ミニ講座

胸部単純写真のCAD

岩手医科大学医用工学室 桂川茂彦

京都医療技術短期大学 杜下淳次

広島国際大学保健医療学部 石田隆行

シカゴ大学放射線科カートロスマン放射線像研究所 土井邦雄

はじめに

胸部単純写真は、簡便に得られるにもかかわらず、含まれる情報量が多いことが知られています。そのために、胸部疾患発見のための最初に行われる検査や、経過観察のための検査として、病院内で最も多く撮影されている画像の一つです。CTは高分解能CT、スパイラルCT、マルチスライスCTなどの急速な進歩を遂げ、その臨床的有用性も確かめられています。一方、胸部単純写真は、その簡便性のために、これから先も病院内で頻繁に撮影されると考えられます。胸部単純写真の読影は、CTの読影と比べて一般に困難で、多くの経験を必要とするといわれています。したがって、CADは“第二の意見”として放射線科医の読影を支援することが目的ですから、読影が困難な胸部単純写真におけるCADは、その効果および役割がより大きいと考えられます。シカゴ大学カートロスマン放射線像研究所では、約15年前に胸部単純写真におけるCADの研究が開始され、これまでに、多くの研究成果が得られています¹⁻⁵⁾。これらの中には、結節状陰

影、間質性肺疾患、心肥大^{6,7)}、気胸^{8,9)}などの検出に関するCAD技術の開発が含まれています。また、1996年9月には臨床用ワークステーションが試作されて、院内における胸部CADの臨床評価が継続して行われています。このミニ講座では、シカゴ大学で開発した胸部単純写真における結節状陰影の検出と、間質性肺疾患の検出に関するCAD技術のアルゴリズムの概要と、現状について解説します。

1. 結節状陰影の検出

肺癌などに原因する結節状陰影は、胸部単純写真における最も重要な異常陰影の一つです。しかし、胸部単純写真において結節状陰影を読影医師が見落とす確率は、約30%近くになるという報告があります¹⁰⁾。さらに、この見落とされた陰影の多くは、後日その存在が指摘されると、容易に認識できる陰影であることも知られています¹¹⁾。したがって、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位置を自動検出して表示し、読影医師の注意を喚起することです。最終的には、医師が真の結節状陰影か否かを判断しますが、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ります。ここで述べるコンピュータによる結節状陰影の自動検出法は、Fig.1に示すように結節状陰影を強調するための差分像処理、候補陰影の拾い上げ、および候補陰影の絞り込みの部分から構成されています¹²⁻¹⁷⁾。

結節状陰影の強調のためには、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、リング状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ります。その結果、胸部画像に含まれる大部分の背景となる構造の陰影は減弱され、差分像では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ります。Fig.2aに示すように、差分像の右下肺にある2個の結節状陰影(矢印)のコントラストが、原画像(Fig.2b)に比べて大きく増大していることに注意してください。

Fig. 1 コンピュータによる結節状陰影検出の概要。

Fig. 2 (a)結節状陰影のコントラストが強調された差分画像。
(b)コンピュータによって検出された2個の結節状陰影。

候補陰影の拾い上げは、差分画像から作られた2値画像における陰影の形状分析によって行います。2値画像とは、ある値(しきい値)以上のピクセル値を持っている領域(低濃度領域)を黒く塗りつぶし、他は白く塗りつぶされた画像です¹⁸⁾。したがって、しきい値以上のピクセル値を持つ陰影のみが、形状分析の対象となります。このような2値画像はしきい値を変えて多数作られます(多重しきい値処理)。また、しきい値は差分画像のピクセル値のヒストグラム面積を基準として設定されます。通常、低濃度側からヒストグラム面積の1%おきに40%位までのしきい値処理を行えば、すべての結節状陰影はいずれかの2値画像の中に出現することが分かっています。ヒストグラム面積40%のしきい値とは、しきい値処理の結果、黒い部分の面積が全体の画像面積の40%になるピクセル値のことをいいます。最初の候補陰影はこれらの多数の2値画像に含まれている陰影の形状分析から拾い上げられます。使用している形状特徴量は、実効直径、円形度および不整度です。すなわち、各特徴量の値がしきい値に応じて決められた範囲内にあれば候補陰影として拾い上げます。しかし、ここで拾い上げた候補陰影の中には、肋骨や血管の断片である多数の偽陽性陰影が含まれています。したがって、真の結節状陰影を残し、偽陽性陰影を除去するために、次のステップの候補陰影の絞り込みが必要となります。

