

連続画像における強いむらのあるヘイズ除去手法の提案

福元 伸也[†] 松元 貴寛^{††} 川崎 洋[†] 古川 亮^{†††} 福田 悠人^{††††}
山口 拓真^{†††††}

[†] 鹿児島大学大学院理工学研究科 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

^{††} 東芝ソリューション 〒 105-6691 東京都港区芝浦 1-1-1

^{†††} 広島市立大学大学院情報科学研究科 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

^{††††} 埼玉大学大学院理工学研究科 〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

^{†††††} 日本信号株式会社研究センター 〒 346-8524 埼玉県久喜市大字江面字大谷 1836-1

E-mail: [†]{fukumoto,kawasaki}@ibe.kagoshima-u.ac.jp, ^{†††}ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp,

^{†††††}fukuda@cv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{†††††}ymgc-tkm@signal.co.jp

あらまし 画像からヘイズ(もや・煙など)を除去する研究が行われている。自然画像では、ある部分領域の RGB 成分の最小値を集めるとその画像はヘイズのみの画像となることが知られている。この性質を利用してヘイズ除去する手法が提案され注目されている。ところが、従来研究では、ヘイズが一様であることを前提としてヘイズ除去処理を行っているため、濃淡のあるヘイズの除去は難しかった。本研究では、連続する画像の中から最もヘイズ除去のうまく働いた部分領域を選択しなめらかに統合する手法により、強いむらのあるヘイズを除去する手法を提案する。実験の結果、単純に最も暗い部分を選択する手法より、色情報の分散および transmission map を利用する提案手法の方が良い結果が得られることが確かめられた。提案手法により、ヘイズの影響で背景のほとんど見えなかった画像からヘイズを除去し、画像の可視性の大幅な改善に成功した。

キーワード Dehazing, transmission map, 分散, むら, ヘイズ, もや, 煙

1. はじめに

屋外でのカメラ撮影時に大気中にもやがあるとその画像はぼやけたものになってしまう。これは、もやがなければ物体から跳ね返ってくる光は、カメラのレンズに直接入るが、もやがあるせいで光が拡散するためである。このため、もやがない状態よりも、画像全体の輝度が上がってしまう問題やコントラストが下がってしまい物体の判別が付きにくくなってしまいう問題が生ずる。

近年、画像からもやや煙などのヘイズを取り除く研究が広く行われており、Dehazing として知られている [1] ~ [8]。Robby らは、マルコフ・ランダム場の枠組みでコスト関数を定義し、もやと画像のエッジとの関係を利用してもやの推定を行う方法を提案した [1]。また、Fattal らは、各ピクセルでもやの中での光の伝搬と陰影が無関係という性質を利用した Dehazing 手法を提案した [2]。He ら [3] は、自然画像の特徴を利用し、部分領域内で一番暗い部分に着目して、その部分の輝度がゼロとなるような処理で Dehazing を行った。

複数画像を用いる手法も提案されている [4], [5]。これは、偏光の異なる 2 つの画像を用いて透過光を復元する方法である。しかし、ヘイズ画像を単純に増やしても情報量は増えないため、超解像のように複数画像を用いる方法は、ほとんど提案されていない。

一方、従来手法では、空間中の濃度を一定と仮定しており、むらがある状態を想定したものは、我々の知る限り研究されていない。そこで、本研究では、ヘイズとし

て濃度変化し、むらのあるもやや煙を扱い、複数枚の連続画像からこれを除去する手法を提案する。時間とともに濃度変化する方法を仮定しているため、偏光の場合と同様に複数枚使用することで、情報量が増し、ヘイズ除去が可能となる。具体的には、自然画像にみられる特性を利用した He らの Dehazing 手法 [3] を拡張し、むらが発生している画像の Dehazing を行う。実験により、提案手法の有効性について調べたところ良好な結果を得た。

2. 画像中のヘイズ除去

本論文では、ヘイズ除去の基本的なアルゴリズムとして、He らの Dark Channel Prior [3] を用いるため、その原理について簡単に説明する。

2.1 画像と光の関係

図 1 に示すようにヘイズの写りこんだ画像は、物体からの直接光と周りの環境光を合わせたものだと考えられ、次式で表される。

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (1)$$

ここで、 I は実際に観察された画像を表し、 J は物体からの直接光を表している。また A はヘイズによって分散した環境光で、 t によってその比率が決まる。式 (1) に表された関係より、 J を求めると、それはヘイズが含まれない状態を意味する。 J を求めるためには、観察された画像 I 以外の t および A が分かればよい。

