

DICOM格式医学图像显示方法研究

张光玉¹, 鲁雯¹, 徐龙春², 张敏凤², 邹越³, 赵文波³, 张岗³, 秦健², 杨贵华², 刘晓寒¹, 闫呈新², 朱建忠², 车琳琳¹

1.泰山医学院放射学院, 山东 泰安 271016; 2.泰山医学院附属医院影像科, 山东 泰安 271000; 3.泰山医学院附属医院耳鼻喉科, 山东 泰安 271000

【摘要】研究DICOM格式图像的非线性开窗显示方法,并同目前常用的线性开窗显示方法进行比较。本研究提出了逆线性、指数型、对数型、幂律型、S型、倒S型和基于复杂曲线的伪彩色非线性开窗显示方法,并比较了各种开窗显示方法。仿真结果表明,线性开窗显示适合于较亮背景中的低密度病变细节显示,对低密度病变增强效果较好。逆线性开窗显示刚好相反。对数型开窗显示能够将窗口中较窄范围的低密度值映射到较宽范围的输出密度值来显示,对窗口中的低密度病变增强效果好,而指数型开窗显示相反。幂律型开窗显示根据幂的取值不同分别类似于线性、指数型和对数型开窗显示。S型和倒S型开窗显示对窗口中的中等密度的病变增强效果好。基于复杂曲线的伪彩色显示方法,能够在较宽的窗口中显示较多的病变信息。非线性方法能够显示更多的图像信息,是线性方法的较好补充。

【关键词】DICOM格式; 医学图像; 线性开窗显示; 非线性开窗显示; 伪彩色开窗显示

【中图分类号】R312; TP391.4

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)01-0032-07

Display methods of medical images in DICOM format

ZHANG Guangyu¹, LU Wen¹, XU Longchun², ZHANG Minfeng², ZOU Yue³, ZHAO Wenbo³, ZHANG Gang³, QIN Jian², YANG Guihua², LIU Xiaohan¹, YAN Chengxin², ZHU Jianzhong², CHE Linlin¹

1. College of Radiology, Taishan Medical University, Tai'an 271016, China; 2. Department of Radiology, Affiliated Hospital of Taishan Medical University, Tai'an 271000, China; 3. Department of Otolaryngology, Affiliated Hospital of Taishan Medical University, Tai'an 271000, China

Abstract: The non-linear window display methods of DICOM images were studied and compared with the commonly used linear display methods. The authors analyzed the methods for inverse linear, exponential, logarithmic, power-law, S function, inverse S function and complex curve-based pseudo color window displays, and compared these methods with linear methods of window display. The experimental results demonstrated that linear window display had good performance in displaying the details of low-density lesions against a bright background with a good lesion enhancement effect, while non-linear window display suited for displaying high-density lesions in dark background. The logarithmic window display was capable of mapping low gray-level values in a narrow range in the window of an input image to a wider range of output values, and suited particularly for enhancing low gray-level lesions; the exponential window display method better suited for enhancing high gray-level lesions. The power-law window display method, according to different values of gamma, could be similar to the linear, logarithmic or the exponential displays. The S and inverse S function displays had good enhancement effect for moderate gray-level lesions in the window. The pseudo color window display was capable of displaying more information of the lesions in a wider range of the window to assist in disease diagnosis. The non-linear methods provide more information of the input images and are thus good complimentary techniques for linear display methods.

Keywords: digital imaging and communications in medicine format; medical image; linear window display; non-linear window display; pseudo color window display

【收稿日期】2016-07-22

【基金项目】山东省自然科学基金(ZR2015HL095, ZR2014HL093); 山东省医药卫生科技发展计划项目(2016WS0608, 2016WS0604); 泰安市科技局引导计划项目(2015NS2159); 泰山医学院博士启动基金(20092007); 泰山医学院校级课题(2010ZR018)

【作者简介】张光玉, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 医学图像处理, E-mail: gyuzhn@163.com

