

原著

一般撮影検査における自動ポジショニング法開発の試み
—頸椎4方向撮影への応用—論文受付
2018年11月15日論文受理
2019年2月5日Code Nos. 251
532鶴岡礼奈¹ 白石順二²¹熊本大学大学院保健学教育部²熊本大学大学院生命科学部

緒言

近年、コンピュータ断層診断(computed tomography: CT)や核磁気共鳴画像(magnetic resonance imaging: MRI)といった画像診断領域における診断技術が著しく進展し、これまでは画像化が困難であった病変が描出可能となってきた。しかし、CTやMRIは検査コストが高額となるため、さまざまな部位の疾患の検索や経過観察においては、依然として単純X線撮影が幅広く用いられ、その重要性は今日でも変わることはない。

一般撮影検査においては、本来、撮影を行う診療放射線技師(以下、技師)が違っていても、同じ撮影法に

関しては、ポジショニングや撮影線量といった点で画像の質が変化しないことが望ましい。特に経過観察の患者では、過去画像と現在画像でポジショニングの違いによって対象部位に大きな変化があった場合、正しい診断が困難になってしまう。しかし、実際の現場では、技師の経験や技量の差によって、ポジショニング角度や撮影線量が異なることで、同一患者の同一部位であっても画像間に差が生じる場合があり、また、撮影部位によっては、診断に有効でないという理由から再撮影となる場合もある¹⁾。

一方、最近では、一般社会だけでなく、医療分野でもコンピュータ技術を用いた自動化に関する研究開発

Development of Automated Positioning System in General Radiography Examination
—Application to Four Directions Cervical Spine Radiography—Reina Tsuruoka^{1*} and Junji Shiraishi²¹ Graduate School of Health Sciences, Kumamoto University² Faculty of Life Sciences, Kumamoto University

Received November 15, 2018; Revision accepted February 5, 2019

Code Nos. 251, 532

Summary

To reduce a number of retaking with unnecessary radiation exposure, and to improve a quality of general radiography and efficiency of radiographic procedure, we propose an automated radiographic system that uses reference points on human face for determining exposure angle and beam center. As a preliminary study, we developed an automated positioning method for determining exposure angle and beam center of four directions (4R) cervical spine radiography by using the human body data from 3D reconstructed head-and-neck computed tomography (CT) images. An image for recognizing human-face was reconstructed and used for identifying the reference points. Clinical utility of this proposed method was demonstrated by using “KENZO” to inspect simulated projection X-ray images which were reconstructed from CT volume data. In this study, we reused a huge number of CT images, which were obtained in routine clinical procedure and had archived in medical institutions. This database, therefore, allowed us to develop a new radiological technique without any additional patient dose.

Key words: general radiography, four directions cervical spine radiography, automated general radiography, automated positioning system, computed tomography (CT)

*Proceeding author

や実用化が進んでいる。例えば、放射線治療分野における代表例として、サイバーナイフを用いた定位放射線治療が挙げられる。サイバーナイフとは、高精度ロボットアームに高エネルギー放射線照射装置(リニアック)を組み合わせた装置で、定位放射線治療が必要とされる多方向からの照射をロボットアームにより可能としている。照射中はロボットアームとは別に、天井に設置された2台のX線撮影装置で常に標的を監視し、標的の動きに合わせて目標位置が自動修正され、常に標的に対して正確な照射が行われる。このようにサイバーナイフは、ほかの多くのリニアック装置と異なり、定位放射線治療に特化した装置であり、高精度の治療が比較的容易に実現できるため、導入する施設が近年増加している^{2,3)}。

一般撮影においては、X線管と検出器の位置を同期させることで、照射野を検出器に一致させて撮影を行う装置が以前より市販化され、一般的に使用されている。それに加えて、定位放射線治療装置であるサイバーナイフで用いられているような、患者ポジショニングにおける撮影台やX線管装置の移動や角度づけをコンピュータ制御により自動で行うといった機能、更に、カメラなどによる顔認識機能を一般撮影装置に装備させることが可能になれば、撮影担当技師の違いによる撮影画像の差がなくなり、撮影の効率化や再撮影減少による患者被ばくの低減、再現性の向上が期待される。

本研究では、一般撮影技術への顔認識技術の応用に際して、カメラ画像ではなくCT画像から被検者の顔表面の凹凸情報を二次元画像化することにより得られた外観情報を用い、自動的にポジショニングを行う手法の開発を目的とする。

一般的に、撮影法開発においては、開発された撮影技術の正確さを検証する必要があるが、被検者に対する侵襲的行為(被ばく)は認められていないため、検証の手段が限定されてしまう。そこで、本研究では、通常の検査目的で施行され、その後、医療機関に保管されている大量のCT検査画像から、一般撮影における撮影技術開発のために必要な三次元画像データを再構成することで、仮想人体データベースを作成した。それらの仮想人体に対してシミュレーションによりX線を照射し、模擬的にX線投影像を得ることで、自動ポジショニング法の検証を可能にした。

