

デジタルデータの分布分析

——デジタル画像からの輝度分布分析

Distribution Analysis of Digital Data

——Luminance Analysis from Digital Image

鎌 田 慎 也

要 約 近年, 我々の生活の中にデジタルカメラや, デジタルビデオカメラなどが普及し, デジタル画像がより身近なものとなった. このデジタル画像には目に見える以上に多くの情報が含まれている. そこでデジタルカメラの画像データを分析し, 撮影された実物体の性質を計量する方法を報告する. デジタルカメラには, ダイナミックレンジが狭く 1 枚の画像から得られる情報が少ないことや, レンズの性質から歪みや光量の減少を起こすなどの問題点が存在する. そのため画像のデータ分析を行うにあたっては, デジタルカメラの特徴を捉え, レンズの補正等を行うことにより, 実用に供することができる範囲に誤差を抑える必要がある. 本稿はデジタル画像からの輝度分布分析方法を示し, その実施例として実世界の実物と仮想世界の CG 画像とを比較した結果を報告し, 仮想世界の CG 画像がより実世界の実物に近い表現ができたことを示す.

Abstract In recent years, the digital camera, the digital video camera, etc. have spread into our life, and the digital image became more familiar. In a digital image, a lot of information is included. Then, we report the method of measuring characteristics of real object by analyzing the image data of digital camera. Since the dynamic range of digital camera is narrow, the information obtained from one image is a little. Moreover, the problem, such as distortion and low-light intensity exist. Therefore, in order to analyze the image data, it is necessary to understand the feature of a digital camera and to perform compensation of a lens etc. This paper presents how to analyze the distribution of luminance easily using the image of digital camera, and reports the comparison result between real objects and the CG image of virtual world as an example.

1. は じ め に

1.1 背 景

コンピュータの普及や処理能力の向上に伴い, 物理現象や自然現象をコンピュータを用いてシミュレーションする事が多くなっている. シミュレーションした結果の信頼性を保証するには, 現実世界との比較を行うことが不可欠である. そのためには現実世界の現象を計量し, 比較を定量化できるように表現することが重要となる.

一般的に, 実世界の物体の位置, 形状 (大きさ), 運動量, 明るさ (輝度), 色などを測定するためには, 高度な技術やさまざまな計測機器を利用する必要がある. そこで, より簡単にこれらの情報を得る方法として, 画像による計測方法を考案した. 我々が普段生活の中で接している写真の画像やビデオの映像には, 形状, 明暗, 色彩, 時間など数多くの情報が含まれている. そして, このデジタル画像や映像が持つ情報量は非常に大きなものである.

画像による計測は①画像測光, ②画像測量の二つに大きく分けることができる. ①画像測光は画像の明度情報から, 物体の輝度や分光情報などを定量的に測定する方法であり, それに対

し②画像測量は画像の幾何的情報から、物体の位置、形状、運動量などの空間特性を定量的に測定する方法である。これらの画像による計測は、撮影されたデジタルデータの処理により計測する技術である。測定対象物を撮影しその画像と撮影条件などを保存しておけば、後日でもデータを分析し多くの情報を得ることができる。また、計測機器などでの測定では実空間にある情報をすべて得ようとする多くの測定点が必要となるのに対し、画像による計測では画像に写る空間全体の情報を得ることができるという利点がある。

本論では、画像が持つデジタルデータ分析として①画像測光を取り上げ、実世界の輝度分布測定方法を示し、仮想世界でシミュレートした CG 画像との輝度分布の比較を行い、この方法が実世界と仮想世界の比較に有効な方法であることを示す。

以下、2 章では予備知識として、フィルムカメラとデジタルカメラの輝度計測方法の特性について、3 章では本論の課題、4 章では輝度分布分析のプロセスおよび課題解決のためのアイデア、5 章ではその結果と仮想世界との比較方法、そして 6 章では今後の課題に関して述べる。

