Technical
Survey

技術解説

HDR画像 ～色空間から符号化まで～

奥田正浩[†]

高ダイナミックレンジ画像 (High Dynamic Range Images: HDR画像) は、人間が知覚しうる輝度範囲と色域すべてが表現可能な画像である。高いダイナミックレンジと、現実シーンの輝度値に比例した画素値を持つことが特徴で、その汎用性の高さから現在注目されている技術である。もともとHDR画像は、Image Based Lightingに基づくCGレンダリングに用いられていたが、現在では視覚特性の推定や、超高コントラスト写真現像、外観検査等に應用されており、今後は車載カメラ、監視カメラ、医用画像、天体画像等の分野でさらなる応用が期待されている。本解説では今までの数多くの研究成果のなかから、特に実用化と普及に重要な役割を果たす色空間に基づく表示形式と圧縮符号化について解説する。

キーワード：高ダイナミックレンジ画像，色空間，画像フォーマット，符号化，視覚感度，画質評価

1. ま え が き

現在一般に市販されている撮像デバイスや出力デバイスのダイナミックレンジは、現実シーンよりもはるかに狭い。例えば、一般に市販されている一眼レフデジタルカメラのダイナミックレンジは高くても80dB程度であり、人間が一度に識別できる範囲と言われている100～120dBに遠く及ばない。1990年代にコンピュータグラフィックスの分野でそのダイナミックレンジを拡大するための画像フォーマットや色空間に対する提案がいくつかなされ¹⁾²⁾、Image Based Lightingにおける大域照明問題に、その高ダイナミックレンジ画像 (High Dynamic Range Image: HDR画像) が積極的に使われるようになった³⁾。その後、主に高精細レンダリングや高コントラスト写真現像の分野でHDR画像が盛んに用いられるようになり、現在では多くのグラフィックスボードや画像処理ソフトウェアがHDR画像に対応している。

高解像度、高フレームレートなどの近年の画像高精細化の動きに伴い、CG分野以外でもダイナミックレンジや画素の階調数を向上させる技術が広まっている。より微細なコントラストを表現するために、1チャンネル10ビット以上の階調数を持つ液晶ディスプレイが市販され⁴⁾、デジタルカメラでは、センサのダイナミックレンジをそのまま保持する階調数10ビット以上のRaw画像の使用が一般的になっている。また、画像センサの高ダイナミックレンジ化に関する研究や実用化も急速に進んでいる^{5)～7)}。

この10数年で、HDR画像取得、トーンマッピング、画像フォーマットと色空間、圧縮符号化に関する数多くの研究成果が発表された。ここでは、その中でも実用化と普及に

重要な役割をはたす画像フォーマット (色空間) と圧縮符号化に重点をおいて解説する。

2. HDR画像とは

デジタルカメラ等に代表される一般的な撮像機器のダイナミックレンジは80dB程度であり、液晶ディスプレイの輝度は最大で 10^3cd/m^2 程度である。これに対して現実シーンの輝度は、太陽光で 10^9cd/m^2 程度と非常に高く、ダイナミックレンジは、しばしば200dBを大きく超える (図1)。この現実シーンの高いダイナミックレンジを記録するには、現行の1チャンネル8ビットの階調数では不十分である。この問題を解決するために、画像のビット深度を増やし、人間が知覚しうるダイナミックレンジと色域全体を表現しうるよう考案されたのが、高ダイナミックレンジ画像である。

一般にダイナミックレンジは、最小輝度と最大輝度の比で与えられることが多いが、この場合、一般的なsRGBフォーマット等による1チャンネル256階調で定義される画像は、ダイナミックレンジを定義することができない。その輝度が出力デバイスに依存するからである。このような画像形式はOutput-referredフォーマットと呼ばれる。これに対してHDR画像はScene-referredと呼ばれ、実際の撮影シ

図1 現実シーンの輝度

[†] 北九州市立大学

"High Dynamic Range Image Coding" by Masahiro Okuda (The University of Kitakyushu, Fukuoka)

ーンの輝度に対して画素値が線形の関係をもつ。このようなScene-referred画像形式は、上記のような問題もなく、さまざまな分野で有効となる。HDR画像に関する技術は近年飛躍的に発展し、数多くの研究成果が発表された。ここでは、HDR画像符号化の解説をする前に、周辺技術として特に重要な、画像取得法、トーンマッピング法、そして現在進められている応用例について概観する。

