

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	建築光環境・視環境設計における 3D 都市データの利用
研究者名※	古賀 靖子
所属組織※	九州大学大学院 人間環境学研究院 都市・建築学部門 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市建築史、都市と文化
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 九州大学
申請者氏名 古賀 靖子

研究課題	建築光環境・視環境設計における 3D 都市データの利用
(概要) ※最大 10 行まで 本研究では、3D 都市データを利用して、計画建物とその周辺地域をゲームエンジン上で表現し、計画建物の窓から見える屋外地物の様子を可視化し、その輝度マップを深層学習により生成する方法の開発を目差す。主要課題は、3D 都市データのテクスチャ画像の色情報から、地物の反射率を推定することである。一般に、テクスチャ画像取得時の測光条件は不明のため、全天球カメラによる測光データを補助的に用いる。 まず、全天球カメラによる測光のために、全方位画像の画素値から輝度を推定する式を求めた。これより、全天球カメラを搭載した小型無人航空機と地上からの画像による測光を可能にした。次に、建物外壁を 2 方向から同時に撮影した全方位画像より、反射特性を調査した。輝度マップには、地物反射光の拡散反射成分が必要であり、直射日光の鏡面反射成分は別に扱い、空中または地上から得た測光データを参照して、輝度マップの生成が可能であることを明らかにした。	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
本研究では、建築光環境・視環境の設計に資するため、3D 都市データを利用して計画建物とその周辺地域をデジタル空間に表現し、室内から窓を通して見える屋外地物の輝度マップを、深層学習により生成する方法の開発を目差す。輝度マップの生成には、3D 都市データのテクスチャ画像が重要であるが、例えば PLATEAU のような 3D 都市データのテクスチャ画像は粗く、測光に必要な撮影時の諸条件が不明で、そのままでは使えない。写真測光法、すなわちカメラで撮った画像の画素値から、対象領域の輝度を求める方法は確立している。したがって、地上または小型無人航空機から撮影した全方位画像を補助的に用いて、テクスチャ画像の RGB データから、昼光の明るさに対応した輝度マップの生成方法を考える。また、実際の利用の便宜を考慮して、補助画像はなるべく少ないことを目標とする。 従来の昼光照明計算では、屋外の地物の反射率データが不十分なため、地物反射光の予測は困難として無視するか、さまざまな地物の反射率を一律に扱って、地物反射光を概算していた。地物反射光や地物反射率の測定は、1980 年代に国内で試みられたが、十分には解明されず研究課題として残されていた^{1,2,3,4)}。しかし、建物が密集する都市部において窓を通して見えるものは、天空より地物であることが多い。現実には即した建築光環境・視環境の設計には、直接的な昼光光源である天空光だけでなく、間接的な昼光光源である地物反射光を無視できない。3D 都市データは、長年残されていた研究課題を解くための糸口を与える。	

本研究に先行して、申請者は 3D 都市データとゲームエンジンを利用し、計画建物の窓から見える眺望の内容を定量的に示す方法を開発した⁵⁾。図 1 に例を示す。ゲームエンジンでレンダリングした空間は、VR ヘッドマウントディスプレイを用いて視覚的に体験できる。ここに欠けているのは、任意の昼光状態において地物の明るさを推定する方法である。本研究による輝度マップの生成方法を組み合わせれば、計画建物の窓の採光性能と眺望性能を総合的に定量評価でき、また室内で感じる明るさの予測と評価も可能になる。

室モデル	幅 20 m×奥行 15 m×天井高 3 m；床面の地上高さ 25.5 m
評価点（座位）	窓のある壁面の中央線上・窓面から室内へ 5 m・床上 1.2 m
眺望の内容 (窓ガラス面に対して)	天空部分の割合 0.19 窓のある壁面より 30m 以内に含まれる建物部分の割合 0.66



図 1 眺望の予測例

参考文献

- 1) 伊藤、他：屋外地物輝度の測定結果について（昭和 54 年 11 月～55 年 2 月）、日本建築学会大会学術講演梗概集、207-208、1980
- 2) 大野、他：地物反射光の実態とその昼光照明設計用資料の検討、日本建築学会近畿支部研究報告集、25-28、1982
- 3) 岩田・中根：昼光照明設計のための地物反射率に関する研究、大阪市立大学生生活科学部紀要、35、123-131、1987
- 4) 松浦：昼光計算に必要な昼光測定資料、照明学会誌、75 (7)、345-346、1991
- 5) R. Majima et al.: Use of digital 3D urban models for view evaluation in building envelope design, Journal of Physics, Conference Series, 2600 (11), 112017, 2023

