

面向人眼探测识别的灰度图像伪彩色化方法

蔡铁峰^{1,2,3}, 朱 枫^{1,3}, 郝颖明^{1,3}, 范慧杰^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 人眼能分辨的颜色数量远多于人眼能分辨的灰度级, 把灰度图像用伪彩色显示出来, 人眼可以更好地感知图像中的景物信息。区别于现有方法, 明确以有利于人眼探测识别为目标, 给出了灰度图像伪彩色化后人眼能感知到的景物信息量的两项评价指标, 在评价指标指导下, 提出了一种灰度图像伪彩色化方法。该方法在确保灰度图像中各灰度级映射成人眼可分辨的不同颜色前提下, 使尽量多的景物信息被人眼感知到。实验结果表明, 相较于现有方法, 该方法能使更多景物被人眼看清。该方法满足实时处理图像的要求。

关键词: 探测识别; 图像对比度增强; 伪彩色

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0213-07

Pseudo-color processing of gray images for human visual detection and recognition

Cai Tiefeng^{1,2,3}, Zhu Feng^{1,3}, Hao Yingming^{1,3}, Fan Huijie^{1,3}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The colors that can be distinguished by human eyes are much more than the gray levels that can be distinguished. More objects information of the gray image can be obtained through the pseudo-color processing. In a fundamental departure from the current pseudo-color processing methods, quantitative metrics for human visual detection and recognition were devised to measure perceivable objects information after pseudo-color processing, and a pseudo-color processing method was proposed under the metrics. At first, it was ensured that different gray levels were mapped to distinguishable colors. Then, a gray-to-color mapping function was created to make more objects information be perceived. In the comparison experiments, the proposed method can make more objects noticed by people. The proposed method can process images in real time.

Key words: detection and recognition; image contrast enhancement; pseudo-color

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61401455)

作者简介: 蔡铁峰(1982-), 男, 博士生, 主要从事图像优化方法方面的研究。Email: ericcal@163.com

导师简介: 朱枫(1962-), 男, 研究员, 主要从事视觉测量、图像质量表征与优化等方面的研究。Email: fzhu@sia.cn

0 引言

常见的 8 位数字灰度图像有 256 个灰度级, 而人眼能分辨的灰度级数量大概在 40 个左右。所以 8 位的包括红外图像在内的数字灰度图像显示给人眼看时, 常有部分景物信息无法显现出来。然而, 人眼能分辨的颜色有成千上万种, 把灰度图像用伪彩色显示, 能使图像中景物信息更好地被人眼感知到。

现有的灰度图像伪彩色方法大多是灰度级颜色映射。早期的灰度图像伪彩色方法(比如彩虹编码)是分别构造灰度级到颜色 RGB 三个颜色通道的映射函数, 由此得到灰度级对应的颜色 RGB 值, 使用的映射函数一般是分段线性的^[1-2]。根据人眼视觉心理特性, 人对颜色的认知并不是把颜色分成 R、G、B 三个分量, 而是把颜色认知为亮度、饱和度、色调三个分量, 所以 Cao M Y 等人^[3]先构造灰度级到亮度、饱和度和色调三个颜色分量的映射函数, 其中亮度和色调的映射函数是线形的, 而饱和度是分段线形, 然后由颜色的这三个分量的值计算得到在显示设备上对应的 RGB 值。由于人眼对亮度、饱和度的感知是非线性的, Wang Huakui 等人^[4]使用的灰度级到颜色亮度、饱和度和色调的映射函数是非线性的。前面这些方法的共同特点是: 不同灰度图像使用的却是相同且固定的灰度级颜色映射函数。肖斌等人^[5]根据图像直方图自适用地确定灰度级颜色映射函数, 其中颜色的饱和度值与图像直方图中灰度级所拥有的像素数相关^[4]。除了灰度级颜色映射方法外, 另外一些伪彩色方法使用小波等滤波器把图像分解成三个不同频谱的图像, 然后把这三个频谱图像分别转成伪彩色图像的 R、G、B 通道图像^[6-7]。

现有的灰度图像伪彩色方法都没有明确的评价指标, 更没有面向人眼探测识别的评价指标, 做不到在评价指标指导下, 自适应地对灰度图像伪彩色化。针对此问题, 明确以有利于人眼探测识别为目标, 给出了灰度图像伪彩色化后人眼能感知到的景物信息量评价指标, 在此评价指标指导下, 提出了一种灰度图像伪彩色化方法。

