

「霧」や「もや」などをクリアにする 高速画像処理技術

Fast Single-Image Defogging

● 譚 志明 ● 白 向暉 ● 王 炳融 ● 東 明浩

あらまし

社会生活に安心・安全を提供するために、防災・防犯のための監視カメラや、事故予防の車載カメラなどの画像が活用されている。しかし屋外カメラの映像は、霧や霞、^{かすみ}塵埃^{じんあい}などの悪天候によって、しばしば鮮明さが低下する。富士通研究開発中心有限公司は、監視カメラや車載カメラの視認性を向上させるため、ダークチャネル処理に基づく高速霧除去画像処理技術を提案する。この方法ではまず、霧画像の空領域を探索することによって環境光を推定する。次に、霧や霞による光の散乱の度合いを示す透過マップを推定する。最後に、環境光と透過マップにより霧画像から鮮明な画像を復元する。CPU+GPUにソフトウェアを実装することにより、720×480画素の画像で50 fpsという処理速度を実現した。本高速霧除去画像処理技術により、監視システムや車載などの用途で、リアルタイムに鮮明な画像を使用できる。

Abstract

Bad weather conditions such as fog, haze, and dust often reduce the performance of outdoor cameras. In order to improve the visibility of surveillance and on-vehicle cameras, we propose a fast image-defogging method based on a dark channel prior. It first estimates the atmospheric light by searching the sky area in the foggy image. Then it estimates the transmission map by refining a coarse map from a fine map. Finally, it produces a clear image from the foggy image by using the atmospheric light and the transmission map. We achieved a run speed of 50 fps @ 720 × 480, with a software implementation on a central processing unit (CPU) with a graphics processing unit (GPU). This fast image-defogging method can be used in surveillance and driving systems in real time.

まえがき

監視カメラや車載カメラ、デジタルカメラは、現代の生活の様々な場面で利用されている。これらのカメラを屋外で使用する場合、霧^{かすみ}や霞^{じんあい}、塵埃などの悪天候は、しばしば撮影映像の鮮明さを低下させる原因となり、視認性が大きく悪化することがある。このような場合、空气中に多くの微粒子（2.5 μm以下の微小粒子状物質PM2.5など）が存在し、これが実物体からの放射を散乱させる。特に遠くからは、人間の目では走行中の自動車や歩行者、ナンバープレートなどの物体をはっきりと識別することができない。

富士通研究開発中心有限公司では、リアルタイム用途に使用するため、画像の霧除去の品質を維持しつつ単一画像を用いた霧除去の処理速度の向上を図る技術を開発した。画像の霧除去とは、霧や霞、塵埃の影響を排除し、物体の鮮明度を向上させることである。この分野の従来手法は、霧画像とそれ以外の情報を利用するもので、非単一画像霧除去方法と呼ばれている。例えば、偏光ベースの方法⁽¹⁾、⁽²⁾は偏光度の異なる2枚以上の画像を使用する。また、深度ベースの方法⁽³⁾、⁽⁴⁾は別の方法で取得した深度情報を利用する。そのほかの方法⁽⁵⁾、⁽⁶⁾は同じ情景を天候の違うタイミングで撮影した複数の画像を使用する。このような方法はいずれも、リアルタイム用途には利用できない。

単一画像霧除去方法は霧画像1枚のみを入力として使用するもので、入力映像をフレームごとに霧除去処理できるため、監視カメラや車載カメラの用途に適している。単一画像霧除去方法では、情景放射による光が、霧や霞の粒子に散乱されずにカメラに到達する度合い（透過マップ）の推定に多くの処理時間を必要とし、鮮明度への影響が大きい。

今回提案の方法では、局所画素情報に基づく二つの単純なフィルターを組み合わせることで透過マップを推定する。従来技術と比較し100倍以上高速で処理するため、監視システムや車載システムの用途に適している。

本稿では、次章で画像霧除去モデルや従来の方法、ダークチャネル処理などの従来技術を説明する。それに続いて著者らの霧除去画像処理アルゴ

リズムと、その実装と適用について述べる。

従来技術

● 画像霧除去モデル

霧画像モデルは以下の式で記述できる。

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

ここで x は画素位置、 $I(x)$ は霧画像、 $J(x)$ は情景放射で、これが霧除去（鮮明）画像として見えるものである。 $t(x)$ は透過マップで、情景放射による光が霧や霞の粒子に散乱されずにカメラに到達する度合いを示す。 A は環境光で、全ての画素で同一である。このモデルでは $J(x)t(x)$ を直接減衰と呼び、情景情報が散乱なくカメラに到達する度合いを示す。 $A(1 - t(x))$ は環境光が霧画像に及ぼす影響の度合いを示す。

