

# 路面三维数据去噪算法

孙朝云<sup>1</sup>,郝雪丽<sup>1</sup>,李 伟<sup>1</sup>,袁梦霞<sup>2</sup>

(1. 长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064; 2. 湖北理工学院 电气与电子信息工程学院,湖北 黄石 435003)

**摘 要:**为了满足路表三维形态精确重构和路面病害检测与特征提取的要求,针对路面激光三维成像系统,结合数字图像滤波处理技术,提出了一种双相标准差滤波法与基于组合结构元素的级联形态学滤波算法相结合的去噪方法,即先对路面三维数据进行双相标准差滤波处理,然后再对其进行基于组合结构元素的级联形态学滤波处理。对整个三维数据、行数据、列数据 3 个方面进行去噪效果分析。研究结果表明:双相标准差滤波法能够很好地滤除高信噪比情况下的脉冲噪声干扰,同时保持路表完整的三维图像细节;基于组合结构元素的级联形态学滤波在低信噪比情况下能有效滤除路表三维数据毛刺类背景噪声的干扰;将这 2 种滤波算法结合可使总噪声、行噪声、列噪声均获得比中值滤波更好的去噪效果。

**关键词:**道路工程;路面;去噪;双相标准差滤波;三维数据

**中图分类号:**U416.2;TP391.9 **文献标志码:**A

## Research of pavement 3D data denoising algorithm

SUN Zhao-yun<sup>1</sup>, HAO Xue-li<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, YUAN Meng-xia<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Electrical and Electronic Information Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, Hubei, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of 3D pavement surface precise reconstruction and feature extraction and detection of pavement distresses, an algorithm was proposed for the laser 3D imaging system of pavement according to digital image filtering processing technology, which combines the biphasic standard deviation average filtering with the cascade morphological filtering algorithm based on composite structural elements. The biphasic standard deviation average filtering was firstly used to denoise the 3D data, which was then processed by the cascade morphological filtering algorithm based on composite structural elements. The denoising effect analysis was done from three aspects, i. e., the whole data, rows data and columns data. Experimental result shows that biphasic standard deviation filtering method has good effect on high SNR filter impulse noise, and keeps the complete 3D image details of road surface. The cascaded morphology filtering method based on composite structural elements has obvious advantages in low SNR, which can effectively filter out the interference of step background noise in road 3d data. The combination of these two methods can achieve a better denoising effect than median filter in the total noise, rows noise and columns noise. 3 tabs, 7 figs, 16 refs.

**Key words:** road engineering; pavement; denoising; biphasic standard deviation filtering; 3D data

## 0 引言

随着光电技术和机器视觉技术日新月异的发展,基于光电方法的非接触式测量技术受到研究人员的关注。新的非接触式测量技术如激光技术、三维全息照相技术在各领域得到了广泛的应用。相应的测量方法有激光三角测量法、双目视觉法、投影光栅测量法、结构光扫描法等<sup>[1-8]</sup>。其中,激光三角测量法是基于结构光三角测量原理、编码技术、光电转换技术及单片机控制技术的非接触式测量系统,其具有测量准确、效率高等优点<sup>[9-11]</sup>。

在路面数据采集过程中不可避免地引入测量噪声。为了得到比较精确的曲面重构模型和好的特征提取效果,有必要对测量数据进行去噪处理。相对于二维 RGB 图像去噪,路面三维数据去噪的研究工作还较少。陈晓明等采用改进双边滤波算法降低噪声,该方法结合 RGB 图像将缺失的深度信息补全,并对深度图像双边滤波法有所改进,但是该方法中深度图像缺失信息位置难以准确定位,导致三维数据不准确<sup>[12]</sup>。目前针对散乱点云的去噪研究较多,主要有 2 种方式:一种是根据散乱点云数据构建网格模型;一种是直接对散乱点云数据进行滤波处理<sup>[13-16]</sup>。基于此,本文对散乱点云数据滤波处理方法进行研究,提出采用双相标准差滤波法与基于组合结构元素的级联形态学滤波算法相结合的方法对数据点进行去噪处理<sup>[12]</sup>。