1 人眼分辨颜色视觉特性

颜色能否被人眼分辨可以由颜色之间的人眼感知颜色差来衡量, 其中颜色间的人眼感知颜色差越大, 颜

色越容易被人眼分辨。人眼感知颜色差不仅由颜色之间差值决定, 还受颜色值本身影响, 他们之间具体关系可通过实验测得。国际照明委员会(CIE)通过实验数据拟合出了颜色之间的人眼感知颜色差度量公式。在不同时期, CIE 给出了多个度量公式, 公布时间越晚的度量公式越准确也越复杂。CIE 推出的最新的人眼感知颜色差度量公式为 CIEDE2000^[8], 如公式(1)所示:

$\Delta E(u, v) =$

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R^T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \quad (1)$$

式中: u, v 为两个不同颜色; $\Delta L'$ 、 $\Delta C'$ 、 $\Delta H'$ 分别为这两个颜色的亮度差、饱和度差、色调差, 公式中各符号的具体含义请见参考文献[8]。当两颜色之间人眼感知差足够大时, 人眼才能清晰地分辨颜色。为了简便, 可以认为存在一个人眼分辨颜色的人眼感知颜色差阈值, 当颜色间人眼感知颜色差小于此阈值时, 人眼分辨不了颜色, 否则就能分辨。根据参考文献[8]设定此人眼感知颜色差阈值为 $T=2.3$ 。

2 评价指标

在灰度图像中, 面向人眼探测识别的景物信息更多体现在像素间灰度关系上, 而不是像素灰度值本身。灰度值关系包括大于、小于和等于。例如图 1 所示, 同样大小的三幅图像, 相同位置的像素灰度值不相同, 但对应像素间的灰度关系相同, 从而人在三幅图像中探测识别出相同的圆^[9]。其中, 相邻像素间的灰度关系又直接与景物的轮廓与纹理等重要信息相关, 相较于不相邻像素间灰度关系包含更多面向人眼探测识别的景物信息。相邻指的是四邻域或八邻域相邻, 文中限定为四邻域相邻。然而, 当一对相邻像素灰度值不同但灰度差小时, 人眼将无法分辨出这对像素的灰度值不同, 误认为灰度值相同, 也就感知不到这对相邻像素间灰度关系所包含的景物信息。

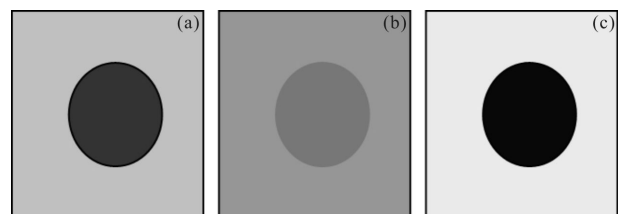


图 1 图像探测识别信息示例

Fig.1 Example of image information for detection and recognition

如果一对灰度值不相同的相邻像素映射得到人眼可分辨的不同颜色,那么人通过分辨出不同颜色就能获得这对像素灰度值不相同所包含的景物信息。因此,原灰度值不相同而映射得到的颜色人眼可分辨的相邻像素对的数量是一项评价人眼可感知信息量的合理指标。令 A 为灰度值不相同的相邻像素对数量,而 B 为灰度不相同且对应颜色人眼可分辨的相邻像素对数量,则归一化后的面向人眼探测识别灰度图像伪彩色化的第一项人眼可感知景物信息量评价指标为:

$$Q_1 = \frac{B}{A} \quad (2)$$

辨识了相邻像素间颜色不同,只做到了识别相邻像素原灰度值不相等,但还没有做到识别灰度值更大的像素,只部分获得了像素间灰度关系所包的景物信息。在颜色的亮度、饱和度、色调这三个分量中,亮度与饱和度有天然的大小属性,人可以把颜色间的亮度大小、饱和度大小与像素间原本的灰度大小对应上。比如,颜色越亮对应的原灰度值越大,而饱和度可以指定越小对应原灰度值越大。其中,之所以选择饱和度值越小对应的灰度越大,是因为这样可以做到颜色越白对应的灰度越大。然而,颜色的色调却没有天然的大小属性,比如说红色与绿色之间没有天然的大小关系。并且,颜色之间色调差异越大,颜色间的亮度大小、饱和度大小就越难以比较。因此,在所有原灰度值不等而对应颜色人眼可分辨的相邻像素对中,亮度差与饱和度差带来的人眼感知颜色差异在颜色间人眼感知颜色差异所占的比重能较好衡量准确识别像素对内灰度值大小的程度,从而这些相邻像素对的比重的总和是评价灰度图像伪彩色化后人眼可感知景物信息量的第二项合理指标。其中,根据人眼感知颜色差公式(1),对于任意两颜色 u, v , 它们之间亮度差与饱和度差带来的人眼感知颜色差在颜色间人眼感知颜色差所占的比重可由下式计算得到:

$$\Phi(u, v) = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_l S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_c S_C}\right)^2}}{\Delta E(u, v)} \quad (3)$$

计算所有颜色可分辨的相邻像素对的比重值,分别用 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_N$ 表示。其中 N 为颜色可分辨的相邻像素对数量。同样令 A 为灰度值不相等的相

邻像素对数量,则归一化后的面向人眼探测识别灰度图像伪彩色化人眼可感知信息量的第二项评价指标为:

$$Q_2 = \frac{\sum_1^N \phi_i}{A} \quad (4)$$

下文将在面向人眼探测识别灰度图像伪彩色化的这两项评价指标指导下提出灰度图像伪彩色方法。

3 灰度图像伪彩色化方法

在灰度图像的伪彩色增强过程中,为了不改变图像中探测识别信息,就需要确保人能从伪彩色图像推测得到的灰度关系是正确的。那么灰度图像中像素灰度值到颜色的映射需要满足表一。其中, u_i, u_j 为图像中任意一对像素 p_i, p_j 伪彩色化后的颜色值, u_i 的亮度、饱和度和色调值分别为 l_i, c_i, h_i, u_j 的亮度、饱和度和色调值分别为 l_j, c_j, h_j , 颜色亮度值、饱和度值、色调值是根据 LCH 颜色模型计算得到,虽然颜色色调值本身没有大小属性,但根据 LCH 颜色模型计算出的色调值有人为定义的大小,为了使颜色之间色调变化光滑有规律,文中在表 1 中要求灰度值越大对应的颜色的色调值也要越大。根据表 1,在原灰度图中灰度值相等的像素在伪彩色图像中颜色需要相等,从而所提的灰度图像的伪彩色增强就是一个灰度级到颜色的映射过程。灰度级到颜色的映射函数可以用下式表达:

$$u = f_{\text{map}}(v) \quad (5)$$

式中: v 为原始图像中灰度级; u 为伪彩色图像中的颜色。由于原灰度图像直方图中像素数为 0 的灰度级不需要参与映射,所以灰度级颜色映射函数只需给出像素数非 0 灰度级的颜色映射就可以了。

表 1 颜色大小与灰度大小映射规则

Tab.1 Rules of gray-to-color relationship

Color relationship	Gray relationship
$L_i = L_j, c_i = c_j, h_i = h_j$	$v_i = v_j$
$u_i \neq u_j, \text{且 } L_i \geq L_j, c_i \leq c_j, h_i \geq h_j$	$v_i > v_j$
$u_i \neq u_j, \text{且 } L_i \leq L_j, c_i \geq c_j, h_i \leq h_j$	$v_i < v_j$
The others	$v_i \neq v_j$

对于图像 I ,统计直方图后,像素数非 0 灰度级组成的从小到大序列为 $V = \langle v_1, v_2, v_3, \dots, v_N \rangle$,使用灰度颜色

映射后将得到颜色序列 $U = \langle u_1, u_2, u_3, \dots, u_{N-1}, u_N \rangle$ 。 U 中任意颜色 u_i 的亮度、饱和度和色调分别用 l_i 、 c_i 和 h_i 表示。根据 LCH 颜色模型, 颜色空间是一个圆柱体, 而颜色亮度、饱和度和色调的值是颜色空间对应的圆柱体坐标系的高度、径向距离和方位角, 其中亮度和饱和度取值范围都为 0~100。

