

物理モデルベース非剛体位置合わせによる 木製文化財の3次元デジタル復原

小林 哲也^{1,a)} 影澤 政隆^{1,b)} 大石 岳史^{1,c)}

概要: 本稿では、物理モデルに基づいた非剛体位置合わせによって、部材の3次元デジタルデータから文化財の組み立てを行い、3次元形状をデジタル復原する手法を提案する。木製文化財は変形によって制作時の形状と異なる状態で発見されることが多く、分解されて保存されていた場合には、各部材において生じている変形を考慮しながら復原する必要がある。本提案手法では、木材の変形特性を物理モデルに基づいて表現し、各部材の3次元デジタルデータを同時に変形させながら組み立てることを行う。そして、第二太陽の船の部材から取得した3次元デジタルデータを用いた復原実験を行い、提案手法の有用性を示す。

1. はじめに

近年、文化財のデジタルデータによる保存や高度な分析が多く行われている [1]。デジタルデータの利用によって、恒久的な保存や詳細な情報を得ることができる。さらに各地の多くの人が文化財を知ることができるように、デジタルデータによる展示といった活用も行われている。

破損などによって制作時の形状と異なる場合に、制作時の形状を得るデジタルデータによる3次元形状復原の研究も行われている。このような研究によって、実物から得ることが困難である本来の文化財の幾何形状を得ることを可能にし、多くの考古学的な知見をもたらしてきた。

3次元デジタルデータによる復原において、対象とされてきた文化財は石板や石像などが多かった。各破片における欠損や割れを考慮し、回転や平行移動による剛体位置合わせによって破片の隣接面を合わせ、復原することが行われてきた。しかし、欠損や割れ以外に非剛体変形が生じている文化財も存在し、そのような文化財は剛体位置合わせだけでは復原できない。

変形が生じる物質で制作された文化財は、変形を考慮した非剛体位置合わせによって復原する必要がある。しかし、各部材にどのような変形が生じるかによって復原形状が異なり、候補が多く存在する。多数の候補の中から、物質の変形特性を満たした復原形状を得ることが重要である。

そこで、本稿では各部材の3次元デジタルデータを非剛

体位置合わせによって組み立て、制作時の形状を復原する3次元形状復原を行う手法を提案する。従来の手法では全体の形状に関する変形が扱われてきた。全体が組み立てられた状態で保存されているため、変形は全体の中の一部として現れる。そのため、全体の形状を変形させるだけで復原が可能である。しかし、各部材に対して変形が生じている場合には、各部材を変形させる必要がある。そこで、各部材を木材の変形特性の物理モデルに基づいた変形手法によって同時に変形させ、復原を行う。

2. 関連研究

文化財を対象とした3次元デジタルデータの取得は、恒久的な保存や詳細な分析が可能であるなどの点から注目されている。対象とされてきた文化財は、書物 [2] や硬貨 [3] など様々であるが、制作時の形状を復原する研究においては、石板や石像といった文化財が多く、破片の組み立てに関する研究は活発に行われている。

Koller ら [4] は大理石製の古代都市ローマの地図である Forma Urbis Romae の破片のデジタルデータを用いて、破片からの組み立て手法を提案している。この手法では、手で彫刻された特徴の場所や方向、どのような特徴かをアノテーションして各破片の一致度を計算し、一致度が高い破片を隣接する破片として探索することで復原している。また、Huang ら [5] は、それぞれの破片について面を分割し、側面の凹凸に関する特徴を取得して他の破片との一致度を計算することで、アノテーションが必要ない手法を提案している。

これらの手法は石板や石像を対象としているので、各破片に非剛体変形は生じておらず、剛体変換だけで復原を

¹ 東京大学
Tokyo University

a) kobayashi @ cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

b) kagesawa @ cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

c) oishi @ cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

行っている。そのため、木製文化材などの非剛体変形が生じている文化財の場合には、これらの手法で復元することはできない。したがって、変形を考慮した位置合わせ方法である非剛体位置合わせによって組み立てる必要がある。

非剛体位置合わせに関する研究として、Amberg ら [6] は入力形状の各点において目標形状の近傍点を対応点として取得し、距離を最小化する手法を提案したが、外れ値に弱いことが問題であった。そこで、Hontani ら [7] は、統計的なモデルを用いることで、外れ値に対してロバストな手法を提案した。また、Liang ら [8] は、入力形状と目標形状の両方から近傍点を計算して双方向の対応を取得することで外れ値にロバストにし、さらにラプラシアンの変化を考慮することで、表面形状の変化に対して制約を付加している。

このように制約を付加した非剛体位置合わせに関する研究として、Rohlfing ら [9] は、Magnetic Resonance (MR) 画像に対して変形のヤコビアンを計算し、行列式が 1 から離れる場合にはペナルティをかけることで、非圧縮性であるという制約を付加している。Lin ら [10] は、メッシュを構成する頂点間でバネの力が作用するようにすることで、トポロジー保存に関する制約を可能にした。このように表面形状や体積、トポロジーなどを考慮して、変形に対する制約を付加することは行われているが、物質の変形特性を考慮した制約を付加することは行われていない。また、目標形状に入力データの形状を合わせており、すべてのデータを変形させながら合わせていくことはできない。

3. アプローチ

本稿では、非剛体位置合わせで生じる変形において物質の変形特性を考慮することで物理モデルに基づく変形位置合わせを実現する。また、目標となる形状を設定せず、全ての 3 次元デジタルデータを同時に変形させながら合わせていく。

部材間の整合性が良く、隙間が少ない状態が制作時の状態であると仮定し、組み立てることを目的とする。復元は、剛体位置合わせによって初期位置を求め、次に非剛体位置合わせによって変形させながら隣接する部材を詳細に合わせていくを行う。

