拡張現実感による照明シミュレーションのための 色票を用いた光学的整合性の実現手法

PHOTOMETRIC REGISTRATION USING A COLOR CHART FOR LIGHTING SIMULATION IN AUGMENTED REALITY

福田知弘*, 林 緯 政**, 矢吹信喜***

Tomohiro FUKUDA, Weicheng LIN and Nobuyoshi YABUKI

This research presents the photometric registration of a 3-Dimensional Computer Graphics (3DCG) and live video image at the time of simulating lighting design in Augmented Reality (AR). First, a color chart system with three brightness levels and a brightness measurement system were developed. Secondly, the accuracy of the 3DCG model with illumination effects was verified. Finally, the 3DCG model with illumination effects was input to an AR system in which a color chart system was installed. Consequently, the brightness of the 3DCG model and the live video image were equalized. This experiment showed that the proposed system was effective.

Keywords : *Augmented Reality, lighting design, lighting simulation, illuminance, photometric registration*

拡張現実感, 照明デザイン, 照明シミュレーション, 照度, 光学的整合性

1. はじめに

1.1 視覚化に着目した照明シミュレーション手法と課題

建築・都市分野において、安全性、機能性、美観性、快適性、省エネ、低炭素社会、脱光害等に配慮した最適な照明環境を実現するためには、計画・設計・施工の各段階で周辺の環境も含む照明シミュレーションを行い、予測内容を視覚化する必要がある。このため、伝統的には模型や手書きパースが使用されてきたが、再現性・正確性・操作性等の観点から一定の限界がある。それらの課題解決に向けて、コンピュータシミュレーション技術が開発されており、3DCG (3-Dimensional Computer Graphics) 静止画、3DCG アニメーション、VR (Virtual Reality: 人工現実感) が実用化されてきた。

3DCG 静止画は、3次元仮想空間上に3次元形状や質感、光源を定義し(以上、3DCG モデル)、プリレンダリング処理によりある視点からの画像を作成する手法である。3DCG アニメーションは、連続的に作成された3DCG 静止画を時系列に沿って繋げた動画画像である。これらの手法は、一定の精度を得るための計算時間を確保することが可能であり、高いシミュレーション精度を得ることが可能となる¹⁾。一方で、検討会議中に視点や照明設計等のパラメータをその場で変更して、異なる視点や代替案を実時間で再生成することは困難である。

VR は、3DCG モデルをリアルタイムレンダリング処理により動画画像

を作成する手法である。実時間で計算する必要があるため、一般に、シミュレーション精度は3DCG 静止画より劣る。しかしながら、実時間性を確保しているため、リアルタイムに視点位置、視線方向、光環境条件を変更して計算できる^{注1)}。そのため、照明設計検討の初期段階に多数のパラメータを変更して大まかな検討を行う際に有効であると考えられる²⁾。一方、3DCG 静止画、3DCG アニメーション、VR に共通する課題として、シミュレーションすべき全ての情報を3DCG モデルとして仮想空間上に定義する必要がある(図1(左))。すなわち、設計対象物のみならず、設計対象物の周辺環境を表現する必要があり、現状の環境調査と照明効果付き3DCG モデル化に多大な労力が必要とされてきた。

このような背景からビデオカメラ等により取得される実写映像と仮想空間の情報とを重量表現可能なAR (Augmented Reality: 拡張現実感) に関する研究が進められている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。AR を応用すれば、設計対象物以外の3DCG モデルを構築する代わりに実写映像を用いることにより、設計対象物を現状の環境中に包含してシミュレーションでき、現状の環境を3DCG モデル化する工数と手間の削減が期待できる(図1(右))。

AR では実写映像と3DCG モデルとの幾何学的整合性、光学的整合性、時間的整合性に関する議論がなされている。本研究では、このうち照明シミュレーションと関わりの深い光学的整合性に着目する。

本論文は、第34回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告)²³⁾、日本建築学会近畿支部研究報告集²⁴⁾において発表した論文に加筆・修正したものである。

* 大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻
准教授・博士(工学)

** 袁宗南照明設計事務所 工修

*** 大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻
教授・Ph. D.

Assoc. Prof., Division of Sustainable Energy and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.

J.Y. Light Design, M. Eng.

Prof., Division of Sustainable Energy and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Ph. D.