为了使伪彩色化图像中景物信息尽量多地被人眼感知到, 该方法要求不同灰度级映射得到的颜色人眼可分辨, 这样能确保公式(2)对应的第一项评价指标值最大, 在此前提下, 在颜色序列 U 中, 优先只变动颜色的亮度, 当只变动亮度无法使所有颜色人眼可分辨时, 然后尽量少地变动饱和度, 当变动亮度和饱和度仍然不够时, 才尽量少地变动色调, 这样能使公式(4)对应的第二项评价指标值尽可能地大。下面将详细介绍求解 U 的过程。

3.1 在只变动亮度的前提下最大均匀人眼感知颜色差

在只变动亮度的前提下, 尽量拉大颜色序列 U 中各颜色之间的人眼感知颜色差。在待求的颜色序列 U 中, 各颜色的饱和度值和色调值相同, 其中各颜色饱和度值都取最大值 100, 而人眼对绿颜色最为敏感, 所有颜色的色调值都同样设定为绿颜色色调, 其中绿颜色色调值为 $h_0 = -0.76$ 。为了使 U 中所有颜色间人眼感知颜色差同时最大, 该方法要求序列 U 中相邻颜色之间人眼感知颜色差相等, 如下式所示:

$$\Delta E(u_1, u_2) = \Delta E(u_2, u_3) = \dots = \Delta E(u_{N-1}, u_N) = \bar{D}$$

式中: \bar{D} 称为此颜色序列的均匀人眼感知颜色差, 而 $\Delta E(u_i, u_j)$ 为颜色 u_i 与 u_j 之间的人眼感知颜色差。为了表达简便, 根据表一映射规则定义颜色的大小关系, 以灰度级 v_i 、 v_j 为例, 其中 $v_i < v_j$, v_i 、 v_j 映射的颜色分别为 u_i 、 u_j , 当它们的映射关系满足表一时, 则定义 $u_i < u_j$ 。现需要使 U 中均匀人眼感知颜色差 \bar{D} 最大, 则此需要可表达为如下最优化问题。其中颜色 u_i 的亮度值、饱和度值和色调值分别用 l_i 、 c_i 与 h_i 表示。

$$\text{求解: } U = \langle u_1, u_2, u_3, \dots, u_{N-1}, u_N \rangle$$

$$\text{优化目标: } \max \bar{D}$$

$$\text{约束条件: } u_i < u_{i+1}, i=1, 2, 3, \dots, N-1$$

$$l_i \in [0, 100], i=1, 2, \dots, N$$

$$c_i = 100, i=1, 2, \dots, N$$

$$h_i = -0.76, i=1, 2, \dots, N$$

$$d_{1,2} = d_{2,3} = \dots = d_{N-1,N} = \bar{D}$$

式中: $d_{i,i+1}$ 为 U 中任意相邻颜色 u_i 与 u_{i+1} 之间人眼感

知颜色差, 人眼感知颜色差可由公式(1)计算得到。为了使 \bar{D} 尽量大, 就需要 U 中第一个颜色的亮度尽量小, 所以 $u_1 = (0, 100, -0.76)$ 。 U 中颜色是依次递增的, 色调值和饱和度值不变动, 需要 U 中颜色的亮度单调递增。由此已知 u_1 的值, 给定 u_1 与 u_2 人眼感知颜色差, 就可以根据公式(1)计算得到 u_2 。同样当给定人眼感知颜色差可由 u_2 计算得到 u_3 , 依此类推可求得 U 中所有颜色的值。当给定的 \bar{D} 太大的时候, 由 \bar{D} 计算得到的颜色序列 U 中颜色的亮度值会超越亮度值的取值范围。下面将通过迭代搜索求得满足约束的最大均匀人眼感知颜色差 \bar{D} , 具体过程如下:

(1) 首先给出均匀人眼感知颜色差 \bar{D} 一个大概的取值区间 (d_L, d_U) , 显然下界 $d_L = 0$, 而 d_U 不可能超过 100, 所以令 $d_U = 100$ 。

