

知っておきたいキーワード

ハイダイナミックレンジ (HDR) イメージ

山本昇志[†][†] 東京都立産業技術高等専門学校

"High Dynamic Range Imaging" by Shoji Yamamoto (Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Tokyo)

キーワード: ハイダイナミックイメージ, カメラ, ディスプレイ

ハイダイナミックレンジ (HDR) イメージとは

最近ではデジタルカメラの応用機能として装備されていることが多く、耳にしたことがあるという方も増えてきていると思います。インターネットで検索しても、派手な色使いの画像が多く出てきて、「新しい加工方法か?」と思われる方もいるかもしれませんが、でも、技術的には「今までの8ピ

ット (256階調) 深度を超える画像」と考えて頂ければ間違いはありません。長い間、デジタル画像はVGA (640×480画素, 8ビット階調) という規格で利用されてきました。近年の高解像度化に伴い、カメラの解像度は4k (4,096×2,160画素) 以上まで向上しましたが、階調は8ビットのままです。この8ビットの制約を超えて、より自然なシーンを正確に記録・再生したいという要望から、このハイダイ

ナミックレンジ (HDR) イメージ技術が開発され始めました (図1)。

実際にHDR画像を生成し、そのヒストグラムを解析した例を図2に示しますが、各画素はRGB毎の8ビット仮数部に8ビットの指数部を加えた32ビットの浮動小数点情報を保持しています。そのため、展開を行うと76桁程度の表現能力を持っていることがわかります。



図1 HDR撮影の例

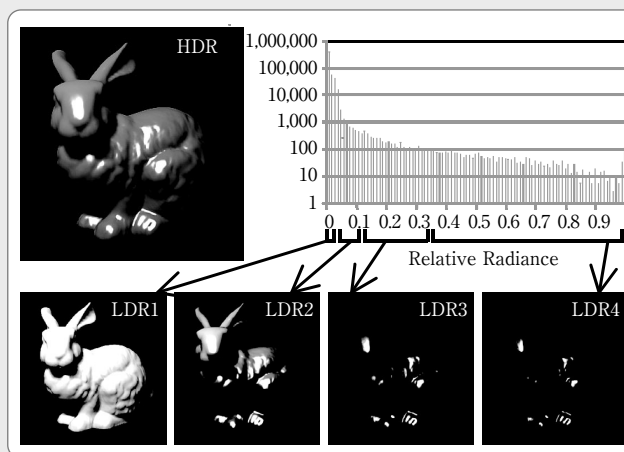


図2 HDR画像の例

HDRイメージの作成

カメラのワンショットで星空から日中までの広い輝度範囲を捉えるのは困難ですが、われわれ人間も一度に捉えているわけではありません。虹彩や網膜が入射光量や感度を適宜調整して、環境に合わせた視覚を実現しています。ですから、カメラでも同様に絞りやシャッタースピードを制御すれば、広い輝度範囲の撮影が可能です。ここで人間は脳の記憶機能をうまく利用して、異なる輝度範囲の視覚をうまく統合して理解や判断を行っています。そこで、カメラにおいても、露出が異なる複数枚の画像を統合できればハイダイナミックレンジな画像の生成は可能となります。ただ、一般的に撮像素子の感度や絞りの制御情報は公開されておらず、正確かつ煩雑な校正作業を必要とします。

この課題を解決するために、コンピュータサイエンスの研究者たちがさまざまな方式を検討しました。もっとも有名な手法は1997年、Paul Debevecらによって開発された自動校正法です¹⁾。図3、図4に示しますが、彼らは撮影位置が変わらないときにカメラの素子が受ける光量は同じであることから、シャッタ速度を変えた複数枚の画像から素子の応答関数を正確に推定可能であることを示しました。素子の応答関

数が判れば、既知であるその他の設定を用いて、実世界の輝度を逆算することができます。このように、複数枚の画像撮影が必要である制約はあるもの

の、実世界の幅広い輝度が簡単に測定できるようになり、HDR画像の利用は飛躍的に進歩しました(図5)。

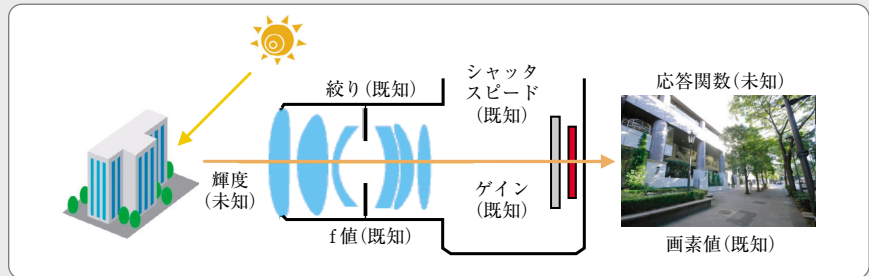


図3 画像撮影におけるパラメータと物理量

通常、撮影するときには輝度と応答関数が未知でも、他のパラメータを調整すればきれいな写真が撮影できます。しかし、正確な輝度を測定するためには応答関数が既知であることが必要となります。