本研究では、自動ポジショニング法開発の初期検討として、頸椎4方向(正面、側面、右斜位、左斜位)撮影について検討を行った。

1. 方法

1-1 自動ポジショニング法の考え方

本研究における自動ポジショニング法とは、被検者の外観情報から、入射するX線の被検者の体内における線束中心(ビームセンタ)の三次元座標を決定したうえで、そのビームセンタに対するX線の入射角度および照射野の大きさを撮影法ごとに自動的に決定する手法を意味する。つまり、従来の一般撮影の手法のように、被検者の外観から入射点を決定するのではなく、放射線治療の位置決めで用いられるような、体内のビームセンタの三次元座標を外観情報から推測することで、ポジショニングを行うという新しい考え方をを用いる。

本研究の頸椎4方向の自動ポジショニング法では、頭頸部CT画像を再構築して得られた頭頸部三次元画像の外観情報から、頸椎4方向撮影のポジショニングに必要であろうと考えられる基準点(鼻尖、左右外耳孔)を自動検出し、ビームセンタおよび入射角を決定する手法を開発した。また、決定したビームセンタと入射角を用いて、頸椎4方向撮影のX線透過像をCT画像からシミュレーションにより再構成し、再構成画像を検像することで、本手法の有用性を検証した。三次元CT画像データからビームセンタを決定するまでのアウトラインをFig. 1に、詳細について以下に示す。

1-2 画像データベース

本研究では、本学附属病院において、通常の診療目的で撮影された頭頸部CT画像80例を使用した。撮影には、40mmのボリュームディテクタを搭載した64列マルチスライスCT装置、Brilliance CT 64(フィリップスメディカルシステムズ)を使用した。オリジナルデータのマトリクスサイズは512×512、FOV(field of view)250mm、スライス厚3mm、再構成サンプリングピッチ3mm、スライス枚数68-117枚、XY平面(Axial平面)におけるピクセルサイズ0.488mm、グレイスケール16bitで、ヘッダ情報をすべて削除し、RAW画像データフォーマットで保存したものを本研究の画像データベースとした。なお、本研究の使用画像については、当該倫理審査委員会の承認を受け、患者の個人情報保護のために、画像データを病院外へ持ち出す前に、院内IDを研究用IDで匿名化し、氏名等の個人情報を削除して、管理・保管した。

本研究においては、全80例のうち、ランダムに抽出した30例を自動ポジショニング法におけるさまざまなパラメータの決定に使用し、残りの50例を開発した手法の検証に用いた。

1-3 三次元画像データの作成

オリジナルのCT画像データのボクセルサイズは $0.488 \times 0.488 \times 3$ mmの非等方性であり、この画像から三次元画像データを作成すると、z軸方向に対して空間情報が不足したものとなる。そのため、スライス間の画像を線形補間によって追加作成することで、x, y, z軸のそれぞれの方向について同じサイズである等方性のボクセルをもつ三次元画像データを作成した。

また、本研究では被検者の皮膚表面のみを外観情報として利用するため、再構成した三次元画像データから検査着やチューブ等を除いた皮膚表面のみの表示に合わせて、CT値-200を閾値とした閾値処理を行い、被検者の外観情報とした。処理後の被検者の外観情報の一例を、三次元画像データのボリュームレンダリング表示によりFig. 2に示す。

1-4 顔認識画像の作成

本研究では、被検者の顔の位置と傾きを自動認識するための基準点として、体型や性別に関係なく検出可能である以下の3点を選択した；1) 鼻尖(被検者の正中を示す)、2) 左右の外耳孔(2点を結んだ線の中点を求めることで、被検者の頭が傾いている場合も正しい結果が得られる)。そして、これらの基準点の三次元的配置から、頸椎4方向撮影の際に入射中心となるビームセンタを決定することが可能になると仮定した。

CT画像より得られた被検者の外観情報を用いて、前述の基準点(鼻尖、左右外耳孔)を検出するために、最初に、正面と左側面の2方向について顔認識画像を作成した。作成した顔認識画像の一例をFig. 3に示す。顔認識画像は、 512×512 の二次元画像における被検者の顔表面から $y=0$ (正面像)、または $x=0$ (側面像)までの直線距離を画素値に置き換えて画像化したもので、顔の凹凸に応じて、正面像における鼻尖のように凸の部分は白く、側面像における耳孔のように凹の部分は黒く表示される。

1-5 基準点の自動検出

基準点の自動検出方法について、以下に示す。なお、基準点の自動検出におけるすべてのパラメータは、自動ポジショニング法開発用にランダム抽出した30例を用いて、経験的に決定した。

1-5-1 鼻尖

鼻尖の検出は、顔認識画像の正面像を用いて行った。画像中の被検者の頭部上部($y=10$)と頭部下部(y : 等方ボクセル化後のスライス枚数/3)の各々の中点を結んだセンターライン上に、x軸方向への横幅が40

