

# 数字图像伪彩色增强方法在岩土 CT 图像分析中的应用

范留明 李 宁 丁卫华

(西安理工大学岩土工程研究所 西安 710048)

**摘要** 直观岩土 CT 图像分析是最基本的 CT 分析方法,而高分辨率的岩土 CT 图像是这一分析方法的关键。为了提高岩土 CT 图像的分辨率,根据人眼的视觉特点,结合计算机数字图像颜色模式和图像格式,采用灰度级-彩色变换方法,对灰度 CT 图像进行伪彩色增强,显著地提高了 CT 图像的分辨率。

**关键词** 岩土力学, CT 图像, 视觉分辨率, 颜色模式, 灰度级-彩色变换, 伪彩色增强, 编码方法

**分类号** TU 413

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)13-2257-05

## APPLICATION OF PSEUDO COLOR ENHANCEMENT METHOD TO GEOTECHNICAL CT IMAGE ANALYSIS

Fan Liuming, Li Ning, Ding Weihua

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract** As a non-destructive and non-invasive technique, CT technique has been successfully used to detect internal fracturing process of soil and rock. In previous geotechnical CT image analysis, CT data are transformed into gray-scale images as usual. However, it is well known that human vision is less sensitive to difference between gray-scale pixels than that between color ones, so the detailed distribution of CT number is not easily recognized based on gray-scale CT images. In order to improve the discriminability, a pseudo color enhancement method based on gray-scale-color transform is used for geotechnical CT image, and some of gray-scale CT images are enhanced using this method. It clearly shows that the enhanced CT images can be more easily discriminated than gray-scale ones.

**Key words** rock and soil mechanics, CT image, discriminability of human vision, color pattern, gray-scale-color transform, pseudo color enhancement, coding method

## 1 引言

CT 作为一种无损检测技术,已从医学界和工业界推广应用到岩土工程界,为细观研究各种荷载作用方式下岩土体的变形破坏机理提供了一条新途径。尽管目前有多种 CT 分析方法<sup>[1]</sup>,例如 CT 数

分析法<sup>[2,3]</sup>,CT 数和灰度联合分析法<sup>[4]</sup>,CT 等值线法<sup>[5]</sup>,CT 图像的三维重采样方法<sup>[6,7]</sup>,数字体积相关法<sup>[8]</sup>等,但是直观的 CT 图像分析仍然是首先必须进行的基础工作<sup>[1]</sup>。文[9]声明实现了黄土 CT 图像的彩色显示,但是没有详述其实现过程。为此,作者根据计算机数字图像彩色增强方法,自编了相关的处理程序,实现了 CT 图像伪彩色增强,显著

2003 年 2 月 10 日收到初稿,2003 年 4 月 13 日收到修改稿。

作者 范留明 简介:男,1968 年生,博士后,1990 年毕业于西安地质学院物探系物探专业,主要从事岩土工程和地质工程方面的教学和科研工作。

E-mail: fanliuming@hotmail.com

地提高了视觉分辨率。此外,还建立了能反映伪彩色与 CT 数之间关系的色标,为快速、直观、半定量分析 CT 图像提供了有力的依据。

## 2 人眼的视觉分辨率

人眼的视觉分辨率是指人眼在一定距离上能够区分相近两点的能力,它与环境照度、物体运动速度、对象相对对比度以及颜色类别等诸多因素有关<sup>[10]</sup>。对于一幅静态图像,颜色类别和对比度是影响视觉分辨率的两个主要因素。

### 2.1 视觉彩色

人类的视觉彩色可以用亮度(luminance)、色调(hue)和饱和度(saturation)3 个量来描述,其中,亮度是指颜色明暗程度,色调是指光的颜色类别,饱和度是指深浅程度。尽管人类视觉可以识别可见光(380~780 nm)范围内的所有彩色,但是对各种彩色的分辨能力却不相同。表 1 列出了人眼对不同颜色的相对分辨率,由表 1 可见,人眼对各种彩色的分辨能力要比黑白的分辨能力低。

表 1 人眼对不同颜色的分辨率<sup>[10]</sup>

Table1 Discriminability of human vision to colors<sup>[10]</sup>

彩色差别	分辨率/%
黑白	100
黑绿	94
黑红	90
黑蓝	26
红绿	40
红蓝	23
蓝绿	19

### 2.2 视觉对比度

人类所感受到的主观亮度并不是直接由景物自身的客观亮度所决定,主观亮度感觉  $S$  与客观亮度  $B$  之间存在对数关系:

$$S = K \lg B + K_0 \quad (1)$$

式中:  $K$  和  $K_0$  均为常数。这一规律称为韦伯-费赫涅尔(Weber-Fechner)定律。

根据韦伯-费赫涅尔定律,视觉相对对比度  $C_v$  可以表示为

$$C_v = \frac{S - S_0}{S_0} = \frac{K(\lg B - \lg B_0)}{K \lg B_0 + K_0} \quad (2)$$