一般に、孤立した結節状陰影の形状特徴量、たとえば、実効直径は、しきい値が高濃度側に移行するに従い緩やかに増大します。ところが、肋骨の断片などの

偽陽性陰影は隣り合う陰影と融合するために、あるしきい値で突然大きく増大する傾向を持っています。したがって、しきい値の変化に対する形状特徴量の変動を分析することで、偽陽性の数をかなり減少させることが可能となります。実際には、前述した形状特徴量の変化以外に、候補陰影のバックグラウンドからのコントラスト、濃度勾配の大きさや分布などを特徴量としたルールベース法と、これらの特徴量を入力した人工ニューラルネットワークを併用しています。ルールベース法は、特徴量を用いてルールを作り、陽性陰影と偽陽性陰影に分類する手法です。また、人工ニューラルネットワークは、人間の脳の神経回路網をコンピュータでモデル化して、分類など複雑な処理を行う技術です。Fig.2bに、コンピュータによる結節状陰影検出の最終結果(矢印)を表示しています。この例では、2個の結節状陰影が正しく検出され、偽陽性陰影は検出されていません。

結節状陰影の検出に対するCADの有効性を検討するために、ROC読影実験を行いました¹⁶⁾。読影対象の画像は結節状陰影1個を含む60枚の胸部写真と、結節状陰影を含まない60枚の胸部写真、合計120症例を用いました。16人の放射線科医が次の二つの方法で読影を行いました。一つは、フィルムだけで読影を行い、他はコンピュータが検出した候補陰影を参考にしながらフィルムで読影を行いました。平均のROC曲線をFig.3に示します。コンピュータの出力結果を参考にして読影を行うCADの方が、明らかに、結節状陰影の検出の正確度が向上していることが分かります。

Fig. 3 結節状陰影の検出に関するROC曲線。

2. 間質性肺疾患の検出

間質性肺疾患は、何らかの原因で肺の間質(肺胞間などの組織)に異物が浸潤を来す病気で、胸部写真の中では最も頻度が高い異常陰影といわれています。また、間質性肺疾患の病巣陰影はコントラストが低く、パターンが複雑なために画像診断が困難であるともいわれています。そこで、もし肺野テクスチャ(陰影模様の分布)を客観的に定量化できる方法があれば、主観性が減少し、画像診断の正確さおよび再現性が改善できる可能性があります。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、これを画像診断のための客観的材料として読影医師に提供することです。ここで述べる間質性浸潤影の定量化では、Fig.4に示すように、フーリエ変換から決定されるrms(root mean square)変動値と、パワースペクトルの一次モーメントをテクスチャ尺度として求めています¹⁹⁻³⁰⁾。

まず、解析の対象となる約6mmの正方形関心領域(ROI)を、両肺野の外側にできるだけ数多く設定します。しかし、肋骨の鋭いエッジを含んだROIは、肋間や肋骨と重なるROIとは異なるテクスチャを持っているので、濃度勾配のヒストグラムを分析することにより除外します。次に、残された約300個のROIに対して、間質性浸潤影に関係のある微細なテクスチャを抽出するため、二次元関数によるバックグラウンド補正を行います¹⁸⁾。最後に、眼のレスポンス関数を用いてフィルタリングされたパワースペクトルから、テクスチャ尺度としてrms変動値および一次モーメントが決定されます。rms変動値はピクセル値の変動の大きさ、すなわち、肺野テクスチャの濃度変動の大きさに対応し、また、一次モーメントはピクセル値の変動の平均周波数、すなわち、肺野テクスチャの粗さ(また