2.1 HDR画像の取得法

HDR画像の取得法は大きく分けて2種類ある。一つはダイナミックレンジの高いセンサを用いて直接HDR画像を得る方法(図2)、もう一つは露光を変えて撮影した複数枚の画像をオフラインで統合する手法である(図3)。動画では前者、静止画では後者の手法が一般的である。この直接的取得法は動画撮影が可能であるが、現時点では技術面、コスト面の問題から高SNR、高解像度、低価格を実現することは難しい。後者は市販のデジタルカメラがあれば可能であるため手軽であり、高画質、高解像度が実現でき、200dBを超えるダイナミックレンジも実現可能である⁸⁾。しかし多重露光画像撮影中のシーンの動き、手ぶれなどが原因でHDR画像に統合した際、ブレやゴーストが現れるという問題が存在する^{*1}。

より詳しい高ダイナミックレンジ画像センサ技術については文献5)～7)、多重露光画像の統合手法については文献

8)～10)等を参照されたい。

2.2 トーンマッピング

一般にHDR画像のダイナミックレンジは、ディスプレイモニターやプリンタに代表される出力デバイスのダイナミックレンジよりもはるかに高いため、HDR画像を線形でスケールリングして表示すると、細部のコントラストが大きく失われる。局所的なコントラストを保持したまま、画像のダイナミックレンジをディスプレイレンジに圧縮する手法を、トーンマッピングと呼ぶ。トーンマッピングは、すべての画素に単一のトーンマッピング関数をかけることでレンジ圧縮するグローバルオペレータと、画素周辺のコントラストに応じて関数が変化するローカルオペレータの2種類存在する。グローバルオペレータは、一般に計算量が少なく、その多くがLUTを介して高速実装できるため動画向きである。これに対してローカルオペレータは、計算コストは高いが明部や暗部のコントラストの再現性はグローバルオペレータより優れている。非常に高いダイナミックレンジをもつ画像の処理や全輝度域でコントラストを維持したい場合には、ローカルオペレータを選択する。

現在までに数多くのトーンマッピング手法が提案されている。文献3)にトーンマッピングの包括的な解説があるので参照されたい。図4にトーンマッピングの例を示す。こ

*1 HDR動画センサでもリアルタイムで多重露光の統合を行っているものがあり、それらはブレやゴーストが起こりうる。

図2 ダイナミックレンジの高いシーン

(b)においてもライトが点灯しているが、ライト内部の模様から車のナンバーまで確認することができる。

図4 トーンマッピングの例

図3 多重露光画像の統合

ここで左半分は単純なガンマエンコーディングによりトーンマップした画像、右半分はFattal等の手法¹¹⁾でトーンマップした画像である。右では広い輝度域で細部のコントラストがディスプレイレンジに圧縮されているのがわかる。

2.3 アプリケーション

1990年代以降、CMOSセンサのダイナミックレンジを向上させる研究が盛んに行われており⁶⁾、CGの分野でも24ビット階調を超える画像フォーマットの研究が行われてきた¹⁾。HDR画像という名称が盛んに用いられるようになったのは、Debevec等が文献9)で全周囲HDR画像の効果的な取得法を提案し、Image Based Lightingに応用した頃からである。その後、HDR画像の取得法、トーンマッピング法、符号化法に関する研究が数多く発表され、さまざまな分野でHDR画像が応用されるようになってきた³⁾。ここ数年、写真愛好家の間では、HDR画像の非常に高いダイナミックレンジを利用した高コントラスト写真の使用が広く普及しており、数多くのHDR画像現象(トーンマッピング)ソフトが現在利用可能である¹²⁾。多重露光画像の統合を行い、白潰れ黒飛びを低減させる安価なデジタルカメラも、近年多く市販されているようになってきた。

HDRセンサの応用も、車載カメラや監視カメラを中心に拡大を見せている。例えば、車載カメラでは100dB以上のダイナミックレンジが必要であり、監視カメラにおいても100dB以上のダイナミックレンジが必要となることが多い(例えば図2のようなシーン)。また、外観検査にもHDR画像が用いられており、光沢のある物質の白飛びを抑え、細部を再現するにはHDR画像が不可欠となる。そのほかにも天体画像におけるHDR画像の利用や、視覚特性の推定、ロボットビジョンに用いられており^{3) 6) 13)}、今後さらなる産業応用の拡大が期待されている。