(2) 令 \bar{D} 为区间 (d_L, d_U) 的中间值, 也就是 $\bar{D} = (d_L + d_U)/2$, 根据此均匀人眼感知颜色差, 由 U 中最小颜色 u_1 依次求得颜色序列 U 中所有颜色的值。如果 U 中最大颜色的亮度值越界, 也就是 $l_N > 100$, 则最大均匀人眼感知颜色差必然小于 $(d_L + d_U)/2$, 所以减小取值区间上界, 令 $d_U = (d_L + d_U)/2$; 当颜色序列中最大颜色的亮度 $l_N < 100$, 则最大均匀人眼感知颜色差必然大于 $(d_L + d_U)/2$, 所以可以增大取值区间下界, 令 $d_L = (d_L + d_U)/2$ 。如果 $l_N = 100$, 则此时的人眼感知差异度 \bar{D} 就是满足约束的最大均匀人眼感知度, 或者 $|l_N - 100|$ 足够小满足精度要求时, 也可以认为此时的 \bar{D} 就是满足约束的最大人眼感知颜色差, 否则返回本步骤开头。

当上面求得的 \bar{D} 不小于人眼能清晰分辨颜色的人眼感知颜色差阈值 T 时, \bar{D} 对应的颜色序列 U 就是满足本方法要求的颜色序列, 否则将进一步尽量少地变动饱和度使 \bar{D} 达到 T 。

3.2 变动亮度和尽量少的饱和度使均匀人眼感知颜色差达到阈值

此需要表达为如下最优化问题, 其中 c_N 为颜色序列 U 中最大的那个颜色 u_N 的饱和度值。

$$\text{求解: } U = \langle u_1, u_2, u_3, \dots, u_{N-1}, u_N \rangle$$

$$\text{优化目标: } \max c_N$$

$$\text{约束条件: } u_i < u_{i+1}, i=1, 2, 3, \dots, N-1$$

$$l_i \in [0, 100], i=1, 2, \dots, N$$

$$c_i = 100, i=1, 2, \dots, N$$

$$h_i = -0.76, i = 1, 2, \dots, N$$

$$d_{1,2} = d_{2,3} = \dots = d_{N-1,N} = T$$

在求解 U 的过程中,该方法选择先暂时把 U 中所有颜色饱和度值设定为最大值 100,只变化 U 中亮度,根据 U 中相邻颜色人眼感知颜色差等于阈值 T ,由 U 中最小颜色 u_1 依次计算 U 中下一个颜色,当计算得到的下一个颜色的亮度值越界时,则再减小饱和度。具体计算步骤如下:

(1) 令 $h_i = -0.76, c_i = 100, i = 1, 2, \dots, N$ 。

(2) U 中最小颜色亮度值 l_1 设为 0。

(3) 由 $l_1 = 0, u_2$ 与 u_1 人眼感知颜色差为阈值 T ,根据人眼感知颜色差计算公式(1)可求得第二个颜色亮度 l_2 ,由 l_2 可求得 l_3 ,依此类推,当求得的颜色亮度越界时($l_i > 100$),转到步骤 4。

(4) U 中颜色 u_x 以及 u_x 后面的颜色亮度值都设为 100($l_i = 100, i = x, x+1, \dots, N$)。已知 u_{x-1} 的颜色值以及 u_{x-1} 与 u_x 人眼感知颜色差为阈值 T ,根据人眼感知颜色差计算公式可求得下一个颜色 u_x 的颜色饱和度 c_x 。依此类推可以求得 U 中所有颜色的值。

当上面求得颜色序列 U 中最大颜色的饱和度值不小于 0 时,则此 U 就是满足该方法要求的颜色序列,否则将进一步尽量少的变动色调来使均匀人眼感知颜色差达到阈值 T 。

3.3 进一步变动色调使均匀人眼感知颜色差达到阈值

当只变动亮度和饱和度无法使 U 中所有颜色人眼可分辨时,就需要尽量少的变动色调,并且文中方法选择把色调变化均匀分配到序列 U 中各相邻颜色之间,如下式所示:

$$h_2 - h_1 = h_3 - h_2 = \dots = h_N - h_{N-1} = \Delta h$$

式中: Δh 称为序列 U 的均匀色调差。拉大均匀色调差就能使 U 中颜色间人眼感知颜色差增大,在确保均匀人眼感知颜色差不小于阈值 T 的前提下,文中方法迭代搜索找到需要最小均匀色调差。此最优化问题可表达如下。