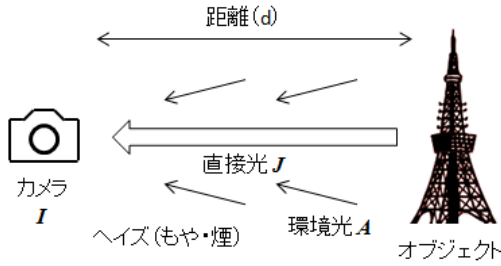


図 1 ヘイズがある場合の光のモデル

2.2 t の推定

カラー画像は RGB 成分を持っているが、その全てに値が必ず入っているわけではない。特に図 2 (a) に示すような自然画像（ヘイズを含んでいない画像）の場合、以下のような条件で RGB 成分のいずれかが欠けていることが多い。

(A) 影, (B) 色鮮やかな物体, (C) 黒い物体

図 2 (a) から RGB 成分の最小値をとると図 2 (b) のような画像を得ることができる。次に、この画像のあるピクセルを含む部分領域（以下、パッチと呼ぶ）内の最小値で、そのピクセルの RGB 値を置き換える作業を行う。この作業を全てのピクセルで行った場合、ほぼ黒い画像が得られる（図 2 (c)）。

次に、図 3(a) で示すようなヘイズを含んだ画像に対して、上記の作業を行う。ヘイズを含んだ画像の場合、パッチごとに最小値をとった画像（図 3(b)）は全体的に黒くなることはない。一般に自然画像においてヘイズがなく、物体だけが写った画像であれば黒くなるはずなので、この画像はヘイズだけの情報を持っている画像と言える。

RGB 最小値を取ることを式で表すと次のようになる。

$$\min_{C \in \{r,g,b\}} (I^C(\mathbf{x})) = \tilde{t}(\mathbf{x}) \min_{C \in \{r,g,b\}} (J^C(\mathbf{x})) + (1 - \tilde{t}(\mathbf{x})) A^C \quad (2)$$

ただし、 C は、RGB 成分のいずれかを表す。次に、パッチごとに最小値を取ることを表すと次式が得られる。

$$\min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \left(\min_{C \in \{r,g,b\}} I^C(\mathbf{y}) \right) = \tilde{t}(\mathbf{x}) \cdot \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \left(\min_{C \in \{r,g,b\}} (J^C(\mathbf{y})) \right) + (1 - \tilde{t}(\mathbf{x})) A^C \quad (3)$$

ただし、 Ω は、パッチを表しており、 \mathbf{y} は、パッチ内の座標である。この式より次式が導かれる [3]。

$$\tilde{t}(\mathbf{x}) = 1 - \min_{\Omega} \left(\min_C \left(\frac{I^C(\mathbf{y})}{A^C} \right) \right) \quad (4)$$

ここで $\min_{\Omega}(\min_C(\frac{I^C(\mathbf{y})}{A^C})) \rightarrow 1$ となるとき、 $\tilde{t}(\mathbf{x}) \rightarrow 0$ となり、完全にヘイズを取り除くことができる。しかし、人間はヘイズによってある程度の遠近感を知覚しているところもあるので、完全にヘイズを取り除いてしまうと画像は不自然になり、奥行き感も失われてしまう。そこ

で、(4) 式に次式のようにパラメータ ω を加える。

$$\tilde{t}(\mathbf{x}) = 1 - \omega \min_{\Omega} \left(\min_C \left(\frac{I^C(\mathbf{y})}{A^C} \right) \right) \quad 0 < \omega \leq 1 \quad (5)$$

ω を加えることにより、遠くの物のために少ない量のヘイズを残すことができる。(5) 式より、各ピクセルでの t の値を計算した transmission map (以下、tmap と略す) を得ることができる (図 4(a))。

