

胸部動画像を対象とした呼吸性動態の定量化

田中 利恵, 真田 茂[†], 鈴木 正行[†], 小林 健^{††}, 松井 武司^{†††}, 井上 仁司^{††††}, 中野 善久^{†††††}

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

[†]金沢大学医学部保健学科・〒920-0942 石川県金沢市小立野 5-11-80

^{††}金沢大学医学部附属病院・放射線科・〒920-8641 石川県金沢市宝町 13-1

^{†††}金沢大学医学部附属病院・放射線部・〒920-8641 石川県金沢市宝町 13-1

^{††††}キヤノン株式会社 宇都宮光学機器事業所・〒321-3292 栃木県宇都宮市清原工業団地 20-2

^{†††††}京都桂病院・放射線科・〒615-8256 京都市西京区山田平尾町 17

(2002年6月9日, 最終2002年11月1日受理)

Quantitative Analysis of Respiratory Kinetics in Breathing Chest Radiographs Obtained Using a Dynamic Flat-Panel Detector

Rie TANAKA, Shigeru SANADA[†], Masayuki SUZUKI[†], Takeshi KOBAYASHI^{††},
Takeshi MATSUI^{†††}, Hitoshi INOUE^{††††} and Yoshihisa NAKANO^{†††††}

Graduate school of Medical Science, Kanazawa University ;

5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, 920-0942, Japan

[†]School of Health Sciences, Faculty of Medicine, Kanazawa University ;

5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, 920-0942, Japan

^{††}Department of Radiology, Kanazawa University Hospital ;

13-1 Takaramachi, kanazawa, 920-8642, Japan

^{†††}Department of Radiology, Kanazawa University Hospital ;

13-1 Takaramachi, kanazawa, 920-8642, Japan

^{††††}DR Systems Development Dept.5, CANON INC ;

20-2 Utsunomiya, 321-3292, Japan

^{†††††}Department of Radiology, Kyoto Katsura Hospital ;

17 Hiraomachi, Yamada, Nishikyoku, Kyouto, 615-8256, Japan

(Received June 9, 2002, in final form November 1, 2002)

Abstract : Dynamic chest radiographs could be obtained in a screening examination using a dynamic flat-panel detector. The dynamic images will provides not only conventional anatomical information but also respiratory kinetic information easily and cost-efficiently. The purpose of this study is to develop the method of quantitative analysis for respiratory kinetics on dynamic chest radiographs. We obtained the dynamic images of six healthy volunteers during respiration using the dynamic flat-panel detector. Our computerized method quantified the movement of diaphragm and lung markings, and the change of density in local area on these images. The results suggest that this computerized method may aid radiologist for the evaluation of lung diseases in a screening examination.

Key words : Dynamic Chest Radiograph, Respiratory Kinetics, Computer Analysis, Flat-Panel Detector, Screening

1. はじめに

胸部単純 X 線写真は胸部疾患のスクリーニング

として広く用いられている。通常、深吸気時に撮影され、肺野病変のスクリーニングや心拡大の評価に利用されている。従って、静止画像としての情報は

多いものの、呼吸による動きや心拍動については評価できない。

現在、呼吸性動態の画像解析は Dynamic MRI や Dynamic CT を用いて行われている。例えば、横隔膜や胸郭の移動量や肺野内局所の濃度変化の呼吸性動態情報が、肺気腫や肺容積減少手術の効果判定に有用であると報告されている^[1,2]。また、腫瘤状陰影の呼吸性動態の有無が、胸壁浸潤判定に有用であるとも報告されている^[3,4]。イメージ・インテンシファイヤー (I.I.) 動画を対象にした研究では、横隔膜や肺内構造物の呼吸性移動および肺野内局所の呼吸性濃度変化の定量化が行われている^[5,6]。しかし、撮像視野の制限や幾何学的歪みが問題となっている。

