

博士学位論文

2次元パネルに基づく土器片組み立て支援
システム構築手法に関する研究

岩手大学大学院工学研究科

デザイン・メディア工学専攻

李 春元

2017年9月

概要

遺物の一種である土器は多くの場合、砕けた状態で遺跡から出土する。土器の破片は土器片と呼ばれ、土器片は接合することによって元の器の形へと復元される。一般に出土した土器の分類、組み立て、復元の工程は手作業で行われている。また、組み立て作業は試行錯誤を伴うため、土器片の汚損や破損のリスクが高まる。そのため、出土した土器片は歴史的、文化的に価値が高いものであると判明した場合は、破損を回避するため、土器片は復元作業を行わずに保存されることもある。しかし、可視化による仮説形成や文化財の保存と公開のために遺物の復元が必要な場合もある。近年、計算機を使用した土器片の組み立てを支援する技術の開発が期待されている。計算機を用いた土器片の組み立てに関する従来研究は、すべてのマッチング工程の自動化を目指す研究とユーザとのインタラクティブな組み立て作業の支援を目指す研究とに大別できる。本研究は後者の立場で、出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステム向けの要素技術開発と、システム構築を行っている。

土器の組み立てに類似する作業としてジグソーパズルが挙げられる。土器復元とジグソーパズルは、ばらばらの状態のピースをつなぎ合わせ、一つのを組み立てるという点で共通している。ジグソーパズルの組み立ての手順では、最初に枠の部分を組み立て、その後、内部の隣接ピースを組み合わせると容易に組み立て可能である。このジグソーパズルのセオリーを土器復元に応用した場合、土器の口縁部が重要となる。口縁部は土器の縁であり、口縁部を含む土器片は形状から判断可能である。口縁部を含む土器片は、ジグソーパズルにおける枠のピースに相当することから、ジグソーパズルの枠を構成するピー

スト同様に、比較的組み立てが容易な部位である。よって土器復元では、口縁部を組み立てた後で他の土器片との組み立てを行うのが有効な手順である。また、ピース輪郭の形状及びピース上の色や柄などの特徴を利用して組み立てるのが一般的である。それと同様に、土器片データ表面の文様や、輪郭線の形状をユーザに提示して土器片を組み立てることも可能である。専門知識を持つ人が、効率的に土器復元することを目的として、本研究ではユーザがパズル感覚でデータを操作する土器片組み立て支援システムを提案する。

本研究は、土器片を計測して得られた点群データ、ポリゴンデータおよび画像データから、ジグソーパズルのピースに相当する素材を生成し、ユーザがパズル感覚で思考できるような機能をいくつか提供する。ユーザは定められた手順に従って操作することによって、土器片データを隣接させていくというアプローチを採用する。本システムでは、ユーザがパズル感覚でデータを操作するため、試行錯誤を含んだ組み立てを支援するシステム実現できることが特徴である。本システムでは、次に示すような流れで、インタラクティブに土器の組み立てを行うことができる。まず、3次元計測器で測定した土器片の点群データを入力とする。すべての土器片の点群データを、ディスプレイ上に2次元的に配置する。次に、ユーザは口縁部と思われる土器片の点群データに手動でラベルを貼り付け、システムは、貼り付けられたラベルを参照して、口縁部を含む土器片の点群データをディスプレイ上部に並べ替える。そして、土器片の表面を表す計測点群を解析して、輪郭線情報と表面の文様の抽出を行う。抽出した輪郭線情報と文様を土器復元インタフェースに入力する。また、入力された輪郭線情報と文様に基づいて、システムが対象となる土器片の隣接候補を示す。ユーザが隣接候補から最も正しいピースを選択して、対象となる土器片に隣接できるように、平面上で平行移動と回転移動させる。システムが隣接された土器片の輪郭線同士を分割線ペアとして登録する。さらに、より正確な復元情報を作成するため、システムが2つの土器片をグループ化する。最後に、ユーザが取り出した隣接土器片を用いて分割線ペアと文様に基づいて、2つの土器片のマッチングと空間姿勢最適化を行う。

本手法の有効性を確認するため、まず、検証に用いた実行環境について述べる。次に、資料や写真などの付加的な画像情報がない場合を想定して、点群データのみを用いて、復元が可能であるかを検証した。その結果、口縁部を含む土器片をユーザはすべて発見し、部分的には、復元情報を生成することができた。また、ユーザが発見した隣接土器片を用いて、3次元マッチングを行い、輪郭線の形状をより正確に表現することができた。本研究では、試行錯誤を含んだ土器片組み立て支援システムを実現した。本システムで仮想的に土器片を組み立てた後、ユーザは復元情報を利用して実物を組み立てることができることを検証し、提案手法の有効性を確認した。

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	4
第2章 関連研究	6
2.1 本章の概要	6
2.2 3次元計測器を用いた土器片計測	6
2.3 土器復元に関する研究	9
2.3.1 破片断裂面の曲率分布に基づいた復元手法	9
2.3.2 VR技術を応用した遺物復元システム	9
2.3.3 分割線を用いた復元手法	11
2.3.4 空間姿勢最適化アルゴリズムの拡張による半自動復元手法	13
2.4 本研究の課題	14
第3章 土器片組み立て支援システム向けの要素技術	18
3.1 本章の概要	18
3.2 提案手法	18
3.3 土器片の配置	19
3.3.1 パネル	19
3.3.2 グリッド線	20
3.3.3 配置と操作	23
3.4 土器片の分類	27
3.4.1 口縁部	27

3.4.2	分類方法	27
3.5	土器片の特徴量の可視化	28
3.5.1	土器片の特徴量	30
3.5.2	特徴量の可視化	35
3.6	組み立てナビゲーション	36
3.6.1	土器片の姿勢変換	37
3.6.2	隣接候補を自動的に探す方法	37
3.6.3	土器片の隣接	42
3.7	3次元マッチング	42
3.7.1	分割線ペアの登録	43
3.7.2	文様を考慮したマッチング	43
3.8	土器片データの統合化	46
第4章	システムの構築手法	52
4.1	本章の概要	52
4.2	システム構成	52
4.3	システムの入力	53
4.4	復元情報を生成する手順	54
4.5	3次元マッチングの手順	56
第5章	実験結果	60
5.1	本章の概要	60
5.2	実験環境	60
5.3	遺跡の学び館からの遺物の事例	61
5.4	万福寺遺跡群から出土した遺物の事例	64
第6章	結論	68
6.1	研究のまとめと成果	68
6.2	今度の課題	70

謝辞	71
参考文献	72
発表論文	74

目 次

1.1	土器復元の様子（出典：IPA「教育用画像素材集サイト」）	1
1.2	従来手法の結果	3
1.3	土器配置の様子（出典：IPA「教育用画像素材集サイト」）	4
2.1	4方向レーザーを用いた計測器	7
2.2	土器片3次元計測点群データ	8
2.3	破片断裂面の曲率分布に基づいた復元手法	10
2.4	VRを使用した復元手法	11
2.5	分割線を用いた土器復元手法	12
2.6	逐次的マッチングによる蓄積誤差	13
2.7	空間姿勢最適化	15
2.8	複数土器片姿勢最適化手法	16
2.9	土器片の復元情報	17
3.1	パネルと土器片データ(点群)の表示	21
3.2	復元情報の説明	22
3.3	グリッド線の種類	23
3.4	土器片のサイズ：グリッド線密度 high	24
3.5	土器片の配置	24
3.6	パネルと土器片の移動	25
3.7	土器片の回転	26
3.8	口縁部判断手法	28
3.9	口縁部ラベル	29
3.10	口縁部の分類	30

3.11 隣接ピースの探索	31
3.12 輪郭点	32
3.13 分割線	33
3.14 文様抽出手法	34
3.15 文様流れ抽出手法	34
3.16 文様流れと文様点	35
3.17 特徴量の可視化	36
3.18 姿勢方向ラベル	38
3.19 付属情報の取り出す	39
3.20 隣接候補の探索方法	41
3.21 文様流れの判断	41
3.22 土器片の隣接手法	42
3.23 分割線ペアの登録	43
3.24 土器片ペアのグループ化	44
3.25 文様間の距離と角度の定義	45
3.26 3次元マッチング結果	47
3.27 グループ化前	49
3.28 グループ化後	50
3.29 グループ化追加	51
4.1 土器片を展開した結果	53
4.2 土器片を分類した結果	54
4.3 隣接候補を示した結果	55
4.4 特徴量を可視化した結果	55
4.5 土器片を隣接した結果	56
4.6 分割線ペア登録した結果	57
4.7 土器片ペアをグループ化した結果	58
4.8 3次元マッチングした結果	59

5.1	実験用出土した土器片1	61
5.2	実験用3次元計測点群データ	61
5.3	土器片データの分類	62
5.4	特徴量の可視化	63
5.5	隣接土器片を探索途中経過	63
5.6	回転と隣接	63
5.7	2次元上口縁部の復元結果	64
5.8	2次元上部分土器片データの復元結果	65
5.9	手作業で土器片の復元結果	65
5.10	3次元上部分土器片データの復元結果	66
5.11	実物の土器を復元した記録	67
5.12	土器片データ2の配置結果	67
5.13	実験2の復元結果	67

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

遺物である土器は多くの場合砕けた状態で遺跡から出土する。土器の破片は土器片と呼ばれ、土器片は接合することによって元の器の形へと復元される。出土した土器片は、土器の分類から、組み立て、復元までを手作業で行っている場合が多い、土器片の数が多いほど復元に時間を要する。また、復元には専門的な知識や経験も必要となり、考古学分野では遺物の復元作業は大きな負担となっている。例えば、図 1.1 のように基本的に手作業であり [1]、土器片に直接触れるため土器片の破損のリスクが高まるといった問題がある。文献 [2]



図 1.1: 土器復元の様子（出典：IPA「教育用画像素材集サイト」）

によると、土器片の年代を測定する方法には、大きく分類して4種類あり、層位学的方法、形式学的方法、相関年代決定法、理化学的年代測定法である。一般的には、4種類の年代測定法のうち複数の方法を用いて年代を測定する。複数の年代測定法を用いて、出土した土器片が現存する最古の土器片よりもさらに過去のものであると判明した場合は、土器片は復元作業を行わずに保存される。しかし、可視化による仮説形成や文化財の保存のために遺物の復元が必要な場合がある。このような問題を解決するために、計算機を使用して土器片の組み立てを支援する技術の開発が期待されている。計算機を用いた土器片の組み立てに関する従来研究 [3-11] は、すべてのマッチング工程の自動化を目指す研究、および、ユーザとのインタラクティブな組み立て作業の支援を目指す研究とに大別できる。

インタラクションによる土器復元システムに、VR(Virtual Reality)を使用した手法 [4] がある。文献 [4] の手法は、直接遺物に触らずにコンピュータを利用して接合するため、土器片の汚損や破損を回避することが可能である。しかし、文献 [4] の手法は、マッチングを手動で行うことになるため、復元精度に関する問題が残される。また、非整列な計測点群からポリゴンモデルを生成するためのプロセスが必要である。このとき、点群の粗密によっては、ポリゴンモデルにできた穴の部分を埋めることも必要である。

3次元計測器により土器片を計測し、計測点群の表面情報に基づいて隣接する土器片を探索する提案手法として、黄らの手法 [5] や Shoji らの手法 [6]、Oikawa らの手法 [7] がある。自動的にマッチング手法 [5] と [6] では、破片断裂面の輪郭と凹凸を用いて、土器片の輪郭線の形状解析を行い、得られた特徴的な箇所を端点として輪郭線を分割する特徴点で分割された輪郭線は、分割線と呼ばれている [5]。得られた分割線と文様情報を利用して破片の接合箇所を検出しマッチングを行う。文献 [5] の手法では、3次元的なマッチングが可能であるが、逐次的に土器片マッチングを行った場合、マッチング誤差が蓄積する問題がある。図 1.2 の (a) は、文献 [5] の手法によって、土器の口縁部周りの土器片を逐次的にマッチングした結果である。丸で囲ってある部分が、誤差の

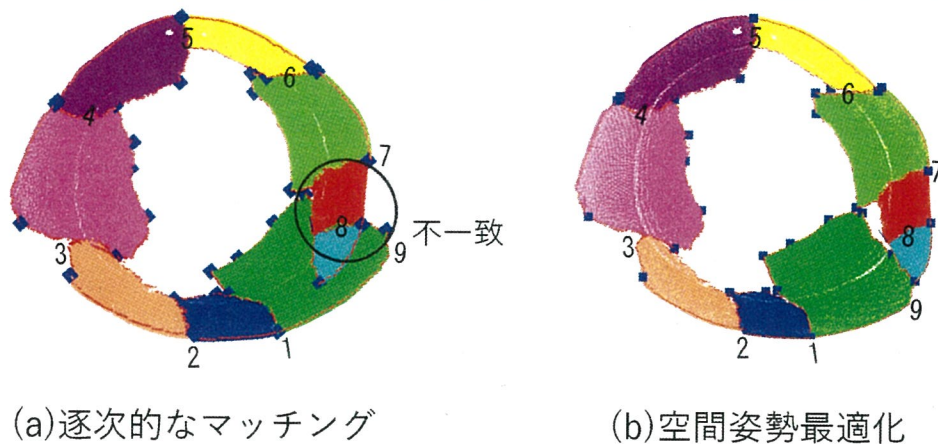


図 1.2: 従来手法の結果

蓄積により不一致となった部分である。

文献 [7] の土器片の空間姿勢最適化アルゴリズムの拡張による半自動組み立て手法では、文献 [5] のマッチング誤差の蓄積により生じたマッチングの不一致を修正する手法である。各土器片の良好な姿勢をできるだけ維持しながら、誤差を修正するため各接合部の誤差の総和を最小にする座標変換を行う手法が述べられている。図 1.2 の (a) に、図 1.2 の (b) と同じ土器片で、空間姿勢を最適化した結果を示す。この結果から、仮想的土器復元においては、逐次的に土器片をマッチングしていくよりも、複数の土器片を姿勢最適化してマッチングしたほうが良い結果が得られる。しかし、姿勢最適化を行うためには、マッチングする分割線のペアを複数定める必要がある。現在分割線のペアの定義は、ほとんど手動で行われており、時間がかかる。

本論文では、文献 [7] の問題であった、姿勢最適化のための分割線ペア決定時間を短縮することを視野に入れている。手作業には土器片が個々の土器ごとに分別され、配置が確認された後、接合される。展示室に保管されている土器配置のサンプルの写真 [1] は図 1.3 示すように、土器片同士がどの分割線でマッチングするかを、復元情報とすると、土器片の復元情報は 2 次元的な配置でも表現が可能である。もし、ディスプレイ上に土器片データを 2 次元的に配置し、移動回転などの編集ができるとすれば、土器片同士の配置関係によっ

て復元情報を表現できる。

本研究は専門知識を持つ人が、効率的に土器復元することを目的として、出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステムを提案する。本システムで仮想的に組み立てた後、ユーザは復元情報を利用して実物を組み立てることができる。よって、仮想組み立てによる復元情報と、隣接する土器片が配置されているかどうか、最終的な良し悪しの判断基準となる。すなわち、本研究で生成した復元情報を用いて、土器片が組み立て可能であることを示すことを目標とする。



図 1.3: 土器配置の様子（出典：IPA「教育用画像素材集サイト」）

1.2 本論文の構成

第2章では、本研究と関係が深い従来の研究について述べる。具体的には、本研究の中で利用している3次元計測器を用いた土器片計測手法と、土器復元に関するいくつかの手法について述べる。また、関連する各手法の問題点を明

確にすると共に、本研究の位置づけを明確にする。

第3章では、本研究で提案する土器片組み立て支援システム向けの要素技術について述べる。まず、ジグソーパズルのピースに相当するパネルの定義とパネルを生成する理由について説明する。また、ユーザの操作をわかりやすくするためグリッド線を導入し、パネルとグリッド線による土器片データの配置方法について述べる。次に、より配置精度を高めるため、輪郭線や文様などの特徴量の定義と抽出方法について説明し、特徴量に基づいて、土器片の隣接候補を探索する方法について述べる。そして、復元情報を評価するために抽出した分割線ペアによる3次元マッチング手法について説明する。最後に、土器片データの統合化手法について述べる。

第4章では、本システムの構成について説明した後、本システムによる土器復元操作手順について述べる。具体的な手順は、次のようである。まず、前処理として、特徴量を抽出する。次に、入力データを保存しているファイルから土器片の3次元点群データと特徴量をシステムに読み込む。そして、2次元パネル上に表示された輪郭線や文様情報に基づいて、復元情報を生成する。最後に、隣接情報を用いて、3次元マッチングを行い、土器を復元する。

第5章では、本手法の検証結果について述べる。本手法の有効性を確認するため、まず、検証に用いた実行環境について述べる。次に、資料や写真などの付加的な画像情報がない場合を想定して、点群データのみを用いて、復元が可能であるかを検証した。その結果、口縁部を含む土器片をユーザはすべて発見し、部分的には、復元情報を生成することができた。また、ユーザが発見した隣接土器片を用いて、3次元マッチングを行い、輪郭線の形状をより正確に表現することができた。

第6章では、本研究をまとめ、今後の課題を示す。まず、序論で述べた目的の確認と、課題に対して提案した本研究の理論を整理する。また、本研究で提案した各手法について、今後の課題を述べる。

第2章 関連研究

2.1 本章の概要

本章では、本研究と関係が深い従来の研究について述べる。具体的には、2.2節では、本研究の中で利用している3次元計測器を用いた土器片計測手法について述べる。2.3節では、土器復元に関するいくつかの手法について述べる。また、関連する各手法の問題点を明確にすると共に、本研究の位置づけを明確にする。

2.2 3次元計測器を用いた土器片計測

本研究の目的を達成するためには、土器片の3次元形状モデルを得る必要がある。土器片の計測方法の一つは3次元計測器を用いて計測する手法がある。文献 [12] は、ガラスボードの上に土器片を並べて4個のレーザーセンサを装着したロボットアームで計測する手法を提案している。文献 [12] で用いる3次元計測器を図 2.1 に示す。図 2.1 の3次元計測器は、ガラスボード、ロボットアーム、レーザーセンサで構成された計測器である。文献 [12] の計測ではまず、ガラスボードの上に計測対象の土器片を並べる。そして計測範囲を設定して計測を開始すると、全て自動で計測が行われる。図 2.1 の計測装置では、図 2.2 のような計測対象物の3次元ポリゴンモデルを生成する。



図 2.1: 4 方向レーザーを用いた計測器

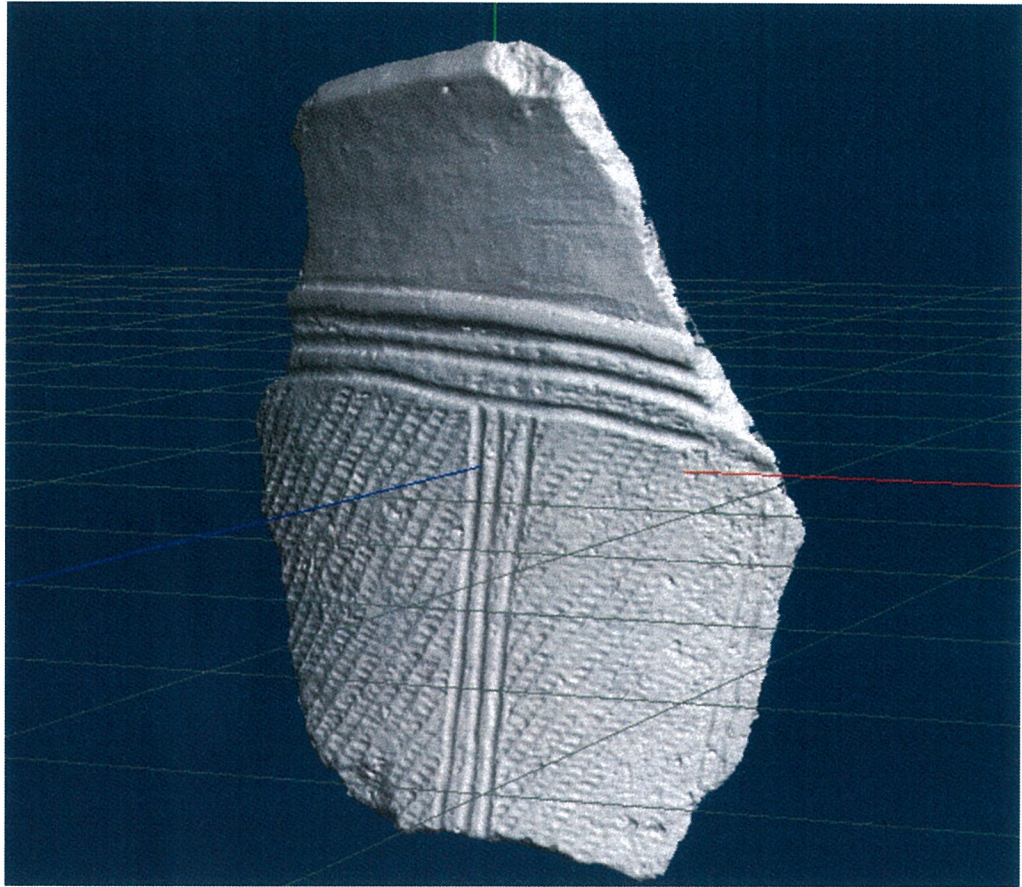


図 2.2: 土器片 3次元計測点群データ

2.3 土器復元に関する研究

計算機を用いた土器復元に関する研究は、すべてのマッチング工程の自動化を目指す研究とユーザとのインタラクティブな組み立て作業の支援を目指す研究とに大別できる。

2.3.1 破片断裂面の曲率分布に基づいた復元手法

3次元計測データを用いた遺物復元手法の1つに、破片断裂面の輪郭と面の凹凸を用いて、破片の接合箇所を検出し、復元する手法がある [3]。まず、積分不変量により破片断裂面の境界稜線を求め、マッチング対象となる断裂面の輪郭を得る。次に、破片断裂面の表面は凹凸が激しいことを利用して、表面の曲率分布から、物体本来の表面と断裂により形成された表面とに分類する。物体本来の表面と分類された部分は、マッチングの対象外とする。最後に、断裂面の曲率分布の類似性を利用して、破片のマッチングを行う。図 2.3 は文献 [3] で復元した遺物である。

文献 [3] の手法は、破片を構成する面を物体本来の面と断裂面に分けることで、マッチングの効率を向上する。また、破片の3次元的位置関係と姿勢を決定することができる。しかし、本研究は、断裂面の情報の抽出が難しい、土器片を扱うものであり、文献 [3] の手法を直接的に適応することができない。

2.3.2 VR 技術を応用した遺物復元システム

VR(Virtual Reality) を使用した手法 [4] がある。文献 [4] の手法は、直接遺物に触らずにコンピュータを利用して接合するため、土器片の汚損や破損を回避することが可能である。しかし、文献 [4] の手法は、マッチングを手動で行うことになるため、復元精度に関する問題が残される。また、非整列な計測点群からポリゴンモデルを生成するためのプロセスが必要である。このとき、点