2.3 マッティング処理

図 4(a) に示すように t の値を計算しただけの tmap だとパッチの境目が残ってしまい、うまくヘイズの除去を行うことができない。そこで、パッチの境界を滑らかにするために、マッティング処理を行う。ここで、イメージモデルを次式で表すことにする。

$$I_i = \alpha_i F_i + (1 - \alpha_i) B_i \quad (6)$$

ただし、 F は切り出す対象（前景）で、 B はそれ以外の部分（背景）である。 α を与えることにより、滑らかにかつ自然に領域を分割することが出来る。(6) 式を変形すると次式が得られる。

$$\alpha_i \approx a I_i + b \quad \forall i \in w_i \quad (7)$$

ただし、 $a = \frac{1}{F-B}$ 、 $b = -\frac{B}{F-B}$ 、 w はパッチである。ここで、

$$J(\alpha) = \min_{a,b} J(\alpha, a, b) \quad (8)$$

と定義すると α は、 a, b の最小値を求めることで得られ、そのとき次式のようなになる。

$$J(\alpha) = \alpha^T L \alpha \quad (9)$$

ただし、 L は Matting Laplacian を表す。

α の導出には、Levin らの Matting Laplacian を使用する [9]。(5) 式で得られた tmap を $\tilde{t}(\mathbf{x})$ 、マッティング処理後の tmap を $t(\mathbf{x})$ とし、それぞれのベクトルを \tilde{t}, t とすると次のコスト関数が得られる。

$$E(t) = t^T L t + \lambda (t - \tilde{t})^T (t - \tilde{t}) \quad (10)$$

このときの t の最小値を求める。右辺の第 1 項はスムース項で、第 2 項はデータ項である。 λ は、調整パラメータである。

最適な t を得るために次式を用いる。

$$(L + \lambda U)t = \lambda \tilde{t} \quad (11)$$

ただし、 U は L と同じ大きさの単位行列で、 λ には、 1.0×10^{-4} を用いる。

マッティング処理後の tmap を図 4(b) に示す。処理前に比べて滑らかな画像が得られている。



(a) 自然画像



(b) RGB 最小値の画像

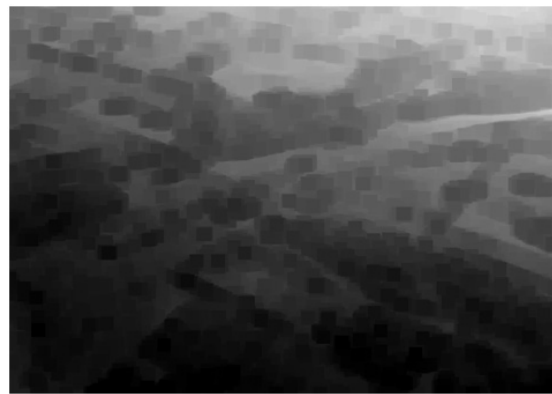


(c) パッチ 最小値の画像

図 2 自然画像と RGB 成分



(a) ヘイズを含んだ画像

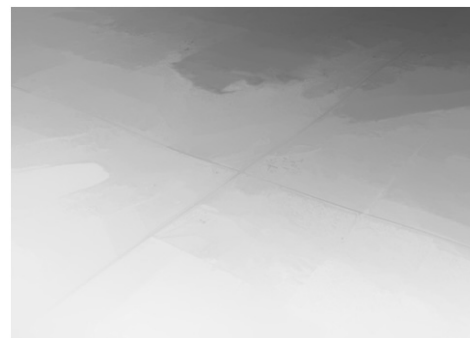


(b) パッチ 最小値の画像

図 3 ヘイズ画像とパッチ最小値



(a) transmission map (tmap)



(b) マッティング処理後の tmap

図 4 tmap とマッティング処理

2.4 環境光 A の推定

原画像から輝度が一番高いピクセルを環境光 A としてしまうと画像中の白い物体を環境光としてしまう可能性がある。そこで、白い物体を環境光としないために、パッチごとの最小値を用いる。これにより、ヘイズだけが残ることになる。次にパッチごとの最小値を取った画像の中で輝度の高い領域を選択し、その領域に対応する入力画像の領域において、輝度の最も高いピクセルの輝

度値を環境光 A とする。

2.5 Dehazing 処理

t と A が得られたので、(1) 式より J を回復することができる。(1) 式を変形すると次式が得られる。

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (12)$$

$t(x)$ は、0 に近い値を取り得る。しかし、その場合には、



(a) ヘイズを含んだ画像 (図 3(a) と同じ)



(b) Dehazing 処理後の画像

図 5 Dehazing 処理の結果

Dehazing の処理結果にノイズが目立つようになる。これを避けるため、 $t_0 = 0.1$ とし、 t の値が 0.1 を下回らないようにしている。図 5(b) は、Dehazing の処理結果である。