【通信作者】车琳琳, 研究方向: 医学图像处理, E-mail: tyachelinlin@163.com

前言

医学数字成像和通信(Digital Imaging and Communications in Medicine, DICOM)格式是数字医学图像的数据存储格式,是医院影像科最常见的图像格式,这种格式图像的显示质量直接影响诊断的准确性。DICOM 标准 PS3.14 灰阶的标准显示函数部分规定,医学显示器应该使用 DICOM 标准提供的标准显示函数进行校正^[1]。许多研究分析了 DICOM 提供的校正方法对图像显示的效果^[2-6]。标准还规定 DICOM 格式的医学图像采用开窗显示技术,通过调节窗宽(即窗口宽度)和窗位(即窗口中心的位置)将医学图像的较大灰度范围分段进行显示,并且在 PS3.6 数据字典里面给出了开窗显示的窗位和窗宽这两个数据元素的标识符。目前国内医院对高精度医学图像均采用开窗显示技术^[7],通过调节窗宽和窗位可以浏览医学图像所包含的全部信息,而且可以将窗宽和窗位调到一个合适的值,使病变信息得到最佳显示,满足临床诊断的要求。高精度医学图像的开窗显示技术原理如下:通常使用的电脑显示器由于动态范围有限,并受到操作系统和人类视觉系统特性^[8-12]的限制,对于灰度图像所能显示的最大灰度值是 255。因此,需要在高精度医学图像的较大灰度范围内开设一个窗口,将这个窗口范围内的灰度值映射为 0~255 范围内的灰度值来显示,而窗口范围外的灰度值映射为 0 或 255 来显示。目前 DICOM 格式图像常用的显示方法是线性开窗显示,然而,人类的视觉系统是非线性的^[10-12],这种显示方法并不完全适合人类的视觉特性,因此,本研究将各种非线性函数^[13]用于开窗显示,提出了各种非线性开窗显示方法,包括逆线性、幂律型、对数型、指数型、S 型和倒 S 型开窗显示。此外,还综合了各种方法的优点,提出一种基于复杂曲线的伪彩色开窗显示方法。开窗显示是医学图像全局对比度增强的一种方法,虽然迄今为止,已研究提出多种医学图像增强方法^[14-20],但还不能完全满足临床应用的要求,因此,研究 DICOM 格式图像的显示方法仍然具有重要的临床价值和实际意义。

1 材料和方法

1.1 材料

使用泰山医学院附属医院影像科提供的 DICOM 格式医学图像作为本研究中的各种开窗显示方法的测试图像。

1.2 方法

1.2.1 线性开窗显示 线性开窗显示就是将窗口内的灰度值通过线性映射变换到 0~255 空间来显示。线性开窗变换可用图 1 来描述。

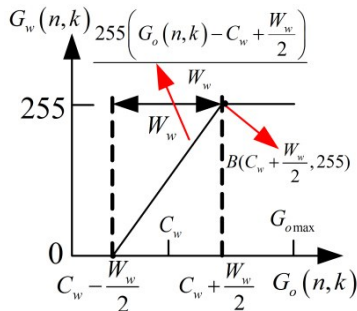


图1 线性开窗变换函数图形

Fig.1 Linear window transformation function graph

图 1 中,横坐标表示原始数字医学图像 I_o 的像素值, $G_o(n,k)$ 是 I_o 中像素点 (n,k) 处的灰度值,纵坐标表示线性开窗变换后图像的像素值, $G_w(n,k)$ 是线性开窗变换后图像 I_w 中像素点 (n,k) 处的灰度值, $G_{o\max}$ 是 I_o 的最大灰度值, C_w 表示窗位, W_w 表示窗宽。 $C_w - \frac{W_w}{2}$ 和 $C_w + \frac{W_w}{2}$ 分别表示窗口的下限值和上限值, $\frac{255(G_o(n,k) - C_w + \frac{W_w}{2})}{W_w}$ 是窗口内连接下端和上限端的线段所对应的线性表达式。根据图 1 可知,当输入的原始医学图像的像素值小于或等于下限值时,线性开窗变换后的值为 0;当输入的原始医学图像的像素值大于或等于上限值时,开窗变换后的值为 255;当输入的原始医学图像的像素值位于下限值和上限值之间时,按照窗口内的线段所对应的线性表达式将原始医学图像的像素值映射为 0~255 范围内的某个值。因此,根据图 1 可得线性开窗变换公式如下:

$$G_w(n,k) = \begin{cases} 0 & G_o(n,k) \leq C_w - \frac{W_w}{2} \\ \frac{255(G_o(n,k) - C_w + \frac{W_w}{2})}{W_w} & C_w - \frac{W_w}{2} < G_o(n,k) < C_w + \frac{W_w}{2} \\ 255 & G_o(n,k) \geq C_w + \frac{W_w}{2} \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 逆线性开窗显示 逆线性开窗显示就是将窗口内的灰度值通过逆线性映射变换到 0~255 空间来显示。逆线性开窗变换可用图 2 来描述。

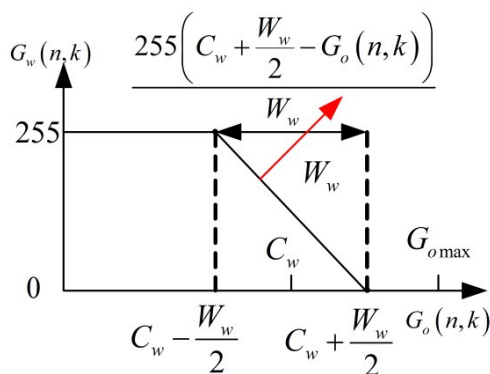


图2 逆线性开窗变换函数图形

Fig.2 Inverse linear window transformation function graph

根据图2可知,当输入的原始医学图像的像素值小于或等于下限时,线性开窗变换后的值为255;当输入的原始医学图像的像素值大于或等于上限时,开窗变换后的值为0;当输入的原始医学图像的像素值位于下限值和上限值之间时,按照窗口内的线段所对应的逆线性表达式将原始医学图像的像素值映射到0~255范围内的某个值。因此,根据图2可得逆线性开窗变换公式如下:

$$G_w(n, k) = \begin{cases} 255 & G_o(n, k) \leq C_w - \frac{W_w}{2} \\ \frac{255 \left(C_w + \frac{W_w}{2} - G_o(n, k) \right)}{W_w} & C_w - \frac{W_w}{2} < G_o(n, k) < C_w + \frac{W_w}{2} \\ 0 & G_o(n, k) \geq C_w + \frac{W_w}{2} \end{cases} \quad (2)$$

