

投稿

眼視に近い皆既月食経過動画の作成

～ 皆既月食の HDR 動画 ～

鈴木裕司（京都大学）、長谷川能三（大阪市立科学館）

1. はじめに

月食は、月が地球の影に入り、欠けて見える現象です。欠けた部分とそうでない部分とでは明るさの差が大きいため、両方を同時に撮影することはできません（図 1）。しかし近年、複数の画像を合成することで、従来は表現できなかった明るさの差が大きい被写体を、1 枚の画像として表現するハイダイナミックレンジ（High Dynamic Range、以下 HDR）合成という手法が広まってきています。HDR 合成を用いると、月食の欠けた部分とそうでない部分を 1 枚の写真に表現できます。さらに、今回は月食の過程で撮影した一連の写真に対して HDR 合成を行い、肉眼で見たのに近い月食の動画を作成しました[1]。そこで本稿では、HDR 合成を用いた、月食の動画を作成する方法を紹介します。



図 1 明るさを変えて撮影した月食の写真
欠けた部分に明るさを合わせると、明るい部分が白とびします（左）。逆に明るい部分に合わせると、欠けた部分が写りません（右）。

2. 月のダイナミックレンジ

2.1 月食の見え方

2014 年 10 月 8 日に、全国的に良い条件で月食が見られました。この時は月が全部欠けて見える皆既月食が起きました。皆既月食については、月が全部欠けても、月が見えな

くなる訳ではなく、地球の大気を通過した赤い光だけが届いて、月が赤黒く見えると説明されることが一般的です。しかし、欠けた部分が赤黒く見えるのは皆既の時だけではなく、部分月食の時も同様です。肉眼では部分月食の時に、欠けている部分も、そうでない部分も確認することができます。

2.2 月食の写真での問題点

この月食の過程を撮影した写真はよく見られますが、通常の写真には実際の見え方を反映していない部分が 2 点あります。

まず 1 点目は、欠けた部分とそうでない部分を同時に写すことができないことです。上で述べたように、部分月食の時にも欠けた部分を見ることができます。しかし、図 1 のように明るい部分に設定を合わせると、欠けた部分は写りません。そのため、時間が経って実際に見た月食のイメージが薄くなり、残った写真だけ見ると、欠けた部分は見えていないかのような印象を与えてしまいます。

続いて 2 点目は皆既中の月は暗いということです。これは当たり前だと思われるかもしれませんが、写真を撮る人でなければ、撮影時に露出を変えていることが分かりません。そのため、よくある皆既中の月の写真を見ただけでは、月は暗く見えているのだとわかりません（少なくとも説明は必要です）。また、月食の過程を動画にする場合、欠けた部分が多くなるにつれて徐々に露出を上げていきます。そのため、露出が変わる時に不自然な見え方になってしまいます。

2.3 ダイナミックレンジ (DR)

こうした問題が起こるのはカメラのダイナミックレンジ (Dynamic Range、以下 DR) の狭さが原因です。DR とは、被写体の中で白とびした部分と黒つぶれした部分の明るさの比のことです。大雑把にはきちんと写る明るさの範囲と思って下さい。部分月食の時に、肉眼では欠けた部分も、そうでない部分も確認できるのは、人間の目の DR が広いからです。それに対し、カメラは撮影した画像を、各ピクセルの各色を 16bit、つまり 0～65535 の値で記録します。そのため、数万倍にも及ぶ DR はそもそも記録できません。また実際には 16bit の全てが使える訳ではなくて、暗い部分はノイズに埋もれてしまいます。逆に明るい部分にはハレーションの影響が出ます。そのため、実際に有効な DR は上位機種でも 3 桁程度になってしまいます。したがって、カメラでは部分月食の時に、欠けた部分とそうでない部分を同時に写すことができません。

2.4 ハイダイナミックレンジ (HDR) 画像

カメラの DR が約 3 桁に対して、自然界の DR はそれよりもはるかに大きいです。例えば、満月の表面の明るさと夜空の明るさとは、約 5 桁も明るさが違います。そのため、自然界の明るさを正確に記録するためには、何らかの方法によって DR を広げた画像を作らなければいけません。DR を通常よりも広げた画像を HDR 画像と呼びます。

HDR 画像を作成する手段としては、設定を変えて複数枚撮影した画像を合成する手法が一般的です。まず、適正な露出設定で 1 枚撮影します。その後、適正よりも明るく写した画像、暗く写した画像をそれぞれ撮影します。適正よりも明るく写した画像では、全体は白っぽくなりますが、適正露出では黒つぶれしていた部分では適正な露出になります。逆に暗く写した場合には、適正露出で白とびし

ていた部分が適正露出になります。このようにして、設定を変えて複数枚の画像を撮影し、各画像の中の適正露出の部分を用いて情報を補うことで、元の画像の DR を広げることができます。使用する画像の枚数に制限はなく、枚数を増やして同様のことを行えば、自然界の DR をカバーした HDR 画像を作成できます (図 2)。



