

5

画像中の不要物除去のための画像インペインティング

河合 紀彦†

キーワード 画像インペインティング, 画像修復, 画像補間, 欠損修復, 不要物除去

1 ま え が き

「インペインティング」という言葉は、2000年に開催されたSIGGRAPHで発表された論文のタイトル“Image Inpainting”¹⁾に基づく造語であるが、それ以前から、画像中の欠損を違和感なく修復することを目的とした研究は日本においても行われている²⁾³⁾。近年では、Adobe社のPhotoshopに“[コンテンツに応じる]塗りつぶし(Content Aware Fill)”として、画像修復が実装されており、一般的にも普及しつつある。

このような画像修復の技術は、経年劣化や災害等により傷やシミが入ってしまった写真の復元、写真をウェブ上にアップロードする際のプライバシーの保護、パンフレット等で写真を利用する際の不要物の除去など、さまざまな目的に利用されることが想定される。しかし、本稿で紹介する1枚の静止画像のみを用いる画像修復手法では、除去対象物の実際の背景を復元するのではなく、あくまで周辺の情報を用いて違和感のない背景テクスチャを生成することが目的であるため、利用用途によっては注意が必要である。

画像インペインティングの分野でも、インターネット上の多数の画像をデータベースとして用いる研究や、動画像中の不要物を除去する研究もあるが、本稿では、1枚の静止画像のみを用いる研究および、それらで用いられている要素技術について紹介する。

2 静止画像インペインティング

1枚の静止画像のみを用いる欠損修復手法は、近傍画素の輝度の滑らかさに基づくアプローチと、画像内のテクスチャパターンの類似性に基づくアプローチに分類される。以下では、それぞれの代表的な手法を挙げ、そのアイデアについて概観する。

2.1 近傍画素の輝度の滑らかさに基づくアプローチ

このアプローチの代表的な文献としては、1節で紹介したBertalmioらの研究¹⁾が挙げられる。この手法では、欠



(a) 入力画像



(b) 出力画像

図1 Bertalmioらの画像修復の結果例¹⁾ (口絵カラー参照)

損領域内の隣接する画素値はエッジの方向に沿って滑らかであるというアイデアに基づき、エッジの方向に沿って画素値が滑らかに伝搬するよう繰り返し画素値を更新することで、欠損を修復する。図1にこの手法による結果例を示す。図のように、引っ掻き傷のような細い領域に対しては、良好な結果を得ることができる。しかし、まとまった大きさの欠損領域を対象とした場合には、欠損領域内部で細かな模様を持つテクスチャを再現することができないため、大きな欠損修復には適していない。このため、近年研究されている画像修復手法は、以下に述べるテクスチャパター

† 奈良先端科学技術大学院大学

"Image Inpainting for Removing Undesired Objects" by Norihiko Kawai (Nara Institute of Science and Technology, Nara)



図2 Criminisiらの画像修復の結果例⁴⁾ (口絵カラー参照)

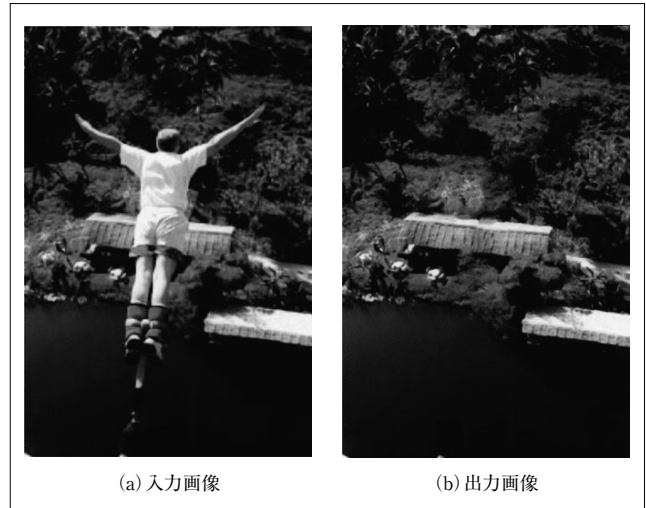


図3 Wexlerらの画像修復の結果例⁵⁾ (口絵カラー参照)

