JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	木造仏像のX線CT画像からの虫食い領域のグラフ構造抽出の一手法
Author(s)	岩本,純子; 剣持,雪子; 小谷,一孔; 長澤,市郎
Citation	情報処理学会研究報告 : オーディオビジュアル複合情報処理, 99(107): 25-30
Issue Date	1999-12
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/3290
Rights	社団法人 情報処理学会, 岩本純子／剣持雪子／小谷一孔／長澤市郎, 情報処理学会研究報告 : オーディオビジュアル複合情報処理, 1999(107), 1999, 25-30. ここに掲載した著作物の利用に関する注意: 本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

オーディオビジュアル複合情報処理　27－5
（1999. 12. 16）

木造仏像のX線CT画像からの虫食い領域のグラフ構造抽出の一手法

岩本 純子†　　剣持 雪子†　　小谷 一孔†　　長澤 市郎††

†北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
Tel:0761-51-1231
E-mail: {jiwamoto, kenmochi, ikko}@jaist.ac.jp

††東京芸術大学 美術研究科
110-8714 東京都台東区上野公園 12-8
Tel:03-5685-7652

あらまし　文化財には保存、修復の必要なものが数多く存在する。中でも木造仏像はその組成、構造の特徴ゆえに 破損や虫食いなどの損傷を受けたものが多く、早急な修復が必要となっている。そこで、本研究では、虫食いによる損傷に注目し、木造仏像の内部をX線CTにより撮影した。X線CT画像中の虫食い領域の3次元形状をグラフ構造として表し。虫食い領域を 抽出する方法について検討する。また、得られた虫食い領域からその仏像のダメージの度合いを、ダメージ度として評価することや、修復必要個所の可視化など、修復に必要な情報の抽出・表現方法についても考える。

キーワード　X線CT、3次元グラフ構造, 木造仏像、領域抽出

Graph structure extraction of woormhole regions from CT images for the damage estimation of a wooden statue

Junko IWAMOTO†,　Yukiko KENMOCHI†,　Kazunori KOTANI†and　Ichiro NAGASAWA††

†Graduate School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
1-1 Asahidai Tatsunokuchi Ishikawa 923-1292 Japan
Tel:+81-761-51-1231
E-mail: {jiwamoto, kenmochi, ikko}@jaist.ac.jp

††Tokyo National University of Fine Arts & Music
12-8 Ueno Kouen Taito-ku Tokyo 110-8714 Japan
Tel:+81-3-5685-7652

Abstract　There are many cultural assets which are desired to being restored and preserved. One of the most damaged assets are wooden statues which have many fractures and wormholes caused by their material properties. Therefore, it is necessary to carry out the urgent restoration. In this paper we focus on the examination and estimation of wormholes We first present the three-dimensional graph representation of wormhole regions, and then extract the graph structures from the X-ray CT images.

key words　three dimentional graph structures, CT images, segmentation, estimation of wormhole damages

1 はじめに

文化財は文化の継承のため, 後世へ残しておかなければならないものである. そのため, 保存・修復には細心の注意を必要としている. 中でも日本の仏教美術の遺品は殆んど木造で作られており, 仏像はその組成や構造ゆえに損傷しやすいという特徴がある. 例えば, 日本の彫刻における国宝の件数は 121 件, 重要文化財の数は 2557 件であるが, そのうち仏像の数だけをみると重要文化財に指定されているものは 1 万体ほどになる[1]. さらに, 重要文化財には指定されていないものの, 歴史的に価値のあるものを含めると全国で木造仏像の数はおよそ 15 万体にのぼる. この中で修復を必要とする仏像は数多く存在する.

これら修復を必要とされている木造仏像の損傷の状態は一様ではないため, 修復作業は困難かつ時間のかかるものである. 修復には解体や再組付け作業が伴うため, 画像による計測や記録が行われている. しかし文化財に対する画像解析はまだ歴史が浅く [1][3], 木造仏像においてはその大きさや移動など, 検査に制限が多いため, 殆んど行われていない. 非破壊的な検査で現状を把握する必要がある場合, 木造仏像では部分的に X 線検査を行うことがあるが, 通常の X 線写真は 2 次元の投影像 (図 1) であるため奥行き情報がない. そこで, 修復には仏師らの経験と知識に依存することになる. 修復は現状維持が原則であるが, 正確な記録を得ることができない場合, 仏師の解釈が加わることもある.

