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３Dグラフ構造抽出(<小特集>3次元映像情報メディア技術)
Author(s)	岩本，純子；小谷，一孔；剣持，雪子；長澤，市郎
Citation	映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア，58(4):514-521
Issue Date	2004-04-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7777
Rights	Copyright (C) 2004 映像情報メディア学会．岩本，剣持，小谷，長澤，映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア，58(4)，2004，514-521．本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

The Institute of Image Information and Television Engineers

木造仏像のX線CT画像からの虫食い領域の3Dグラフ構造抽出

3D Graph Structure Extraction of the Gallery Regions for X-Ray CT Images of Wooden Statues of Buddha

岩本純子†, 正会員 小谷一孔†, 剣持雪子††, 長澤市郎†††

Junko Iwamoto†, Kazunori Kotani†, Yukiko Kenmochi†† and Ichirou Nagasawa†††

Abstract In this paper, we present a new method for extracting the 3D graph structure of gallery regions (worm-eaten areas) from x-ray CT images of wooden statues of Buddha. The extraction and analysis of these gallery regions by image processing is indispensable in the restoration of these historic and precious statues. Our new method consists of two parts: extraction of the initial 3D graph structure and its correction. Because the local shape of the statues and of the gallery regions can be similar, extraction of the gallery regions can create errors in the initial 3D graph structures. The second part of our method satisfactorily corrects both extraction errors and unsuitable extractions based on their local and global features. Our method can extract the 3D graph structures of gallery regions with high accuracy and can also be used to visualize these regions using extracted graph data.

キーワード：木造仏像，虫食い，X線CT，図形融合，3Dグラフ構造

1. まえがき

文化財は文化の継承のため，後世へ残すべきものである．中でも仏像など日本の仏教美術の遺品の殆んどは木造であり，その組成や構造ゆえに損傷しやすく高度な保存・修復技術が必要である[1)2)]．保存や修復が特に必要な文化財クラスの仏像の数は15万体に上ると言われているが，修復作業を行う仏師には後継者不足，経験豊富な仏師の不足という問題があり[3)]，工学的な支援が必要とされている[1)~5)]．

これまで仏像の損傷の調査は，記録写真撮影やX線撮影した画像を解析し，破損，欠落，内部の釘の位置などから仏師ら修復担当者が損傷の状態（損傷度と呼ぶ）を判断していた．損傷の中で木材内部の虫食いは頻度，損傷度共に高いが，内部にある虫食いの状態は把握できず，修復は手探りで行われており，充分な修復は難しいのが現状である[1)]．

このような虫食いによる損傷の診断と修復作業を画像処理技術によって支援できれば，仏像修復作業の精度向上や大幅な効率向上が期待できる．例えば，仏像内部の診断に医療で用いられているX線CTを用いて内部を可視化するだけではなく[4)]，虫食い穴の3次元的なつながり(分岐や合流の位置や数など)や大きさなど，虫食い構造特徴を詳細に抽出・記述することで精度・効率の良い修復が可能となり，定量的な診断も期待できる．

本稿では仏像のX線CT画像から虫食い領域を抽出し，3次元グラフ(3Dグラフ)で記述して構造特徴を解析することを試みる．特に本手法ではグラフの各ノードに，虫食い穴の位置情報だけでなく，穴の直径など幾何情報を持たせ，仏像形状と虫食い穴の局所的，大局的特徴に基づいてグラフ構造抽出の誤りを修正して，仏像修復に重要な虫食い領域の詳細な構造特徴を解析・記述する．さらに，本手法の3Dグラフは，虫食い構造のトポロジカルな情報と幾何情報とを有するため，仏像の診断と修復時に重要な虫食い穴の詳細な可視化が可能である[6)]．

2. 虫食い構造の特徴と修復作業

仏師や修復を行っている人から聞き取り調査を行い，虫食い構造の特徴と修復作業の現状，問題点を調べた．

2003年8月20日受付，2004年2月6日最終受付，2004年2月16日採録

† 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）
†† 岡山大学工学部情報工学科
（〒700-8530 岡山市津島中3-1-1，TEL 086-251-8174）
††† 東京芸術大学 美術研究科
（〒110-8714 台東区上野公園12-8，TEL 03-5685-7652）
† Japan Advanced Institute of Science and Technology
(1-1 Asahidai Tatsunokuchi-machi Ishikawa 923-1292, Japan)
†† Okayama University
(3-1-1 Tsushimanaka Okayama-city Okayama 700-8530, Japan)
††† Tokyo National University of Fine Arts & Music
(12-8 Ueno Kouen Taito-ku Tokyo 110-8714, Japan)

映像情報メディア学会誌 Vol. 58, No. 4, pp. 514~521 (2004)

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers

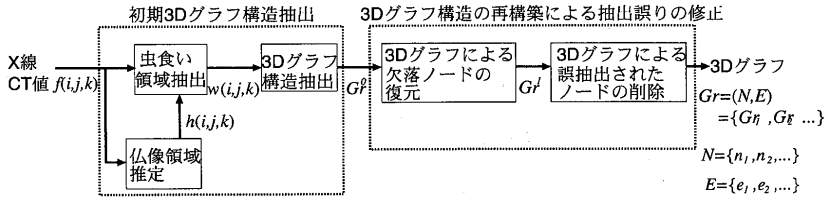


図 1　虫食い領域のグラフ構造抽出システム
The system of graph structure extraction for gallery regions.

