ちぎり分けられた紙片間の形状特徴マッチング技術

令和2年度　修士論文

日本大学大学院　総合基礎科学研究科
地球情報数理科学専攻　宮田研究室

6119M09　富永　詩音

概要

スマートフォンやタブレットをはじめとする電子端末の普及により，電子情報のやりとりは日常的に行われるようになった．そして時には，初対面あるいは見知らぬ相手と電子情報をやりとりすることもあるだろう．しかし，既存の方式を利用して初対面の相手との電子情報をやりとりするには，ユーザ間で個人を特定可能な ID や連絡先を交換する必要があったり，電子情報のやりとりを行っている間，しばらくその場に留まらなければならなかったり，やりとりに専用のデバイスを使用する必要があったりするため，ユーザへの心理的負担・物理的負担が大きい．この状況に鑑み，先行研究では，初対面の相手と電子情報をやりとりするシーンにおいて，紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式の提案を行ってきた．これは，ある紙を 2 片にちぎり分けたとき，各紙片の破れ目付近の特徴が合致するという性質を利用したアプローチである．

本稿では提案方式における紙片同士のマッチング成功率のさらなる向上を目指し，Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法と，破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法を提案・実装することで，ちぎり分けられた紙片間の形状特徴マッチング技術を洗練させた．従来システムとのマッチング成功率比較実験では，従来システムよりも高い成功率で紙片同士のマッチングを行えることを確認した．

本稿の貢献は次の通りである．

- Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法を提案し，紙片撮影時の周囲の光環境や影などの影響を受けにくいロバスト性の高い方法で紙片領域の抽出を行うことができるようにしたこと．
- 破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法を提案し，紙片の破れ目の形状をより正確に捉えた特徴量を紙片同士のマッチングに利用できるようにしたこと．
- 上記 2 つの提案を取り入れたマッチングエンジンと，従来のマッチングエンジンとで，紙片同士のマッチング成功率を比較する評価実験を行ったこと．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　研究の背景 2
1.2　研究の目的 2
1.3　本論文の構成 3

第 2 章　見知らぬ人同士で連絡先を交換せず行うコミュニケーションに関する事例 **4**
2.1　見知らぬ人同士のコミュニケーションに関する研究事例 5
2.1.1　出会ったことがない見知らぬ人同士の出会いを支援する研究事例 . 5
2.1.2　すでに出会っている見知らぬ人同士の交流を支援する研究事例 . . . 6
2.2　連絡先を交換せずに情報送受信を行う方式に関する事例 7
2.2.1　サービス 7
2.2.2　研究事例 7

第 3 章　研究課題 **13**
3.1　先行研究 14
3.2　先行研究における問題点 15
3.3　研究課題の設定 15

第 4 章　提案手法 **17**
4.1　アプローチ 18
4.2　提案手法 18

第 5 章　実装 **20**
5.1　実装した画像処理上の制約 21
5.2　マッチングアルゴリズム 21
5.3　前処理 1：紙片画像からの紙片部分の抽出 22
5.3.1　領域分割手法 22
5.3.2　領域分割ネットワークの学習 23
5.3.3　紙片領域推定/紙片部分抽出 23
5.4　前処理 2：紙片の撮影角度の補正 25
5.5　前処理 3：紙片の破れ目部分の輪郭の抽出 26
5.6　紙片の特徴量の抽出 27
5.6.1　特徴量 f_s：紙片の破れ目部分の形状 27

5.6.2 特徴量 f_a：紙片の破れ目部分の縦横比 27
5.7 マッチング候補の絞り込み 28
5.8 紙片同士のマッチング 29

第 6 章 評価実験 **31**
6.1 実験の目的 32
6.2 実験条件 32
6.3 実験手順 32
6.4 実験結果 36
6.5 考察 36
6.5.1 紙片部分の抽出に関して 36
6.5.2 紙片の破れ目の形状から得られる特徴量に関して 37
6.5.3 今後の紙片同士のマッチング成功率の向上方法に関して 38

第 7 章 結論 **41**

謝辞 **44**

参考文献 **47**

研究業績 **51**

図 目 次

3.1 先行研究のマッチング成功率 16

4.1 左上から右下に向かって 台形が 2 つできるように斜めにちぎる 19
4.2 ちぎり始め・終わりの点がそれぞれ 紙の左右の対辺上に存在するようにちぎる 19

5.1 ちぎり始め・終わりの点がそれぞれ紙の左右の対辺上に存在するようなちぎり方 21
5.2 マッチングアルゴリズム 22
5.3 Deep Learning を用いた画像中の紙片領域の推定・抽出 24
5.4 入力紙片（元画像） 25
5.5 紙片部分抽出後 25
5.6 近似形状の頂点群 26
5.7 撮影角度補正に用いる要素 26
5.8 撮影角度補正後 26
5.9 Canny 法によるエッジ検出後 26
5.10 紙片の破れ目部分の輪郭抽出後 26
5.11 特徴量 f_s（Shape Feature） 27
5.12 紙片の破れ目の概形 28
5.13 特徴量 f_a（Aspect Feature） 28

6.1 実際に実験で用いた紙片画像（上側）の例 33
6.2 実際に実験で用いた紙片画像（下側）の例 34
6.3 実験に使用するテンプレート紙 35
6.4 マッチング成功率 36
6.5 光量が少ない光環境下で撮影された紙片画像に対する紙片領域抽出結果（a:元画像，b:従来システムによる抽出，c:提案システムによる抽出） 37
6.6 紙片部分に影がかかっている紙片画像に対する紙片領域抽出結果（a:元画像，b:従来システムによる抽出，c:提案システムによる抽出） 38
6.7 破れ目によって分断された文字 39

7.1 アプリケーション画面（a:トップ画面, b:ファイル送信画面, c:ファイル受信画面, d:チャットルーム画面） 43

表 目 次

3.1 見知らぬ人同士のコミュニケーション支援/電子情報をやりとりする方式の比較 15

5.1 領域分割ネットワーク実装環境 24
5.2 マッチング処理時間計測 PC スペック 30

第1章　序論

1.1 研究の背景

スマートフォンやタブレットをはじめとする電子端末の普及により，電子情報のやりとりは日常的に行われるようになった．昨今，職場の同僚や友人，家族などと，電子メールや SNS で画像や動画などを送り合うことは珍しくない．しかし時には，“ツアー参加時に撮った集合写真を他のツアー客に送る”，“友人の結婚式のセレモニーを撮影した動画を他の参列者に送る” といったような，初対面あるいは見知らぬ相手と電子情報をやりとりする必要に迫られる場面もあるだろう．

このような初対面の相手との電子情報をやりとりするには，電子メールやソーシャルネットワーキングサービス（以下,「SNS」）を利用することが考えられるが，これらを利用する場合にはユーザ間で個人を特定可能な ID や連絡先を交換する必要がある．出会ったばかりの見知らぬ人と連絡先を交換することには抵抗を感じるユーザが多いと考えられる．一方で，連絡先を交換せずに電子情報のやりとりを行うことができる方式も存在するが，いずれの方式も遠隔での電子情報のやりとりを可能にするものではない．したがって，電子情報のやりとりを行っている間，ユーザは見知らぬ人と一緒にしばらくその場に留まらなければならず，これはユーザにとっての心理的な負担となる可能性がある．

この状況に鑑み，先行研究では，初対面の相手と電子情報をやりとりするシーンにおいて，**紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式**の提案を行ってきた [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]．これは，ある紙を 2 片にちぎり分けたとき，各紙片の破れ目付近の特徴が合致するという性質を利用したアプローチである．本方式を用いてユーザ A，B 間で電子情報をやりとりするには，ユーザ A が紙を 2 片にちぎり，一方をユーザ B に手渡す．このときユーザ A が持つ紙片を k_a，ユーザ B が持つ紙片を k_b とする．ユーザ A は k_a をカメラで撮影し，k_a の破れ目部分の特徴をシステムに登録する．その後，ユーザ B は k_b をカメラで撮影することで，k_b と破れ目付近の特徴が合致する紙片である k_a を所持しているユーザ A とつながり，電子情報をやりとりすることが可能となる．一旦紙をちぎって渡してしまえば，ちぎり分けられた 2 枚の紙片の所有者 2 人は，いつでもどこからでもつながって電子情報をやりとりすることが可能である．

1.2 研究の目的

本研究では，これまで提案してきた紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式において，ちぎり分けられた紙片間の形状特徴マッチング技術を洗練させ，紙片同士のマッチング成功率をさらに向上させることを目的とする．この目的を達成するために，Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法を提案し，紙片撮影時の周囲の光環境や影などの影響を受けにくい，ロバスト性の高い方法で紙片領域の抽出を行えるようにする．加えて，破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法を提案し，紙片の破れ目の形状をより正確に捉えた特徴量を紙片同士のマッチングに利用できるようにする．

本稿では，上記の提案を取り入れたマッチングエンジンの実装，および，実装したマッチングエンジンと従来のマッチングエンジンとで紙片同士のマッチング成功率を比較する実験を行い，ちぎり分けられた紙片同士をどの程度正しくマッチングできるかを検証することを目的とする．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次のとおりである．

2 章では，見知らぬ人同士で連絡先を交換せず行うコミュニケーションに関する事例について述べる．

3 章では，先行研究について紹介するとともに，先行研究において生じている問題を定義し，それをふまえた上で本研究における課題を設定する．

4 章では，先行研究で生じていた問題を解決するためのアプローチとして，画像からの紙片領域抽出処理と，紙片同士のマッチングに利用する特徴量の 2 点を洗練させる必要があることを説明した上で，Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法と，破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法の提案を行う．

5 章では，ちぎり分けられた紙片を撮影した画像から Deep Learning を用いて紙片部分のみを抽出する方法，破れ目がある紙片の撮影角度を補正する方法，紙片同士のマッチングに利用する特徴量を抽出する方法，および紙片同士のマッチング方法について具体的に述べる．

6 章では，今回行った評価実験の目的や条件，手順について述べ，実験結果とその結果に関する考察についても述べる．

最後に 7 章にて，本論文の結論を述べる．

第2章　見知らぬ人同士で連絡先を交換せず行うコミュニケーションに関する事例

本研究は，見知らぬ人同士を連絡先を交換することなく繋げ，情報の送受信によるコミュニケーションを行うことを可能にするものである．本章では，2.1 節では見知らぬ人同士のコミュニケーションに関する研究事例について，2.2 節では連絡先を交換せずに情報の送受信を行う方式に関する研究事例について，それぞれ紹介する．

2.1　見知らぬ人同士のコミュニケーションに関する研究事例

見知らぬ人同士のコミュニケーションに関して調査している研究事例としては，文献 [8, 9, 10, 11] が挙げられる．2.1.1 項では，出会ったことがない見知らぬ人同士の出会いを支援する研究事例について紹介する．2.1.2 項では，すでに出会っている見知らぬ人同士の交流を支援する研究事例について紹介する．

2.1.1　出会ったことがない見知らぬ人同士の出会いを支援する研究事例

文献 [8] は，見知らぬ人同士の，非言語でアドホックなコミュニケーションを観察する実験を行っている．携帯電話，インターネットメッセージング，テレビ会議などのユビキタス通信技術が人々の日常に浸透し，常に新しいコミュニケーションの形が生まれている．一般的に，人々は新しいユビキタス通信技術を使って他の人とつながる新しいコミュニケーション方法を生み出したいと考えているが，生み出されるコミュニケーション方法は，コミュニケーションがどのような目的で行われるかというコンテキストに影響される．そこで，社会的・技術的なコンテキストが，人々のコミュニケーションやコラボレーションをどのように形成するのかについて研究がされている．研究のファーストステップとして，遠く離れた 2 箇所のナイトクラブに，表面を指で触ることで描画が可能で，描かれた内容が同期する 2 台のインタラクティブなテーブルを設置した場合，人々がこのテーブルを使って他人とどのようなインタラクションを行うのかについての観察が行われた．1 台のテーブルのみを使ったローカルインタラクションにおいては，その場の見知ったユーザ同士でコラボレーションを行う使用方法が多く見られた．2 台のテーブルを使ったリモートインタラクションにおいては，遠隔地の見知らぬユーザとのコミュニケーションを行う使用方法が多く見られた．

文献 [9] は，見知らぬ人同士の対面での交流を促進することを目的とした，Next2You というモバイルアプリケーションを提案している．現在のモバイル技術は，主にユーザと遠く離れた他者とのインタラクションを目的として設計されているため，その場にいる見知らぬ人々の間の社会的インタラクションに適用する上では最適でないことがある．例えば，人々は自分のデバイスを使うことに集中すると，無意識のうちに他人を無視してしまうだけでなく，その場の見知らぬ人たちから成る集合から自分を切り離して意図的にプライベートな状況を作るためにモバイルデバイスを使用することもある [12]．このような社会的ではないモバイルデバイスの役割を修正するために，近くにいる見知らぬ人同士であっても社交的な交流を促進できるような研究も多数行われているが，いずれも人と人と

の対面での交流を促進するのではなく，モバイルデバイス上のアプリケーションなどを介する間接的な交流を促進してしまっている．そこで，見知らぬユーザ同士が物理的に接近すると，ユーザが生成したコンテンツを，近くの見知らぬ人同士で自動的に交換することで，その後の見知らぬ人同士の対面での交流を促進するアプリケーション，Next2You が提案されている．Next2You はユーザの付近にいる他のユーザを自動的に検出し，ユーザが事前に作成したプロフィールの情報を交換する．162 名を対象に，7 週間にわたる試用実験を行った結果，Next2You を使用することで，近くにいる見知らぬ人同士の交流を促進できることが示唆された．

2.1.2　すでに出会っている見知らぬ人同士の交流を支援する研究事例

文献 [10] は，初対面の人同士の会話を円滑にするために，会話中にリアルタイムでトピックを提示するシステムを提案している．新しい人と出会い，新しい友達を作ることは，日常生活において重要であり，初対面の人との最初の会話は関係を築くために重要であるが，見知らぬ人との初対面の会話を良好に維持することはしばしば困難であるという問題が挙げられている．この問題の解決策として，お互いの共通の知識を有していない見知らぬユーザ同士での会話中に，各ユーザの視界に，パーソナライズされたトピックを提示するシステムが提案されている．このシステムは，ユーザから好みの話題を事前に収集しておき，既存のレコメンドシステムの手法を用いて，双方のユーザにとって興味がありそうな会話のトピックのリストを決定する．トピックは Google Glass を介して各ユーザの視界に表示される．38 組の見知らぬ人々に対して行った実験の結果，システムによるトピックの提案は，適切なタイミングで，特定のタイプの話者にのみ有用であるということが分かった．

