

急性期脳梗塞の MRI 拡散強調画像における 濃度ヒストグラム解析法を用いた表示条件自動設定法

下川 賢二，長島 宏幸，小倉 敏裕

白石 明久，五十嵐 均，土井 邦雄

群馬県立県民健康科学大学大学院診療放射線学研究科

目的：本研究では，濃度ヒストグラム解析法を用いて，急性期脳梗塞の脳 MRI 拡散強調画像 (DWI) の表示条件を自動設定する方法を考案した。

方法：本研究では，虚血後 6 時間以内に撮像された 60 症例の DWI を利用した。本手法は，まず，別の 1 症例に対し， b_0 画像上の視床の信号強度を利用して DWI の表示条件を設定させる既存方法を適用し，線形濃度変換法を用いて表示条件を 8 bits に変換した。次に，濃度ヒストグラムを求めて，最大頻度値の半値となる画素値の全幅 ($FWHM$) を求めた。その後，対象の 60 症例に対して 3 次元 DWI を作成し，脳実質部における濃度ヒストグラムを求めて，最大頻度値となる画素値を決定した。最後に，決定された画素値をウィンドウ中心として設定し，調節された DWI の濃度ヒストグラム上の $FWHM$ と先に求めた $FWHM$ とが同一となるウィンドウ幅を求めて設定し，3 次元 DWI の表示階調を調節した。既存の手法と本自動化法を比較するため，手法ごとで準備した画像のペアに対する 2 肢強制選択法 (2-AFC 法) を実施し，信号強度と画像コントラストの変動を主観的に評価した。

結果：2-AFC 法を実施し，本手法により調節された 3 次元 DWI の症例間に対する主観的類似度を求めた結果，選択率が 71.7% となり，本自動化法は，既存方法に比べ，より一貫した画像表示を提供できることが明確に示された。

結論：本手法は，脳 DWI の表示条件の正確且つ迅速な自動設定において有望な技術であり，画像診断における放射線科医の意思決定にとって有用である。

キーワード：MRI 拡散強調画像，急性期脳梗塞，表示条件，自動設定，濃度ヒストグラム解析

I. 緒 言

脳血管疾患の 70～80% を占める脳梗塞の急性期における画像診断において，脳虚血領域の描出能に優れている MRI 拡散強調画像 (diffusion-weighted magnetic resonance image: 以下，DWI)¹⁻⁴⁾ は中心的な役割を成している。また，DWI の高信号を示す脳虚血領域の程度および範囲の確定は，劇的に症状を改善できる血栓溶解療法⁵⁾の適応を決定する上で重要な情報となる。しかし，脳虚血領域の程度や範囲は，表示画像の画素

値の幅に対応するウィンドウ幅 (*window width*: 以下， WW) や WW の中間値であるウィンドウレベル (*window level*: 以下， WL) の調節により大きく変化する。そのため，不適切な表示条件で画像診断を実施すると，急性期脳梗塞の存在診断や範囲判定の精度低下につながり，血栓溶解療法の適応の決定を誤ることで，重篤な出血性合併症を引き起こす可能性もある。

この問題を解決するため，厚生労働省研究班 (Acute Stroke Imaging Standardization Group-Japan: 以下，ASIST-Japan)⁵⁻⁸⁾ は，

DWIと同時に撮像されるb値を0にした画像(以下、b0画像)の視床に円形の関心領域(region of interest:以下、ROI)を目視にて設定し、平均画素値を計測して、その値をDWI表示のWLに、WLの2倍値をWWに設定する、表示条件の標準化法(以下、ASIST-Japan法)を提唱した。この方法は、装置間、施設間、担当者間及び被検者間におけるDWIの表示階調の変動を低減できると仮定されている。しかし、モニタ上の画像を観察する医師の手動によるROI設定が必要となるため、再現性に劣り、また、作業時間と労力を必要とする。さらに、ROIを設定する視床は、出血や無症状性のラクナ梗塞の好発部位であり^{9,10)}、視床にこれら疾患の既往があった場合、信号強度が大幅に低信号または高信号を呈し、その視床が利用され調節されたDWIの信号強度や画像コントラストは著しく変化する。したがって、ASIST-Japan法は、これらの問題点により表示階調の標準化に影響を及ぼすものと推測される。