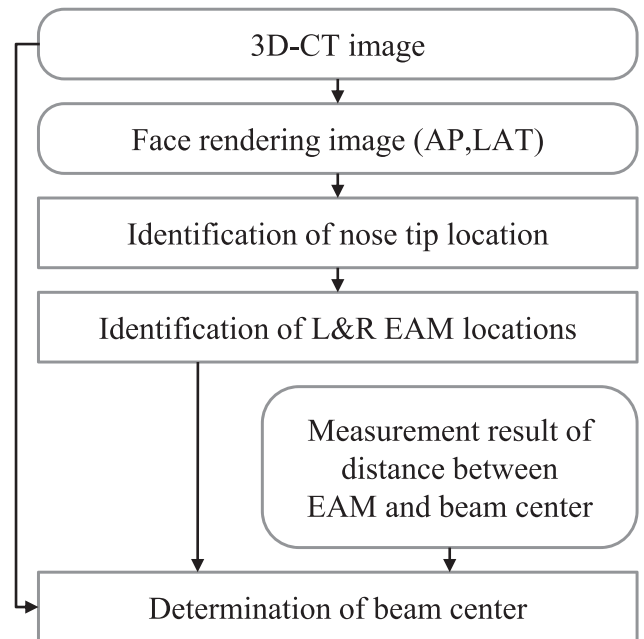


Fig. 1 The outline of computerized scheme for determining the beam center from 3D-CT image.

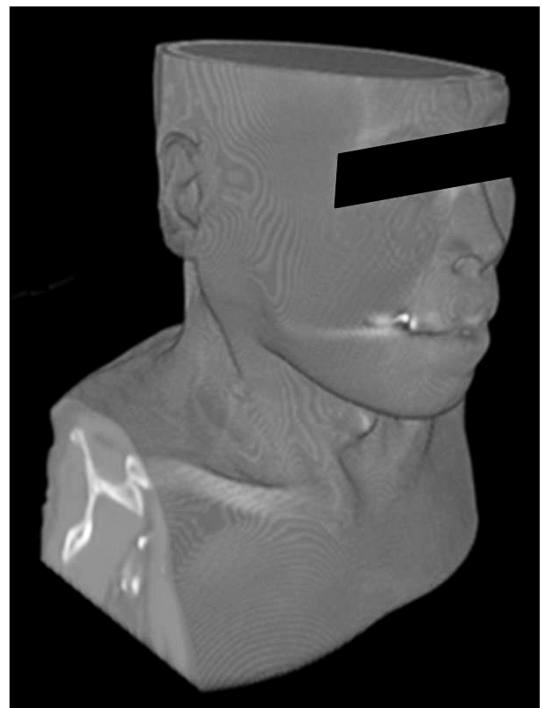


Fig. 2 Example of isotropic 3D-CT image with surface thresholding.

ピクセルであるようにサーチエリアを設定した(Fig. 4a)。そのサーチエリア内で顔認識画像における画素値が最も高い点を鼻尖であると決定した(Fig. 4b)。

1-5-2 外耳孔

外耳孔の検出は、顔認識画像の左右側面像において行った。耳介があると予測される範囲を耳介部領域画

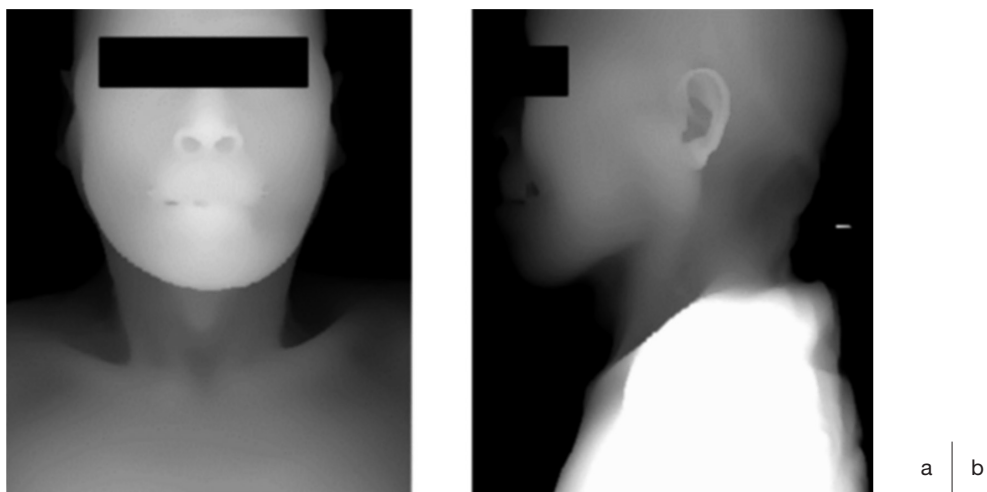


Fig. 3 Examples of face rendering images reconstructed from 3D-CT images.
(a) Front view, (b) Left lateral view