図1 周辺環境を含む夜景VRの例(左), 昼景ARの例⁹⁾(右)

照明効果付き3DCGモデルと実写映像とをAR上で重畳させる際には、それらの光学的特性を一致させることが重要な課題である。すなわち、3DCGモデルの測光量と実写映像のそれとが同一である場合に、AR画面上で3DCGモデルと実写映像の表示が同一となるように実現するための手法が望まれる。このような、光学的整合性の実現手法に関する既往研究について次節で整理する。

1.2 既往研究の整理

ARにおける光学的整合性の実現手法の研究動向について整理する。池内ら¹⁰⁾は、画像列から反射モデルの係数を抽出し、これを物体表面に蓄積して任意光源・任意視点での画像を合成することを可能とするモデルベース法を示した。神原ら¹¹⁾は、幾何学的整合性と光学的整合性を同時に解決するために正方マーカと鏡面球を組み合わせた3次元マーカを利用して違和感のないAR環境の構築を試みた。富手ら¹²⁾は、現実の影と光学的な整合性を保って仮想の影を描画する手法を検討した。角田ら¹³⁾は、シーンの3次元モデル周辺に仮想的な平面上の物体を配置し、この平面群に対して物体の影を表す画像をテクスチャマッピングすることで実光源環境に対応した物体のソフトシャドウを高速に表現する手法を提案している。小川ら¹⁴⁾は、正方形マーカを固定する押しピンが作る影を手がかりとして、光源を正確に推定する手法を検討した。仁科ら¹⁵⁾は、仮想物体の陰影のみならず写り込みを再現するため、ハイダイナミックレンジで撮影した画像から光源環境推定を行う手法を検討した。これらの報告は、実空間に存在する照明環境や陰影を手掛かりに光源環境マップを作成して3DCGモデルに合成する試みである。一方、本研究が対象とするような照明設計分野にARを応用する場合、照度等の測光量と視覚化されたAR映像との関係も確認可能であることが必要とされる。上述した既報では測光量についての記述は見られず照明設計ツールとしての使用に課題が残る。

1.3 本研究の目的

一方、実際の照明シミュレーションの現場において、実物の光源と3DCGモデルを両方とも用意することは稀である。すなわち、3DCGモデルと実写映像の測光量が同値になっているかを確認することは実質困難であり、何らかの手法により支援する必要がある。興味深い既往研究として、篠田ら¹⁶⁾¹⁷⁾は、空間の明るさ感を測定する手法として色モード境界輝度測定法を提案している。これは、同じ輝度を持つパッチ(視対象)を明るさ感の異なる空間に入れると、空間の明るさ感の大きさに応じて知覚されるパッチの明るさが異なるという人間の視覚特性を応用して「空間の明るさ感」を定量化する手法である。本研究では、篠田ら¹⁶⁾が提案したようなパッチを媒介として、実物の光源により発生する照度と3DCGモデルにより発生するそれとを同値化させることが可能になると考えられる。

そこで本研究は、ARで照明シミュレーションを行う際に必要とな

る、3DCGモデルと実写映像との光学的整合性を色票を媒介として実現することを目的とした。

本研究で開発するARシステムの位置づけを述べる。ARは実時間性を確保するため計算精度は高くない。そのため、精度の低い計算結果を考慮の上で設計内容をある程度正しく予測することが可能なユーザが対象となる。具体的には、照明設計者自身の検討や、照明の専門家同士による検討の場での使用が考えられる。また活用の段階であるが、ARシステムは、VRと同様、実時間性を確保しているため、リアルタイムに視点位置、視線方向、光環境条件を変更して再計算できる。そのため、照明設計検討の初期段階に多数のパラメータを変更して大まかな検討を行う際に有効であると考えられる。

2. 照明シミュレーションのためのARシステムの構築

2.1 構築したARシステム

ARシステムは既往研究⁶⁾¹⁸⁾の成果を基に、人工マーカ方式とし、ARtoolKit¹⁹⁾を基本ライブラリとして構築する。人工マーカは一般に紙等を材料とするが、本研究が対象とする夜間の場合、使用する空間の照度が低く、人工マーカの認識が困難である可能性が高い。そこで、ノートPCの画面上にマーカを表示させる内照式のマーカとした。

ARシステムのフローを図2に示す。まず、3DCGソフトウェア上で、照射面となる床や壁等の形状、色(反射率を含む)、テクスチャを含む3DCGモデルの定義、及び、光束、色温度(RGB)、配光曲線を含む光源モデルの定義を行った後、テクスチャレンダリングを行い、VRML(Virtual Reality Modeling Language)形式として出力する。結果、照明効果付きテクスチャを含む3DCGモデルが生成される。次に、ARシステムに3DCGモデルを入力し、webカメラで内照式の人工マーカをキャプチャして、画面上に3DCGモデルと実写映像とを重畳させてAR表示する。

2.2 色票システムの設計

本研究では白色光源を対象とする。同値化させるパッチは色票とし、3DCGモデルとして表示される色票 CS_{cg} と実空間に配置されwebカメラにキャプチャされて実写映像としてAR表示される色票 CS_{video} を準備する。色票 CS_{cg} 、 CS_{video} はいずれも、使用する空間の照度が低くても対応可能であるよう、いずれもノートPCの画面上に表示させる。そのため、デジタル画像で用いられる画素階調値(RGBをそれぞれ8bit表現した場合の階調値の平均値。本研究では白色光源を対象とするためグレースケール画像となり $R=B=G=$ 平均値である)について、3段階の明るさ(RGB値)、白($R=G=B=255$)、50%灰($R=G=B=127$)、黒($R=G=B=0$)を準備する(図3)。すなわち、各RGB値において、色票 CS_{cg} のRGB値 RGB_{cg} と、色票 CS_{video} のRGB値 RGB_{video} が同値であれば、光学的整合性は実現していると考えられる。