2. カメラを用いた実世界のデータ分析

本章では、フィルムカメラとデジタルカメラによる輝度計測の原理について示し、デジタルカメラの利点を述べる。

2.1 フィルムカメラによる輝度計測

フィルムカメラを用いた輝度計測方法に関しては昔から研究がなされていた^{[1],[2]}。フィルムに使われる写真感光材料は支持体の表面に感光乳剤を塗布したもので、光学系によって作られる測定対象の像による照度すなわち像面照度を、感光乳剤の黒化を利用して記録する。黒化の程度は濃度 D によって示される。濃度 D と像面照度 E の関係は濃度曲線で示され、その濃度曲線の一部として直線領域を持つ。これを露出適正域といい、これに対応する間隔を「ラティテュード」という。このラティテュードの範囲に対して、像面照度は測定対象の輝度に比例するので、黒化（濃度）の程度によって輝度測定を行うことができる。しかし、この方法では測定をするにあたり、微小濃度計やカラーデータシステムなどの特別な機器を用意する必要がある。以下に、フィルムカメラでの輝度計測に関する欠点を挙げる。

- 高価な装置が必要
- さまざまな装置を操作する技術が必要
- 写真現像に細心の注意が必要
- 微小濃度計を用いた濃度測定に手間がかかる

フィルムカメラでの輝度計測はフィルムの現像やその濃度測定といった撮影の後処理に大変な作業と日数を要するため、普及には至っていない。

2.2 デジタルカメラによる輝度計測

デジタルカメラの画像は、画素毎に RGB のデジタル情報の集合として記録されており、この情報から得られる輝度の階調値と輝度との間には、フィルムカメラにおけるフィルム濃度と輝度との関係と同様な対応関係が認められる^{[3][4]}。カメラは、ダイナミックレンジが人間の目に比べ狭いため、特定の露出から得られる輝度の範囲は限られてしまう。そこで、露出を変化させるために異なるシャッタースピード、絞りで撮影した画像を重ね合わせることによって、

広い輝度範囲の測定データを採取する工夫をした。デジタルカメラを用いた輝度計測はこの特性を利用して、画像の指定位置の階調値から、対応する部位の輝度を算出する。フィルムカメラを用いた計測法よりも手軽に行えるために、フィルムカメラの欠点を補えた。次に利点を挙げる。

- 輝度計、カメラ以外には特別な機器は必要ない
- 現像の必要がなく、画質も劣化しない
- 多大な量のデータの整理が容易である
- 測定時間を大幅に短縮できる

3. 本論の課題

デジタルカメラのデータを取り扱うには、デジタルカメラの特徴を理解する必要がある。デジタルカメラのダイナミックレンジは実世界をすべて表現するには狭く、例えば太陽の影響を含む屋外撮影に必要なダイナミックレンジは 100 dB 以上となるのに対し、一般のデジタルカメラのダイナミックレンジは 30～60 dB 程度である。1 回の撮影から得られるデータは、RGB (光の 3 原色 = Red, Green, Blue) それぞれについて 8 bit すなわち 256 階調の範囲で表現される。(多くのデジタルカメラは内部的に 12 bit でデータを持っているが、出力する際にデータの流通性を重んじ 8 bit にしている) このため得られる映像は高輝度部分を中心に白く飛んだり、暗い部分が見えなくなったりしている。このため課題のひとつとして、写真による輝度計測を行うにあたっては、ダイナミックレンジを広げる必要がある。また、レンズの性質上、レンズに入射する光の角度が大きくなればなるほど、カメラに入射する光が減少し、画像の中心から離れた部分が若干暗く撮影される現象があるため、補正を行い画像内の輝度が正しく表現されるようにする必要がある。本論では以上の 2 点の課題を解決する。

4. デジタルカメラによる輝度分布分析

この章では、デジタルカメラを用いた輝度分布分析のプロセスおよび工夫点を説明する。

4.1 デジタルカメラのデータ

デジタルカメラでは、レンズを通して光を受けた「撮像素子」が電子を放出し、それを信号処理回路が瞬時に電気信号に変えて、画像がデジタル信号で記憶される。この時点で作られる加工されていない非圧縮画像データを RAW データと呼ぶ。画素毎の輝度値を詳細に分析するため、JPEG などの圧縮された画像を使わずに、この RAW データ (RGB 各 12 bit) を使用して輝度値との比較を行う。