## 1 三维激光扫描原理

三维激光扫描主要由激光器、3D 相机和 PC 机三部分组成,其原理是结构光三角法。该设备所用的激光器是线阵激光器,用于向被测物体表面投射一束垂直的线状激光,它是通过将半导体激光器输出的点激光束经过圆柱透镜扩束来实现的。3D 相机位于激光器的另一侧,用于捕捉被测物体上激光线的位置。为了获得最佳测量效果,在 3D 相机的镜头前面安放了 1 个激光滤光片,用于滤掉除该激光频段以外的其他杂散光。PC 机上插有用于采集图像信号的以太网接口及用于控制激光器的接口卡等,以达到采集 3D 相机输出图像信号及激光器输出参数的目的。如图 1 所示,线阵激光器发出的激光束经准直聚焦后垂直入射到路面上,由 3D 相机拍摄路面上变形的激光线条进行成像,然后根据结构光三角法计算出路面的三维信息数据。

通过对三维激光扫描设备测量原理的分析可知,当被测表面光泽度比较高或者粗糙度比较低时,

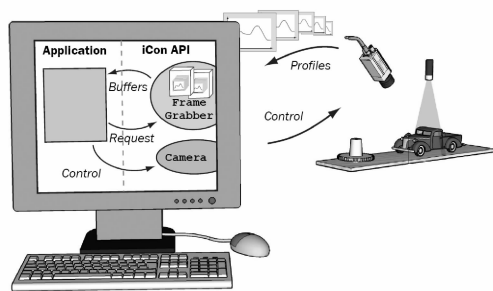


图 1 三维激光扫描设备原理

Fig. 1 3D laser scanning equipment schematic

会使得激光束在漫反射的同时产生较强的镜面反射,反射光强会造成较大的测量误差。比如当被测路面有裸露的石头时,一些光点会随机性地发生镜面反射,从而导致所采集到的三维信息数据里有阶跃的噪声点;又如路面上存在的一些细小的光线无法到达的裂缝处,会使得采集到的三维信息数据里有高度信息为 0 的噪声点。可见由于被检测物体表面对光的镜面反射作用、3D 相机的拍摄角度,以及被检测物体表面的倾斜,都会造成采集到的三维信息数据不连续,或出现丢失和错误的信息。如图 2 所示,图 2(b)为图 2(a)中“口”型框所圈部分图像的局部放大图,可见图像会因为噪声点的影响而使得某一方向出现多条结构光条纹。

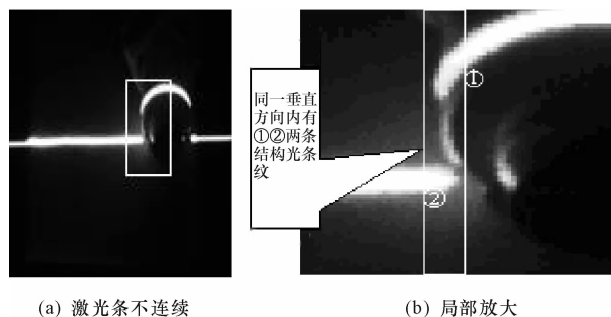


图 2 受噪声影响的三维数据图像

Fig. 2 3D data image affected by noise

由图 2 可知若不对三维信息数据进行去噪处理,这些噪声点将会影响特征数据的精度,其结果将导致重构曲面、曲线不光滑并且会降低模型重构的精度。因而在进行数据处理前必须对采集到的三维信息数据进行去噪处理。

## 2 路面三维数据去噪处理

采用灰度形态学方法对路面三维数据进行去噪处理。灰度形态学 4 个基本的算法是腐蚀、膨胀、开运算和闭运算。

用结构元素  $b$  对信息数据  $f$  进行灰度腐蚀和膨

胀分别记为

$$f \ominus b = \min \{ f(s+x, t+y) - b(x, y) \mid (s+x, t+y) \in D_f, (x, y) \in D_b \} \quad (1)$$

$$f \oplus b = \max \{ f(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x, t-y) \in D_f, (x, y) \in D_b \} \quad (2)$$

式中:  $D_f$ 、 $D_b$  分别为  $f$  和  $b$  的定义域;  $x$ 、 $y$  分别为图像中像素的横、纵坐标;  $s$ 、 $t$  分别为结构元素  $b$  的横、纵坐标;  $\ominus$  为腐蚀符号;  $\oplus$  为膨胀符号。

开运算和闭运算是由腐蚀和膨胀运算组合而成的, 分别记为

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (3)$$

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b \quad (4)$$

其中, 开运算采用先腐蚀后膨胀的方法, 先通过腐蚀运算将比结构元素尺寸小的毛刺和暗点等噪声从信息数据中移除, 然后通过膨胀运算恢复被腐蚀掉的路面边缘特征。开运算在保留比结构元素尺寸大的物体的同时可以移除比结构元素窗口尺寸小的物体, 该特性在激光三维数据去噪中有明显优势。