2.1　虫食い構造の特徴

虫食い穴の形状には次のような特徴がある．

（1）　虫の種類や木の材質（固い，軟らかい）によって穴の直径は $0.1-3[mm]$ 程度の範囲にある．

（2）　虫は木材を食いながら進むので跡は管状になる．

（3）　虫食いの位置は木材の軟らかい部分や設置された場所で陰になった部分，底や背面など他の木材に接する部分など不特定多数となる．

（4）　木造仏像内部で虫食いが進む方向には規則性はなく，直進，蛇行，ループをつくるなど複雑な経路を残す．複数の虫が食うため管状の経路には分岐や合流が発生し，経路が集中すると木材がスポンジ状になって強度が低下し，崩落するなどして大きな空洞を残すことがある．

2.2　修復作業の現状と問題点

虫食いが起きた仏像を放置すると強度低下による崩落などが生じたり，木材の風化によって形状を維持することさえ困難になる．このため，次のような修復が主に行われる．

（1）　欠落部分に補材（できれば古材）を継ぎ足して整形し，表面に紙や金箔を張ったり，古色を施す．

（2）　木材内部に固化する液状の薬剤を充填する．

(1) は他の外観から確認できる損傷（部品の消失や欠損）と同様に調査や診断，修復を行う．(2) は直径 $1[mm]$ 程度の穴から処置を行うが，その際，

- 穴の体積に応じた充填剤の量
- 穴の密度，構造特徴に応じた充填剤の種類や粘度

を正しく決定しないと，充填剤の過不足，合わない粘度の充填剤を無理に注入して木材を痛めるなど，不完全な修復に終ることもある．充填剤は，固化するため再充填は難しく，事前に虫食いの構造特徴などの情報を得ておくことが不可欠である．しかしながら，外観から虫食いの特徴を観察することが不可能であり，内部を調べるためのX線撮影では，2次元平面に投影された陰影となるので，X線吸収係数の大きく異なる金属性の釘や，崩落により大きな空洞になった穴の位置などは確認できるものの，数ミリの虫食いは観察できない．このため，虫食いの損傷の診断，修復は熟練した仏師らの経験に頼らざるを得ないが，このような仏師の数は修復を待つ仏像の数に比して極めて少なく，練度のみに頼っていては，修復が遅々として進まないのが現状である．

このため，内部の状態を3次元的に可視化し，その構造を解析，記述する工学的サポートが強く望まれていた．似たような状況として，医療における人体内部の状態や構造を可視化するX線CT撮影，解析がある[7]．特に管状の構造解析として医用画像では気管支，血管の解析がある．これらは，人体の解剖学的知識を領域抽出や解析に利用している．しかしながら，虫食いは人体の場合と異なり，①背景と連結しており，②凹部は虫食いと外形によるものが混在している．さらに分布には規則性がなく，複数の虫食いが集中して複雑な形状になっているものが多い．このような特徴から既存の医用画像解析を適用することはできない．

本研究では，木造仏像をX線CT撮影し，内部の虫食い穴の形状，構造を仏像形状と虫食い穴の局所的，大局的構造特徴に基づいて，高い精度で構造解析・記述・可視化する方法を与える．

3.　虫食い領域の初期3Dグラフ構造抽出

X線CT画像から仏像内の虫食い領域のグラフ構造を抽出するために，まずCT画像の特徴を解析し，仏像領域と背景，虫食い領域を分離しなければならない．本章ではこれら領域分離，推定手法とグラフ構造抽出アルゴリズム (図1の前半部分) について示す．

3.1　木造仏像のX線CT画像の特徴

図2(a)-(d) に仏像の外観，CT画像列とスライスの一部を拡大したもの，CT値* のヒストグラムを示す．図2(c), (d) より木材と空気のCT値は大きく異なり，ヒストグラムは双方性のピークを持つことがわかる．

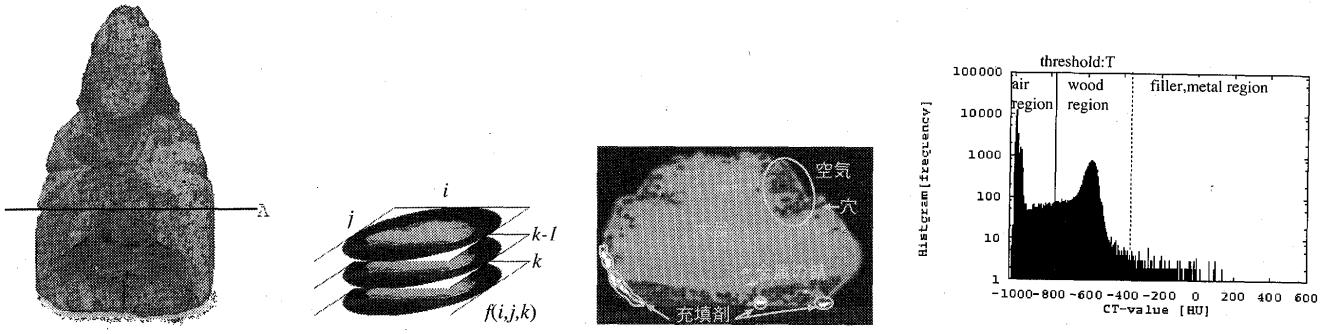
3.2　仏像領域推定

領域抽出手法には多くの手法があるが，仏像の外形の凹凸と虫食い穴による凹凸が混在した複雑な形状において，CT値による閾値処理等により，空気領域中の背景と虫食い領域を分離するのは困難である．このため，虫食い領域を含む仏像領域を推定する必要がある．ここでは，3次元図形融合[9]により虫食い穴を塞いで仏像領域を推定する．3次元図形融合には，拡大 → 縮小と縮小 → 拡大の膨張・収縮処理の組合せがあるが[10]，縮小 → 拡大処理は仏像内部の虫食い穴が拡大し，輪郭部が変形してしまうので拡大 → 縮小の図形融合により仏像領域を推定する[6]．処理過程の概要を以下に示す．

* CT値 f は物質 t の X 線吸収係数 μ_t と水の吸収係数 μ_w と装置固有の定数 K を用いて次式で与えられる[8]．$f_t = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \times K \ [HU]$

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers



(a) Appearance of a wooden statue of Buddha　(b) X-ray CT images　(c) An X-ray CT image at the cross section **A** of (a)　(d) The histogram of CT values of (b)

図 2　仏像の概観と X 線 CT 画像
The appearance of a wooden statue of Buddha and a X-ray CT image.