各部材の変形では、木材の変形特性である含水率の変化による異方性の拡大縮小と曲げといった大域的な変形を扱う。ここで、部材が多い文化財を扱う場合を考えると、一つの部材の変形に必要なパラメータが少ない変形手法が望ましい。そこで、スプライン曲線を用いた変形手法によって、スプライン曲線を構成する制御点数だけのパラメータで扱うことを可能にする。

また、木材において長さ変化は含水率と関係し、変形は滑らかに生じている。そこで、長さ変化、曲げと振れに対して制約を加えることを行う。これにより、3 次元デジ

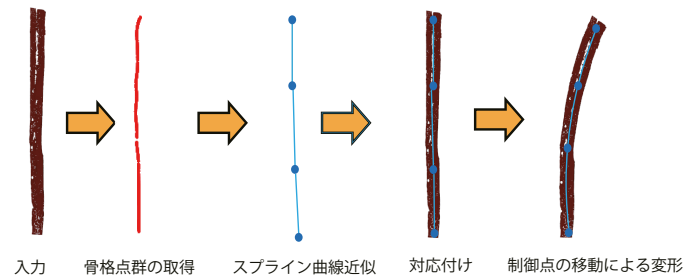


図 1 変形手法の手順

ルデータの変形の自由度を制限する。

4. 各部材の物理モデルに基づく変形手法

4.1 変形手法の流れ

各部材の変形手法の流れについて図 1 に示す。まず、骨格となる点群を取得し、その点群をスプライン曲線で近似する。ここで、本研究では、計測点群を用いるため、取得した 3 次元デジタルデータにおいて欠損やノイズが含まれている。そのため、欠損やノイズに強い手法である Huang ら [11] の手法を用いて骨格を得る。次にスプライン曲線の各離散点において Local 座標系である Local Reference Frame (LRF) を計算し、物体の各頂点とスプライン曲線の各離散点における最近傍点の対応付けを行い、相対位置である Local 座標を求める。制御点の移動によってスプライン曲線を変形させ、各離散点における変化した座標値と LRF を用いて、Local 座標から変形後の頂点座標を計算する。ここで、スプライン曲線において長さの変化が生じた場合には、LRF の各軸方向への拡大縮小として物体に影響させる。

4.2 物体の変形方法

骨格を表す点群から得たスプライン曲線の各離散点において、ローカル座標系である LRF を定義する。物体の各方向に位置関係の変化を対応させて考えるために、LRF を物体の各方向に対応付ける。これにより、相対位置関係を用いて異方性の拡大縮小を扱えるようになる。

スプライン曲線の i 番目の離散点 $\mathbf{c}(i)$ における LRF を構成する 3 つの軸を表す正規直交基底を $\mathbf{L}_1(i)$, $\mathbf{L}_2(i)$, $\mathbf{L}_3(i)$ とすると、離散点 $\mathbf{c}(i)$ と離散点 $\mathbf{c}(i+1)$ の座標を用いて $\mathbf{L}_1(i)$ を式 (1) で求める。

$$\mathbf{L}_1(i) = \frac{\mathbf{c}(i+1) - \mathbf{c}(i)}{\|\mathbf{c}(i+1) - \mathbf{c}(i)\|} \quad (1)$$

次に、物体の形状から得た情報を LRF に含めるために、物体の頂点座標を用いて主成分分析を行い、各固有ベクトルと固有値を求める。求めた固有ベクトルを \mathbf{V}_1 , \mathbf{V}_2 , \mathbf{V}_3 、固有値を λ_1 , λ_2 , λ_3 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$) とすると、最小固有値に対応する固有ベクトルである \mathbf{V}_3 を用いて $\mathbf{L}_3(i)$ を式 (2) で求め、 $\mathbf{L}_1(i)$ と $\mathbf{L}_3(i)$ を用いて $\mathbf{L}_2(i)$ を式 (3) で求める。

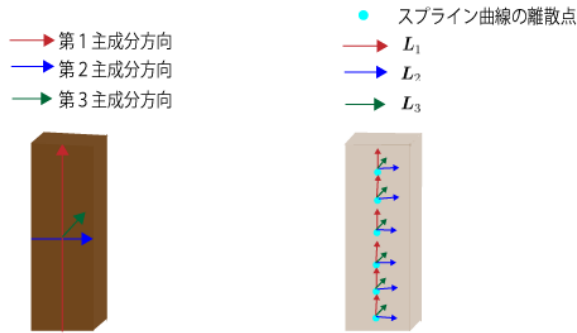


図 2 Local Reference Frame の構成

$$\mathbf{L}_3(i) = \frac{\mathbf{V}_3 - (\mathbf{L}_1(i) \cdot \mathbf{V}_3)\mathbf{L}_1(i)}{\|\mathbf{V}_3 - (\mathbf{L}_1(i) \cdot \mathbf{V}_3)\mathbf{L}_1(i)\|} \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_2(i) = \mathbf{L}_1(i) \times \mathbf{L}_3(i) \quad (3)$$

これらの LRF を構成する $\mathbf{L}_1(i)$, $\mathbf{L}_2(i)$, $\mathbf{L}_3(i)$ は、図 2 のように物体の各方向に対応するように定義することができる。物体の各頂点の座標をスプライン曲線の最近傍の離散点における LRF を用いて式 (4) で定義する。

$$\mathbf{X} = \mathbf{c}(i) + s\mathbf{L}_1(i) + t\mathbf{L}_2(i) + u\mathbf{L}_3(i) \quad (4)$$