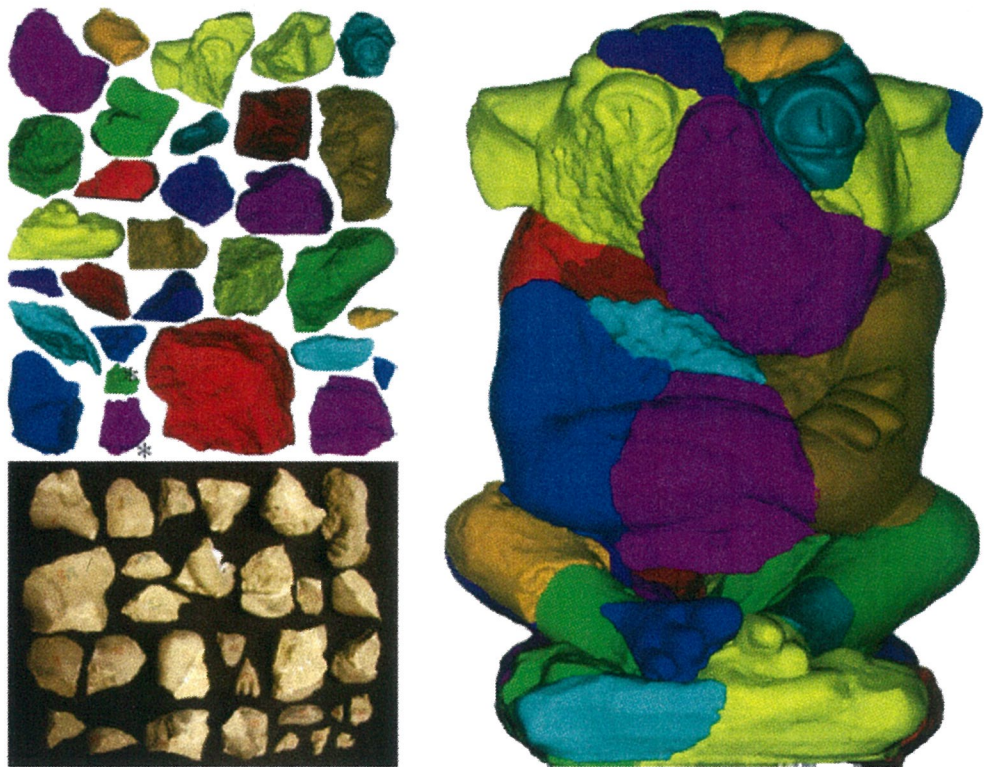


図 2.3: 破片断裂面の曲率分布に基づいた復元手法

群の粗密によっては，ポリゴンモデルにできた穴の部分埋めることも必要である．図 2.4 は文献 [4] の復元システムである．

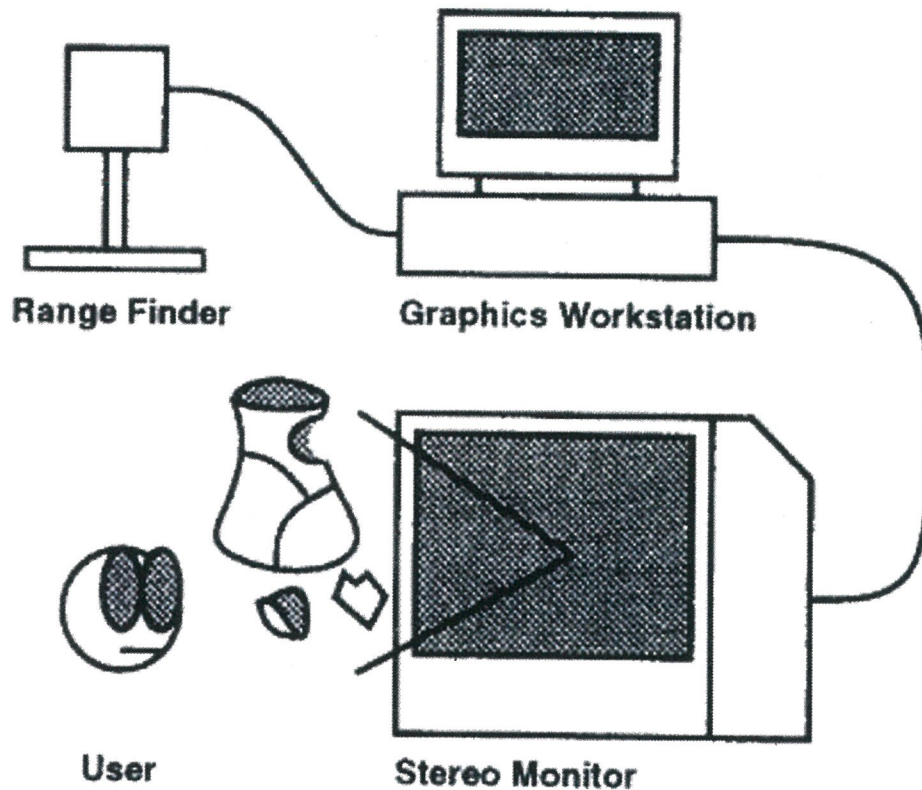


図 2.4: VR を使用した復元手法

2.3.3 分割線を用いた復元手法

コンピュータを利用して土器片などの破片からの形状復元を支援する研究が行われている．土器片の空間姿勢，および位置の最適化を提案する手法として，黄らの手法 [5] や Shoji らの手法 [6] がある．黄らの手法の概略は以下である．

1. 3次元計測器で土器片を計測することで3次元座標点群を獲得する．
2. 獲得した3次元座標点群から土器片の輪郭線を抽出する．

3. 抽出した輪郭線の形状解析を行い，複数の有意な分割点で輪郭線を分割する。
4. 点群の凹凸を検出して文様のある位置を抽出し，輪郭線に属性情報として追加する。
5. 分割した輪郭線ごとに幾何情報と文様の位置を比較評価することで，土器片をマッチングする。
6. マッチングされた土器片の分割線ペアを取り出し，それぞれの分割線上で接平面を推定する。
7. 接平面が一致するような幾何変換を導出し，隣接する土器片の空間姿勢を最適化する。

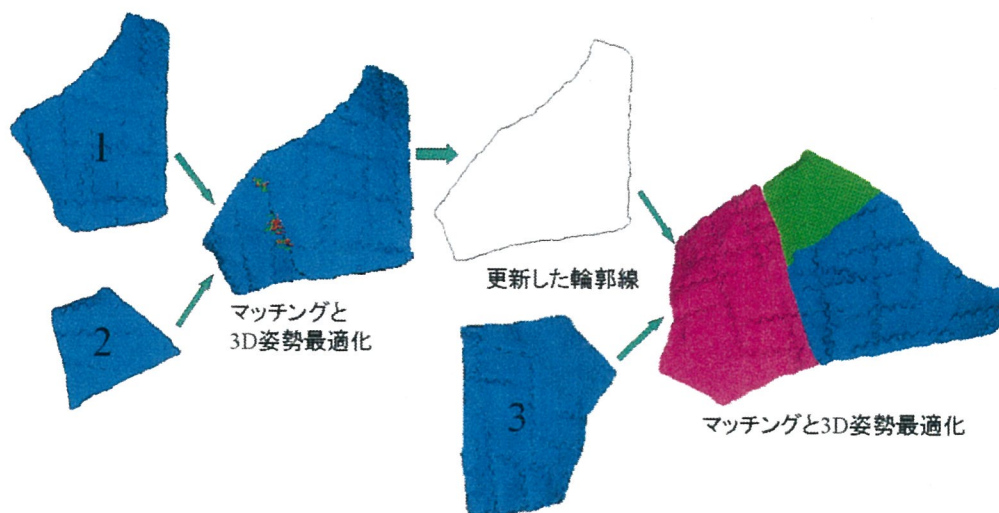


図 2.5: 分割線を用いた土器復元手法

図 2.5 は，黄らの手法により最適化された土器を示している．しかし，土器片の計測点群データで逐次的マッチングと位置の最適化した場合，土器片の破損等でデータが不足または変化し，空間姿勢がずれてしまう問題がある．図 2.6 は，黄らの手法 [5] によって，土器の口縁部周りの土器片を逐次的にマッチ

ングした結果である。丸で囲ってある部分が，誤差の蓄積により不一致となった部分である。

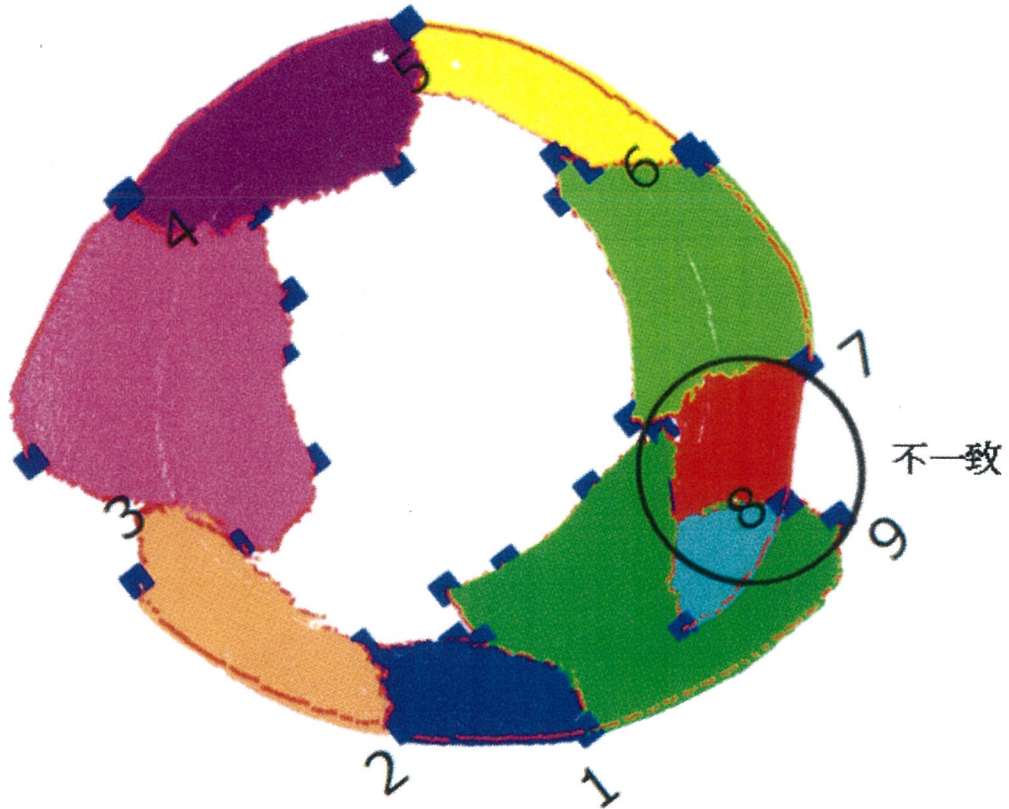


図 2.6: 逐次的マッチングによる蓄積誤差

2.3.4 空間姿勢最適化アルゴリズムの拡張による半自動復元手法

及川らの手法 [7] は，黄らの手法 [5] のマッチング誤差の蓄積により生じたずれを修正する手法である。土器片の空間姿勢最適化アルゴリズムの拡張による半自動組み立て手法を提案する。本手法は，まず土器片の表面を3次元計測器で計測する。そして，土器表面形状を表す計測点群に直接接触することで，視覚，触覚の両方の感覚を用いた，3次元的なマッチングを実現する。力覚を導入することで，マッチング結果の可否の判定が容易になる。点群への直接接触を行うため，まず接触する位置の近傍の点群を取得し，曲面近似手法により

局所的な曲面を生成する。そして、生成した曲面に対し力覚を提示することで点群に対して接触する。また、マッチングは、まず計測点群から分割線 [5]、文様流れ [13] を取り出す。次に、分割線と文様流れに基づいて、2つの土器片のマッチングと空間姿勢を決定する。その後、ユーザーはマッチング結果が妥当かどうかを視覚的、触覚的に判断する。さらに、必要に応じて、土器片の空間姿勢を手動で調整する。最後に、逐次マッチングによって生じた蓄積誤差を空間姿勢最適化アルゴリズムの拡張により修正する。図 2.7 に、図 2.6 と同じ土器片で、空間姿勢最適化を施した結果を示す。

及川らの手法 [7] の結論として、仮想的土器復元においては、逐次的に土器片をマッチングしていくよりも、複数の土器片を姿勢最適化してマッチングしたほうが良い結果を得られる。しかし、姿勢最適化を行うためには、図 2.8 のように、マッチングする分割線のペアを複数定める必要がある。現在分割線のペアの定義は、ほとんど手動で行われており、時間がかかる。

2.4 本研究の課題

本論文では、文献 [7] の問題であった、姿勢最適化のための分割線ペア決定時間を短縮することを視野に入れている。図 2.9 の画像は、土器片をテーブルの上に配置している様子の写真である、図 2.9 に示すように、土器片の配置関係によって復元情報を見て取ることができる。もし、ディスプレイ上に土器片データを2次元的に配置し、移動回転などの編集ができるとすれば、土器片同士配置関係によって分割線ペア決定することができる。

そこで、本論文では、土器復元における人間の思考作業を、インタラクションによって支援することを目指して、出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステム向けの要素技術開発と、システム構築を行っている。本システムで仮想的に組み立てた後、ユーザは復元情報を利用して実物を組み立てることができる。システム向けの要素技術について3章で詳しく述べる、システムの構築手法について4章で述べる。

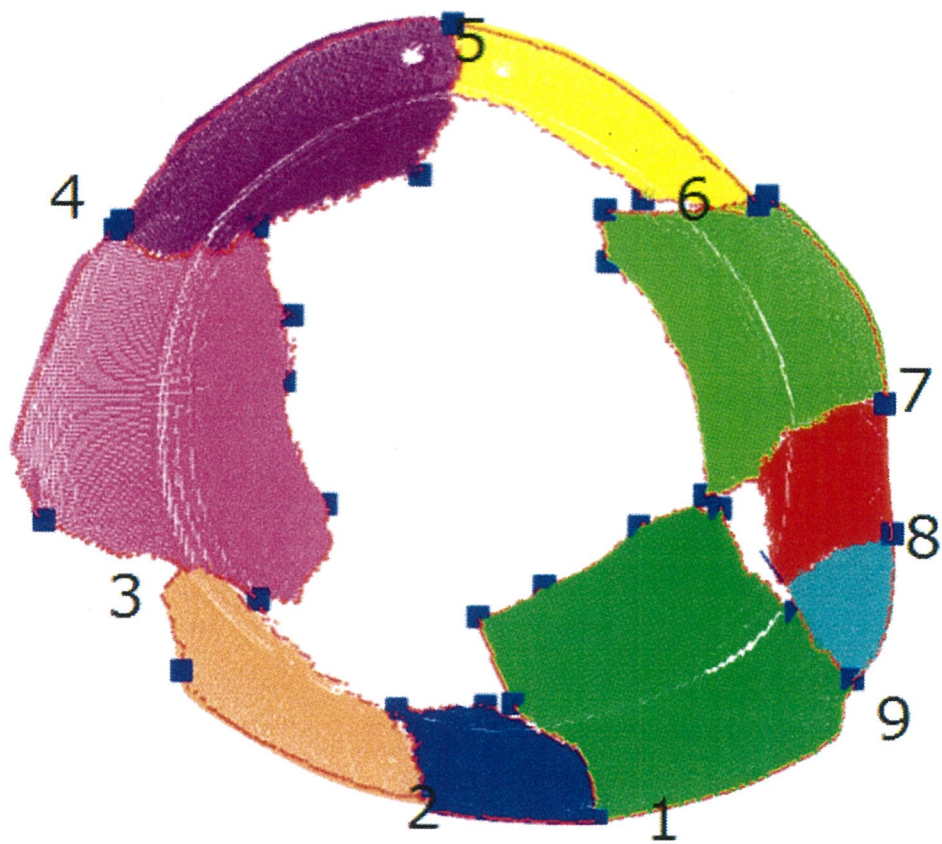


图 2.7: 空間姿勢最適化

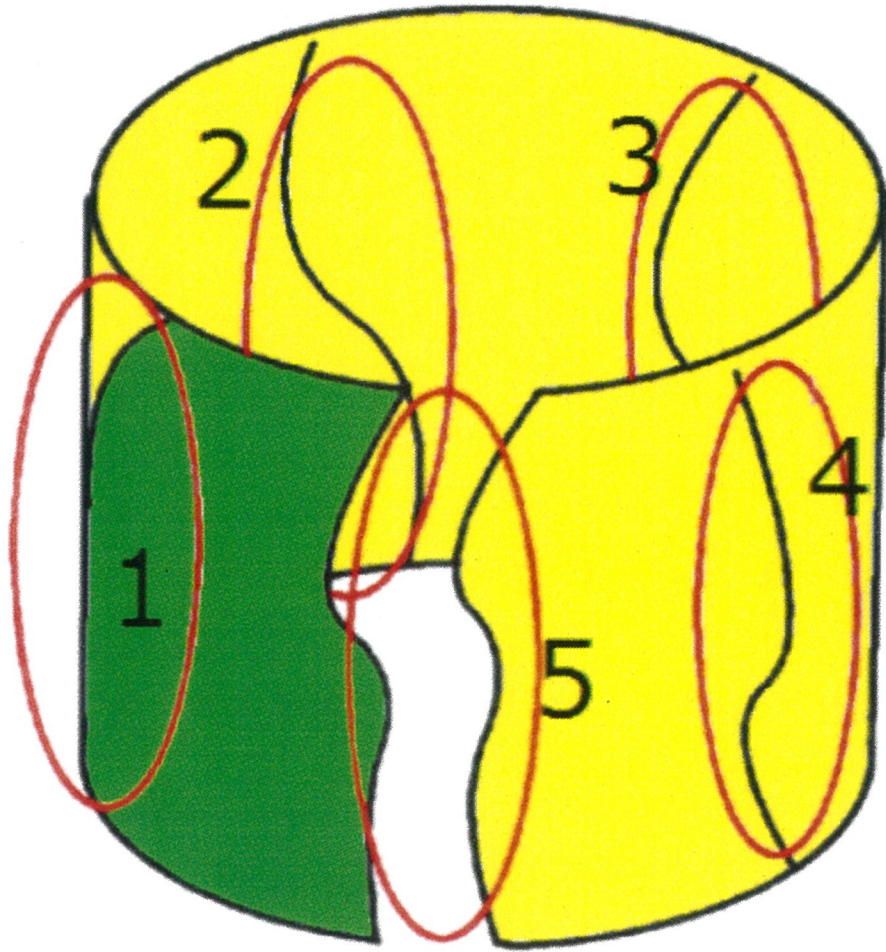


图 2.8: 複数土器片姿勢最適化手法



図 2.9: 土器片の復元情報

第3章 土器片組み立て支援システム ム向けの要素技術

3.1 本章の概要

本章では、本研究で提案した土器片組み立て支援システム向けの要素技術について述べる。3.2節では、本研究の課題を解決するための提案手法について述べる。具体的な要素技術は、次のようである。まず、3.3節では、ジグソーパズルのピースに相当するパネルの定義とパネルを生成する理由について説明する。また、ユーザの操作をわかりやすくするためグリッド線を導入し、パネルとグリッド線による配置する方法について述べる。次に、3.4節では、口縁部の土器片は互いにマッチングしやすく、なおかつマッチング姿勢が判断しやすいという利点があることから、口縁部を定義し分類する方法について述べる。そして、3.5節では、より配置精度を高めるため、輪郭線や文様などの特徴量の定義と抽出方法について説明する。更に、3.6節では、特徴量に基づいて、土器片の隣接候補を自動的に探索する方法について述べる。その後、3.7節では、復元情報を評価するために抽出した分割線ペア情報を用いて、3次元マッチングを行う手法について説明する。最後に、3.8節では、土器片データの統合化手法について述べる。

3.2 提案手法

土器の組み立てに類似する作業としてジグソーパズルが挙げられる。土器復元やジグソーパズルは、ばらばらになっているピースをつなぎ合わせ、一つの物体を組み立てるという点で共通している。ジグソーパズルの組み立ての手順

では、最初に枠の部分を組み立て、その後内部の隣接ピースを組み合わせると容易に組み立て可能である。このジグソーパズルのセオリーを土器復元に応用した場合、土器の口縁部が重要となる、口縁部は土器の縁であり、口縁部を含む土器片は形状から判断可能である。口縁部を含む土器片は、ジグソーパズルにおける枠のピースに相当することから、ジグソーパズルの枠を構成するピースと同様に、比較的組み立てが容易な部位である。よって土器復元では、口縁部を組み立てた後で他の土器片との組み立てを行うのが有効な手順である。また、ピース輪郭の形状及びピース上の色や柄などの特徴を利用して組み立てるのが一般的である、それと同様に、土器片データ表面の文様や、輪郭線の形状をユーザに提示して土器片を組み立てることも可能である。そこで、本研究では、専門知識を持つ人が、効率的に土器復元することを目的として、本研究ではユーザがパズル感覚でデータを操作する土器片組み立て支援システムを提案する。

土器片を計測して得られた点群データ、ポリゴンデータおよび画像データから、ジグソーパズルのピースに相当する素材を生成し、ユーザがパズル感覚で思考できるような機能をいくつか提供する。ユーザは定められた手順に従って操作することによって、土器片データを隣接させていくというアプローチを採用する。本システムでは、ユーザがパズル感覚でデータを操作するため、試行錯誤を含んだ組み立てを支援するシステム実現できることが特徴である。これから、出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステム向けの要素技術について述べる。

3.3 土器片の配置

3.3.1 パネル

本研究で扱っている土器片データは、文献 [12] の 3次元計測手法によって得られた3次元座標点群である。本システムでは、ジグソーパズルの組み立てセ

オリを応用するために、まず、すべての土器片データを本システムに入力する。土器片データの入力時に土器片データのサイズを参照し、土器片が収まるサイズの長方形パネルを自動的に生成する。入力した土器片データは、生成したパネルの上に乗せるように表示する。図 3.1 に生成したパネルと土器片データの配置関係を示す。パネルのサイズは、グリッドのマスを最小単位として、土器片データが収まる最小のサイズとなる。

パネルを生成する理由は、パネル同士の配置関係によって復元情報を容易に定義するためである。パネルを利用した復元情報を図 3.2 に示す。パネルが隣接する土器片同士を、接合可能な土器片の組み合わせとし、隣接するパネルの線分に最も近い土器片の輪郭を接合可能な輪郭と判断する。例えば、図 3.2 のようにパネルを配置した場合は、隣接している土器片 C と土器片 B が、緑色の輪郭線で接合可能であると判断する。同様に、隣接している土器片 A と土器片 C が、赤い輪郭線で接合可能であると判断する。また、隣接している土器片 A と土器片 B が、青い輪郭線部分も接合可能であると判断する。

3.3.2 グリッド線

本システムでは、システムの初期状態として、2次元のグリッド線を用意する。グリッド線を利用する理由は、ユーザの操作をわかりやすくするためである。土器の復元作業は、ジグソーパズルの組み立て作業と酷似している。パズルのピースを土器片とするならば、土器片を他の土器片と正しい組み合わせ、姿勢で接合することによって、完成体へと近づけていくことができる。ピースとなる土器片とパネルを、グリッド線上に配置し、2次元的に操作することによって、あたかもジグソーパズルを組み立てているように土器片を操作できる。これによりユーザは、ジグソーパズルを組み立てる要領で、仮想的な土器復元ができる。また、グリッド線のメモリによって、土器片の大きさや土器片間の距離を明確化するメリットもある。