(a) 初期仏像画像　(b) 拡大 → 縮小　(c) 孤立点除去

図 3　仏像領域の推定例
An example of estimation of Buddhist region.

仏像領域推定処理

入力：X 線 CT 画像 $f(i,j,k)$，i,j はスライス k における座標 (図 2(b)) を表す

出力：仏像画像 $h(i,j,k)$

Step1　初期仏像画像の決定

CT 画像の 2 値化処理により，初期仏像領域を抽出する (図 **3**(a))．

Step2　外部と連結した虫食い穴の融合

初期仏像領域に対し拡大 → 縮小の図形融合を行い，背景と連結した穴を埋める (図 3(b))．

Step3　仏像領域内部の孤立点の除去

step2 で融合出来なかった内部の空気領域を除去し，仏像領域を推定する (図 3(c))．

3.3　虫食い領域の抽出

上記の仏像領域推定結果を元に，仏像画像内部に位置する空気領域を虫食い領域として抽出する．処理の概要を以下に示す．

虫食い領域抽出処理

入力：X 線 CT 画像 $f(i,j,k)$ と推定した仏像画像 $h(i,j,k)$

出力：虫食い画像 $w(i,j,k)$

各スライス k における虫食い領域の CT 値の閾値を T_k とし，虫食い画像 $w(i,j,k)$ を式 (1) より得て，連結する 1 の値の各かたまりを虫食い領域と呼び $C_{k,l(k)}$ と表す．ここで $l(k)$ は，スライス k における各かたまり (虫食い領域) に割当てたラベルを表す．

$$w(i,j,k)=\begin{cases}1, & h(i,j,k)=1 \text{ かつ } f(i,j,k)\leq T_k\\ 0, & otherwise\end{cases} \quad (1)$$

3.4　3D グラフ構造抽出

仏像内の虫食い穴には閉路が存在する上，分岐規則もないため木構造による解析 [7] は適用できない．このため 3D グラフでノードとエッジにより虫食い領域を解析する．3D グラフ構造抽出処理の概要を以下に示す．

3D グラフ構造抽出処理 [6]

入力：虫食い画像 $w(i,j,k)$

出力：初期 3D グラフ $Gr^0=(N^0,E^0)=\{Gr_1^0,Gr_2^0,\cdots\}$

Step1　ノード作成

各虫食い領域 $C_{k,l(k)}$ にノード $n_{k,l(k)}$ を割当てる．ノードの始まりを始点 $n^1_{k,l(k)}$ とし，ノードの集合を $N^0=\{n_{k,l(k)}:k\in K,l(k)\in L\}$，$K$：全スライス数，$L$：全ラベル数 とする．

Step2　幾何情報の取得

各虫食い領域 $C_{k,l(k)}$ の面積 $S_{k,l(k)}=\mid C_{k,l(k)}\mid$ と重心 $\boldsymbol{g_{k,l(k)}}$ を求める．

Step3　ノードの誤抽出の削除

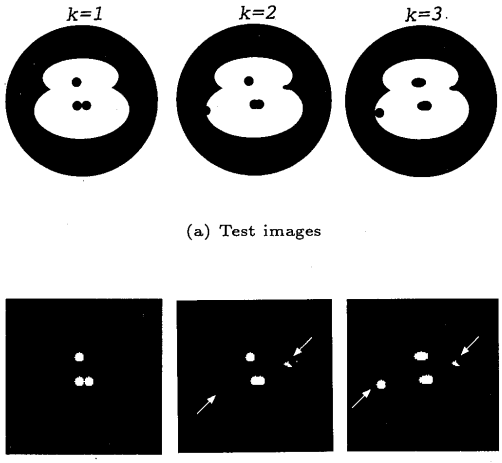
各虫食い領域 $C_{k,l(k)}$ の近傍* $B_{k,l(k)}$ を定義する．仏像領域 H と背景領域 A 内にある $B_{k,l(k)}$ の要素数をそれぞれ $|B^H_{k,l(k)}|$，$|B^A_{k,l(k)}|$ とし，この比 $Q_1(n_{k,l(k)})$ を式 (5) で与えると，$Q_1(n_{k,l(k)})$ が大きいほど背景領域に属する可能性が大きくなることから，これが設定した閾値 T_{Q_1} 以上の時，不適切なノードとして $n_{k,l(k)}$ を削除する．同様に，$|B^A_{k,l(k)}|$ と虫食い領域の面積 $S_{k,l(k)}$ の比 $Q_2(n_{k,l(k)})$ を式 (6) で与えると，$Q_2(n_{k,l(k)})$ が大きいほど背景領域に属する可能性が大きくなることから，閾値 T_{Q_2} を設定して不適切なノードを削除する．閾値 T_{Q_1},T_{Q_2} は実験により決定する．

$$B_{k,l(k)}=\left\{(i,j,k)\in\overline{C_{k,l(k)}}:\mathcal{N}_m\cap C_{k,l(k)}\neq\phi\right\} \quad (2)$$

* $\mathcal{N}_m$: $(i,j,k)\in Z^3$ の m 近傍の点の集合

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers



(a) Test images

(b) The example of gallery regions extraction

図 4　抽出誤差が発生する例
The example which an extraction error generates.

$$B^{H}_{k,l(k)} = \left\{(i,j,k) \in B_{k,l(k)} : B_{k,l(k)} \cap H\right\} \quad (3)$$

$$B^{A}_{k,l(k)} = \left\{(i,j,k) \in B_{k,l(k)} : B_{k,l(k)} \cap A\right\} \quad (4)$$

$$Q_1(n_{k,l(k)}) = \frac{|\,B^{A}_{k,l(k)}\,|}{|\,B^{H}_{k,l(k)}\,|} \quad (5)$$

$$Q_2(n_{k,l(k)}) = \frac{|\,B^{A}_{k,l(k)}\,|}{S_{k,l(k)}} \quad (6)$$

Step4　エッジ作成 (虫食い穴の連結性の抽出)

