

Advanced Geological Detection for Tunneling Based on Comparative Analysis of Histogram

Ti Zhao

Beijing Gonglian Road Tie-line Co., LTD., Beijing
Email: 55143279@qq.com

Received: Mar. 17th, 2020; accepted: Apr. 14th, 2020; published: Apr. 21st, 2020

Abstract

Based on the construction of several tunnels in Guizhou Province, the relation between image features of TRT advanced geological prediction and physical truth discovered by excavation was analyzed comparatively, and the TRT image features of several typical adverse geologic phenomena, such as karst cavern, fracture zone, fault, were summarized. According to the features of TRT images, the color histogram contrast method was used to assist the judgment of adverse geologic phenomena from TRT images in the paper. The pick-up and analysis program of color histogram of TRT images was developed based on OpenCV Program. Furthermore, the matching methods between unknown TRT images and the typical TRT images were put forward, and the calculation program was developed to obtain the matching degree which can be used to determine the adverse geologic phenomena reflected by the unknown images. The application of the color histogram contrast method will promote the quantification and automation of advanced geological prediction, and there was a good achievement in the actual application.

Keywords

Tunnel, Advanced Geological Prediction, Color Histogram, Matching Degree

基于直方图对比分析的隧道超前地质预报判译方法

赵 体

北京市公联公路联络线有限责任公司, 北京
Email: 55143279@qq.com

收稿日期：2020年3月17日；录用日期：2020年4月14日；发布日期：2020年4月21日

摘要

本文依托贵州的多条隧道工程，通过跟踪施工开挖进度，对比分析施工揭露实际情况与TRT超前地质预报图像特征的关系，总结出了溶洞、破碎带、断层等岩溶地区典型不良地质现象所对应的TRT预报图像特征。根据TRT预报图像的特点，提出采用颜色直方图对比法可以较好地辅助TRT图像的判别，以溶洞和破碎带两种不良地质现象为例，基于OpenCV编制了TRT图像的颜色直方图提取与分析程序；基于TRT预报特征图像库，提出了未知图像与特征图像的匹配方法，编制了多种匹配方法的计算程序，给出了定量化的匹配度来辅助判断TRT图像反应的不良地质现象。基于直方图对比分析技术的隧道超前地质预报判译方法推动了地质预报向量化、自动化的发展，并且在实际工程应用中获得较好的效果。

关键词

隧道，超前地质预报，颜色直方图，匹配度

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于地质环境的复杂性，隧道在开挖过程中经常会遇到与设计不符的不良地质现象，从而造成突水、突泥、垮塌等事故[1]，对隧道内施工相关人员生命财产安全造成巨大威胁，因此在隧道施工过程中，开展超前地质预报，为施工人员提供掌子面前方的准确地质情况，指导其安全施工就显得尤为重要。

自从1972年8月在芝加哥召开快速掘进与隧道工程会议以来，超前地质预报工作就一直受到各国的重视，我国也于上世纪90年代初开始了相关研究。超前导洞、超前钻探方法最先被用来勘探掌子面前方的地质情况，随后地球物理超前探测技术，包括地震发射类、电磁类、直流电法类等，也大量应用于工程实践[2]。

李术才等提出了一种多同性源阵列观测模式，兼顾了三极测深探距大和聚焦观测抗干扰能力强的优势，在钻爆法施工隧道得到成功验证[3]。张向东等采用反射共偏移法对某煤矿回风大巷断层情况进行了预报[4]。姚海波等基于Google-earth全方位、多角度的地貌影像数据，识别区域构造次级构造，并建立了隧址区构造格架体系[5]。高峰等建立基于TRT技术的井下超前预报基本程序，运用TRT6000系统，开展井下地质超前探测和预报[6]。刘新荣等以地质雷达为超前预报的主要手段，结合TGP206地震反射波法和工程地质调查法，针对某特长隧道开展综合超前地质预报[7]。刘斌等人针对TBM施工过程遇到的问题，提出了一套以地球物理超前地质预报和基于“岩-机关系”预测岩体主要参数的解决方法，并为TBM掘进方案决策提供依据[8]。李术才等提出跨孔电阻率CT方法用于地铁超前预报[9]。邱道宏等提出了基于数字钻进技术和量子遗传-径向基函数神经网络的围岩类别超前分类方法[10]。谭信荣等根据隧道工程所处的地质环境，利用地质模型判断未开挖岩层中的岩溶发育类型、规模等情况[11]。曹国侯等基于弹性波三维空间传播理论，应用地震波共反射面元叠加“偏移成像”和“相控阵”等技术，对掌子面前方地质情况和不良地质体高精度准确定位[12]。李术才等通过分析突水风险孕险环境与致险因子，结合施