光学的整合性の実現に影響を与えるパラメータを整理する。照明シミュレーション時には、光源は点光源として定義され、光源の光束、色温度、配光曲線をパラメータとして使用する。3DCGモデルの色や反射率は実空間と同一にする必要がある。実物の光源はwebカメラを通じてAR表示されるため、色票 CS_{video} を表示するディスプレイの輝度、webカメラのパラメータである明るさ、コントラスト、ガンマ、露出等がRGB値に影響を与える。尚、色票 CS_{cg} の各RGB値 RGB_{cg-255} 、 RGB_{cg-127} 、 RGB_{cg-0} は、パラメータの影響を受けないため、

図 2 AR システムのフロー

図 3 AR 画面上に表示した色票システム

常に, $RGB_{cg-255}=R=G=B=255$, $RGB_{cg-127}=R=G=B=127$, $RGB_{cg-0}=R=G=B=0$ となる。

2.3 RGB 値計測システムの開発

色票システムでは, 3 段階の RGB 値 RGB_{cg} と RGB 値 RGB_{video} とを同値化することが重要となる。一方, 前節で述べたように, この同値化の作業には多数のパラメータが存在するため, 短時間に数多くのパラメータの組み合わせを試行できることが望ましい。そのため, RGB_{cg} と RGB_{video} を効率的に計測できる RGB 値計測システムを開発した。

RGB 値計測システムのフローを図 4 に示す。AR 画面上に表示された各 RGB 値の色票 CS_{cg} と色票 CS_{video} を順に選択する。選択された色票の中心点の周囲 64 画素を抽出する。抽出された画素群の各 V 値を取得し, 求めた平均値を色票の RGB 値 RGB_{cg-255} , RGB_{cg-127} , RGB_{cg-0} ,

図 4 RGB 値計測システムのフロー

$RGB_{video-255}$, $RGB_{video-127}$, $RGB_{video-0}$ とする。次に, RGB_{cg-255} と $RGB_{video-255}$, RGB_{cg-127} と $RGB_{video-127}$, RGB_{cg-0} と $RGB_{video-0}$ の値をそれぞれ比較し, 差がある場合にはパラメータを変更して再計測を行う。RGB 値計測システムは, OpenCV (Open Source Computer Vision) ²⁰⁾ の各ライブラリを使用して開発した。

3. 照明効果付き 3DCG モデルの精度検証

3.1 3DCG 照度分析の性能確認

(1) 実験概要

AR 上に照明設計モデルを表示するために照明効果付き 3DCG モデルを作成する必要がある。まず, この 3DCG モデルが照明光学理論をどの程度再現可能であるかを確認する。本研究で使用した光源は, パナソニック製 LED 電球 (LDA7D-A1) である。これは照明シミュレーションに必要な, 光束 (570lm), 色温度 (6700K), 配光曲線が入手可能であるためである。3DCG モデル作成と照度分析には Autodesk 製 3ds MAX DESIGN 2010 (以下, 3dsMAX) の照明分析アシスタントを使用した。実験内容は以下の通りである。

- ・光源よりある一定の距離 h に作業面上を定義し, 作業面上の照度を照度計算式並びに 3DCG 照度分析機能によりそれぞれ計算する。 h は, 30cm, 50cm, 100cm とした。
- ・照度計算式について述べる。図 5 (左) のように, 点光源のある方向の光束が I である時, h の距離における光の方向に垂直な面上 P 点の照度 E は逆二乗の法則により, 式 (1) となる。

$$E = I/h^2 \quad (1)$$

図 5 逆二乗の法則(左)と光源の配光曲線(右)

図 6 3dsMAX の照明分析アシスタント画面

- ・ 光度 I は光源の配光曲線 (図 5 (右)) より読み取り, h に, 30cm, 50cm, 100cm を代入して, E_{F-30} , E_{F-50} , E_{F-100} を求める.
- ・ 3dsMAX 上に, 図 5 (左) と同じ 3DCG モデルを作成し, 距離 h 上空に光源の光束と配光曲線 (.ies) を付与した点光源モデルを配置して照度解析を行い, E_{CG-30} , E_{CG-50} , E_{CG-100} を得る (図 6).
- ・ 計算結果を比較して, 3DCG 照度分析の性能を確認する.

(2) 結果

照度計算式並びに 3DCG 照度分析による照度値を表 1 に示す. 結果, 照度計算式で得られる照度値 E_{F-30} , E_{F-50} , E_{F-100} と, 3DCG 照度分析で得られる照度値 E_{CG-30} , E_{CG-50} , E_{CG-100} は同値である. すなわち, 3DCG 照度分析機能の性能は照度計算式に基づいているといえる.