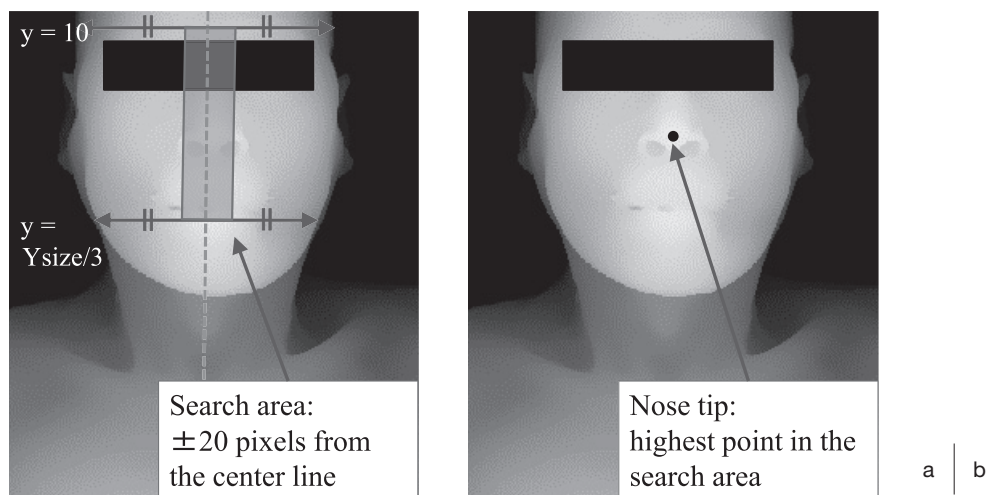


Fig. 4 Identification of nose tip from front view of face rendering image.
(a) Setting of search area for the identification of nose tip
(b) Determination of a nose tip location at the highest pixel value point on the search area

像として切り出すため、切り出しの範囲を 128×128 pixel と設定し、1-5-1 で求めた鼻尖の位置情報から耳介部領域画像を作成する位置を決定した (Fig. 5a)。本手法では、側面顔認識画像における鼻尖と外耳孔の高さはほぼ同じであると仮定し、耳介部領域画像の中心点と鼻尖の高さは同じであるとした。また、耳介は頭部全体の少し後方寄りであると仮定し、鼻尖と頭部後方を結んだ直線上の $3/5$ だけ鼻尖から離れた点を、側面顔認識画像の x 方向についての耳介部領域中心点と決定した。

作成した耳介部領域画像に対して、差分フィルタ⁴⁾を適用することで画像内の凹の部分を実際強調した画像を作成 (Fig. 5b)、その後、多重閾値処理とルール識別器を用い⁴⁾、外耳孔の位置を決定した (Fig. 5c)。

ルール識別器とは、多重閾値処理を終了させる閾値をあらかじめルールとして設定しておくものであり、本研究では、多重閾値処理によって二値化した場合に、外耳孔が存在する可能性が高い範囲 (切り出した範囲の中央 $1/4$ の面積の範囲) における二値化画像内の候補領域の円型率が 0.7 以上から 0.7 未満に急に下がる値の直前の値を実際の閾値とし (Fig. 6)、その候補領域を外耳孔として、その重心を外耳孔中心とした⁴⁾。

1-6 ビームセンタの決定

本手法では、検出した鼻尖と左右の外耳孔中心の座標の三次元的配置から、頸椎 4 方向撮影の際のビームセンタの三次元座標を決定した。一般的に、頸椎 4 方向撮影の場合のビームセンタは、正面、左側面、右斜

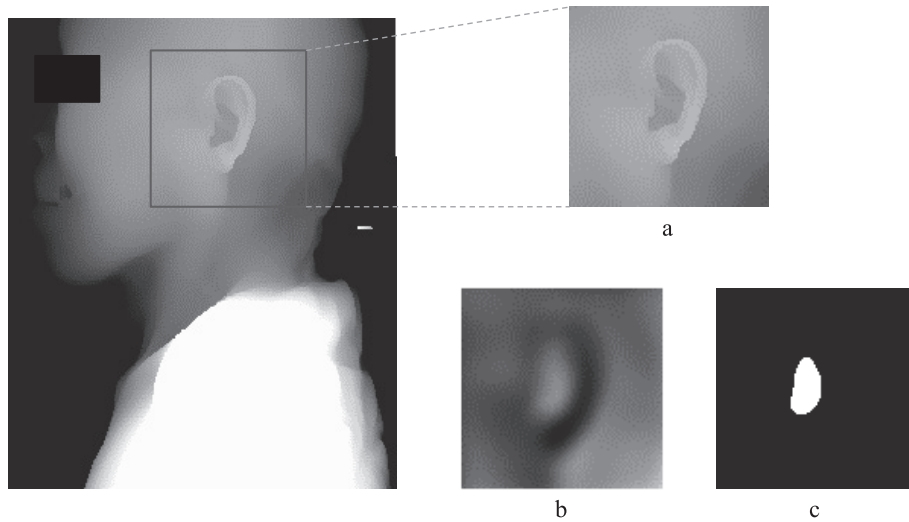


Fig. 5 Identification of an external acoustic meatus (EAM) from the lateral view of the face rendering image.