我々は木造仏像の保存・修復のために, X 線 CT により外形と内部の状態を可視化し, 得られた CT 画像を画像解析して, 修復の際に必要な損傷の特徴領域を抽出し, 仏像の損傷度等の定量化などについて研究している (図 2, 図 3). 本報告ではこれら損傷のうち最も被害の深刻な虫食いによる損傷について検討する. チューブ状の構造のものを解析する手法として [4][5][6] などが挙げられるが, 虫食い構造は形状や分布パターンが一定でないことから空洞であることを利用して領域抽出を行い, その連結をグラフ構造として表現する.

2 木造仏像の修復に必要な情報

木造仏像において 修復作業を行う際に必要となる情報について以下にまとめる.

1. 損傷の原因
   木造仏像に損傷を与える原因には以下のようなものが挙げられる.
   (a) 虫食い
   様々な種類の虫食い穴が不規則に存在する.
   (b) 腐食
   木材の水分, 日本の高温多湿の気候によりカビが発生しそこから腐食が起こる.
   (c) 破損
   (d) 釘, 鎹の錆び
   (e) 干割れ
   (f) 表面層の剥離
   (g) 風化
   (h) ネズミによる被害
2. 外観の形状
   修復の前後で外観が不必要に変わらないように正確な外観の形状を記録することが必要である.
3. 材料に関する知識
   (a) 檜や杉など 木材に関する知識
   (b) 釘, 鎹などの形状や時代背景の 知識
   (c) 糊 の種類の知識
4. 作り方に関する知識
   (a) 一木造り (一本の木をそのまま, 時にはくりぬいて製作)
   (b) 寄せ木造り (一体の仏像を複数の部品にわけて作成し, 最後に組み合わせるもの)

これらの内, 内部に広がる虫食いや腐食の損傷状態は外観から判断できない. そのため, 情報を得るには非破壊検査を行うか, 仏師の経験, 知識に依存することとなる. しかし仏師の後継者不足もあり, 修復を待つ仏像の数も多数存在することから, 非破壊検査による, より客観的な情報が必要となる.

3 虫食い領域抽出法

仏師や修復を担当している人からの聞き取り調査によると, 虫食い穴には次のような特徴がある.

- 穴の位置は表面を残して内側あり外観から状態を把握出来ない.
- 0.1mm から 4mm のチューブ状の穴である.
- 虫の種類は多種多様なので穴の形状も不規則である.

虫食いによる損傷を定量化するためには, このような虫食い領域を抽出しその構造を把握する必要がある.

[1] 神社・仏閣などの単位で指定されているので, 一件当たり, 数体 (5,6 体) が指定されているところもあるため, 件数と仏像の数は一致しない

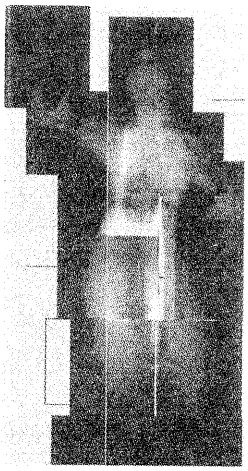


図 1: 仏像の X 線写真 (図 2,3 とは異なる仏像)

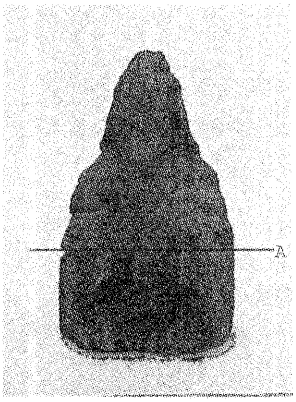


図 2: 仏像の外観

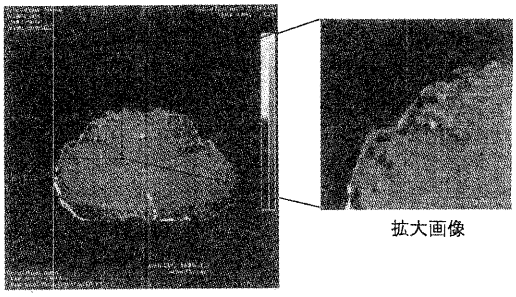


図 3: 図 2 の A の断面における CT 画像

表 1: 虫食い構造と気管支構造の比較

	虫食い	気管支
開始地点	各地	固定
開始地点数	複数個存在	1 個
構造	分岐, 合流が存在	分岐を繰り返し小さくなる.

