

手関節における三次元動態撮像法および解析法の開発

林 則夫, 真田 茂^{*}, 鈴木 正行^{*}, 藤原 康博^{*,*}, 日高 国幸^{*,*}, 松井 武司^{*,*,*}

金沢大学大学院医学系研究科・〒920-0942 石川県金沢市小立野 5 丁目 11 番 80 号

^{*}金沢大学医学部保健学科・〒920-0942 石川県金沢市小立野 5 丁目 11 番 80 号

^{*,*}福井医科大学附属病院放射線部・〒910-1193 福井県吉田郡松岡町下合月 23-3

^{*,*,*}大阪大学附属病院放射線部・〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-15

^{*,*,*,*}金沢大学付属病院放射線部・〒920-8641 石川県金沢市宝町 13 番 1 号

(2002 年 10 月 5 日, 最終 2002 年 11 月 18 日)

Digital Dynamic Radiography with 3-D and Kinetic Analysis for the Wrist

Norio HAYASHI, Shigeru SANADA^{*}, Masayuki SUZUKI^{*}, Yasuhiro FUJIWARA^{*,*},
Kuniyuki HIDAKA^{*,*,*} and Takeshi MATSUI^{*,*,*,*}

Graduate School of Medical Science Kanazawa University, Kodatsuno 5-80, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-0942, Japan

^{*}School of Health Sciences Kanazawa University, Kodatsuno 5-80, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-0942, Japan

^{*,*}Fukui Medical University Hospital, Shimoaiduki 23-3, Matsuoka-tyou, Yoshida-gun, Fukui 910-1193, Jpn

^{*,*,*}Osaka University Hospital, Yamadaoka 2-15, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

^{*,*,*,*}Kanazawa University Hospital, Takara-machi 13-1, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-8641, Japan

(Received October 5, 2002, in final form November 18, 2002)

Abstract : Sequential wrist images were taken at 5-degree rotational interval from a pronate to supinate position (180 degrees). A tentative rotational center was obtained automatically by image analysis. We analyzed the sinogram obtained from the profile data of each image and calculated the true rotational center. Axial images were reconstructed using filtered back projection. These reconstructed images were more accurate than images that were reconstructed without analyzing the sinogram.

The sinogram was derived of ulnar and radius profile data. This sinogram was used to reconstruct more accurate images. These images are easily converted into 3D or multi planar reconstruction.

These results indicate that rotational imaging provides additional diagnostic information like 3D structure and kinetic data.

Key words : dynamic FPD, wrist, sinogram, Computer analysis.

1. はじめに

現在, 臨床の現場で, 従来のスクリーン/フィルム系のエックス線撮影から, CR やフラットパネルディテクタを用いたデジタルエックス線撮影に移行しつつある。デジタル撮像機器の普及で, 簡単に画像処理や画像解析を行うことが可能となった。さらに動画対応フラットパネルディテクタを用いると, 従来の静態診断から動態診断の可能性がでてきた[1-2]。今回は整形外科の領域で検査の頻度が高

い手関節を動態診断の対象とした[3]。手関節では, 従来は主として, 正面, 側面などの静止画を対象に検査が行われている。ところが, 手関節を回転させながら撮影を行うことで, 他方向からの手関節の観察が可能となる。さらに, 回転させて得た回転画像から逆投影法で, 断層像を再構成することもできる。しかし再構成の際の回転中心は実際の回転中心とは異なっているために, 回転中心の不一致に伴うアーチファクトが見られる。この回転中心の不一致に伴うアーチファクトをサイノグラム上で補正して, 断

層像を適切に再構成する方法を検討した。そして得た断層像から MPR (Multi Planar Reconstruction) 画像や 3-D 再構成を行った[4-5]。

