

# 輝度分布を最適化する照明制御システムにおける輝度計測システムの精度の検討 —デジタル一眼レフカメラを用いた輝度計測システムの構築—

江見 明彦  
Akihiko EMI

## 1 はじめに

近年、オフィスにおける、オフィスワークの快適性および知的生産性の向上に注目が集まっている。オフィス環境を改善することにより、知的生産性が向上すると報告されている<sup>1)</sup>。また、オフィス環境のうち、特に光環境に着目した研究では、執務に最適な照度を個人ごとに提供することがオフィス環境の改善に有効であることが明らかとなっている<sup>2)</sup>。

このような背景から、著者らは、任意の場所に任意の明るさを提供することで、執務者の快適性を実現する照明システムの(以下、知的照明システム)研究・開発を行っている<sup>3)</sup>。知的照明システムを実オフィスに導入した結果、執務者が要求する机上面照度を実現できることがわかった。一方で、視野内の輝度分布が執務の快適性に影響を与えるという研究成果が報告されているが(参考文献)、知的照明システムにおいて、この視野内の輝度分布は考慮されていない。そこで著者らは、輝度分布を考慮する照明制御システムの開発を行っている。

輝度分布を考慮する照明制御システムでは、視野内の輝度分布を計測する必要がある。市販の二次元輝度計測システムには、非常に高い精度をもつ専用の計測機器があるが、デジタルカメラを用いて簡易的に計測する手法もある<sup>4,5)</sup>。さらに、近年では、デジタルカメラの高性能化が進んでおり、専用の計測機器を用いずに、デジタルカメラで輝度分布を計測し、照明制御に利用することが可能であると考えられる。そこで、本研究では、デジタルカメラを利用した輝度分布計測システムを構築し、市販の輝度計測機器と精度の観点から比較を行う。

## 2 輝度計測システムの構築

### 2.1 作成概要

デジタルカメラを用いて、輝度分布を計測する方法を説明する。デジタルカメラはレンズを通して光を受けた撮像素子(イメージセンサ)が電子を放出し、それを信号処理回路が電気信号に変えて、画像がデジタル信号で記憶される。この情報から得られる画素の階調値と輝度との間には、一定の対応関係がある。すなわち、この対応関係を数式化することにより、デジタルカメラにより撮影された画像から輝度分布を推定することが可能である。対応関係を求めるために、ある対象物をデジタルカメラで撮影し、その時の輝度を輝度計を用いて測定する。これにより、階調値と輝度の1対1の関係を導き出す。

### 2.2 カメラ出力値と輝度計による測定値のキャリブレーション

デジタルカメラで撮影した画像から階調値と輝度計で測定した輝度との対応関係を求めた。香知館 KC111 実験室の壁に、測定対象を設置し、約5メートル離れた位置にデジタル一眼レフカメラ(Canon EOS 5D)および輝度計(KONICA MINOLTA 製 LS-100)をカメラ画像の中心にフェルト生地が位置するように設置した。なお、測定対象としては、拡散反射率が高く、安価で容易に入手のできるフェルト生地を撮影の対象物として用いた。これは、鏡面反射率の高い壁面などを測定の対象とすると、設置位置の異なる輝度計およびデジタルカメラへの入光量に差がでるためである。撮影した画像を Fig.1 に、Table1 に用いたカメラのスペックを示す。



Fig.1 フェルト生地の撮影画像

Table1 デジタルカメラのスペック

機種	Canon EOS 5D
レンズ	Canon EF 24-85mm F3.5-4.5
画像サイズ	4368 × 2912
撮像素子のタイプ	CMOS
撮像素子の大きさ	フルサイズ 35.8 × 23.9mm
撮像素子の分解能	12bit
カラーフィルタ方式	RGB 原色フィルター

実験室に取り付けられた電球色蛍光灯および白色蛍光灯の点灯光度を変えることでフェルト生地の輝度を調節した。それぞれの輝度において、レンズの絞り(F値)、露光時間(シャッタースピード)、およびレンズのズーム

(焦点距離)は固定して撮影した。撮影時のデジタルカメラの設定を Table2 に示す。

Table2 デジタルカメラの設定

レンズ焦点距離	24mm
露出モード	マニュアル
ホワイトバランス	蛍光灯
ISO 感度	100
絞り (F 値)	5.6

輝度値と階調値を比較するために、輝度値は輝度計の測定値を用いる。また、階調値は撮影画像内の、輝度計の測定範囲に対応する領域を抽出し、その領域に含まれる画素の階調値の平均値を用いた。