3. 提案手法

3.1 連続画像を用いたヘイズ除去

画像中のヘイズが一様でなくむらのある状態で撮影されると、前述の Dehazing 処理だけでは、ヘイズを取り除くことができない。ヘイズが薄い場合、光の拡散は少なく、直進する成分は大きい。しかし、ヘイズが濃くなると光は拡散し、急激に減衰する。そのため、物体からの情報がほとんど得られなくなる状況になり得る。そこで、ヘイズにむらのある画像に対し、一枚の画像からだけでなく、複数枚の連続画像を用いたヘイズ除去を考える。

今回提案するヘイズ除去手法の大まかな処理手順は以下ようになる。

- (1) 各画像における Dehazing 処理
- (2) 分散最大マップ作成処理
- (3) tmap 最大マップ作成処理
- (4) 分散値および tmap を用いた画像選択処理
- (5) グラフカットによるなめらかな画像統合

(1) の Dehazing 処理については、前章で述べた。以下の節では、分散最大マップ作成処理以降について説明する。

3.2 分散最大マップの作成

自然画像にテクスチャ模様があれば、パッチ内の分散値は、ヘイズが少ないほど大きな値となる。よって、複数枚の画像で同じ場所のパッチの分散を比較した場合、分散の値が大きい画像は、そのパッチ内でヘイズの少ない領域である可能性が高い。そこで、分散の値の最大値を取る画像 ID を格納するマップを作成する^(注1)。

手順

- 1) Dehazing 処理後、ヘイズの含まれる原画像においてパッチごとに色情報の分散を計算する。
- 2) Dehazing 処理された画像において、分散の最も大きい画像 ID を格納する。

(注1): 背景に光が差しているような条件では、ヘイズは減衰成分として働くため、そのような場合には、分散最小値はうまく働かない。このような場合は、次節の tmap が有効である。

3.3 tmap 最大マップの作成

自然画像にテクスチャ模様が少なかったり、濃いヘイズによって物体からの光が遮断されていたりする場合、分散最大マップ作成処理だけでは、その違いを見ることが難しくなり、また、ノイズが出ている画像を選択してしまう可能性もある。そこで、複数枚の全てのパッチの分散値が、ある閾値を下回った場合には、tmap で最大値を取る画像を選択する。これは tmap の値が高い場所は、物体からの直接光 J が大きくなるので、良い結果を得られている可能性が高いと考えられるためである。

手順

- 1) tmap 画像において、パッチ内で最大の値を持つ画像 ID を格納する。

3.4 分散値および tmap を用いた画像選択処理

分散最大マップ作成処理と tmap 最大マップ作成処理は、それぞれ単体の処理だけでもむらのある場合のヘイズ除去効果が期待できる。しかしながら、分散最大マップ作成処理だけでは、ノイズが含まれる画像を選択してしまう可能性があり、また、tmap 最大値算出処理だけでは、ヘイズが濃くなった場合に、画像中の暗い部分を見つけることが出来ず、Dark Channel Prior を用いた Dehazing 処理が成り立ちにくい状況となる可能性がある。そこで、分散値の閾値をみて、分散最大マップを使用するか tmap 最大マップを使用するかを選択を行い、これら 2 つの処理を組み合わせる統合画像を作成する。

手順

- 1) 分散最大マップ作成処理後、分散値が小さく比較が困難な場合、tmap 最大マップ作成処理により、最大の色情報を持つ画像 ID を格納する。
- 2) 格納された画像 ID に対応する Dehazing 結果画像を用いて、統合画像を作成する。

3.5 グラフカットによるなめらかな画像統合

グラフカットは、エネルギー最小化において、大域的な最小値を比較的高速に求めることができる手法で、画像処理のノイズ除去に利用されている [10] ~ [12]。画像統合処理において、選択された画像がある範囲の領域で見た場合に一樣でないために、これが逆にノイズとなる可能性があった。そこで、領域内を滑らかにする目的でグラ

フカットを利用した．画像統合の際に部分領域間の隙間にどの画像にも対応しない領域が生じるが，その部分は tmap が最大の画像 ID を利用する．また，境界部分においても不連続が発生するためスムージング処理を行った．

4. 実験

4.1 実験準備

実験では，むらのあるヘイズ画像を得るためにフォグマシンを用いて人工的にヘイズを発生させ，それをカメラで撮影し，原画像とした．フォグマシンには，Antari Z1200 II を使用した．ここでは，原画像として図 6 に示す 6 枚の画像を使用した．各画像に対し，Dehazing 処理を実行する．tmap を求めるところでは，最小値を取るためのパッチの大きさを 15×15 ピクセルとし，マッティング処理を行うときのパッチの大きさは， 3×3 ピクセルとした．その他のパラメータは， $\omega = 0.95$ ， $\lambda = 1.0 \times 10^{-4}$ ， $t_0 = 0.1$ ， $\varepsilon = 1.5 \times 10^{-5}$ とした．