長島らは、これら問題点の改善と実用化を目的に、視床の信号強度を利用するASIST-Japan法とは異なる新しいDWIの表示階調調節法を提案した。具体的には、b0画像の脳実質部に対して濃度ヒストグラムを求め、最も頻度が高くなる画素値を決定して、その画素値をDWIのWLに、WLの2倍値をWWに設定する方法(以下、先行研究法)である¹¹⁾。この方法は、視床の信号強度を利用することなく、非常に短時間で安定した画像表示が行えることから、画像診断や血栓溶解療法の迅速かつ正確な判断に有用であるとされている。しかし、先行研究法は、システムを実行させる前段階において、撮像された全スライス像から視床が描出されているスライス像を選択する手動操作が必要であり、半自動化のシステムである。さらに、我々の実地調査において、12 bitsで量子化されているDWIとb0画像をpicture archiving and communication system (PACS)により

画像サーバや画像処理ワークステーションに転送する際、b0画像のみを圧縮する施設が存在した。両画像が同一階調でない場合、先行研究法は利用できない。

そこで我々は、b0画像を利用せずにDWIの表示階調を自動的に調節する手法として、DWIの全スライス像を合成した3次元画像における濃度ヒストグラム解析法を用いた表示条件自動設定法を提案する。DWIの表示法に関する推奨や基準についての報告は、これまでASIST-Japan法以外提唱されておらず、DWIの表示階調を調節するシステムに関する既存研究は先行研究法以外、国内外ともに見当たらない。本研究では、急性期脳梗塞症例のDWIで構築された画像データベースを利用して、ASIST-Japan法および本手法を実施し、調節されたDWIを用いた観察者実験による評価結果を用いて、本手法の精度および特性を評価した。

II. 方 法

1. 画像データベース

実験に使用した画像データベースは、2005年11月から2007年11月まで、群馬県内3施設で1.5TのMRI装置(GENESIS SIGNA, SIGNA EXCITE: GE社製, Gyroscan Intera: PHILIPS社製)を用いて撮像された、60症例のDWIで構築されている。内訳は、男性40名、女性20名、年齢22歳~90歳(平均 68.1 ± 14.2)である。なお、本研究における画像データベースの使用に際し、本施設の倫理委員会の審査を受け、承認を取得している。撮像条件は、撮像シーケンス:SE-EPI, b値:1000 s/mm², TR:3472~10000ms, TE:86~102ms, フリップ角:90°,スライス厚:5mm,スライス間隔:6~7mm,MPG印加軸:3方向である。

2. 開発環境

パーソナルコンピュータOPTIPLEX GX260(DELL社製)(CPU: Intel Pentium 4, メイン

メモリ：1 GB, OS：Windows 2000) および VisualC++6.0 (Microsoft 社製) にて本方法の開発を行った。

3. 基準画像の設定と画像評価指標の算出

本手法は、まず、画像データベースとは異なる1症例のDWIとb0画像に対して、ASIST-Japan法を適用し、以下に示す式(1)の線形濃度変換法を用いて表示階調を8 bits (0～255階調)に変換した。

$$g(i,j) = 255 \times \frac{f(i,j)}{WW} \quad (1)$$

ここで、 $g(i,j)$ は変換処理した画像の画素値、 $f(i,j)$ は変換処理前の画像の画素値である。なお、 $g(i,j)$ が255以上の場合には、画素値を255とした。