なお、階調値は、デジタルカメラの画像データ (RAW 画像) から得られる各画素の RGB 値から算出する。画像データはベイア配列と呼ばれる構造で記録されており、Fig.2 に示す 4 つの画素を 1 つのグループとして階調値 P を式 (1) によって求める。

$$P = r * R + g * (G_1 + G_2) / 2 + b * B \quad (1)$$

式 (1) において r,g,b は重み付け係数であり、今回は NTSC (National Television System Committee) でカラー画像のグレースケール化に使用されている係数  $r=0.298912$  ,  $g=0.586611$  ,  $b=0.114478$  を使用した。

R	G <sub>1</sub>	R	G	R	G	R	G
G <sub>2</sub>	B	G	B	G	B	G	B
R	G	R	G	R	G	R	G
G	B	G	B	G	B	G	B

Fig.2 ベイア配列

RAW 画像を用いた理由として、デジタルカメラは、イメージセンサで得られたデジタル信号をメーカー独自の画像処理を行っているためである。例として、記憶色と呼ばれる人の目や脳での印象に近づくような、彩度を高める処理や、12bit の階調値を 8bit の階調値へ非線形変換している点が挙げられる。

### 2.3 シャッタースピードによる出力特性の違い

一度のシャッターで幅広い輝度値を算出するための回帰曲線を得るために、適切な露出 (カメラに取り入れる光の量) で撮影する必要がある。今回は、絞りを F5.6 に固定し、シャッタースピードを変えることで適切な露出を探った。シャッタースピードが 1/8 秒, 1/15 秒, 1/30 秒, および 1/60 秒の時の輝度値と階調値の関係を Fig.3

に示す。Fig.3 より、シャッタースピードが 1/60 秒の場合は、輝度が高くなるにつれ飽和傾向にあることがわかる。シャッタースピードが 1/30 秒の場合は適切な露出であったので、階調値 128~3692 の範囲において得られた回帰曲線を式 (2) に示す。また、回帰係数は 0.996 以上であった。

$$y = 0.0002x^2 + 0.1829x - 13.911 \quad (2)$$

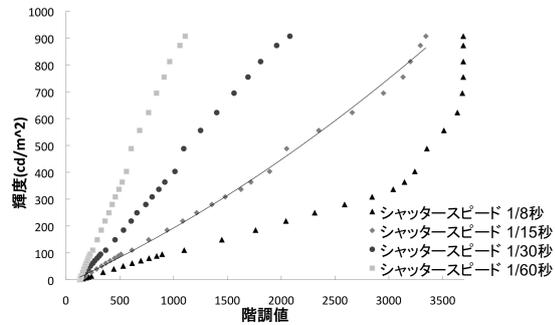


Fig.3 シャッタースピードによる出力特性の違い

### 2.4 周辺光量低下の補正

本システムで用いたカメラでは、レンズ収差やイメージセンサのサイズに起因して、レンズの中心から離れるにしたがってイメージセンサに入射する光量が、減少する現象が起きる。そのため、画像の中心から離れた場所では、実際の輝度よりも低く、画像が若干暗くなる (Fig.1)。カメラ画像全面において輝度を測定するためには、レンズ中心部とレンズ周辺部のセンサの値が等しくなるように補正テーブルを作成する必要がある。

補正テーブル作成のために、撮影対象のフェルト生地とカメラの距離をほぼ一定に保ったままカメラを回転させ、フェルト生地からの光線のカメラへの入射角のみを変えて撮影し、それによる階調値の変化を検討した。F 値 5.6, シャッタースピード 1/30 秒, 輝度 754.4  $cd/m^2$  において、周辺光量の低下特性は Fig.4 のようになった。

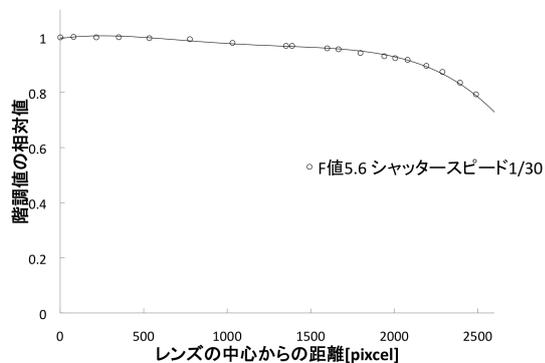


Fig.4 周辺光量の低下特性

レンズの中心から離れるにつれて、光量が低下してい

ることがわかる。得られた回帰曲線を式 (3) に示す。

$$y = -0.000000000000004x^4 + 0.0000000002x^3 + 0.0000002x^2 + 0.00009x + 0.99560.62 \quad (3)$$