4.2 実験結果

(1) マッティング処理後の tmap を図 7 に示す．図 8 は，各画像に対する Dehazing 処理の結果を示している．各画像において，ヘイズに濃淡があるため，ヘイズの薄い部分では，除去が出来ているが，ヘイズの濃い部分では，うまく除去が出来ていない．

(2) 図 9(a) は，分散最大マップ作成処理で分散値が最大で，どの画像が選択され使用されたか，すなわち画像 ID を表した図で，図 9(b) は，画像選択処理の結果である．図 9(a) の赤，緑，青などの領域を大域的に眺めたときに，その領域内には粒状の別の色の領域が含まれていることが分かる．それが，図 9(b) の統合画像においてノイズ状に現れている．

(3) グラフカットを用いてある程度のもつまった領域にする処理を行った結果が図 10 である．図 10(a) はグラフカット処理後の画像 ID を表した図で，最終的に得られた統合画像が，図 10(b) である．グラフカットを行うことで，領域内の粒状のノイズを取り除くことができた．

(4) 図 11 は，屋外の別の原画像を用いたときの原画像である．図 11(a),(b) は，むらのあるヘイズを含んだ原画像 6 枚のうちの 2 枚で，図 12(a) は，グラフカット処理により得られた画像 ID のマップで，図 12(b) は，最終的に得られた統合画像である．入力画像では，ヘイズが濃すぎてほとんど見えなかった部分が，大きく改善されていることが確認できる．

(5) 図 13 は，色情報最小値で画像を選択し統合した結果である．図 13 (a) では，提案手法と比べると光の強い部分でヘイズ除去がうまく働かなかったり，図 13 (b) では，窓のところでノイズが見られる．

(6) 図 14 は，屋内の画像を用いたときの原画像および処理結果である．屋内は，自然画像と異なり，Dark Channel Prior が厳密には成立しないため，本来はうまくヘイズ除去できないはずであるが，ヘイズの影響で，ほとんど見えなかった背景が，提案手法の適用により，違和感が残るものの画像の可視性が改善されたことが分かる．

5. まとめ

本研究では，大きく濃度変化し，むらのあるヘイズ画像からヘイズを除去する手法を提案した．従来のヘイズ除去では，ヘイズが空間中で一様であることを前提としており，濃度変化のある状態には対応できていなかった．提案手法では，複数枚の画像を用いて分散および tmap を組み合わせ，ヘイズの濃淡が少ない画像をうまくつなぎあわせて，全体として画像の可視性の改善をはかった．これにより，一枚だけでは取ることが難しかった濃淡のあるヘイズの除去を行うことができた．

しかしながら，結果画像では，まだヘイズが少し残っていることが分かる．周辺の情報などを用いて，これを軽減することが今後の課題である．

謝辞 本研究の一部は，総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) ICT イノベーション創出型研究開発 (101710002)，文部科学省科学研究費補助金 (21200002) および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030) の助成を受けて実施されたものである．ここに記して謝意を表す．

文献

- [1] Robby T. Tan, "Visibility in Bad Weather from a Single Image," Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on, 2008.
- [2] Raanan Fattal, "Single Image Dehazing," ACM SIGGRAPH 2008 papers, pp.72:1-72:9, 2008.
- [3] Kaiming He, Jian Sun, Xiaoou Tang, "Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior," Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on, pp.1956-1963, 2009.
- [4] Y.Y. Schechner, S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Instant Dehazing of Images using Polarization," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol.I, pp.325-332, Dec, 2001.
- [5] Y.Y. Schechner, S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Polarization-Based Vision through Haze," Vol.42, No.3, pp.511-525, Jan, 2003.
- [6] Peter Carr, Richard Hartley, "Improved Single Image Dehazing Using Geometry," Digital Image Computing: Techniques and Applications, pp.103-110, 2009.
- [7] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Vision and the Atmosphere," International Journal on Computer Vision, Vol.48, No.3, pp.233-254, Jul, 2002.
- [8] Yong Du, Guindon, B. and Cihlar, J., "Haze detection and removal in high resolution satellite image with wavelet analysis," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 1, pp.210-217, 2002.
- [9] Anat Levin, Dani Lischinski, Yair Weiss, "A Closed-Form Solution to Natural Image Matting," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 228-242, February, 2008.
- [10] 石川博, "グラフカット," 情報処理学会研究報告, 2007-CVIM-158-26, pp.193-204, 2007.
- [11] Yuri Boykov, Olga Veksler, Ramin Zabih, "Fast Approximate Energy Minimization via Graph Cuts," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp.1222-1239, November, 2001.
- [12] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake, "'grabcut': interactive foreground extraction using iterated graph cuts," ACM Trans. Graph., Vol.23(3), pp.309?-314, 2004.



