

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K10690

研究課題名(和文) 相同モデルを用いた骨盤骨形態の三次元解析による計測学的年齢・性別推定法の開発

研究課題名(英文) Morphometric age and sex estimation of the pelvis by three dimensional analysis of the homologous models.

研究代表者

青木 康博 (AOKI, Yasuhiro)

名古屋市立大学・医薬学総合研究院(医学)・教授

研究者番号：90202481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：従来より性別・年齢推定に利用されてきた骨盤骨につき、多変量解析や近年進歩が著しい機械学習・深層学習の手法も取り入れ3次的形態解析を行い、新たな性別・年齢推定法を考案することを目的とした。各骨盤骨のCT画像を3次元構成し、同一点(面)数、同一位相からなる3次元ポリゴン画像を作成し、これを前述の手法で解析し性別・年齢推定の精度を検証した。その結果性別判定では99～92%の高い正判率が得られた。一方年齢推定では、2群分類での正判率は75～80%に留まり、回帰による年齢推定の誤差は、±9歳以上であった。本研究で検討した方法は法医人類学的計測に有用ではあるが、実務に供するにはさらに研究が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

骨盤骨はヒトにおいて性差のもっとも顕著な骨であり、また各部位の形態が年齢推定に有用であることから、法医人類学的に重視されてきた。性別・年齢推定法には計測値によるものと、非計測的な方法によるものがあり前者は熟練を必ずしも必要しないことなどの利点があるが、成績は後者に比して必ずしも良好とはいえない。本研究で3次元情報を解析することによって、課題は残されたものの一定程度精度の向上が認められた。また、近年のコンピュータ関連技術の進歩・普及により発展の著しい多変量解析や、機械学習の手法が法医人類学的解析に利用可能なことが示された。

研究成果の概要(英文)：We conducted a three-dimensional (3D) morphological analysis of the pelvis incorporating multivariate analysis and machine learning, including deep learning methods to develop new sex and age estimation strategies. We created 3D polygonal images consisting of the same number of points (facets) and the same topology and analyzed them using the methods mentioned above to verify the accuracy of sex and age estimation. As a result, a high accuracy rate of 99% to 92% was obtained for sex determination. On the other hand, for age estimation, the accuracy rate for the two group classifications was at most 75-80%, and the average error margin for age estimation by regression was ±9 years or more. Although the methods examined in this study could be feasible for forensic anthropological measurements, further research is required for the practical implementation.

研究分野：法医学

キーワード：法医人類学 骨盤骨 年齢推定 性別判定 機械学習 深層学習 相同モデル 多変量解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 骨盤骨はヒトにおいて性的二型のもっとも顕著な骨であり、また恥骨結合面や寛骨耳状面の形態などが年齢推定に有用であることなどから、従来より法医人類学的に重視されてきた。性別判定については二次元計測を用いた方法が多く提唱されており、これらは、非計測学的方法に比して、①客観的な数値に基づき判定・比較が可能であることや、②熟練を必ずしも必要とせず、観察者間誤差が小さいなどの利点がある。しかし、一方で、計測学的方法が正確性において非計測学的方法より優れているとは必ずしも言えないことから、非計測学的判定方法も広く利用されている。これは年齢推定についても同様であって、むしろ年齢推定にはもっぱら非計測学的方法が用いられていると言ってよい。概説すると、非計測学的方法で利用されているのは三次元情報であり、計測学的方法により利用されているのは大半が二次元的かつ直線的な計測データであるため、前者に比べて情報量が少ないと言える。この問題を解決するためには、骨盤骨の三次元計測、あるいは三次元像を用いた画像解析の手法を導入する必要があると考えられ、これまで検討を重ねてきた。

(2) 近年は三次元データを用いた形状解析手法の研究が進展し、さらに機械学習およびその一種である深層学習手法が医科学分野でも積極的に導入されている。これらの手法を用いて顕著な立体構造を有する骨盤環を定量解析することにより、三次元データを利用した性別・年齢推定が可能になると考えられた。

