

## 飽和画像からの色復元 —1,2 色飽和の場合—

玉置 貴規<sup>†</sup> 和田 俊和<sup>†</sup> 鈴木 一正<sup>†</sup>

<sup>†</sup>和歌山大学システム工学部 〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930 番地

E-mail: {tama,suzuki,twada}@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

あらまし 写真を撮影する際に、近距離からのフラッシュや露出過多によってカメラのダイナミックレンジを超えた入射光が観測されることがある。この場合には、記録される画素値は使用するカメラの最大画素値となる。このような画素値の飽和は、各色チャネルで発生し、特定の色だけで飽和が発生すると、色のバランスを崩してしまう。デジタルカメラや写真現像器の多くには、このようなカラーバランスの崩れを補正する機能が搭載されているが、それらの多くは、飽和した画素の値を周囲と比べて矛盾のない最大輝度値よりも小さい値で置き換えていくという手法である。このような対症療法的アプローチでは、様々なケースに対応することができないだけでなく、本質的に正しい画素値を得ることはできない。本報告ではRGBのうち、1色あるいは2色が飽和しているケースについて、最大画素値を超える本来観測されるべき画素値を推定する方法を提案する。

キーワード 色飽和, 最近傍探索, 色の推定

## Color Restoration From Saturated Images

—Restration method up to 2 channel saturations—

Takanori TAMAKI<sup>†</sup> Toshikazu WADA<sup>†</sup> and Kazumasa SUZUKI<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Wakayama University No.930 Sakaedani, Wakayama-si, Wakayama, 640-8510 Japan

E-mail: {tama,suzuki,twada}@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

**Abstract** When we take a photograph, excessive light over the dynamic range of the camera can be injected by proximal lighting or long exposure. Such excessive light will be clipped to the maximum intensity of the range. When this saturation occurs, the color balance may be broken. For relaxing the problem, many digital cameras have a special function that substitutes saturated colors by non-saturated likely colors. The likely colors are estimated from the pixels surrounding the saturated pixels. However, this method does not estimate the original colors over the maximum value but finds consistent colors less than the maximum value. In this report, we propose a method for estimating original colors over the maximum value by using Nearest Neighbor Search. This method can be applied to those colors up to two saturated color components.

**Keyword** Color saturation, Nearest Neighbor Search, Color estimation

### 1. はじめに

最近のデジタルカメラで使用される撮像素子はRGBの各色を8-bit以上のダイナミックレンジで撮影することができる。しかし、実際に記録される画素値は他の機器などとの互換性のため、各色8-bit(最大255)と丸めることが大半である。また、デジタルカメラ以外で撮影された画像もほとんどの場合、各チャネル最大画素値255で記録されるのが普通である。

画像を撮影する際に、露光量が過剰になると、記録される各色チャネルで画素値が最大画素値にクリップされる。これは俗に「白とび」と呼ばれる現象であるが、本稿では「画素値の飽和」と呼ぶことにする。画素値の飽和が起きると、各色チャネルで最大画素値を

持つ画素が観測されるようになる。本稿では、必要に応じて、最大画素値が観測される色チャネルの数で、画素値の飽和を「1色飽和」「2色飽和」「3色飽和」と区別することにする。この最大画素値は本来それ以上の画素値であるべきであるが、これは画像データには記録されない。この結果、例えば肌色を撮影した場合に、最も大きな値を持つRの成分が飽和すると、相対的にG、Bの成分が強くなり、結果的に黄色味を帯びた肌色の画像となるといった現象が起きる。このような画像が記録されてしまうと本来の画素値は分からなくなってしまう。

写真現像用ソフトウェアやフォトレタッチソフトウェア、さらには一部のデジタルカメラでは、この

ような色ずれによる「違和感を消す」ために、

1. 飽和の起きた画素の色を強制的に周囲の色に近づける。
2. 飽和した画素の間に強制的に飽和が起きていない画素値を計算し、挿入する。
3. 同一画像中の似た部分の画像をマニュアルで指定してシームレスに張り合わせる。