文献 [11] は，私たちが普段公共の場で目にする「見知らぬ人」の中でも，何度か観察しているにもかかわらず直接的な交流はしていない,「見慣れた見知らぬ人（Familiar Stranger）」に着目している.「見慣れた見知らぬ人」とは，心理学者の Stanley Milgram が 1972 年に発表したエッセイの中で初めて取り上げた社会現象である [13]．携帯電話やスマートフォンなどのモバイルコミュニケーションツールは，人々を友人や既知の知人と容易に結びつけることができる．しかし，見知らぬ人や初対面の人，特に私たちが日常的に目にする「見慣れた見知らぬ人」との，繊細でありながらも重要な結びつきについて探求するためのモバイルデバイスは存在しないという問題が挙げられている．そこで著者らは，ユーザの周囲にどの程度の数の「見慣れた見知らぬ人」がいるのかを可視化する機能を持ったデバイスを制作し，このようなデバイスが，見知らぬ人や未知の都市環境とのインタフェースをどのように提供してくれるのか，自分自身や見知らぬ人について何を明らかにしてくれるのか，見知らぬ人と出会う場所に対する私たちの認識を変えてくれるのか，といったことについて調査している．

2.2　連絡先を交換せずに情報送受信を行う方式に関する事例

2.2.1　サービス

連絡先を交換せずに情報送受信を行うサービスとしては，AirDrop [14]，Bluetooth File Transfer Profile が挙げられる．

AirDrop は，Apple によって開発された，近くにある Apple 製デバイス間で情報を手軽に送受信することができる機能である．相手に送信したい情報を選択したのち，近くにある Apple 製デバイスの一覧から相手のデバイスを選択することで，Bluetooth によってセッションが確立され，Wi-Fi によって情報が相手に送信される．

Bluetooth File Transfer Profile は，Bluetooth 接続した 2 台のデバイス間でファイル転送を行うためのプロファイルである．Bluetooth は多種多様なデバイス間の通信に使用されるため，デバイスの種類ごとに策定されたプロトコルが存在し，それらの使用方法をプロファイル（Profile）と呼び標準化している．数あるプロファイルのうち，File Transfer Profile に対応しているデバイス同士であれば，デバイスを Bluetooth 接続することで，ファイルの転送を行うことができる．

2.2.2　研究事例

連絡先を交換せずに情報送受信を行う方式に関する研究事例としては，文献 [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28] が挙げられる．

Sonoba.org [15] は，その場限りの人間関係においても利用可能な匿名情報共有システムである．偶然出会った人とデジタルな情報をやりとりするコミュニケーションを行う場合，相手との接点がその場限りかもしれないにもかかわらず連絡先を交換することはプライバシーの面から不安がある，という問題が挙げられている．この問題の解決策として，時間制限付きの覚えやすい URL をその場にいるユーザ間で共有し，URL のアクセス先ページ内で情報のやりとりを行う手法が提案されている．これにより，ユーザはその場に居合わせた人と連絡先を交換せずに，その場限りで情報をやりとりすることができる．専用のデバイスを必要とせず，インターネット回線と Web ブラウザさえあれば利用できる．URL を知っているユーザ全員が情報のやりとりを行えるという性質から，1 対多または多対多の利用や，電話越しの相手に URL を言葉で伝えることでの利用も可能である．セキュリティ面については，URL を知りさえすれば誰でも情報にアクセスできてしまうため，万が一関係のない人がアクセスした場合に問題が起きるような情報は取り扱わないべきである．また，複数人で利用する際には，その場にいる人たちによってアップロードされる情報が 1 箇所に集約されるため，一時的な写真アルバムや資料置き場のような活用も可能となっている．

SmARt Projection [16] は，同じ場所を利用する人々とのモバイルデバイス内データの円滑な共有を行うためのシステムである．日常生活で同じ場所を過ごす人々と互いのモバイルデバイス内のデータを共有したいとき，Web やメールなどの既存手法を用いる場合，

データの在処やデータの共有相手を明示しなければならないという問題が挙げられている．この問題の解決策として，普段から過ごす空間の壁面をデータの共有スペースとし，壁面の任意の位置にモバイルデバイス内のデータを容易かつ直感的に貼り付けることができる手法が提案されている．壁面に貼り付けたデータは，各ユーザが所有するモバイルデバイスで閲覧・取得することができる．システムの実装はモバイルデバイス側と PC 側に分かれている．モバイルデバイス側には，壁面へのデータの「貼り付け」または「閲覧，取得」を行えるアプリケーションが実装されている．加えて，実世界の壁面とモバイルデバイス画面上の座標との対応付けを行う処理と，カメラで取得する映像上へのデータの描画処理も実装されている．PC 側には，貼り付けられたデータをプロジェクタを通して壁面に描画するための画面描画プログラムが実装されている．実装したシステムの試用を行った結果，ユーザと壁面とのインタラクションに関しては，壁面をデータ共有スペースとすることで，日常生活中の行為の延長として自然かつ直感的にデータの貼り付け・取得・閲覧を行えている．

Pass-Them-Around [17] は，同一箇所に集まったグループ内での写真共有・回覧システムである．デジタルイメージング技術の導入や，安価なデジタルカメラやスマートフォンなどの普及に伴い，人々の間で写真撮影のハードルが下がり，デジタル写真を遠隔で共有したり，配信したり，写真にコメントをつけたりできるオンラインサービスも登場してきた．これらの新しい共有技術はユーザに多くのメリットを提供する一方で，対面でその場にいるユーザー間で紙の写真を共有する場合と比較すると，ソーシャルインタラクションの豊かさに欠けている，という問題が挙げられている．この問題の解決策として，その場にいる数人のグループのモバイルデバイス間で，直感的な操作で写真を共有・回覧することができるシステムが提案されている．モバイルデバイスのディスプレイに写真が表示された状態で，写真を渡したい相手の方向にモバイルデバイスを傾けたり，写真をスワイプしたりすることで，他のユーザに写真を渡すことができる．また，複数のモバイルデバイスのディスプレイを隣り合わせることで，これらを擬似的に 1 つの大画面ディスプレイとして機能させ，写真を大きく表示することもできる．システム利用時のユーザは，写真の共有・回覧は直感的に行え，自分のモバイルデバイスを他人と共有したり，他人のモバイルデバイスと接続したりすることに関しても積極的だが，自分のデバイスを他人に扱われることによるデバイスの消耗やプライバシーの侵害に関しては懸念がある，といった結果が得られた．

Vinteraction [18] は，スマートフォンやタブレットなどのスマート端末を 2 台重ねて置き，端末のバイブレーション機能を利用して情報を受け渡す手法である．スマートフォンやタブレット端末の普及に伴い，デバイス間で情報のやりとりを行う機会が増えてきているが，従来の手法は機器指定の煩わしさや情報送信完了までのステップが多いため必ずしも簡便ではないという問題が挙げられている．この問題の解決策として，振動モータと加速度センサを利用した情報送信インタラクション手法が提案されている．この手法ではまず送信側端末で情報を振動としてエンコードし，バイブレータを用いて振動させる．次に，送信側端末の振動を受信側端末の加速度センサで検知しデコードを行うことで，情報が受け渡される．受け渡す情報は文字列であり，振動パターンには受け渡す文字列を

ASCII コードのビット列にしたものを用いている．実験ではシステムの性能評価を行い，複数の市販デバイスにおいて 10bit/sec 程度の速度で情報を送信可能という結果が示されている．これは，URL やパスワード程度の小さな情報を送信したい状況では有効な情報送信速度といえる．また，情報送信速度の高速化方法や，デバイスの大きさ・筐体の材質などによる差異に関する問題点についても議論がなされている．

Transmimic [19] は，ユーザが娯楽を楽しみながら情報の受け渡しを行うシーンにおいて，楽しさを感じながら情報の受け渡しを行えるシステムである．イベント会場やテーマパークのような場所で楽しみながら情報を受け渡すシーンにおいて，メッセージングアプリや QR コードのような無機質な手段を用いると雰囲気が台無しになってしまい楽しめないという問題点が挙げられている．この問題の解決策として，送信者が行ったジェスチャを受信者が真似ることで情報を受け取るインタラクション方式が提案されている．送信者が自らジェスチャを考案し，引き渡したい情報をジェスチャと結びつけた後，送信者が行ったジェスチャを受信者が真似ることで情報を受け渡すことができる．ユーザが行ったジェスチャは加速度データとして保存され，Dynamic Time Warping 距離が最も近い他のユーザのジェスチャデータとマッチングされる．実験では，構築したプロトタイプシステムを用いることで情報の受け渡しをより楽しく行うことができるのかについて検証されている．その結果，ジェスチャを用いて情報を受け渡す手法は “真似る” という行為の有無によらず，既存手法よりも楽しく情報を受け渡すことができることが判明した．

O-Link [20] は，動画ファイルを物理世界オブジェクトの形状に関連付けて，専用のデバイスの上にオブジェクトを置くことで動画を再生できるシステムである．祖父母と孫との間の関係をより緊密にするためのインタフェースを構築する上で，高齢者と孫との間のデジタル機器操作スキルの格差と，子どもが行う手芸活動の重要性に着目している．典型的な利用シーンとしては次のようなシーンが挙げられている．まず，祖父母にプレゼントするための折り紙などの物理的な工芸品を孫が作っている様子を，保護者が録画する．続いて，保護者は O-Link を用いて，折り紙と録画した動画とをリンクさせる．リンクさせた後，保護者は祖父母に折り紙を郵送する．最後に，祖父母は内部にカメラを搭載した箱型の装置上に折り紙を置くことで，折り紙にリンクされた動画が自動的にテレビなどの画面に表示される．通常，物体認識を行うには RFID や QR コードのようなタグを付ける技術が最も一般的で，物体を正確に検出する能力も持っているが，日常生活の中で使用する場合には目立つ上に煩雑なものになってしまう．その点，このシステムではタグを用いず，子どもが手作りしたプレゼントをそのまま用いることができる．実際にシステムを利用したユーザからは「3 歳の子どもが作った不器用な折り紙でも宝物に変わる」などの前向きな意見が寄せられた．

Pocket Transfers [21] は，公共のディスプレイに表示されているコンテンツを，ユーザのポケットやバッグに入っているモバイルデバイスに簡単に転送することができるシステムである．ユーザが公共空間を移動中，街頭ディスプレイに表示されているコンテンツを自分のモバイルデバイスに保存しておいて後で確認したい場合，既存の手法ではユーザがモバイルデバイスを見たり手に持ったりしてコンテンツを転送しなければならないという問題が挙げられている．この問題の解決策として，ユーザがポケットに入れたままのモ

バイルデバイスにコンテンツを転送することができる，新しいコンテンツ転送手法が提案されている．提案手法によるコンテンツの転送は，ディスプレイに表示されているコンテンツへのタッチ，ハンドジェスチャ，視線など，様々なアクションによって行うことが可能となっているが，ディスプレイにはあらかじめ専用のアプリケーションがインストールされている必要がある．実験では 20 名の実験参加者にシステムを体験してもらった結果，既存の手法と比較して高速に転送が行えるという点に加えて，モバイルデバイスを操作する必要がない点について高い評価が得られている．

Mobiphos [22] は，グループで写真撮影を伴う作業を行うシーンにおいて，グループ内の各ユーザがカメラで撮影した写真を，動的にグループのメンバ全員に共有するアプリケーションである．歴史的には，写真の撮影と共有は非同期的であり，撮影後しばらくしてから共有が行われてきた．この研究の目的は，この撮影と共有との伝統的な関係を変えるモバイル技術の影響について探ることである．特に，写真の撮影と共有が，小規模で社会的なグループの活動に与える影響について調査することに重きを置いている．アプリケーションはカメラ付きの携帯電話に実装されており，写真の共有は複数の携帯電話で形成される無線のローカルネットワークを介して行われる．

ShakeCast [23] は，2 人のユーザが握手をすることで互いの連絡先の交換を行うシステムである．連絡先の交換は，一般的には名刺のような物理的なアイテムを介して，さらに最近ではスマートフォンによるデータ転送のような技術的な手段を介して行われてきた．しかし，これらを含めた既存の手法はどれもユーザによる意図的な所作を必要とするため，商談や会議のような場面で多くの連絡先交換が行われる場合には，ユーザにとって連絡先交換が負担になる可能性があるという問題が挙げられている．この問題の解決策として，世界中の多くの文化で，相手と会ったときに簡単な握手をすることが習慣となっていることから，握手動作をトリガーとして連絡先情報などの小さな情報の交換を行うシステムが提案されている．このシステムでは，ユーザが手首に装着したスマートウォッチの加速度センサを用いてユーザ同士の握手動作を検出し，同一の握手動作が検出されたユーザ間で連絡先の交換が行われる．実際の握手動作データセットを用いたシステムの評価においては，同じ握手動作をしているペア同士でも，それぞれ握手動作の大きさが異なる場合があることが発見された．これは加速度センサの出力に大きな違いをもたらすため，加速度センサのデータだけに基づいてユニークでロバストな識別子を生成することは難しいことがわかった．また，より正確な握手動作データを得るために追加で利用するセンサとして，スマートリングやフィットネストラッカーなども検討されている．

Pick-and-Drop [24] は，ペン型デバイスを用いて異なるコンピュータ間で情報の転送を行う方式である．ユーザインタフェースを考慮せずに複数台のコンピュータを操作する上で，コンピュータ 1 台にキーボードやポインティングデバイスが固定されているという問題と，近くにあるコンピュータ間での情報の転送が手間であるという問題が挙げられている．この問題の解決策として，ペン型デバイスを用いて，あるディスプレイから別のディスプレイへ物理的なオブジェクトを操作するように情報を転送することを可能にする方式が提案されている．これは，多くの GUI アプリケーションでよく使われている，ドラッグアンドドロップを自然に拡張させたものである．この方式では，ペン型デバイスでコン

ピュータ画面上のデータを選択した後，他のコンピュータ画面にペン型デバイスを接触させることで，データの転送を行うことができる．

FlashTouch [25] は，投影式静電容量タッチスクリーンを搭載するモバイルデバイスとデジタル周辺機器との間で情報の転送を行う方式である．モバイルデバイスやアプリケーションに関する知識が未熟なユーザにとっては，デバイス間での情報の移動は困難であるという問題が挙げられている．この問題の解決策として，ペン型の専用機器と静電容量タッチスクリーンを利用した直感的なデータ転送方式が提案されている．この方式における情報の転送には，光センサとリレースイッチを搭載したペン型の専用機器を用いる．はじめに，送信側デバイスが情報をエンコードしスクリーンから光として放出する．次に，専用機器は放出された光を光センサで読み取ってバイナリ化し，機器内のストレージに保存する．続いて，専用機器は保存したバイナリをリレースイッチを使って受信側デバイスのスクリーンに対してタッチ情報として入力する．最後に，受信側デバイスがタッチ情報をデコードすることで情報の転送が完了する．情報の転送は専用機器の内部ストレージを介して行われるため，ネットワークに接続していないモバイルデバイス間でも情報の転送を行える．

