

修士論文

多対多同時非剛体位置合わせ手法

Simultaneous Non-rigid Registration
of Multiple Objects

2009年2月4日提出

指導教官 池内克史 教授



情報理工学系研究科 電子情報学専攻

076429 藤原 研人

概要

コンピュータビジョンの分野において研究が進展するにつれ、3次元形状データを計測するための機器や計測したデータの位置合わせや統合などのモデリング技法などの開発が盛んになっている。近年になり高精細な3次元形状データを用いて形状を解析する試みが行われる様になり、3次元形状データを用いた研究が活発になりつつある。

3次元形状解析では物体を重ね合わせるために様々な位置合わせ手法が開発されているが、特に物体を変形させる非剛体位置合わせが注目を集めている。通常、非剛体位置合わせには基準物体の設定が必要であり、これには専門知識が必要となる場合がある。

本論文では、逐次非剛体位置合わせに必要な局所的な位置合わせの改良を行う。さらに、複数の物体を同時に変形する同時非剛体位置合わせ手法を提案し、鶏の頭蓋骨に対して処理を施し有用性を示す。最後に、提案手法を三角縁神獣鏡に適用し、応用の可能性を示す。

目次

第1章	研究背景	7
1.1	研究背景	8
1.1.1	コンピュータビジョン	8
1.1.2	3次元データの応用	8
1.2	位置合わせ手法	9
1.2.1	剛体位置合わせ	10
1.2.2	Iterative Closest Point	10
1.3	研究の目的	13
1.3.1	1対1逐次非剛体位置合わせと多対多同時非剛体位置合わせ	14
1.4	本論文の構成	15
第2章	非剛体位置合わせ手法	16
2.1	はじめに	17
2.1.1	変形手法	17
2.1.2	非剛体位置合わせに適した対応点探索法	18
2.2	関連研究	18
2.3	Free-Form Deformation 法	21
第3章	分割非剛体位置合わせによる差異検出	24
3.1	はじめに	25
3.2	FFD を用いた 3次元形状比較	25
3.2.1	特徴点を用いた手法	25
3.2.2	局所的な位置合わせを用いた手法	25
3.2.3	高速対応点探索法	26
3.3	分割方法の改善	28
3.4	評価実験	29
3.4.1	実験の設定	29
3.4.2	実験結果	29

第 4 章	多対多同時非剛体位置合わせ	33
4.1	はじめに	34
4.2	多対多同時非剛体位置合わせ	34
4.2.1	従来手法の問題点	34
4.2.2	提案手法	35
4.3	評価実験	40
第 5 章	応用: 非剛体位置合わせによる	
	三角縁神獣鏡解析	47
5.1	三角縁神獣鏡を用いた応用実験	48
5.1.1	三角縁神獣鏡	48
5.2	1 対 1 逐次非剛体位置合わせ手法を用いた実験	51
5.2.1	2 枚の鏡を用いた傷の抽出	51
5.2.2	複数の鏡による継承関係の理解	53
5.3	多対多同時非剛体位置合わせ手法を用いた実験	56
第 6 章	結論	62
6.1	結論と今後の展望	63
6.1.1	結論	63
6.1.2	今後の展望	64

目次

1.1	複数の距離画像からなる3次元モデルの例	9
1.2	3次元形状モデルの作成例	10
1.3	Chenらの手法での点と面の距離	11
1.4	Levoyの実験に用いられた3種類の形状	12
1.5	1対1逐次非剛体位置合わせ	14
1.6	多対多同時非剛体位置合わせ	15
2.1	TPS-RPMの行程	19
2.2	TPS-RPMによる位置合わせ	20
2.3	Elastic Netを用いた位置合わせ	20
2.4	TPS-RPMとElastic Netによる位置合わせ結果の比較	21
2.5	FFDによる変形	22
3.1	分割位置合わせ	27
3.2	岐阜地鶏2体の形状データ gifu2 と gifu4	29
3.3	真川らの手法適用後の格子点の移動	30
3.4	提案手法適用後の格子点の移動	30
3.5	2手法の比較結果	31
4.1	多対多同時非剛体位置合わせの手順	36
4.2	子軍鶏3体の形状データ koshamo1, koshamo2 と koshamo3	41
4.3	剛体位置合わせ後の差異	43
4.4	同時非剛体位置合わせによる格子点の移動	44
4.5	同時非剛体位置合わせ後の差異	45
4.6	逐次非剛体位置合わせ後の差異	46
5.1	三角縁神獣鏡	48
5.2	剛体位置合わせ後の範傷 27	52
5.3	FFDによる変形後の範傷 27	53

5.4	提案手法による変形後の範傷 27	54
5.5	目録番号 70 の傷	55
5.6	goryo1-4 と Dkz29 の比較結果	56
5.7	Dkz29 と ishi04-1-4 の比較結果	57
5.8	ishi04-1-4 と fhana1 の比較結果	58
5.9	範傷 E の継承	59
5.10	範傷 E の変化	59
5.11	同時非剛体位置合わせ適用後の格子点	60
5.12	同時非剛体位置合わせ適用後の範傷 E	60
5.13	goryo1-4 と Dkz29 の比較	61

表目次

3.1	凹凸部分の割合	31
4.1	閾値以上凹凸な部分の割合	42
4.2	格子点の合計移動距離	42
5.1	手法ごとの D_{kz22} における凹凸部分の割合	52

第1章 研究背景

1.1 研究背景

1.1.1 コンピュータビジョン

現在, 画像の情報をを用いて実世界の物体などの解析を行うコンピュータビジョンの研究が活発である. この分野の研究は 1960 年代の衛星画像などの解析から始まり, 後に画像, 動画内の物体認識などへと発展していった. 現在ではこのような技術を応用した新しい技術開発が行われており, その対象はロボットビジョン, 画像検索, 複合現実など多岐にわたる.

コンピュータビジョンの研究が盛んに行われている理由には, 近年の目覚ましいソフトウェアやハードウェアの性能向上とインターネットの普及が挙げられる. 市場で発売されているハードウェアの性能は飛躍的に向上し, これまで困難であった高品質のデータ処理が現在では短時間で行う事が可能になった. これにより情報量の多い画像を扱うアルゴリズムやソフトウェアの開発が行われ, 様々な手法が提案されてきた. さらに三次元計測機器の性能は大幅に向上したことによって, 低コストで高品質な情報が得られるようにもなった. ハードウェアと同様に, インターネットの発展も目を引くものがある. 以前は少量の情報の送受信に限られていたが, 通信技術の発展の結果, 現在では大量のデータのやり取りが可能になった. 最近では画像や動画を共有する為のウェブサイトが注目を集めており, 数多くの画像や動画データがインターネット上で閲覧可能になっている. このように, コンピュータを利用する者にとって画像や動画が身近になった. 現在はこのデータを利用した研究も活発に行われている. コンピュータビジョンの画像処理技術の重要性は今後さらに高まることが予想される.

1.1.2 3次元データの応用

コンピュータビジョンの研究は主に実世界の情報を取得する為の計測機器の開発, そしてこのような計測機器によって取得した情報の活用や分析の2つに分類することが可能である. デジタルカメラなどの2次元情報を取得する機器の発展とともに, これまでには2次元画像を扱った様々な手法の開発が行われて来た. 最近になり, 3次元形状を取得する為の計測機器の開発が急速に進み, 高精細で大量の三次元形状データが取得可能になった. これと共に取得された三次元形状データを用いた位置合わせ手法 [1] や統合手法 [2] などのモデリング技法が発展した. 3次元形状データは2次元画像よりもより大量な精密形状データを保有しているため, 現在このデータを活用する研究が盛んである. 例えば, 文化財保護という観点からこのデータが注目されている. 異なった時期に計測した文化財の形状を比較解析することにより劣化箇所を特定する事ができる. さらに補修後のデータを比較することで, この効果を定量的に分析する事も可能となる. さらに生物学を例として取り上げる. 生物学には形態の違いから生物の系統分類を行う形態学が存在する. 形態学の一部である骨計測法では骨の特

微的な部分間の距離を計測し形態の違いを数値化している [3]. 近年になり, 3次元形状データを用いた特徴部分の比較や骨全体の形状の解析が行われている [4]. 考古学でもこのデータの応用が考えられている. 増田らは, 日本各地で発見された三角縁神獸鏡の3次元形状データを用いて鏡の親子関係を解析する研究を行っている. 三角縁神獸鏡は複製され日本全国に伝わっていったとされる文化財である. 複製による劣化の解析により親子関係を理解する事で, どこで発掘された鏡が一番最初の親鏡であるかを知ることができる. もし現存する学説が正しければ, この鏡の発掘場所が邪馬台国の位置, ということになる. 本研究においても応用例としてこのデータを扱う.

1.2 位置合わせ手法

前述の通り, 近年になり様々な機器の開発が進んでおり, レーザレンジファインダーなどの機器を用いれば物体の3次元形状データも計測が可能になった. しかし, このような情報はある特定の視点から取得されるため大きな物体や建造物などを撮影する際, 一枚の画像には計測対象の一部分しか写っていないことがある. このため計測対象の全体を計測する為に

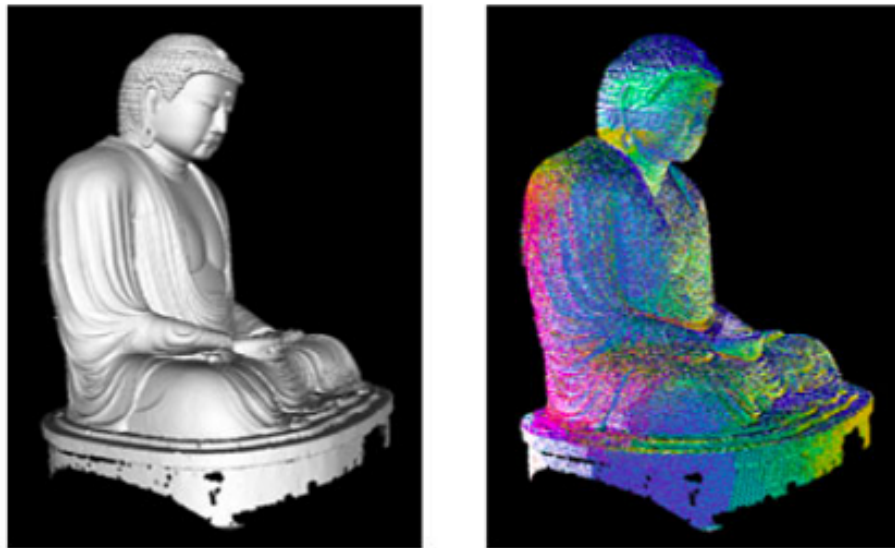


図 1.1: 複数の距離画像からなる3次元モデルの例

は, 複数の視点から計測を行い, 得られた画像の位置合わせを行う必要がある. 位置合わせとは, 複数の画像を共通の座標系に変換する行程である. 位置合わせ手法は, 形状が微妙に異なる物体を重ね合わせる方法としても有効な手段である. 位置合わせは, 複数の画像の共通の部分近づける為, 画像間の差異を検出するにあたっての前処理に当たる行程でもある. こ

の研究においては、同一カテゴリーに属する物体の形状差異の検出を行うため、比較する物体の3次元形状データの位置合わせ処理が必要である。

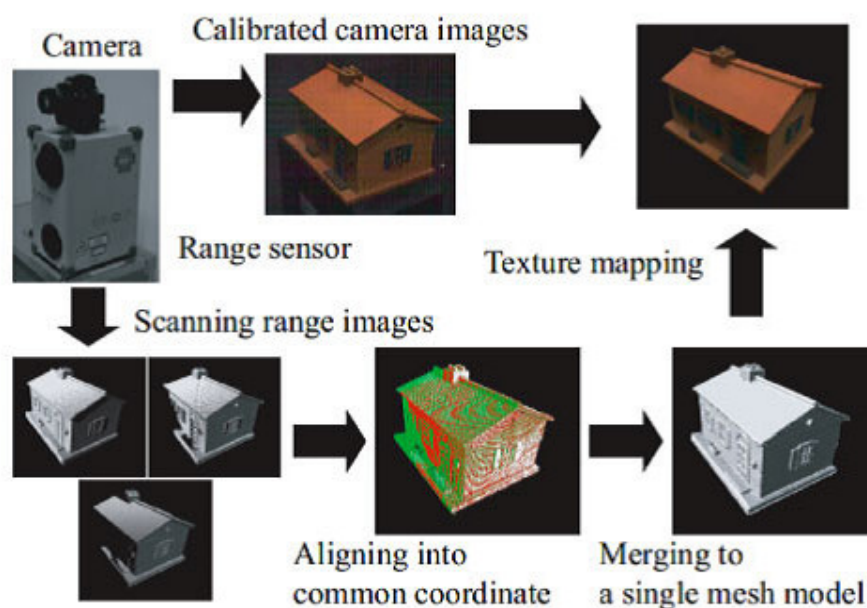


図 1.2: 3次元形状モデルの作成例

カメラによって取得された幾何情報に対し位置合わせが施される。その後、データの統合 (merging) が行われ、そのモデルの上に写真などのテクスチャが貼り付けられ、モデルが完成する

1.2.1 剛体位置合わせ

ここでは現在でも頻繁に様々な研究で用いられている剛体位置合わせ手法というアプローチを紹介する。剛体位置合わせとは、入力された画像の形状を変えずに位置合わせを行う手法であるが、代表的なものに、Iterative Closest Point (Iterative Corresponding Point) という手法がある。以下ではこの手法、そしてここから派生した手法を取り上げる。

1.2.2 Iterative Closest Point

Beslらの手法

Iterative Closest Point[1] (以下、ICP と表記) は Besl らによって 1992 年に発表された手法で、3次元モデルの位置合わせに使われる代表的な位置合わせ手法である。ICP では2つの3次

元モデル最近傍点を対応点とし, 対応点の間の距離を最小にするような変換行列を求め, この変換を一方の三次元モデルに施す. この行程は, 誤差がある設定した条件を下回るまで繰り返され, 位置合わせが行われる.

ICPにおいてこの計算は3次元モデルにある全ての点を用いて行われる. 誤差としては, 対応点間の距離の二乗和が採用されている. しかし, ICP 自体は対応点の誤対応や画像に含まれるノイズに影響を受けやすいという点が指摘されている. ICP のロバスト性や速度を高める様々な手法が提案されており, それぞれの研究では ICP の以下の 6 行程のいずれかに改良や変更が施されている.

- 1. 選択
- 2. 対応付け
- 3. 重み付け
- 4. 除外
- 5. 誤差の設定
- 6. 誤差の最小化

Chen らの手法

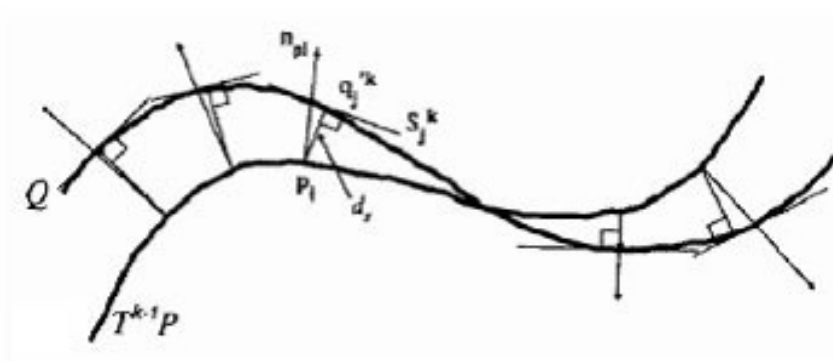


図 1.3: Chen らの手法での点と面の距離

時代は少し遡るが, Chen が 1991 年に提案した手法 [6] は対応付けの部分で ICP とは大きく異なっている. この手法では 3 次元モデルの面の法線を計算し, 点の法線がぶつかる表面との対応を取り, その距離を最小化するように位置あわせを行っている. さらに, Oishi, そして Neugebauer[7, 8] は視点の方向に向かって 3 次元モデル上の点を他方の面に投影する方法

を提案している. Benjamaa[9]などはこれをさらに発展させ, 投影後に点の検索を行う手法を開発している.

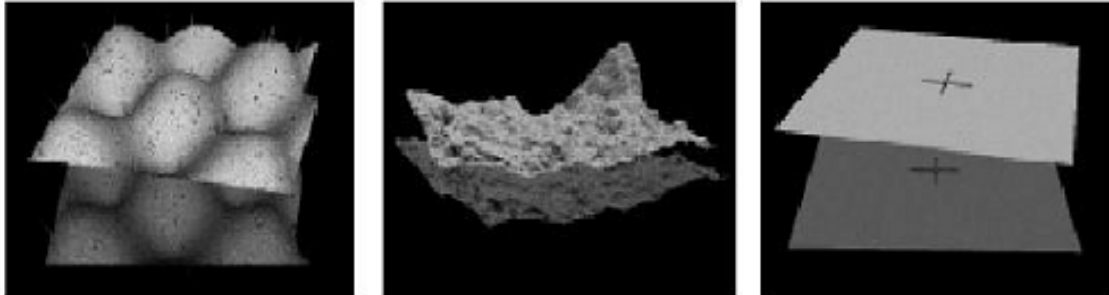


図 1.4: Levoy の実験に用いられた 3 種類の形状

Levoy[10] は図 1.4 のような三つの形状を用いて, 提案された手法の比較を行っている. 中央の図の様な場合は, 点と面の対応を取る手法が早く収束しているのに対し, 点と点の対応を取る手法は収束までに前者よりも多くの繰り返し演算を必要としている. しかし, 右図の場合, 唯一正しい位置あわせが行えたのが点と点の対応を取る手法であったという結果を示している. よって, 収束までの繰り返し演算数は点と面の対応を取る手法が勝るが, 特徴が少なく, 位置あわせが難しい物体の場合, 点と点の対応を取る手法が適していると記している. なお, Levoy は総合計算時間の速さにおいては, 投影を行う手法が一番優れているということも示している.

さらに, ICP の正確性を高めるために, 対応する点の組によって異なった重みを付加する手法も考案されている. Godin[12] は, 点同士の距離が離れている組に対しては少な目の重みを与え, 距離が近い組には大きい重みを与える手法を開発した. 重みと関連しているが, 対応点の組を ICP の計算から除外する手法も提案されている. 除外する組の決定方法には, ある閾値を設定し, それ以上離れている点の組は除外する方法や, 点の距離の大きさが上位 $n\%$ のものを除外する方法などがある.

ICP に関連した手法は高速で安定しているため, 現在でも様々な研究で画像の位置合わせを行う際に用いられている. しかし, この手法は物体の形状を保持したまま位置合わせを行うため, 対象物体の中に変形している物体があると, 重ね合わせが困難になる. 本研究では考古学のような対象物体の保存状態があまり良くない場合も考慮しなければならないため, 剛体位置合わせ手法が最適なアプローチであるとは言い難い.