3. シーンのダイナミックレンジと視覚特性

晴天時の太陽の直接光は $10^8 \sim 10^9 \text{cd/m}^2$ 程度であり、暗所視においては人間は 10^{-5}cd/m^2 程度まで知覚することができると言われている。一般によく知られているとおり、人間の輝度に対する感度は一定ではなく輝度に依存する。通常のLDR画像ではそれが問題になることは少ないが、HDR画像のトーンマッピングや符号化では、視覚感度を陽に考慮する必要がある。ここでは視覚特性のなかでも特に重要な、入力輝度とそれに対する応答について解説する。

光受容体の応答特性を簡単な数式でモデル化する試みは、数百年の歴史がありさまざまなモデルが存在する。その中の一つに、S型関数としてよく知られているMichaelis-Mentenの式(Naka-Rushtonの式、またはHill関数とも呼ぶ)がある。これは以下の式で与えられる。

$$R = \frac{L^n}{L^n + \sigma^n}$$

ここで R は刺激に対する光受容体の応答であり、最大値が1

図5 輝度順応モデル

に正規化されているとする。 L は輝度、 n は立ち上がりの急峻さをコントロールするパラメータ、 σ は順応輝度による感度変化を調整するパラメータである。いくつかの σ に対する応答曲線を図5に示す。これは、順応輝度が上がることで、人間の感度が最大になる輝度域も上昇することを示している。この式を実際に画質評価や符号化に応用しようとすると、順応輝度を先に求める必要があり、実用的ではない¹⁴⁾。Dalyはこれを基に、順応輝度に対して不変なモデルを以下の通り定めた¹⁵⁾。

$$R = \frac{L}{L + 12.6L^{0.63}} \quad (1)$$

さらにその後、Mantiuk等は、HDR画像評価のための応答曲線を新たに示した¹⁶⁾。これはコントラスト感度関数(Contrast Sensitivity Function: CSF)の周波数における最大値を用いて視覚感度を求めている。

また、ウェバー・フェヒナーの法則として知られる対数則は有名であるが、その近似が有効である範囲は限られている。スティーブンスの法則として知られる、べき乗則はウェバー・フェヒナーの法則よりも近似精度が高いとされており、CIE1976の明度 L^* に用いられている。

図6では、Daly¹⁵⁾、Mantiuk¹⁶⁾、スティーブンスの対数則¹⁷⁾を比較している*2。このような視覚特性の応答曲線は、HDR画像のトーンマッピング、符号化、画質評価などに応用されている。例えば、トーンマッピングにおいては、視覚感度の高い領域をレンジ圧縮しディスプレイレンジに収めるために用いられ、符号化においては、視覚感度の低い領域で量子化ステップをあげることで圧縮効率を上げる工夫がなされる。

4. 色空間と画像フォーマット

高ダイナミックレンジを実現するためには8ビットを超

*2 高輝度域における感度特性はその実験の困難さから正確なデータが少なく、定説がないのが現状である。

図6 光受容体モデル

えるビット深度が必要となるが、必ずしもビット深度とダイナミックレンジは同義ではない。TIFFやPPM等の画像フォーマットでは以前から、8ビット以上のビット深度に対応しており、後述のsRGBも16ビットまでのビット深度を持ちうる。しかしながら、これらは必ずしもダイナミックレンジを意識した符号化方式ではない。つまり、視覚特性の感度が極端に鈍る超高輝度域が、中間輝度域と同程度の精度で符号化される。本章では、HDR画像のために考案された色空間エンコーディング、および、ファイルフォーマットについて述べる。

4.1 sRGBとscRGB

現行のディスプレイ、デジタルカメラ、プリンタ等では色空間としてsRGBを用いることが多い。このsRGBは、ディスプレイで表示することを前提とした色空間であり、 $\gamma = 2.2$ 相当のガンマ補正の後、符号化される。この処理は本来はCRTのディスプレイガンマを補正するための処理であるが、3章の諸定理が示す高輝度域に鈍感な視覚特性に合致した符号化方式であるといえる。sRGBは、 80cd/m^2 の輝度レベルに基づいて設計されているため、色域も狭く、HDR画像の符号化には向いていない。Adobe RGBはsRGBよりも色域が広いのが特徴であるが、色域、輝度範囲ともにHDR画像に用いるには不十分である。scRGBは原色や白色点はsRGBと同一であるが、値を $[0, 1]$ の外に拡張しており、負の値も許容するため可視色域を完全に包含している。