式中:  $B$  和  $B_0$  分别为对象的客观亮度和背景的客观

亮度,  $S$  和  $S_0$  分别为对象的主观亮度与背景的主观亮度。

## 3 计算机图像工作原理

### 3.1 颜色模式

颜色模式是指图像颜色的配色方式,其理论依据是色度学中三基色假说。三基色假说认为,自然界中的各种色光可以由红、绿、蓝 3 种色光按不同比例相配而成,同样,绝大多数色光也可以分成红、绿、蓝 3 种色光。虽然这一假说尚未得到医学的证实<sup>[10]</sup>,但是却得到广泛应用,计算机和电视显示器 CRT(cathode ray tube)颜色合成就是利用了这一原理,称为 RGB 相加模型。此外,颜色模式还有其他表示方法,诸如 CMYK 模式、Lab 模式、HSL 模式、YUV 模式、灰度模式、索引颜色(IndexColor)模式等等,它们与 RGB 颜色模式都有一定的对应关系<sup>[11]</sup>。

### 3.2 图像格式

图像应用和需求不同,其存储格式也不尽相同。目前计算数字图像格式很多,常用的格式有 BMP 格式、TIF 格式、PCX 格式、GIF 格式、JPEG 格式、RAW 格式等,其中与 Windows 应用软件兼容性最好的是 BMP 格式。

BMP 图像(通常称为位图)是 Microsoft 公司专为 Windows 系列软件设计的一种与设备无关的图像格式,使用 RGB 颜色模式和索引颜色模式,可以存贮真彩色图像、256 色彩色图像和灰度图像。图像文件包括表头数据、调色板数据和图像数据三部分,其中表头数据长度是固定的,共 54 字节。表头数据结构分为两组,其中一组为存放文件信息的 Bit Map File Header 数据结构,另一组为存放图像信息的 Bit Map Info Header 数据结构。除了真彩色图像外,还需要在表头之后增加调色板数据,调色板之后为图像数据。调色板共有 256 个单元,每一个单元 4 个字节,共 1 024 个字节。其中单元中前 3 个字节 rgbBlue、rgbGreen、rgbRed 分别存储蓝、绿、红 3 种颜色分量,第四个字节 rgbReserved 为保留字,通常设置为零值。

图像数据按矩阵形式存储,其数据含义与位图类型密切相关。其中,真彩色图像没有调色板,每一个像素直接由蓝、绿、红 3 种颜色分量表示;256 色彩色图像使用调色板,图像数据为调色板颜色索

引值,即调色板颜色序号,数据范围为0~255;灰度图像格式与256色彩色图像相似,是256色彩色图像格式的一个特例,所不同的是调色板中RGB三基色比例相等,即 $\text{rgbBlue} = \text{rgbGreen} = \text{rgbRed}$ ,并按照从小到大的顺序存放,所以灰度图像只有亮度,没有颜色,图像数据表示灰度(亮度)值。

## 4 岩石CT图像的彩色增强方法

图像增强是图像处理中的一项任务,目的是有选择性地突出图像中主要的、所感兴趣的有用信息,压制、降低次要信息或干扰。彩色增强是一种常用的图像增强方法,分为假彩色增强和伪彩色增强。将一幅彩色图像映射为另一幅彩色图像的增强方法称为假彩色增强,而将一幅灰度图像映射为一幅彩色图像的增强方式称为伪彩色增强。岩土CT图像彩色增强属于后者,即伪彩色增强。

### 4.1 基本思想

图像彩色增强旨在提高图像分辨率,而颜色类别和对比度是影响视觉分辨率的两个主要因素。如上所述,主观亮度与客观亮度之间存在对数关系(Weber-Fechner定律),通过增加对比度提高视觉分辨率是有限的,而且计算机数字图像只有256个灰度级。尽管人眼对各种彩色的分辨能力要比对黑白的分辨能力低,但是人眼对灰度微弱递变的分辨能力远比颜色变化低,所以增加颜色类别是提高人眼对图像视觉分辨率的一条有效途径,也是图像彩色增强的出发点。