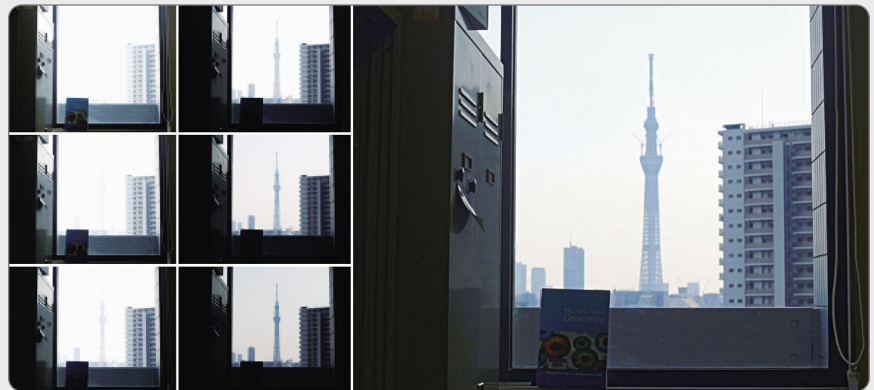


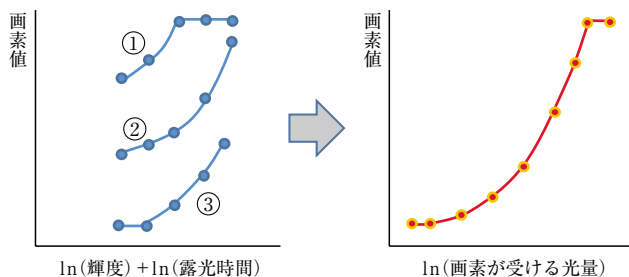
図5 多重露光撮影とHDR合成結果 (Reinhard²⁾ らの手法でレンダリング)

HDRの一つのメリットは輝度差のあるシーン(室内の書籍と窓外の風景)を同時に表示することが可能になる点です。われわれにとって、このようなシーンはとても自然に見えることから、われわれの脳内でも同様のシーン合成が行われていると考えられています。

i : 空間位置別



j : 露光時間別



$$\begin{cases} \text{画素値}_{i,j} = f(\text{画素が受ける光量}) \\ \text{画素が受ける光量} = \text{輝度} \times \text{露光時間} \end{cases}$$

よって、
 $f^{-1}(\text{画素値}_{i,j}) = \text{輝度} \times \text{露光時間}$

両辺の対数を取って、
 $\ln(f^{-1}(\text{画素値}_{i,j})) = \ln(\text{輝度}) + \ln(\text{露光時間})$
 物体の輝度と位置が一定と仮定すると、下式を満足する応答関数 f を求めることができる

$$\min \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{ \ln(f^{-1}(\text{画素値}_{i,j})) - \ln(\text{輝度}) - \ln(\text{露光時間}) \}^2 \right]$$

図4 素子の応答関数を推定する方法

Debevecらはシャッタースピードの異なる複数の画像から、空間位置別に素子が受ける光量と画素の出力の関係を使い、両者の値が一致するような応答関数を最適化手法で求めました。

HDRイメージの表示

16~32ビットの階調を持つHDR画像は、そのままでは従来型のディスプレイに表示することはできません。そこで、最初に考えられたのは人間の眼の応答に類似した非線形変換による圧縮です²⁾。図6に示したこの方法は計算が簡単で、最適なパラメータを設定することにより、現実に近い見えを生成することが可能です。しかしながら、画像によっては見えにくい部分があったり、人工的な偽像が発生することがありました。現在では局所的な空間を考慮するような圧縮手法も検討されていて、画質の改善が進められています^{3) 4)}。

一方、HDR画像を物理的に正しく表示する装置の開発も行われています。図7にその一例を示しますが、Helge Seetzenらは8ビット階調を持つ二つのデバイスを、光のレベルで乗算することで16ビット階調のディスプレイを開発しました⁵⁾。このディスプレイは市販され、多くの研究機関で視覚的