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

輝度マップの生成方法を開発するために、まず実空間における写真測光により、建物外壁の光反射特性を調べ、さまざまな昼光条件下で、昼光照度と共に外壁の輝度データを収集する。図 2 に示すように、輝度の実測データを補助資料として用い、検討対象の位置、例えば計画建物の室内から見える窓外の地物の輝度を推定する。屋内照明環境については、天井面や壁面に設置した画像センサーの画像を用いて、執務者の視野内の輝度分布を推定する方法が提案されている^{6,7,8)}。本研究では、その研究を参考にして、屋外空間での応用を考える。

また、3D 都市データのテクスチャ画像の色情報を利用して、外壁の反射率を推定する方法を考える。物体表面の反射特性は、図 3 に示すように、近似的に鏡面反射成分と拡散反射成分の和で表される^{9,10)}。鏡面反射成分は、入射光の正反射方向で強くなる。拡散反射成分は、あらゆる方向に一様に強くなる（均等拡散）。したがって、輝度マップを生成する観察方向の反射光は、概して昼光の拡散反射成分と見なせる。地物反射光のうち、鏡面反射成分の強い直射日光の反射光は、天空光の反射光と分けて計算する。

物体表面の色は、拡散反射成分の性質として扱われる¹¹⁾。一方、物体色の視感反射率は、近似的にマンセルバリューの関数で表される。これらを考え合わせて、建物外壁の測色データを収集し、3D都市データのテクスチャ画像と照らし合わせて、反射率を推定する計算方法を考案する。

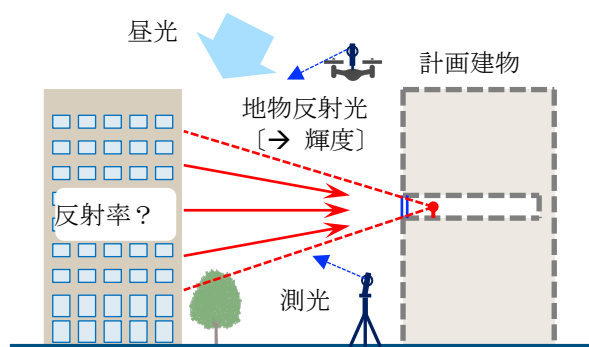


図2 計画建物の室内から見える地物の輝度の推定

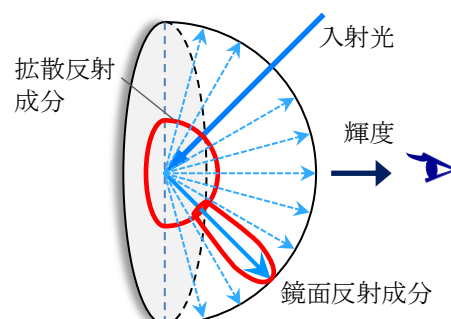


図3 物体表面の反射特性

研究作業は次の手順で進めた：①写真測光の準備として、全天球カメラで撮影した全方位画像の画素値と輝度値の関係式を求める、②小型無人航空機に搭載した全天球カメラの全方位画像による輝度と、地上から輝度計で測定した輝度を比較する、③外壁に対して正対する方向と任意の方向から同時に撮影した2枚の全方位画像で、対象領域の輝度を比較する、④3D都市データPLATEAUでテクスチャ画像のある場所を選定し、建物外壁を2つの異なる方向から同時に撮影して、対象領域の輝度を比較する。

2-1 全方位画像による測光

本研究では、写真測光にRAW画像（情報の省略や圧縮を行わず、画像素子の出力をそのまま記録したもの）が取れるRICOH THETA Z1（以下、THETA Z1と記す）を使用することとした。調光可能なLEDパネルの出力を変え、THETA Z1の絞り値とシャッタースピードを変えて、LEDパネルを撮影した。ISO感度は100とした。また、同時に輝度計でLEDパネルの輝度を測定した。LEDパネルからの光を均一な拡散光とするために、前面に乳白色の亚克力板をつけ、輝度の測定点を特定するために、輝度計の測定角（ $1/3^\circ$ ）に対応する大きさの穴を開けた黒い画用紙を亚克力板につけた。発光面の輝度は、 $300 \text{ cd/m}^2 \sim 18,000 \text{ cd/m}^2$ の間で変えた。図4にLEDパネルの輝度測定方法を示す。