図-1は霧画像モデルである。まず入力霧画像 $I(x)$ から透過マップ $t(x)$ と環境光 A を推定する。これで鮮明画像 $J(x)$ を $I(x)$ から復元できる。これは一つの既知数 $I(x)$ から三つの未知数 $t(x)$ 、 A 、 $J(x)$ を決定する必要があるため、数学的アルゴリズムによる計算解を一意に得ることはできない不良設定問題である。

透過マップは大気による減衰を意味しており、次の式で表わされる。

$$t(x) = e^{-\beta d(x)}$$

ここで β は環境光の散乱係数で、 $d(x)$ は物体からカメラまでの距離である。環境光による減衰は、光が通過する距離が長くなるほど大きくなるため、透過マップは近景の物体が写っているときは値が大きく、遠景の物体では値が小さい。霧画像においては、透過マップは霧濃度を表し、霧濃度は遠景で高く、近景で低くなる。物体ごとに正確な霧濃度を推定することは容易ではなく、特にエッジでは急に変化するため困難である。

● 霧除去の方法

この不良設定問題を解決するため、従来のほとんどの単一画像霧除去方法では前処理や仮定を利用する。 $\text{Tan}^{(7)}$ は、霧や霞のない画像は霧画像や霞画像よりもコントラストが高いと考え、霧除去画像のコントラストを最大化して霧を除去している。 $\text{Fattal}^{(8)}$ は透過と表面シェーディングは局所的に無相関であると仮定し、物体の拡散光を推定することによって霧除去を行い、透過マップを推

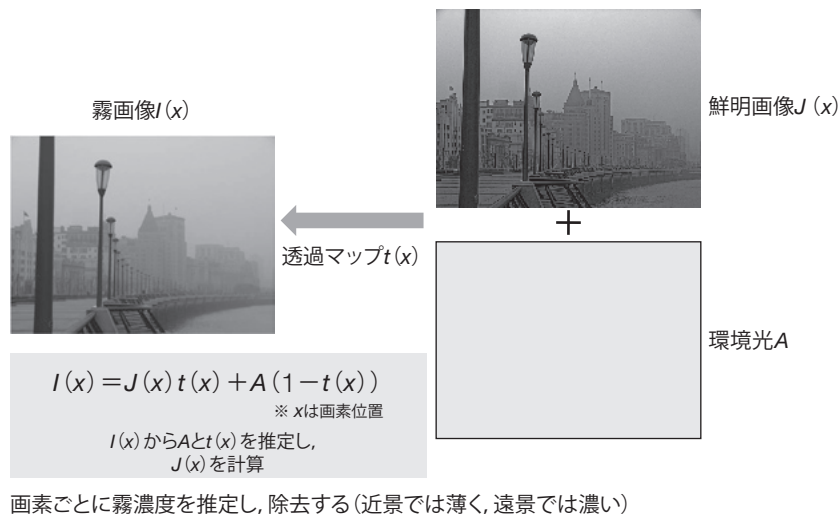


図-1 霧画像モデル

測している。Kratzら⁽⁹⁾は物体の拡散光と情景の深度を統計的に独立した二つの成分と仮定し、マルコフ確率場モデルにより画像を物体の拡散光と深度に因数分解している。Heら⁽¹⁰⁾は屋外の霞なし画像の統計に基づいてダークチャンネル処理を使用し、粗い透過マップを推定して生成することにより、霞を除去している。Tarelら⁽¹¹⁾は、大気のパールが正で $I(x)$ の成分の最小値より小さいと仮定し、メジアンフィルタを使用して求めている。

これらの方法のうち、Heの方法のアルゴリズムフレームワークが最も単純で霧除去品質が高い。ただし、3.0 GHzのIntel Pentium 4プロセッサを搭載したPCを使用して600×400画素の画像1枚の処理に10～20秒かかる。このような低速度では、監視カメラや車載カメラの用途には使用できない。

● ダークチャンネル処理

ダークチャンネル処理は、Heらの屋外の霞なし画像の観察に基づいている。空以外の画像領域のほとんどでは、少なくとも色チャンネル一つが一部の画素で非常に強度が低いということである。

ここでダークチャンネルは次のように定義できる。

$$I^{dark}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} I^c(y))$$

I^c は I の色チャンネルで、 $\Omega(x)$ は x を中心とする局所領域である。

5000枚の日中の霞なし画像の検討により、全画素の約75%はダークチャンネルの強度が0であり、同じく90%のダークチャンネルの強度が25に満たない(最大値は255)と結論付けている。Heらはダーク

チャンネルの強度が低い理由には、影、色の鮮やかな物体、暗い物体の三つの要素があるとしている。

霧画像の場合、ダークチャンネルはそれほど暗くない。環境光が加わるため、鮮明画像よりも霧画像のほうが明るくなり、霧画像のダークチャンネルは強度が高くなる。したがって、ダークチャンネルの強度は霧濃度を示し、物体までのおおよその距離も示すことになる。