図 2 半月の地球照

一番明るい露出の写真 (左上) と、一番暗い露出の写真 (右上)。それらの間で露出を 1 段階ずつ変えて撮影した 12 枚の画像から作成した HDR 画像 (下)。月の昼の部分でも、夜の部分でも模様が見えています。

3. HDR 画像の作成

3.1 RAW と JPEG の対応関数

今回は露出を 1 段階ずつ (光量にして 2 倍) 変えて撮影した 7 枚の画像を 1 組として、HDR 画像を作成しました。各組の写真は、月食の過程で 20 秒毎に撮影しています。

今回使用した写真は、記録形式が JPEG であるため、ピクセル値が明るさに比例してい

ません。そのため合成に先立ち、JPEG のピクセル値を明るさに比例した値に変換しました。そのために、RAW+JPEG 形式で撮影を行い、同一の写真の RAW と JPEG とで、同一のピクセルの値を比較し、JPEG での値と RAW での値とで 1 対 1 対応の関数を作成しました (図 3)。その関数をもとに値を変換しています。もちろん、JPEG には 256 段階しかないので、ピクセル値の取りうる値は飛び飛びになります。

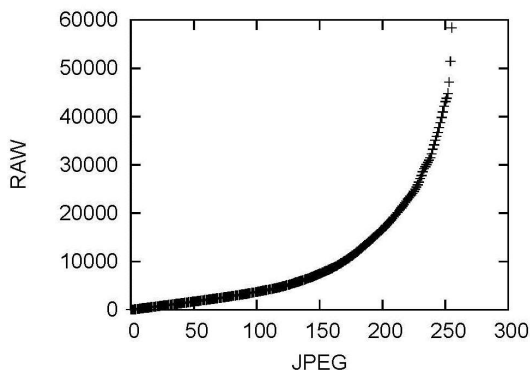


図 3 RAW と JPEG の対応関数

3.2 適正露出の範囲の判断

さて、HDR 画像を合成には、各画像の適正露出の部分を用いるため、次に各画像の適正露出がどこかを判断します。今回は、適正露出でない部分は単に白っぽい・黒っぽいではなく、被写体の本来の明るさからずれている部分としました。それを判断するため、各画像について、明るさのヒストグラムを作成しました (図 4)。理想的には、露出が半分になれば全てのピクセルで値が半分になるはずですが。そのため、例えば露出が 1 段暗い画像のピクセル値を 2 倍にすれば、2 枚の画像のヒストグラムは重なるはずですが、実際には DR が限られているので、各画像のヒストグラムにはずれが存在します。明るい側のピクセル数が多くなっているのはセンサ

一の飽和とハレーションの影響です。また、暗い側のピクセル数が多くなっているのはノイズの影響です。異なる露出のヒストグラムを同じグラフに表示すると、複数のヒストグラムで重なる部分が見られます。この重なる部分が被写体の本来のヒストグラムを現していると推測できます。月食時には月の表面の明るさは空間的に連続的に変化します。そのため、ハレーションの影響を受けているのは、ある値よりも明るい部分だと考えられます。また、ノイズの影響が大きいのは、ある値よりも暗い部分となります。そこで、それらの値の間の明るさ、つまりヒストグラムが重なっている明るさが、各画像での適正露出の部分だと判断しました。

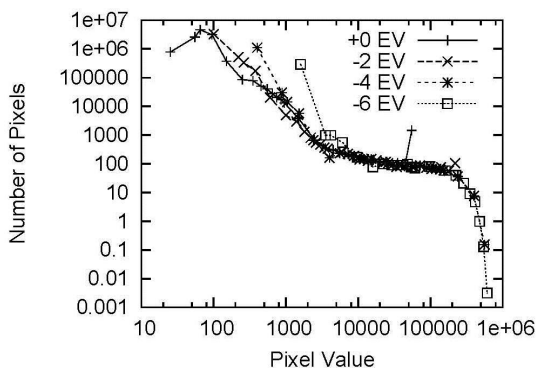


図 4 ある食分における画像のヒストグラム一番明るい露出を +0 段 (+0 EV; +) として、-2 EV (×)、-4 EV (※)、-6 EV (□) の 4 枚の画像についてのヒストグラムを重ねて表示しています。+0 EV のグラフでの最大値の点が上がっているのはセンサーの飽和とハレーションの影響です。また -6 EV のグラフでの最小値の点が上がっているのはノイズの影響です。

3.3 HDR 合成

こうして各画像に対して適正露出の明るさの範囲を設定すると、露出が異なる画像で適

正露出の明るさに重なりが生じるので、その重なりの中で閾値を設定しました。閾値よりも明るい値を持つピクセルでは、より暗い露出で撮影された画像のピクセルの値を用いて、情報を補間していきました。この方法を1組7枚の内、露出が2段ずつ異なる4枚に対して行い、HDR画像を作成しました。