グリッド線の目盛は土器片データを2次元的に移動させる時の移動量の目安

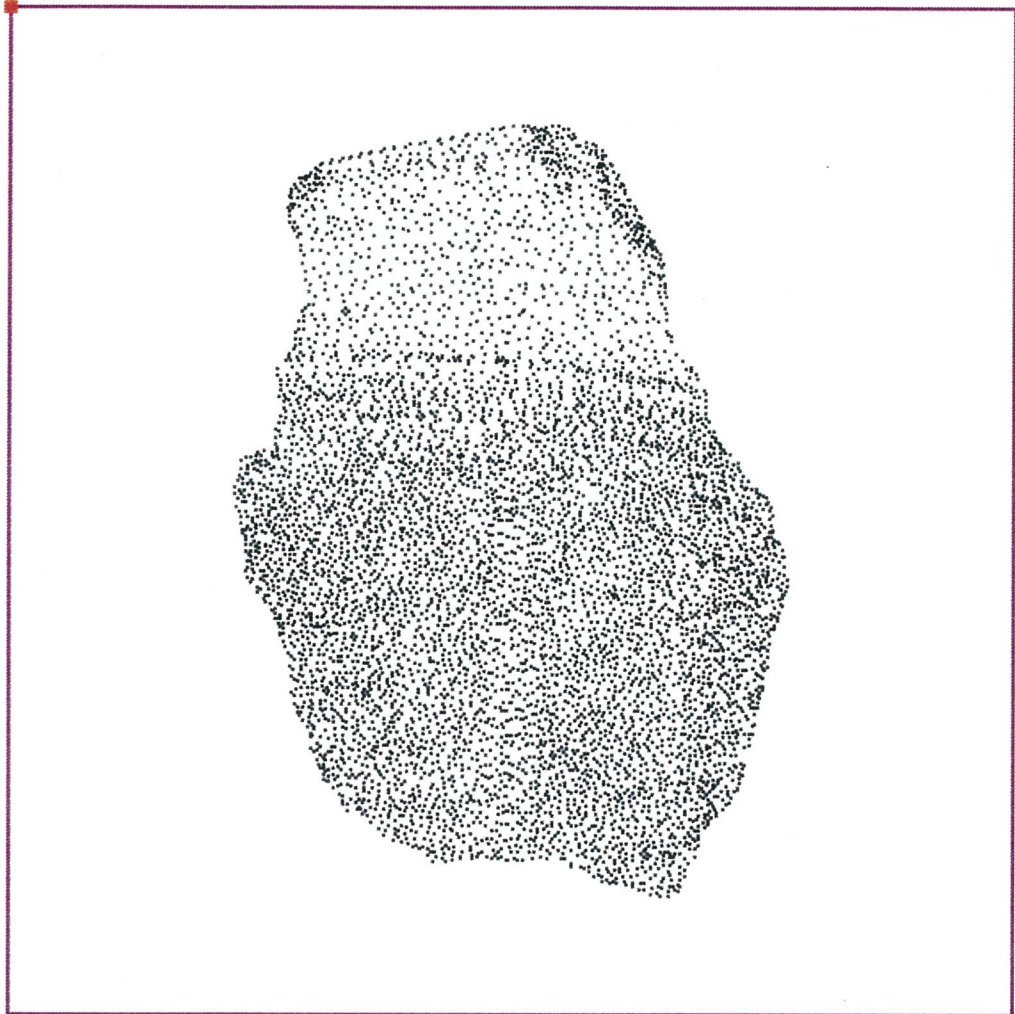


図 3.1: パネルと土器片データ (点群) の表示

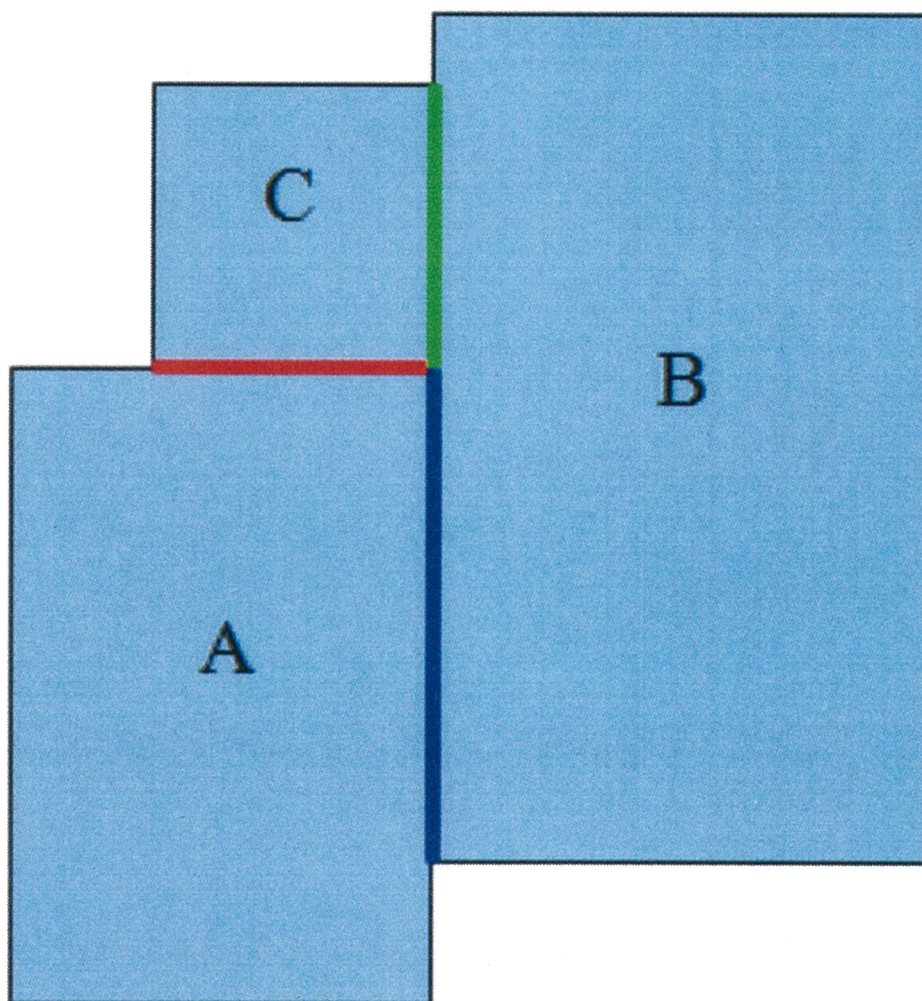


図 3.2: 復元情報の説明

として用いる。グリッド線の線密度について図 3.3 に示す。図 3.3 には 3 種類の線密度が示されており、それぞれ縦 n 本横 m 本を表示する状態 *high*、縦 $n/2$ 本、横 $m/2$ 本表示する状態 *middle*、縦 $n/4$ 本横 $m/4$ 本を表示する状態 *low* となっている。

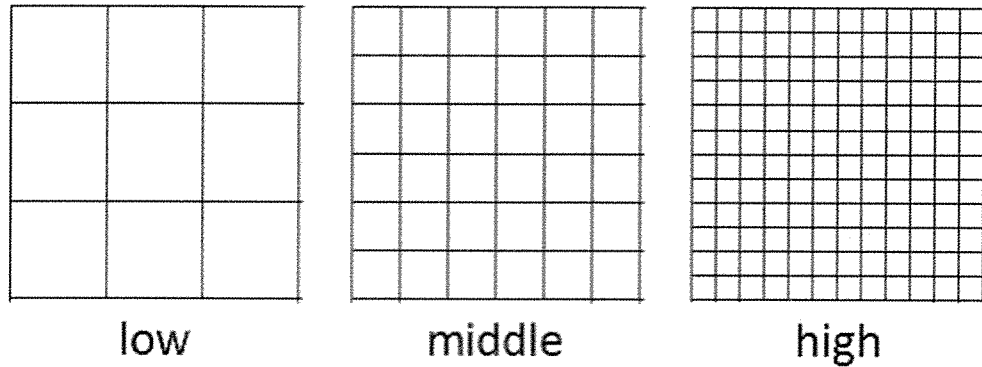


図 3.3: グリッド線の種類

グリッド線上にパネルを設置した様子から、土器片のサイズをおおよそ目測することができる。図 3.4 に土器片のサイズを判断する方法を示す。図 3.4 では、線密度 *high* のグリッド線の上にパネルを設置している。*high* のグリッド線の 1 目盛は、計測する実空間の 1cm に相当しており、パネルの 1 辺の長さを調べることで土器片のおおよそのサイズが判断できる。図 3.4 のパネルは、縦 9cm 、横 13cm に相当し、パネルは土器片データが収まる最小単位で生成されているので、計測土器片のサイズが判断しやすい。

3.3.3 配置と操作

すべての土器片データを本システムに入力すると、土器片の入力順に 2 次元的に配置される。土器片データは生成したパネルと共にグリッド線上に配置した様子は図 3.5 に示す。図 3.5 のように、パネル同士は重なっても良い。

本システムでは、土器片データとパネルは対になっており、土器片データに対応したパネルを操作することで、間接的に土器片データを操作している。図

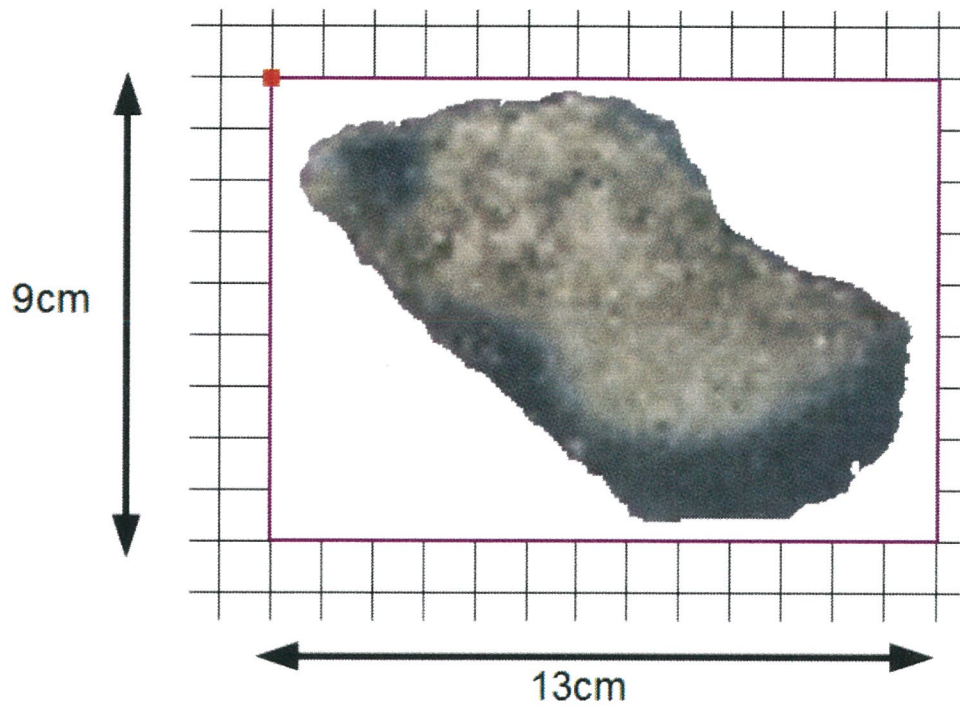


図 3.4: 土器片のサイズ：グリッド線密度 high

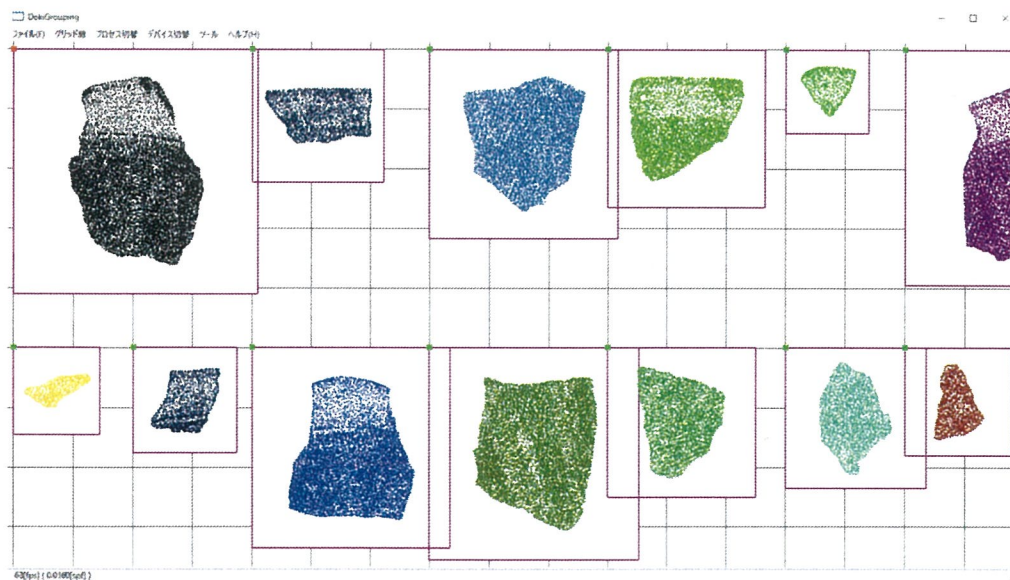


図 3.5: 土器片の配置

3.6に示すように、ユーザは選択した土器片データをグリッド線の縦横方向に1目盛ずつ移動させることができる。更に、グリッド線の線密度を動的に変化させることによって、土器片データの移動量を変化させることができる。

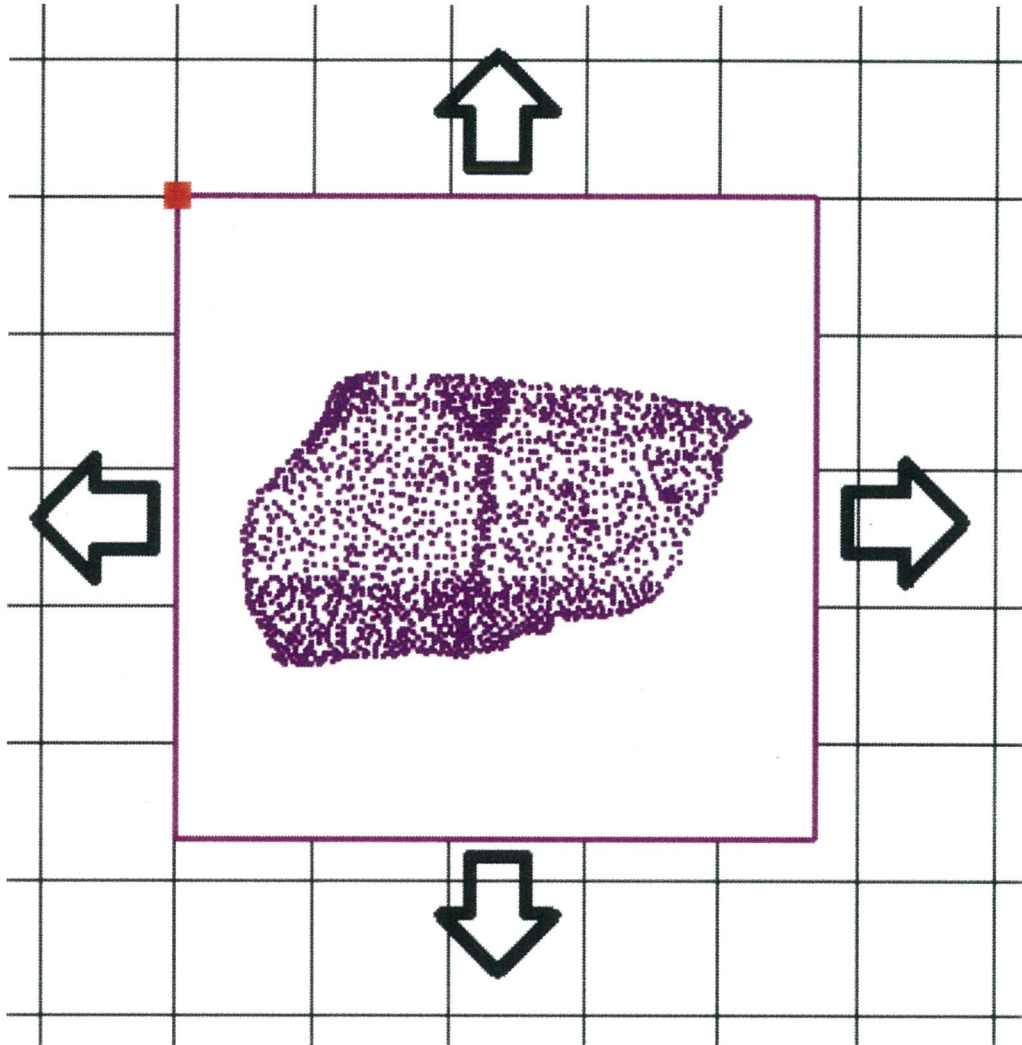


図 3.6: パネルと土器片の移動

隣接情報を表現するために、パネルの辺と、土器片の姿勢ができるだけ合うように、適当に土器片を回転する必要もある。本システムは、図3.7のように、パネルを変更せずに土器片を2次的に自由に回転できる。本システムは、グリッド線上で土器片データの配置関係を編集することで、土器片の接合関係を表現し、よりジグソーパズルに近い操作を再現する。

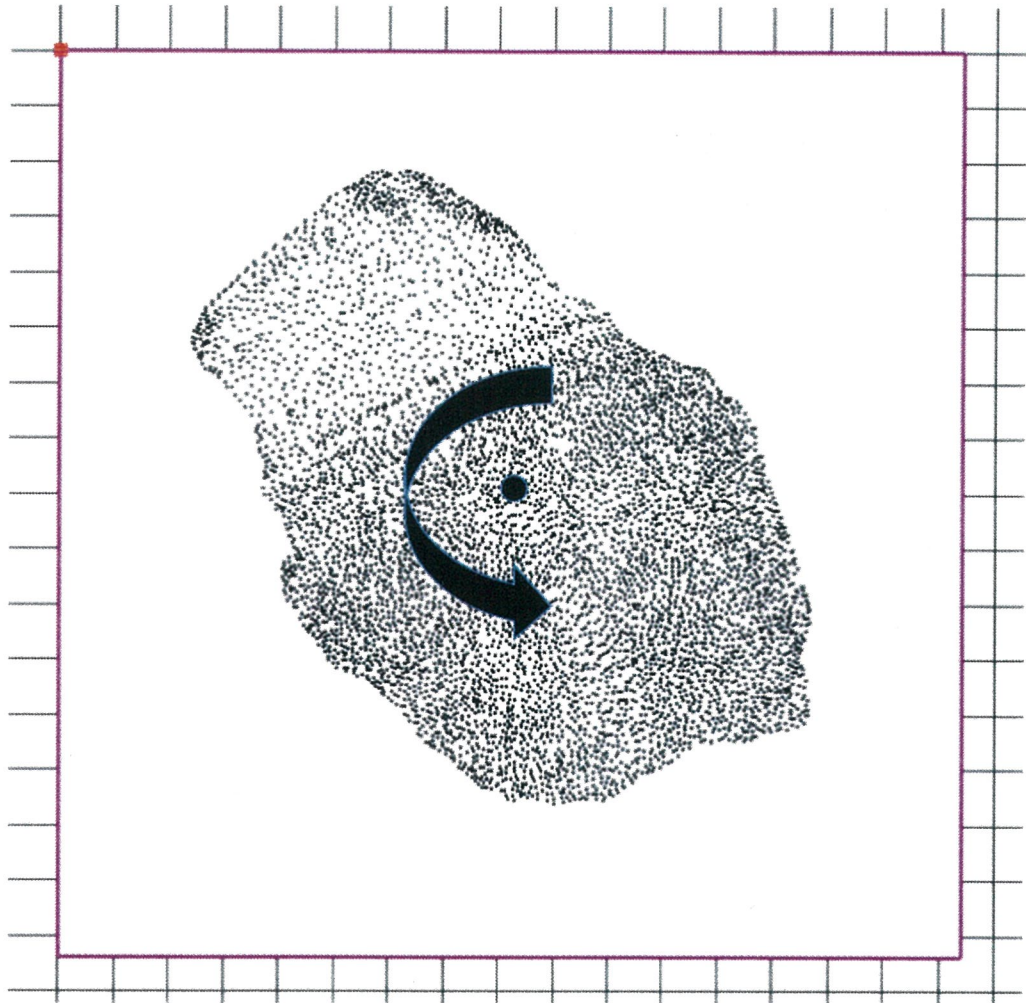


図 3.7: 土器片の回転

3.4 土器片の分類

口縁部を含む土器片とそれ以外の土器片を分類する。実際に土器復元を行う場合、接合する可能性のある土器片を取り出して接合を試みる作業の繰り返しとなる。このような試行作業は、土器復元に限らず、ジグソーパズルの組み立てにおいても同様である。ジグソーパズルは外枠から組み立てていくことで、比較的容易に組み立てが可能である。このジグソーパズルのセオリーを土器復元に応用した場合、土器の口縁部が重要となる。よって、土器復元には、まず、器の縁に当たる口縁部を含む土器片を分類し、口縁部から組み立てていくのが有効な手順と考えられる。

3.4.1 口縁部

考古学で、土器などの特徴を表現する場合に、特に口の部分の部位を指している。図 3.8 の (a) に示すように、口の部分は口縁部である。本研究では口の部分を構成している土器片は全部口縁部を含む土器片となる。土器片が口縁部を含むかどうかは、ユーザがディスプレイに表示された土器片データから視覚的に判断できる。図 3.8 の (b) は、口縁部を含む土器片の例となる。土器片 6 は上部が滑らかであることから口縁部と判断できる。それに対して、図 3.8 の (c) は、土器片 14 は口縁部を含まない土器片となる。

3.4.2 分類方法

口縁部と判断した場合は、手動でラベルを貼り付ける。口縁部ラベルが貼られた土器片データを図 3.9 に示す。図 3.9 では、緑色の辺に近い輪郭線に口縁部が存在する。口縁部ラベルは方向性を持っており、土器片のどの部分が口縁部であるかを示すことができる。

土器片データをラベルで分類した後は、自動並べ替えを行い、口縁部の土器片はディスプレイ上部に並べられ、他の土器片は下部に並べられる。図 3.10 は

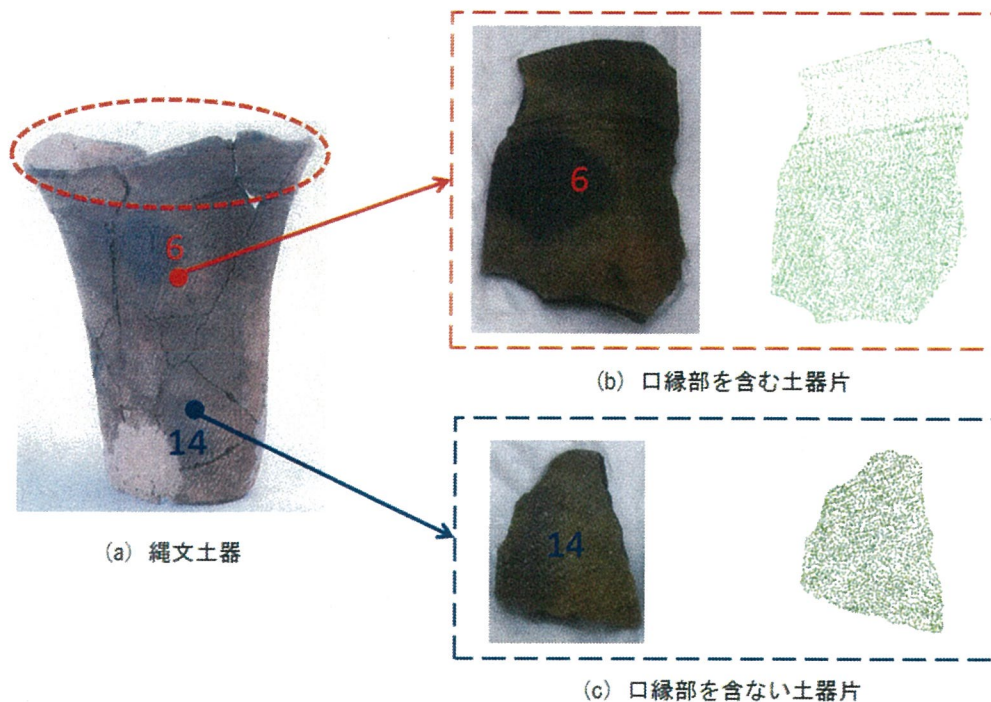


図 3.8: 口縁部判断手法

分類した土器片を並べ替えた様子である。口縁部の土器片は互いにマッチングしやすく、なおかつマッチング姿勢が判断しやすい利点がある。図 3.10 ではディスプレイ上部に口縁部を集めることで、互いにマッチングしやすい土器片が集められており、また口縁部が全て上を向いているので土器片の姿勢を補正している。故に、ユーザーが口縁部を復元しやすい配置と姿勢で土器片データが配置されていることが分かる。

3.5 土器片の特徴量の可視化

図 2.9 に示すように、土器表面には文様が施されている。図 3.10 は、土器片データの文様などを表示していない。ゆえに、土器片の隣接関係を判断することが難しい場合もある。図 3.11 のように、特徴などの情報をユーザに提示しない場合、土器片 23 と隣接している土器片を探索するのが難しい。ジグソーパズルの場合、ピース輪郭の形状及びピース上の色や柄などの特徴を利用して