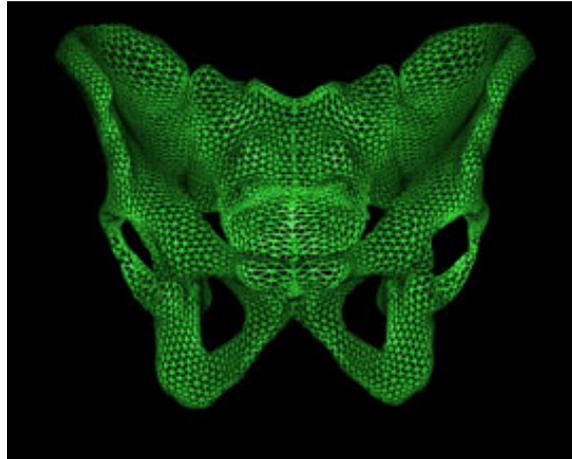


図1 CT 三次元画像から再構成した骨盤相同モデル像。16511個の三角形の面で構成されている。すべてのCT画像を同一位相・同一点(面)数で再構成すれば、相互の定量的な比較や統計処理が可能になる。

2. 研究の目的

マルチスライス CT 画像 (DICOM データ) から再構成したヒト骨盤骨三次元像を用いて、骨盤環の相同モデルを作成し、数値化された骨盤骨形状データをもとに多変量解析を行い、性別・年齢依存性の成分を抽出・特定し、性別・年齢推定への応用を試みる。また深層学習等の手法を導入して、機械学習を利用した性別・年齢推定の可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) 骨盤骨相同モデルの作成および改良

法医解剖前に撮影された CT 画像男女計約 1,300 例について骨盤骨の三次元像を構成し、これを試料とし、HBM-Rugle ソフトウェア (メディック・エンジニアリング) を用いて、相同モデルを作成した (図 1)。相同モデルは、解剖学的標記点 (ランドマーク) を指標として、同一点数 (原法は 8471 点、機械学習および深層学習による年齢推定では 8,321 点で構成されたモデルを使用)、同一位相構造のポリゴンで再構成した像である。骨盤骨は複雑な形状をしているため、再構成が若干困難な部位もあり、それが以後の検討結果に影響を与える可能性があるため、レンダリングを含めてモデルの作成法について検討を行った。各骨盤骨相同モデルを年齢分布に留意してデータ作成・解析用試料 (解析用試料) と、得られたデータを元に検証を行う未知試料 (検証用試料) とに分けて、以後の検討を行った。

(2) 平均像との頂点間距離を利用した性別判定

男女の相同モデルについて Human Body Statistics Principal Component Analysis ソフトウェア (HBS-PCA, 産業技術総合研究所) により解析用試料 (男性 403 例, 女性 364 例) をもとに男女の平均骨盤骨像を作成し、各検証試料がどちらの平均像により近いかに性別を推定方法を試みた。具体的には HBM-Rugle ソフトウェアを用いて各検証用試料 (男性 113 例, 女性 62 例) とそれぞれの平均像との対応する各頂点間の距離を計測し、その平均値が小さい側の性と推定した。

(3) 深層学習による性別判定

学習用に用意した男女各 300 例の相同モデルから、HBM-Rugle を用いて各画像の大きさと姿勢を揃えて正規化した後、男女の各平均像と男性平均像を作成し、さらに、2 つの平均像から全体の平均像を生成した。全体の平均像の骨盤傾斜角 (x 軸周り) を 30°, 60°, 90° に設定し、それに合わせて各相同モデルの姿勢とサイズを調整し、HBM-Rugle での深層学習用の正面および上面 2 次元画像 (JPEG 形式, 640×640 ピクセル) を取得した。さらに 60° 傾斜角の相同モデルを垂直軸 (y 軸) 回りに反時計方向に 45 度回転させた 2 次元画像を生成した。2 次元画像では奥行き (z 座標) をグレースケールで表現させた (深度画像)。テスト画像 (男女各 150 例) と合わせ計 3600 画像 (900 例 × 4 種) を作成した。学習用画像から実際に使用する各 150 画像を選択する方法 (基準) として、①年齢層別にランダムに選択する, ②各性の平均画像との頂点間距離が小さいものを選択する, ③反対の性の平均画像との頂点間距離が大きいものを選択する, の 3 種を設けた。

