

# 基于空间拓扑和形态相似关系的长裂缝拼接算法

薛丹, 苑玮琦

(沈阳工业大学视觉检测技术研究所, 辽宁沈阳 110870)

**摘要:** 针对公路隧道采集的衬砌裂缝图像存在重叠和间隙两种现象,不能保证裂缝首尾相连而直接拼接的问题,本文提出一种基于空间拓扑和形态相似关系的长裂缝拼接算法. 首先将空间拓扑关系与图像点特征相结合,提出一种基于 RCC 的长裂缝连接性特征点识别算法,自动识别相邻图像中的裂缝是否同属于一条长裂缝以及存在重叠还是间隙现象;然后,采用基于余弦相似性度量的裂缝配准算法完成重叠区域的配准拼接,采用几何标定法补足间隙裂缝后首尾相连完成拼接. 该算法在工程应用中得以验证,能够在图库中自动完成长裂缝的拼接. 实验结果表明,在拼接精度和速度方面的综合性价比优于特征拼接算法和几何拼接算法. 另外,该算法给多幅图像中存在连续性线条时,如何进行拼接提供了一种新思路.

**关键词:** 公路隧道; 裂缝; 区域连接演算; 拼接; 余弦相似性

**中图分类号:** TP751      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)04-0672-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.12263/DZXB.20200319

## A Long Crack Splicing Algorithm Based on Spatial Topology and Morphological Similarity Relationship

XUE Dan, YUAN Wei-qi

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

**Abstract:** In view of the fact that the lining crack images collected from highway tunnels have overlaps and gaps, which cannot guarantee that the cracks are connected end to end and directly splicing, this paper proposes a long crack splicing algorithm based on spatial topology and morphological similarity. First, the spatial topological relationship is combined with the image point features, and a long crack connectivity feature point recognition algorithm based on RCC is proposed to automatically identify whether the cracks in adjacent images belong to the same long crack and whether there is overlap or gap; then, a crack registration algorithm based on the cosine similarity measure is used to complete the registration and splicing of the overlapping area, and the geometric calibration method is used to fill the gap and the cracks are connected end to end to complete the splicing. The algorithm has been verified in engineering applications and can automatically complete the splicing of long cracks in the gallery. The experimental results show that the integrated cost performance is superior to the feature stitching algorithm and geometric stitching algorithm in terms of precision and speed. In addition, the algorithm provides a new idea on how to splice continuous lines in multiple images.

**Key words:** highway tunnel; crack; RCC; splicing; cosine similarity

### 1 引言

用视觉法检测隧道衬砌裂缝时,由于裂缝的长度约在 1m ~ 10m<sup>[1]</sup>,受相机视场的限制,无法在一幅图像中拍摄到裂缝的全貌,因此需要对采集的多幅图像裂缝拼接. 为避免漏拼,采集装置设计时保证相邻图像有一定重叠,但由于采集车的车速以及与衬砌的距离无

法保持恒定,则重叠率不固定,甚至有时没有重叠,而有一定间隙. 因此为了保证拼接长裂缝的精度,需在拍摄的图库中自动识别两种情况并采用不同的拼接策略.

针对隧道衬砌图像拼接的相关文章<sup>[2-4]</sup>主要包括特征检测、几何标定以及两者相结合的方法. 文献[5~7]采用点特征提取算法,主要包括 Harris、SIFT、SURF、FAST 等,先提取图像的特征点,再拼接图像. 文献[8~

13]采用了线特征提取算法,先在单幅图像中提取出裂缝的线特征,再进行拼接.文献[14]采用几何标定法,利用被检测隧道和已标定好的检测系统之间的几何关系,计算相邻图像重合区域后进行拼接.文献[15,16]给出了几何标定和特征检测相结合的方法进行拼接.对于没有找到匹配特征的图像,用几何标定法;能找到特征匹配的图像,采用改进的 SIFT 算法检测特征后进行拼接.

特征检测法,无论是点特征还是线特征都没有考虑空间位置分布关系,使得大量特征点都参与配准,计算量较大.几何标定法采用相机标定参数拼接,但公路隧道采集的图像重叠率的变化易导致拼接错位.即使将特征检测和几何标定法相结合,也会因图像中的灯箱,绳子等的存在,导致特征点提取和配准的数量较多,拼接时耗费大量时间.