表 1 3DCG 照明分析の性能確認結果

測定距離 (cm)		30	50	100
照度 (lx)	照度計算式	1734	624	156
	3DCG 照度分析	1734	624	156
照度計算式-3DCG 照度分析		0	0	0

3.2 3DCG 照度分析と実測の比較

(1) 実験概要

次に, 3DCG 分析により作成される 3DCG モデルと実物の光源の照度値との比較を行う^{注2)}. 以下の 2 種類の実験を実施した (図 7).

a) 実験①

室内にて実物の光源を 3.1 節と同様に, h が 30cm, 50cm, 100cm, 150cm, 200cm の地点で, 照度を測定した^{注3)}.

b) 実験②

実験①では垂直距離 h に関する照度を測定したが, 実験②では現実の設計により近い条件を想定する. そのため, 実物の光源と照射面 (壁) との距離 d を 50cm, 100cm と変化させ, 床面に設置された実物の光源の水平位置から垂直方向 0~100cm の範囲で照度を測定した^{注4)}.

図 7 実験②の測定方法 (左) と実験風景 (右)

(2) 結果

a) 実験①

結果を表 2 に示す. 結果, 実測値の方が 3DCG 照度分析による照度値より全て高くなった. 実測値の照度は 3DCG 照度分析より 14~52% 高い.

b) 実験②

3DCG 照度分析と実測値の比較結果を図 8, 9 に示す. 結果, 実験

表 2 3DCG 照度分析と実測との比較 (実験①)

測定距離 (cm)		30	50	100	150	200
照度 (lx)	3DCG	1734	624	156	69.4	29
	実測	1976	837.7	234.7	80.4	44.1
実測/3DCG 照度分析		1.14	1.34	1.5	1.16	1.52

①と同様に, 実測値の方が 3DCG 照度分析による照度値より全て高い. $d=50$ cm の時, 実測値の照度は 2~43% 高く, 光源に近い地点ほど値の差が大きくなった. $d=100$ cm の時, 実測値の照度は 18~33% 高く, 光源に近い地点ほど両者の値の差が大きくなった^{注5)}.

3DCG 照度分析と実測値の差が生じる原因について, 照明の専門家にヒアリングを行った結果を併せて整理する.

- ・ 照明器具の光束値は, 基準値 (公表値=3DCG 照度分析機能に使用) と必ずしも同一ではなく, 許容される範囲の最大値及び最小値が存在する. 最大値と最小値の差を公差と呼ぶが, この値は明らかでない.
- ・ 照明器具の光束値は, 経年変化により新品の時点から徐々に減少する. 公表値はある時間断面の値であるため, 実測値とは一致しない可能性が高い.
- ・ 照度計算式並びに 3DCG 照度分析は光源を点光源として扱う. 一方, 実物の光源は厳密には面光源である. そのため, 光源近傍では計算値と実測値に差が生じる可能性が高い.
- ・ 床, 壁, 天井面からの間接光の影響.

図 8 3DCG 照度分析と実測との比較 (実験②, $d=50$ cm)

図 9 3DCG 照度分析と実測との比較 (実験②, $d=100$ cm)

図 10 光束値の補正結果の比較

3.3 3DCG モデルに与える光束値の補正

(1) 実験概要

3.2 節の結果より, AR 上で 3DCG モデルと実物の光源との照度値の同一化を図るため, 3DCG 照度分析時に与える光束値を増加させて補正する. 光束について, 公表値 570lm に係数 1.1~1.3 を乗じた値を光束補正值として, 3.2 節 b) 実験②の 3DCG 分析を再実施する.

(2) 結果

結果を図 10 に示す. 照度値について, 光源からの測定高さが 10~100cm の間における 3DCG モデルの照度値を実測値で除した平均を求めると, 公表値 570lm を使用した場合に 0.83 であるのに対して, 係数 1.1 (光束 627lm) の場合に 0.91, 係数 1.2 (光束 684lm) の場合に 1.0, 係数 1.3 (光束 741lm) の場合に 1.11 となった. 値が最も良好な係数 1.2 (光束 684lm) の場合について, 測定高さ別に見ると, 光源に近い位置ほど 3DCG モデルの照度値と実測値との差が大きくなる一方, 測定高さが 40cm 以上の場合にはほぼ同値となることが確認された. よって, 以降は光束 684lm として照度分析を行う^{注6)}.

4 色票を媒介とした AR 光学的整合性の検証

4.1 実験概要

2 章で構築した色票システムを含む AR システム上に 3 章で検証した照明効果付き 3DCG モデルを入力して, 実物の光源と同条件の 3DCG モデルとを並べて配置し, 光学的整合性の実現状況を検証する^{注7)}.