近年、フラットパネルディテクタ (FPD) の臨床への導入が進んでいる。特に注目すべきことは、現在開発が進められている大視野の動画対応 FPD を用いることで、胸部動画の取得が可能となることである。すなわち、この胸部動画をコンピュータ解析することによって、従来の解剖学的所見に動態情報を付加できる可能性がある。

本研究の目的は、胸部動態画像診断のためのコンピュータ解析法を開発することにある。今回は FPD 改造機で撮影した正常ボランティア 6 名の胸部動画を対象に、横隔膜の移動量、肺内構造物の呼吸性移動ベクトル、肺野内局所の呼吸性濃度変化の定量化を試みたので報告する。

2. 対象および方法

2.1 画像の取得

FPD 改造機 (CXDI-22, CANON Co., Ltd, Tokyo) を用いて、6 名の正常ボランティアの呼吸過程を撮影した。撮影体位は従来の胸部単純 X 線撮影と同様に、立位正面背腹方向とした。撮影時に放射線技師はボランティアに対して次のような合図を出した。

「はい、息を吸って。1, 2, 3, 4, はい、吐いて。1, 2, 3, 4, はい、終了です。」(下線部撮影中)。前半のカウント時が吸気相で、後半のカウントが呼気相となり、かつ最大吸気と通常呼気になるように撮

影前に練習を行った。撮影条件は 120kV, 80mA, 3.2 msec, 3fps とし、10 秒間で 30 枚の胸部 X 線画像を連続的に取得した。この時の被曝線量は我々の施設で Fuji Computed Radiography (FCR) (Fuji Medical Systems Co., Ltd., Tokyo) を用いて胸部 X 線写真 (正面像) を撮影した時の約 1.5 倍に相当する。なお、ボランティアにはこの撮影に関する十分な説明を行って同意を得た。画像サイズは 43cm×43cm で、マトリックスサイズは 2688×2688 (pixels)、階調数は 4096 Gray Scale である。撮影された胸部動画をパーソナルコンピュータ (OS: Windows2000 (Microsoft, USA), 開発環境: C++Builder (Borland, Scotts Valley, USA)) に転送して解析した。

2.2 画像解析アルゴリズム

Fig. 1 にアルゴリズムの概要を示す。解析を始め

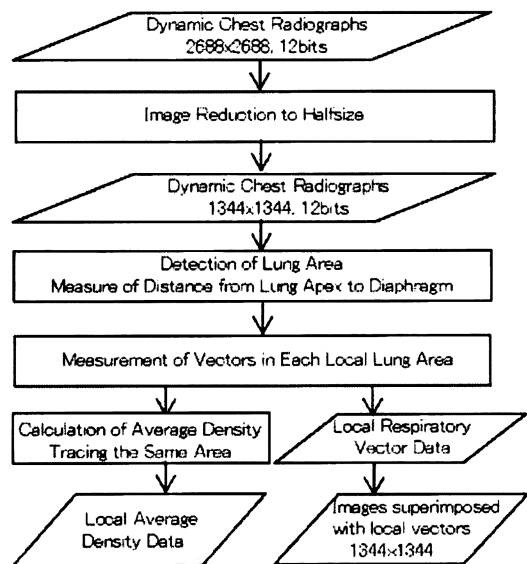


Fig. 1 The overall scheme of our analysis technique.

る前に、処理時間短縮のために胸部動画のマトリックスサイズを半分の 1344×1344 に縮小した。まず呼吸による体の動きを補正するために肺野外側より算出した胸部中心線を目安に全てのフレームに対して位置合わせを行った。肺野領域を認識させて、肺尖部の一番高い 1 点から横隔膜までの距離を計測

した^[5,7,8]。横隔膜動態の解析結果を呼吸位相の指標にも利用した。次に胸部動画像を格子状の局所領域に分割し、局所領域ごとにブロックマッチングの手法により呼吸性移動ベクトルを測定した^[9,10]。この際の局所領域サイズは計算時間と解析精度を考慮して肋骨間距離とした^[11]。それぞれの局所領域ですべてのフレームを通して同一部位を追跡しながら平均濃度を算出した^[6]。