4.2 カメラ校正

輝度値と階調値の関係を求めるために、ある一定の露出で撮影できる輝度値の範囲測定を行う。対象物をデジタルカメラで撮影し、その時の測定対象物の輝度を輝度計を用いて測定する。これにより、撮影した画像と輝度の 1 対 1 の関係を導き出す。撮影時のカメラの設定はすべてマニュアルモードとし、一度設定した条件を変えずに行った。

撮影対象物を一定の光源の元で設定し、計測面の輝度の計測および撮影を行う。計測面に使用する材質は、拡散の強い材質が望ましい。反射の大きなものを使用すると、輝度計の測定時

点で、測定点の若干のずれにより輝度の誤差が大きくなるからである。また、幅広い輝度が測定できるように露出の幅を広くして撮影を行なった。

4.3 輝度の階調値測定

撮影した RAW データを画像処理ソフトで読み込み、輝度計で計測した部分の輝度の階調値を調べる。画像処理ソフトで表される輝度の階調値は RGB の各値から変換式をもちいて、256 階調の値に変換される。画像中で各部位の階調値を測定する際に、輝度計の測定範囲円の大きさを考慮する必要がある。測定範囲円の大きさは、撮影した画像の画素サイズおよび輝度計測距離から算出した。使用した輝度計の視野角が 1° であるから、半径 0.5° の円の領域に含まれる画素の階調値の中間値を採用した。

4.4 輝度値—階調値の関係式

まず、輝度計より測定した輝度値、および画像より得た階調値の関係式を求める。輝度値と階調値の関係は、フィルム写真の濃度と輝度との関係と同様であるとし、その関係は対数軸をとり、描くことで明らかになった。この関係はトーンカーブと呼ばれる曲線を描き、ある一部の区間においては直線となる。この直線部を最小二乗法を用いて回帰的に式として導き、統計的な回帰検定を行い、十分に信頼できることを示す。本測定では回帰直線で階調値が 50 から 200 の範囲において、相関係数 0.99 以上の条件の回帰直線が求められることが分かった。一つの露出撮影画像から得られる輝度範囲は限られており、屋外での輝度計測を考慮した場合には、低輝度から高輝度まで（ $\sim 100,000 \text{ cd/m}^2$ 程度）必要とするので、複数での露出条件が必要となる。本システムでは、各露出の輝度範囲を考慮した結果、以下のように 6 種類の露出条件を採用した。これにより、従来は 1 枚の画像では狭いダイナミックレンジでしか表すことしかできなかったが、人間の目に近いダイナミックレンジまで広げることができ、一枚から得られる輝度の数倍まで正しく測定することができた。また、今回の露出では対応しきれない高輝度部分の輝度範囲では、次に示す減光フィルターを用いた補正を行うことにより、輝度を算出した。

得られた関係グラフは図 1 のように表される。

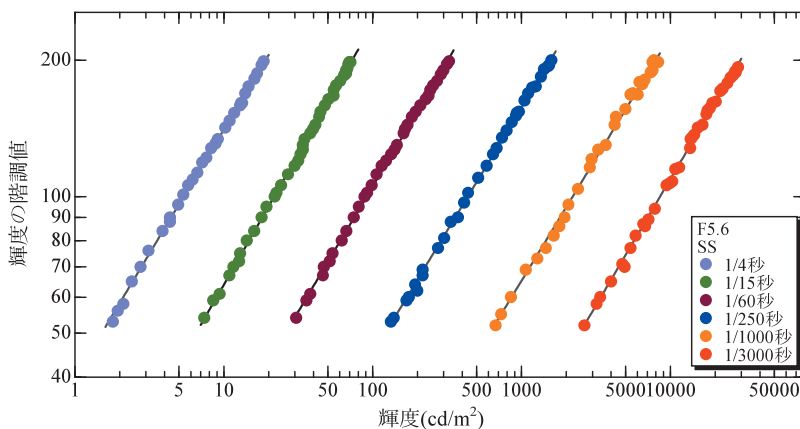


図 1 輝度と階調値の関係

4.5 減光フィルター対応

屋外での撮影時、太陽光を反射するような輝度の高い部分は、測定範囲や精度の問題から、輝度計だけの校正は困難である。この問題を解決する方法として減光フィルターを用いた。減光フィルターは指定された光量を減少させるように製作されているが、製造誤差などにより固体差があると考えられるので、各フィルターに対して光量の減少度を測定する必要がある。

