Photon Mapping** がミラー・レンズなど複雑な鏡面成分を持つ面のシミュレーションに適したアルゴリズムであるため、昨今特に注目が集まっている直射日光を積極的に活用する昼光導入装置の効果を正確に予測するために適した手法である。  
②昼光照明環境の定量的把握：**Photon Mapping** では個々の **Photon** は同一の放射束を持っている為、その密度はスカラー照度に対応することになり、**Physical Light Field** (物理的な光場) の記述が可能となるため、昼光照明の空間分布を定量的に把握できるようになる。さらに本手法により温熱環境に影響を及ぼす日射取得の空間的分布を捉えることも可能となる。  
③昼光照明環境の視覚的效果の予測：上記の光の流れの3次元表現は、人が認識する光場 **Light Field** を従来よりも正しく予測できると考えられるため、光の流れがもたらす視覚的效果の時間的・空間的変化を捉えやすくなる。特にスカラー照度は空間の明るさ知覚に対応する指標であり、昼光導入による空間の明るさ変化の検討が可能となる。

### 3. 研究の方法

(1) **Volume Photon Map** を用いた新たな光環境の3次元記述手法の確立  
本研究では、**Photon** の向きに影響を与えないように **Henyey-Greenstein** 位置関数を1とし、

エネルギーを吸収しないように設定した関与媒質でモデル全体を覆い、空間内の Photon Map を作成する (Figure1)。①Photon 分布密度からスカラー照度を算出する方法を確立すること、②各 Photon に色を持たせることにより、光量のみならず光色の情報も伝達できるようにすること、の2点を主たる目的として開発を行った。Photon の放射輝度は HDR 階調を持つ RGBE 形式で記述されているため、放射輝度を示す RGB 各成分値を 8 ビットの RGB 値に近似するトーンマップ処理の方法を決定した。

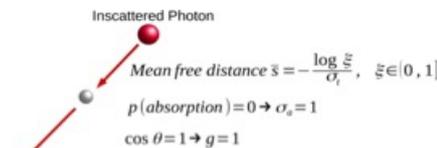


Figure1 Modified volume photon transport in participating medium for application in photon flow.

## (2) 新たな3次元記述手法を用いた Light Field の予測：被験者実験による検証

Kartashova (2016) の Visual Light Field の研究手法に則り、ある実空間内の光の流れを本手法で記述した結果をモニター上に提示して、被験者に Gauge Object と呼ぶ球に生じる陰影を予測させることにより、実空間における陰影知覚と比較して Light Field が正しく知覚できているかどうかを判定した。対象空間としては、HDR(High Dynamic Range)モニター上での輝度・色の再現、呈示手法の検討を行い、予備実験を通して照明条件等を決定する。被験者実験を通して、本記述手法により光の場 Light Field を従来の空間照度記述よりも正しく予測できるかどうかを検証する。

## (3) 昼光導入装置を備えた空間での検証：Goniophotometer 利用と反射モデル BSDFs の作成

①Goniophotometer を利用したシミュレーション用反射モデル BSDFs の作成、②BSDFs を用いた昼光導入装置を備えた空間のシミュレーション、③対象空間における Light Field の実測 (魚眼レンズを用いた輝度測定)、④実測とシミュレーションの比較を通じた新たな3次元表現手法の有用性の検証を実施する。

## (4) Radiance への組み込みと公開

Radiance の正式な機能としてコマンドを組み込む。

## 4. 研究成果

### (1) Volume Photon Map を用いた新たな光環境の3次元記述手法の確立

Volume Photon Map を生かした3次元可視化手法を Photon Flow と名づけ、照明シミュレーションプログラム Radiance のコマンド *Mkpmmap* を拡張して、直接 Photon Flow を算出できるようにした。さらに消失係数等を調整することにより、空間内の光場 light field の状態を定量的に記述するスカラー照度・Cubic illuminance を Volume Photon Mapping により直接算出できるようにした (Figure2)。さらに建築環境快適性への応用から、昼光導入による日射取得の空間的分布の評価にスカラー放射照度を導入し、Photon Flow を用いた日射熱取得の計算方法を確立した。

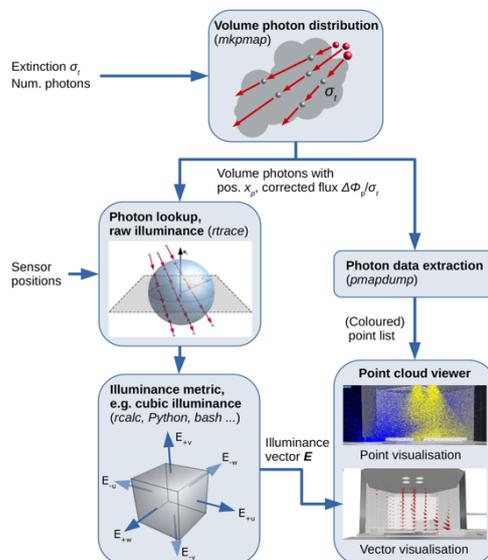


Figure2 Photon flow workflows with example numeric (left) and visual (right) evaluation.

