

# 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法

英 红, 谈至明

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 针对水泥混凝土路面错台测量手段的不足, 提出了一种基于双目视觉的错台测量方法. 该方法根据双目摄像机的成像特点和水泥混凝土路面的图像特征, 对接缝位置进行定位和错台计算. 定位分为 2 个主要步骤, 一是基于灰度投影的粗定位, 二是在粗定位的基础上提取接缝附近图像, 利用灰度投影和边缘投影精定位. 由双目视觉测量系统计算相邻 2 块水泥板在错台附近点的三维坐标, 利用这些坐标计算错台量, 其中关键环节是在双目图像匹配时提出了一种基于匹配点位置估计的匹配算法. 试验表明, 与直尺测量结果吻合.

**关键词:** 水泥混凝土路面; 错台测量; 接缝定位; 双目视觉; 数字图像处理

**中图分类号:** U 414

**文献标识码:** A

## Cement Concrete Pavement Faulting Detection and Recognition Based on Binocular Vision

YING Hong, TAN Zhiming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A new measurement method for faulting detection is proposed to overcome the shortcomings of traditional measurement methods for faulting detection on the cement concrete pavement. This method is realized by slab joints positioning based on the digital image processing and faulting calculating based on binocular vision, according to double camera's imaging characters and the cement concrete pavement's imaging feature. Slab joints positioning can be divided into approximate location based on the gray projection feature of whole image and accurate location based on the character of gray projection and edge projection around the slab joints image. The 3D coordinates of the points around the slab faulting which is used to calculate the faulting are obtained by the binocular vision measurement system. For the key step of this system, image matching adopts a new

algorithm based on the estimated location of matching points. The experimental results show that measurement accuracy meets to the test results by ruler.

**Key words:** cement concrete pavement; faulting detection; slab joints positioning; binocular vision; digital image processing

错台是影响水泥混凝土路面平整度、寿命以及加铺后反射裂缝的重要指标, 也是水泥混凝土路面技术状况评定<sup>[1]</sup>、养护、加铺设计<sup>[2]</sup>时必须考虑的一个重要指标. 目前, 错台测量主要依靠人工, 费时费力且不安全. 有的地区采用激光断面仪, 它仅靠纵断面高程及板块尺寸对接缝大致定位, 所以还要依赖于图像采集系统对接缝位置进行辅助判断, 同时激光测距传感器价格较高. 基于双目视觉的错台测量系统是通过图像实现错台识别、定位和测量, 它可以得到路面致密的三维信息, 横断面上的采样点远远超过激光断面仪, 它将路面裂缝、嵌缝料损坏等平面类病害和错台等立面病害融合到同一个系统中进行三维分析, 而硬件成本相对较低. 同样地, 对于沥青路面也适用, 特别对于那些裂缝类与变形类叠加的病害更具有优势.

## 1 基于双目视觉水泥混凝土路面错台检测系统

如图 1 所示, 系统总体结构可采用双面阵相机 (CCD) 或双线阵 CCD 2 种方案. 图 1a 采用面阵 CCD 和面光源, 系统主要包括 2 个面阵 CCD、1 个面光源照明系统、图像压缩、同步控制子系统、里程编码器 and 高速工控机, 图像传输采用 CameraLink 接口. 图

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (200731822301-9)

第一作者: 英 红 (1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为路面工程. E-mail: yinghongcq@tom.com

通讯作者: 谈至明 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路面工程. E-mail: tanjk@online.sh.cn

1b 系统与图 1a 主要的区别是采用 2 个线阵 CCD 和线激光照明系统,线阵 CCD 扫面线与线激光照明线在路面上共线,激光照明线的宽度略大于 CCD 的扫面线宽度.