4. トーンマッピング

4.1 目標とするピクセル値の範囲

上記の方法でHDR画像を作成することができました。しかし、ディスプレイが表現できるDRにも限界があるので、HDR画像をそのまま表示することはできません。そこで、全体もしくは局所的なDRを下げるトーンマッピングという作業が必要になります。HDR合成からトーンマッピングまでは市販のソフトで行えますが、今回は動画の作成が目的であるため、全ての画像に対して同一の処理でトーンマッピングを行う必要があります。つまり、元画像での明るさが同じであれば、最終画像でも同じピクセル値を持つように処理しなければなりません。市販のソフトだと、異なる画像に対しての同一処理を担保することができないため、今回は手動でトーンマッピングを行いました。

画像はJPEG形式で出力するため、最終的なピクセル値は0～255に収める必要があります。その際に、図3で示したRAWとJPEGの対応関数を用いれば、0～65535の値を0～255の範囲の値へと変換できます。ただし、対応関数のDRをギリギリまで使うとコントラストを出しにくいので、手動によるトーンマッピングではピクセル値を300～30000の範囲の収めることにしました。

4.2 月食のダイナミックレンジ

目標とするDRが2桁なのに対して、処理前のDRがどの程度なのかをまず調べます。

今回の目的は動画の作成であるため、1組の画像のDRではなく、月食の過程を通してのDRを考えなくてははいけません。そこで、皆既から部分食明けまで、いくつかの食分でのHDR画像のヒストグラムを作成しました(図5)。ここから、月食を通してのDRは約6桁であることが分かりました。

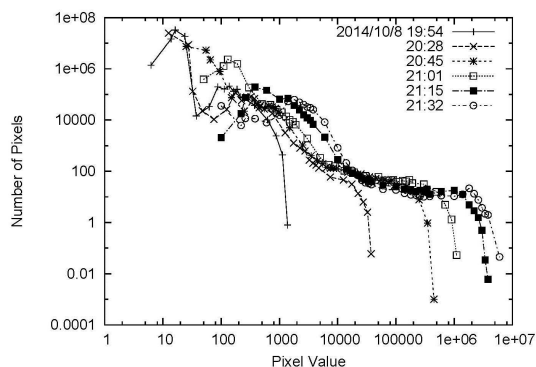


図5 食分の異なるHDR画像のヒストグラム
時刻は右上に書いてある通りです。

6桁のDRを2桁のDRに圧縮するためには、単純に三乗根をとればよいことになります。ですので、各ピクセルの三乗根を取り、その後定数をかけてピクセル値がだいたい300～30000になるようにしました。明暗の差が縮まるので、場合によっては、月の表面の様々を見やすくする処理が必要になりますが、今回は許容範囲と判断して行いませんでした。最後に図3の対応関数を用いて、各ピクセルの値を0～255に収めました。これをRGB各色について行い、最終的にカラーのJPEGを作成しました。

4.3 動画の作成

約400組の写真に対して同一の処理を施し、同数のJPEG画像を作成しました(図6)。最後にこれらの画像をつなげて、動画を作成しました[1]。作成した動画では、皆既中の赤黒い様子が再現されています。また、部分月

食から食が明けていく様子が、露出の変化によって見え方が変わることなく表現されています。

5. おわりに

2014年10月8日の月食では、撮影時には、HDR 動画の作成を意識していませんでした。保険として、露出を変えた写真を複数枚撮影していたことで、たまたま HDR 動画を作成できました。それでも、月食の前半は露出の設定を試行錯誤していたため、HDR 画像は皆既直前より後でしか作成していません。

それに対し、この記事の執筆直後の 2015年4月4日の皆既月食では、HDR 動画を念頭に置き、月食の全過程で露出を3段ずつ変えた5枚1組の写真を30秒毎に撮影しました。加えて、処理をスクリプト化することで、月食から1週間以内に HDR 動画を作成できました。月食中は終始もやのかかる条件でしたが、月食の過程を再現できています。

HDR 動画であれば、月食の経過を違和感なく表現することができます。月食の際には各地で過程が撮影されると思いますので、撮影時に余裕があれば、月食の DR をカバーした撮影を行っていただければと思います。

A. 補足

HDR 画像は FITS 形式で作成しました。また、今回使用したソフトは以下の通りです。

- ・JPEG ⇔ FITS の変換 : ImageMagick
- ・RAW → FITS の変換 : UFRaw
- ・FITS の処理 : IRAF、cfitsio

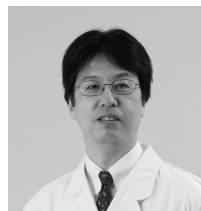


図6 動画に使用した最終画像の一部
時刻は左上から下へ 19:54、20:28、20:45、右上から下へ 21:01、21:15、21:32 です。

文 献

[1] 動画はこちらからご覧いただけます。

http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/%7Enozo/hdr_le/index.html



鈴木 裕司 (左)
長谷川 能三 (右)