$C_{k,l(k)}$ と $C_{k+1,l(k+1)}$ の要素 (画素) が 3 次元空間で連結しているならば，エッジ $e(n_{k,l(k)}, n_{k+1,l(k+1)})$ を作成する．エッジの集合を $E^0 = \left\{e(n_{k,l(k)}, n_{k+1,l(k+1)}) : k \in K, l(k) \in L\right\}$ とする．

Step5　グラフ作成

グラフはノードとエッジの集合の組から成り，$Gr^0 = (N^0, E^0)$ と表す [11]．エッジでつながるノードのかたまりを部分グラフ Gr^0_i とすると，グラフは部分グラフの集合 $Gr^0 = \left\{Gr^0_1, Gr^0_2, \cdots\right\}$ で表すこともできる．

3.5　初期 3D グラフ構造抽出の問題点

仏像表面は，仏像外形の凹凸と虫食い穴の表出による凹凸が混在する上，これらの大きさはまちまちである．図形融合は，融合回数により埋める凹部の大きさを変えられるが，大きさの違いが個々別々である仏像外形と虫食い穴の表出とを分離するのは困難である．このため，図 4(矢印の部分) に例示するように，虫食い領域の抽出処理において抽出漏れや誤抽出が生じる．これらの抽出誤りにより，その部分でのグラフ構造抽出に誤差が生じるだけでなく，連結する，あるいは近傍のグラフ構造抽出にも誤差を生じてしまう．

初期 3D グラフ構造抽出では，各ノードに対してスライス内および近傍のスライスとの関係に基づいて，虫食い穴として不適切なノードの削除を行って上記の問題に対応している．しかしながら，仏像外形の凹部は数スライスから数十スライスに及ぶため，近傍との関係だけでは誤抽出したノードの削除は充分には行えない．しかも，抽出漏れには対応できないため初期 3D グラフ構造に抽出誤りが散見される．

このため局所的な処理だけでなく，大局的なグラフ構造特徴に基づいた初期 3D グラフ構造の修正手法を考える．

4.　3D グラフ構造の再構築による抽出誤りの修正

初期 3D グラフのエッジ e_i とノード $n_{k,l(k)}$ の位置情報を用いて，部分グラフを探索し，仏像内の虫食い穴の大局的なグラフ構造特徴を基に，虫食い穴の 3 次元構造として不適切な構造を修正して 3D グラフを再構築し，抽出漏れと誤抽出を修正する手法を提案する (図 1 の後半部分)．さらに，抽出した 3D グラフにより虫食い領域の復元手法を示す．

4.1　3D グラフによる欠落ノードの復元

外部に接した始点ノードの抽出漏れがあると，修復作業において充填剤を注入するのに重要な表出した虫食い穴の位置を見逃すことになる．このため初期 3D グラフで，抽出漏れにより部分グラフ Gr^0_i から欠落した始点ノード n^1 を復元する．図 5(b) に再構築の必要な欠落ノードの例を示す．図 5(b) は，ノード $n_{k,l(k)}$ の現在の始点ノード $n^1_{k-1,l(k-1)}$ が外部と連結しており，スライス $k-2$ に削除された領域 $C_{k-2,l(k-2)}$ が存在する．このとき，$n^1_{k-2,l(k-2)}$ を始点ノードとして復元する．以下に処理の概要を示し，図 6 に処理の詳細を示す．

3D グラフによる欠落ノードの復元

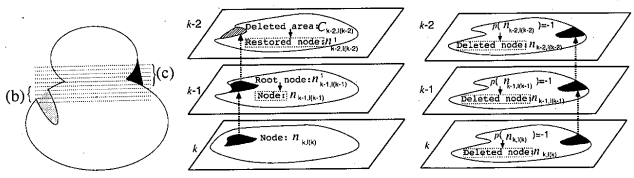
入力：初期 3D グラフ $Gr^0 = \left\{Gr^0_1, Gr^0_2 \cdots\right\}$
出力：修正 3D グラフ $Gr^1 = \left\{Gr^1_1, Gr^1_2 \cdots\right\}$

Step1　始点の位置のチェック

各部分グラフ Gr^0_i の始点ノード $n^1_{k,l(k)}$ に対して，$|B^A_{k,l(k)}| > 0$ を判定して外と連結するノードを見つける．

Step2　新しい始点ノードの作成

もし始点ノード $n^1_{k,l(k)}$ の上に削除領域 $C_{k-1,l(k-1)}$ が存在するならば，$n_{k-1,l(k-1)}$ を復元しルートノードを変更する．



(a) The model of intermingled concave area　(b) A certain incorrect-deleted region $C_{k-2,l(k-2)}$　(c) The concave area of the incorrect-extracted statues

図 5　3D グラフ構造により再構築するノード例
The example of a node reconstructed according to 3D graph structure.

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers

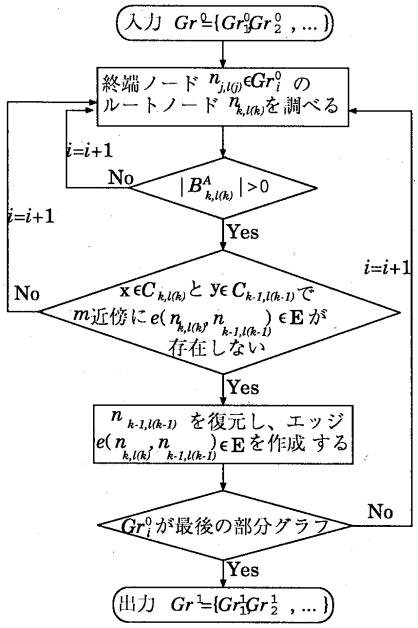


図 6 3D グラフによる欠落ノードの復元
Restoration processing of lack nodes.