对此,本文提出一种基于空间拓扑和形态相似关系的长裂缝拼接算法.首先提出一种基于 RCC 的长裂缝连接性特征点识别算法,将空间拓扑关系与图像的点特征相结合,并构造属于同一条裂缝的概率模型,从而自动识别相邻两幅图像中的裂缝是否同属于一条长裂缝以及重叠还是间隙情况;然后,提出一种基于余弦相似性度量的重复裂缝匹配识别算法,对前幅图像中的裂缝采用曲线多边形逼近法提取多处拐点,并分别与裂缝终点之间的连线构成夹角,计算相邻两段的角度差值,同时与后幅图像取相同长度分段,并计算的相邻角度差值比对,当余弦相似度最大时对应的即为重叠区域.由于裂缝的拐点能够反映裂缝的趋势,且拐点数量远小于裂缝像素数,使得配准速度大大提高.另外,用几何标定法对间隙补足后拼接.

## 2 裂缝的重叠、间隙现象

公路隧道衬砌图像采集系统由拍摄架、车轮编码器和面阵 CCD 相机组成.拍摄架平面垂直于行车方向,上面放置相机,车轮编码器安装在后左车轮上,经过分频器,能够在车轮转动时发出多次触发信号,触发相机拍摄.为方便图像拼接,需要保证采集到的相邻两幅图像有一定的重叠率.

不同于铁路隧道,公路隧道内没有固定轨道,导致

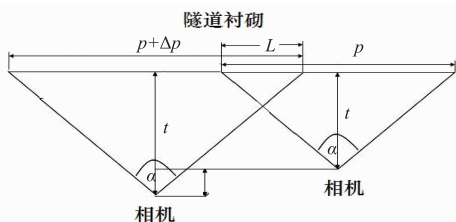


图1 公路隧道衬砌检测车采集图像示意图

拍摄时无法保证与隧道衬砌恒定距离,图1所示,在相机视角  $\alpha$  不变的情况下,  $t \rightarrow t + \Delta t$  时  $p \rightarrow p + \Delta p$ ,即相邻图像重叠率不恒定.另外,车速不稳时,还会导致没有重叠出现间隙的现象,如图2所示.

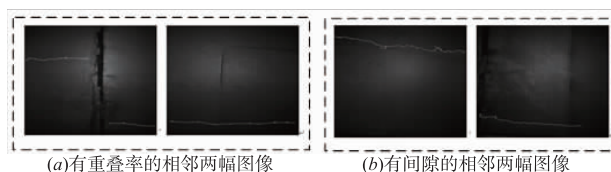


图2 相邻两幅图像的重叠、间隙现象

那么要在图库中,自动识别有重叠的图像并去除重叠部分后拼接,还是有间隙部分需补充间隙后拼接就是本文要研究的内容,主要包括基于 RCC 的长裂缝连接性特征点和基于余弦相似性度量的裂缝配准两部分内容,从而完成多幅图像长裂缝的拼接.

## 3 基于 RCC 的长裂缝连接性特征点识别算法

区域连接演算 (Region Connection Calculus, RCC)<sup>[17]</sup>最早由 Randell 等人于 1992 年基于 Clarke 利用二元连接关系公理化分体拓扑学的工作提出,迄今建立了一系列拓扑、方位、距离等空间关系的形式化模型.其基本原理是用  $C(x, y)$  表达空间区域  $x$  和  $y$  的连接关系,满足如下反映连接和传递性的两条基本公理:

$$\forall x [C(x, y)] \quad (1)$$

$$\forall x \forall y [C(x, y) \rightarrow C(y, x)] \quad (2)$$

利用  $C(x, y)$  可以定义其它二元关系,其中 RCC8 是区域连接演算中最常用的一个子集,规定了两个空间区域间可能的八种基本关系:  $DC(x, y)$  (相离)、 $EC(x, y)$  (外切)、 $PO(x, y)$  (部分重合)、 $EQ(x, y)$  (相等)、 $TPP(x, y)$  (内切) 和它的逆关系  $TPP^{-1}(x, y)$ 、 $NTPP(x, y)$  (真包含) 和它的逆关系  $NTPP^{-1}(x, y)$ .

### 3.1 算法基本思想

将图像处理中“点特征”与 RCC8 理论结合,即可表达相邻两幅图像中裂缝的空间关系,从而识别连接性以及重叠还是间隙.

图3中的两个方框分别代表两幅相邻图像,用示意图描述了图像中裂缝线存在的几种位置关系,并用“点特征”定义描述如下:

(1) 裂缝1的终点与图像边界无交点,如图3(a)所示,此点定义为端点 E.