ここで、s,t,u は LRF から求めた Local 座標である。

制御点が移動することによって、スプライン曲線が変形し、対応する離散点の座標と LRF が変化した場合には、この Local 座標から物体の頂点座標を再計算する。また、各頂点の変形後の座標を計算する際に、各方向への local 座標を増大、減少させることで、異方性の拡大縮小を表現することが可能である。よって、変形時の座標 \mathbf{X}_d は、スプライン曲線の長さに関する変化量 m 、第二主成分に関係した方向への比 r_2 、第三主成分に関係した方向への比 r_3 を用いて式 (5) で求める。

$$\mathbf{X}_d = \hat{\mathbf{c}}(i) + s\hat{\mathbf{L}}_1(i) + (1 + r_2m)t\hat{\mathbf{L}}_2(i) + (1 + r_3m)u\hat{\mathbf{L}}_3(i) \quad (5)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{c}}$ は変形後のスプライン曲線における離散点の座標、 $\hat{\mathbf{L}}$ は再計算した LRF である。

4.3 制約の付加方法

まずは、物体の長さ変化に対する制約について述べる。物体の長さ変化には、全体の長さ変化、局所的な長さ変化の二種類がある。これらの変化は提案する変形手法におけるスプライン曲線の全体の長さ変化、離散点間の距離の変化として考えることができる。ある一定以上の長さ変化や不均一な長さ変化を防ぐために、図 3 のように全体の長さにおいて閾値以上の変化が生じることに對する制約、全体の長さにおける各離散点間の距離の比率が変化することに對する制約を付加する。

全体の長さ変化への制約について述べる。物体全体の長さに関するスプライン曲線の長さは、各離散点間の距離の総和として考える。スプライン曲線の長さを用いて、定めた比率以上の長さ変化が生じることを制限するために、その比率を閾値として長さの変化に制約を付加する。

制約を加えるために、シグモイド関数を用いる。シグモイド関数とは、式 (6) で定義される関数である。

$$\zeta_a(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (6)$$

ここで、 a は傾きを変化させるゲインである。この関数は、 x が 0 より小さい値では 0 に近い値、0 より大きい値では 1 に近い値となる。

そこで、閾値より全体の長さ変化が小さい場合は 0 に近い値、大きい場合は 1 に近い値となるように、全体の長さ変化と閾値の関係を表す g_{entire} を変形時のスプライン曲線の長さ D 、初期のスプライン曲線の長さ \tilde{D} を用いて式 (7) で定義する。

$$g_{entire} = \zeta_a\left(\left|\frac{D}{\tilde{D}} - 1\right| \times 100 - D_T\right) \quad (7)$$

ここで、 D_T は全体の長さの変化比率に関する閾値である。 g_{entire} の値が小さい変形は、閾値より小さい長さの変化比率であることが判断でき、このような変形を実現することで制約を表現する。

次に局所的な長さ変化について述べる。長さの変化が一部分に生じてしまうことを防ぎ、均一な全体の長さ変化を許容するために、全体の長さにおける各離散点間の距離の比率の変化を用いて局所的な長さの変化を考えることとする。局所的な長さの比率の平均変化 g_{local} は式 (8) で求められる。

$$g_{local} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|d_i - \tilde{d}_i|}{n-1} \quad (8)$$

ここで、 d , \tilde{d} はそれぞれ変形時と初期のスプライン曲線における局所的な長さの比率、 n はスプライン曲線の離散点の数である。求めた局所的な長さ比率の平均変化を表す g_{local} が小さくなるような変形を行うことで、均一な比率で長さ変化が生じる変形を実現し、制約を表現する。

次に、物体の曲げと振れに対する制約を付加するために、各離散点を持つ LRF の変化に制約を付加する。ただし、物体の姿勢変化に対して制限しないように、隣り合う離散点の LRF の姿勢の差について初期からの変化量で評価し、制約を付加する。隣り合う離散点の LRF の姿勢の差である回転行列 \mathbf{R}_i を式 (9) より求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i &= \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{i+1,1} & \mathbf{L}_{i+1,2} & \mathbf{L}_{i+1,3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{i,1} & \mathbf{L}_{i,2} & \mathbf{L}_{i,3} \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{i+1,1} & \mathbf{L}_{i+1,2} & \mathbf{L}_{i+1,3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{i,1} & \mathbf{L}_{i,2} & \mathbf{L}_{i,3} \end{pmatrix}^T \quad (9) \end{aligned}$$

そして、LRF の各方向を軸とした回転として考えること

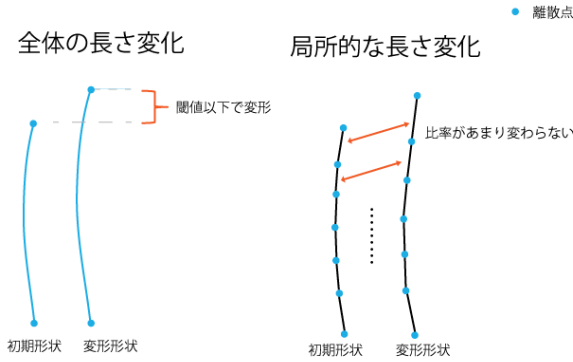


図 3 長さに関する変化

ができるように、求めた回転行列を各軸に対する回転の組み合わせとして表す。このようにすることで、離散点間の姿勢の差を物体の変形として表現しやすくなる。

離散点 i の LRF の各軸に対する回転角を $\theta_{i,1}$, $\theta_{i,2}$, $\theta_{i,3}$ とすると、式 (10) を満たすそれぞれの回転角を求める。

$$\min_{\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \theta_{i,3}} \| \mathbf{R}_i - \mathbf{r}(\mathbf{L}_{i,1}, \theta_{i,1}) \mathbf{r}(\mathbf{L}_{i,2}, \theta_{i,2}) \mathbf{r}(\mathbf{L}_{i,3}, \theta_{i,3}) \| \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{r}(\mathbf{m}, \theta)$ は軸 \mathbf{m} まわりに θ 度だけ回転させた回転行列である。