2. 方 法

2.1 対象および使用機器

健常ボランティア 1 名(男性, 49 才)の手関節を対象として, FCR-7000 (Fuji Film) を用いて撮影した。撮影した画像はパーソナルコンピュータ Net Vista (IBM) に転送して解析を行った。解析プログラム開発には C++ Builder5 (Borland) を使用した。

2.2 撮影方法

本研究は、動画対応フラットパネルディテクタを用いた検査を想定しているが、装置を現有していない。そのために、今回は FCR-7000 を用いて、手関節を回内 90 度から回外 90 度までの 5 度間隔で、時系列に手を回転させながら撮影した。撮影条件は管電圧 45kV、管電流 3.6mAs であり、撮影した画像サイズはマトリックスサイズ 2510×2000、ピクセルサイズ 0.1mm、階調数 10bit である。手関節の回転回転画像の一部を Fig. 1 に示す。

2.3 断層像再構成法

2.3.1 再構成法

回転画像で作成した投影データから、フィルタ補正逆投影法を用いて断層像を再構成した。ここで用いるフィルタ関数は、通常の再構成に用いられている Shepp&Logan を用いた。

2.3.2 基準回転中心の決定および投影データの作成

回転画像から投影データを作成するためには、そのすべての画像中において、基準となる回転中心を定める必要がある。そのために、月状骨近位端の位置で、両端の皮膚面の中点を仮の基準回転中心とした。Fig. 2 に手関節画像中の基準回転中心を示す。このようにして定めた基準回転中心から、それぞれの回転画像の投影データを作成した。



Fig. 1 X-ray sequential images from pronation to supination of wrist.

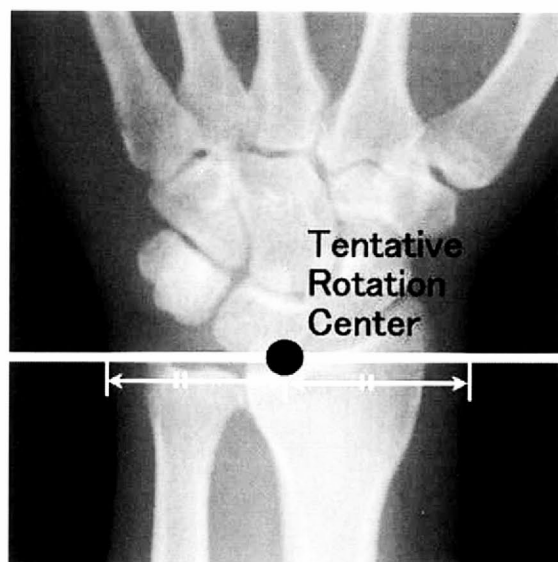


Fig. 2 A wrist image pointed Basic Rotation Center for reconstruction. The horizontal line through a juxtaposition of lunate bone. In the line, skin edges are found. The midpoint of these edges is defined as Basic Rotation Center.

2.4 回転中心補正法

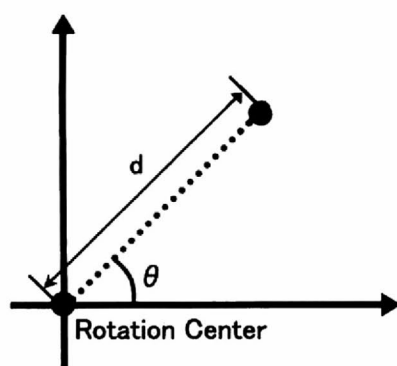
2.3 で設定した基準回転中心と実際の回転中心とは異なっている。このズレを評価し、補正するために、投影データを用いてサイノグラムを作成した。