実験装置配置図を図 11 に示す. ディスプレイ 1 は AR 表示用であり AR システムがインストールされている. また, ディスプレイ上部には web カメラが水平視で設置されている. ディスプレイ 2 は AR マーカ用である. ディスプレイ 3 は色票 CS_{video} 用である^{注8)}. ディスプレイ 3 と壁との間には実物の光源が設置されている. 尚, 壁の材質はコンクリートであり, 白く塗られている. 反射率は不明である.

色票 CS_{video} と色票 CS_{cg} との RGB 値 RGB_{cg-255} と RGB_{video-255}, RGB_{cg-127} と RGB_{video-127}, RGB_{cg-0} と RGB_{video-0} をそれぞれ同値化させる作業の間, 光源は消灯状態である. 次に, 色票 CS_{video} と色票 CS_{cg} とが同値化された後, 光源を点灯させ, AR 表示された 3DCG モデルと実写映像との RGB 値を観察する. その際, AR 映像をスクリーンキャプチャし, 画像処理ソフトを用いて光源からの一定間隔別に RGB 値を測定する.

同値化作業を行う際には, 2.2 節で示したパラメータが色票 CS_{video} の RGB 値に影響を与えるが, 組み合わせが膨大となるため, 予備実験を通じて各パラメータ値の絞込みを検討した. まず, 色票 CS_{video} を表示するディスプレイ 3 の輝度レベルは 0~8 の 9 段階に変更が可能であるが, 輝度レベルが高いと色票 CS_{video} の RGB 値が RGB_{video-0} = 0 を示さなくなり, 輝度レベルが低いと色票 CS_{video} の RGB 値が RGB_{video-255} = 255 を示さなくなることが観察された. そのため, ディスプレイ 3 の輝度レベルは中間値の 4 と 5 を採用した. 次に, web カメラのパラメータである明るさ, コントラスト, ガンマ, 露出の内, 露出は最大値 (1) で固定した. 明るさ, コントラスト, ガンマについては, RGB 値計測システムを使用して計測される RGB_{cg-255}, RGB_{cg-127}, RGB_{cg-0}, RGB_{video-255}, RGB_{video-127}, RGB_{video-0} の計測結果を観察しながら, RGB_{cg-255} と RGB_{video-255}, RGB_{cg-127} と RGB_{video-127}, RGB_{cg-0} と RGB_{video-0} とが可能な限り同値となるように調整する. また, web カメラと色票 CS_{video} を表示する液晶ディスプレイとの成す角度によっても RGB 値は変化する^{注9)}. 本実験では, web カメラと色票 CS_{video}

図 11 実験風景 (上: 平面図, 下: 写真)

を表示するディスプレイ 3 との成す角度は 10°, 20°, 30° の 3 パターンを設定した. これらの組み合わせにより下記の 4 ケースを設定した.

- ・ ケース 1: ディスプレイ 3 の輝度レベルは 4, web カメラとディスプレイ 3 との成す角度は 10°, web カメラの明るさ 10, コントラスト 15, ガンマ 105
- ・ ケース 2: ディスプレイ 3 の輝度レベルは 4, web カメラとディスプレイ 3 との成す角度は 10°, web カメラの明るさ 10, コントラスト 15, ガンマ 110
- ・ ケース 3: ディスプレイ 3 の輝度レベルは 4, web カメラとディスプレイ 3 との成す角度は 20°, web カメラの明るさ 10, コントラスト 20, ガンマ 160
- ・ ケース 4: ディスプレイ 3 の輝度レベルは 5, web カメラとディスプレイ 3 との成す角度は 30°, web カメラの明るさ 10, コントラスト 20, ガンマ 160

4.2 結果と考察

(1) 色票の同値化の状況

色票 CS_{cg} と色票 CS_{video} の RGB 値の結果を表 3 に示す. 2.3 節で示した通り, 各色票の中心点の周囲 64 画素の RGB 値 (0~255) を抽出し, 各色票について, 平均値を RGB_{cg-255}, RGB_{cg-127}, RGB_{cg-0}, RGB_{video-255}, RGB_{video-127}, RGB_{video-0} とした. RGB_{cg} はいずれのケースも (RGB_{cg-255}, RGB_{cg-127}, RGB_{cg-0}) = (255, 127, 0) となった. RGB_{video} は液晶ディスプレイに表示された人工マーカを web カメラでキャプチャするため, 各画素の RGB 値の標準偏差が大きくなった. また, RGB_{cg-255} と RGB_{video-255}, RGB_{cg-127} と RGB_{video-127}, RGB_{cg-0} と RGB_{video-0} の値が完全に一致するケースは現れなかったものの, RGB_{video} の三色票の合計と RGB_{cg} の三色票の合計との差の絶対値は, 4~19 と小さな値を示した.