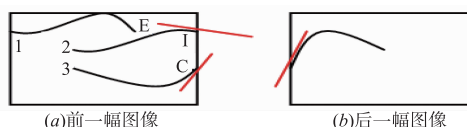


图3 裂缝在相邻图像中的位置及形态

(2) 裂缝 2 的终点与图像边界有交点, 并以该交点作裂缝曲线的切线, 同样对后一幅图像中裂缝起始点与图像边界的交点处作裂缝曲线的切线, 若两条切线相交的夹角大于  $\pi/2$ , 将前幅裂缝的终点和后幅裂缝的起点合一为中心点, 八邻域存在裂缝像素情况如图 4(b) 所示, 将此点定义为交叉点 I.

(3) 与裂缝 2 情况相似的裂缝 3, 不同之处是相邻裂缝边界的切线夹角小于  $\pi/2$ , 如图 4(c) 所示, 将此点定义为连接点 C.

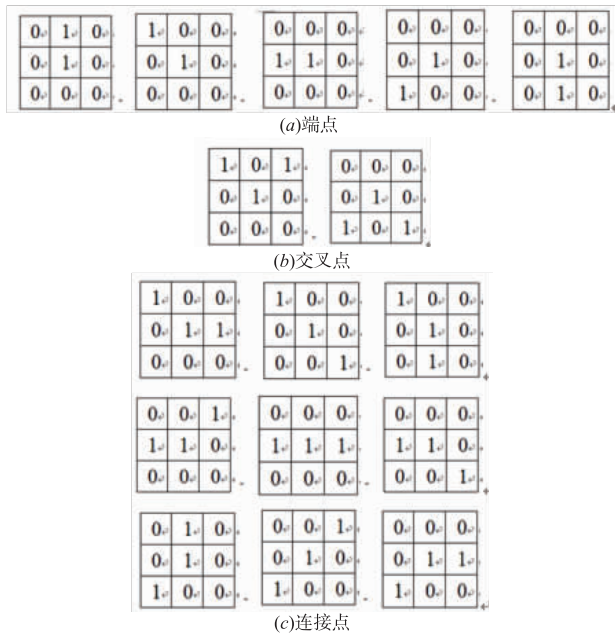


图4 裂缝图像中点特征描述

与 RCC8 理论相结合, 判断重叠还是有间隙的规则如下:

(1) 若是端点, 用  $DC(x, y)$  表示相邻图像中的裂缝相离, 即不属于同一条裂缝.

(2) 若是交叉点, 构造概率模型  $p$ , 判断不是同一条长裂缝 ( $DC(x, y)$ ) 或有间隙的同一条长裂缝 ( $EC(x, y)$ ).

$$p = \left(1 - \frac{2|\delta_1 - \delta_0|}{\pi}\right) e^{k \cdot |x_1 - x_0|} \quad (3)$$

其中,  $x_1$  和  $x_0$  分别表示相邻两裂缝的终点和起点行坐标, 其差值  $\Delta x$  称为行差值;  $\delta_1$  和  $\delta_0$  分别为两条裂缝在图像边界处的切线方向角, 其差值  $\Delta\delta$  称为夹角;  $k$  为调节因子, 三个参数共同决定了同属于一条裂缝的概率.

$\Delta\delta \geq \frac{\pi}{2}$  时  $p < 0$ .  $\Delta x$  越大,  $p$  越小, 用  $DC(x, y)$  表示两条裂缝相离, 不属于同一条长裂缝;  $\Delta x$  越小,  $p$  越大, 用  $EC(x, y)$  表示两条裂缝相切, 属于同一条长裂缝.

(3) 若是连接点, 两条裂缝必属于同一条裂缝. 由式(3)计算可区分是有间隙 ( $EC(x, y)$ ) 的或者重叠

( $PO(x, y)$ ).

$0 < \Delta\delta < \frac{\pi}{2}$  时  $p > 0$ .  $\Delta x$  越大,  $p$  越小, 即用  $EC(x, y)$

表示两条裂缝相切, 属于同一条长裂缝但之间有一定间隙;  $\Delta x$  越小,  $p$  越大, 用  $PO(x, y)$  表示两条裂缝相交, 属于同一条长裂缝且之间有重叠. 当  $x_0 = x_1$  时,  $\Delta x = 0$ , 两条裂缝正好首尾相连.

### 3.2 算法具体步骤

对相邻两幅二值裂缝图像使用基于 RCC 的长裂缝连接性识别算法的步骤如下:

(1) 对于大小为  $M * N$  的图像, 提取前幅裂缝终点坐标  $(x_0, y_0)$ , 若  $y_0 < M$ , 则该点为端点; 若  $y_0 = M$ , 则该点为非端点.