2.4.1 回転中心のズレの評価

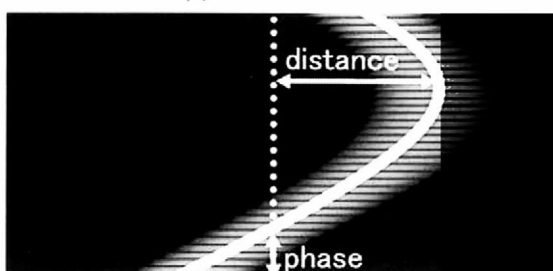
得た投影データが、実際の回転中心と一致しているか否かを簡便に評価するためにサイノグラムを用いた。ある断面において、回転中心から距離 d 、角度 θ の位置に物体があるとする。この物体と回転中心の関係を Fig. 3(a) に示す。この物体は、サイノグラム上ではサインカーブを描く [6]。このときサイノグラムの縦軸を ψ 軸 (手の回転角度) として、横軸を r 軸 (中心からの距離) とすると、サイノグラム上での物体の成分は次式で示すことができる。

$$r = d \times \sin(\psi - \theta)$$

すなわち、断面上のある物体の重心は、もし回転中心が一定であれば、サイノグラムはサインカーブを描く。今回は対象とする橈骨、尺骨の重心と中心はほぼ一致しているとした。仮に回転中心が一致し



(a)



(b)

Fig. 3 Theory of the sinogram. (a) A point object. (b) The sinogram acquired from the object.

ていなければ、重心はサインカーブを描かない。

2.4.2 回転中心の補正法

サイノグラム上でサインカーブを描かない場合、サイノグラムをシフトさせることで、多少の位置情報のズレは発生しても、回転中心の移動に伴うアーチファクトを大幅に減少させることができる。正しく再構成を行いたい物体のサイノグラム上での成分に着目して、その成分の中心を求める。得た中心から最小 2 乗法を用いてサインカーブに近似させる。その近似式と中心のデータから、中心が近似式に合うようにサイノグラムを適切にシフトさせた。

2.5 シミュレーション

正しく再構成するための正しい回転中心が、あるべき場所がないときに再構成画像上でどのようなアーチファクトが発生するのか、そして本研究で述べる補正法によって、回転中心を正しい場所にシフトさせ、正しく再構成を行えるかを評価するために

シミュレーションを行った。

2.5.1 サイノグラムの作成

橈骨、尺骨を想定して、Fig. 4(a)に示すようなシミュレーション原画像を作成した。この原画像を対象として、0度から180度まで5度間隔で投影

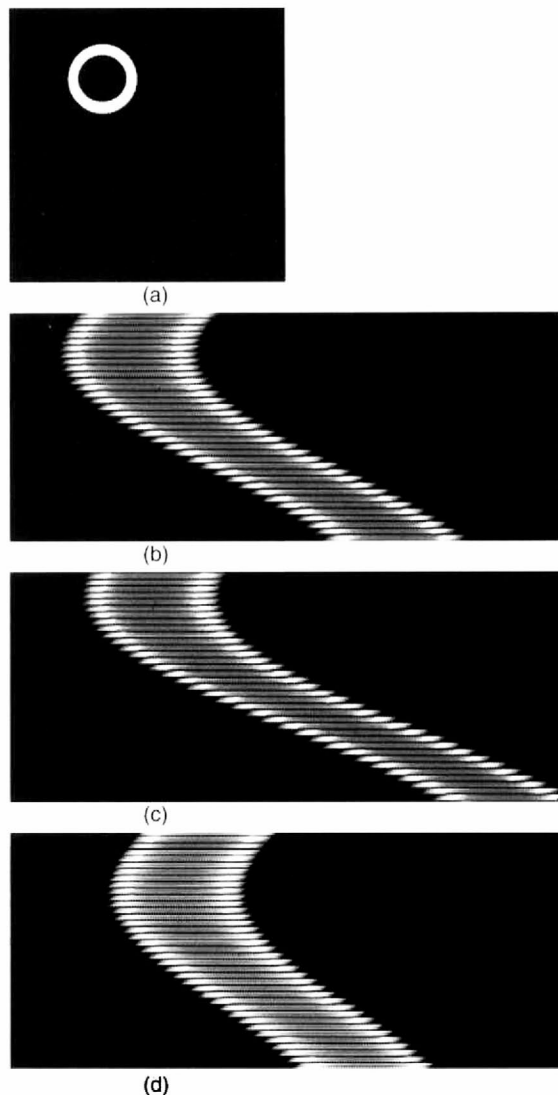
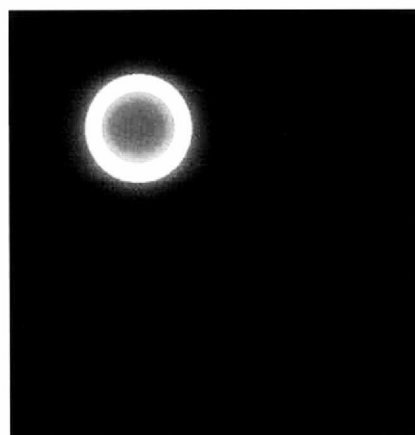
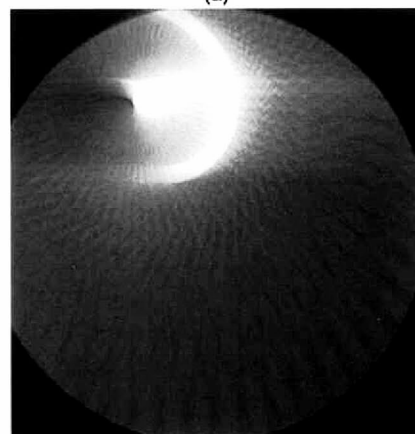