開発アルゴリズム

● 概要

著者らの高速霧除去アルゴリズムは、ダークチャンネル処理に基づくものである。従来技術の章で説明した霧画像モデルからダークチャンネルを得る場合、次のように表現される。

$$I^{dark}(x) = J^{dark}(x)t(x) + A^c(1-t(x))$$

ここで $I^{dark}(x)$ は霧画像のダークチャンネル、 $J^{dark}(x)$ は鮮明画像のダークチャンネル、 A^c は環境光の色チャンネルを示す。鮮明画像のダークチャンネルのほとんどの輝度値は0であるため、上式は次のように書き換えることができる。

$$I^{dark}(x) \approx A^c(1-t(x))$$

これを基に、透過マップを推定する式を得ることができる。

$$t(x) \approx 1 - I^{dark}(x)/A^c$$

霧画像の空領域については、距離が無限遠であるため、この領域の $t(x)$ はほぼ0になり、空の色は環境光 A の値と等しくなる。

図-2は霧除去のフレームワークである。まず、入力霧画像 $I(x)$ から環境光 A を推定する。次に、 A と $I(x)$ から透過マップ $t(x)$ を推定する。最後に、画像霧除去モデルに従って霧除去画像を復元する。

● 環境光の推定

環境光 A を推定することは、空領域を特定することである。まず、 $I^{dark}(x)$ の上位0.1%の高強度画素を抽出する。この画素のうち、霧画像 $I(x)$ の輝度値が最も高い画素を環境光として選び出す。環境光領域の推定の例を図-3に示す。図中矩形領域で示した部分が環境光の位置である。

● 透過マップの推定

著者らの透過マップ $t(x)$ の推定方法を図-4に示す。入力霧画像からまず粗マップを得る。これは、局所領域の霧濃度を表す。次に、詳細な画像エッジ情報を示す詳細マップを得る。最後に、この二つのマップを合成して各画素の霧濃度を表す透過マップ $t(x)$ を得る。

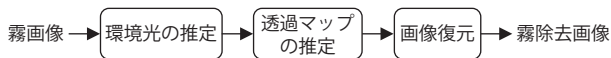


図-2 霧除去のフレームワーク



図-3 環境光の位置



図-5 ハロー効果の生じた霧除去画像



図-4 透過マップ推定方法

以降詳細に説明する。ダークチャンネル処理の節で述べた局所領域に基づくダークチャンネルを粗マップと呼ぶ。

$$M^{coarse}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} I^c(y))$$

これにより、まずR、G、Bの各チャンネルの局所領域の最小値を探し、現行画素値をこの最小値と置き換える。

単に粗マップを $t(x)$ として使用した場合、すなわちエッジの詳細を維持した透過マップを得られない場合、最終的な復元画像には図-5に示すようにハロー効果が発生する。この問題を克服するには、バイラテラルフィルタやガイドドフィルターなど多くのエッジ保存フィルターの使用が提案されている^{(12), (13)}しかし、このようなフィルターを使用すると多くの時間を要する。

著者らはこの問題を解決するためにより単純な方法を使用する。R、G、Bの各チャンネルの最小値を持つ詳細マップを次式で得る。これは霧画像のエッジ詳細情報を表す。

$$M^{fine}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x)$$

この詳細マップから、次式により粗マップを整

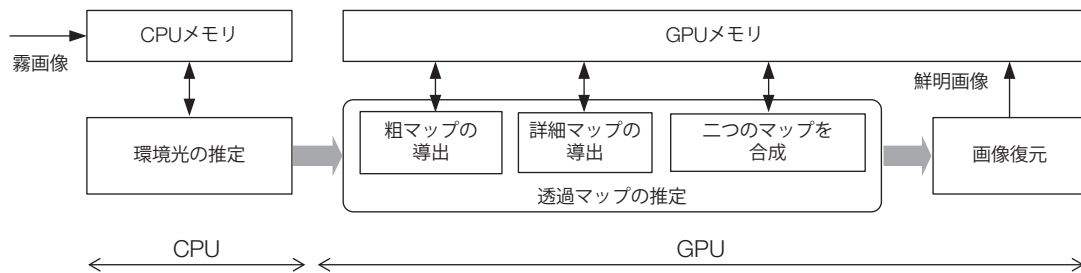


図-6 高速画像霧除去の実装



(a) 霧画像

(b) 霧画像の部分

(c) 霧除去画像

(d) 霧除去画像の部分

図-7 霧除去結果の例

形する。これで、粗マップの x を中心とする局所ブロックを検索して、詳細マップの位置 x にある画素の最も近い値を探す。これは、詳細マップのブロックの最大値を探し、詳細マップの位置 x にある画素の値と比較して最小値を選び出すことによって可能である。これを次式に示す。

$$M^t(x) = \min(\max_{y \in \Omega(x)} M^{coarse}(y), M^{fine}(x))$$

これで透過マップ $t(x)$ を次式により得ることができる。

$$t(x) = 1 - \omega \cdot M^t(x) / A$$

ω は画像の霧除去の度合いを表すパラメーターで、1より小さく、0より大きい。この値が0.9であれば、遠景の物体にかかる霧の量は非常に少なくなる。この値がもっと小さい場合、より多くの霧が画像に残る。