(2) 在非端点情况下, 将前幅裂缝的终点坐标和后幅裂缝的起点坐标作为中心像素, 分别提取相邻像素的链码值  $A$  和  $B$ . 由图 4 所示, 若  $\{A, B\} = \{3, 1\}$  or  $\{5, 7\}$ , 则为交叉点; 若  $A = 3, 4, 5$  时,  $|B - A| \geq 3$ , 为连接点.

(3) 由已确定的端点、交叉点还是连接点, 确定调节因子  $k$  的取值分别为:  $k = -\infty, k > 0$  和  $k < 0$ , 具体取值在实验部分给出.

(4) 由式(3)计算同属于一条长裂缝的概率及两条裂缝的空间连续性, 如式(4).

(5) 若为同一条长裂缝, 确定其拼接方向. 当  $(y_0 = M) \wedge (x_0 < N) = 1$  时, 左右拼接; 当  $x_0 = 0$  或  $x_0 = N$  时, 上下拼接.

$$\begin{cases} \text{if“端点”} & p = 0 & DC(x, y) \\ \text{if“交叉点”} & \begin{cases} p > -0.5 & DC(x, y) \\ -0.5 \leq p < 0 & EC(x, y) \end{cases} \\ \text{if“连接点”} & \begin{cases} 0 < p < 0.5 & EC(x, y) \\ 0.5 \leq p < 1 & PO(x, y) \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

## 4 基于余弦相似性度量的裂缝配准算法

具有  $PO(x, y)$  空间关系的两条裂缝, 在拼接时, 需先将重叠区域去除. 本算法根据两幅图像中裂缝线条的相似性给出重复区域判定条件. 由于几何中夹角余弦可用来衡量两个向量方向的差异, 本文用余弦相似度寻找两幅图像中线条的重复范围<sup>[18]</sup>. 基本思想是计算两个向量在空间中的夹角大小, 值域为  $[-1, 1]$ . 夹角余弦越大表示两个向量的夹角越小, 即两个向量越相似; 反之夹角越大越不相似. 向量  $A$  和  $B$  的夹角余弦表示为:

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (5)$$

算法具体步骤如下:

(1) 对待拼接的相邻两幅裂缝二值图像, 首先提取裂缝骨架; 然后提取其端点和交叉点, 并去除两者之间较短线条; 最后连接去毛刺后断裂部分形成完整的长裂缝作为待检测相似度曲线。

对裂缝骨架中每点像素的八邻域搜索, 若除中心像素外, 只有一个像素, 则该中心像素为端点; 若有两个像素, 则为分叉点. 记录所有端点坐标  $S_1 = \{(x_{ai}, y_{ai}), i = 1, 2, \dots, m\}$  和分叉点坐标  $S_2 = \{(x_{bj}, y_{bj}), j = 1, 2, \dots, n\}$ , 并按式(6)计算欧式距离, 记录值小于  $Th$  时对应的端点坐标  $S_3 = \{(x_{ci}, y_{ci}), i = 1, 2, \dots, p\}$  和分叉点坐标  $S_4 = \{(x_{dj}, y_{dj}), j = 1, 2, \dots, q\}$ . ( $S_3, S_4$ ) 即为曲线的毛刺段. 两幅图像中分别将去除毛刺后的断裂曲线端点连接, 对应的每一点坐标记录在集合  $T$  中.

$$(S_3, S_4) = \sqrt{(x_{ai} - x_{bj})^2 + (y_{ai} - y_{bj})^2} < Th, \quad (6)$$

$$i = \{1, 2, \dots, m\}, j = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$\begin{cases} T_1 = \{(x_{pi}, y_{pi}), i = 1, 2, \dots, s\} \\ T_2 = \{(x_{qj}, y_{qj}), j = 1, 2, \dots, t\} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 提取前幅图像裂缝拐点与端点之间的每段曲线, 计算长度及相邻角度差值, 作为向量  $A$  的数据.

用曲线多边形逼近法<sup>[19]</sup>, 得到多边形基点对应的位置即为曲线的拐点. 提取拐点坐标放入  $S_5 = \{(x_{ei}, y_{ei}), i = 1, 2, \dots, M\}$  中, 并将曲线分成  $1, 2, \dots, M$  段. 依次建立  $T_1$  中右端点到拐点  $S_5$  中的每条曲线段  $(x_{ps}, y_{ps}) \rightarrow (x_{ei}, y_{ei})$ , 每段长度为  $L_i = |y_{ps} - y_{ei}|$ , 方向角为  $\theta_i = \arctan((y_{ei} - y_{ps}) / (x_{ei} - x_{ps}))$ ,  $i = M, M - 1, \dots, 1$ . 相邻曲线的角度差有旋转不变性, 放入  $A$ .

$$A = \{(\theta_i - \theta_{i-1}), i = M, M - 1, \dots, 2\} \quad (8)$$

(3) 按前幅图像每段曲线长度, 依次对后幅图像裂缝分段, 计算每段相邻曲线角度差值, 作为向量  $B$  的数据.