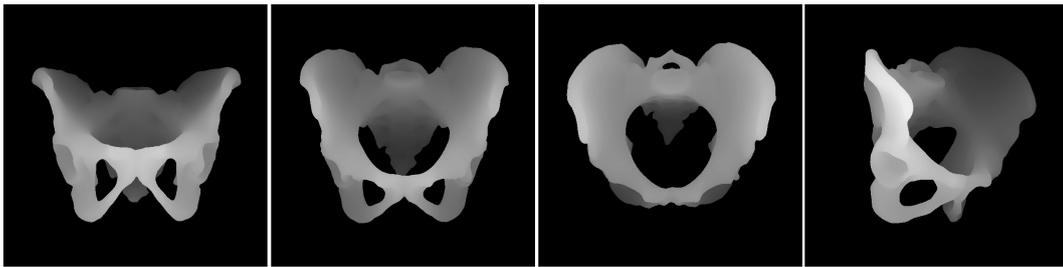


図 2 相同モデルを回転して生成した 2 次元深度画像。左から骨盤傾斜角 30°, 60°, 90° の正面像。右端は骨盤傾斜角 60°, y 軸 45° 回転像。

これらの画像を用い ATLAB 深層学習ツールボックス (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) を組み込んだ Train-Rugle プログラム (Medic Engineering) により、転移学習により畳み込みネットワーク (CNN) を学習させた。事前学習済みの CNN としては AlexNet を使用した。また 60° のデータセットを用いた学習には GoogLeNet と ResNet-50 も利用した。学習用 CNN は各設定に対して 5 回ずつ作成し、Classify-Rugle プログラム (Medic Engineering) でテスト用画像を用いて評価した。0.9 以上の確度を持って推定された性が実際の性と一致したものを正答とし、5 回の平均正答率を比較した。

(4) 年齢層別平均像を利用した主成分分析による年齢推定

男女の解析用試料から 10 歳間隔 (20~80 歳代) の平均像 (各 7 種) と 20 歳間隔の平均像 (各 6 種) を作成し、この平均像群と解析試料とを併せて主成分分析を行い、その分布図から各年代の 10 歳間隔の平均像の主成分値の上下に分布する解析用試料群を用い新たにそれぞれの平均像 (各 14 種) を作成した。年齢推定は HBM-Rugle ソフトウェアを用い、まず年齢と相関を有する各主成分の上記平均像群計 27 種の主成分データを用いて解析試料の主成分分析を行った。次いで検出された解析試料の全主成分値と平均像の全主成分値間のユークリッド距離を計測し、その距離の小さい順に平均像を並べ替え、その上位 1 位から 5 位までの平均像の作成に用いた解析資料群の各年齢の平均値を算出し、各解析試料の実年齢との誤差を比較した。また平均像 13 種の主成分値をもとに算出した推定年齢と実年齢との誤差が、±10 歳以内に留まる例数 (割合) を比較した。

(5) サポートベクターマシンを用いた年齢推定

機械学習の一つであるサポートベクターマシン (SVM) のサポートベクター分類 (SVC) による年代の分類、およびサポートベクター回帰 (SVR) による年齢推定を試みて形態特徴を示す主成分値の有用性について検討した。男性 704 例、女性 421 例の相同モデルを用いて主成分分析を行い、検出された全主成分を特徴量として用いた。SVC は分類は、閾値を 30, 40, 50, 60, または 70 歳とする 2 群分類, 40 歳未満, 40~60 歳代, および 70 歳以上とする 3 群分類, 30 歳未満, 30 歳代, 40 歳代, 50 歳代, 60 歳代, および 70 歳以上とする 6 群分類 (多クラス分類) の 3 種類について検討した。R 言語の関数 sample を用いて全データの 8 割を学習データ (うち 2 割が訓練データ), 残りの 2 割をテストデータに振り分け、学習モデルでテストデータの分類を行う操作を 10 回繰り返した。

