

# ICP による位置合わせと生成 AI による文章評価に基づく紙片復元

川原 佑斗 河合 紀彦

大阪工業大学情報科学部 〒573-0171 大阪府枚方市北山 1-79-1

E-mail: e1c22017@oit.ac.jp, norihiko.kawai@oit.ac.jp

**あらまし** 近年、DX 推進によるペーパーレス化の過程でデジタル化前の文書が誤って破損する事例や、歴史的文書の断片が複数発見される事例がある。これらの紙資料を復元するには、正しい組み合わせの紙片を探索することやそれらの復元に多くの時間を要する。本研究では、この課題を解決するため、紙片形状および文書内容を考慮して紙片同士を合成し復元する手法を提案する。破断部を抽出し、ICP による幾何学的変換によって紙片を合成する。合成した紙の文章構造に着目し、生成 AI を用いて文章の妥当性を評価し正しい紙片同士で合成できているか検証する。これにより、紙片の高精度な復元を実現する。

**キーワード** ICP・生成 AI・紙片復元・文章評価

## 1. はじめに

各企業が DX 化を目指す中で、紙資料をデジタル化する工程は必要不可欠である。しかし、企業によっては紙資料の数が膨大であり、デジタル化漏れが発生する場合も少なくない。そのような資料がシュレッダーや溶解処理によって完全に破棄されていた場合には復元は不可能である一方、手で破られて破棄されている程度であれば復元は可能である。ただし、適切な断片同士を見つけ出すには多くの時間を要する。また、歴史的文書をデジタル化する際、破れて紙片となった状態のものは復元後にデジタル化を行うが、汚損や破損の恐れがあるため慎重な取り扱いが求められる。そのため作業には多大な時間と労力を要する。

この問題に対して、従来研究として、破れた紙片の破断部の形状を用いて、正しい紙片同士の組み合わせを調査する手法がある[1]。この手法では、紙片の破断部の抽出に、破断部が上部にある、紙片の左辺と右辺は真っ直ぐであるといった複数の撮影条件が存在する。これらの条件が満たされない場合、破断部が抽出不可である。また、似た破断部形状の紙片が複数ある場合は、形状が合ったとしてもその組み合わせが適切かどうか判断できない問題がある。

本研究は、紙片輪郭の ICP による破断部の形状の位置合わせと生成 AI を用いた紙面の文書評価を合わせることで、紙片を復元する手法を提案する。提案手法では、まず、紙片の輪郭から破断部のみを抽出する。ICP により破断部同士が最も近くなる剛体変換行列（平行移動、回転）を計算し、紙片の画像合成を行う。最後に、合成後の紙片に書かれた文章が、日本語として適切であるか生成 AI を用いて評価し、正しい紙片同士で合成できているか判断する。これらにより、組み合わせ判定の精度の向上と、正確な画像合成を図る。

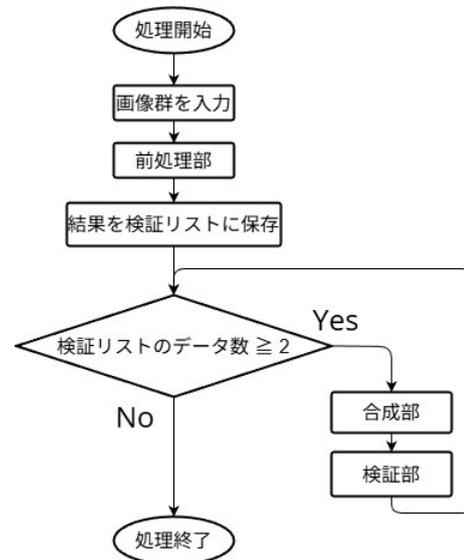


図 1 提案手法のフローチャート

## 2. 提案手法

### 2.1. 概要

本研究では、破断部を含む紙片の画像群を入力とし、適切な断片を組み合わせて紙を復元することを目的とする。ただし、入力となる紙片集合が複数の紙に由来する可能性があるため、最終的に復元される紙の枚数は事前には不定であるとする。処理の流れを、図 1 に示す。主に前処理部、合成部、検証部の 3 部に分けて各処理を行う。