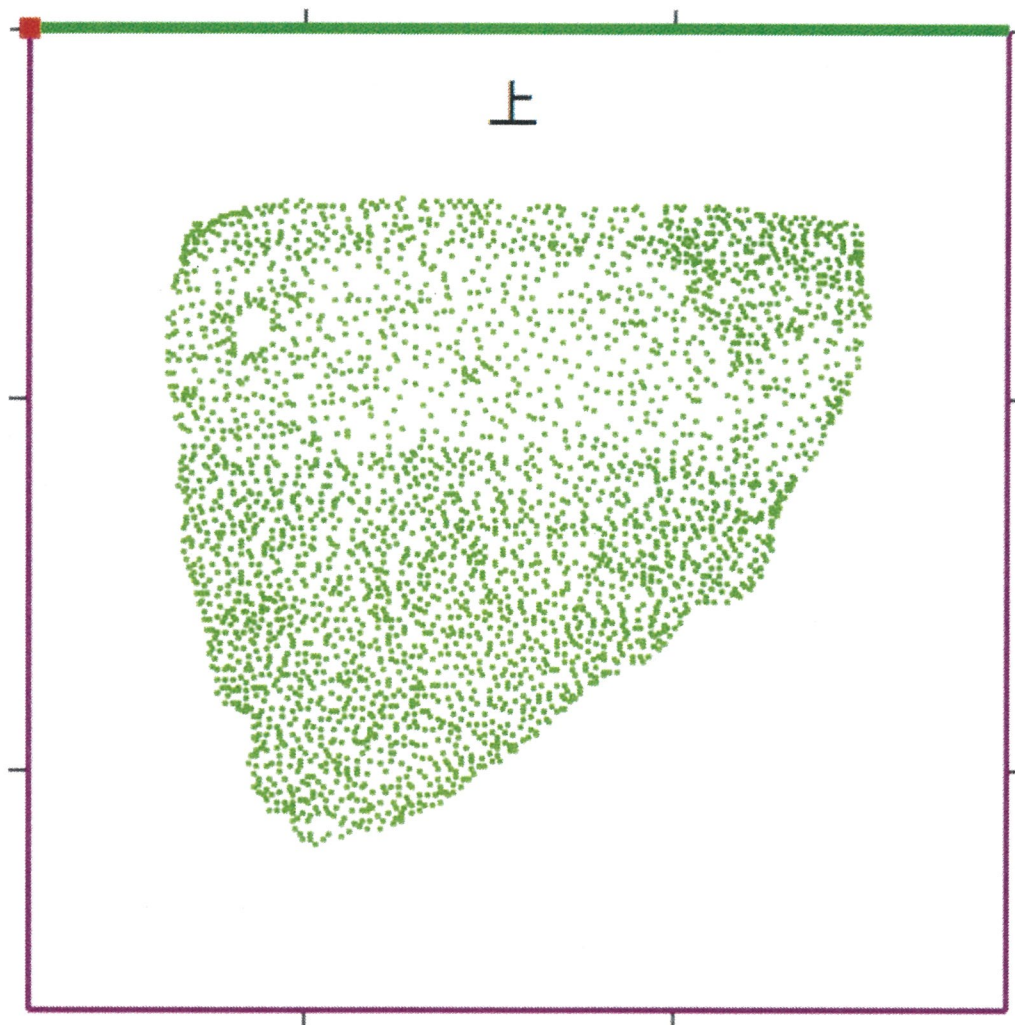


図 3.9: 口縁部ラベル

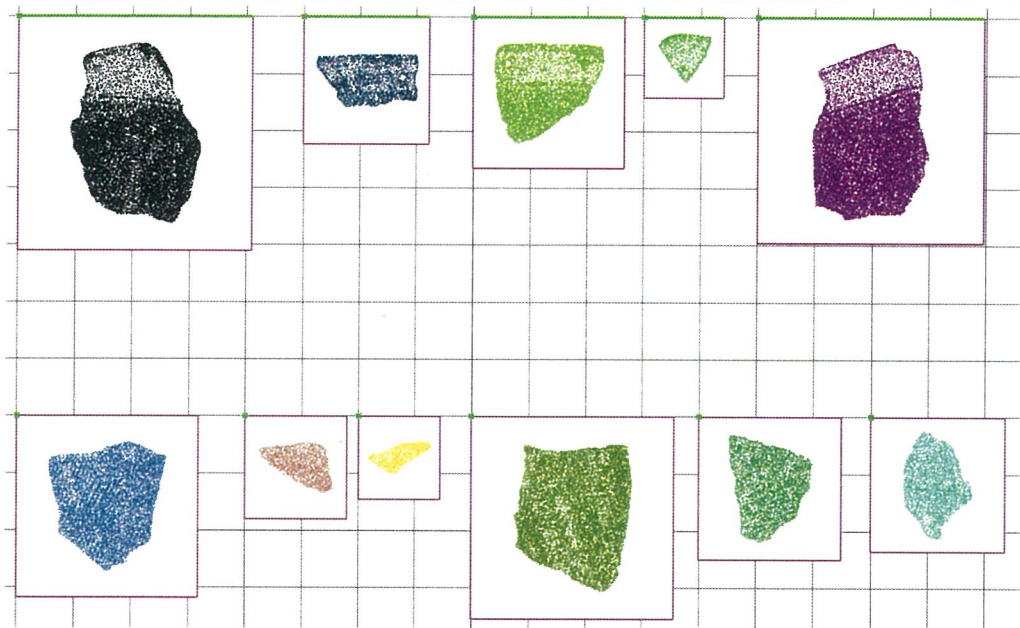


図 3.10: 口縁部の分類

組み立てるのが一般的である，それと同様に，土器片データ表面の文様や，輪郭線の形状をユーザに提示して土器片を組み立てることは有効な手法と考えられる．ゆえに，土器片の隣接情報を取り出すためには，表面の文様流れや，輪郭線の形状が重要である．ユーザは，システムが提示する文様情報や輪郭情報を手がかりに，土器片の隣接関係を判断する．ゆえに，土器片データの特徴量を可視化する必要がある．特徴量を可視化するために，それぞれの特徴量を抽出する必要がある．

3.5.1 土器片の特徴量

本節では用語の説明と各データの取得方法について示す．

- 輪郭点

土器片点群データで輪郭を構成している点を輪郭点と呼ぶ．本手法で輪郭点は， x, y 平面上で z 軸の高さを計測した非整列な点群から探索する．輪郭点は， x, y 平面に点群を投影し，最外郭となる点群を時計回りに探

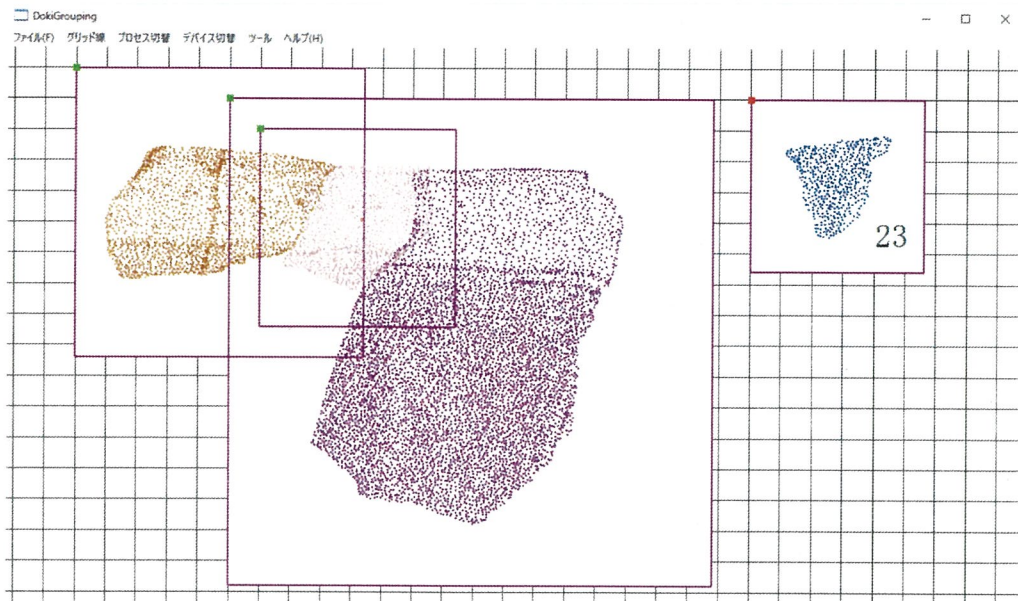


図 3.11: 隣接ピースの探索

索することで得られる。図 3.12 は輪郭点を表し、図の赤い点が輪郭点である。

- 分割線

文献 [6] の手法を用いて土器片の表面を表す計測点群を解析することで、輪郭線の特徴的な箇所を検出する。得られた特徴的な箇所を端点として輪郭線を分割し、分割線を得る。図 3.13 は輪郭線の分割例を示す。赤い点が端点、赤い分割点の間の線を分割線と呼ぶ。

- 文様点

本研究では文献 [13] の手法を用いて文様流れを抽出する。文献 [13] の土器表面の文様の抽出方法について説明する。土器片をテーブル上に置き、3次元計測器で z 軸を高さ方向として測定すると、土器片の凹凸は z 軸方向で表現される。獲得した3次元座標点群を z 軸方向の座標値を拡大して、元の土器片の凹凸を強調できる。しかし、土器片表面の凹凸を強調する場合、ノイズも強調される。そのため、撚糸文様を抽出する場合、強調された土器片の表面のノイズを除去する。ノイズを除去した後得ら

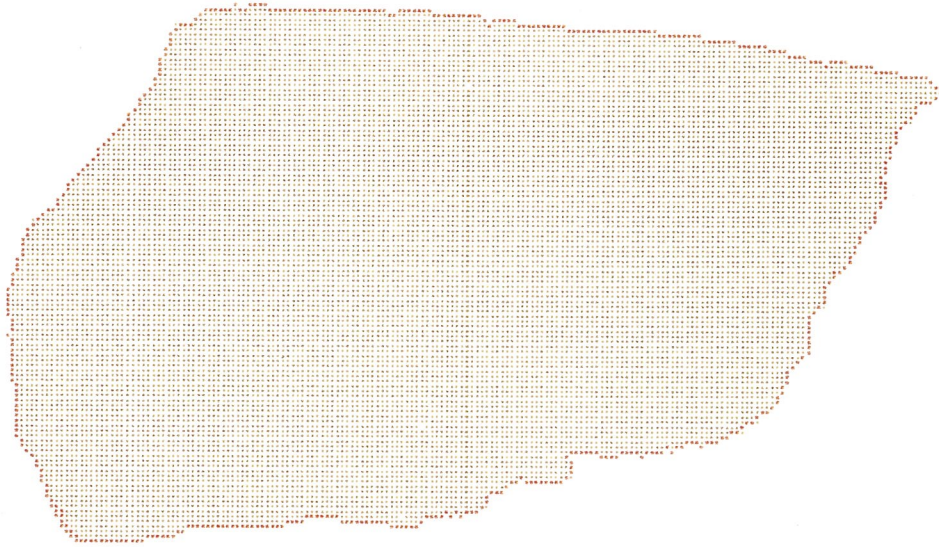


図 3.12: 輪郭点

れた面を基準面と呼ぶ。基準面にフィルタをかけて得られた面と、基準面との z 軸方向で高さの差分を算出し、差分に基づいて、土器片表面の文様を抽出する。

具体的な文様の抽出方法を説明する。図 3.14 に示すように、 A は基準面、面 A に対して、凹凸を除去した面を B とする。土器片のポリゴンモデル上の任意の点 P 、面 A と面 B における対応点を P_A 、 P_B とする。面 A と面 B の差分 h は $|h = P_A - P_B|$ としたときに、 $h > \epsilon$ となる部分を文様とする。閾値 ϵ は試行結果により決定する。

- 文様流れ

撚糸文は、隣接している撚糸文様とする点は等分となる、という特徴がある。このことから、撚糸文を直線に近似することができる。得られた文様点を xy 平面へ投影した 2 次元座標値を用いて直線で近似する。近似した直線は不連続なので、文様の流れに応じて、複数の直線をグループ化して、1 本の直線で近似し、文様のベクトルである文様流れを得る。図 3.15 は文様流れを表している。

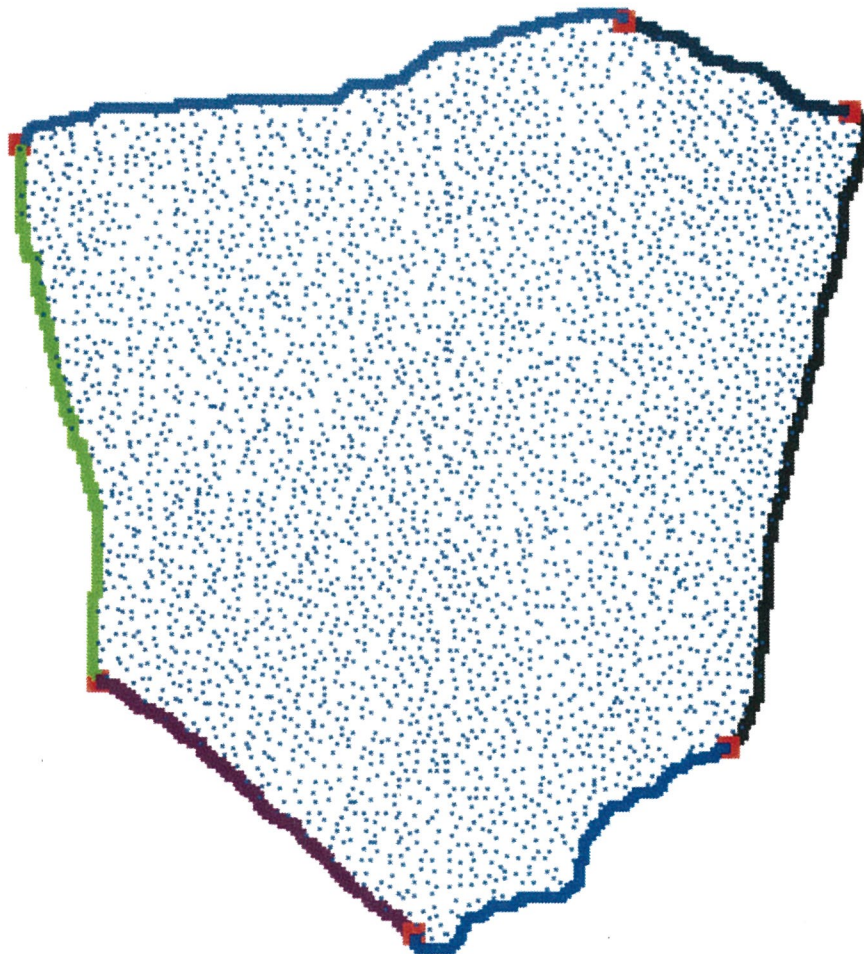


图 3.13: 分割線

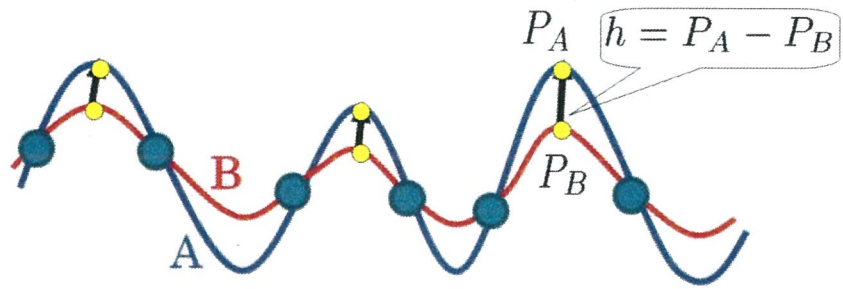


图 3.14: 文様抽出手法

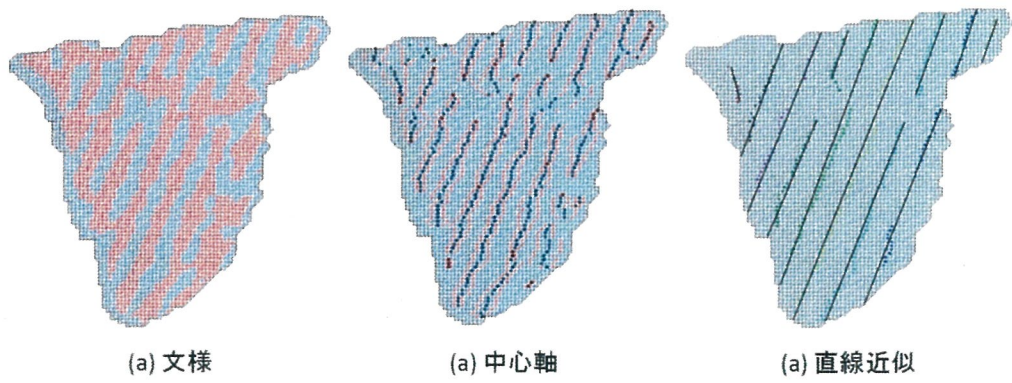


图 3.15: 文様流れ抽出手法

図 3.16 は文様点と文様流れの例を示す。緑の点が分割線上の文様点，赤い点で構成している線が文様流れである。

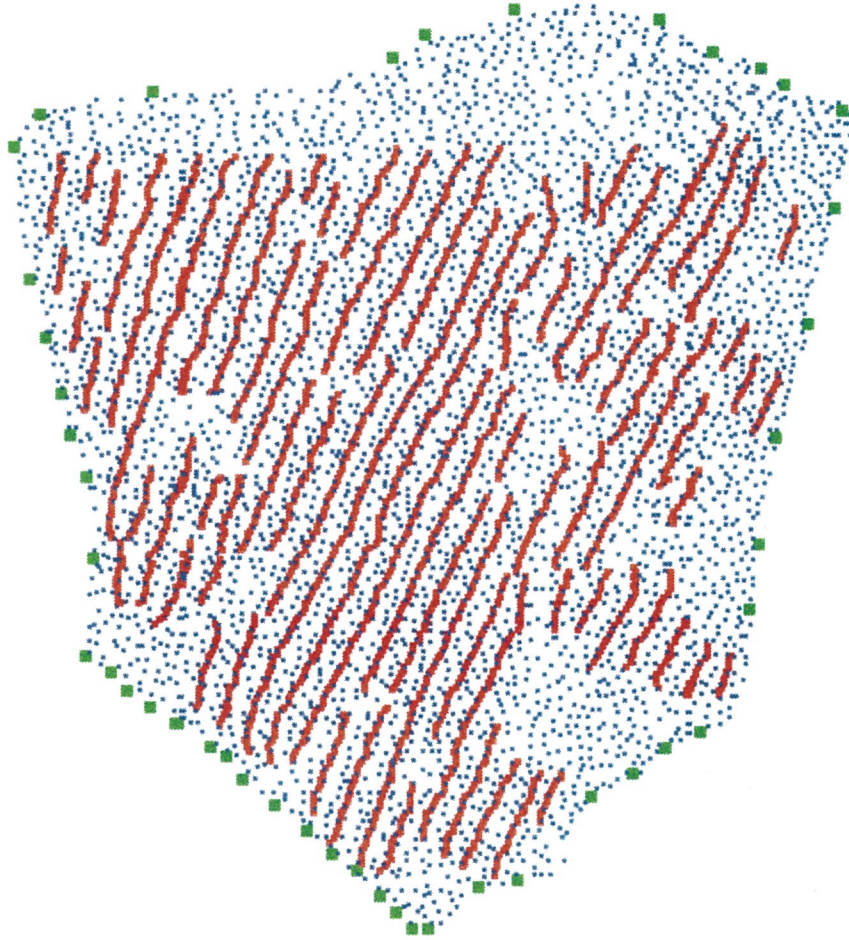


図 3.16: 文様流れと文様点

3.5.2 特徴量の可視化

前節で抽出した輪郭線，分割点，文様点，文様流れ，を本研究では特徴量と呼ぶ。抽出したデータを本システムに入力して，土器片データと同じ場所に

描画する機能を追加する。図 3.17 は特徴量の可視化例である。図 3.17 の示すように、土器片 23 の復元情報を、文様を提示することで、取り出すことができる。

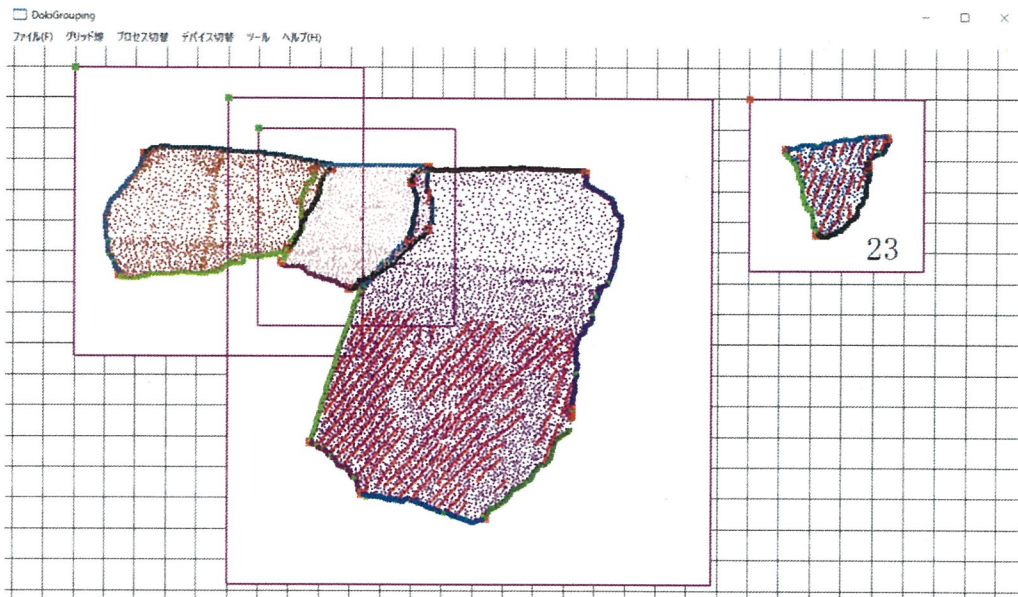


図 3.17: 特徴量の可視化

3.6 組み立てナビゲーション

土器復元するために、隣接土器片を探索する必要がある。人手で隣接土器片を探索するには試行錯誤が伴うため、土器片の汚損や破損のリスクが高まる。ジグソーパズルのセオリーにより、ユーザは土器片データを移動、回転することによって、文様や口縁部などの特徴量を提示しながら、ユーザが直感的に隣接土器片データを決定する。しかし、ユーザが直感的に隣接土器片を探すため、接合する可能性のある土器片を取り出して接合を試みる作業の繰り返しとなる、土器片の数により、復元に時間がかかってしまう。それに、ユーザが直感的に隣接土器片データを判断するとマッチング精度が悪い。そこで、本研究では、土器復元インターフェースに基づいて隣接候補を自動的に探すが、土器片組み立ての効率化に貢献することに着目して、土器の文様流れと輪郭情報

を付加した2次元パネルに組み立てナビゲーション機能を追加することを提案する。

3.6.1 土器片の姿勢変換

本手法では、隣接候補を自動的に探すために、全ての土器片は文様流れに応じて正しい姿勢を決定する必要がある。ここで、口縁部を含まない土器片データの上下方向を定義するために、姿勢方向ラベルを用意する。ユーザが土器片の姿勢を判断したら、図3.18に示すような姿勢方向ラベルを貼り付けて、システムは判断の結果に従って、土器片を回転する。図3.18の土器片データは、黄色の辺が上を向く姿勢が正しい姿勢とする。

3.6.2 隣接候補を自動的に探す方法

本節では、隣接候補を自動的に探す方法について説明する。まず、パネルの辺をそれぞれ上、下、左、右としてマークする。次に、全ての土器片に対応するパネルの四辺に近い分割線と文様情報をそれぞれ取り出す。そして、対象となる土器片の一つ分割線を選択する、もし、選択された分割線はパネルの右の辺に近い分割線の場合、ほかの土器片の全ての左分割線とマッチングを行う。マッチング結果に従って、条件に満たせば、左分割線が示される、左分割線に対応する土器片が隣接候補とする。すべての候補を示すあと、ユーザは隣接候補を選択したら、自動並べ替え機能を使用しシステムが対象となる土器片の近くに配置される。同様に、選択された分割線はパネルの下の辺に近い分割線の場合、ほかの土器片の全ての上分割線とマッチングを行う。