求解: $U = \langle u_1, u_2, u_3, \dots, u_{N-1}, u_N \rangle$

优化目标: $\min \Delta h$

约束条件: $\Delta E(u_1, u_2) = \Delta E(u_2, u_3) = \dots = \Delta E(u_{N-1}, u_N) = T$

$$u_i < u_{i+1}, i = 1, 2, 3, \dots, N-1$$

$$l_i \in [0, 100], i = 1, 2, \dots, N$$

$$c_i \in [0, 100], i = 1, 2, \dots, N$$

$$h_2 - h_1 = h_3 - h_2 = \dots = h_N - h_{N-1} = \Delta h$$

其中,同样有 $u_1 = (0, 100, -0.76)$,以及在求解 U 的过

程中,同样选择先暂时把 U 中所有颜色饱和度值设定为最大值 100,只增大亮度和色调,当亮度增大到最大值后再减小饱和度。下面将通过迭代搜索求得满足约束的最小均匀色调差以及对应的颜色序列 U 。具体计算过程如下:

(1) 首先给出均匀色调差 Δh 一个大概的取值区间 (h_L, h_U) ,显然下界 $h_L = 0$,然后取一个足够大的值为上界,比如 $h_U = 100$ 。

(2) 令 Δh 为 (h_L, h_U) 的中间值,也就是 $\Delta h = (h_L + h_U)/2$,根据此均匀色调差,由 $h_i = -0.76 + \Delta h \times (i-1)$ 求得 U 中颜色各色调值,然后仿照变动亮度和尽量少的饱和度使均匀人眼感知颜色差达到阈值的计算方法,得到 U 中所有颜色的值。如果 U 中最大颜色的饱和度值没有越界 $c_N > 0$,则最小均匀色调差必然小于 $(h_L + h_U)/2$,所以减小取值区间上界 $h_U = (h_L + h_U)/2$;当颜色序列中最大颜色的饱和度越界 $c_N < 0$,则最大均匀人眼感知颜色差必然大于 $h_L = (h_L + h_U)/2$,所以可以增大取值区间下界。如果 $c_N = 0$,则此时的均匀色调差 Δh 就是满足约束的最小均匀色调差,或者 $|c_N|$ 足够小满足精度要求时, Δh 就是满足约束的最小均匀色调差,否则返回文中步骤开头。

该方法的简洁算法流程图如图 2 所示。为了减

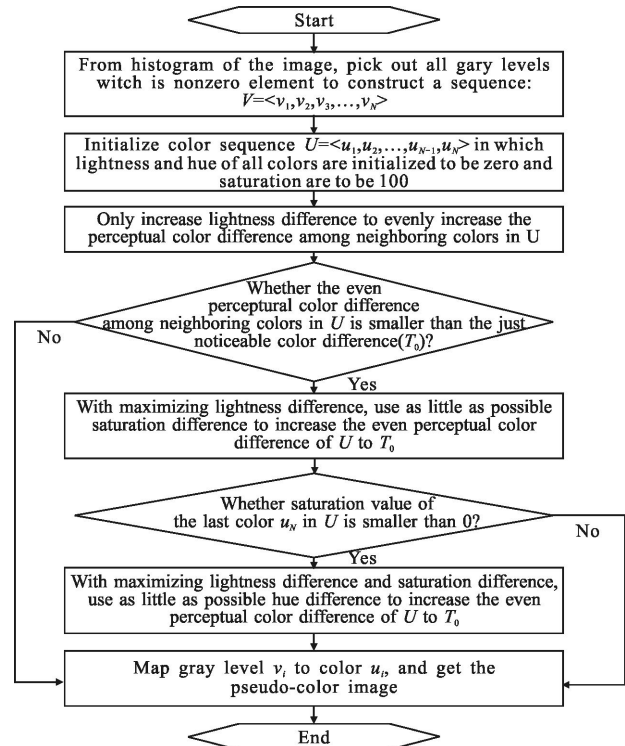


图 2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of the algorithm

少求解灰度级颜色映射函数的时间,可以先离线的预先计算出非 0 灰度级数分别为 1、2、3、...、256 时对应的映射函数,并生成一个查找表。然后对具体灰度图像进行伪彩色增强时,统计出图像中非 0 灰度级的数量,查表就可以得到需要的灰度级颜色映射。