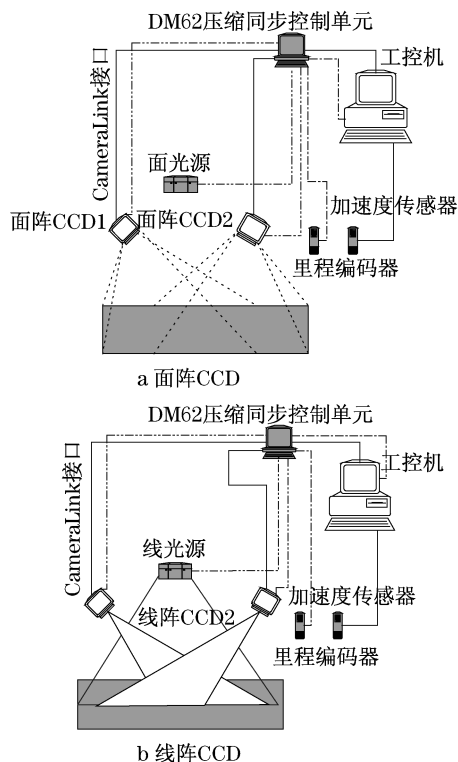


图 1 视觉检测系统总体结构  
Fig.1 Constitution of the system

2 个 CCD 安放在同一高度,调整合适的角度,使 2 个 CCD 的重叠采样区覆盖所要检测的车道,CCD 由图像压缩、同步控制子系统根据里程编码器的方波脉冲触发电子快门,实现 2 个 CCD 同步,同时对路面进行拍摄,CCD 采集的图像数据首先经过 CameraLink 接口进入该子系统,数据经分拣、压缩,传入工控机,存储到磁盘阵列中.双线阵 CCD 系统需要加速度传感器得到检测车辆振动信息,用于对错位量的修正,而双面阵 CCD 系统则不需要考虑车辆振动对错位测量的影响.

分辨率在毫米级的路面高速图像检测系统每秒多达几十兆像素的采集量,采用双 CCD 系统数据量将增加 1 倍,对计算机存储压力极大,通常的压缩算法对三维计算精度影响很大,针对这一难题,采用平行双目设计,同名像点在左右 2 个 CCD 图像中具有相同的行号,由于并不需要计算路面每个像点的三维坐标,因此行频可取厘米级的分辨率,而小波类的压缩算法对裂缝、接缝等目标的高频分量影响不大,因此通过对左右 CCD 图像进行分拣、压缩,数据存

储量可减少到每秒几兆,大幅减少了存储压力.

双面阵方案不需要加速度传感器消除检测车辆振动对错位测量的影响,而且对光源的要求较低,结构简单,成本低,容易实现;但由于目前相同价位的线阵 CCD 的分辨率远高于面阵 CCD,相应的测量精度高于面阵 CCD,因此 2 种方案各有利弊.

## 2 基于数字图像的接缝定位

水泥混凝土路面板接缝定位依靠路面图像灰度、边缘强度以及接缝自身的几何特征,受到混凝土板上刻槽、污渍、裂缝等因素干扰,定位总体分为 2 个步骤:粗定位和精定位.流程绘于图 2.

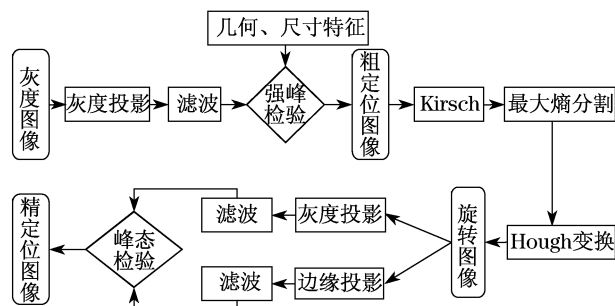


图 2 接缝定位流程

Fig.2 Flow chart of slab joints positioning

粗定位:首先将采集的路面灰度图像平行于接缝方向作灰度投影,由于接缝处可能存在较多的孔隙及嵌缝料缺陷,与水泥混凝土面板灰度相比有一定的差异,这些差异将累积到灰度投影中;然后,将灰度投影进行高通滤波,过滤掉较小的干扰波峰;最后,对几处强峰进行检验,检验的依据是接缝的直线特征、尺寸特征,剔除平行于接缝的裂缝干扰,一般而言,灰度投影的最大峰值处就是接缝位置,得到接缝粗定位图像.提取粗定位图像时考虑到接缝可能有一定的倾角,取该最大值所在位置的左右两侧 3~5 个缝宽图像,缝宽的像素数目可以根据 CCD 的分辨率和接缝实际尺寸大体估计.