以下には、パネルの四辺に近い付属情報を取り出す方法と分割線ペアを用いて、マッチング方法について述べる。

- 付属情報の取り出す

パネルの四辺に近い付属情報を取り出す方法について述べる。まず、分

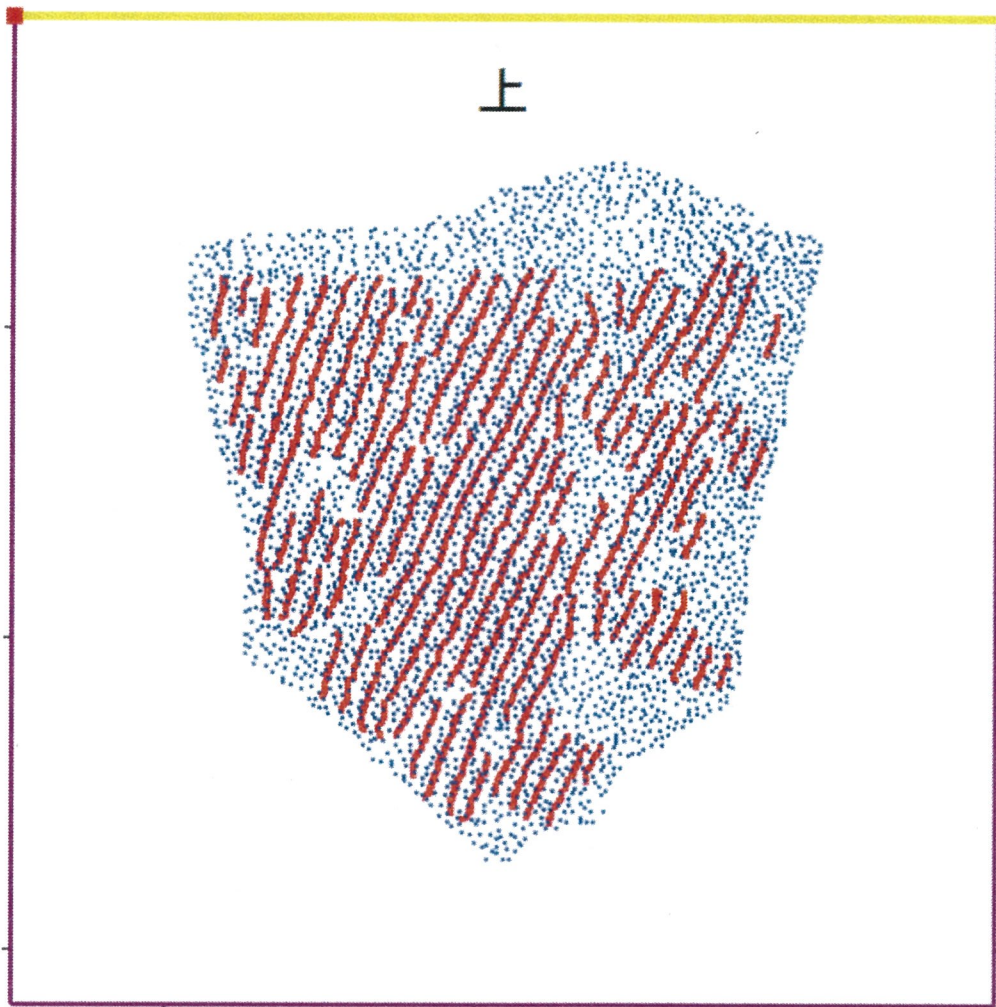


図 3.18: 姿勢方向ラベル

分割線上のすべての点がパネルの四辺までの平均距離を求める。次に、平均距離が最小となる時、分割線に対応するパネルの辺を算出できる。図 3.19 のように、分割線 d_2 の場合は、分割線 d_2 上の点 $p_i (i = 0, \dots, n)$ 、パネルの四辺までの平均距離 $d_{上}$, $d_{下}$, $d_{右}$, $d_{左}$ をそれぞれ算出する。平均距離 $d_{右}$ が最小となる時、分割線 d_2 は右の辺に近い分割線となる。土器片 D に対応するパネルの右の辺に近い分割線情報を、分割線 d_2 と分割線 d_3 となる。同様に、他の辺の付属情報を取り出すことができる。

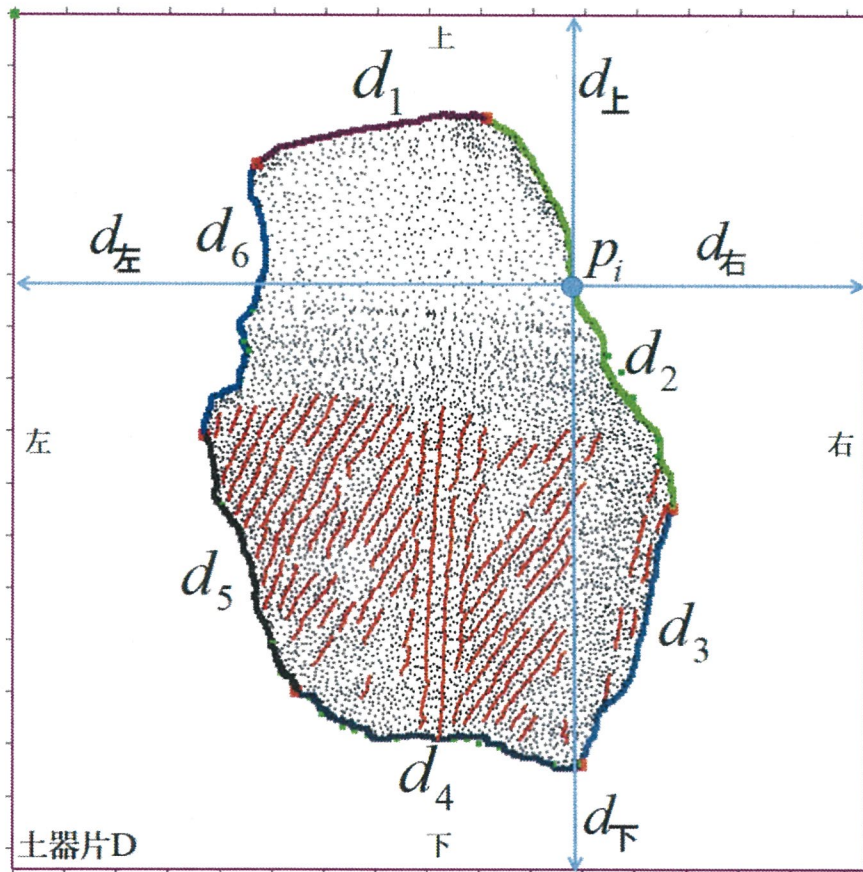


図 3.19: 付属情報の取り出す

- マッチング方法

分割線ペアを用いて、マッチする方法について述べる。

1. 分割線の両端を結ぶベクトルをあわせて、分割線上の点をもう一方の分割線に射影した距離の総和 D を求める。以下の式より距離 D

を求める。

$$D = \sum_{i=0}^n \min(a_i, b) + \sum_{j=0}^m \min(b_j, a) \quad (3.1)$$

距離 D は閾値より小さいとき、分割線ペア間に文様点が存在する場合、文様流れの一致性を判断する。

2. 文様同士の距離 d と文様流れと同じ向き の単位ベクトルの角度 θ を求め、距離と角度が閾値以下なら文様流れが一致しているとする。分割線ペア間の全文様点数を α 、一致とみなされた文様点数を β として、分割線ペア内の全文様点のうち、どの程度一致したかを表す比率 R を以下のように求める。 R の値が閾値以上なら、左分割線を表示される、左分割線に対応する土器片が隣接候補とする。

$$R = \beta/\alpha \quad (3.2)$$

3. 文様点が存在しない場合、距離 D が閾値以下なら、左分割線を表示される、左分割線に対応する土器片が隣接候補とする。

図 3.20 のように、対象となる土器片 A の右分割線 a_3 となる、任意の土器片 B の左分割線は b_6, b_7, b_8 となる。分割線ペア a_3 と b_6, a_3 と b_7, a_3 と b_8 を作る、それぞれ分割線ペアの距離の総和は D_1, D_2, D_3 となる。距離 D_1 は閾値より小さいとき、分割線ペア a_3 と b_6 の間に文様点が存在する、図 3.21 のように、文様流れの一致性を判断する。文様同士の距離 d と文様流れと同じ向き の単位ベクトルの角度 θ を求め、距離と角度が閾値以下なら文様流れが一致しているとする、 R の値が閾値以上なら、左分割線 b_6 を示される、土器片 B は隣接候補とする、すべての候補を示すあと、ユーザは隣接候補を選択したら、自動並べ替え機能を使用しシステムが対象となる土器片の近くに配置される。ユーザは隣接候補から、正しい隣接土器片を決定することができる。

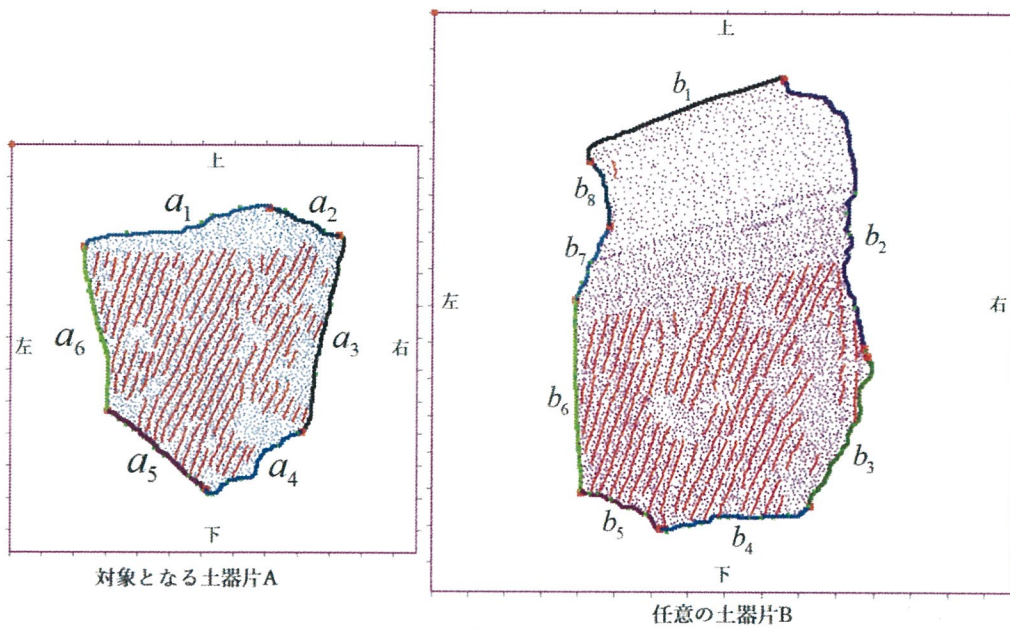


図 3.20: 隣接候補の探索方法

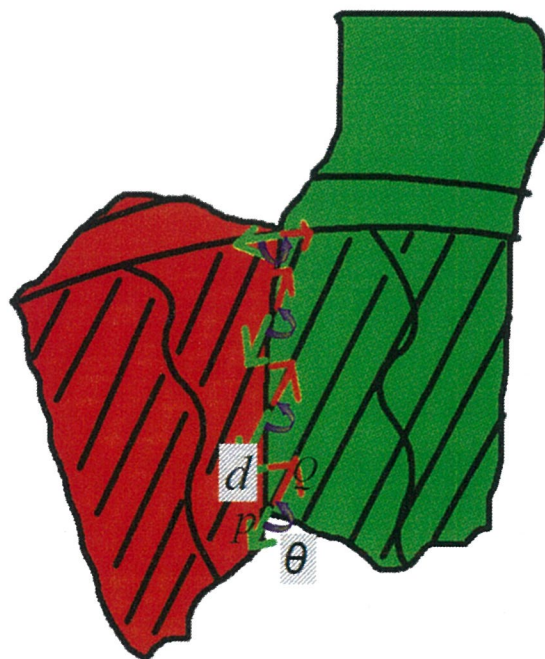


図 3.21: 文様流れの判断

3.6.3 土器片の隣接

2つの土器片データを更に近づけて土器片の輪郭を隣接させるように、ユーザが選択された土器片データを移動させる。ユーザがグリッド線の線密度を *high* に変更し、土器片の位置を、接合する輪郭が重なるように調整する。なお、土器片データを近づける際に互いのパネルが重なることになるが、次のプロセスでグループ化するので、重なりは許すものとする、2つの土器片データを隣接させた様子を図 3.22 に示す。

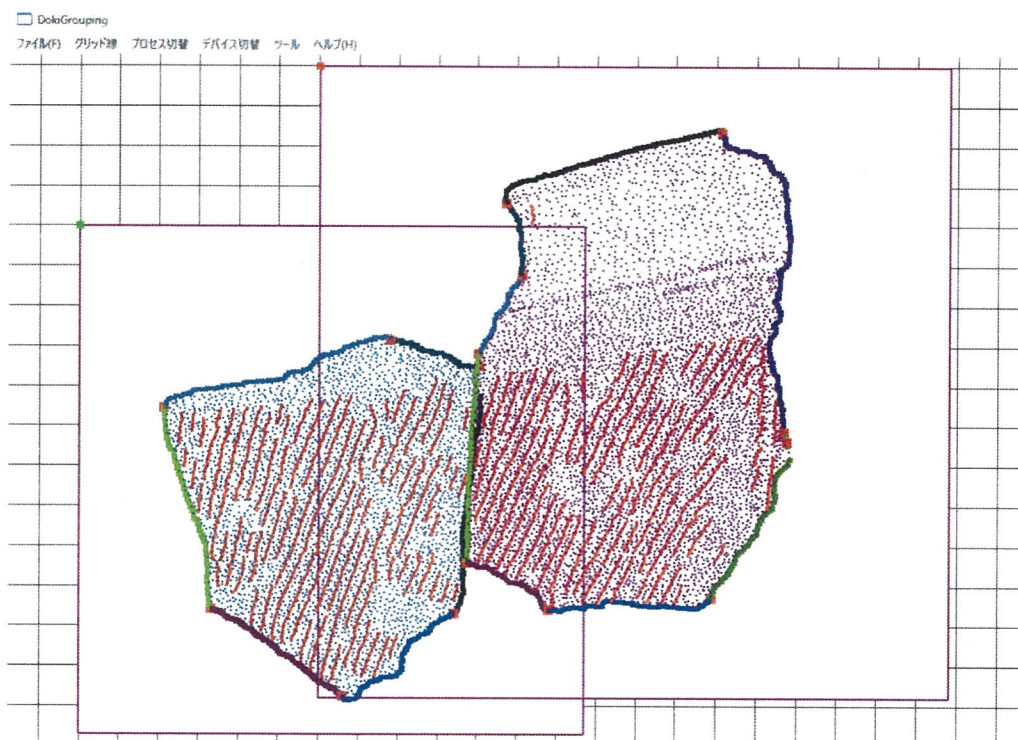


図 3.22: 土器片の隣接手法

3.7 3次元マッチング

土器片同士の隣接部分を、接続するように配置するために、実際の3次元的な形状は展開図上ではそのまま表現されない。そのため、2次元パネル上で隣接する2つの土器片をグループ化した後、グループ内の土器片に対して、自動

的に3次元マッチングと空間姿勢を決定する。ここで、3次元マッチング方法について述べる。

3.7.1 分割線ペアの登録

パネルが隣接する土器片同士を、接合する土器片の組み合わせとし、パネルの隣接する線分に最も近い土器片の輪郭線を分割線ペアとして登録する。図3.23では、分割線 a_3 と分割線 b_6 は分割線ペアであると判断する。

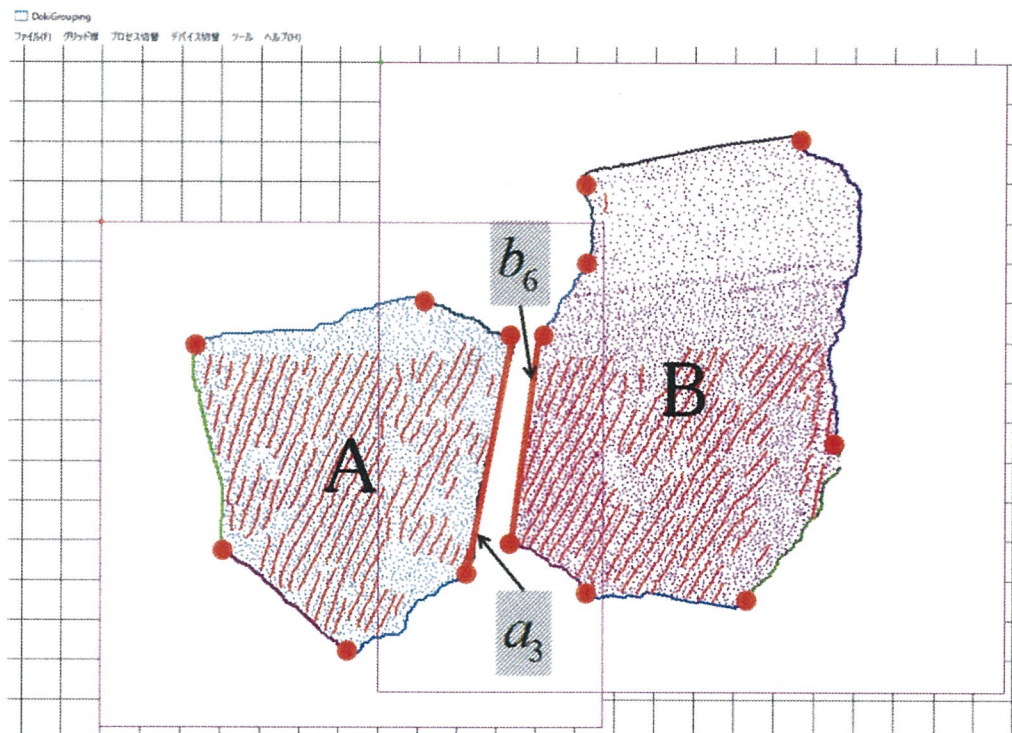


図 3.23: 分割線ペアの登録

3.7.2 文様を考慮したマッチング

本節では文様を考慮したマッチングについて述べる。具体的な土器復元は次のように行う。図3.24に示すように、まず、土器片配置インタフェース部分で復元情報を生成した2つの土器片をグループ化した土器片 A と土器片 B を取

得する。次に、ユーザが選択した土器片 A と土器片 B のマッチング [7] を行う。その後、文様流れを用いてマッチング結果を判定し、結果の可否によっては空間最適化を行い土器片を結合する。文様流れを用いたマッチングの方法を以下に示す。

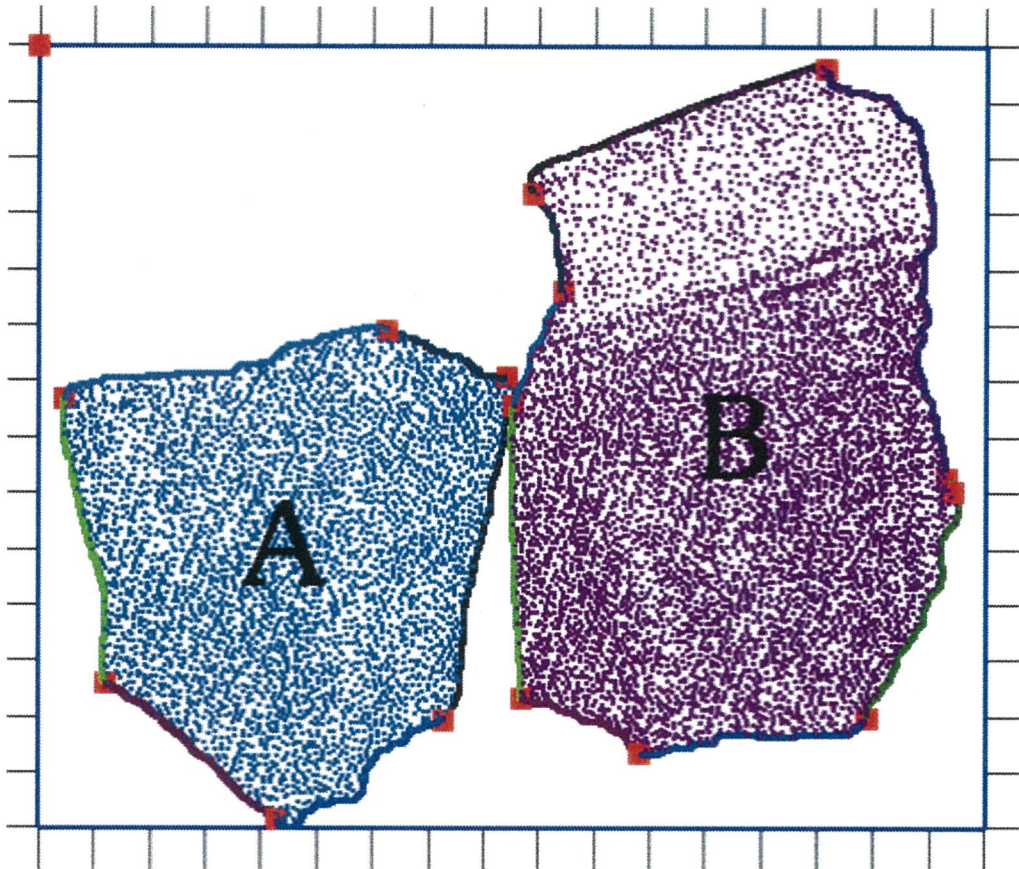


図 3.24: 土器片ペアのグループ化

1. 文献 [7] の手法を用いて、それぞれの土器片の分割線同士でペアを作る。本手法では、分割線の点群のリスト $P_A(a_0, a_1, \dots, a_n)$, $P_B(b_0, b_1, \dots, b_m)$ を用いてマッチング処理を行う。ここでは、端点 a_0 と a_n , b_0 と b_m 間のベクトルを u , v とする。その後、方向ベクトル u と v が平行となる回転行列を、分割線 P_A に適用する。次に、分割線 P_A の始点 a_0 が分割線 P_B の終点と b_m と一致するような平行移動を分割線 P_A に適用する。つまり、1 組の分割線のどちらか一方の端点を一致させる。 P_A , P_B のうち点の

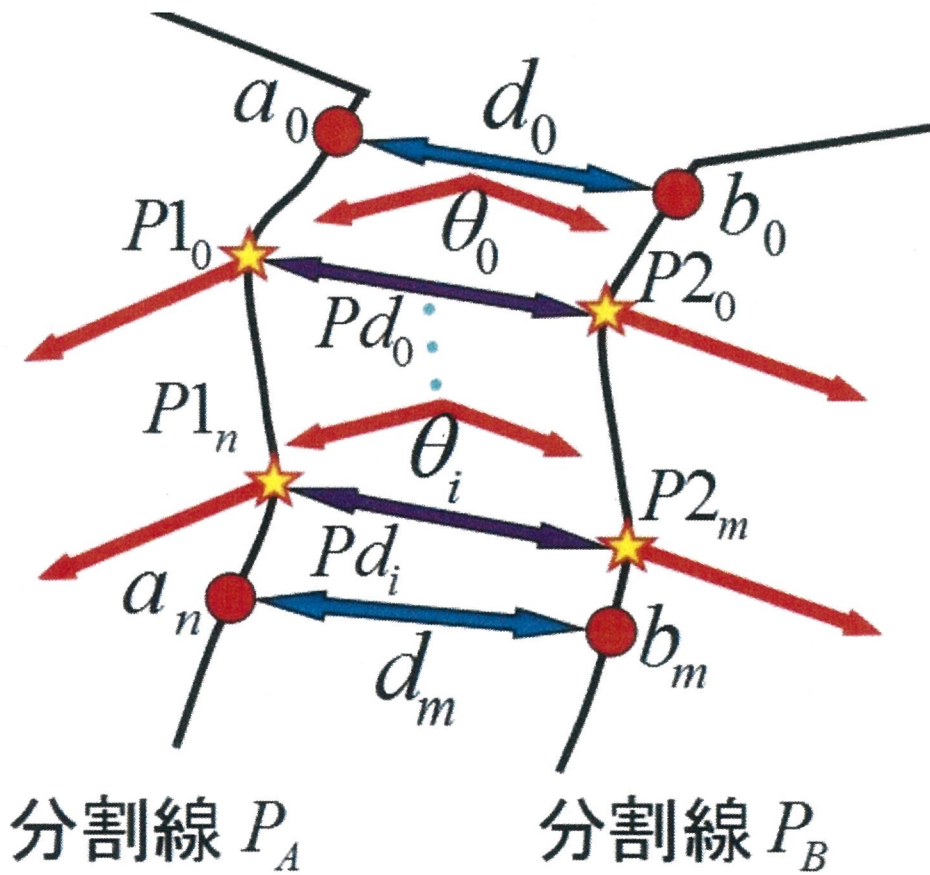


図 3.25: 文様間の距離と角度の定義

数の少ない方を基準とし、点群リストの全ての点で、もう一方のリストの点との距離が最小となっている点を見つけペアとする。求めた距離の総和を分割線の評価値とし、分割線の評価値が小さい順に並び替える。