1.2.3 指数型开窗显示 指数型开窗显示就是将窗口内的灰度值通过指数映射变换到0~255空间来显示。指数型开窗变换可用图3来描述。

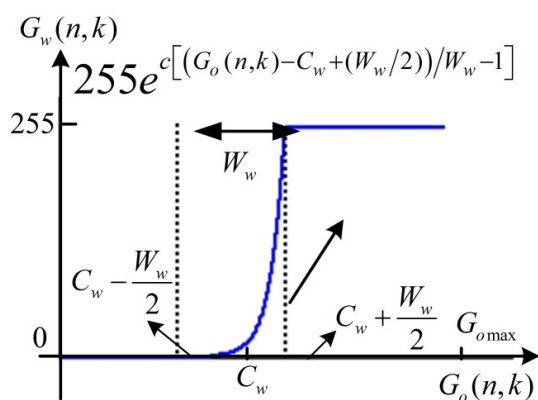


图3 指数型开窗变换函数图形

Fig.3 Exponential window transformation function graph

图3中, $255e^{c[(G_o(n, k) - C_w + (W_w/2))/W_w - 1]}$ 是窗口内的曲线所对应的指数表达式,式中, c 为曲率系数,表示曲线的弯曲程度。因此,根据图3可得指数型开窗变换公式如下:

$$G_w(n, k) = \begin{cases} 0 & G_o(n, k) \leq L_v \\ 255e^{c[(G_o(n, k) - L_v)/W_w - 1]} & L_v < G_o(n, k) < H_v \\ 255 & G_o(n, k) \geq H_v \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $L_v = C_w - (W_w/2)$ 表示下限值, $H_v = C_w + (W_w/2)$ 表示上限值。

1.2.4 对数型开窗显示 对数型开窗显示就是将窗口内的灰度值通过对数映射变换到0~255空间来显示。对数型开窗变换可用图4来描述。

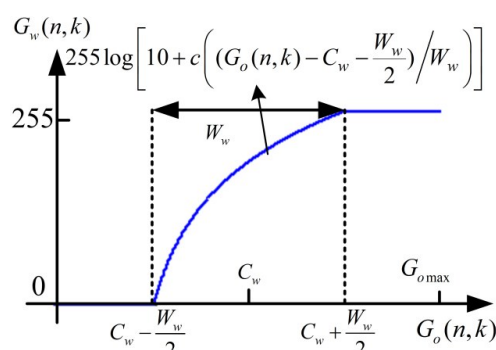


图4 对数型开窗变换函数图形

Fig.4 Logarithmic window transformation function graph

图4中, $255 \log \left[10 + c \left((G_o(n, k) - C_w - \frac{W_w}{2}) / W_w \right) \right]$ 是窗口内的曲线所对应的对数表达式,因此,根据图4可得对数型开窗变换公式如下:

$$G_w(n, k) = \begin{cases} 0 & G_o(n, k) \leq L_v \\ 255 \log \left[10 + c \left((G_o(n, k) - H_v) / W_w \right) \right] & L_v < G_o(n, k) < H_v \\ 255 & G_o(n, k) \geq H_v \end{cases} \quad (4)$$

1.2.5 幂律型开窗显示 幂律型开窗显示就是将窗口内的灰度值通过幂律映射变换到0~255空间来显示。幂律型开窗变换可用图5来描述。

图5中, $255 \left[(G_o(n, k) - C_w + \frac{W_w}{2}) / W_w \right]^\gamma$ 是窗口内的曲线所对应的幂律表达式,式中, γ 为幂, γ 取值不同,曲线形状不同。当 $\gamma < 1$ 时,曲线是上凸型曲线,类似于对数曲线;当 $\gamma = 1$ 时,曲线变为一条直线;当 $\gamma > 1$ 时,曲线是下凹型曲线,类似于指数曲线。因此,根据图5可得幂律型开窗变换公式如下:

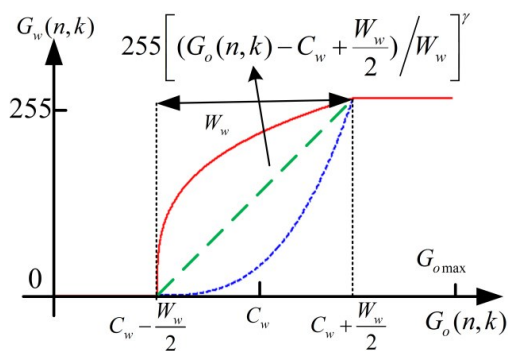


图5 幂律型开窗变换函数图形

Fig.5 Power-law window transformation function graph

$$G_w(n, k) = \begin{cases} 0 & G_o(n, k) \leq L_v \\ 255 \left[\frac{G_o(n, k) - L_v}{W_w} \right]^\gamma & L_v < G_o(n, k) < H_v \\ 255 & G_o(n, k) \geq H_v \end{cases} \quad (5)$$

1.2.6 S型开窗显示 S型开窗显示就是将窗口内的灰度值通过S型函数映射到0~255空间来显示。S型开窗变换可用图6来描述。

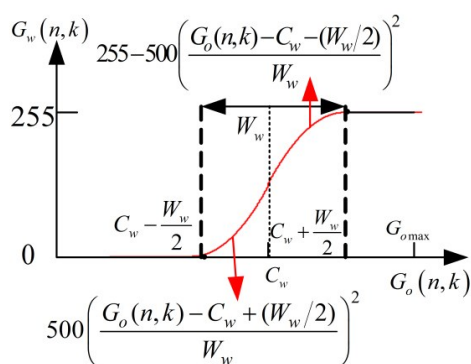


图6 S型开窗变换函数图形

Fig.6 S window transformation function graph

图6中, $500 \left(\frac{G_o(n, k) - C_w + (W_w/2)}{W_w} \right)^2$ 是窗口 $\left(C_w - \frac{W_w}{2}, C_w \right]$ 内的曲线所对应的表达式, $255 - 500 \left(\frac{G_o(n, k) - C_w - (W_w/2)}{W_w} \right)^2$ 是窗口 $\left(C_w, C_w + \frac{W_w}{2} \right)$ 内的曲线所对应的表达式。因此,根据图6可得S型开窗变换公式如下:

$$G_i(n, k) = \begin{cases} 0 & G_o(n, k) \leq L_v \\ 500 \left(\frac{G_o(n, k) - L_v}{W_w} \right)^2 & L_v < G_o(n, k) \leq C_w \\ 255 - 500 \left(\frac{G_o(n, k) - H_v}{W_w} \right)^2 & C_w < G_o(n, k) < H_v \\ 255 & G_o(n, k) \geq H_v \end{cases} \quad (6)$$

1.2.7 倒S型开窗显示 倒S型开窗显示就是将窗口内的灰度值通过倒S型函数映射到0~255空间来显示。倒S型开窗变换可用图7来描述。

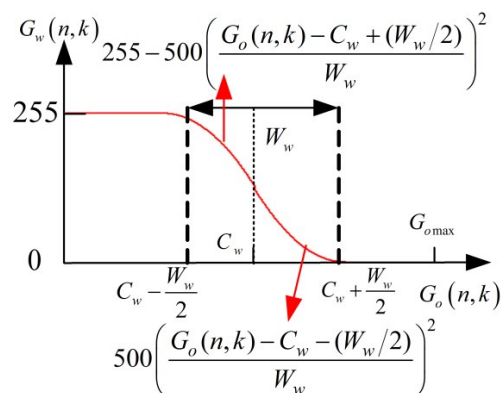


图7 倒S型开窗变换函数图形

Fig.7 Inverse S window transformation function graph

图7中, $255 - 500 \left(\frac{G_o(n, k) - C_w + (W_w/2)}{W_w} \right)^2$ 是窗口 $\left(C_w - \frac{W_w}{2}, C_w \right]$ 内的曲线所对应的表达式, $500 \left(\frac{G_o(n, k) - C_w - (W_w/2)}{W_w} \right)^2$ 是窗口 $\left(C_w, C_w + \frac{W_w}{2} \right)$ 内的曲线所对应的表达式。因此,根据图7可得倒S型开窗变换公式如下:

$$G_i(n, k) = \begin{cases} 255 & G_o(n, k) \leq L_v \\ 255 - 500 \left(\frac{G_o(n, k) - L_v}{W_w} \right)^2 & L_v < G_o(n, k) \leq C_w \\ 500 \left(\frac{G_o(n, k) - H_v}{W_w} \right)^2 & C_w < G_o(n, k) < H_v \\ 0 & G_o(n, k) \geq H_v \end{cases} \quad (7)$$