ただしこの色空間はsRGBを拡張することで可視色域をカバーするために設計されたものであり、sRGBと同様にHDR画像を符号化するために考案されたものではなく、表現可能なダイナミックレンジも低い。

4.2 OpenEXRフォーマット

OpenEXRフォーマット(拡張子.exr)は、RGB各16ビットで計48bpp(Bit Per Pixel)で各チャンネルを記録する。これは、単精度IEEE浮動小数点数のビット数を半分にした形式であるといえる。符号部、指数部、仮数部に分割されており、それぞれ1ビット、5ビット、10ビットが割当てられている(図7(a))。これにより相対誤差を0.1%以下に抑えることができる。このフォーマットでは常用対数単位で10.7倍のダイナミックレンジをもつ。また、ロスレスデータ圧縮機能があり、平均で約60%のデータ圧縮が可能になる³⁾。

4.3 RadianceのRGBEフォーマット

RadianceのRGBEフォーマット(拡張子.hdr)は、RGBと指数部(Exponent)にそれぞれ1バイトを割当てた合計32bppのフォーマットである。RGB各チャンネルに対し1バイトで仮数を表現し、全チャンネル共通の指数部として1バイトが割当てられている(図7(b))。符号ビットをなくし、指数部を共通にすることで、効率よく各チャンネルを符号化している。圧縮にはランレングス符号化を用いており、約25%の圧縮が可能となる。

OpenEXRの指数部が5ビットであるのに対して、RGBEでは1バイトを割当てているため、表現可能なダイナミックレンジは高く、常用対数単位で76倍程度である。これに対して、仮数部が1バイトであるためOpenEXRに比べて量子化誤差が大きく、約1%の相対誤差となる。符号ビットがなく負の値をもたないために、RGB表色系では可視色域全体を表現することはできない。そのためXYZ表色系を取り扱うXYZEフォーマットも同様に規定されている³⁾。

4.4 LogLuvフォーマット

RadianceのRGBEとOpenEXRは、現在最も普及しているHDR画像フォーマットであるが、両者とも浮動小数点数を用いた符号化方式のため、冗長な表現となっている。これに対してLogLuvフォーマット(拡張子.tifまたは.tiff)は、画素値が整数で表現され、厳密ではないが量子化誤差が誤差検出閾値を下回るように工夫されている。輝度は、上記ウェバー・フェヒナーの法則に基づく対数エンコーディング

図7 各種HDRフォーマット

を用い、色度はCIE1976L*u*v*内で規定される以下の色度である。

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z}, v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} \quad (2)$$

このフォーマットでは、符号部に1ビット、対数圧縮された輝度に15ビット、二つの色度にそれぞれ8ビットを割当てており、常用対数単位で38倍のダイナミックレンジを持ち、相対誤差は約0.3%程度である(図7(c))。

5. 圧縮符号化

1画素あたりの階調数が多いHDR画像は、そのデータサイズが問題になることが多く、圧縮符号化は欠かせない重要な技術である。従来のJPEG2000, JPEG-XR, H.264/AVC等は1画素10ビット以上のビット深度を取り扱うことができるが、ダイナミックレンジを意識した処理は行われていないため、画像のダイナミックレンジが非常に高い場合に、単にHDR画像を線形スケーリングして対応可能なビット深度におさめた後に上記の従来の符号化方式で圧縮するのは効率が悪い。既記の通り、視覚特性は高輝度域と低輝度域において感度が鈍るためである。特に高輝度域の感度の鈍化を考慮に入れて、より効率の良い圧縮を行うことが求められる。

HDR画像を対象とした非可逆圧縮手法は多数提案されており、それらは、前処理でレンジを非線形圧縮した後にJPEGやH.264/AVC等で符号化する手法^{18)~20)}と、2層のダイナミックレンジスケラビリティを持つ手法^{21)~25)}に大別できる。以下にそれぞれの詳細を述べる。

5.1 前処理でレンジ圧縮する手法

これはJPEG2000やH.264/AVCの高圧縮機能を有効利用した手法である^{18)~20)}。前述の視覚特性を考慮した前処理関数を画像全体にかけ、HVSの感度が低い輝度範囲をレンジ圧縮したのち、量子化しJPEG2000やH.264/AVCで符号化する。図8にその符号化手順を要約している。最も簡易な前処理関数は、ウェバー・フェヒナーの対数則に基づく処理であり、文献18)ではその対数則を用いてレンジ圧縮し、8~16ビットで量子化した後にJPEG2000で圧縮する手法をとっている。Mantiukら¹⁹⁾はMPEG-4 (ISO/IEC 14496-2)に基づくHDR動画の圧縮法を示している。ここでは、べき乗則と対数則を組合せたlogLuvに類似した色空間を提案し前処理に用いている。