采集到的激光三维数据中存在大量严重偏离准确值的噪声, 直接采用标准差滤波并不能完全滤除噪声点, 因此本文提出了一种双相标准差滤波法与基于组合结构元素的级联形态学滤波算法相结合的去噪算法。即采用对  $x$  轴标准差滤波滤除突出噪声, 若某行突出噪声多于较准确的值, 采用对  $x$  轴标准差滤波并不能滤除这些噪声, 则需要再对  $y$  轴标准差滤波滤除剩余的突出噪声。由于双相标准差滤波处理后还会存在影响路面特征计算的噪声点, 这些噪声点往往随机分布, 而且多数是孤立点, 所以在双相标准差滤波处理之后再采用形态学的滤波方法进行处理, 将比结构元素尺寸小的毛刺和暗点等从信息数据中移除。

本文提出的双相标准差滤波法与基于组合结构元素的级联形态学滤波算法相结合的算法, 可以较好地消除路面数据采集系统所采集到的数据中的噪声, 该算法主要流程如图 3 所示。

其具体实现如下所述。

(1) 以标准差来度量行、列每个数据点值偏离对应行、列的程度, 将偏离程度超过阈值的数据点认为是噪声点, 并用对应行、列的均值替代该噪声点, 实现方法如下:

(a) 逐行取三维图像数据矩阵  $\mathbf{O}$  的数据, 如第  $i$  行

$$\mathbf{R}_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im}), i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

按式(6)与式(7)求出第  $i$  行数据  $R_i$  的算术平

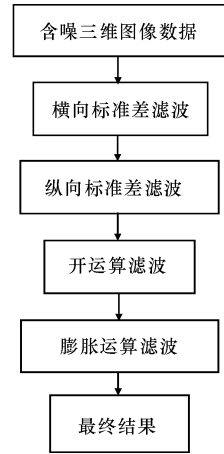


图 3 路面三维数据去噪算法流程

Fig. 3 Pavement 3D data denoising algorithm flow

均值  $\bar{R}_i$  和标准差  $S_i$

$$\bar{R}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (6)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_{ij} - \bar{R}_i)^2} \quad (7)$$

(b) 依次取该行中的每个数据  $z_{ij}$ , 如果满足条件式

$$\frac{|z_{ij} - \bar{R}_i|}{S_i} > k \quad (8)$$

则用算术平均值  $\bar{R}_i$  代替该点数据值  $z_{ij}$ ,  $k$  为行滤波系数, 取 3~8;

(c) 逐行消除图像噪声点后, 用同样的方法逐列处理, 再次消除噪声点, 对所有行处理完毕, 得到三维图像数据矩阵  $\mathbf{O}'$ 。

(2) 采用沿水平夹角  $45^\circ$  方向、 $11 \times 11$  的结构元素模板  $\mathbf{S}_1$  对三维图像数据矩阵  $\mathbf{O}'$  作开运算, 消除细小的尖刺, 也就是去掉孤立的数据点, 沿水平夹角  $45^\circ$  方向、 $3 \times 3$  的结构元素模板如图 4 所示。

0	0	1
0	1	0
1	0	0

图 4 线结构元素模板

Fig. 4 Line structure element template

(3) 采用  $5 \times 5$  的球结构元素模板  $\mathbf{S}_2$  对数据矩阵作膨胀运算, 填充边缘, 消除数据中的零值点, 去噪之后的三维图像数据矩阵  $\mathbf{O}''$  为

$$\mathbf{O}'' = (\mathbf{O}' \mathbf{S}_1) \oplus \mathbf{S}_2 \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{O}''$  为去噪后的三维图像数据。

### 3 路面三维检测试验结果与分析

为了检验该去噪方法的滤波效果, 对系统采集

的路面表面三维图像数据,首先定性的进行滤波效果分析,结果如图 5、图 6、下页图 7 所示。

图 5~图 7 中,图(a)是采集到的原始数据三维显示图,图(b)是用双相标准差均值滤波与形态学滤波结合处理的效果图,图(c)是中值滤波处理效果图。由效果图可以定性地看出本文滤波算法在滤除噪声的同时,保留了路面表面的三维形态特征,相比中值滤波取得了更好的效果。

