欠落ピースを含む方形ピースジグソーパズルの組み立て

谷口 侑平† 外山 史‡ 森 博志‡ 東海林 健二‡

宇都宮大学工学部† 宇都宮大学大学院工学研究科‡

1. はじめに

計算機を用いてジグソーパズルを解く問題は、パターン認識や組み合わせ最適化問題の一つとして知られており、考古遺物の復元、美術品修復、切断されたドキュメントの復元などの応用例が存在する。計算機でジグソーパズルを解く場合、一般的にピースの輪郭線形状が用いられるが、本研究ではピースは方形とし色情報のみを用いる。ピースの表面はフルカラー画像とし、パズルの全体のサイズは不明とする。また、ピースが欠落している場合でもパズルが完成する手法を提案する。

同様の条件でパズルを組み立てる手法として Paikin らによる手法がある[1]。Paikin らの手法では、あるピースに対してピース間の相違度が最も低いピースと二番目に低いピースとの相違度の差を元に評価値を定義している。しかし、青空のような様なピースにおいて、最も評価値が高いピースが複数存在していても優先して組み立てを行ってしまうという問題点がある。そこで本研究では、最も評価値が高いピースが複数存在している接合が曖昧なピースは終盤まで組み立てないことにより Paikin らの手法を改良したパズル組み立て手法を提案する。実験では、5種類のデータセットに対し、Paikin らの手法と提案手法との比較を行い、提案手法の有効性を確認できた。

2. 従来手法

Paikin らの手法では、2つのピースの接合辺において、隣り合う画素値の変化量に注目した相違度を定義している。色空間には $L^*a^*b^*$ 空間が用いられており、ピース p の座標 (x, y) における画素値を $p(x, y, d)$ ($d=1$ のとき L^* , $d=2$ のとき a^* , $d=3$ のとき b^*) とする。一辺のサイズが K であるピース p_i, p_j が与えられたとき、ピース p_i の右側にピース p_j を接合したときのピース間相違度 $D(p_i, p_j, right)$ は式(1)のように定義される。ピース p_i の上側, 下側, 左側にピース p_j を接合したときのピース間相違度も同様に定義される。

Assembly of rectangle piece jigsaw puzzles with missing pieces
†Yuhei Taniguchi

‡Faculty of Engineering, Utsunomiya University

‡Fubito Toyama · ‡Hiroshi Mori · ‡Kenji Shoji

‡Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

$$D(p_i, p_j, right) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^3 \left| \left([2p_i(K, k, d) - p_i(K-1, k, d)] - p_j(1, k, d) \right) \right| \quad (1)$$

式(1)によるピース間相違度が小さい順にパズルを組み立てた場合、あるピースに対してピース間相違度が小さい類似したピースが複数存在した場合においても、優先して接合されてしまう。本来、このような類似したピースが複数存在するピースの組み立ては後回しにした方がよい。そこで Paikin らは式(1)で定義された相違度を元に、すべてのピースに対して二番目に相違度が低いピースとの相違度の差を考慮した評価値を定義している。ピース p_i の r 方向 ($r \in \{up, down, right, left\}$) において、ピース間相違度のうち二番目に低い相違度を $secondD(p_i, r)$ とすると、ピース p_j との評価値 $C(p_i, p_j, r)$ は式(2)のように定義される。

$$C(p_i, p_j, r) = 1 - \frac{D(p_i, p_j, r)}{secondD(p_i, r)} \quad (2)$$

式(2)により、相違度の低さが1位のピースと2位のピースの差が大きい接合部分の評価値は高くなる。Paikin らの手法では、確実に接合できるピースから接合していくために、Pomeranz らによって提案された“best buddies”が用いられている[2]。best buddies とは、ピース p_i の r_1 方向において、最も評価値が高かったピースを p_j とすると、そのピース p_j の r_2 方向 (r_2 は r_1 の逆方向) の最も評価値が高いピースが p_i であるピースの組み合わせである。best buddies は式(3)を満たすピース (p_i, p_j) の組み合わせである。

$$\begin{aligned} \forall p_k \neq p_j, C(p_i, p_j, r_1) &\geq C(p_i, p_k, r_1) \\ \forall p_k \neq p_j, C(p_j, p_i, r_2) &\geq C(p_j, p_k, r_2) \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、best buddies の接合の強さを示すために、2つのピースの評価値の平均を相互評価値 $\tilde{C}$ とし以下の式(4)で表す。

$$\tilde{C}(p_i, p_j, r_1) = \tilde{C}(p_j, p_i, r_2) = \frac{C(p_i, p_j, r_1) + C(p_j, p_i, r_2)}{2} \quad (4)$$