ンの類似性に基づく手法が多くを占める。

2.2 テクスチャパターンの類似性に基づくアプローチ

このアプローチでは、欠損領域内に存在すると推測される背景・物体と類似した背景・物体が同一画像内に存在するという仮定に基づき、欠損領域内のテクスチャを画像中の他の領域のテクスチャを用いて生成することで、欠損領域を修復する。このような手法は、類似したテクスチャを探索し逐次的に欠損領域内にコピーするアプローチと、全体最適化によるアプローチに大別される。以下、それぞれの代表的な研究を挙げる。

2.2.1 逐次的なコピーによる修復

Criminisi⁴⁾は、欠損領域の境界に局所的なパッチを設定し、そのパッチと最も類似するパッチを画像内から探索し、それを欠損領域内にコピーする。これを欠損領域がすべて埋まるまで繰り返すことで欠損領域全体を修復する。図2にこの手法による結果例を示す。図のように、比較的大きな欠損領域に対して複雑で自然なテクスチャが対象領域内に生成できている。しかし、逐次的にコピーをするアプローチでは、局所的には違和感のないテクスチャを生成できるが、コピーの順序に結果が大きく依存し、画像によっては処理の終盤にテクスチャが違和感なくつながらない場所が生じる。このため、近年は次に述べるコピーの順に依存しない全体最適化による手法が盛んに研究されている。

2.2.2 全体最適化による修復

Wexler⁵⁾は、欠損領域を含む局所的なパッチと画像中の欠損領域外のパッチの類似度の重み付き総和に基づくエネルギー関数(目的関数)を最小化することで、欠損領域を修復する。これは、欠損領域内の任意の局所的な領域で、欠損領域外のテクスチャと類似するようテクスチャを生成すれば、欠損領域全体として違和感なく修復できるという考えに基づいている。具体的な処理としては、欠損領域を含む局所パッチと最も類似したパッチを画像内から探索する処理と、対応付いたパッチの重み付き平均により欠損領

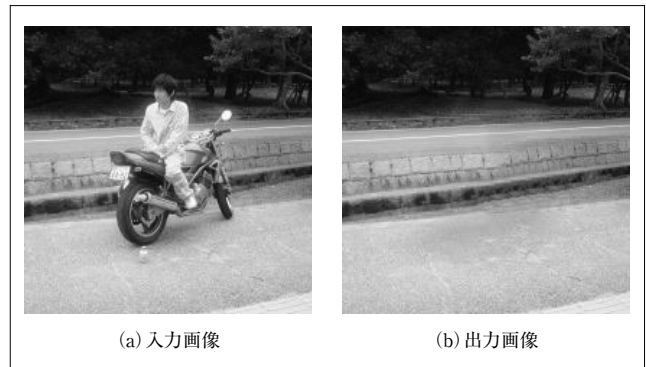


図4 筆者らの画像修復の結果例⁶⁾ (口絵カラー参照)

域内の画素値を更新する処理を、エネルギーが収束するまで繰り返す。図3にこの手法による結果例を示す。図のように、全体最適化により違和感のないテクスチャが生成できていることがわかる。なお、この手法の一部がAdobe社Photoshopの「コンテンツに応じる」塗りつぶし⁶⁾として利用されている。

また、近年の発表文献^{6)~8)}においても、Wexlerらの手法⁵⁾に基づき拡張した手法が多い。筆者らの提案した手法⁶⁾では、同一画像中には構造は同じであるが明度が異なるテクスチャが多く存在するという考えから、テクスチャの明度変化を許容した修復を行っている(図4)。Darabiらの手法⁷⁾では、一般的な画像に写る物体には対称性や同一構造のスケール変化が存在するという考えから、テクスチャの幾何学的変換を許容した修復を行っている(図5)。しかし、一般的な写真には、カメラの撮影位置に依存して、テクスチャパターンのさまざまな幾何学的変化が存在し、完全に自動で適切な幾何学的変換パラメータを推定することは難しい。そのため、Huangらの手法⁸⁾では、ユーザの簡単な入力を通じて幾何学的構造の推定を行い、それを利用して

