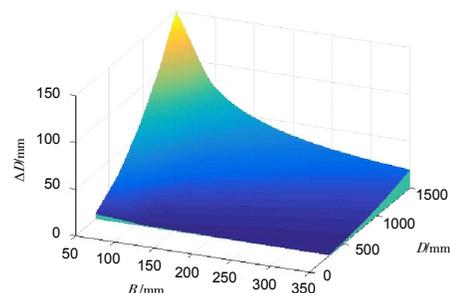




## 主动式全景视觉的隧道全断面变形检测方法

汤一平\*, 袁公萍, 陈 麒, 韩国栋, 胡克钢

浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023



**摘要:** 针对隧道距离长、运维检测时间跨度长、可检测时间短、形变数据变化小等特点, 本文提出了一种基于主动式全景视觉的隧道全断面变形检测方法。首先通过配置在隧道检测装置上的主动式全景视觉传感器对隧道横断面进行全景扫描, 获取隧道全景切面扫描图像; 接着通过改进的高斯曲线拟合法提取全景切面扫描图像上的亚像素激光中心点, 并采用贝塞尔曲线对其进行平滑处理; 然后根据全方位视觉传感器的标定结果解析出隧道横断面上内壁的几何信息; 再利用隧道横断面上内壁三维点云数据进行三维重建; 最后, 对重构的隧道模型进行了精度分析。实验研究表明: 基于主动式全景视觉的隧道全断面变形的检测方法具有检测速度快、实时性好、数据全面、可视化程度高等优点, 能满足对狭长隧道进行快速定性定量分析的需求。

**关键词:** 隧道变形检测; 隧道横断面; 三维重建; 主动式全景视觉; 亚像素

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

## Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on active panoramic vision technique

Yiping Tang\*, Gongping Yuan, Qi Chen, Guodong Han and Kegang Hu

Information Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

**Abstract:** Aiming at the characteristics of long-distance tunnel, long maintenance intervals, limited repairing time and small changes in the deformation data, this paper presents a detection method of tunnel deformation based on active omni-directional vision tunnel section deformation. Firstly, the active panoramic vision sensor (ASODVS) is installed at the tunnel and detecting device scans the cross section of tunnel to acquire tunnel section panoramic images. Secondly, the sub-pixel center of the panoramic image is extracted by the improved Gauss curve fitting method, and the smooth processing is performed by using the Bezier curves. Thirdly, the system analyzes the geometry information of the tunnel cross-section of the inner wall through calibration results of omnidirectional vision sensor. The tunnel cross section 3D point cloud data are used for 3D reconstruction. Finally, the precision of the tunnel reconstruction model is analyzed. The experimental results show the method has the advantages of high speed acquisition, real-time, comprehensive data and good visualization. It can meet the needs of the rapid qualitative and quantitative analyses.

**Keywords:** tunnel deformation monitoring; tunnel cross section; tunnel 3D reconstruction; active panorama vision; sub-pixel

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.009

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(4): 442-452

收稿日期: 2017-01-04; 收到修改稿日期: 2017-02-24

\*E-mail: typ@zjut.edu.cn

## 1 引言

隧道作为交通设施重要的部分,它的定期维护和检测是十分繁重且极其重要的一项任务,其中隧道结构变形测量又是隧道工程中必不可少的步骤。一般来说,在运营过程中隧道“开天窗”的时间很短。因此如何快速准确地检测隧道的形变是一个具有挑战性的研究内容。

传统的隧道变形人工测量方法效率低、精度不高。激光经纬仪交会断面的测量方法<sup>[1]</sup>耗时长,属于静态测量,对整个隧道测量需要对不同断面进行人工拼接。隧道收敛计<sup>[2]</sup>、大地测量<sup>[3]</sup>、巴塞特收敛系统<sup>[4]</sup>等方法得到的测量数据无法全面反映整个隧道的变形信息。Chaiyasarn K<sup>[5]</sup>等提出对所拍摄的隧道局部图像进行拼接,再基于 SFM<sup>[6]</sup>的被动三维重建方法生成稀疏的点云信息,对隧道进行建模,但该方法三维重建精度不高。传统的车载式激光测距仪采用圆周扫描方式,对隧道的内表面沿纵向方向进行扫描,显示出来的是隧道断面的螺旋线,拟合出的断面精度达不到系统要求。周奇才<sup>[7]</sup>等提出了一种车载式激光测距装置来获取隧道断面信息,但测量的点较少,通过断面拟合轮廓的方法不能真实表示隧道的轮廓。全站仪<sup>[8]</sup>和地面三维激光扫描仪(LiDAR)<sup>[9]</sup>这两种仪器能高精度地检测隧道内表面的几何坐标,但是在检测时需要专业人士沿隧道轴线方向内布设多个测站才能完成整条隧道的检测扫描工作,属于离线检测技术,且设备价格昂贵,因而只适用于重点区域短距离的检测,难以在狭长的公路隧道和铁路隧道中得到推广应用。谢熊耀<sup>[10]</sup>等采用 LiDAR 技术测量隧道全断面变形,存在着检测过程繁杂、检测花费时间和人工量大、检测数据的处理自动化水平低等问题。

Seo 等<sup>[11, 12]</sup>采用二维平面建模方法提取隧道横断面坐标的轮廓线进行变形分析,没有将该方法拓展到三维平面; Delaloye<sup>[13]</sup>用椭圆拟合算法获得隧道横断面的相对变形,但这种方法计算复杂度高、计算量大。

针对隧道距离长、形变量小的特点,导致在隧道变形检测时,检测数据量少、检测速度慢、重构精度低等问题,本文提出了基于主动式全景视觉的隧道全断面变形检测解决方案。论文的主要贡献是:1) 提出的检测方法具有检测速度快、实时性好、数据全面、可视化程度高等优点;2) 能满足对狭长隧道进行快速定性定量分析的需求,有效地提高了隧道健康检测自动化和智能化水平。

## 2 总体方案

### 2.1 隧道检测系统的组成

基于主动式全景视觉的隧道全断面变形检测系统主要由硬件部分和软件部分组成。其中硬件主要由隧道检测机器人、全方位视觉传感器(ODVS)<sup>[14, 15]</sup>、全景激光光源等组成。其中全景激光光源由圆锥形镜面、透明外罩、圆形激光发射器和底座等组成。ODVS 和全景激光光源进行同轴连接,构成主动式全方位视觉传感器(ASODVS),通过连接轴安装在机器人上,并可以调节高度。圆形激光发射器发出的圆形激光通过圆锥形镜面的反射产生垂直于轴心线的全景激光光源。系统的硬件总体结构如图 1 所示。