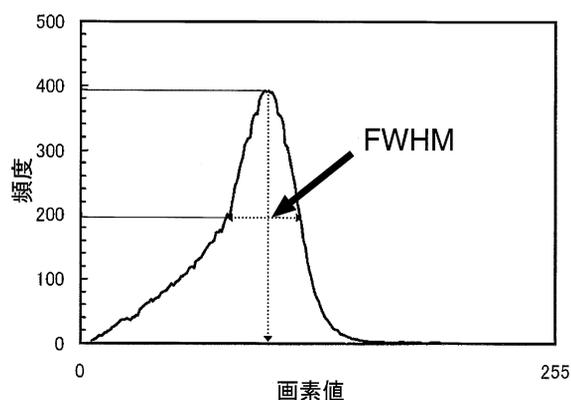


図1 本研究にて利用した画像評価指標の詳細

次に、得られた基準画像に対して濃度ヒストグラムを求め、最大頻度値の半値となる画素値の全幅である $FWHM$ (以下、 $FWHM_{\text{standard}}$) を決定した。なお、濃度ヒストグラムは画素値0を除外して算出した。図1に、 $FWHM$ の詳細について示す。本研究で設定した基準画像における $FWHM_{\text{standard}}$ は、45となった。

4. 対象画像における表示条件の自動設定法

4-1 脳実質部の抽出処理

抽出処理方法は、前処理として、撮像された脳DWI (matrix size : 256×256, gray level : 12 bits, pixel size : 0.820～0.937mm) をコンピュータに読み込み、DWIの全スライス像を合成して3次元画像を作成した。そして、DWIの最小画素値及び最大画素値を求め、線形階調変換処理を用いて8 bits (0～255階調)に変換した。次に、階調変換した画像に対し、2値化処理を行った。なお、しきい値は、脳実質部ができる限り正確に抽出でき、かつすべての症例で一定の割合となるよう、経験的に画素値を75と定めた。その後、明らかに小さい陰影を除去するため、ラベリング処理を用いて陰影の体積を計算し、体積が100000 voxels以下であるものを除外して、DWIの脳実質部を抽出した。図2 (a) に3次元DWI、図2 (b)、図2 (c) に脳実質部を抽出した2値化画像および原画像をそれぞれ示す。

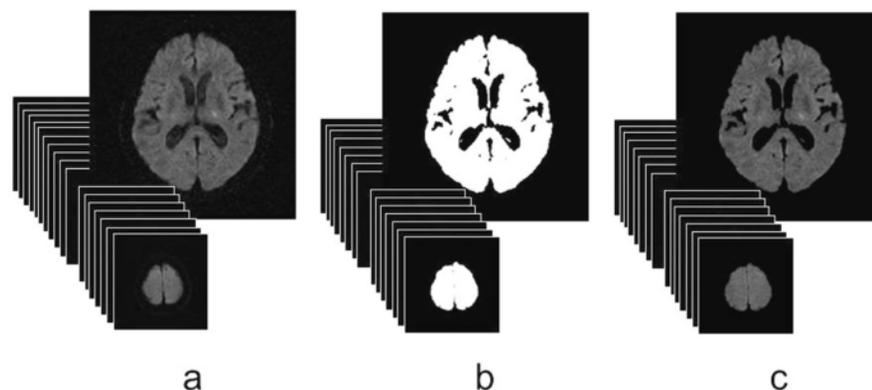


図2 脳実質部の抽出処理。

(a) 3次元DWI, (b) 脳実質部を抽出した2値化画像, (c) 脳実質部を抽出した原画像

4-2 濃度ヒストグラム解析法を用いた3次元DWIの表示条件の設定

3次元DWIから抽出した脳実質部の原画像に対して濃度ヒストグラムを求め、最頻値となる画素値を算出した。なお、計算された濃度ヒストグラムは、頻度値に変動がみられ、最頻値の決定に困難を要したため、20区間移動平均処理を用いて平滑化させた。そして、平滑化させた濃度ヒストグラムから求めた最頻値となる画素値を WL に、 WL に2を乗じた値を WW に設定し、式(1)の線形濃度変換法を用いて3次元DWIの表示階調を8bits(0~255階調)に変換した。次に、表示階調が調節された8bitsの3次元DWIに対し、濃度ヒストグラムを再度求め、 $FWHM$ (以下、 $FWHM_{\text{subject}}$)を決定した。最後に、以下の式(2)を用いて、3次元DWIの原画像に対する WW を求め、表示階調を調節した。

$$WW = 2WL \times \frac{FWHM_{\text{subject}}}{FWHM_{\text{standard}}} \quad (2)$$