Paikin らの手法では、最初に配置されるピースに、全ての方向に best buddies を持ち、その best

buddies にも 4 方向すべてに best buddies を持つピースのうち、相互評価値の総和が最も高いピースを選択することで、より特徴的な領域からパズルの組み立てを始める。次に、配置されたピースの best buddies を次に配置する候補ピースとしておき、候補ピースの中から最も相互評価値が高いピースを配置する。この配置と候補ピースの追加を繰り返すことでパズルを組み立てる。候補ピースがなくなった場合、未配置ピースと配置済みピース間で評価値を再計算し、もっとも相互評価値が高いピースを best buddies であるかに関わらず配置し、そのピースと best buddies となる未配置のピースを候補ピースに追加し、再び配置と候補ピースの追加を繰り返す。

3. 提案手法

従来手法で用いられる式(2)の評価値では、あるピースに対して、評価値が最も高くなるピースが複数個あった場合、これらのピースを区別できないにもかかわらず、best buddies として優先して組み立てている。例えば、青空のような一様なピース同士は相違度が非常に小さく、評価値が非常に高いピースが複数現れることがある。そのようなピースは間違った best buddies を組みやすいにもかかわらず、最初に配置するピースの条件を満たしやすく相互評価値も高いので優先的に接合されてしまうため、より特徴的な領域からパズルを組み立てるという本来の目的からも外れてしまう。そこで提案手法では、best buddies を組む条件に、最も評価値が高いとされるピースが1つであるという条件を加えることで、より接合に間違いないピース同士から best buddies を組ませる。

また、後に残った接合の難しい一様なピースを配置する際、パズルの形を大きく乱さないよう配置するには、組み立て途中の凹凸がある部分を埋めるのが理想である。従来手法では、候補ピースがなくなった際、配置済みピースと未配置ピースの2つのピースの接合辺の相互評価値のみを比較し次に配置するピースを選択するが、提案手法では、凹凸の部分のような接合辺が複数ある場合、隣り合うピースとの相互評価値を全て足し比較することで接合辺が複数ある位置への配置を優先させる。

4. 実験

本実験では、Paikin らが用いたものと同様の画像データセット5種類を用いた。パズルの条件として、ピースの向きは固定、パズルのサイズは不明、ピースのサイズは全て 28*28 とし、432,

540, 805 ピースの画像それぞれ 20 枚と、2360, 3300 ピースの画像をそれぞれ 3 枚の合計 66 枚を用いた。また、同様のデータセットで、5%のピースが欠落している場合についても実験を行った。ピースの絶対的な位置が正しいかの割合 (direct)、隣り合うピースが正しいかの割合 (neighbor)、パズルが完成した枚数(p)を評価基準とし、同様の条件での Paikin らの手法と比較した。実験結果を表 1, 表 2 に示す。

表 1: パズル組み立て結果 (欠落ピースなし)

総数	従来手法			提案手法		
	direct	neighbor	p	direct	neighbor	p
432	84.1%	95.7%	14	96.1%	95.8%	14
540	90.1%	95.0%	9	90.4%	95.5%	9
805	79.4%	93.8%	8	88.1%	94.8%	8
2360	92.6%	95.5%	1	92.8%	95.4%	1
3300	89.8%	94.6%	1	89.7%	95.3%	1

表 2: パズル組み立て結果 (欠落ピースあり)

総数	従来手法			提案手法		
	direct	neighbor	p	direct	neighbor	p
432	82.7%	95.4%	11	93.8%	95.1%	10
540	88.8%	94.7%	5	89.1%	95.0%	6
805	86.6%	94.3%	5	89.0%	94.7%	5
2360	88.4%	93.7%	0	88.9%	93.8%	0
3300	86.6%	93.0%	1	86.3%	94.2%	1

表 1 より、提案手法では従来手法よりも direct が大きく改善していることがわかる。また、neighbor においてもわずかながら改善している傾向がある。表 2 より、ピースが欠落している場合においても同様の改善がみられ、従来手法では完成しなかったパズルが完成しているものもあった。したがって、提案手法は従来手法よりパズルの組み立て精度が上がっているといえる。

5. むすび

本研究では、Paikin らの手法を改良したパズル組み立て手法を提案した。実験の結果、提案手法は従来手法よりパズルの組み立て精度が上がっていることが確認できた。

参考文献

- [1] G. Paikin, A. Tal, "Solving multiple square jigsaw puzzles with missing pieces," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.4832-4839, 2015.
- [2] D. Pomeranz, M. Shemesh, O. Ben-Shahar, "A fully automated greedy square jigsaw puzzle solver," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.9-16, 2011.