ニューラルネットワークによる超音波像 組織性状識別法の検討

正員 吉野進也 (帝京技科大)
非会員 小林 暁 (帝京技科大)
非会員 谷萩隆嗣 (千葉大)
非会員 福田浩之 (千葉大)
非会員 江原正明 (千葉大)
非会員 大藤正雄 (千葉大)

A Method for Characterization of Ultrasonic Image Texture Using Neural Networks

Shin'ya Yoshino, Member, Akira Kobayashi, Non-member (Teikyo University of Technology),
Takashi Yahagi, Non-member, Hiroyuki Fukuda, Non-member, Masaaki Ebara, Non-member,
Masao Ohto, Non-member (Chiba University)

We have classified parenchymal echo patterns of cirrhotic liver into four types according to the size of hypoechoic nodular lesions. Neural network technique has been applied to the characterization of hepatic parenchymal diseases in ultrasonic B-scan textures. We employed a multilayer feedforward neural network utilizing the back-propagation algorithm. Coarse score of cirrhotic liver at autopsy correlates closely with histological findings. The coarse score is also bound up with parenchymal echo pattern of the liver. The experimental study suggests that the neural network approach is useful for objective evaluation of hepatic parenchymal echo pattern, though continuing work is needed to improve the classification accuracy.

キーワード：医用超音波像，肝臓病，神経回路網，組織性状，パターン認識

1. ま え が き

臨床医学の分野において超音波検査法は，無侵襲性，安全性，簡便性，経済性など，多くの優れた点があるため，種々の部位や疾病に対する診断として，今後ますます有用になるものと思われる。

本研究は，パーソナルコンピュータレベルで超音波断層画像処理システムを構築し，肝臓病，特に肝硬変について，微小肝細胞癌の疑いのある結節性低エコー病変に注目した実質パターン情報の特徴抽出を行い，病変の進展段階のクラス分けなど診断に有益な情報を専門医師へ提供することを目的としている。

従来の実質パターン情報の特徴抽出に関する研究で

は，医師の関心領域における濃度分布を統計的に調べる方法による結果としての平均値，標準偏差，変動率などを指標にして分類している。ところが，この領域は血管やそれによる音響反射の影響などにより，統計処理に対して十分なデータ数を提供できるほど広くないのが実情である。臨床医学の立場では，未学習データまで拡張して即座に病変の進展段階のクラス分けを実行し，治療に役立つ情報を提供できるような識別法が望まれている。

著者らは，これまで電子走査型超音波診断装置 SSA-270 A，パソコン PC-9801 およびイメージプロセッサ nexus 6400 を用いて，研究を推進してきた。この成果として，一次元的処理による「あらし」の抽

出と、二次元的処理による「くぼみ」の抽出の二つの方法を提案してきた。症例画像に対して、前者は肉眼で感じる「あらさ」に相関性のある指標を得ることができ、後者は専門医師の鑑別診断による病変部の輪郭に近いものを描出することができた。しかし、結節性低エコー病変の進展段階を客観的にクラス分けすることにおいて不十分であった⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

本論文では、まずパソコン用フレームメモリーボードやスチルビデオレコーダなどを導入して、より忠実な超音波断面画像を採集し、装置全体の容積を縮小することにより、機動性と経済性からも改善を図ったことを述べる。次に、誤差逆伝搬学習法による3層ニューラルネットワークを利用し、肝硬変の結節性低エコー病変のパターン情報を特徴量にして、即座に病変の進展段階を識別する方法を提案する。最後に、本方法を病理学所見に基づく超音波画像に適用し、専門医師の鑑別と強い相関のある結果が得られたことを報告する。

2. 実質パターンの特徴とシステムの構成

〈2・1〉 肝硬変におけるパターン情報の特徴

肝臓を構成している、肝小葉（成人で直径が0.7～2 mm 程度）が、ウィルス肝炎、アルコール性肝障害、胆道閉塞（そく）、うっ血など種々の基礎疾患を起因として、変性または壊死に進行する。このような肝障害が長期化すると、肝小葉の集団が増生した繊維状の結合組織で取囲まれたり（偽小葉形成）、肝臓の表面には隆起ができたりする（再生結節形成）。これらは肝臓内での血流の変化を伴い、新たな肝小葉の壊死を招く。このように非可逆的な悪循環状態に陥ったものが肝硬変である。