などの処理が行われている。しかし、これらはあくまでも画像としての違和感を消すことが目的であり、本来の画素値を計算しているわけではない。

本稿では、2色までの色飽和が起きた画素の本来の画素値を推定し、色ずれを無くす方法を提案する。このような研究は、単に鑑賞のための写真加工のみを目的としたものではなく、CV や計測などコンピュータによる処理の対象となる画像を推定する技術・理論の確立を目的としたものである。

本来の画素値は飽和した最大画素値以上であるということしか分からない。したがって、一つの画素の色を調べるだけでは本来の色を求めることはできない。このため、飽和した画素の周辺の画素を調べることになるが、どのように周辺の画素を求め、それを画素値の推定に利用するかは規範が必要になる。

本研究では、通常用いられる2色性反射モデルではなく、ボディ反射成分のみが色空間内の原点から直線状に伸びる反射モデルを仮定する。このモデルをもとに、直線状に伸びたボディ反射軌跡が最大画素値の平面にぶつかった後に辿る軌跡上の一点が飽和画素値であると考え、「ボディ反射軌跡上の非飽和画素値」を参照して、飽和画素値が飽和していなかった場合の画素値を推定するという計算を行う。これは、1色飽和の場合であるが、後述するように最大画素値の平面2枚にぶつかる2色飽和の場合にも、同様の推定が行える。

この計算の際に用いる「ボディ反射軌跡上の非飽和画素値」を飽和画素値から求めるためには、飽和画素値をクエリとした最近傍探索を用いる。この最近傍探索を無制限で行うと、飽和画素と同じ物体上で非飽和画素がサンプリングされない場合があるため、その場合、不正確な推定が行われる。この問題を解決するため、飽和した画素に対応し得る非飽和画素の集合に限定して最近傍探索を行う方法を明らかにする。

以下2では関連研究について述べ、3で提案手法、4で実験結果、5でまとめを述べる。

## 2. 関連研究

色飽和を起した画素の色を推定する問題を取り扱った研究は非常に少ない。Zhang ら[1]の研究では、飽和を起している近辺での非飽和画素の RGB 空間内での色分布を正規分布で表わし、これを利用して本来

の画素値を推定している。すなわち、飽和色に含まれる飽和を起していない色成分を定数、飽和している色成分を未知パラメータとして与え、確率密度を最大化するようにパラメータの推定を行う。しかし、この方法では、

1. 飽和した色に対応する物質が飽和せずに撮影されている画素が、飽和した画素の近辺に存在することが仮定されているため、この条件が成立しなければ正しい推定が行えない。
2. 飽和した画素の近辺で正規分布の計算を逐一行うため、計算に時間がかかる。
3. 原理的に推定される値は実際よりも暗めに推定される。

といった問題がある。

これに対して、HDR Hallucination[2]は飽和した画素とほぼ同じテクスチャを持つ飽和していない領域をマニュアルで指定し、グラフカットを利用し Interactive Digital Photomontage[3]と同様にしてシームレスに張り付けていく方法である。この方法は、マニュアル操作で領域を指定しなければならぬため、本研究には適用できないが、きわめて自然な画像の生成が行えるという特徴がある。

これらの研究のうち Zhang らの研究は、物理モデルとしては明確な反射モデルを持たないが、色の分布を正規分布で表現しているという点で、ボディ反射成分のみを取り扱っていると見なすことができる。これに対し、Klinker ら[4]は、物体が誘電体(絶縁体)である場合、物質表面で反射される光は2色性反射モデルに従うと主張している。すなわち、反射光は、1)物質の内部に入り物質の色を帯びた反射光(ボディ反射)  $\alpha I_B$ 、物質の内部に入らず光源と同じ色を持つ表面反射光  $\beta I_S$ 、の和  $\alpha I_B + \beta I_S$  で表される「2色性平面」上に存在するという内容である。 $\beta I_S$  が観測されるのは正反射方向の付近であり、その付近では通常  $\alpha I_B$  もある程度大きな値を持つ。この結果、同じ物体の反射光は図1に示す RGB 空間中の歪んだ T または P の形になる。