软件系统设计可分为用户界面设计、数据库设计、模块设计、数据结构和算法设计,下面对隧道变形检测系统软件设计的重点部分——模块设计进行介绍。根据模块设计原则以及对系统功能的模块分析,该系统的模块设计可分为图像采集模块和图像处理模块,前者主要功能是控制机器人的运动速度和采集视频图像;后者运行在特定的处理器上,主要的功能是图像预处理、激光中心线提取、隧道内壁三维坐标获取模块、隧道三维重建和隧道变形可视化分析、存储测量结果。通过软件系统实现一种三维全景扫描、解析计算、建模和分析的并行处理方式。

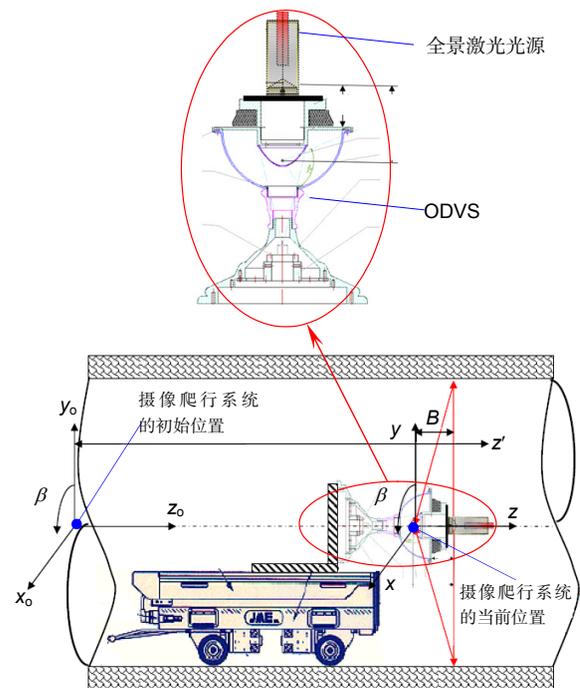


图 1 隧道检测系统硬件示意图。

Fig. 1 The diagram of tunnel detection hardware system.

### 2.2 隧道检测系统的检测原理

隧道检测系统的核心部分是主动式全景视觉传感器,它由 ODVS 和全景激光光源组成,运用主动式视觉三维测量技术,高精度地测量物体的形变。全景激光光源投射到隧道内壁上的全景激光线经隧道内壁的反射后成像于全景图中。

为了从全景图中获取隧道内壁的三维信息,首先需要从全景图中解析出激光投射信息;然后通过对 ODVS 进行标定,建立图像像素和空间体素的对应关系;最后根据全景激光和 ODVS 固定的几何关系,计算得到隧道内壁上激光投射点的三维坐标并对隧道进行三维重建。

### 2.3 隧道检测系统的工作流程

隧道检测系统的工作流程分成两个部分:数据采集和处理。利用有限的检测时间,通过隧道检测装置对隧道内壁进行连续测量。

数据采集方面:在测量起始位置建立笛卡尔坐标系,调节隧道检测装置的中轴线与隧道中轴线重合,以使全景激光光源处于最佳的照射效果,同时运行隧道检测装置,使之匀速驶入隧道,全景激光扫描示意图如图 2。启用 ODVS 获取视频图像数据;通过隧道检测装置的运行速度  $v$  和获取激光全景图的频率  $f$  可以确定每一张全景图中激光中心线对应的实际位置,即该位置距起始位置的纵向里程坐标,以纵向里程坐标为文件名命名激光扫描图像数据,同时通过机器人连接隧道检测系统的局域网,将实时获取的激光扫描图像数据显示在检测系统的软件界面并存储在全景激光数据库中,直到检测车到达终点。



图 2 圆形激光器扫描示意图。  
Fig. 2 The scanning diagram of the circular laser.

数据处理方面,首先从全景激光图数据库中依次读取全景激光图,按照隧道检测系统的检测原理得到各横断面的三维坐标数据,生成被检测隧道的三维数据集;再将它导入程序中进行三维重构,得到隧道三维空间模型;最后与隧道全断面基准数据库进行对比,使隧道变形量可视化,并将测量结果存储在隧道健康体检结果数据库中,供以后参考。

## 3 基于 ASODVS 的隧道内壁三维坐标的获取

### 3.1 ODVS 的成像原理和标定

ODVS 的成像原理如图 3 所示。图中  $O_m$  和  $O_c$  为双曲面镜的两个焦点,其所在的连线称为 ASODVS 的主轴。装配时,确保摄像机的光心与双曲面镜的虚焦点  $O_c$  重合。根据双曲面镜满足单视点成像约束的光学特征,单视点约束是指来自周围场景中的光线经过反射镜面后聚集于一点,距离焦点  $O_m$  为  $B$  的圆形激光发射器发出的激光线在空间中形成激光点  $G(x, y, z)$ ,激光点  $G$  沿  $GO_m$  在镜面上的成像点为  $P(x, y, z)$ ,  $P$  点经过双曲面镜反射后聚焦于摄像机光心(双曲面镜焦点)  $O_c$ ,并交摄像机成像平面于像点  $Q(x, y)$ ,该像点唯一对应着一条反射光线  $PO_c$ ,并且由入射光线与  $X$  轴的夹角  $\alpha$  和反射光线在成像平面上的夹角  $\beta$  唯一确定。从双曲面镜成像点到摄像机平面的成像过程符合透视成像原理。

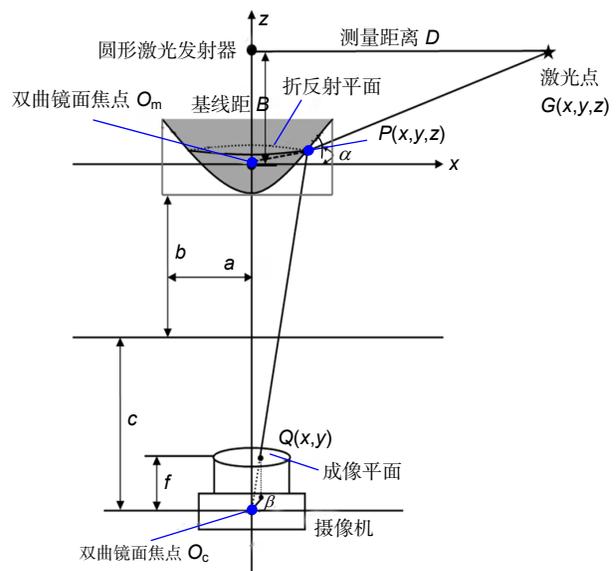


图 3 全方位视觉传感器的成像原理。  
Fig. 3 The image-forming principle of ODVS.

