



Fig. 7 Images of the chest phantom with a nylon nodule in the left upper lung zone. Left image is an original image and right image is a bone-subtracted image.

部単純X線写真の重要性は変わらず、胸部疾患のスクリーニングとして重要な位置を占めている。検査にかかる費用や時間等を考慮すれば、第1選択はやはり胸部単純X線写真であり、これで異常が疑われる場合にCT検査を施行するというのが妥当である。FCRの登場により胸部単純X線写真の領域においてもデジタル画像の利用が一般的になりつつある。FCRでは画像がデジタルであるという特性を生かして、さまざまな画像変換が可能である。ダイナミックレンジ・コントロール処理や粒状性改善エネルギーサブトラクション処理のような画像変換処理は、従来のスクリーン/フィルム画像の持つ情報に加えてさらに診断に有用な情報を放射線科医に提供すると考えられる。

参考文献

- 1) Ikezoe J, Takeuchi N, Kido S, et al.: Dynamic range control processing of digital chest images. *Acta. Radiol.*, **37**, 107-115, (1996).
- 2) Ikezoe J, Kohno N, Takeuchi N, et al.: Interpretation of subtle interstitial chest abnormalities: conventional radiography versus high-resolution storage phosphor radiography. *Radiology*, **197**(P), 340-341
- 3) Ito W, Shimura K, Nakajima N, et al.: Improvement of detection in computed radiography by new single-exposure dual-energy subtraction. *Proc. SPIE*, **1652**, 386-396, (1992).
- 4) Kido S, Ikezoe J, Naito H, et al.: Single-exposure dual-energy chest images with computed radiography: evaluation with simulated nodules. *Invest Radiol*, **28**, 482-487, (1993).
- 5) Kido S, Ikezoe J, Naito H, et al.: Clinical evaluation of pulmonary nodules with single-exposure dual-energy subtraction chest radiography with an iterative noise-reduction algorithm. *Radiology*, **194**(2), 407-412, (1995).

3. 画像計測・理解—CADの臨床導入—

Symposium

桂川茂彦
岩手医科大学医用工学室

1. はじめに

近年のデジタル画像技術の発達により、現在では単純写真から血管造影像に至るまで、ほぼ全ての放射線画像のデジタル化が可能になってきている。しかし、CR(computed radiography)に代表される単純写真のデジタル画像は、スクリーン・フィルム系のアナログ画像と同等もしくはそれ以下の画像情報しか現在の技術では与え得ないので、デジタル画像を単に表示するだけでは、画像診断を行う放射線科医にとって、デジタル技術の導入によって診断が容易になったとは思われない。したがって、単純写真のデジタル画像を診断にとって真に役立つものにするためには、本シンポジウムの他演者が述べているような高度な画像処理技術および、画像の伝送および蓄積を迅速に行うPACSなどの開発が重要である。さらに、画像情報の定量化(計測)および解析(理解)を行い、その結果を“第2の意見”として画像診断へ積極的に利用しようとするコンピュータ支援診断(computer-aided diagnosis; CAD)システム¹⁻⁴⁾の開発は、デジタル画像の特徴を最大限に利用した技術として不可欠であると考えられる。

CADの一般的アプローチは次の2つに大別される。一つは、胸部単純写真における結節状陰影の検出に見られるように、異常陰影のありそうな箇所をコンピュータが検出して表示し、見落としが起らないように注意を喚起する。他の一つは、心胸郭比の計測のように、病巣についての定量的尺度を求めて、読影の際に客観的情報として提供することである。したがって、コンピュータの分析結果を画像診断に用いることで、見落としによる誤診を減少させ、また、主観的判断による思い違いを防止することができれば、画像診断の正確度の向上と、再現性の改善が期待される。このように、CADの目的はコンピュータが放射線科医の役割を置き換えることではなく、放射線科医の読影がやりやすくなるように援助することにある。したがって、CADの基本的思想と方針は、従来から自動診断と呼ばれていたものとは根本的に異なるものであることに注意する必要がある。

放射線画像情報の定量化の試みは、1970年代から炭鉱夫塵肺症の重症度を自動分類する研究が数多くなされてきた^{5,6)}。最近では、デジタルラジオグラフィおよび画像処理技術の急速な発展に伴い、CADの分野