3. 結果

Fig. 2(a)に肺尖部から横隔膜までの距離の時間

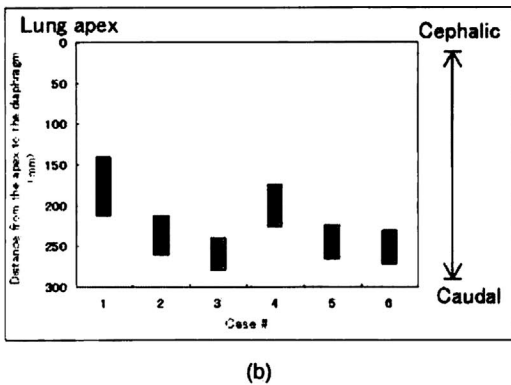
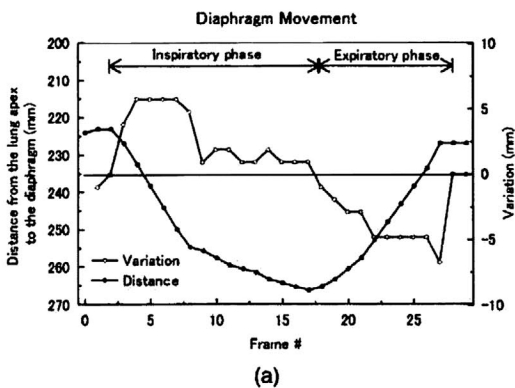


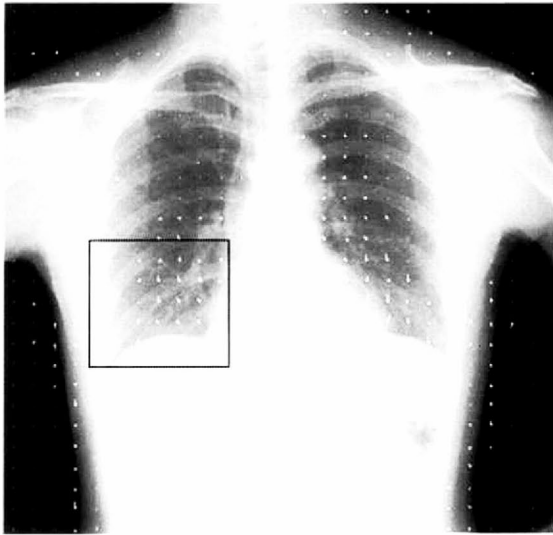
Fig. 2 Diaphragm movement. (a) Distance from the lung apex to the diaphragm curve in the right lung of a healthy volunteer. Diaphragm movement was used for index of respiratory phase. (b) Range of diaphragm movement from inspiration to expiration in six healthy volunteers. The lung apex corresponds to 0 at the vertical axis. Range of diaphragm's position are shown as bar graphs.

変化を示す。その距離の変化量が正である、すなわち肺が拡張するフレームを吸気相とし、負であるフレームを呼気相と推定した。この症例の場合、横隔膜の最大移動量は約4.5cmであった。Fig. 2(b)に6名の正常ボランティアについての、横隔膜の移動量を示す。肺尖部から横隔膜までの距離においても、横隔膜の移動量においても、大きな個人差が見られた($p < 0.01$)。