2. 文献 [5] の手法を用いて、分割線の評価値が最も小さい分割点ペアで、空間姿勢最適化を行う。
3. 空間姿勢を決定した分割線上の文様点をそれぞれ $P1=P1_i : i = 0, \dots, n$, $P2=P2_j : j = 0, \dots, m$ とする。図 3.25 に示されるように、 $P1$ の各点に対して、 $P2$ の点列との最短距離となる点を求める。その後、文様同士の距離 P_d と、赤色のベクトルで示される文様流れを表す 2 つの単位ベクトルの角度 θ を求め、距離と角度が閾値以下なら文様流れが一致しているとする。
4. 文様流れの一致している割合が閾値以上なら、結果が正しいとして処理を終了する。割合が閾値以下なら次に分割線の評価値が小さい分割線ペアでステップ 2, 3 を行い、閾値以上になるまで繰り返す。
5. 全ての分割線ペアで文様点が存在しない場合、または文様流れが一致しなかった場合、分割線の評価値が最も小さい分割線ペアを一致するとみなす。

図 3.24 に示した隣接している 2 つの土器片データと分割線ペア情報を用いて、3次元マッチング [7] を行った結果を本インタフェースに表示する。3次元マッチングの結果を図 3.26 に示す。

3.8 土器片データの統合化

復元情報を生成した 2 つの土器片をグループ化し、1 つのパネルに収める。パネル同士を隣接させることでも復元情報を生成できるが、より正確な情報を作成するため、ここでは 2 つの土器片をグループ化し、1 つのパネルの中で復

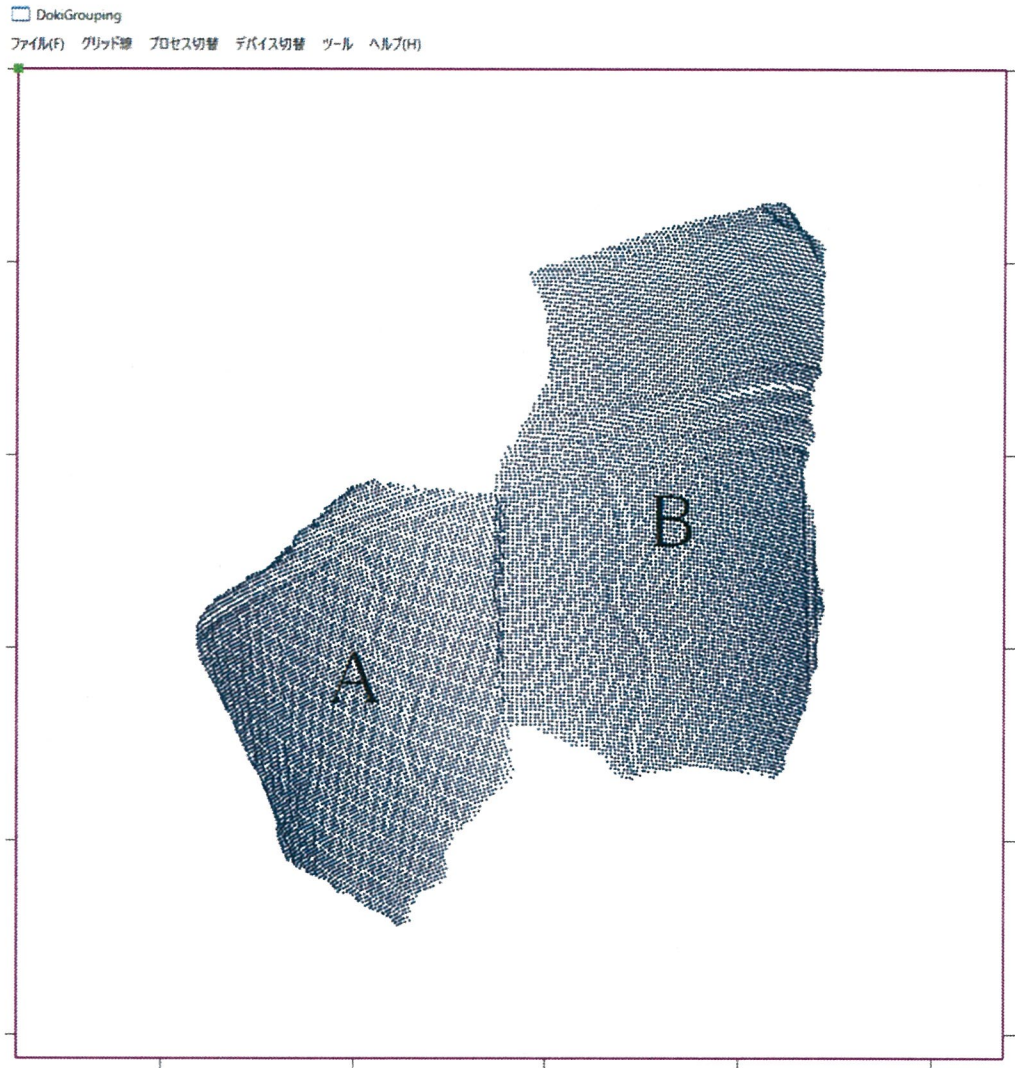


図 3.26: 3次元マッチング結果

元情報を表現する。土器片のグループ化を行うことによって、ユーザは復元情報を生成しやすくなる。すなわち、土器片データの3次元マッチングを行い、土器片データ情報を書き出すため、輪郭線の情報がより正確となる。図3.27、図3.28に例を示す。図3.27では、土器片 *CE* が離れているために、土器片 *A* とマッチする輪郭が判断しにくくなっている。図3.28では、土器片 *CE* をグループ化して輪郭が結合されているため、土器片 *A* とマッチする輪郭を判断しやすい。グループ化した土器片は、更に別の土器片データとグループ化を行うことができる。図3.28のグループに、別の土器片データを追加した様子を図3.29に示す。

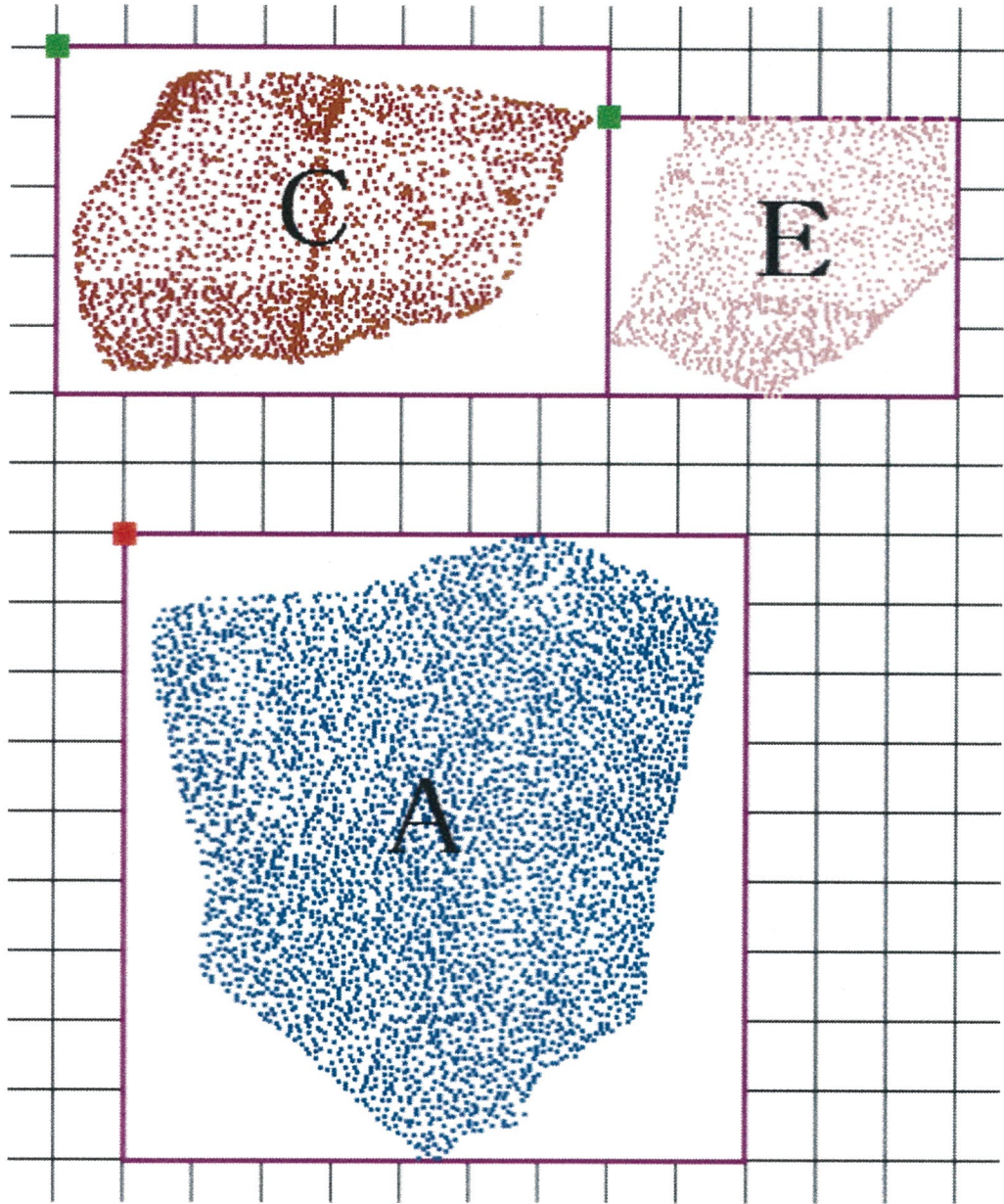


図 3.27: グループ化前

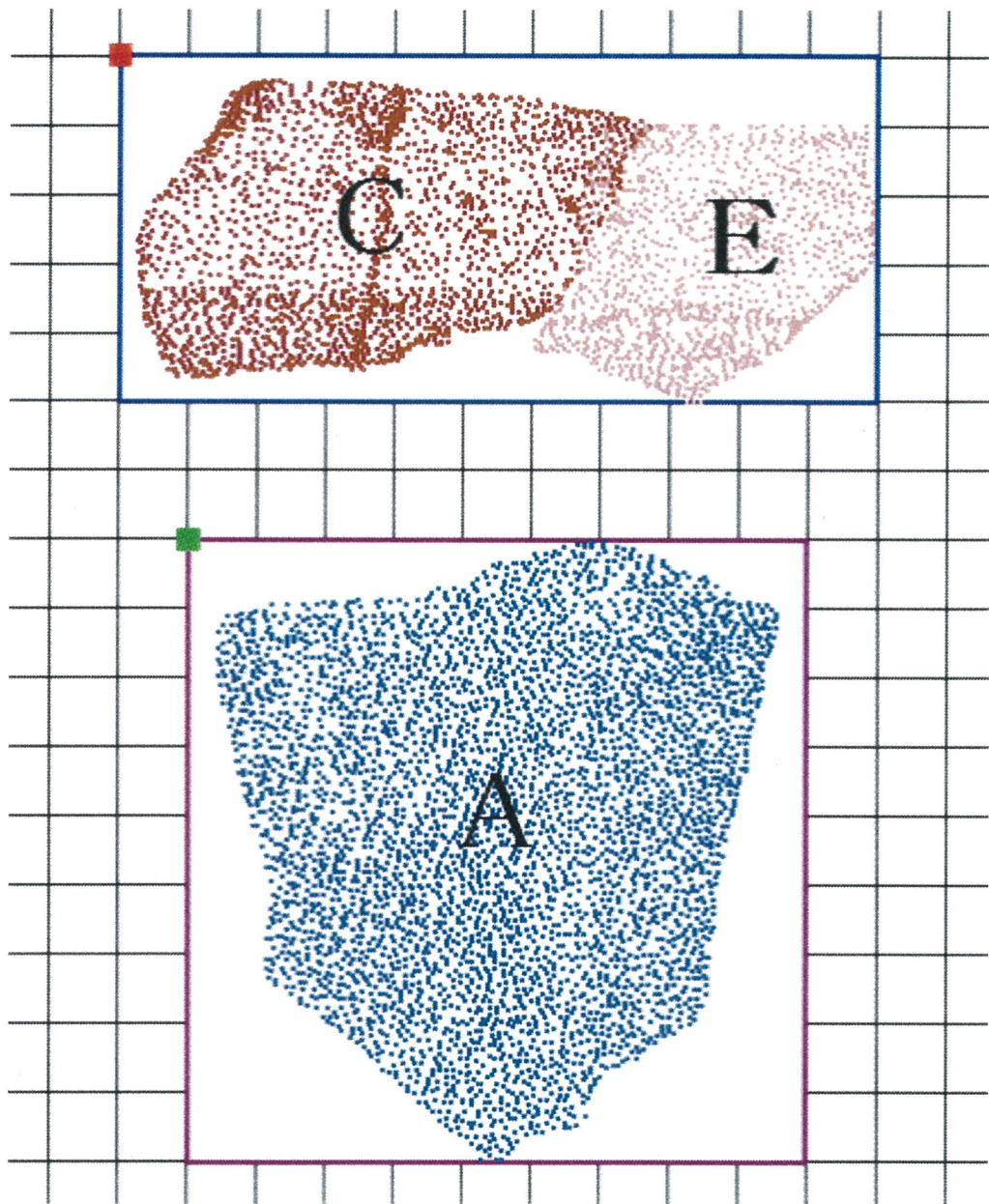


図 3.28: グループ化後

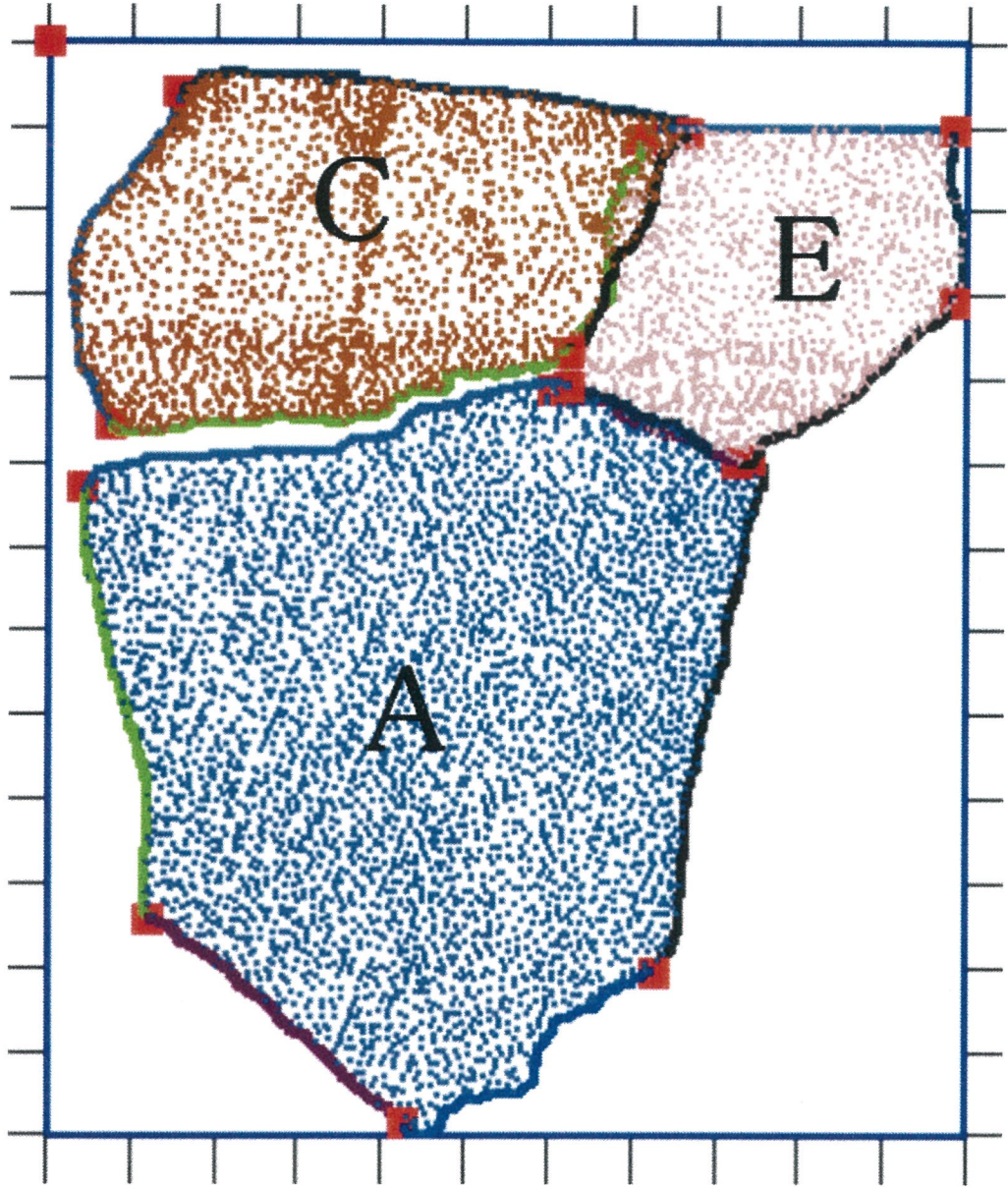


図 3.29: グループ化追加

第4章 システムの構築手法

4.1 本章の概要

第4章では、システム構築手法について述べる。4.2節では、本システムの構成について述べる。本システムの構成について説明した後、本システムによる土器片復元操作手順について述べる。具体的な手順は、次のようである。まず、4.3節では、入力データを保存しているファイルから土器片の3次元点群データと特徴量をシステムに読み込む。次に、4.4節では、2次元パネル上に表示された輪郭線や文様情報に基づいて、復元情報を生成する。最後に、4.5節では、隣接情報を用いて、3次元マッチングを行い、土器片を復元する。

4.2 システム構成

本節では、システム構成を説明する。文献 [12] の3次元計測手法によって得られた土器片3次元計測データを用いて、土器片の表面を表す計測点群を解析して、輪郭線情報と表面の文様の抽出を行う。3次元計測データと抽出した特徴量を本システムに入力する。

本システムでは、次に示すような流れで、インタラクティブに土器の組み立てを行うことができる。まず、すべての土器片の点群データを、ディスプレイ上に2次元的に配置する。次に、ユーザは口縁部と思われる土器片の点群データに手でラベルを貼り付け、システムは、貼り付けられたラベルを参照して、口縁部を含む土器片の点群データをディスプレイ上部に並べ替える。そして、入力された輪郭線情報と文様に基づいて、システムが対象となる土器片の隣接候補を示す。特徴量を提示することで、ユーザが隣接候補から最も正しいピー

スを選択して、対象となる土器片に隣接できるように、平面上で平行移動と回転移動させる。システムが隣接された土器片の輪郭線同士を分割線ペアとして登録する。さらに、より正確な復元情報を作成するため、システムが2つの土器片をグループ化する。最後に、ユーザが取り出した隣接土器片を用いて分割線ペアと文様に基づいて、2つの土器片データの3次元マッチングを行う。

本システムは、パネルの配置を容易に変更できるので、バックトラックによる試行錯誤を容易に行うことが可能である。本研究はこのような試行錯誤を含んだ組み立て支援システムを目指す。

4.3 システムの入力

本システムの入力としては、文献 [12] の3次元計測手法によって得られた土器片3次元計測点群データと、土器片の3次元点群データを用いて抽出した特徴量である。画面上に計測した土器片データを表示する。土器片データは横一列に配置される。展開した様子を図4.1に示す。

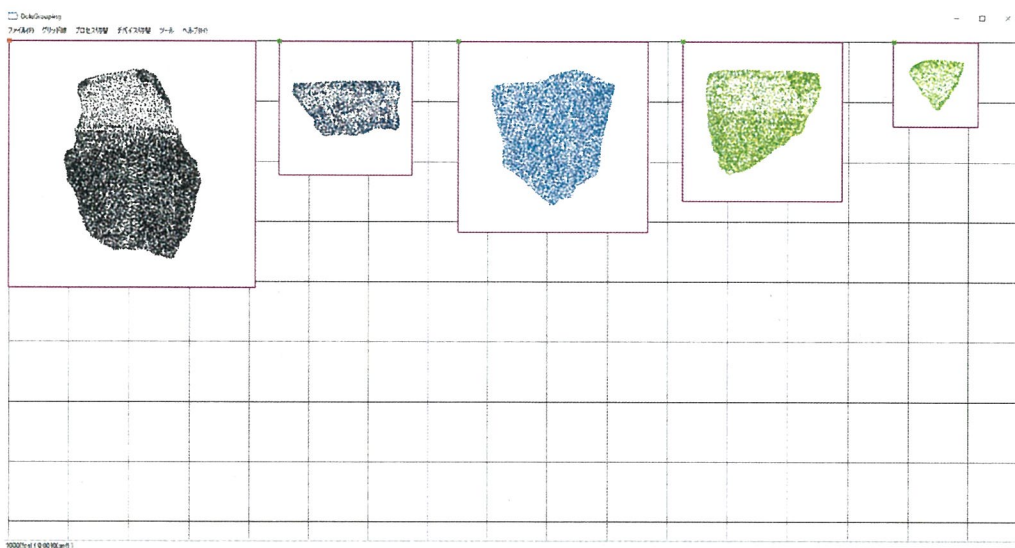


図 4.1: 土器片を展開した結果

4.4 復元情報を生成する手順

2次元復元システムの操作手順としては、入力された土器片群を分類する。そして、ユーザは土器片データを移動、回転することによって、文様や口縁部などの特徴量を提示しながら、ユーザが直感的に隣接土器片ペアを決定する。ここで、復元情報を生成する手順について説明する。

分類機能では、まず、画面上に表示した土器片データを閲覧し、ユーザは口縁部と思われる土器片データにラベルを貼り付ける。次に、ラベルを貼り付けたら自動並べ替え機能を使用し、口縁部の土器片データをディスプレイ上部に並べる。分類した様子を図 4.2 に示す。

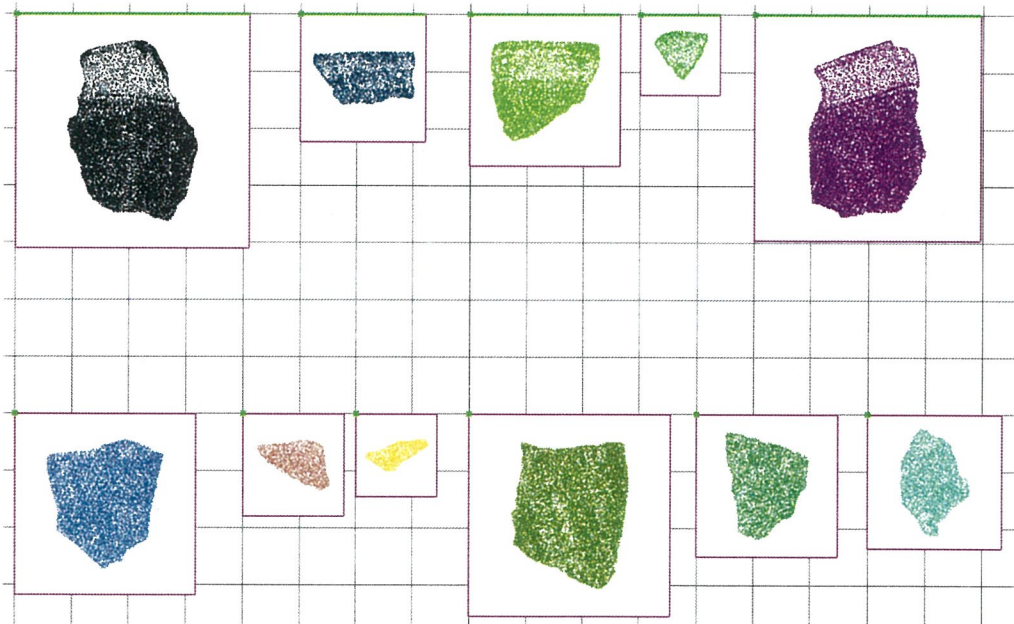


図 4.2: 土器片を分類した結果

土器片が復元情報を生成するために、ユーザが対象となる土器片 D の分割線 d_3 を選択する、組み立てナビゲーションボタンを選択し、システムが隣接候補を自動的に探して示す。図 4.3 は隣接候補を示した結果である。

3.4 節で述べたように、土器片の特徴量は文様点、分割点、文様流れ、輪郭線である。ユーザーが特徴量を描画したいとき、インタフェース上の特徴量表示ボタンを選択し、描画したい特徴量のみ描画することができる。土器片の特