肝臓などの実質臓器は、実質細胞と結合組織の割合や分布、つまり解剖学的構造に応じた固有の音響インピーダンスの構成をもち、それぞれが特徴的な実質のパターンを示す。この実質パターンは、基本的には群体からの散乱反射に基づくものである。

正常な場合、肝臓全域からある程度の反射があり、微細で、ほぼ均一に密に分布した複雑な斑紋状のパターン（スペックルパターン）と、散在する血管のエコー像から構成されている。門脈や肝静脈などの血管は樹枝状に分岐し、内腔の血液部分は黒い無エコー領域となり、血管壁は反射の強い白色の高エコー部分として確認できる。肝内に腫瘍などの病変がある場合には、実質パターンの異常さに基づく超音波の反射特性によって、エコーの強度、密度、分布が変化するので有益な診断情報となる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

文献(6)に述べてあるように、肝硬変の再生結節の

表 1 実質パターンの分類
Table 1. Classification of parenchymal echo patterns.

実質パターン	低エコー病変の大きさ
0型（正 常）	認めない
I型（非結節性）	3 mm未満
II型（細結節性）	3 mm以上5 mm未満
III型（粗結節性）	5 mm以上10 mm未満

図 1 システムの構成

Fig.1. Block diagram of the proposed system.

像はスペックルパターンよりも大きくて、周辺に比べて反射波の少ない低エコー領域となる。逆に石灰化、脂肪滴、細かい多数の嚢胞などがある場合は、反射波の多い高エコー領域となることが知られている。肝硬変におけるパターン情報の特徴を表す指標として、微小肝細胞癌の疑いのある結節性低エコー病変に注目した。この大きさが10 mm 未満のものは、表1のように分類されることが腹腔鏡所見や剖検肝の水槽実験で確認されている。

そして、I～III型の中で10 mm 以上の結節性低エコー病変を認める場合には、I'、II'、III'型に分類される。慢性肝炎をI型、肝硬変をI～III型として分類している。肝硬変の診断において結節性低エコー病変は肝表面、肝縁、脾臓の大きさ、側副血行路などの超音波所見に比して最も高い正診率を示し、肝障害の重症度との間で有意な相関が見られたとしている⁽⁶⁾。

従って、結節性低エコー病変の大きさが増すと肝癌の可能性が高くなるので、この大きさの進展段階を客観的に評価できれば各段階で適正な治療を施すことが可能となり、臨床においても非常に有用である。

〈2・2〉 システム構成 図1にシステムの構成を示す。千葉大学医学部付属病院で稼働している、電子

(a) 一次元データと前処理

(b) ニューラルネットワークの構成

図 2 サンプル方法とニューラルネットワークの構成
Fig. 2. Sampling method and construction of neural network.

走査形超音波診断装置 SSA-270 A を用いた。各段階の症例画像を同一条件で比較するため、コンソールの設定 (Echo enhancement, Dynamic range, Sensitivity, Time control, Scale) を固定してステルビデオレコーダ R 1000 H で採集した。探触子はコンベックス型である。フレームメモリーボード CT-9800 B を介して、数値演算プロセッサ搭載のパソコン PC-9801 へ画像データを取込んでいる。

画像データは水平方向 512 画素、垂直方向 486 画素、グレースケール 256 階調である。ディスプレイ画面上の症例画像に対して、処理対象点の決定や各種パラメータの設定はマウスで対話的に実行できる。ビデオプリンタ VP-1500 により、256 階調、300 dpi の高画質ハードコピーが出力される。画面での症例画像に対して、関心領域内における識別開始点の決定は、キーボードに加えてマウスにより対話型に実行可能である。

このような周辺機器を導入して装置全体の容積を縮小したため、機動性が高まると共に経済性も向上させることができた。

フォトビデオカメラ PHB-A 7 と高精細モノクロ CCD ビデオカメラ KP-M1 (41 万画素) により、これまでの管面撮影による症例パラロイドや症例フィルムも教師データや判定対象データとして取込めるようにしている。