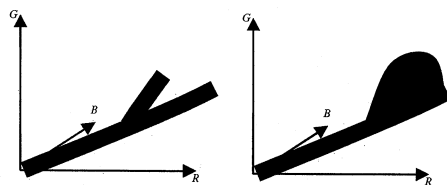


図1: Skewed T and P

これらの研究と比べると、本研究には以下に示すような特性がある。

- A) [1]と同様に、2色性反射モデルのボディ反射成分のみを扱う。

- B) 但し、暗電流成分は0とし、全てのボディ反射の軌跡は原点を通過するものと仮定する。
- C) 飽和画素に対応する非飽和画素を画素間の近接性を考慮しつつ、画像の広い範囲から探索するため、探索の失敗が起きにくい。
- D) 但し、1色のみが飽和している場合、残り2つの非飽和成分の比がかけ離れている非飽和色の探索は行わないようにしているため、誤った探索は行う可能性は少ない。
- E) この探索には(R,G,B,X,Y)の5次元ベクトルに対する最近傍探索を用い、ANN[5]等のアルゴリズムを用いることで、処理の高速化が図れる。

### 3. 提案手法

#### 3.1. 色の飽和モデル

本論文では暗電流成分を0、反射光はボディ反射成分のみから成ると仮定しているため、同一物質からの反射光は色空間内の原点から特定の方向に伸びていく。これは、以下のように表すことができる。

$$C(\alpha) = \alpha c \quad \dots(1)$$

但し、 $c = (r, g, b)^T$ はその物質のボディ反射方向を表すベクトル、 $\alpha$ は反射光の強さを表すパラメータ、 $C(\alpha)$ は観測される画素値を表す。

このとき、ある一つの色成分が最大輝度値に達したとする。一般性を失うことなく、ここではRの成分が

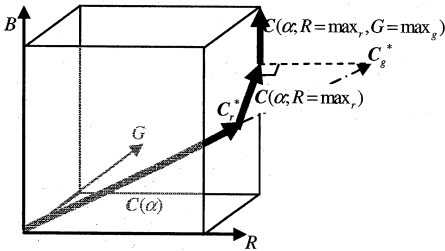


図2. 1色飽和による画素値のクリッピング

飽和したものと仮定する。今  $e_r = (1, 0, 0)^T$ 、Rの最高画素値を  $\max_r$  とすると、

$$C(\alpha) \cdot e_r \geq \max_r \quad \dots(2)$$

がRが1色飽和を起こす条件となる。

飽和を起こした瞬間は、 $\alpha r = \max_r$  となっており、

$C_r^* = (\max_r, \frac{\max_r}{r} g, \frac{\max_r}{r} b)^T$  が飽和と非飽和の境界となる。

$\alpha r \geq \max_r$  の範囲では、観測される画素値は

$$\begin{aligned} C(\alpha) &= C(\alpha; R = \max_r) \\ &= \alpha c - ((\alpha c - C_r^*) \cdot e_r) e_r \\ &= (\alpha r, \alpha g, \alpha b)^T - (\alpha r - \max_r, 0, 0)^T \\ &= (\max_r, \alpha g, \alpha b)^T \end{aligned} \quad \dots(3)$$

となる。これが1色飽和後に観測される色である。

この一色飽和が起きている状況で、さらに、もう一色の飽和が起きたとする。Gの成分に飽和が起きたとしても、一般性は失われない。この場合、 $e_g = (0, 1, 0)^T$ 、Gの最高画素値を  $\max_g$  とすると、次式が成立する。

$$\begin{aligned} C(\alpha) &= C(\alpha; R = \max_r, G = \max_g) \\ &= \alpha c - ((\alpha c - C_r^*) \cdot e_r) e_r - ((\alpha c - C_g^*) \cdot e_g) e_g \\ &= (\max_r, \max_g, \alpha b)^T \end{aligned} \quad \dots(4)$$

但し、 $C_g^* = (\frac{\max_g}{g} r, \max_g, \frac{\max_g}{g} b)^T$  である。これが、2

色飽和を表す式である。

3色の飽和は、全ての色が最大値となるので、ここでは省略する。

これらの現象を図示すると、図2のようになる。最初  $C(\alpha)$  は飽和しておらず、 $\alpha$  の増加によって、まず  $R = \max_r$  の平面にぶつかる。その後Rの成分は増加せず、 $\alpha$  の増加にしたがって、 $R = \max_r$  の平面内部を移動していく。さらに  $G = \max_g$  の平面にぶつかる、これら2つの平面が作る稜線上を飽和色が移動していく。