1.3 研究の目的

本研究では 1.1.2 で紹介したような 3 次元形状データを扱い物体の形状比較を行う。前述の通り、3 次元形状データの比較を行う前処理として、比較対象の物体を位置合わせし重ね合わせる必要がある。しかし、対象物体によっては形状が変形している場合も考慮しなければいけない。そこで、歪みや変形を考慮した位置合わせ手法の提案を本研究の最大の目標とする。これを達成する手法は以下の要件を満たす必要がある。

まず、この手法は物体の全体的な違いと局所的な違いを区別しなければならない。比較する物体が同一カテゴリに属すると言う事を考慮すると、全体の形状は比較的似ていることが想定できる。よって分析を行う為には個々の微小な違いを考慮せず、特徴的な違いのみを抽出する必要がある。次に、この手法では高速に位置合わせ処理が行われなければならない。形状比較において、多数のデータを比較し分析する必要が生じる。このため、複数の高精細な 3 次元形状データを位置合わせしなければならない。さらに、この手法においては複数の物体を同時に位置合わせする必要がある。既存の手法では主に 2 つの対象を取り上げ、1 対 1 の比較が行われている。しかし、大量のデータを扱う際にこの作業を繰り返す必要性が生じるため、多大な時間が消費される事が容易に想像できる。さらに 1 対 1 の比較では基準物体を設定する必要がある。基準物体を変更すると、位置合わせ結果にも変化が生じ、どの結果が妥当なのか明確な答えを出す事が困難になる。よって多対多の比較を行う手法が好ましい。

この手法が満たすべき点をまとめると以下の通りになる。

- 物体の全体的な違いと局所的な違いの区別
- 大量の高精細データの処理
- 多対多の形状比較

最初の 2 つの要求を考慮すると、既存の手法中では真川ら [20] の手法が最もこれを満たす。この手法では物体を 2 つに分割し、剛体位置合わせによって他方の物体にそれぞれを近づける。さらにその後分割前の物体を分割後の物体に対して変形する事で位置合わせを行っている。しかし、この手法を施した後でも大きな差が残ることが確認された。よってこの手法を詳細に解析し、さらに差を小さくする為の物体分割手法を提案し、またその手法を用いた評価実験を行い、手法の有効性を示すことを本論文の第一の目的とする。

これに加え、最後の要求を考慮し、筆者は複数の物体を扱った同時非剛体位置合わせ手法を提案する。この手法では Free-Form Deformation 法の変形に基づき全ての対象物体を変形させる。最適な変形を施すため、それぞれの物体を囲う格子点の関係を明確にし、この情報を用いて全体の変形量を最小にする。本手法を用いその評価を行い、手法の有効性を示すことを第二の目的とする。

1.3.1 1対1逐次非剛体位置合わせと多対多同時非剛体位置合わせ

本研究では, 1対1逐次非剛体位置合わせ手法に関する改善と, 多対多同時非剛体位置合わせ手法の提案を行っている. ここではそれぞれの手法の枠組みを説明し, 違いを明確にする.

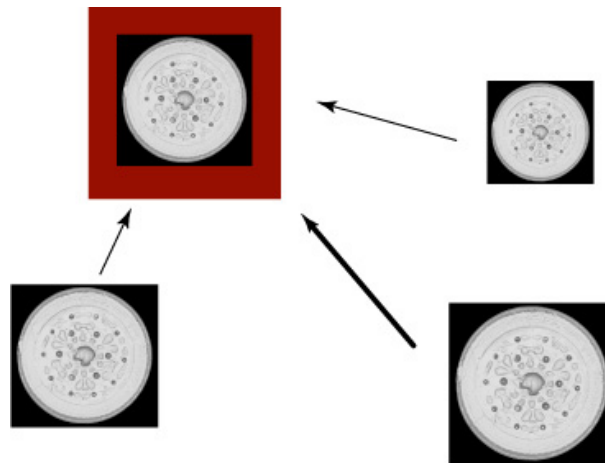


図 1.5: 1対1逐次非剛体位置合わせ

この手法では基準物体 (赤い枠内) が設定され, 位置合わせの対象になる物体は全てこの基準物体に合わせるよう変形される.

1対1逐次非剛体位置合わせは名前の通り, 2つの物体の対応に着目し, 一方の物体を他方に変形させる手法である. 現在, この手法による位置合わせは注目を集めている. 特に医療の分野では常に形が変わる臓器を撮影した画像の位置合わせが必要であり, この手法に関する研究が活発に行われている. この手法では2つの物体に存在する対応点間の距離を位置合わせのメトリックとし, これを最小化する事を目標としている. 図 1.5 にその概要を示す.

しかし, この手法では対象物体の中から1つ基準物体を選択する必要があり, これには分野によっては専門的な知識が必要となる. よって処理の完全自動化は困難である. さらに, 基準物体に歪みや傷がある場合は, 変形する物体に過度な変形が加わるという課題が存在する.

この課題を乗り越えるため, 筆者は多対多同時非剛体位置合わせ手法を提案した. この手法では, 対象を2つの物体に限らず, 複数の物体を同時に扱う. 1対1逐次非剛体位置合わせ手法と同様, 全ての物体を1つの形状に位置合わせする事を目標としているが, この手法では基準物体を設けず, 全物体の変形量の合計が最小となるように全物体を変形させて1つの形状を作成する.

これにより, 1つの物体の歪みや傷に影響される事無く, 最適な変形がそれぞれの物体に施されることになる. さらにこの手法において基準物体を設定する必要がない為, 各分野の専門知識は不要である. よって誰にでも容易に実行が可能な自動的位置合わせ手法であると言

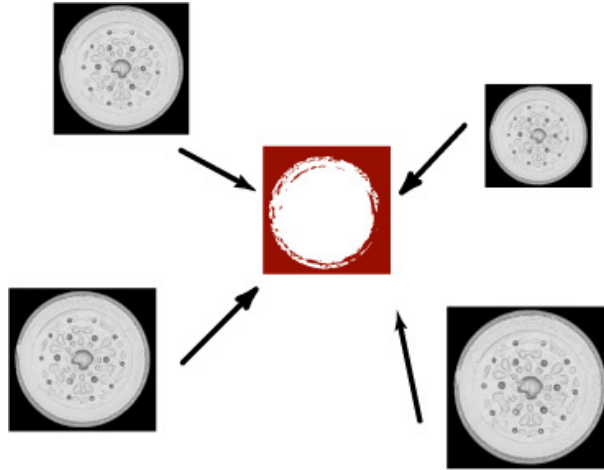


図 1.6: 多対多同時非剛体位置合わせ

この手法では, 基準物体ではない 1 つの形状に全ての物体が変形される. この際, 全体の変形が最小になる形状が目標 (赤い枠内) の形状となる.

える.

1.4 本論文の構成

本論文の章立てを以下に示す.

第 1 章は本章であり, 研究の背景, 3 次元形状データの位置合わせ, そして研究の目的と本研究で扱う同時非剛体位置合わせの概要を述べた.

第 2 章では, 非剛体位置合わせ手法の概要と関連研究に関して述べる. 次に本研究の基盤となっている Free-Form Deformation 法について説明する.

第 3 章では, まず真川ら [20] の手法について述べ, これの問題点について考察する. これに基づき, 前処理として行う新たな分割方法を提案し, 評価実験を行う.

第 4 章では, 複数物体を用いて行う同時非剛体位置合わせ手法を提案する. さらに, この方法についての評価実験を行う.

第 5 章では, 本論文で提案した手法を考古学で注目を集めている三角縁神獣鏡の 3 次元形状データに適用し, 得られた結果について考察を行う.

第 6 章では, 本論文の結論をまとめる.

第2章 非剛体位置合わせ手法

2.1 はじめに

非剛体位置合わせとは, 前章で紹介した手法などによる剛体変換に加え, ある種の変形を施すことで位置合わせをおこなう方法である. 3次元形状モデリングの際の部分形状間の位置合わせに関しては, 剛体位置合わせで十分である. 計測された部分形状は計測範囲が異なるのみで, 対応する形状は, 計測ノイズの影響を無視すれば完全に一致するからである.

しかし, 3次元形状の解析・比較, 例えば本研究の応用例として扱っている「三角縁神獣鏡」の解析において, 変形と損傷という2種類の形状差異を扱う必要がある. 特に前者の変形に対応するためには, 非剛体位置合わせによるデータ処理が必要である. また剛体位置合わせにより吸収されるのは変形による差異であるため, 前述の2種類の形状の差異を分離することが可能となる.

非剛体位置合わせの場合,

- 変形方法
- 変形にロバストな対応点探索

の2つが問題となる. 以下, それらについて具体的に述べる.

2.1.1 変形手法

これまでに提案された変形手法は, Free-Form Deformation (FFD) 法 [13], Thin-plate Spline (TPS) 法 [14] に代表されるパラメトリックな方法と, Elastic-Nets[15] に代表されるノンパラメトリックな方法の2つに大別される. FFD 法は, 格子点により形成される直方体を変形対象物体を囲うように配置し, 格子点を移動させることにより形状データを滑らかに変形させる手法である. TPS 法は, “曲げエネルギー” を最小化することで定義される変形手法である. TPS 法は剛体変換と変形変換の2つを完全に分離することができ, 変形要素の導出が容易であるといった特徴がある. ただし FFD 法に比べて計算時間がかかるといった問題が指摘されている. また一方で FFD 法は非剛体位置合わせ過程において, 格子点数を変化させることにより多重解像度的な位置合わせおよび変形をおこなうことができる [16] といった特徴がある.

Elastic-Nets 法のようなノンパラメトリックな方法では, 通常どんな変形も許してしまうため, 滑らかさ拘束を導入することにより変形の質をコントロールすることになる. Elastic-Nets 法はノンパラメトリックつまりパラメトリックな方法に比べて非常に自由度の高い問題を解く必要があるが, 基本的な演算はすべて線形演算であるので TPS 法による変形よりも大規模な問題を扱えるという報告もされている [17].

2.1.2 非剛体位置合わせに適した対応点探索法

非剛体位置合わせにおいて、前述の ICP による対応点探索のみではロバストな位置合わせが困難である場合が多い。そこで、Chui らは従来の ICP 法の点の対応関係にある種のファジーさを持たせることにより、非剛体位置合わせに適した ICP 法を提案している [18]。さらにファジーさ度合いや TPS における剛体変換-変形変換の割合を焼きなまし (Annealing) 的な手法で微調整していくことにより、更なるロバスト性を獲得している。

また点群で表される形状データを一種の確率分布とみなし、確率分布の一致度 (たとえば KL-ダイバージェンス) を最小化することにより、陽に対応関係を求めることなく変形位置合わせをおこなう方法が提案されている [19]。また前述の Elastic-Nets 法と同時に用いられている方法では、混合ガウス分布を利用して点の対応度合いを計算することにより、同様の手法を実現している [15]。

以下では、関連研究の例として TPS-RPM 法, Elastic-Nets 法, そして本研究の基盤となっている FFD 法を取り上げ説明する。

2.2 関連研究

TPS-RPM

2003 年には Chui[18] らが、TPS-RPM という手法を開発している。ここでは焼きなまし (Annealing) の考えが導入されており、演算が繰り返されるにつれ徐々に変形が行われる手法である。

この手法では以下のエネルギー関数を最小にする演算が行われる。

$$E(\mathbf{M}, f) = \sum_{i=1}^N \sum_{a=1}^K m_{ai} \|x_i - f(v_a)\|^2 + \lambda \|Lf\|^2 + T \sum_{i=1}^N \sum_{a=1}^K m_{ai} \log m_{ai} - \zeta \sum_{i=1}^N \sum_{a=1}^K m_{ai} \quad (2.1)$$

M は対応行列であり、この中の要素 m_{ai} は 0 から 1 の間の値を取り、 $\sum_{i=1}^{N+1} m_{ai} = 1$ ($i \in (1, 2, \dots, N)$), そして $\sum_{a=1}^{K+1} m_{ai} = 1$ ($a \in (1, 2, \dots, K)$)。 f が移動をつかさどる関数である。 x は対象データの座標であり、 $f(v_a)$ が移動後の座標を示す。 λ, ζ は重みパラメータ、 T が温度パラメータであり、これらを徐々に減らすことで位置合わせが行われる。1 番目の項は単純に変更後と対応する点の距離を計算している。2 項目は「smoothness 項」と定義され、これによって変換が拘束される。3 番目の項はエントロピー項であり、この項により、あいまいな対応が

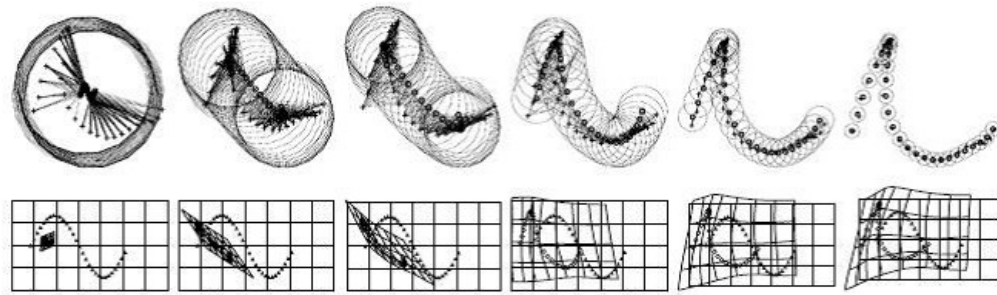


図 2.1: TPS-RPM の行程

左から右に位置合わせが進む。初期は大きな変形が許されていないが、複数点との対応が認められている。右に推移するにつれ、徐々に変形が大きくなり、点が1対1の対応に変化してゆく。

可能になっている。さらに最後の項は多くの対応点が除外されるのを防ぐために設けられている項である。

この手法の特徴は主に2点ある。1つ目があいまいな対応を許す点である。ICPにおいては、1対1の点の対応が必ず求められていたが、TPS-RPMでは複数点との対応が許されている。係数が減少するにつれ、これは1対1の対応に近づいてゆき、最終的なレジストレーションへとつながる。

もう1つの特徴が、焼きなまし (Annealing) の考えを用いているところにある。上の式に設定されているパラメータの数値を徐々に減らしてゆくことで、初期はあまり変形が許されないが、徐々に大きな変形が行えるようになってゆく。

Elastic Net を用いた手法

上に記した TPS-RPM と類似しているが、エネルギー関数を最小化して位置合わせを行う手法として、Elastic Net を用いた非剛体画像レジストレーション手法 [17] も提案されている。Elastic Net は結合された点の集団であり、ある物体をなめらかにモデリングするのに使われる手法であり、巡回セールスマン問題を解く為などに使われている。

Myronenko らの手法は、まず Elastic Net を1つの画像に当てはめる。その後、位置合わせを行いたいもう一方の画像に Elastic Net を当てはめる。Elastic Net の変形を行うことで、2画像間にはどのような変形が必要かが把握できる。この手法の特徴は、混合ガウス分布である Elastic Net を用いることで、確率的な情報を利用して位置合わせを行っている点である。この特徴により、ノイズや外れ値的なデータに振り回されることなく処理が行えると言うことを



図 2.2: TPS-RPM による位置合わせ

1 段目が対象物体であり, 2 段目が ICP による位置合わせ結果. 3 段目が TPS-RPM による位置合わせ後の結果.

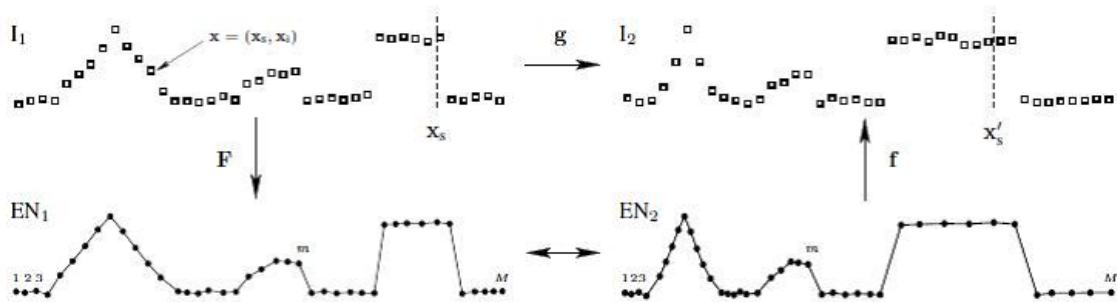


図 2.3: Elastic Net を用いた位置合わせ

1 回目の画像 I_1 に Elastic Net EN_1 を当てはめる. 2 回目の画像 I_2 には EN_2 が当てはめられ, 2 画像間の比較は 2 つの Elastic Net の比較により行われる.

実験結果を用いて示している. さらに, 実験の中で TPS-RPM よりも大きなデータをレジストレーションすることが可能であることが示されている.

これらの手法は, 2 つあるいは複数の画像を同一の物に近づけることを目標としている. このため, 実験の材料として異なった時期に撮影した脳の MRI 画像などが用いられている. 人

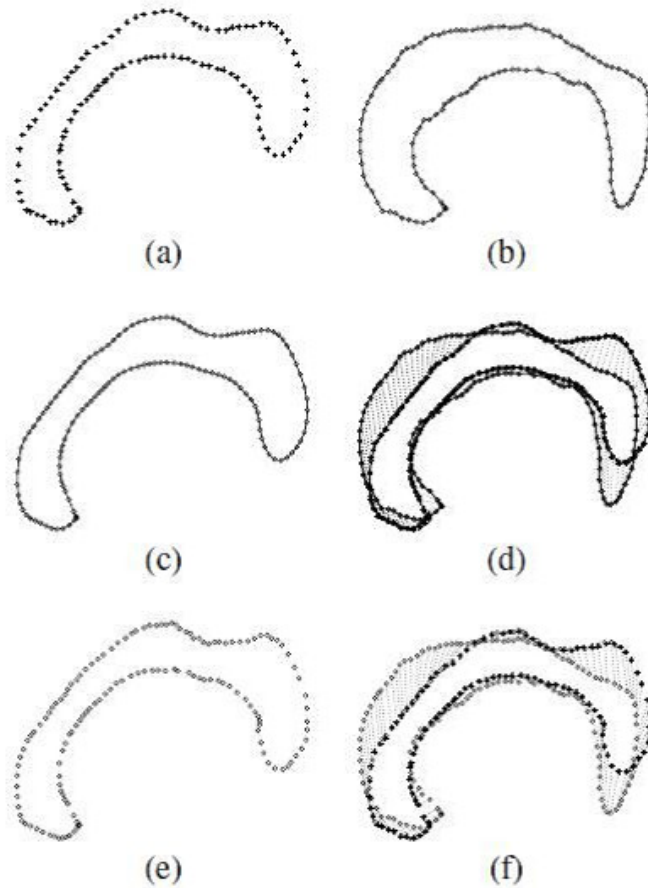


図 2.4: TPS-RPM と Elastic Net による位置合わせ結果の比較

(a,b) が変形前の形状.(c) が Elastic Net により (b) を変形した結果. (d) が初期位置との差. (e,f) が TPS-RPM による変形結果と初期位置との差. ほぼ等しい結果が得られていることが分かる.

間の臓器は日々形状を変化させているため, 剛体変換による位置合わせではかなりの誤差が生じることが考えられる. よって医療の分野において, 異なった時期に撮影した同物体画像の位置合わせは重要であり, 非剛体位置合わせ手法の開発は現在もなお進行中である。

2.3 Free-Form Deformation 法

ここでは, 本研究の基盤ともなっている FFD 法に関して説明を行う. FFD 法はコンピュータグラフィックスの世界で開発された技法である. 元々はある物体を変形させるために用いられていたが, この性能を用いて後に物体の位置合わせに転用されるようになった. 以下では

FFD 法の基本的な特性を紹介する.