1.2.8 基于复杂曲线的伪彩色开窗显示 基于对各种开窗显示方法的分析,我们发现:对于幂律型函数,幂 γ 取值不同,曲线形状不同。当 $\gamma < 1$ 时,曲线是上凸型曲线,类似于对数曲线,在这种情况下,幂律型开窗显示等价于对数型开窗显示;当 $\gamma = 1$ 时,曲线变为一条直线,幂律型开窗显示等价于线性开窗显示;当 $\gamma > 1$ 时,曲线是下凹型曲线,类似于指数曲线,幂律型开窗显示等价于指数型开窗显示。因此,将幂律型和倒S型进行组合得到如下的伪彩色开窗显示公式:

$$\left\{ \begin{array}{ll} R(n,k) = G(n,k) = B(n,k) = 255 & G_o(n,k) \leq L_v \\ G(n,k) = 255 - 255[(G_o(n,k) - L_v)/W_w]^{1/\gamma} & L_v < G_o(n,k) \leq L_v + \frac{W_w}{3} \\ R(n,k) = c, B(n,k) = 255 - G(n,k) & \\ \\ R(n,k) = 255 - 500\left(\frac{G_o(n,k) - L_v}{W_w}\right)^2 & L_v + \frac{W_w}{3} < G_o(n,k) \leq C_w \\ G(n,k) = c, B(n,k) = 255 - R(n,k) & \\ \\ R(n,k) = 500\left(\frac{G_o(n,k) - H_v}{W_w}\right)^2 & C_w < G_o(n,k) \leq L_v + \frac{2W_w}{3} \\ G(n,k) = c, B(n,k) = 255 - R(n,k) & \\ \\ R(n,k) = 255 - 255[(G_o(n,k) - L_v)/W_w]^\gamma & L_v + \frac{2W_w}{3} < G_o(n,k) < H_v \\ G(n,k) = R(n,k), B(n,k) = 255 - R(n,k) & \\ \\ R(n,k) = G(n,k) = B(n,k) = 0 & G_o(n,k) \geq H_v \end{array} \right. \quad (8)$$

类似地,将幂律型和S型进行组合得到如下的伪彩色开窗显示公式:

$$\left\{ \begin{array}{ll} R(n,k) = G(n,k) = B(n,k) = 0 & G_o(n,k) \leq L_v \\ G(n,k) = 255[(G_o(n,k) - L_v)/W_w]^{1/\gamma} & L_v < G_o(n,k) \leq L_v + \frac{W_w}{3} \\ R(n,k) = c, B(n,k) = 255 - G(n,k) & \\ \\ R(n,k) = 500\left(\frac{G_o(n,k) - L_v}{W_w}\right)^2 & L_v + \frac{W_w}{3} < G_o(n,k) \leq C_w \\ G(n,k) = c, B(n,k) = 255 - R(n,k) & \\ \\ R(n,k) = 255 - 500\left(\frac{G_o(n,k) - H_v}{W_w}\right)^2 & C_w < G_o(n,k) \leq L_v + \frac{2W_w}{3} \\ G(n,k) = c, B(n,k) = 255 - R(n,k) & \\ \\ R(n,k) = 255[(G_o(n,k) - L_v)/W_w]^\gamma & L_v + \frac{2W_w}{3} < G_o(n,k) < H_v \\ G(n,k) = R(n,k), B(n,k) = 255 - R(n,k) & \\ \\ R(n,k) = G(n,k) = B(n,k) = 255 & G_o(n,k) \geq H_v \end{array} \right. \quad (9)$$

式(9)中, $R(n,k)$ 、 $G(n,k)$ 和 $B(n,k)$ 分别表示开窗显示后的图像中像素点 (n,k) 处像素值的红色、绿色和蓝色分量,这3个分量的不同取值,像素点会显示不同的颜色, c 是常数。

2 结果

对各种显示方法进行了仿真实验,实验结果如图8~11所示。图中,(a)表示线性开窗显示结果;(b)表示逆线性开窗显示结果;(c)表示对数型开窗显示结果;(d)表示指数型开窗显示结果;(e)表示幂律型开窗显示结果(幂小于1,本实验图8~9中幂取值为0.3,图10~11中幂取值为0.9);(f)表示幂律型开窗显示结果(幂大于1,本实验图8~9中幂取值为2.0,图10~11中幂取值为1.2);(g)表示S型开窗显示结果;(h)表示逆S型开窗显示结果;(i)表示基于公式(8)的伪彩色开窗显示结果;(j)表示基于公式(9)的伪彩色开窗显示结果。图中, C_w 表示窗位, W_w 表示窗宽。调节窗位和窗宽可以改变开窗显示后的图像亮度和对比度,只有调节到合适的窗位和窗宽,图像的

亮度和对比度才能到达最佳。图8~9是根据人的主观判断调节的结果(已将亮度和对比度调节到最优状态)。窗宽提示开窗显示后的图像所容纳的信息量,窗宽变大时,图像所容纳的信息增多。图10~11是窗宽固定为一个较大值时,将亮度调到最佳状态时的结果。可以看出,非线性开窗显示方法在最优显示状态下,窗宽比线性开窗显示大,表明非线性显示方法能够包含更多的病变信息,有利于临床影像诊断。