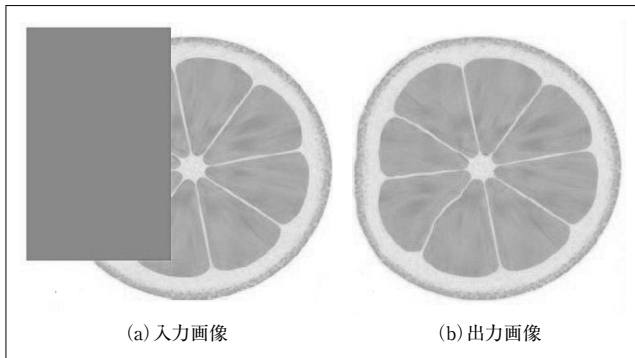


図5 Darabiらの画像修復の結果例⁷⁾ (口絵カラー参照)

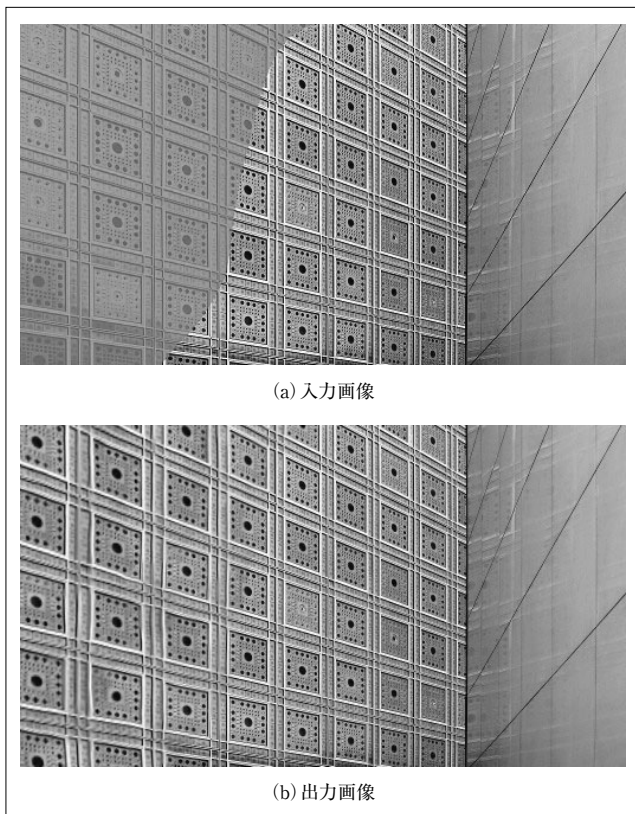


図6 Huangらの画像修復の結果例⁸⁾ (口絵カラー参照)

違和感のないテクスチャを生成している (図6)。

このように、全体最適化による手法では、さまざまな画像において良好な結果を得られているが、これらの手法で用いられているエネルギー最小化手法は、必ずしも最適解を得られる保証がなく、局所解つまり、不自然な結果が得られる場合もある。また、画像内から類似したテクスチャを探索する処理において、画像全領域を探索した場合、画像の解像度によっては膨大な時間がかかってしまう。そのため、これらの問題を緩和する方法が各研究で採られている。以下では、その方法として二つの要素技術を紹介する。

(1) 高速な探索手法

類似テクスチャパターンの探索処理では、欠損領域を含

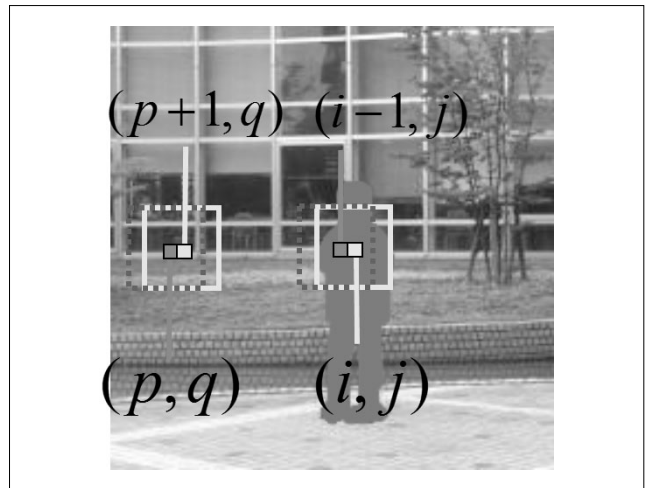


図7 PatchMatchにおける探索の一例 (口絵カラー参照)