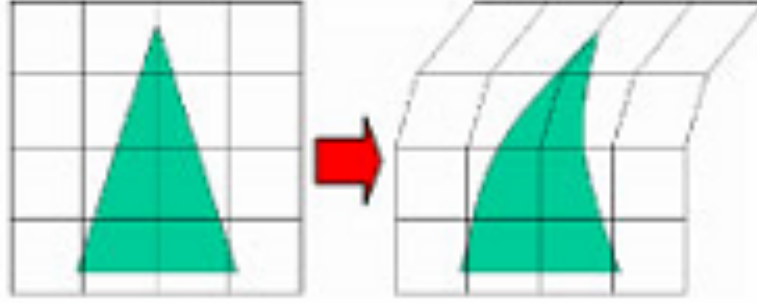


図 2.5: FFD による変形

FFD 法 [13] では, まず整列した格子点群からなる直方体で変形させたい物体を囲み, 格子点を移動させる事により変形をおこなう. 物体を囲む直方体を, 縦, 横, 奥行き方向にそれぞれ l, m, n 個に均等に分割することにより, 元々の頂点と分割された交点からなる $(l+1)(m+1)(n+1)$ 個の格子点 \mathbf{P}_{ijk} が得られる. ここで i, j, k はそれぞれ縦, 横, 奥行き方向の分割位置を示し $i \in \{0, 1, \dots, l\}, j \in \{0, 1, \dots, m\}, k \in \{0, 1, \dots, n\}$ である. 格子点 \mathbf{P}_{ijk} を変位させることにより, 変形前の物体の任意の点 \mathbf{X} の移動後の位置 \mathbf{X}_{ffd} は以下の式により決定される:

$$\mathbf{X}_{ffd} = \sum_{i=0}^l B_l^i(s) \left(\sum_{j=0}^m B_j^m(t) \left(\sum_{k=0}^n B_k^n(u) \mathbf{P}_{ijk} \right) \right). \quad (2.2)$$

ただし, (s, t, u) は変形前の点 X の FFD 座標系での位置であり,

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \frac{s}{l} \mathbf{S} + \frac{t}{m} \mathbf{T} + \frac{u}{n} \mathbf{U} \quad (2.3)$$

により決定される. \mathbf{X}_0 は変形前の格子点 \mathbf{P}_{000} に対応し, $\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}$ は直方体の縦, 横, 奥行き方向の辺である. また, B はある条件を満たす多項式であり, Sederberg の手法 [13] では Bernstein 多項式が用いられている.

Bernstein 多項式を用いた FFD 法では, ある 1 つの格子点の変位が全ての点に影響を与えるという特徴がある. このため, それぞれの格子点の動きが変形にどのような影響を与えるのか想像しにくい. そのため, この手法では格子点の局所の変動が近傍点にしか影響を与えない B-spline 基底:

$$R(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,r}(t) p_i \quad (2.4)$$

を用いている. r を B-spline の位数といい $r = m - n$ である. さらに基底関数 $N_{i,r}(t)$ は,

$$N_{i,r}(t) = \frac{(t - x_i)N_{i,r-1}(t)}{x_{i+r-1} - x_i} + \frac{x_{i+1,r-1}(t)}{x_{i+r} - x_{i-1}} \quad (2.5)$$

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & (x_i \leq t < x_{i+1}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.6)$$

で定義される. p_0, \dots, p_n は $n + 1$ 個の制御点である. x_0, \dots, x_r はノット列とよばれ, 変形をコントロールするパラメータのひとつである. ノット列は単調増加性を満たす任意の値に設定することができるが, ここでは開一様分布 (各隣接ノット間の距離が一定) にしたがって設定した.

まとめると, FFD 座標系での点 \mathbf{p} は, FFD 法により以下で以下の式に従って変位する.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{p}) &= \sum_i^l N_{i,r}(s) \left(\sum_j^m N_{j,r}(t) \left(\sum_k^n N_{k,r}(u) \mathbf{P}_{ijk} \right) \right) \\ &= \sum_i^l \sum_j^m \sum_k^n c_{ijk,r}(\mathbf{p}) \mathbf{P}_{ijk}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

ただし,

$$c_{ijk,r}(\mathbf{p}) = N_{i,r}(s) N_{j,r}(t) N_{k,r}(u) \quad (2.8)$$

である.

第3章 分割非剛体位置合わせによる差異検出

3.1 はじめに

本章では, 前章で紹介した FFD 法を形状比較に応用した研究を紹介する. この中でも特徴点の指定が不要な真川らの手法を取り上げる. 類似した複数の物体の解析を行う際, 個体間の違いはあるものの対応する箇所は比較的近くに存在する事が想像できる. この手法ではこの点を考慮し, 前処理として物体を 2 つに分割し, それぞれの部分を剛体位置合わせ手法により事前に対象物体を出来るだけ近づけている. 筆者は真川らの提案する手法の検証を行い, 分割方法に関する問題点を指摘し, 分割方法の改良を行う. さらにその効果をサンプルデータを用いて検証する.

3.2 FFD を用いた 3 次元形状比較

3.2.1 特徴点を用いた手法

Mochimaru[21] らは FFD 法による足の形状比較を行っている. この研究ではまず解剖学的な知識に基づき特徴点を設定し, 位置を測定する. 測定方法としてはまず対象物体上の特徴点に印を付け, その位置をレーザーレンジセンサなどによって計測する方法や, 先にレーザーレンジセンサーで対象物体を計測して 3 次元モデルを作成し, このモデル上で特徴点を設定する方法がある. ここでは同一カテゴリ内の物体を比較するため, 比較する 2 物体間においてそれぞれの特徴点は 1 対 1 の対応関係を持っている. よって FFD 法に基づきこの対応点が一致するように一方の形状の変形を行う. 一致させる特徴点よりも制御格子点の方が多いため変形は一意に定まらない. そこで, 2 つの物体形状の差異の大きさは, 一致させるために必要な最小の変形によって表されると考えられるために各制御格子点の移動距離の和が最小になる変形を施す. この変形の結果 2 物体間の差異が示され, 各制御格子点の動きの大きさの和によって, 2 つの形状の類似度が求められる.

3.2.2 局所的な位置合わせを用いた手法

前述の手法では, 位置合わせや形状解析を行う前に特徴点の情報を必要とする. しかし, このような情報の指定が困難である分野も想像が出来る. 形状の違いが小さい同一カテゴリ内の物体の場合, 対応する部分を示す点が近くにあるはずである. そこで, 真川 [20] らが提案した手法では, まず剛体位置合わせ手法により 2 つの物体を近づけている. この位置合わせにより 2 つの物体の座標系を合わせることで, 2 つの物体を一致させるために必要な変形を小さくしている. この際, すべての最近傍点間の距離から平均値と分散を計算し, 最近傍点との距離が平均値と分散の和より大きい場合には, 対応点がないと設定している.

目標とする変形の導出 位置合わせのメトリックとして, 対応点間の距離の二乗和を用いる. 具体的に, メトリックは以下の式で表される:

$$E = \sum_a (\mathbf{f}(\mathbf{p}_a) - \mathbf{q}_a) \cdot (\mathbf{f}(\mathbf{p}_a) - \mathbf{q}_a). \quad (3.1)$$

ここで \mathbf{q}_a は \mathbf{p}_a の対応点を示す. これを最小化する格子点を導出することが目標となる.

E を最小化するために各格子点で微分をおこない, その値が 0 になる点を探す. 式 (2.7) より, 格子点の各座標の変位はそれぞれの座標の値にしか影響を及ぼさないことがわかる. つまり, 各座標を独立に扱うことができる. x 座標のみを考えると

$$\frac{\partial E}{\partial P_{x_{ijk}}} = 2 \sum_a (f_x(\mathbf{p}_a) - q_a) \cdot \frac{\partial f_x(\mathbf{p}_a)}{\partial P_{ijk}} \quad (3.2)$$

となる. さらに式 (2.7) より

$$\frac{\partial f_x(\mathbf{p}_a)}{\partial P_{ijk}} = c_{ijk}(\mathbf{p}_a) \quad (3.3)$$

が成り立つ. E が最小の時, 全ての i, j, k において, 式 (3.2) が 0 となる必要がある. つまり, 線型方程式 $\mathbf{A}\mathbf{P}_x = \mathbf{b}_x$ が成立しなければならない. ただし,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{111}^{111} & a_{112}^{111} & \cdots & a_{lmn}^{111} \\ a_{111}^{112} & a_{112}^{112} & \cdots & a_{lmn}^{112} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{111}^{lmn} & a_{112}^{lmn} & \cdots & a_{lmn}^{lmn} \end{pmatrix}$$

$$a_{ijk}^{IJK} = \sum_a c_{ijk,r}(\mathbf{p}_a) c_{IJK,r}(\mathbf{p}_a)$$

$$\mathbf{P}_x = (P_{x_{111}}, P_{x_{112}}, \dots, P_{x_{lmn}})^T$$

$$\mathbf{b}_x = (b_{x_{111}}, b_{x_{112}}, \dots, b_{x_{lmn}})^T$$

$$b_{x_{ijk}} = \sum_a c_{ijk,r}(\mathbf{p}_a) q_{x_a}$$

である. この方程式を解くことで, 変形後の対応点間の距離の二乗和が最小となる格子点の位置を計算することができる.

3.2.3 高速対応点探索法

ここでは, 形状が似ている 2 つのデータに対しての位置あわせを想定しているため, 局所的な形状は剛体位置合わせ程度で位置合わせ可能であると仮定している. しかし, 全体的に誤差が小さくなくても, それぞれの部位では誤差が大きくなっているところがある場合も確認されている. このように誤差が大きいと, 別の対応点に対して変形による位置合わせが行

われたり, 対応点がないとみなされてうまく変形がなされなかったりすることも想定できる. そこで前処理として, 剛体位置合わせをした物体の一方の3次元データを分割し, それぞれの部分を剛体位置合わせ手法によりさらにもう一方の物体に近づける. そして, FFDの最初の一度目は分割して位置合わせした結果に対して行っている. 具体的な方法は以下のとおりである(図3.1参照):

1. 2つの物体の3次元形状データを作成する.
2. 事前に剛体位置合わせを施し, 2つの物体を近づける.
3. 変形対象物体をもっとも偏りの大きな軸に関して分割する.
4. 分割されたそれぞれの部分に対して剛体位置合わせを行う.
5. 満足な精度が得られるまで剛体位置合わせを繰り返し行う.
6. 分割位置合わせされたそれぞれの部分と分割前の形状が一致するような変形を導出する.

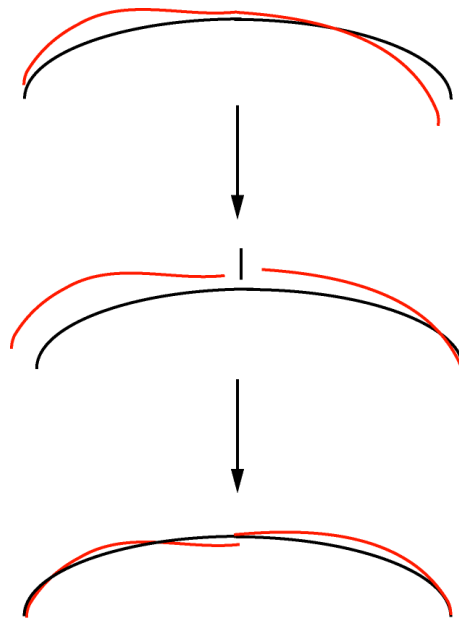


図 3.1: 分割位置合わせ

さらにこの手法では, 分割前後の物体は同一の点番号を持っているため, 対応点探索は一意に決定される. また, 仮定より定義された対応点は変形対象物体に十分に近いことを示している.十分に位置合わせ対象形状が近づいた状態であればICP法による対応点探索でもロバストな非剛体位置合わせが可能であると主張している.

この研究で使用している手法は剛体位置あわせの手法であるため、剛体位置合わせ手法に適用される様々な高速化手法をそのまま当てはめることができ、通常の対応点探索よりも速い処理が可能になっている。さらに、分割の密度を変化させることにより Chui ら [18] の手法で行われている焼きなましと同等のことを行い、高速でロバストな対応点探索を実現している。

3.3 分割方法の改善

しかし、真川らが提案する手法の分割位置合わせでは、物体は最も偏りの大きな辺に沿って分割されている。分割位置合わせにより、分割しない位置合わせよりも2物体間の誤差が縮まっている事が確認できる。しかし、物体によってはこの分割による処理でも不十分な場合がある。図では銅鏡を分割した後に位置合わせを施した例が示されているが、真川らが提案した処理では誤差の除去が不十分であることが伺える。

物体間で誤差のある部分は、図からも分かる様にランダムに存在している。よって偏りの大きい軸での分割による前処理では、閾値で物体を分割する改善策を提示する。具体的には、分割方法がある閾値以上に離れている部分(値はよい結果が得られるよう手動で調整した。)を切り離す方法に変更した。分割したそれぞれの部分をもう一方の物体に対して剛体位置合わせで近づけ、従来と同様、FFDによる変形を施した。これによってランダムに分布している差異に対応した事前処理が施されるようになり、変形前の物体間の誤差がさらに小さくなり、全体の変形量を抑える事が効果として期待できる。詳しい手順は以下の通りである。

1. 2つの物体の3次元形状データを作成する。
2. 事前に剛体位置合わせを施し、2つの物体を近づける。
3. 変形対象物体がもう一方の物体から閾値以上に離れている部分を分割する。
4. 分割されたそれぞれの部分に対して剛体位置合わせを行う。
5. 満足な精度が得られるまで剛体位置合わせを繰り返し行う。
6. 分割位置合わせされたそれぞれの部分と分割前の形状が一致するような変形を導出する。

3.4 評価実験

3.4.1 実験の設定

ここでは、形状的に似ている物体の形状解析を行い、提案分割位置合わせ手法による効果の調査を行った。ここで用いたのは鶏の頭骨である。具体的には、岐阜地鶏 2 体の頭蓋骨の形状比較を行った。これら頭骨の距離画像は、VIVID910 というレーザーレンジセンサを用いて取得された。以下に対象データとして利用した岐阜地鶏 2 体の距離画像を示す。

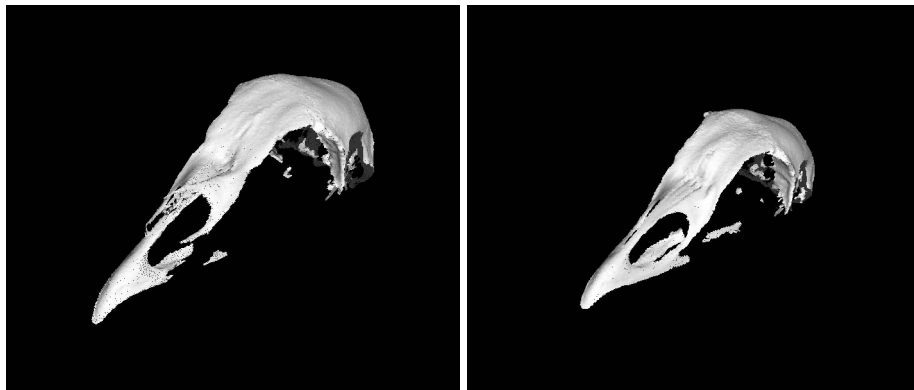


図 3.2: 岐阜地鶏 2 体の形状データ gifu2 と gifu4

本実験では、gifu4 とされる頭蓋骨のデータを基準物体とし、gifu2 のデータを変形させ他の個体に近づけ、その差異を求める。変形させる物体が同一であるため、同じ格子点群を用いることができる。よって格子点の動きをそのまま比較することができる。FFD 座標系は基準物体のもつ頂点データの中で、x 軸、y 軸、z 軸方向のそれぞれ最大値と最小値を求め、それにより作られる直方体である。よって、世界座標系と同じ軸方向を持ち、そのなかでもっとも小さな直方体である。本研究では制御格子点群の数は各辺 5 個設けた。手法の効果を示す為に、gifu2 に真川らによる分割位置合わせと本研究で提案した分割位置合わせを施した後変形し、その結果を比較した。

3.4.2 実験結果

真川らが提案した分割方法と本研究で提案した分割方法による分割非剛体位置合わせ結果を以下に示す。最初の図がそれぞれの格子点の移動結果を示す。

図からも分かる様に、本研究で提案した分割方法を施した後の変形結果の方が真川らの提案手法よりも格子点の移動量が全体的に少ない事が分かる。よって提案手法による分割位置合わせにより、2つの物体がより近づいたことが理解できる。さらに、以下にそれぞれの手法による位置合わせ後の 2 物体間の誤差を示す。

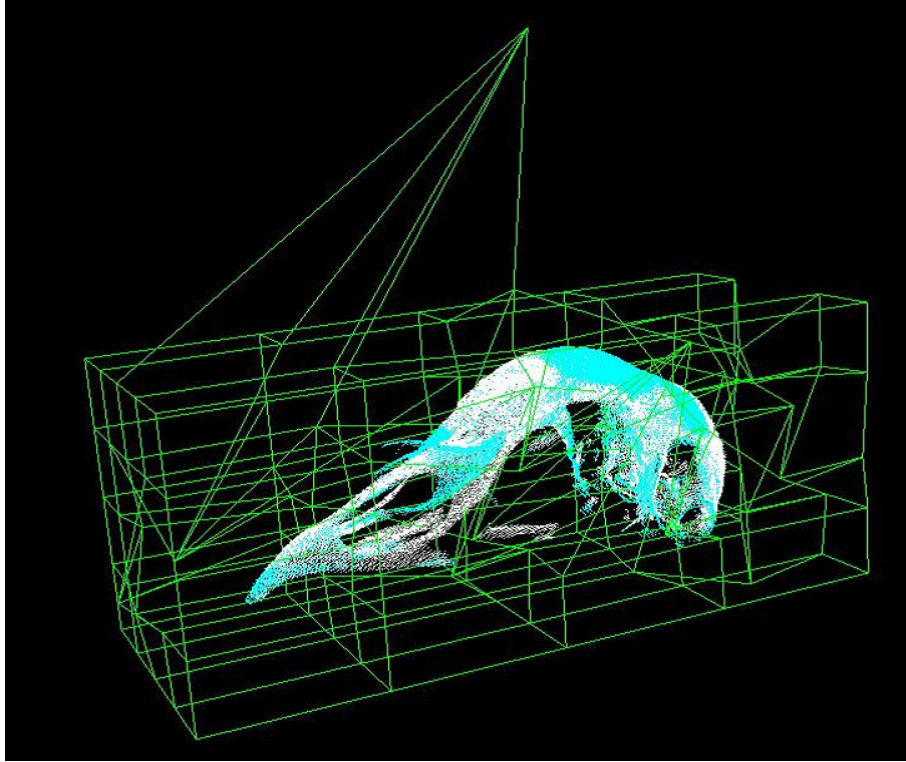


図 3.3: 真川らの手法適用後の格子点の移動

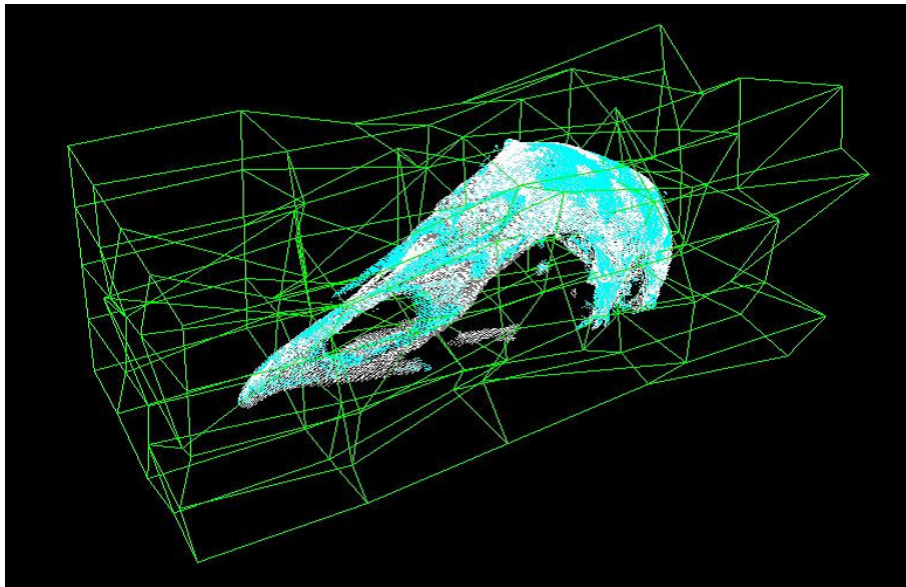


図 3.4: 提案手法適用後の格子点の移動

図 3.5 では 2 つのデータを重ね合わせ, gifu4 に対して gifu2 が凸である部分が赤, 凹である部分が青で示されている (2 つの物体の対応点が 0.0003 以上の部分). 左側の頭蓋骨が真川ら