SVR では全データに実年齢（死亡時年齢）をラベルとして付し、関数 K_{svm} を用いて、SVC で行ったのと同じ割合で全データを分割し、学習モデルによりテストデータの年齢を推定した。

(6) 深層学習による年齢推定

男性骨盤について深層学習による年齢推定を試みた。仙骨部分を除去した相同モデルから、性別判定と同様に、各方向・角度の 2 次元深度画像、および色調のないシルエット画像を生成した。分類では年齢カテゴリを 16~40 歳、41~65 歳、66~90 歳の 3 分類とし、各年齢層で 100 例ずつ、合計 300 例を学習用データとして使用した。学習用サンプルの選択法は①年齢分布に考慮しランダムに選択、②各年齢層の平均像との頂点間距離の小さい（平均像に近い）ものを選択、の 2 法を採用した。学習には GoogLeNet, AlexNet, ResNet, SqueezeNet の 4 種類のニューラルネットワークを用いた。学習用サンプルとは別に各年齢層 50 例ずつ計 150 例をテスト用の未知画像として用意し、再学習させたニューラルネットワークを用いて、各条件下での正答率を求めた。回帰においても同様にして再学習を行わせ、テスト用画像を用い、5 回の試行における実年齢との平均誤差を求めテスト結果を評価した。

4. 研究成果

(1) 骨盤骨相同モデルの検討

計 1,302 例（男性 740 例、女性 562 例）の CT 画像より原法では 28 のランドマーク、8471 形状点（頂点）、16954 ポリゴン（三角形）からなるジェネリック・モデルをもとに相同モデルを作成した。CT 再構成画像との対応する頂点間距離の平均値と標準偏差は、女性で 0.80 ± 0.21 mm、男性で 1.01 ± 0.31 mm と良好な成績を得た。しかし、その後の検討で寛骨臼および仙骨上面の描出がやや困難なことや、そこで生じたノイズが解析に影響を与える可能性が考えられたので、同部を空洞化したジェネリック・モデル（20 ランドマーク、8321 形状点、16511 ポリゴン）を作成し、機械学習・深層学習ではこのモデルを利用して作成した相同モデルを検討に供することとした。また深層学習においては、形態の差異が結果に過度に影響する可能性を考慮し、仙骨を除去（マスクした）した相同モデル（6698 形状点、13228 ポリゴン）、さらに、同様の理由で寛骨臼周囲をも除去したモデル（6481 形状点、12657 ポリゴン）も用いた。同一点数・同一位相から構成される相同モデルは各骨盤 3 次元像のサイズや方向（姿勢）を調整・統一することが可能であり、規格化（正規化）された画像を簡便に得ることができるだけでなく、一部をマスクした像を得ることも容易である。このことは、例えば特に年齢依存性が高い部位を抽出して検討するというような推定法の精度向上に利用可能であることだけでなく、破損骨の性別・年齢推定を行う必要がある場合に、対応する部の相同モデルを作成できる利点があると考えられた。

(2) 平均像との頂点間距離差による性別判定

男女それぞれの平均像と、これとは別に用意した検証用試料の相同モデルとの間で頂点間距離を計測して性別判定を行ったところ、男性の 107 例（92%）が男性、女性では全例が女性と正しく判定された。この結果は片側寛骨を利用した先行研究の結果よりも良好であった。男性骨盤像で誤判定された 6 例の内訳は 20 歳代、40 歳代、50 歳代および 80 歳代が各 1 例、30 歳代が 2 例であり、数が少ないため年齢層との有意な関連は見出し難いが、比較的若年に多い傾向が見られた。