3 讨论

DICOM 格式的数字医学图像具有高灰阶值的特点,这种类型的图像具有较大的灰度范围,包含了较多层次的病变信息。但由于受到人类视觉系统和显示器动态显示范围的限制,不能将所有的灰度范围全部显示出来,只能通过开窗显示,分段将病变信息显示出来。人类视觉系统是非线性的^[8-12],因此,线性开窗显示并不完全适合人类视觉系统的特点,非线性开窗显示可以对现有的线性开窗显示方法起到较好补充,对于某些类型的图像,可能非线性方法更能清楚显示病变,特别是基于复杂曲线的伪彩色开窗显示,有时更能增强人眼对病变的敏感性。开窗显示后的图像对比度与窗口宽度有关。窗宽越小,对比度越大,也就是说当图像对比度比较大时,图像所容纳的信息比较少;当窗宽变大时,图像所容纳的信息会增多。

由于人类视觉系统对亮度变化较敏感,线性开窗显示适合于较亮背景中的低密度病变细节显示,对低密度病变增强效果较好;逆线性开窗显示刚好相反。对数型开窗显示能够将窗口中较窄范围的低密度值映射到较宽范围的输出密度值来显示,对窗口中的低密度病变增强效果好,而指数型开窗显示相反,对窗口中的高密度病变增强效果好。幂律型开窗显示根据幂的取值不同分别类似于线性、指数型和对数型开窗显示。S型和倒S型开窗显示对于窗口中的中等密度的病变增强效果好。基于复杂曲线的伪彩色显示方法,充分利用了各种方法的优点,能够在较宽的窗口中显示较多的病变信息,更有利于临床诊断。总之,非线性开窗显示更符合人类视觉系统特性,能够将窗宽调节到较大的值,开窗显示后的图像包含更多的病变信息。非线性方法是线性方法的较好补充。

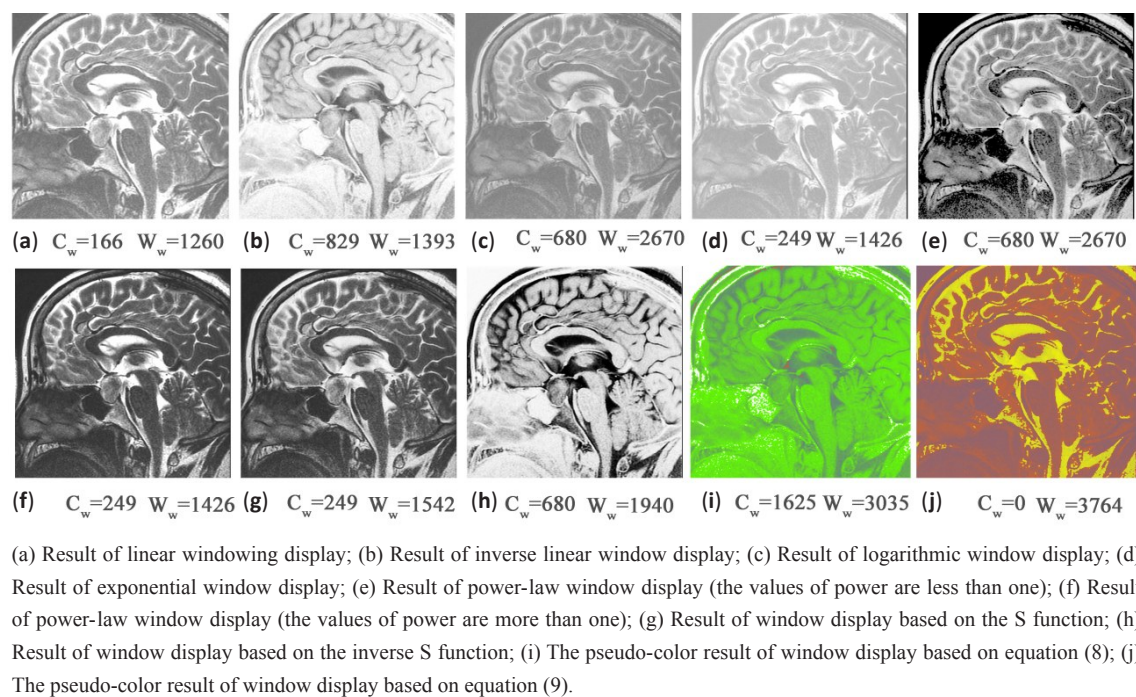


图8 脑垂体瘤的磁共振影像各种开窗显示方法的实验结果

Fig.8 Experimental results of the window display methods for a magnetic resonance (MR) image of pituitary adenoma