〈2・3〉 データの前処理 後述するニューラルネットワークへ入力するデータ群に施した前処理について説明する。ここで対象とするデータ群とは、図 2

(a) の右側の波形で示すように超音波画像の縦方向の濃度分布を入力して、一次元的に処理する有限個のデータの集まりである。ここでは方形領域内の肝硬変の実質パターンを対象とし、各一次元データについては、その始点を 20 画素の範囲で前後させ、始点がピーク値で一致するようにしている。更に個々の超音波画像のコントラストを一定にするために、同図の左側の波形で示すように各々のデータ群の平均値を 0 とし、 $-1 \sim +1$ の範囲に規格化させている。また、対象とする方形領域は垂直方向 128 画素、水平方向 68 画素からなっており、一次元データの長さを 128 としている [(b) 図]。これらの値は対象とする一次元パターンの特徴と、パソコンレベルでリアルタイム処理を実現するための理由から決定した。従って、この領域内には 68 本の一次元データが存在するが、実験によれば 30 本程度で良好な結果が得られている。

3. ニューラルネットワーク

学習アルゴリズムとしては、有効性が認められている誤差逆伝搬学習法を用いることにした。

ニューラルネットワークは図 2 (b) の右側に示すように、入力層、中間層、出力層の 3 層構造とし、対象画像のパターン情報より採取する入力層のニューロンユニット数を 128 個に設定した。出力層は分類結果に対応するカテゴリーが 0 ～ III 型なので 4 個である。中間層については 1 層とし、ユニット数は入出力層に見合った数に実験的に設定することとした。今回の報告は 32 個とした結果である。逐次修正法で更新し、結

図 3 肝臓の超音波断層画像の例
Fig. 3. Examples of ultrasonic images of livers.

合係数の更新値を 0.5 としている。各ユニットのしきい値関数は通常用いられている、次のシグモイド関数 $f(x)$ である。

$$f(x) = 1 / \{1 + \exp(-2x)\} \dots\dots\dots (1)$$

また、結合係数の初期値を 0～1 の間でランダムに設定している。

図 3 (a)～(d) が用いられた 0～III 型の超音波断層画像の例である。これら 4 種の画像に対して、専門医により判定された典型的な方形領域内の組織性状パターンから、垂直方向の 128 個の一次元データの濃度分布を 1 パターンとし、これを本ニューラルネットワークの教師データとして用いた。学習過程では 1 症例画像あたり 10 パターンを選び、0 型から III 型について各々 3 画像を用意し、合計 120 パターンを採用した。0, I, II, III, 0, I, II, III, … の順で、30,000 回学習させた。教師信号を T_k 、出力を S_k ($k = 0, I, II, III$) とし、誤差関数 e を次に示すように定義している^{(7)～(10)}。

図 4 学習曲線
Fig. 4. Learning curve.

$$e = \sum_k (T_k - S_k)^2 \dots\dots\dots (2)$$

このときの学習曲線を図 4 に示す。

4. 試 行 結 果

本システムの性能評価を行うために、臨床による肝硬変：39例、慢性肝炎：6例を未学習データとして採集し、超音波像組織性状の判定対象とした。また、肝硬変：12例、慢性肝炎2例の剖検肝画像について、統計解析による病理学的な立場からも検証を行った。

〈4・1〉臨 床 例 症例0～Ⅲ型の画像における関心領域内のデータについて、出力 S_k を求めた。

ニューロンユニット数は前述の入力層：128個、中間層：32個、出力層：4個である。

図 5 判 定 結 果

Fig. 5. Classification using the neural networks.

画像診断の能率向上を図って、水平方向8分割 (64画素/1 div)、垂直方向12分割 (40画素/1 div) の編目の交点を起点として、画面全体にわたり自動的にニューラルネットワークによる判定を実行できるようにしている。これは対象領域が指定された場合にも有効である。

対象領域に対して、水平方向のデータ群を64本として自動判定した結果をマッピングして表した例が図5(a)～(d)である。ここで、横軸は水平方向の座標で、縦軸は垂直方向の座標であり、原点(0, 0)は画像の左上である。0から3の数字は対象領域内の交点を始点として、判定された0～Ⅲ型を表している。図5によると専門医の鑑定による4段階のクラス分けに対して、顕著ではないが0型からⅢ型へと従い、数字が大きくなる傾向の分布となっていて、専門医の肉眼判定と相関性があることがわかる。しかし、(d)図のⅢ型の場合には、実質パターンによるデータ群の特徴によって0型と判定される区画が多く存在する例がしばしば見られ、今後の改善を要する。