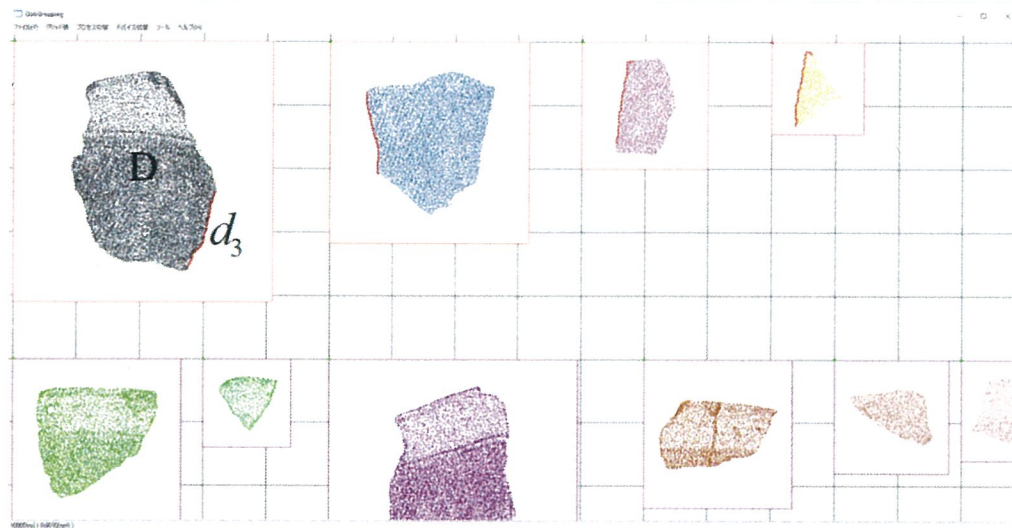


図 4.3: 隣接候補を示した結果

微量を描画する様子を図 4.4 に示す。図 4.4 では、土器片の文様流れ、文様点、分割線、分割点を表示している。

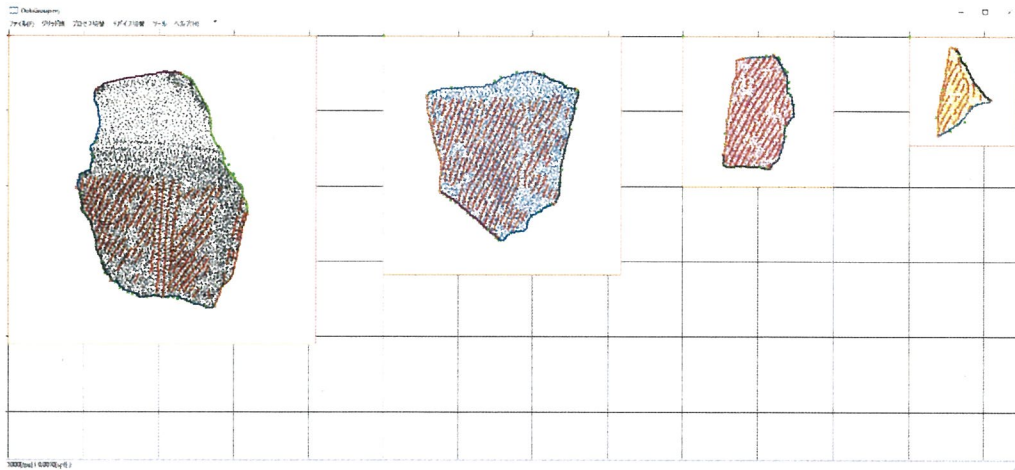


図 4.4: 特徴量を可視化した結果

ユーザが候補から、正しい隣接する土器片を選択し、2つの土器片データを更に近づけて土器片の輪郭を隣接させるように、選択された土器片データを移動させる。グリッド線の線密度を *high* に変更し、土器片の位置を、接合する輪郭が重なるように調整する。なお、土器片データを近づける際に互いのパネ

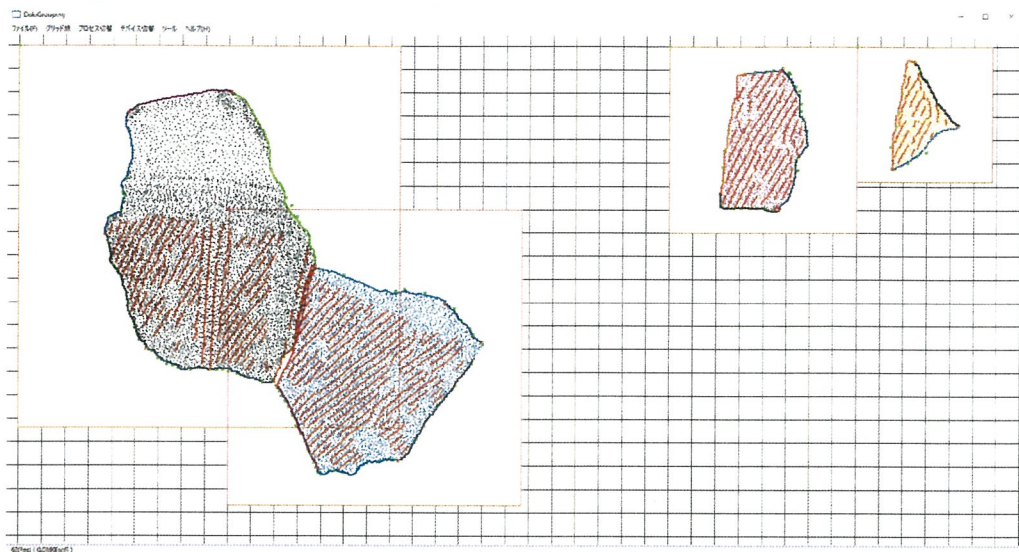


図 4.5: 土器片を隣接した結果

ルが重なることになるが，次のプロセスでグループ化するので，重なりは許すものとする，2つの土器片データを隣接させた様子を図 4.5 に示す．以上のプロセスを繰り返すことで，ばらばらに扱われていた土器片データの間にも復元情報を生成することができる．

4.5 3次元マッチングの手順

パネルが隣接する土器片同士を，接合する土器片の組み合わせとし，パネルの隣接する線分に最も近い土器片の輪郭線を分割線ペアとして登録する．図 4.6 に示すように，分割線 a_6 と分割線 d_3 は分割線ペアとして登録して，分割線ペア登録のボタンを選択して，土器片 A と土器片 D のデータ情報を自動的にファイルに書き出す．

2つの土器片データを隣接させて，2つのうちの1つを選択した後，グループ化のボタンを選択してグループ化し，土器片同士の位置関係を固定する．2つの土器片データをグループ化した様子を図 4.7 に示す．

図 4.7 に示した隣接している2つの土器片データと分割線ペア情報を用いて，3次元マッチング [7] を行った結果を本インターフェースに表示する．3次元マッ

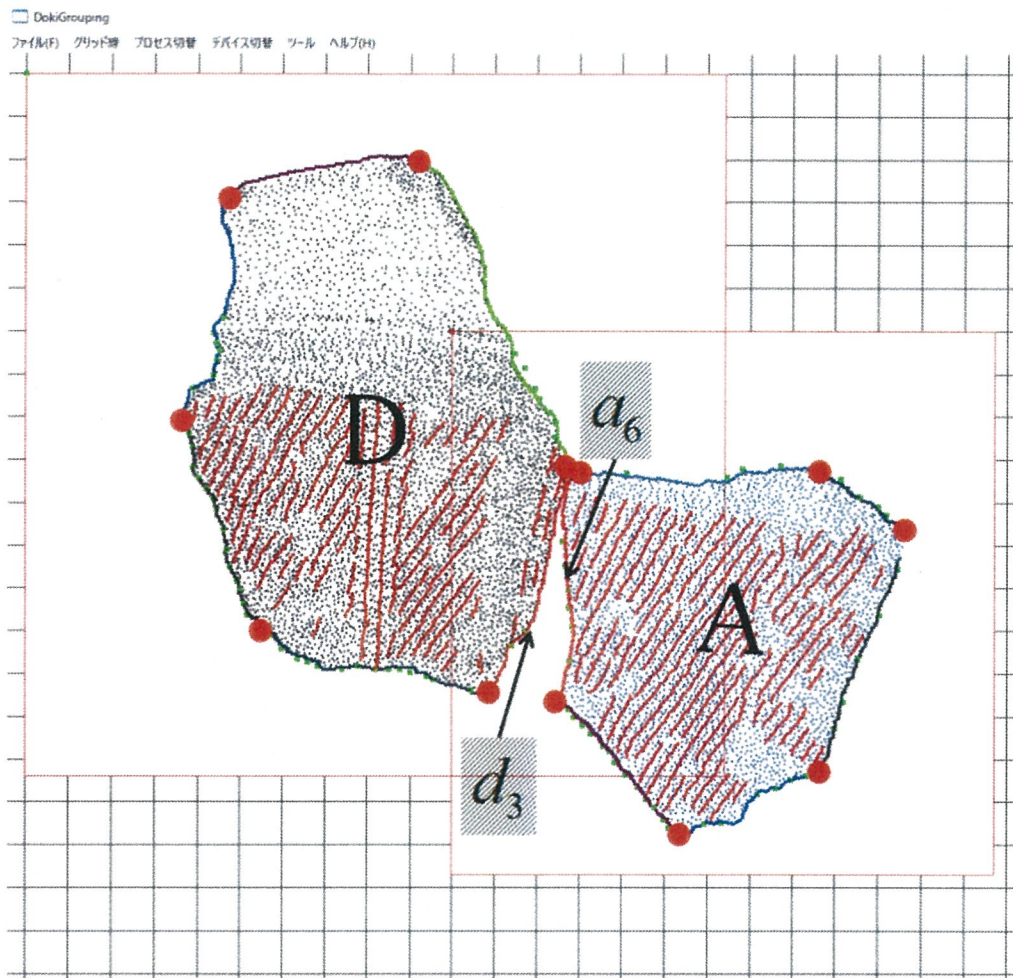


図 4.6: 分割線ペア登録した結果

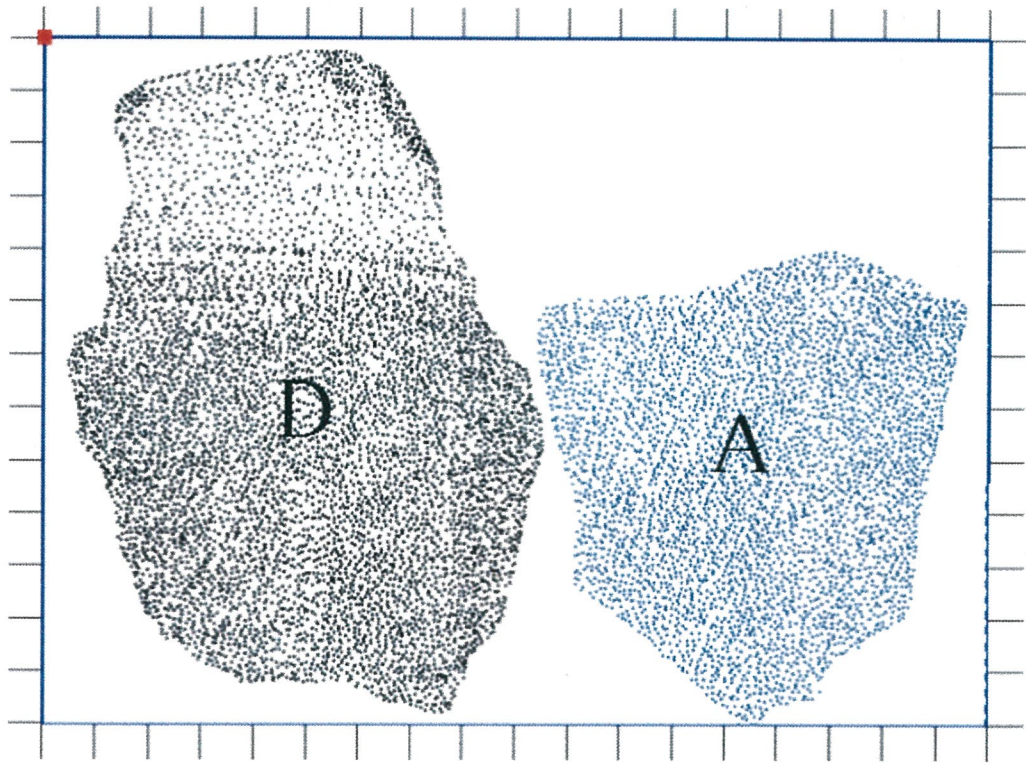


図 4.7: 土器片ペアをグループ化した結果

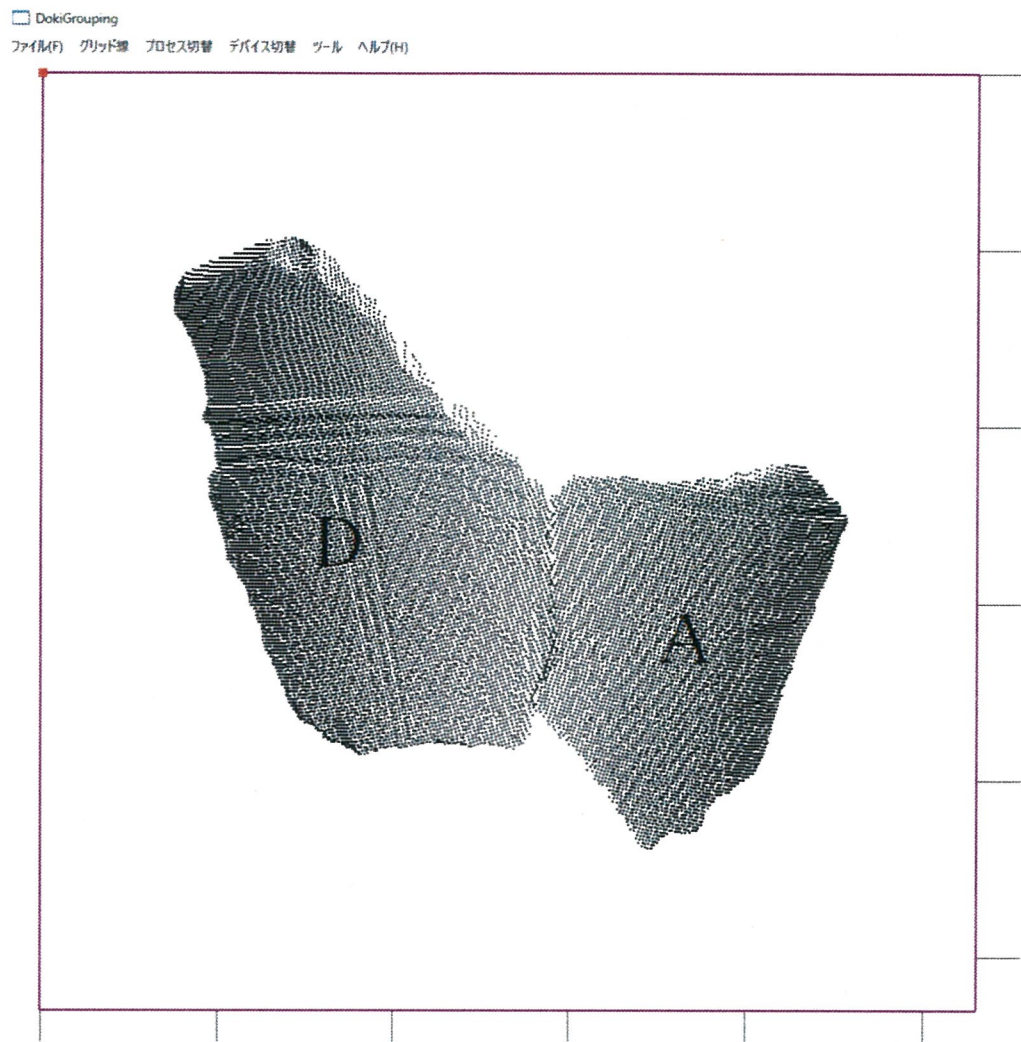


図 4.8: 3次元マッチングした結果

チングの結果を図 4.8 に示す.

第5章 実験結果

5.1 本章の概要

本章では、本手法の検証結果について述べる。本手法の有効性を確認するため、まず、5.2節では、検証に用いた実行環境について述べる。次に、資料や写真などの付加的な画像情報がない場合を想定して、点群データのみを用いて、復元が可能であるかを検証した。その結果、口縁部を含む土器片をユーザはすべて発見し、部分的には、復元情報を生成することができた。また、ユーザが発見した隣接土器片を用いて、3次元マッチングを行い、輪郭線の形状をより正確に表現することができた。

5.2 実験環境

これまで述べた手法に基づき、以下の表にあげたスペックのPC、開発ツール、開発言語上で土器片組み立て支援システムの構築と検証実験を行った。

表 5.1: 実験環境

System	Windows 10 Pro 64ビット
CPU	Inter(R)Core(TM)i7-6700 CPU 3.40GHZ
Memory	8GB RAM
Development tools	Microsoft Visual Studio 12.0
Language	C++, OpenGL

5.3 遺跡の学び館からの遺物の事例

図 5.1 に実験に利用する遺跡の学び館から提供された土器片 [14] を示す。これら 34 個の土器片を組み立てることで、ひとつの土器を形成できる。図 5.2 に、計測点群を入力した直後の展開された土器片 3 次元計測点群データを示す。各土器片の点数は 1,000~13,000 個である。本実験は図 5.2 の土器片 3 次元計測点群データを、ユーザの判断で復元が可能であるかを検証する。

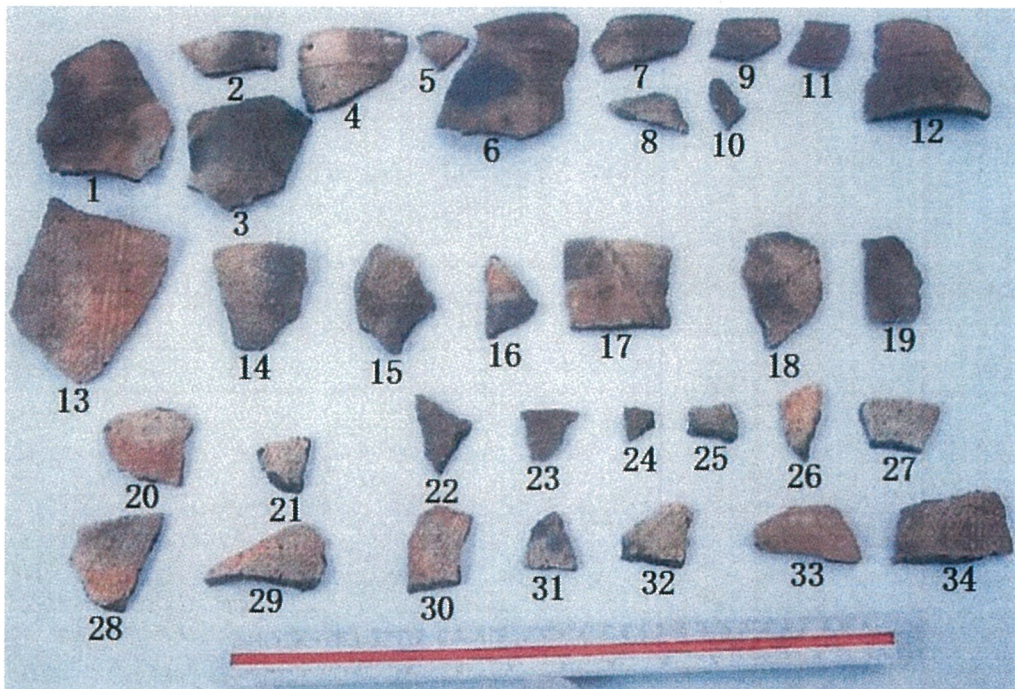


図 5.1: 実験用出土した土器片 1



図 5.2: 実験用 3 次元計測点群データ

まず、土器復元のプロセスを決定する。3.4 節で述べたように、土器復元において、口縁部を含む土器片は、口縁部を含まない土器片よりも、多くの情報を持っている。よって、まず、口縁部の土器片を分類し、口縁部の土器片のみ

で復元を行い、口縁部の土器片全てで復元情報が生成できてから、ほかの土器片がマッチするかを調べていく。図5.2に示す土器片に対して、口縁部を含む土器片を抽出し、口縁部ラベルを貼り付ける。口縁部を含む土器片を分類した後、ラベルによって土器片データを自動再配置する。図5.3は土器片データを再配置した結果である。

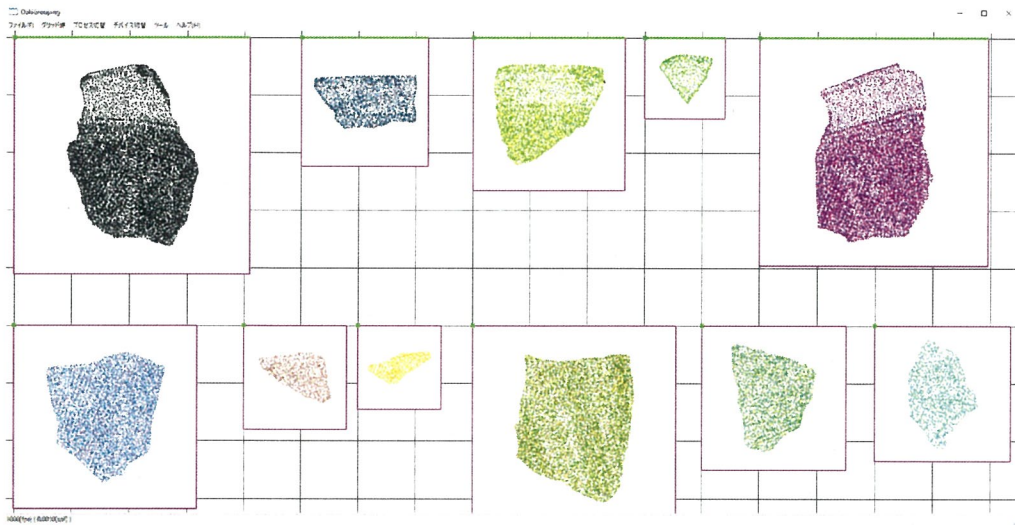


図 5.3: 土器片データの分類

次に、図5.3の上部に配置されている口縁部を含む土器片で復元情報を生成する。図5.4に示すように土器片の特徴量を可視化することで、ユーザは特徴量を手がかりに隣接土器片を探すことができる。例えば、図5.5は、復元プロセスの途中経過を示している。この図では、土器片6の赤い丸で囲まれた部分に隣接する土器片を見つけるために、他の土器片の分割線と形状が一致するかどうかを調べる様子を示している。土器片1, 9, 2の緑の丸で囲まれた部分が候補となる分割線である。また、この土器の表面は、口縁部付近に深い凹凸がある。それも参照することで、土器片9が隣接する土器片と判断できる。土器片6を回転し、土器片9のグループに隣接するように移動する。移動した結果を図5.6に示す。このような操作を繰り返して、口縁部を含む土器片の復元情報を生成した結果を図5.7に示す。

輪郭線のペアは比較的容易に判断できた。輪郭線ペアの判断を容易にした要

因は3つある。1つは、口縁部を含む土器片のみを利用したので、土器片の組み合わせの数が少なかったことである。2つ目は、口縁部が上を向くように配置しているため、土器片の姿勢が全て揃っていたことである。3つ目は、口縁部が繋がるように接合しなければならないので、口縁部を含む土器片同士はグリッドにおける左右方向に繋がりやすいという傾向があったためである。