ここで、 WL は対象症例の脳実質部の原画像から求めた濃度ヒストグラムに対する最頻値となる画素値である。

5. システムの特性評価

まず、ASIST-Japan法および本手法により調節された60症例のDWIから乱数を用いて20症例を選択し、症例間で190のペアを用意した。なお、ASIST-Japan法は、放射線科医の合議のもと手動で実施された。そして、各ペアを利用した観察者による2肢強制選択法^{12,13)}を実施した。具体的には、手法ごとのペア画像を同一モニタ上に並べて表示し、脳実質部の信号強度および画像コントラストの類似度を主眼として、より類似している手法を選択するよう観察者に依頼した。手法間における比較評価は、手法ごとで選択された割合を基に行い、表示階調の標準化について検討した。なお、視覚評価した観察者は、9~29年(平均

14.6±8.2)の経験を持つ5名の放射線科専門医である。

III. 結果

1. 特性評価結果

表1に、各手法により調節された20症例190ペアのDWIを用いて2肢強制選択法を実施し、手法ごとの選択率を求めた結果を示す。ASIST-Japan法で調節されたDWIの観察者間での平均選択率は、28.3%であったのに対し、本手法で調節されたDWIでは、71.7%であった。

表1 ASIST-Japan法および本手法により調節されたDWIを利用した2肢強制選択法により得られた観察者ごとの選択率

観察者	ASIST-Japan法(%)	本手法(%)
a	24.2	75.8
b	33.2	66.8
c	27.4	72.6
d	23.2	76.8
e	33.7	33.7
平均	28.3	71.7

組み合わせ数=190

2. DWIの表示階調の調節結果の比較

図3に、ASIST-Japan法と本手法により調節された3症例のDWIを示す。図3(a), 図3(b)および図3(c)はASIST-Japan法, 図3(d), 図3(e)および図3(f)は本手法により調節されたDWIである。本手法を用いて表示階調を調節したDWIは、ASIST-Japan法により調節されたDWIに比べ、信号強度や画像コントラストが主観的に類似しており、他の症例においても明らかな差異は認められなかった。

IV. 考察

本研究では、先行研究法の問題点を改善することを目的に、b0画像を利用しない3次元DWIにおける濃度ヒストグラム解析法に基づく表示条件自動設定システムを開発した。

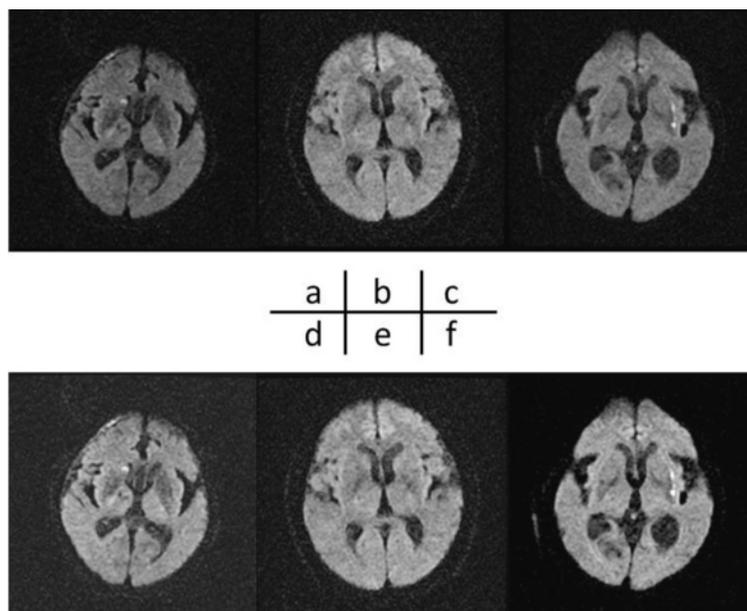


図3 3例のDWI症例の比較.