4 实验

该实验图像处理平台为个人电脑,处理器运算频率为 2.66 GHz。选用大小为 500×500 的灰度图像进行对比实验。为了体现该算法的性能,该实验分别选用了一幅灰度级少和一幅灰度级多的图像,其中图 3 第一行原图有 73 个灰度级,第二行原图有 176 个灰度级。该方法将和彩虹编码、参考文献[3]中的方法以及参考文献[5]中的方法这三个具有代表性的伪彩色增强算法做比较。其中彩虹编码是直接 RGB 空间构造灰度级颜色映射函数;参考文献[3]中的方法先构造灰度到颜色亮度、饱和度与色调的映射函

数,然后转换得到颜色的 RGB 值;而参考文献[5]中的方法则根据图像直方图自适应的构造灰度级映射函数。实验中该方法的人眼分辨颜色的人眼感知颜色差阈值 T 将取值为 2.3。

比较图 3 第一行图像,可以发现只有该方法把像素间人眼感知颜色差拉大到人眼能看清图像中的所有景物,而且该方法生成的伪彩色图像中颜色间色调差又特别小,使人眼可以很直观的看清图像中景物。比较图 3 第二行,同样只有该方法把图像中颜色的人眼感知颜色差拉大到人眼足够看清图像中所有的景物,以左上角那栋楼为例,只有该方法所得图像中才能看清楚这栋楼,不过由于这一行图像原图灰度级较多,所以为了使人眼感知颜色差达到阈值 T 增加了相对多的色调差,使图像给人看时不够自然,获取景物信息不直观,而彩虹编码方法、参考文献[3]中的方法和参考文献[5]中的方法没有把像素间人眼感知颜色差拉大到人眼足够看清图像所有景

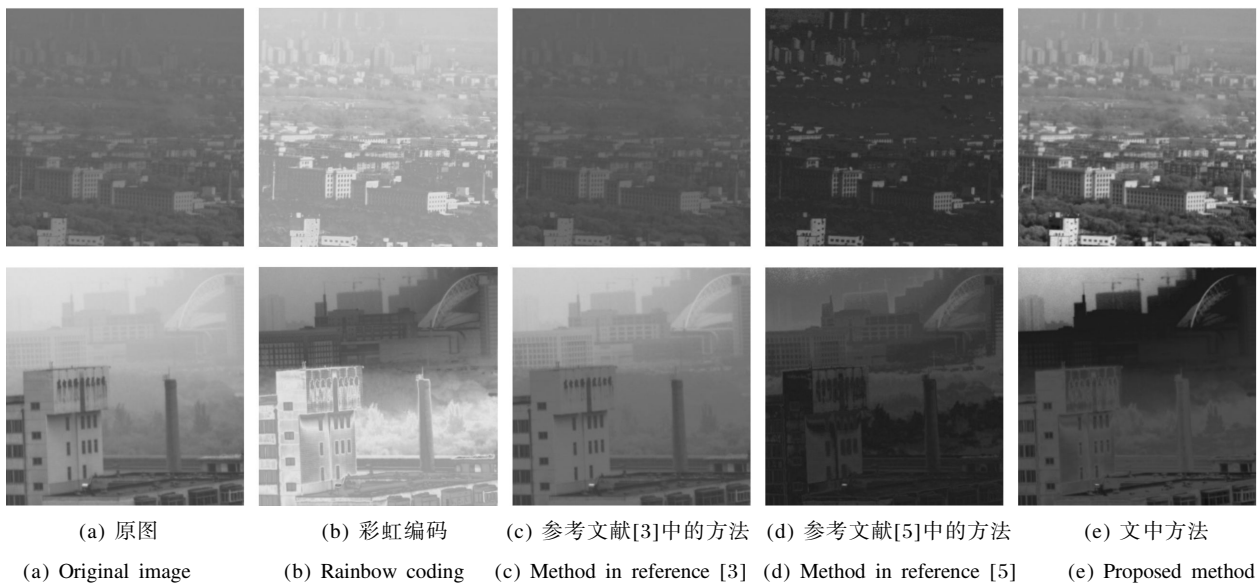


图 3 算法性能比较

Fig.3 Comparison between pseudo-color enhancement methods

物,其中参考文献[3]中的方法所得图像在图像中间树林那块区域几乎完全看不清。

在表 2 中给出了各伪彩色化方法根据公式(2)计算得到的评价指标一的值,其中两行图像中都是文中方法值最大。表 3 中给出了各算法根据公式(4)计算得到的评价指标二的值,同样是该方法值最大。面向人眼探测识别的景物信息更多体现在像素间灰

