

パターン類似度に基づくエネルギー最小化による画像修復

河合 紀彦[†] 佐藤 智和[†] 横矢 直和[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: [†]{norihi-k,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

あらまし 本稿では、写真についた傷など画像内の不要な部分を取り除き、その欠損領域を自動的に修復する新たな手法を提案する。従来、欠損領域の修復に関しては、パターン類似度 SSD(Sum of Squared Differences) を用いて欠損領域全体の尤もらしさを表す目的関数を定義し、それを最大化することで画像修復を行う手法が提案されてきた。しかし、同一画像内における照明条件の変化を考慮していないため、修復画像に輝度値の不自然な変化が表れ違和感が生じる場合がある。また、パターン類似度 SSD による評価尺度はパターンの変形に比較的弱いいため、画像上でテクスチャが幾何学的に連続変化する場合には、不適切なウインドウの対応を招き、修復画像がぼけてしまう。そこで、本研究ではテクスチャの明るさを考慮したパターン類似度と画像の局所性を考慮したエネルギー関数を新たに定義し、これを最小化することで、高品位な欠損領域の修復を行う。明るさを考慮したパターン類似度を用いることで、輝度値の不自然な変化を抑止することができる。また、テクスチャパターンの局所性を考慮することで、不適切なウインドウの対応付けを防ぎ、ぼけの発生を抑えることができる。実験では、様々な画像に対して欠損領域の修復を行い、従来手法との比較を行うことで手法の有効性を示す。

キーワード 画像修復, 画像補間, エネルギー最小化

Image Inpainting by Minimizing an Energy Function of Pattern Similarity

Norihiko KAWAI[†], Tomokazu SATO[†], and Naokazu YOKOYA[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Takayama 8916-5, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: [†]{norihi-k,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

Abstract Image inpainting techniques have been widely used to remove undesired visual objects in images such as damaged portions of photographs and people who have accidentally entered into pictures. Conventionally, the missing parts of an image are completed by minimizing a SSD-based energy function. In this report, the conventional energy function is extended by considering intensity changes and spatial locality to prevent unnatural intensity changes and blurs on a resultant image. In experiments, the effectiveness of our proposed method is demonstrated using various images.

Key words image inpainting, image completion, energy minimization

1. はじめに

インターネットの普及に伴い、個人が日常的に撮影した写真や映像をホームページやブログに掲載することが一般的に行われている。このような目的で、過去に撮影済みのアナログ写真をスキャナなどで電子化する際、アナログ写真の物理的な損傷(キズ, よごれ等)によりそのままの利用が難しい場合がある。また、デジタル写真や映像においては、利用意図に沿わない物体などが写っているため、そのままでは利用しづらい場合

も起こりうる。このような問題に対して、写真についた傷や意図せず写りこんでしまった物体などの画像内の不要部分を取り除き、取り除かれた領域(以下、欠損領域)を自動的に違和感なく修復することで画像の利用価値を高める画像修復に関する研究が盛んに行われている。

これら画像修復に関する基礎的な手法として、輝度値の連続性を考慮して欠損領域の周りから滑らかに輝度値を補間する手法が古くから用いられてきた[1]~[3]。これらの手法は、画素の輝度値を欠損領域の境界から内側へ徐々に伝播させること

で、写真に付いた引っかき傷のような細い領域に対しては良好な修復画像を得ることができる。しかし、大きな領域を修復した場合には細かいテクスチャが表現できず、不鮮明な画像が生成されるという問題がある。このような問題を解決するために、欠損領域内にテクスチャを合成する手法が近年盛んに研究されている。これまで、テクスチャから固有空間を生成し修復する手法 [4], [5], テクスチャを欠損領域に逐次合成し修復する手法 [6], [7], 欠損領域の尤もらしさを表す目的関数を用いてテクスチャを最適化する手法 [8] が提案されてきた。以下ではまず、各手法の特徴を概説し、本手法の位置付けを述べる。