LRF の各軸における回転は、図 4 のように捩れ、水平方向への曲げ、垂直方向への曲げに対応する。これらの回転角における初期からの変化を制限することで、捩れや曲げに制約を付加する。各軸における角度変化の閾値をそれぞれ θ_{T1} , θ_{T2} , θ_{T3} とすると、各離散点間の回転を滑らかに制限するために、スプライン曲線の全体の長さに対する制約と同様に式 (6) で定義したシグモイド関数を用いて閾値と各回転角の変化の関係を表す g_{LRF} を式 (11) で定義する。

$$g_{LRF} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \zeta_a(|\theta_{i,j} - \tilde{\theta}_{i,j}| - \frac{\theta_{Tj}}{n-1}) \quad (11)$$

ここで、 $\tilde{\theta}_{i,1}$, $\tilde{\theta}_{i,2}$, $\tilde{\theta}_{i,3}$ は初期の回転角、 $\theta_{i,1}$, $\theta_{i,2}$, $\theta_{i,3}$ は変形時の回転角である。式 (11) で定義した g_{LRF} は、それぞれの回転角の変化量が閾値より小さければ 0 に近い小さい値を持ち、近くなれば離散点数に応じた大きい値を持つことになる。したがって、 g_{LRF} の値が小さい場合には閾値より小さい変化量であることが判断でき、このような変形を実現することで制約を表現する。

5. 物理モデルベース非剛体位置合わせ

5.1 復原の概要

まず、特徴点のマッチングなどで得た疎な対応を用いて、回転と平行移動によって対応の位置を近づける剛体位置合わせを行う。しかし、剛体位置合わせを行っただけでは、各部材は変形しているので、部材間での隙間や重なりが生じてしまう。次に、非剛体位置合わせを行うため、疎な対応だけでなく、密な対応を取得する。これらの対応点間

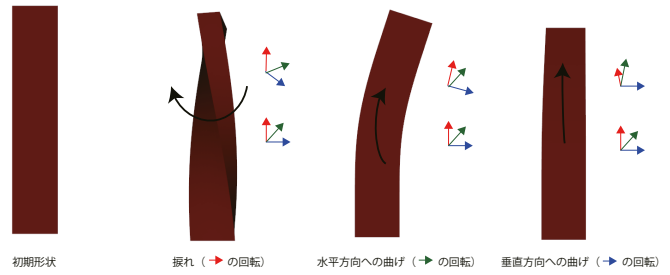


図 4 各軸における角度変化による変形

の距離を物理モデルに基づく変形手法によって最小化する最適化を行うことで非剛体位置合わせを行う。

提案した変形手法を用いることで、異方性の拡大縮小を表現し、部材の長さ変化や曲げ、捩れについて制限することができる。全ての部材の非剛体位置合わせを同時に行い、密な対応の取得と非剛体位置合わせを繰り返すことで、密な対応を更新し、全ての部材を徐々に合わせていく。

5.2 密な対応の取得

密な対応として隣接面の対応点を取得する。ここで、疎な対応が存在する面同士は隣接すると考え、探索する面は疎な対応が存在する面であるとする。また、部材における各面はセグメンテーションされていることとする。

まず面を構成する各頂点から隣接面の最近傍点を探索し、対応点の候補を取得する。ここで、一つの面が複数の部材に隣接している場合があり、その場合には複数の近傍点を対応点の候補として持っている。これらの対応の中で距離が遠い対応は、隣接面であるが接している部分ではない可能性があるため、隣接面への最近傍点の中で、距離が一番小さいものを対応とする。

ただし、欠損が生じている物体において面における近傍点のすべてを対応として利用するのは好ましくない。欠損が生じている部分は隣接面において合わさることがないので、対応点間の距離が大きくなる。そこで、外れ値の除去として、各面について対応点の中央値を計算し、中央値以上の距離がある場合には対応として扱わないこととする。

また、面が交差しているといった各部材が重なる状態は復原時の状態として好ましくないため、面を構成する頂点の法線と対応点の向きを用いて重なりを判断する。図 5 に示すように、法線と対応点の向きが同じ場合には部材の重なりが生じておらず、逆の場合には重なりが生じていることが分かる。そこで、頂点の法線ベクトルと対応点へのベクトルの内積が負の場合には重なっている対応、正の場合には重なっていない対応と判断することができる。よって、重なりを減少させるように内積が負である対応点を合わせる必要があるため、中央値による外れ値除去の対象とせず、対応として扱うこととする。

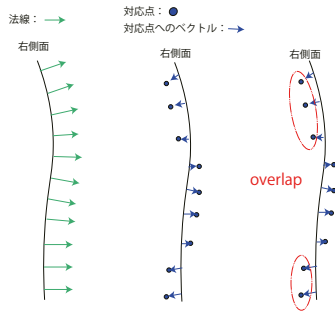


図5 部材の重なり

5.3 非剛体位置合わせ

復元を行うために、変形特性を考慮して変形の自由度を制限し、対応を合わせることが必要である。そのため、評価関数を位置合わせに関する項と変形制約に関する項で構成し、非剛体位置合わせを行う。設定する評価関数 E は位置合わせに関する項 E_{reg} 、変形制約に関する項 E_{cons} を用いて式 (12) で定義する。

$$E = E_{reg} + E_{cons} \quad (12)$$

位置合わせに関する項である E_{reg} は、特徴点のマッチングなどで得た疎な対応と隣接面から得た密な対応を用いて求める。変形制約に関する項である E_{cons} は、長さに関する制約、曲げと振れに関する制約から求める。それぞれの制約は、変形手法で述べた方法で付加する。

隣接する各部材を等しく合わせていくことを目的として位置合わせに関する項を定義する。疎な対応に関しては、各隣接部材における平均距離の平均として目的関数 f_{sparse} を式 (13) で定義する。

$$f_{sparse} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_{h_i}} \frac{\|\mathbf{h}_{i,j} - \tilde{\mathbf{h}}_{i,j}\|}{N_{h_i}} \quad (13)$$