工工程动态信息,提出并成功实施一种基于隧道施工风险评估的超前地质预报体系[13]。王传武等将地面三维电阻率观测模式引入到隧道超前预报中,提出了基于三维电阻率的隧道超前探测新型观测模式[14]。李术才等通过三维数值试验和模型试验研究,提出隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法[15]。

现有的各种隧道超前地质预报技术都存在各自限制,因此开展综合超前地质预报已成为业界共识,如:舒森等在综合地质预报中引入三维数据处理技术以获取岩溶异常三维信息,根据三维信息制定专项钻探动态设计方案[16]。周轮等提出采用宏观地质分析法、TSP地震波法、地质雷达法、掌子面围岩预判以及超前钻探相结合的方法进行综合超前地质预报,提高对不良地质体预报的准确率[17]。江杰等提出洞外采用高密度电法,洞内采用掌子面素描和地质雷达对地铁施工进行超前地质预报[18]。姚林林等以西藏某公路隧道为例介绍了以“前期地质工作是基础,物探工作是手段,地质分析是主线”为思路的地质预报综合技术[19]。任涛等在总结地震区隧道灾害特征及成因的基础上,采用短距离地质分析与长距离物探监测相结合的方法进行超前地质预报工作[20]。与此同时,还有学者在对超前地质预报探测成果解译方面进行了研究,如:陈礼彪等建立地震波反射法(TGP)成果中的反射幅度比、波轴相似度等参数对异常地质体的地震动态响应特征[21]。李宝奇等针对隧道地质超前预报过程中探地雷达线测图解释仅依靠专家经验且存在准确率不高的问题,提出一种改进的基于压缩感知和深度置信网络的线测图分类解释模型[22]。吴回获等对影响 TSP 超前地质预报准确性的相关问题进行了深入研究,提出了相应措施,有效地提高了超前地质预报的准确性[23]。

虽然经过长期的科学研究和现场实践,超前地质预报技术得到长足的发展,但是目前仍存在预报精度不高的问题;尤其是在复杂地质条件下,预报结果可靠性不高,究其原因就是在复杂地质条件下,影响地震波(或电磁波)反射信息的因素太多;相同的不良地质现象在不同的地质条件和地质环境下其反射信息不同,因而生成的预报结果图像亦差别较大,因此对预报结果的判译往往要依靠预报工作人员的经验。本文依托贵州的多条隧道工程,采用 TRT 地震波反射法进行超前地质预报;通过分析 TRT 探测结果的图像特征,选取了 HSV 颜色直方图对比法来对 TRT 图像进行计算机图像识别,通过输出匹配度的方式对贵州岩溶地区隧道中的溶洞和破碎带两种不良地质现象加以区分,实现程序自动识别;将该套 TRT 图像识别方法用于多条隧道工程,实际检验效果良好。

2. 常见不良地质现象 TRT 特征图像

TRT 超前地质预报技术引进国内已有 10 余年,并在大量隧道工程中进行了应用,不少学者总结了不同不良地质现象的特征图像,但是如前文所述,不同地区与不同地质条件下,相同不良地质现象的特征图像往往亦存在较大差异,因此欲提高超前地质预报的精度,进一步确定工程区域各种不良地质现象的特征图像是必不可少的工作。本文通过跟踪贵州中部地区两条铁路隧道的施工开挖进度,实地对比分析施工揭露的不良地质现象与 TRT 图像特征的关系,建立了溶洞、破碎带、断层等典型不良地质现象所对应的 TRT 特征图像库,总结了这些不良地质现象的基本图像特征,为后续超前地质预报计算机自动判译提供依据。

2.1. 破碎带

渝黔铁路(重庆至贵阳铁路)高寨坝隧道进口在开挖到 D2K320 + 270 段时揭露了大型破碎带,掌子面出露大范围破碎的强风化灰岩,如图 1 所示,其对应的 TRT 图像如图 2 中红框范围所示,图中自上至下分别为俯视图、侧视图和立体图。

