

H-16 2次元 Warping を用いた頸椎 X 線画像の骨年齢評価

Two-dimensional Warping Based Skeletal Age Estimation
From Cervical Vertebrae X-ray Image下平 博[†] 福田 将彦[†] 松田 繁樹[†] 中井 満[†]
水戸 智恵[‡] 佐藤 亨至[‡] 三谷 英夫[‡]

1. はじめに

頸椎 X 線写真から骨の成熟度を示す骨年齢を評価する方式として、骨の輪郭線抽出を要しない方式、すなわち、入力画像と参照画像間の非線形パターン整合 (以下、弾性マッチング) に基づく評価法を新たに提案し、その有効性を示す。

歯科矯正の分野において、骨の成熟度を示す骨年齢を知る事は成長診断や矯正治療の方針決定に必要な特徴の一つである。骨年齢の評価には手部 X 線写真が一般に利用されているが、被曝量を低減するために、歯科矯正臨床において必要不可欠な側面頭部 X 線規格写真のみを用いる評価法の確立が求められている。

従来の計算機による骨年齢の評価法としては、手骨に関する研究が殆どであり、(i) X 線写真から骨の輪郭線を抽出後、特徴点を抽出し、重回帰式を用いて特徴点から推定骨年齢を算出する方式、(ii) 専門家が骨年齢を付与した多数の参照用画像を用意しておき、入力画像と参照用画像間で類似度を求め、類似度の高い上位 n 枚の参照用画像に付与されている骨年齢から荷重平均によって骨年齢を算出する方式 [1] 等が提案されている。

一方、7 個の骨から成る頸椎は、隣接する骨が 3 次元的に複雑に重なり合った構造をしているため、X 線画像処理が手骨に比較して難しく、骨年齢の評価を完全に自動化した研究は皆無である。とくに、輪郭線の抽出は動的輪郭法を用いても失敗する例が多く、上記 (i) の方式のように輪郭線抽出を用いて特徴点を求める手法は困難である。(ii) のようにパターン整合に基づく手法を用いるにしても、骨年齢の類似した画像間においても個体差や変形が多いため、アフィン変換による変形を許容する単純な類似度を用いただけでは高い性能が望めない。そこで、本研究では、弾性マッチングを利用することで画像の非線形な変形に対して頑健な骨年齢評価法を開発する。

2. 弾性マッチングによる骨年齢評価

弾性マッチングを利用した特徴点抽出および類似度情報を用いて骨年齢を評価する 2 つの提案手法について説明する。本研究で用いる弾性マッチングは内田らが提案している動的計画法を用いた 2 次元 warping 法 [2] であり、これについては第 3 章で説明する。

2.1. 特徴点抽出による骨年齢評価 (提案手法 1)

弾性マッチングを利用すると、輪郭線抽出を用いることなく特徴点抽出を行うことができる。まず、図 2 で示すように、予め視察等によって特徴点を付与してある参照パターン (R) と、特徴点抽出を行う入力パターン (B) を考え、次の手順で特徴点抽出、および骨年齢評価を行う。

- (1) パターン R と B 間で弾性マッチングを行い、R を B に近付けるように変形したパターンを R' とする。
- (2) 変形した R' 上の特徴点をもって B の特徴点とする。
- (3) 特徴点から骨年齢評価用の特徴量ベクトル $\mathbf{x}$ を求める。

[†] 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
[‡] 東北大学大学院 歯学研究科

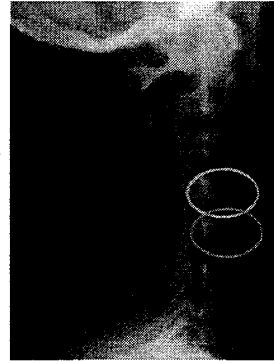


図 1: 頸部 X 線写真の例

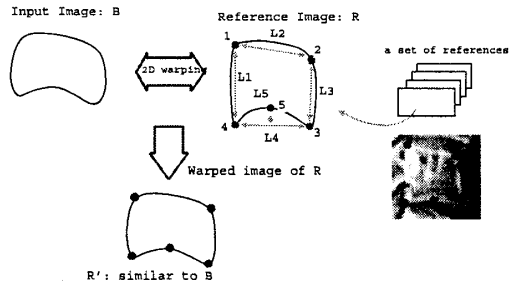


図 2: 弾性マッチングによる特徴点抽出

(4) 重回帰式を用いて $\mathbf{x}$ から骨年齢評価値 y を求める:

