

平成30年 4月30日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25252033

研究課題名(和文) 木製文化財の非破壊材質評価とデジタルアーカイブ作成

研究課題名(英文) Non-destructive wood identification and evaluation of cultural properties and their archives.

研究代表者

杉山 淳司 (SUGIYAMA, Junji)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：40183842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,300,000円

研究成果の概要(和文)：画像情報に基づく樹種識別を、観察者の目を人工知能に置き換えることで、これまで不可能であった解剖学的な近類種の識別を可能にした。同時に、識別技術の他分野への学際的な展開を可能とした。即ち、人の設計する特徴抽出と判別器の組み合わせに加え、特徴抽出から知的判断までの全てを多層のニューラルネットに委ねる深層学習を木材識別に実装した。応用面では、文化財木製品の非破壊診断に利用できるCT画像による識別モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：By replacing observer's eyes to artificial intelligence, we have made it possible to identify anatomically closely related species that were impossible so far on the basis of microscopic observation. At the same time, it enabled interdisciplinary development of identification technology to other fields. In addition to combinations of feature extraction and discriminators designed by humans, deep learning that leaves all processes from feature extraction to intellectual judgment to multilayered neural networks was implemented for wood identification. On the application side, a discrimination model based on CT images that can be used for nondestructive diagnosis of cultural property wood products was constructed.

研究分野：森林科学

キーワード：樹種識別 ニング 機械学習 光学顕微鏡 デジタル画像 X線CT グレーレベル同時生起行列 スケール不変特徴変換 ディープラ

1. 研究開始当初の背景

昨今、寺社関連の歴史的建造物の多くで耐震補強などの改修が行なわれている。歴史的文化財には素性の明るい良材が使われるとともに、湿潤な軒など腐朽を嫌うところにはヒノキ科の木材というように「適材適所」の物作りを見ることが出来る。これは技術者や職人が素材の特性を熟知し、技術を最適化したからに他ならない。

木材は、樹木という生き物の形態ではなく、木材として手にすることが普通であるので、木材の樹種を識別することは、考古学や歴史学など様々な局面で有用な情報となる。そのために、光学顕微鏡観察により組織学的な特徴を見極めて樹種識別するという手法が発達しており、現在属レベルでの識別が可能となっている。もっとも、遺伝子情報を用いた識別では種の同定が可能であるが、適用できる樹種が限られており、所謂一般的な識別調査にはまだ不十分である。

近年、近赤外などのスペクトルと多変量解析を組み合わせたケモメトリクス解析も樹種識別に利用されている。特定の種間の判別分析などに有効な方法ではあるが、判定基準に主観が加わることもあるので、研究者間で結果が異なることも少なく無い。

申請者らも同属異種間でかつ組織上識別が極めて難しいヒノキとサワラ、アカマツとクロマツなどについて、匂いや赤外を用いた樹種識別の可能性を検討してきた。残念ながら測定サンプルには破壊を伴う粉体試料が必要であるものの、樹種特性が検出できることが定量的に確認された。特に両者を併用することで種の特定が可能であった。

文化財木製品の非破壊検査という点に関して、申請者らはシンクロトン放射光を用いた高解像度 X 線トモグラフィ法が樹種識別に有効であることをいち早く証明した^{1,2)}。修理の際に離落した微小片から得られるデジタルデータは分解能が 0.5 マイクロメートルで、あらゆる方位からの断面観察、立体構造の定量などを可能とした。ただ、サンプルの収集は我々ではできないこと、また計画的な放射光実験が組めないことなどが課題として残った。

2. 研究の目的

博物館は展示目的で文化財を移動ならびに保管するためのセキュリティーや環境が担保されているため、多くの文化財を調査することが可能である。事実、九州国立博物館ではこの 5 年間に興福寺の阿修羅像をはじめとし、約 1500 点の文化財や学術資料が通過し、基礎調査として空間分解能約 50 マイクロメートルで X 線 CT 像を撮影してきた。

本研究の目的は、大学の有する非破壊・非接触の木質の解析技術と、博物館の有する文化財の収集・保存・調査・共同研究機能を融合させ、文化的、歴史的に貴重な国宝級木製品の材質の非破壊評価する方法を確立し、そのデ

