

Python と Colab で作る - RAW 現像ソフト作成入門

目次

1. はじめに
2. カメラ画像処理について
3. 基本的な処理
 - 3.1 準備
 - 3.2 簡易デモザイク処理
 - 3.3 ブラックレベル調整
 - 3.4 ホワイトバランス調整
 - 3.5 ガンマ補正
4. 重要な処理
 - 4.1 この章について
 - 4.2 線形補間デモザイク
 - 4.3 欠陥画素補正
 - 4.4 カラーマトリクス補正
 - 4.5 レンズシェーディング補正
5. 画質を良くする処理
 - 5.1 この章について
 - 5.2 ノイズフィルター
 - 5.3 エッジ強調
 - 5.4 トーンカーブ補正
6. 応用編
 - 6.1 線形補間デモザイクの周波数特性
 - 6.2 高度なデモザイク処理
7. まとめ
8. Appendix
 - 8.1. Google Colab の使い方
 - 8.2. RAW 画像の撮影方法

1. はじめに

この本について

この本では、カメラ画像処理・RAW 画像現像の内容を実際の動作レベルで解説し、なるべくスクラッチから Python 上で実行してみる事を目的としています。

そのために、解説する処理は最も重要なものにしぼり、使用するアルゴリズムは一部の例外（デモザイク）を除き、もっとも簡単なものを選びました [1]。

記事の最後ではラズベリーパイのカメラで撮影した RAW 画像からこんな RGB 画像が作れるようになります。

(TODO: 画像を入れる)

またすべての処理は Google Colab 上で行うことができ、読者の皆さんにはパワフルな PC や特殊なソフトウェアをよういせずとも、ブラウザ上で全ての処理を試してみることができます。

全てのコードへのリンクはこちらの目次ページからたどることができます。

対象読者

この本は以下のような読者を対象としています。 - カメラ内部の画像処理または RAW 現像の内容に興味がある。

また次のような知識があれば、内容を深く理解する助けになります。 - Python プログラミングの基本的な内容について知っている。 - 高校で学ぶ程度の数学の知識がある。

Colab について

Google Colab (グーグル・コラボ) とは Google が提供するサービスの一つで、ブラウザ上で実行可能な Python のインタラクティブ環境です。

Google Colab を利用することにより、Python の環境を無料でブラウザ上で利用することができます。

詳しくは Google 自身による Colab の解説をご覧ください。

この本で扱うもの

この本で扱う内容は基本的に以下のとおりです。

- 基本的な RAW 現像処理・カメラ画像処理の流れ
- Bayer 画像から RGB 画像出力までの各アルゴリズムのうち、基本的な最低限のものの解説
- 解説した基本的なアルゴリズムの Python による実装と処理例

一部例外はありますが、そういったものは関連した話題として触れられるだけにとどまります。

この記事で扱わないもの

この本で基本的に扱わない物は以下のとおりです。ただし、記事の解説上最低限必要なものについては触れることがあります。

- 3 A (オートフォーカス、オートホワイトバランス、オート露出)などを始めとするカメラコントロールアルゴリズム
- 高度なカメラ画像処理アルゴリズム
- 画像評価、カリブレーション、及びチューニング
- 画像圧縮

環境について

この記事で解説する内容は一般的なものですが、使用した画像ファイルは特定のカメラに依存しています。他のカメラでもわずかな変更で同等の処理ができるとは予想されますが、検証はしていません。

使用カメラ

- Sony Alpha 7 III
- Raspberry Pi Camera v2.1

なお、使用したファイルは Github からダウンロードできるので、これらのカメラをお持ちでなくとも、紹介した処理の内容を実行することは可能です。

実行環境

この内容を再現するには通常の PC 環境に加えて以下の環境等が必用です。

- Google Colab にアクセスできるブラウザ
- 多くのブラウザが対応できると思われます。なお、本書の内容は Chrome によって確かめられています。
- Colab にアクセスできる Google アカウント

必須ではありませんが、次の物があれば、本書の内容を更に深く理解することができます

- PC 上で実行できる Perl 環境 (ExifTool の実行に必用)
- exiftool

次の章

次はカメラ画像処理について簡単に解説します。

2. カメラ画像処理について

この章について

この章ではカメラのしくみや RAW 画像からはじめて、カメラ画像処理や RAW 現像ソフトの中でどのような処理が行われているのかを説明します。

この章を含む全ての内容は Colab ノートブックとして公開しています。この章のノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_chapter.ipynb

カメラのしくみ

(TODO: 追加)

RAW 画像、RAW ファイルとは？

RAW ファイルや RAW データというのは厳密な定義はないのですが、カメラ処理で RAW というと Bayer フォーマットの画像データを指すことが多いようです。したがって多くの場合、RAW データは Bayer フォーマットの画像データ、RAW ファイルはその RAW データを含んだファイルということになります。

まず前提として、今使われているカメラの画像センサーの殆どは Bayer 配列というものを使ってフルカラーを実現しています。

画像センサーは、碁盤の目状にならんだ小さな光センサーの集まりでできています。一つ一つの光センサーはそのままでは色の違いを認識できません。そこで色を認識するためには、3 原色のうち一色を選択して光センサーにあてて、その光の強度を測定する必要があります。方法としてはまず、分光器を使って光を赤、青、緑に分解して、3 つの画像センサーにあてて、それぞれの色の画像を認識し、その後その 3 枚をあわせることでフルカラーの画像を合成するという方法がありました。これは 3 板方式などとよばれることがあります。この方法は手法的にもわかりやすく、また、余計な処理が含まれないためフルカラーの画像がきれい、といった特徴があり高級ビデオカメラなどで採用されていました。欠点としては分光器と 3 つの画像センサーを搭載するためにサイズが大きくなるという点があります。

これに対して、画像センサー上の一つ一つの光センサーの上に、一部の波長の光だけを通す色フィルターを載せ、各画素が異なる色を取り込むという方法もあります。この方

法では1枚の画像センサーでフルカラー画像を取り込めるため、3板方式に対して単板方式とよばれることもあります。3版方式とくらべた利点としては分光器が不要で1枚のセンサーで済むのでサイズが小さい。逆に欠点としては、1画素につき1色の情報しか無いので、フルカラーの画像を再現するには画像処理が必要になる、という点があります。

単版方式の画像センサーの上に載る色フィルターの種類としては、3原色を通す原色フィルターと、3原色の補色（シアン・マゼンダ・イエロー）を通す補色フィルター¹というものがあります。補色フィルターは光の透過率が高いためより明るい画像を得ることができます。それに対して原色フィルターは色の再現度にすぐれています。Bayer配列はこの単版原色フィルター方式のうち最もポピュラーなものです。

こういうわけで Bayer 配列の画像センサーの出力では1画素につき一色しか情報をもちません。Bayer配列のカラーフィルターはこの図左のように、 2×2 ブロックの中に、赤が1画素、青が1画素、緑が2画素ならぶようになっています。緑は対角線上にならびます。緑が2画素あるのは、可視光の中でも最も強い光の緑色を使うことで解像度を稼ぐため、という解釈がなされています。Bayer というのはこの配列の発明者の名前です。

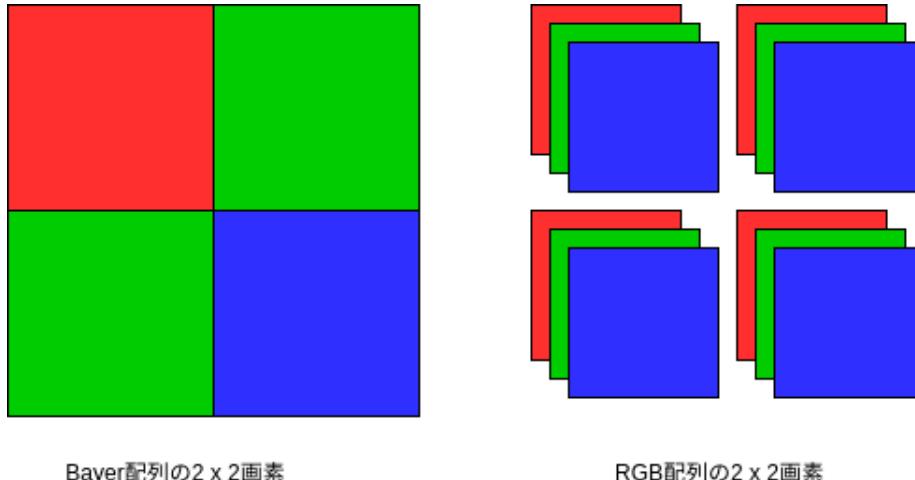


Figure 1: Bayer と RGB 配列

カメラ用センサーでは2000年代初頭までは、補色フィルターや3板方式もそれなりの割合で使われていたのですが、センサーの性能向上やカメラの小型化と高画質化の流れの中でほとんどがBayer方式にかわりました。今では、SigmaのFoveonのような意欲的な例外を除くと、DSLRやスマートフォンで使われているカラー画像センサーの殆どがBayer方式を採用しています。したがって、ほとんどのカメラの中ではBayerフォーマットの画像データをセンサーから受取り、フルカラーの画像に変換するという処理が行われている、ということになります。

¹ 7IIIのRAW画像ではEXIF情報に含まれているので、-bオプションをつけなくとも! `exiftool sample.ARW`で読み取ることができます。

こういった Bayer フォーマットの画像ファイルは、すなわちセンサーの出力に近いところで出力されたことになり、カメラが処理した JPEG に比べて以下のような利点があります。

- ビット数が多い (RGB は通常 8 ビット。Bayer は 10 ビットから 12 ビットが普通。さらに多いものもある)
- 信号が線形 (ガンマ補正などがされていない)
- 余計な画像処理がされていない
- 非可逆圧縮がかけられていない (情報のロスがない)

したがって、優秀なソフトウェアを使うことで、カメラが出力する JPEG よりもすぐれた画像を手に入れる事ができる「可能性」があります。

逆に欠点としては

- データ量が多い (ビット数が多い。通常非可逆圧縮がされていない)
- 手を加えないと画像が見れない
- 画像フォーマットの情報があまりシェアされていない
- 実際にはどんな処理がすでに行われているのか不透明

などがあります。最後の点に関して言うと、RAW データといつてもセンサー出力をそのままファイルに書き出すことはまもなく、欠陥画素除去など最低限の前処理が行われるのが普通です。しかし、実際にどんな前処理がおこなわれているのかは必ずしも公開されていません。

カメラ画像処理のあらまし

Bayer からフルカラーの画像を作り出す RAW 現像処理・カメラ画像処理のうち、メインになる部分の例はこんな感じになります。²

このうち、最低限必要な処理は、以下のものです。

- ブラックレベル補正
- ホワイトバランス補正 (デジタルゲイン補正も含む)
- デモザイク (Bayer からフルカラー画像への変換)
- ガンマ補正

これらがないと、まともに見ることのできる画像を作ることができません。

さらに、最低限の画質を維持するには、通常は、

- 線形性補正
- 欠陥画素補正
- 周辺減光補正
- カラーマトリクス

²これはあくまで一例です。実際のカメラや RAW 現像ソフト内で行われる処理はメーカーや機種ごとに異なります。

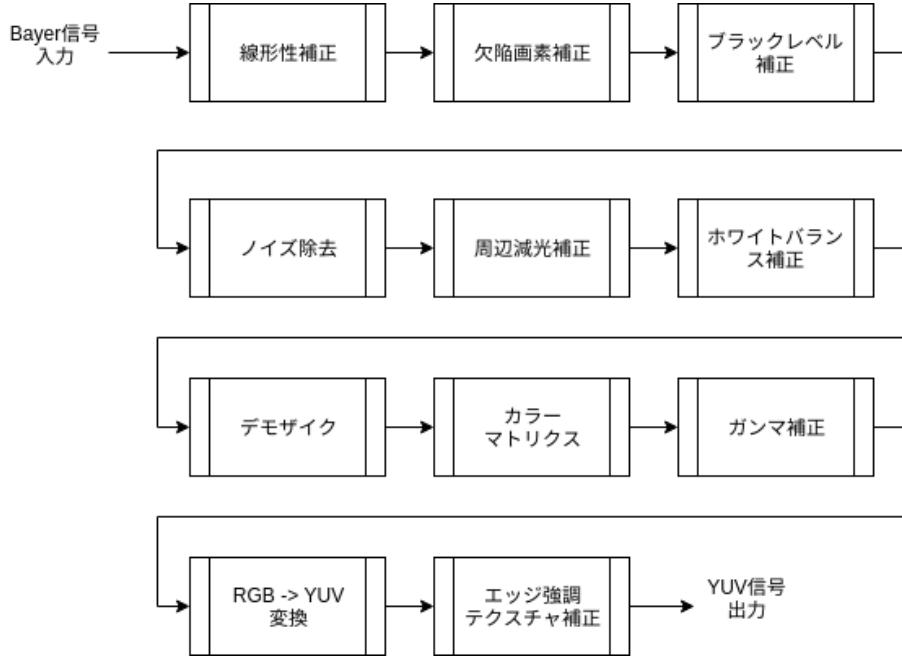


Figure 2: カメラ画像処理パイプライン

が必要です。ただし、線形性補正や欠陥画素補正は、カメラが RAW データを出力する前に処理されていることが多いようです。また、センサーの特性がよければ線形性補正やカラーマトリクスの影響は小さいかもしれません。

次に、より良い画質を実現するものとして、

- ノイズ除去
- エッジ強調・テクスチャ補正

があります。RGB->YUV 変換は JPEG や MPEG の画像を作るのには必要ですが、RGB 画像を出力する分にはなくともかまいません。

この他に、最近のカメラでは更に画質を向上させるために

- レンズ収差補正
- レンズ歪補正
- 偽色補正
- グローバル・トーン補正
- ローカル・トーン補正
- 高度なノイズ処理
- 高度な色補正
- ズーム
- マルチフレーム処理

などの処理が行われるのが普通です。今回はベーシックな処理のみとりあげるので、こういった高度な処理は行いません。

結局、今回扱うのは次の部分のみです。

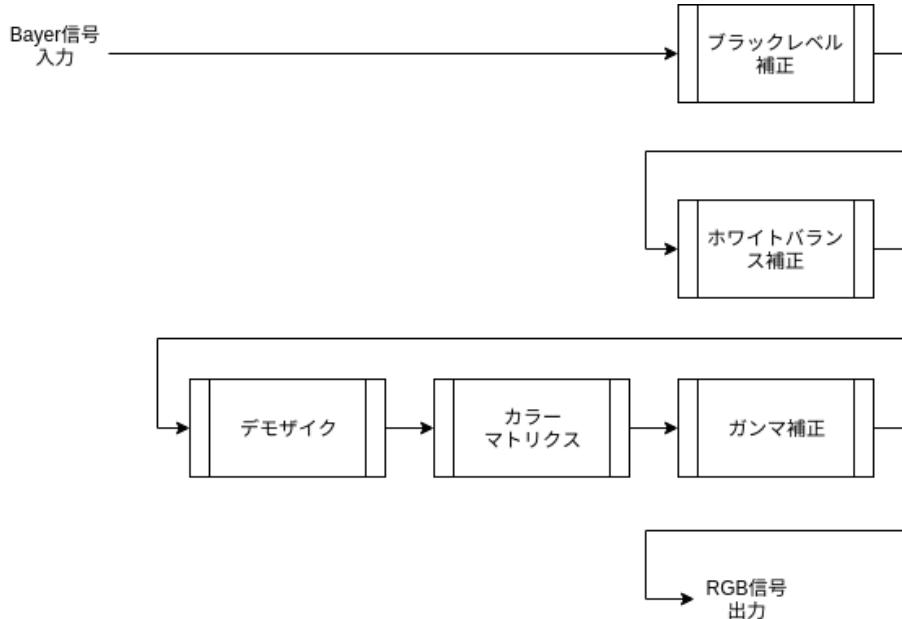


Figure 3: 単純化したカメラ画像処理パイプライン

この章のまとめ

カメラ内部の仕組みと RAW 現像処理・カメラ画像処理を、画像処理の観点から説明しました。

次の章

次はRAW 画像の準備を行います。

3.1 準備と簡易デモザイク

この節について

この節ではまず RAW 画像を準備し、簡易的なデモザイクを行ってみます。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