さらにレンズ特性を確認するために、発光面に対してTHETA Z1の向きを水平方向に $0^\circ \sim 40^\circ$ の範囲では 10° ずつ、 $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲では 5° ずつ変えて撮影した。一般に、レンズの周縁部ではカメラに入る光量が落ちる。THETA Z1内で補正している可能性はあるが、THETA Z1の画素値の減衰は0.5%程度であり、撮影画像における周縁部の輝度補正は不要と判断した。

RAW画像は、画像処理ソフトImageJで8bitのグレースケール画像に変換した。測定領域内の画素値の平均と輝度の測定値より、屋外で想定される3つの輝度範囲 $300 \text{ cd/m}^2 \sim 1,100 \text{ cd/m}^2$ 、 $1,100 \text{ cd/m}^2 \sim 11,000 \text{ cd/m}^2$ 、 $11,000 \text{ cd/m}^2 \sim 18,000 \text{ cd/m}^2$ について、画素値から輝度を推定する関係式を導き出した。次に輝度推定式の精度を確認するため、建物外壁の撮影と輝度測定を行った。図5に測光の様子を示す。THETA Z1で外壁を撮影すると共に、外壁に設定した参照点9点の輝度を測定した。これを3つの異なる建物について行った。全方位画像による輝度推定値と輝度計による測定値の差は、平均して5%であり、屋外での測光には問題ないと判断した。

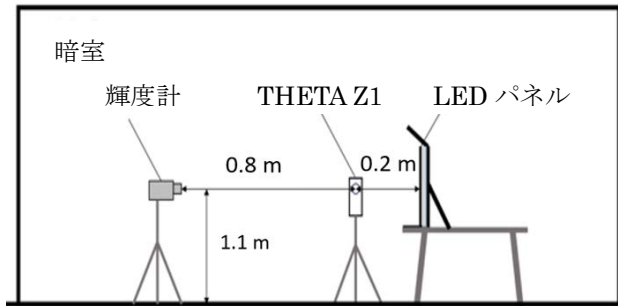


図 4 LED パネルの輝度測定

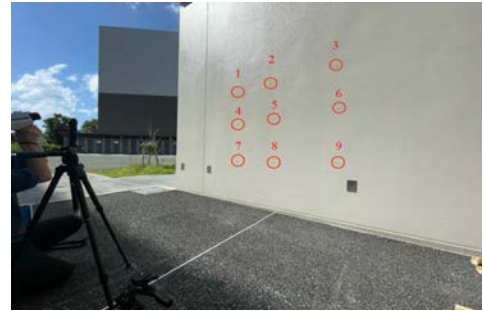


図 5 輝度推定式検証のための測光

2-2 小型無人航空機に搭載した全天球カメラによる測光

図 6 に示すように、建物外壁に高さの異なる複数の測定点を設定し、小型無人航空機に THETA Z1 を取り付け、測定点に正対して撮影した。外壁からの撮影距離は 2 通り設定した。撮影と同時に、地上の 2 点から輝度計で輝度を測定した。また、参考値として水平面昼光照度を測定した。これより、画像による輝度値と地上から測定した輝度値を比較した。画像による輝度値と輝度計による輝度値の間には、測定点の高さに関係なく、3 つの異なる測定方向について、概ね一定の関係が見られた。しかし、輝度計の測定値には、測定点までの距離の影響があると考え、加えて輝度計では 1 回に 1 点しか測定できないため、2 台の THETA Z1 を用いて、異なる測定方向からの輝度を比較することとした。