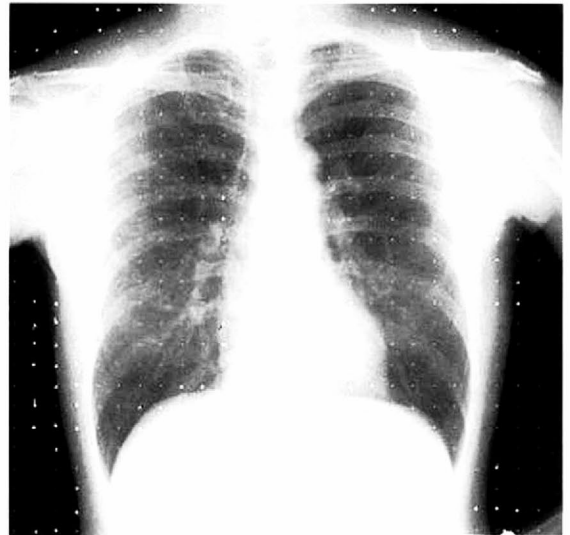
Fig. 3(a-c)に局所の呼吸性移動ベクトルを表示した画像を示す。矢印は画像上の肺内構造物が1つ前のフレームからどの方向にどの程度動いてきたのかを示している。Fig. 3(a)は2フレーム目から3フレーム目(吸気相)にかけての呼吸性移動ベクトルを3フレーム目の画像に表示した画像である。横隔膜付近と下肺野の肺紋理上に下向きに長い矢印があることが確認できる。また、大動脈弓付近および肺門部には末梢方向に向かう短い矢印がある。上肺野の呼吸性移動ベクトルは下肺野に比べると小さい。Fig. 3(b)は17フレーム目から18フレーム目(最大吸気位)にかけての呼吸性移動ベクトルを18フレーム目の画像に表示した画像である。肺野内全体で呼吸性移動ベクトルはほぼ0であった。Fig. 3(c)は23フレーム目から24フレーム目(呼気相)にかけての呼吸性移動ベクトルを24フレーム目の画像に表示した画像である。横隔膜付近および下肺野の肺紋理上に上向きに長い矢印がみられ、肋骨付近に下向きに長い矢印がみられる。吸気相と同様に下肺野の肺紋理が呼吸により大きく動いているにも関わらず、上肺野での呼吸性移動ベクトルはほぼ0であった。

Fig. 4(b,c)はFig. 4(a)に示す局所領域での濃度の時間変化である。吸気相ではピクセル値が上昇し、呼気相では低下している。吸気相では肺の中の空気が増加し、呼気相では減少する。それに伴いX線透過性は吸気相で上昇し、呼気相で低下する。この事実を反映する結果が得られた。

Fig. 5は、6名の正常ボランティアの呼吸性濃度変化量の平均値と標準偏差を示す。左右どちらの肺野についても下肺野が上肺野に比べて、呼吸性濃度変化は有意に大きい。上肺野は左右で有意に差はないが、下肺野は左右で有意に差がある($p < 0.01$)。



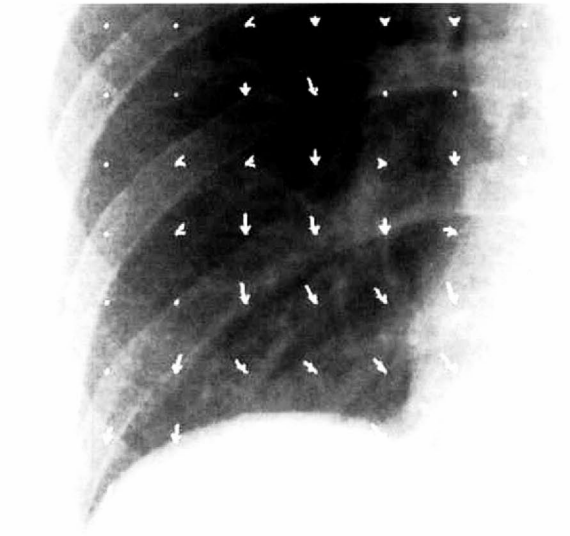
(a)



(b)



(c)