RAW 画像の準備

まず RAW 画像を用意します。今回は Sony 7 III で撮影したこの画像を使います。



Figure 4: 最終的な画像

ここで表示している画像は使用する RAW ファイルから作成した RGB 画像 (PNG ファイル) です。

元になる RAW ファイルはこの URL にあります。

https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/sample.ARW

では、colab 上にダウンロードしてみましょう。

```
!if [ ! -f sample.ARW ]; then wget  
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/sample.ARW;  
fi
```

自分で撮影した RAW データを使用する場合は次のコマンド利用してください。

```
# from google.colab import files  
# uploaded = files.upload()
```

使いやすいように RAW ファイル名を変数に保存しておきます。

自分でアップロードしたファイルを使用する場合は、ファイル名を対象のファイルに書き換えてください。

```
raw_file = "sample.ARW"
```

RAW 画像の読み込み

まず必用なモジュールをインストールします。

まずインストールするのは rawpy です。

rawpy は python で RAW 画像を操作するためのモジュールです。

```
https://pypi.org/project/rawpy/
```

rawpy を使うと RAW 画像から RAW 画像データを取り出したり、画像サイズなどのパラメータを読み出したり、また簡易現像をすることができます。

rawpy の使用法については実際に使う時に説明します。

```
!pip install rawpy
```

```
Requirement already satisfied: rawpy in  
  /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)  
Requirement already satisfied: numpy in  
  /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)  
(1.15.1)
```

colab ではコマンドの最初に! をつけると、linux コマンドが実行できます。pip は python のモジュール管理用のコマンドです。

次に imageio をインストールします。

imageio は画像の表示やロード・セーブなどを行うモジュールです。

```
!pip install imageio
```

```
Requirement already satisfied: imageio in  
  /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
```

次にこれらのモジュールをインポートします。

```
import rawpy, imageio
```

他に必用なモジュールがある場合はその都度 import することにします。

では先程ダウンロードした RAW ファイルを rawpy を使って読み出してみましょう。

`imread()` は raw データをファイルから読み込む rawpy のメソッドです。

```
raw = rawpy.imread(raw_file)
```

読み込みがうまくいったか確認を兼ねて RAW データの情報を見てみましょう。

まず、画像サイズを確認します。読み込んだ RAW データは、sizes というアトリビュートでサイズ確認ができます。

```
print(raw.sizes)
```

```
ImageSizes(raw_height=4024, raw_width=6048, height=4024, width=6024,
           top_margin=0, left_margin=0, iheight=4024, iwidth=6024,
           pixel_aspect=1.0, flip=0)
```

raw_height と raw_width は RAW データのサイズです。この画像のサイズは縦 4024 ライン、横 6048 画素、ということになります。

height と width は、画像処理後の出力画像のサイズです。

他の値については rawpy のページで解説されています。

<https://letmaik.github.io/rawpy/api/rawpy.RawPy.html#rawpy.RawPy.sizes>

この画像を処理しやすくするために、numpy を使用します。

numpy は python 用の数値計算ライブラリーです。行列処理の機能が豊富なので画像処理にも向いています。

まず、numpy を np という名前でインポートします。

```
import numpy as np
```

次に raw 画像データから数値データのみを numpy の配列に読み込みます。

```
raw_array = raw.raw_image
```

raw_image は RAW 画像データを numpy の配列として渡すアトリビュートです。

このままでは 1 次元配列で扱いにくいので、reshape を使って 2 次元配列に変換します。

```
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w))
```

これで raw_array は 4024 x 6048 の 2 次元配列になりました。画像データを表示するコマンド imshow を使って、画像として確認してみましょう。

まずキャプション用に日本語フォントを用意します。

```
# 日本語フォントをインストール
!apt -y install fonts-ipafont-gothic

# 画像表示用ライブラリ pyplot のインポート。
import matplotlib.pyplot as plt
# 日本語フォントを設定
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAGothic'
```

```
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:  
    Permission denied)  
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock  
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?
```

実際に画像を表示します。

```
# 画像表示サイズを設定。figsizeの中身は横サイズ、縦サイズ。  
#  
# 単位はインチだが実際の表示サイズはディスプレイ解像度によって異なる。  
plt.figure(figsize=(8, 6))  
# raw_arrayの中のデータをグレースケールで表示します。  
plt.imshow(raw_array, cmap='gray')  
# 軸を非表示にします。  
plt.axis('off')  
# 画像タイトルの設定  
plt.title(u"Bayer画像をそのまま表示")  
# 実際に表示します。  
plt.show()
```



Figure 5: png

ここで matplotlib は numpy 用描画ライブラリーです。その中で pyplot は各種グラフを表示するモジュールです。ここでは plt という名前でインポートしています。

もし日本語のタイトルが文字化けしている場合は、もし日本語が文字化けしている場

合は ! rm /content/.cache/matplotlib/fontList.json を実行して、Runtime->Restart Runtime で再実行してみてください。

```
# もし日本語が文字化けしている場合次の行の#を削除して実行。  
# ! rm /content/.cache/matplotlib/fontList.json  
# その後、Runtime->Restart and run allで再実行
```

この節のまとめ

必用なモジュールをインポートして RAW 画像を colab 上に読み込みました。次は簡易デモザイク処理を行います。

3.2 簡易デモザイク処理

この節について

この節では、RAW データの簡易でモザイク処理を行い、画像をフルカラーで表示してみます。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

準備

まず前節で行ったライブラリーのインストールと、モジュールのインポート、画像のダウンロード、及び RAW 画像の読み込みを行います。内容については前節を参照ください。

```
# rawpyとimageioのインストール  
!pip install rawpy  
!pip install imageio  
  
# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート  
import rawpy, imageio  
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt  
  
# 日本語フォントの設定  
!apt -y install fonts-ipafont-gothic  
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAPGothic'  
# もし日本語が文字化けしている場合 ! rm  
/content/.cache/matplotlib/fontList.json を実行して、
```

```

# Runtime->Restart Runtimeで再実行

# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f sample.ARW ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/sample.ARW;
fi

#
# 自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file = "sample.ARW"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w))

Requirement already satisfied: rawpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
(1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:
    Permission denied)
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?

```

RAW 画像の確認

読み込んだ RAW 画像を表示してみます。

```

# raw_arrayの中のデータをグレースケールで表示します。
plt.imshow(raw_array, cmap='gray')
plt.axis('off')
plt.title(u"RAW画像の確認")
plt.show()

```

拡大して見てみましょう。

```
# pyplotのコマンドfigure()を使って表示サイズを調整.
```



Figure 6: png

```
# ここではfigsize=(8, 8)で、8inch x
#inchを指定（ただし実際の表示サイズはディスプレイ解像度に依存）
plt.figure(figsize=(8, 8))

# RAW画像の中から(1310, 2620)から60x60の領域を表示。
plt.imshow(raw_array[1310:1370, 2620:2680], cmap='gray')
plt.axis('off')
plt.title(u"RAW画像の拡大表示")
plt.show()
```

明るいところが緑、暗いところが赤や青の画素のはずです。

疑似カラー化

Bayer の画素と色の関係を直感的に理解するために、Bayer の赤の部分を赤、青を青、緑を緑で表示してみましょう。

まず、RAW 画像の配列を確認しておきます。

```
print(raw.raw_pattern)
```

```
[[0 1]
 [3 2]]
```

RAW画像の拡大表示

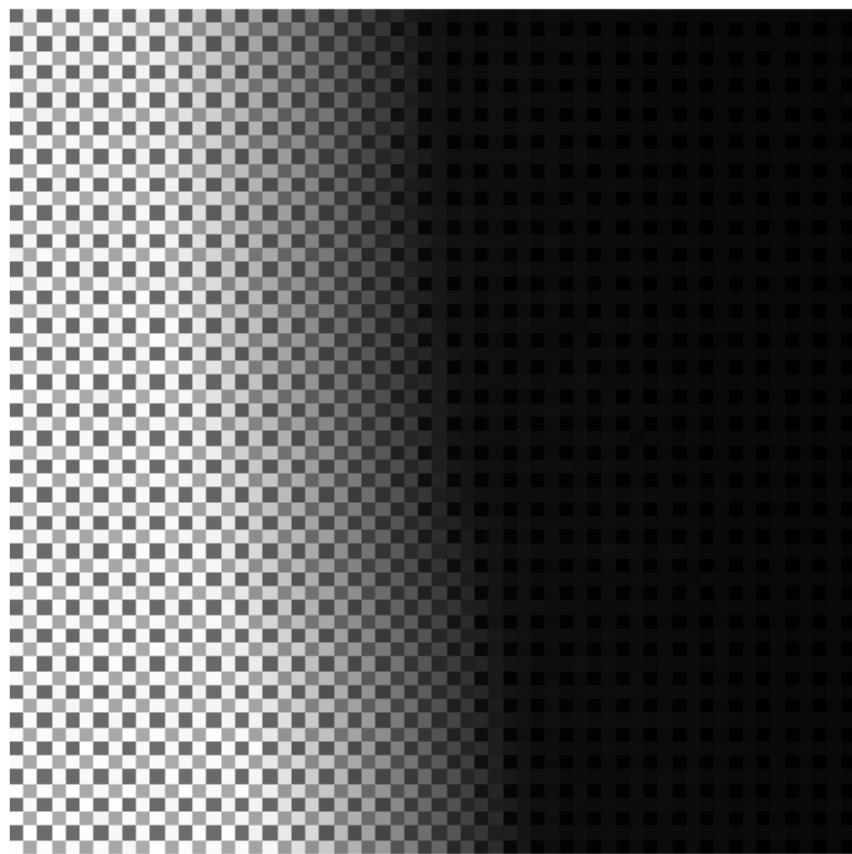


Figure 7: png

raw_pattern は rawpy のアトリビュートで、Bayer 配列の 2x2 行列を示します。

ここで、各番号と色の関係は以下のようになっています。カッコ内は略称です

番号	色
0	赤 (R)
1	緑 (Gr)
2	青 (B)
3	緑 (Gb)

ここで緑に Gr と Gb があるのは、赤の行の緑と青の行の緑を区別するためです。カメラ画像処理では両者を区別することが多々あり、両者を Gr と Gb と表す事があります。

両者を区別する必要が無い場合はどちらも G であらわします。

この対応関係を考えると、この画像の各画素の色は、左上から

赤 緑

緑 青

のように並んでいることがわかります。これを図示するところなります。

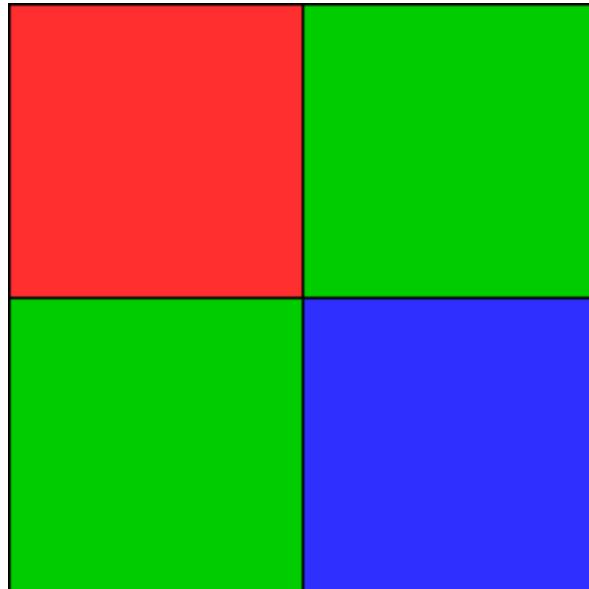


Figure 8: この画像の Bayer 配列

では、これに対応する RGB 画像を作ってみましょう。

```
# raw_arrayと同じ大きさで、3色のデータを持つnumpyの行列を作る。
```

```

# zerosは指定された大きさの0行列を作るコマンド。
raw_color = np.zeros((h, w, 3))

# 偶数列、偶数行の画素は赤なので、赤チャンネル(0)にコピー。
raw_color[0::2, 0::2, 0] = raw_array[0::2, 0::2]
# 奇数列、偶数行の画素は緑なので、緑チャンネル(1)にコピー。
raw_color[0::2, 1::2, 1] = raw_array[0::2, 1::2]
# 偶数列、奇数行の画素は緑なので、緑チャンネル(1)にコピー。
raw_color[1::2, 0::2, 1] = raw_array[1::2, 0::2]
# 奇数列、奇数行の画素は赤なので、青チャンネル(2)にコピー。
raw_color[1::2, 1::2, 2] = raw_array[1::2, 1::2]

# 0から1の範囲にノーマライズ
raw_color[raw_color < 0] = 0
# max()はnumpy行列の最大値を得る関数。
raw_color = raw_color / raw_color.max()

```

これで Bayer に対応する RGB 画像ができたはずです。表示してみましょう。

```

# RAW画像に色を割り振ったものを表示。
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.imshow(raw_color)
plt.axis('off')
plt.title(u"RAW画像の各画素に色を割り当てたもの")
plt.show()

```

さらに拡大してみます。

```

plt.figure(figsize=(8, 8))
# RAW画像の中から(1310, 2620)から32x32の領域を表示。
plt.imshow(raw_color[1310:1342, 2620:2652])
plt.axis('off')
plt.title(u"RAW画像の各画素に色を割り当てたものを拡大表示")
plt.show()

```

これではなんだかよくわかりません。そういうわけで Bayer をフルカラーの RGB に変換する処理が必用になるわけです。

簡易デモザイク処理

それでは Bayer 配列からフルカラーの画像を作ってみましょう。

この処理はデモザイクと呼ばれることが多いです。本来デモザイクはカメラ画像処理プロセス (ISP) の肝になる部分で、画質のうち解像感や、偽色などの不快なアーティファクトなどを大きく左右します。したがって手を抜くべきところではないのですが、今回は簡易処理なので、考えうる限りでもっとも簡単な処理を採用します。



Figure 9: png

その簡単な処理というのは、3色の情報を持つ最小単位の 2x2 のブロックから、1画素のみをとりだす、というものです。

結果として得られる画像サイズは 1/4 になりますが、もとが 24M もあるので、まだ 6M 残っていますので簡易処理としては十分でしょう。

なお、解像度低下をともなわないデモザイクアルゴリズムは応用編以降でとりあげます。

では、簡易デモザイク処理してみましょう。なお、2x2 ピクセルの中に 2 画素ある緑は平均値をとります。

今回の処理では 2 つの緑画素は同じものとして扱うので、bayer 配列を 0, 1, 2 で表しておきましょう。

```
bayer_pattern = raw.raw_pattern
# Bayer配列を0, 1, 2, 3から0, 1, 2表記に変更
bayer_pattern[bayer_pattern==3] = 1
# 表示して確認
print(bayer_pattern)
```

```
[[0 1]
 [1 2]]
```