ここで、処理を円滑に行うため、検証リストに画像と破断部情報の保存を行う。保存は、紙の復元に至らなかった入力画像に対して行われる。保存したデータは、紙片の合成の際に取得され、紙の復元に成功した際には、検証リストからデータを削除する。前処理部、合成部、検証部については以下で詳しく述べる。

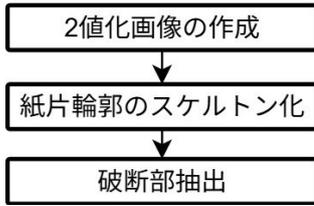


図2 前処理部のフローチャート



図3 入力画像

また、入力画像には次に示す5つの前提条件を満たすとする。

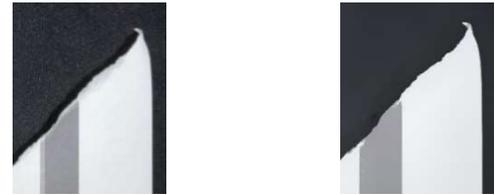
- 文章が書かれている紙片である
- 紙片全体が画像内に収まっている
- 紙片は真正面で同じ高さから撮影する
- 紙片は明るい色とし、背景は黒とする
- 文章が書かれている紙片である

## 2.2. 前処理部

前処理部の流れを図2に示す。まず、色の変換およびモルフォロジー変換を用いて、画像を紙とそれ以外の領域に2値化する。次にスケルトン化により、紙片の輪郭をグラフとして扱い、点同士の繋がりに関する情報を保存する。最後に、輪郭情報に基づき、破断部を抽出する。以下で各ステップについて詳しく述べる。

### 2.2.1. 2値化画像の作成

図3のような入力画像から、紙片領域を白、それ以外の領域を黒とした2値化画像を作成する。まず、入力画像に対して図4のように色むらを減少させることを目的としてMeanshift法を適用する。具体的には、各画素の座標 $(x,y)$ およびRGB値 $(R,G,B)$ からなる5次元の特徴量を用いて、各画素のカテゴリ分けを行う。同じカテゴリ内に属する5次元特徴量の平均値を用いて、各画素の5次元特徴量との差を計算し、差が一定以内の画素を抽出してその特徴量の平均値を計算する。この処理を繰り返し行い、カテゴリ分けを行う。カテゴリ分けが完了した時、各画素のRGB値を同じカテゴリ内のRGB値の平均値に変更する。次に、画素値をHSV色空間に変換し、明度(V)を用いて図5に示すように2値化処理を行う。ここで、紙片の輪郭抽出をそのまま行くと、紙片領域に大きな穴が生じているような状態になるため、クロージング処理を使用し穴を



(a) 入力画像の一部拡大 (b) Meanshift法適用後

図4 Meanshift法による色変換



図5 明度を用いた2値化画像

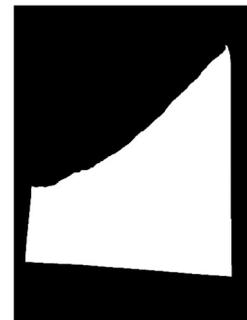


図6 紙片領域を白とする2値化画像

埋める。最後に、Suzukiらによる輪郭抽出技術[2]を用いて紙片輪郭を抽出し、輪郭の内側を白で塗りつぶすことで図6のような紙片領域を白、それ以外を黒とした2値化画像として取得する。

### 2.2.2. スケルトン化

2値化画像を基に、紙片輪郭を白、それ以外を黒とした画像を生成し、紙片輪郭のスケルトン化を行う。図7に示すような紙片輪郭画像を、Suzukiらによる輪郭抽出技術[2]を用いて作成し、Zhang-Suenの細線化アルゴリズム[3]に基づいたスケルトン化を行う。これにより、細線化後に残った白画素は、隣り合う白画素の座標を保持する点群となる。本研究では、各点群をノードとして定義する。また、あるノードから他のノードまでを辿る経路をエッジとして定義する。