画像1

画像2

画像3



画像4



画像5



画像6

図 6 むらのあるヘイズを含んだ画像



画像1



画像2



画像3



画像4



画像5



画像6

図 7 マッティング処理後の tmap



画像1



画像2



画像3



画像4



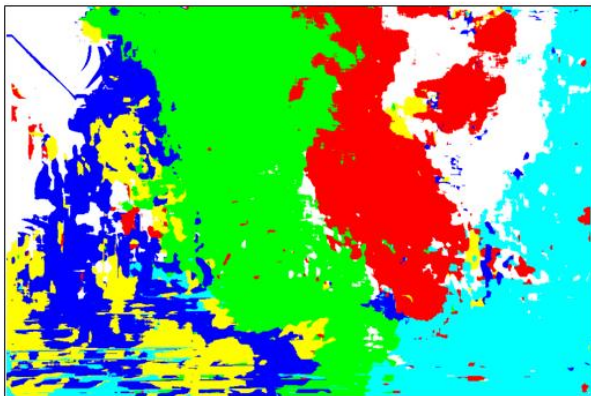
画像5



画像6

図 8 Dehazing 結果

白：画像1 赤：画像2 緑：画像3
 青：画像4 黄：画像5 水色：画像6



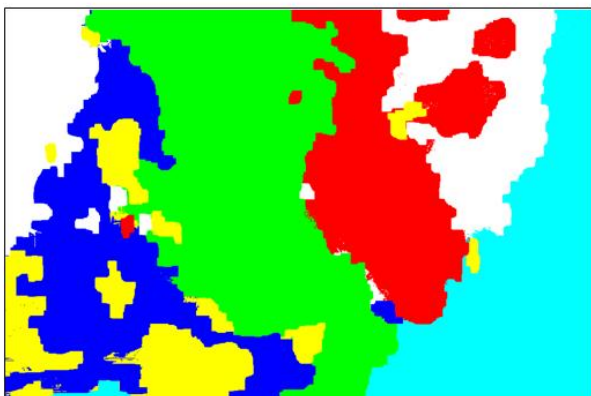
(a) どの画像が選択されたかを表す (画像 ID)



(b) 統合画像

図 9 分散値および tmap を用いた画像選択

白：画像1 赤：画像2 緑：画像3
 青：画像4 黄：画像5 水色：画像6



(a) グラフカット処理後の画像 ID



(b) 統合画像

図 10 グラフカット処理後の画像



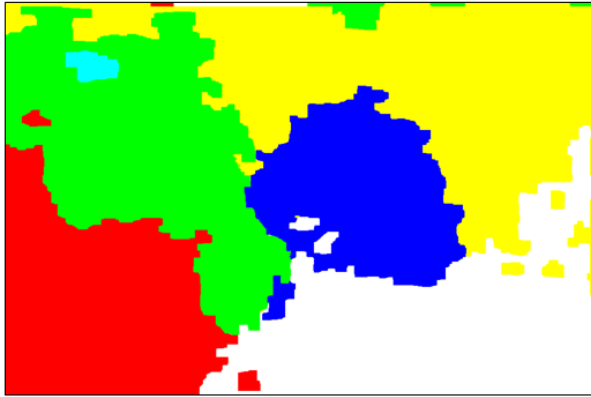
(a) むらのあるヘイズを含んだ原画像 1



(b) むらのあるヘイズを含んだ原画像 2

図 11 別の写真の原画像 (屋外 2)

白：画像1 赤：画像2 緑：画像3
 青：画像4 黄：画像5 水色：画像6



(a) グラフカット処理後の画像 ID



(b) 統合画像

図 12 別の写真での結果（屋外 2）



(a) 屋外 1



(b) 屋外 2

図 13 色情報最小値を用いた場合の結果



(a) むらのあるヘイズを含んだ原画像



(b) 統合画像

図 14 別の写真の原画像と結果（屋内）