从图 2 可以看出,破碎带图像特征为:黄色区域和蓝色区域成斑点状离散分布,不同颜色无明显连通,彼此间颜色差异较明显,边界不清晰。

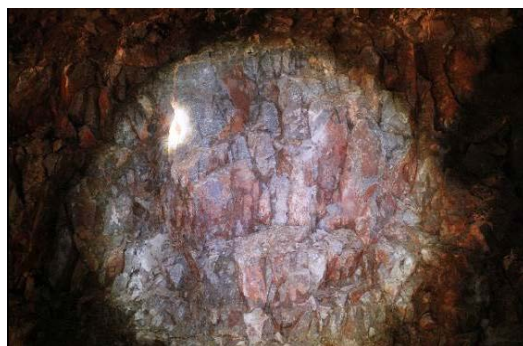
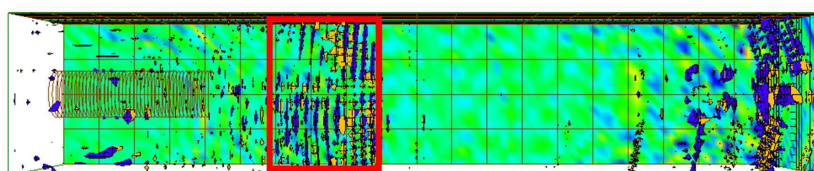
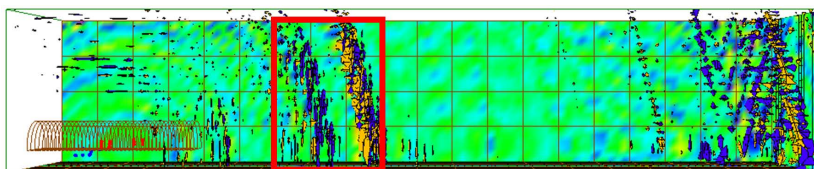


Figure 1. The fracture zone located at Section DK320 + 270 of Gaozhaiba Tunnel

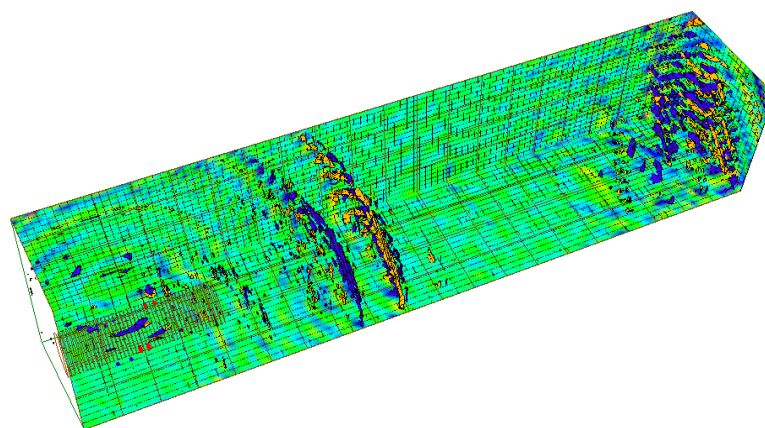
图 1. 高寨坝隧道 DK320 + 270 所揭露破碎带



(a) 俯视图



(b) 侧视图



(c) 立体图

Figure 2. The TRT figures of Gaozhaiba Tunnel when working face located at Section DK320 + 250

图 2. 高寨坝隧道 TRT 成像图(掌子面里程 DK320 + 250)

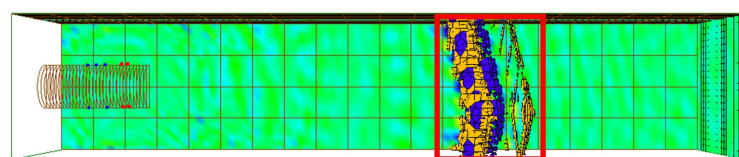
2.2. 溶洞

渝黔铁路蔡家关隧道进口在开挖至 DK308 + 120 附近时遇到了大型充填型溶洞, 如图 3 所示, 溶洞被流塑状饱水黏土所填充, 其对应的 TRT 图像如图 4 中红框范围所示。

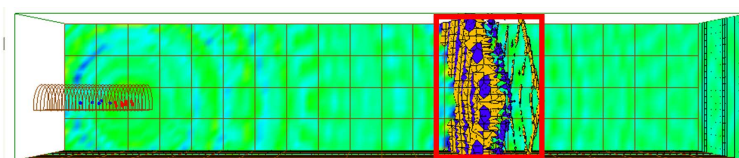


Figure 3. The Karst cavern located at Section DK308 + 120 of Caijiaguan Tunnel

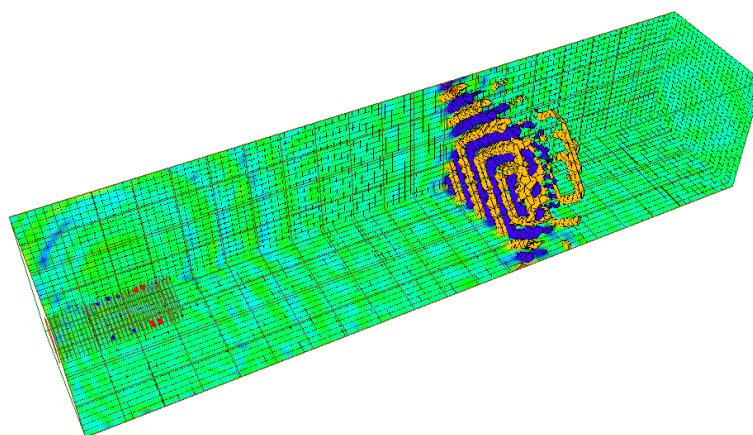
图 3. 蔡家关隧道 DK308 + 120 所揭露的溶洞



(a) 俯视图



(b) 侧视图



(c) 立体图

Figure 4. The TRT figures of Caijiaguan Tunnel when working face located at Section DK308 + 005