ここで、 N_p は隣接する部材の組数、 N_{h_i} は各隣接部材における疎な対応点の数、 \mathbf{h} 、 $\tilde{\mathbf{h}}$ は疎な対応点の座標である。

次に密な対応に関しては、各隣接部材における平均距離の平均を用いて定めるが、重なりが生じている場合には、隣接面をより強く合わせるようにペナルティを設定する。重なりが生じている場合のペナルティを β として、目的関数 f_{dense} を式 (14) で定義する。

$$f_{dense} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_{s_i}} \frac{\beta_i \|\mathbf{s}_{i,j} - \tilde{\mathbf{s}}_{i,j}\|}{N_{s_i}} \quad (14)$$

ここで、 N_s は密な対応点の数、 \mathbf{s} 、 $\tilde{\mathbf{s}}$ は密な対応点の座標である。

以上より、位置合わせに関する項 E_{reg} を各目的関数に関する重み w_s 、 w_d を用いて式 (15) で定義する。

$$E_{reg} = w_s f_{sparse} + w_d f_{dense} \quad (15)$$

次に変形制約に関する項 E_{cons} について定義する。この

項は、各部材において変形手法で述べた制約を付加することで定義する。

全体の長さ変化を制限するための目的関数 f_{entire} を i 番目の部材のスプライン曲線における式 (7) で定義した $g_{entire,i}$ を用いて式 (16) で定義する。

$$\begin{aligned} f_{entire} &= \sum_{i=1}^{N_c} g_{entire,i} \\ &= \sum_{i=1}^{N_c} \zeta_a \left(\left| \frac{D_i}{\bar{D}_i} - 1 \right| \times 100 - D_T \right) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 N_c はスプライン曲線の数である。式 (16) で定義した目的関数は、スプライン曲線の長さ変化が閾値に近くなると値が大きくなり、非剛体位置合わせにおける全体の長さ変化に対して影響を与える。

均一な長さ変化を実現するための目的関数 f_{local} を i 番目の部材のスプライン曲線における式 (8) で定義した $g_{local,i}$ を用いて式 (17) で定義する。

$$\begin{aligned} f_{local} &= \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} g_{local,i} \\ &= \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^n \frac{|d_{i,j} - \tilde{d}_{i,j}|}{n-1} \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) で定義した目的関数は、局所的な比率が変化すると値が大きくなり、非剛体位置合わせにおける局所的な長さ変化に対して影響を与える。

次に物体の曲げや振れを制限するための目的関数 f_{LRF} を i 番目の部材のスプライン曲線における式 (11) で定義した $g_{LRF,i}$ を用いて式 (18) で定義する。

$$\begin{aligned} f_{LRF} &= \sum_{i=1}^{N_c} g_{LRF,i} \\ &= \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 \zeta_a \left(|\theta_{i,j,k} - \tilde{\theta}_{i,j,k}| - \frac{\theta_{T_k}}{n-1} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

式 (18) で定義した目的関数は、振れや曲げが大きくなり、生じた各軸への角度変化が閾値に近くなると値が大きくなり、非剛体位置合わせにおける曲げや振れに対して影響を与える。

以上で定めた各目的関数 f_{entire} 、 f_{local} 、 f_{LRF} を用いて変形制約に関する項 E_{cons} を各目的関数に関する重み w_e 、 w_l 、 w_L を用いて式 (19) で定義する。

$$E_{cons} = w_e f_{entire} + w_l f_{local} + w_L f_{LRF} \quad (19)$$

6. 実験

6.1 復元対象の木製文化財

我々のグループでは、太陽の船と呼ばれる2隻の巨大木造船を対象として3次元デジタルデータの取得、分析を



図 6 展示されている第一の船



図 7 格納されている第二の船の部材

行っている。太陽の船とは、4500 年ほど前に制作された巨大木造船である。これらは、部材に分解して保存され、図面などの設計図となるものは残されていない。そのため、正確な復原形状を記したものは存在しない。

一つ目の船は、第一の船と呼ばれており、1954 年にクフ王の大ピラミッド南側で大量に堆積していた砂を除去したところに発見された石室の中に格納されていた。発見時には約 600 の部材に分解された状態であったが復原され、現在では図 6 のように、展示されている [12]。

第二の船は、第一の船が発見された場所の近くで 2002 年に存在が確認され、現在も発掘が行われているが、第一の船と比べて状態が悪く、図 7 のように格納されている各部材が経年劣化により変形、破損している。このように、変形や破損が激しいことから、実際の部材による全体の組み立てには多くの年月を要すると考えられている。そこで、各部材の 3 次元デジタルデータを計測し、提案する復原手法によって 3 次元デジタル復原を行う。

6.2 接続関係に関する知見

各部材の組み立て時の固定は、釘などではなく、各部材に空けた穴にロープを通す、ほぞ接ぎを行うといった方法で行われていたと考えられている [13]。制作時には、固定するための穴は隣接面における近くの場所に空けられたと考えられる。しかし、各部材が変形している場合には、移動によって合わせただけでは対応する穴の距離が大きくなる。そこで、対応する穴の距離を小さくすることが復原において必要となり、穴の位置は大きな手がかりである。よって、穴の中心位置を疎な対応として用いる。

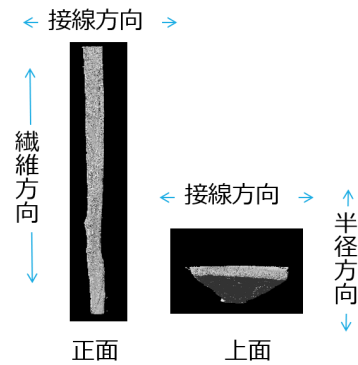


図 8 部材の各繊維方向

6.3 変形に関する知見

木材は、含水率の変化によって繊維の方向に関係した異方性の拡大収縮が生じる。一般的な木材の場合において各繊維の方向への拡大縮小に関する比率は、繊維方向、半径方向、接線方向に対して、約 1 : 5 : 10 である [14]。このように、繊維方向への変化は非常に小さく、接線方向への変化は大きい。本論文における第二の船の復原では、この比率を変形手法で用いる。