(3) 深層学習による性別判定

AlexNet で事前学習した CNN を用いたテスト用画像の性別判定において、正答率の平均は $0.98 \sim 0.92$ であり、骨盤傾斜角 60° の正面画像を用いて学習・テストしたネットワークの成績が最も良好（正答率 $0.98 \sim 0.93$ ）であり、平均画像との面間距離が小さい画像のセットはすべての角度の画像においてもっとも良い成績であった（同 $0.98 \sim 0.94$ ）。このセットにおいては、男女間の正答率の差に明確な傾向は見られなかったが、ランダム選択したセットにおいては女性、反対の性の平均画像との頂点間距離が大きいものを選択したセットにおいては男性で正答率が高くなる傾向が見られた。今回比較的少数のサンプルでの再学習でありながら、 0.9 という高い閾値を以て検証を行っても良好な成績を得られたことは、骨盤骨の投影画像に顕著な性差があることによるところが大であると考えられるが、同時に、骨盤の深度画像を用いた深層学習が法医学的個人識別に応用可能であることが示された。

(4) 年齢層別平均像を利用した主成分分析による年齢推定

頂点間距離差による性別判定と同様男性 403 例、女性 364 例の相同モデルを用い、解析試料群および各年齢層の平均像 7 種とを併せて主成分分析を行った結果、男性では計 19 個、女性では 15 個の主成分が検出され、その中で年令と比較的相関 ($|r| > 0.18$) が見られた主成分は、男性では第 1, 3, 4, 6, 7 および 11 主成分、女性では第 1, 2, 第 6 および 10 主成分であった。

各主成分をもとに作成された平均像 27 種と各解析試料のユークリッド距離の比較では、各平均像の平均年齢と実年齢との間の平均誤差は、いずれにおいても上位 1 位の平均像、および 1~5 位のその平均値によるものが小さく、女性においても男性と同様の傾向がみられたが、男性の平均像群による推定値と実年齢の誤差が ± 10 歳以内に留まった割合は平均 70%前後で、50 歳代や 60 歳代では低かった。一方、女性では全般に男性より成績が悪かった。

そこでさらに、第 1 主成分値をもとに作成した計 27 種の平均像の主成分データを用いた年齢推定値が、実年齢(死亡時年齢)から 10 歳以上離れた解析試料群を集め、新たに 12 種の平均像を作成し、計 39 種の平均像群と解析試料群を併せて同様に検討したところ、若干の成績の向上が見られたが、誤差が大きい事例では改善が見られなかった。

本法による年齢推定の誤差は平均すると 15 歳前後であり、年齢依存性の形態変化をある程度捉えることは可能であるが、実用レベルには至らないと考えられた。また誤差の大きい事例が散見され、最大誤差は 40 歳以上になるものが特に男性の 70 歳代以上にみられ、この点の改善が必要である。

(5) サポートベクターマシンを用いた年齢推定

2 群分類では、いずれの年齢を閾値にとっても、男女ともテストデータは 75%以上の正答率を示したが、交差検証では訓練データの成績と比較し、30 歳代以下の正答率が低く、20%程度の差が生じた。これは過学習を引き起こしているか、データ数が少ないためと考えられた。3 群分類のテストデータの正答率は男性で約 60%、女性で約 67%、多クラス分類ではそれぞれ約 36%、約 46%にとどまった。この結果は分類の細分化による影響として予想されたことではあるが、データ数が影響している可能性も考えられた。

回帰においては実年齢と推定年齢の誤差の平均は、男性で 10.5~12.0 歳、女性で 10.2 歳~12.3 歳であった。最大誤差は男女とも 70 歳以上のテストデータにみられ、それぞれ 43.8 歳、54.7 歳であった。年代別の誤差の平均では、年齢層別平均像を利用した方法と同様 70 歳以上で誤差が大きくなる傾向を示す一方、20 歳代でも誤差の大きい事例が散見された。これは、若年期および高齢期に骨盤の形態差(個体差)が大きくなる可能性を示唆しているが、正確な原因は不明である。