精定位:对粗定位提取的图像作 Kirsch 边缘检测<sup>[3]</sup>,用 Kirsch 算法将粗定位中所有边缘都进行增强,由于接缝处的边缘强度通常是最强的,因此, Kirsch 边缘检测对接缝处的边缘强度有放大效果;考虑到接缝图像可能存在着偏角,需对图像进行旋转校正,使接缝完全垂直于投影边,先利用最大熵阈值分割法<sup>[4]</sup>对 Kirsch 边缘增强后的图像进行二值化,对二值图像作 Hough 变换<sup>[5]</sup>检测出接缝大致方向,利用该方向与水平轴夹角进行旋转校正;对校正

图像做灰度、边缘投影,分别对投影做滤波,根据投影的峰态进行精定位,接缝处的灰度投影存在单峰或多峰,单峰又分为单主峰和单偏峰,主峰和偏峰可

通过峰值和峰宽来区别,一般,单主峰的峰值远大于单偏峰的峰值,如图3.

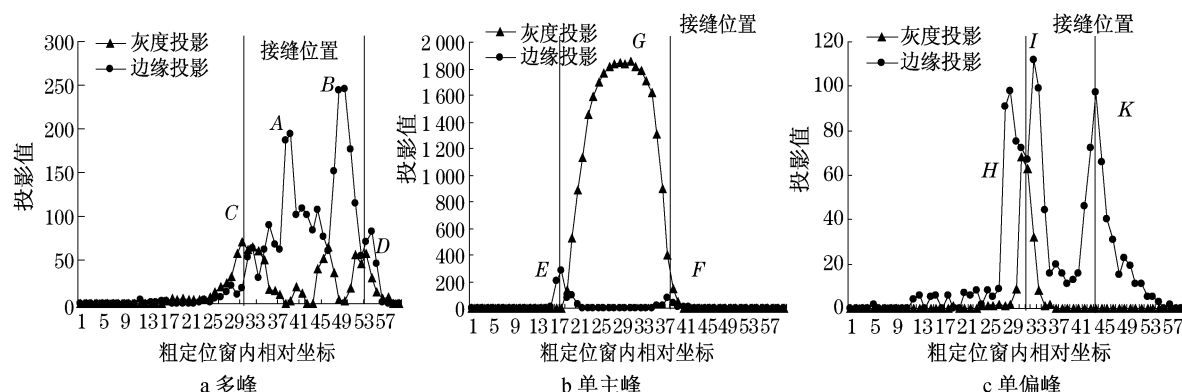


图3 接缝处的边缘投影和灰度投影

Fig.3 Edge projection and gray projection around the slab joints

对于灰度投影存在多峰的情况,如图3a,接缝处的边缘投影一般有2个强峰,但这2个最大峰可能并不对应接缝的2条边界.水泥混凝土路面接缝处的嵌缝料由于老化与水泥板块脱离,留下狭长的缝隙;另外,由于大量啃边的存在,接缝边界变得模糊,综合这些因素,边缘投影最强的2个峰外侧第1个灰度投影峰值作为接缝边界是合理的.首先确定边缘投影的2个最强峰A点和B点,然后根据A点找到它左侧距离最近的灰度投影峰值C点,由B点找到它右侧距离最近的灰度投影峰值D点,最后由C点和D点所在位置确定接缝的边界.

灰度投影存在单主峰的情况比较简单,一般是由于接缝处嵌缝料全部脱落,该处完全由空隙占据,如图3b,接缝边界由边缘投影的2个最大峰E、F确定.

灰度投影存在单偏峰的情况,如图3c,接缝边界由灰度投影单偏峰H峰和距离H峰较远的边缘投影K峰确定.