Memory Stones [26] は，情報端末間で直感的な動作を使って情報の送受信を行う方式である．コンピューティングデバイスの普及に伴い，複数デバイスを所有・使用するユーザも急増しており，ユーザが複数デバイスを同時に操作するシーンが増えてきている．このような利用シーンでは，複数のコンピューティング環境間での操作を容易かつ直感的に行うために，2 台のデバイス間でのドラッグ&ドロップ機能などのユーザインタフェース方式が求められている．しかし，これまでの手法では文字列を手打ちする必要があったり，ネットワークへの接続やポータブルメモリなどを利用する面倒で複雑な手続きが必要だったりするという問題が挙げられている．この問題の解決策として，複数の指による特定動作のみでデバイス間の情報の転送を行える方式が提案されている．この方式では，送信側のスマートフォンやタブレット PC のディスプレイ上に表示されている情報を，複数の指を使ってつまみ上げる動作を行い，受信側のスマートフォンやタブレット PC に置く動作を行うことで，受信側のデバイスへの情報の転送が行われる．ユーザビリティ実験を実施した結果，実験参加者の提案方式に対する評価は高く，ユーザはドラッグ＆ドロップ操作を行う際に指を内側に動かす傾向があることが分かった．また，ユーザが情報をつまみ上げた際の指の形を，別のユーザが真似ることで，意図的に情報を盗むことが可能かについての実験も行っているが，その成功率は約 4.0%であり，実用化には十分な安全性を有していると考えられる．

Toss-It [27] は，モバイルデバイス間の情報の移動を，ジェスチャを用いて直感的に行える方式である．モバイルデバイスや無線ネットワーク技術が普及つつあるが，モバイルデバイス間での情報の転送は多くのステップを必要とし，複数の相手に情報を渡したい場合には同じ操作を何度も行わなければならないという問題が挙げられている．また，転送先デバイスの指定についても，既存の方法では，IP アドレスやネットワーク上の名前などを知った上で，転送可能なデバイスの一覧から目的のデバイスを探した上で選択する必要があり手間であるという問題も挙げられている．これらの問題の解決策として，現実世

界では，身の回りの人に何かを渡すときには，それを相手に向かって投げればいいだけであるという点に着目し，投げるジェスチャによる直感的な操作でモバイルデバイス内の情報を転送できる方式が提案されている．この方式では，ユーザが送信側のデバイスを把持し，受信側のデバイスに向かって “トスをする” ジェスチャや “振る” ジェスチャをすることで，情報を受け渡すことが可能となっている．実装したシステムを用いた実験では，情報を投げる距離の推定エラーや，投げる向きの認識エラーが，ある程度の割合で発生することや，スイング動作で情報を投げる際には，スイングの角度が筆者らの想定していた 90 度よりも大きい角度で行われることが多く，その分，情報転送の成功率が他のジェスチャに比べて高かったことなどが分かった．

HoverLink [28] は，一部のスマートフォンに搭載されているホバーセンシング機能を用いてスマートフォン同士を接続し情報の送受信を行う方式である．ホバーセンシング機能とは，端末の画面に直接触れずとも，画面の近くでジェスチャを行うだけで端末の操作を行える操作方法である．近距離で 2 台のモバイルデバイスを接続して情報を転送する場合，Wi-Fi や Bluetooth などを用いる既存の手法では，転送先のデバイスを選択する必要があり手間であるという問題が挙げられている．この問題の解決策として，ホバーセンシング機能を利用することで簡単に目的のデバイスと接続して情報の転送を行う方式が提案されている．この方式により，ユーザは専用デバイスなどを介さずに簡単に 2 台のデバイスを接続・切断し，情報の転送を行うことができる．ホバーセンシング機能を備えたデバイスの画面にタッチすると，接触点でタッチイベントだけでなくホバーイベントも同時に発生する仕様がある．提案方式ではこの仕様を利用して情報の転送を行う．デバイス A，B 間で情報の転送を行う場合，デバイス A を，ホバーセンシング機能を持つデバイス B のタッチスクリーンに接触させながら，デバイス A のタッチスクリーンを操作する．

第3章　研究課題

3.1　先行研究

スマートフォンやタブレットをはじめとする電子端末の普及により，電子情報のやりとりは日常的に行われるようになった．昨今，職場の同僚や友人，家族などと，電子メールや SNS で画像や動画などを送り合うことは珍しくない．しかし，時には初対面あるいは見知らぬ相手と電子情報をやりとりする必要に迫られる場面もあるだろう．例えば下記のような例が挙げられる．

- ツアー参加時に撮った集合写真を他のツアー客に送る．
- 友人の結婚式のセレモニーを撮影した動画を他の参列者に送る．
- 企業の説明会で映されたスライドを撮影した写真を他の参加者に送る．

見知らぬ人同士のコミュニケーションを支援するアプローチはいくつか提案されている [8, 9, 10, 11]．しかし，これらのアプローチでは，ユーザ間で電子情報をやりとりするシーンを支援することはできない．

一般的にユーザ同士で電子情報をやりとりするためには，電子メールや SNS などを利用することが考えられる．しかし，これらの方式を用いて電子情報をやりとりするには，ユーザ同士で連絡先を交換する必要がある．ユーザが互いに見知った仲であれば，連絡先を交換することに抵抗はない．だが，出会ったばかりの見知らぬ人（例：ツアー中に知り合った人，結婚式でたまたま近くに居合わせた人）と連絡先を交換することに抵抗を感じるユーザは多いと考えられる．

連絡先を交換せずに電子情報やりとりすることができる方式も存在する [14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28]．しかし，いずれの方式も，遠隔での電子情報のやりとりを可能にするものではない．したがって，ユーザは電子情報のやりとりを行っている間，見知らぬ人の近くにいる状態を維持しなければならない．見知らぬ人と一緒にしばらくその場に留まらなければならないのは，ユーザにとって心理的な負担となる可能性がある．また，仮に連絡先を交換せずに遠隔で電子情報をやりとりできる方式があったとしても，見知らぬ相手と後で電子情報をやりとりしたい場合には，相手と対面している時点から繋がっておく必要がある．このため，一時的にとはいえ見知らぬ相手と繋がっている状態を維持しておくことは，ユーザにとって心理的負担となる可能性がある．

さらに，一部の方式は専用のデバイスを使用する必要がある [16, 20, 21, 23, 25]．電子情報をやりとりする際，連絡先を交換する必要をなくすためだけに，専用のデバイスを別途用意することは，ユーザにとって大きな負担であると考えられる．

これらの問題を解決するために，先行研究では，初対面の相手と電子情報をやりとりするシーンにおいて，**紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式**の提案を行ってきた [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]．これは，ある紙を 2 片にちぎり分けたとき，各紙片の破れ目付近の特徴が合致するという性質を利用したアプローチである．本方式を用いてユーザ A，B 間で電子情報をやりとりするには，ユーザ A が紙を 2 片にちぎり，一方をユーザ B に手渡す．このときユーザ A が持つ紙片を k_a，ユーザ B が持つ紙片を k_b とす

る．ユーザ A は k_a をカメラで撮影し，k_a の破れ目部分の特徴をシステムに登録する．その後，ユーザ B は k_b をカメラで撮影することで，k_b と破れ目付近の特徴が合致する紙片である k_a を所持しているユーザ A とつながり，電子情報をやりとりすることが可能となる．一旦紙をちぎって渡してしまえば，ちぎり分けられた 2 枚の紙片の所有者 2 人は，いつでもどこからでも電子情報をやりとりすることが可能である．さらに，相手と繋がるか否かについても，紙片を撮影するか否かという形で後から自分で選択できるため，見知らぬ相手と繋がるタイミングを遅らせることが可能であり，ユーザの心理的負担の軽減にも繋がると考えられる．

上述した方式間での比較についてまとめたものを表 3.1 に示す．確認できる限り，見知らぬ人同士のコミュニケーションを支援でき，他のユーザとの電子情報のやりとりを，連絡先を交換せず，遠隔で，専用デバイスを用いずに行えるのは先行研究だけである．

表 3.1: 見知らぬ人同士のコミュニケーション支援/電子情報をやりとりする方式の比較

アプローチ/方式	見知らぬ人同士の コミュニケーション支援	電子情報のやりとり 連絡先の交換不要	遠隔でのやりとり	専用デバイス不要
[10, 11, 8, 9]	✓	-	-	-
電子メール/SNS	-	-	✓	✓
[14, 15, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 27, 28]	-	✓	-	✓
[16, 20, 21, 23, 25]	-	✓	-	-
先行研究 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]	✓	✓	✓	✓

3.2　先行研究における問題点

本方式は，初対面の相手と 1 対 1 で画像・動画・テキストなどの電子情報をやりとりするシーンにおける利用を想定している．この想定シーンにおいて求められるシステムの精度について考える．本システムにおける精度とは，紙片同士のマッチング成功率のことを指す．具体的には，“ちぎり分けられた紙片を，ペアとなる紙片と，どの程度の割合で正しくマッチングできるか” である．先行研究 [7] において実装したシステムでは，10 組から 80 組の紙片で 70%前後のマッチング成功率を達成している（図 3.1）．しかし，このマッチング成功率では上述した想定シーンにおいて本方式を用いるには不十分であると考える．加えて本方式は初対面のユーザ間で利用されることを想定しているため，誤マッチングなどのシステムトラブルによって初対面のユーザ間の繊細なコミュニケーションを阻害してしまうようなことは避けたい．このため，システムは可能な限り高い精度で紙片同士のマッチングを行えることが望ましい．

3.3　研究課題の設定

3.2 節で述べた問題点をふまえ，本研究では，これまで提案してきた紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式において，**ちぎり分けられた紙片間の形状**

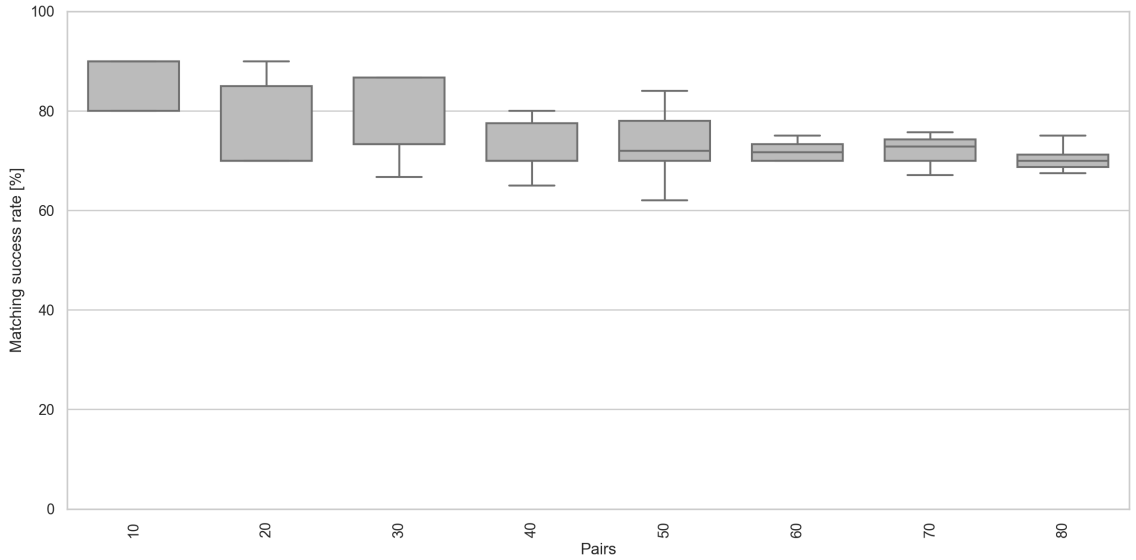


図 3.1: 先行研究のマッチング成功率

特徴マッチング技術を洗練させ，紙片同士のマッチング成功率をさらに向上させることを研究課題として設定する．

第4章　提案手法

4.1　アプローチ

先行研究 [1, 2, 3] では，実装の都合上，紙のちぎり方に関して，“左上から右下に向かって台形が 2 つできるように斜めにちぎる” という制約を設けていた（図 4.1）．しかし，この制約下でちぎられた紙片はどれも破れ目の形状が似通うためマッチング精度が頭打ちになってしまうという問題があった．そこで先行研究 [4, 5, 6, 7] にて，ちぎり方の制約を “ちぎり始め・終わりの点がそれぞれ紙の対辺上に存在するようにちぎる” に変更した（図 4.2）．これにより紙のちぎり方の自由度が向上し，破れ目の形状にもバリエーションが生まれたことでマッチング成功率は向上したが，さらなるマッチング成功率向上のための課題は残されていた．具体的には，撮影された紙片画像から紙片部分のみを抜き出す画像処理が未洗練であることや，紙片の破れ目の形状の部分的な特徴のみを紙片同士のマッチングに利用していたことなどである．

以上のことをふまえ，紙片同士のマッチング成功率の向上を目指すにあたり，洗練させる必要がある点について考える．

1 点目に，画像から紙片領域を抽出する際のロバスト性を向上させる必要があると考えた．本システムでは，画像中から紙片領域を抽出する処理を行う．しかし，抽出方法については，およそ白色と思われる一定範囲の HSV 値を定めて抜き出すという極めて単純かつロバスト性の低い方法であった．この抽出方法では，紙片撮影時の周囲の光環境によって紙片領域を抽出できるか否かが左右されてしまう．加えて，紙片領域に影がかかっている場合なども正確な抽出が行えない．理想的には，紙片撮影時の周囲の光環境や影などの影響を受けにくい，ロバスト性の高い方法で紙片領域の抽出を行うべきである．

2 点目に，紙片の破れ目の形状をより正確に捉えた特徴量をマッチングに利用する必要があると考えた．本システムでは，紙片の破れ目の概形を紙片同士のマッチングに利用してきた．しかし，概形では破れ目の細かな形状までは捉えきれないため，似た破れ目の形状をもつ紙片との誤マッチングが発生しやすい．理想的には，紙片の破れ目の形状全体をマッチングに利用すべきである．なお，これまで紙片の破れ目の概形を紙片同士のマッチングに利用してきたのは，紙片撮影時の撮影角度によって生じる，破れ目の形状の歪みの影響を緩和するためである．