今回、使用した減光フィルターでは円内においてほぼ一定に減光することがわかっており、各露出に対して同様な減少率を示すことから、減光フィルターを装着した時の写真から得られる輝度に減少率を考慮した値を掛けることにより輝度を算出する。これにより、測定することのできる輝度範囲をさらに広げることが可能となった。

4.6 周辺光量補正

レンズ中心部から離れた場所では、レンズに入射する光量が減少する現象が起こる。そのため、撮影された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。この周辺光量の補正を以下のようにして行った。

4.6.1 Distortionless Lens 使用時

Distortionless Lens (歪曲のないレンズ) は、光線の入射角を ϕ 、光学系の焦点距離を f 、像面における射影半径を r とすれば、

$$r = f \cdot \tan \phi$$

と表すことができ、測定対象の実際の輝度を L_0 、光学系の透過率と入射瞳の面積をそれぞれ τ, a とすれば、像面照度 E について、

$$E = L_0 \cdot \tau \cdot \frac{a}{f^2} \cdot \cos^4 \phi$$

という関係が成り立つ。これよりレンズに対して光線の入射角 ϕ が大きくなるほど光量の減少が起きることがわかる。理論上、Distortionless Lens での周辺光量の減少は以上の式で表されるが、実際は光線の入射角による透過率の不同、口径食、表面反射、さらに製造誤差などの影響もあるので、個々のレンズについて周辺光量の減少を確認することが必要である。これについては、図2のように輝度が一定の対象を、撮影対象面とレンズの距離をほぼ一定に保ったままレンズ部分を5度ずつ回転させ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検討を行った。中心部から角度 θ (rad) の位置での階調値の、中心部での階調値に対する比 $r(\theta)$ を求める。周辺光量は絞りによって変化するので、露出を変えた撮影時に絞りを変化させるのであれば、変化させた数の測定を行い、補正を行う必要がある。

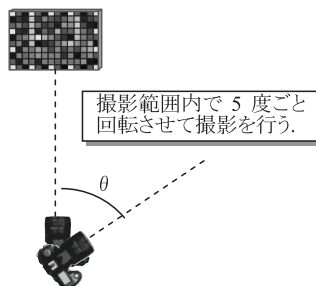


図2 周辺光量の減少率測定

4.6.2 等距離射影魚眼レンズ使用時

デジタルカメラ用に使われる魚眼レンズの現在の主流は等距離射影レンズである．等距離射影の魚眼レンズでは，光線の入射角を ϕ ，光学系の焦点距離を f ，像面における射影半径を r とすれば，

$$r = f \cdot \phi$$

と表すことができる．また等距離射影レンズも中心からの角距離が大きい部分では，実際よりも輝度が低く暗く撮影される．よって等距離射影の魚眼レンズでも Distortionless Lens と同様にレンズを回転させ，輝度の比を求めることにより，周辺光量の補正を行った．

4.7 輝度算出ツール

撮影後の画像から画素ごとに輝度を算出するツールを作成した．このツールでは上記で得られた関係式を用いて各画像の階調値から輝度に変換し，上記で述べたような減光フィルターや周辺光量などの各補正を考慮している．これにより，デジタルデータとして輝度情報をそのまま扱うことができる．またこのツールにより，画素毎に輝度情報を出力できるようにし，以後の比較に役立てるようにした．図3に輝度算出ツールを用いた輝度算出の流れを示す．



図3 輝度算出ツールによる輝度算出の流れ

4.8 輝度計との誤差確認

撮影した画像の輝度が輝度計からの計測値とどの程度誤差があるか確認した．比較に使用したものはカラーチャートであり，これを光が変化しない環境で露出を変化させて撮影し，各色を輝度計にて輝度計測を行った．測定は周辺光量の補正を確認するためにカラーチャートがレンズの中心に来る場合と中心から離れた場合で行った．写真から得られた輝度値と輝度計から測定された輝度値との誤差は5%以内に収まっており，十分な実用精度を有しているものと判断できる．