● 画像の復元

最後に、次式により鮮明画像を復元する。

$$J(x) = (I(x) - A) / \max(t(x), t_0) + A$$

ここで t_0 は0による除算を避けるための定数値である。

実 装

画像霧除去のフレームワークでは、透過マップ

の推定が時間のかかるプロセスである。今回の方法では、位置 x の局所情報を使用し、画素ごとに画像を処理できるようにした。これで並列処理が容易になり、GPUに実装できる。まずCPUで霧画像から環境光を計算し、次に霧画像と環境光をGPUメモリに入力する。GPUはメモリからデータをテクスチャとしてフェッチして処理を行い、霧除去画像をレンダリングしてGPUメモリのフレームバッファに入れる。CPU+GPUの実装のフレームワークを図-6に示す。2.53 GHzのIntel i5 CPUとNVIDIA GeForce 310M GPUを搭載したノートPCを使用し、720×480画素の画像で約50 fpsの速度を実現した。

図-7は処理の結果である。(b)と(d)に示すとおり、特に遠景で霧除去されている。

む す び

今回提案したのは、ダークチャネル処理による高速霧除去画像処理技術である。この方法では重要ステップとして、画像局所情報のみを用い、詳細マップを使用して粗マップを整形することにより透過マップを推定する。これで、霧除去品質を維持して鮮明画像を得、かつ参照方法と比較して

100倍の処理速度の向上を実現した。この技術により、監視システムや車載システムなどで、リアルタイムに鮮明な画像を使用できる。

参考文献

- (1) Y. Y. Schechner et al. : Instant Dehazing of Images Using Polarization. *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceeding of the 2001 IEEE Computer Society Conference, Vol.1, p.325-332, 2001.*
- (2) S. Shwartz et al. : Blind Haze Separation. *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceeding of the 2006 IEEE Computer Society Conference, Vol.2, p.1984-1991, 2006.*
- (3) J. Kopf et al. : Deep Photo : Model-Based Photograph Enhancement and Viewing. *SIGGRAPH Asia, 2008.*
- (4) S. G. Narasimhan et al. : Interactive (De) Weathering of an Image Using Physical Models. *Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision, 2003.*
- (5) S. G. Narasimhan et al. : Chromatic Framework for Vision in Bad Weather. *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceeding of the 2000 IEEE Conference, Vol.1, p.598-605, 2000.*
- (6) S. G. Narasimhan et al. : Contrast Restoration of Weather Degraded Images. *The IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, No.6, p.713-724 (2003).*
- (7) R. Tan : Visibility in Bad Weather from a Single Image. *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceeding of the 2008 IEEE Conference, p.1-8, 2008.*
- (8) R. Fattal : Single Image Dehazing. *Proceeding of SIGGRAPH 2008, p.1-9, 2008.*
- (9) L. Kratz et al. : Factorizing Scene Albedo and Depth from a Single Foggy Image. *Computer Vision, Proceeding of the 2009 IEEE 12th International Conference, p.1701-1708, 2009.*
- (10) K. He et al. : Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior. *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceeding of the 2009 IEEE Conference, p.1956-1963, 2009.*
- (11) J. P. Tarel et al. : Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray Level Image. *Computer Vision, Proceedings of the 12th IEEE International Conference, p.2201-2208, 2009.*
- (12) X. Lv et al. : Real-time Dehazing for Image and Video. *18th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, p.62-69, 2010.*
- (13) K. He et al. : Guided Image Filtering. *Computer Vision, Proceedings of the 11th European conference, p.1-14, 2010.*

著者紹介



譚 志明 (Tan Zhiming)

富士通研究開発中心有限公司 所属
現在、グラフィックス・画像処理技術の研究開発に従事。



王 炳融 (Wang Bingrong)

富士通研究開発中心有限公司 所属
現在、ステレオ対応・コンピューテーショナルフォトグラフィの研究開発に従事。



白 向暉 (Bai Xianghui)

富士通研究開発中心有限公司 所属
現在、グラフィックス・画像処理技術の研究開発に従事。



東 明浩 (ひがし あきひろ)

富士通研究開発中心有限公司 所属
現在、映像符号化、グラフィックス、画像処理技術の研究開発に従事。