### (2) 新たな3次元記述手法を用いた Light Field の予測

Photon Flow による光場の知覚については、当初想定していた視覚的光場 Visual Light Field の知覚よりも、物理的光場 Physical Light Field を正しく知覚できた方が昼光照明設計のためのツールとして有用になるとの判断し、後者の知覚に対する適用可能性とその限界を明らかにする方向に最終的には修正を行なった。ある実空間内の光の流れを本手法で記述した結果をモニター上に提示して、被験者に Gauge Object と呼ぶ球に生じる陰影を予測させることにより、実空間における陰影知覚と比較して Light Field が正しく知覚できているかどうかを判定した。スポットライト1灯・2灯のみが設置

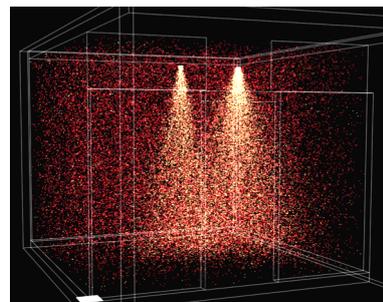


Figure3 Photon Flow in the experimental room with two spotlights.

された簡易な空間 (Figure3) と、フロアライトや光を遮る障害物が設置されたより複雑な光場をもつ空間を対象とした被験者実験を行うことにより、Photon Flow を通じて物理的光場を正しく予測できる条件とその限界を明らかにした。既存の三次元光環境表現手法の一つである照明ベクトルによる記述と比べると、Photon Flow による記述は複数光源による光の流れを直感的に把握しやすい。一方で、間接成分割合が高い条件や障害物の陰の境界部分では、物理的光場の読み取りが難しいことが判明した。今後は Photon Flow の観察方法の工夫 (HMD: Head

Mounted Display による3次元表示)、提示方法の検討 (Photon 数と消失係数の設定方法) などを通して、より物理的光場を読み取りやすい方法を確立していく必要があり、2023 年度に継続的に研究を進め、Photon Flow を用いた光場の知覚と建築照明デザインへの応用に関する論文をまとめる予定としている。

### (3) 昼光導入装置を備えた空間での検証

①研究実施期間がほぼ新型コロナウイルス感染症による海外渡航や対面活動の自粛時期と重なり、またそれに伴い共同研究先の HSLU における Goniophotometer 利用も滞ってしまったため、まずは特徴的な昼光導入手法を持つ国内の実建物(風の丘葬祭場:大分市)における Light Field の実測(魚眼レンズを用いた輝度測定)を通して、実測とシミュレーションの比較を通じた新たな3次元表現手法の有用性の検証を行った。Photon Flow による光場の表現は、従来のグリッド毎の照明ベクトルによる記述と比べても、光源位置を含めた光場を直感的に把握しやすいこと(Figure4)、Photon Flow の密度がスカラー照度に比例し、実際に Volume photon mapping から計算したスカラー照度が従来の Classic Radiance から計算した値と一致することなどを示した。この成果は第1報目の論文として Lighting Research and Technology (2023.1)に採択された。

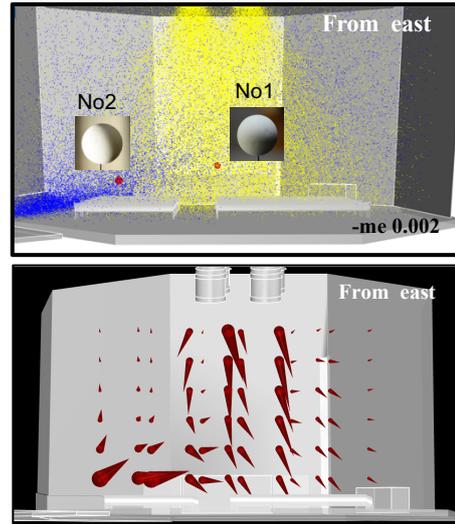


Figure4 Photon Flow (above) and illumination vectors (below) in Kaze-no-Oka Crematorium

②鏡面成分割合の高い昼光導入装置を備えた空間における Photon Flow の活用については、日射取得の空間分布評価にスカラー放射照度の概念を導入し、Photon Flow を用いた日射取得の計算手法を検討する中で、検証を進めた。具体的には日射取得を評価する ANSI/ASHRAE Standard55-2020 の  $ERF_{solar}$  計算に変わって(Figure5)、Volume Photon Mapping を用いて計算することにより、複雑な鏡面反射特性を持つ昼光導入装置を備えた窓からの日射取得も正確かつ短い計算時間で算出可能であると同時に、Photon Flow によりその導入効果を視覚的に表示可能であることを示した(Figure6/7)。この成果は第2報目の論文として Building and Environment に投稿中(2023.6 現在)である。さらにシミュレーション上で比較した上記の結果に加えて、某社技術研究所での実測結果を Volume photon mapping を用いたシミュレーションと比較することで、本手法の有用性を検証する分析を現在進めている。なお Goniophotometer による反射モデル BSDFs については 2022 年度中に実測・入手ができなかったため、今後 HSLU から測定データを入手して実施する予定である。