4.2　提案手法

4.1 節で述べた 2 つの点それぞれについて，解決策となる手法を提案する．

紙片撮影時の周囲の光環境や影などの影響を受けにくい，ロバスト性の高い方法で紙片領域の抽出を行うために，**Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法**を提案する．多様な光環境下で撮影されたものや，紙片に影がかかっているものなどを含めた多数の紙片画像を用いて，画像中の紙片領域をネットワークに学習させる．そして，学習済みのネットワークを用いて，未知の紙片画像の紙片領域を推定することで，ロバスト性の高い紙片領域の抽出が行えると考えられる．

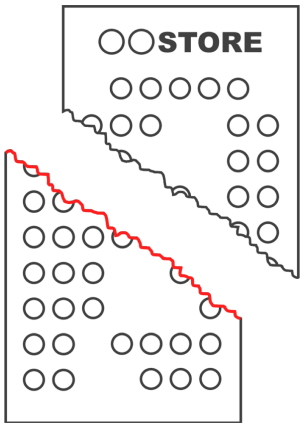


図 4.1: 左上から右下に向かって
台形が 2 つできるように斜めにちぎる

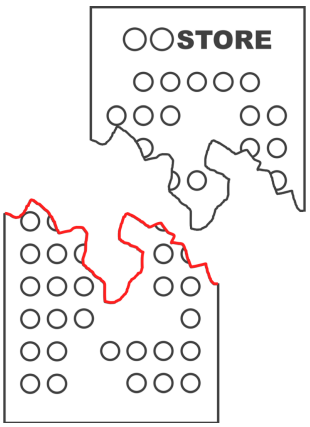


図 4.2: ちぎり始め・終わりの点がそれぞれ
紙の左右の対辺上に存在するようにちぎる

紙片の破れ目の形状全体をマッチングに利用するために，**破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法**を提案する．これは，破れ目がある紙片を撮影した際に生じた撮影角度を，紙片に対して正面から撮影したように補正するものである．これにより紙片撮影時の撮影角度による破れ目の形状の歪みが生じにくくなる．よって，紙片の破れ目の形状全体をマッチングに利用することが可能となり，マッチング成功率の向上が期待できる．撮影角度補正アルゴリズムを次に示す．詳細については 5.4 節で述べる．

Step1：紙片の破れ目の両端点と，下辺の両端点の座標を取得する．以降，これら 4 点を tl（top-left），tr（top-right），bl（bottom-left），br（bottom-right）とする．
Step2：bl と br を通る直線を b_line（bottom line），tl と bl を通る直線を l_line（left line），tr と br を通る直線を r_line（right line）とする．
Step3：b_line の傾きと切片を求め，b_line と同じ傾きと切片の直線を，紙片の破れ目の最も上の位置を通るように引く．
Step4：Step4 で引いた直線の傾きに-1 を掛けたものを t_line（top line）とする．
Step5：t_line と l_line との交点，t_line と r_line との交点，bl，br，の 4 点を用いて射影変換を行う．

第5章　実装

5.1　実装した画像処理上の制約

マッチングに使用する紙，および紙片の撮影方法に関しては，下記 4 つの制約を設ける．

- 紙はあまり劣化していない（破れていたり，ひどく折り目がついていたりしない）．
- 紙はちぎり始め・終わりの点がそれぞれ紙の左右の対辺上に存在するようにちぎる（図 5.1）．
- 紙片は破れ目が上にくるように撮影する．
- 紙片は基本的に手のひらの上に乗せて撮影する．

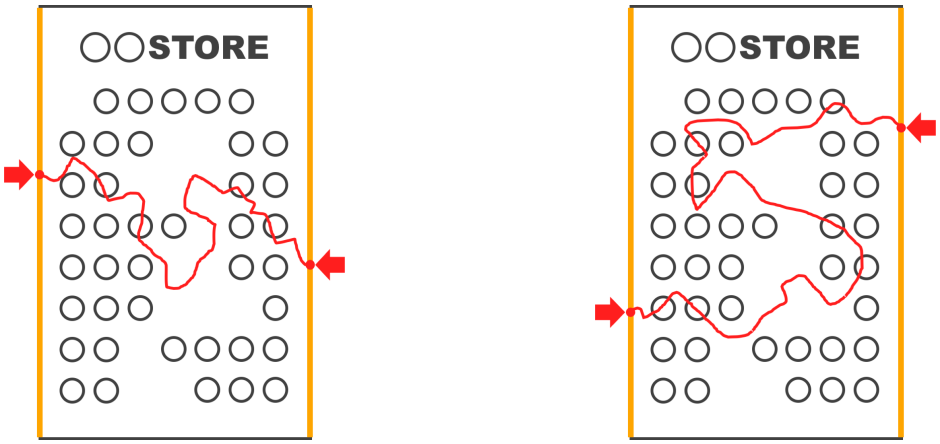


図 5.1: ちぎり始め・終わりの点がそれぞれ紙の左右の対辺上に存在するようなちぎり方

5.2　マッチングアルゴリズム

ちぎり分けられた紙片同士をマッチングさせるアルゴリズムを次に示す（図 5.2）．

Step1：入力された紙片画像から，紙片部分の領域のみを抽出する．
Step2：紙片部分の領域に対し撮影角度補正処理を行い，正面から撮影されたように画像全体を変換する．
Step3：撮影角度補正後の紙片部分の領域から，紙片の破れ目部分の輪郭を抽出する．
Step4：紙片の破れ目部分の輪郭から，紙片の特徴量を抽出する．
Step5：入力紙片の特徴量と，マッチング候補の他の紙片の特徴量との類似度を算出する．
Step6：マッチング候補の他の紙片のうち，入力紙片との類似度が最も高い紙片をマッチング相手とする．

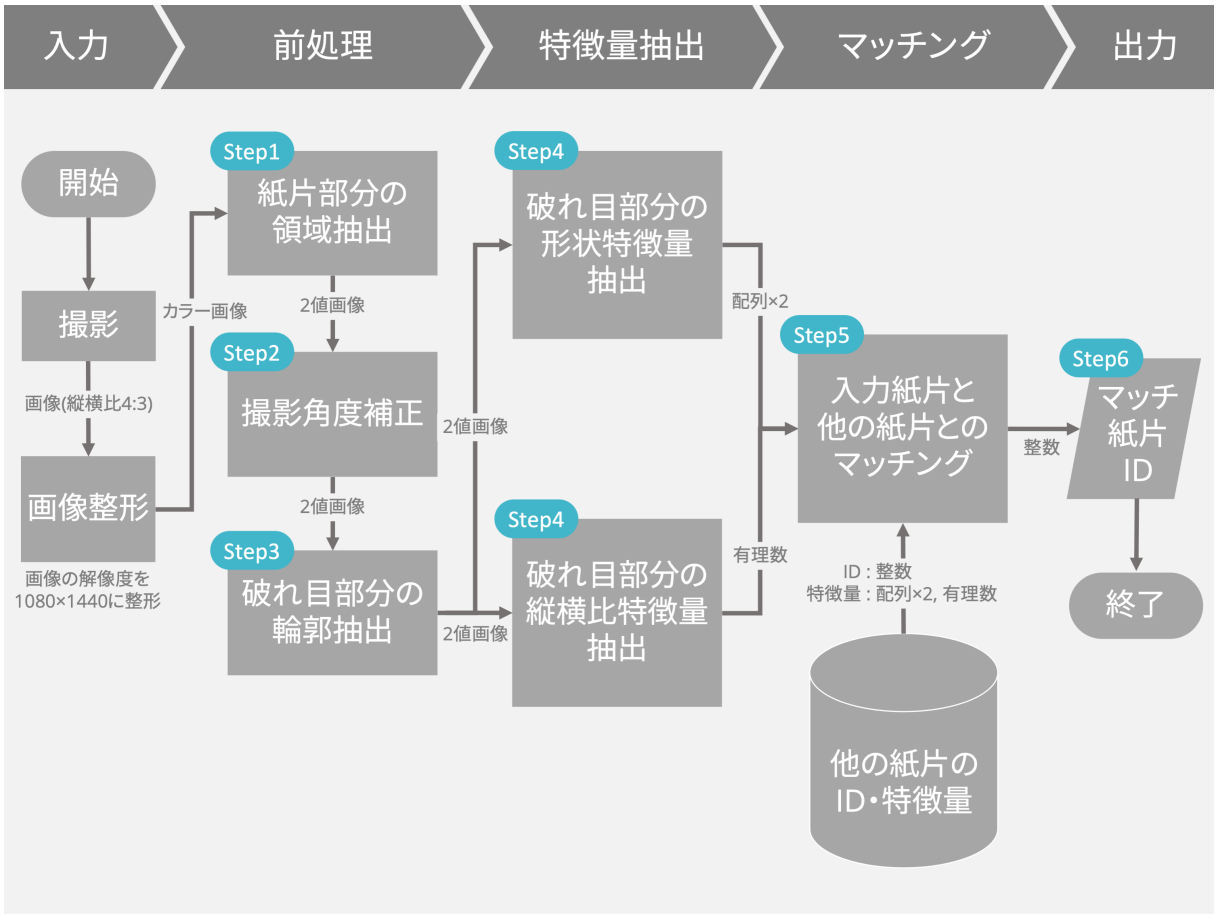


図 5.2: マッチングアルゴリズム

5.3　前処理 1：紙片画像からの紙片部分の抽出

入力された紙片画像から紙片部分のみを抽出するためには，画像中のどこが紙片なのかを判別する必要がある．このようなタスクは，画像処理分野において「領域分割（Segmentation）」と呼ばれる．

本実装では，4.2 節で述べたように，Deep Learning によって画像中の紙片領域を学習させたネットワークを用いて紙片部分の抽出を行う（図 5.3）．多様な環境下で撮影された紙片画像をネットワークに学習させることで，紙片部分の抽出をロバストに行えると考える．

5.3.1　領域分割手法

画像処理における領域分割手法は主に 3 つあり，それぞれ “Semantic Segmentation”，“Instance Segmentation”，“Panoptic Segmentation” と呼ばれている．

Semantic Segmentation は，画像内の全画素に対し 1 画素ごとにクラス分類を行うことで，画像の領域分割を行う手法である．画像内の全画素に対してクラス分類を行うため，

道路や空などの不可算な対象の領域分割も行える．一方，人や車などの可算な対象については重なりがあっても同クラスの領域として扱うため，同じクラスの物体が重なっている場合に各物体を個別に領域分割することができない．

Instance Segmentation は，画像内の物体候補領域を検出し，検出した領域内の全画素に対し 1 画素ごとにクラス分類を行うことで，物体ごとの領域分割を行う手法である．各物体を区別して領域分割を行うため，人や車などの可算な対象については重なりがあっても別々の物体として認識される．一方，物体候補領域（Region of Interest）に対してのみ領域分割を行うため，道路や空などの不可算な対象については領域分割の対象とはならない．

Panoptic Segmentation [29] は，上述の Semantic Segmentation と Instance Segmentation を組み合わせて領域分割を行う手法である．道路や空などの不可算な対象に対しては Semantic Segmentation を行い，人や車などの可算な対象に対しては Instance Segmentation を行う．

本実装においては，入力画像内の全画素を，紙片か背景かの 2 クラスに分類する必要がある．加えて，画像内に写る紙片は 1 枚のみであり，仮に他の紙片が背景に写り込んだとしてもそれらを別々の紙片として区別する必要はない．このため，領域分割手法として Semantic Segmentation を採用する．

5.3.2 領域分割ネットワークの学習

使用するネットワークは，Semantic Segmentation に特化しており，学習する画像の枚数が少ない場合でも高精度に領域分割が行えるとされている U-Net [30] を採用する．一般的な画像の特徴を抽出するエンコーダ部分のネットワーク（Backbone）には EfficientNet-B3 [31] を用いる．ネットワークの学習に関しては，ILSVRC2012 データセット*を用いて事前学習を行ったあと，人手で紙片領域のアノテーションを行った 150 枚の紙片画像を使って転移学習†を行う．転移学習時のトレーニングデータとバリデーションデータの比は 8:2 とし，各種ハイパーパラメータについては，学習率は 1e-4，バッチサイズは 5，総エポック数は 200，最適化アルゴリズムは Adam，損失関数は Focal Loss [32] とした．加えて，学習中に 10 エポックの間指標に改善が見られない場合には学習率を削減し，最大で 1e-7 まで削減する．その後，15 エポックの間指標に改善が見られない場合には，学習を早期終了する．実装に用いた環境を表 5.1 に示す．

5.3.3 紙片領域推定/紙片部分抽出

5.3.2 項で学習したネットワークを用いて，未知の紙片画像から紙片領域を推定し，画像中の紙片部分のみを抽出する．本実装による紙片部分抽出前後の画像を図 5.4，図 5.5

*Large Scale Visual Recognition Challenge 2012 (ILSVRC2012), http://image-net.org/challenges/LSVRC/2012/

†転移学習時のネットワークへの入力画像サイズは 512×512 とした．

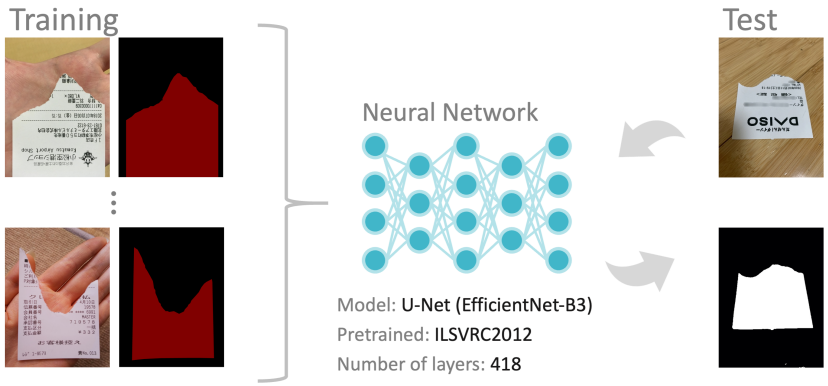


図 5.3: Deep Learning を用いた画像中の紙片領域の推定・抽出

表 5.1: 領域分割ネットワーク実装環境

項目	内容	バージョン
使用言語	Python	3.7.7
使用ライブラリ	matplotlib	3.2.1
	numpy	1.18.4
	pillow	7.1.2
	scipy	1.4.1
	segmentation_models [33]	1.0.1
	TensorFlow	2.2.0

に示す.