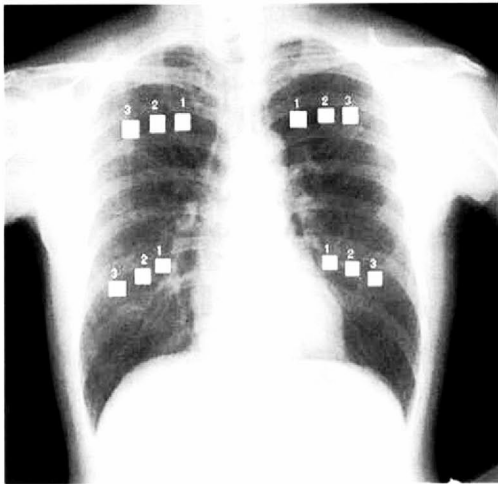
(d)

Fig. 3 Images with local vectors. The arrows show local vectors from the previous frame. (a) At the beginning of inspiration from frame# 2 to frame# 3. (b) At maximum inspiration from frame# 17 to frame#18, diaphragm doesn't move. (c) At expiratory phase from frame#23 to frame#24. (d) The enlargement at the small square on Fig. 3 (a).

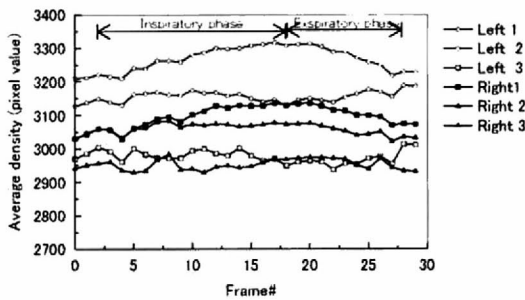
4. 考 察

スクリーニング胸部動態画像診断のためのコンピュータ解析ツールを開発するために、FPD改造

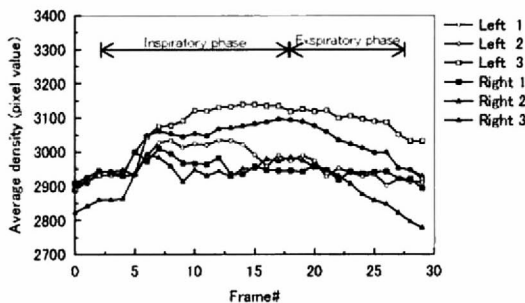
機で撮影した胸部動画像を対象に、呼吸性動態の定量化を行った。今回定量化したのは横隔膜の移動量、肺内構造物の呼吸性移動ベクトル、肺野内局所の呼吸性濃度変化である。この基礎的な検討において、



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Local density in lung field. (a) Local density was measured in the small square drawn on the image. The numbers shown in the image correspond to the series number in Fig. 4 (b-e). Relationship between average density and frame#(b)in the upper local lung field, (c) in the lower local lung field. m's position are shown as bar graphs.

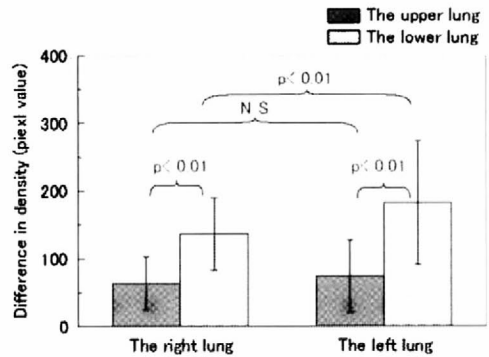


Fig. 5 Average difference in local density and its standard deviation in six healthy volunteers.

胸部動画像を対象に呼吸性動態をコンピュータによって定量的に解析した。本法により従来の解剖学的所見に動態情報を付加することが可能となり、画像診断に有用であることが示唆された。

横隔膜の形態および位置情報から、慢性閉塞性肺疾患(COPD)や拘束性肺疾患等の診断が可能である。拘束性肺疾患では横隔膜の位置は高くなるが、形態に変化はない。また、COPDでは横隔膜の位置は低くなり、形態は平らになる。しかし、横隔膜の形態および位置の正常範囲には幅がある^[12]。すなわち、上記の解剖学的所見に呼吸による横隔膜動態情報を付加することによってスクリーニングのための画像診断を支援することが期待される。吸気および呼気の二位相を撮影することによっても横隔膜移動量を評価することは可能である。しかし、本法による胸部動画像では吸気位から呼気位への変化過程や左右の同調性の解析も可能である。しかも、胸部単純X線写真の1.5倍の被曝線量であり、動態撮影に適切な撮影条件の検討により、さらに被曝線量を低減できることも考えられる。