部材の含水率は約 18 % であるという知見が得られており、この知見に基づく一般的な木材の場合には繊維方向に約 0.5 % の縮小が生じていると考えられる。しかし、第二の船の部材が格納されていた石室は、気密を保っておらず、水分が入り込んでいた可能性があり、その場合には含水率の上昇によって拡大が生じる [15]。さらに、拡大縮小を担う細胞壁が劣化しており、含水率に従った変化がある時点で生じなくなっている可能性がある。そこで、繊維方向において 0.5 % の拡大縮小に関する比率を知見として繊維方向に対応する全体の長さ変化の閾値で用いる。

また、各部材は、木目の推定が難しい状態であるため、仮定を置く必要がある。ここで、木目は板目と柾目の 2 つに大別することができる。板目として切る方が柾目として切るよりも多くの木材を得ることができるので、古代エジプトにおいて貴重であった木材は板目として切られていた可能性の方が高い。したがって、本研究では板目材であるという仮定を置くこととする。板目材である場合には、部材の各繊維方向は図 8 に示したように、繊維に関する方向が与えられる。

6.4 各目的関数への重みの考察

重みの設定するために、各目的関数の値について物理的な意味を考察する。目的関数 f_{sparse} 、 f_{dense} 、 f_{local} が 1 となる場合について考える。 f_{sparse} が 1 であるということは、各部材の隣接する面における疎な対応点の平均距離が 1m であるということを示している。また、 f_{dense} が 1 であるということは、各部材の隣接する面における密な対応点の平均距離が 1m であるということである。 f_{local} が 1

になるということは、局所的な長さの変化が平均 1% 生じていることになる。これらを考慮しながら、必要である関係を考え、重みの設定を行った。

6.5 パラメータの設定

設定したパラメータの値を表 1 に示す。角度に関する閾値に関する知見は得られていないので、実験的にすべての LRF の軸に対して閾値を 30 度に設定した。また、スプライン曲線のノット列は開一様に設定した。

表 1 設定したパラメータ

パラメータ名	設定値
スプライン曲線の制御点数	4
スプライン曲線の次数	3
スプライン曲線の離散点数	100
シグモイド関数のゲイン	100
部材の重なりに関するペナルティ	10
LRF の各軸に対する回転角の閾値	30
最適化の反復回数	1000
密な対応の取得と非剛体位置合わせの繰り返し回数	10

6.6 結果と考察

第二の船は現在も発掘中であるため、既に発掘されている甲板の一部を用いる。甲板の一部である部分 1 において固定に用いられた穴の対応を手動で取得した結果を図 9 に示す。この対応により初期位置を求めるが、対応の位置が直線的であり、変形が生じている場合には 3 次元の剛体変換が不安定になってしまうので、2 次元平面における剛体変換によって初期位置を求めた。

この部分 1 を用いて、提案手法における変形制約の有用性を示すために、表 2 のように式 (15)、式 (19) で用いた重みを設定し、制約を付加した場合と付加しない場合の結果を比較する。図 10 の (b) に付加した場合の結果、付加しない場合の結果を (c) に示す。付加しない場合には下部が左に曲がっている。さらに、復原で生じた全体の長さ変化を調べてみると表 3 のようになる。ここで、左の部材から部材番号 621-627 である。付加した場合には閾値として設定した 0.5% より小さい変化であるのに対して、付加しない場合には 7 つの部材の中で 6 つの部材において 0.5% より大きい変化が生じている。このように、制約を付加しない場合には必要以上の大きな変形が生じてしまっていることが確認でき、制約を付加する有用性が確認できた。

また、制約を付加した非剛体位置合わせによって、剛体位置合わせだけでは生じていた隣接する部材の重なりや隙間が減少した。特に重なりや隙間が少なくなった箇所を図 11 に示す。

他の甲板部分である部分 2 において穴の対応を図 12 のように取得し、制約を付加した提案手法によって復原した

表 2 制約の有無に関する比較実験で設定した重み

	w_s	w_d	w_e	w_l	w_L
付加	10	1	3	10	3
なし	10	1	0	0	0

表 3 スプラインの長さ変化 (%)

	621	622	623	624	625	626	627
付加	99.57	100.42	99.64	99.95	99.58	99.86	100.20
なし	98.05	101.32	98.44	102.26	100.23	102.51	102.57

結果を図 13 に示す。部分 2 においても重なりや隙間が減少しており、特に減少した箇所を図 14 に示す。

その他の発掘されている甲板部分についても復原を行い、配置した結果を図 15 に示す。このように、甲板の 50% において復原を行い、それぞれの部分において隙間や重なりが非剛体位置合わせによって減少した。

7. まとめと今後の課題

本論文では、変形が生じている文化財の部材の 3 次元デジタルデータから、デジタル復原を行う手法を提案した。各部材の変形において異方性の拡大縮小の表現と物理モデルに基づいた制約を付加することによって、木材の変形特性を考慮しながら位置合わせを行う。そして、第二太陽の船の部材から得た 3 次元デジタルデータを用いた提案手法による復原実験によって制約を付加することの有用性を確認した。また、剛体位置合わせ結果を初期値として、非剛体位置合わせを行うことによって隣接部材の隙間や重なりが減少したことを示した。

今後の課題として、多様な変形表現が可能な手法への拡張がある。現在の変形手法では、骨格から取得したスプライン曲線を基準とした変形しか行うことができない。この問題の解決方法として、変形の基準となるスプライン曲線を複数用いることで、多様な表現を可能にするなどが考えられる。