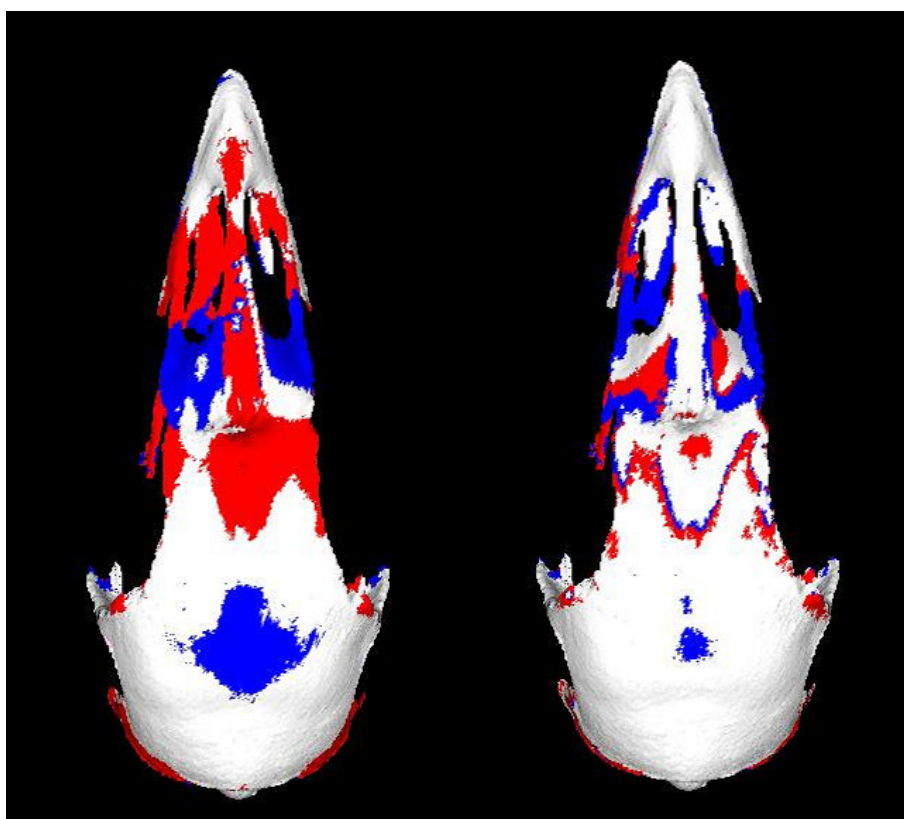


図 3.5: 2 手法の比較結果

左:真川らの手法 右:提案手法 0.0003 以上凸:赤 凹:青

手法	凸	凹	閾値以内
真川	20.761392	11.628064	67.610547
提案手法	6.258767	5.576452	88.164778

表 3.1: 凹凸部分の割合

閾値は 0.0003

の手法を適用した結果, 右側の頭蓋骨が提案手法を適用した結果をそれぞれ示す. この様に, 誤差が大きい部分に色が付与されているが, 提案手法による結果では, 色の付いた領域が縮小していることが明らかになっている. 格子点の移動量だけでなく, 物体間の距離からも, 提案手法による変形の方がより適切な位置合わせ処理であることが理解できる. さらに頭蓋骨の頂点や中央部分の凹凸は提案手法による結果でも残されていることが確認でき, 物体の特徴的な差異は除去されずに残されるということも理解できる. よって物体間の小さな誤差を軽減しつつ, 特徴を残す手法として, 筆者が提案する分割方法が適切であるということが示さ

れた.

ただ, 赤い部分が青になる部分や, 以前は差異が確認されていなかった場所に色が発生する部分が多少確認された. これは, 分割位置合わせにより, 過度に剛体位置合わせが行われてしまった箇所を示す可能性が高い. 大半の部分はこの手法によって適切な処理が行われたが, 過度な移動が行われないよう, さらに適切な閾値の設定方法を考慮する必要がある.

第4章 多対多同時非剛体位置合わせ

4.1 はじめに

本章では, 本章では, 多数の物体を同時に扱う多対多同時非剛体位置合わせ手法を提案する. 従来, 多数の物体を変形し比較するには, その中から一つの基準物体を選択し, その物体に対して変形による位置合わせを施していた. しかし, このような手法を用いて専門的な解析を行う為には, 基準物体を選択する際に専門的知識が必要となる. さらに, 基準として設定した物体に大きな歪みや傷が存在する場合, 他の物体がその傷によって大きな影響を受けることが想像できる. これら物体が同時に変形できるとすれば, 基準物体の選択が不要になり, さらに1つの物体の歪みや傷に大きな影響を受けなくて済むようになる. そこで筆者は複数物体を同時にかつ自動的に変形する方法を模索した.

以下では, まず多対多同時非剛体位置合わせ手法の提案を行い, この手法の概要を述べる. 次にこの手法を達成する際に解決する必要がある問題を列挙し, それぞれを解くためのアプローチを説明する. 最後に実験を行い, 提案手法を評価し, 有効性を示す.

4.2 多対多同時非剛体位置合わせ

4.2.1 従来手法の問題点

2章で述べた通り, 従来の非剛体位置合わせ手法は1対1逐次非剛体位置合わせとして分類する事が出来る. これら手法では, 2つの物体を取り上げ, 一方を基準物体と設定し, もう一方の物体が基準物体に近づく様に変形が施される. 多数の物体を位置合わせする際にも, どれか1つの物体を基準物体と設定し, これに近づけるように他の物体が変形される. よって最終的な位置合わせ結果は, 基準物体に限りなく近い物であることが容易に想像できる.

しかし, 専門的な分野において1対1非剛体位置合わせ手法を用いて形状解析を行うには, 基準物体を選定する際に専門的知識が必要不可欠となる. 基準物体によって最終的な位置合わせ結果が左右されるため, 間違った物体を選択した場合には, 位置合わせ結果自体も間違ってしまう可能性が生じる. さらに, 分野によっては, こういった基準物体が未知であり, 基準設定が困難な場合も考えられる. 5章で取り上げる三角縁神獣鏡の研究を行っている考古学の分野が代表例として挙げられる. 特に三角縁神獣鏡の研究においては, 基準物体の特定自体が研究目標の一部であるため, この手法を用いては有効な結果が取得できない可能性が高い. また有用な結果が得られるとしても, 複数の物体の中から1つずつ基準物体を選んでゆき, 繰り返し位置合わせ処理を行わなければならない.

さらに, 基準となる物体が存在したとしても, もしその物体に大きな歪みや傷が物理的に存在する場合, 位置合わせ処理が困難になる. 形状比較において, 変形処理の第一の目的が特

徴としては扱うことのない誤差を軽減することである。このような誤差として扱われる歪みや傷が基準物体に多く存在する場合、変形の目標を達成することは非常に困難になる。

以上の通り、既存の1対1同時非剛体位置合わせ手法には課題が残っている事が確認された。この様な課題を乗り越えるために開発される手法は以下の条件を満たさなければならない。

1. 基準物体を設定しない
2. 対象物体を同時に変形する
3. 専門知識を用いずに自動で処理する

4.2.2 提案手法

筆者は、この条件を満たす多対多同時非剛体位置合わせ手法を提案する。この手法では、1度の処理で同时对象物体を変形し、1つの形状に位置合わせする。これは1対1逐次非剛体位置合わせと同じであるが、この手法では基準形状となる物体を設定せず、全物体の変形量の合計が最小となるように全物体を変形させて1つの形状を作成する。

実際同時に複数の物体を変形させようとすると、目標となるべき対応点も同時に移動することが考えられるため、移動目標の設定が困難になる。

位置合わせ実現の条件

本手法ではまず、ラベル付けされている0から n までの物体の中から0をまず選択する。これは基準物体ではないため、どの物体を選択しても問題は無い。次にこの物体0を残りの1から n までの各物体 i に対しFFD法による変形を施し位置合わせを行う。この処理により、物体0は物体 i に対し完全に位置合わせされた、とする。位置合わせの際、物体0の格子点は移動するため、それぞれの物体に対して変形した後の格子点の位置を記録しておく。最後に、一致している状態の物体0と i を同時に動かし、物体0から n の一致状態を維持しながら、格子点の移動量の合計が最小になる地点に移動する。

図4.1はこの手法の手順のフローチャートである。

この処理を施す為には、以下の問題を解決しなければならない。

1. 各物体の格子点の変化の関係を理解
2. 全体の格子点変化量の最小化
3. 初期工程で変形した物体0の一元化

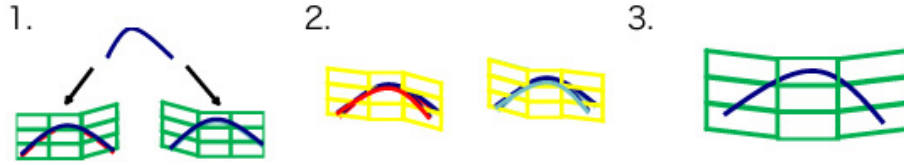


図 4.1: 多対多同時非剛体位置合わせの手順

始めに物体 0 が i に対し変形される. 次に 0 と i を同時に動かし, 最終的に 1 つの形状に収束させる. この際, 全ての物体の格子点の移動量は最小になる.

1 番目の問題は, 物体 0 と物体 i を同時に変形する際に生じる. 初期工程の結果, 物体 0 と i が一致しているのので, 一見物体 0 と i の格子点を同じ具合に移動させれば, 物体を一致させたまま同時に変形が行えそうであるが, 実際これら物体はそれぞれ異なった基底関数を用いて変形が行われるため, 格子点に同じ変形を加えても, その変形結果は一致しないことが考えられる. よって各物体が格子点の移動によってどの程度変化するかを把握しなければならない.

2 番目の問題が, 最適な形状を模索する際に生じる問題である. 1 番目の問題を解く事で物体 0 と i の変化の関係が把握できるが, ここでは複数の物体を同時に変形させることを目標としている. よって最適な変形を施す為には, 1 対 1 の関係において最適な形状を模索するのではなく, 全ての物体に対する最適な形状を提示しなければならない. よって各物体の変形関係をふまえ, 全体の格子点の移動量が最小な形状を算出しなければならない.

3 番目の問題も, 最適な形状の算出の際に生じる問題である. 初期工程において, 物体 0 は, 物体 1 から n までのそれぞれの物体 i に対して変形が施される. つまり, 0 は 1 から n までの形状にそれぞれ変化することになる. しかし, これらは元々 1 つの物体である. まとまりのない状態では, 位置合わせが行われたということにはならない. よって最終処理の後には, 1 つの形状一元化されていなければならない, という制約が課されることになる.

手法手順

ここでは, 本手法の詳細を説明しつつ, 3 つの問題に関しても言及する.

2 章の通り, ある物体の点を \mathbf{a} とする. これは FFD 座標系で $\mathbf{a} = (s, t, u)^t$, と表現する. さらに世界座標系 x, y, z 軸上にある格子点の数をそれぞれ l, m, n と表記する. FFD による変形 \mathbf{f} は以下の様に定義される.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{P}_{ijk}) &= \sum_i^l N_{i,r}(s) \left(\sum_j^m N_{j,r}(t) \left(\sum_k^n N_{k,r}(u) \mathbf{P}_{ijk} \right) \right) \\
 &= \sum_i^l \sum_j^m \sum_k^n c_{ijk,r}(\mathbf{a}) \mathbf{P}_{ijk}.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ここで,

$$c_{ijk,r}(\mathbf{a}) = N_{i,r}(s)N_{j,r}(t)N_{k,r}(u) \quad (4.2)$$

である.

ここに $0, \dots, n$ とラベル付けされた複数の点群データがある. これらデータの同時非剛体位置合わせを行う際, まずは物体 0 のデータを i に対して 1 対 1 の非剛体位置合わせをする. この結果, 変形した後の物体 0 の格子点の移動量 \mathbf{P}_i が求められる. 物体 0 のそれぞれのデータに対する変形は $\mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{I} + \mathbf{P}_i), (i = 1, \dots, n)$ と示される. \mathbf{a} は FFD 座標系における点の位置, \mathbf{I} は格子点の初期位置をそれぞれ示している. この処理によって 0 と i のデータは完全に一致する様位置合わせされた, と仮定する.

次に, 物体 0 の変形を表す格子点がさらに $\Delta\mathbf{P}_i$ 変化する. この時, 変形は $\mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{I}_0 + \mathbf{P}_i + \Delta\mathbf{P}_i)$ と記される. 0 と i が一致していなければならないため, この時, a^0 と対応する物体 i の点 a^1 も移動する. この移動は $\mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \mathbf{I}_i + \Delta\mathbf{Q}_i)$ という変形として記される.

上の条件より

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{I}_0 + \mathbf{P}_i + \Delta\mathbf{P}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \mathbf{I}_i + \Delta\mathbf{Q}_i) \quad (4.3)$$

が成立しなければならない. 式 (4.1) より FFD には格子点に関して線形性があるため,

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{I}_0 + \mathbf{P}_i + \Delta\mathbf{P}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{I}_0) + \mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{P}_i) + \mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \Delta\mathbf{P}_i) \quad (4.4)$$

となる. また物体 i に関しては

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \mathbf{I}_i + \Delta\mathbf{Q}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \mathbf{I}_i) + \mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \Delta\mathbf{Q}_i) \quad (4.5)$$

となる.

物体 0 は最初の変形において物体 i に完全に一致する様位置合わせされているという仮定より $\mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \mathbf{I}_0 + \mathbf{P}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \mathbf{I}_i)$ が成り立つ. よって式 (4.3) は

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}^0, \Delta\mathbf{P}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{a}^i, \Delta\mathbf{Q}_i) \quad (4.6)$$

と表記することが可能であるが, この式が成立する事を示さなければならない. ただし, これが成立するためには全ての \mathbf{a}^i , に対して式 (4.6) が成り立つ必要がある. この問題を少し緩和し, 代表的な点を p 個取り上げ, これらの点において上の式が成立するかを調べる.

今, ある制御点の x 座標値のみが変わった場合, 式 (4.1) から, その影響は各点の x 座標値のみに影響するということがわかる. つまり, x, y, z を独立に考えることができるため, ここでは x に関してのみを考慮する. さらに, 式 (4.6) を詳しく表記すると, 式 (4.1) より,

$$\begin{aligned}
& (c_{111}(a_{x1}^0)P_{ix111} + c_{112}(a_{x1}^0)P_{ix112} + \dots + c_{lmn}(a_{x1}^0)P_{ixlmn}) \\
&= (c_{111}(a_{x1}^i)Q_{ix111} + c_{112}(a_{x1}^i)Q_{ix112} + \dots + c_{lmn}(a_{x1}^i)Q_{ixlmn}) \\
& (c_{111}(a_{x2}^0)P_{ix111} + c_{112}(a_{x2}^0)P_{ix112} + \dots + c_{lmn}(a_{x2}^0)P_{ixlmn}) \\
&= (c_{111}(a_{x2}^i)Q_{ix111} + c_{112}(a_{x2}^i)Q_{ix112} + \dots + c_{lmn}(a_{x2}^i)Q_{ixlmn}) \\
& \quad \vdots \\
& (c_{111}(a_{xp}^0)P_{ix111} + c_{112}(a_{xp}^0)P_{ix112} + \dots + c_{lmn}(a_{xp}^0)P_{ixlmn}) \\
&= (c_{111}(a_{xp}^i)Q_{ix111} + c_{112}(a_{xp}^i)Q_{ix112} + \dots + c_{lmn}(a_{xp}^i)Q_{ixlmn})
\end{aligned} \tag{4.7}$$

となる。ここで

$$\mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} c_{111}(a_{x1}^0) & c_{112}(a_{x1}^0) & \cdots & c_{lmn}(a_{x1}^0) \\ c_{111}(a_{x2}^0) & c_{112}(a_{x2}^0) & \cdots & c_{lmn}(a_{x2}^0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{111}(a_{xlast}^0) & c_{112}(a_{xlast}^0) & \cdots & c_{lmn}(a_{xlast}^0) \end{pmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{P}_i = (P_{ix111}, P_{ix112}, \dots, P_{ixlmn})^T$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} c_{111}(a_{x1}^i) & c_{112}(a_{x2}^i) & \cdots & c_{lmn}(a_{x1}^i) \\ c_{111}(a_{x2}^i) & c_{112}(a_{x2}^i) & \cdots & c_{lmn}(a_{x2}^i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{111}(a_{xlast}^i) & c_{112}(a_{xlast}^i) & \cdots & c_{lmn}(a_{xlast}^i) \end{pmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{Q}_i = (Q_{ix111}, Q_{ix112}, \dots, Q_{ixlmn})^T \tag{4.8}$$

とすると、以下の方程式が出来上がる。

$$\mathbf{A}_0 \Delta \mathbf{P}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{Q}_i \tag{4.9}$$

ただし、格子点の位置を求めるには式 (4.9) を解かなければならない。よって、ここでは $\Delta \mathbf{P}_i$ が与えられたとし、最も妥当な $\Delta \mathbf{Q}_i$ を求める問題に置き換える。

式 (4.9) より

$$\Delta \mathbf{Q}_i = \mathbf{A}_i^+ \mathbf{A}_0 \Delta \mathbf{P}_i \tag{4.10}$$

となる。 \mathbf{A}_i^+ は \mathbf{A}_i の擬似逆行列である。この擬似逆行列を求めることで最も妥当な $\Delta \mathbf{Q}_i$ が求められる。 \mathbf{A}_i に逆行列が存在する場合は、擬似逆行列を用いらずに逆行列 \mathbf{A}^{-1} を用いて $\Delta \mathbf{Q}_i$

を求める. この式から, 物体 0 を再変形する際の格子点の移動 $\Delta\mathbf{P}_i$ と物体 i の格子点の移動 $\Delta\mathbf{Q}_i$ の関係が得られる. 問題 1 として挙げた, 物体間の格子点の変化の関係はこの関係によって示される. この式により, 位置合わせされた状態を維持しながら全ての物体を変形することが可能である事が示されたが, 場合によっては, 一部の物体が大きく変形する可能性がある. 特定の物体に対する過剰な変形を回避するため, 物体 0 から物体 n までの全体的変形量が最小になる変形を実施する.