Fig. 4 コンピュータによる肺野テクスチャ解析の概要。

は細かさ)に対応する物理量です。途中で用いられているバックグラウンド補正は、肺や胸壁などの正常構造に起因する濃度変動の影響を排除する効果があり、また、眼のレスポンス関数によるフィルタは、残留バックグラウンドや画像に含まれる雑音などの高周波成分を除去する役割があります。

テクスチャ解析から得られた二つの尺度は、正常肺と間質性肺疾患を持つ異常肺に自動分類するために使用されます。まず、二つのテクスチャ尺度を用いて、データベースに含まれる多数の正常肺の平均値からの距離に対応する単一尺度を求めます。次に、単一尺度の分布をルールベース法およびニューラルネットワークを用いて、正常肺もしくは異常肺として分類します。テクスチャ解析の結果はFig.5のようにモニタ上の胸部画像に重ねたマークで表されます。十字、円、四角および三角形のマークは、それぞれ正常、粒状、網状および網粒状陰影に対応し、マークの大きさは重症度を表しています。マークの種類と大きさは個々のROIのテクスチャ尺度とデータベースとの比較によって決定されています。Fig.5aの症例では、上肺野はほとんど正常ですが、中下肺野に間質性浸潤影がみられます。一方、Fig.5bのテクスチャ解析の結果は、上肺野に正常陰影を表す十字のマークが多数分布し、中下肺野に網粒状陰影を表す三角形のマークが多く分布しています。したがって、テクスチャ解析の結果は、Fig.5aの異常陰影の分布とよく一致していることが分かります。

間質性肺疾患の検出に対するCADの有効性を検討するために、ここでもROC読影実験を行いました³⁰⁾。読影対象の画像は、間質性浸潤影を含む20枚の胸部写真

Fig. 5 (a) 間質性浸潤影を含む胸部画像。

(b) テクスチャ解析結果の表示。マーカの十字、円、四角、三角形は、それぞれ、正常、粒状影、網状影、網粒状陰影に対応。

と、正常肺の20枚の胸部写真の合計40症例を用いました。16人の放射線科医が、次の二つの方法で読影を行いました。一つは、フィルムだけで読影を行い、他はコンピュータの分析結果を参考にしながらフィルムで読影を行いました。平均のROC曲線をFig.6に示します。コンピュータの分析結果を参考にして読影を行うCADの方が、統計的有意差を持って、間質性肺疾患の検出の正確度が改良されていることが分かります。

おわりに

乳房画像における微小石灰化と腫瘍影の検出に関する臨床用のCAD装置は、1998年から商用ベースでの利用が可能となっています。一方、胸部画像は、正常陰影が複雑であること、異常陰影も多様であることなどの理由で、実用化への研究は一步遅れています。しかし、ここで述べたように、コンピュータによる画像解析結果を読影に利用した方が、画像だけでの読影より、診断の正確度が優れているという結果が得られていますので、胸部画像におけるCADの実用化も、近い将来実現される可能性が高いと期待されています。