む局所パッチ内の画素値列 (クエリ) と類似したパッチを、欠損領域以外の領域 (データベース) から探す最近傍探索問題と考えられる。最近傍探索は、木構造を用いた方法などさまざまな手法がこれまで研究されてきているが、画像修復を対象とした場合には、次元数はパッチのサイズに対応し、探索空間の大きさは画像の解像度に対応する。例えば、類似度算出に用いるパッチサイズが 9×9 で、画像の解像度が100万画素とすると81次元の空間で、100万から欠損領域の画素数だけ除いた個数のデータから最も類似したデータを見つける問題になる。このため、これまでの最近傍探索手法では、実用的なソフトウェアとして用いられるための処理の高速化としては不充分であった。

これに対して、画素値の類似度だけでなく、欠損領域内の隣接する画素同士と、それらの画素が対応付く欠損領域外の画素同士の相対的な位置関係を考慮したPatchMatch⁹⁾ と呼ばれる探索手法が提案された。具体的な処理の一例としては、左上から右下に向かってラスタスキャンをしながら、欠損領域内の各画素に対する欠損領域外の画素を順番に対応付ける場合、図7に示すように、ある欠損領域内の画素 $(i-1, j)$ が欠損領域外の画素 (p, q) に対応付いているとすると、欠損領域内の隣接画素 (i, j) においては、画素 $(p+1, q)$ に対して類似度を計算する。同様に、画素 $(i, j-1)$ が画素 (s, t) に対応付いているとすると、画素 $(s, t+1)$ に対しても類似度を計算する。次に、欠損領域からある一定範囲内のランダムな1画素に対して類似度を計算する。これを範囲を縮めながら数回繰り返す。最後に、この中から類似度が最も高い画素を画素 (i, j) に対応付く画素として決定する。もし画像全体を探索した場合には、欠損領域内の1画素につき、解像度次第で数百万回の類似度の比較をする必要があるが、PatchMatchでは解像度にはほぼ依存せず数回程度の比較のみで済む。また、それにも関わらず、結果への影響が少ないことは、Barnesらの論文⁹⁾ に掲載さ

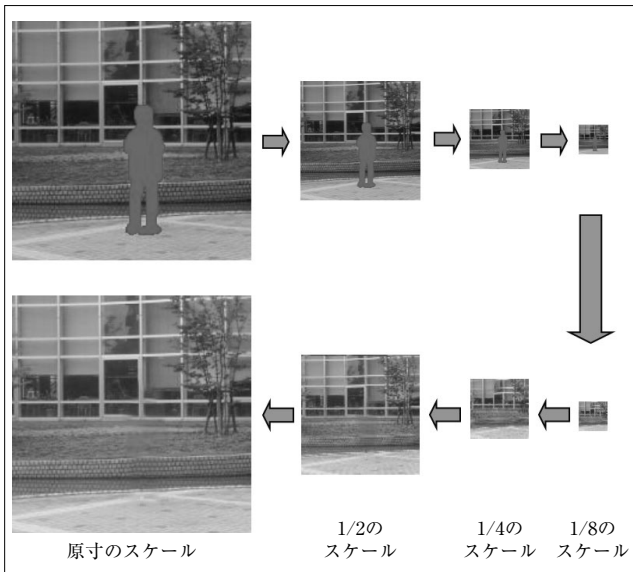


図8 マルチスケール処理 (口絵カラー参照)

れている結果より確認できる。このため、この探索手法が提案されるまで、1枚の画像に対する画像修復に数十分の時間が必要であったが、数秒で結果を出力できるようになった。