判定をより明確にするために、教師信号とする画像の組合せや教師信号とするデータ群の選定などを変更して、本ニューラルネットワークのチューニングを行う必要がある。また、FFTやMEM (最大エントロピー法) など画像データに対する前処理の検討も必要である⁽¹¹⁾。そして今回は画像の縦方向のデータ群を対象としたが、超音波像組織性状の方向性、特にコンベックス探触子による扇形の画像の場合には、極座標方向についても検討する必要がある。

表2は肝右葉の表皮からの深さ20～70mmに存在する、典型的領域内の水平方向34画素、垂直方向128画素を区分単位 (約10×37mm²) として識別した結果である。ここでは判定結果の0型からⅢ型に対して、それぞれ0から3の値を与えて平均値を算出したものをCoarse score (以下、CS) としている。表中の0型からⅢ型において医師の肉眼による実質パタ

表 2 臨床例による評価
Table 2. Clinical evaluation.

実質パターン	症例数	C S
0型	6	0.64 ± 0.3
I型	22	1.31 ± 0.6
II型	11	1.90 ± 0.5
III型	6	2.36 ± 0.2

(a) 肝硬変

(b) 再生結節の面積分布

図 6 剖検肝

Fig. 6. Autopsy specimen of liver cirrhosis.

表 3 組織学的検討
Table 3. Histological study.

パターン	症例	$A_a[\text{mm}^2]$	$N[\text{個}]$	CS
0型	2	—	—	0
I型	5	2.56 ± 0.6	20.6 ± 5.1	0.51 ± 0.3
II型	5	5.20 ± 1.1	12.7 ± 2.4	2.04 ± 0.5
III型	2	21.6 ± 7.4	3.75 ± 1.5	2.19 ± 0.3

ン鑑別とCSには強い相関があり、本方法の妥当性が確認された。

〈4・2〉 組織学的検討 図6(a)のような剖検肝による症例画像に対して、組織学的に検証を行うために画像解析システムSUPER ASPECTを用いて、再生結節の特徴値を計測した。この再生結節の面積分布ヒストグラムの例が(b)図である。

表3は超音波画像から本ニューラルネットワークの識別結果によるCSと、剖検で摘出した肝臓の組織画像を計測して求めた再生結節の特徴値を比較したものである。ここで、 A_a は再生結節平均面積、 N は

100 mm²あたりの再生結節個数を示す。超音波画像を専門医が肉眼で0型と鑑定した2例については、剖検による肝臓の組織画像でも再生結節は認められず、CSの値も0であった。I型からIII型では再生結節の大きさと個数がCSと強い相関を示している。

本方法を用いることにより、臨床において診断に有用な情報を提供できることが検証された。

5. む す び

本論文は、誤差逆伝搬学習法による3層ニューラルネットワークを用いて、肝硬変のパターン情報のクラス分けをする試みについての報告である。

本研究の特長を要約すると、次のようである。

(1) パソコン用フレームメモリーボードやスチルビデオレコーダなどを導入して、より忠実な超音波断面画像の採集を可能とし、装置全体の容積を縮小させ、機動性と経済性を向上させた。

(2) 誤差逆伝搬学習法による3層ニューラルネットワークを用いることにより、統計的分類にとどまらず、臨床において即時に診断に役立つ情報を提供できるような有用性を確認した。

(3) 専門医師の鑑別と組織学による計測値に対して、強い相関を示す結果が得られた。

処理時間としては学習には数時間を要したが、対象点単位での認識は3秒程度であり、問題はなかった。現在のアルゴリズムは、まだ完全なものではなく、ハードウェアの拡充やソフトウェアの改善を要する。

ニューラルネットワークは教師信号や学習係数の更新、加減を実行させながら性能を向上させることが必要である。

今後は次のポイントを中心に研究を推進する方針である。

- (i) 各クラスの症例超音波画像を多く収集する。
- (ii) 効果的な画像の前処理と教師信号の決定法を検討して、学習曲線の改善を図る。
- (iii) 本システムに対する医師側の検証を重ねて、より客観的に病変の進展段階を細分化できるようにする。

これらにより、本方法を確立すると共に、これまでの他の方法と組合せて、10 mm以上の結節性低エコー病変と複合している症例、I'～III'型に対しても識別が可能な診断支援システムへと発展させたいと考える。

有益な御意見をいただいた、住友重機械工業(株)高村松三氏、新日本製鐵(株)中村英都氏および松下電工(株)鈴木孝氏に深謝いたします。症例画像の採

集に御協力を願った関係各位に感謝します。卒業研究として本実験の一部に従事された府川 功、曲田吉史の両君に謝意を表する。本研究の一部は帝京技術科学大学の特別研究助成による。