ここでは変形量を格子点の移動距離としている. 物体 0 に対する変形量は

$$\|\mathbf{P}_i + \Delta\mathbf{P}_i\| \quad (4.11)$$

という式で示される. しかし, 物体 0 は同一物体であるため, 同時位置合わせの最終段階においては一カ所に収束しなければならない. これは 3 番目の問題として挙げた点である. 物体 0 を一カ所に収束させる為には, 格子点の恒等変換が望ましい. この条件より

$$\mathbf{P}_i + \Delta\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_j + \Delta\mathbf{P}_j \quad (4.12)$$

が成立しなければならない. 同様に上式は

$$\mathbf{P}_i + \Delta\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 \quad (4.13)$$

と表記する事ができ, 式 (4.14) に代入すると

$$\|\mathbf{P}_1 + \Delta\mathbf{P}_1\| \quad (4.14)$$

となる. さらに物体 i に対する変形量は

$$\|\Delta\mathbf{Q}_i\| \quad (4.15)$$

と示す事ができる. 式 (4.10) を代入すると

$$\|\mathbf{A}_i^+ \mathbf{A}_0 \Delta\mathbf{P}_i\| \quad (4.16)$$

となる. 式 (4.13) を変更すると $\Delta\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_i$ となるためこの式は

$$\|\mathbf{A}_i^+ \mathbf{A}_0 (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_i)\| \quad (4.17)$$

となる. 物体 0 から n までの変形量の合計を最小化するためには

$$E = \|\mathbf{P}_1 + \Delta\mathbf{P}_1\| + \sum_{i=1}^n \|\mathbf{A}_i^+ \mathbf{A}_0 (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_i)\| \quad (4.18)$$

を最小化する必要がある. この式において, 変化する値は $\Delta\mathbf{P}_1$ だけであるため, 本研究では

$$\operatorname{argmin}_{\Delta \mathbf{P}_1} E = \|\mathbf{P}_1 + \Delta \mathbf{P}_1\| + \sum_{i=1}^n \|\mathbf{A}_i^+ \mathbf{A}_0 (\mathbf{P}_1 + \Delta \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_i)\| \quad (4.19)$$

を最小二乗法を用いて解く. これにより, 全ての物体の格子点の最終的な位置を取得する.

また, 格子点の情報を与えられていない状態から $\Delta \mathbf{P}_i$ と $\Delta \mathbf{Q}_i$ を求める問題の場合は

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0 & -\mathbf{A}_i \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{pmatrix}$$

と式 (4.9) の式の操作を行うことで, 以下の式を得る.

$$\mathbf{MR} = \mathbf{0} \quad (4.20)$$

しかし, この条件に当てはまる解が求められない可能性もある. ここで条件を緩和し,

$$\mathbf{MR} = \mathbf{e} \quad (4.21)$$

の \mathbf{e} を最小化する問題に置き換える. ($\mathbf{e}^t \mathbf{e} = \|\mathbf{e}\|$ を小さくする \mathbf{R} を探す. ただし $\|\mathbf{R}\| = 1$ とする.)

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M}^T \mathbf{MR} = \|\mathbf{e}\| \quad (4.22)$$

$$\mathbf{M}^T \mathbf{MR} = \|\mathbf{e}\| \mathbf{R} \quad (4.23)$$

これは固有値問題であり, $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$ の最少の固有値に対応する固有ベクトルを求めることでこの問題を解くことができる ($k\mathbf{R} = \mathbf{MR}$ という式において $\mathbf{M}^T \mathbf{M} = k^2 = \|\mathbf{e}\|$). 固有値が 0 となる固有ベクトルが存在する場合は式 (4.20) の場合での \mathbf{R} を求めたことになる.

本研究では, 物体 0 を最初に変形させるため, 一方の格子点の位置情報が与えられるため, 前者の最小化問題を扱う. この結果, 3 つの問題に対処しながら, 対象物体の同時非剛体位置合わせが施される.

4.3 評価実験

ここでは, 前章と同様, 鶏の頭蓋骨を用いて提案手法の評価実験を行う. 同じデータセットに対し, 剛体位置合わせ, 逐次非剛体位置合わせと提案した同時非剛体位置合わせを施し, 結果の検証を行った. 具体的には, 子軍鶏 3 体の頭蓋骨の形状比較を行った. 図 4.2 に対象データの子軍鶏 3 体の距離画像を示す.

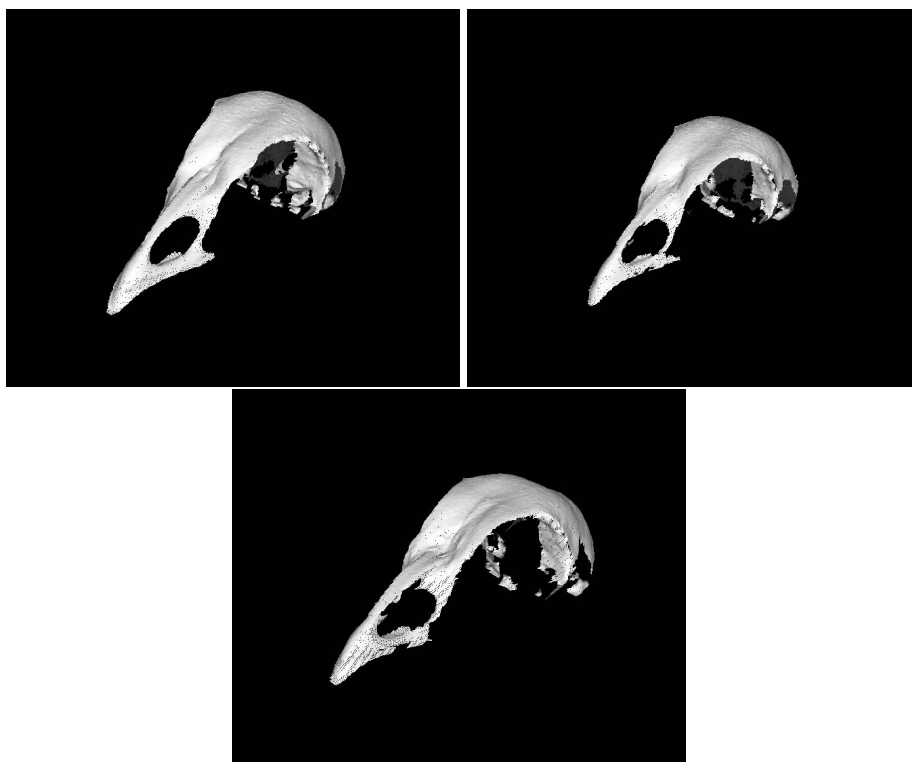


図 4.2: 子軍鶏 3 体の形状データ koshamo1, koshamo2 と koshamo3

本実験では、まず基準物体を koshamo1 として設定し、剛体位置合わせ、逐次非剛体位置合わせを施し、差異を求めた、次に同じデータに対し同時非剛体位置合わせを施し、前者 2 手法との結果を比べた。なお、同時非剛体位置合わせにおいて、擬似逆行列の計算が行われているが、この安定化の為に本実験では Ridge Regression 法を用いている。ここでは逆行列の計算前に対角成分に 1.0 を加えている。

まず、剛体位置合わせを施した結果を図 4.3 に示す。

次に、提案手法による結果を示す。図 4.4 に同時非剛体位置合わせによる格子点の移動を示す。

図 4.4 で示す通り、剛体位置合わせよりも誤差の領域が限定されており、特徴が目視によっても分かりやすくなっていることが伺える。

さらに、逐次非剛体位置合わせ手法による結果と比較する。

表 4.3 で示された誤差や図 4.6 から、提案手法では、誤差の領域が逐次非剛体位置合わせ手法による結果よりも若干拡大してしまうことが分かった。しかし、格子点全体に加わった変化量は表 4.3 の通り大幅に減少しており、各物体に変形量を分散させて位置合わせが施されているという事が理解できる。

よって、同時非剛体位置合わせにより、全体の変形量を軽減しつつ、全ての物体を特徴を残

手法	組み合わせ	凸	凹	閾値以内
剛体	1 → 2	8.654173	7.635224	82.710604
-	1 → 3	20.512303	19.587549	59.900151
-	2 → 3	16.944440	17.573287	65.482269
逐次非剛体	1 → 2	5.5834090	8.326559	85.839347
-	1 → 3	13.018215	8.744484	78.237304
-	2 → 3	10.606190	8.475615	80.918196
同時非剛体	1 → 2	11.421285	10.195007	78.383712
-	1 → 3	20.498449	18.706797	60.794754
-	2 → 3	21.746118	18.132251	60.121630

表 4.1: 閾値以上凹凸な部分の割合
閾値 0.0003

手法	格子点の移動距離
逐次非剛体	0.410927
同時非剛体	0.227798

表 4.2: 格子点の合計移動距離

しつつ位置合わせする事が可能になったと言う事が示された. 1つの物体に影響され無かったことが示されたが, 位置合わせの精度に関しては, 結果の通り逐次位置合わせよりも劣っている事がわかった. この原因としては, 同時非剛体位置合わせが仮定している条件が挙げられる. この手法では, 最初の段階で完全に一致する様位置合わせされた, ということを仮定している. しかし, 実際は一致していない点も残されており, この誤差が次の段階に影響を与えている事が考えられる. さらに, 安定化の際に RR 法を用いているが, 与える値次第で変形の具合も変化するため, これも原因の1つとして挙げられる. 今後の課題としては, 全ての物体を1カ所にまとめる際に, 全体の変形量を低く抑えつつ, かつ物体間の誤差をさらに抑える方法をさらに模索することが挙げられる.