ジタルアーカイブを作成して教育普及に役立てることである。

3. 研究の方法

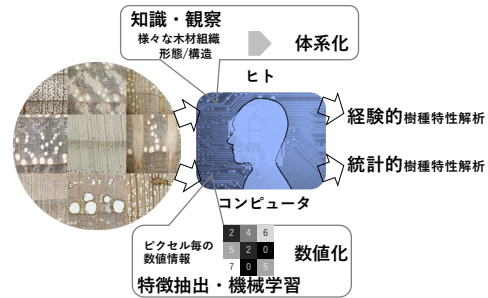


図1 人と計算機による識別

既存の解剖学では、図 1 に示すように、木材組織に現れる様々な構造を調べ、形、大きさ、道管やその他の細胞種の配列などの特徴を記述し、解剖学などで体系化された図鑑など知識と比較することで、経験的に樹種を同定するという作業であった。これが、人がコンピュータに置き換わるとどう変わるのか。顕微鏡画像そのものはデジタルデータであり、ピクセルごとに異なる数値をもつ、いわば数値情報である。人は、形や大きさというアナログな表現を使う一方、コンピュータは、最初から画像を数値データとしてとらえている。その数値の並びに現れる(濃度)勾配、周期性、不均一性などのパターンを数値化し、画像の特徴として記憶する。そのようにして求めた画像の代表的な数値を、膨大な数のラベル付き画像データベース(樹種が判明している画像の集大成)から同様の方法で特徴を抽出して構築した樹種識別用の判別モデルに代入して、統計的かつ確率的に近似する樹種を特定する。したがって、人とコンピュータでは、全く見ているものが異なる。

このようなコンピュータによる機械学習を用いた人工知能の設計にはいくつかの方法がある(図 2)。一つは、人が設計したルールに従って、人が行えないような判定をコンピュータに下させるという試みである。例えば、人工衛星の画像から、森林、農地、市街地、海、工業地帯などを即座に見分けるような技術である。このような機械学習は二つの重要なプロセスで構成される。一つ目は、デジタル画像を、人みずからが設計した特徴抽出法により数値化すること。二つ目は、数値化した特徴を、人が設計したルールを盛り込んだ判別

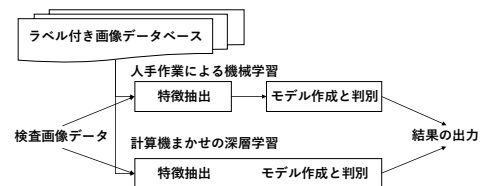


図2 薄層学習と深層学習

器にかけることである。この方法は、問題が複雑になる（特定のための条件や必要な設定が増える）と、マンパワーではルールの記事が追いつかなくなるという弱点もある一方、「何をみるか」を人が設計するので、コンピュータが「何をみているか」検証しやすいという利点も持ち合わせている。

一方、第2の方法であり、今の人口知能ブームを牽引しているのは、いわゆるディープラーニング（深層学習）と呼ばれる機械学習技術の進化形である。これは、先に述べた一般的な機械学習に必要な二つのプロセスを、人が介入することなく自動化したものに他ならない。人が介入するルールは一切無視して、大量のデータをコンピュータに読み込ませ、統計的、確率的なアプローチのみから結論を導くというものである。ビッグデータの活用も相まって、精度はうなぎ上りに上昇し、深層学習は様々な分野に急速に広がっている。

本研究では、この2つの方法を木材の画像データの機械学習に応用した。

4. 研究成果

5年間の研究機関を通して、次の点を達成した。

(1)九州国立博物館で撮影した標準木材サンプルのCT画像を用いた木材識別：まず、木彫像に利用されてきた10種類の木材サンプルについて、九州国立博物館で撮影されてきた仏像と同程度の低分解能で、データベース画像を収集した。これらの画像に対して、グレーレベル同時生起行列に基づくハラリックパラメータを求めて特徴量とした(図3)。計算はR言語で実装し、wvtoolというパッケージとして公開した(その他参照)。kNNを判別器に用いた場合、95%を超える精度で個体の識別が可能であることを明らかにした(論文8)