天野らは欠損領域以外の領域から学習サンプルとして複数のウィンドウを切り出すことにより固有空間を構成し、生成された固有ベクトルを結合することで欠損領域の補間を行う BPLP 法 [4] および BPLP 法を改良した kBPLP 法 [5] を提案した。この手法では、自己相関性の高い画像に対して、欠損領域内に細かいテクスチャを再現し違和感の少ない修復を行うことができる。しかし、欠損領域を含む 1 つのウィンドウ内に必ず欠損領域以外の領域を含まなければならないという原理的な制約から、1 つのウィンドウに収まらないような大きな欠損領域を持つ画像に対しては適用が難しい。

Criminisi らは欠損領域以外の画像内の領域から欠損領域の境界のテクスチャパターンと類似する部分を探索し、最も類似したテクスチャを逐次的に欠損領域に合成する手法 [6] を提案した。この手法では、欠損領域が大きい場合にも細かいテクスチャを生成できるが、テクスチャを欠損領域の境界から内側に逐次的に合成するというアプローチを採るため、最終的に生成される画像の品質がテクスチャの合成順に大きく依存し、不連続なテクスチャが生じやすいという問題がある。これに対して、エッジ部分のつながりを手動で指定し、優先的にテクスチャを合成することでこの問題を回避する手法 [7] も提案されているが、テクスチャが複雑な場合には、修復に有効なエッジを正しく指定することが難しい。

Wexler らは欠損領域と欠損領域以外のパターン類似度 SSD を用いて画像の尤もらしさを表す目的関数を定義し、これを欠損領域全体に対して最大化することで画像を修復する手法 [8] を提案した。この手法は主に動画における欠損領域を対象とした手法であるが、静止画にも適用可能であり、テクスチャの合成順に依存せずに、欠損領域全体に対して最適な画像を生成できる。しかし、同一画像内における照明条件の変化を考慮していないため、修復画像に輝度値の不連続が表れ違和感が生じる場合がある。また、パターンの類似度を画像全体で一様に評価するため、画像上でテクスチャが幾何学的に連続変化する場合には、不適切なテクスチャの対応を招き、修復画像がぼけてしまうという問題がある。

本稿では、Wexler らの手法と同様に画像全体に対する目的関数を最適化することで画像修復を行うアプローチを採るが、新たにテクスチャの明るさを考慮したパターン類似度とテクスチャの局所性を考慮することで、不連続・不明瞭なテクスチャの生じにくい画像修復を行う。本手法では、明るさを考慮したパターン類似度を用いることで、輝度値の不自然な変化を抑止

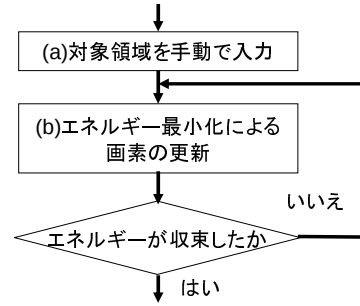


図 1 処理の流れ

し、違和感を軽減する。また、テクスチャパターンの局所性を考慮することで、不適切なウィンドウの対応付けを防ぎ、ぼけの発生を抑える。

2. エネルギー最小化による画像修復

提案手法の処理の流れを図 1 に示す。本研究では、まず写真上の傷や不要な物といった修復したい領域を画像上で手動により指定し (a), 2.2 節で定義するエネルギー関数を、2.3 節で提案する手法を用いて最小化することで、欠損領域の修復を行う (b)。以下では、まず従来から用いられてきたパターン類似度 SSD によるエネルギー関数の定義について概説し、次に、今回提案するエネルギー関数とその最小化手法について述べる。

2.1 パターン類似度 SSD によるエネルギー関数の定義

ここでは、Wexler らが提案した、SSD による画像修復のための目的関数について概説する [8]。ただし、文献 [8] では目的関数を確率密度関数として定義しているが、本研究ではこれを本質的に同等なエネルギー関数として再定義する。