图 4. 蔡家关隧道 TRT 成像图(掌子面里程 DK308 + 005)

从图 4 可以看出，溶洞的图像特征为：成片状分布的蓝色区域相互连通，整体呈现立体分布，与周围岩体波速差异明显；当溶洞未充填或被水充填时，蓝色波速区域成连通的立体分布且与周围介质具有明显边界；当溶洞被土体或石块充填时，代表溶洞的蓝色区域内夹杂有黄色斑点或小范围块状分布。

2.3. 断层

织纳铁路(贵州织金至纳雍铁路)小田坝隧道出口在开挖至 DK37 + 375 段时揭露了一张性断层，断层面之间被大量粘土填充，如图 5 所示，其对应的 TRT 图像如图 6 所示。

从图 6 可以看出，断层的图像特征为：成片状分布的黄色或蓝色区发生明显的错动，隧道中线前方的异常区存在明显的空隙，断裂面两侧的岩性有明显的差异。

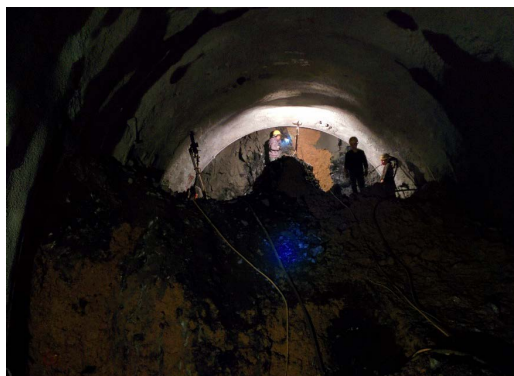
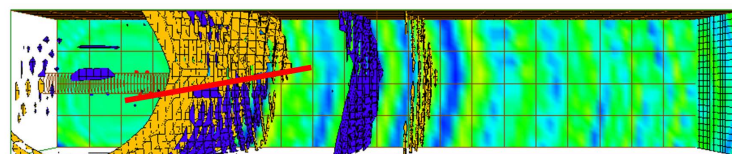
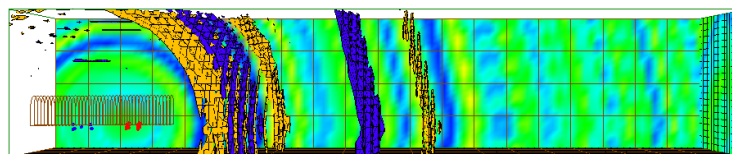


Figure 5. The fault located at Section DK37 + 375 of Xiaotianba Tunnel

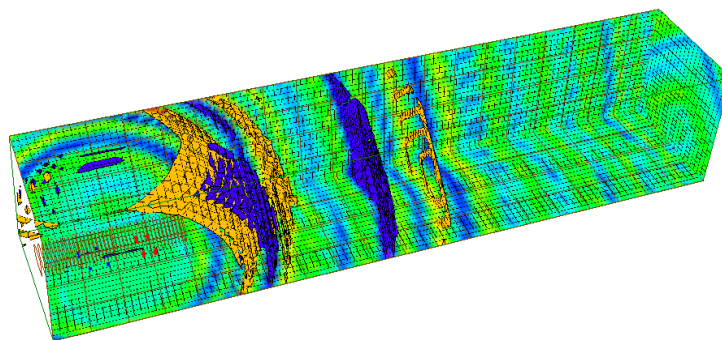
图 5. 小田坝隧道于 DK37 + 375 所遇断层



(a) 俯视图



(b) 侧视图



(c) 立体图

Figure 6. The TRT figures of Xiaotianba Tunnel when working face located at Section DK37 + 385

图 6. 小田坝隧道 TRT 成像图(掌子面里程 DK37 + 385)

3. 颜色直方图对比法

3.1. TRT 图像特征分析

图像识别的前提条件是对图像的特征提取,选择合适的特征非常重要,其会影响到图像识别程序的设计、性能以及最终识别结果的可靠性和准确性。一般情况下描述图像特征可以用点、线、面来描述,基于特征的匹配所处理的图像一般包含的特征有颜色特征、纹理特征、形状特征、空间位置特征等。在与地质工程相关的工程及测绘领域所识别的图像大多都是同一区域不同时间段的图像,如针对遥感图像的滑坡检测、隧道衬砌裂隙识别、边坡变形监测等,这些图像的一个重要特征就是重叠部分多,特征点及特征区域明显,识别起来可行性高。