でも実用化を目的とした全く新しい研究開発が展開している。特にシカゴ大学の土井らは幅広い領域の画像に対するCADシステムの開発に関する優れた研究を数多く行い、すでに実用機を試作し臨床評価を行っている。ここでは、胸部単純画像、乳房画像を対象としたシカゴ大学土井グループが開発中のCADに関する現状を概説し、臨床応用への試みを紹介する。

2. システム構成

CADに用いられる基本的なハードウェアシステム構成⁷⁾にはフィルムデジタイザ、高速ワークステーション、レーザプリンタなどの出力装置が含まれる。スクリーン・フィルム系で撮像された放射線画像は、フィルムデジタイザによってデジタル化される。レーザ光を使用した通常のフィルムデジタイザでは、ピクセル寸法は0.05mmから0.2mm、階調数は1024(10bits)から4096(12bits)の範囲でデジタル化が可能である。一般に、より小さなピクセル寸法、かつ、より大きい階調数でデジタル化すれば、オリジナル像に忠実な画像が得られるが、ディスク容量や演算速度も考慮しなければならない。対象となる疾患の性質によりこれらのパラメータは変化し、乳房撮影像における微小石灰化の検出の場合は、ピクセル寸法が0.05mm、また、胸部写真の場合にはピクセル寸法が0.2mmが普通である。したがって、大角サイズの胸部写真をピクセル寸法0.2mmでデジタル化した場合、8MBの記憶スペースがコンピュータ内部で必要となる。もちろん、フィルムデジタイザによるデジタル化以外にも、イメージングプレートを使ったCR画像を入力画像として使うことも出来る。

画像処理および解析のためには高速のワークステーションが必要となる。主メモリは少なくとも64MB、磁気ディスクの容量は3GB以上が望ましい。また、CADの出力結果の表示にはCRTモニタまたはレーザプリンタを必要とする。

3. 胸部単純画像を対象としたCAD

現在開発中の胸部単純写真のCADには結節状陰影、間質性肺疾患、心肥大および気胸の検出が含まれる。肺腫瘍などに起因する結節状陰影を放射線科医が見落とす確率は約30%近くもあると報告されている。さらに、この見落とされた結節状陰影のほとんどのものは、後日その存在が指摘されると認識できるものであることも分かっている。見落としの原因には多くの因子が含まれるが、基本的には胸部写真を読影する際の放射線科医の“観察者としての特性”、あるいは“人間的エラー”が主要な寄与をしていると考えられる。特に、結節状陰影の周囲にある肋骨や肺血管などの胸部写真に含まれる正常構造が、結節状陰影をカムフラージュ(偽装)してしまうために、結節状陰影が目立たなくなってしまう、その結果見落としが起りやすくなる。また、明らかな異常を一つ見つけたとき、それ以外の異常陰影を見つけるための読影をやめてしまう

場合があることも見落としの原因になっている。

そこで、結節状陰影の検出に関するCADの目的は、コンピュータが結節状陰影と疑われる候補陰影を自動検出して示し、注意を喚起することにある。最終的には放射線科医が真の結節状陰影か否かを判断するが、注意を喚起されることによって、見落としを減少させることが可能となる。結節状陰影の自動検出には差分画像法が良く使われる。差分法では、1枚の胸部写真からマッチドフィルタにより結節状陰影のコントラストを増強した画像と、平滑化フィルタによりコントラストを減弱した画像を作り、二つの画像間の差分をとる。差分像では肋骨などの胸部正常構造はほとんど除去されるが、結節状陰影のコントラストは原画像よりも強調されることになる。差分像から結節状陰影の特徴抽出を行い候補陰影を同定する⁸⁻¹²⁾。この手法を100例の正常胸部写真、および、CTで確認された直径5-30mmの結節状陰影を含む100例、合計200例の胸部写真に適用した結果は、有病正診率が約80%、無病誤診率は1.7(個/画像)であった。

胸部単純写真における間質性肺疾患の診断は、放射線画像診断のなかでは最も困難な問題の一つといわれている。その理由は間質性浸潤影のコントラストがきわめて低く、そのパターンが複雑であることと、さらに、それらのパターンの記述と名称が、粒状影とか網状影などと、主観的なものであり、客観的に定義されていないことなどである。そこで、もし肺野テクスチャ(texture)パターンを客観的に定量化できるような方法があれば、主観性が減少し、画像診断の正確さおよび再現性が改善されることが期待される。したがって、間質性肺疾患の検出に関するCADの目的は、間質性浸潤影の特徴を定量的尺度(テクスチャ尺度)で表現し、これを放射線科医の画像診断のための客観的材料として提供することである。定量的尺度として、肺野テクスチャのフーリエ変換から求めたrms変動値(濃度変動の大きさに対応)とパワースペクトルの一次モーメント(濃度変動の細かさまたは粗さに対応)¹³⁻²³⁾、また、陰影の形状分析から粒状影の総面積と線状影の総延長を求めている^{24,25)}。本手法を100例の正常肺と100例の間質性肺疾患を持った異常肺について適用した結果、有病正診率約90%、無病正診率約90%であった。