### 4.2 灰度级-彩色变换

灰度级-彩色变换是图像彩色增强的常用方法之一。通过构造传递函数 $I_R(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ 和 $I_B(x, y)$ 建立RGB三基色与灰度级 $g(x, y)$ 之间的映射关系,然后再合成为伪彩色图像,从而达到彩色增强的目的。这一过程可以用图1来表示。

由于伪彩色图像的合成需要对图像数据重新编码,而灰度级-彩色变换传递函数 $I_R(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ 和 $I_B(x, y)$ 又是图像编码的依据,所以传递函数也称为图像颜色编码方法。传递函数不同,编码方法也不一样,本文采用了彩虹码和热金属码两种编码方法<sup>[12]</sup>。

### 4.3 编码方法

彩虹码传递函数为一分段线性函数,其传递函数变化曲线如图2所示。图中, $I_R$ ,  $I_G$ 和 $I_B$ 分别表示红、绿、蓝三基色的含量,Gray表示灰度级,数

据范围均为0~255。由图2可以看出,除局部为常数(0或255)外,基色传递函数 $I_R$ 、 $I_G$ 和 $I_B$ 斜率绝对值均大于1,而且在一定灰度级范围内, $I_R$ ,  $I_G$ 和 $I_B$ 不能同时为常数,以保证合成颜色有较大的变化梯度,从而提高了图像视觉分辨率。

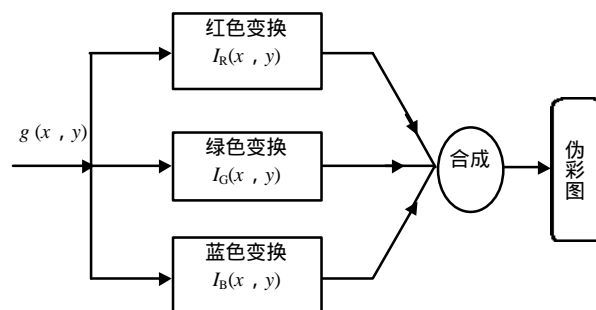


图1 灰度级-彩色变换流程图

Fig.1 Procedure of transform from gray to RGB

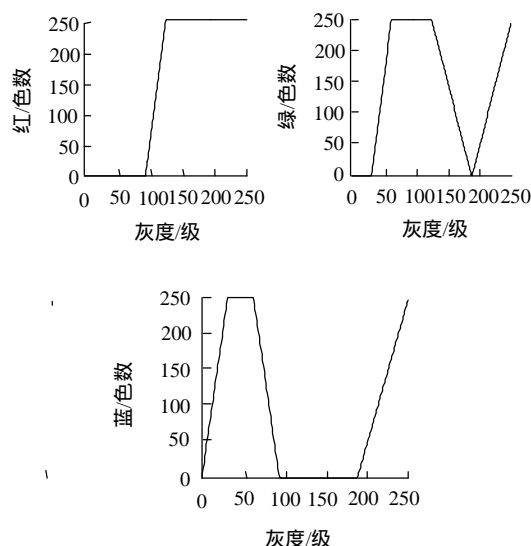


图2 灰度级-彩色变换彩虹码传递函数

Fig.2 Rainbow transfer function from gray to RGB

热金属码传递函数形式比彩虹码复杂,分段函数接近于线性变化,但有微小的波动(详见图3),即为不光滑的函数。传递函数的变化梯度比彩虹码小( $I_R$ 和 $I_G$ 尤其如此),表明其图像的视觉分辨率要比彩虹码略低。