では、2x2 画素毎に平均をとって RGB 画像を作ります。

```
# RGB画像を容易。サイズは縦横ともRAWデータの半分。
```

RAW画像の各画素に色を割り当てたものを拡大表示

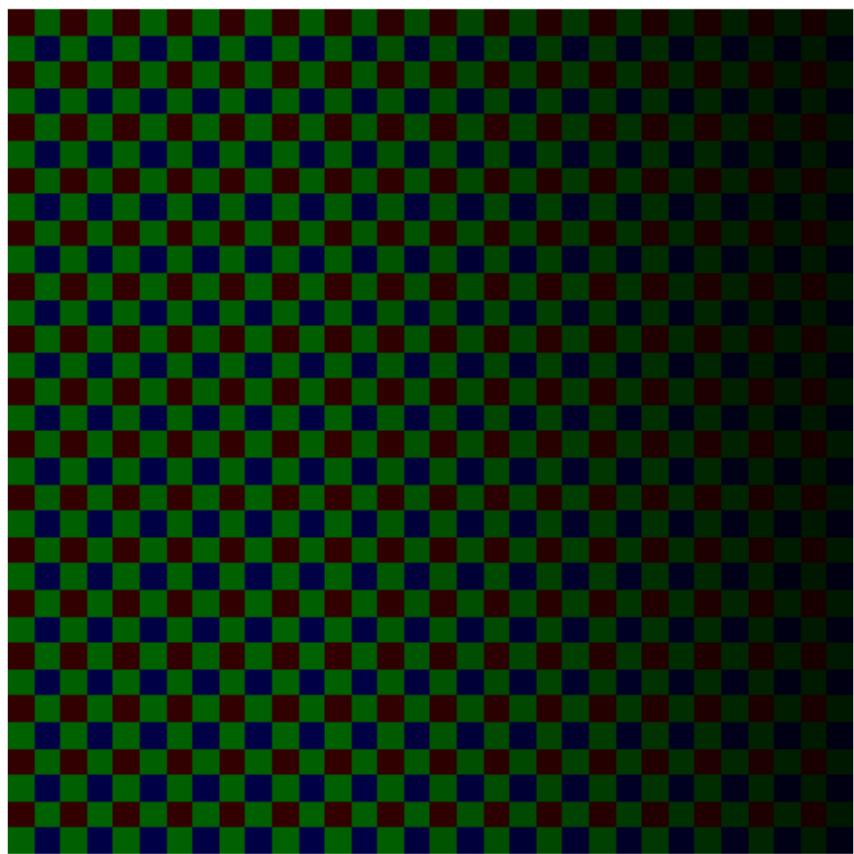


Figure 10: png

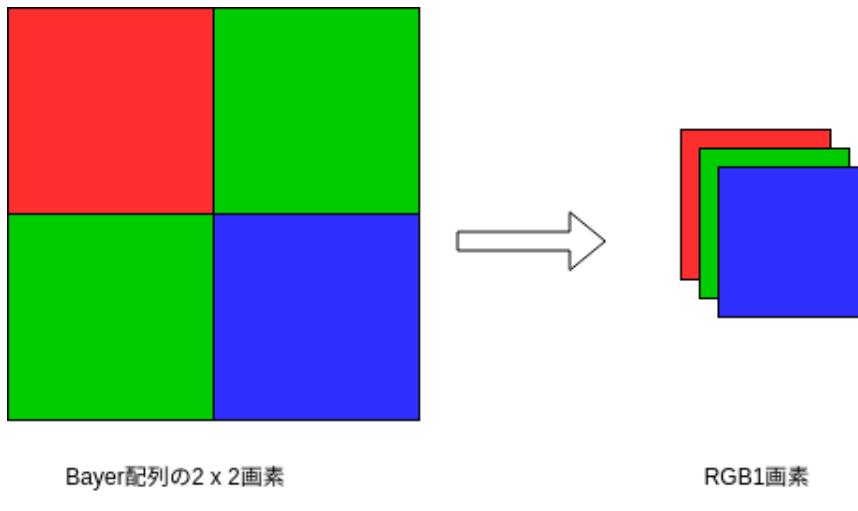


Figure 11: Bayer 配列から RGB 1 画素への簡単な変換

```

dms_img = np.zeros((h//2, w//2, 3))

# 各画素毎に処理.y, xはRAW画像での位置。
for y in range(0, h, 2):
    for x in range(0, w, 2):
        # bayer_pattern[0, 0]は2x2ブロックの左上の画素の色を示す
        dms_img[y // 2, x // 2, bayer_pattern[0, 0]] += raw_array[y
            + 0, x + 0]
        # bayer_pattern[0, 1]は2x2ブロックの右上の画素の色を示す
        dms_img[y // 2, x // 2, bayer_pattern[0, 1]] += raw_array[y
            + 0, x + 1]
        # bayer_pattern[1, 0]は2x2ブロックの左下の画素の色を示す
        dms_img[y // 2, x // 2, bayer_pattern[1, 0]] += raw_array[y
            + 1, x + 0]
        # bayer_pattern[1, 1]は2x2ブロックの右下の画素の色を示す
        dms_img[y // 2, x // 2, bayer_pattern[1, 1]] += raw_array[y
            + 1, x + 1]
        # 緑画素は2つあるので平均を取る
        dms_img[y // 2, x // 2, 1] /= 2
    
```

できあがった画像を見てみましょう。

```

# 画像を0と1の間でノーマライズ
dms_img[dms_img < 0] = 0
dms_img = dms_img / dms_img.max()
# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))

```

```
plt.imshow(dms_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"簡易デモザイク")
plt.show()
```



Figure 12: png

このように RGB のフルカラー画像を作ることができました。

まだ色が正しくない、全体的に暗い、などの問題があります。次の節でこのあたりを修正していきます。

処理の高速化

上記のコードは、画像処理とコードの対応がわかりやすいように各画素ごとの処理をループを使って記述してあります。

これは処理の内容はわかりやすいのですが、numpy の高速性を十分に活用しておらず、かなり遅い処理になっています。このコードを numpy の機能を利用して書き直すところになります。

```
def simple_demosaic(raw_array, bayer_pattern):
    """
    簡易デモザイク処理を行う。
    """
```

```

Parameters
-----
raw_array: numpy array
    入力BayerRAW画像データ
bayer_pattern: int[2, 2]
    ベイヤーパターン。0:赤、1:緑、2:青、3:緑。

Returns
-----
dms_img: numpy array
    出力RGB画像。サイズは入力の縦横共に1/2。
"""

height, width = raw_array.shape
dms_img = np.zeros((height//2, width//2, 3))
bayer_pattern[bayer_pattern == 3] = 1
dms_img[:, :, bayer_pattern[0, 0]] = raw_array[0::2, 0::2]
dms_img[:, :, bayer_pattern[0, 1]] += raw_array[0::2, 1::2]
dms_img[:, :, bayer_pattern[1, 0]] += raw_array[1::2, 0::2]
dms_img[:, :, bayer_pattern[1, 1]] += raw_array[1::2, 1::2]
dms_img[:, :, 1] /= 2
return dms_img

```

処理の内容としては最初のループを使ったコードと同じですが、速度は格段に上がっています。

同じ画像になったか確認してみましょう。

```

dms_img = simple_demosaic(raw_array, raw.raw_pattern)

# 画像を0と1の間でノーマライズ
dms_img[dms_img < 0] = 0
dms_img = dms_img / dms_img.max()
# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.imshow(dms_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"simple_demosaic関数の出力")
plt.show()

```

同様の画像が出力されたようです。

このsimple_demosaic()関数を含んだモジュールがraw_process.pyとしてgithubにアップロードされています。使用する場合は、

```
!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py
としてダウンロードした後、
```



Figure 13: png

```
from raw_process import simple_demosaic  
としてインポートしてください。
```

この節のまとめ

RAW 画像に対して簡易デモザイク処理を行いました。次はホワイトバランス補正を行います。

3.3 ホワイトバランス補正

この節について

この節では、ホワイトバランス補正を行い画像の色を修正します。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

準備

まず 3.1 節で行ったライブラリーのインストールと、モジュールのインポート、画像のダウンロード、及び RAW 画像の読み込みを行います。内容については 3.1 節を参照ください

```
# rawpyとimageioのインストール
!pip install rawpy
!pip install imageio

# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート
import rawpy, imageio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 前節までに作成したモジュールのダウンロード
!if [ ! -f raw_process.py ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/raw_process.py;
fi

# 日本語フォントの設定
!apt -y install fonts-ipafont-gothic
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAPGothic'
# もし日本語が文字化けしている場合`! rm
    /content/.cache/matplotlib/fontList.json`を実行して、
# Runtime->Restart Runtimeで再実行

from raw_process import simple_demosaic

# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f sample.ARW ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/sample.ARW;
fi

#
# 自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file  = "sample.ARW"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w))
```

```
Requirement already satisfied: rawpy in
  /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
  /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
  (1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
  /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:
  Permission denied)
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock
  (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?
```

ホワイトバランス補正とは

ホワイトバランス補正とは、センサーの色ごとの感度や、光のスペクトラムなどの影響を除去して、本来の白を白として再現するための処理です。そのためには各色の画素に、別途計算したゲイン値をかけてあげます。

実際のカメラではホワイトバランスの推定は AWB（オートホワイトバランス）と呼ばれる複雑な処理によって行いますが、今回はカメラが撮影時に計算したゲイン値を RAW ファイルから抽出して使います。

ホワイトバランス補正処理

まずはどんなホワイトバランス値かみてみましょう。RAW ファイルの中に記録されたゲインを見てみましょう。

rawpy のアトリビュート camera_whitebalance を使います

```
wb = raw.camera_whitebalance
print(wb)
```

```
[2288.0, 1024.0, 1544.0, 1024.0]
```

これは、赤、緑（赤と同じ行）、青、緑（青と同じ行）のゲインがそれぞれ、2288、1024、1544、1024 に比例することをあらわしています。

通常もっとも感度の良い緑に対するゲインを 1.0 倍として処理するのが普通なので、今回もこのゲインを 1024 で正規化します。

結局、赤、青に対して、 $2288/1024$ 倍、 $1544/1024$ 倍のゲインを与えればよい事がわかります。

処理してみましょう。

```
# 緑画素のゲインでノーマライズします。
norm = wb[1]
```

```

# 元のRAWデータをコピーします。
wb_img = raw_array.copy()
# RAWデータのベイヤーパターン。
bayer_pattern = raw.raw_pattern
for y in range(0, h):
    for x in range(0, w):
        # cは画素に対応する色チャンネル
        c = bayer_pattern[y % 2, x % 2]
        # 画素の色に対応するゲイン
        gain = wb[c] / norm
        # 各画素にゲインをかけ合わせる
        wb_img[y, x] *= gain

```

これでホワイトバランスがそろったかみてみましょう。3.2 で使用した簡易デモザイクを使って表示します。

```

# 簡易デモザイク。
# 詳細は3.2節を参照
dms_img = np.zeros((h//2, w//2, 3))
bayer_pattern[bayer_pattern==3] = 1
dms_img[:, :, bayer_pattern[0, 0]] = wb_img[0::2, 0::2]
dms_img[:, :, bayer_pattern[0, 1]] += wb_img[0::2, 1::2]
dms_img[:, :, bayer_pattern[1, 0]] += wb_img[1::2, 0::2]
dms_img[:, :, bayer_pattern[1, 1]] += wb_img[1::2, 1::2]
dms_img[:, :, 1] /= 2

# 画像を0と1の間でノーマライズ
dms_img[dms_img < 0] = 0
dms_img = dms_img / dms_img.max()
# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.imshow(dms_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"ホワイトバランス後の画像")
plt.show()

```

これでだいぶ色がよくなりました。

まだ赤みが強い画像になっています。ブラックレベルの補正がされていないためだと思われます。ブラックレベル補正是次の節で扱います。

処理の高速化

先程扱ったホワイトバランスの処理は、コードの読みやすさを優先したものなので低速です。

ホワイトバランス後の画像



Figure 14: png

numpy の機能を利用して高速化した関数は次のようにになります。

```
def white_balance(raw_array, wb_gain, raw_colors):
    """
    ホワイトバランス補正処理を行う。

    Parameters
    -----
    raw_array: numpy array
        入力BayerRAW画像データ。
    wb_gain: float[4]
        ホワイトバランスゲイン。
    raw_colors: int[h, w]
        RAW画像のカラーチャンネルマトリクス。

    Returns
    -----
    wb_img: numpy array
        出力RAW画像。
    """
    norm = wb_gain[1]
    gain_matrix = np.zeros(raw_array.shape)
    for color in (0, 1, 2, 3):
```

```
    gain_matrix[raw_colors == color] = wb_gain[color] / norm
wb_img = raw_array * gain_matrix
return wb_img
```

この関数を使ってホワイトバランス処理を行うにはこのように書きます。

```
wb_img = white_balance(raw_array, raw.camera_whitebalance,
                      raw.raw_colors)
```

簡易デモザイク処理を行って確認しましょう。

```
# 簡易デモザイク。
dms_img = simple_demosaic(wb_img, raw.raw_pattern)

# 画像を0と1の間でノーマライズ
dms_img[dms_img < 0] = 0
dms_img = dms_img / dms_img.max()
# 表示
plt.imshow(dms_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"white_balance関数を使った出力")
plt.show()
```

white_balance関数を使った出力

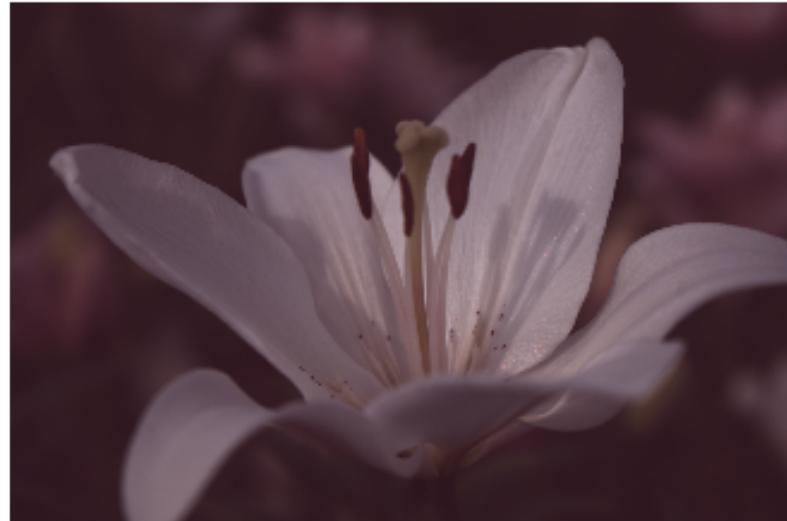


Figure 15: png

同様の画像が出力されたようです。

このwhite_balance()関数はraw_process.pyモジュールの一部としてgithubからダウンロードできます。使用する場合は、

```
!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py
```

としてダウンロードした後、

```
from raw_process import white_balance
```

としてインポートしてください。

この節のまとめ

この節ではホワイトバランスの調整を行いました。次はブラックレベル補正を行い、色再現を向上します。

3.4 ブラックレベル補正

この節について

この節では、ブラックレベル補正を行い画像の明るさと色を修正します。

この節の内容はColabノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

```
https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch
```

準備

まず3.1節で行ったライブラリーのインストールと、モジュールのインポート、画像のダウンロード、及びRAW画像の読み込みを行います。内容については各節を参照ください。

```
# rawpyとimageioのインストール
!pip install rawpy;
!pip install imageio;

# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート
import rawpy, imageio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 前節までに作成したモジュールのダウンロード
!if [ ! -f raw_process.py ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/raw_process.py;
fi
```

```

from raw_process import simple_demosaic, white_balance

# 日本語フォントの設定
!apt -y install fonts-ipafont-gothic
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAPGothic'
# もし日本語が文字化けしている場合`! rm
    /content/.cache/matplotlib/fontList.json`を実行して、
# Runtime->Restart Runtimeで再実行

# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f sample.ARW ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/sample.ARW;
fi

#
# 自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file  = "sample.ARW"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w));

Requirement already satisfied: rawpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
(1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:
    Permission denied)
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?