また、隣接画素の相対的な位置関係だけでなく、対称性やスケール変化等のテクスチャの幾何学的な変換も考慮した、一般化されたPatchMatch¹⁰⁾も提案されており、文献7)において利用されている。通常、テクスチャの幾何学的変換を許容すると探索空間が膨大に増えることになるが、これを用いることでその問題は緩和される。

(2) マルチスケール処理

数式を用いた最適化問題として画像修復を扱う手法において、求めるパラメータの数が欠損領域の画素数に依存するため、欠損領域が大きい場合には、最適解が容易に求まらず、また、処理コストも大きい。この問題を解決するため、多くの手法ではマルチスケール処理が用いられている。具体的には、図8に示すように、まず元の画像を段階的に縮小した画像ピラミッドを作成しておき、最も縮小した画像に対して修復処理を行う。次に、その修復結果を次の層の初期値として用いる。ここでは、単純に修復テクスチャを次の層の欠損領域の初期テクスチャとして用いるだけでなく、欠損領域の各画素と欠損領域外の画素の対応関係を次の層の初期の対応付けとして用いる。この処理を元のスケールの画像まで繰り返すことで修復を行う。これにより、処理の高速化を行うことができ、また、大局的かつ局所的

に違和感の少ないテクスチャを生成することができる。

3 むすび

本稿では、1枚の静止画像のみを用いる画像インペインティングの代表的な研究とそれらで用いられている要素技術を紹介した。さまざまな文献の実験結果を見る限り、一見どのような画像に対しても良好な結果が得られており、今後の研究課題が限られているようにも見えるが、実験で用いられている画像は提案手法が有効に働くような特徴的な画像である場合が多く、一般的な写真で良好な結果が得られるシーンは限られるように思う。このため、今後もさまざまな画像をよく観察し、法則等を考えることで、より良い画像インペインティング手法が開発できるのではないかと考える。

(2013年4月30日受付)

〔文 献〕

- 1) M. Bertalmio, G. Sapiro, V. Caselles and C. Ballester: "Image Inpainting", Proc. SIGGRAPH2000, pp.417-424 (2000)
- 2) 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", 信学誌, J69-D, 1, pp.91-97 (1986)
- 3) 東海林健二: "テクスチャ画像における欠損修復の一手法", 信学誌, J71-D, 9, pp.1701-1708 (1988)
- 4) A. Criminisi, P. Perez and K. Toyama: "Region Filling and Object Removal by Exemplar-Based Image Inpainting", IEEE Trans. Image Processing, 13, 9, pp.1200-1212 (2004)
- 5) Y. Wexler, E. Shechtman and M. Irani: "Space-Time Completion of Video", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29, 3, pp.463-476 (2007)
- 6) 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和: "テクスチャの明度変化と局所性を考慮したパターン類似度を用いたエネルギー最小化による画像修復", 信学誌, J91-D, 9, pp.2293-2304 (2008)
- 7) S. Darabi, E. Shechtman, C. Barnes, D.B. Goldman, P. Sen: "Image Melding: Combining Inconsistent Images Using Patch-based Synthesis", ACM Trans. Graphics, 31, 4, pp.82:1-82:10 (2012)
- 8) J. Huang, J. Kopf, N. Ahuja and S.B. Kang: "Transformation Guided Image Completion", Proc. Int. Conf. Computational Photography, pp.1-9 (2013)
- 9) C. Barnes, E. Shechtman, A. Finkelstein and D.B. Goldman: "PatchMatch: A Randomized Correspondence Algorithm for Structural Image Editing", ACM Trans. Graphics, 28, 3, pp.24:1-24:11 (2009)
- 10) C. Barnes, E. Shechtman, A. Finkelstein and D.B. Goldman, A. Finkelstein: "The Generalized PatchMatch Correspondence Algorithm", Proc. European Conf. Computer Vision, pp.29-43 (2010)



河合 紀彦 2005年、京都大学工学部情報学科卒業。2010年、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。2010年～2011年、カリフォルニア大学バークレー校博士研究員。2011年より、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。画像処理、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。