TRT 图像一大特点是杂乱——没有明显的线条特征,没有能作为基准的兴趣点,而典型的图像识别技术都是基于特征点的识别,如人脸识别、指纹识别等。然而,对 TRT 图像的识别归根结底是对不良地质现象的识别,而不是对物体本身的识别。不良地质现象不具备稳定的视觉特征,以溶洞为例,溶洞的形态千奇百怪,有管型的、漏斗形的、纺锤形的、硐室形的,发育的方向也是难以捉摸,无法用形状特征予以描述,更不用说纹理以及高层语义特征。因此难以使用传统的基于特征点的图像识别方法对其进行识别。

但是,TRT 图像中的不良地质现象也有其显著的特征——颜色,蓝色区域代表着低波速区,也就是破碎的、强度较低的区域;黄色区域代表着高波速区,也就是致密的强度较高的区域。同时,颜色也是地质类相关专业的最重要的视觉指标之一,如对岩石的确认,颜色都是作为一个非常重要的标志。因此,本文利用基于颜色的图像识别技术——颜色直方图对比法对 TRT 图像特征进行分析。

3.2. 颜色直方图对比法

颜色直方图是在图像检索领域中采用最为广泛的颜色特征,它描述了一张图像中关于颜色的数量特征,可以反映图像的颜色统计分布,表示了每个颜色范围内像素数的个数(通常会进行归一化以保证适应尺度的变化),但丢失了像素的空间信息,因此无法描述图像中的对象及物体。以最简单的灰度直方图为例,其可以定义为:

$$H(k) = \frac{n_k}{N}, k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (1)$$

其中, N 为图像的总像素数, L 为颜色直方图的颜色级数,对于灰度直方图来说就是灰度级数,表示把 0~255 的灰度值分割的区间数(bin), n_k 为第 k 级颜色区间包含的图像像素数。对于其他如 RGB、HSV 颜色直方图来说,原理与上式一致,只不过通道数或者特征空间数更多。

根据上述我们可以得知,颜色直方图可以理解为一个图像信息的集合,可以利用计算集合间的距离来判断两张图片的相似度。颜色分布直方图所描述的是不同色彩在整幅图像中所占的比例,而并不关心每种色彩所处的空间位置。在 TRT 图像识别中,这个问题可以由手动截取感兴趣的不良现象区来解决,可以使用一个模板可以对选定的不同尺寸的 TRT 图像进行匹配识别。

3.3. 代码实现

TRT 图像识别基于开源代码 OpenCV3 (Open Source Computer Vision Library)的算法,对其实例进行了一定程度的修改以应对对 TRT 图像进行识别的需求,程序基于 WIN7 64 位旗舰版、Microsoft Visual Studio 2010 和 OpenCV3,通过 C++编写[24]。

本文以破碎带和溶洞两种不良地质现象的 TRT 图像识别为例,程序主要采用图像匹配的方法针对

TRT 俯视图进行识别，将测试图像与模板图像进行匹配，根据匹配度判断测试图像所代表的不良地质现象类型。图 7 是上述经过现场验证的典型溶洞和破碎带特征图像，从左至右分别为溶洞图像 1、溶洞图像 2、破碎带图像 3、破碎带图像 4。

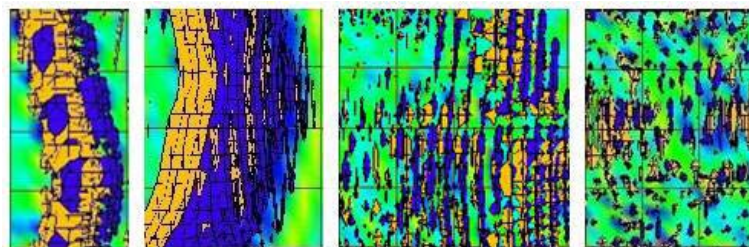


Figure 7. Template images of TRT

图 7. TRT 模板图像

在进行 TRT 图像直方图对比之前，我们需要手动选取待测的异常图像区，选取时对尺寸没有要求，但边界部分选取时不能有过多的非异常区(底色)存在，如图 8 所示。图 8 是渝黔铁路中寨隧道某次 TRT 检测结果图中待确定不良地质现象类型的局部裁剪图。