特にケース 3 の差は 4 と最小であり、同値化はほぼ達成しているといえる。

表 3 色票 CS_{cg} と色票 CS_{video} の RGB 値

			ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
R=G=B =0 (黒)	RGB _{video}	平均	0	0	3	3
		標準偏差	0	0	0	0
	RGB _{cg}	平均	0	0	0	0
		標準偏差	0	0	0	0
R=G=B =127 (50% 灰)	RGB _{video}	平均	128	140	128	105
		標準偏差	3	2	3	2
	RGB _{cg}	平均	127	127	127	127
		標準偏差	0	0	0	0
R=G=B =255 (白)	RGB _{video}	平均	247	255	255	255
		標準偏差	2	0	0	0
	RGB _{cg}	平均	255	255	255	255
		標準偏差	0	0	0	0
RGB _{video} 平均計 - RGB _{cg} 平均計			-7	13	4	-19

(2) 実物光源と 3DCG モデルの光学的整合性の実現状況

壁の反射率が不明であるため、4.1 節で設定した 4 つのケースについて、3DCG モデルの壁面反射率毎 (25%, 30%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%) に AR 映像を作成して、スクリーンキャプチャする。作成された AR 画像に対して光源から一定間隔 (50mm) 毎に RGB 値を測定する。これにより、実物光源と 3DCG モデルの光学的整合性の実現状況を検証する。測定地点として、光源から垂直方向 (0~550mm。サンプル点 12)、光源上空 250mm から水平方向 (0~300mm。サンプル点 7) とした。測定の状況を図 12 に示す。

垂直方向と水平方向を総合した結果を図 13 に示す。反射率別に、19 のサンプル点で得られた 3DCG モデルと実写映像との差の平均値を下に示す。文献²²⁾において、白壁の反射率は 55%~75%とある。そのため、ケース 3-反射率 60% (0.1)、ケース 3-反射率 70% (2.7) が妥当な数値であると考えられる。ケース 3-反射率 60% の AR 光学的整合性の実現状況を図 14 に示す。目視観察においても光学的整合性は実現しているといえ、CS_{cg} と CS_{video} の RGB 値が同値であるならば、3DCG モデルと実写映像の光学的整合性は実現することを確認した。

最後に、AR システムによる光の再現度合いについて、実験室に配置された照明を目視した場合と、照明が web カメラを通じてディスプレイに表示された場合を比較すると、ディスプレイ表示では照明の輝度 (まぶしさ) が目視の場合ほど強くない。これは実験に用いたディスプレイのダイナミックレンジが目視に比べて小さいためであると考えられる。この解決の一方策として、ダイナミックレンジのより大きいディスプレイの使用、光学透過ヘッドマウントディスプレイの使用が考えられる。光学透過ヘッドマウントディスプレイは、実空間の照明光源を直に眺めながら、その手前に 3DCG モデルを重畳させることができるため、目視に近い状態で AR シミュレーションが可能になると予想される^{注 10)}。

5 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究は、AR で照明シミュレーションを行う際に必要となる、3DCG モデルと実写映像との光学的整合性の実現手法について検討した。このため、実物の白色光源と同条件の 3DCG モデルを同時に AR 表示させ、3DCG モデルと実写映像の RGB 値の同値化を検討した。その際、実際の照明シミュレーションの現場では、実物の光源を用

図 12 測定の様子 (円印:測定点)

図 13 3DCG モデルと実写映像との差の平均値 (総合)

図 14 AR 画面キャプチャ (左) と拡大表示 (右) (ケース 3-反射率 60%)

意することは稀であるため、3DCG モデルと実写映像の媒介として色票システムを提案した。本研究の成果を以下に示す。

- ・構築した AR システムは、照明効果付き 3DCG モデルを入力することが可能であり照明シミュレーションに適用可能である。また、内照式の人工マーカを採用しているため、夜間のような低照度の空間でも利用可能である。
- ・AR システムに入力する照明効果付き 3DCG モデルは、3DCG モデルが点光源に近似されること、公表されている光束値には公差が存在すること等の理由により、実測値と照度値の差が存在する。3DCG モデルは実測値よりも常に低い値を示しており、係数 1.2 を乗じて補正すると照度はほぼ同値となることを確認した。
- ・3 段階の RGB 値を有する色票システムを構築して、3DCG モデルの色票 CS_{cg} と、実空間を実写映像として AR 表示する色票 CS_{video} との RGB 値の同値化に成功した。その際、パラメータである CS_{video} を表示するディスプレイの輝度レベルは 4、web カメラとディスプレイ 3 との成す角度は 20°、web カメラの明るさ 10、

コントラスト 20, ガンマ 160, 壁面反射率 60%において, 実物光源と 3DCG モデルとの RGB 値差は 0.1 であった。すなわち, 3DCG モデルと実写映像との光学的整合性は実現しているといえる。