```

ブラックレベル補正とは

RAW データの黒に対応する値は通常 0 より大きくなっています。

これは、センサーの読み出しノイズがマイナスの値を取ることがあるために、画像の値

を0以上にしてしまうと、ノイズのクリッピングがおきて非常に暗い領域で色ズレが起きてしまうためです。

したがって、正しい画像処理を行うにはブラックレベルを調整して置かなくてはなりません。これをやって置かないと黒が十分黒くない、カスミがかかったような眠い画像になってしまいますし、色もずれてしまいます。

ブラックレベル補正処理

まずはどんなブラックレベル値かみてみましょう。

まず、rawpy のアトリビュートを使ってブラックレベルを確認しましょう。

```
blc = raw.black_level_per_channel  
print(blc)
```

```
[512, 512, 512, 512]
```

これは全チャンネルでブラックレベルは512であるという事をしめしています。

今回は全チャンネルで同じ値でしたが、他のRAWファイルでもこのようになっているとは限りません。各画素ごとのチャンネルに対応した値を引くようにしておきましょう。

```
# ベイダー配列パターンを変数に保存  
bayer_pattern = raw.raw_pattern  
  
# RAWデータを符号付き整数としてコピー。  
blc_raw = raw_array.astype('int')  
# 各画素毎に対応するブラックレベルを参照して引いていく。  
for y in range(0, h, 2):  
    for x in range(0, w, 2):  
        blc_raw[y + 0, x + 0] -= blc[bayer_pattern[0, 0]]  
        blc_raw[y + 0, x + 1] -= blc[bayer_pattern[0, 1]]  
        blc_raw[y + 1, x + 0] -= blc[bayer_pattern[1, 0]]  
        blc_raw[y + 1, x + 1] -= blc[bayer_pattern[1, 1]]
```

処理が正常に行われたか、最大値と最小値を比較しておきましょう。

```
print("ブラックレベル補正前: 最小値=", raw_array.min(), ", 最大値=",  
      raw_array.max())  
print("ブラックレベル補正前: 最小値=", blc_raw.min(), ", 最大値=",  
      blc_raw.max())
```

```
ブラックレベル補正前: 最小値= 0 , 最大値= 8180  
ブラックレベル補正前: 最小値= -512 , 最大値= 7668
```

どうやら正常に処理が行われたようです。

ブラックレベル後の画像の確認

ホワイトバランスと簡易デモザイク処理を行って、ブラックレベルが正常に補正されたか確認しましょう。

```
# 最初に定義したwhite_balance()関数を使って、ホワイトバランス調整。
wb_img = white_balance(blc_raw, raw.camera_whitebalance,
                       raw.raw_colors)
# simple_demosaic()関数を使って、簡易デモザイク処理。
dms_img = simple_demosaic(wb_img, raw.raw_pattern)
```

では、処理の結果を見てみましょう。

```
# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))
#
    imshowでは画像は0から1.0の値をとる必用があるので、ノーマライズする。
dms_img[dms_img<0] = 0
dms_img /= dms_img.max()
plt.imshow(dms_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"ブラックレベル補正後の画像")
plt.show()
```

ブラックレベル補正後の画像

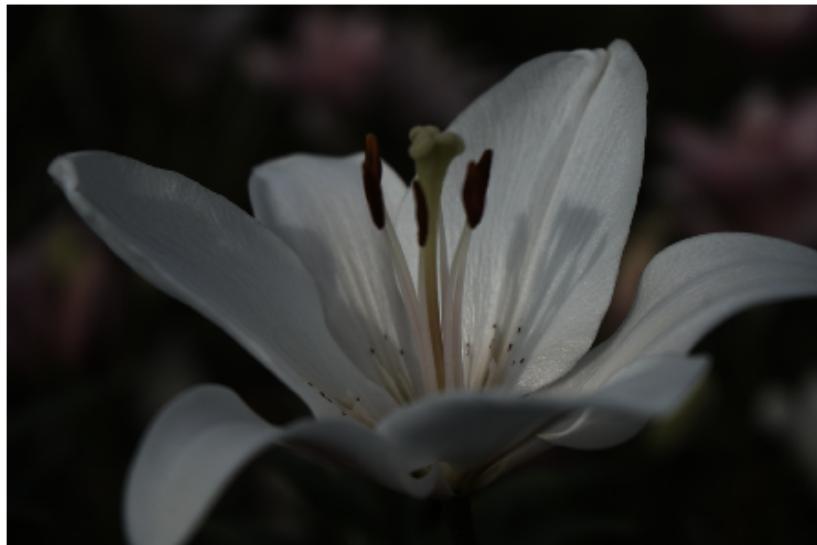


Figure 16: png

だいぶきれいになりました。前回問題だった赤みがかった色も集成されています。

ただし、だいぶ暗い画像になっています。これはガンマ補正がされていないためです。
次の節ではガンマ補正をかけてみましょう。

処理の高速化

今回のブラックレベル補正処理もコードの読みやすさを優先して、非常に遅いものになっています。

numpy の機能を利用して高速化すると次のようになります。

```
def black_level_correction(raw_array, blc, bayer_pattern):
    """
    ブラックレベル補正処理を行う。

    Parameters
    -----
    raw_array: numpy array
        入力BayerRAW画像データ。
    blc: float[4]
        各カラーチャンネルごとのブラックレベル。
    bayer_pattern: int[2, 2]
        ベイヤーパターン。0:赤、1:緑、2:青、3:緑。

    Returns
    -----
    blc_raw: numpy array
        出力RAW画像。
    """
    # 符号付き整数として入力画像をコピー
    blc_raw = raw_array.astype('int')
    # 各カラーチャンネル毎にブラックレベルを引く。
    blc_raw[0::2, 0::2] -= blc[bayer_pattern[0, 0]]
    blc_raw[0::2, 1::2] -= blc[bayer_pattern[0, 1]]
    blc_raw[1::2, 0::2] -= blc[bayer_pattern[1, 0]]
    blc_raw[1::2, 1::2] -= blc[bayer_pattern[1, 1]]
    return blc_raw
```

簡易デモザイク処理を行って確認しましょう。

```
# 上記のblack_level_correction関数を使用してブラックレベル補正。
blc_raw = black_level_correction(raw_array, blc, raw.raw_pattern)
# 最初に定義したwhite_balance()関数を使って、ホワイトバランス調整。
wb_img = white_balance(blc_raw, raw.camera_whitebalance,
                       raw.raw_colors)
# simple_demosaic()関数を使って、簡易デモザイク処理。
```

```

dms_img = simple_demosaic(wb_img, raw.raw_pattern)

# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))
#
    imshowでは画像は0から1.0の値をとる必用があるので、ノーマライズする。
dms_img[dms_img<0] = 0
dms_img /= dms_img.max()
plt.imshow(dms_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"black_level_correction関数を使った出力")
plt.show()

```



Figure 17: png

同様の画像が出力されたようです。

このblack_level_correction()関数はraw_process.pyモジュールの一部としてgithubにアップロードされています。使用する場合は、

```

!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py
としてダウンロードした後、

from raw_process import black_level_correction
としてインポートしてください。

```

まとめ

この節ではブラックレベル補正を行いました。次はガンマ補正を行い、明るさとトーンを補正します。

3.5 ガンマ補正

この節について

この節では、ガンマ補正を行い画像の明るさとトーンを修正します。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch3.ipynb

準備

まずこれまで行ったライブラリーのインストールと、モジュールのインポート、画像のダウンロード、及び RAW 画像の読み込みを行います。内容については各節を参照ください。

```
# rawpyとimageioのインストール
!pip install rawpy;
!pip install imageio;

# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート
import rawpy, imageio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 前節までに作成したモジュールのダウンロード
!if [ ! -f raw_process.py ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/raw_process.py;
fi

from raw_process import simple_demosaic, white_balance,
black_level_correction

# 日本語フォントの設定
!apt -y install fonts-ipafont-gothic
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAGothic'
# もし日本語が文字化けしている場合`! rm
    /content/.cache/matplotlib/fontList.json`を実行して、
```

```

# Runtime->Restart Runtimeで再実行

# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f sample.ARW ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/sample.ARW;
fi

#
# 自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file = "sample.ARW"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w));

Requirement already satisfied: rawpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
(1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:
    Permission denied)
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?

```

ガンマ補正とは

ガンマ補正というのは、もともとテレビがブラウン管だった頃にテレビの出力特性と信号の強度を調整するために使われていたものです。

今でも残っているのは、ガンマ補正による特性が結果的に人間の目の非線形的な感度と相性が良かったからのようです。そんなわけで現在でもディスプレイの輝度は信号に対してブラウン管と似たような信号特性を持って作られており、画像にはガンマ補正をかけておかないと出力は暗い画像になってしまいます。

ガンマ特性自体は次の式で表されます

$$y = x^{2.2}$$

グラフで書くと次のようになります。

```
xs = np.arange(0.0, 1.0, 0.01)
ys = np.power(xs, 2.2)
plt.plot(xs, ys)
plt.title(u"ガンマカーブ")
plt.show()
```

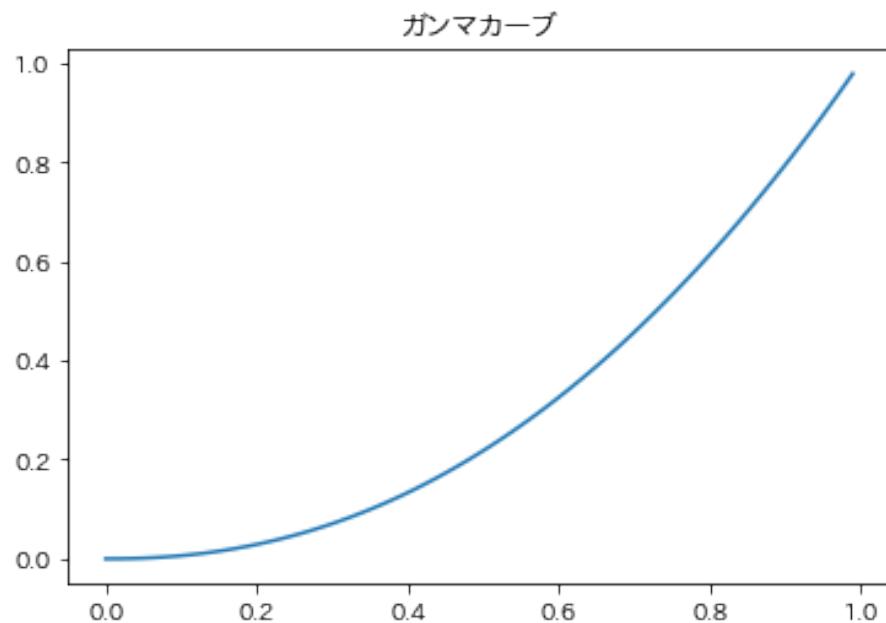


Figure 18: png

モニターなどの出力の強さは入力に対してこのような特性になるので、入力の方をこれに合わせて調整しておく必用があります。これがガンマ補正です。

ガンマ補正是これを打ち消す必要があるので、このような式になります。

$$y = x^{\frac{1}{2.2}}$$

グラフはこうなります。

```
xs = np.arange(0.0, 1.0, 0.01)
ys = np.power(xs, 1/2.2)
plt.plot(xs, ys)
plt.title(u"ガンマ補正カーブ")
plt.show()
```

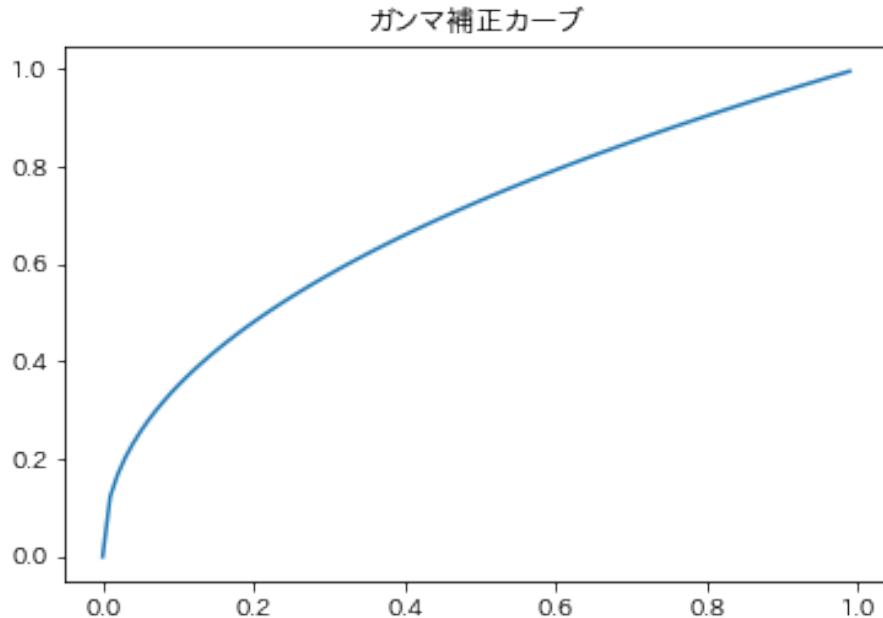


Figure 19: png

ガンマ補正処理

それではガンマ補正をかけてみましょう。

ガンマをかけるのはデモザイクまで行った RGB 画像が対象ですので、まずブラックレベル補正、ホワイトバランス補正、簡易でモザイク処理をかけます。

```

# raw_processからインポートしたblack_level_correction()関数を使用してブラックレベル補正。
blc_raw = black_level_correction(raw_array,
    raw.black_level_per_channel, raw.raw_pattern)
#
# raw_processからインポートしたwhite_balance()関数を使って、ホワイトバランス調整。
wb_img = white_balance(blc_raw, raw.camera_whitebalance,
    raw.raw_colors)
#
# raw_processからインポートしたsimple_demosaic()関数を使って、簡易デモザイク処理。
dms_img = simple_demosaic(wb_img, raw.raw_pattern)

```

画像が正常に処理できているか確認しておきましょう。

```
# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))
```

```

#
    imshowでは画像は0から1.0の値をとる必用があるので、ノーマライズする。
img = dms_img.copy()
img[img<0] = 0
img /= img.max()
img[img>1] = 1
plt.imshow(img)
plt.axis('off')
plt.title(u"ガンマ補正前")
plt.show()

```



Figure 20: png

デモザイクまでの処理は正常に行われたようなので実際にガンマ補正をかけてみましょう。

```

# デモザイク後の画像をfloatタイプとしてコピー。
gamma_img = dms_img.astype(float)
# ガンマ関数は0-1の範囲で定義されているので、その範囲に正規化する。
gamma_img[gamma_img < 0] = 0
gamma_img /= gamma_img.max()
# numpyのpower関数を使って、ガンマ関数を適用。
gamma_img = np.power(gamma_img, 1/2.2)

```

処理の結果を見てみましょう。

```
# 表示
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.imshow(gamma_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"ガンマ補正後")
plt.show()
```