### 2.2.3. 破断部抽出

スケルトン化した紙片輪郭を基に、破断部の端点を特定し、破断部の端点のノードをつなぐエッジを抽出する。まず、破断部の端点を特定するため、Douglas-Peuckerのアルゴリズム[4]で図8のような紙片輪郭の単純化を行い、紙片の各辺の端点の座標を抽出する。

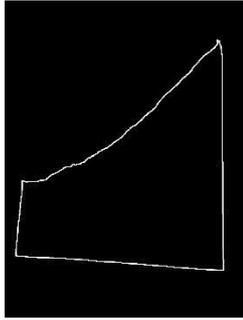


図 7 紙片輪郭を白とする 2 値化画像

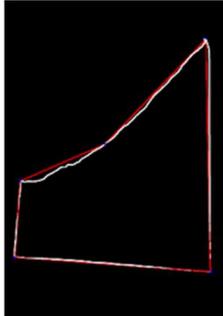


図 8 紙片輪郭を単純化した画像

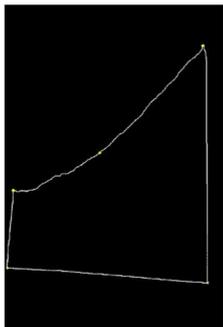


図 9 端点候補を黄色で表示した画像

次に、各辺の端点の座標に最も近いノードを図 9 のように抽出し、それらを破断部の端点候補とする。ここで、破断部は手で破るなどの行為により不規則な曲線となると仮定し、端点候補から破断部の端点を特定するため計算を行う。

具体的には、隣り合う端点候補間のエッジについて、上下左右を 1、斜めを  $\sqrt{2}$ 、とした総和の距離を、紙片輪郭の単純化の際に得た隣り合う端点候補間の線分のユークリッド距離で割る。これにより求められた値は図 10 に示すように 1 が最大であり、1 に値が近いほど直線で、小さくなるほど複雑な曲線とみなせる。このため、値が一定以下であればその端点候補間の辺を図 11 に示すような破断部とみなす。ここで、同図の青色や橙色に示すように、紙片輪郭の単純化の結果によっては破断部が複数に分かれる可能性がある。紙の破り方は不定であるため、別れた破断部を結合し、一本の破断部とした場合に後の合成部で正しい合成が出来る可能性がある。本研究では、破断部の端点と同じ座標

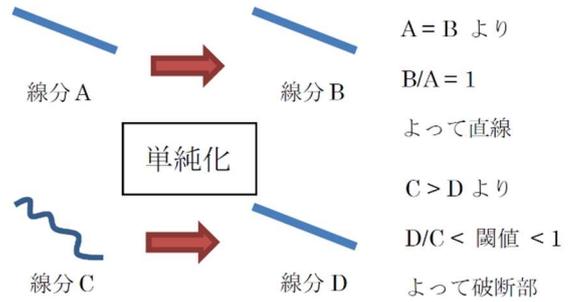


図 10 単純化による破断部の判定

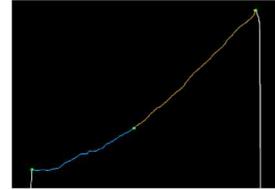


図 11 破断部を表示した画像



図 12 統合破断部を赤色で表示した画像

を持つ場合、その破断部同士を結合した図 12 のような破断部を追加で作成し、合成に用いる。

### 2.3. 合成部

合成部では、前処理部で抽出した破断部情報や端点情報を用いて、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムに基づき紙片同士の合成を行う。ICP アルゴリズムとは、2つの点群間の位置合わせを行うための反復的な最適化手法である。まず、一方の点群に含まれる各点に対して、他方の点群の中で最も近い点を対応点として求める。次に、得られた対応点に基づき、点群間の距離誤差が最小となるような剛体変換を推定する。この処理を誤差が収束するまで繰り返すことで、2つの点群の最も近い位置関係を求めるものである。本研究では、繰り返し回数を最大 50 回、収束判定は今回の処理の誤差から 1 つ前の処理の誤差の差が  $10^{-6}$  以下である場合収束したとみなす。合成処理には、以下の手順で ICP を適用する。