为了找到上述的对应关系, 采用 Davide Scaramuzza 的多项式展开模型对 ODVS 进行标定, 实验中使用的 ODVS 获得的标定参数如表 1 所示, 再由式(1)求出入射角  $\alpha$  :

$$\tan \alpha = \frac{\|u''\|}{f(\|u''\|)} = \frac{\|u''\|}{a_0 + a_1 \|u''\| + a_2 \|u''\|^2 + \dots + a_N \|u''\|^N}, \quad (1)$$

$$\beta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{u''}{v''}\right) & u'' > 0, v'' > 0 \\ \pi + \arctan\left(\frac{u''}{v''}\right) & u'' < 0, v'' > 0 \\ \pi + \arctan\left(\frac{u''}{v''}\right) & u'' < 0, v'' < 0 \\ 2\pi + \arctan\left(\frac{u''}{v''}\right) & u'' > 0, v'' < 0 \end{cases}. \quad (2)$$

式中:  $\|u''\|$  为光线在传感器平面投影点到该平面中心点的像素距离; 函数  $f$  表示三维空间点和二维平面点之间的关系;  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$  为标定的全方位视觉传感器的内参数。图像平面到传感器平面之间的转换用式(3)表示:

$$u'' = Au' + t, \quad (3)$$

式中:  $A \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ ,  $t \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ ,  $u''$  为物点在传感器平面的投影,  $u'$  是其对应的图像平面的像素点, 通过式(1)、式(2)可以建立一张全景成像平面任一像素点与入射角  $\alpha$  之间的对应关系表。具体的标定算法请见参考文献[16]。根据标定参数和式(2)可从全方位图像上的像素坐标求出对应传感器平面上点的坐标  $u'' = [u'', v'']^T$  之后, 再由传感器平面上的坐标求出对应的方位角  $\beta$ , 如式(2)所示。

表 1 ODVS 的标定参数。

Table 1 The calibration parameters of ODVS.			
$a_0$	$a_2$	$a_4$	平均误差 / pixel
-75.8903	0.0026	0.00001	0.38
中心点			
$A$	$t$		
$\begin{bmatrix} 0.999 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 49.461 \\ -15.692 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 311.850 \\ 235.891 \end{bmatrix}$	

### 3.2 激光投射信息解析

调节圆形激光发生器所发射出来的激光为最细最亮的状态, 对全景激光图提取激光中心线之前, 先进行必要的图像增强——滤除噪声。根据对全景激光图

中噪声的来源分析, 如式(4)所示:

$$I_{\text{im}}(u', v') = I_{\text{la}}(u', v')\theta_{\text{sp}}(u', v') + I_{\text{n}}(u', v'). \quad (4)$$

式中:  $I_{\text{la}}(u', v')$  表示无散斑影响时的激光灰度值,  $\theta_{\text{sp}}(u', v')$  表示以像素点  $(u', v')$  为中心  $m \times n$  大小的  $\delta$  领域内样本的散斑对比度,  $I_{\text{n}}(u', v')$  为图像采集系统噪声。  $I_{\text{im}}(u', v')$  表示  $(u', v')$  的灰度值。

采用中值滤波处理散斑噪声和图像采集系统噪声。图 4 为对同一位置处理前后的激光线放大对比图, 从中可以看出处理之后的图像保留了图像尖锐的边缘, 并选择了适合的点来替代孤立的噪点, 处理效果较好。

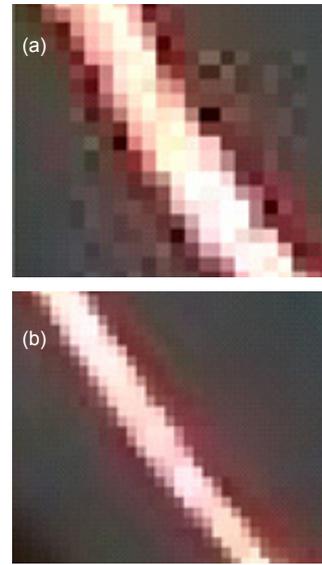


图 4 中值滤波前后的对比。(a) 滤波前。(b) 滤波后。  
Fig. 4 The comparison diagram of median filter. (a) Before filtering. (b) After filtering.

理想情况下, 全景激光光源投射到隧道内壁上的全景激光线经隧道内壁的反射后在 ODVS 的全景图中成像, 全景图上的激光条纹应该是一个横向只有单位像素的单线, 但是在实际中, 由于激光器的发散和物体表面漫反射的影响, 在全景图中所成的激光线为一个有多个像素宽度的条纹, 精准地找到条纹的中心点, 细化为无宽度的坐标是三维坐标获取模块的前提, 在保证重建工作输入的准确性下, 最终实现物体坐标精确测量。

本文中全景激光图的激光线区域的亮度值波形为单峰光条, 可用高斯曲线拟合, 考虑到对激光中心点的提取激光精度要求高, 综合考虑了阈值法、极值法和曲线拟合法的提取效果, 最终选用改进后的高斯曲线拟合法来提取激光中心点。结果如图 5 所示。

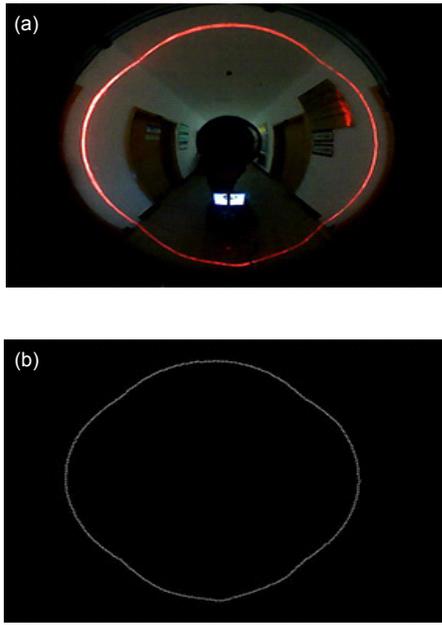


图5 高斯曲线拟合法提取全景激光线效果. (a) 全景图. (b) 提取激光线.

Fig. 5 The results of extracting the panoramic laser line based on the Gaussian curve approximation. (a) Panorama. (b) Laser extraction.