Fig. 4 Simulation of rotation shift.

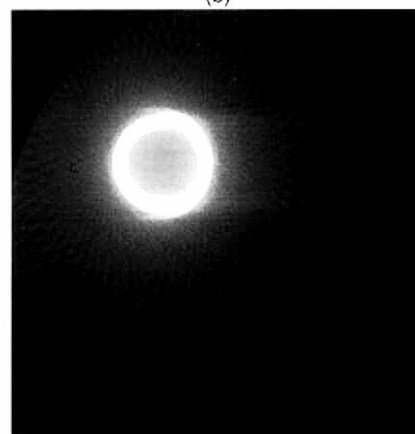
- (a) A simulation image.
- (b) Corrected centered sinogram.
- (c) Uncorrected centered sinogram.
- (d) Corrected sinogram.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Sinogram acquired from x-ray sequential images of wrist.

- (a) Uncorrected sinogram.
- (b) Corrected sinogram.

データを作成し、その投影データからサイノグラムを作成した。回転中心の移動のないサイノグラムをFig. 4(b)に示す。つぎに、投影データを作成する際に、回転中心を故意に移動させた場合のサイノグラムの1例をFig. 4(c)に示す。回転中心を移動させる際に、その移動量は投影角度ごとに異なる。

2.5.2 回転中心移動の補正

2.5.1で回転中心を移動して作成したサイノグラムを対象にして、今回の回転中心補正法を試した。Fig. 4(c)のサイノグラムに対して、回転中心の移動を補正したサイノグラムをFig. 4(d)に示す。それぞれのサイノグラムから投影データを作成して、2.3.2で示した再構成法を用いて再構成を行った。

2.6 実際の手関節を対象とした補正および再構成

2.6.1 サイノグラムの取得

手関節回転画像において、設定した基準回転中心をもとに投影データを作成して、サイノグラムを作成した。Fig. 6(a)に橈骨遠位端から4cm近位側の断面を対象として作成されたサイノグラムを示す。こ