まず、入力画像の紙片の破断部と検証リストから取得した合成対象の紙片の破断部の 2 つを用いて、破断部の同士が最も近い位置関係になるために必要な剛体変換行列を、ICP を使って求める。なお、ICP は初期位置や姿勢に大きく依存し、結果として局所的な最も近い位置関係しか求められないため、破断部同士の位置と姿勢が大きく異なる場合、正解と程遠い局所解に陥る可能性がある。そこで、画像を  $0^\circ$  から  $330^\circ$  まで  $30^\circ$

回転しながら ICP を用いて剛体変換行列を求め破断部を移動させた後、最も誤差の少ない角度での ICP の結果を採用する。誤差は各破断部の点群から最も近い破断部までのユークリッド距離を求め、平均値を算出したものである。次に、2 値化画像をマスク画像として用いて、入力画像から紙片領域部分のみを抽出した画像を作成する。最後に求めた剛体変換行列を用いて、抽出した紙片の変換を行い、合成対象の画像に合成する。

## 2.4. 検証部

検証部の流れを図 13 に示す。まず、OCR と生成 AI を用いて文字抽出を行う。次に、抽出結果の文章について日本語としての自然さを生成 AI で評価する。最後に、その角度の文字抽出結果を、他の合成後の画像と比較し、生成 AI で評価を行う。以下で各ステップについて詳しく述べる。

### 2.4.1. 文字抽出

文字抽出は、OCR (Optical Character Recognition) 技術と、生成 AI (gpt-4o) を用いる。OCR で、文字の位置情報を取得し、その位置情報をもとに生成 AI で文字抽出を行う。なお、画像の向きが不明であるため、画像を  $0^\circ$  から  $330^\circ$  まで  $30^\circ$  刻みで回転しながら、文字抽出を行い、生成 AI が最も日本語らしい文章と判断した角度での文字抽出結果を採用する。

### 2.4.2. 文章評価

文字抽出によって得た文章の妥当性を生成 AI により評価する。まず、最初の合成処理で得られた文章を暫定的に最も日本語らしい文章として保持する。その後、新たに合成処理で得られた文章と現在保持している文章を比較し、日本語としてより自然であると生成 AI が判断した文章を保持する。この操作をすべての合成処理によって得た文章に対して逐次的に繰り返すことで、最終的に最も日本語らしい文章を得られる。なお、記号は文章評価の妨げとなる可能性が高いため、評価前に事前に排除しておく。

最後まで処理が終わった際には、生成 AI を用いて文章の日本語らしさを 100 点満点で評価し、70 点以上であれば正しい紙片同士の合成が行われたと判断する。

## 2.5. 紙片の復元判定

3 枚以上の紙片の合成を行う際、本研究では、2 枚の紙片同士の合成を繰り返し行うことで復元を行う。正しい紙片同士の合成ができたかと判断された画像は、検証リストに他の破断部が残っているか調査する。ここで、破断部がまだ残っていると判断された場合は、合成画像に再度前処理を施し、検証リストに追加する。この処理を繰り返し行い、検証リストに残りの破断部が無くなった際に、紙片が復元できたと判断し、画像を出力する。