$$y = A\mathbf{x} + a_0. \quad (1)$$

ただし、 A は重回帰係数行列、 a_0 はバイアスで、両者は学習用データを用いた重回帰分析によって予め算出しておく。

上記の処理 (1)~(2) において、もし、パターン R が B と類似していない場合、弾性マッチングを行っても変形された R' は B とうまく重ならず、特徴点の抽出精度が低下する。そこで、参照パターンを多数枚用意しておき、その中から弾性マッチングの結果 B に最も類似する参照パターンを用いて特徴点抽出を行う。なお、処理 (4) において、特徴量 $\mathbf{x}$ と骨年齢 y との関係は一般には非線形であるが、年齢層を限定すると線形の関係と見做せることが分かっているので、本研究においては式 (1) で示すような線形回帰式を用いた。

2.2. 類似度に基づく骨年齢評価 (提案手法 2)

二つの画像パターン R_i と B に対する弾性マッチングによる相違度を $D(R_i, B)$ と置いたとき、類似度 $s(R_i, B)$ を相違度の逆数、すなわち $s(R_i, B) = 1/D(R_i, B)$ と置く。類似度の大きい順に上位 J 個を整理したものを $\hat{s}_j$ とおき、整理後の j 番目の参照パターンに付与されていた評価値を $\hat{y}_j$ とおく。B

の骨年齢評価値 y を次式で定義する.

$$y = \frac{\sum_{j=1}^J \hat{s}_j \hat{y}_j}{\sum_{j=1}^J \hat{s}_j} \quad (2)$$

3. 動的計画法による二次元 warping

2次元画像 R, B を, それぞれ $R = \{r(i, j) | i, j = 1, 2, \dots, N\}$ および $B = \{b(x, y) | x, y = 1, 2, \dots, M\}$ とする. ここで, $r(i, j), b(x, y)$ はそれぞれ画素 $(i, j), (x, y)$ の特徴量で, 本研究では輝度値を特徴量として用いる. 二次元 warping による画像のマッチングは, warping 関数 $x(i, j), y(i, j)$ における相違度 $D_{xy}(R, B)$ の最小値を求める最適化問題として次式のように定式化される [2].

$$D(R, B) = \min_{x(i, j), y(i, j)} D_{xy}(R, B) \quad (3)$$

$$D_{xy}(R, B) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |r(i, j) - b(x(i, j), y(i, j))| + \alpha P_1 + \beta P_2 \quad (4)$$

ここで, P_1, P_2 は, 不自然な warping を避ける為のペナルティ関数で, それぞれ, 一様性ペナルティ, 単調性ペナルティである. また, α, β は各ペナルティに対する重みである. 同最適化問題は動的計画法を用いることによって比較的高速に最適解を求めることができる.

4. 評価実験

提案手法を評価するため, 表1に示す実験条件で骨年齢の評価実験を行った. 弾性マッチングは第3~第5の各頸椎ROI画像毎に行い, 得られた骨年齢の平均値をもって最終的な骨年齢評価値とした. 各頸椎のROI画像は, ヒストグラム正規化, 回転補正等の前処理後に頸椎領域を含む矩形領域を視察によって切り出したものを用いた. 2次元 warping におけるペナルティ項の重み α, β は共に100に固定した. なお, 骨年齢評価の精度を求めるための基準として, (i) 専門家が付けた骨年齢, (ii) 暦年齢を用いる方法があるが, 今回は (ii) 暦年齢を用いた. これは, 実験に用いたデータが健康者のものであるため, 統計的には骨年齢の期待値(中央値)が暦年齢に一致する性質を利用したものである. (i) の基準が専門家の主観によって左右されるのに対して, (ii) は客観的基準である. なお, 参照パターンに対象患者のパターンは含まれていない(患者オープン).

4.1. 各手法の比較

実験結果を表2に示す. ここで, "単純整合"とは弾性マッチングによるパターン変形を用いず2画像間の単なる類似度を用いて骨年齢評価を行う従来法[1]を示す. "弾性整合・特徴量"は, 2.1.節に示した提案手法1で, 次の特徴量を用いた.