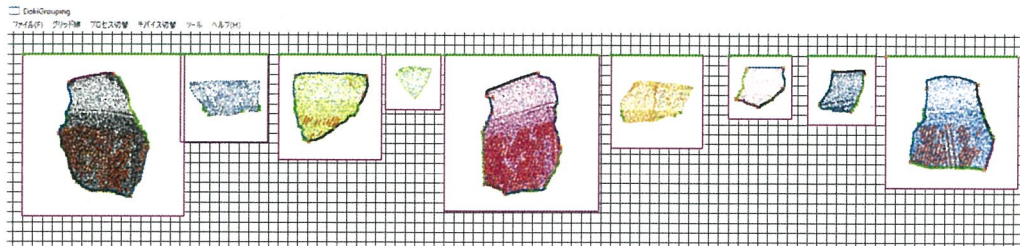


図 5.4: 特徴量の可視化

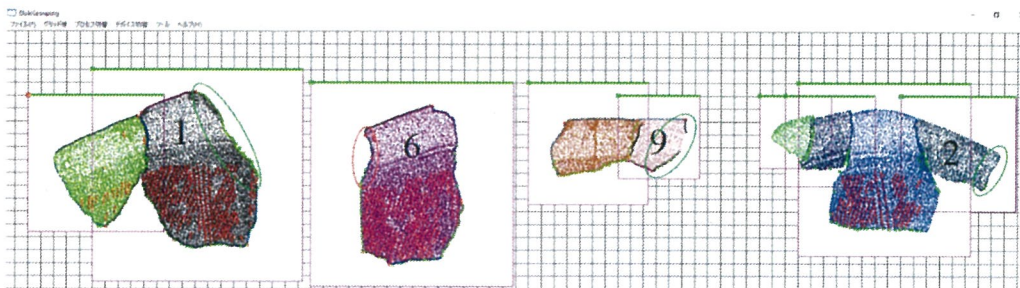


図 5.5: 隣接土器片を探索途中経過

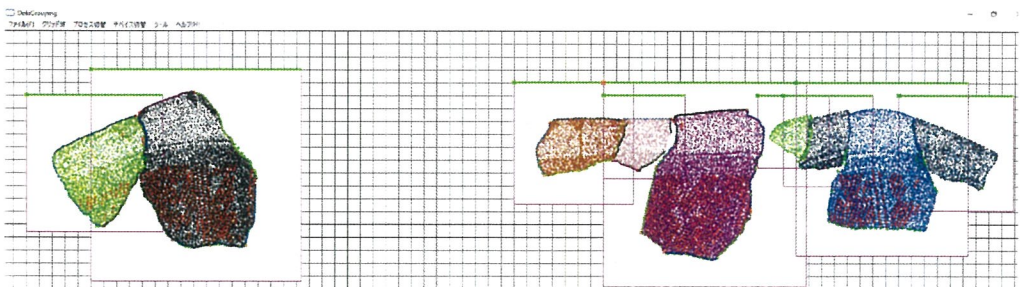


図 5.6: 回転と隣接

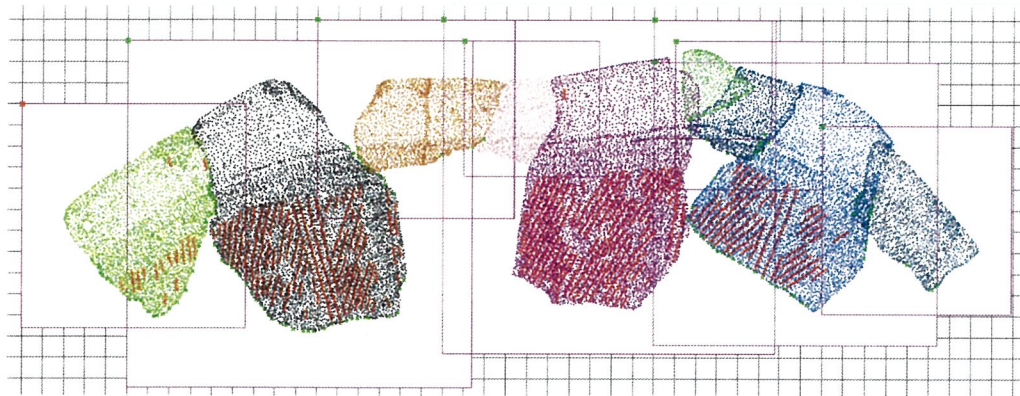


図 5.7: 2次元上口縁部の復元結果

その後、口縁部で復元情報を生成した後、更にほかの土器片を繋げていく実験を行う。図 5.7 の口縁部の復元情報に、口縁部を含まない土器片がいくつか追加した結果を図 5.8 に示す。本研究で扱ってる実物の土器の一部分を 2 次元上に復元した様子は図 2.9 に示す、図 5.8 に示した 2 次元の復元結果と一致した。本システムでは、土器片同士の隣接部分を、接続するように配置するために、実際の 3 次元的な形状は展開図上ではそのまま表現されない。図 5.9 では実物の土器片を復元した結果、図 5.10 の緑色の 6 つの土器片は 3 次元マッチングを行った土器片を実物に近い位置で表示した結果である。図より実物に近い形状に復元されていることがわかる。実験結果 1 により、コンピュータ上での土器復元のためのシステムにおいて、開発されたインターフェースは面倒な作業を軽減するのに有効である。

5.4 万福寺遺跡群から出土した遺物の事例

図 5.11 に示すように、実物の土器を復元した記録が発掘調査報告書 [15] に記載されている。もし、資料や写真などの画像の土器片配置を、本システムで再現できれば、資料や写真などの画像情報がない場合にも、再現情報により実物の復元を支援できる。このことを検証するために、図 5.11 をユーザが参照せずに、図 5.12 に示した土器片の 3 次元計測点群データのみを用いて、本シ

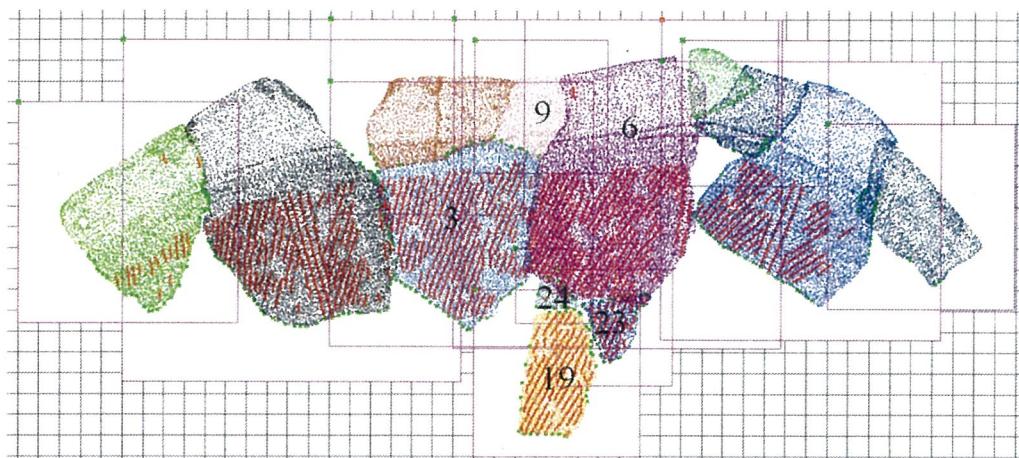


図 5.8: 2次元上部分土器片データの復元結果

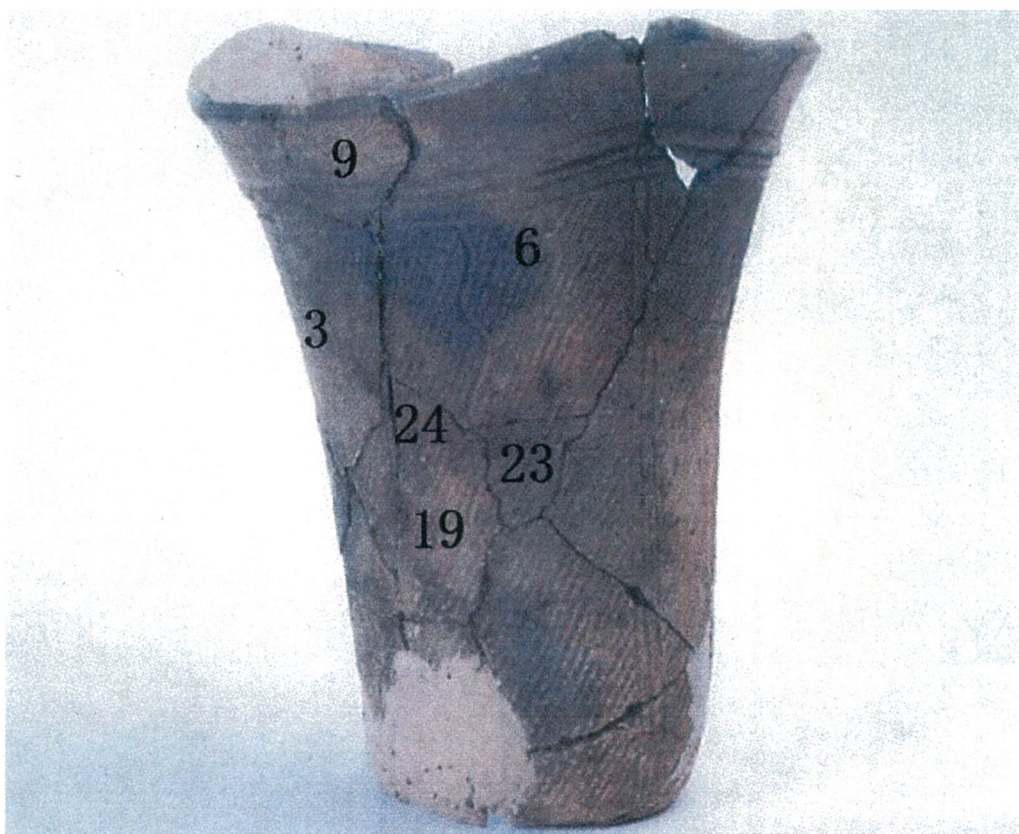


図 5.9: 手作業で土器片の復元結果

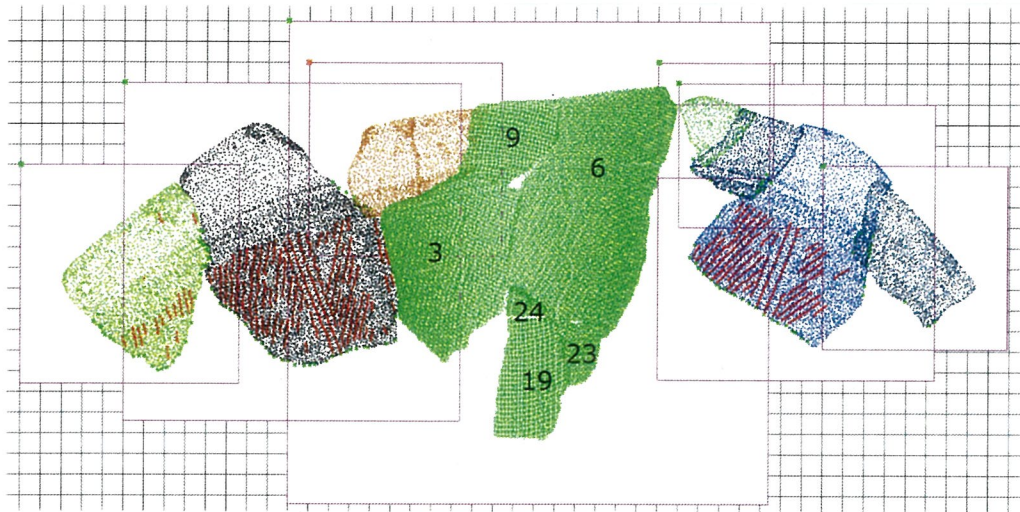


図 5.10: 3次元上部分土器片データの復元結果

システムによる復元実験を行った。

復元した結果を図5.13に示す。この図からわかるように、口縁部を含む土器片をユーザはすべて発見した。また、実物の土器を復元した記録図5.11と同じように口縁部を含む土器片1と土器片2，土器片4と土器片5を配置した。しかし、口縁部を含む土器片3と土器片7の配置した場所図5.13とは異なった結果であった。ユーザは土器片2と土器片7，土器片3と土器片4それぞれの分割線の形状が類似していると判断したため、隣接して配置したと考えられる。また、土器片6，土器片8から12までは復元することができなかった。口縁部を含まない土器片を配置するためには、分割線の類似箇所を自動的に検出して提示するなどの、更なる拡張が必要と考えられる。

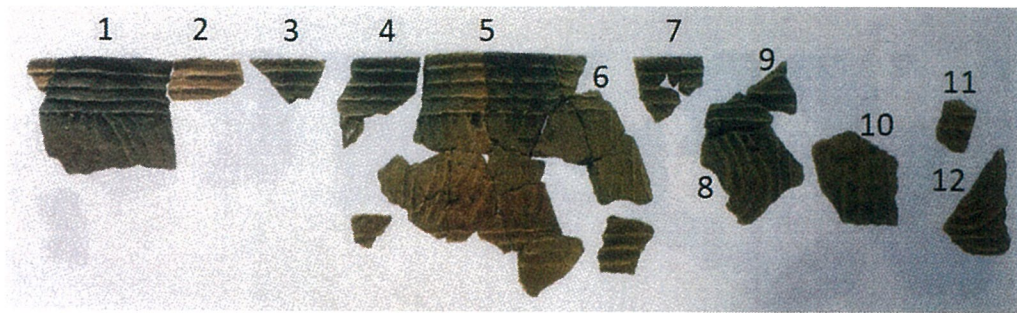


図 5.11: 実物の土器を復元した記録

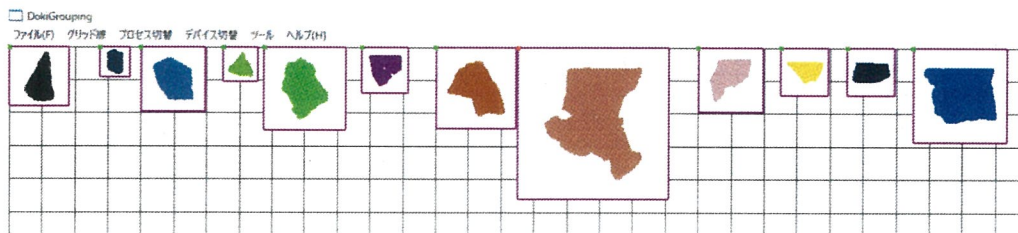


図 5.12: 土器片データ 2 の配置結果

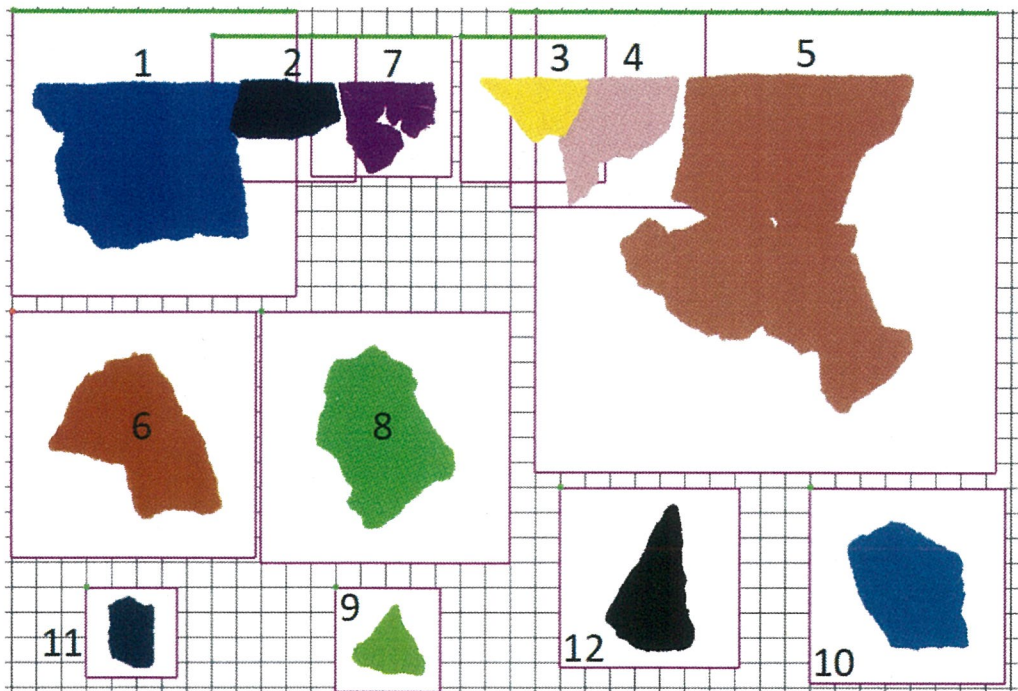


図 5.13: 実験 2 の復元結果

第6章 結論

6.1 研究のまとめと成果

専門知識を持つ人が、効率的に土器復元することを目的として、本研究ではユーザがパズル感覚でデータを操作する土器片組み立て支援システムを提案したものである。

1章では、土器復元作業には、基本的に手作業であり、組み立て作業の試行錯誤を伴うため、土器片の汚損や破損のリスクが高まるといった問題がある。近年では、計算機を用いた土器片の組み立てに関する従来研究は、すべてのマッチング工程の自動化を目指す研究とユーザとのインタラクティブな組み立て作業の支援を目指す研究とに大別できる。本研究は後者の立場で、出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化し、ユーザに提示するシステム向けの要素技術開発と、システム構築を行っている課題を提出した。

2章では、まず、本研究の目標を達成するため、3次元計測器を用いて計測する手法について紹介した。次に、土器復元に関する研究の現状と問題点を述べた。最後に、本研究における復元情報の定義を行った、本研究の位置づけを明確に述べた。

3章では、本研究で提案した土器片組み立て支援システム向けの要素技術について述べた。まず、ジグソーパズルのピースに相当するパネルの定義とパネルを生成する理由について説明した。また、ユーザの操作をわかりやすくするためグリッド線を導入し、パネルとグリッド線による土器片データの配置方法について述べた。次に、より配置精度を高めるため、輪郭線や文様などの特徴量の定義と抽出方法について説明し、特徴量に基づいて、土器片の隣接候補を探索する方法について述べた。そして、復元情報を評価するために抽出した分

割線ペアによる3次元マッチング手法について説明した。最後に、土器片データの統合化手法について述べた。

4章では、本システムの構成について説明した後、本システムによる土器片復元操作手順について述べた。まず、入力データを保存しているファイルから土器片の3次元点群データと特徴量をシステムに読み込んだ。次に、2次元パネル上に表示された輪郭線や文様情報に基づいて、復元情報を生成した。最後に、隣接情報を用いて、3次元マッチングを行い、土器を復元した。

5章では、本手法の検証結果について述べた。ここまで述べた土器片組み立てシステムを用いて実験を行った、本手法の有効性を確認するため、まず、検証に用いた実行環境について述べる。次に、資料や写真などの付加的な画像情報がない場合を想定して、点群データのみを用いて、復元が可能であるかを検証した。以下のような結論が得られた。

1. 土器片データを2次元的に配置し、ユーザは定められた手順に従って、2次元的に復元情報を表現することができた。分割線ペアを簡単に取り出すことができた。
2. 資料や写真などの付加的な画像情報がない場合でも、口縁部を含む土器片をユーザはすべて発見し、部分的には、復元情報を生成することができた。
3. 隣接している土器片の分割線ペアを用いて、3次元マッチングを行い、土器片を復元し、輪郭線の形状をより正確に表現した。

以上の結果、本研究で目的としていた、専門知識を持つ人が、効率的に土器復元することを目的として、出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステムを構築した。本研究では、試行錯誤を含んだ組み立て支援システムを実現できた。本システムで仮想的に土器片を組み立てた後、ユーザは復元情報を利用して実物を組み立てることができると可能とした。

6.2 今度の課題

現時点ではまだ実用するには多くの課題がある。まず、組み立てナビゲーション機能によって、姿勢を決定する機能を追加して、現在の組み立てナビゲーション機能を改良する。次に、多くの土器片に対して、復元情報をより容易に生成するため、土器片の色を表示するなどの機能の追加が挙げられる。さらに、本システムに基づいて、遺跡から出土した大量な土器片を分類する方法を開発する。

謝辞

本研究を行うにあたり，懇切丁寧なるご指導を賜りました，今野晃市教授に心から感謝致します。また，本論文作成にあたり，ご討論いただきました藤本忠博教授と大塚尚寛教授に深く感謝致します。本論文で使用した資料の一部を提供していただいた岩手県滝沢村埋蔵文化財センター，および盛岡市遺跡の学び館に感謝致します。本研究の一部を実施していただいた，修了生の及川聡氏と加賀俊介氏，および日々様々なご協力を頂いた今野研究室の皆様，ならびに日々様々なご協力を頂いた今野研究室の皆様，ならびに今野研究室の卒業生の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] “IPA「教育用画像素材集サイト」”，<https://www2.edu.ipa.go.jp/>
- [2] 松藤和人，門田誠一：“よくわかる考古学”，ミネルヴァ書房，2010.
- [3] QX.Huang, S.Flory, N.Gelfand, M.Hofer and H.Pottmann: “Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching” ACM SIGGRAPH2006, pp.569-578, (2006).
- [4] 金谷一郎，陳謙，千原國宏：“VR 技術を応用した遺物復元システム”，テレビジョン学会技術報告，Vol.20，No.50，pp.7-12，1996.
- [5] 黄海浪，今野晃市，今野哲士，千葉史：“3次元座標点群を用いた土器片マッチングと姿勢最適化アルゴリズム”，第24回 NICOGRAPH 論文コンテスト (NICOGRAPH 秋季大会)，(2008).
- [6] K.Shoji,K.Konno,T.Konno,F.Chiba: “An Algorithm of Fracture Matching Based on Measured Point Set of Fragment Surface”，IWAIT 2011,CD-ROM 2011.
- [7] S.Oikawa, C.Li, K.Matsuyama and K.Konno: “An Examination of Matching Algorithm Considering Pattern Flow of Cord-Wrappe Stick Pattern for Earthenware Restiration”，IWAIT2013, (2013).
- [8] 堀謙太，今井正和，小笠原司：“土器復元における接合部分検出のための輪郭の階層型表現”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J83-D-II，No.5，pp.1392-1394，(2000).

- [9] B.Brown, C.Toler-Franklin, D.Nehab, M.Burns, D.Dobkin, A.Vlachopoulos, C.Doumas, S.Rusinkiewicz, and T.Weyrich: "A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments: Reassembling Theran Wall Paintings" ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), August 2008, Vol.27, No.3, (2008).
- [10] 坂本麻衣, 安原彰吾, 加納政芳, 加藤昌平, 伊藤英則: "輪郭形状の階層表現に基づく接合箇所検出土器復元への応用", 画像電子学会誌, 第34巻, 第3号, pp.228-235, (2005).
- [11] 大村晃宏, 西尾孝治, 小堀研一: "3次元輪郭曲線を用いた遺物の復元", 情報処理学会第67回全国大会 pp.191-192, 2005
- [12] E.Altantsetseg, Y.Muraki, F.Chiba, and K.Konno: "3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine", The International Journal of Virtual Reality, Vol.10, No.1, pp.37-43, (2011).
- [13] 李春元, 松山克胤, 今野晃市, 千葉史: "土器復元のための撚糸文の文様流れ抽出についての検討", 芸術科学会東北支部研究会, 2011.
- [14] "盛岡市遺跡の学び館", <http://www.city.morioka.iwate.jp/14kyoiku/iseki/manabikan>
- [15] 北原實, 今泉克巳: "神奈川県川崎市 万福寺遺跡群", 有明文化財研究所, 万福寺遺跡発掘調査団, (2005).
- [16] C.Li, K.Matsuyama and K.Konno: "A New Simple Interface of Fracture Matching by Using 2D Panel", NICOGRAPH 2016, pp.1234-1241, (2016).

発表論文

学術論文

- [1] 李春元, 松山克胤, 今野晃市, “2次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム”, 芸術科学会論文誌. 採択済.

国際会議予稿集論文

- [1] C.Li, K.Matsuyama, K.Konno, “ A Study of Assembly Navigation Operation with 2-D Panel for Restoring Fractured ”, NICOGRAPH International 2017,2-3 June, (2017)
- [2] S.Oikawa, C.Li, K.Matsuyama, K.Konno, Y.Tokuyama, “ An Examination of Matching Algorithm Considering Pattern Flow of Cord-Wrapped Stick Pattern for Earthenware Restoration ”, IWAIT2013, pp.366-371, CD-ROM, (2013)

学会口頭発表予稿集論文

- [1] 李春元, 松山克胤, 今野晃市, “土器片配置インタフェースのための分割線ペアの可視化”, 平成 27 年度第 1 回 芸術科学会東北支部研究会, 1 月, (2016).
- [2] 李春元, 加賀俊介, 松山克胤, 今野晃市, “土器片配置インタフェースのための特徴量の可視化”, 平成 27 年度第 1 回 芸術科学会東北支部研究会, 7 月, (2015).
- [3] 李春元, 松山克胤, 千葉史, 今野晃市, “土器復元のための撚糸文の文様流れ抽出についての検討”, 平成 24 年度第 2 回芸術科学会東北支部研究会, 9 月, (2012).
- [4] 李春元, 今野晃市, 千葉史, “計測点群から得られた土器片の文様抽出法に関する検討”, 平成 21 年度東北支部研究会, 於:岩手大学, (社) 情報処理学会東北支部, 12 月 (2009).

研究会報告予稿集論文

- [1] 李春元, 松山克胤, 今野晃市, “2次元パネルに基づく土器片組み立てのための簡易インタフェースの検討”, NICOGRAPH 2016, pp.40-48, 11月(2016).