Step3 新しいエッジの作成

$n_{k,l(k)}$ と $n^1_{k-1,l(k-1)}$ の間に $e(n^1_{k-1,l(k-1)}, n_{k,l(k)})$ を作成する．

4.2 誤抽出された不要ノードの削除

外形の凹部による誤抽出は複数のスライスに及び，誤抽出されたノードが他のノードと連結するなど，誤差の影響が伝搬する．例えば，図 5(c) では複数のスライスにおいて形状の凹部を誤抽出しており，連結して部分グラフの一部を形成している．今，虫食い穴の直径を $0.1-3[mm]$ と想定し，スライスの間隔を $1[mm]$ とすると，虫食い穴であれば少なくとも $4[slice]$ 以内には仏像領域内のみに接するノードを持つ部分グラフとなる．したがって，ノードのすべて，もしくは $4[slice]$ を越えて背景に接するノードを持つ Gr_i^1 を探索し，不要なノードを削除する．以下に処理の概要を示し，図 **7** に処理の詳細を示す．

3D グラフによる誤抽出されたノードの削除

入力：修正 3D グラフ $Gr^1 = \{Gr_1^1, Gr_2^1 \cdots\}$

出力：3D グラフ $Gr = \{Gr_1, Gr_2 \cdots\}$

Step1 ノードの位置に対しフラグを付ける

各部分グラフ Gr_i^1 のノード $n_{k,l(k)}$ に対し式 (7) の条件により，各ノードにフラグ $p(n_{k,l(k)})$ を付ける．-1 のフラグは背景に接するノードであることを表す．

$$p(n_{k,l(k)}) = \begin{cases} -1, & |B^A_{k,l(k)}| > 0 \\ 1, & |B^A_{k,l(k)}| = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Step2 上下のフラグをチェックする

ノード $n_{k,l(k)}, n_{k+1,l(k+1)}$ のフラグが異なれば，ノード $n_{k,l(k)}$ に一旦保留フラグを付け，その後，上のノード $n_{k-1,l(k-1)}$ と同じフラグを付ける．

Step3 ノードの削除

部分グラフ Gr_i^1 において，$4[slice]$ 以上 $p(n_{k,l(k)}) = -1$ のノードが続く時，このノードを削除し Gr_i を出力する．

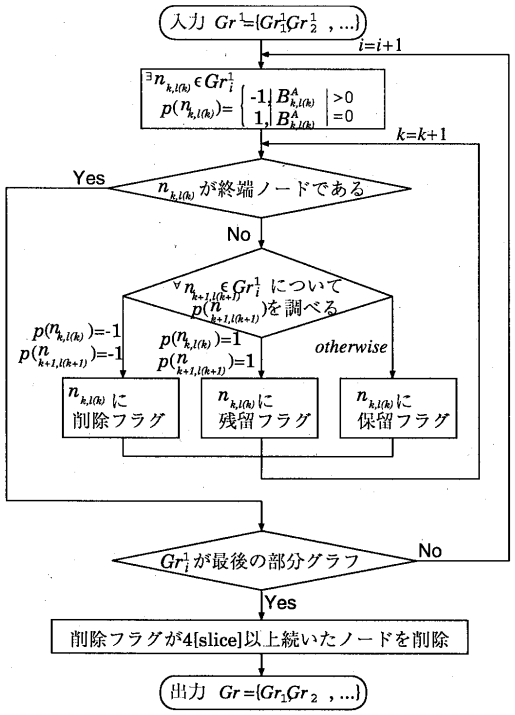


図 7 3D グラフによる誤抽出された不要ノードの削除
Deletion of the incorrect partial node.

(a) Front view (b) Side view

図 8 グラフ構造より復元した虫食い領域 $r(i,j,k)$ を 3 次元に可視化した例
The example which visualized the gallery regions restored from graph structure to three dimensions.

4.3 3D グラフからの虫食い領域の復元

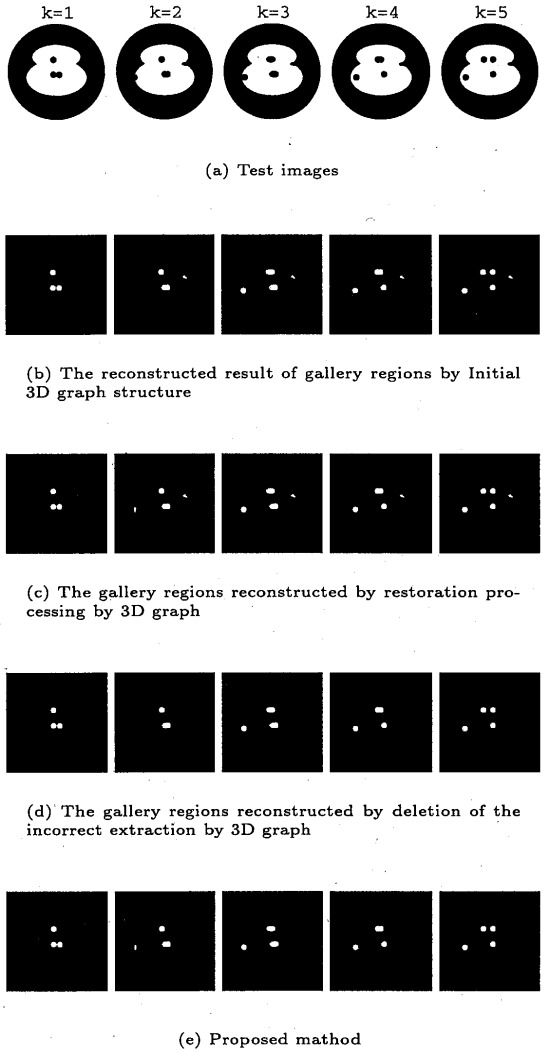
抽出した 3D グラフは各ノード $n_{k,l(k)}$ にノードに対応する虫食い領域 $C_{k,l(k)}$ の画素の位置情報も持っている．したがって，式 (8) により $C_{k,l(k)}$ が持つ画素の位置を塗り潰すことで，復元画像 $r(i,j,k)$ を得ることができる (図 **8**)．

$$r(i,j,k) = \begin{cases} 1, & (i,j,k) \in C_{k,l(k)} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