5.2 今後の課題

本研究では, 一種類の LED 光源のみを対象としており, 他の点光源や面光源について検証できていない。3.3 節に示した補正の程度は光源ごとに異なることが考えられるため, データベース化が求められる。また, 光源として白色のみを扱ったため作成した色票はグレースケールとした。しかしながら実際には電球色など有彩色の光源も存在する。今後は様々な色温度の光源とそれに対応する色票の検討を行う必要がある。次に, 本研究で構築した AR システムでは, 照明シミュレーションされた 3DCG モデルの照明効果を実写映像領域に及ぼすことはできない。すなわち, AR システムの適応対象は, 照明設計の影響が 3DCG モデルの領域内に収まる場合に限られる。3DCG モデルの照明効果を実写映像領域に及ぼすことが可能なシステムを開発し, 適応対象を広げることが求められる。今後の課題としたい。

注

注1) 現状では, 夜間景観設計分野において VR 上でリアルタイム代替案を生成することは直接光の定義に留まる。

注2) 使用した光源, ソフトウェアは 3.1 節で述べた内容と同じである。以下の実験も同様。

注3) 実験日時は 2011 年 7 月 8 日 18:00~19:00, 場所は大阪大学吹田キャンパス S4-111 講義室 (W=10.0m, D=18.7m, H=3.2m) である。照度を測定する壁面はコンクリートであり, 白く塗られている。反射率は不明である。それ以外の壁面は 5m 以上離れており間接光の影響は限りなく小さい。床面は白色のタイルであるが反射の影響を抑えるため黒色の布マットを敷いた。消灯時の照度は 0lx であった。照度計は(株)コニカミノルタ製 T-10 を使用した。

注4) 実験日時は 2011 年 10 月 7 日 10:30~12:00, 場所はパナソニック電工(株)照明環境評価大暗室 (W=5.5m, D=7.5m, H=11.84m) である(社名は当時)。大暗室には窓がなく, 照射される一面が白色である他の三面は黒カーテンで覆われている。床面は濃い灰の絨毯である。消灯時の照度は 0lx であった。照度計は(株)コニカミノルタ製 T-10 を使用した。

注5) 実測照度値と 3DCG 照度分布による照度値のズレに関して, 昼光を対象とした既往研究²¹⁾では, 実測とシミュレーションの値には 1.4 倍の差があると報告されている。人工照明のみを対象とした両者のズレに関する既往研究は見当たらない。一般の照度設計では, 机上面や床面照度を検討するため, 光源-照度面距離は 3.2 節の実験で対象としたような 100cm 以下の距離以上になると考えられる。100cm 以上の場合, 両者のずれは無視できるほど小さくなることは 3.2 節で確認済みである。一方, AR システムを用いた照明検討シーンでは, 光源近傍の照明影響などを検討することも考えられるため 3.2 節の実験形態とした。尚, 本研究の限界として, 他の点光源や面光源での検証はできていない。また, 3.3 節で示したような補正の方法は, 各光源により異なることも考えられデータベース化を進める必要がある。これらは今後の課題に記述した。

注6) 本研究で実施したような平均値による光束値の補正方法による精度向上以上に実測値に近づけるためには, 光束値に加え配光曲線を補正する必要がある。しかし, 3 次元で定義される配光曲線の各パラメータを操作して実測値に近づけるには膨大な試行錯誤が必要であるため, 本研究では光束値のみの補正とした。尚, 5 章に示した通り, 本研究では, 3DCG モデルと実写映像との RGB 差はほぼ同値であることを示しており(図 13), 現在の AR システムで得られる精度は光束値のみの補正で十分であると考えられる。

注7) 実験日時は 2012 年 1 月 30 日 18:00~26:00, 場所は大阪大学吹田キャンパス S4-111 講義室である。実験室, 照度計の条件は, 注 3 と同じである。

注8) 本研究では, ディスプレイ 3(色票表示用), Web カメラのデバイスはそれぞれ, ディスプレイ 3(ソニー製 VAI0 VPCS13AGJ), web カメラ(エ

レコム製 UCAM-DLX300BK) と一般の市販品を用いている。他の市販品を用いた場合に最適なパラメータを新たに確認する必要は生じるが, 本研究で示した手順と同様の再現性は可能であると考ええる。

注9) 照明 AR シミュレーションでは 4 章で述べた実験のように, 低照度の空間での検討が多いと考えられるため, 色票は内照式が有効であると考えられる。一方, 本研究で使用した PC ディスプレイは設置角度により web カメラから見た時の色票の RGB 値が変化してしまい, キャリブレーションの手間が増えた。これは, 用いた PC ディスプレイが液晶ディスプレイである上にプライバシー保護の観点から斜め方向からの視認性を低下させているためである。あらゆる方向から眺めた時に同じ RGB 値となる内照式色票は技術的には可能であるため, この課題解決に向けて検討する必要がある。

注10) 光学透過ヘッドマウントディスプレイは研究開発が進められているが, 本研究実施時点では, 性能面とコスト面で課題が多いと判断したため採用していない。光学透過ヘッドマウントディスプレイの利用により, 本研究で用いた web カメラは少なくとも不要となるため, 4.1 節で述べたパラメータの組合せを減らすことにも寄与できると考える。