## 5 岩土CT图像彩色增强

### 5.1 增强方法

岩土CT图像主要由反映岩土内部密度变化的CT数构成。为了表示成灰度图形式,往往将其变

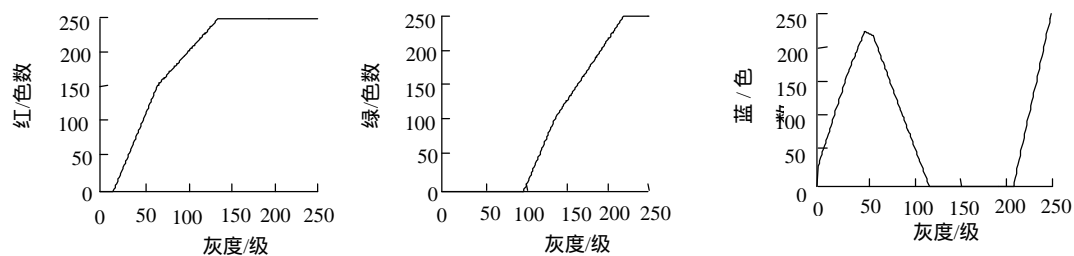


图3 灰度级-彩色变换热金属码传递函数

Fig.3 Transfer function of hot metal from gray to RGB

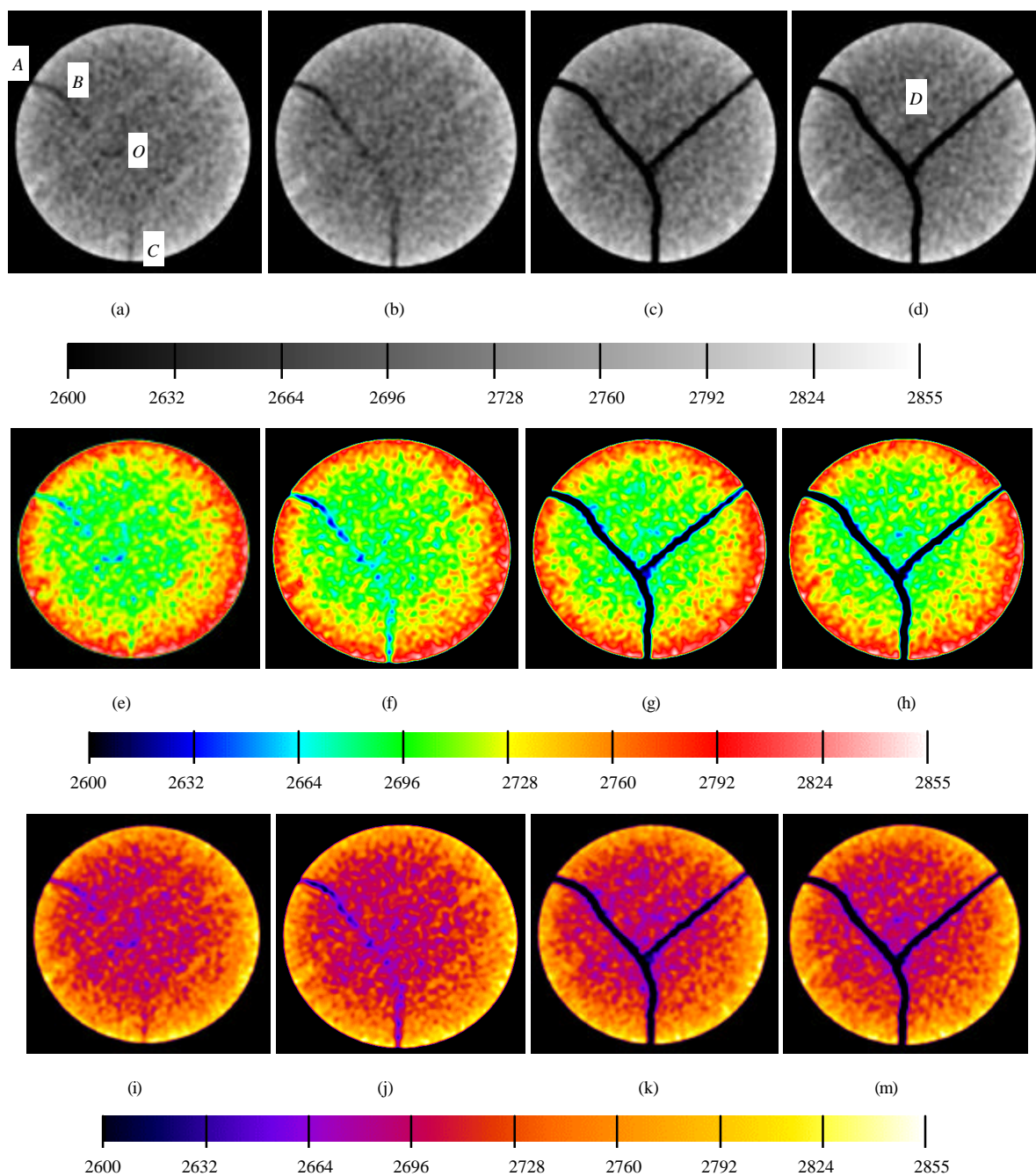


图4 岩土CT灰度图及其彩色增强图

Fig.4 Pseudo colour enhancement for geotechnical CT image

换为 0~255, 与 BMP 格式的灰度图中 256 灰度级相对应。所以 CT 图像实质上表示的是相对 CT 数(或称图像 CT 数), 而不是真实 CT 数, 真实的 CT 数需要通过图像 CT 数的转换得到。