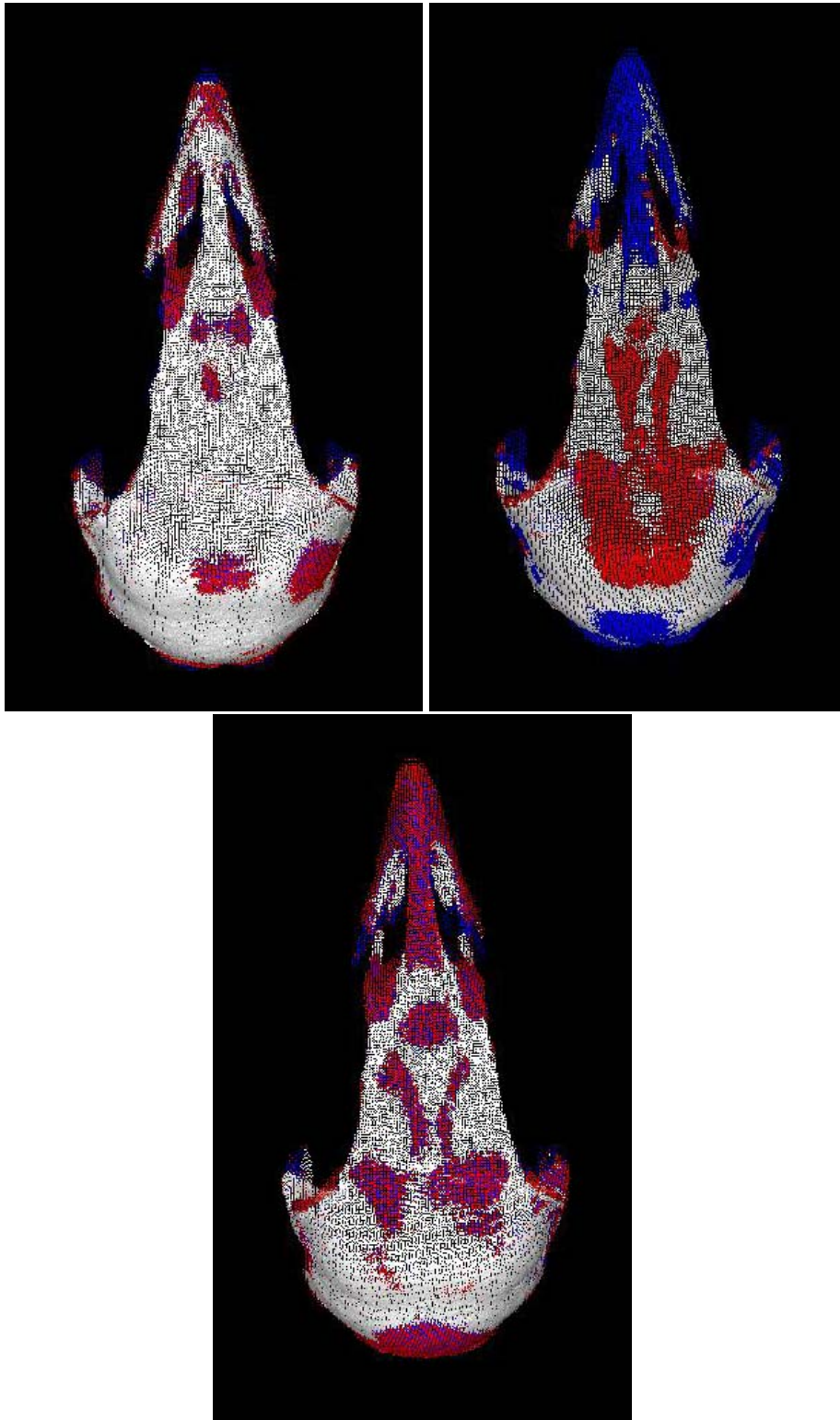


図 4.3: 剛体位置合わせ後の差異
左上から 1 と 2, 1 と 3 下 2 と 3 閾値 0.0003

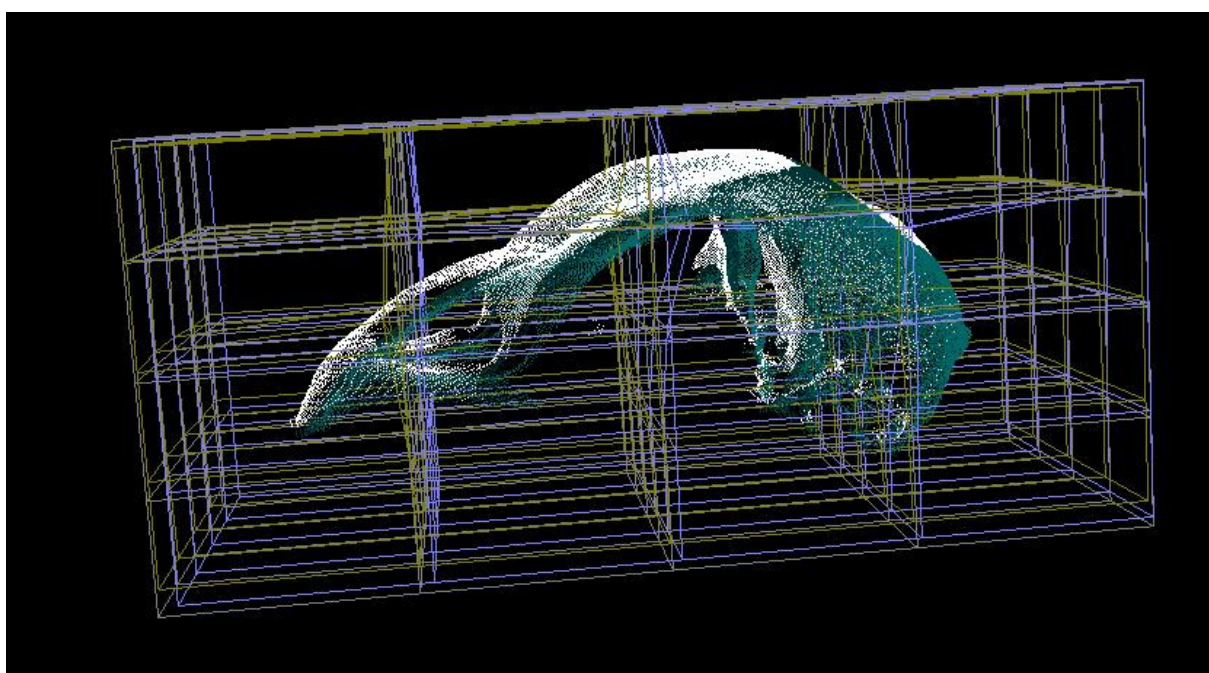


図 4.4: 同時非剛体位置合わせによる格子点の移動

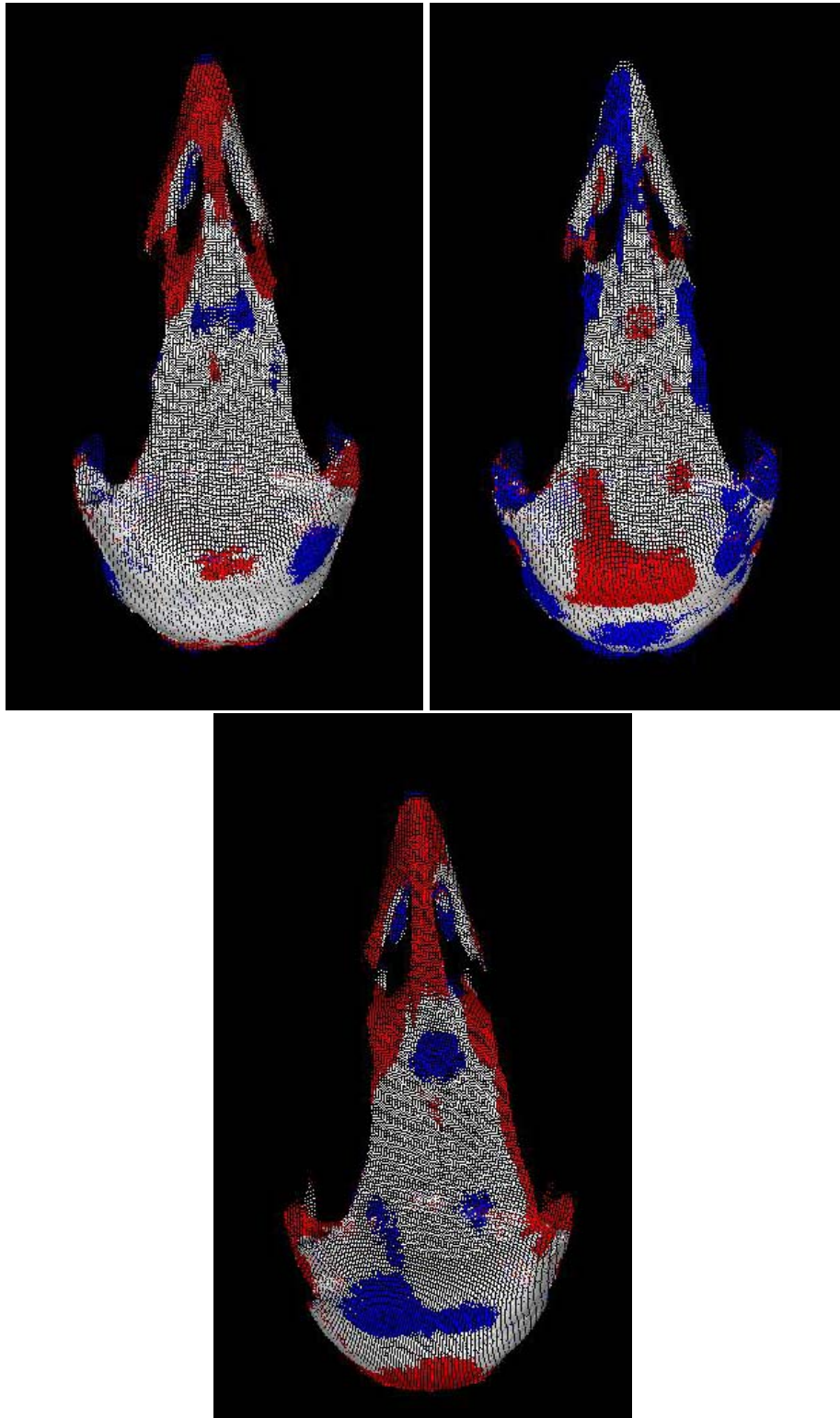


図 4.5: 同時非剛体位置合わせ後の差異
左上から 1 と 2, 1 と 3 下 2 と 3 閾値 0.0003

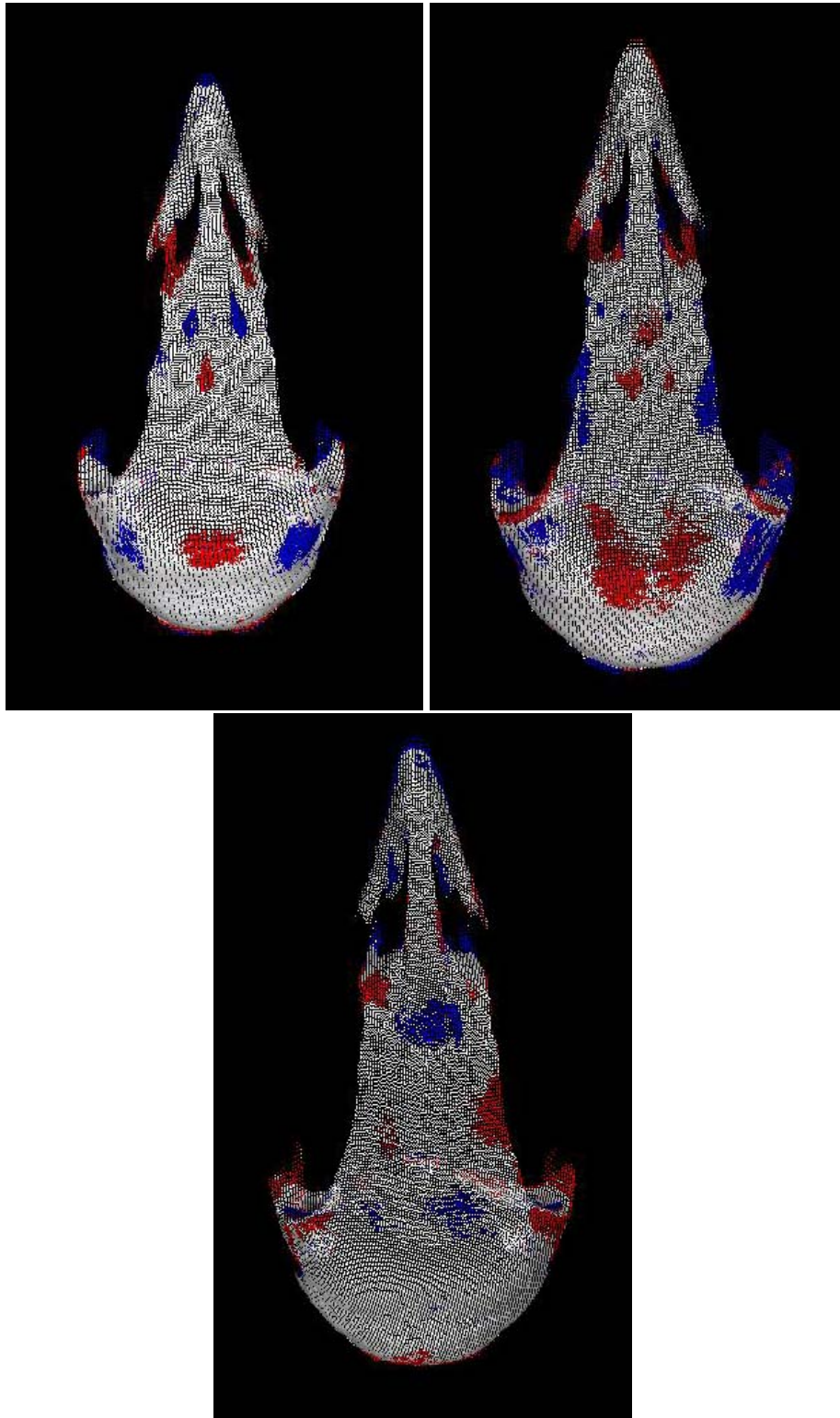


図 4.6: 逐次非剛体位置合わせ後の差異
左上から 1 と 2, 1 と 3 下 2 と 3 閾値 0.0003

第5章 応用: 非剛体位置合わせによる 三角縁神獣鏡解析

5.1 三角縁神獣鏡を用いた応用実験

5.1.1 三角縁神獣鏡

三角縁神獣鏡という名前が一般的に利用され始めた時期ははっきりとは分かっていないが、三角縁神獣鏡の名前の由来は、この鏡の形状にある。この鏡の特徴的な点は、縁が鋭い三角形のように尖っていて、さらに鏡面の裏には様々な文様が施されており、神像と獣形の文様が特に多い。参考として三角縁神獣鏡の形状を図 5.1 に示す。

鏡の直径はおよそ 20cm 程で、他の種類の銅鏡より比較的に大きい部類に入る。以下の図に示す通り、この鏡は数区分に分けられており、それぞれの区分ごとに名称がつけられ、中央部分からそれぞれ鈕、鈕座、内区、外区、そして縁となっている。内区はさらに主文帯、副文帯に分けられる。

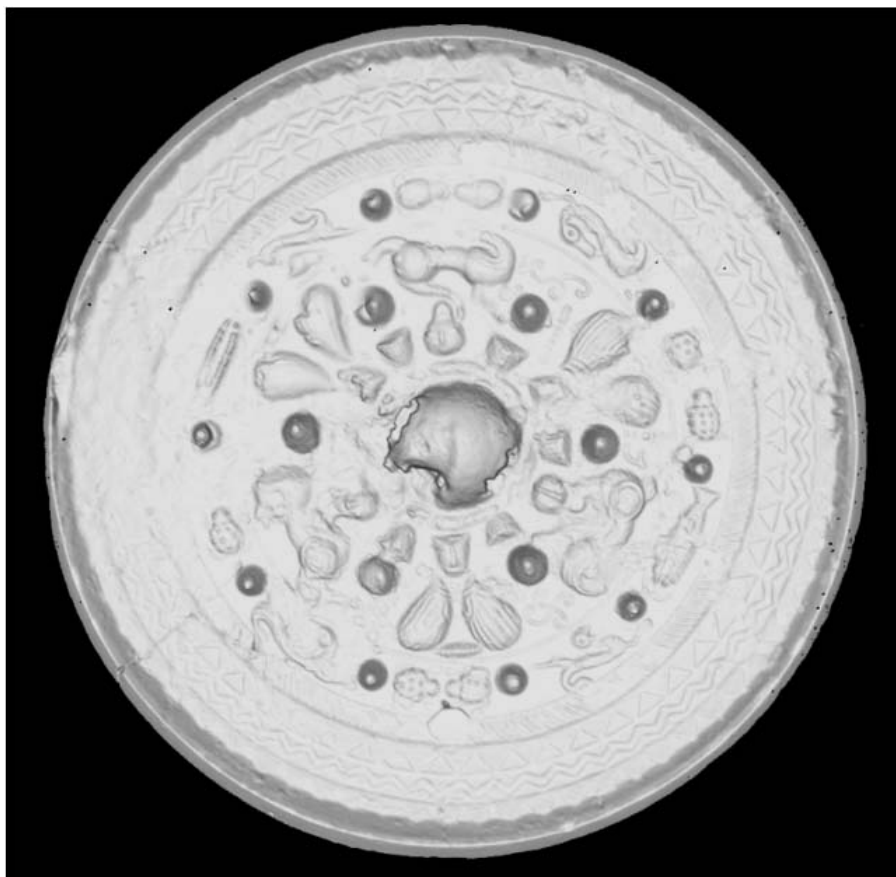


図 5.1: 三角縁神獣鏡

内区には神像や獣形が配置され、その間に小さな乳と呼ばれる突起物がある。さらに副文帯には銘帯、唐草文帯、獣帯、波文帯、鋸歯文帯の種類があり、さらに外区には鋸歯文帯、複波

文帯、鋸歯文帯の三種類が存在していることが樋口隆康の三角縁神獸鏡の調査により分かっている [24].

さらに、三角縁神獸鏡には銘がある物がある。神や獣の名前を示す銘もあれば、鏡の制作に関する情報を示す物まである。原材料である銅の生産地や、制作された時期らしき表記も存在する。樋口隆康の調査から [24], この年号を示す銘文は大阪府和泉市の黄金塚から発見された景初三年という銘の入った画文帯神獸鏡や京都府福知山市広峰 15 号墳から発見された景初四年という銘が入った平縁盤龍鏡の銘文と似ており、この類の鏡は魏の年号を持った鏡以外には見当たらないという事が指摘されている。三角縁神獸鏡のデザインにはいくつかのパターンがあるため、三角縁神獸鏡はいくつかのグループに分けられ、それぞれに絵柄をもとにした異なった名称が付けられている。この様な古鏡が京都府にある椿井塚山古墳、そして奈良県にある黒塚古墳から大量に発見されて以来、この種類の銅鏡が卑弥呼に渡された「銅鏡百枚」であるか否かという議論が勃発した。邪馬台国の位置、そして卑弥呼の存在を明らかにする可能性があるかもしれない三角縁神獸鏡に関しても様々な議論が行われている。三角縁神獸鏡の問題として議論される項目には、この古鏡の生産地がどこであるか、というものもある。三角縁神獸鏡には中国から持ち込まれた舶載鏡と、日本国内で生産された委製鏡の二種類があるという説があるが、舶載鏡は大陸で作られたのか、日本で作られたのかという議論が起こっている。

舶載鏡が海外からきた、と論じる研究者は、これらの鏡に施されたデザインを証拠として挙げている。舶載鏡とされる三角縁神獸鏡の完成度は高く、図柄も多様であり、委製鏡の出来とは異なっている。さらに銘など施せる倭人が存在したとは考えにくいという事を主張している [25].

それに対して、舶載鏡は日本製であると論じる研究者は、三角縁神獸鏡が中国本土からは一つも出土していない事実が一番の証拠になる、という主張をしている。これらに記されている年号は魏の物であるが、魏の人物の墓とされるものは山東省東阿県魚山にある陳王陵しか無く、そこから鏡は出土していない [24]. さらに王仲殊は、三角縁神獸鏡には中国で出土した鏡にはない銘や文様が施されている事を挙げ、呉の工人が日本へやってきて三角縁神獸鏡を作り出した、という説を主張した。銘も、解釈によっては「銅を持ってきて海の東にやってきた」と理解できるものなどもある、という事を述べた [26].

それに対抗するように、舶載鏡説論者は、この様な多様な種類のデザインを生み出す為には相当の人数が日本にやってこないといけないという点を挙げ、さらに、委製鏡にはそのような高度な技術が活かされた形跡がない事が不自然であると述べている。

どちらの説が正しいにせよ、この様な高度なデザインが施されている鏡は大陸の人間しか出来なかったはずである、という事に関してはどちら側の研究者からも異論は出ていない。しかし、舶載鏡と委製鏡の明確な識別を行う為には、魏の古墳を探し出すなど、更なる調査や研

究が必要である。

議論は銅鏡の生産方法までにも及ぶ。三角縁神獸鏡には同じ模様をしたものが多いが、これらは一つの範を一回ごとに作成し、一つの同じ模様の鏡を作る手法で制作された同範鏡、あるいは一つの鏡から複数の範を作成し、同時に複数の鏡を作る手法で制作された同型鏡のいずれかであるとされる。

なぜこのように複数の同形の三角縁神獸鏡が存在するのかには様々な考え方が存在する。小林行雄は、椿井大塚古墳から大量の三角縁神獸鏡が発見され、さらにそれらと同範であるとする鏡が日本の様々な地域から出土している事に着目をし、大和が全国を支配した後に全国各地の権力者に三角縁神獸鏡を配布したと考えた [27]。一方で、樋口は、古墳に埋葬された鏡は、受け継いだ物であれば埋葬してしまうのは不自然であるため、その墓の主の所有物であると考えるのが自然であると論じ、配布した鏡のうち残った物を自分の墓に埋めるということはあり得ないという考えを明らかにしている。さらに、大量に三角縁神獸鏡が出土した古墳は椿井大塚古墳以外に黒塚古墳があり、小林 [27] の説に従うと、鏡の配布者が最低でも二人いたという不自然な考えにとどり着いてしまうという事を論じた。分配したという事実が正しいならば、一人がすべての三角縁神獸鏡を持っているはずである、という考えに基づいている [24]。樋口は、権力者が三角縁神獸鏡を分配した、という論を否定し、独自の見解の解説を行っている。それは、三角縁神獸鏡が一種の流行になった、という説である。この説では、大和の王が大陸には無かった前方後円墳を制作し、全国統一の際にそれが地方の首長にも取り入れられるようになり、全国的に前方後円墳が作られるようになったという事と同じように、中国からやってきた鏡を倭人が気に入り、大和の王がそれを愛用し、そして次第に地方の首長も同じような物を好むようになり、三角縁神獸鏡の獲得を目指したという事が述べられている。

これら三角縁神獸鏡が大和政権の中心人物より地方の有力者に分配されたという分配説を唱えた小林行雄はさらに、三角縁神獸鏡が魏の鏡であるという推測をもとに、これらの鏡が卑弥呼の鏡であるという説も提示している [27]。この説に対して森浩一は、近畿地域の社会が中国鏡を輸入した記録が無い事を挙げ、年号のない鏡が伝えられてきたという説は想像の産物でしかないという主張をした。さらに、年号のある鏡は比較的新しい古墳から発見されている事実を挙げ、晋の時代に輸入したものを所有者の死体とともに埋葬したと考えるのが自然で、卑弥呼の「銅鏡百枚」とは何の関係もない、という説を提示した [28]。さらに、三角縁神獸鏡が本当に魏の鏡なのかということにも疑問を投げかけ、それまで研究者が魏鏡と同類であるとしていた模様は、実は構成が異なっていて、同類とは言いがたいと述べた。

しかし、この問題に関する学説は、状況証拠をもとに論じられており、決定的な証拠にはたどり着いていない。この是非を理解する為には、同範同型である三角縁神獸鏡の生産順序と出土地間の地理的關係などに着目をする必要があると考えられる。現在、文献に基づいた研究だけではなく、物体自体を用いてこの問題を検証する研究が行われるようになっている。

増田 [22] らは、三角縁神獸鏡の 3 次元形状データを計測し、剛体位置合わせ手法によりこれらを重ね合わせ比較を行っている。

本研究では、三角縁神獸鏡の変形処理を通じて、小林 [27] らが支持している三角縁神獸鏡の複製分配説の検証を行う。考古学では、複製した鏡上の文様は滑らかになることが知られている。さらに複製の際に生じた鏡の傷などは、子の鏡に継承される事が知られている。ここで、提案手法を用いて文様の変化や傷の継承関係の証拠になる情報の抽出を試みる。その情報が既存の考古学的見地と一致すれば、提案手法が三角縁神獸鏡解析の新たな切り口になる可能性を示す事が出来る。

提案手法の有用性が示されれば、考古学的見地が示されていないデータセットの処理を行い、独自の結果を示すことも可能になる。提案手法による処理結果により、親鏡と示された鏡の出土場所が 1 カ所に集中していることが示されれば、複製分配説を支持する証拠となり、卑弥呼の所在地を探る手がかりになる可能性がある。一方、親鏡の出土場所のパターンが示されない場合でも、樋口らの学説を支持する証拠となり、考古学的に有益な解析が行われたことになる。

本研究では、この前の段階として、既に考古学的見地が示されている鏡の解析を行い、結果と照らし合わせ提案手法の効果を検証する。

5.2 1対1逐次非剛体位置合わせ手法を用いた実験

5.2.1 2枚の鏡を用いた傷の抽出

この実験では 3 で提案した逐次非剛体位置合わせ手法を用いて、三角縁神獸鏡上の傷や尖っている乳の形が成長しているか否かを検証する事が目標である。一般的に複製された鏡上の文様の凹凸は減少し、乳の形状も不揃いになるということが言われているが、解析から得られる結果を用いて、複製された鏡の傷は実際に成長し、鏡上の文様の凹凸は衰退しているかを確認する。

本研究では、「古鏡総覧」[23]において目録番号 37 に設定されている三角縁神獸鏡 Dkz22 と tsu05 の形状データを用いて、比較をおこなった。目録番号 37 に対しては既に「Dkz22 は tsu05 から得られた範を用いて制作された」とする考古学者による一致した見解が示されており、提案手法の有用性を検証する上での真値を提供するデータとなる。

まず、基準物体として Dkz22 の座標系を設定しこれに対して tsu05 を変形させた。ここでは、FFD のみの位置合わせ、我々の提案手法である局地位置合わせ両方を施した。なお、FFD に利用されている B-Spline 基底の次数は 3 とした。

非剛体位置合わせの結果を図 5.3 に、また非剛体位置合わせの有用性を示すために、剛体位

表 5.1: 手法ごとの Dkz22 における凹凸部分の割合

全体は 100. tsu05 に対し閾値 0.3 以上に凸, 凹, 閾値以上の差がない部分を示す

手法	凸	凹	閾値以内
rigid	33.437281	9.900675	56.662044
FFD	16.163404	3.736655	80.099943
FFDsplit	15.589521	4.151870	80.258607
FFDthresplit	9.882593	3.381601	86.735808

置合わせ手法による位置合わせ後の差異を表示したものを図 5.5 に示す. 黄色の円で囲われた部分は考古学者が範傷 27 として設定している傷である. 赤く示されている部分は, Dkz22 が元形状に比べて 3mm 以上凸になっている事を示し, 青く示されている部分は Dkz22 が逆に凹になっている事を示している. 図 5.4 に示す通り, 剛体変換による位置合わせと比べ, 提案手法は変形の情報を取り除き, 表面の傷の情報のみを際立たせている事が観察できる.

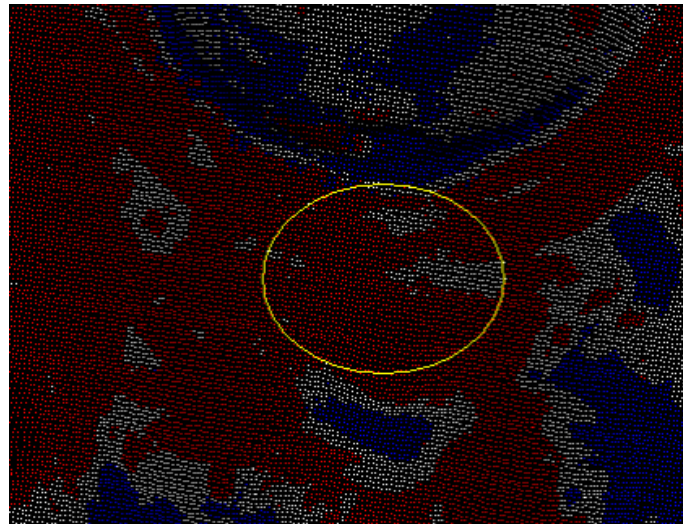


図 5.2: 剛体位置合わせ後の範傷 27

しかし, 凸になっている赤い部分は傷の周りにも確認されており, 傷のみを見分ける事はまだ困難である事が確認できる. 表 5.1 には, Dkz22 が tsu05 に対して閾値以上に凸, 凹, そして閾値以内に収まる部分の比が示されている. この結果, 剛体位置 (rigid と記述) 合わせ後に比べ, 提案する分割位置合わせ手法を用いない FFD(単に FFD と記述) 後の誤差の方が少ないことが読み取れ, 提案手法 (FFDsplit と記述) に関しては FFD よりも誤差が減少していることが確認できている.



図 5.3: FFD による変形後の範傷 27

実験の結果, 提案した逐次非剛体位置合わせにより, 複製による乳の変形や傷の成長が抽出することが可能であるということが示された.

5.2.2 複数の鏡による継承関係の理解

1つ目の実験では, 継承関係が既知である2枚の鏡を用いて, 傷の検出が行われることを示した. しかし, 三角縁神獣鏡の中には1枚の鏡から複数の複製が作成された物も存在する. よって, 鏡上の傷を検出するだけでなく, 複製が繰り返された場合の傷の変化も確認しなければならない.

ここでは, 逐次非剛体位置合わせ手法を用いて, 複数の鏡の比較を行う. ここでは, 前回と同様, 傷の観察を行い, 継承関係の証拠を取得する. さらにこの証拠と考古学的知識を比較し, 手法の妥当性を示す.