- (a) Auricle region image extracted from the face rendering image by using a nose tip location
- (b) Application of a difference filter to enhance EAM in auricle region image
- (c) Determination of EAM location by using multiple threshold technique and a rule-based classifier on the difference filter image

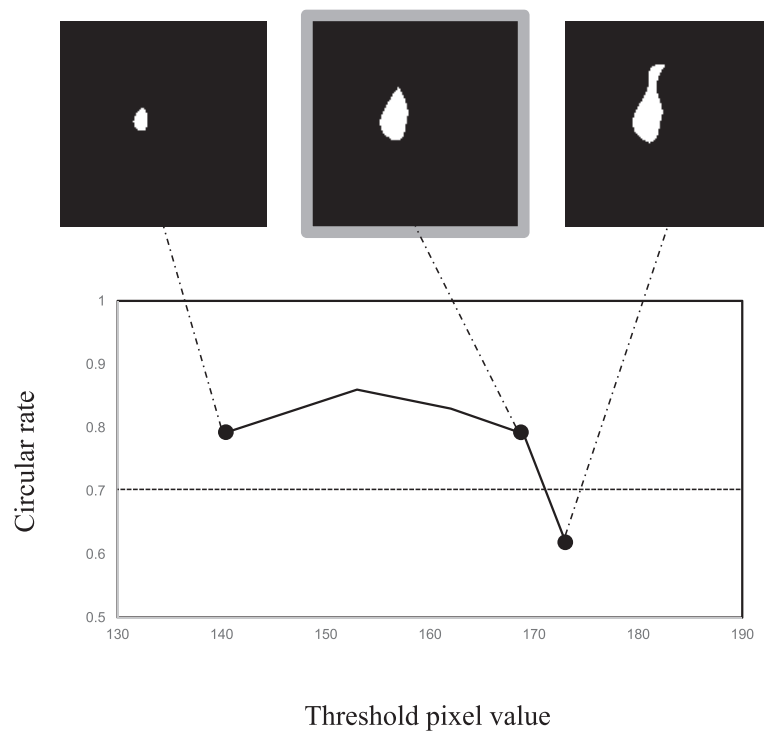


Fig. 6 Application of a multiple threshold technique and a rule-based classifier.

位, 左斜位, 各々の入射中心の線の交点で求められるため, 一般的な撮影法の文献に示されている頸椎4方向撮影の際の入射角度に準じて, 本手法ではCT画像横断面における第4頸椎椎体の後方をビームセンタと決定した(Fig. 7).

また, 外観からはビームセンタである第4頸椎椎体

後方の点を目視することができないため, 1-5-2で検出した外耳孔中心との位置関係から, その位置を推測した. 左右外耳孔の midpoint とビームセンタとの距離を, A-P (Anterior-Posterior) 方向について X, S-I (Superior-Inferior) 方向について Y とした(Fig. 7左). そして, 画像データベース80例のうち30例のCT画

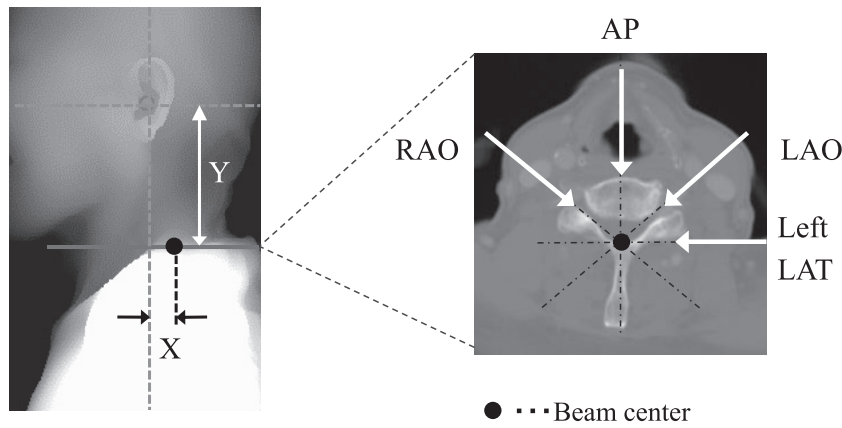


Fig. 7 A beam center location of 4R cervical spine radiography (right) at the level of fourth cervical spine. Distances (X, Y) in A-P and S-I direction between the midpoint of left and right EAM and the beam center, respectively, were measured for 30 cases.

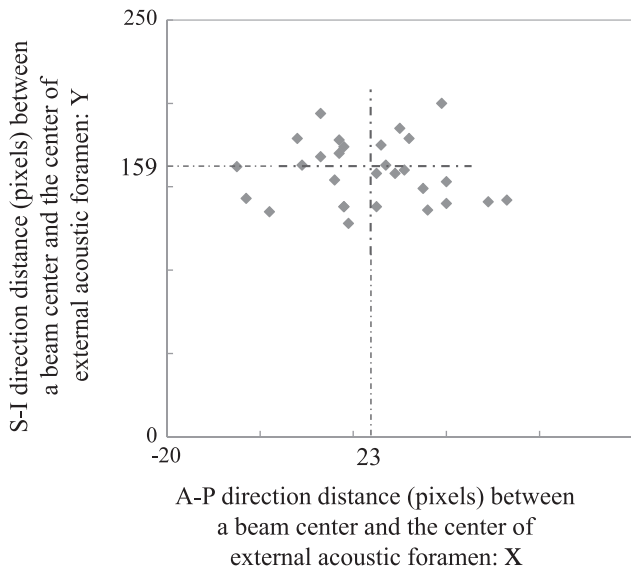


Fig. 8 Distribution of two measured distances obtained from 30 cases.