(平成4年1月27日受付, 同4月5月14日再受付)

文 献

- (1) 中村・谷萩・吉野・大藤・江原・木村:「超音波断層画像における肝臓の実質パターン解析」, 信学技報, MBE 87-104, 29 (昭63-3)
- (2) 谷萩・吉野・中村・大藤・江原・木村:「超音波断層画像による肝硬変のパターン情報抽出の方法」, テレビ学技報, ICS88-32/IPA88-35, 19 (昭63-6)
- (3) 中村・谷萩・吉野・大藤・江原・木村:「超音波断層画像からの肝硬変のパターン情報抽出の方法」, 信学論, J72D-II, 316 (平元-2)
- (4) 大藤 編:消化器超音波診断学 (昭60) 医学書院
- (5) 大藤:「肝・胆道・膵疾患における超音波診断の役割」, 映像情報(M), 14, 625 (昭57-8)
- (6) 木村・大藤・木村・江原・松谷・税所・土屋・近藤:「肝硬変における実質パターンの検討—特に結節性エコー病変について—」, 日超医論文集, 50, 789 (昭62-6)
- (7) 中野:ニューロコンピュータの基礎(平2)コロナ社
- (8) 中野:入門と実習ニューロコンピュータ(平元)技術評論社
- (9) 吉野・小林・谷萩・江原・大藤:「ニューラルネットワークによる肝硬変のパターン情報抽出の方法」, 平3信学秋季大, D-248, 6-250(平3)
- (10) 吉野・小林・谷萩・福田・江原・大藤:「ニューラルネットワークによる肝硬変のパターン情報抽出法の検討」, 信学会第6回DSPシンポジウム, A1-4, 25 (平3-11)
- (11) 谷萩:デジタル信号処理の理論 3 推定・適応信号処理 (昭61) コロナ社

吉 野 進 也 (正員)

昭和23年6月13日生。47年3月千葉大学工短部電気工学科専攻生修了。同年4月同大学勤務。63年5月帝京技術科学大学情報学部情報工学科助手。肝硬変を対象とする超音波画像診断支援システムの開発に従事。IEEE, 電子情報通信学会, テレビジョン学会, 日本超音波医学会, コンピュータ支援画像診断学会会員。

小 林 暁 (非会員)

昭和36年6月16日生。平成2年千葉大学大学院自然科学研究科博士課程生産科学専攻修了。同年帝京技術科学大学情報学部情報工学科助手。学術博士。平面アンテナ, 適応制御, デジタル信号処理の研究, 最近では遺跡探査用地中レーダの開発に従事。電子情報通信学会, 日本超音波医学会, 日本文化財科学学会会員。

谷 萩 隆 嗣 (非会員)

昭和18年2月1日生。46年3月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程電子工学専攻修了。同年千葉大学工学部電子工学科専任講師, 49年同助教授, 59年電気工学科教授, 平成元年情報工学科教授となり, 現在に至る。工学博士。デジタル信号処理, システム工学の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本超音波医学会会員。

福 田 浩 之 (非会員)

昭和37年4月14日生。62年3月千葉大学医学部卒業。同第一内科医師, 現在に至る。ニューラルネットワークによる医用超音波像組織性状の鑑別診断方式の開発に従事。日本超音波医学会, 日本内科学会, 日本消化器病学会, 日本肝臓学会, 日本磁気共鳴医学会会員。

江 原 正 明 (非会員)

昭和23年4月20日生。49年3月千葉大学医学部卒業。平成2年4月同第一内科講師となり, 現在に至る。医学博士。内科学, 特に肝臓病の画像診断の研究に従事。日本超音波医学会, 日本内科学会, 日本消化器病学会, 日本肝臓学会, 日本磁気共鳴医学会会員, 日本画像学会評議員。

大 藤 正 雄 (非会員)

昭和4年10月7日生。29年3月千葉医科大学卒業。現在, 千葉大学医学部第一内科教授。医学博士。内科学, 特に消化器超音波診断学, 超音波映像下穿刺術の臨床応用の研究に従事。日本画像学会評議員。日本超音波医学会, 日本磁気共鳴医学会, 日本内科学会, 日本消化器病学会, 日本肝臓学会会員。