#### 3.2. 色の復元

ここで必要となるのは、飽和した画素から本来の色を推定する方法である。

まず、1色飽和が起きている場合に本来の色を復元する方法について述べる。この場合は式(3)に示すように、 $C(\alpha) = (\max_r, \alpha g, \alpha b)^T$  となる。この値から本来の色  $(\alpha r, \alpha g, \alpha b)^T$  を求めるためには、 $\alpha$  の値が必要である。今、何らかの方法で飽和していないボディ反射成分  $\beta c = (\beta r, \beta g, \beta b)^T$  が求められたと仮定する。そうすると、 $\alpha g / \beta g$  もしくは、 $\alpha b / \beta b$  から、 $\alpha / \beta$  を求めることができる。そうすると、この値を用いて

$$\beta r \left( \frac{\alpha}{\beta} \right) = \alpha r \quad \dots(5)$$

とすることで、本来のR成分を求めることができる。

2色飽和  $C(\alpha) = (\max_r, \max_g, \alpha b)^T$  が観測されている場合でも、何らかの方法で  $\beta c = (\beta r, \beta g, \beta b)^T$  が求められれば  $\alpha b / \beta b$  から、 $\alpha / \beta$  を求めることができ、

$$\beta r \left( \frac{\alpha}{\beta} \right) = \alpha r, \quad \beta g \left( \frac{\alpha}{\beta} \right) = \alpha g \quad \dots(6)$$

のように、本来のR,Gを求めることができる。以降  $s = \alpha / \beta$  と表す。

以上が、色復元の概要である。当然、これらの議論

は、2色までであれば、どの色成分が飽和している場合にでも成り立つ。

しかし、以上の計算を実際に行うためには、同じ物体の非飽和色を求めなければならない。実際にこの値は、完全に  $\beta c = (\beta r, \beta g, \beta b)^T$  を満足することは稀であり、以降、推定される非飽和色を  $c' = (R_n, G_n, B_n)^T$  と表す。

1色飽和の色を  $C(\alpha; R = \max_r) = (\max_r, G_o, B_o)^T$  とすると、

$$G_o / G_n = B_o / B_n = s \quad \dots(7)$$

を満足しなければ、 $s(\cong \alpha / \beta)$  を求める際に使用する色成分を G とするか B とするかで結果が変わってしまう。さらにこの条件が満足されて、ほぼユニークに  $s$  が求められる場合でも、推定される本来の色が最大輝度値を超えなければならない。すなわち、

$$sR_n \geq \max_r \quad \dots(8)$$

が成立しなければならない。

これら 2 条件を同時に満足する非飽和色  $c'$  をいかにして求めるかが、最終的な推定結果に大きな影響を与える。

### 3.3. 飽和色に対応する非飽和色の推定

まず、一般性を失うことなく、赤の 1 色飽和について考える。1 色飽和では式(7)を満足しなければならない。式(7)を変形すると、

$$G_n B_o - B_n G_o = 0 \quad \dots(9)$$

が得られる。これは、 $n = (0, B_o, -G_o)$  とすると、

$$n \cdot c' = 0 \quad \dots(10)$$

という平面の方程式になっている。この平面は、図 3 に示すように、原点、 $C(\alpha; R = \max_r)$ 、 $C_r^*$ 、さらに  $(\max_r, 0, 0)$  の 4 点を含む平面である。

$C_r^*$  がこの平面に乗ることは、 $C(\alpha; R = \max_r)$ 、 $C_r^*$ 、 $(\max_r, 0, 0)$  の 3 点が直線上に存在するためである。また、推定される色は  $C(\alpha; R = \max_r) + \delta e_r$  と表されるが、 $n \cdot e_r = 0$  かつ、 $n \cdot C(\alpha; R = \max_r) = 0$  であることから、推定される色  $C(\alpha; R = \max_r) + \delta e_r$  もまたこの平面上に存在する。この平面を以降、「拘束平面」と呼ぶことにする。