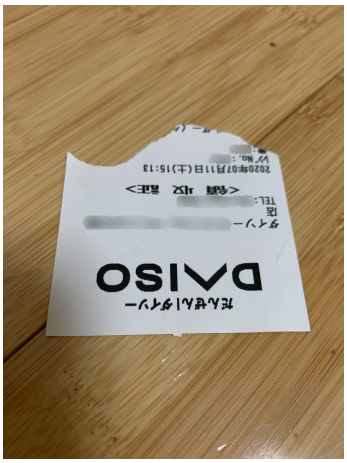


図 5.4: 入力紙片（元画像）

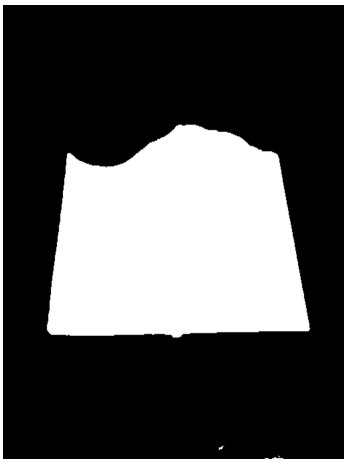


図 5.5: 紙片部分抽出後

5.4　前処理 2：紙片の撮影角度の補正

紙片領域を抽出した後は，4.2 節で述べたように，紙片の撮影角度を補正する．紙片には破れ目部分が存在するため，全体の形状は矩形ではなく，既存の手法（例：射影変換）では補正が行えない．このため，独自のアルゴリズムによる撮影角度補正処理を行う．これにより，紙片が正面から撮影されたように画像が変換される（図 5.8）．撮影角度補正処理のアルゴリズムを次に示す.

Step1：白領域（紙片領域）をより単純な形状に近似し，その形状の頂点群を *approx* とする（図 5.6）.
Step2：*approx* のうち，画像中における x 座標が小さい順に 2 つ，大きい順に 2 つ，合わせて 4 つの点を抜き出す．これにより，破れ目の両端点と，下辺の両端点を得る．以降，これら 4 点を *tl*（top-left），*tr*（top-right），*bl*（bottom-left），*br*（bottom-right）とする（図 5.7）.
Step3：*bl* と *br* を通る直線を *b_line*（bottom line），*tl* と *bl* を通る直線を *l_line*（left line），*tr* と *br* を通る直線を *r_line*（right line）とする.
Step4：*b_line* の傾きと切片を求め，*b_line* と同じ傾きと切片の直線を，*approx* のうち画像中における y 座標が最も小さい点を通るように引く.
Step5：Step4 で引いた直線の傾きに-1 を掛けたものを *t_line*（top line）とする.
Step6：*t_line* と *l_line* との交点，*t_line* と *r_line* との交点，*bl*，*br*，の 4 点を用いて射影変換を行う（図 5.8）.

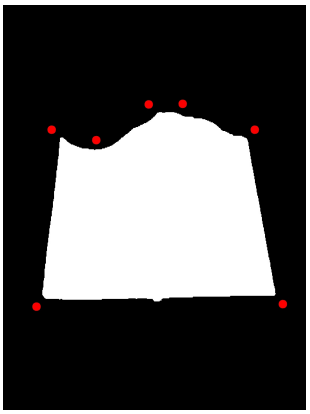


図 5.6: 近似形状の頂点群

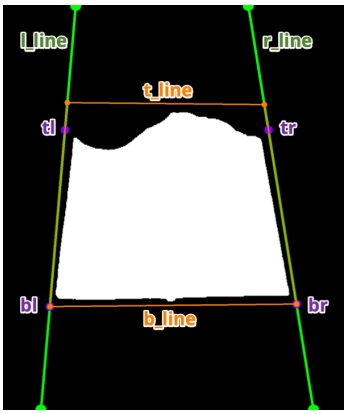


図 5.7: 撮影角度補正に用いる要素

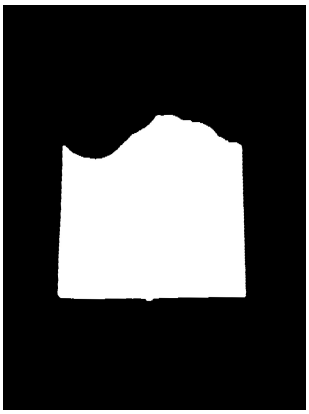


図 5.8: 撮影角度補正後

5.5　前処理 3：紙片の破れ目部分の輪郭の抽出

紙片の撮影角度を補正した後は，紙片の破れ目部分の輪郭を抽出する．まず，5.4 節の前処理 2 によって得られた，撮影角度補正後の紙片画像（図 5.8）に対し，Canny 法 [34] によるエッジ検出を行う．エッジとは，画像中の輝度が急に変化している箇所のことである．文字・図形除去後の紙片画像では，紙片部分が白色，背景が黒色となっているため，エッジ検出を行うことで，白色と黒色の境目となる，紙片部分の輪郭を検出することができる（図 5.9）．Canny 法とは，(1) 画像の平滑化，(2) 勾配の大きさ・方向の算出，(3) 細線化処理，(4) ヒステリシス閾値処理の 4 つの処理手順によって画像中のエッジ部分を検出するアルゴリズムであり，画像の解像度に関係なくエッジ部分を 1px の線分として検出できる．続いて，検出した紙片部分の輪郭を，5.4 節で抽出していた破れ目の左端（tl）から右端（tr）にかけて追跡することで，紙片の破れ目部分の輪郭を抽出する（図 5.10）．

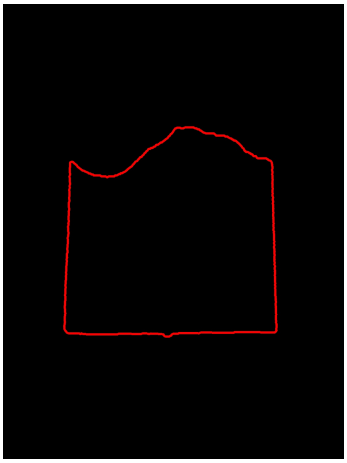


図 5.9: Canny 法によるエッジ検出後

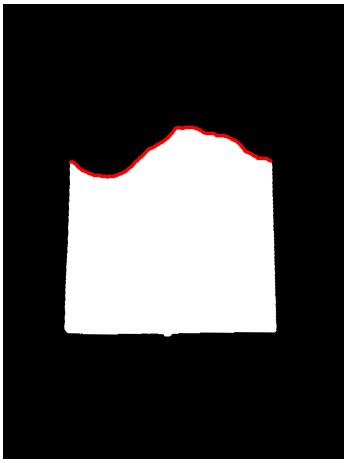


図 5.10: 紙片の破れ目部分の輪郭抽出後

5.6　紙片の特徴量の抽出

5.6.1　特徴量 f_s：紙片の破れ目部分の形状

紙片の破れ目部分の形状は，ちぎり分けられた 2 枚の紙片同士で一致する．このため，紙片の破れ目部分の形状を紙片同士のマッチングに利用する．

破れ目部分の輪郭というのは細かいピクセルが連なることで形成されており，破れ目の左端から右端にかけて n 個のピクセルが存在する．これら n 個のピクセルの座標を x 座標，y 座標で分け，破れ目の左端のピクセルの座標の値を基準にキャリブレーションを行う．キャリブレーション後の x 座標群，y 座標群を，紙片の破れ目の形状から得られる特徴量 f_s（Shape Feature）として利用する（図 5.11）．

4.1 節で述べたように，これまでの実装では紙片の破れ目の概形（図 5.12）を f_s として利用していた．本実装では，5.4 節の撮影角度補正処理によって，紙片撮影時の撮影角度による破れ目の形状の歪みが生じにくくなるため，紙片の破れ目の形状全体を f_s として利用した．

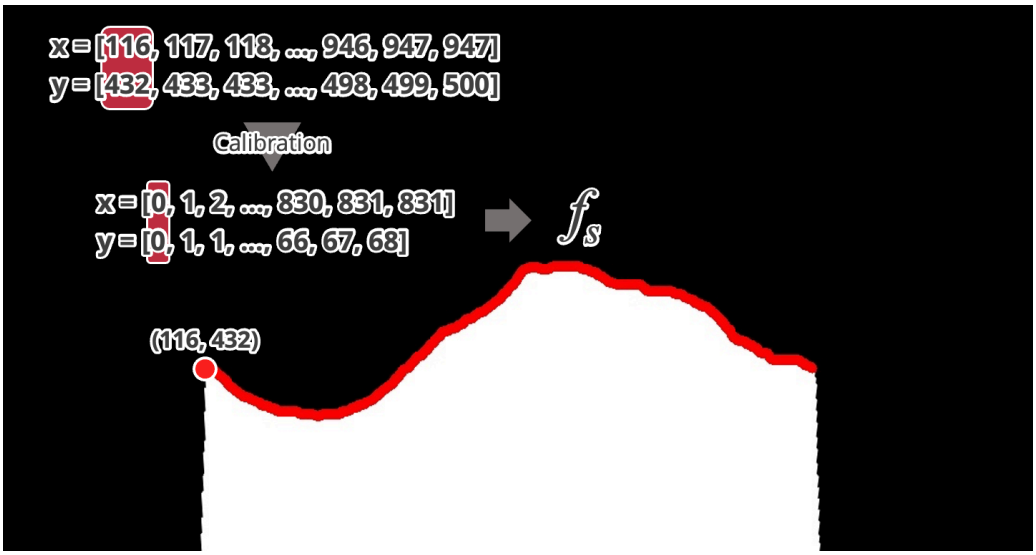


図 5.11: 特徴量 f_s（Shape Feature）

5.6.2　特徴量 f_a：紙片の破れ目部分の縦横比

紙片の破れ目部分の縦横比についても，ちぎり分けられた 2 枚の紙片同士で一致する．このため，紙片の破れ目部分の縦横比を紙片同士のマッチングに利用する．

紙片の破れ目部分の輪郭のうち，破れ目の左端，破れ目の右端，最も上に位置する点，最も下に位置する点，の 4 点を使用する．以降，これら 4 点を $leftend$，$rightend$，$highest$，$lowest$ とする．まず，$highest$ と $lowest$ との y 座標の差を計算し，破れ目部分の縦幅を算出する．次に，$leftend$ と $rightend$ との x 座標の差を計算し，破れ目部分の横幅を算出

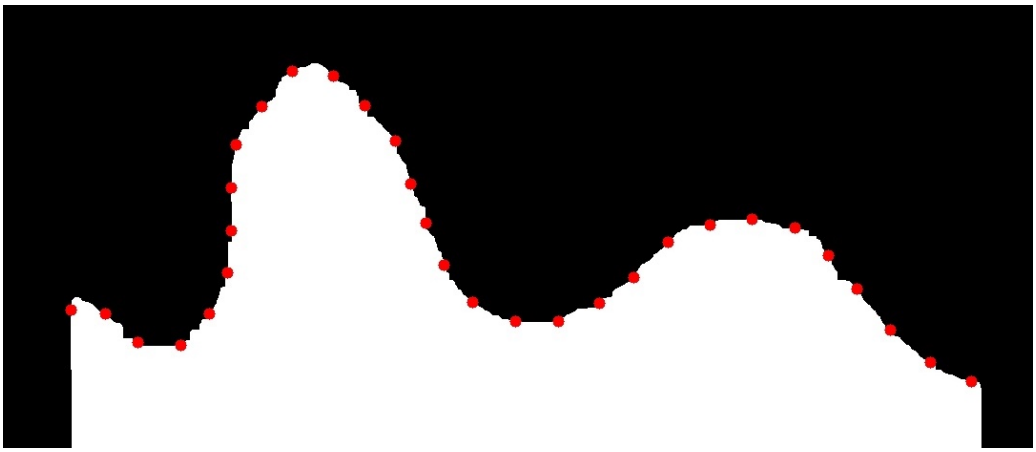


図 5.12: 紙片の破れ目の概形

する．最後に，破れ目部分の縦幅を破れ目部分の横幅で割った値を算出する．この値を，紙片の破れ目部分の縦横比から得られる特徴量 f_a（Aspect Feature）として利用する（図 5.13）．

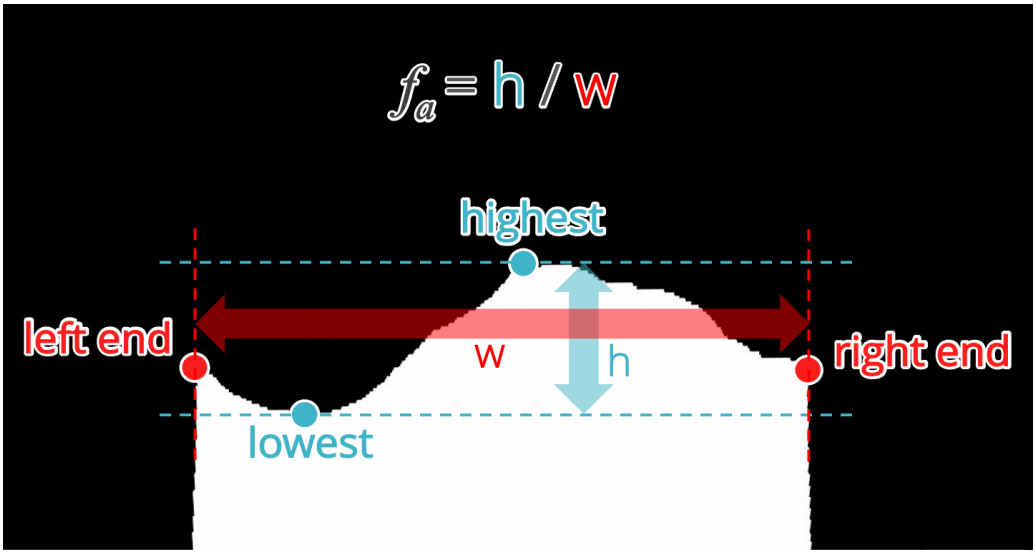


図 5.13: 特徴量 f_a（Aspect Feature）

5.7　マッチング候補の絞り込み

マッチングを行う際，入力紙片とマッチング候補紙片群の全ての紙片との f_s の類似度計算を行うと，計算処理時間が膨大になりユーザエクスペリエンスを低減させることになりかねない．そこで，相対的に高精度に検出しやすい f_a を，マッチング候補を絞り込むためのフィルタとして機能させる．

入力紙片の f_a と，マッチング候補紙片群の中の，ある紙片の f_a を比較し，差が閾値[‡]未満となる紙片にのみマッチング処理を行う．差が閾値以上となる紙片はマッチング候補紙片群から除外する．これにより，次の 2 つの効果が期待できる．