3.1 虫食い領域の抽出

虫食い領域は空洞のため虫食い穴はまわりの木材の CT 値と比べ低く, 背景とほぼ同等の CT 値を持つ (CT 値 $-1000\sim-750HU$). そこで今回は経験的に閾値を決定し, 対象画像中から虫食い領域を特定した.

3.2 虫食い領域の位相構造

複数の種類の複数の虫が不規則に食い荒すために、虫食い領域は不規則に枝がのびたチューブ状をしており, 穴の大きさが異なる. また同じ虫食い領域の全体積が仏像に占める割合が同じであっても, 虫食い領域の位置の分布によって仏像に与えるダメージが異なる. 虫食いによる損傷を解析するためには虫食い領域の抽出だけでなく, その位相構造を得る必要がある.

チューブ状のものを解析する従来手法としては, 医療用の CT 画像解析にける血管像処理 [4][5] や気管支構造抽出 [6] などがある. 安江ら [4] は 3 次元構造を細線化し, 河田ら [5] は走行方向の抽出, 動脈瘤や狭窄などの病変形態の表示, 計測を行い 細線化処理を行い得られた結果をグラフ表現している. 細線化処理を行わずに 3 次元構造を解析する手法としては, 井関ら [6] が気管支の特徴に基づいて気管支の 3 次元構造の抽出を行っている. これは気管支の 3 次元構造にそって断面領域を求め, 一つの枝の末端に来たら手前の分岐に戻るという再帰的な処理を用いて木構造として表すものである. 木造仏像の虫食いのような複数の開始点, 交差, 合流を含む構造は木構造を表現するのは難しい (表 1) ため本研究ではグラフ構造として抽出法を考える.

3.3 虫食い構造抽出アルゴリズム

3 次元 X 線 CT 画像 は L 行 M 列 N 段個の画素で構成されており, i 行,j 列,k 段の画素の値を f_{ijk} と表す. またラベル付けされた後の $f_{ijk})>0$ の時の画素を $f(i,j,k)$ と表す. 各スライスにおいて連結した領域を一つのノードと表現する. k 枚目のスライスにおいて現れたノード $node_i$ が $k-1$ 枚目のどのノードとも連結していないときは $node_i$ を開始点としてルートノードと表現する. 閾値

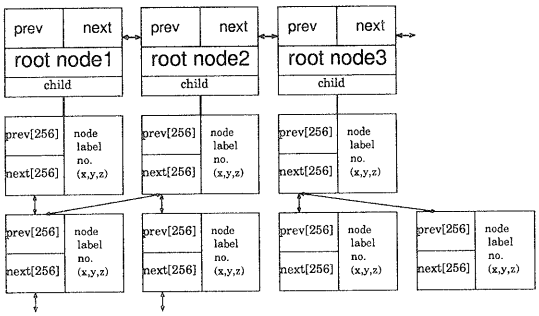


図 4: データ構造

処理により抽出された虫食い領域をノードとして表し, 各ノードの前後の関係を以下のアルゴリズムで求めていく.

1. グラフ構造抽出アルゴリズム
   入力：3 次元画像 $f_{i,j,k}$
   出力：3 次元グラフ構造のノード n とエッジ $e(n\acute{n})$

   (a) 各スライス k において
   1.1 閾値を T とし $f(i,j,k) > T$ の時 $(i,j,k) \in W_k$ とする.
   1.2 W_k をいくつかの連結成分 $C_{k,l;(l=1,2,3\cdots)}$ に分ける.
   ただし $\bigcup_{l=1,2\cdots} C_{k,l} = W_k$

   (b) 各 $C_{k,l}$ に対応したノード $n(k,l)$ を作成する.