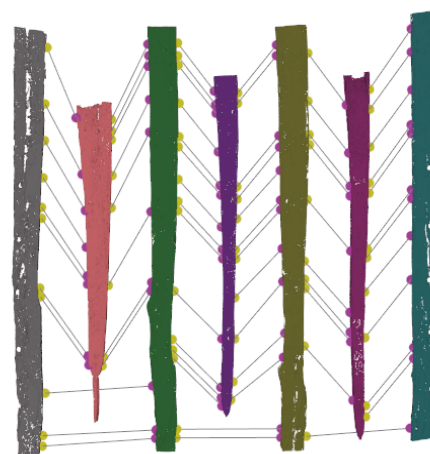
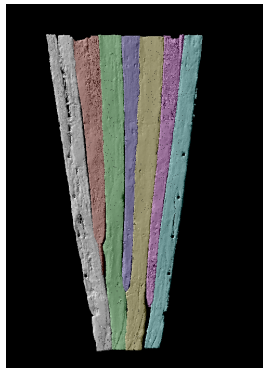
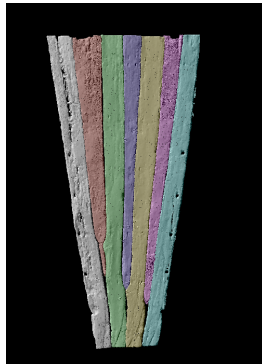


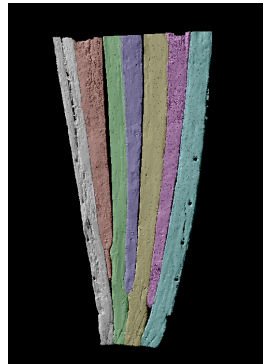
図 9 疎な対応の可視化 (部分 1)



(a) 初期位置



(b) 制約を付加



(c) 制約なし

図 10 制約の有無による復元結果の比較

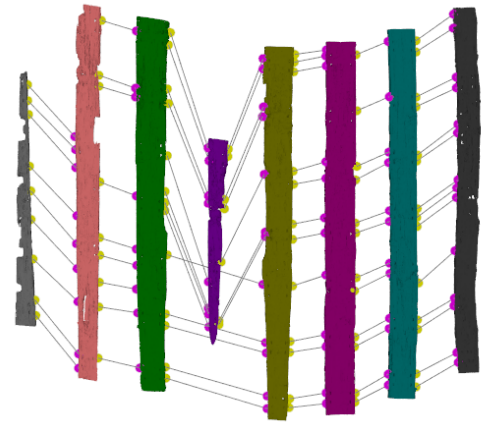
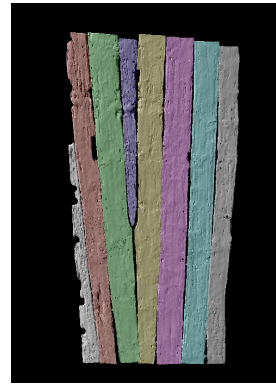
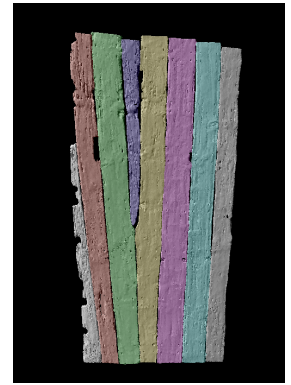


図 12 疎な対応の可視化 (部分 2)

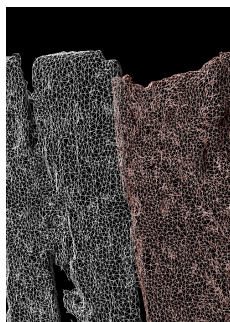


(a) 初期位置

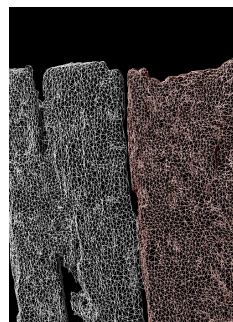


(b) 復元結果

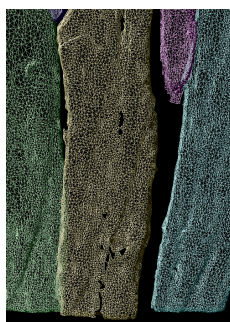
図 13 提案手法による復元結果 (部分 2)



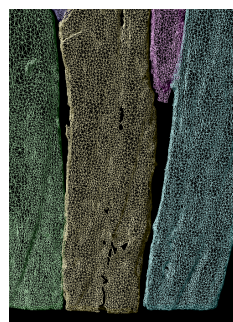
(a) 初期位置
(箇所 1)



(b) 復元結果
(箇所 1)

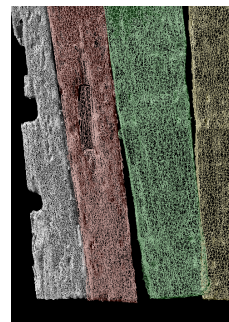


(c) 初期位置
(箇所 2)

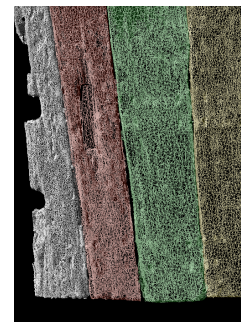


(d) 復元結果
(箇所 2)

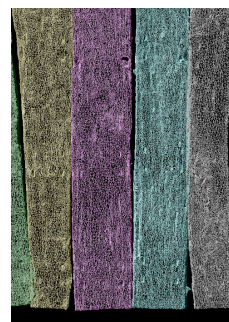
図 11 重なりや隙間の減少箇所 (部分 1)