実験では「古鏡総覧」で目録番号70に設定されている4つの三角縁神獣鏡を用いる. それぞれには goryo1-4, Dkz29, ishi04-1-4, fhana1 というラベルが付与されており, goryo1-4 が最も親, fhana1 が最も子の鏡である, という考古学的見解が既に示されている. この知識を用いて, この実験では前回と同様に子と位置づけされる鏡を基準とし, 親鏡を変形させている. さ

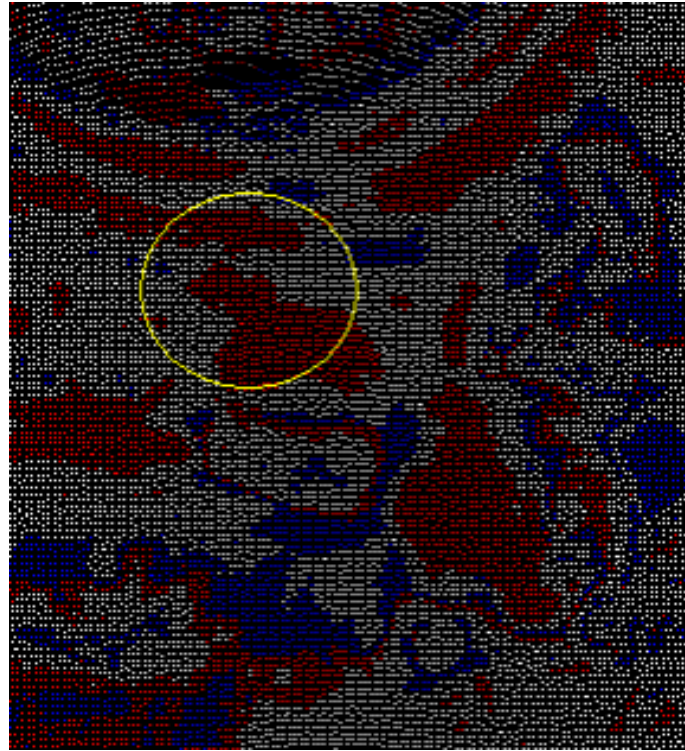


図 5.4: 提案手法による変形後の範傷 27

らに、この実験では「古鏡総覧」で既にラベル付けされている傷を 3 次元データ内から探し出し、それぞれの傷の観察を行っている。

実験の手順としては、goryo1-4 を Dzk29 に、次に Dzk29 を ishi04-1-4 に、さらに ishi04-1-4 を fhana1 に対して変形させ位置合わせを行った。そしてそれぞれのペアに関して誤差が閾値 (0.5) 以上に凸である点は赤、凹である点には青の色を与えた。以下にそれぞれのペアの比較結果を示す。

さらに、この鏡の上で範傷 E と指定されている傷に着目し、この変化を観察した。まず、最も親である鏡と各子鏡を比較した際の結果を示す。

図 5.9 から、範傷 E の部分を観察すると、最初の図で凸になったことが示されており、この状態はその後も継続している事が観察できる。よって傷は一度生成されると、複製された鏡に継承される事がわかる。

次に、継承関係において直前と直後と比較した図 5.10 を示す。ここでは、傷は継承された後、少し赤くなっている事が分かる。この後も複製され、さらに傷が盛り上がった可能性が示される。

この様に、逐次位置合わせ手法により局所的な違いを明確にする事により、範傷を抽出することに成功した。さらに傷が成長を示しており、複製が繰り返された可能性も示したため、

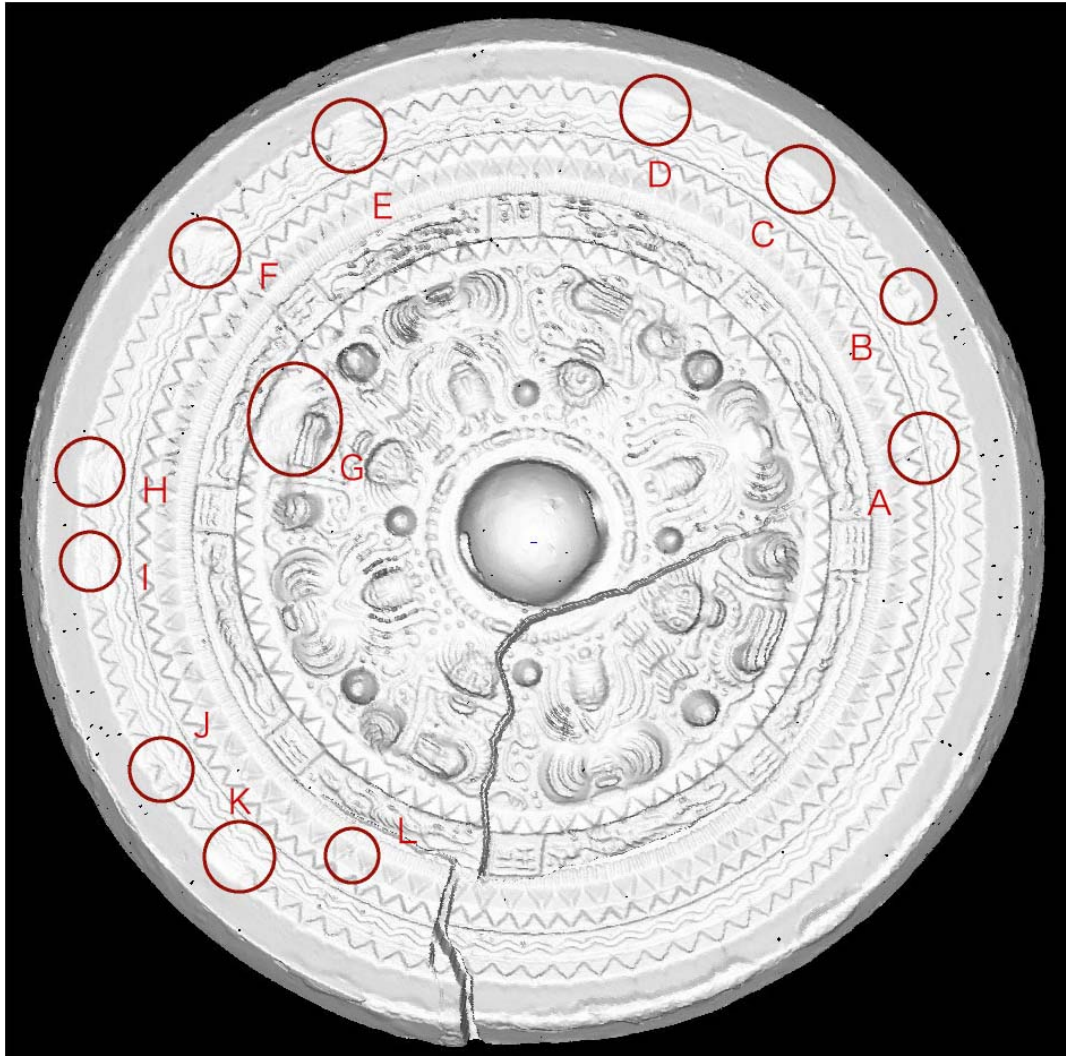


図 5.5: 目録番号 70 の傷

考古学的な情報を裏付ける結果となった。

しかし、問題点としては、傷の抽出の自動化が困難であるという点が挙げられる。この解析は考古学的知識を裏付けるための情報取得を目的とし行われた。そのため、既にラベル付けされている傷の判定を主に行った。しかし、傷のラベル付けが行われていないデータセットも存在する。そのためどの凹凸部分が傷なのか判定が行えれば良いが、現時点ではそれが行えない。学説の検証の為に、傷の自動判別が必要であり、これが今後の課題となる。

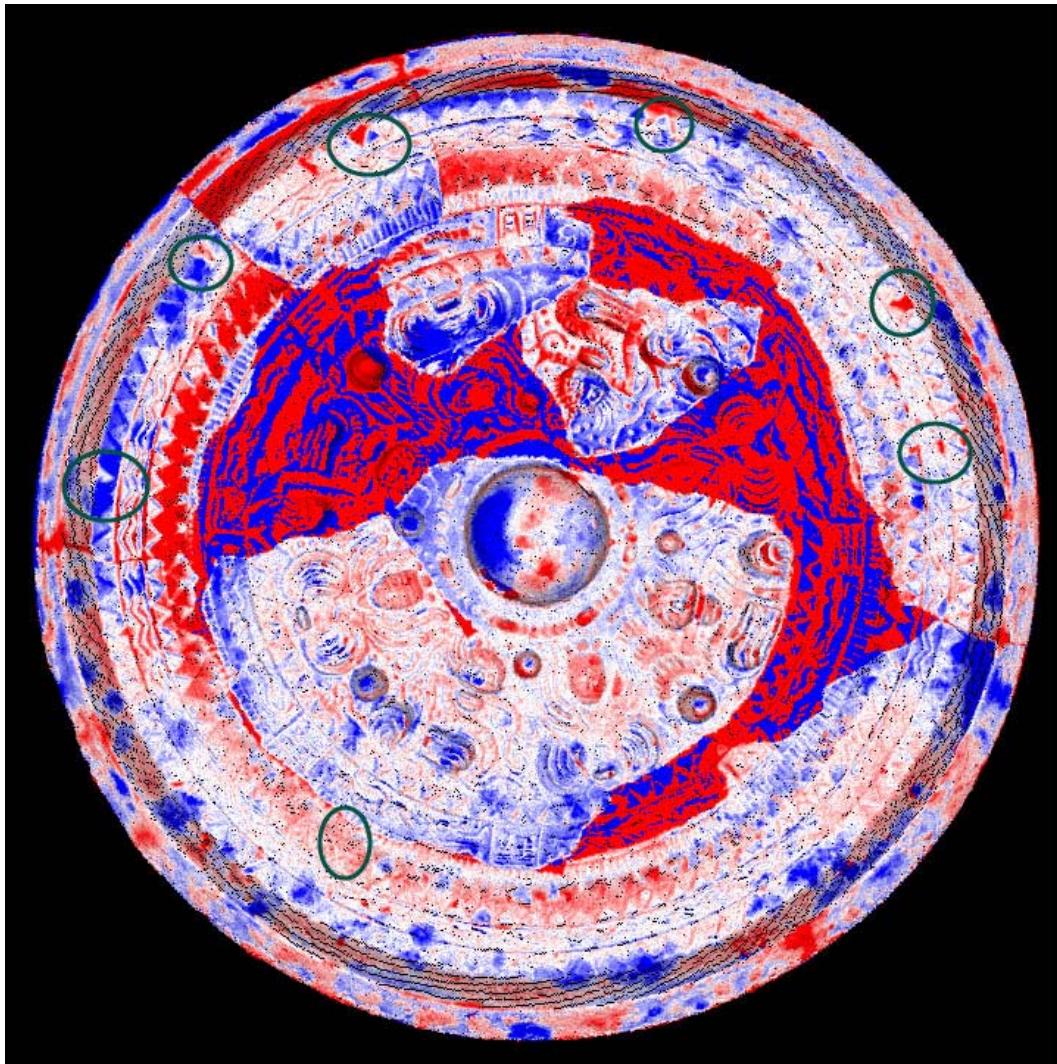


図 5.6: goryo1-4 と Dkz29 の比較結果
0.5 以上に凸:赤 凹:青

5.3 多対多同時非剛体位置合わせ手法を用いた実験

これらは考古学的前提知識を用いて行われている。しかし、まだ確実に継承関係が分かっているセットもある。逐次非剛体位置合わせ手法を用いてこのデータ処理をするには、基準物体を変え、何回も同じ実験を繰り返さなければならない。

この状況を避ける為に、本研究で提案した多対多同時非剛体位置合わせ手法を用いて、同じ目録番号 70 の鏡の解析を行う。逐次非剛体位置合わせの実験同様、傷 E とラベル付けされた傷の観察を行う。なお、ここでも計算の安定化の為に Ridge Regression 法を用いて擬似逆行列の計算を行っている。

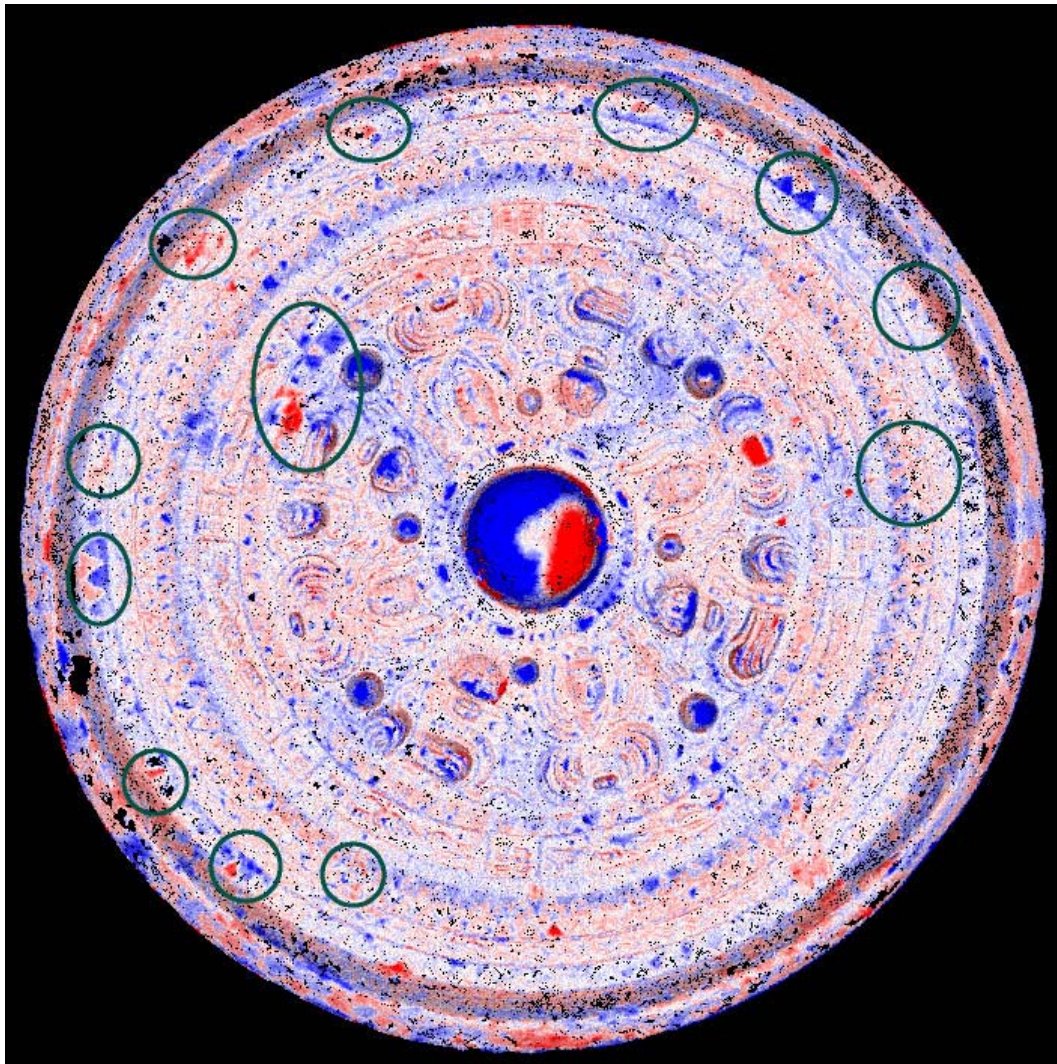


図 5.7: Dkz29 と ishi04-1-4 の比較結果
0.5 以上に凸:赤 凹:青

図 5.11 に変形の様子を示す. さらに図 5.12 傷 E の変化を示す.

図 5.12 では, 親鏡である goryo1-4 と子にあたる鏡それぞれを比較し, 傷 E の部分を拡大している. この部分では赤色が目立っており, 傷の継承と成長が改めて確認できる. しかし, 傷の近辺も同じく赤色を示している場合や, または青くなっている場合が目立っている. 鏡全体を観察しても, 同様の事が言える. 図 5.13 に比較例を示す.

原因として考えられるのが, 4 章で示した仮定である. 鏡は鶏の頭蓋骨よりも大きく, さらに特徴的な文様などが多い. この為, 初期段階の変形による位置合わせが不十分であるため, 全ての物体に対して十分な変形が施されていないことが考えられる.

さらに, 銅鏡には鑄造時にランダムに変形が加わるため, 個体間の差が比較的大きい. よっ

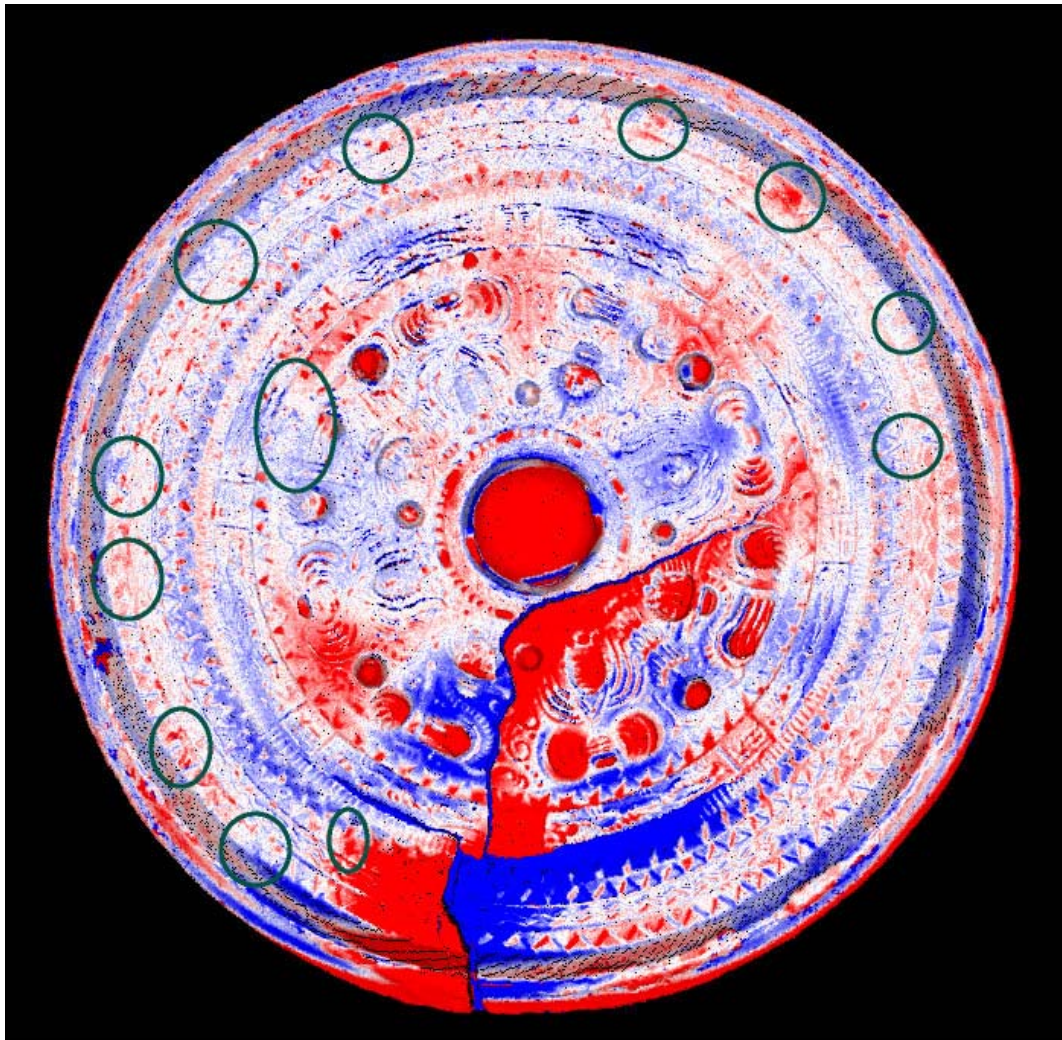


図 5.8: ishi04-1-4 と fhana1 の比較結果

0.5 以上に凸:赤 凹:青

て、この様な変形を軽減する調整を行う際に、鏡の特徴である文様が影響を受け、不適切な変形が行われたことも考えられる。

この結果から、同時非剛体位置合わせを適用する際に専門知識が無くても位置合わせが施される事が分かったが、誤差をさらに詳しく分析するには、局所的な特徴を考慮し、この情報を同時位置合わせの際に織り込む必要があることが分かった。