また、決定係数は 0.996 以上であった。補正するときはこの逆数を掛けることになる。これにより、撮影した画像の全域にわたって輝度を計測することが可能となった。

### 3 推定式の精度

階調値から輝度推定式を用いて得られる算出輝度値と、輝度計を用いて測定した実測輝度値との差を求めた。用いた画像は Fig.5 である。輝度推定式と実測値の関係を Fig6 に示し、各測定位置に対する実測輝度値と算出輝度値の値を Table3 に示した。Table3 より、低輝度の場合を除いて平均誤差 3.91% であった。

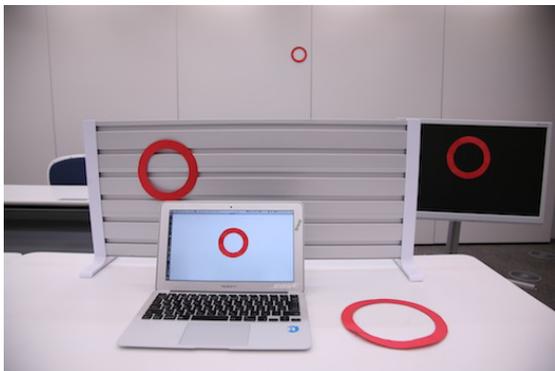


Fig.5 精度検証に用いた画像

Table3 実測輝度値と算出輝度値の差

測定位置	実測輝度値	算出輝度値	差 (%)
テーブル	579.3	573.7	0.96
壁面	282.1	269.9	4.6
パーティション	173.0	162.2	6.2
ディスプレイ輝度 A	61.78	64.2	3.9
ディスプレイ輝度 B	10.12	16.7	65.2

### 4 まとめと今後の展望

デジタル一眼レフカメラを用いて輝度計測を行った結果、低輝度な場合を除き、4% 程度の誤差精度で検出可能であった。今後、照明制御システムに組み込むとともに、コンパクトデジタルカメラや Web カメラを用いた輝度分布計測システムも構築し、輝度分布を最適化する照明制御に必要な輝度計測システムの精度の検討を行う。

### 参考文献

- 1) 大林史明, 富田和宏, 河内 美佐服部 瑤子, 下田宏, 石井 裕剛, 寺野真明, 吉川榮和. オフィスワークのプログラク

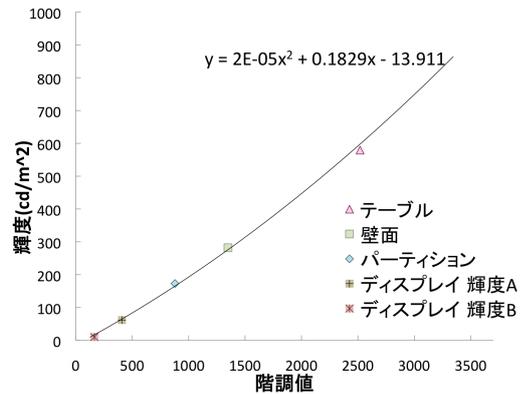


Fig.6 輝度推定式と実測値

- ティビティ改善のための環境制御法の研究 - 照明制御法の開発と実験的評価. ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006, Vol.1, No.1322, pp. 151-156.
- 2) Neil H. Eklund Peter R. Boyce and S. Noel Simpson. Individual lighting control: task performance, mood, and illuminance. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol. 29, pp. 131-142, 2000-01.
  - 3) Kazuhiro Imazato Mitsunori Miki, Tomoyuki Hiroyasu. Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. *Proc IEEE CIS*, pp. pp520-525.
  - 4) 岩田利枝, 塚見史郎. Ccd カメラの光環境計測への応用技術. *照明学会誌*, Vol. 81, No. 3, pp. 246-249, mar 1997.
  - 5) 三木洋平, 宮原浩二. D-11-78 デジタルカメラを用いた輝度計測手法の検討 (d-11. 画像工学, 一般セッション). *電子情報通信学会総合大会講演論文集*, Vol. 2011, No. 2, p. 78, feb 2011.