按照  $L_i$ , 对第二条曲线分段, 依次建立  $T_2$  中左端点与分段长之间的每条曲线段  $y_{q1} \rightarrow y_{q1} + L_i, i = M, M - 1, \dots, 1$ , 相邻曲线段的角差值作为向量  $B$  中的样本数据.

(4) 计算向量  $A$  和  $B$  的余弦相似度. 最大值对应的曲线范围即为重叠区域.

分别将  $A$  和  $B$  向量中的数据代入式(5)计算余弦相似度, 记录其最大值对应的  $j$  段. 则前后两幅图像裂缝重复区域分别为  $l_1: (x_{ej}, y_{ej}) \rightarrow (x_{ps}, y_{ps})$  和  $l_2: (x_{q1}, y_{q1}) \rightarrow (x_{q(L_j)}, y_{q(L_j)})$ , 则两幅图像配准时的坐标变换如下:

$$f(l_2) = l_1 + T \quad (9)$$

$$\text{即: } \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_j \\ x_{p(s-L_j)} - x_{q(1+L_j)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$T_x, T_y$  分别为水平、垂直方向平移量.

本文算法总体流程图如图 5 所示.

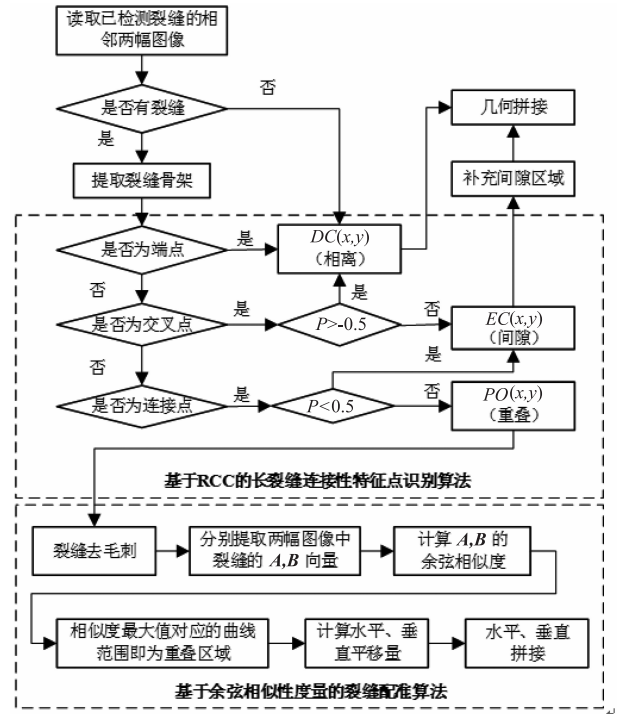


图5 本文算法总体流程图

## 5 实验验证

对辽宁省唐岭山隧道采集的衬砌图像中抽取具有端点、交叉点、连接点(重叠和间隙)特征的相邻图像典型样本, 如图 6 所示, 分别对本文提出的算法 1(基于 RCC 的长裂缝连接性特征点识别算法)、算法 2(基于余弦相似性度量的裂缝配准算法)、多幅图像拼接和与其他算法对比做了验证.

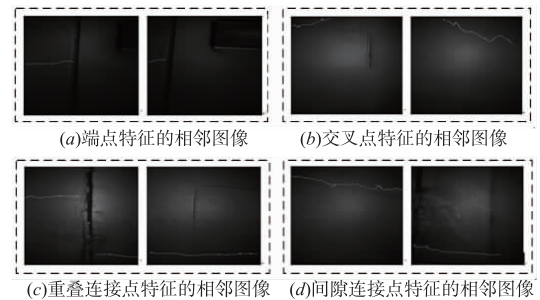


图6 具有典型样本特征的两幅相邻图像

### 5.1 本文算法 1 实验验证

在本文算法 1 中, 特征点的类型识别以及概率值的计算是识别裂缝是否有重叠或间隙的关键步骤.

#### 5.1.1 识别特征点类型

将图 6 中相邻图像的边界点及邻域分布放大, 并与图 4 对照, 可见图 7 中从上到下分别为端点、交叉点和

两个连接点.