一方、式(8)を変換すると、

$$\begin{aligned} sR_n &\geq \max_r \\ G_o R_n / G_n &\geq \max_r \\ G_o / \max_r &\geq G_n / R_n \end{aligned} \quad \dots(11)$$

$$\tan \theta_m \geq \tan \theta_n$$

と書きなおすことも、

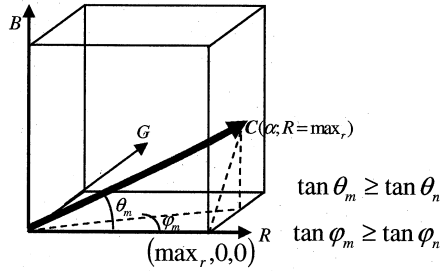


図 3. 式(8)から決まる  $(R_n, G_n, B_n)$  の範囲

$$\begin{aligned} sR_n &\geq \max_r \\ B_o R_n / B_n &\geq \max_r \\ B_o / \max_r &\geq B_n / R_n \\ \tan \phi_m &\geq \tan \phi_n \end{aligned} \quad \dots(12)$$

と書きなおすこともできる。但し、 $\theta$ 、 $\phi$  は拘束平面上の、「 $C(\alpha; R = \max_r)$ 、 $(\max_r, 0, 0)$ 、および原点を結ぶ三角形領域」をそれぞれ RG 平面、RB 平面に射影した時の原点を頂点とする角度であり、 $\theta_m$ 、 $\phi_m$  が  $C(\alpha; R = \max_r)$  に対応し、 $\theta_n$ 、 $\phi_n$  は推定される非飽和色  $(R_n, G_n, B_n)$  は、図 3 の三角錐の内部に限定される。

式(7)から拘束平面上に存在しなければならないという条件が導かれ、式(8)から図 3 の三角錐内部に拘束される。これら条件の集合積は拘束平面上の、原点、 $C(\alpha; R = \max_r)$ 、 $(\max_r, 0, 0)$  を頂点として持つ三角形領域内に限定される。

この三角形領域内部に限定して非飽和色の探索を行う手法を以降「平面限定法」と呼ぶことにする。

但し、厳密にこの三角形領域上の色のみを探索すると、点の個数が極端に減少するため、実際には、ある程度の誤差を許容する範囲内で探索を行う。この結果、計算に誤差が生じるため  $G_n$  と  $B_n$  を比較し大きい方を式(7)での  $s$  の推定に用いる。

次に、二色飽和について考える。以降では、R と G が飽和しているものとする。1 色飽和と同様に考えると 1 色飽和では B と G を比べる必要があったが 2 色の場合 B のみ色成分として用いるので、非飽和画素の探索領域は平面とはならない。この場合は、飽和色成分が 2 つになったので  $sR_n > \max_r$  と  $sG_n > \max_g$  を同時に満たさなければならない。

まず、色成分 R の飽和の場合の平面は 1 色飽和の時と同じ平面なので  $sR_n > \max_r$  の条件にあてはめて、

$$G_n B_o - B_n G_o < 0 \quad \dots(13)$$

となる。また G の場合も同様に計算すると、

$$R_o B_n - B_o R_n < 0 \quad \dots(14)$$

となる。

したがって、これら 2 つの条件を同時に満足する非

飽和画素を探索する必要がある。これは1色飽和での条件では取ってくる非飽和画素値は平面上であったが、2色飽和では2平面より下の部分から探索領域になる。

探索領域が決定した段階では、飽和した色をクエリとして対応する非飽和色を探索する。この際に、飽和した画素と空間的に近い色だけをデータベースに登録すると、似た色の探索に失敗する可能性がある。その一方で、全ての非飽和色を対象として探索をすると、空間的に離れた部分を参照することがある。この場合には異なる物質を参照している可能性もある。

これらの問題を回避するために、本研究では画像全域からサンプリングした色をデータベースに登録し、(R,G,B,X,Y)の5次元ベクトルで表現し、最近傍探索を行う。こうすることにより、探索の失敗を防ぎつつ、同様の色がある場合には近接した画素の色を信じるといった扱いができる。