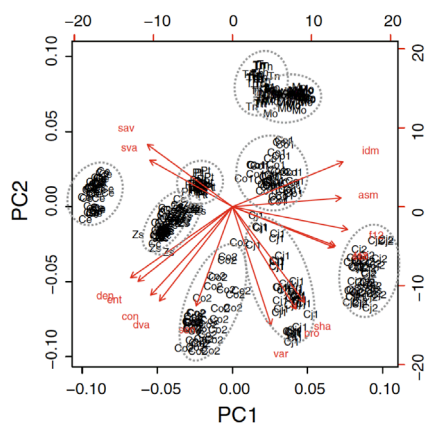


図3 ハラリックパラメータによる樹種毎の主成分クラスタリングの実際。

(2)韓国海印寺の保有する八萬大経蔵(版木)に用いられた樹種同定にむけて：非破壊診断が原則なため、表面の実体顕微鏡観察による識別の可能性を調査した。すなわち、候補となる10数種類の広葉樹の標準木材サンプルから実体顕微鏡画像を撮影し、データベース

を構築した。この画像データに対して、ハラリックパラメータや、局所バイナリーパターンなどの特徴量を求め、重み付きk近傍法により判別したところ、高精度の識別モデルが得られた(論文2)。また、奈良文化財研究所が所有する、年輪解析用にデザインされた中程度の分解能を有するCT画像を利用して、同じ木材サンプルについて識別を行ったところ、ほぼ100%精度で樹種同定が可能な識別モデルを構築することができ、現場での実施も可能となった(投稿中)。

(3)光学顕微鏡画像による樹種特性抽出の試み：光学顕微鏡の画像データベースを構築し、これを機械学習に供した。スケール不変特徴変換(SIFT)とよぶ特徴抽出器を用い、識別にはk近傍法やサポートベクターマシン、線形判別分析法などの手法を適用し、識別性能を比較検討した。

ブナ科の検討においては、SIFT特徴量のクラスター分析により、コナラ属コナラ節、クヌギ節、ウバメガシ節において、クヌギ節の晩材がウバメガシに類似しているという、観察からは得られない新しい解剖学的特徴が示唆された(発表6、当学会にて優秀口頭発表賞受賞)。

また、クスノキ科の検討からは、種の識別において、95%以上の高い識別モデルを得るためには画像の解像度が細胞壁厚程度必要であること、また、構造変動は属内において非常に大きく、種より属の識別精度が低いことなどを明らかにした。また、同時に、SIFT特徴量の可視化を試み、人工知能がどこを見ているか検討した(図4、論文1)

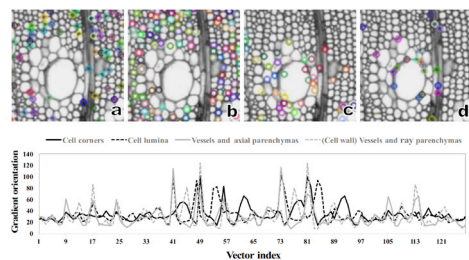


図4 SIFT特徴量をクラスター分析したところ、下段の特徴ベクトルの分布を得た。この4つの分布に相当する特徴点をもとの画像に表皮することにより、計算機が画像のどの部分を見ているかを明らかにした。

(4)文化財所有者、博物館との連携による実際の文化財の識別にむけた試み：九州国立博物館のCT装置により撮影された木材の画像データ、カヤ、アカマツ、スギ、ヒノキの4種類を用いて、深層学習(ディープラーニング)による判定モデルの構築を行なったところ、100エポックで99パーセントの識別率のモデルが構築された。そのモデルを使用して、検査対象となった仏像の頭部、胴部、腕部の心木の画像データの判定を行なった(書籍1)。

明確に結論できることは、3カ所の木材は

異なる可能性が高いということ。ただし、データベースの画像と、実際の文化財画像とは、ノイズや解像度においてかなり変動が大きいため、例えばノイズ除去に用いるフィルター処理により候補が変わることから、人工知能的には悩ましいデータであると言わざるを得ない。しかし結果は結果として、確率・統計的なものなのでこれ以上議論することは避け、現段階での理解や問題点を整理すると以下の通りである。