具体实现算法如下:

Step1: 初始化. 以全景图像中心点  $O'$  为中心, 设置初始方位角  $\beta = 0$ ;

Step2: 求出某一个方向上的激光中心点坐标. 以步长为 1, 从  $\beta = 0$  的方向进行遍历, 记录距离中心点像素距离为  $\|\mathbf{u}''\|_k$  的点在 HSI 颜色模型中的亮度值  $I_k$ , 其中  $k = 1, 2, \dots, N$ , 对于非整数坐标点采用双线性插值法计算得到该点处的亮度值. 同时计算以  $\|\mathbf{u}''\|_k$  为起点的  $s$  个连续像素亮度值之和, 遍历结束后保留总和最大的长度为  $\|\mathbf{u}''\|_{\max}$ ,  $s$  为用于拟合激光亮度值曲线的像素点个数, 实验表明  $s$  取 7 的时候提取效果最好. 进而根据式(5)、式(6)把亮度值  $I_s$  进行高斯曲线拟合, 其中  $s = 1, 2, \dots, 7$ , 求出此时高斯曲线极值点对应的像素距离为  $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}}$ :

$$\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}} = a \cdot \exp\left[-\frac{(I_s - b)^2}{s}\right], \quad (5)$$

$$s = \frac{\sigma^2}{4 \ln 2}, \quad (6)$$

式中:  $(I_s, \|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}})$  为样本点,  $(b, a)$  为高斯曲线极值点的像素坐标,  $\sigma$  为高斯曲线的半峰宽度.

Step3: 求出所有方向上的激光中心点坐标. 根据提取的激光点数  $N$ , 以  $2\pi/N$  为增量对  $\beta$  从 0 至  $2\pi$  进

行遍历, 得到所有的当方位角为  $\beta$  时该方向的像素距离  $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}}$ .

Step4: 激光中心点平滑处理. Step3 得到的像素距离所对应的激光中心点仅通过径向亮度值计算得到, 并未考虑切向方向上的激光本身的连续性, 因此采用二阶贝塞尔曲线对相邻像素距离进行平滑处理. 首先根据当前方向上的像素距离  $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}n}$  及其相邻两方向上的像素距离  $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}(n-1)}$ 、 $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}(n+1)}$ , 通过式(7)计算得到当前像素距离的理论值  $L$ , 然后根据设定的阈值  $T$ , 判断  $|L - \|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}n}| < T$  是否成立, 若成立则  $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}n} = L$ , 反之则跳过. 直到处理完 Step3 中所有的像素距离.

$$L = (1-t^2)\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}(n-1)} + 2t(1-t)\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}n} + t^2\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}(n+1)}. \quad (7)$$

式中  $t \in [0, 1]$  为常数, 本文根据实验效果取  $t=0.2$ .

Step5: 以上求出了  $N$  个当方位角为  $\beta = 2\pi n/N$  时的像素距离  $\|\mathbf{u}''\|_{\text{ev}}$ , 通过简单的几何关系可以求出其对应的亚像素坐标  $(i_{\text{ev}}, j_{\text{ev}})$ , 即判定为激光中心点坐标.

考虑到硬件装置的基线距不变, 根据 ODVS 的单视点成像原理, 在每帧图像中, 激光线的成像位置是基本一致的, 则可以在特定的激光线成像区域提取激光中心点, 加快提取亚像素激光中心点的时间. 图 5(b) 为当提取的激光点数  $N=1000$  时, 用高斯曲线拟合法提取激光中心线的效果图. 从图中可以看出, 该方法满足要求.

### 3.3 隧道内壁的三维点云数据集获取

在被检测隧道入口, 调整检测机器人的高度, 使其 ODVS 的单视点  $O_m$  处于隧道中轴线上, 并尽量靠近初始隧道横截面的中心  $O_0$ , 以  $O_0$  点建立固定坐标系, 再在隧道检测装置的当前位置以 ODVS 的单视点  $O_m$  建立移动坐标系. 若隧道检测装置沿平直隧道前行, 则这两个坐标系之间的关系用式(8)进行计算, 如图 1 所示:

$$x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0 + z', \quad (8)$$

式中:  $(x, y, z)$  为移动坐标系的三个空间分量,  $(x_0, y_0, z_0)$  为固定坐标系的三个空间分量,  $z'$  为隧道检测装置沿轨道移动的距离, 也即纵向里程信息.

空间中的每个点可以通过固定坐标系和移动坐标系表示, 在移动坐标系中获取全景激光点的坐标示意图如图 6.

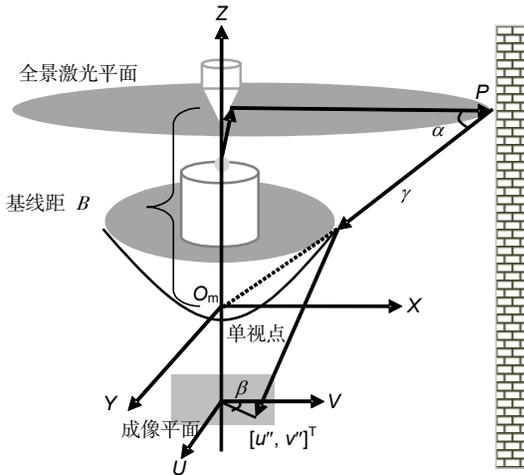


图6 隧道内壁三维坐标数据获取示意图。

Fig. 6 The diagram of acquiring 3D coordinate data on tunnel lining.

图中,  $B$  称为基线距, 是 ODVS 单视点  $O_m$  到全景激光平面的距离;  $\gamma$  为隧道内壁中任意激光投射点  $P$  到单视点  $O_m$  的距离;  $\alpha$  为  $PO_m$  与全景激光平面所成的角度, 也即式(2)中的入射角  $\alpha$ ; 激光点  $P$  在成像平面上的投影对应的方位角  $\beta$  通过式(4)可求得。

则在移动坐标系中获取全景激光点的三维坐标  $(x, y, z)$ , 如式(9)所示:

$$x = \frac{B}{\tan \alpha} \cdot \sin \beta, \quad y = \frac{B}{\tan \alpha} \cdot \cos \beta, \quad z = B. \quad (9)$$

通过式(8)、式(9), 则可以得到激光点  $P$  在固定坐标系下的坐标  $(x_0, y_0, z_0)$ 。最终得到隧道内壁的三维点云数据集, 把它导入软件系统中, 生成隧道三维重建模型。

#### 4 选择最优基线距的值

基线距是 ODVS 单视点  $O_m$  到全景激光平面的距离, 优化基线距的值能有效的减小测量误差。

图7是改变基线距前后的全景激光在全景图中的成像位置。靠近图像中心部分的分辨率低, 因为靠近图像中心的像素总数少于远离图像中心部分的像素总数<sup>[17]</sup>, 因此可以通过选取最适合的基线距来选择全景激光的最佳成像区域。