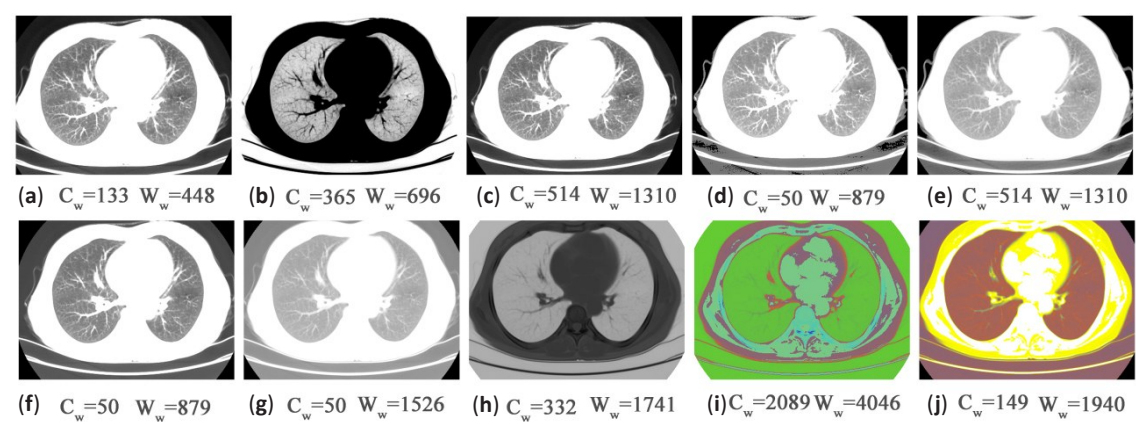


图9 右肺中叶肺炎的CT影像各种开窗显示方法的实验结果

Fig.9 Experimental results of the window display methods for a CT image of middle lobe pneumonia in the right lung

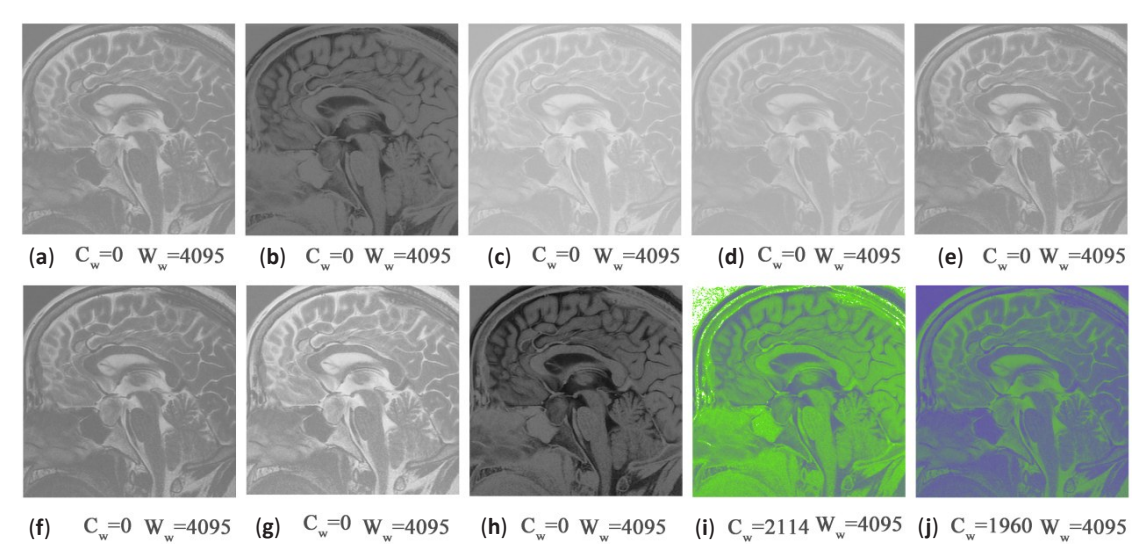


图10 脑垂体瘤的磁共振影像各种开窗显示方法的实验结果(窗宽固定)

Fig.10 Experimental results of the window display methods for a MR image of pituitary adenoma (with a constant window width)

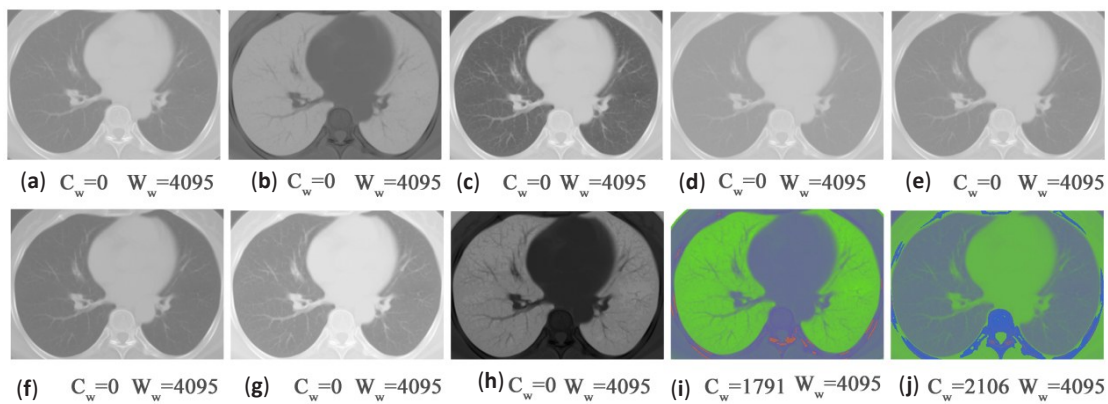


图 11 右肺中叶肺炎的CT影像各种开窗显示方法的实验结果(窗宽固定)