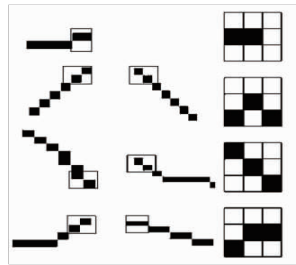


图7 图6中裂缝边界点放大图及链码

### 5.1.2 概率值的计算

按照本文提出的概率模型(3),对连接点和交叉点测试,分别用空间拓扑关系  $DC(x,y)$ 、 $EC(x,y)$  和  $PO(x,y)$  判定为不属于同一条裂缝、有间隙和有重叠的裂缝.

图8中横轴  $\Delta x$  表示相邻两幅图像中裂缝终点和起点坐标的行差值;纵轴  $p$  表示同属于一条裂缝的概率,由于  $p$  既与  $\Delta x$  还与  $\Delta\delta$  有关,因此为一族曲线.  $\Delta x$  和  $\Delta\delta$  都越小时,  $p$  越大. 图(a)是对“连接点”情况下概率

测试实验结果. 对于分辨率为  $5568 \times 3712$  的图像,定义图片的  $1/10$  为无间隙情况,将  $x = 5568/10, \Delta\delta = 0, p = 0.5$ ,代入式(1)中,得到  $k = -0.001, \Delta\delta \in 0 \sim \pi/2$ ,取不同的值,可得到不同的  $p$  曲线,如每 10 个点采样一次,得到  $p \in 1 \sim 0$  变化的 9 条曲线,其中  $p \geq 0.5$  时为  $PO(x,y)$ ,  $0 < p < 0.5$  时为  $EC(x,y)$ . 图(b)是对“交叉点”的概率测试实验结果. 此时  $k$  取  $0.001, \Delta\delta > \pi/2$ ,则  $p < 0$ ,其中,  $-0.5 < p < 0$  时为  $EC(x,y)$ ,  $p < -0.5$  时为  $DC(x,y)$ . 对图6测试结果如表1所示.

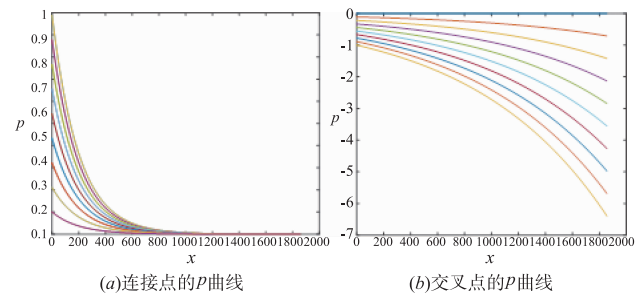


图8 连接点和交叉点的概率分布曲线

表1 图6的概率值计算及空间拓扑关系判定

| 图6 | $k$       | $x_1$ | $x_0$ | $\Delta x$ | $\delta_1$ | $\delta_0$ | $\Delta\delta$ | $p$    | 关系        |
|----|-----------|-------|-------|------------|------------|------------|----------------|--------|-----------|
| a  | $-\infty$ | -     | -     | -          | -          | -          | -              | 0      | $DC(x,y)$ |
| b  | 0.001     | 0     | 0     | 0          | $9\pi/25$  | $-\pi/5$   | $14\pi/25$     | -0.1   | $EC(x,y)$ |
| c  | -0.001    | 5038  | 4653  | 385        | 0          | 0          | 0              | 0.6805 | $PO(x,y)$ |
| d  | -0.001    | 1264  | 4305  | 3041       | $2\pi/45$  | $\pi/45$   | $\pi/45$       | 0.0457 | $EC(x,y)$ |

### 5.2 本文算法2实验验证

按算法2流程,关键步骤结果如图9所示. 分别为提取裂缝骨架、端点、交叉点、去除毛刺、连接成光滑曲线、拐点分割结果;相似性度量中的向量  $A$ 、向量  $B$  及余弦值分布曲线;其中余弦最大值对应的为拐点序号数,对应到拐点分割曲线中即可找到配准裂缝位置,从

而找到匹配裂缝区域放大图.

### 5.3 多幅图像裂缝拼接

按本文提出的算法,对有重叠区域的裂缝按式(10)拼接,有间隙的裂缝按照几何标定法<sup>[14]</sup>补充间隙区域后拼接,以及多幅图像水平、垂直拼接结果如图10所示.

### 5.4 与其它实验方法对比

用特征点检测法拼接图像的典型情况如图11所示. 当图像有明显特征时,如(a)(b)拼接效果较好,由于工程上只关心裂缝,不关心灯箱等拼接的准确度,没有裂缝的图像拼接会消耗不必要的时间;当图像特征点不明显时,如(c)只能几何拼接.