一般来说, ASODVS 视觉测量的精度取决于基线距的长度; 当基线距增长时, 全景激光在全景图上的成像位置也发生变化。因此, 测量误差取决于基线距和图像的分辨率。

量化误差是由图像采集时将模拟信号转化成数字

信号过程中引入的误差, 与 CMOS 的分辨率以及图像信号的 A/D 转换频率有关。

假设 CMOS 摄像机的像素有效数量为  $P_H \times P_V$ , 单位为像素; 每个像素的尺寸为  $S_H \times S_V$ , 单位为毫米, 实际获取图像的大小为  $H \times V$ , 单位为像素, 则基线距  $B$  和测量误差  $\Delta D$  在深度方向的关系如式(10)~(13)所示:

$$\Delta r = \sqrt{\left(\frac{P_H S_H}{2H}\right)^2 + \left(\frac{P_V S_V}{2V}\right)^2}, \quad (10)$$

$$\|u\| = k \times \Delta r, \quad (11)$$

$$\|u''\| = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4a_0 a_2 D^2}}{2a_2 D}, \quad (12)$$

$$\Delta D = \left| \frac{B \times \|u''\|}{a_0 + a_2 \|u''\|^2} - \frac{B \times \|u'' + u\|}{a_0 + a_2 \|u'' + u\|^2} \right|, \quad (13)$$

式中:  $\Delta r$  是图像平面上的量化误差,  $k$  为单位距离上的像素个数,  $\|u\|$  为量化误差对应的像素距离,  $\|u''\|$  为图像平面中心点到激光中心点的像素距离,  $a_0, a_2$  为标定参数,  $D$  为距测量物体的距离。

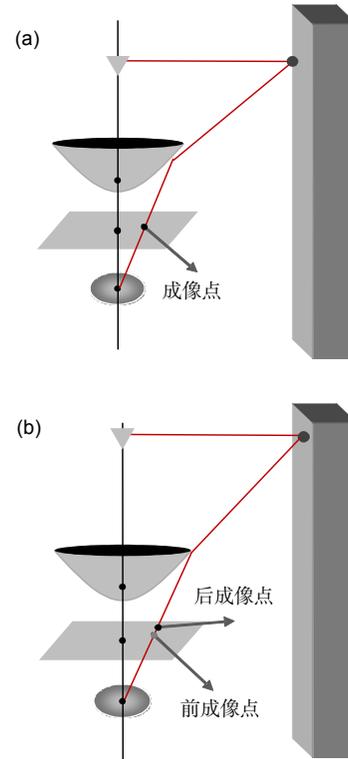


图7 增长基线距前后成像位置的变化。(a) 增长基线距之前。(b) 增长基线距之后。

Fig. 7 The change of imaging position due to increasing the baseline. (a) No growth baseline. (b) Growth baseline.

根据上述公式,得到了基线距 $B$ 、测量距离 $D$ 和测量误差率 $\Delta D$ 的三维关系图,如图8所示。从图中可以看出,在 $B$ 不变的情况下, $D$ 越大则 $\Delta D$ 也越大;在 $D$ 情况下, $B$ 越大则 $\Delta D$ 越小。故在保证全景图上有全部的全景激光成像下,基线距 $B$ 的值越大越好。

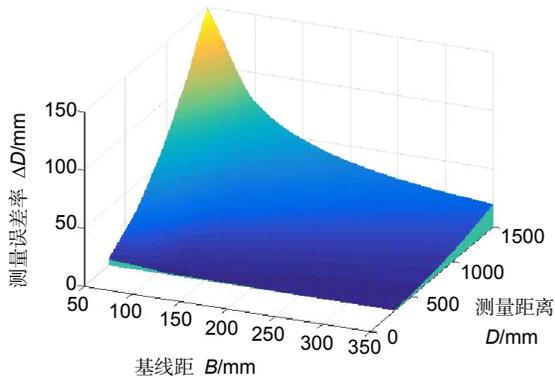


图8 基线距、测量距离和测量误差率的关系。

Fig. 8 The relationship among the baseline, measuring distance and measuring error rate.

## 5 实验研究

国际隧道协会(ITA)按照隧道横断面积的大小划分标准分类,把隧道分为极小断面隧道( $2\sim 3\text{ m}^2$ )、小断面隧道( $3\sim 10\text{ m}^2$ )、中等断面隧道( $10\sim 50\text{ m}^2$ )、大断面隧道( $50\sim 100\text{ m}^2$ )和特大断面隧道(大于 $100\text{ m}^2$ )。

根据现有的设备条件和实验环境,本文首先选取了宽约为 $2.4\text{ m}$ ,高约为 $2.8\text{ m}$ ,横断面面积约为 $7\text{ m}^2$ 的小断面模拟隧道——走廊进行实验研究。根据隧道检测系统的工作流程获取走廊的三维坐标数据集并对

其进行三维重建。

实验研究采用的硬件部分——基于ASODVS的隧道检测装置,如图9所示。其中ODVS中的摄像单元采用具有USB接口的CMOS摄像单元,分辨率为 $640\text{ pixels}\times 480\text{ pixels}$ ,通过USB接口与MT-R机器人微处理器连接。圆形激光发射器也通过USB接口与机器人微处理器连接,产生全景激光光源。

软件部分包括MT-R机器人上显示全景视频图像和本地处理器处理全景视频图像,其中都是在Eclipse中采用Java语言编写,通过网络编程,把MT-R机器人显示屏显示的带有激光的全景视频图片传输到本地客户端进行处理。客户端配置如下:英特尔Pentium(R) Dual-Core的CPU、内存 $4\text{ GB}$ 、独立显卡、显存 $1550\text{ MB}$ 、操作系统为Window 7(32位)。

实验环境如图10(a),其中红色激光线所在的截面是隧道检测机器人在模拟隧道中的起始位置;图10(b)显示的是模拟隧道被重构区域的三维图,被重构区域的空间尺寸为 $2640\text{ mm}\times 2860\text{ mm}\times 2000\text{ mm}$ 。

为了考查隧道检测装置在更大断面隧道检测的适应性,通过选取了一个宽为 $4745\text{ mm}$ ,高为 $2860\text{ mm}$ 的走廊进行实验研究,图11(a)为当基线距为 $330\text{ mm}$ 时,在该实验场景中拍摄的全景激光图,图11(b)是对图11(a)图像增强后采用基于亚像素的高斯曲线拟合法提取得到的激光中心点图。实验环境如图12(a)所示。

图12(b)为图11(a)对应的三维测量图。从图12(b)可以看出,三维测量效果很不理想,尤其是在宽度方向上。

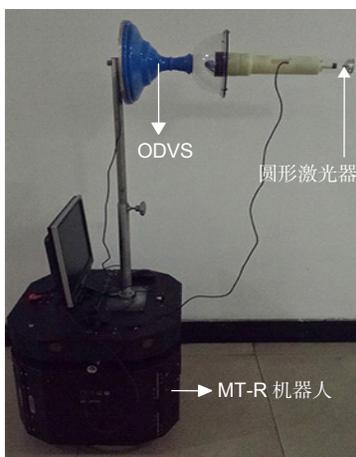


图9 硬件实物。

Fig. 9 The real product of hardware part.