Fig.11 Experimental results of the window display methods for a CT image with middle lobe pneumonia in the right lung (with a constant window width)

4 结论

本研究将各种非线性用于开窗显示,提出了逆线性、指数型、对数型、幂律型、S型和倒S型开窗显示。在此基础上,还综合了各种方法的优点提出了基于复杂曲线的伪彩色开窗显示方法。研究表明非线性开窗显示能够容纳更多的病变信息,是线性开窗显示方法的较好补充。在实际临床应用中,将这些方法充分结合,能够更好地发挥医学图像处理对临床的辅助诊断功能。

【参考文献】

[1] <http://dicom.nema.org/standard.html>[EB/OL].
[2] KALLIO-PULKKINEN S, HUUMONEN S, HAAPEA M, et al. Effect of display type, DICOM calibration and room illuminance in bitewing radiographs[J]. Dentomaxillofac Radiol, 2016, 45(1): 20150129.
[3] LOWE J, BRENNAN P, EVANOFF M, et al. Variations in performance of LCDs are still evident after DICOM gray-scale standard display calibration[J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 195(1): 181-187.
[4] PETERS K, RAMSBY G. Natural display mode for digital DICOM-conformant diagnostic imaging[J]. Acad Radiol, 2002, 9(9): 1025-1035.
[5] SALAZAR A, AGUIRRE D, OCAMPO J, et al. DICOM gray-scale standard display function: clinical diagnostic accuracy of chest radiography in medical-grade gray-scale and consumer-grade color displays[J]. AJR Am J Roentgenol, 2014, 202(6): 1272-1280.
[6] THOMPSON S, WILLIS C, KRUGH K, et al. Implementing the DICOM grayscale standard display function for mixed hard- and soft-copy operations[J]. J Digit Imaging, 2002, 15(Suppl 1): 27-32.
[7] 贾克斌. 数字医学图像处理, 存档及传输技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 20-25.
JIA K B. Digital medical image processing, archiving and communication technique[M]. Beijing: Science Press, 2006: 20-25.
[8] NERCESSIAN S, PANETTA K, AGAIAN S. Non-linear direct multi-scale image enhancement based on the luminance and contrast masking characteristics of the human visual system[J]. IEEE Trans Image Process, 2013, 22(9): 3549-3561.

[9] PANETTA K, WHARTON E, AGAIAN S. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern, 2008, 38(1): 174-188.
[10] WANG S, JIN K, LU H, et al. Human visual system-based fundus image quality assessment of portable fundus camera photographs [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2016, 35(4): 1046-1055.
[11] WANG H, CUIJERS R, LUO M, et al. Optimal illumination for local contrast enhancement based on the human visual system [J]. J Biomed Opt, 2015, 20(1): 015005.
[12] ZHANG Y, PHAM B, ECKSTEIN M. The effect of nonlinear human visual system components on performance of a channelized Hotelling observer in structured backgrounds [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2006, 25(10): 1348-1362.
[13] 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 75-85.
GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 75-85.
[14] 陈科, 林江莉, 李德玉, 等. 超声医学图像滤波和对比度增强新方法[J]. 生物医学工程学杂志, 2007, 24(2): 434-438.
CHEN K, LIN J L, LI D Y, et al. Filtering and contrast enhancement of medical ultrasonic image[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2007, 24(2): 434-438.
[15] DONG B, YANG J, HAO S, et al. Research on an improved medical image enhancement algorithm based on P-M model [J]. Open Biomed Eng J, 2015, 9: 209-213.
[16] GAN H S, SWEE T T, ABDUL KARIM A H, et al. Medical image visual appearance improvement using bi-histogram Bezier curve contrast enhancement: data from the osteoarthritis initiative [J]. Scientific World J, 2014, 2014: 294104.
[17] GUO Q, SU X. The study of medical image enhancement based on curvelet[J]. Technol Health Care, 2015, 23(Suppl 2): S319-323.
[18] QI G, FEI S, SHU-TING S. A case study on medical image enhancement based on II curvelet[J]. Biomed Mater Eng, 2015, 26(3-4): 129-138.
[19] QING-HANG H, ZHEN-XI Z, ZHENG L, et al. The processing of the degraded Medical digital image's image enhancement [C]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2005: 3383-3385.
[20] WANG Q, CHEN L Y, SHEN D G. Fast histogram equalization for medical image enhancement [C]//2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vols 1-8, 2008: 2217-2220.

(编辑: 黄开颜)