度关系上,而不是像素灰度值本身,且其中存在灰度差异的相邻像素间灰度关系又直接与景物的轮廓与纹理等重要信息相关,是人眼完成探测识别任务的特别重要依据。所以人能从伪彩色图像感知到原灰度图像中所有灰度值不等的相邻像素灰度关系的量在一定程度上就衡量了伪彩色化后人能获得的原灰度图像所包含的面向人眼探测识别的图像信息量。

两个灰度值不等的像素之间的灰度关系可以分解为灰度值是否相等以及灰度值谁大谁小两部分,评价指标一给出的是所有灰度值不等的相邻像素在伪彩色图像中能感知到不等关系的比例,评价指标二给出所有灰度值不等的相邻像素在伪彩色图像中被感知不等的前提下进一步被正确感知到灰度值谁大谁小的程度,从而这两项指标的和在一定意义上就衡量了伪彩色化后人能获得的原灰度图像所包含的面向人眼探测识别的景物信息的量。表 4 给出了两个指标值的和,同样是本方法得分最高。

表 2 评价指标一

Tab.2 Quantitative metric I

Methods	Rainbow coding	Method in reference [3]	Method in reference [5]	Proposed method
1st row	0.21	0.24	0.26	1.00
2nd row	0.29	0.20	0.48	1.00

表 3 评价指标二

Tab.3 Quantitative metric II

Methods	Rainbow coding	Method in reference [3]	Method in reference [5]	Proposed method
1st row	0.18	0.22	0.23	0.98
2nd row	0.13	0.17	0.42	0.63

表 4 总分

Tab.4 Total score

Methods	Rainbow coding	Method in reference [3]	Method in reference [5]	Proposed method
1st row	0.39	0.46	0.49	1.98
2nd row	0.42	0.37	0.90	1.63

该方法处理大小为 500×500 图像用时 0.03 s,满足实时处理图像要求。

5 结论

给出了合理评价灰度图像伪彩色化后人眼可感知面向人眼探测识别景物信息量的指标。在此指标下,提出了一种自适应的面向人眼探测识别的灰度图像伪彩色方法。此方法简单快速,可用于实时处理图像。区别于已有伪彩色方法,文中方法确保了 8 位数字灰度图像的所有灰度级映射到人眼可分辨的不

同颜色,使灰度值不同的相邻像素一定在伪彩色图像中被感知到颜色不同,且进一步使相邻像素颜色差异尽量多地体现为亮度与饱和度的差异,从而使能从本方法所得伪彩色图像更多的获得原灰度图像中面向人眼探测识别的信息。

该方法是针对 8 位数字图像设计的,当灰度图像是 10 位、12 位或者是 16 位时,就很可能做不到使图像中所有灰度级都映射到人眼可分辨的不同颜色上,对于这类图像的伪彩色化方法将在未来进一步开展研究。

参考文献:

- [1] Li B H, Xie S S, Lu Z K. Fluorescence image enhancement of lung cancer by pseudocolor processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(8): 938-941.
- [2] Rafael Gonzalez, Richard E. Digital Image Processing [M]. New York: Prentice Hall, 2002.
- [3] Cao M Y, Yu D Y. Pseudocolor coding of gray image based on perceptual color space [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(4): 61-63.
- [4] Wang H K, Wu B, Zhao Y, et al. Pseudo-color based visual method of sonar detection[C]//2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2011: 1347-1358.
- [5] Xiao Bing, Wang Xuan, Bi Xiuli, et al. A Gray image pseudo-color coding approach in HIS space based on image's histogram[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 35(1): 61-63. (in Chinese)
- [6] Zhong S, Jiang X Y, Wei J, et al. Image enhancement based on wavelet transformation and pseudo-color coding with phase-modulated image density processing [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, 58: 56-63.
- [7] Wang Zhiwen, Li Shaozi, Liu Meizheng, et al. Remote sensing image enhancement based on orthogonal wavelet transformation and pseudo-color image processing [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(7): 1602-1605. (in Chinese)
- [8] Wikipedia. "Color difference". http://en.wikipedia.org/wiki/Color_difference
- [9] Cai T F, Wu Q X, Hao Y M, et al. A method to enhance images based on human vision property [C]//2012 11th International Conference on Signal Processing, 2012: 952-955.