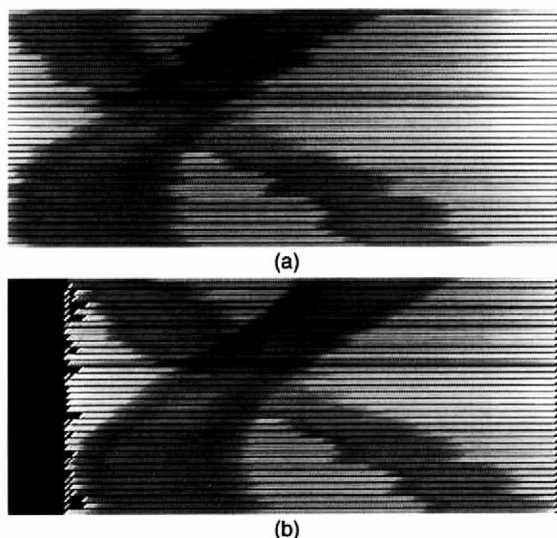


Fig. 6 Reconstruction images from simulation sinograms.
(a) Reconstruction image from no shifted sinogram.
(b) Reconstruction image from shifted sinogram.
(c) Reconstructin image from corrected sinogram.

のサイノグラムにおいて、左上から右下へかけて見られる成分は尺骨の成分であり、右上から左下にかけて見られる成分は、橈骨の成分である。どちらも滑らかでなく、中心がサインカーブを描いていない。

2.6.2 回転中心の補正および再構成

そこで、今回の補正法を用いて回転中心の移動の補正を行った。Fig. 6(a)中の橈骨の成分に着目して、回転中心の補正を行ったサイノグラムをFig. 6(b)に示す。それぞれのサイノグラムから投影データを作成し、2.3.2で示した方法を用いて再構成を行った。本研究では、コーン角が小さく、被写体-フィルム間距離が非常に短いため2次元再構成法を用いた。得られた再構成画像(Axial)を用いて、MPR画像(Coronal 像, Sagittal 像)や3-D再構成を行った。3-D再構成はサーフェスレンダリング法を用いた。

3. 結 果

3.1 シミュレーション画像の補正

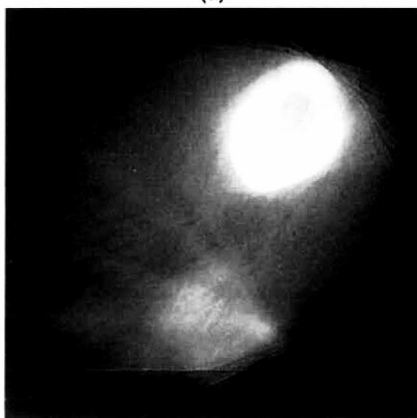
シミュレーションで作成したサイノグラムから断層像を再構成した画像をFig. 5に示す。Fig. 5(a)は、回転中心の移動のないサイノグラム(Fig. 4(b))から再構成した画像である。回転中心の移動がないため、シミュレーション原画像とはほぼ同様の再構成画像となっている。Fig. 5(b)は、回転中心を移動させたサイノグラム(Fig. 4(c))から再構成した画像である。中心がサインカーブを描いていないサイノグラムから再構成した場合には、このような回転中心の不一致のためアーチファクトが見られる。Fig. 5(c)は、回転中心の移動の補正を行ったサイノグラム(Fig. 4(d))から再構成した画像である。この画像ではリング状のパターンが正しく再構成されている。

3.2 手関節を対象とした画像の補正

手関節回転画像から作成したサイノグラムを用いて、再構成した画像をFig. 7に示す。Fig. 7(a)は回転中心の移動を補正していないサイノグラムFig. 6(a)を用いて、再構成した結果である。橈骨、尺骨



(a)



(b)

Fig. 7 Radius reconstruction images from sinogram acquired from x-ray sequential images of wrist.

(a) Reconstruction image from no shift sinogram.

(b) Reconstruction image from shifted sinogram.