(a), (b), (c) ASIST-Japan 法により調節されたDWI,
(d), (e), (f) 本手法により調節されたDWI

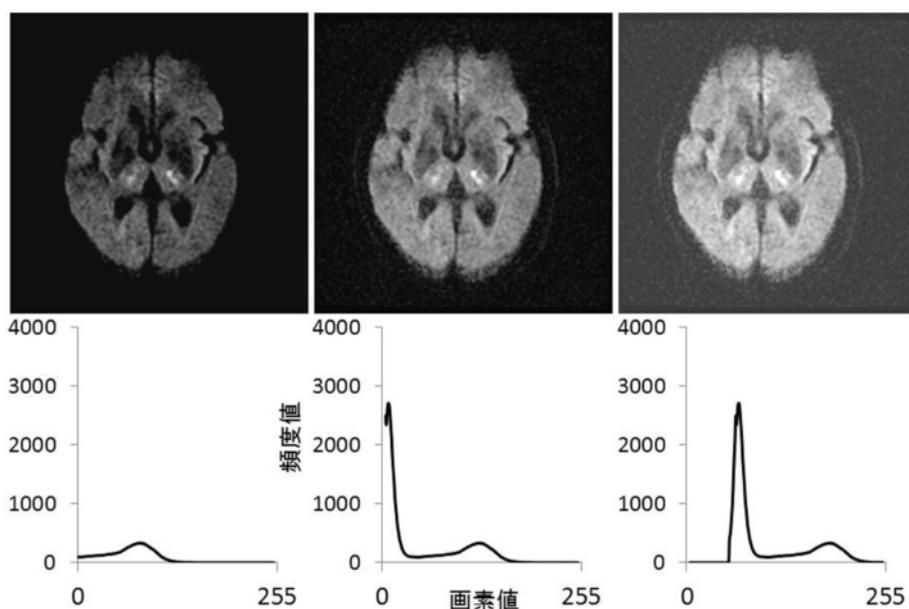


図4 WLを変化させたDWIと濃度ヒストグラム.

DWI (上段), 上段のDWIに対応する濃度ヒストグラム (下段)

本手法では、まず、線形階調変換法を用いてDWIの階調を正規化し、その後、2値化処理、ラベリング処理を用いて脳実質部を抽出した。抽出された脳実質部は、実際の脳実質領域の位置と満足できる程度に一致していた。したがって、本研究における脳実質部の抽出方法は、DWI表示に利

用する、濃度ヒストグラムにおける最頻値となる画素値の正確な決定を可能にした。

図4に、WLを変化させたDWIと濃度ヒストグラムを示す。濃度ヒストグラムは、WLが一定の場合、WLを変化させると、形状が不変のまま画素値方向に移動する。我々は、症例ごとで異な

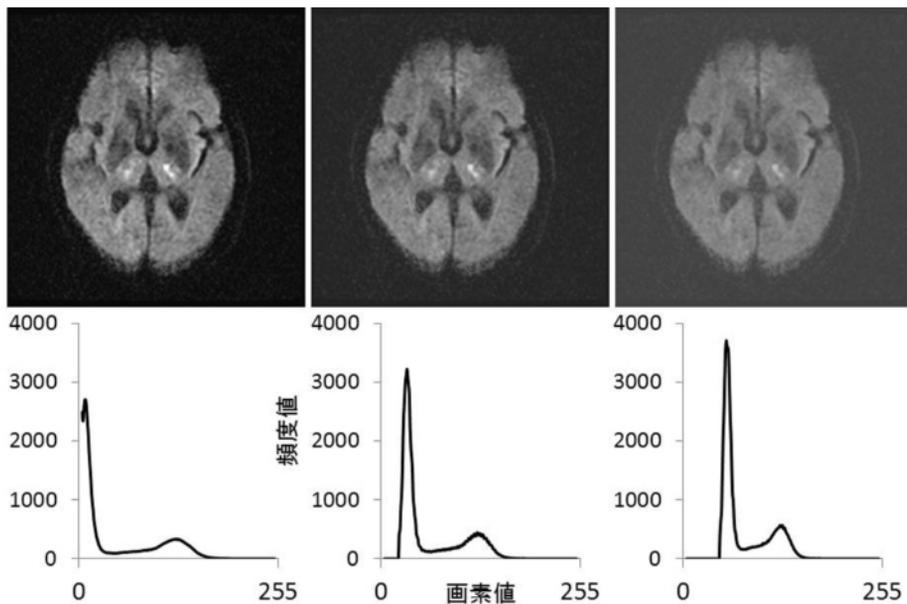


図5 WW を変化させた DWI と濃度ヒストグラム。
DWI (上段), 上段の DWI に対応する濃度ヒストグラム (下段)