- “破れ目の形状が似ているが f_a が大きく異なる紙片” をマッチング候補から除外でき，誤マッチングが減少する．
- 破れ目の形状が大きく異なる紙片とはマッチング処理（5.8 節）が行われないようにすることで，マッチングにかかる時間を短縮する．

5.8 紙片同士のマッチング

入力紙片の f_s を D_x，D_y，マッチング候補紙片群の中の，ある紙片の f_s を D'_x，D'_y とする．はじめに，D_x と D'_x との類似度 s_x と，D_y と D'_y との類似度 s_y を算出する．D_x，D_y の要素数は画像内に写り込んだ紙片部分の大きさによって変化するということに加えて，比較する系列間の形状の類似性についても考慮すべきであるため，類似度 s_x，s_y は Derivative Dynamic Time Warping [35]（以下,「DDTW」）を用いて算出する．DDTW による系列 A,B 間の距離の算出を $DDTW\,(A,B)$ と定義し，s_x，s_y は次の式で求められる．

$$s_x = \frac{1}{1 + DDTW\,(D_x, D'_x)} \tag{5.1}$$

$$s_y = \frac{1}{1 + DDTW\,\left(D_y, D'_y\right)} \tag{5.2}$$

その後，s_x と s_y それぞれに係数 w_x，w_y をかけて重み付けを行い，その線形和 s_t がマッチング候補紙片群の中で最も高い紙片をマッチング結果とする．以上より，s_t の算出式は下記のようになる．

$$s_t = w_x s_x + w_y s_y \tag{5.3}$$

また，上述の重み係数に関して，本稿では w_x=1.0，w_y=5.0 としているが，これは次のような理由からである．

紙の破れ目は，本研究において設けたちぎり方に関する制約により，左右どちらか一方の辺上から始まり，もう一方の辺上で終わる．そのため，紙片の左右方向，つまりシステム上での x 軸方向においては，破れ目上の点の x 座標の値は単調増加する場合が多々あり，対となる紙片ではない紙片との s_x が不当に高くなってしまう可能性があると考えられる．一方，紙片の上下方向，つまりシステム上での y 軸方向においては，本研究において設けたちぎり方に関する制約による影響はほとんどなく，破れ目上の点の y 座標の値の変化は，破れ目の形状によって大きく異なると考えられるため，破れ目の形状が似ている紙片とのみ s_y が高くなると考えられる．よって，s_x と s_y とでは，s_y の方が紙片の識別性能

[‡]閾値は実際のペア紙片間での f_a の差がどの程度の値になるのかを観察して設定した．

により大きく関係していると考え，s_x よりも大きい重み付けをしている．なお，w_x=1.0, w_y=5.0 という値は，システム開発時にいくつかの値を試した上で，おおむね適切であると著者が判断した値である．この値の妥当性は今後も検証を重ねる必要がある．

マッチングの処理時間に関しては，表 5.2 に示すスペックの PC において，1 枚の入力紙片を用いて 1000 枚のマッチング候補紙片群に対するマッチング処理を行った場合，100 回の試行の平均は 734.88ms となった．実際にユーザがシステムを利用する際は，これにサーバ・クライアント間の通信時間が加わることになる．

表 5.2: マッチング処理時間計測 PC スペック

Component	Specification
OS	CentOS Linux release 7.9.2009 (Core)
CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v4 @ 3.60GHz
GPU	GeForce GTX 1080
Memory	16GB

第6章　評価実験

6.1　実験の目的

今回私が提案する，Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法（5.3 節）と破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法（5.4 節，5.6.1 項）を取り入れた提案システムが，先行研究 [7] の従来システムと比べて，ちぎり分けられた紙片同士をどの程度正しくマッチングできるかを検証することを本実験の目的とする．

6.2　実験条件

実験には，500 組（1000 枚）の紙片画像を使用する．この 500 組の紙片画像は，実験協力者 11 名にちぎって撮影してもらうことで作成した 250 組の紙片画像と，それらを左右方向に反転させた 250 組の紙片画像からなる（図 6.1，図 6.2）．実験協力者の年代と利き手については，30 代左利きが 1 名，20 代右利きが 9 名，20 代左利きが 1 名，となっている．実験に使用する紙の大きさ・形状を統一するため，実験協力者にちぎってもらう紙は著者が作成したテンプレート紙*を用いる（図 6.3）．紙のちぎり方については “破れ目の開始点と終了点がそれぞれ対辺上に存在するようにちぎる” とだけ指示し，破れ目の形状には制限を設けず自由な形状にちぎってもらった．ちぎられた紙片の破れ目の形状については，一直線のものも複雑な形状のものもあったが，全体的には比較的シンプルな形状が多く見られ，それほどバリエーションに富んでいるわけではないように思えた．紙片の撮影については，撮影時の光環境は特に指定せずに，下記の注意事項のもとで行ってもらった．

注意事項 1：紙片は手のひらの上に乗せる．
注意事項 2：紙片は破れ目が上にくるように撮影する．
注意事項 3：なるべく正面から撮影する．
注意事項 4：画像に紙片全体が写り込むように撮影する．

6.3　実験手順

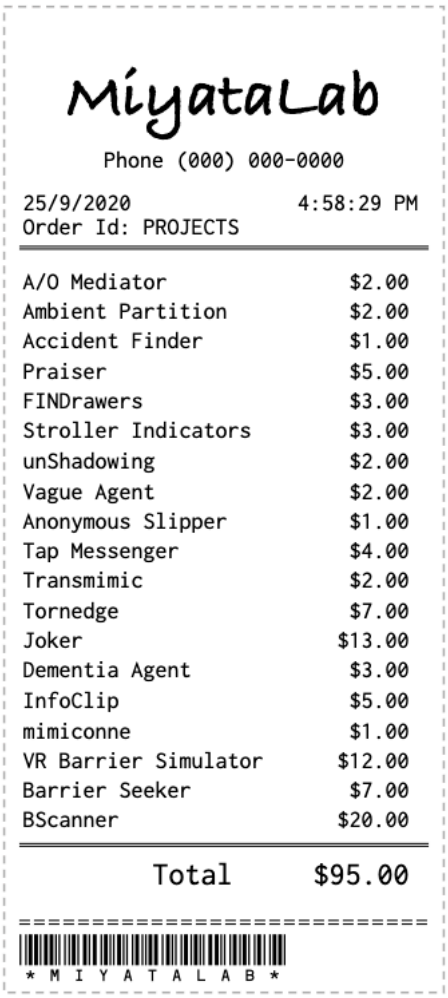
6.2 節の条件のもと，従来手法と提案手法のそれぞれでマッチング成功率の検証を行う．マッチング成功率は，従来システム，提案システムともに下記の手順で算出する．

Step1：用意した 500 組（1000 枚）の紙片から無作為に N 組を抜き出す．
Step2：抜き出した紙片 N 組（$N \times 2$ 枚）を，上側の紙片（以下,「upper」）N 枚と下側の紙片（以下,「lower」）N 枚の，2 つのグループに分ける．
Step3：upper$N$ 枚をシステムのデータベースに登録する．

*テンプレート紙の大きさは，幅 58mm，高さ 130mm である．

図 6.1: 実際に実験で用いた紙片画像（上側）の例

図 6.2: 実際に実験で用いた紙片画像（下側）の例



MiyataLab

Phone (000) 000-0000

25/9/2020 4:58:29 PM
Order Id: PROJECTS

A/O Mediator	$2.00
Ambient Partition	$2.00
Accident Finder	$1.00
Praiser	$5.00
FINDrawers	$3.00
Stroller Indicators	$3.00
unShadowing	$2.00
Vague Agent	$2.00
Anonymous Slipper	$1.00
Tap Messenger	$4.00
Transmimic	$2.00
Tornedge	$7.00
Joker	$13.00
Dementia Agent	$3.00
InfoClip	$5.00
mimiconne	$1.00
VR Barrier Simulator	$12.00
Barrier Seeker	$7.00
BScanner	$20.00
Total	$95.00

==========

MIYATALAB

図 6.3: 実験に使用するテンプレート紙

Step4：データベースに登録されている upper$N$ 枚に対し lower$N$ 枚でマッチングを行う．
Step5：Step3〜4 を upper と lower を入れ替えて再度行う．
Step6：upper でマッチングを行った結果と lower でマッチングを行った結果の両方で，ペアとなる紙片がマッチング結果となった場合，その紙片はマッチング成功とする．
Step7：紙片 N 組のうちマッチングが成功した紙片の割合をマッチング成功率として算出する．
Step8：Step1 で抜き出した紙片の偏りを考慮し，手順 1〜7 を 5 回繰り返して N 組における 5 回分のマッチング成功率を算出する．

上記の手順を，N の値を 10 から 490 にかけて 20 ずつ増やしながら繰り返し，組数ごとの 5 回分のマッチング成功率を算出する．

6.4　実験結果

マッチング成功率を図 6.4 に示す．従来システムと提案システムのマッチング成功率を比較すると，いずれの組数においても提案システムが従来システムを大きく上回っている．また，両システムの組数ごとのマッチング成功率に対して t 検定を行ったところ，全ての組数において 1%水準で有意差が認められた．

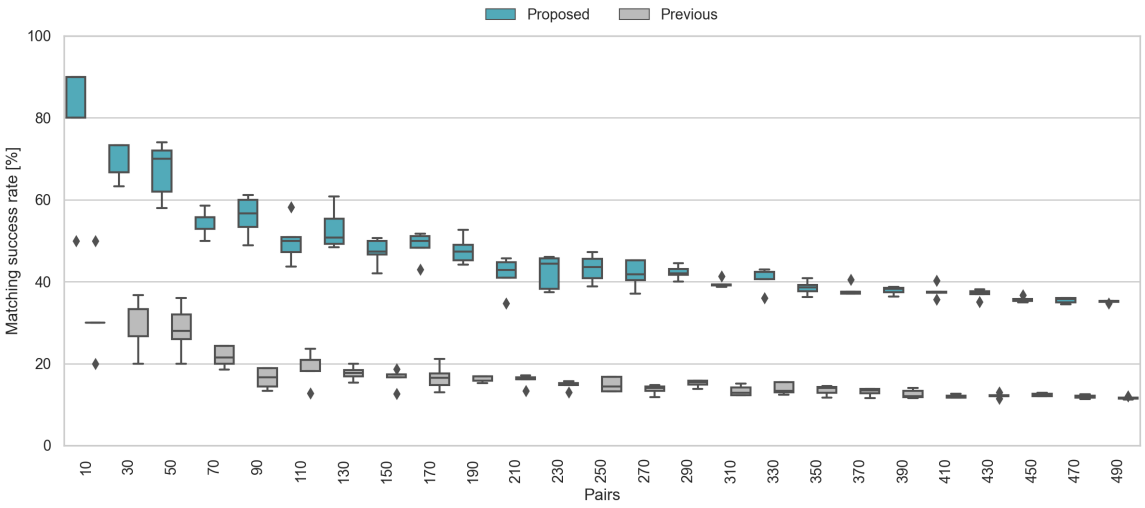


図 6.4: マッチング成功率

6.5　考察

6.5.1　紙片部分の抽出に関して

Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法を取り入れたことによって，光量が少ない光環境下で撮影された暗めの紙片画像や，撮影時に撮影者の頭部の影やス

マートフォンの影などがかかった紙片画像であっても，紙片領域を抽出することが可能となった（図 6.6，図 6.5）．これによって，誤マッチング以前に，そもそも紙片領域の抽出に失敗していることが原因でマッチングに失敗するというケースを大幅に削減することができたのではないかと考えられる．

今回の実装・実験では，5.1 節と 6.2 節で述べているように，手のひらの上に乗せた状態で撮影された紙片画像を用いている．加えて，画像の領域分割を行って紙片領域を推定するネットワークの学習に用いた紙片画像も，全て手のひらの上に乗せた状態で撮影されたものである．よって，今回の実験で使用した紙片においては紙片部分の抽出ミスは見られなかったが，手のひらの上以外の場所に置いて撮影された紙片画像については，抽出ミスが発生する可能性があると考えられる．今後は，いかなる状況で撮影された紙片画像であっても紙片部分の抽出が行えるよう，多種多様な撮影環境の紙片画像でネットワークを学習し直すことが必要となる．

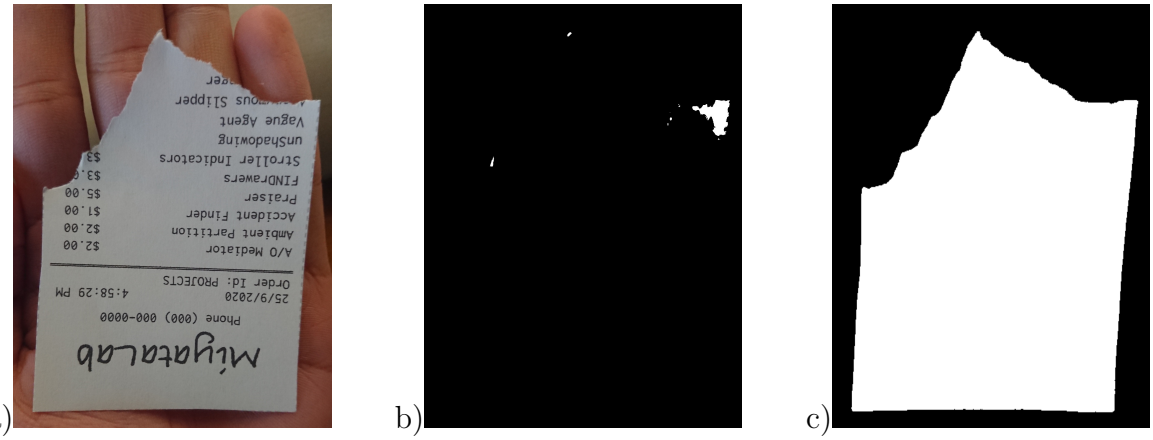


図 6.5: 光量が少ない光環境下で撮影された紙片画像に対する紙片領域抽出結果（a:元画像，b:従来システムによる抽出，c:提案システムによる抽出）

6.5.2　紙片の破れ目の形状から得られる特徴量に関して

破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法を取り入れたことによって，あらゆる紙片の撮影角度を補正・統一し，紙片の破れ目の形状全体を特徴量として利用することが可能となった．これによって，紙片の破れ目の形状の特徴をより詳細に取得できるようになり，破れ目の形状のより細やかな違いを識別するマッチングが行えるようになったのではないかと考えられる．