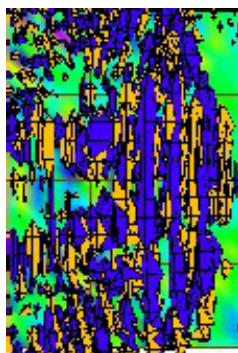


Figure 8. The local portion of a TRT image

图 8. 裁剪的某张 TRT 图像局部

3.4. 图像对比匹配步骤

TRT 图像直方图对比代码实现主要包括读取图片、色彩空间转换、HSV 直方图计算、直方图对比四个步骤。

1) 读取图片：配置好 OpenCV 后，图像读取非常便利，可以直接使用“imread”读取图片，可以直接把待检测图像放入相应的工程目录下，也可以直接引用图片的储存地址；

2) 色彩空间转换：对于 TRT 图像来说，颜色特征并没有自然界场景那么复杂，但由于较为成熟有效的直方图匹配技术都是基于 HSV 色彩空间的，所以进行直方图对比前要先进行色彩空间的转化，需要注意的是 OpenCV 读取彩色图像时的通道顺序为蓝绿红(BGR)，而不是我们一般讲的红绿蓝(RGB)；

3) HSV 直方图计算：OpenCV 中可以使用 calcHist() 函数来计算直方图，在使用之前需要初始化直方图实参，选择合适的 bin 数及取值范围。bin 可以翻译为组距，代表着每个特征空间子区段的数目，其数值为从数据中计算出的特征统计量。选择合适数目的 bin 可以降低直方图维数，提高识别及匹配的效率；

4) 直方图对比：OpenCV 中可以使用 compareHist() 函数进行直方图对比，此函数的返回值为 $d(H_1, H_2)$ ，即两张直方图的距离。

3.5. 对比分析

在 OpenCV 中比较两个直方图的相似程度有 4 种不同的距离标准[25]:

1) 相关

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_I (H_1(I) - \overline{H_1})(H_2(I) - \overline{H_2})}{\sqrt{\sum_I (H_1(I) - \overline{H_1})^2 \sum_I (H_2(I) - \overline{H_2})^2}} \quad (2)$$

其中:

$$\overline{H_k} = \frac{1}{N} \sum_J H_k(J) \quad (3)$$

N 为第三步设置的 bin 数。

2) 卡方

$$d(H_1, H_2) = \sum \frac{[H_1(I) - H_2(I)]^2}{H_1(I)} \quad (4)$$

3) 直方图相交

$$d(H_1, H_2) = \sum_I \min[H_1(I), H_2(I)] \quad (5)$$

4) Bhattacharyya 距离(巴氏距离)

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{H_1 H_2 N^2}} \sum_I \sqrt{H_1(I) H_2(I)}} \quad (6)$$

按照第 3.4 节中的图像对比匹配步骤, 采用上述 4 种对比方法, 将图 8 依次与图 7 中的 4 张标准图进行对比分析, 计算得到它们的匹配度, 如表 1 所示。

Table 1. Matching degree between Figure 8 and Figure 7

表 1. 图 8 与图 7 的匹配度

对比方法 \ 对比图像	溶洞图像 1	溶洞图像 2	破碎带图像 3	破碎带图像 4
相关法 1)	0.87	0.85	0.55	0.51
卡方法 2)	19.62	29.39	81.93	88.06
直方图相交法 3)	24.75	26.20	28.84	27.89
巴氏距离法 4)	0.35	0.39	0.38	0.40

对于相关法和直方图相交法, 匹配数值越高说明匹配度越高; 对于卡方法和巴氏距离法, 匹配数值越低匹配度越高。从表 1 可知, 根据相关法和卡方法, 图 8 与图 7 中溶洞图像 1、2 匹配度较高; 而直方图相交法和巴氏距离法显示图 8 与图 7 中的 4 张图匹配度相当。

实际上在计算机图像学中, 4 种对比方法孰优孰劣并没有定论, 为保证对比分析的稳定性和可靠性, 可以通过对 4 种方法计算得到的匹配度进行加权平均来得出一个较为稳妥的匹配度。计算公式如式(7)所示, 由于 4 种方法计算得到的匹配度值量值范围不一致, 因此在对其进行加权平均前需要对它们进行均一化处理, 如式(8)、式(9)所示:

$$\overline{D}_i = \frac{\sum_{j=1}^4 D_{ij}}{4} \quad (i=1 \sim 4, j=1 \sim 4) \quad (7)$$

式中, \overline{D}_i 为图 7 与图 6 中第 i 个图像的加权平均匹配度; D_{ij} 为图 7 与图 6 中第 i 个图像采用第 j 种方法计算得到的均一化匹配度。

$$D_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^4 d_{ij}} \quad (i=1 \sim 4, j=1, 3) \quad (8)$$

$$D_{ij} = \frac{\frac{1}{d_{ij}}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_{ij}}} \quad (i=1 \sim 4, j=2, 4) \quad (9)$$