在 halcon 软件上对 200 幅图像(含裂缝的 120 幅)采用表2中的5种算法拼接,并用拼接准确度(拼接后裂缝的长度与实际裂缝长度之比)和运行时间上进行对比.

Harris 角点检测法是特征点检测法中常用的一种,由于它不具有“尺度不变性”,因相邻图像存在尺度变化,即前幅图中的边缘或曲线,在后幅图像可能被检测为角点,导致匹配失败. 另外,混凝土在图像中表现为大量角点特征,导致运行时间较慢;几何拼接法是按相

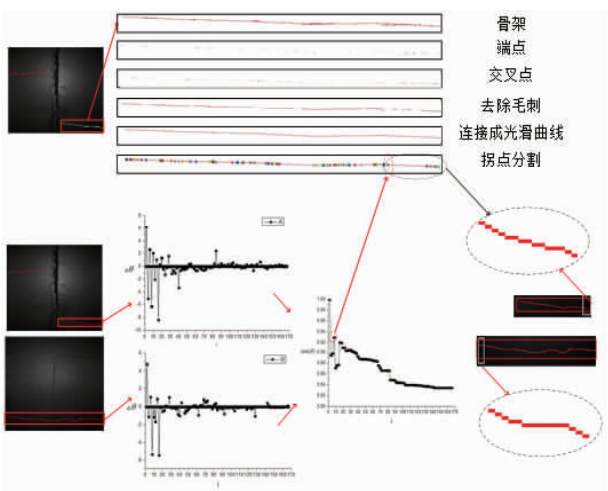
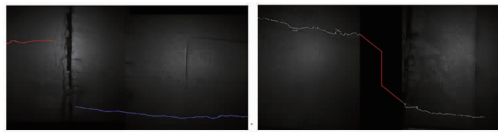
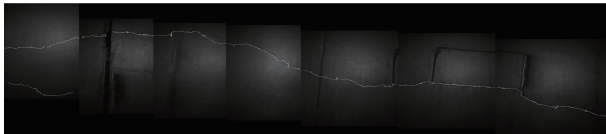


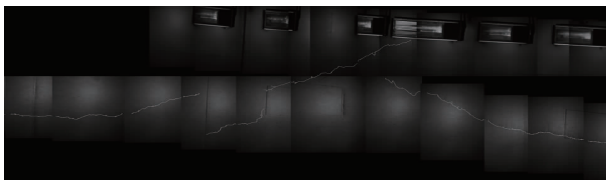
图9 算法2关键步骤结果图



(a)图6中连接点特征的两幅图像拼接结果

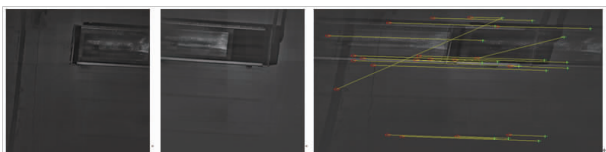


(b)同一趟多幅图像水平方向拼接结果

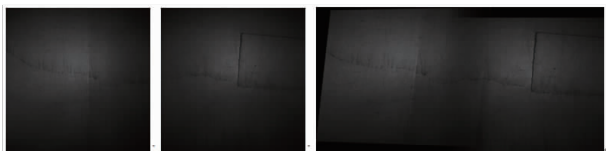


(c)不同趟多幅图像垂直方向拼接结果

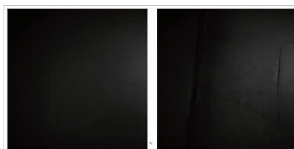
图10 多幅图像裂缝拼接结果



(a)特征点匹配过程(不含裂缝图像)



(b)特征点拼接图像效果(含裂缝图像)



(c)无法正确提取匹配特征点(一幅含裂缝,一幅不含裂缝)

图11 特征点检测法拼接图像

机标定的重叠率拼接,但现场采集存在偏差,导致拼接准确度较低。在此基础上,文献[15]还结合了改进的SIFT算法,由于公路隧道内较暗,采集的图像普遍存在低对比度,在删除低对比度的极值点及不稳定的边缘响应点时,一些关键特征点容易被去除导致匹配失败。若不删除这些特征点,在配准时,计算量较大。而线特征提取可大大降低计算量,如文献[16]用裂缝的差分链码匹配相邻图像的线特征。由于光照不均衡,即使是同一段裂缝,在相邻两幅图像中所处的局部邻域的灰度及梯度值不同,导致检测出的裂缝线骨架的差分链码值会有偏差,致使配准率不高,且对于大幅面图像中的裂缝长达上千个像素,计算耗时较长。而本文对裂缝线的拐点处分段,既能很好地反映裂缝趋势的相似性,又能减少计算量。