   (c) 各スライス k について
   $C_{k,l}$ と $C_{k+1,\acute{l}}$ の要素が 3 次元空間中で連結しているならば, ッジ $e(n,\acute{n})$ を作成する.

   (d) チェックすべきノードがなくなったら終了.

グラフ構造は (図 4) のようなデータ構造で表す. 各ノードが自分の前後のポインタを複数個持つため複数の分岐, 合流を表現できる. また各スライス毎に処理を行っても各ノードのつながりを保持できる. 各ノードが自分の位置情報, ラベルをもっているので, 分岐・合流の際に新たに同一のラベルを付け直す必要がない.

4 虫食い状態の評価

4.1 虫食い状態の解析に必要な測度

虫食い状態を解析するのに必要な測度をまとめる.

1. 穴の断面積 $S_{k,l}$：
   同じ体積でも穴の断面積と長さの違いによって仏像に対するダメージが変化する.

$$S_{k,l} = \sum_{f_{(i,j,k)} \in C_{k,l}} f_{(i,j,k)} \tag{1}$$

2. ノードの重心 $\boldsymbol{g}$:
   穴が仏像表面近くにあるか, 内部深くにあるか等, 穴の位置の分布によってダメージは変わる. スライス k の一つのノード $[l]$ の重心を (i_l, j_l) とすると

$$\boldsymbol{g} = \left(\frac{1}{S}\sum_{l=0}^{S} i_l, \frac{1}{S}\sum_{l=0}^{S} j_l \right) \tag{2}$$

3. 体積比率 R_V:
   仏像の大きさに対する虫食い領域が占める割合が大きいほどダメージが大きい.

   - 穴の体積 V:

$$V = \sum_{i=0}^{n-1} S_{k,l} \tag{3}$$

   n は各ノードがもつ面積の和

   - 仏像全体の体積 A: CT 画像中から背景の領域を引いたもの.

$$R_v = \frac{v}{A} \times 100 \tag{4}$$

4. 長さ len:
   面積と同じく穴の長さによってダメージが変化する. ルートノードから終端または分岐点のノードまでの距離

面積や重心はアルゴリズム 1 においてノード毎に計算するので改めて計算する必要はない. これらを用いて虫食いのダメージを定量化する.

4.2 虫食いダメージの定量化

上記した 1〜5 の測度を用いてダメージの定量化を試みる. 尚, 現時点では概念的なモデル化までしか出来ていない. これはモデル内のパラメータの決定とモデル自身の評価に仏師ら修復の専門家の主観的評価等の協力が必要なため, 時間を要するからである. 仏像に対する虫食いによるダメージ D を , ロジスティック回帰モデルを用いてモデル化する [7].

$$D = 1 + \frac{4}{1 + exp(S)} \tag{5}$$

$$S = a_0 + \sum_{p=0}^{P} a_p f_p(\,) \tag{6}$$

表 2: X 線 CT 装置の性能の比較

	医療用	工業用
最小スライス厚 [mm]	1.0	0.10
最小スライス幅 [mm]	1.0	0.10
撮影時間 (1 枚)	1.0sec	約 5〜10 分
撮影時間 (例 100 枚)	100sec	約数時間〜
X 方向画像サイズ [pixel]	512	512 (1024)
Y 方向画像サイズ [pixel]	512	512 (1024)
撮影領域 (FOV) [mm]	150	約 100
分解能 [mm/pixel]	0.293	0.195(0.097)
階調 [bits]	符合付き 16	12

表 3: X 線 CT の撮影条件

	医療用	工業用
スライス厚	1.0 mm	0.10 mm
スライス幅	1.0 mm	0.10 mm
管電圧	120kv	70kv
管電流	80mA	40μA

この $f_p(\ )$ は 3.1 で示したそれぞれの測度の関数とする. a_p は (6) 式と上記の主観評価値との間での重回帰分析により決定する偏回帰係数である.

5 実験

木造仏像 (図 2) を撮影し CT 画像取得した. この画像から虫食い領域を抽出する.