今回の実装のように，特徴量に紙片の破れ目の形状全体を用いる場合，入力される紙片画像の解像度が高ければ高いほど，破れ目のより詳細な形状を捉えられる．しかし，これはマッチングの処理時間とのトレードオフであり，破れ目の形状に関する情報量が増えると，紙片同士のマッチングにかかる計算量も増え，マッチングの処理時間が膨大になってしまうと考えられる．これについては，紙片同士のマッチングが終わるまでの間ユーザが

図 6.6: 紙片部分に影がかかっている紙片画像に対する紙片領域抽出結果（a:元画像，b:従来システムによる抽出，c:提案システムによる抽出）

許容できる待ち時間についての検証などを行った上で，破れ目の形状を可能な限り詳細に捉えて紙片同士のマッチングに利用すべきであると考える．

6.5.3　今後の紙片同士のマッチング成功率の向上方法に関して

本研究では紙片同士のマッチングを行うにあたって，紙片の破れ目部分から得られる特徴量のみを利用している．しかしながら，図 6.4 に示すマッチング成功率は決して高くはない．今後，紙片同士のマッチング成功率を向上させていくためには，紙片の破れ目部分以外から得られる情報についても，紙片同士のマッチングの判断材料として利用する必要があるのではないかと考えられる．より具体的には，紙に書かれた文字を利用することが考えられる．例えば，紙を 2 片にちぎり分けた場合，紙に書かれた文字は破れ目によって分断される（図 6.7）．このとき分断された文字の数はちぎり分けられた 2 つの紙片で一致する．このような，紙に書かれた文字から得られる情報を紙片同士のマッチングの判断材料として利用することで，マッチング成功率を向上させていくことができるのではないかと考えられる．

また，ユーザがちぎった紙片の破れ目の形状は，複雑で特殊であるほどペア紙片を特定しやすくなり，マッチング成功率が高まると考えられる．今回の実験では複数の実験協力者に紙をちぎってもらったが，ちぎってもらった紙片の形状は全体的には比較的シンプルな形状が多く見られ，それほどバリエーションに富んでいるわけではないように思えた．ユーザに紙を複雑にちぎってもらうためには，ちぎり方に関して何かしらの目安を設けたり，複雑にちぎることがユーザにとって有利に働くようなシーンを設定したりといった工夫が必要となると感じた．例えば，ユーザが紙をちぎる際に居る場所から見える，何かの物体の形を真似てちぎってもらうようにする．あるいは，本方式の現状の想定シーンとは大きく異なるが，エンターテインメントに関するシーンで本方式を利用する場合に，ユーザに，他人と異なる自分だけの破れ目形状を作るように促す．

図 6.7: 破れ目によって分断された文字

紙片の破れ目の形状のマッチング方法に関しても検討の余地がある．現状の実装では，紙片の破れ目の形状の類似度算出に DDTW を利用しているが，Dynamic Time Warping を拡張した他の時系列データ間類似度算出手法（例：robust DDTW [36]，shapeDTW [37]）を用いた場合についても今後比較・検討する必要があると考えられる．さらに，紙片が劣化した場合などに，破れ目の形状が変化することも考えると，破れ目の形状全体のうち類似している区間を検出するアルゴリズムなどについても今後検討する必要があると考えられる．

第7章　結論

先行研究では，初対面あるいは見知らぬ相手と電子情報をやりとりするシーンにおいて，相手と連絡先を交換したり専用デバイスを使用したりすることなく電子情報のやりとりを行う方法として，紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式を提案してきた．本方式は，初対面の相手と 1 対 1 で画像・動画・テキストなどの電子情報をやりとりするシーンにおける利用を想定している．しかし，先行研究において実装したシステムにおける紙片同士のマッチング成功率は，10 組から 80 組の紙片で 70%前後となっており，上述の想定シーンにおいて本方式を用いるには不十分であると考えた．加えて本方式は初対面のユーザ間で利用されることを想定しているため，誤マッチングなどのシステムトラブルによって初対面のユーザ間の繊細なコミュニケーションを阻害してしまうようなことは避けたい．このため，システムは可能な限り高い精度で紙片同士のマッチングを行えることが望ましい．

この状況に鑑み，本研究では，これまで提案してきた，紙をちぎって手渡すことで電子情報のやりとりを可能にする方式において，ちぎり分けられた紙片間の形状特徴マッチング技術を洗練させ，紙片同士のマッチング成功率をさらに向上させることを試みた．具体的には，画像から紙片領域を抽出する際のロバスト性を向上させるために，Deep Learning を用いた領域分割による紙片領域抽出手法を提案した．加えて，紙片の破れ目の形状をより正確に捉えた特徴量をマッチングに利用するために，破れ目がある紙片に対する撮影角度補正手法を提案した．先行研究において実装した従来のシステムと，本研究における上述の提案を実装したシステムとのマッチング成功率比較実験では，500 組（1000 枚）の紙片を用いて，マッチング候補紙片の数を 10 組から 490 組にかけて 20 組ずつ増やして行った際の組数ごとのマッチング成功率を算出し比較した．実験の結果，マッチング成功率は，いずれの組数においても提案システムが従来システムを大きく上回った．さらに，両システムの組数ごとのマッチング成功率に対して t 検定を行ったところ，全ての組数において 1%水準で有意差が認められた．

本研究を世に普及させる上でいくつかの課題が残されている．1 つ目に，紙片同士のマッチング成功率のさらなる向上が課題として挙げられる．本研究によって，紙片同士のマッチング成功率は先行研究と比べて向上した．しかし，本方式が世に普及し，多数のユーザがシステムに紙片を登録するようになった場合，現状のマッチング成功率（490 組で 35%前後）では到底使い物にならない．マッチング候補紙片の数が増加しても高いマッチング成功率を維持できるように，今後も紙片同士のマッチング成功率の向上については取り組んでいく．2 つ目に，本方式利用時のユーザ体験についての調査が課題として挙げられる．本方式は，見知らぬ人同士が連絡先の交換や専用デバイスの用意をすることなく電子情報のやりとりを行えるようにするものである．しかし，実際に見知らぬユーザ同士が本方式を利用した際の体験については未調査である．そこで，本研究において実装した紙片マッチングエンジンを使って実際にユーザ間で電子情報のやりとり（ファイル送受信，テキストチャット）を行えるアプリケーションを制作した（図 7.1）．今後，本方式の利用想定シーンを設定した上で，見知らぬユーザ同士で上述のアプリケーションを利用してもらった際の体験について調査する予定である．3 つ目に，3 つ以上にちぎりわけられた紙片同士をマッチングできるようにするための実装方法の検討や，3 名以上のユーザで本方式を

利用する場合の想定シーンの検討も課題として挙げられる．仮に本方式の 3 名以上での利用が実現した場合の利用方法としては，次のようなものが考えられる．

- 実空間の特定の場所にいた証（例：イベントの参加証，講義の出席票，など）として各ユーザが 1 枚の紙からちぎり取った紙片を持ち帰り，帰宅後に紙片から限定コンテンツを受け取る．
- 見知らぬ人同士からなる一時的なグループ（例：ツアー，講義，集団面接，など）のメンバ全員で 1 枚の紙をちぎり分け合っておき，後から紙片を通じてコンテンツをアップロードし合う．

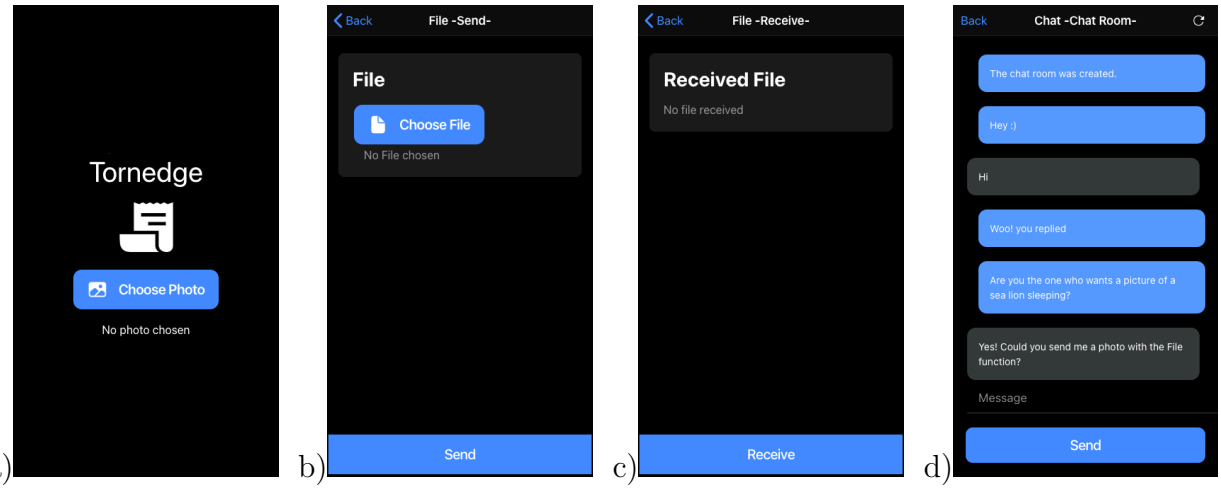


図 7.1: アプリケーション画面（a:トップ画面, b:ファイル送信画面, c:ファイル受信画面, d:チャットルーム画面）

謝辞

本研究は非常に多くの方々のご支援のもと行われました．

まず第一に，本研究の主査であり，学部時代から合わせて 4 年もの間ご指導賜りました宮田章裕准教授に感謝を申し上げます．未熟な私に研究とは何なのかを教え続けてくださったおかげで，私は研究に取り組むことの楽しさ，難しさ，意義を学び，人としても研究者としても成長することができました．先生のような偉大な研究者からご指導をいただけたことを誇りに思います．まだまだ未熟者ではございますが，これからも先生からいただいた教えを大切にし，精進して参ります．
副査を務めてくださいました尾崎知伸教授と北原鉄朗教授に感謝を申し上げます．大変ご多忙であるにも関わらず，研究の本質に関わる部分から本研究の今後の展望に至るまで丁寧にご指摘いただきありがとうございます．

長きにわたり共著者として本研究をご支援くださったお茶の水女子大学の伊藤貴之教授に感謝を申し上げます．画像処理の実装アイデアから研究の進め方，英語論文の執筆方法に至るまで，多くのご助言，ご指導をいただきました．心から御礼申し上げます．

本研究の発案者であり，研究生活中いついかなるときも力になってくださった，研究室の先輩である呉健朗さんに感謝を申し上げます．呉さんは私が研究室に配属されたときから現在に至るまでの 4 年間，時間や場所を問わず，常に支えつづけてくださいました．さまざまな研究に関わってきた経験からくる助言は的確かつ斬新で，たびたび，私の凝り固まった考えをほぐしてくれました．呉さんがいなければ，私はここまでやってこられなかったと思います．深く感謝を申し上げるとともに，どうぞこれからもよろしくお願いいたします．
研究室の同期で進学した唯一の友人である大和佑輝君に感謝を申し上げます．大学の初登校日で出会って以降，6 年にわたる仲となりました．互いに切磋琢磨しここまで来られたことを嬉しく思います．
研究室の同期であり卒業生の中原涼太君，長岡大二君，多賀諒平君，小林舞子さん，篠崎涼太君，宇野広伸君，樋口恭佑君に感謝を申し上げます．それぞれが取り組む研究は違いましたが，みなさんが自らの研究に真剣に取り組んでいたことで私も気が引き締まりました．研究室では互いの研究について議論や助言をし合い，研究生活を彩りのある楽しいものにしてくれました．研究室のドアを開けるのが楽しくなっていったのは，同期のみなさんの存在が大きかったと思います．

研究室の後輩であり，同研究室で進学した大西俊輝君，本岡宏將君に感謝をしています．研究に取り組む 2 人の真摯な姿勢は素晴らしく，いつも私を刺激してくれました．これから苦しいこともあると思いますが，これからの研究室を支え，頑張ってください．
同じく研究室の後輩であり他大学に進学した立花巧樹君，鈴木颯馬君，卒業生の内田大樹君にも感謝をしています．3 人は研究室内の同じチームの後輩として私を支えてくれました．いつも自分が忙しいときでも私の研究議論に参加してくれたり，実験の手伝いをし

てくれました．立花君と鈴木君は他大学に進学してからの活躍をときどき耳にします．これからの研究生活も頑張ってください．

同じく研究室の後輩であり卒業生の小林優維さん，柴田万里那さんにも感謝をしています．他チームだったため，研究を通しての関わりは実験の参加者程度でしたが，後に論文誌に載るほどの研究テーマを担当していた 2 人の研究者としての実力は確かであり，私も刺激を受けていました．

研究室の後輩である今井廉君，奥川和希君，大河原巧君にも感謝をしています．

今井君は本研究の研究議論に積極的に参加し，柔軟な発想で斬新なアイデアの創出に寄与してくれたり，指示をせずとも議論の議事録を取ってくれたり，さまざまな形で私をサポートしてくれました．

奥川君は本研究のシステムのアプリケーションを製作する際，強力な助っ人として実装を手伝ってくれました．システムを実装しつつ通話しながら共に年を越したことは良い思い出です．

大河原君は本研究におけるユーザ体験を測る評価実験の手伝いをしてくれました．私の家族が実験参加者であっても実験を整然と行い，見事完遂してくれました．

この研究を，そして私自身を支えてくださった方は数え切れません．適切なアドバイスをくださり研究をより良い方向に導いて下さった方々，本研究の評価実験に協力してくださった方々，貴重な学生時代を共に過ごした友人達，そして家族に感謝の意を表します．

2021 年 2 月
富永 詩音

参考文献

[1] 呉健朗, 玉城和也, 中村仁汰, 宮田章裕. 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の基礎検討. マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集, pp. 1493–1499, 2017.

[2] 玉城和也, 呉健朗, 中村仁汰, 富永詩音, 宮田章裕. 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実装. 情報処理学会インタラクション 2018 論文集, pp. 615–619, 2018.

[3] 呉健朗, 富永詩音, 宮田章裕. 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実用性検証. マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, pp. 1770–1776, 2018.

[4] 富永詩音, 呉健朗, 立花巧樹, 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基礎検討. 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2018 論文集, pp. 1–7, 2018.

[5] 富永詩音, 呉健朗, 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, pp. 75–81, 2019.

[6] Shion Tominaga, Kenro Go, Takayuki Itoh, and Akihiro Miyata. An interaction method for transferring electronic information by tearing a sheet of paper. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction*, OZCHI'19, p. 327–331, New York, NY, USA, 2019.

[7] 富永詩音, 呉健朗, 伊藤貴之, 宮田章裕. 紙をちぎって電子情報を手渡すコミュニケーションシステム. 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 2, pp. 244–253, 2020.