また，3D グラフのエッジ $e(n_{k,l(k)}, n_{k+1,l(k+1)})$ 情報から各ノードの重心 $\boldsymbol{g_{k,l(k)}}$ と $\boldsymbol{g_{k+1,l(k+1)}}$ を結ぶことで，トポロジカルな情報のみをグラフとして表現することもできる．

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers



(a) Test images

(b) The reconstructed result of gallery regions by Initial 3D graph structure

(c) The gallery regions reconstructed by restoration processing by 3D graph

(d) The gallery regions reconstructed by deletion of the incorrect extraction by 3D graph

(e) Proposed mathod

図 9　テスト画像に対するグラフ構造抽出による虫食い領域抽出実験結果の例
Test images and the experimental results extracted gallery regions.

5. 3D グラフ構造抽出実験

本手法により 3D グラフ構造を抽出し，結果の可視化を行う．まず抽出精度を求めるため，虫食い領域が既知であるテスト画像に対して実験し，次に CT 画像に対し実験を行った．

5.1 テスト画像によるグラフ構造抽出実験

虫食い領域が既値であり，背景と連結する穴を含むテスト画像 ($129 \times 129[pixel], 5[slice]$ 枚，**図 9**(a)) を CG により作成した．図 9(b) は初期 3D グラフにより虫食い領域を復元した画像，(c) は 3D グラフにより欠落ノードを復元した画像，(d) は 3D グラフにより誤抽出されたノードを削除した画像，(e) は復元と削除を組合せた本手法による画像である．初期 3D グラフで欠損した領域，誤抽出した領域が図 9(e) では正しく抽出できていることがわかる．また，虫食い領域の抽出誤差 ϵ_k を式 (9) により計算した結果を**表 1** に示す．

表 1　虫食い領域の抽出誤差
The extraction error of gallery regions.

		k[slice]				
		1	2	3	4	5
虫食い領域		141	143	192	170	188
ϵ_k $[pixel]$	初期 3D グラフ	0	2	18	18	18
	欠落ノードの復元	5	18	18	18	18
	誤抽出の削除	0	20	0	0	0
	本手法	0	0	0	0	0

$$\epsilon_k = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} |r(i,j,k) - \tilde{r}(i,j,k)| \tag{9}$$

ここで $r(i,j,k)$ は正解画像の輝度値，$\tilde{r}(i,j,k)$ は推定した画像の輝度値，k はスライス番号，I, J は画像サイズである．表 1 に示すように，初期 3D グラフでは $k=2$ において背景と連結した穴，$k=2,3,4,5$ において形状の凹部に誤差が生じており，他の手法も単体で用いた場合は誤差が生じているが，本手法は正しく虫食い領域を抽出できている．

5.2 X 線 CT 画像に対するグラフ構造抽出実験

木造仏像の X 線 CT 画像 ($512 \times 512[pixel]$, $173[slice]$, スライス間隔 $1[mm]$) に対し本手法を適用し，虫食い穴の 3D グラフ構造抽出実験を行なった．

パラメータの決定

仏像領域を得るための閾値 T_f は予備実験から $T_f = -800[HU]$ とした．直径 $3[mm]$ 程度の穴を塞ぐ図形融合の繰り返しパラメータ u は，解像度が約 $0.3[mm/pixel]$ であるため $u=4$ とした．

虫食い領域の抽出結果

X 線 CT 画像に対して，虫食い領域を抽出した結果の一例を**図 10** に示す．(a) は X 線 CT 画像，(b) は仏像領域推定画像，(c) は虫食い領域画像，(d) は比較のため閾値処理による虫食い領域抽出結果を示す．図 10(c) において，閾値処理だけでは抽出できなかった背景と連結した虫食い領域が仏像領域を推定することで抽出できているが，仏像領域推定の拡大処理の影響で，仏像輪郭部周辺に誤抽出 (図 10(c) の矩形で囲った部分) が生じている．

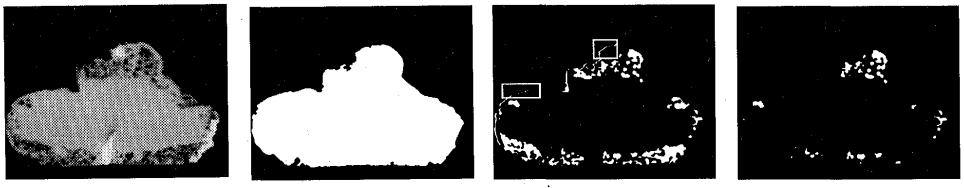
3D グラフ構造による虫食い穴の抽出実験

抽出した虫食い領域から初期 3D グラフ構造に基づいて虫食い穴を抽出した結果を**図 11**(a) に示す．グラフ構造に基づいて虫食い穴を抽出することにより，上記した仏像輪郭周辺部の誤抽出を除去できたが，仏像外形の凹凸による誤抽出 (図 11(a) の矩形で囲った部分) は除去できていない．

次に，本手法による 3D グラフ構造抽出による虫食い穴の抽出結果を図 11(d) に示す．初期 3D グラフ構造に基づく抽出結果 (図 11(a)) と比べて，誤抽出が良好に除去できている．また，抽出漏れについても良好に修正できていることを確かめている．さらに，図 11(b), (c) に示す欠落ノードの復元，不要ノードの削除処理のみによる結果と比べると，本手法が復元と削除による修正処理によって 3D グラ