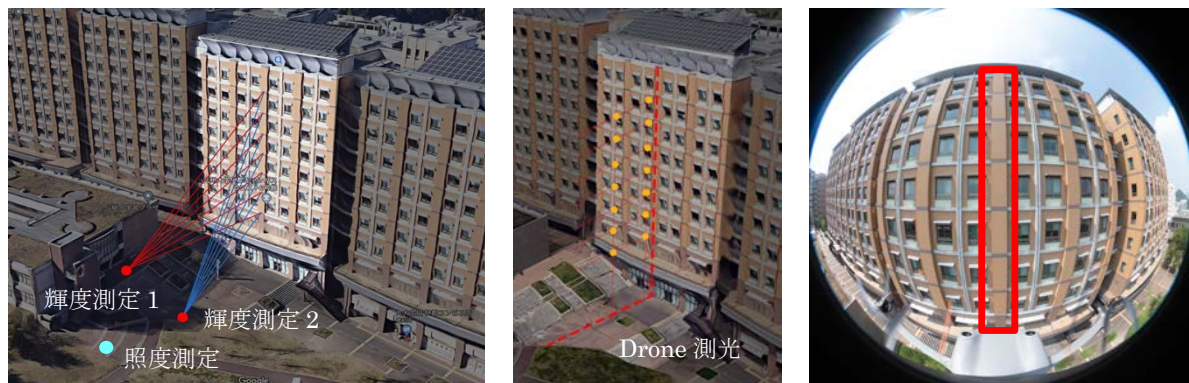


図 6 地上からの輝度測定と小型無人航空機による輝度測定

2-3 2 つの異なる方向からの測光

光庭のある建物を利用して、図 7 に示すように、光庭側 2 階上部の壁に、色の異なる 5 枚の紙製ターゲット（明度の異なる灰色 3 種・赤・青・緑・黄）を貼り付け、ターゲットを含む外壁を 2 階と屋上から同時に撮影した。また、参考値として水平面昼光照度を測定した。各色において縦 15 画素×横 20 画素に相当する部分を対象範囲に設定し、各対象範囲の輝度を比較した。

異なる位置から撮影することにより、2 つの画像間で、ターゲットにおける対象範囲の形状や大きさが変わる。画素ごとに輝度値を比較するため、OpenCV を用いてホモグラフィ（射影変換）により、2 階から撮った画像を屋上から撮った画像と対応させることとした。ホモグラフィとは、ある平面上の点を、別の平面上の点へ投影するもので、4 点以上の参照点を必要とする。魚眼レンズで撮った円形画像では、中心から離れるほど台形状の歪み大きい。したがって、図 8 に示すように、円形画像を矩形画像へ変換した後、ホモグラフィによる画素の座標変換を行った。

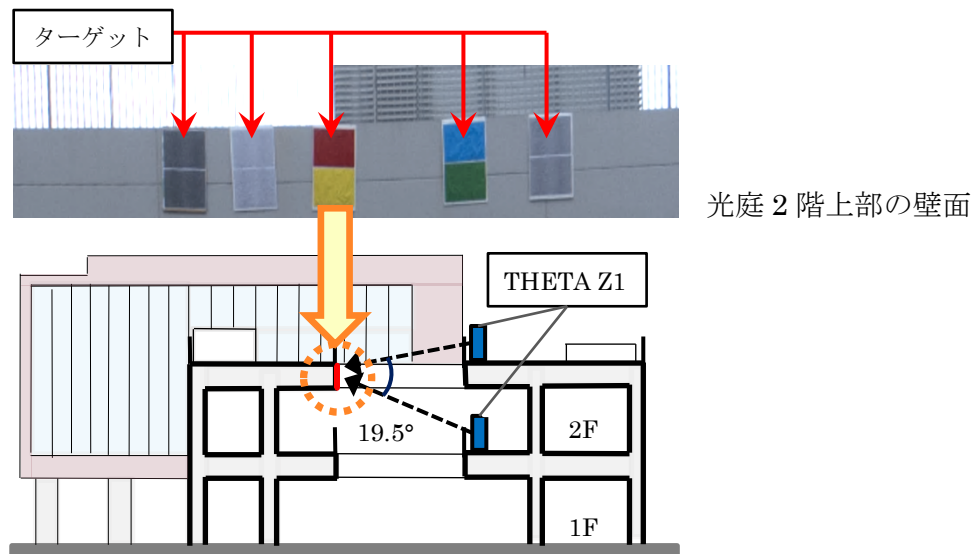


図7 2つの異なる方向からの測光

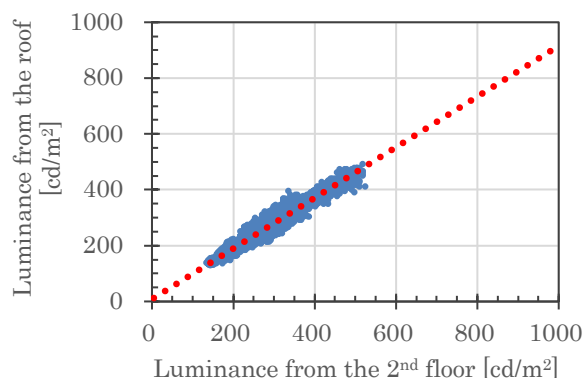
撮影場所	撮影画像（円形）	矩形変換	座標変換	画素値の比較
	OpenCV	OpenCV（ホモグラフィ）	ImageJ	
屋上				
2階				