5. 撮影写真からの輝度情報取得の適用例

5.1 写真撮影

実物体の輝度分布を測定するには，上記で示した関係式の露出で撮影を行えばよい．図4に車両を例とした撮影画像を示す．

5.2 輝度値の算出

撮影画像を用いて作成した輝度算出ツールにより画素毎の輝度を算出する．画素毎の輝度から，画像全体の輝度分布図の作成を行う．最大輝度値を基準として4段階に輝度を分け，RGBの階調を0～255に変化させることにより，画像全体の輝度分布を示すことができる．これに

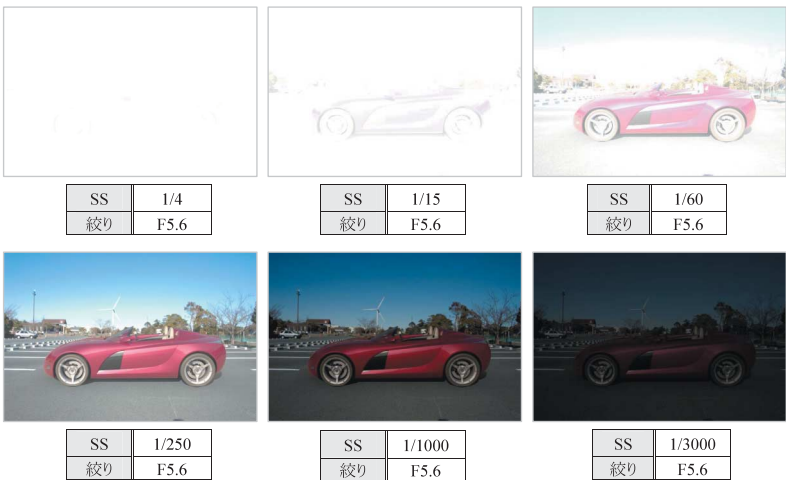


図 4 露出を変えた撮影画像

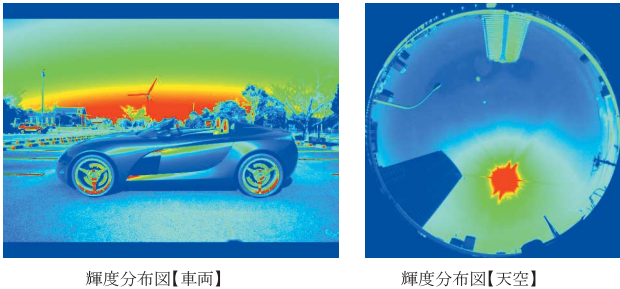


図 5 輝度分布図例

より、画像全体の輝度分布が評価できるので、解析時の位置確認など視覚的な直感的把握が容易になった。図 5 は車両および天空（魚眼レンズ）を撮影し、輝度分布を出したものである。

5.3 仮想世界との比較

得られた輝度情報より、実物とシミュレートした CG 画像との比較を行うことができる。この CG 画像は、光の反射、屈折などの挙動を物理的にシミュレートしているので、画素毎に輝度情報をもつ。シミュレートした結果画像の正当性を数値的に評価する方法として①グラフで表し比較する方法と、②両者の差を視覚的に画像で表す方法がある。以下に実施した二つの比較方法を述べる。

5.3.1 輝度値のグラフ比較

各領域に対する輝度値の比較を線グラフ化する。これにより輝度の振幅や輝度の差を数値的に捉えることができ、シミュレーションの問題を明らかにすることができる。また、比較したい部分のデータだけを利用するので、問題がわかりやすい。以下、実際の車両および CG 画像の白線上の輝度値を比較する。図 6 のように車両の部分だけの輝度比較を行うと、差が数値的に表される。例えば、これにより、ボディの輝度のグラデーションが実写と CG では大きく異なっていることが分かり、シミュレーションが間違っていると判断できる。