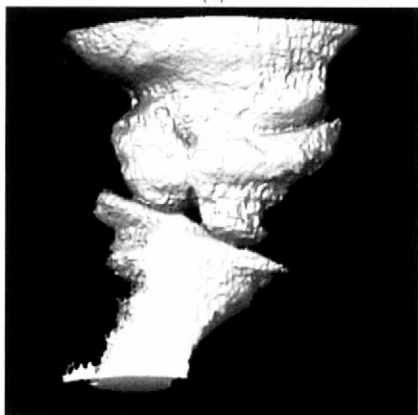
のいずれも、回転中心の不一致が原因のアーチファクトが見られる。この再構成画像から橈骨、尺骨の形態を観察することはほとんど不可能である。Fig. 7(b)は、橈骨を基準に補正したサイノグラム(Fig. 6(b))から再構成した画像である。基準とした橈骨に関しては、大まかではあるが形態を観察することができる。また尺骨を基準にした場合も同様に、アーチファクトを低減した再構成画像を得た。また、その断層像を用いたMPR画像および3-D再構成画像をFig. 8に示す。Fig. 8(a)は、Coronal像を再構成した画像である。コントラストは低いが橈骨、尺骨が分離して描画されている。Fig. 8(b)は、Sagittal



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 MPR and 3D images.

(a) A coronal MPR image.

(b) A sagittal MPR image.

(c) 3D image by surface rendering.

像を再構成した結果である。手根骨の識別は困難だが手根骨と前腕骨との関節の認識は可能である。Fig. 8(c)は断層像(Axial)からサーフェスレンダリング法を用いて3-D再構成を行った画像である。

4. 考 察

Fig. 5のシミュレーションの結果でも明らかなように、回転中心の移動は、再構成に非常に大きく影響する。回転中心の移動がわずかであっても、それに伴うアーチファクトは大きい。回転中心の移動は、サイノグラム上でも顕著に現れる。本法のように、サイノグラム上で中心がサインカーブを描くように補正することで、回転中心の不一致が原因のアーチファクトを大幅に減少させることができた。手関節回転画像において実際の回転中心をあらかじめ求めておくことは非常に困難である。ただし、本補正法を用いると比較的に正しい断層像を再構成できる。Fig. 7の手関節回転画像からの再構成画像においても、本補正法で再構成画像が大幅に改善されている。しかし、手関節回転撮像は、断層像を得ることのみを目的としているわけではない。回転画像で動態解析やストレス運動解析を行い、さらに付加的な診断情報として断層像などを得ようとするものである。手を回転させて撮像するという簡便な方法で、CTの分解能までは期待できないものの、臨床的に有用な断層像が得られる可能性を示した。また、MPR画像や3-D再構成画像も含めて、今後臨床的な有用性について検討する予定である。

5. まとめ

整形外科の領域で、手関節は頻度の高い重要な検査部位である。手関節回転画像だけでなく、今回得た断層像やMPR画像などは、スクリーニングの段階で、かなり診断価値の高い付加的情報として提示することが可能になると期待される。

参考文献

- [1] Michel M, Vieux G, Peppler T, et al.: 一般撮影と透視撮影の組み合わせにおけるFPDの開発, INNEVISION, 16(4), 52-60, 2001.
- [2] 真田 茂: FPDの技術と開発の方向を中心に, INNEVISION, 16(4), 2-5, 2001.
- [3] Charles A, Goldfarb, Yuming Y, Louis A, et al.: Wrist Fractures: What the Clinician Wants to Know, Radiology, 219, 11-28, 2001.
- [4] Patterson RM, Viegas SF, Elder K and Buford WL: Quantification of anatomic, geometric, and load transfer characteristics of the wrist joint, Semi Arthroplasty, 6(1), 13-19, 1995.
- [5] Feipel V and Rooze M: Three-Dimensional motion patterns of the carpal bones: an in vivo study using three-dimensional computed tomography and clinical applications.
- [6] 大沼巧, 橋本雄幸, 井上多門: サイノグラム上の図形特徴と再構成のための事前情報, 電子情報通信学会技術研究報告, 100(464), 21-26, 2000.