まず、博物館に導入されているCT装置の画像は、深層学習を用いた樹種識別を実行するのに十分な性能を持っていること。学習用のデータベースが100%識別率のモデルを与えたことで十分に証明された。複数の国立博物館に同性能のマシンが導入されているので、今後さらなるデータベースの充実が期待される。

次に、画像の取得に際しては、密度の指標がわかるように、水を含んだ小瓶を同時に収録しておく。そうすると、空気層と水の部分の濃度から、大雑把ではあるものの、密度の指標を得ることができる。そうすることによって、例えば、サワラやスギなどの密度の低い材の識別に有効である。

さらに、博物館で画像を取得する際には、識別目的で木材部の高精細な画像も取得しておくことをルーチンとすること。画像データベースに匹敵する解像度の画像であれば判定結果も正しく、測定データ自体を画像データベースに追加できる可能性もある。一方、筆者ら解析側も、画像のサイズや解像度の変化にロバストな、しっかりと対応できるモデルを立てる必要があり、双方の努力によって初めて頑強な識別システムとなる。

CT画像撮影装置においても改善する余地はある。例えば、X線光源の強度のばらつきが、試料との相互作用による透過率のばらつきを生じ、二次元検出器の感度のばらつきも加わって再生像にノイズが生ずる。このようなばらつきの影響を抑制する、画像再構成アルゴリズム導入の検討など、ハード・ソフトの進歩にも期待する。

最後に、本研究により取得した画像データは、整理したのちメタデータ（京都大学木材標本番号、採集地等の書誌情報）を加えて、HDFファイル形式としたものを、生存圏研究所データベース(その他参照)として後悔する予定である。

<引用文献>

1. Mizuno, S., R. Torizu, J. Sugiyama 2010, Wood identification of a wooden mask using synchrotron X-ray microtomography, *J. Archeol. Sci.*, 37, 2842-2845.
2. 水野寿弥子、高瀬克彦、杉山淳司 2011 シンクロトロン放射光X線トモグラフィーを用いた木質文化財の樹種識別、*考古学と自然科学*, 62, 85-95

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

1. Hwang SW, Kobayashi K, Zhai S, Sugiyama J (2018) Automated identification of Lauraceae by scale-invariant feature transform, *J Wood Sci* 64:69-77 (査読有)
2. Kobayashi K, Hwang SW, Lee WH, Sugiyama J (2017) Texture Analysis of Stereograms of Diffuse-Porous Hardwood: Identification of Wood Species Used in Tripitaka Koreana. *J Wood Sci* 63:322-330 (査読有)
3. 杉山淳司 田鶴寿弥子 反町始 (2017)平成25年度修復文化財(木造)材質調査報告 鹿苑雑集 17.18:59-62
4. Hwang SW, Lee WH, Horikawa Y, Sugiyama J (2016) Identification of *Pinus* species related to historic architecture in Korea by using NIR chemometric approaches. *J Wood Sci* 62(2):156-167 (査読有)
5. Endo R, Hattori T, Tomii M, Sugiyama J (2015) Identification and conservation of a Neolithic polypore. *Journal of Cultural Heritage*, 16(6): 869-875 (査読有)
6. Hwang SW, Lee WH, Horikawa Y, Sugiyama J (2015) Chemometrics approach for species identification of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. and *Pinus densiflora* for. *erecta* Uyeki. *Korean Wood Sci Technol* 43(6): 701- 713 (査読有)
7. 杉山淳司(2015)韓国の祭祀と面 一古面の材質から一 繊維と工業 71(6):291-295
8. Kobayashi K, Akada M, Torigoe T, Imazu S, Sugiyama J (2015) Automated recognition of wood used in traditional Japanese sculptures by texture analysis of their low-resolution computed tomography data. *J Wood Sci* 61:630-640 (査読有)
9. Horikawa, Y., Mizuno-Tazuru, S., Sugiyama, J.(2015) Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese dipoxylons. *J Wood Sci* 61(3):251-261 (査読有)
10. 杉山淳司(2015)歴史や文化に関わる科学的調査. *海洋化学研究* 28(1):24-29