心肥大を胸部単純写真で読影する場合、明らかな心肥大は容易に検出できるが、わずかな心臓の大きさの変化は肉眼では検出が困難である。したがって、胸部単純写真における心肥大の客観的判断基準として、心胸郭比の計測が広く行われてきた。このような理由から、心臓の大きさの自動計測は最も古くから始められた医用画像処理における研究テーマであった。心臓の形状計測においては、いかにして心臓の辺縁を正確に検出するかが重要な技術であり、微分法によるエッジ検出が一般的である。しかし、心臓の上端と下端の境界は写真上に描出されてないことが多いので、検出された左右肺野と心陰影の境界点データについてモデル関数を用いて近似し、心臓全体の辺縁を描出しなければ

ばならない^{26,27)}。この手法を46例の胸部写真に適用したところ、放射線科医がマニュアルで求めた心胸郭比と、コンピュータが自動計測した心胸郭比の間には、相関係数0.91の強い正の相関があることが分かり、コンピュータの自動計測はマニュアル法と良い一致を示している。

気胸は胸部単純写真において重要な異常陰影であるが、しばしば肋骨あるいは鎖骨との重なりのために診断が困難となることがある。気胸の画像上の特徴的陰影は胸郭に沿った曲線であるから、気胸の自動検出には細い滑らかな曲線の検出技術が必要である。微細な曲線検出にはHough変換が用いられる²⁸⁾。この方法を60例の胸部写真に適用した結果は、有病正診率約80%、無病正診率約70%と報告されている。

4. 乳房画像を対象としたCAD

乳房撮影における微小石灰化の診断は個々の陰影が非常に小さいため困難であるといわれている。したがって、乳房撮影像における微小石灰化のクラスタ検出のためには、0.1mm以下のピクセル寸法をもった高分解能のデジタル化が必要である。また、ノイズと微小石灰化を区別する技術が検出結果に大きな影響を与える。まず、微小石灰化の信号対雑音比を改善するために、乳房像に対して線形フィルタ処理を行い、しきい値処理により微小石灰化の候補陰影を抽出する。さらに、陰影のサイズ、コントラスト、テクスチャおよびクラスタの程度を分析することにより、微小石灰化とノイズを区別する^{29~36)}。この手法を60例の乳房像に適用した結果は、有病正診率85%、無病誤診率0.5(クラスタ/画像)であった。また、原画像とCAD出力結果の両者を見ながらの読影と、原画像のみによる読影では、CADを併用する方が微小石灰化の検出能は高くなることも確認されている。

乳房撮影像における腫瘍影の検出では、左右乳房像の

対称性の変化の分析が代表的な基本技術である^{37~42)}。MLO(mediolateral oblique)またはCC(craniocaudal)方向から撮影した一対のデジタル画像に対し、しきい値処理、左右乳房間での差分およびランレングス解析により候補腫瘍陰影を検出する。さらに、候補陰影のサイズおよび不整度を分析して真の腫瘍影を決定する。この手法を46対の乳房像に適用した結果は、有病正診率約90%、無病誤診率1.5(個/画像)であった。

5. 臨床評価の試み

シカゴ大学土井グループは、世界に先駆けて1994年に乳房撮影像に対するCADの臨床用“インテリジェント”ワークステーションを試作し現在臨床評価を継続して行っている。彼等は臨床で撮影されたすべての乳房画像に対して毎日微小石灰化および腫瘍影検出プログラムを走らせ、1995年末までに合計約4000症例16000枚の画像を分析している。この中の最初の約1000例の患者群から7症例の異常陰影を検出し、そのすべてがバイオプシによって乳癌であることが確認されている。また、1画像当たりの平均無病誤診率は微小石灰化が0.9個、腫瘍影が1.4個であったと報告している。この結果は現在の乳房画像に対するCAD技術でも、かなりの程度臨床に役立つことを意味しており、これからのCADの研究に明るい未来を示唆した大変意義深い結果であると思われる。