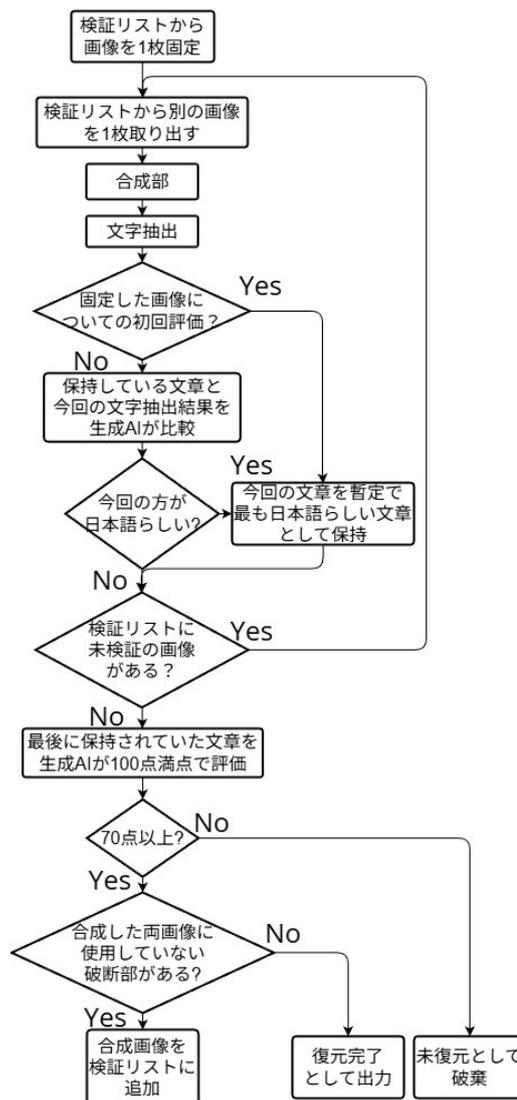


図 13 検証部のフローチャート

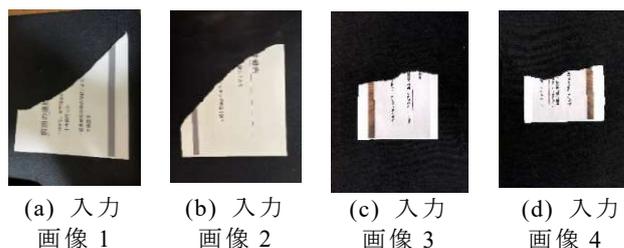


図 14 2 片からなる紙片画像

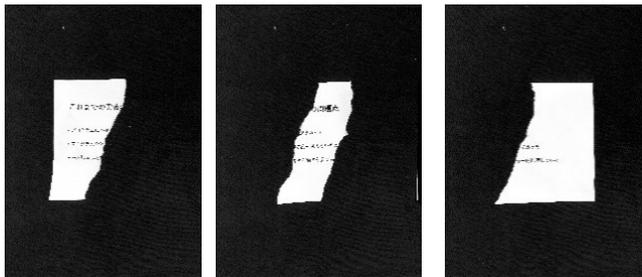
## 3. 実験と考察

### 3.1. 実験概要

本章では、前処理部における破断部抽出及び、合成部や検証部で正しい紙片が出力されるかどうかの確認を行う。実験には図 14 に示す 2 片に破られた紙片の画像 4 枚と、図 15 に示す 3 片に破れた紙片の画像 3 枚の計 7 枚を用いて実験を行う。

### 3.2. 破断部抽出結果

破断部抽出を行った画像を図 16 に示す。白以外の



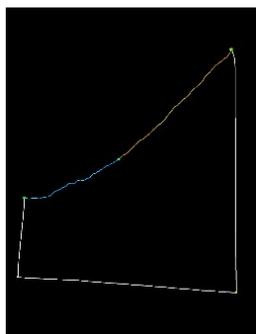
(a) 入力画像 5 (b) 入力画像 6 (c) 入力画像 7  
図 15 3 片からなる紙片画像