### 3 基于双目视觉的测量方法

#### 3.1 摄像机模型

以面阵CCD为例,世界坐标系由 $\mathbf{X}_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$ 组成,设 $(u, v)$ 为以像素为单位的图像坐标,世界坐标系表示的P点坐标与其投影点p的坐标 $(u, v)$ 的关系为<sup>[6]</sup>

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_w = \mathbf{M} \mathbf{X}_w \quad (1)$$

式中: $s$ 为比例因子; $a_x, a_y$ 为与摄像机像元物理尺寸及焦距有关的内部参数; $(u_0, v_0)$ 为镜头中心投影在 $u, v$ 坐标系中的坐标; $\mathbf{R}$ 为摄像机于世界坐标系的旋转矩阵; $\mathbf{t}$ 为摄像机于世界坐标系的平移矩阵; $\mathbf{M}_1$ 为摄像机内参,只与摄像机内部结构有关,由 $a_x, a_y, u_0, v_0$ 确定; $\mathbf{M}_2$ 描述了摄像机的位姿,成为摄像机外参,由 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 确定; $\mathbf{M}$ 为摄像机的基本矩阵.

#### 3.2 摄像机标定

求内外参数的过程称为摄像机标定.采用文献[7]提出的基于平面方格点的摄像机标定方法,该方法利用坐标已知的平面方格点即标定点构成的靶标在多个视角下求解摄像机内外参数,并得到摄像机切向畸变参数用于畸变校正.标定板及摄像机位姿如图4.

棋盘2D靶标由已知尺寸的黑白方格构成,由激光打印机印制,2个黑色方格的交点为标定点,标定点具有明显的几何特征,可被计算机自动捕获.摄像机位置和角度也非常重要,如图3b和3c所示,标定共用了9个视图,其中4个视图距离摄像机较近,黑白方格占据了图像的大部分空间,另外的5个视图距离摄像机较远,它们大体位于视觉检测系统工作距离附近.

在靶纸标定过程中,采用亚像素角点搜索方法,理论上,精度达到像素的1/50,即如果当前像素代表1mm,那么此像素附近的角点搜索精度能达到0.02mm,但在水泥混凝土路面上,角点并没有靶纸上的角点那么明显,一般只能达到像素级别,即每个像素

实际代表距离,这时系统的精度就依赖于 CCD 的分辨率、图像匹配和噪声抑制水平,目前线阵 CCD 能够轻松达到上万的行分辨率,考虑到数据存储压力,

一般 3.5 m 路面宽度用行分辨率 8 000 的线扫描 CCD,坐标分析精度能够到达毫米以下。



图 4 摄像机标定

Fig.4 Calibration of the camera

### 3.3 双目系统测量原理

设  $M_i = M_{1,i}M_{2,i}$ ,  $i$  为 2 个摄像机的代号;由摄像机标定已知  $M_{1,i}$  和  $M_{2,i}$ ,继而可求  $M_i$ ,则有下列关系成立:

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11,i} & m_{12,i} & m_{13,i} & m_{14,i} \\ m_{21,i} & m_{22,i} & m_{23,i} & m_{24,i} \\ m_{31,i} & m_{32,i} & m_{33,i} & m_{34,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

消去  $s_1$  和  $s_2$ ,得到关于  $X_w, Y_w, Z_w$  的方程组 (3):

$$\begin{cases} (u_i m_{31,i} - m_{11,i})X_w + (u_i m_{32,i} - m_{12,i})Y_w + \\ (u_i m_{33,i} - m_{13,i})Z_w = m_{14,i} - u_i m_{24,i} \\ (v_i m_{31,i} - m_{21,i})X_w + (v_i m_{32,i} - m_{22,i})Y_w + \\ (v_i m_{33,i} - m_{23,i})Z_w = m_{24,i} - v_i m_{34,i} \end{cases} \quad (3)$$

将上述方程写成矩阵的形式  $A_i P = b_i$ ;合并 2 个 CCD 后得到  $AP = b$ ;其中  $A = (A_1, A_2)^T$ ,  $b = (b_1, b_2)^T$ ;假设  $A^T A$  可逆,由最小二乘法可得  $P$  点的三维坐标  $P = (A^T A)^{-1} b$ .