参考文献

- 1) T. Fukuda, R. Nagahama, A. Kaga, S. Oh, T. Sasada: Collaboration Support System for City Plans or Community Designs based on VR/CG Technology, International Journal of Architectural Computing, Issue 04, Volume 01, pp.461-469, 2003.12.
- 2) T. Fukuda, R. Nagahama, A. Kaga, S. Oh, T. Sasada: Collaboration Support System for Nightscape Design based on VR Technology, Proceedings of The 7th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA2001), pp.103-111, 2001.4.
- 3) T. P. Viet, C. S. Yeon, W. S. Hak, C. Ahrina: AR: An Application for Interior Design, Proceedings of The 14th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA2009), pp.116-124, 2009.4.
- 4) Charles, W., Mika, H., Otto, K., Tuomas, K., Miika, A., Kari, R., Kalle, K.: Mixed Reality for Mobile Construction Site Visualization and Communication, Proceedings of the 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (conVR2010), pp.35-44, 2010.11.
- 5) N. Yabuki, K. Miyashita, T. Fukuda: An invisible height evaluation system for building height regulation to preserve good landscapes using augmented reality, Automation in Construction, Volume 20, Issue 3, pp.228-235, 2011.3.
- 6) S. Watanabe: Simulating 3D Architecture and Urban Landscapes in Real Space, Proceedings of The 16th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA2011), pp.261-270, 2011.4.
- 7) 中林拓馬, 加戸啓太, 平沢岳人: 拡張現実感と模型を用いた建築設計用ツールの開発, 日本建築学会技術報告集, 17, 37, pp.1053-1056, 2011.10.
- 8) N. Yabuki, Y. Hamada, T. Fukuda: Development of an accurate registration technique for outdoor augmented reality using point cloud data, 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE2012), 2012.6.
- 9) T. Fukuda, T. Zhang, Y. Yabuki: Availability of Mobile Augmented Reality System for Urban Landscape Simulation, 9th International Conference, CDVE (Cooperative Design, Visualization, and Engineering) 2012, pp.231-238, 2012.9.
- 10) 池内克史, 佐藤洋一, 西野恒, 佐藤いまり: 複合現実感における光学的整合性の実現, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 4(4), pp.623-630, 1999.12.
- 11) 神原誠之, 横矢直和: 光源環境の実時間推定による光学的整合性を考慮したビジョンスペース拡張現実感, 電子情報通信学会技術研究報告, 102(555), pp.7-12, 2003.
- 12) 富手要, 藤木真和, 麻生隆: 複合現実感における影の光学的整合性に關する検討とレイトレーシングによる実現, 情報処理学会研究報告, 2008(3), pp.75-80, 2008.
- 13) 角田哲也, 大石岳史, 池内克史: 影付け平面を用いた複合現実感におけ

- る高速陰影表現手法, 映像情報メディア学会誌, Vol. 62, No. 5, pp. 788-795, 2008.
- 14) 小川拓也, 倉持元陽, 山本昇志: 物体の影からの光源推定を用いた複合現実感の生成, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 35, No. 8, pp. 139-142, 2011.
- 15) 仁科勇作, 奥村文洋, 神原誠之, 横矢直和: 適応的なハイダイナミックレンジ画像合成による拡張現実感のための光源環境推定, 情報処理学会研究報告, 2008(3), pp. 185-190, 2008.
- 16) 篠田博之, 山口秀樹: 色モード境界輝度による視環境の明るさ評価, 照明学会誌, 93(12), pp. 885-891, 2009. 12.
- 17) 山口秀樹, 篠田博之: 色モード境界輝度による空間の明るさ感評価, 照明学会誌, 91(5), pp. 266-271, 2007. 5.
- 18) 加藤博一, M. Billinghamurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, パーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 4, No4, pp. 607-616, 1999. 12.
- 19) HITLab : ARToolkit Home Page, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, (参照 2012. 9. 25)
- 20) OpenCV. jp: opencv samples and documents, HITLab : ARToolkit Home Page, <http://opencv.jp/>, (参照 2012. 9. 25)
- 21) 栗木茂, 大阪谷彰, 三浦寿幸, 村江行忠: 高窓を有する小学校の室内照度分布の実測とシミュレーションの比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 581-582, 2008. 9.
- 22) 平山嵩: 建築学大系 22 室内環境計画「新建築学大系 22」, 1969.
- 23) 林緯政, 福田知弘, 矢吹信喜: AR を用いた夜間景観シミュレーションのための光学的整合性の実現に向けた基礎的研究, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 34 回情報・システム・利用技術シンポジウム論文集(報告), pp. 175-178, 2011. 12.
- 24) 福田知弘, 林緯政, 矢吹信喜: AR を用いた照明シミュレーションのための光学的整合性の実現手法に関する研究, 平成 24 年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 52 号環境系, pp. 17-20, 2012. 6.

(2012年 9 月27日原稿受理, 2013年 4 月26日採用決定)