5.1 CT 画像取得

虫食い穴を抽出するには, X 線 CT の撮影条件のうち, スライス厚, スライス幅を薄く設定する必要がある. まず今回は工業用 X 線 CT と医療用の X 線 CT による検査を試みた. 各々の装置の仕様を (表 2) 示す. スライス厚やスライス幅は小さくする程解像度が高くなるが, 撮影に長時間を要する. また医療用であれば病院等での撮影が可能となり便利がよい.

5.2 結果

用いた CT 画像は 512×512[pixce],20 枚である. 撮影条件を (表 3) に示す. 図 5に CT 画像, 図 7(a) に CT 画像を 2 値化して 3 次元化したもの,(b) にノードデータから復元した画像を 3 次元化した例を示す. またノードデータのグラフ構造をリストで表現したもの (一部) を図 8に示す. 図 8における番号は各ノードの番号である.

ノード情報から虫食い領域が復元されているのがわかる.

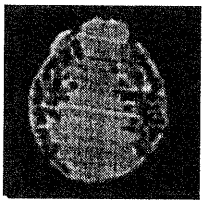


図 5: 虫食いの CT 画像例

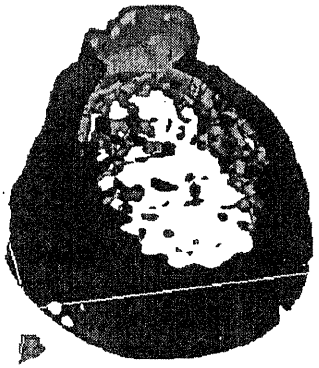


図 6: CT 画像を 3 次元化したもの

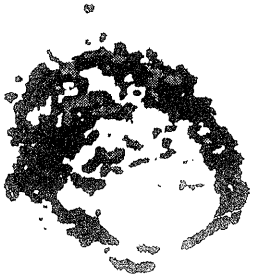
6 まとめ

木造仏像の虫食いによる損傷の可視化と損傷度を定量化するために必要な虫食い領域の抽出を行った. 虫食い領域は始点が一定でなく複数存在し, 途中で交差が起ったり, 閉路が発生するような構造であるため, グラフ構造として表現した. グラフを構成する各ノードは画素の位置情報を持っている. これを確認するためにノード情報から画像を復元し, 3 次元表示した.

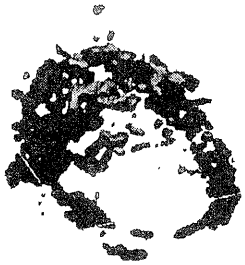
今後は各ノードが持つ面積や重心の情報を用いてダメージを定量的に与えるモデルの構築と, その妥当性を検討する. さらに損傷の効果的な可視化についても検討を行っていく.

謝辞

本研究にあたり工業用 CT データを撮影して頂いた東葛テクノプラザ研究開発室の細谷 昌裕 氏、医療用 CT データを撮影して頂いた金沢大学医学部放射線科の小林 健 助手に深く感謝致します

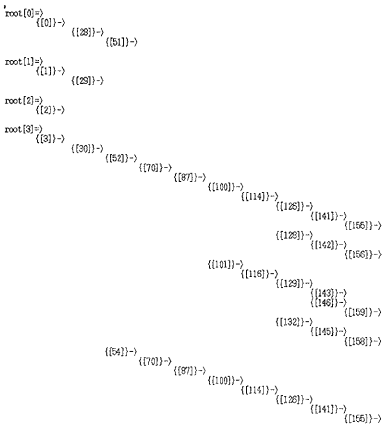


(a) CT画像を2値化して図6から背景を除いた画像



(b) ノード情報から虫食い領域
を復元したもの

図 7: 虫食い領域の CT 画像とノード情報から復元した画像


root[0]=>
{[0]}->
{[28]}->
{[51]}->
root[1]=>
{[1]}->
{[29]}->
root[2]=>
{[2]}->
root[3]=>
{[3]}->
{[30]}->
{[52]}->
{[70]}->
{[97]}->
{[100]}->
{[114]}->
{[126]}->
{[141]}->
{[156]}->
{[129]}->
{[142]}->
{[156]}->
{[101]}->
{[116]}->
{[129]}->
{[143]}->
{[146]}->
{[159]}->
{[132]}->
{[145]}->
{[158]}->
{[54