胸部画像に対するCADは、乳房画像と比較して画像が極端に複雑であることなどの理由から、実用化の研究は一步遅れていたが、1996年9月から、やはりシカゴ大学で臨床評価の試みがスタートした。日本では肺癌の早期発見を目的とした集団検診が各地で行われているため、胸部画像に対するCADの実用化が強く望まれており、最近では、スパイラルCTを用いた集団検診画像に対する結節状陰影の検出を目的としたCADの研究も行われている。

参考文献

- 1) 土井邦雄, 桂川茂彦, Giger ML, 他: デジタルラジオグラフィにおけるコンピュータ支援診断の可能性. 日放技学誌, **45**(5), 653-663, (1989).
- 2) MacMahon H, Doi K, Chan HP, et al.: Computer-aided diagnosis in chest radiology. J. Thorac. Imag., **5**, 67-76, (1990).
- 3) Doi K, Giger ML, MacMahon H, et al.: Computer-aided diagnosis present and future. A new horizon on medical physics and biomedical engineering. ed. by Abe H, Atsumi K, Iinuma T, et al. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 59-66, (1991).
- 4) Doi K, Giger ML, MacMahon H, et al.: Development of automated schemes for quantitative analysis of radiographic images. Seminars in Ultrasound, CT and MRI, **13**, 140-152, (1992).
- 5) Kruger RP, Thompson WB, Turner AF: Computer diagnosis of pneumoconiosis. IEEE Trans. Syst. Man and Cybern., **4**, 40-49, (1974).
- 6) Jagoe JR: Gradient pattern coding: An application to the measurement of pneumoconiosis in chest X rays. Comput. Biomed. Res., **12**, 1-15, (1979).
- 7) Giger ML, Doi K, MacMahon H, et al.: An intelligent workstation for computer-aided diagnosis. RadioGraphics, **13**, 647-656, (1993).
- 8) Giger ML, Doi K, MacMahon H, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: 3. Automated detection of nodules in peripheral lung fields. Med. Phys., **15**, 158-166, (1988).
- 9) Giger ML, Doi K, MacMahon H, et al.: Computer-aided detection of pulmonary nodules in digital chest images. Radiographics, **10**, 41-52, (1990).
- 10) Giger ML, Ahn N, Doi K, et al.: Computerized detection of pulmonary nodules in digital chest images: Use of morphological filters in reducing false positive detections. Med. Phys., **17**, 861-865, (1990).
- 11) Yoshimura H, Giger ML, Doi K, et al.: Computerized scheme for the detection of pulmonary nodules: Nonlinear filtering