像データについて、これらの X と Y を測定した結果、その平均値は、X=23 pixel (11.2 mm), Y=159 pixel (77.6 mm) となった (Fig. 8)。そこで、本手法では、この値を用いることで、外耳孔位置からビームセンタ位置を決定した。

1-7 模擬 X 線投影像の作成

1-7-1 RaySum 処理

RaySum 処理は、CT によって再構成された横断面画像を HU (Hounsfield units) スケールのまま単純に 1 方向へ加算または平均処理を行った処理で、この画像の画素値はその画素位置における投影経路上の線減弱係数の和に比例する⁵⁾。

単純 X 線撮影では X 線管から X 線が放射投影され

ることから、本手法では、加算平均処理を行う方向をビームセンタからの距離に応じて放射状に変化させた。

1-7-2 模擬 X 線投影像の作成

ビームセンタの決定に用いた 30 例を除いた残り 50 例の CT 画像データを用いて、加算平均処理による模擬 X 線投影像を作成した。作成した模擬 X 線投影像は 8 bit グレイスケールで、通常の X 線投影像と画像の見え方が同等となるように階調反転処理を行い、透過 X 線量が多いほど画素値が 0 に近づき、黒くなる階調とした。

頸椎 4 方向撮影における X 線の入射角や焦点-検出器間距離 (source image receptor distance: SID) は、一般的に文献^{6,7)}に記載されているデータを参照して、正面像と斜位像については尾頭方向に 15°, SID は 150 cm として、加算平均処理を行った。また、側面像については左側面で、検出器面に対して垂直に X 線が入射するものとした。そして、検出器のサイズは、一般的に頸椎撮影で使用されている四切サイズ (25x30 cm) とし、通常の撮影で得られる X 線像を再現するため、X 線の照射範囲をコリメータで横幅 18.75 cm (7.5 インチ) に設定したように見える画像処理を行った (Fig. 9)。この画像処理では、仮想照射野内に対しては 5x5 のカーネルによるアンシャープマスク処理を行い、仮想照射野外に対しては、同じカーネルサイズで平滑化処理を行ったうえで、画素値を加算して平均処理による計算値の 4 倍にして、照射野外の X 線像を再現した。

1-8 検像による評価

自動ポジショニング法の正確さは、50 例の CT 画像データを用いて作成した模擬 X 線投影像について、

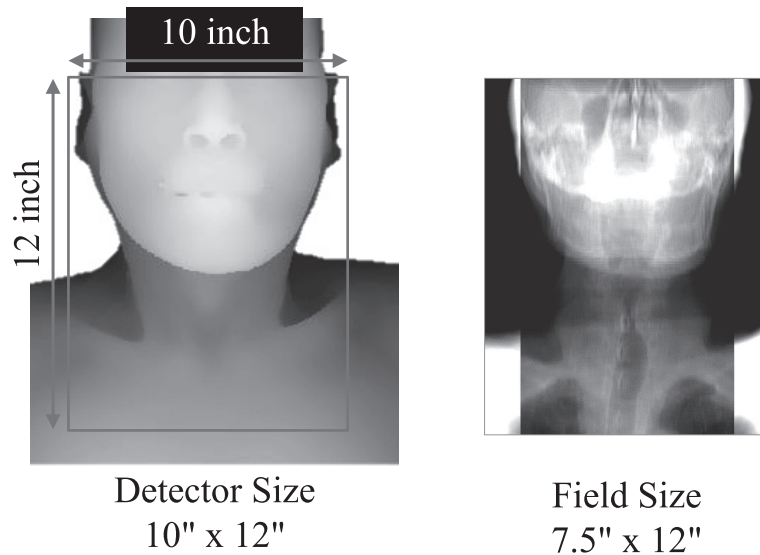


Fig. 9 Simulated detector size and irradiation field for 4R cervical spine radiography.

技師 1 名(一般撮影における検像の経験 20 年)が検像を行うことで検証した。

本研究では、頸椎 4 方向が正しく撮像されているかどうかの検像基準として、斜位と側面については、第 1 頸椎から第 7 頸椎がすべて正しく含まれていること、そして、斜位については椎間孔が明瞭に観察可能であることとした。なお、正面像については、通常の検像では下顎先端と後頭蓋窩が重なるポジショニングが正しく行われているかどうか判断されるが、本手法では CT 検査時に下顎を前方に出していることが稀なため、下顎先端と後頭蓋窩の一致については検像の対象外として、画像の正中線上に棘突起が位置しているか、第 3 頸椎から第 1 胸椎までが描出されているか、という点について検像を行った。

2. 結果

検証用の 50 例に本手法を適応した結果、基準点の検出については、鼻尖を誤検出したものが 1 例、左外耳孔を誤検出したものが 1 例であり、残り 48 例においては、鼻尖、左右外耳孔ともに正しく検出された。