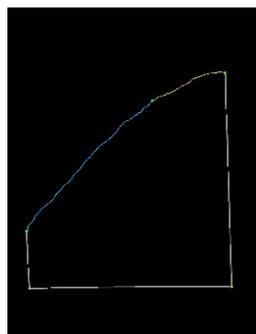
(a) 入力画像 1 と 2 の合成結果



(b) 入力画像 3 と 4 の合成結果



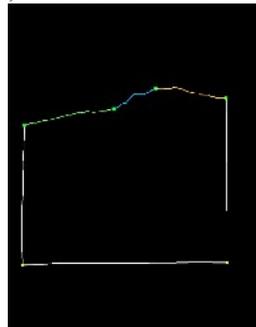
(a) 入力画像 1 の破断部



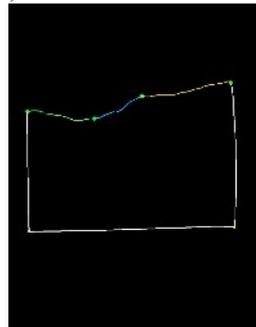
(b) 入力画像 2 の破断部



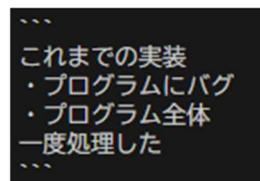
(c) 入力画像 5~7 の合成結果  
図 17 全破断部を対象とした際の合成結果



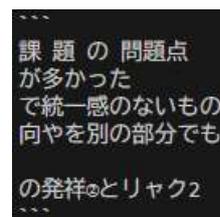
(c) 入力画像 3 の破断部



(d) 入力画像 4 の破断部

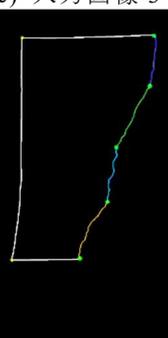


(a) 入力画像 1 の破断部

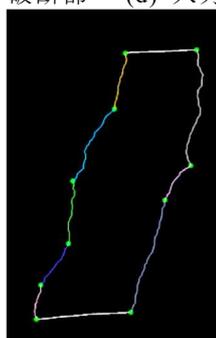


(b) 入力画像 2 の破断部

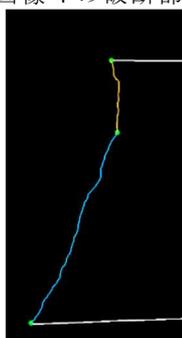
図 18 入力画像 5 と 6 のみで合成した結果群の一部文字抽出内容



(e) 入力画像 5 の破断部



(f) 入力画像 6 の破断部



(g) 入力画像 7 の破断部

図 16 破断部抽出を行った画像

色に着色されている辺が破断部と判定された辺であり、破断部が左右の辺に 2 つ存在しているが、こちらも同様に正しく抽出できていることがわかる。

### 3.3. 合成部および検証部の処理結果

図 14 および図 15 の入力画像 7 枚の全破断部を対象として合成を行った結果を図 17 に示す。図 17 に示すように、紙片の組み合わせは全ての紙片で正しい一方、

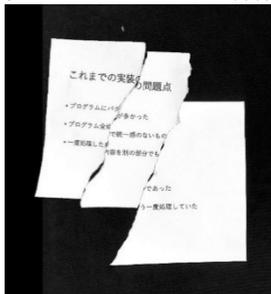
合成結果には紙片によって異なる結果となった。(a)では正しく合成、出力されている一方で、(b)は概ね正しく合成されているものの、少しずれた合成結果が出力となり、(c)は正しく合成できていない画像が出力されていることが分かる。原因として、文字抽出の精度が考えられる。(b)と(c)において、図 17 に示す合成結果以外の正しい紙片の組み合わせにおける文字抽出内容を確認した結果、(b)では、同じ文字抽出内容を得た合成結果が複数存在した。これは、ずれが生じる合成結果において、生成 AI が文章の繋がりを補完しているためであると考えられる。(c)においては図 18 の(a)に示すように入力画像 6 を無視した文字抽出結果や同図(b)に示すような補完によって画像内に無い文章を生成しているケースが見られた。これらは総じて図 17(c)に示すような紙片同士が被る合成の仕方の場合に低頻度で起きていた。そこで、合成に用いる破断部を統合した破断部に限定することで、ずれが生じる画像自体を合成結果として生成せず、また、画像内に無