る濃度ヒストグラムの最頻値となる画素値を WL に設定することで、装置間および被検者間の DWI の信号強度を統一化できると考えた。そこで、DWI から抽出した脳実質部の原画像に対して濃度ヒストグラムを求め、最頻値となる画素値を算出して WL に設定した。

さらに、図5に、 WW を変化させた DWI と濃度ヒストグラムを示す。 WL が一定の場合、 WW を変化させると、 WL に設定した画素値を中心として、濃度ヒストグラムの形状が変化し、最頻値の半値となる画素値である $FWHM$ が増減する。我々は、症例ごとで異なる $FWHM$ を、適切な画像コントラストで表示されている画像の $FWHM$ と等しい値に設定することで、装置間および被検者間の DWI の画像コントラストを統一化できると考えた。そこで、8 bits (0~255階調) に階調変換を行った DWI から、濃度ヒストグラムを求め、決定した $FWHM$ を表示階調の調節に利用した。具体的には、基準画像の $FWHM_{\text{standard}}$ と対象画像の $FWHM_{\text{subject}}$ 、原画像に対する濃度ヒストグラムの最頻値となる画素値から、式(2)を用いて、3次元 DWI の原画像に対する WW を求め、

表示階調を調節した。

本研究において、本手法と ASIST-Japan 法により調節された60症例の DWI から20症例を選択し、190のペアを用意して、観察者による2肢強制選択法を実施した結果、すべての観察者において、本手法の選択率が著しく高い値となり、観察者間での平均選択率が71.7%となった。また本手法と ASIST-Japan 法により、表示階調が調節された DWI を視覚的に比較評価した結果、本手法により調節された DWI は、ASIST-Japan 法で調節された DWI に比べ、脳実質部の信号強度や画像コントラストに明らかな差異が認められず、極めて類似していた。本システムにおける一連の処理に費やす時間は、本計算機スペック (Pentium 4, CPU 2.4GHz) において、1症例あたり約5秒と計測された。これらの結果より、視床の信号強度はもとより b0 画像を利用することなく、DWI の表示条件を自動設定できる本システムは、安定した画像表示を非常に短時間で行えることから、画像診断と血栓溶解療法の迅速かつ正確な判断において有用であると考えられる。

V. 結 論

本論文では、b0画像を利用せずにDWIの表示階調を自動的に調節する手法として、DWIの全スライス像を合成した3次元画像における濃度ヒストグラム解析法を用いた表示条件自動設定法を考案した。その結果、本手法は、既存方法と比べてより安定した信号強度および画像コントラストのDWI表示が可能であることが明確に示唆された。したがって、本手法は、脳DWIの表示条件の正確且つ迅速な自動設定において有望な技術であり、画像診断における放射線科医の意思決定にとって有用である。