Figure 21: png

ガンマ補正により明るさが適正になりました。

処理のモジュール化

今回のガンマ補正もモジュールの一部としておきましょう。

```
def gamma_correction(input_img, gamma):
    """
    ガンマ補正処理を行う。

    Parameters
    -----
    input_img: numpy array [h, w, 3]
        入力RGB画像データ。
    gamma: float
```

ガンマ補正值。通常は2.2。

```
Returns
-----
gamma_img: numpy array [h, 2, 3]
    出力RGB画像。
"""
# デモザイク後の画像をfloatタイプとしてコピー。
gamma_img = input_img.astype(float)
#
    ガンマ関数は0-1の範囲で定義されているので、その範囲に正規化する。
gamma_img[gamma_img < 0] = 0
gamma_img = gamma_img/gamma_img.max()
# numpyのpower関数を使って、ガンマ関数を適用。
gamma_img = np.power(gamma_img, 1/gamma)
return gamma_img
```

この`gamma_correction()`関数は`raw_process.py`モジュールの一部としてgithubにアップロードされています。使用する場合は、

```
!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py
としてダウンロードした後、
from raw_process import gamma_correction
としてインポートしてください。
```

まとめ

この節ではガンマ補正を行いました。これで基本的な処理はすべておわりです。次の章ではその他の重要な処理を扱います。

4. 重要な処理

4.1 この章について

はじめに

この章ではカメラ画像処理の中でも重要な処理を紹介します。

この章の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

この章で扱う処理について

前章で RAW 画像に最低限の処理を行いフル RGB として表示することができました。処理が単純な割には以外のきれいな画像ができたのではないでしょうか？

しかし、これは多くの部分が元の RAW データが良い状態であったという恵まれた条件によるものです。前章で扱った RAW データは、フルサイズセンサーのカメラで非常に明るい屋外で撮影したもので、歪みもノイズも少なく、最小限の画像処理でもそこそこの画質を再現することができました。

しかし、RAW 現像やカメラ画像処理で扱う画像は常にこのような理想的な状態で撮影されるわけではありません。撮影は室内などの暗いところで扱われることも多いですし、センサーもスマートフォン向けを始め非常に小さい物を使う事が多々あります。そういった画像データにはさまざまな理想的でない特性があり、そういうものは、各種の補正処理を行わないと最終的な画質は低品質になってしまいます。

また、前章で扱ったデモザイクは簡易的なもので出力画像が入力画像の 4 分の 1 の大きさになるという重大な問題があります。これも解決しなくてはなりません。

この章ではそういう通常の RAW 画像を処理する上で重要な処理を紹介します。

とりあげるのは以下の処理です。
- デモザイク - 欠陥画素補正 - カラーマトリクス補正
- レンズシェーディング補正

最初に扱うデモザイクでは、出力サイズが入力サイズと同じになる通常のデモザイク処理を取り上げます。

次の欠陥画素補正では、画像センサーにはつきものの欠陥画素を修正する方法を紹介します。

カラーマトリクス補正は色再現性を向上する処理です。

レンズシェーディング補正是画像の周辺で明るさが低下する周辺減光・レンズシェーディングと呼ばれる現象を補正します。

また、これらの処理の効果を見るために、この章以降では、ラズベリーパイのカメラ (v1.2) で撮影した RAW 画像を使用します。

まとめ

この章で扱う内容について概要を説明しました。次はデモザイク処理です。

4.2 線形補間デモザイク

この節について

この節では、画像サイズを変えないデモザイク処理を解説します。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

準備

まず 3 章で行ったライブラリーのインストールと、モジュールのインポートを行います。内容については各節を参照ください。

```
# rawpyとimageioのインストール
!pip install rawpy;
!pip install imageio;

# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート
import rawpy, imageio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 前節までに作成したモジュールのダウンロード
!if [ ! -f raw_process.py ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/camera_raw_process.py;
fi

# 日本語フォントの設定
!apt -y install fonts-ipafont-gothic
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAPGothic'
# もし日本語が文字化けしている場合`! rm
    /content/.cache/matplotlib/fontList.json`を実行して、
# Runtime->Restart Runtimeで再実行

from raw_process import simple_demosaic, white_balance,
    black_level_correction, gamma_correction
```

```
Requirement already satisfied: rawpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
    (1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:
    Permission denied)
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?
```

次に画像のダウンロードと読み込みを行います。

今回はラズベリーパイで撮影したこの画像を使用します。

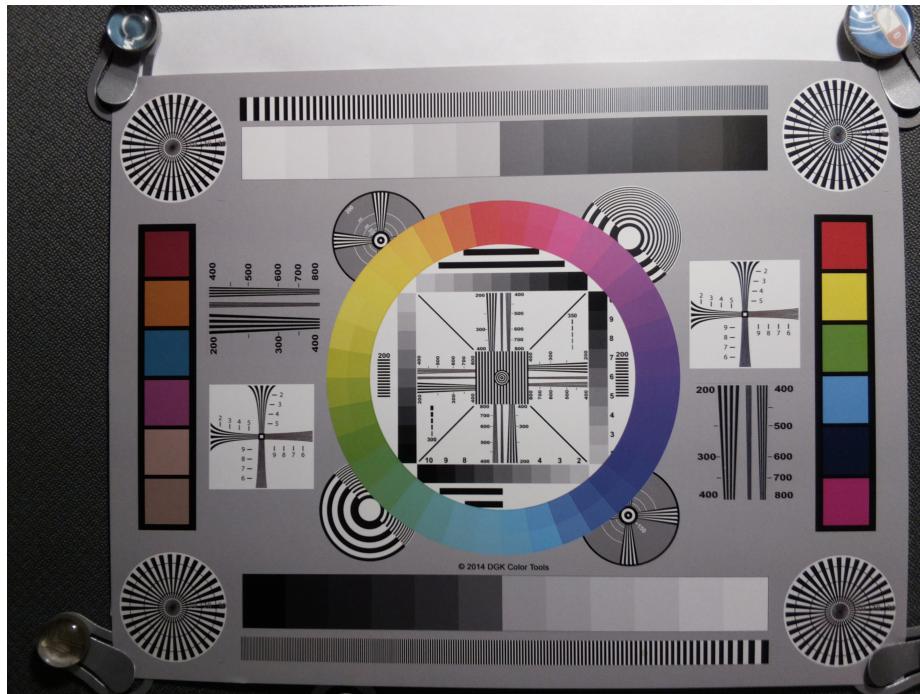


Figure 22: チャート画像

```
# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f chart.jpg ]; then wget
  https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/chart.jpg;
fi

#
# 自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file  = "chart.jpg"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w));
```

ラズベリーパイによる RAW 画像の撮影方法については付録を参照ください。

簡易デモザイク処理の問題点

前節では、デモザイク処理（Bayer 配列の画像からフルカラーの画像を作り出す処理）として、簡易的な画像サイズが 1/4 になるものを使いました。単純な処理の割に意外なほどきれいな出力が得られるのですが、いかんせん画像が小さくなるのは問題です。また、出力画像が 1/4 になるので、細かい部分は潰れてしまいます。

この点を確認するために、先程の画像を raw_process モジュールを使って RGB 画像に変換してみましょう。

```
# raw_process からインポートした black_level_correction 関数を使用して ブラックレベル補正。
blc_raw = black_level_correction(raw_array,
    raw.black_level_per_channel, raw.raw_pattern)
#
# raw_process からインポートした white_balance() 関数を使って、ホワイトバランス調整。
wb_raw = white_balance(blc_raw, raw.camera_whitebalance,
    raw.raw_colors)
#
# raw_process からインポートした simple_demosaic() 関数を使って、簡易デモザイク処理。
dms_img = simple_demosaic(wb_raw, raw.raw_pattern)
#
# raw_process からインポートした gamma_correction() 関数を使って、ガンマ補正。
gmm_img = gamma_correction(dms_img, 2.2)
```

表示してみます。

```
# サイズ設定
plt.figure(figsize=(16, 8))
plt.imshow(gmm_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"簡易デモザイクを使ったRAW現像結果")
plt.show()
```

この画像のサイズと RAW データのサイズを見てみましょう。

```
print("現像後のサイズ = ", gmm_img.shape)
print("RAWデータのサイズ = ", raw_array.shape)
```

```
現像後のサイズ = (1232, 1640, 3)
RAWデータのサイズ = (2464, 3280)
```

この画像の大きさは縦 1232 ライン、横 1640 画素であることがわかります。それに対して元の RAW 画像のサイズは縦 2464 ライン、横 3280 画素です。ちょうど 2 分の 1 ずつになっています。

簡易デモザイクを使ったRAW現像結果

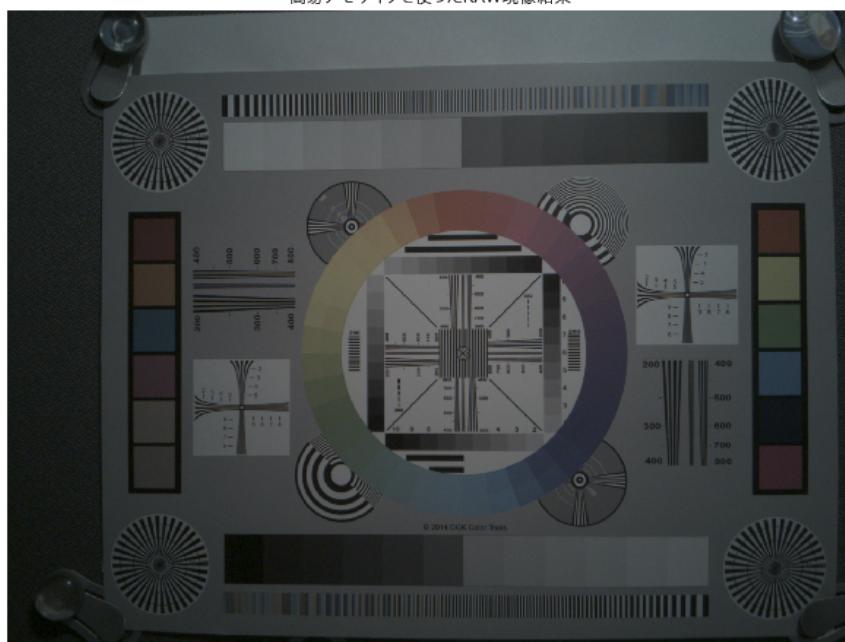


Figure 23: png

最初に表示した JPEG 画像と大きさを合わせて並べてみましょう。まずは JPEG 画像を numpy の array として読み込みます。

```
# matplotlibのモジュールimageを使ってJPEG画像を読み込みます。
from matplotlib import image
jpg_img = image.imread("chart.jpg")
# 0-1の範囲で正規化します
jpg_img = jpg_img / jpg_img.max()
# 画像サイズを取得します
h2, w2, c = jpg_img.shape
```

次に、この JPEG から作ったデータと、先程簡易 RAW 現像したデータを同じ numpy array に代入してみます。

```
# JPEG画像の横幅の倍の幅を持つnumpy arrayを作成
two_img = np.zeros((h2, w2 * 2, c))
# numpy arrayの右半分にJPEG画像のデータをはめこむ。
two_img[0:, w2:, :] = jpg_img
# 左半分に簡易RAW現像したデータをはめこむ。
two_img[h//4:h//4+h//2, w//4:w//4+w//2, :] = gmm_img
```

ならべてた画像データを表示してみましょう。

```
plt.figure(figsize=(16, 8))
plt.imshow(two_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"簡易RAW現像結果（左）とJPEG画像（右）")
plt.show()
```



Figure 24: png

色合いが違う、明るさが違う、という点は無視しても、サイズの違いは明白です。

次は拡大してみましょう。こんどは表示サイズが同じになるように調整します。

```

# 表示サイズ設定
plt.figure(figsize=(16, 8))

# まずは簡易RAW現像したファイルの表示。
# 縦1列、横2列に表示領域を設定。
# そのうち1つ目に画像表示。
plt.subplot(1, 2, 1)
# 簡易RAW現像した画像の表示したい範囲。
y1, x1 = 740, 835
dy1, dx1 = 100, 100
# 選択した範囲を表示
plt.imshow(gmm_img[y1:y1+dy1, x1:x1+dx1])
plt.axis('off')
plt.title("簡易デモザイク結果")

# 次にJPEG画像の表示。
# 縦1列、横2列のうち2つめに表示。
plt.subplot(1, 2, 2)
# 画像位置を簡易RAW現像のものに合わせる
y2, x2 = y1 * 2, x1 * 2
dy2, dx2 = dy1 * 2, dx1 * 2
plt.imshow(jpg_img[y2:y2+dy2, x2:x2+dx2])
plt.axis('off')
plt.title("JPEG画像")
# 実際に表示。
plt.show()

```

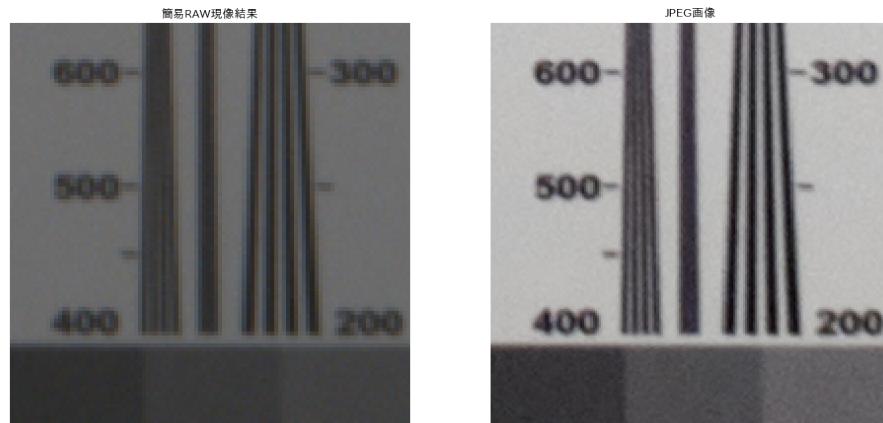


Figure 25: png

明るさやコントラストの違いがまっさきに目につきますが、それは次回以降考えましょう。解像度に注目すると、意外なほど健闘はしているのですが、縦のラインの分解能が

低かったりする点がわかると思います。このあたりは簡易デモザイクによる画像サイズの低下の影響があるといえるでしょう。

現代のカメラ内部のデモザイクはかなり高度な処理をしているはずなので、右側の JPEG 画像並みの解像度を得るのは難しいと思いますが、せめてとの画像サイズを取り戻せるような処理を導入してみましょう。

線形補完法

デモザイクアルゴリズムの中で、縮小する方法の次に簡単なのは、線形補間法です。線形補間というもののものしいですが、ようするに、距離に応じて間の値をとるわけです。たとえば、緑の画素ならこうなります。