5.2 2層符号化

現在最大輝度が5,000cd/m²を超えるHDRディスプレイが実用化されているが⁴⁾、現時点では研究など特殊な用途で用いられているだけであり、ほとんどのアプリケーションでは、トーンマップされたLDR画像が使用される。2層符号化とは、HDR符号化データの一部を符号化することで、トーンマップされたLDR画像が得られる、2層のダイナミックレンジスケラビリティをもつ符号化手法である。図9に符号化手順

図8 レンジ圧縮に基づく手法
($f(\cdot)$ は視覚特性を考慮した前処理関数、 Q は線形量子化を表す)

図9 二層符号化

を示す。方法は非常にシンプルであり、まずHDR画像からトーンマッピングをへてLDR画像を得る。LDR画像は従来の静止画符号化手法で圧縮し、圧縮伸張後のLDR画像とHDR画像との差分画像を独立に圧縮する。前者のみを復号すればLDR画像、すべてを復号するとHDR画像が得られることになる。これはSpaulding等²¹⁾がデジタルカメラのRAW画像符号化のために考案した手法である。その後HDR静止画像の符号化²¹⁾やHDR動画²⁵⁾に応用された。文献22)ではLDR画像をJPEGで圧縮し、差分画像の符号化データをJFIFフォーマットのアプリケーションマークと呼ばれるバッファ領域に格納することで、従来のLDR画像フォーマットとの上位互換性を維持している。この方法の利点は、復号化側でトーンマップすることなく符号化側が用意したLDR画像が得られ、差分画像を復号すればHDR画像が得られる点にある。

しかしながら、この方法では差分画像の圧縮に多くのビットを要し、前節の圧縮手法よりも圧縮効率では大きく劣る。圧縮効率を改善するためのいくつかの手法が提案されており、文献22)では視覚的に重要な高周波成分はLDR画像に含まれているという仮定のもとに、差分画像をデシ

メーションすることで符号化効率を上げている。また、差分画像のエネルギーを減少させるために、LDR画像のダイナミックレンジをあげてHDR画像を近似する手法も提案されている。前述のとおりトーンマッピングには、グローバルオペレータとローカルオペレータがある。逆変換が可能なグローバルオペレータは、逆トーンマッピングによりLDR画像からHDR画像を復元できる。これを用いれば、差分画像のエネルギーを小さくすることが可能であるが、一般にはローカルオペレータが用いられ、使われるトーンマッピングが不明であることが多く、その場合は完全再構成される逆オペレータを定義することが難しい。そこで文献23)では局所的なインパルス応答を求める手法、文献24)ではLDR画像から最適な可逆グローバル関数を解析的に導出する手法を提案し、差分画像の符号化効率を上げることで高圧縮を実現する手法を提案している。また、LDR画像からHDR画像を復元する際に逆トーンマッピングをかけると、しばしば彩度が低下する。彩度調節が圧縮効率の改善には必要となり、文献22)や文献24)でいくつかの改善手法が提案されている。

5.3 比較

HDR画像の画質を評価するとき、SNR^{*3}を評価基準として用いると満足な評価が得られない場合が多い。符号化やトーンマッピングの研究などで事実上の標準画像となっている"Memorial" (図10) は、約 $3 \cdot 10^5 \text{cd/m}^2$ の最大輝度を持つ^{*4}。この画像は125dB程度の非常に高いダイナミックレンジを持つが、97.8%の画素が視覚感度が最も良い 10^3cd/m^2 以下、99%の画素が 10^4cd/m^2 以下の輝度域に分布する。このような画像をSNRなどで評価すると、高輝度域が過度に評価され多くの場合主観評価にそぐわない結果となる。これはSSIM²⁶⁾等の評価法でも同様である。VDP¹⁵⁾ VDP-HDR¹⁶⁾等、上記で述べた視覚感度を考慮した画質評価法は数多く存在するが、ユニバーサルなHDR画像の評価法は確立されていないのが現状である^{*5}。