パターン類似度を用いた画像修復では、図 2 に示すように、画像をユーザが指定した欠損領域 Ω を含む領域 Ω' と、画像内の Ω' 以外のデータ領域 Φ に分け、領域 Ω' 内の画像の尤もらしさをデータ領域 Φ 内の画像パターンを用いて定義する。ここでは、画像内において一定サイズの正方ウィンドウ W 内に一部でも Ω が含まれる領域を Ω' とし、欠損領域の尤もらしさを表すエネルギーを、欠損領域 Ω' 内の画素 x とデータ領域 Φ 内の画素 $\hat{x}_{org}$ 周辺のパターン類似度 SSD の重み付き総和として以下のように定義する。

$$E_{org} = \sum_{x \in \Omega'} w_x SSD(x, \hat{x}_{org}) \quad (1)$$

ただし、 $SSD(x, \hat{x}_{org})$ は以下のように表される。

$$SSD(x, \hat{x}_{org}) = \sum_{p \in W} \{I(x+p) - I(\hat{x}_{org}+p)\}^2 \quad (2)$$

ここで、 $I(x)$ は画素 x の画素値を表す。また、 $\hat{x}_{org}$ は領域 Ω' 内の画素 x 周辺のパターンと最も類似したパターンを持つデータ領域 Φ 内の画素であり、 E_{org} を最小化する $\hat{x}_{org}$ は次の式によって決定できる。

$$\hat{x}_{org} = f_{org}(x) = \underset{x' \in \Phi}{\operatorname{argmin}} SSD(x, x') \quad (3)$$

また、ここでは重み w_x として、領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ では各画素の値が

このとき、欠損領域全体のエネルギー E と各画素での要素エネルギー $E(x)$ の関係は、以下のように表せる。

$$E = \sum_{x \in \Omega} E(x) + C \quad (11)$$

C は、領域 $\bar{\Omega} \cap \Omega'$ 内にある画素に関するエネルギーであり、ここでは類似パターン位置が固定されているため定数として扱える。ここで、 E を欠損領域内のある画素の画素値 $I(x_k)$ で偏微分すれば、エネルギー E を最小化する $I(x_k)$ の必要条件は次式で表せる。

$$\frac{\partial E}{\partial I(x_k)} = \sum_{x \in \Omega} \frac{\partial E(x)}{\partial I(x_k)} = 0 \quad (12)$$

このとき、画素値 $I(x_k)$ の変化に対する輝度値補正係数 α の変化は微小であると仮定し、

$$\frac{\partial \alpha_{x_i x'}}{\partial I(x_j)} = 0 \quad (\forall x_i, x_j \in \Omega, \forall x' \in \Phi) \quad (13)$$

とおけば、 $\partial E(x)/\partial I(x_k) = 0$ ($x \neq x_k$) となり、以下の式を満たす $I(x_k)$ を求めることで、 E を最小化できる。

$$\frac{\partial E}{\partial I(x_k)} = \frac{\partial E(x_k)}{\partial I(x_k)} = 0 \quad (14)$$

これを欠損領域内の全ての画素 x について一般化すれば、欠損領域内の全ての画素値 $I(x)$ を以下のように算出できる。

$$I(x) = \frac{\sum_{p \in W} w_{x+p} \alpha_{x+p} f(x+p) I(f(x+p) - p)}{\sum_{p \in W} w_{x+p}} \quad (15)$$

なお、式 (15) は式 (13) を前提とした近似解であるが、 $I(x)$ が収束するに従って輝度値の補正係数 α の値も収束するため、エネルギーが収束するにつれて良い近似解となる。