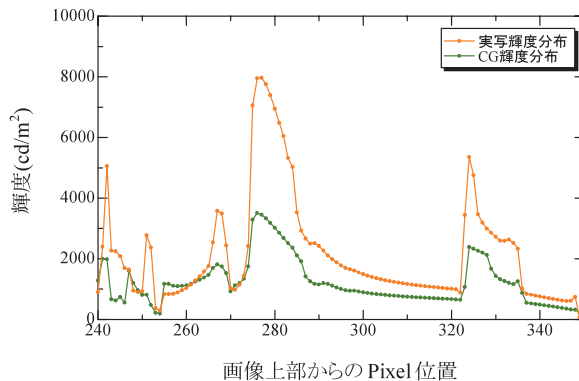
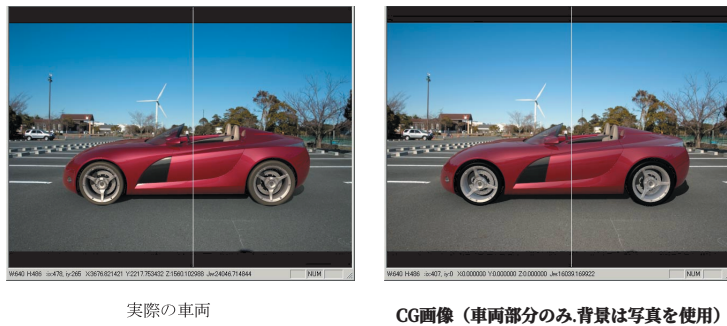


図6 実写およびCGの輝度比較

5.3.2 輝度分布図の作成および比較

仮想世界のCG画像から得られる輝度情報とデジタル写真から得られた輝度情報の差を絶対値で画像として表すことにより、各部位の輝度差を視覚的に捉えることができる。図7は実写およびCGの輝度情報の差をとり、青から赤までの色により輝度の差の大小を視覚的に分かりやすく表している。例えばこの結果により、太陽光が直接あたる部分や影の部分において輝度の差が大きいことから、太陽光の強度が異なっていることなどを考察することができる。

6. おわりに

6.1 評価

本論で示した実世界の情報を、デジタルカメラを用いてデータ化し、実世界の輝度分布を幅広く採取した。この際、露出を変えた複数の画像を用いることにより画像のデータ量を増やし、ダイナミックレンジを広げることができた。またレンズの性質上起こる、周辺光量の減少に関しても補正を行い、正しい輝度が得られるようにした。さらに得られたデータを用いて仮想世界のデータとの比較をより視覚的に表す方法を示し、いままであやふやな比較しか行えなかった状態から画像全体で行うことを可能にした。

これらの画像によるデータ分析により、シミュレーションの問題点を視覚的に確認することができ、同分野のデータ比較を大幅に改善できることを示せた。



図7 実写およびCGの輝度差分布図

6.2 今後の課題

画像データや映像データには多大な情報が含まれるため、画像を用いたデータの分布分析は今後様々な計測に使用できると考えられる。それぞれの計測を行うにあたっては、今回3章で示した二つの課題点以外にも、レンズの収差や幾何学的性質、被写体と撮影画像の位置関係、色温度などさまざまな点を考慮しなければならない。また、比較方法に関しても、数値的にグラフ化する方法や、分布図のように視覚化してわかりやすく表す方法を示したが、デジタルデータの評価については、これら以外にも選択された領域におけるヒストグラム分布を表す方法など、統計的な手法を用いて結果を視覚的に比較する方法をさらに考えている。

-
- 参考文献** [1] 中村洋, 正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定(その1. 写真測光法と正射影カメラ・感光材料), 日本建築学会論文報告集, 第243号・昭和51年5月, pp.73-79.
- [2] 中村洋, 正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定(その2. 写真濃度の測定・校正・測定手順など), 日本建築学会論文報告集, 第244号・昭和51年6月, pp.81-87.
- [3] 岩田利枝他, CCDカメラの光環境計測への応用技術, 照明学会誌, 第81巻・第3号・平成9年, pp.246-249.
- [4] Moor T, Graves H, Perry MJ and Carter DJ, Approximate field measurement of surface luminance using a digital camera, Lighting Research and Technology 2000.9

執筆者紹介 鎌 田 慎 也 (Shinya Kamata)

2004年日本ユニシス(株)入社. 現在, 日本ユニシス・ソリューション(株)に出向中, エンジニアリングサービス本部 PLM 一部 CG システム一室に所属し, レンダリングプログラムの開発作業に従事.