図8 2方向からの輝度を比較するための画像処理の流れ

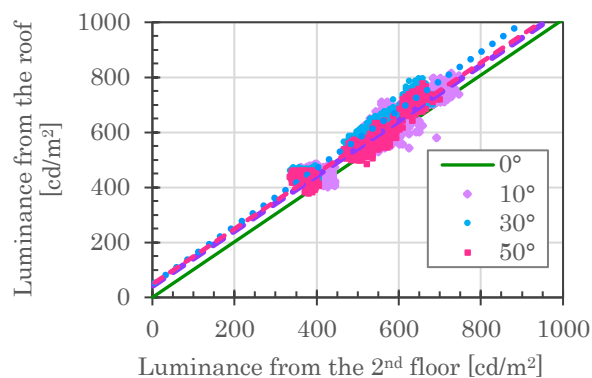
屋上からの輝度は、図9に示すように、2階からの輝度の1次関数で近似でき、ターゲットからの反射光は、概ね均等拡散と見なせることが判った。また、ターゲットの色（マンセルバリュー）と輝度の関係を確認した。さらに、屋上の撮影点を基準（水平方向 0°）として、2階の撮影点を水平に 0°から 60°まで 10°間隔で移して撮影した。水平方向についても、ターゲットからの反射光は、50 cd/m²程度の違いで均等拡散と見なせた。

2-4 建物外壁の測光データの収集

3D 都市データ PLATEAU でテクスチャ画像のある東京都内 6 か所を選び、2 方向から同時に撮影した建物外壁の画像を収集した。直射日光の影響があると考ええる部分を除いて、外壁面は概ね均等拡散と見なせることを確認した。ただし、PLATEAU のテクスチャ画像は不正確で、質が低いため、ゲームエンジンでのレンダリングには Google マップの画像を用いることとした。環境光の明るさを変え、撮影画像と同じ位置から見たレンダリング画像の色変化を調べている。



(a) 曇天時 (n=8400)



(b) 晴天時 (水平方向; 各 n=1200)

図9 2方向からの輝度の比較

参考文献

- 6) T.W. Kruisselbrink et al.: Feasibility of ceiling-based luminance distribution measurements, Building and Environment, 172, 106699, 2020
- 7) P.U.C. Songwa et al.: LumNet: Learning to estimate vertical visual field Luminance for adaptive lighting control, Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 5 (2), Article 79, 2021
- 8) M. Kim & A. Tzempelikos: Performance evaluation of non-intrusive luminance mapping towards human-centered daylighting control, Building and Environment, 213, 108857, 2022
- 9) J. Krivánek: Computer graphics III – Light reflection, BRDF, 2015
<https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2017-npgr010/slides/03%20-%20npgr010-2017%20-%20BRDF.pdf>
- 10) 電子情報通信学会「知識の森」2群2編5章 照明・反射解析、2010
https://www.ieice-hbkb.org/files/02/02gun_02hen_05.pdf
- 11) 正木：色と光沢 (1)、金属表面技術 現場パンフレット、15・17、1962

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、まず、全天球カメラによる測光のために、全方位画像の画素値から輝度を推定する式を求め、画像周縁部でも輝度補正は不要であることを明らかにした。これより、全天球カメラを搭載した小型無人航空機と地上からの測光を可能にした。次に、建物外壁に対して2方向から同時に全方位画像を取得し、反射特性を調査した。直射日光の鏡面反射成分は別に扱い、空中または地上から得た測光データを参照して、輝度マップの生成が可能であることを明らかにした。

本研究の成果は、2024年度日本建築学会大会の「窓・開口部がもたらす光・視環境の評価と設計規準」に関するオーガナイズドセッション (2024年8月) で発表予定である。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

深層学習で地物の輝度を推定するために、測光データを蓄積し、2つのアプローチを試みる。すなわち、地物の反射率を推定して輝度を求める方法と、輝度を直接推定する方法である。学習用データの収集には、3Dレーザースキャナも用いる。3Dレーザースキャナが取得する色情報は内蔵カメラによるため、全天球カメラの利用と同じだが、反射強度 (反射率) を測定できる。

また、日照がある場合に日影の影響を受ける部分の輝度を推定するために、環境光の強さが異なるレンダリング画像と、異なる昼光照度下の撮影画像の間で、陰の明るさ変化の対応を求める。