[学会発表] (計29件)

1. Kayoko Kobayashi, Sung-Wook Hwang, Junji Sugiyama: A Deep Learning Approach to Wood Anatomy」、『韓国木材工学会』、Jinju、韓国、2018年4月
2. Sung-Wook Hwang, Kayoko Kobayashi, Junji Sugiyama: Species-specific features in bag-of-features model, 『韓国木材工学会』、Jinju、韓国、2018年4月
3. Sung-Wook Hwang, Kayoko Kobayashi, Junji Sugiyama: Species specific features for identification of Lauraceae in bag-of-features

- model. 第 68 回日本木材学会、京都、2018 年 3 月
4. 小林加代子, Sung Wook Hwang, 杉山淳司「人工知能による顕微鏡画像の解析 –転移学習を用いた識別モデルの作成と検証–」、第 68 回日本木材学会、京都、2018 年 3 月
 5. 小林加代子, Sung Wook Hwang, 杉山淳司「人工知能による顕微鏡画像の解析 –高解像度画像のディープラーニング–」、第 68 回日本木材学会、京都、2018 年 3 月
 6. 毛笠貴博, 小林加代子, 杉山淳司「ブナ科木材組織の定量に向けたコンピュータビジョンの応用」、第 68 回日本木材学会、京都、2018 年 3 月
 7. 杉山淳司 「人工知能を使って樹種特定に迫る」興福寺中金堂再建記念・興福寺シンポジウム、九州国立博物館、2018 年 3 月 4 日
 8. 小林加代子, 杉山淳司、木材科学における標本資料と電子データ利用の現状. 第 369 回生存圏シンポジウム 生存圏データベース全国共同利用研究成果報告会「モノのデータベースから電子データベースまで」2018 年 3 月 9 日 京都大学生存圏研究所
 9. Sung-Wook Hwang, Kayoko Kobayashi, Shengcheng Zhai, Junji Sugiyama Application of SIFT as a tool for extracting feature from microscopic image for Lauraceae classification. The 12th Joint Seminar of China-Korea-Japan on Wood Quality and Utilization of Domestic Species 2017 年 12 月 18 日, RISH Kyoto University
 10. Junji Sugiyama, Sung Wook Hwang, Kayoko Kobayashi, Takahiro Kegasa, Shengcheng Zhai, Masato Shiotani: Humansphere database and wood collections - Aspects of computer vision wood anatomy –The Eighth International Symposium on Polar Science 2017 年 12 月 6 日 極地研、立川市
 11. Takahiro Kegasa, Kayoko Kobayashi, Junji Sugiyama: Analysis of anatomical feature in Fagaceae wood species with computer vision. 9th Pacific Regional Wood Anatomy Conference バリ、インドネシア、2017 年 9 月
 12. Kayoko Kobayashi, Sung-Wook Hwang, Takayuki Okochi, Won-Hee Lee, Junji Sugiyama : Texture analysis of diffuse-porous hardwood: Identification of wood species used in Tripitaka Koreana. 9th Pacific Regional Wood Anatomy Conference バリ、インドネシア、2017 年 9 月
 13. Junji Sugiyama, Sung Wook Hwang, Kayoko Kobayashi, Takahiro Kegasa, Shengcheng Zhai: Aspects of computer vision wood anatomy. 9th Pacific Regional Wood Anatomy Conference バリ、インドネシア、2017 年 9 月
 14. Sung-Wook HWANG, Kayoko KOBAYASHI, Shengcheng ZHAI, Junji SUGIYAMA: What does computer vision look from wood? 韓国木材工学会、全州 2017 年 4 月
 15. Sung-Wook Hwang, Kayoko Kobayashi, Shengcheng Zhai, Junji Sugiyama: Classification based on image database from Lauraceae using scale-invariant feature transform. 第 67 回日本木材学会 博多、2017 年 3 月
 16. 毛笠貴博, 小林加代子, 杉山淳司: コンピュータビジョンを用いたブナ科木材における解剖学的特徴の解析. 第 67 回日本木材学会、博多、2017 年 3 月
 17. Hairi Cipta, Widyanto Dwi Nugroho, Suyako Tazuru, Junji Sugiyama: Identification of wooden keris sheath using synchrotron X-ray microtomography. 第 67 回日本木材学会、博多、2017 年 3 月
 18. 黄盛煜, 李元熙, 小林加代子, 杉山淳司: 木材を画像に基づいて識別する方法について、韓国木材工学会 ソウル、韓国 2016 年 4 月
 19. 小林加代子, 杉山淳司, 黄盛煜, 李元熙: 八萬大蔵経に用いられる版木の樹種同定に向けた画像認識システムの構築. 第 66 回日本木材学会、東京、2016 年 3 月
 20. 小林加代子 杉山淳司: CT データによる木彫像の樹種推定 平成 27 年度九州国立博物館 10 周年記念シンポジウム X 線 CT を用いた文化財の研究と活用 2015 年 12 月 19 日 九州国立博物館
 21. Kobayashi K, Akada M, Imazu S, Sugiyama J : Toward automated wood identification by texture analysis of CT images. 韓国木材工学会 春川、韓国 2015 年 4 月 11 日
 22. Sugiyama J: Non destructive analysis of wood properties. - toward wood identification of culturally important artifacts. Special seminar at Nanjing Forestry University, Nanjing, China 2015 年 3 月 25 日
 23. Kobayashi K., Akada M., Imazu S., Sugiyama J. Pattern recognition system toward identification of culturally important wooden artifacts. International Symposium on Wood Science and Technology 2015, 2015 年 3 月 1 日
 24. Sugiyama J: Novel technique for wood identification by means of image recognition. Seminar on Conservation of Archeological waterlogged wood, Gadjah Mada University, Indonesia 2015 年 1 月 19 日
 25. Kobayashi K., Akada M., Imazu S., Sugiyama J. Novel approach for wood identification by image recognition. 9th Joint Seminar of China-Korea-Japan on Wood Quality and Utilization of Domestic Species, Akita Japan, 2014 年 10 月 29 日
 26. Horikawa Y, Mizuno-Tazuru S, Sugiyama J: Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese diploxylons. 9th Joint Seminar of China-Korea-Japan on Wood Quality and Utilization of Domestic Species, Akita Japan, 2014 年 10 月 29 日
 27. Sugiyama J: Novel technique for wood identification by means of image recognition. Workshop on the conservation of waterlogged wood, Vietnam Forestry University, 2014 年 8 月 8 日