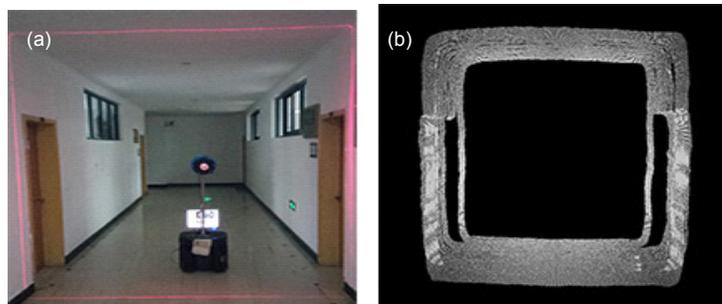


图10 实验环境和三维重构。(a) 实验环境。(b) 走廊部分重构。

Fig. 10 Experimental environment and the graph of three-dimensional reconstruction. (a) Experimental environment. (b) Corridor partial reconstruction.

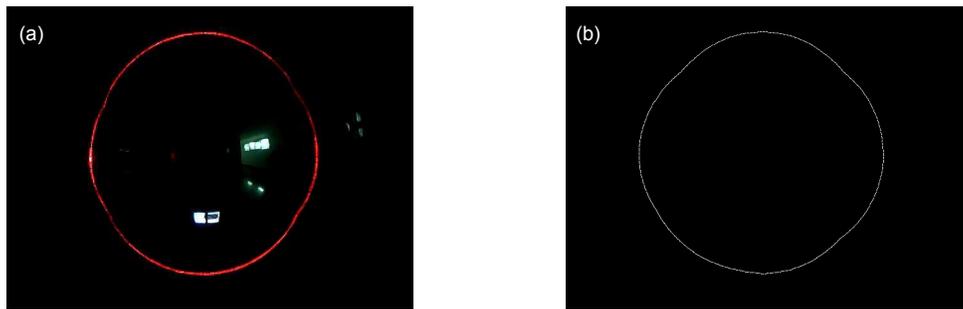


图 11 全景激光图和激光提取图(I). (a) 全景激光图. (b) 激光提取图.

Fig. 11 Panorama and laser extraction images ( I ). (a) Panorama. (b) Laser extraction.

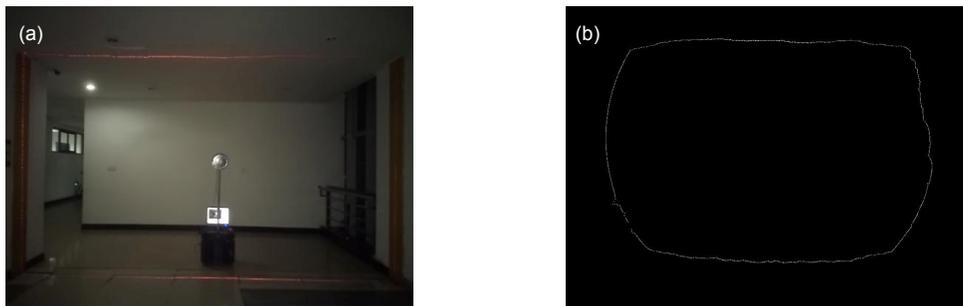


图 12 实验环境和三维测量图. (a) 实验环境. (b) 三维测量图.

Fig. 12 The experimental environment and the graph of three-dimensional measurement. (a) Experimental environment. (b) The graph of 3D measurement.

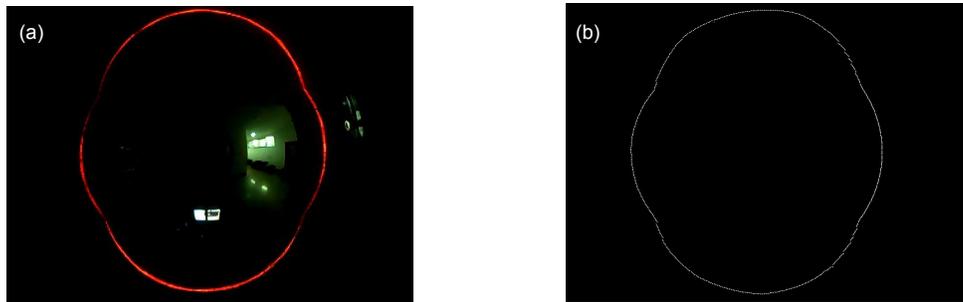


图 13 全景激光图和激光提取图(II). (a) 全景激光图. (b) 激光提取图.

Fig. 13 Panorama and laser extraction images ( II ). (a) Panorama. (b) Laser extraction.

分析其原因,根据图 8 的所示的基线距、测量距离和测量误差率之间的关系,宽度方向上的测量距离远大于高度方向的测量距离,在相同基线距的情况下,宽度方向具有较大的测量误差,这与理论分析是完全一致的。

为此,将基线距 330 mm 增加至 500 mm,观察其测量误差。图 13(a)是当基线距为 500 mm 时捕获的全景激光图,图 13(b)是激光提取图。

图 14 为该场景断面的三维测量图。与图 12(b)所示的实验结果比较,测量精度明显改善。实验再次论证了选择基线距的重要性,对于不同形状的截面积三维测量,需要选择一种与之最远测量距离相匹配的基

线距。图 15 为该场景的三维重构图。被重构区域的空间尺寸为 4745 mm×2860 mm×800 mm。

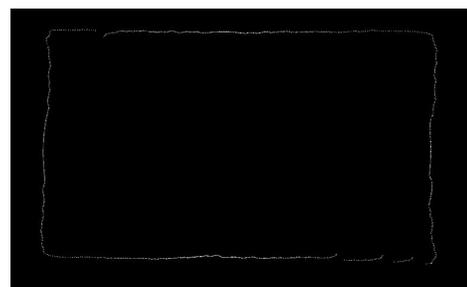


图 14 三维测量图(II).

Fig. 14 The graph of three-dimensional measurement ( II ).