2.3.2 各画素に対する類似パターン位置 $\hat{x}$ の更新

処理 (II) では、処理 (I) で更新された欠損領域内の画素値を用い、対応する類似パターン位置を更新する。パターン位置の更新は、基本的にはデータ領域 Φ 内の全ての画素に対して SSD' と AD を算出し、式 (7) を満たすパターン位置 $\hat{x}$ を決定することで実現できる。しかし、データ領域 Φ の全範囲を対象に毎回全探索を行うことは計算負荷が大きい。そこで、本研究では最類似パターンの位置の候補になり得る類似度の高いパターン位置をリスト化し、リスト内のみを対象として探索することで高速化を図る。図 4 に、欠損領域 Ω 内の個々の画素値を対象とした最類似パターン位置の探索とリスト化の流れを示す。処理 (I)、(II) の繰り返しの初回ではデータ領域 Φ 内の全画素を注目画素とするウインドウ内のパターンと修復画素周辺のパターンを総当たりで比較することで最類似パターンを決定し、同時に類似パターンの候補のリストを作成する。2 回目以降の処理では、後述する条件を満たす場合にはリスト内の候補から最類似パターンを探索し、条件を満たさない場合にはリストの更新を行う。これらの処理を画素独立に行うことで、無駄な探索を排除する。

まず、全探索におけるリストの作成について述べる。ここでは、全探索によって式 (7) で類似パターンの組 $(x, \hat{x})$ が定ま

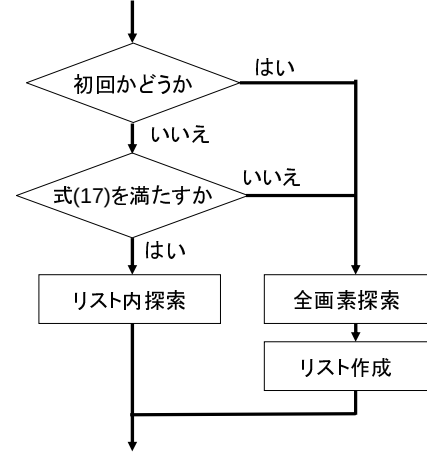


図 4 類似パターン位置の探索とリスト化の流れ

る時の評価値： $SSD'(x, \hat{x}) + w_{dis} AD(x, \hat{x})$ の値を S_{min} とおき、以下に示すようにデータ領域 Φ 内の画素に対する評価値が S_{min} の T 倍以下 (T :定数) となる全ての x' を候補としてリストに格納する。

$$SSD'(x, x') + w_{dis} AD(x, x') < T S_{min} \quad (16)$$

ただし、ここではリスト内探索の時間と全探索の頻度のトレードオフを考慮し、 T を適切に設定する必要がある。

リストが作成されれば、次回以降の類似パターンの探索はリスト内のパターンのみを用いた照合で完了するため、効率的な処理が実現できる。ただし、繰り返しによって x 周辺のパターンが更新されていくと、リスト内に最類似パターンが存在しない場合が発生する。そこで、リスト内に最類似パターンが存在することが保証されるかどうかを判定し、存在しない可能性が生じた場合には再度リストを作成する。具体的には、リスト化作成時の x 周辺のパターンと、更新を行った後のパターンの SSD が $\{(\sqrt{T}-1)/2\}^2 S_{min}$ を超えればリスト内に最類似パターンとなる位置が存在しない可能性が生じる。よって、次の式を満たさなくなった場合に x に対するリストを更新する。

$$\sum_{p \in W} \{I'(x+p) - I(x+p)\}^2 < \left(\frac{\sqrt{T}-1}{2}\right)^2 S_{min} \quad (17)$$

ただし、 I' は全探索を行いリスト化した時点での画素値、 I は更新を行った後の現在の画素値とする。

3. 実験

提案手法の有効性を示すために、PC(Pentium M 2GHz メモリ 512MB) を用い、図 6(a) に示す異なる特徴を持つ複数の画像 A~D(200 × 200 画素) を対象として実験を行った。本実験では、エネルギー関数の各種パラメータは表 1 に示すように設定し、欠損領域の境界からの距離に対する重み w_x の値は欠損領域内における重みの最大値と最小値の比率が 10 倍となるように画像ごとに設定した。また、欠損領域の指定は、図 6(b) に示すように、原画像の一部を塗りつぶすことにより手動で与えた。同図中 (c) は 2.1 節で述べたパターン類似度 SSD をエネルギーとした従来手法による修復画像であり、(d) は提案手