由于 BMP 格式灰度图采用索引颜色模式, 调色板数据是固定的, 图像数据为相对 CT 数(0~255), 其值与调色板颜色相对应, 所以在进行图像彩色增强时, 只需要改变调色板数据即可, 而不必对图像数据作任何修改。从这个意义上说, 岩土 CT 图像彩色增强的过程即是重新设置调色板的过程, 调色板设置与颜色编码方法有关, 具体方法是将灰度级-彩色变换传递函数  $I_R$ ,  $I_G$  和  $I_B$  分别赋给调色板数据 rgbRed, rgbGreen 和 rgbBlue。

## 5.2 增强实例

根据上述方法, 选择了 1 组岩石 CT 灰度图像进行了伪彩色增强。图 4(a)~(d)是某一断面在单轴压力分别为 18.85, 19.93, 20.59, 31.03 MPa 作用时的 CT 图像, 实验设备为 SIEMENS-PLUS 螺旋 CT 扫描仪。样品为直径 50 mm、高度 100 mm 的砂岩试件, 峰值强度为 31.93 MPa。图 4(e)~(h)是基于彩虹编码方法的伪彩色增强后的 CT 图像, 图 4(i)~(m)是基于热金属编码方法的伪彩色增强 CT 图像。比较 3 组图像可以看出, 彩色增强 CT 图像的分辨率比灰度图显著提高。

在图 4(a)中, 裂纹 A 处的 CT 数为 2 670~2 690, B 处的 CT 数为 2 630~2 660, 两者视觉差别很小, 几乎无法直观识别。但是在彩色增强图像 4(e)中, 裂纹 A 处为绿色, 裂纹 B 处为蓝色, 差别非常显著。图 4(i)中也有类似规律。

图 4(b)是岩石变形破坏的第二阶段, 裂纹 ABOC 已经开始贯通, 但是沿着裂纹的 CT 数分布并不是一个常数, 而是表现为 ABO 段 CT 数小、OC 段 CT 数大的变化特点, 这种渐变特点在图 4(b)中辨认困难, 但这一特点在图 4(f)和图 4(j)中得到充分体现。

图 4(c)和图 4(d)差别很小, 很容易误判为同一幅 CT 图像, 但是在相应的图 4(g)和图 4(h)中, 裂纹背景差别明显: 图 4(h)中, 在两条裂纹的交叉部位 O 点上方 D 处有一个蓝色斑点, 对应 CT 数约为 2 640, 而在图 4(g)中却无这一现象。

另外, 在图 4 中还给出了颜色(或灰度)变化与 CT 数对应关系的色标图, 为半定量直观分析 CT 图

像提供了可靠的依据。

## 6 结 语

在岩土 CT 方法和手段日益多样化的今天, 尽管直观的 CT 图像分析仍然是必须的基础工作, 但是, 由于灰度图像视觉分辨率较低, 这一方法的优势未能充分发挥。为了克服这一缺陷, 对图像进行彩色增强处理是一项有意义的工作。根据增强 CT 图像以及反映颜色与 CT 数之间关系的色标图, 能够快速对 CT 图像进行半定量分析。此外, 根据不同需要, 选择合适的彩色增强方法<sup>[13]</sup>, 充分发挥这一方法优点, 将对 CT 图像的直观分析收到事半功倍的效果。

## 参 考 文 献

- 1 丁卫华, 许彦卿, 薄毅彬等. X 射线岩石 CT 的历史与现状[J]. 地震地质, 2003, 25(3): 467~467
- 2 杨更社, 谢定义, 张长庆等. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279~285
- 3 葛修润, 任建喜, 薄毅彬等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191~195
- 4 李晓军, 张登良. CT 技术在土体结构性分析中的应用初探[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 62~66
- 5 陈蕴生, 李 宁, 李爱国等. 非贯通节理介质细观损伤演化 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 702~706
- 6 Kawakata H, Cho A, Kiyama T, et al. Three-dimensional observations of faulting process in Westerly Granite under uniaxial conditions by CT X-ray scan[J]. Tectonophysics, 1999, 313(3): 293~305
- 7 Ueta K, Tani K, Kato T. Computerized X-ray topography analysis of three-dimensional fault geometries in basement-induced wrench faulting[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1/2): 197~210
- 8 Bay B K, Smith T S, Fyhrie D P, et al. Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray topography[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(2): 217~226
- 9 薄毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 49~54
- 10 赵荣椿. 数字图像处理导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995
- 11 Kenneth R. 数字图像处理[M]. Castleman, 朱学刚, 林学闯等译. 北京: 电子工业出版社, 2002
- 12 何 斌, 马天予, 王运坚等. Visual C++数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- 13 张秀娟, 孙忠林, 马万良. 医学细胞图像的伪彩色增强[J]. 山东矿业学院学报, 1999, 18(3): 62~64