今回はすべての主成分を特徴量としたが、これについてはさらに検討を重ねる必要があると考えられた。なお、本法においては仙骨上部および寛骨臼を空洞にしたジェネリックモデル(8321 形状点)を使用したことにより若干の成績向上を見たことと推定された。

(6) 深層学習による年齢推定

3 群分類での成績は、骨盤傾斜角 60° 正面像、ランダム選択の条件下で、正答率約 67%となり最大値を示した。また CNN は GoogLeNet, AlexNet において良好な成績が得られた。誤答の傾向は 5 条件のいずれにおいても中年層および高齢層で高く、特に境界付近の年齢サンプルで高くなった。回帰においては、骨盤傾斜角 60° y 軸回り 45 度回転の深度画像において平均誤差 ± 9.3 歳、実年齢との誤差が ± 10 歳であった例が 60%、 ± 15 歳以下であったものが 80%となり、もっとも成績が良好であった。なお、骨盤傾斜角 60° 、正面深度画像での結果はそれぞれ、 ± 11.0 歳、52%、73%であった。また他の方法と若干異なり、むしろ高年齢層において誤差が縮小する傾向が見られた。一方、この方法においても誤差が大きい事例が散見されたので、分類と回帰との結果に乖離が生じた場合には分類の結果を優先するという措置を施したところ若干の成績向上が認められた。

相同モデルを用いて規格化された画像を得ることは、学習効率を向上させる上で有用であると考えられた。一方、画像の提示法を再検討することでさらなる成績向上がある程度望めるものと考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fukuta M, Kato C, Biwasaka H, Usui A, Horita T, Kanno S, Kato H, Aoki Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Sex estimation of the pelvis by deep learning of two-dimensional depth images generated from homologous models of three-dimensional computed tomography images.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Forensic Science International: Reports	6. 最初と最後の頁 100129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fsir.2020.100129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 琵琶坂仁, 青木康博, 福田真未子, 臼井章仁, 齋藤春夫, 藤田さちこ, 高宮正隆, 出羽厚二, 舟山真人, 杉山一洋
2. 発表標題 主成分分析を利用した骨盤骨の年齢依存性変化の解析（第4報）
3. 学会等名 第104次日本法医学会学術全国集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田真未子, 琵琶坂仁, 加藤千晶, 堀田哲也, 大瀧純, 中村昌美, 菅野さな枝, 加藤秀章, 臼井章仁, 青木康博
2. 発表標題 深層学習による骨盤骨の2次元深度画像を用いた性別推定
3. 学会等名 第104次日本法医学会学術全国集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 琵琶坂仁, 青木康博, 福田真未子, 臼井章仁, 齋藤春夫, 藤田さちこ, 高宮正隆, 出羽厚二, 舟山真人, 杉山一洋
2. 発表標題 主成分分析を利用した骨盤骨の年齢依存性変化の解析（第4報）
3. 学会等名 第104次日本法医学会学術全国集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田真未子, 琵琶坂仁, 加藤千晶, 堀田哲也, 大瀧純, 中村昌美, 菅野さな枝, 加藤秀章, 臼井章仁, 青木康博
2. 発表標題 深層学習による骨盤骨の2次元深度画像を用いた性別推定
3. 学会等名 第104次日本法医学会学術全国集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukuta M, Kato C, Biwasaka H, Usui A, Aoki Y.
2. 発表標題 Gender estimation of the pelvis by deep learning of two-dimensional depth images generated from three-dimensional computed tomography images.
3. 学会等名 22nd Triennial Meeting of International Association of Forensic Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福田 真未子 (FUKUTA Mamiko) (60832201)	名古屋市立大学・医薬学総合研究院(医学)・助教 (23903)	
研究分担者	琵琶坂 仁 (BIWASAKA Hitoshi) (90405837)	岩手医科大学・医学部・非常勤講師 (31201)	
研究分担者	臼井 章仁 (USUI Akihito) (90588394)	東北大学・医学系研究科・講師 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------