28. Sugiyama J., Wood identification by image recognition technique, Special seminar at Kangwon National University, April, 17, 2014.
29. Sugiyama J., Wood science for culturally important wooden artifacts. Wood Culture Symposium, Xiamen, China, 2014/3/22

〔図書〕 (計 2 件)

1. 杉山淳司、小林加代子 (2018) 人口知能で樹種と特定する。「阿修羅像の秘密」、朝日選書、出版予定
2. 杉山淳司 (2016) 面の材質を科学する。神戸女子大学古典芸能研究センター編「能面を科学する-世界の仮面と演劇」、勉誠出版

〔その他〕

ホームページ等

(1)木材画像処理用 R パッケージ wvtool:
Image Tools for Automated Wood Identification
<https://cran.r-project.org/web/packages/wvtool/index.html>

(2)生存圏データベース：
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

杉山淳司 (SUGIYAMA Junji)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号： 40183842

(2)研究分担者

今津節生 (IMAZU Setsuo)
奈良大学・文化財学科・教授
研究者番号： 50250379

(3)研究協力者

小林 加代子 (KOBAYASHI Kayoko)
黄 盛 煜 (HWANG Sung Wook)
毛笠 貴博 (KEGASA Takahiro)
金井 いづみ (KANAI Izumi)
田鶴 寿弥子 (TAZURU Suyako)
反町 始 (SORIMACHI Hajime)
鳥越 俊行 (TORIGOE Toshiyuki)
赤田 昌倫 (AKADA Masatoshi)