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers



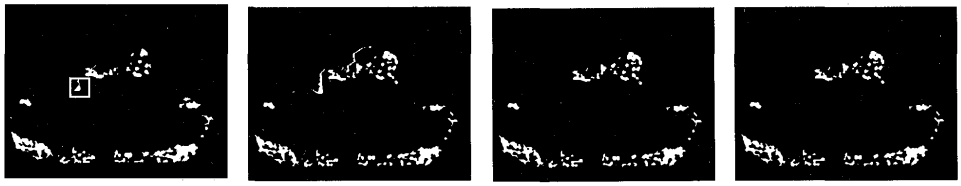
(a) A X-ray CT image at the slice $k = 99$, $f(i,j,k)$

(b) The estimation result of a statue region including galleries $h(i,j,k)$

(c) The extraction result of gallery regions $w(i,j,k)$

(d) The extraction result of gallery regions by thresholding $w(i,j,k)$

図 10 X 線 CT 画像に対する仏像領域推定例と虫食い領域抽出例 (slices of $k = 99$)
X-ray CT images and the experimental results of region estimation and the extracted results of gallery regions (slices of $k = 99$).



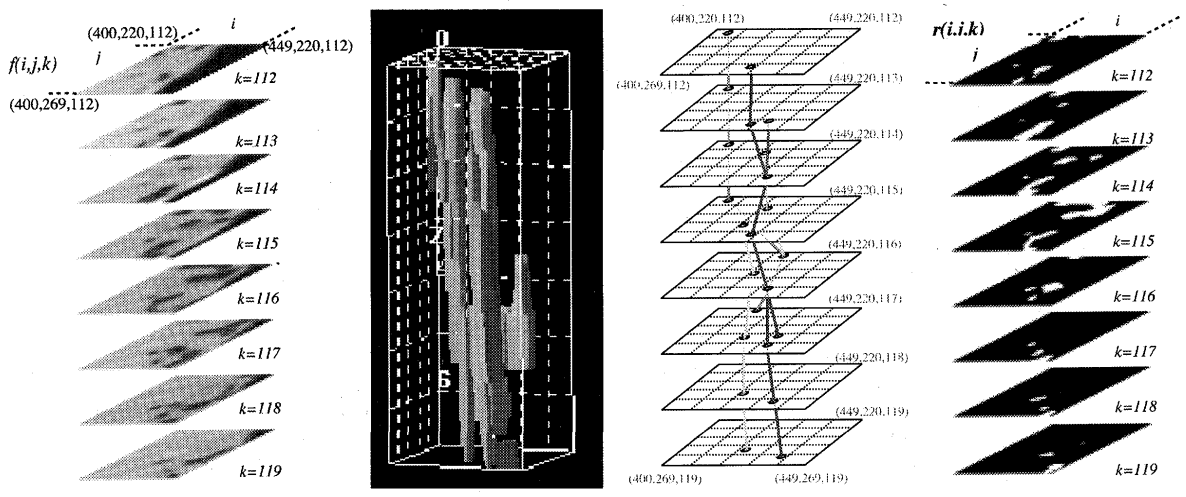
(a) The reconstructed result of gallery regions by Initial 3D graph structure

(b) The gallery regions reconstructed by restoration processing by 3D graph

(c) The gallery regions reconstructed by deletion of the incorrect extraction by 3D graph

(d) Proposed method

図 11 初期 3D グラフによる虫食い穴抽出例と本手法による虫食い穴抽出例 ($k = 99$)
The example of gallery regions extraction by initial 3D graph, and the example of gallery regions extraction by our method(slice of $k = 99, r(i,j,k)$).



(a) A part of cross-sectional X-ray CT images

(b) The 3D image of gallery region

(c) The rough sketch of the gallery regions using edge information

(d) The reconstruction image from node information

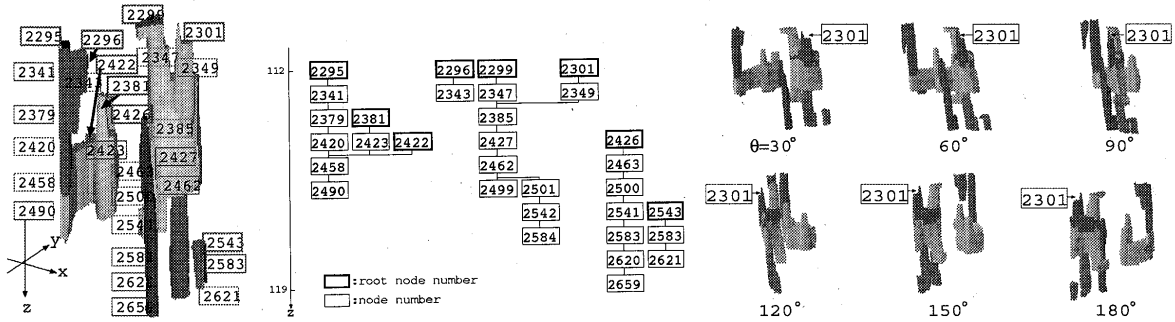
図 12 虫食い穴の 3D グラフ構造と可視化例
The graph structure and the example of visualization of gallery regions.