探索によって求められた色は、1色飽和の場合、対応する三角形領域の内部に存在するか否か、2色飽和の場合には、2平面の下部に存在するか否かのチェックを行い条件に合致していれば、飽和色の推定を行う。

探索で求めた色が上記の条件に合わなければ、次の最近傍色を求める。条件を満たす非飽和色が求められるまで探索を行うが、指定回数以上探索しても条件に合致する色が見つからない場合、特に修正は行わない。

また、5次元のベクトルの座標(X,Y)と画素値(R,G,B)の重みづけに関しては以下のように設定した。RGB値が255の最大値を持つのに対し、座標(X,Y)は画像サイズが幅3000高さ3000だと仮定すると10倍以上の差がある。したがって、画素値に対し10倍の重みを掛けて5次元距離の計算をしている。

但し、1色飽和の場合には $C(\alpha; R = \max_r)$ の傾きごとに飽和色、非飽和色それぞれのデータをまとめ、それぞれにANN[5]を用いて探索することにより、計算時間の短縮を実現している。

## 4. 実験

### 4.1. 飽和箇所

まず、通常のデジタルカメラで撮影した画像で発生している色飽和の例を図4に示す。図中、1色飽和を青、2色飽和を緑、3色飽和を赤で示し、非飽和画素は本来の画素値で示している。これらの画像に示すように、違和感なく見ることのできる画像であっても、広い範囲で飽和が発生していることがしばしばある。また、撮影を行うデジタルカメラでは、こういった飽和に対して、偽色を埋め込んだり、飽和画素を拡散させたりすることで飽和を目立たせなくする処理が行われており、その方式は各社まちまちである。

これらのうち、飽和対策を過剰にしていないC社のカメラを用いて次に示す実験を行った。

### 4.2. 実験結果

次に飽和画素値の推定結果を示す。計算に用いたPCはIntel Pentium4 3.6GHz メモリ1Gである。入力画像は3072x2048のサイズの画像である(図5(a))。推定し

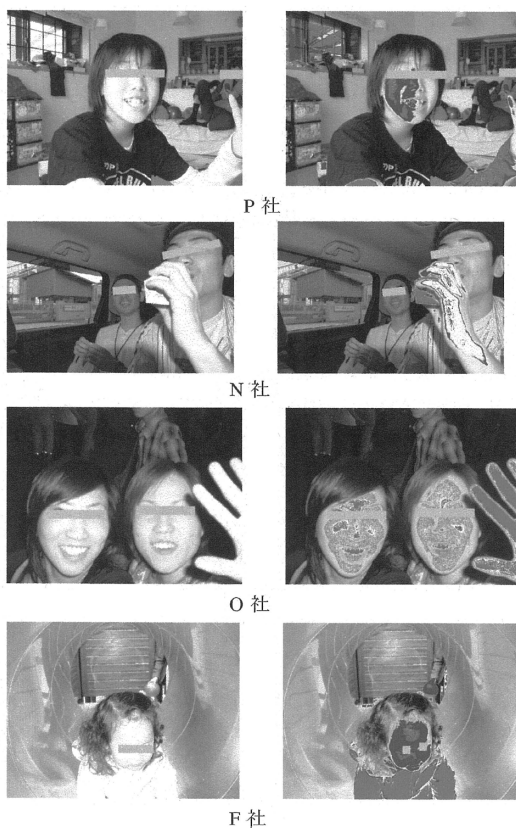


図4. 各社デジタルカメラで撮影した画像の飽和パターン

た画素値は最大画素値255を超えるため、推定画素値からGauss関数によりぼかした画素値を引く「覆い焼き」の手法を用いて最大画素値の範囲内の画素値に変換し補正画像(図5(c)-(f))を生成している。補正の手法は平面限定法を用いた場合と用いない場合の2種類である。飽和画素値の推定と覆い焼きに要した計算時間は約1分17秒であった。