特徴量 A = $(L1 + L3)/(L2 + L4)$

特徴量 B = L5

ここで, 特徴点および, 長さ L1~L5 は図2中と同じものである. "弾性整合・類似度"は 2.2.節に示した提案手法2である. また, 1-best, 5-best は, 弾性マッチング後に骨年齢評価を行う際に考慮した参照パターン数である.

表2から, 非線形な画像伸縮を許す提案手法は, 従来の単純整合法よりも骨年齢評価の精度が向上していることが分かる. また, 弾性マッチングの中では, 特徴点を用いるよりも, 類似度を用いた方が精度が高くなっている. この原因として, 特徴点を用いることに伴う情報の損失, および参照パターンに付与されている特徴点自体の精度の問題が考えられる. なお, 実験に用いたデータが同一ではないものの, 専門家が特徴点を視察によって求めて骨年齢を評価した場合の誤差が1歳程度[3]であることから, 提案手法は専門家と同程度の精度を達成していると考えられる.

表1: 実験条件

患者	女性患者 16 名 (健康者)
対象年齢	5 歳 ~ 16 歳
全画像数	139 枚
前処理	画像の縮小 (約 60x50 pixels) ・ ノイズ除去 ・ ヒストグラム平滑化 ・ ROI の視察切り出し
使用 ROI	第三頸椎, 第四頸椎, 第五頸椎
評価法	患者 open, 16-fold cross validation

表2: 骨年齢評価法の絶対値誤差 (括弧内は暦年齢と推定骨年齢との相関)

	1-best	5-best
単純整合	2.58(0.56)	1.47(0.79)
弾性整合・特徴量 (A)	1.34(0.81)	1.23(0.82)
弾性整合・特徴量 (A,B)	1.42(0.82)	1.22(0.86)
弾性整合・類似度	1.24(0.90)	0.87(0.94)

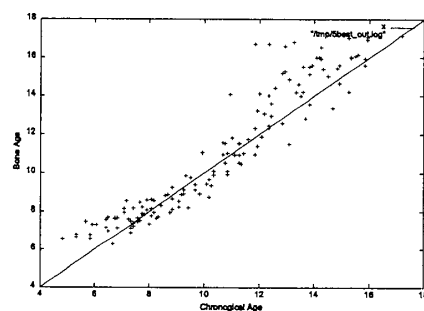


図3: 提案手法2による骨年齢評価値と暦年齢の関係

4.2. ROI 切り出し位置の変動に対する頑健性

現段階の提案手法はROI画像のとなる頸椎を含む矩形領域の抽出は視察で行っている. ROIの切り出し位置のゆらぎが, 骨年齢評価に与える影響について実験を行なった. 適当に選択した22枚の画像それぞれについて, 切り出し位置を, 上下左右に10ピクセル平行移動および左右に10度回転させ, 提案手法2で骨年齢評価を行った. その結果, 骨年齢の評価値の標準偏差は0.10歳となり, 切り出し位置の変動に対して頑健であることが確認された.

5. まとめ

非線形な画像変形を許容する弾性マッチングが頸椎X線画像における骨年齢評価に有用であることを示した. 提案手法は輪郭線抽出を必要としないため, 様々な分野への応用の可能性がある. ただし, 現状では50x50ピクセル程度の画像の1回の弾性マッチングに1分程度の計算時間を要する. 今後は計算量の削減法について検討し高速化をはかる.

参考文献

- [1] 西大介, 下平博, 佐藤亨至, 中井満. パターン整合法を用いた手相 X 線画像からの骨年齢推定. 医用画像工学研究会 JAMIT Frontier'98 講演論文集, pp. 42-47, 1998.
- [2] 内田誠一, 迫江博昭. 動的計画法に基づく単調連続 2 次元ワーブ法の検討. 信学論, Vol. J81-D-II, No. 6, pp. 1251-1258, 6 2000.
- [3] 水戸智恵. 頸椎の形態変化を指標とした骨年齢 "頸椎年齢" の確立および下顎骨成長予測への応用. PhD thesis, 東北大学, 2002.