フ構造を精度良く抽出できていることがわかる．

穴の構造を詳細に見るために一部を拡大して示す．図 **12** (a)-(d) に CT 画像の一部，虫食いの 3 次元画像，3D グラフのエッジ情報を可視化した簡易的な線画，(d) は (c) のグラフ構造から復元した画像を示す．これらは，分岐や合流のある虫食いの構造を表しており，特に図 12(d) のようにノード情報から $r(i,j,k)$ を復元したり，図 12(c) のようにエッジ情報からトポロジカルな情報のみを表現することにより，虫食いの大きさや連結をよりわかり易く可視化できる．また図 12 と同じ位置を 3D グラフにより，各分岐ごとに色分けして可視化したものを図 **13** に示す．(a) は各分岐ごとに色分けしノード番号を振ったもの，(b) は (a) に対応する部分のノードのリスト表現，(c) は (a) を異なった角度の視点から表した図である．図 13(a)，(b) により枝の長

NII-Electronic Library Service

The Institute of Image Information and Television Engineers



(a) A part of gallery region from the front view

(b) The relation between nodes of a graph

(c) Rotating a part of gallery region for different view angle θ

図 13　3D グラフの情報を用いて虫食い領域を分岐ごとに可視化した例
The example which visualized the gallery regions for every branch using the information on graph.

さ，分岐の関係をより詳細に見ることができる上，(c) のように領域を回転させる等、視点の位置を変えることも容易であることから，各枝の分岐や合流の位置などを詳細に見ることができる．

6. むすび

木造仏像の損傷のうち，最も深刻な虫食いに注目し，X 線 CT 画像から虫食い領域を 3D グラフ構造により抽出し，虫食い穴の構造の詳細な特徴を表す手法について検討した．背景と連結した虫食い領域を抽出するため，図形融合処理の組合せにより仏像領域を推定し，3D グラフ構造抽出により虫食い領域抽出を試みたところ仏像の凹凸と，仏像表面に表出した虫食い穴による凹凸とが混在するために，虫食い領域の抽出漏れ，誤抽出が生じた．このため，3D グラフ構造の大局的特徴に基づいて，虫食い構造として不適切な構造を除去する手法を与え，精度よく虫食い領域を抽出できることを示した．

抽出した 3D グラフ構造により，全体像や分岐ごとの選択的な可視化が行える．修復の担当者らによると，このような可視化により，穴の分岐した枝ごとの位置関係が明確にわかるので，修復の際の適切な判断ができ，さらに修復用の樹脂の選択や修復の要，不要を決定する際に，有用であるとの評価を得ている．このように本手法は，仏師ら修復担当者の仏像の損傷の診断と，修復作業の効率化に大きく寄与するものと期待している．

今後の課題として，3D グラフ構造抽出データからの仏像の損傷の定量的な評価などを考えている．

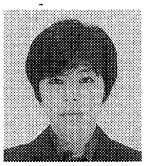
最後に，日頃貴重なご助言をいただきます本学宮原誠教授，浅野哲夫教授に深謝致します．また，本研究の仏像の X 線 CT データを撮影していただいた東葛テクノプラザ研究開発室の細谷昌裕氏，金沢大学医学部放射線科の小林健氏，放射線技師の辻井秀夫氏に深謝致します．本研究の機会を与えていただいた，故 内山昭太郎 東京芸術大学名誉教授に心より感謝致します．

〔文　献〕

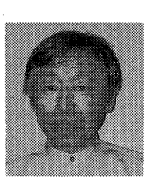
1) 長澤，稲葉：“木彫文化財の修復への放射線利用”，放射線と産業 Radiation & Industries，**56**，pp.4-8，(1992)
2) 岩崎：“文化財の保存と修復”，NHK ブックス，(1977)
3) 西岡，松久，青山：“木のこころ仏のこころ”，春秋社，(1996)
4) 三浦，本間，馬淵：“X 線断層撮影による仏像の調査”，計測自動制御学会論文集，**16**，pp.239-244，(1980)
5) 三浦，藤井：“高エネルギー X 線 CT スキャナによる金銅仏の調査”，古文化財の科学，**32**，pp.40-46，(1987)
6) 岩本，剣持，小谷，長澤：“木造仏像の X 線 CT 画像からの虫食い領域の 3 次元グラフ構造抽出”，Research Report of JAIST，IS-RR-2003-016，ISSN 0918-7553，(2003)
7) 井関，小畑，大松，柿沼：“胸部 CT 画像からの気管支 3 次元木構造の抽出の一手法”，信学論，**D-II**，**J80**，10，pp.2841-2847，(1997)
8) 福田：“放射線技師のための物理学”，pp234-235，東洋書店，(1996)
9) 鳥脇：“画像理解のためのディジタル画像処理 (II)”，昭晃堂，(1988)
10) 長谷川，森，鳥脇，安野，片田：“3 次元ディジタル画像処理による CT 画像からの肺癌候補領域の自動抽出”，信学論，**D-II**，**J76**，8，pp.1587-1594，(1993)
11) 浅野，増沢，和田：“アルゴリズム論 IT Text”，オーム社，(2003)

岩本　純子（いわもと　じゅんこ）2000 年，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了．現在，同大学博士後期課程在学中．X 線 CT 画像解析の研究に従事．

小谷　一孔（こたに　かずのり）1983 年，長岡技術科学大学修士課程修了．同年日立製作所家電研究所に勤務．1990 年，長岡技術科学大学博士課程修了．同年同大学工学部助手．1991 年，同助教授．現在，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授．符号化，表情解析，ＣＧの研究に従事．工博．正会員．



剣持　雪子（けんもち　ゆきこ）1993 年，千葉大学工学部情報工学科卒業．1998 年，同大大学院自然科学研究科博士課程修了．同年より，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手．その間，2000～2002 年，仏国 ESIEE 客員研究員．2003 年より，岡山大学工学部情報工学科講師，現在に至る．離散幾何学・離散位相幾何学的アプローチによるディジタル画像解析の研究に従事．工博．



長澤　市郎（ながさわ　いちろう）1962 年，東京芸術大学専攻科卒業．東京芸術大学美術学部保存修復技術 (彫刻担当)．1980 年，講師，1988 年，助教授，1995 年，同大独立専攻文化財保存学教授．彫刻文化財の保存修復に関する研究に従事．

NII-Electronic Library Service