### 3.4 双目图像匹配

得到系统内外参数之后,由方程组 (3) 可知,只要找到 2 个视图中的同名像点  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$  就可求出目标点的空间坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,寻找 2 个视图中的同名像点是双目视觉系统计算空间点三维坐标的关键,传统的双目视觉图像匹配方法有区域搜索法、对极几何法<sup>[8]</sup>;两者一般都用灰度相关法<sup>[9]</sup>描述配点的相似程度.区域搜索法匹配时搜索空间为整个图像,为二维搜索;对极几何法的搜索空间是图像区域内的一条直线,为一维搜索;显然,后

者搜索速度快.水泥混凝土路面错台量较小,错台处两板的  $z$  方向坐标相差不大,针对这一特点以及水泥混凝土路面图像纹理特征,笔者提出一种新的图像匹配算法,它是在对极几何法的基础上通过预估匹配点大致范围,缩小搜索空间、增加了匹配速度,降低了误匹配的风险.

如图 5,空间一点  $P$  的世界坐标为  $(x_w, y_w, z_w)$ ;在图像  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  中的坐标为  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$ ;  $C_1$  和  $C_2$  分别为 2 个摄像机的光心;  $e_1$  和  $e_2$  分别为直线  $C_1 C_2$  与 2 个图像平面的交点;  $P, P_0, P_+$  和  $P_-$  在  $PC_1$  直线上,设  $P_0$  在  $z_w = 0$  平面上,  $P_+$  在  $z_w = h_{\max}$  平面上,  $P_-$  在  $z_w = -h_{\max}$  平面上,  $h_{\max}$  为常数,它表征最大可能的错台量,一般可取 30,根据路面错台量,适当调整;它们与图像平面  $\Gamma_1$  相交于  $U_1$  点;直线  $PC_2, P_0 C_2, P_+ C_2$  和  $P_- C_2$  分别与图像平面  $\Gamma_2$  相交于  $U_2, U_0, U_+$  和  $U_-$ ,其坐标分别为  $(u_2, v_2), (u_0, v_0), (u_+, v_+)$  和  $(u_-, v_-)$ .由它们的几何关系,不难看出直线  $U_+ U_-$  是平面  $C_1 C_2 P$  与平面  $\Gamma_2$  的交线,且点  $U_2, U_0, U_+$  和  $U_-$  均在这条直线上,此直线称为图像  $\Gamma_1$  中的  $U_1$  点在图像  $\Gamma_2$  中的对极线.

$(u_1, v_1)$  对极线方程的求解过程如下,摄像机的基本矩阵  $M$  可表示为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} = [M_3 \quad m_4] \quad (4)$$

$P$  在世界坐标系中的齐次坐标  $P_h = [x_w \quad y_w \quad z_w \quad 1]^T = [P \quad 1]^T$ ,则有下式成立:

$$\begin{cases} s_1 I_1 = M_{31} P + m_{41} \\ s_2 I_2 = M_{32} P + m_{42} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{I} = [u_1 \ v_1 \ 1]^T$  为空间点  $P$  在摄像机 1 的齐次图像坐标;  $\mathbf{I}_2 = [u_2 \ v_2 \ 1]^T$  为空间点  $P$  在摄像机 2 的齐次图像坐标;  $[\mathbf{M}_{31} \ \mathbf{m}_{41}]$  和  $[\mathbf{M}_{32} \ \mathbf{m}_{42}]$  分别为摄像机 1 和摄像机 2 的基本矩阵. 由式(5)消去变量  $P$ , 整理后得到

$$s_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{31}^{-1} s_1 \mathbf{I}_1 = \mathbf{m}_{42} - \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{31}^{-1} \mathbf{m}_{41} \quad (6)$$

令  $\mathbf{m} = \mathbf{m}_{42} - \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{31}^{-1} \mathbf{m}_{41}$ , 由反对称矩阵性质有

$$\mathbf{m}_x \mathbf{m} = 0 \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{m}_x$  为反对称矩阵, 由式(6)和(7)得

$$\mathbf{m}_x (s_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{31}^{-1} s_1 \mathbf{I}_1) = 0 \quad (8)$$

将式(8)展开, 并同除以  $s_2$ , 同乘以  $\mathbf{I}_2^T$  并由反对称矩阵性质得

$$\mathbf{I}_2^T \mathbf{m}_x \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{31}^{-1} s_0 \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2^T \mathbf{m}_x \mathbf{I}_2 = 0 \quad (9)$$

式中,  $s_0 = s_1 / s_2$ ; 将式(9)两边同除以  $s_0$ , 可得

$$\mathbf{I}_2^T \mathbf{m}_x \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{31}^{-1} \mathbf{I}_1 = 0 \quad (10)$$