表2 五种算法实验对比

| 算法           | 拼接准确度 | 运行时间(s) |
|--------------|-------|---------|
| Harris 角点检测法 | 90%   | 4       |
| 几何拼接法        | 76%   | 0.8     |
| 文献[15]       | 94.1% | 3.1     |
| 文献[16]       | 90.3% | 2.7     |
| 本文算法         | 93.2% | 1.2     |

## 6 结论

本文针对在连续采集的图库中不能保证裂缝首尾相连而直接拼接的问题,提出基于RCC的长裂缝连接性特征点识别算法和基于余弦相似性度量的裂缝配准识别算法,两者结合解决了自动识别是否拼接为同一条裂缝以及重叠区域剔除的问题。并在工程应用中实现了长裂缝拼接。实验结果表明,精度及速度综合性价比优于特征拼接和几何拼接算法。综上,本文提出的将空间拓扑关系和形态相似关系相结合的方法,给图像中存在连续性线条时的拼接提供一种新思路。

## 参考文献

- [1] 尹蓉蓉. 运营公路隧道衬砌正常使用极限状态模糊随机可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(01): 122-128.
- [2] Lee C H, Chiu Y C, Wang T T, et al. Application and validation of simple image-mosaic technology for interpreting cracks on tunnel lining[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2013, 34(2): 61-72.
- [3] Simon Stent, Riccardo Gherardi, Björn Stenger, Kenichi Soga, Roberto Cipolla. Visual change detection on tunnel linings[J]. Machine Vision and Applications, 2016, 27(3): 319-330.
- [4] CHAIYASARN K, KIM T K, VIOLA F, et al. Distortion-free image mosaicing for tunnel inspection based on robust cylindrical surface estimation through structure from motion[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 30(3): 04015045.
- [5] YAO J B, TIAN Q H, SUN Z R, et al. Study on hologram mosaic algorithm based on Harris corners[A]. International Symposium on Precision Mechanical Measurements[C]. International Society for Optics and Photonics, 2016. 99031H.
- [6] Alahi A, Ortiz R, Vandergheynst P. Freak: Fast retina keypoint[A]. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. IEEE, 2012. 510-517.
- [7] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[A]. 2011 International Conference on Computer Vision[C]. IEEE, 2011. 2564-2571.
- [8] 施嘉察. 基于线特征和网格优化的图像拼接算法研究[D]. 浙江大学, 2018.

- [9] 苑玮琦,薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12):3100-3111.
- [10] Grompone von Gioi R. LSD;a fast line segment detector with a false detection control [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,2010,32(4):722-732.
- [11] Lilian Zhang. An efficient and robust line segment matching approach based on LBD descriptor and pairwise geometric consistency [J]. Journal of Visual Communication & Image Representation,2013,24(7):794-805.
- [12] David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision,2004,60(2):91-110.
- [13] Attard L, Debono C J, Valentino G, et al. Vision-based change detection for inspection of tunnel liners[J]. Automation in Construction,2018,91:142-154.
- [14] JIALIN M, JIMMING Z, WEIXIN S. Research on panoramic image mosaic method based on camera calibration[J]. Journal of System Simulation,2017,5:1112-1119.
- [15] 冷鹏博. 基于几何标定和特征检测的隧道图像拼接方法[D]. 湖北工业大学,2017.
- [16] 朱鑫. 隧道结构表面病害特征快速检测研究[D]. 西南交通大学,2014.
- [17] Randell DA, Cui Z, Cohn AG. A spatial logic based on regions and connection [A]. 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning [C]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1992. 165-176.
- [18] Mulekar M S, Brown C S. Distance and Similarity Measures. Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining [M]. New York: Springer, 2017.
- [19] Hosur PI, Ma KK. Optimal algorithm for progressive polygon approximation of discrete planar curves [A]. International Conference on Image Processing [C]. IEEE, 1999. 16-20.

#### 作者简介



薛丹 女,1983年2月出生,辽宁沈阳人. 分别在2005年和2008年于沈阳工业大学获得学士和硕士学位,现为沈阳工业大学讲师、博士研究生,主要研究方向为机器视觉和图像处理.

E-mail: x2d2003@163.com



苑玮琦 男,1960年5月出生,辽宁沈阳人. 教授、博士生导师. 1982年于湖南大学获得学士学位,分别在1988年和1997年于东北大学获得硕士和博士学位,现为沈阳工业大学视觉检测技术研究所所长,主要研究方向为生物特征识别和机器视觉.

E-mail: yuan60@126.com