また、呼吸性移動ベクトル解析では、局所の移動量とその向きを定量的に自動計測が行えた。また、視覚的に認知することも可能となった。肺内陰影の形態情報に動態情報を付加することによって、葉気管支レベルの中樞閉塞型肺癌と末梢肺炎との鑑別の可能性もあると考えている。

呼吸性濃度変化の解析では、吸気でピクセル値が

上昇し、呼気で減少するという結果が得られた。これは呼吸によるX線透過性の変化を反映したものである。すなわち、6名の正常ボランティアの呼吸性濃度変化は正常な呼吸生理学的現象を示していると考えられる。横隔膜が停止しているときでも濃度に変化しているのは、心拍動に伴って肺血管陰影が収縮するためであると考えられる。上肺野では左右差がないにも拘らず、下肺野で有意差があったのは、肺内の肺紋理密度の違いによるものであると考えられる。文献的には肺野内局所の濃度は肺紋理の集散程度により変化し、肺紋理は肺胞の含気・排気により拡散・収縮すると述べられている^[11]。すなわち、本法により肺気腫におけるair trappingのように呼吸性濃度変化に異常を示す肺疾患の診断および定量評価の可能性が示唆された。

本法の対象疾患として、COPD、拘束性肺疾患、横隔神経麻痺、気管支異物、肺癌、肺炎を想定している。また、胸部動画像より作成した胸部差分動画像により、正常構造物の陰から出現するような腫瘍状陰影を検出できると考えている。特にCOPDは世界的に罹患率が上昇し、高齢者に多発している(死因：アメリカ、第4位/日本、第8位)。長期管理が必要なために医療経済的に効率のよい管理法が求められている^[12]。本法は精密検査のような精度は望めないとしても、簡便かつ低コストで行なえる呼吸性動態解析法として期待できる。

しかし、呼吸性動態解析の有用性は精密検査においては示されているものの、本法は初めての試みであるため、診断的有用性のエビデンスがない。したがって、これまでに開発したコンピュータ解析法の臨床的価値を評価することと、他の呼吸機能検査との相関性を明らかにすることが今後の課題である。我々は差分動画像の解析も進めている^[15]。差分動画像の有用性についてはI.I.-X線TVシステムで撮影した動画像を対象に報告されている。その報告によれば、差分動画像では気管支分岐形態を容易に描出できるので、内臓心房位を推定し、複雑心奇形の診断が可能である^[16]。

胸部動画像が二次元投影像であるため、動態解析の精度には限界がある。また、胸部単純X線写真

上に描出される肺紋理は、実際の肺血管および気管支等の1/3にすぎないため、動態の検出にも限界がある。前述のように、精密検査のような精度を求めるのではなく、“簡便かつ低コストに動態情報を得るためのスクリーニング検査”という位置付けで開発することが重要であると考えられる。また、前後方向の動態情報は、側面の動画像を撮影することで取得可能となる。

今回は撮影装置の性能に合わせて、撮影条件および撮影方法を決定した。しかし、呼吸性動態を効率的にかつ精度よく解析することが可能な条件について検討する必要がある。撮影法に関しては呼吸ペースや撮影時の合図の出し方について、撮影条件に関してはX線発生装置側とFPD側の両方の条件についての検討が急務である。