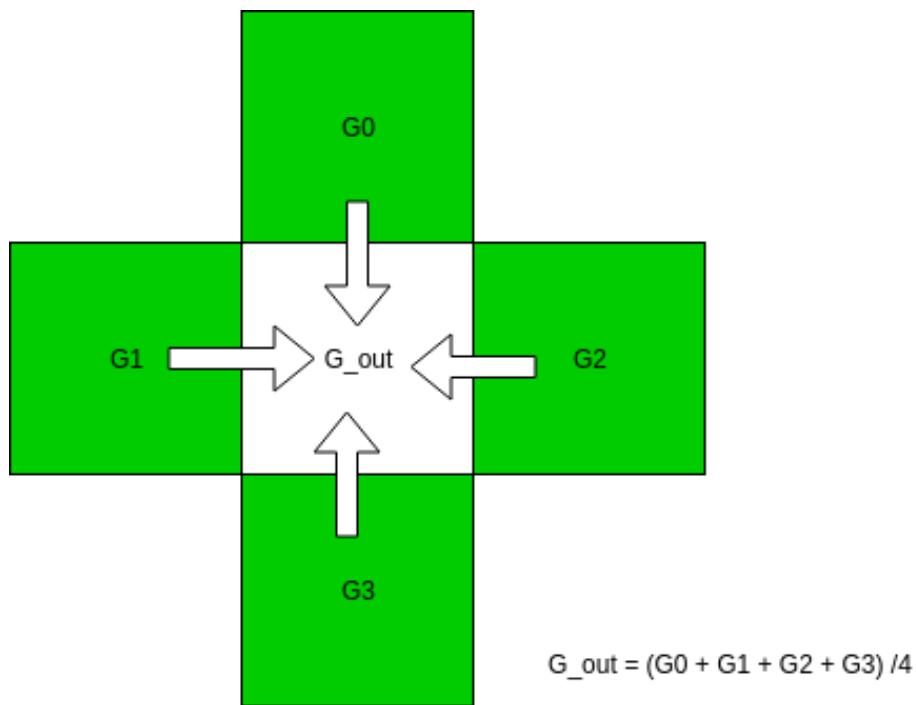


Figure 26: 緑画像の線形補間

赤の画素ではこうです。

青の画素でも、赤の場合と同じような補完を行います。

では実際やってみましょう。

```
# 画像のヘリの部分で折り返すためのヘルパー関数
def mirror(x, min, max):
    if x < min:
```

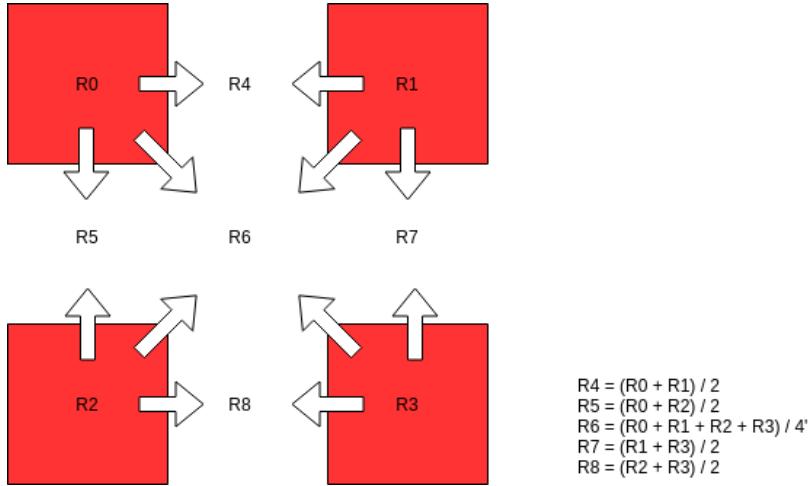


Figure 27: 赤画像の線形補間

```

    return min - x
elif x >= max:
    return 2 * max - x - 2
else:
    return x

dms_img = np.zeros((h, w, 3))
bayer_pattern = raw.raw_pattern
for y in range(0, h):
    for x in range(0, w):
        color = bayer_pattern[y % 2, x % 2]
        y0 = mirror(y-1, 0, h)
        y1 = mirror(y+1, 0, h)
        x0 = mirror(x-1, 0, w)
        x1 = mirror(x+1, 0, w)
        if color == 0:
            dms_img[y, x, 0] = wb_raw[y, x]
            dms_img[y, x, 1] = (wb_raw[y0, x] + wb_raw[y, x0] +
                wb_raw[y, x1] + wb_raw[y1, x])/4
            dms_img[y, x, 2] = (wb_raw[y0, x0] + wb_raw[y0, x1] +
                wb_raw[y1, x0] + wb_raw[y1, x1])/4
        elif color == 1:
            dms_img[y, x, 0] = (wb_raw[y, x0] + wb_raw[y, x1]) / 2
            dms_img[y, x, 1] = wb_raw[y, x]
            dms_img[y, x, 2] = (wb_raw[y0, x] + wb_raw[y1, x]) / 2
        elif color == 2:
            dms_img[y, x, 0] = (wb_raw[y0, x0] + wb_raw[y0, x1] +
                wb_raw[y1, x0] + wb_raw[y1, x1])/4
            dms_img[y, x, 1] = (wb_raw[y0, x0] + wb_raw[y0, x1] +
                wb_raw[y1, x0] + wb_raw[y1, x1])/4
            dms_img[y, x, 2] = (wb_raw[y0, x0] + wb_raw[y0, x1] +
                wb_raw[y1, x0] + wb_raw[y1, x1])/4
    
```

```

        wb_raw[y1, x0] + wb_raw[y1, x1])/4
    dms_img[y, x, 1] = (wb_raw[y0, x] + wb_raw[y, x0] +
        wb_raw[y, x1] + wb_raw[y1, x])/4
    dms_img[y, x, 2] = wb_raw[y, x]
else:
    dms_img[y, x, 0] = (wb_raw[y0, x] + wb_raw[y1, x]) / 2
    dms_img[y, x, 1] = wb_raw[y, x]
    dms_img[y, x, 2] = (wb_raw[y, x0] + wb_raw[y, x1]) / 2

```

画像のサイズを確認します。

```
print(dms_img.shape)
```

```
(2464, 3280, 3)
```

元の RAW 画像の同じサイズになっているようです。

画像を確認してみましょう。まずは残っているガンマ補正処理を行います。

```
gmm_full_img = gamma_correction(dms_img, 2.2)
```

表示します。

```
# サイズ設定
plt.figure(figsize=(16, 8))
plt.imshow(gmm_full_img)
plt.axis('off')
plt.title("線形補間デモザイク画像")
plt.show()
```

それでは、JPEG 画像と並べて表示してみましょう。

```
# 表示サイズ設定
plt.figure(figsize=(16, 8))

# まずは簡易RAW現像したファイルの描画。
plt.subplot(1, 2, 1)
y1, x1 = 740, 835
dy1, dx1 = 100, 100
plt.imshow(gmm_img[y1:y1+dy1, x1:x1+dx1])
plt.axis('off')
plt.title("簡易デモザイク結果")

# 今回RAW現像した画像の描画。
plt.subplot(1, 2, 2)
y2, x2 = y1 * 2, x1 * 2
dy2, dx2 = dy1 * 2, dx1 * 2
plt.imshow(gmm_full_img[y2:y2+dy2, x2:x2+dx2])
```

線形補間デモザイク画像

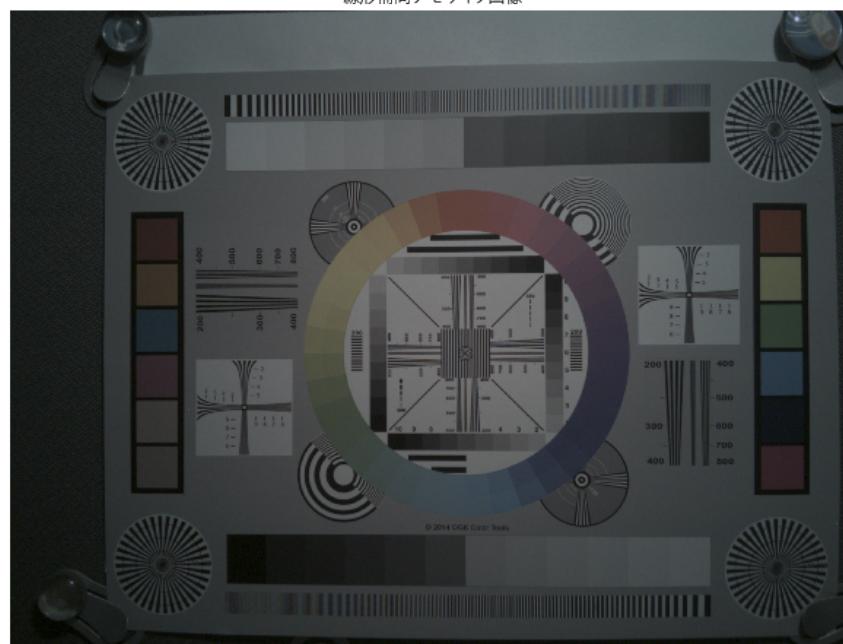


Figure 28: png

```

plt.axis('off')
plt.title(u"線形補間デモザイク画像")

# 実際に表示。
plt.show()

```

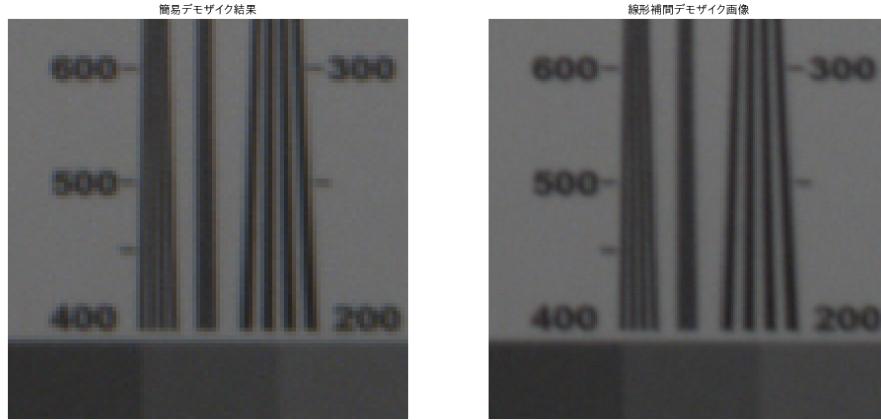


Figure 29: png

右側の線形補間した結果では、縦のラインがより細い部分まで分解されていることがわかります。とりあえずは成功としましょう。

なお、より高性能なデモザイクは6章の応用編でとりあげます。

処理の高速化

今回のデモザイクもコードの読みやすさを優先させてあります。高速化しておきましょう。

高速化に当たっては、数値計算ライブラリ `scipy` の `signal` モジュールを使います。

```

from scipy import signal

def demosaic(raw_array, raw_colors):
    """
    線形補間でデモザイクを行う

    Parameters
    -----
    raw_array: numpy array
        入力BayerRAW画像データ。
    raw_colors: numpy array

```

*RAW*画像のカラーチャンネルマトリクス。
通常*Raupy*の*raw_colors*を用いて与える。

Returns

dms_img: *numpy array*

出力*RAW*画像。

"""

h, w = raw_array.shape

dms_img = np.zeros((h, w, 3))

緑画素の処理

元の*RAW*画像から緑画素だけ抜き出す

green = raw_array.copy()

green[(raw_colors == 0) | (raw_colors == 2)] = 0

緑画素の線形補間フィルター

[[0, 1, 0]]

[1, 4, 1]

[0, 1, 0]] / 4.0

g_flt = np.array([[0, 1, 0], [1, 4, 1], [0, 1, 0]]) / 4.0

フィルターの適用

boundary='symm': 画像のヘリで折り返す。

mode='same': 出力画像サイズは入力画像と同じ。

dms_img[:, :, 1] = signal.convolve2d(green, g_flt,
boundary='symm', mode='same')

元の*RAW*画像から赤画素だけ抜き出す

red = raw_array.copy()

red[raw_colors != 0] = 0

赤画素の線形補間フィルター

[[1, 2, 1]]

[2, 4, 2]

[1, 2, 1]] / 4.0

rb_flt = np.array([[1 / 4, 1 / 2, 1 / 4], [1 / 2, 1, 1 / 2], [1 / 4, 1 / 2, 1 / 4]])

フィルターの適用

dms_img[:, :, 0] = signal.convolve2d(red, rb_flt,
boundary='symm', mode='same')

元の*RAW*画像から青画素だけ抜き出す

blue = raw_array.copy()

blue[raw_colors != 2] = 0

青画素の線形補間フィルターは赤と共に通

フィルターの適用

dms_img[:, :, 2] = signal.convolve2d(blue, rb_flt,
boundary='symm', mode='same')

```
return dms_img
```

ここで使った convolve2d は、線形フィルターを画像などの2次元データに畳み込む処理です。

上記の場合は、入力画素の周辺 3x3 画素を取り出し、その一つ一つの画素とフィルターの値を掛け合わせた上で合計し出力するという処理をしています。

例えばこのコードの場合、緑画素なら、*gin*, *gout* を緑画素の入力、出力とすると

$$g = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$gout_{x,y} = \sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} gin_{x+i, y+j} g_{i,j}$$

という処理を行います。これで入力画素が緑画素の場合、上下左右には緑画素がないので入力画素がそのまま出力されます。そうでない場合は、上下左右の緑がその平均値が出力されます。

この demosaic() 関数は raw_process.py モジュールの一部として github にアップロードされています。使用する場合は、

```
!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py  
としてダウンロードした後、  
from raw_process import demosaic  
としてインポートしてください。
```

まとめ

この節では線形補間によるデモザイク処理を行いました。次は欠陥画素補正を行います。

4.3 欠陥画素補正

この節について

この節では、欠陥画素補正を解説します。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

準備

まずライブラリーのインストールと、モジュールのインポート、画像の読み込みを行います。今回もラズベリーパイで撮影したチャート画像を使用します。内容については各節を参照ください。

```
# rawpyとimageioのインストール
!pip install rawpy;
!pip install imageio;

# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート
import rawpy, imageio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 前節までに作成したモジュールのダウンロード
!if [ ! -f raw_process.py ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/camera_raw_process.py;
fi

from raw_process import simple_demosaic, white_balance,
    black_level_correction, gamma_correction, demosaic

# 日本語フォントの設定
!apt -y install fonts-ipafont-gothic
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAGothic'
# もし日本語が文字化けしている場合`! rm
    /content/.cache/matplotlib/fontList.json`を実行して、
# Runtime->Restart Runtimeで再実行

# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f chart.jpg ]; then wget
    https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/camera_raw_process/master/chart.jpg;
fi

#
# 自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file  = "chart.jpg"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
```

```

raw_array = raw_array.reshape((h, w));

Requirement already satisfied: rawpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
(1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:
    Permission denied)
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?