法を適用した修復画像である．なお，従来手法と提案手法の実装上の違いはエネルギー関数の変更のみであり，双方共にリスト化による高速化を行っている．以下，画像 A ～ D に関して考察する．

画像 A のような欠損領域の周辺での明るさやパターンの変化が小さい画像に関する実験では，従来手法，提案手法ともに違和感の少ない画像が生成されており，主観的には違いが感じられない．これに対して，画像 B ～ D のような明るさの大きな変化やパターンの連続的な変形を伴う画像に関する実験では，従来手法と提案手法との処理結果に明らかな差が生じている．

画像 B は，欠損領域周辺において明るさの変化が大きい画像である．従来手法では，座席部と背もたれ部の間のエッジがつかず違和感のある画像が生成されている．また，床の領域においては，輝度値が不自然に変化する箇所が見られる．これに対して，提案手法では明るさの変化を考慮しているためエッジがうまくつながり，また床の輝度値も連続的に変化することで違和感の少ない画像が生成されている．

画像 C は，欠損領域周辺においてパターンの連続的な変形を伴う画像である．従来手法では，欠損領域の一部が完全にぼけてしまっている．これは，SSD が比較的パターンの変形に弱いため，周辺の窓より右側の壁にウィンドウが対応してしまったことが原因であると考えられる．これに対して，提案手法ではテクスチャパターンの局所性を考慮した結果，パターンの変形にも関わらず欠損領域周辺のパターンが対応付けられ，窓のテクスチャが違和感なく再現されている．

画像 D は，欠損領域周辺において明るさの大きな変化と連続的なパターンの変形を伴う画像である．従来手法では，道路や石垣などがつながっているが，欠損領域内部の明るさの急激な変化により違和感が生じている．これに対して提案手法では，輝度値が滑らかにつながり，またパターンも比較的連続的なものが生成されているため，違和感の少ない画像が生成できている．

次に，処理時間の比較を行った．従来手法と提案手法による処理時間を表 2 に示す．表から提案手法では従来手法に対して 3 ～ 7 倍程度の処理時間が必要であることが分かる．これは，明るさの変化を考慮することで，取りうるテクスチャパターンの数が従来に比べて大きく増えたことが要因であると考えられる．

最後に，図 5 に提案手法による原寸スケール画像処理時のエ

ウィンドウサイズ	9×9
画素間距離に対する重み w_{dis}	0.002
輝度値補正係数 α に関する範囲 D	0.1
リスト化候補となる上限倍率 T	4

表 1 本実験での各種パラメータの設定

	従来手法	提案手法
画像 A	3 分 43 秒	10 分 38 秒
画像 B	4 分 35 秒	12 分 12 秒
画像 C	1 分 32 秒	5 分 06 秒
画像 D	7 分 03 秒	50 分 40 秒

表 2 従来手法と提案手法による処理時間

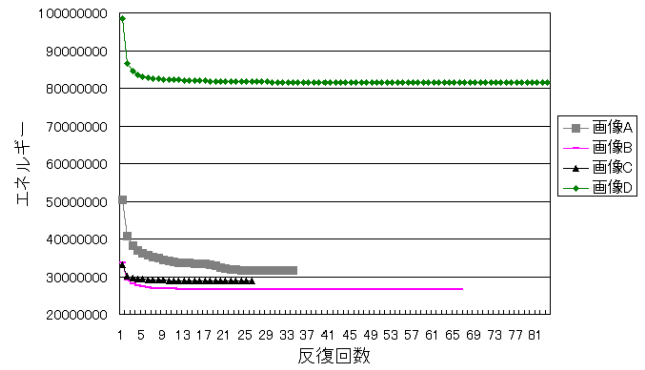


図 5 エネルギーと反復回数の関係

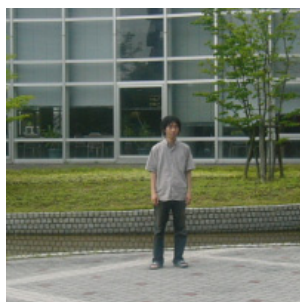
ネルギーの変化と反復回数の関係を示す．図から式 (13) による近似を用いてもエネルギーは単調に減少していることが確認できる．しかし，画像によっては数十回の繰り返し以降エネルギーがほとんど変化しておらず，収束判定を緩和することで，処理速度の改善が見込める．