式(10)即为图像点  $(u_1, v_1)$  在图像  $\Gamma_2$  的极线约束方程, 目标点  $P$  介于  $P_+$  和  $P_-$  之间, 其在第 2 幅图像中的坐标  $(u_2, v_2)$  位于  $(u_+, v_+)$  和  $(u_-, v_-)$  之间, 这 3 点全部在  $(u_1, v_1)$  所对应的对极线上.  $P_+$  和  $P_-$  的世界坐标及其在 2 幅图像中的图像坐标满足方程组(3), 在  $z$  轴坐标已知的情况下, 可求  $(u_+, v_+)$  和  $(u_-, v_-)$ , 这 2 点确定了  $(u_2, v_2)$  的大致范围, 缩小了对极线法的搜索空间.

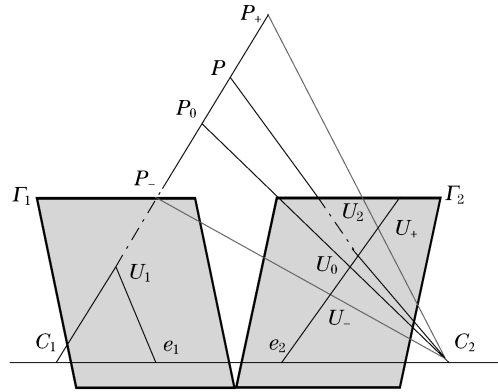


图5 图像匹配示意

Fig.5 Sketch of image matching

在图像 2 中的线段  $U_+$   $U_-$  上任意一点  $U_k$ , 设其坐标为  $(u_k, v_k)$  与图像 1 中的  $U_1$  点的相似度可由下式计算:

$$\epsilon_k = \frac{1}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-m}^m |\bar{f}_k(u_k + i, v_k + j) - \bar{f}_1(u_1 + i, v_1 + j)| \quad (11)$$

式中:  $\epsilon_k$  为相似度, 值越小, 相似程度越高;  $i, j$  为  $U_k$  和  $U_1$  点附近大小为  $(2m+1)(2n+1)$  窗口内的

坐标;  $\bar{f}_k(u_k + i, v_k + j) = (f_k(u_k + i, v_k + j) - \mu_k) / \sigma_k$ ,  $\mu_k = \frac{1}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-m}^m f_k(u_k + i, v_k + j)$ ,  $\sigma_k = \frac{1}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-m}^m (f_k(u_k + i, v_k + j) - \mu_k)^2$ ,  $\bar{f}_1(u_1 + i, v_1 + j) = (f_1(u_1 + i, v_1 + j) - \mu_1) / \sigma_1$ ,  $\mu_1 = \frac{1}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-m}^m f_1(u_1 + i, v_1 + j)$ ,  $\sigma_1 = \frac{1}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-m}^m (f_1(u_1 + i, v_1 + j) - \mu_1)^2$ . 计算线段  $U_+$   $U_-$  上所有点与  $U_1$  的相似程度, 当相似程度为最大即  $\epsilon_k$  值为最小时的点为最佳匹配点.

### 3.5 错台计算方法

首先在视图 1 中找到接缝位置, 在其接缝附近的两板上各选取若干点(3 个以上不共线点), 分别找到这些点在视图 2 中的匹配点, 用式(3)求各点的三维坐标; 利用接缝一侧水泥板上的选取点三维坐标回归出基准平面, 然后求另一块水泥板上的选取点到该平面的距离, 最后求平均即为该接缝处的错台量. 显然, 取点越多, 随机误差越小.

## 4 试验验证

摄像机内外参数计算误差、图像几何畸变、同名像点匹配误差是影响系统检测精度的主要因素. 为检验本文方法的可靠性, 用直尺测量了 120 余条错台, 双目视觉测量结果与之对比结果如图 6, 图中  $R^2$  为相关系数;  $n$  为样本数量. 图 6a 中两者拟合直线的斜率接近 1; 图 6b 中最大绝对误差在  $\pm 3$  mm 内, 71% 的点在  $\pm 1$  mm 内, 96% 的点在  $\pm 2$  mm 内, 标准差  $\sigma$  为 0.657 mm. 从图 6b 中可以看出, 错台量的大小与测量精度并没有明显的关系.