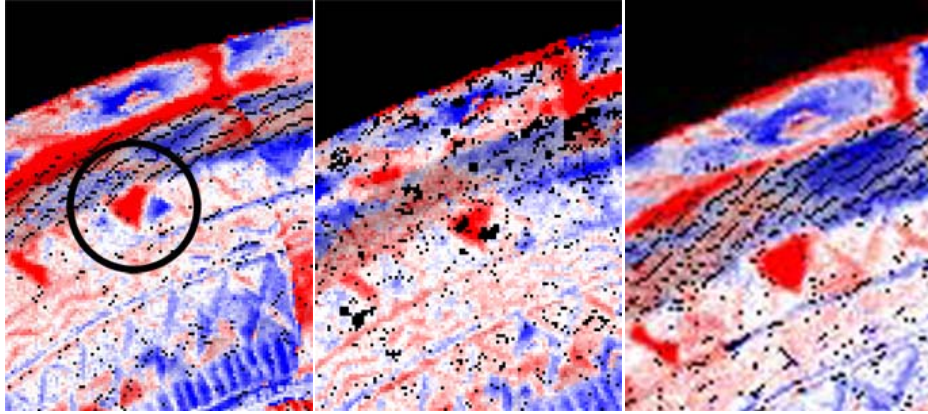


図 5.9: 範傷 E の継承

左から goryo1-4 と Dkz29, ishi04-1-4, fhana1 の比較結果 0.5 以上に凸:赤 凹:青

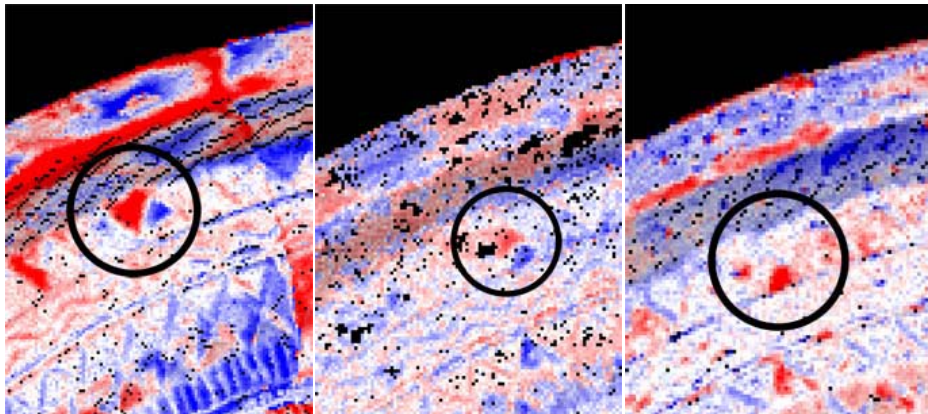


図 5.10: 範傷 E の変化

左から goryo1-4 と Dkz29, Dkz29 と ishi04-1-4, ishi04-1-4 と fhana1 の比較結果 0.5 以上に
凸:赤 凹:青

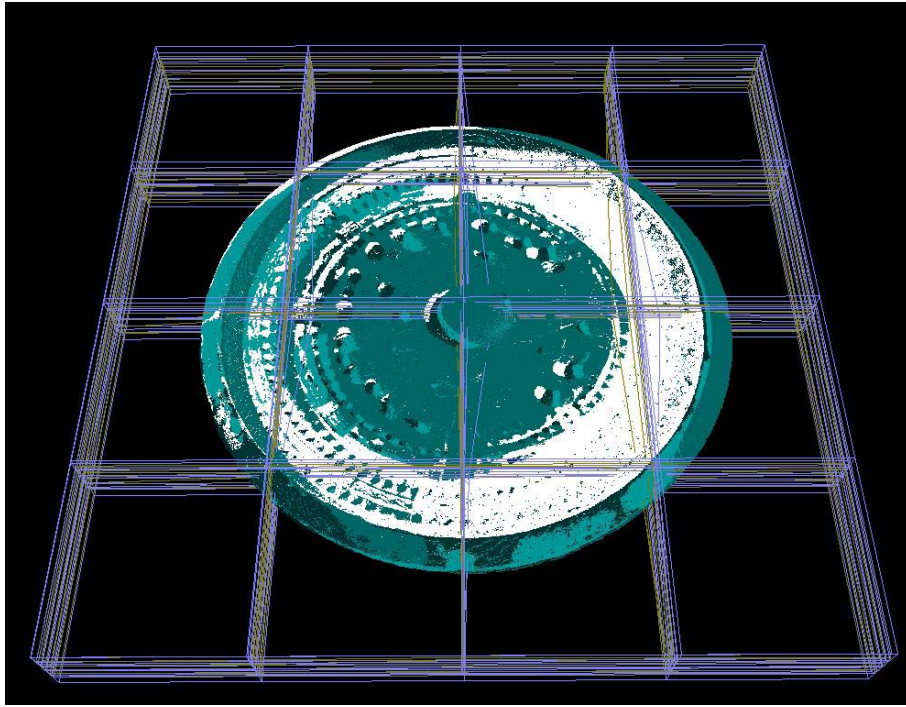


図 5.11: 同時非剛体位置合わせ適用後の格子点

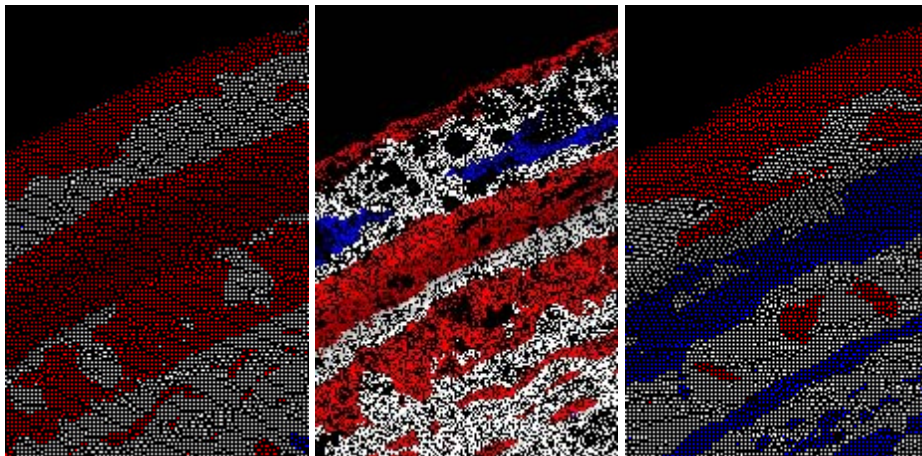


図 5.12: 同時非剛体位置合わせ適用後の範傷 E

左から goryo1-4 と Dkz29, ishi04-1-4, fhana1 の比較結果 0.5 以上に凸:赤 凹:青

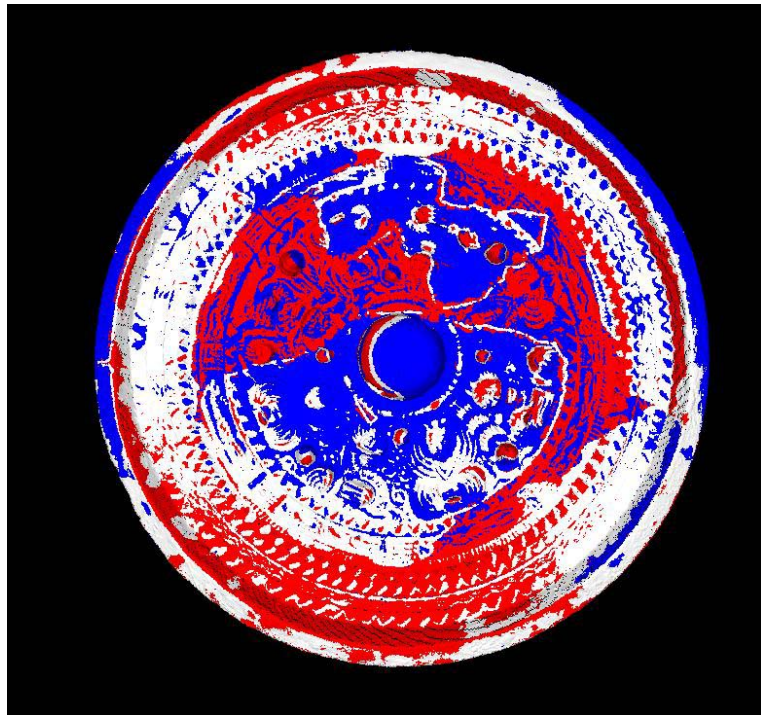


図 5.13: goryo1-4 と Dkz29 の比較

0.5 以上に凸:赤 凹:青

第6章 結論

6.1 結論と今後の展望

6.1.1 結論

本研究では、3次元形状データの有用性に着目し、計測した物体の比較解析を行う際の問題点の調査を行った。そして真川らが提案した手法を取り上げ、この手法の鍵となる物体の分割方法を改良し、実験を行い提案手法の有用性を示した。さらに、既存の1対1逐次非剛体位置合わせ手法を分析し、問題点を詳細に解析した。ここから基準物体の設定を必要としない多対多同時非剛体位置合わせ手法を提案し、この評価を行った。最後に、これら提案手法を用いて、三角縁神獣鏡の分析を行い、興味深い結果を得た。

1対1逐次非剛体位置合わせに関しては、様々な手法の調査を行い、同一カテゴリーの形状比較に当たっては、真川らの手法が目的を達成する上で一番有効な手法であることが分かった。しかし、この手法においての分割手法の不適切さによって、十分な事前剛体位置合わせが施されていないということが理解できた。本研究では2物体間の距離をもとに、変形する物体上である程度以上離れている部分を閾値によって切り離し、基準物体に再位置合わせする分割方法を提案した。これにより事前に変形する物体を基準物体にさらに近づけ、変形量の軽減を行うとともに、特徴的ではない部分の誤差の軽減も試みた。

さらに、1対1逐次非剛体位置合わせにおいて、基準物体の設定には専門知識が必要であることや、基準物体上に望ましくない歪みや傷が存在する場合に過度な変形が施されることなどの問題点が存在することが分かった。本研究ではこのような問題に対処するため、基準物体の設定が不要な多対多同時非剛体位置合わせ手法を提案した。複数の物体を同時に変形する事で、自動的に処理を行い、さらに1つの物体上に存在する傷や歪みに過度に影響されない位置合わせを施す事を試みた。

実験の結果、以下の事が分かった。

1. 提案分割手法と真川らが提案した分割手法を用いた非剛体位置合わせの結果を比較した。この結果、対象物体に関わらず、誤差が大きい部分の面積が圧倒的に減少した。さらに、提案手法による変形後においても、各物体の特徴が維持されており、分析に適した変形が施されている事が確認できた。しかし、これまでに誤差として認識されていなかった部分が新たに誤差として識別されたり、一部に過度な変形が加わったりしたことも確認できた。今後は物体を分割する際の閾値の設定方法や値についての考察や改良が必要である。
2. 1対1逐次非剛体位置合わせによる変形量と多対多同時非剛体位置合わせによる変形量、さらに位置合わせ後の誤差の検証を行った。この結果、従来の位置合わせ手法よりも、全体的には少ない変形量で位置合わせが自動的に施されていることが確認できた。

しかし、計算処理を行う際に Ridge Regression 法を用いているが、ここで加算する値が経験に基づいたものであり、値の設定に当たっては、時には数回のテストが必要であった。今後は完全な自動化が必要となる。

6.1.2 今後の展望

本研究では、同一カテゴリーに属する物体の形状比較を目標としている。今回は鶏の頭蓋骨や三角縁神獣鏡を用いて実験を行ったが、今後は顔データを用いた人物認証や文字による筆跡分析など、様々な分野への応用を考えなければならない。さらに、多対多同時非剛体位置合わせ手法においては、安定化のため Ridge Regression 法を用いて計算を行っている。加算する値は経験則に基づいており、この値の設定は現在は手動で行っている。この手法の完全自動化の為には、安定な変形を施す為には、Ridge Regression 法に限らず、どういった方法があるのかを模索する必要がある。最後に、現在はこの手法は同一カテゴリーの物体を対象にしている。しかし、今後としては、物体間の違いだけを検出するだけでなく、物体間の類似度も計測し、その情報を一般的な物体認識に応用し、この手法の実用性を示さなければならない。

謝辞

最初に、研究全般に渡って広くご指導を頂きました池内克史教授に、深く御礼申し上げます。毎週の打ち合わせで適確な助言と暖かいご指導を賜り、研究の内容だけでなく、本当に様々な事を学び、また研究の面白さや研究に関する哲学も教わりました。さらに、池内研究室という素晴らしい環境を与えて下さったことにも、深く感謝しております。

また、本研究を進めるにあたって、様々な面で支援して頂きました奈良先端科学技術大学院大学の高松淳准教授に心から御礼申し上げます。研究に関するブレインストーミングから、プログラムに組み込む計算方法など、様々な段階においてご指導していただいたおかげで、この論文を完成させることが出来ました。この場を借りて深い感謝と敬意を表明致します。

さらに、研究を進める上で、毎週の打ち合わせで多くの助言をして頂いた、同じ幾何学グループのメンバーである鄭波さん、鎌倉真音さんにもこの場を借りて深く御礼申し上げます。無知で未熟である私の多くの疑問に答えていただき、さらに研究以外の面でも同じ部屋のメンバーとして支えていただきました。そして、この論文の校正を手伝ってくださった早稲田大学大学院の嶋本紗枝さんにも深く御礼申し上げます。また様々な業務を引き受けて下さった秘書の皆様、研究室の運営にご尽力される職員の皆様にこの場を借りて深く感謝致します。そして、充実した研究生生活にしてくださった池内研究室の先輩、後輩、同期の皆様本当に心から感謝の意を示したいと思います。

最後に、これまで支えてくれた家族、そして友人に、心から感謝いたします。

2009年 2月 4日

発表文献

- [1] 藤原研人, 高松淳, 池内克史, “非剛体位置合わせ手法による古鏡の解析”, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM) 161, Jan. 2008.
- [2] 比留間英, 藤原研人, 鎌倉真音, 高松淳, 芳賀京子, 池内克史, “古代ローマ期彫像の3次元形状解析による考古学調査”, 人文科学とコンピュータシミュレーション (じんもんこん 2008), Dec. 2008.

参考文献

- [1] P.J. Besl, N.D. McKay “A method for registration of 3-D shapes,” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2 pp.239-256, 1992.
- [2] W. E. Lorensen, H. E. Cline, “Marching cubes: A high resolution 3-d surface construction algorithm”, *AM Proceedings of SIGGRAPH*, pp.163-169, 1987.
- [3] Y. Hayashi, et al, “Measurement of the Skull of Jangle and Domestic Fowls.” *Jpn. J. Vet. Sci.*, 44(6), pp. 1003-1006, 1982.
- [4] J. Takamatsu, et al, “A Novel Osteometrical Method Using Computer Vision Techniques for Comparison of Morphological Differences,” *J. Yamashina Inst. Ornithol.*, 36 2, March 2005.
- [5] J. Bentley, “Multidimensional binary search trees used for associative searching,” in *Commun. ACM*, Vol.10, No.9, pp.509-517, 1975.
- [6] Y. Chen, G. Medioni “Object modeling by registration of multiple range images,” in *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1991
- [7] T. Oishi, R. Sagawa, A. Nakazawa, R.Kurazume and K. Ikeuchi, “Parallel Alignment of a Large Number of Range Images,” in *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp.195-202, 2003.
- [8] P. Neugebauer, “Geometrical cloning of 3D objects via simultaneous registration of multiple range images,” in *Proc. SMA*, 1997.
- [9] R. Benjemaa, F.Scgnutt, “Fast global registration of 3D sampled surfaces using a multi-z-buffer technique,” in *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 1997.
- [10] S. Rusinkiewicz, M. Levoy, “Efficient variants of the ICP algorithm,” in *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001.

- [11] M.D. Wheeler and K. Ikeuchi, "Sensor modeling, probabilistic hypothesis generation, and robust localization for object recognition," in *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, No.3, pp. 252-265, 1995.
- [12] G. Godin, M. Rioux, and R. Baribeau, "Three-dimensional registration using range and intensity information," in *Proc.SPIE: Videometrics III*, Vol.2350, 1994.
- [13] T. Sederberg, "Free-form deformation of solid geometric models," in *Proc. of ACM SIG-GRAPH in Computers and Graphics*, Vol.20, No.4, pp.151-160, 1986.
- [14] F. L. Bookstein, "Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations," in *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.11, No.6, pp.567-585, 1989.
- [15] R. Durbin and D. Willshaw, "An analogue approach to the traveling salesman problem using an elastic net method," in *Nature*, Vol.326, No.6114, pp. 689-691, 1987.
- [16] S. Lee, G. Wolberg, and S. Y. Shin, "Scattered data interpolation with multilevel B-splines," in *IEEE Trans. Visualization Comput. Graph.*, Vol.3, pp. 228-244, 1997.
- [17] A. Myronenko, X. Song and M. Carreira-Perpinan, "Free-form nonrigid image registration using generalized elastic nets," in *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007.
- [18] H. Chui and A. Rangarajan, "A new point matching algorithm for non-rigid registration," in *Proc. of Computer Vision and Image Understanding*, Vol.89, No. 2-3, pp.114-141, 2003.
- [19] A. Rajwade, A. Banerjee and A. Rangarajan, "New method of probability density estimation with application to mutual information based image registration." in *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp. 1769-1776, 2006.
- [20] 真川純, 高松淳, 池内克史, "位置あわせに基づく Free-Form Deformation を用いた三次元形状解析," 画像の認識・理解シンポジウム, 2007.
- [21] M. Mochimaru, M. Kouichi, H. Yahara, and Y.Fukui, "Automatic landmarking based on 3-D foot database using the FFD method," in *SAE Digit Human Modeling for Design and Engineering*, 2000.
- [22] 増田智仁, 長谷川仁則, 池内克史, "コンピュータグラフィックスにおける三角縁神獣鏡の範傷の自動検出," 「三次元デジタルアーカイブ 古鏡総覧」, pp.405, 学生社, 2006.

- [23] 奈良県立橿原考古学研究所, 「三次元デジタルアーカイブ 古鏡総覧」, 学生社, 2006.
- [24] 樋口隆夫, 「三角縁神獣鏡新鑑」, 学生社, 2000.
- [25] 西谷正, 「三角縁神獣鏡と邪馬台国」, 梓書院, 1997.
- [26] 王仲殊, “日本の三角縁神獣鏡の問題について”, 「日中古代文化の接点を考える」, pp311-343, 山川出版社, 1982.
- [27] 小林行雄, 「古墳時代の研究」, 青木書店, 1961.
- [28] 森浩一, “日本の古代文化 -古墳文化の成立と発展の諸問題-,” 「古代史講座3」, pp197-226, 学生社, 1962.