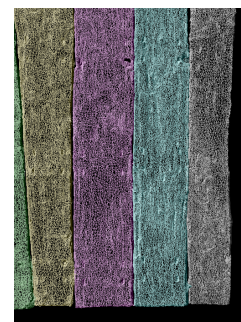
(a) 初期位置
(箇所 1)



(b) 復元結果
(箇所 1)



(c) 初期位置
(箇所 2)



(d) 復元結果
(箇所 2)

図 14 重なりや隙間の減少箇所 (部分 2)

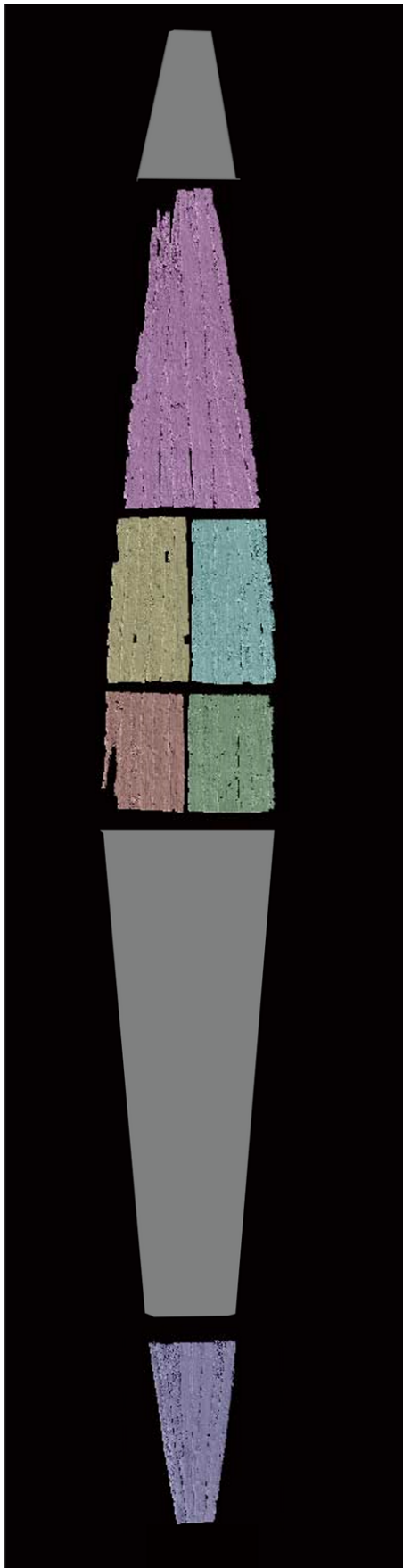


図 15 復原した甲板の一部の配置

参考文献

- [1] K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume, K. Nishino, M. Kamakura, and Y. Okamoto. The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects. *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 75, No. 1, pp. 189–208, October 2007.
- [2] K. Pal, M. Terras, and T. Weyrich. 3d reconstruction for damaged documents: imaging of the great parchment book. In *Proc. of the 2nd International Workshop on Historical Document Imaging and Processing*, pp. 14–21. ACM, 2013.
- [3] A. Itskovich and A. Tal. Surface partial matching and application to archaeology. *Computers & Graphics*, Vol. 35, No. 2, pp. 334–341, 2011.
- [4] D. Koller and M. Levoy. Computer - aided reconstruction and new matches in the forma urbis romae. *bulletino Della Commissione Archeologica Comunale di roma*, 2005.
- [5] Q. Huang, S. Flöry, N. Gelfand, Mi. Hofer, and H. Pottmann. Reassembling fractured objects by geometric matching. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 569–578, July 2006.
- [6] B. Amberg, S. Romdhani, and T. Vetter. Optimal step nonrigid icp algorithms for surface registration. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007*, pp. 1–8. IEEE, 2007.
- [7] H. Hontani, T. Matsuno, and Y. Sawada. Robust non-rigid icp using outlier-sparsity regularization. In *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 174–181, June 2012.
- [8] L. Liang, M. Wei, A. Szymczak, A. Petrella, H. Xie, J. Qin, J. Wang, and F. L. Wang. Nonrigid iterative closest points for registration of 3d biomedical surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 100, No. Supplement C, pp. 141 – 154, 2018.
- [9] T. Rohlfing, C. R. Maurer, D. A. Bluemke, and M. A. Jacobs. Volume-preserving nonrigid registration of mr breast images using free-form deformation with an incompressibility constraint. *IEEE Trans Med Imaging*, Vol. 22, No. 6, pp. 730–741, June 2003.
- [10] X. Lin, S. Ruan, T. Qiu, and D. Guo. Nonrigid medical image registration based on mesh deformation constraints. *Computational and mathematical methods in medicine*, Vol. 2013, , 2013.
- [11] H. Huang, S. Wu, D. Cohen-Or, M. Gong, H. Zhang, G. Li, and B. Chen. L1-medial skeleton of point cloud. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 65:1–65:8, July 2013.
- [12] 吉村作治, 中川武, 黒河内宏昌. 「クフ王の第1の船」部材上の未公表ヒエラティック文字について: 古代エジプト「クフ王の船」復原研究 その1. *日本建築学会計画系論文集*, Vol. 62, No. 496, pp. 201–208, 1997.
- [13] P. P. Creasman. Ship timber and the reuse of wood in ancient egypt. *Journal of Egyptian History*, Vol. 6, No. 2, pp. 152–176, 2013.
- [14] 佐道健. 水分変化による木材の寸法と形状の変化. *木材保存*, Vol. 22, No. 2, pp. 74–81, 1996.
- [15] 吉村作治, 黒河内宏昌ほか. 古代エジプトにおける太陽の船思想について: 太陽の船発掘から見たもの (20周年記念号). *東日本国際大学研究紀要*, Vol. 22, No. 1, pp. 171–187, 2017.