その中でもここでは、比較的有効と思われる二つの指標を用いて上記符号化法の性能を評価する。一つは、CIE 2000 ΔE^* ²⁷⁾である。ここでHDR画像の高いダイナミックレンジに対応するために、CIELABにおける白色点を局所ウィンドウ内の最大値と定義し、画素毎に白色点が変わるように設定した。もう一つは、HDR画像をトーンマッピングしたLDR画像のPSNRである。一部のアプリケーションを除いて、HDR画像はトーンマッピングしたLDR画像を用いることがほとんどであり、また、トーンマッピング手法は、細部のコントラストを広い輝度範囲で保持する特性を

図10 Memorial

図11 符号化比較

(I) HD Photo, (II) Ward等の手法²²⁾, (III) Xu等の手法¹⁸⁾, (IV) Mantiuk等の手法²⁵⁾

*3 HDR画像はpeakが存在しないのでPSNRを用いることは少ない。

*4 オリジナル画像を定数倍し cd/m^2 単位のシーン輝度に近づけた画像を用いた。

*5 例えばDalyのVDPによる評価を上げたければ、そこで使われている視覚感度曲線を用いればよく、これではユニバーサルな評価とは言えない。

もつので、簡潔かつ比較的理にかなった評価指標となる。図11に(I) JPEG-XRの基となっているHD Photo, (II) Ward等の手法²²⁾, (III) Xu等の手法¹⁸⁾, (IV) Mantiuk等の手法²⁵⁾を評価している。なお、ここではLDRのPSNRを算

出する際にReinhardのローカルオペレータ²⁸⁾を用いてトーンマップしている。

二つの評価指針ともに、Xu等の手法¹⁸⁾が最もよい結果が得られた。これはJPEG2000の符号化性能が一つの要因であるが、特にLDR画像の画質を維持する際に有効であることがわかる。(Ⅱ)の手法²²⁾と(Ⅳ)の手法²⁵⁾はともに二層のダイナミックレンジを持ち、トーンマップなしでLDR画像が得られるという大きな利点をもつ。(Ⅳ)の手法²⁵⁾が(Ⅱ)の手法²²⁾よりも良い結果が得られているが、これは用いている符号化器の性能の違いも含まれ、また、使用するトーンマッピングによっても結果が変化することに注意されたい。

6. む す び

現在HDR画像が広く用いられているのは、CGと写真の分野であるが、高いダイナミックレンジが要求される車載カメラや医用画像、超高コントラストを活かした外観検査などで応用が進んでいる。また、知覚できるすべての輝度範囲と色域をカバーする形式は、デジタルアーカイブには欠かせない技術となるであろう。CMOSセンサの発展も著しく、最大輝度5,000cd/m²で16ビット階調のディスプレイも開発されており(2009年11月現在)、今後ますます画像の高ダイナミックレンジ化は加速するものと思われる。

最後に、本解説を執筆するに当たりご協力いただいたイーエヌジー株式会社関係各位と北九州市立大学博士課程神納貴生君に感謝の意を表する。(2009年12月11日受付)

〔文 献〕

- 1) G. Ward: "Real Pixels", in Graphic Gems II, pp.80-83, Academic Press, Inc. (1991)
- 2) Larson, G.W.: "Overcoming Gamut and Dynamic Range Limitations in Digital Images", Proceedings of the Sixth Color Imaging Conference (Nov. 1998)
- 3) E. Reinhard, S. Pattanaik, G. Ward and P. Debevec: "High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting (Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling)", Morgan Kaufmann Publisher (2005)
- 4) Seetzen, Helge, W. Heidrich, W. Stuezelinger, G. Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, A. Vorozcovs: "High Dynamic Range Display Systems", ACM Trans. Graph. (special issue SIGGRAPH 2004) (Aug. 2004)
- 5) 須川成利: "広ダイナミックレンジイメージセンサの最新動向", 映像学誌, 60, 3 pp.299-302 (2006)
- 6) B. Hoefflinger (Ed.): "High-Dynamic-Range (HDR) Vision", Springer Series in Advanced Microelectronics (2006)
- 7) Spivak, A. Belenky, A. Fish, O. Yadid-Pecht: "Wide-Dynamic-Range CMOS Image Sensors -Comparative Performance Analysis", IEEE Trans. On Electron Devices, 56, 11, pp.2446-2461 (Nov. 2009)
- 8) S. Mann and R. Picard: "On Being 'Undigital' with Digital Cameras: Extending Dynamic Range by Combining Differently Exposed Pictures", in Proceedings IS&T's 48th annual Conference; Society for Imaging Science and Technology (May 1995)
- 9) P.E. Debevec and J. Malik: "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs, Proceedings of SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, pp.369-378 (1997)
- 10) T. Mitsunaga and S.K. Nayer, T. Mitsunaga and S.K. Nayer:

- "Radiometric Self Calibration", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1, pp.374-380 (June 1999)
- 11) R. Fattal, D. Lischinski and M. Werman: "Gradient Domain High Dynamic Range Compression, ACM Transactions on Graphics, pp.249-256 (July 2002)
- 12) Ferrell McColough: "Complete Guide to High Dynamic Range Digital Photography", Lark Books (2008)
- 13) Maria Bualat, et al.: "Autonomous Robotic Inspection for Lunar Surface Operations", 6th International Conference on Field and Service Robotics (July 2007)
- 14) S. N. Pattanaik, Jack E. Tumblin, Hector Yee, Donald P. Greenberg: "Time-Dependent Visual Adaptation for Realistic Real-Time Image Display", Proceedings of SIGGRAPH 2000, pp.47-54, New Orleans, 23-28 (July 2000)
- 15) S. Daly: "The Visible Difference Predictor: An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity", in A.B. Watson, editor, Digital Image and Human Vision, pp.179-206, Cambridge, MA, MIT Press (1993)
- 16) R. Mantiuk, K. Myszkowski, H.-P. Seidel, R.I. Mantiuk, K. Myszkowski, H-P Seidel: "Visible Difference Predictor for High Dynamic Range Images", in Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 2763-2769 (2004)
- 17) G. Wyszecki and W.S. Stiles: "Color Sciences, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae", John Wiley & Sons (2000)
- 18) R. Xu, S.N. Pattanaik, C.E. Hughes: "High-Dynamic-Range Still-Image Encoding in JPEG 2000", IEEE Computer Graphics and Applications 25, 6, 57-64 (2005)
- 19) R. Mantiuk, G. Krawczyk, K. Myszkowski and H.P. Seidel: "Perception-Motivated High-Dynamic Range Video Encoding, ACM Trans. On Graphics, 23, 3, pp.773-741 (2004)
- 20) M. Okuda and N. Adami: "JPEG Compatible Raw Image Coding Based on Polynomial Tone Mapping Model", IEICE Trans. On Fundamentals, E91-A, 10, pp.2928-2933 (Oct. 2008)
- 21) K.E. Spaulding, R.L. Joshi, G.J. Woolfe: "Using a Residual Image Formed from a Clipped Limited Color Gamut Digital Image to represent an extended color gamut digital image", United States Patent 6301393
- 22) Ward, Greg and M. Simmons: "JPEG-HDR: A Backwards-Compatible, High Dynamic Range Extension to JPEG", Proceedings of the Thirteenth Color Imaging Conference (Nov. 2005)
- 23) Ward, Greg: "A General Approach to Backwards-Compatible Delivery of High Dynamic Range Images and Video", Proceedings of the Fourteenth Color Imaging Conference (Nov. 2006)
- 24) M. Okuda, N. Adami: "Two-Layer Coding Algorithm for High Dynamic Range Images based on Luminance Compensation", Special Section on High Dynamic Range Imaging, Journal of Visual Communication and Image Representation, Elsevier, 18, 5, pp.377-386 (Oct. 2007)
- 25) R. Mantiuk, A. Efremov, K. Myszkowski, H.P. Seidel: "Backward Compatible High Dynamic Range MPEG Video Compression", In Proc. of ACM SIGGRAPH 2006, pp.713-723 (2006)
- 26) Wang, Z. And Bovik, A.C. "A Universal Image Quality Index", IEEE Signal Processing Letters 9, 3, 81-84 (Mar. 2002)
- 27) G. Sharma, W. Wu, E.N. Dalal: "The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data and Mathematical Observations", Color Research and Application, 30, 1 (Feb. 2005)
- 28) E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda: "Photographic Tone Reproduction for Digital Images", ACM Trans on Graphics, 21, 3, 267-276

おくだ まさひろ
奥田 正浩 1998年、慶應義塾大学理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員、カーネギーメロン大学客員研究員を経て、2000年より、北九州市立大学国際環境工学部情報メディア工学科准教授。信号処理、画像処理、3次元映像処理の研究に従事。工学博士。