基準点では、誤検出が 2 例認められたが、その 2 例を含めたすべての 50 症例について、ビームセンタの三次元座標を用いて再構成した模擬 X 線投影像は、いずれの症例も検像では問題がないと判定された。

基準点を正しく検出した 2 例と誤検出した 2 例の、基準点の検出結果画像と模擬 X 線投影像を Fig. 10 に示す。

3. 考察

Figure 10A の Case 1 の被検者は頭頸部に損傷や炎症などの症状がなく、顔認識に影響を与える因子が少なかったため、理想に近い頸椎撮像像が得られた。Case 2 は右下顎が欠損している例であるが、基準点検出での影響はなく、模擬 X 線投影像も正しく作成された。Figure 10B の Case 3 においては、被検者の口唇に炎症による腫脹がみられる状態で、CT 画像上では鼻尖よりも上口唇が高い座標を示したことが誤検出の原因であった。Case 4 の誤検出は、被検者の頭の傾きと、耳介部のつくりの個人差に対応しきれなかったことから生じたものであると考えられる。今後、鼻尖、外耳孔検出の両方において、手順の再検討が必要である。

被検者の体表面に入射点を定める従来の考え方ではなく、ビームセンタの三次元座標を体表面の基準点から決定し、そのビームセンタに向けて X 線を照射するという、ポジショニングにおける新しい考え方は、放射線治療の領域で長期にわたって利用されてきた考え方を利用したものである。技師が目で見えて被検者のポジショニングを行う場合には、体表面における入射点の位置が被検者の体格によって変化するため、経験則により、その入射点の位置を調整する必要があるが、ビームセンタの三次元座標に対して X 線照射を行う新しい考え方であれば、体格に影響を受けずに、検査対象が高い割合で画像の中央となるようなポジショニングが可能になると考えられる。実際、本手法を用いて得られた頸椎 4 方向の画像では、50×4 方向の全 200 画像の 174 画像(87%)において、頸椎椎体が