[8] Panu Åkerman, Arto Puikkonen, Pertti Huuskonen, Antti Virolainen, and Jonna Häkkilä. Sketching with strangers: In the wild study of ad hoc social communication by drawing. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing*, UbiComp '10, pp. 193–202, New York, NY, USA, 2010.

[9] Susanna Paasovaara, Kaisa Väänänen, Aris Malapaschas, Ekaterina Olshannikova, Thomas Olsson, Pradthana Jarusriboonchai, Jiří Hošek, and Pavel Mašek. Playfulness and progression in technology-enhanced social experiences between nearby

strangers. In *Proceedings of the 10th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '18, pp. 537–548, New York, NY, USA, 2018.

[10] Tien T. Nguyen, Duyen T. Nguyen, Shamsi T. Iqbal, and Eyal Ofek. The known stranger: Supporting conversations between strangers with personalized topic suggestions. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 555–564, New York, NY, USA, 2015.

[11] Eric Paulos and Elizabeth Goodman. The familiar stranger: Anxiety, comfort, and play in public places. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, pp. 223–230, New York, NY, USA, 2004.

[12] Mizuko Ito, Daisuke Okabe, and Ken Anderson. Portable objects in three global cities: The personalization of urban places. In *The reconstruction of space and time: mobile communication practices*, pp. 67–87, 2009.

[13] Stanley. Milgram. *The individual in a social world : essays and experiments / Stanley Milgram.* Addison-Wesley series in social psychology. Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass, 1972.

[14] https://support.apple.com/en-us/ht204144 (last visited: 2021/1/26).

[15] 山本伶, 増井俊之, 安村通晃. Sonoba.org: その場限定の情報共有システム. 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, 第 2013-HCI-152 巻, pp. 1–8, 2013.

[16] 土佐伸一郎, 田中二郎. SmARt Projection: モバイル端末内データを共有するための情報掲示システム. マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集, pp. 565–575, 2011.

[17] Andreés Lucero, Jussi Holopainen, and Tero Jokela. Pass-Them-Around: Collaborative Use of Mobile Phones for Photo Sharing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1787–1796, 2011.

[18] 米澤拓郎, 中澤仁, 永田智大, 徳田英幸. Vinteraction: スマート端末のための振動を利用した情報送信インタラクション. 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1498–1506, 2013.

[19] 富永詩音, 呉健朗, 篠崎涼太, 多賀諒平, 宮田章裕. ジェスチャを真似て電子情報を楽しく受け取る手法の実装と評価. マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, pp. 1341–1348, 2018.

[20] Toshihiro Nakae, Shiro Ozawa, and Naoya Miyashita. O-link: augmented object system for intergenerational communication. In SIGGRAPH ' 10 ACM SIGGRAPH 2010 Posters, 2010.

[21] Ville Mäkelä, Mohamed Khamis, Lukas Mecke, Jobin James, Markku Turunen, and Florian Alt. Pocket transfers: Interaction techniques for transferring content from situated displays to mobile devices. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018.

[22] Nirmal Patel, James Clawson, Amy Voida, and Kent Lyons. Mobiphos: A study of user engagement with a mobile collocated–synchronous photo sharing application. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 67, No. 12, pp. 1048–1059, 2009.

[23] Tim Weißker, Erdan Genc, Andreas Berst, Frederik David Schreiber, and Florian Echtler. ShakeCast: Using Handshake Detection for Automated, Setup-free Exchange of Contact Data. In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, pp. 88:1–88:8, 2017.

[24] Jun Rekimoto. Pick-and-Drop: A Direct Manipulation Technique for Multiple Computer Environments. In *Proseedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 31–39, 1997.

[25] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. Flashtouch: Data communication through touchscreens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 2321–2324, New York, NY, USA, 2013.

[26] Kaori Ikematsu and Itiro Siio. Memory stones: An intuitive information transfer technique between multi-touch computers. In *Proceedings of the 16th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, HotMobile '15, pp. 3–8, New York, NY, USA, 2015.

[27] Koji Yatani, Koiti Tamura, Keiichi Hiroki, Masanori Sugimoto, and Hiromichi Hashizume. Toss-it: Intuitive information transfer techniques for mobile devices using toss and swing actions. *IEICE - Trans. Inf. Syst.*, Vol. E89-D, No. 1, pp. 150–157, 2006.

[28] Takuro Kuribara, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Hoverlink: Joint interactions using hover sensing capability. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, pp. 1651–1656, New York, NY, USA, 2015.

[29] Alexander Kirillov, Kaiming He, Ross Girshick, Carsten Rother, and Piotr Dollar. Panoptic segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 9404–9413, 2019.

[30] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Nassir Navab, Joachim Hornegger, William M. Wells, and Alejandro F. Frangi, editors, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, pp. 234–241, Cham, 2015.

[31] Mingxing Tan and Quoc V. Le. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In Kamalika Chaudhuri and Ruslan Salakhutdinov, editors, *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, Vol. 97 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pp. 6105–6114. PMLR, 2019.

[32] T. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollár. Focal loss for dense object detection. In *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2999–3007, 2017.

[33] Pavel Yakubovskiy. Segmentation models. `https://github.com/qubvel/segmentation_models`, 2019.

[34] John Canny. A computational approach to edge detection. In Martin A. Fischler and Oscar Firschein, editors, *Readings in Computer Vision*, pp. 184–203. Morgan Kaufmann, San Francisco (CA), 1987.

[35] Eamonn J. Keogh and Michael J. Pazzani. Derivative dynamic time warping. In *Proceedings of the 2001 SIAM International Conference on Data Mining*, pp. 1–11, 2001.

[36] Yang Zhang and T. F. Edgar. A robust dynamic time warping algorithm for batch trajectory synchronization. In *2008 American Control Conference*, pp. 2864–2869, 2008.

[37] Jiaping Zhao and Laurent Itti. shapedtw: Shape dynamic time warping. *Pattern Recognition*, Vol. 74, pp. 171–184, 2016.

研究業績

査読付き論文誌

(1) 鈴木颯馬, 尹泰明, 立花巧樹, 大和佑輝, 呉健朗, 富永詩音, 小林稔, 宮田章裕: FINDrawers: 収納物を検索可能な引き出し型システム, 情報処理学会論文誌, Vol.62, No.1, pp.44–52 (2021 年 1 月).

(2) 立花巧樹, 呉健朗, 富永詩音, 大西俊輝, 鈴木颯馬, 諏訪博彦, 宮田章裕: 実世界オブジェクトを用いた生活空間内における事故予測支援手法, 情報処理学会論文誌, Vol.62, No.1, pp.35–43 (2021 年 1 月).

(3) 呉健朗, 富永詩音, 武藤佑太, 宮田章裕: 複数対話型エージェントの役割分担によるユーモア生成システム, 情報処理学会論文誌, Vol.61, No.8, pp.1353–1362 (2020 年 8 月).

(4) 富永詩音, 呉健朗, 伊藤貴之, 宮田章裕: 紙をちぎって電子情報を手渡すコミュニケーションシステム, 情報処理学会論文誌, Vol.61, No.2, pp.244–253 (2020 年 2 月).

(5) 呉健朗, 富永詩音, 多賀諒平, 宮田章裕: InfoClip: 日常生活空間中のオブジェクトへのリマインダ登録インタフェース, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.147–156 (2019 年 1 月).

査読付き国際会議

(1) Shion Tominaga, Kenro Go, Takayuki Itoh and Akihiro Miyata: An Interaction Method for Transferring Electronic Information by Tearing a Sheet of Paper, Proc. 31st Australian Conference on Human-computer-interaction (OzCHI 2019), pp.327–331 (2019.12).

(2) Kenro Go, Nagomu Horikoshi, Shion Tominaga, Jinta Nakamura and Akihiro Miyata: Implementation and Evaluation of a Reminder Registration Interface for Daily Life Objects, Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction (HCII 2018), Communications in Computer and Information Science, Vol.852, pp.455–462 (2018.6).

査読付き国内会議

(1) 今井廉, 呉健朗, 富永詩音, 木村悠児, 酒井知尋, 小島一憲, 宮田章裕: 会話の流れの可視化によるビデオ会議ファシリテーションへの影響, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2020 論文集, Vol.2020, pp.1–7 (2020 年 11 月).

(2) 鈴木颯馬, 尹泰明, 立花巧樹, 大和佑輝, 呉健朗, 富永詩音, 宮田章裕: finDrawers: 収納物を検索可能な引き出しの検証, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2019 論文集, Vol.2019, pp.120–124 (2019 年 11 月).

(3) 富永詩音, 呉健朗, 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, pp.75–81 (2019 年 3 月).

(4) 富永詩音, 呉健朗, 立花巧樹, 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基礎検討, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2018 論文集, Vol.2018, pp.1–7 (2018 年 11 月).

(5) 呉健朗, 堀越和, 富永詩音, 中村仁汰, 宮田章裕: 実世界オブジェクトへのリマインダ登録インタフェースの実装と評価, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2017 論文集, Vol.2017, pp.1–8 (2017 年 11 月).

研究会・シンポジウム

(1) 尹泰明, 富永詩音, 今井廉, 木村悠児, 宮田章裕: オンライン講義における学生の内職防止手法の比較, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2020 論文集, Vol.2020, pp.39–40 (2020 年 11 月).

(2) 栗田元気, 今井廉, 呉健朗, 富永詩音, 尹泰明, 酒井知尋, 小島一憲, 宮田章裕: 匿名性を段階的に変化させるコミュニケーションシステムの受容性調査, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2020 論文集, Vol.2020, pp.8–9 (2020 年 11 月).

(3) 武藤佑太, 呉健朗, 富永詩音, 山内愛里沙, 宮田章裕: ノリツッコミを行う対話型エージェントの基礎検討, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2020), Vol.2020, pp.663–668 (2020 年 6 月).

(4) 尹泰明, 富永詩音, 立花巧樹, 鈴木颯馬, 秋山和隆, 宮田章裕: 共有スペースにおいて空間専有感を生むライティング方式の検証, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2020), Vol.2020, pp.1029–1032 (2020 年 6 月).

(5) 富永詩音, 蔵内雄貴, 宮田章裕: 疎な移動履歴に基づく道ごとの通行可否推定方式の基礎検討, 情報処理学会研究報告 (GN), グループウェアとネットワークサービス, Vol.2020-GN-110, No.16, pp.1–5 (2020 年 3 月).

(6) 武藤佑太, 呉健朗, 富永詩音, 山内愛里沙, 宮田章裕: ユーモア提示エージェントプラットフォームの構築, 情報処理学会インタラクション 2020 論文集, pp.253–255 (2020 年 3 月).

(7) 尹泰明, 立花巧樹, 呉健朗, 富永詩音, 鈴木颯馬, 秋山和隆, 宮田章裕: 共有スペースにおいて空間専有感を生むライティング方式の基礎検討, 情報処理学会インタラクション 2020 論文集, pp.504–506 (2020 年 3 月).

(8) 今井廉, 呉健朗, 内田大樹, 富永詩音, 尹泰明, 栗田元気, 酒井知尋, 小島一憲, 宮田章裕: 匿名性を段階的に変化させるコミュニケーション支援システムの基礎検討, 情報処理学会インタラクション 2020 論文集, pp.722–724 (2020 年 3 月).

(9) 立花巧樹, 大西俊輝, 鈴木颯馬, 富永詩音, 呉健朗, 宮田章裕: 生活空間における危険予測支援システムの基礎検討, 情報処理学会グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2019 論文集, Vol.2019, pp.99–102 (2019 年 11 月).

(10) 鈴木颯馬, 立花巧樹, 大和佑輝, 呉健朗, 富永詩音, 宮田章裕: finDrawers:収納物を検索可能な引き出しの基礎検討, 情報処理学会インタラクション 2019 論文集, pp.864–866 (2019 年 3 月).

(11) 立花巧樹, 富永詩音, 大西俊輝, 呉健朗, 宮田章裕: ベビーカー利用時における周囲への動作予告手法の基礎検討, 情報処理学会インタラクション 2019 論文集, pp.179–181 (2019 年 3 月).

(12) 内田大樹, 立花巧樹, 富永詩音, 呉健朗, 宮田章裕: 影を用いた誘目性と受容性を両立する情報提示方法の基礎検討, 情報処理学会インタラクション 2019 論文集, pp.504–507 (2019 年 3 月).

(13) 富永詩音, 呉健朗, 篠崎涼太, 多賀諒平, 宮田章裕: ジェスチャを真似て電子情報を楽しく受け取る手法の実装と評価, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018), Vol.2018, pp.1341–1348 (2018 年 7 月).

(14) 呉健朗, 富永詩音, 宮田章裕: 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実用性検証, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018), Vol.2018, pp.1770–1776 (2018 年 7 月).

(15) 多賀諒平, 呉健朗, 富永詩音, 宮田章裕: スリッパを用いた匿名フィードバックシステムの基礎検討, 情報処理学会シンポジウム論文集, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018), Vol.2018, pp.427–431 (2018 年 7 月).

(16) 富永詩音, 呉健朗, 篠崎涼太, 多賀諒平, 宮田章裕: Transmimic: ジェスチャを真似て情報を受け取る手法の基礎検討, 情報処理学会インタラクション 2018 予稿集, pp.978–981 (2018 年 3 月).

(17) 玉城和也, 呉健朗, 中村仁汰, 富永詩音, 宮田章裕: 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実装, 情報処理学会インタラクション 2018 予稿集, pp.615–619 (2018 年 3 月).

メディア掲載

(1) 破った紙の画像、割り符に, 日本経済新聞 朝刊 科学技術面 (2018 年 4 月 2 日).

受賞

(1) マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム 最優秀プレゼンテーション賞, ジェスチャを真似て電子情報を楽しく受け取る手法の実装と評価, 受賞者: 富永詩音 (2018 年 7 月).

(2) マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム ナイトテクニカルセッション賞, ちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実用性検証, 受賞者: 呉健朗, 宇野広伸, 富永詩音, 長岡大二, 小林舞子, 大和佑輝, 篠崎涼太, 多賀諒平 (2018 年 7 月).

(3) 情報処理学会インタラクション 2018 インタラクティブ発表賞 (PC 推薦), 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実装, 受賞者: 玉城和也, 呉健朗, 中村仁汰, 富永詩音, 宮田章裕 (2018 年 3 月).

(4) 情報処理学会インタラクション 2018 インタラクティブ発表賞 (一般投票), 紙をちぎることで電子情報を手渡すインタラクション方式の実装, 受賞者: 玉城和也, 呉健朗, 中村仁汰, 富永詩音, 宮田章裕 (2018 年 3 月).