この実験の結果から平面限定法を用いた場合の方が推定される画素の輝度値が増しており、飽和による黄色が強まった肌色の色が復元できていることが分かる。

また、覆い焼きを行う前のRの推定画素値の空間分布の一部を図6に示す。この図からわかるように、推定された画素値は255を上回る値となっていることが確認できる。

さらに、推定前後の画素値のヒストグラムを図7に示す。この画像から原画像のRのヒストグラム中255の部分に見られたピークが、推定後の画素では消え、様々な画素値に分散していることが分かる。



(a)原画像の一部



(b)飽和画素



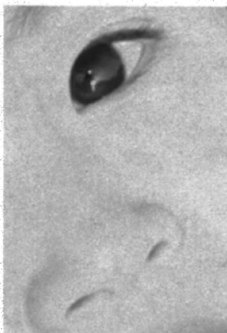
(c)限定なし補正画像



(d)平面限定法補正画像



(e)原画像(拡大図)



(f)(d)の拡大図

図5. 飽和画素値の推定結果

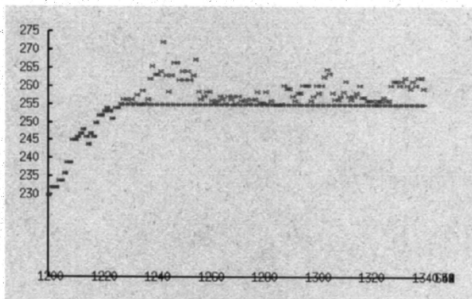


図6. 赤: 元画像画素値 緑: 推定画素値

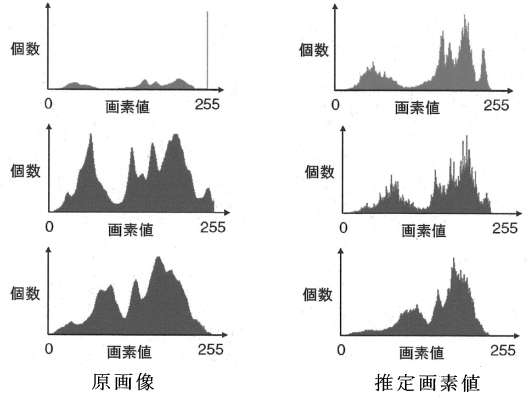


図7. RGBそれぞれのヒストグラム

### 5. まとめ

本稿では、色飽和画素の周辺にある非飽和画素値を用いて、色飽和が起きる前の状態を推定することにより飽和画像を色飽和のない状態にする手法を提案した。

1, 2 色飽和まではこの手法を用いることで元の画素値が復元できることを実験により確認した。

また、最近傍点の探索を行う範囲を限定することによって、より正しい復元を行うことができ、非色飽和平面をクラスタリングして別々に探索することで計算時間の短縮をすることができた。

今後の課題に次の2点を挙げる。1つは、図7にあるように画素値は255を超えているけれども、画素値のばらつきが多い。これを解決することにより滑らかな画像になるようにする予定である。2つ目は、3色飽和の解決である。現在1, 2色までの色飽和の解決のみで3色の解決はできていないので行う予定である。

### 謝辞

本研究は、ノーリツ鋼機㈱の支援のもとに実施されたものである。

### 文献

- [1] X.Zhang, D.H.Brainard, "Estimation of saturated pixel values in digital color imaging," Journal of the Optical Society of America A, Vol. 21, pp. 2301-2310, 2004.
- [2] L. Wang, L.Y. Wei, K. Zhou, B. Guo, and H.Y. Shum, "High Dynamic Range Image Hallucination," Proc. of the Eurographics Symposium on Rendering, 2007
- [3] A. Agarwala, M. Dontcheva, M. Agrawala, S. Drucker, A. Colburn, B. Curless, D. Salesin, and M. Cohen, "Interactive Digital Photomontage," ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2004), 2004.
- [4] J. Klinker, R. Steven, A. Shafer, and T. Kanade, "The Measurement of Highlights in Color Images," International Journal of Computer Vision, Vol. 2, pp.7-32, 1988.
- [5] S. Arya, D.D. Mount, N.S. Netanyahu, R. Silverman, and A.Y. Wu, "An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching," Journal of the ACM, Vol.45, pp. 891- 923, 1998