式中, d_{ij} 为图 8 与图 7 中第 i 个图像采用第 j 种方法计算得到的匹配度。

令:

$$D_K = D_1 + D_2 \quad (10)$$

$$D_F = D_3 + D_4 \quad (11)$$

可以得到图 8 与溶洞的匹配度(D_K)和破碎带的匹配度(D_F)。

根据上述计算过程, 可以得到图 8 与溶洞(D_K)和破碎带(D_F)的匹配度分别为 0.6 和 0.4, 说明图 8 反应的不良地质现象为溶洞。经现场揭露, 该位置确实为一溶蚀带, 发育多处小型溶穴、溶槽, 个别溶穴直径达到 1 m。

4. 工程应用

4.1. 渝黔铁路中寨隧道

渝黔铁路中寨隧道进口施工到 DK304 + 127 处进行了一次 TRT 超前地质预报, 得到预报的俯视图如图 9 所示, 对图中红框范围内的图像进行颜色直方图对比分析, 得到其与溶洞和破碎带的匹配度分别为 0.64 和 0.36, 判断该位置有溶洞发育; 经实际施工揭露, 该处为大型充填型溶洞(如图 10 所示), 与程序判断结果吻合。

4.2. 织纳铁路小田坝隧道

织纳铁路小田坝隧道进口施工到 DK34 + 401 处进行了一次 TRT 超前地质预报, 得到预报的俯视图如图 11 所示, 对图中红框范围内的图像进行颜色直方图对比分析, 得到其与溶洞和破碎带的匹配度分别为 0.68 和 0.32, 判断该位置有溶洞发育; 经实际施工揭露, 该处为大型充填型溶洞(如图 12 所示), 与程序判断结果吻合。

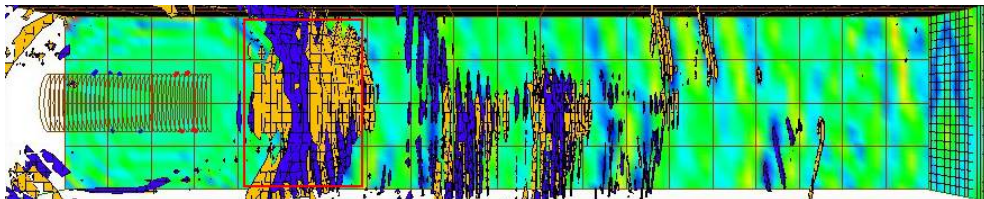


Figure 9. Planform of advanced geological prediction in Zhongzhai Tunnel
图 9. 中寨隧道超前地质预报俯视图



Figure 10. The picture of surrounding rock masses in Zhongzhai Tunnel
图 10. 中寨隧道施工揭露围岩照片

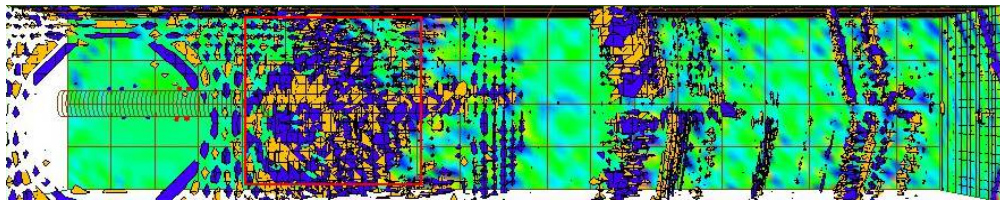


Figure 11. Planform of advanced geological prediction in Xiaotianba Tunnel
图 11. 小田坝隧道超前地质预报俯视图



Figure 12. The picture of surrounding rock masses in Xiaotianba Tunnel
图 12. 小田坝施工揭露围岩照片

4.3. 渝黔铁路修文隧道

渝黔铁路修文隧道进口施工到 DK314 + 210 处进行了一次 TRT 超前地质预报, 得到预报的俯视图如图 13 所示, 对图中红框范围内的图像进行颜色直方图对比分析, 得到其与溶洞和破碎带的匹配度分别为 0.48 和 0.52, 两种不良地质现象的匹配度相当, 根据计算结果应偏向于破碎带; 经实际施工揭露, 该处为溶蚀破碎带, 存在多条小型溶沟、溶槽, 沟槽内充泥, 岩体破碎(图 14)。