な評価装置として活躍しています。また、技術の一部は一般的なテレビのバックライト制御に適用され、コントラストを強調するような機能に使用されています。ただ、装置的には非常に高額になるため、図8に示したような別の手法で、簡易にハイダイナミックレンジな画像を表示する装置も開発されてきています^{6) 7)}。



図6 トーンマッピング処理の一例
通常のトーンマッピングでは、輝度の低いテクスチャ部分と輝度が高い照明部分を圧縮率を変えながら8ビット階調空間に圧縮します。ただ、空間的な分布を考慮しないと輝度変化が激しい部分に人工的な偽像が発生することがあります。

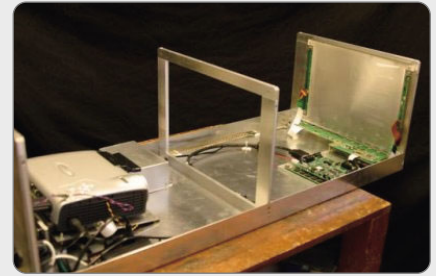


図7 HDR表示装置の例
8ビット階調の表示が可能な液晶ディスプレイに8ビット階調で光量変化が可能なプロジェクト像を乗算しています。

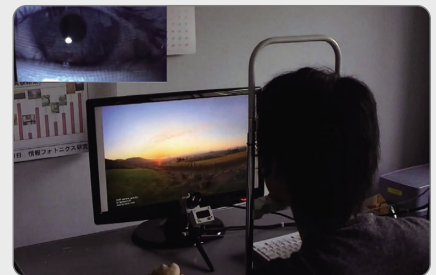


図8 HDR表示装置の例
観察者の注目点を視線検出カメラで求め、HDRデータから注目点付近の8ビット画像を抽出し、再現する方法です。時間の遅れなどがあるものの、通常のディスプレイでハイダイナミックレンジな画像が再現可能です。

今後の展望

HDR画像の技術は決して新しいものではなく、古くは銀塩写真の時代から多重露光による画像記録が検討されてきています。ただ、銀塩カメラからデジタルカメラになり、さらにコンピ

ュータの計算能力向上が伴って普及した技術だと言えます。

現在でもレンジの広い受光素子や表示デバイスの開発は盛んに行われています。よって近い将来、ハイダイナミックレンジ画像がごく一般的に活用される日も近いと言われています。今後

はその深い階調再現性と豊かな表現能力を利用して、物体認識や人間の感性の定量化など、応用分野の研究・開発に進んでいくことと思われます⁸⁾。

(2012年7月9日受付)

参考文献

- 1) P.E. Debevec and J. Malik: "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", Proc. of SIGGRAPH '97 (Special issue of ACM Transactions on Graphics) (1997)
- 2) E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda: "Photographic tone reproduction for digital images", Proc. of SIGGRAPH '02 (Special issue of ACM Transactions on Graphics) (2002)
- 3) T. Horiuchi, S. Tominaga: "HDR Image Quality Enhancement Based on Spatially-Variant Retinal Response", EURASIP J. Image and Video Processing (2010)
- 4) J. Kuang, G.M. Johnson, M.D. Fairchild: "iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering", J. Visual Communication and Image Representation, 18, 5, pp.406-414 (2007)
- 5) Seetzen, Heidrich, Stuerzlinger, Ward, Whitehead, Trentacoste, Ghosh, Vorozcovs: "High Dynamic Range Display Systems", Proc. of SIGGRAPH '04 (Special issue of ACM Transactions on Graphics) (2004)
- 6) S.N. Pattanaik, J. Tumblin, H. Yee, D.P. Greenberg: "Time-Dependent Visual Adaptation. For Fast Realistic Image Display", Proc. of SIGGRAPH '00 (Special issue of ACM Transactions on Graphics) (2000)
- 7) 山内拓也, 三上俊彰, 宮田公佳, 中口俊哉, 津村徳道: "高ダイナミックレンジ画像のための注視領域情報を用いたトーンマッピング手法の評価", 日本写真学誌, 75, 1, pp.87-96 (2012)
- 8) 例えば: 質感脳情報学, <http://shitsukan.jp/>



やまもと しょうじ
山本 昇志

1991年、静岡大学大学院光電機械工学専攻修了。同年、三菱重工業(株)入社。技術本部で撮影デバイス、カラーマッピング、ヒューマンインタフェースの開発に従事。2007年、千葉大学大学院融合科学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。現在、東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科准教授。博士(工学)。