- technique. *Invest. Radiol.*, **27**, 124-129, (1992).
- 12) Kobayashi T, Xu X, MacMahon H, et al.: Effect of a computer-aided diagnosis scheme on radiologists' performance in detection of lung nodules on radiographs. *Radiology*, **199**, 843-848, (1996).
- 13) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Detection and characterization of interstitial lung disease in digital chest radiographs. *Med. Phys.*, **15**, 311-319, (1988).
- 14) 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).
- 15) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Classification of normal and abnormal lungs with interstitial disease in chest images. *Med. Phys.*, **16**, 38-44, (1989).
- 16) Katsuragawa S, Doi K, Nakamori N, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Effect of digital parameters on the accuracy of computerized analysis of interstitial disease in digital chest radiographs. *Med. Phys.*, **17**, 72-78, (1990).
- 17) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H, et al.: Quantitative computer-aided analysis of lung texture in chest radiographs. *RadioGraphics*, **10**, 257-269, (1990).
- 18) 桂川茂彦, 土井邦雄, MacMahon H, 他: 間質性肺疾患のコンピュータ支援診断の可能性. *日本医放会誌*, **50**, 753-766, (1990).
- 19) 佐々木康夫, 桂川茂彦, 柳澤 融: じん肺標準写真のテクスチャー解析による定量的評価. *日本医放会誌*, **52**: 1385-1393, (1992).
- 20) 桂川茂彦: コンピュータ支援診断システムにおける画像処理技術. *日放技学誌*, **49**(6), 833-839, (1993).
- 21) Chen X, Doi K, Katsuragawa S, et al.: Automated selection of regions of interest for quantitative analysis of lung textures in digital chest radiographs. *Med. Phys.*, **20**, 975-982, (1993).
- 22) Abe K, Doi K, MacMahon H, et al.: Analysis of results in a large clinical series of computer-aided diagnosis in chest radiography. *Radiologia diagnostica*, **35**, 9-14, (1994).
- 23) Morishita J, Doi K, Katsuragawa S, et al.: Computer-aided diagnosis for interstitial infiltrates in chest radiographs: Analysis of optical-density dependence on texture measures. *Med. Phys.*, **22**, 1515-1522, (1995).
- 24) Monnier-Cholley L, MacMahon H, Katsuragawa S, et al.: Computerized analysis of interstitial infiltrates on chest radiographs: A new scheme based on geometric pattern features and Fourier analysis. *Academic Radiol.*, **2**, 455-462, (1995).
- 25) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H, et al.: Quantitative analysis of geometric-pattern features of interstitial infiltrates in digital chest radiographs: Preliminary results. *J. Dig. Imag.*, **9**, 137 - 144, (1996).
- 26) Nakamori N, Doi K, Sabeti V, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Automated analysis of sizes of heart and lung in digital chest images. *Med. Phys.*, **17**, 342-350, (1990).
- 27) Nakamori N, Doi K, MacMahon H, et al.: Effect of heart size parameters computed from digital chest radiographs on detection of cardiomegaly: Potential usefulness for computer-aided diagnosis. *Invest. Radiol.*, **26**, 546-550, (1991).
- 28) Sanada S, Doi K, MacMahon H, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Automated detection of pneumothorax in chest images. *Med. Phys.*, **19**, 1153-1160, (1992).
- 29) Chan HP, Doi K, Galhotra S, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: 1. Automated detection of microcalcifications in mammography. *Med. Phys.*, **14**, 538-548, (1987).
- 30) Chan HP, Doi K, Vyborny CJ, et al.: Computer-aided detection of microcalcifications in mammograms: Methodology and preliminary clinical study. *Invest. Radiol.*, **23**, 664-671, (1988).
- 31) Chan HP, Doi K, Vyborny CJ, et al.: Improvement in radiologists' detection of clustered microcalcifications on mammograms: The potential of computer-aided diagnosis. *Invest. Radiol.*, **25**, 1102-1110, (1990).
- 32) Jiang Y, Nishikawa RM, Giger ML, et al.: Method of extracting microcalcifications' signal area and signal thickness from digital mammograms. *Proc. SPIE.*, **1778**, 28-36, (1992).
- 33) Wu Y, Doi K, Giger ML, et al.: Computerized detection of clustered microcalcifications in digital mammograms: Application of artificial neural networks. *Med. Phys.*, **19**, 555-560, (1992).
- 34) Nishikawa RM, Giger ML, Doi K, et al.: Computer-aided detection of clustered microcalcifications: An improved method for grouping detected signals. *Med. Phys.*, **20**, 1661-1666, (1993).
- 35) Nishikawa RM, Doi K, Giger ML, et al.: Computerized detection of clustered microcalcifications: Evaluation of performance using mammograms from multiple centers. *RadioGraphics*, **15**, 443-452, (1995).
- 36) Zhang W, Doi K, Giger ML, et al.: An improved shift-invariant artificial neural network for computerized detection of clustered microcalcifications in digital mammograms. *Med. Phys.*, **23**, 595-601, (1996).
- 37) Giger ML, Yin FF, Doi K, et al.: Investigation of methods for the computerized detection and analysis of mammographic masses. *Proc. SPIE.*, **1233**, 183-184, (1990).
- 38) Yin FF, Giger ML, Doi K, et al.: Computerized detection of masses in digital mammograms: Analysis of bilateral-subtraction images. *Med. Phys.*, **18**, 955-963, (1991).
- 39) Yin FF, Giger ML, Vyborny CJ, et al.: Comparison of bilateral-subtraction and single-image processing techniques in the computerized detection of mammographic masses. *Invest. Radiol.*, **28**, 473-481, (1993).
- 40) Giger ML, Vyborny CJ, Schmidt RA: Computerized characterization of mammographic masses: Analysis of spiculation. *Cancer Letters*, **77**, 201-211, (1994).
- 41) Yin FF, Giger ML, Doi K, et al.: Computerized detection of masses in digital mammograms: Automated alignment of breast images and its effect on bilateral-subtraction technique. *Med. Phys.*, **21**, 445-452, (1994).
- 42) Huo Z, Giger ML, Vyborny CJ, et al.: Analysis of spiculation in the computerized classification of mammographic masses. *Med. Phys.*, **22**, 1569-1579, (1995).