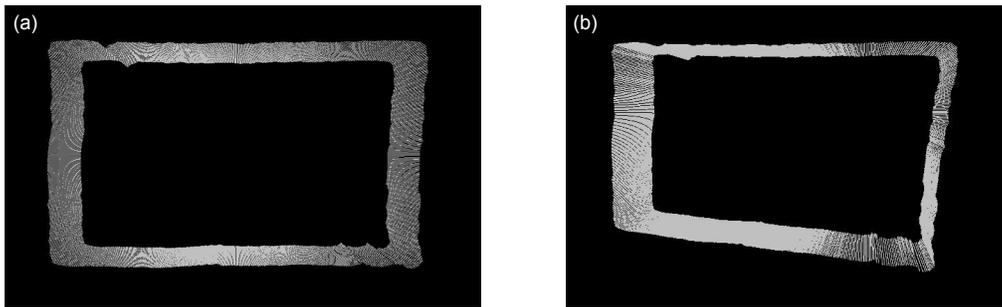


图 15 三维重构图(II). (a) 正面. (b) 旋转一定角度.

Fig. 15 The graph of three-dimensional reconstruction (II). (a) The front. (b) After rotation.

从图 14 所示的三维测量效果来说,还存在着一些不尽人意的地方。以下我们对基于 ASODVS 的三维视觉测量方法进行精度分析,为后续进一步提升视觉测量精度提供改进方向。

## 6 精度分析

在与历史检测模型数据进行对比之前,还需验证本文提出的基于主动式全景视觉的隧道全断面变形检测方法的准确性。

### 6.1 测量误差

隧道检测装置通过 MT-R 机器人改装而成,使用前需对其进行多种测量校正。其中对激光点坐标提取的准确度和 ODVS 的标定精度都将直接导致误差的产生。下面通过对设备装配过程、激光点坐标提取等方面进行分析,误差来源主要有以下几种:

1) 硬件设备的误差。圆形激光器、锥形反光镜和 ODVS 之间并没有完全地同轴连接,存在一定的误差,导致圆形激光面并没有完全与该轴线垂直。但是由于实验之前会进行精细的调整,这个误差可以忽略。

2) ODVS 标定的误差。从前文 3.1 节和 3.3 节中可以分析出:若 ODVS 标定参数不够精确,则计算得到的隧道数据集与真实值会存在一定的偏差。通过表 1 可知,ODVS 的标定误差是 0.38 个像素距离,根据式(13)计算实际的测量距离。在该实验场景内,由标定误差导致的测量平均误差为 12.54 mm。

3) 激光中心线的提取误差。激光中心线提取的不准确,必然导致隧道数据集重构误差的产生。该误差主要由实验环境、系统噪声、提取算法准确度和激光亮度引起。把提取得到的亚像素激光中心点还原到全景激光图中,估算利用基于高斯曲线拟合法提取得到的激光中心线与真实值平均像素误差约为 0.25 pixels。

根据式(13)计算出由该误差导致的测量平均误差为 8.28 mm。

4) ODVS 摄像头分辨率为  $640 \times 480$ ,根据式(10)计算得到量化误差为 0.004 mm,根据式(11)可计算得到量化误差对应的像素距离为 0.72,也就是说实际上的  $\|u''\|$  与理论上的  $\|u''\|$  存在标定误差,通过  $\|u''\| + 0.72$  表示理论上的像素距离,并用式(13)来计算实际的测量距离。经过分析,在该实验场景内,由量化误差导致的测量平均误差为 23.59 mm,若精度要达到隧道变形检测要求的 0.5 mm,摄像机分辨率需提升至  $3072 \text{ pixels} \times 2304 \text{ pixels}$ 。

### 6.2 误差分析

经过对实验装置的调整、程序参数的修正之后,得到走廊的三维重构图。随机对第一个实验中的一个截面进行误差分析。图 16(a)为其中一个截面的重构图;图 16(b)为该重构截面与真实截面(红线方框部分)的对比图。表 2 为截面宽度和高度的分析表,高度平均测量值为 2878.62 mm,平均误差为 26.9 mm,平均相对误差为 0.94%。宽度平均测量值为 2689.2 mm,平均误差为 60.9 mm,平均相对误差为 2.31%。表 3 是重构的截面面积和真实截面面积的分析表,其中不含门部分的重构面积为  $7.7412 \text{ m}^3$ ,相对误差为 0.25%,包含门部分的重构面积为  $8.3395 \text{ m}^3$ ,相对误差为 0.13%。表 4 为特征点位置分析表,平均相对误差为 0.81%。

从图 16(b)单截面误差对比图来看,本应是红色直线部分,在重构时的线条不直。这是由于全景激光光源全景投射误差所致,全景激光光源是由圆锥形镜面、透明外罩、圆形激光发射器所构成,这三个部件的制作误差以及装配质量好坏都会导致全景激光光源全景投射误差。本文中,圆锥形镜面是采用注塑成型镀膜工艺生产的,为了减少圆锥形镜面的上下两端受到塑

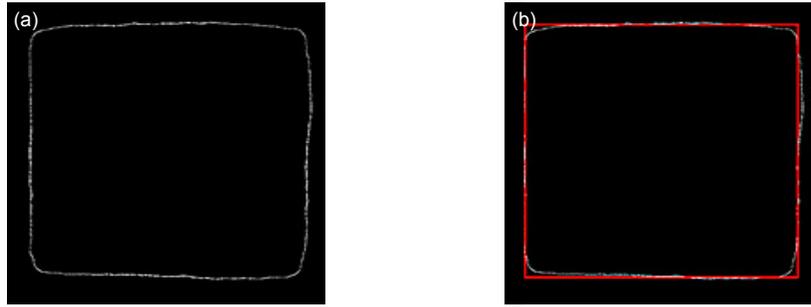


图 16 单截面误差分析。(a) 单截面重构。(b) 对比图。

Fig. 16 The error analysis diagram of cross section. (a) Single section reconstruction. (b) Comparison chart.

表 2 高度和宽度分析表。

Table 2 Height and width analyses.

	测量值/mm	实际值/mm	相对误差/(%)
高 度	2835.2	2860	0.86
	2872.9	2860	0.45
	2867.4	2860	0.25
	2915.0	2860	1.92
	2907.6	2860	1.66
	2873.6	2860	0.48
宽 度	2648.5	2640	0.32
	2735.6	2640	3.62
	2728.3	2640	3.34
	2705.2	2640	2.47
	2712.7	2640	2.75
	2605.0	2640	1.33

表 3 截面面积分析表。

Table 3 Sectional area analyses.

面积	测量值/m <sup>3</sup>	实际值/m <sup>3</sup>	相对误差/(%)
不含门	7.7412	7.5504	0.25
包含门	8.3395	8.3384	0.12

表 4 特征点位置分析表。

Table 4 The location of feature point analyses.