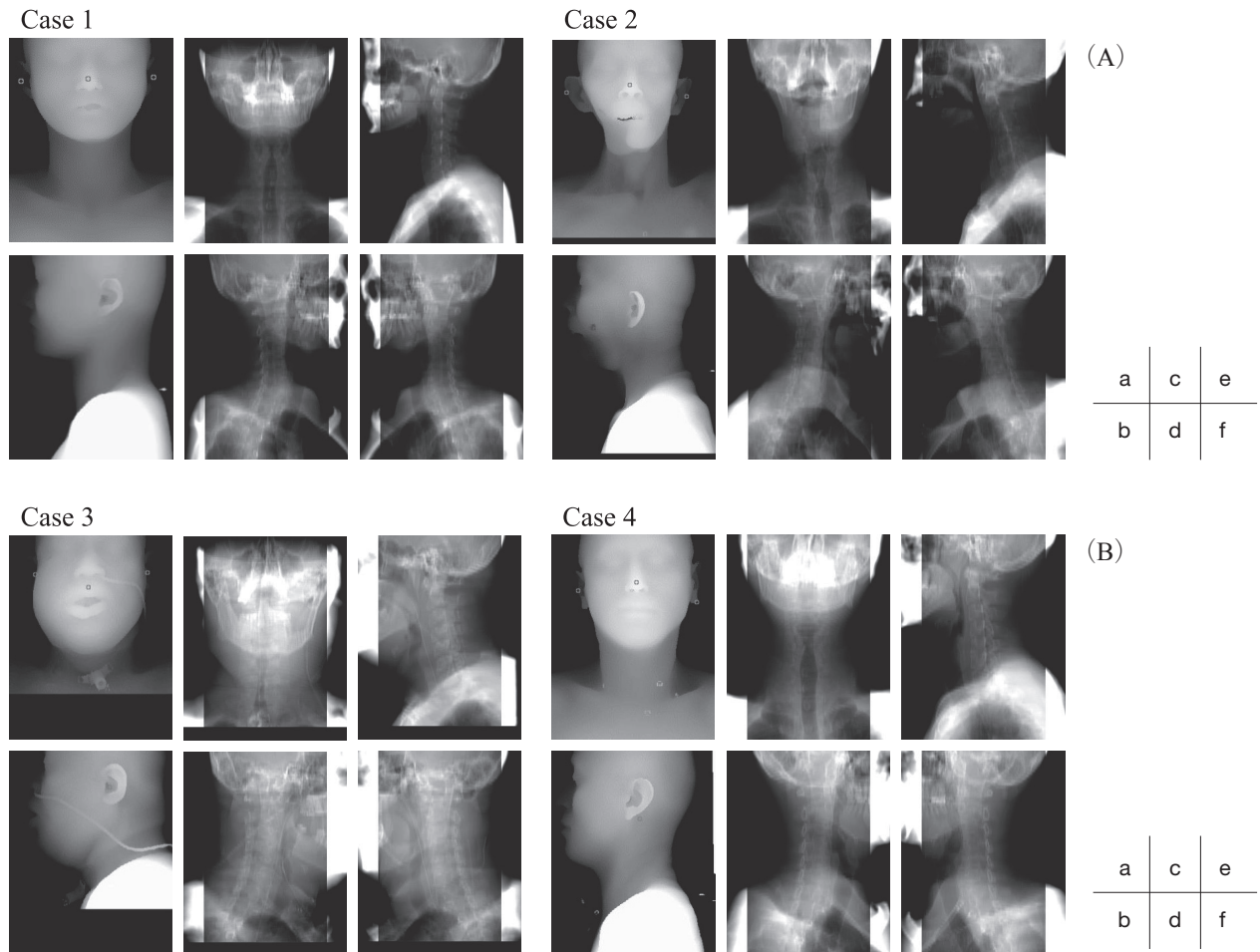


Fig. 10 (A) Examples of the correctly inspected cases of which reference points were identified suitably on the face rendering images (a, b), and produced appropriate projection images for 4R cervical spine radiography (c-f).

(a) Front, (b) Lateral, (c) AP, (d) RAO, (e) LAT, (f) LAO

(B) Examples of the incorrectly inspected cases of which reference points were not identified on the face rendering images (a, b), but produced appropriate projection images for 4R cervical spine radiography (c-f).

画像の正中線と一致しており、一致が認められなかったのは、CT撮影の際の枕の高さや頸椎彎曲により、通常より頸椎が斜めに配置されている被検者、また、頸椎変性疾患により前彎が失われている被検者であった。ただし、結果に示したように、一致が認められなかった症例でも、検像では、すべての症例において問題は認められなかった。

本研究では、院内に保存されている診療用に撮影されたCT画像データを用いて、一般撮影における自動ポジショニング法の開発を行った。CT画像の分解能が一般撮影における画質に比べて劣るため、細かな部分の描出の再現については問題があるが、本研究のように、診断目的ではなく、ポジショニングの適否を確認することが目的であれば、現状の解像度でも問題はないと考える。しかし、今後、CT画像に対する機械学習を用いた超高解像度処理などを行うことによっ

て、より実際のX線投影像に近い模擬X線投影像が作成されれば、診断を目的とした利用も可能になると考えられる。

本研究では、被検者の顔情報とX線投影像を対応させるために、被検者の顔認識はCTの三次元画像データから作成した画像を用いて行ったが、本手法が臨床で実用化される場合には、一般的に普及しているカメラからの入力から鼻尖や耳孔を検出する手法の方が精度が高いため、より正確なポジショニングが可能になると期待される。また、本研究で用いた画像データにおいては、CT検査でのポジショニング時の被検者の頭の傾きが誤検出や画像中央からのずれの一因となっていたため、頭の傾きや回転の補正といった検査時の被検者の整位を正しく行うための工夫も、自動ポジショニング実現に必要であると考えられる。

4. 結 語

自動ポジショニング法開発の初期検討として、三次元再構成した頭頸部 CT 画像から頸椎 4 方向撮影に必要な基準点を自動検出する自動ポジショニング法の開発を試みた。

本手法により、CT 画像の模擬人体データから頸椎 4 方向撮影のポジショニングに必要な基準点が正確に検出され、基準点からビームセンタの三次元座標を決定することで、正確なポジショニングが可能となった。また、本研究により、通常の検査目的で施行され、その後、医療機関に保管されている大量の CT 検査データが、一般撮影における撮影技術開発のために必要な模擬人体データとして利用可能であることが証明された。

また、本研究のように、既存の CT 画像を用いることで、患者に対する無用な被ばくなしに、撮影法に関するさまざまな研究が実現可能となることが期待される。

謝 辞

本研究で用いた CT 画像およびデータを提供していただきました。本学医学部附属病院中央放射線部の羽手村昌宏様に深く感謝いたします。

本研究の要旨は、第 74 回日本放射線技術学会総会学術大会にて発表し、CyPos 賞 (Excellent Student Awards) を受賞しました。

参考文献

- 1) Nose H, Shiraishi J. Clinical utility of ultra-low-dose pre-test exposure to avoid unnecessary patient exposure due to positioning errors: a simulation study. *Radiol Phys Technol* 2017; 10(4): 489-495.
- 2) 塚本信宏. サイバーナイフによる定位放射線治療. *RADIOISOTOPES* 2018; 67(1): 31-42.
- 3) 久保田佳樹. 異業種での映像情報メディア利用 [第 7 回]: 放射線治療のための画像処理. *映像情報メディア学会誌* 2015; 69(7): 580-584.
- 4) Giger ML, Doi K, MacMahon H. Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography. 3. Automated detection of nodules in peripheral lung fields. *Med Phys* 1988; 15(2): 158-166.
- 5) 鈴木省吾, 市川勝弘, 玉木 繁. CT による ray-summation 画像の画質と臨床的有用性: *Digital radiography* との比較. *日放技学誌* 2017; 73(5): 372-381.
- 6) 小水 満. 放射線画像技術学. 東京: 医歯薬出版, 2010.
- 7) 山下康行, 船間芳憲, 永末 望, 他. 単純 X 線撮影必携. 東京: 診断と治療社, 2013.

問合先

〒862-0976 熊本市中央区九品寺 4 丁目 24 番 1 号
熊本大学大学院保健学教育部 鶴岡礼奈