Fig. 6 間質性肺疾患の検出に関するROC曲線。

本稿は『画像診断』(19, 417-422, 1999)および『INNERVISION』(14, 40-43, 1999)に投稿した原稿を基に加筆修正しました。

参考文献

- 1) MacMahon H, Doi K, Chan H, et al.: Computer-aided diagnosis in chest radiology. *J Thorac Imag*, 5, 67-76, (1990).
- 2) Doi K, Giger ML, MacMahon H, et al.: Computer-aided diagnosis (CAD): Development of automated schemes for quantitative analysis of radiographic images. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 13, 140-152, (1992).
- 3) Abe K, Doi K, MacMahon H, et al.: Computer-aided diagnosis in chest radiography: Preliminary experience. *Invest Radiol*, 28, 987-993, (1993).
- 4) 土井邦雄: 放射線医学における画像技術—新しい世紀への期待—. *日本医放会誌*, 55 (13), S475-486, (1995).
- 5) Giger ML, Doi K, MacMahon H, et al.: An intelligent workstation for computer-aided diagnosis. *RadioGraphics*, 13, 647-656, (1993).
- 6) 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).
- 7) Nakamori N, Doi K, MacMahon H, et al.: Effect of heart size parameters computed from digital radiographs on detection of cardiomegaly: Potential usefulness for computer-aided diagnosis. *Invest Radiol*, 26, 546-550, (1991).
- 8) Sanada S, Doi K, and MacMahon H: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Automated delineation of posterior ribs in chest images. *Med Phys*, 18, 946-971, (1991).
- 9) Sanada S, Doi K, and MacMahon H: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: Automated detection of pneumothorax in chest images. *Med Phys*, 19, 1153-1160, (1992).
- 10) Forrest JV and Friedman PJ: Radiologic errors in patients with lung cancer. *West J Med*, 134, 485-490, (1981).
- 11) Muhm JR, Miller WE, Fontana RS, et al.: Lung cancer detected during a screening program using four-month radiographs. *Radiology*, 148, 609-615, (1983).
- 12) Giger ML, Doi K, and MacMahon H: 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).
- 13) Giger ML, Doi K, MacMahon H, et al.: Pulmonary nodules: Computer-aided detection on digital chest images. *RadioGraphics*, 10, 41-51, (1990).
- 14) Yoshimura H, Giger ML, Doi K, et al.: Computerized scheme for the detection of pulmonary nodules: A nonlinear filtering technique. *Invest Radiol*, 27, 124-129, (1992).
- 15) Matsumoto T, Yoshimura H, Doi K, et al.: Image feature analysis of false-positive diagnoses produced by automated detection of lung nodules. *Invest Radiol*, 27, 587-597, (1992).
- 16) Kobayashi T, Xu XW, 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).
- 17) Xu XW, Doi K, Kobayashi T, et al.: Development of an improved CAD scheme for automated detection of lung nodules in digital chest images. *Med Phys*, 24, 1395-1403, (1997).
- 18) 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).
- 19) Katsuragawa S, Doi K, and 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).
- 20) Katsuragawa S, Doi K, and 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).
- 21) 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).
- 22) 桂川茂彦, 土井邦雄, H. MacMahon, 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 (7), 753-766, (1990).
- 23) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H, et al.: Quantitative computer-aided analysis of lung texture in chest radiographs. *RadioGraphics*, 10, 257-269, (1990).
- 24) 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).
- 25) Monnier LC, 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. *Acad Radiol*, 2, 455-462, (1995).
- 26) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H, et al.: Quantitative analysis of geometric-pattern features of interstitial infiltrates in digital chest radiographs. *J Digital Imag*, 9, 137-144, (1996).
- 27) Ishida T, Katsuragawa S, Kobayashi T, et al.: Computerized analysis of interstitial disease in chest radiographs: Improvement of geometric-pattern feature analysis. *Med Phys*, 24, 915-924, (1997).
- 28) Katsuragawa S, Doi K, MacMahon H, et al.: Computer-aided diagnosis of interstitial disease in digital chest radiographs: Classification of normal and abnormal lungs by rule-based method and artificial neural networks. *J Digital Imag*, 10, 108-114, (1997).
- 29) Ishida T, Katsuragawa S, Ashizawa K, et al.: Application of artificial neural networks for quantitative analysis of image data in chest radiographs for detection of interstitial lung disease. *J Digital Imag*, 11, 182-192, (1998).
- 30) Monnier LC, MacMahon H, Katsuragawa S, et al.: Computer-aided diagnosis for detection of interstitial opacities on chest radiographs. *Am J Roentgenol*, 171, 1651-1656, (1998).