4. ま と め

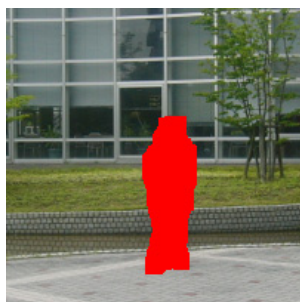
本稿では，従来から提案されているパターン類似度 SSD による画像修復手法を基礎に，明るさの変化とテクスチャパターンの局所性を考慮したエネルギー関数を新たに定義し，これを最小化することで，最適な修復画像を生成する手法を提案した．実験では，明るさの変化を考慮したことで，輝度値の不自然な変化を防ぎ，また，テクスチャパターンの局所性を考慮することでの不適切なテクスチャの対応によるぼけの発生を抑止できることを示した．しかし，ウィンドウのサイズやエネルギー関数中での重みなど，経験的に決定したパラメータが多く，パラメータの変化によって結果画像が大きく異なってしまう．今後は画像から最適なパラメータを決定する手法を確立する必要がある．また，最近傍探索の枠組みを用いることで，更なる処理の高速化を実現する．

文 献

- [1] 前田浩幸，高橋健一，太田正光：”欠損画像の修復処理の一方式”．電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J69-D, No.1, pp.91-97, 1986.
- [2] S. Masnou and J.M. Morel: ”Level lines based disocclusion”. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, 1998.
- [3] M. Bertalmio, G. Sapiro, V. Caselles and C. Ballester: ”Image Inpainting”. Proc. ACM SIGGRAPH2000, pp.417-424, 2000.
- [4] 天野敏之，佐藤幸男：”固有空間法を用いた BPLP による画像補間”．電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J85-D-II, No.3, pp.457-465, 2002.
- [5] 天野敏之，佐藤幸男：”kBPLP 法を用いた高次元非線形射影による画像補間”．電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No.4, pp.525-534, 2003.
- [6] A. Criminisi, P. Perez and K. Toyama: ”Region Filling and Object Removal by Exemplar-Based Image Inpainting”. IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 13, No. 9, 2004.
- [7] J. Sun, L. Yuan, J. Jia and H. Shum: ”Image Completion with Structure Propagation”. Proc. ACM SIGGRAPH2005, pp.861-868, 2005.
- [8] Y. Wexler, E. Shechtman and M. Irani: ”Space-Time Video Completion”. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.120-127, 2004.



(a) 原画像



(b) 指定した欠損領域



(c) 従来手法による結果画像

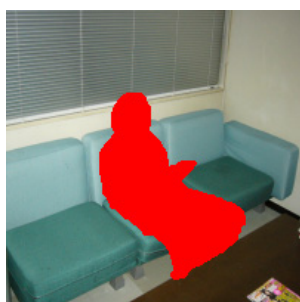


(d) 提案手法による結果画像

画像 A：明るさの変化とパターンの変形が小さい画像



(a) 原画像



(b) 指定した欠損領域



(c) 従来手法による結果画像



(d) 提案手法による結果画像

画像 B：明るさの大きな変化が伴う画像



(a) 原画像



(b) 指定した欠損領域



(c) 従来手法による結果画像



(d) 提案手法による結果画像

画像 C：パターンの連続的な変形を伴う画像



(a) 原画像



(b) 指定した欠損領域



(c) 従来手法による結果画像



(d) 提案手法による結果画像

画像 D：明るさの大きな変化とパターンの連続的な変形を伴う画像

図 6 様々な特徴を持つ画像に対する画像修復