(a) 結合破断部のみを用いた入力画像 1 と 2 の合成結果



(b) 結合破断部のみを用いた入力画像 3 と 4 の合成結果



(c) 結合破断部のみを用いた入力画像 5 ~ 7 の合成結果

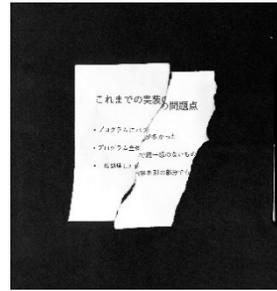
図 19 結合破断部のみを用いた合成結果

い文章を生成する合成結果の出力数も減るため、正しい結果の出力確率が上がると考えた。

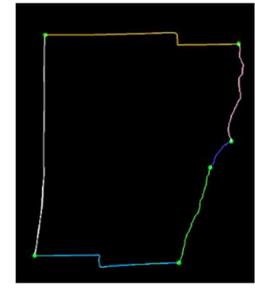
結合した破断部のみで合成した結果を図 19 に示す。同様に図 19(a)は正しく合成、出力できており、(b)も検証対象にずれた合成結果が無くなったため、正しい合成結果が出力されている。また、(c)の出力結果は入力画像 5 と 6 の 2 枚の合成は概ね正しく合成できているものの、ずれが生じている。このずれによって、2 枚で合成し 3 枚目の入力画像 7 との合成にかかる際、再度前処理を行うため図 20 のように破断部が正しく抽出できていない。

この問題について、全合成結果を確認した結果、全てでずれが生じていた。よってこの問題は、合成部に原因があると考えられる。具体的な原因として、ICP が初期位置に大きく依存することが挙げられる。紙片の重心を求めてあらかじめ近い座標に紙片を移動させた後、ICP を行うなど対策が必要である。

ここまでの実験結果として、結合した破断部のみで合成することで、全破断部を対象として合成する場合よりも、出力結果が良くなる傾向にあることが分かった。だが、統合した破断部のみで合成してしまうと、図 21 に示すような画像において、本来 2 つの破断部と判定されるべき(b)や(c)の破断部が結合されて 1 つとなってしまうため、正しい合成結果が期待できない。入力画像の柔軟性が損なわれるため、生成 AI の能力



(a) 入力画像 5 と 6 の 2 枚時点での合成画像



(b) 入力画像 5 と 6 の 2 枚時点で再度破断部抽出を行った画像

図 20 3 枚の紙片の合成途中画像



(a) 対象外となる画像 1



(b) 対象外となる画像 2



(c) 対象外となる画像 3

図 21 破断部結合のみを用いた場合に対象外となる画像の例

向上や、他の評価方法があれば、統合した破断部のみでの処理は避けるべきである。

#### 4. まとめ

本研究では、紙片輪郭の ICP による破断部の形状の位置合わせと生成 AI を用いた紙面の文書評価を組み合わせ、紙片を復元する手法を提案した。実験の結果、合成結果によっては正しく文字抽出が行われないケースがあり、生成 AI の評価にずれが生じやすいことや、ICP による位置合わせの精度を上げる必要があることが分かった。今後の課題として、ICP の精度向上に向けた処理の実装や、生成 AI を活用したより高度な評価方法の考案が考えられる。

#### 文 献

- [1] 富永 詩音 呉 建朗 伊藤 貴之 宮田 章裕, “自由に紙をちぎって電子情報を手渡すインタラクション方式の提案”, 情報処理学会インタラクション 2019 論文集, pp75-81, 2019
- [2] Suzuki, S. and Abe, K. “Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following”, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol.30, No.1, pp.32-46, 1985
- [3] Zhang, T. Y. and Suen, C. Y. “A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns”, Communications of the ACM, Vol.27, No.3, pp.236-239, 1984
- [4] Douglas, D. H. and Peucker, T. K. “Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature”, The Canadian Cartographer, Vol.10, No.2, pp.112-122, 1973