謝 辞

本研究にあたり、多大な御協力を頂きました中央群馬脳神経外科病院、桐生厚生総合病院の皆様深く感謝致します。

なお、本研究は、医用画像情報学会平成21年度秋季（第155回）大会にて発表した。

引用文献

- 1) 井田正博, 大西貴弘, 豊田圭子ほか (2000) : 拡散強調画像 臨床における現状と将来, INTERVISION 15(9) : 63-66
- 2) 田中忠蔵 (2001) : Diffusion MRI 高信号の意味するもの 脳梗塞急性期 Brain attack 時代の診断と治療, 成富博章 (編) p.32-37, 医歯薬出版
- 3) 表利知幸, 星野貴志, 丸山喜仁ほか (2006) : 早期脳梗塞診断における Diffusion MRI の役割, 日放技学誌 62(10) : 1422-1427
- 4) 平野照之 (2008) : 脳卒中専門医のための脳血管障害の画像診断 急性期脳梗塞の頭部単純 CT・拡散強調画像, 分子脳血管病 7(1) : 78-85
- 5) 佐々木真理, 藤原俊朗 (2005) : 頭部領域での拡散強調画像の臨床, 日獨医報 50(4) : 621-628
- 6) 佐々木真理 (2005) : 急性期脳梗塞の CT, MRI 標準化の意義, 脳卒中 27(4) : 564-567
- 7) 佐々木真理 (2007) : 国内における拡散強調画像 灌流強調画像の標準化の動向, 分子欠陥病 6(1) : 73-77
- 8) M. Sasaki, M. Ida, K. Yamada, et al. (2007) : Standardizing Display Conditions of Diffusion-weighted Images Using Concurrent b0 Images : A Multi-vendor Multi-institutional Study. Magnetic Resonance in Medical Sciences 6(3) : 133-137
- 9) 佐藤正之 (2006) : 神経損傷部位と症状 視床の症候, 総合リハビリテーション 34(10) : 963-970
- 10) 奥田佳延, 鈴木俊久, 多根一之ほか (2008) : 脳出血の予後の検討, Neurosurg Emerg 13(1) : 66-71
- 11) 長島宏幸, 原川哲美, 土井邦雄 (2010) : 濃度ヒストグラム解析に基づく脳 MRI 拡散強調画像における表示階調の自動調節, 映像情報メディア 64(6) : 874-880
- 12) 大塚昭義, 砂屋敷忠, 小寺吉衛ほか (1994) : C-D ダイアグラムと AFC 法 実験画像評価初学者のための実験入門書, p.71-80, 三松堂印刷
- 13) J. Shiraishi, H. Abe, K. Ichikawa, R.A. Schmidt, et al (2009) : Observer Study for Evaluating Potential Utility of a Super-high-resolution LCD in the Detection of Clustered Microcalcifications on Digital Mammograms. J Digit Imaging

Computerized Scheme for Automated Setting of Display Conditions in Brain Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Images Using Density Histogram Analysis

Kenji Shimokawa, Hiroyuki Nagashima, Toshihiro Ogura,
Akihisa Shiraishi, Hitoshi Igarashi, Kunio Doi
School of Radiological Technology, Gunma Prefectural College of Health Sciences

Objectives : In this study, we evaluated a computerized scheme for automated setting of grayscale display for diffusion-weighted magnetic resonance images (DWI) of brains based on the density histogram analysis against existing standard methods for setting display conditions for DWI to ascertain whether the automated methods provided more consistent display.

Methods : We used 60 brain DWI cases, which were scanned within the first 6 hours after stroke onset. In our computerized scheme, the existing method of setting the display conditions for DWI using the thalamic signal intensity in a b_0 image was first applied for one DWI case. The display grayscale was converted into 8-bits by the linear grayscale transfer technique. The density histogram was then determined, and the full width of pixel values corresponding to half of the maximum (*FWHM*) in density histogram was determined. The DWI volumes were then created for 60 cases, and the density histogram was determined from the brain region based on DWI volumes. The pixel value corresponding to the maximum in density histogram was determined for DWI volume. The display grayscale for DWI volumes was adjusted by setting the determined pixel value as a window center, and the pixel value that *FWHM* in the density histogram of adjusted DWI is corresponding to *FWHM* previously obtained as a *window width*. To compare the existing manual method to the automated method, the variation in signal intensity and image contrast was evaluated subjectively using a two-alternative-forced-choice test for pairs of images prepared by each method.

Results : The subjective similarity for pairs of DWI volumes adjusted using our computerized scheme was judged to be more similar than those using existing manual methods by 71.7%, which indicated clearly our automated method provided more consistent display.

Conclusions : Our computerized scheme is a promising technique for accurate, prompt automated setting of display conditions in brain DWI, and may be useful to radiologists in decision-making for radiological diagnosis.

Key words : diffusion-weighted magnetic resonance images (DWI), acute ischemic stroke, display conditions, automated setting, density histogram analysis