## 5 结论

(1) 提出了一种基于视觉成像的水泥混凝土路面错台检测方法, 可由面阵 CCD 或线阵 CCD 组成的视觉系统进行检测, 能够方便地与现有图像检测系统融合. 该方法利用数字图像处理技术找到水泥混凝土路面接缝的准确位置, 利用双目视觉计算水泥板上测点三维坐标, 由这些坐标计算得到错台量. 通过对 120 余条错台测量, 本文方法与直尺测量结果吻合, 两者最大绝对误

差在  $\pm 3$  mm 内,71%的点在  $\pm 1$  mm 内,96%的点在  $\pm 2$  mm 内,标准差  $\sigma$  为0.657 mm.

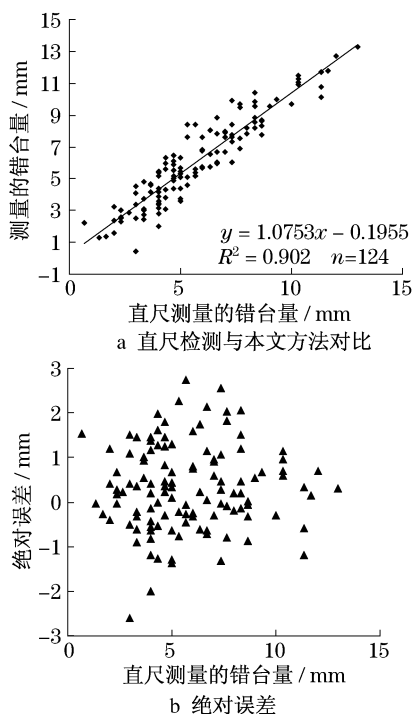


图6 误差分析  
Fig.6 Error analysis

(2) 提出了基于数字图像处理的水泥混凝土接缝定位方法,分为粗定位和精定位2个主要步骤.前者根据水泥混凝土路面接缝的灰度特征进行定位,后者根据接缝附近的边缘特征、投影特征以及接缝的几何特征进行定位.

(3) 基于双目视觉的错台测量方法,首先对摄像机进行校正,得到摄像机的内外参数,根据接缝定位结果,在接缝两侧的板上各取若干测点,找到这些测点在双目图像中的匹配点,从而计算测点的三维坐标,利用接缝一侧水泥板测点坐标回归出基准平面,计算接缝另一侧水泥板各测点到该平面的距离,最后求平均即为错台量.

(4) 双目视觉测量的关键是图像匹配,根据水

泥混凝土路面图像特征以及错台量相对较小这一特点提出了一种快速、准确匹配方法,首先估计匹配点大致的位置和可能范围,在该位置处设置一个窗口,搜索对极线通过该窗口区域上的像素点,找到匹配点.

(5) 由于水泥板在检测过程中发生振动,系统并未考虑这部分振动对测量结果的影响,将在进一步研究中考察.

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. JTG H20—2007 公路技术状况评定标准 [S]. 北京:人民交通出版社,2007.  
Ministry of Communication of the People's Republic of China. JTG H20—2007 Highway performance assessment standards [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范 [S]. 北京:人民交通出版社,2002.  
Ministry of Communication of the People's Republic of China. JTG D40—2002 Specifications of cement concrete pavement design for highway [S]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] Kirsch R. A computer determination of the constituent structure of biological images [J]. Computers in Biomedical Research, 1971, 4: 315.
- [4] Pun T. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of histogram [J]. Signal Processing, 1980, 2(3): 223.
- [5] 刘文耀. 光电图像处理 [M]. 北京:电子工业出版社,2002.  
LIU Wenyao. Optoelectronic image processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2002.
- [6] 张广军. 视觉测量 [M]. 北京:科学出版社,2008.  
ZHANG Guangjun. Vision measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [7] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(5): 1330.
- [8] Hartley R. In defense of the 8-point algorithm [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6): 580.
- [9] Banks J, Corke P. Quantitative evaluation of matching methods and validity measures for stereovision [J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(7): 512.