```

欠陥画素

ライブラリーを使って対象画像を現像して拡大表示すると、こんな部分があります。

```

#
    raw_processからインポートしたblack_level_correction()関数を使用してブラックレベル補正。
blc_raw = black_level_correction(raw_array,
    raw.black_level_per_channel, raw.raw_pattern)
#
    raw_processからインポートしたwhite_balance()関数を使って、ホワイトバランス調整。
wb_raw = white_balance(blc_raw, raw.camera_whitebalance,
    raw.raw_colors)
#
    raw_processからインポートしたsimple_demosaic()関数を使って、簡易デモザイク処理。
dms_img = demosaic(wb_raw, raw.raw_colors)
#
    raw_processからインポートしたgamma_correction()関数を使って、ガンマ補正。
gmm_img = gamma_correction(dms_img, 2.2)

# 画像の一部分を拡大表示。
plt.figure(figsize=(16, 8))
plt.imshow(gmm_img[2110:2160, 1150:1210, :])
plt.axis('off')
plt.title(u"欠陥画素")
plt.show()

```

これはいわゆる欠陥画素です。「欠陥」という名前がついていますが、製品の欠陥ではなく、一部の画素が正常な値を出力しない状態です。多くの場合このように、常に明るく見えますが（ホットピクセル）、常に暗い（デッドピクセルまたはコールドピクセル）こともあります。これらは、本来の信号とずれた値を示すという捕まえにくいケースもあります。

欠陷画素



Figure 30: png

数ミリ角のサイズに数百万から数千万の画素を作り込む現代の画像センサーでは、一部にこのような欠陥画素が含まれていることはごく普通のことです。

なぜこのような欠陥ができるかというのには、さまざまな原因が考えられます。たとえば製造過程でパーティクルが入り 1 特定の画素が反応しなくなったとか逆にショートして常に電流が流れるようになった、というのがまさしく思い描きます。まだ半導体中の結晶欠陥などのせいで基板側に電流が漏れている（または基板から漏れて入ってくる）のかもしれません。さらには宇宙線などが当たって製造後に欠陥が形成されるケースもあると聞きます。

このように、画像センサーに欠陥画素はつきもので、画像処理である程度対応していく必用があります。市販のスマートフォンのカメラはもちろん、一眼レフカメラなどでも欠陥画素補正処理は内部的に行われているはずです。

それでは、実際に簡単な補正処理を行ってみます。

欠陥画素補正には大きく分けて 2 つのステップがあります 2。

- 欠陥画素検出
- 欠陥画素修正

今回は、欠陥画素検出としては、周辺の画素の最大値よりある程度以上大きいか最小値よりある程度以上小さければ欠陥とみなす、という方針で行います。また修正としては、欠陥画素の上下左右 4 画素の平均をとる事にします。

それでは処理してみましょう。ブラックレベル補正後のデータ `blc_raw` から処理をはじめます。

各色毎に欠陥画素の検出と修正を行います。なお、ここでは Gr (Red と同列の Green) と Gb (Blue と同列の Green) を別の色として処理しています。まず、左上の色 (Blue) からです。処理しやすいように Blue のみを抜き出します。

```
dpc_raw = blc_raw.copy()
single_channel = dpc_raw[:, :, 2]
```

周辺の 5x5 画素の最大値と最小値を求めます。

最大値最小値を求めるのに `scipy` の `ndfilter` モジュールから、`maximum_filter` と `minimum_filter` を使います。

```
import scipy

# 5x5 の行列を作る、全成分を 1 にする。
footprint = np.ones((5, 5))
# 中心の値のみを 0 にする。
footprint[2, 2] = 0
#
# 入力画像の各画素周辺 5 x 5 の最大値をもとめて、画像と同じサイズの numpy
# array として保存。
local_max = scipy.ndimage.filters.maximum_filter(single_channel,
    footprint=footprint, mode='mirror')
```

```

# 入力画像の各画素周辺 5 x 5 の最小値をもとめて、画像と同じサイズのnumpy arrayとして保存。
local_min = scipy.ndimage.filters.minimum_filter(single_channel,
    footprint=footprint, mode='mirror')

```

ここで footprint によって、どの画素を最大値・最小値の計算の対象にするか決めることができます。

ここでは、5x5 の行列を作り、中心の成分のみをゼロ、他は 1 として footprint を作成しました。

$$footprint = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

これを使うことで、欠陥画素かどうか判定する対象を最大値最小値の計算から取り除くことができます。

この最大値と最小値を使って、欠陥画素判定を行います。最大値や最小値との差が threshold 値より大きい場合欠陥画素とみなす事にします。

```

threshold = 16
mask = (single_channel < local_min - threshold) + (single_channel >
    local_max + threshold)

```

これで欠陥画素の位置が mask に True として記録されました。(欠陥画素以外は False)

それでは修正しましょう。

まず、欠陥画素の上下左右の画素の平均値を計算しておきます。

```

# 上下左右の平均値を取るフィルター。
flt = np.array([[0, 1, 0], [1, 0, 1], [0, 1, 0]]) / 4
# scipyの機能で上下左右画素の平均値をとり、結果をnumpy arrayとして保存。
average = scipy.signal.convolve2d(single_channel, flt, mode='same')

```

次に欠陥画素をこの平均値で置き換えます。

欠陥画素は mask のうち True になっている部分です。

```
single_channel[mask] = average[mask]
```

これで Blue 面の欠陥画素補正ができました。

他の色の欠陥も補正するためにループ化します。

```

# ブラックレベル補正後の画像をコピー。
dpc_raw = blc_raw.copy()
# footprintとして5x5のマスクを作成
# [[1 1 1 1 1]
#  [1 1 1 1 1]
#  [1 1 0 1 1]
#  [1 1 1 1 1]
#  [1 1 1 1 1]]
footprint = np.ones((5, 5))
footprint[2, 2] = 0

# 各カラーごとの処理。左上(0, 0)、左下(1, 0), 右上(0, 1), 右下(1, 1)
for (yo, xo) in ((0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)):
    # 1カラーチャンネルを取り出す。
    single_channel = dpc_raw[yo::2, xo::2]
    # 上下左右の平均をとるフィルター
    flt = np.array([[0, 1, 0], [1, 0, 1], [0, 1, 0]]) / 4
    # 平均値をとった画像の作成
    average = scipy.signal.convolve2d(single_channel, flt,
        mode='same')
    #
    # 周辺画像の最大値を求める。footprintにより、対象となる画素は含めない。
    local_max = scipy.ndimage.filters.maximum_filter(single_channel,
        footprint=footprint, mode='mirror')
    #
    # 周辺画像の最小値を求める。footprintにより、対象となる画素は含めない。
    local_min = scipy.ndimage.filters.minimum_filter(single_channel,
        footprint=footprint, mode='mirror')
    #
    # 中心画素が最大値よりthreshold分以上大きい、または最小値よりthreshold分以上小さければ欠陥
    threshold = 16
    # 欠陥の位置をTrueとして保存。
    mask = (single_channel < local_min - threshold) +
        (single_channel > local_max + threshold)
    # 欠陥画素を平均値で置換。
    single_channel[mask] = average[mask]
    # single_channelはdpc_rawへの参照なので書き戻す必要がない

```

残りのホワイトバランス、デモザイク、ガンマ処理を行い、出力結果を確認します。

```

wb_raw = white_balance(dpc_raw, raw.camera_whitebalance,
    raw.raw_colors)
#
# raw_processからインポートしたsimple_demosaic()関数を使って、簡易デモザイク処理。
dms_img = demosaic(wb_raw, raw.raw_colors)
#

```

```

raw_processからインポートしたgamma_correction()関数を使って、ガンマ補正。
gmm_img = gamma_correction(dms_img, 2.2)

# 画像の一部分を拡大表示。
plt.figure(figsize=(16, 8))
plt.imshow(gmm_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"欠陥画素補正後")
plt.show()

```

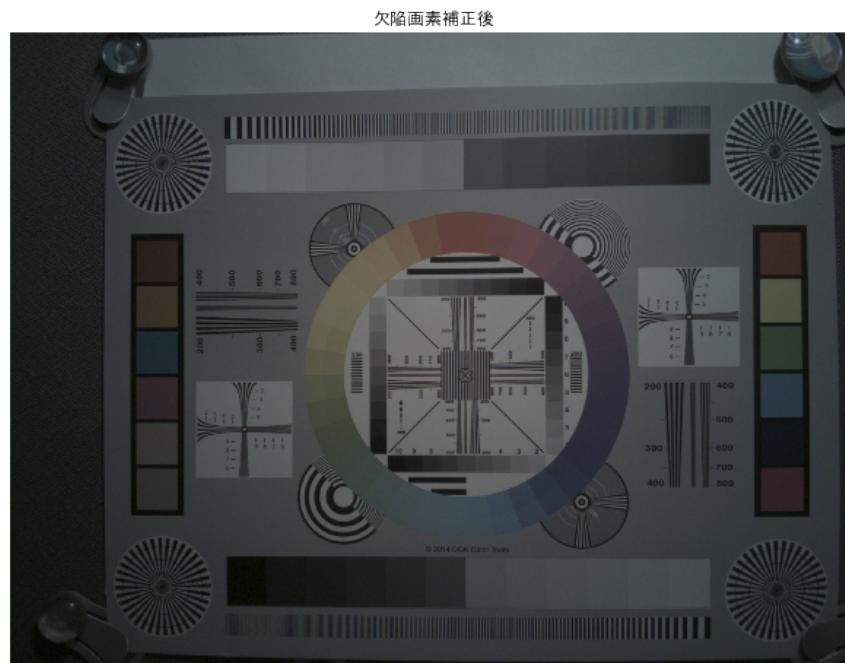


Figure 31: png

欠陥画素が修正されたか、先ほどと同じ部分を拡大して確認しましょう。

```

# 画像の一部分を拡大表示。
plt.figure(figsize=(16, 8))
plt.imshow(gmm_img[2110:2160, 1150:1210, :])
plt.axis('off')
plt.title(u"補正された欠陥画像")
plt.show()

```

どうやら修正されたようです。

補正された欠陥画像

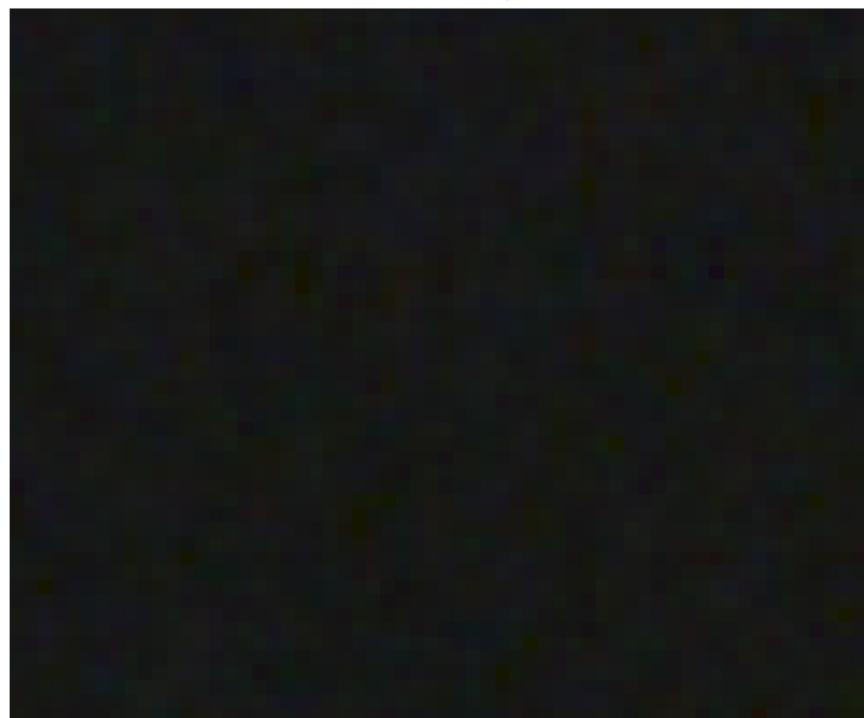


Figure 32: png

モジュールへの追加

この処理も関数としてモジュールへ追加しておきましょう。

```
def defect_correction(raw_array, threshold):
    """
    線形補間でデモザイクを行う

    Parameters
    -----
    raw_array: numpy array
        入力BayerRAW画像データ。
    threshold: int
        欠陥画素判定の閾値。
        10bitRAW入力に対して典型的には16程度。

    Returns
    -----
    dpc_raw: numpy array
        出力RAW画像。
    """
    dpc_raw = raw_array.copy()
    # footprintとして5x5のマスクを作成
    # [[1 1 1 1 1]
    #  [1 1 1 1 1]
    #  [1 1 0 1 1]
    #  [1 1 1 1 1]
    #  [1 1 1 1 1]]
    footprint = np.ones((5, 5))
    footprint[2, 2] = 0
    # 各カラーごとの処理。左上(0, 0)、左下(1, 0)、右上(0, 1)、
    # 右下(1, 1)
    for (yo, xo) in ((0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)):
        single_channel = dpc_raw[yo::2, xo::2]
        # 上下左右の平均をとるフィルター
        flt = np.array([[0, 1, 0], [1, 0, 1], [0, 1, 0]]) / 4
        # 上下左右の平均値をとった画像の作成
        average = scipy.signal.convolve2d(single_channel, flt,
                                           mode='same')
        #
        # 周辺画像の最大値を求める。footprintにより、対象となる画素は含めない。
        local_max =
            scipy.ndimage.filters.maximum_filter(single_channel,
                                                 footprint=footprint, mode='mirror')
        #
        # 周辺画像の最小値を求める。footprintにより、対象となる画素は含めない。
```

```

local_min =
    scipy.ndimage.filters.minimum_filter(single_channel,
                                          footprint=footprint, mode='mirror')
#
# 中心画素が最大値よりthreshold分以上大きい、または最小値よりthreshold分以上小さければ
# 欠陥の位置をTrueとして保存。
mask = (single_channel < local_min - threshold) +
       (single_channel > local_max + threshold)
# 欠陥画素を平均値で置換。
single_channel[mask] = average[mask]
# single_channelはdpc_rawへの参照なので書き戻す必用がない
return dpc_raw

```

このdefect_correction()関数はraw_process.pyモジュールの一部としてgithubにアップロードされています。使用する場合は、

```

!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py
としてダウンロードした後、
from raw_process import defect_correction
としてインポートしてください。
```

まとめ

この節では欠陥画素補正を行いました。次はカラーマトリクス補正を行います。

4.4 カラーマトリクス補正

この節について

この節では、カラーマトリクス補正を解説します。

この節の内容は Colab ノートブックとして公開しています。ノートブックを見るには目次ページから参照するか、以下のリンクを使ってアクセスしてください。

https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/master/camera_raw_ch

準備

まずライブラリーのインストールと、モジュールのインポート、画像の読み込みを行います。今回もラズベリーパイで撮影したチャート画像を使用します。内容については各節を参照ください。

```

# rawpyとimageioのインストール
!pip install rawpy;
!pip install imageio;

# rawpy, imageio, numpy, pyplot, imshowのインポート
import rawpy, imageio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.pyplot import imshow

# 前節までに作成したモジュールのダウンロードとインポート
!if [ ! -f raw_process.py ]; then wget raw_process.py; fi
from raw_process import simple_demosaic, white_balance,
    black_level_correction, gamma_correction, demosaic,
    defect_correction

# 日本語フォントの設定
!apt -y install fonts-ipafont-gothic
plt.rcParams['font.family'] = 'IPAPGothic'
# もし日本語が文字化けしている場合`! rm
    /content/.cache/matplotlib/fontList.json`を実行して、
# Runtime->Restart Runtimeで再実行

# 画像をダウンロードします。
!if [ ! -f chart.jpg ]; then wget chart.jpg; fi

#
    自分で撮影した画像を使用する場合は以下のコメントを取り除きアップロードします。
# from google.colab import files
# uploaded = files.upload()

# RAWファイルの名前。
# アップロードしたファイルを使う場合はその名前に変更。
raw_file = "chart.jpg"
raw = rawpy.imread(raw_file)
raw_array = raw.raw_image
h, w = raw.sizes.raw_height, raw.sizes.raw_width
raw_array = raw_array.reshape((h, w));

Requirement already satisfied: rawpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (0.13.0)
Requirement already satisfied: numpy in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (from rawpy)
    (1.15.1)
Requirement already satisfied: imageio in
    /home/moiz/anaconda3/lib/python3.7/site-packages (2.4.1)

```

```
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:  
      Permission denied)  
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock  
      (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?
```

カラーマトリクスとは

前節までに RAW 現像した画像と、JPEG 画像を並べて比較してみましょう。こちらが JPEG 画像を JPEG としてそのまま表示したものです。

```
# JPEG画像をnumpyのarrayとして取得  
#  
[4.2節参照](https://colab.research.google.com/github/moizumi99/camera_raw_processing/blob/main/notebooks/04%20-%20Color%20Matrix.ipynb)  
from matplotlib import image  
import matplotlib  
jpg_img = image.imread("chart.jpg")  
jpg_img = jpg_img / jpg_img.max()  
  
# JPEG画像表示  
plt.figure(figsize=(16, 8))  
imshow(jpg_img)  
plt.axis('off')  
plt.title(u"JPEG画像")  
plt.show()
```