5. まとめ

現在開発が進められている大視野の動画対応FPDを用いることによって、胸部動画像の取得が可能となる。この胸部動画像をコンピュータ解析することで、従来の解剖学的所見に動態情報を付加できる可能性がある。我々はスクリーニング胸部動態画像診断のためのコンピュータ解析ツールを開発し、良好な結果を得た。このコンピュータ解析法の臨床的価値を評価することと、他の呼吸機能検査との相関性を明らかにすることが今後の課題である。我々は、スクリーニング胸部動態撮影法を開発することと、胸部動画像を対象としたコンピュータ支援診断(CAD)システムを開発することを目指している。

謝 辞

大阪府済生会吹田病院放射線科の尾辻秀章先生には、本研究の対象疾患に関する助言をしていただきました。感謝申し上げます。

文 献

- [1] Suga K, Tsukuda T, Awaya H, et al.: Impaired

- Respiratory Mechanics in Pulmonary Emphysema. Evaluation with Dynamic Breathing MRI. *JMRI*, 10, 510-520, 1999.
- [2] Miniati M, Filippi E, Falaschi F, et al. : Radiologic Evaluation of Emphysema in Patients with Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Am J Respir Crit Care Med*, 151, 1359-1367, 1995.
- [3] Sakai S, Murayama S, Murakami J, et al. : Bronchogenic Carcinoma Invasion of the Chest Evaluation with Dynamic Cine MRI During Breathing. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 21(4), 595-600, 1997.
- [4] Murata K, Takahashi M, Mori M, et al. : Chest Wall and Mediastinal Invasion by Lung Cancer : Evaluation with Multisection Expiratory Dynamic CT. *Radiology*, 191, 251-255, 1994.
- [5] 田中利恵, 真田茂, 鈴木正行他 : 呼吸性動態解析の可能な新しい胸部 X 線撮影法. *日放技学誌*, 58(5), 665-669, 2002.
- [6] 田中利恵, 真田茂, 鈴木正行 他 : 新しいスクリーニング胸部 X 線撮影法による肺紋理の移動解析および肺野内局所の濃度解析. *日放技学誌*, 58(11), 2002. (In press)
- [7] Powell GF, Doi K, Katsuragawa S. : Localization of inter-rib spaces for lung texture analysis and computer-aided diagnosis in digital chest images. *Med Phys*, 15, 581-587, 1988.
- [8] Li L, Zheng Y, Kallergi M, et al. : Improved method for automatic identification of lung regions on chest radiographs. *Acad Radiol*, 8, 629-638, 2001.
- [9] 木村一郎, 植村知正, 奥野武俊 著 : 2次元速度情報の計測, 可視化情報計測, 7-80, 近代科学社, 2001.
- [10] Kano A, Doi K, MacMahon H, et al. : Digital image subtraction of temporally sequential chest images for detection of interval change. *Med Phys*, 21, 453-461, 1994.
- [11] 八木信行, 井上誠喜, 林正樹, 他 : C 言語で学ぶ実践デジタル映像処理改訂 2 版, 206-252, オーム社, 2001.
- [12] Suwatanapongced T., Solne RM, Gierada DS : Diaphragm Position and Shape on Standard Chest Radiographs in Patients with Normal, Obstructive, and Restrictive Pulmonary Function. *Radiology* 217(P), 647, 2000.
- [13] Squire LF, Robert A. : Overexpansion and collapse of the lung, In : *Fundamentals of radiology*. 4th ed. Cambridge, 88-89, Harvard University Press, 1988.
- [14] 泉 孝英 : 第 1 章 慢性閉塞性肺疾患の概念・定義, 最新医学別冊, 新しい診断と治療の ABC1, 慢性閉塞性肺疾患—慢性気管支炎・肺気腫— 呼吸器 1, 9-32, 最新医学社, 2001.
- [15] 田中利恵, 真田茂, 鈴木正行, 他 : スクリーニング胸部動態画像診断のための差分画像解析. *信学技報*. 102(299), 19-23.
- [16] 柴 信行, 木村晃二, 太田光重, 他. : Digital fluorography を応用した複雑心奇形の気管分岐型同定. *臨床放射線*, 35, 259-263, 1990.