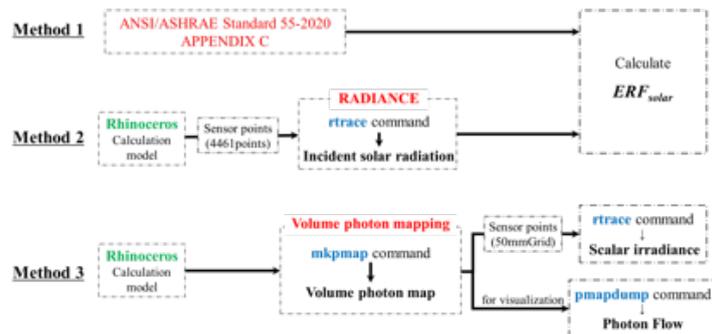


Figure5 Validation flow for thermal comfort using scalar irradiance.

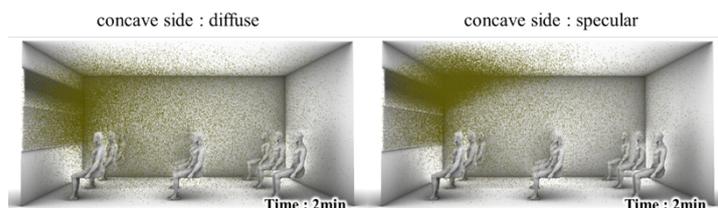


Figure6 Method 3: Photon flow and calculation time (winter solstice 12:00)

### (4) Radiance 本体 への組み込みと公開

Volume photon mapping を利用して Photon Flow を算出するプログラムについては、複雑な形状の空間内において効率的に Photon を捕獲する手法やスカラー照度を算出するコマンド等を含め、既に Radiance への組み込みを行った。後は正式な公開に向けた手続きを進める段階であり、公開後はフリーのプログラムとして誰でも利用することが可能となる。

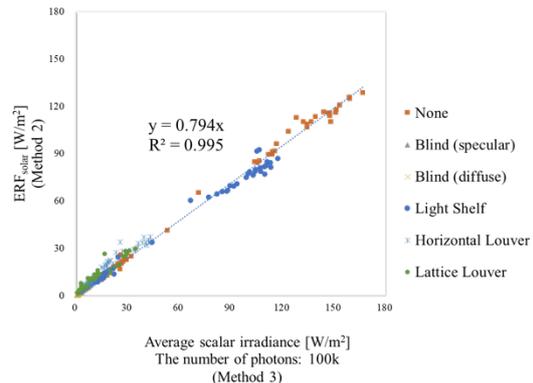


Figure7 Relationship between the results of Method 2 and 3: Various shading devices

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshizawa N, Schregle R, Komazawa K, Ootori K, Okamoto T	4. 巻 55
2. 論文標題 Photon flow: A three-dimensional expression of the light field using volume photon mapping	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Lighting Research and Technology	6. 最初と最後の頁 300 ~ 320
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/14771535221145672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Roland Schregle, Nozomu Yoshizawa, Ken Komazawa, Kaira Ohtani
2. 発表標題 A Case Study of Three-Dimensional Light Flow Expressed Through Volume Photon Mapping
3. 学会等名 19th International Radiance Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Roland Schregle, Nozomu Yoshizawa
2. 発表標題 Gone in 60 Nanoseconds: Adventures in Transient Rendering
3. 学会等名 19th International Radiance Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ootori Kaira, Ken Komazawa, Roland Schregle, Nozomu Yoshizawa,
2. 発表標題 Relationship between Photon flow and the Perception of Light Field
3. 学会等名 LIGHT SYMPOSIUM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 駒澤健、岡本俊英、吉澤望
2. 発表標題 Photon Flowと人の知覚する光場との関係
3. 学会等名 一般社団法人照明学会 2020年度全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazunori Yanagawa, Tomoyuki Akaho, Roland Schregle, Hiroyuki Miyake, Kazuto Takase, Nozomu Yoshizawa
2. 発表標題 Observation method of photon flow using virtual reality headsets -Application to architectural light environment design-
3. 学会等名 21th International Radiance Workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keita Matsuda, Takanori Kabaki, Roland Schregle, Keiichiro Taniguchi, Kozo Takase, Nozomu Yoshizawa
2. 発表標題 New method for predicting the solar radiation environment based on scalar irradiance using volume photon mapping
3. 学会等名 20th International Radiance Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Okamoto, T., Schregle, R., Yoshizawa, N.
2. 発表標題 CASE STUDIES OF A THREE-DIMENSIONAL EXPRESSION OF COLOURED LIGHT FLOW USING VOLUME PHOTON MAPPING
3. 学会等名 CIE 2019 29th Quadrennial Session (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本俊英, 吉澤望
2. 発表標題 Volume Photon Mapを応用した色を帯びた光の三次元表現手法-建築設計での活用を目指したRadianceへの実装-
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	高瀬 幸造 (TAKASE Kozo) (20739148)	東京理科大学・理工学部建築学科・講師  (32660)	
研究分担者	谷口 景一郎 (TANIGUCHI Keiichiro) (80746496)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任助教  (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スイス	Hochschule Luzern, HSLU		