それに対してこちらが、前回までに現像したものです。

```
# ブラックレベル補正。  
blc_raw = black_level_correction(raw_array,  
    raw.black_level_per_channel, raw.raw_pattern)  
# 前節で作成したdefect_correction関数を使って、欠陥画素補正。  
dpc_raw = defect_correction(blc_raw, 16)  
# 残りの現像処理  
wb_raw = white_balance(dpc_raw, raw.camera_whitebalance,  
    raw.raw_colors)  
dms_img = demosaic(wb_raw, raw.raw_colors)  
gmm_img = gamma_correction(dms_img, 2.2)  
  
# 画像表示。  
plt.figure(figsize=(16, 8))  
imshow(gmm_img)  
plt.axis('off')  
plt.title(u"RAW現像した画像")  
plt.show()
```

JPEG画像

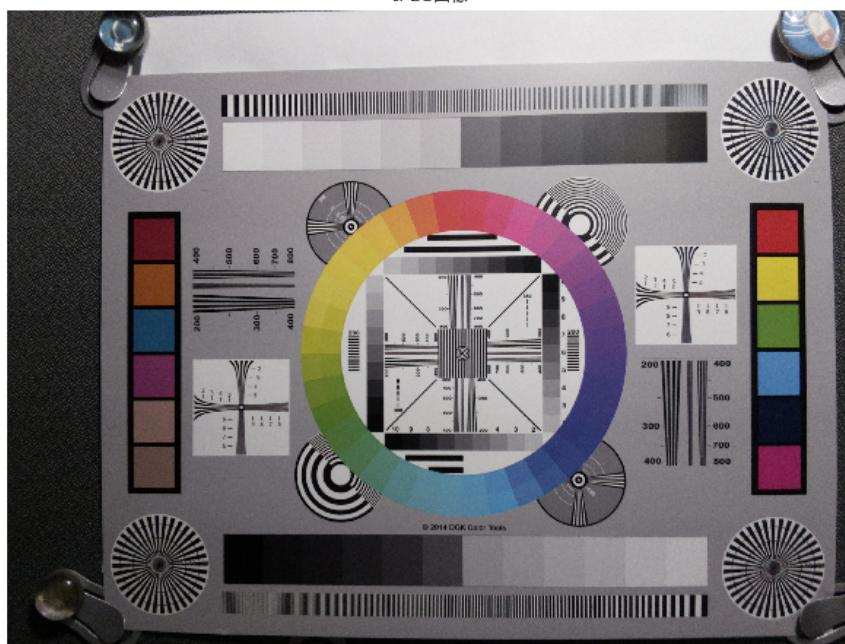


Figure 33: png

RAW現像した画像

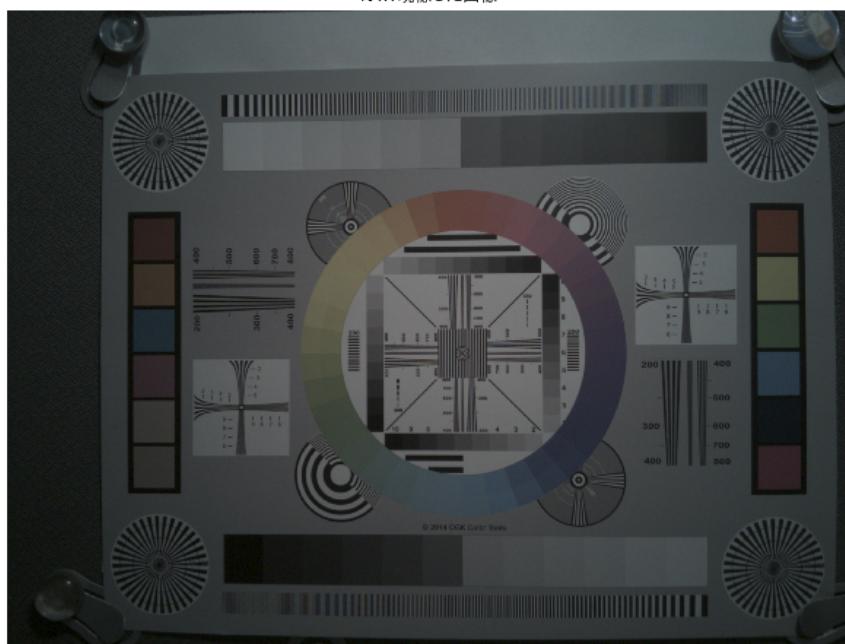


Figure 34: png

2つの画像を見比べると、色の鮮やかさが違うことがわかると思います。また色合いも完全には一致していません。実際の見た目も最初の JPEG の画像に近くなっています。

どうしてこうなってしまうかというと、最大の原因はカメラのセンサーの色ごとの感度が人間の目とは完全には一致しないことです。例えば人間の目はある光の周波数の範囲を赤、青、緑、と感じのですが、センサーが緑を検知する範囲は人間が緑と感じる領域とは微妙に異なっています。同じように青や赤の範囲も違います。これは、センサーが光をなるべく沢山取り込むため、だとか、製造上の制限、などの理由があるようです。さらに、人間の目には、ある色を抑制するような領域まであります。これはセンサーで言えばマイナスの感度があるようなのですが、そんなセンサーは作れません。

こういったセンサー感度と人間の目の間隔となるべく小さくなるように、3 色を混ぜて、より人間の感覚に近い色を作り出す必要があります。この処理を通常は行列を使って行い、これをカラーマトリクス補正と呼びます。

カラーマトリクス補正というのは処理的には 3×3 の行列に、3 色の値を成分としたベクトルをかけるという処理になります。

$$\begin{pmatrix} R_{out} \\ G_{out} \\ B_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0 & c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 & c_5 \\ c_6 & c_7 & c_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{pmatrix}$$

このような処理で、色の深み・鮮やかさ (Saturation と呼ばれます)、色合い (Hue と呼ばれます) をある程度修正することができます。

カラーマトリクス補正

それでは実際にカラーマトリクス補正をかけてみましょう。

まず、撮影された RAW 画像に保存されているカラーマトリクスの値を読んでみましょう。RAWPY にもカラーマトリクスを読み取る機能はあるのですが、実際に実行するとこうなってしまいます。

```
print(raw.color_matrix)
```

```
[[0. 0. 0. 0.]  
 [0. 0. 0. 0.]  
 [0. 0. 0. 0.]]
```

これでは仕方がないので、exiftool を使います。exiftool はコマンドラインから各種画像ファイルの情報を取り出すツールです。

まず colab の環境に exiftool をインストールします。

```
! apt install exiftool
```

```
E: Could not open lock file /var/lib/dpkg/lock-frontend - open (13:  
    Permission denied)  
E: Unable to acquire the dpkg frontend lock  
    (/var/lib/dpkg/lock-frontend), are you root?
```

Exiftool をつかって、カラーマトリクスの内容を見てみましょう。

Raspberry Pi の RAW 画像の場合、カラーマトリクスはメーカーノート情報（カメラメーカー独自のデータ）に含まれています³。メーカーノートは-bオプションで読むことができます。

```
! exiftool chart.jpg | head -c 512
```

```
11.10chart.jpg.154593162019:01:26 20:15:58-08:002019:02:02  
09:13:14-08:002019:01:26  
20:16:11-08:00664JPEGJPImage/jpegMMRaspberryPiRP_imx219727222018:10:20  
18:10:0110.0629982312502202018:10:20 18:10:012018:10:20  
18:10:011 2 3 00.062998007062321722.62203.039ev=-1 mlux=-1  
exp=62998 ag=556 focus=255 gain_r=1.128 gain_b=2.546 greenness=3  
ccm=6022,-2314,394,-936,4728,310,300,-4324,8126,0,0,0 md=0  
tg=262 262 oth=0 0 b=0 f=262 262 fi=0 ISP Build Date: Oct 8  
2018, 17:46:45 VC_BUILD_ID_VERSION: 656741eb5ba785fc4f10
```

ここでhead -c 512は先頭部分のみを取り出すのに使っています。

繋がっていて読みにくいですが、よく見てみるとこのような部分があるのがわかります。

```
ccm=6022,-2314,394,-936,4728,310,300,-4324,8126,0,0,0
```

これは、カラーマトリクス (CCM: Color Correction Matrix) が次のような値であることを示しています。

$$\begin{pmatrix} 6022 & -2314 & 394 \\ -936 & 4728 & 310 \\ 300 & -4324 & 8126 \end{pmatrix}$$

このままでは入力と掛け合せた時に非常に大きくなってしまうので、何かの値で正規化しなくてはなりません。Exif のメーカーノートには特に記載がありませんが、各行の和が 4096 に近いので、4096 で正規化しておくことにしましょう。

それではこの値を使ってカラーマトリクス補正を行ってみましょう。カラーマトリクス補正是線形な色空間で行う必用があるので、ガンマ補正の前に行います。

```
# カラーマトリクス  
# [[6022,-2314,394]  
# [-936,4728,310]  
# [300,-4324,8126]] / 4096
```

³ 7III の RAW 画像では EXIF 情報に含まれているので、-bオプションをつけなくとも! exiftool sample.ARWで読み取ることができます。

```

color_matrix =
    np.array([[6022,-2314,394],[-936,4728,310],[300,-4324,8126]]) /
    4096

# 出力先を作成しておく
ccm_img = np.zeros_like(dms_img)
# 実際に1画素毎に処理
# 入力はデモザイク処理後の画像。
for y in range(0, h):
    for x in range(0, w):
        pixel = dms_img[y, x, :]
        # numpyのdotは行列同士の掛け算を計算する関数
        pixel = np.dot(color_matrix, pixel)
        ccm_img[y, x, :] = pixel

```

残っているガンマ補正を行います。

```
ccm_gmm_img = gamma_correction(ccm_img, 2.2)
```

最終的な画像を表示して、カラーマトリクス補正なしのものと比較してみましょう。

```

# 表示領域設定
plt.figure(figsize=(12, 16))
# 2x1(縦2, 横1)のうち1つめの表示
plt.subplot(2, 1, 1)
# CCM補正なしの画像を表示
plt.imshow(gmm_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"CCM補正なし")
# 2x1(縦2, 横1)のうち2つめの表示
plt.subplot(2, 1, 2)
# CCM補正ありの画像を表示
plt.imshow(ccm_gmm_img)
plt.axis('off')
plt.title(u"CCM補正あり")
# 画像を描画
plt.show()

```

CCMありのほうが色が鮮やかになっているのがわかると思います。

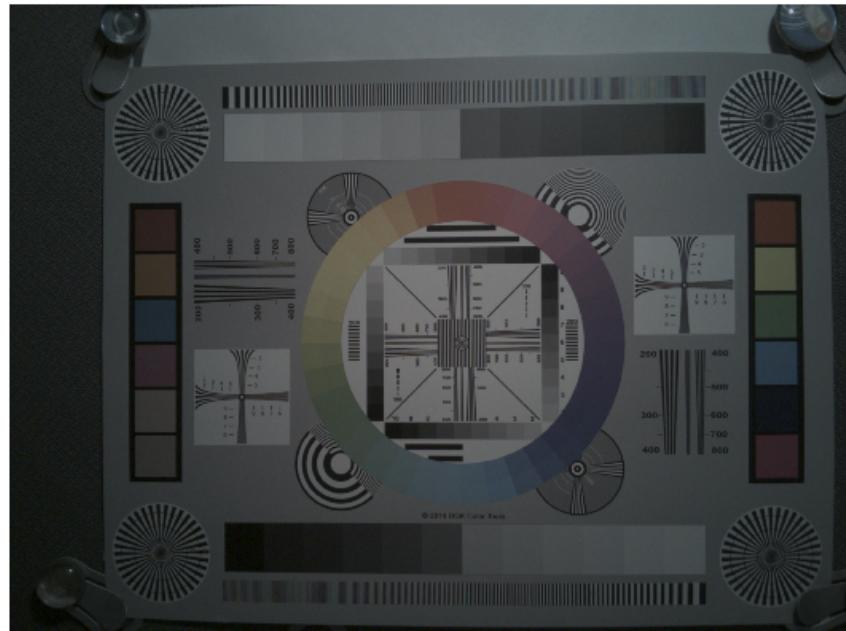
モジュールへの追加

この処理も高速化して、関数としてモジュールへ追加しておきましょう。

```
def color_correction_matrix(rgb_array, color_matrix):
    """

```

CCM補正なし



CCM補正あり

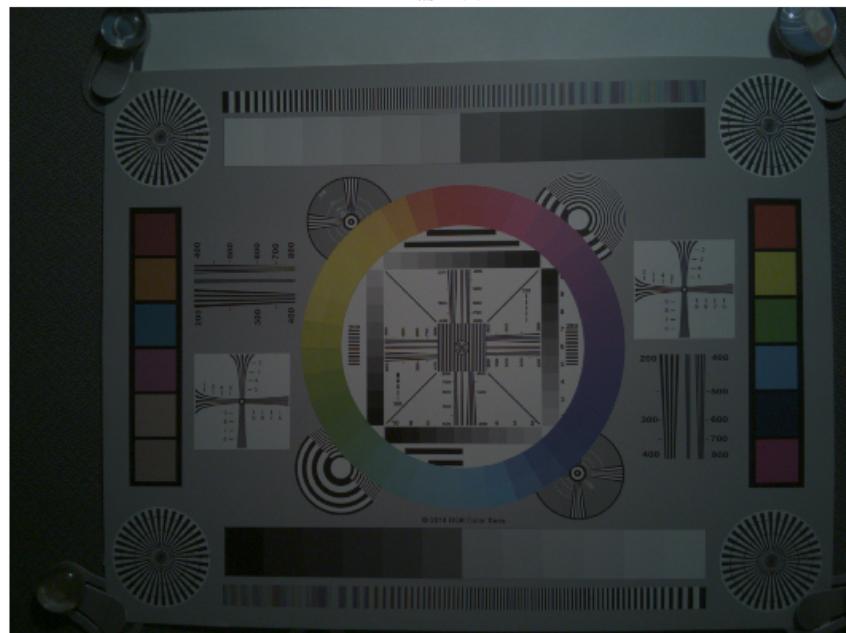


Figure 35: png
74

カラーマトリクス補正を行う。

Parameters

rgb_array: numpy array
 入力RGB画像
color_matrix: 2D (3x3) array like
 3x3 Color Correction Matrix
 Need to be normalized to 1.0

Returns

ccm_img: numpy array
 出力RGB画像
"""

```
# 出力先を作成
ccm_img = np.zeros_like(rgb_array)
# CCMが3x3フォーマットでない場合、3x3に変換
ccm = np.array(color_matrix).reshape((3, 3))
# 各色毎に処理。この方が各画素ごとに処理するよりも高速なようだ。
for color in (0, 1, 2):
    # 行列と入力画像の各色を掛け合わせる。
    ccm_img[:, :, color] = ccm[color, 0] * rgb_array[:, :, 0] + \
                           ccm[color, 1] * rgb_array[:, :, 1] + \
                           ccm[color, 2] * rgb_array[:, :, 2]
return ccm_img
```

このcolor_correction_matrix()関数はraw_process.pyモジュールの一部としてgithubにアップロードされています。使用する場合は、

```
!wget https://raw.githubusercontent.com/moizumi99/raw_process/master/raw_process.py
としてダウンロードした後、
from raw_process import color_correction_matrix
としてインポートしてください。
```

まとめ

この節ではカラーマトリクス補正を行いました。次はレンズシェーディング補正を行います。