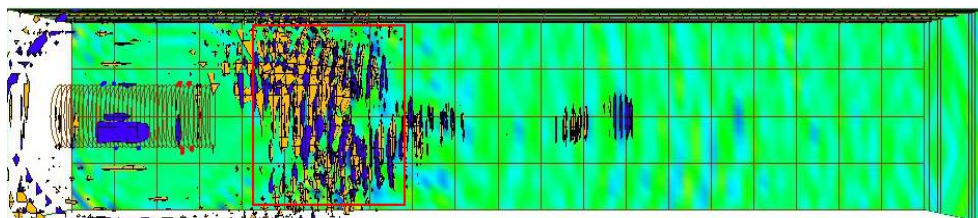


Figure 13. Planform of advanced geological prediction in Xiuwen Tunnel

图 13. 修文隧道超前地质预报俯视图



Figure 14. The picture of surrounding rock masses in Xiuwen Tunnel

图 14. 修文施工揭露围岩照片

5. 结论

本文依托贵州的多条隧道工程, 采用 TRT 超前地质预报方法对隧道掌子面前方围岩进行探测, 并利用基于颜色的图像识别技术——颜色直方图对比法对 TRT 图像特征进行分析, 得到如下主要结论:

- 1) 通过跟踪施工开挖进度, 实地对比分析施工揭露结果与 TRT 预报图像特征的关系, 总结了溶洞、破碎带、断层等典型不良地质现象所对应的 TRT 预报图像特征;
- 2) 基于 TRT 预报图像的特点, 提出采用颜色直方图对比法可以较好地辅助 TRT 图像的判别, 以溶洞和破碎带两种不良地质现象为例, 基于 OpenCV 编制了 TRT 图像的颜色直方图提取与分析程序;
- 3) 基于 TRT 预报特征图像库, 提出了未知图像与特征图像的匹配方法, 编制了多种匹配方法的计算程序, 给出了量化的匹配度来辅助判断 TRT 图像反应的不良地质现象。

基于直方图对比分析技术的隧道超前地质预报方法推动了地质预报向量化、自动化的发展, 并且在实际工程应用中获得较好的效果。

参考文献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [2] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [3] 李术才, 聂利超, 刘斌, 等. 多同性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1434-1446.
- [4] 张向东, 蔡赫男, 李军. 红庆梁煤矿巷道断层带的超前地质预报[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 377-380.
- [5] 姚海波, 苏河修, 梁文广, 等. 基于 Google-Earth 的地质分析技术在南方某隧道工程地质灾害探测中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(s2): 167-174.
- [6] 高峰, 周科平, 周炳仁, 等. 基于 TRT 技术的矿山井下地质超前预报[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(4): 80-85.
- [7] 刘新荣, 刘永权, 杨忠平, 等. 基于地质雷达的隧道综合超前预报技术[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(s2): 51-56.
- [8] 刘斌, 李术才, 李建斌, 等. TBM 掘进前方不良地质与岩体参数的综合获取方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(6): 105-112.
- [9] 李术才, 苏茂鑫, 薛翊国, 等. 城市地铁跨孔电阻率 CT 超前地质预报方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 913-920.
- [10] 邱道宏, 李术才, 薛翊国, 等. 基于数字钻进技术和量子遗传 - 径向基函数神经网络的围岩类别超前识别技术研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2013-2018.
- [11] 谭信荣, 陈寿根, 王磊, 等. 基于岩溶发育地质模型的隧道地质预测[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1641-1647.
- [12] 曹国侯, 王运生, 李耀华, 等. 三维成像系统在地下工程地质灾害预报中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(s1): 1735-1739.
- [13] 李术才, 石少帅, 李利平, 等. 三峡库区典型岩溶隧道突涌水灾害防治与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1887-1896.
- [14] 王传武, 李术才, 聂利超, 等. 隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测反演与优化方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 218-227.
- [15] 李术才, 孙怀凤, 李貅, 等. 隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1309-1318.
- [16] 舒森, 胡金星. 隧道岩溶空间探测[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1350-1363.
- [17] 周轮, 李术才, 许振浩, 等. 隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(2): 55-62.
- [18] 江杰, 黄厚, 钟一和, 等. 岩溶地区地铁一种综合超前地质预报方法[J]. 工程勘察, 2017, 45(6): 69-73.
- [19] 姚林林, 张世殊, 崔中涛, 等. 双护盾 TBM 施工综合超前地质预报技术探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1549-1556.
- [20] 任涛, 魏清华, 姜德义, 等. 提高地震区隧道超前地质预报准确性的措施[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 819-824.
- [21] 陈礼彪, 刘泉声, 张国华, 等. 非可溶岩隧道突涌灾害预测研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 786-796.
- [22] 李宝奇, 贺昱曜, 郭元术, 等. 基于 DBN 的隧道地质超前预报自动解释算法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 90-96.
- [23] 吴回获, 侯小军, 曹小军. 提高 TSP 超前地质预报准确性的研究与对策[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 484-488.
- [24] 江帆. 基于直方图对比 TRT 图像识别技术的隧道超前地质预报综合判别方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [25] 毛星云, 冷雪飞. OpenCV 编程入门[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.