特征点	测量值/mm	实际值/mm	误差/(%)
A	(-1289, 1446)	(-1320, 1430)	0.46
B	(1306, 1453)	(1320, 1430)	0.39
C	(-1309, -1405)	(-1320, -1430)	1.33
D	(1358, -1423)	(1320, -1430)	1.07

料收缩的影响, 本文利用圆锥形镜面的中间部分进行反射。透明外罩是选用了市售的塑料透明管, 由于加工工艺的问题, 未达到光学级的加工要求。在图 14 和图 16 中所示的测量图像中发现有明显的波纹, 由于塑料透明管生产过程中所产生的拉纹所致。关于圆形激光发射器也有自身的投射误差。上述三个部件的制作误差在装配后会综合反映为全景投射误差。提高全景激光光源的加工及装配精度是减少全景投射误差的有效方法, 即圆锥形镜面、透明外罩、圆形激光发射器的生产制作必须符合光学级的加工要求。

## 7 结 论

实验研究表明, 本文提出的基于主动式全景视觉的隧道全断面变形检测方法能快速获取全景范围内隧

道内壁表面的三维坐标数据, 其特点和创新之处如下:

1) 利用配置有主动激光全景视觉的隧道检测装置来高效获取隧道内壁三维点云信息, 可望成为一种自动化、智能化隧道健康体检全新的解决方案。

2) 提出的隧道全断面变形检测方法具有检测速度快、实时性好、数据全面、可视化程度高等优点。隧道内壁点云数据采集始终以 ODVS 的单视点  $O_m$  作为坐标原点, 提高了隧道数据集的存储、操作、运算和建模效率。

3) 将全景成像与全景激光扫描技术进行融合, 即能快速获取隧道内壁的三维坐标数据, 又能对隧道内壁全景图像上的纹理、颜色等进行分析处理, 为今后隧道内壁的其他危害, 如渗水、裂缝等检测提供数据支撑。

但是也存在不足:未能解决基于影像的自动测量系统的测量精度问题,原因在于成像芯片的分辨率不高、硬件装置的固有误差和实验过程中的偶然误差。下一步将对装置进行改进。

由于本文限制于原理研究,在实验中仅仅模拟平直隧道的形状,今后的研究工作将对三维重建精度进行提高并配备具有高速高清的ASODVS隧道检测装置对实际隧道进行实验研究,考虑到隧道内环境复杂等因素,在拍摄全景图,计算三维坐标前需要对拍摄系统进行标定,以弥补误差,提高精度,另外还需要进行多次实验,不断优化程序和算法,增强程序的鲁棒性和功能性,提高计算精度和计算速度,希望得到更为贴近实际应用的实验数据。

## 致谢

本文研究得到了国家自然科学基金“主动三维立体全景视觉传感技术研究”项目(61070134)的资助,同时也得到了研究所各位同仁的指导和帮助,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- Wu Bin, Yang Song. Research of measurement technology of non-orthogonal shaft laser theodolites[J]. *Laser Technology*, 2015, **39**(5): 603–609.  
吴斌, 杨松. 非正交轴系激光经纬仪测量技术研究[J]. *激光技术*, 2015, **39**(5): 603–609.
- Zeng Dinghua, Zhang Yongxing, Yin Ke, et al. Application of diagonal measurement method in the displacement monitoring of tunnel[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, **32**(5): 113–115.  
曾鼎华, 张永兴, 阴可, 等. 三角形量测法在隧道变形监测中的应用研究[J]. *水文地质工程地质*, 2005, **32**(5): 113–115.
- Wang Taidian, Zhuang Haiyue, Qiu Yazhu, et al. The application of micro-transformer monitor for the operation of the tunnel stability assessment[J]. *Supervision Test and Cost of Construction*, 2009, **2**(10): 28–35.  
王泰典, 庄海岳, 邱雅筑, 等. 微变监测在营运中隧道稳定评估之应用[J]. *建筑监督检测与造价*, 2009, **2**(10): 28–35.
- Bassett R H, Kimmance J P, Rasmussen C. An automated electrolevel deformation monitoring system for tunnels[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 1999, **137**(3): 117–125.
- Chaiyasam K. Damage detection and monitoring for tunnel inspection based on computer vision[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2014.
- Olsson C, Enqvist O. Stable structure from motion for unordered image collections[C]// *Scandinavian Conference on Image Analysis*. Springer-Verlag, 2011: 524–535.
- Zhou Qicai, Jin Qi, Gao Song, et al. A tunnel cross-section deformation detection system based on laser ranging technology[J]. *Measurement & Control Technology*, 2010, **29**(5): 44–46, 49.  
周奇才, 金奇, 高嵩, 等. 基于激光测距技术的隧道断面形变检测系统[J]. *测控技术*, 2010, **29**(5): 44–46, 49.
- Izvoltova J, Villim A, Kozak P. Determination of geometrical track position by robotic total station[J]. *Procedia Engineering*, 2014, **91**: 322–327.
- Reshetyuk Y. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2006.
- Xie Xiongyao, Lu Xiaozhi, Tian Haiyang, et al. Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3d laser scanning[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(11): 2214–2224.  
谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(11): 2214–2224.
- Seo D J, Lee J C, Lee Y D, et al. Development of cross section management system in tunnel using terrestrial laser scanning technique[C]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, 2008, **36**: 573–582.
- Han J Y, Guo J, Jiang Y S. Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3-D LIDAR point clouds[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, **33**: 186–192.
- Delaloye D. Development of a new methodology for measuring deformation in tunnels and shafts with terrestrial laser scanning (LIDAR) using elliptical fitting algorithms[D]. Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2012.
- Tang Yiping, Ye Yongjie, Zhu Yihua, et al. Research on intelligent Omni-Directional Vision Sensors and their applications[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(6): 1316–1320.  
汤一平, 叶永杰, 朱艺华, 等. 智能全方位视觉传感器及其应用研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(6): 1316–1320.
- Tang Yiping, Wang Qing, Chen Minzhi, et al. Design of stereo Omni-directional vision sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(7): 1520–1527.  
汤一平, 王庆, 陈敏智, 等. 立体全方位视觉传感器的设计[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(7): 1520–1527.
- Mičušík B. Two-view geometry of omnidirectional cameras[D]. Prague: Czech Technical University, 2004.
- Yamashita A, Matsui K, Kawanishi R, et al. Self-localization and 3-D model construction of pipe by earthworm robot equipped with omni-directional rangefinder[C]. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Karon Beach, Phuket, 2011: 1017–1023.