再定量分析滤波的效果,本文分别从行方向、列方向和整幅三维图像数据 3 个角度进行分析。整幅三维图像数据的总平均值  $\bar{S}$  为

$$\bar{S} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f(m, n) \quad (10)$$

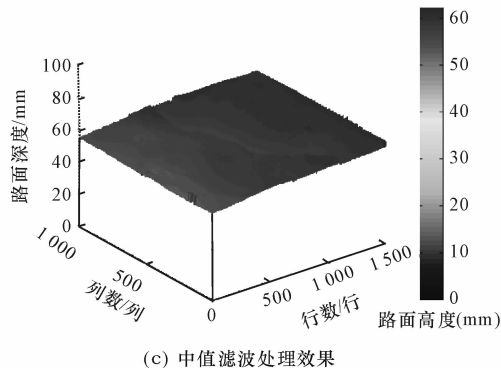
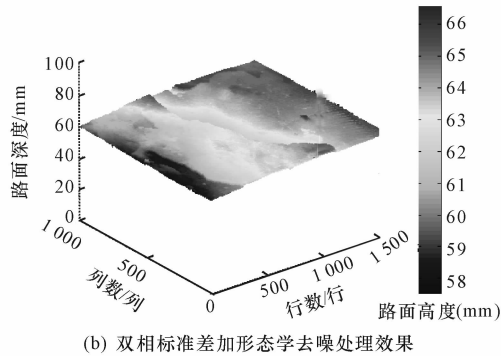
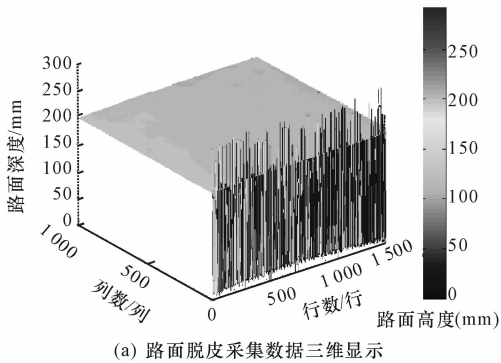


图 5 路面表面三维数据样本 1 处理效果

Fig. 5 Pavement surface 3D data processing result of sample 1

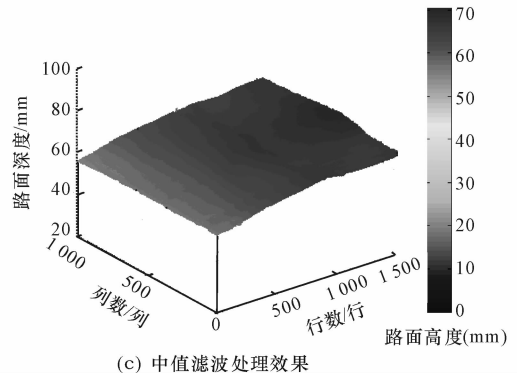
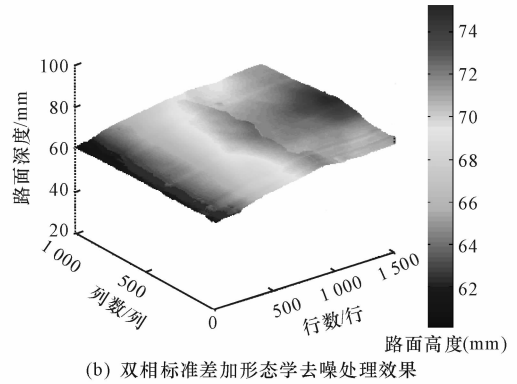
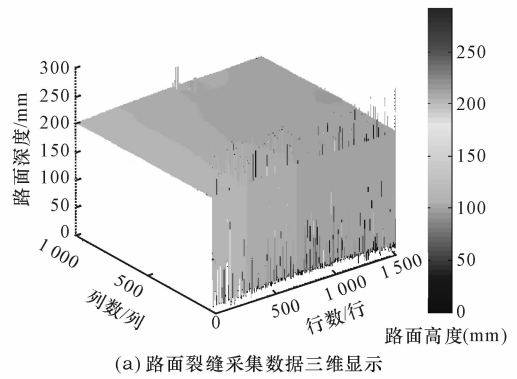


图 6 路面表面三维数据样本 2 处理效果图

Fig. 6 Pavement surface 3D data processing result of sample 2

三维图像数据的行平均值  $\bar{S}(x)$  为

$$\bar{S}(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f(m, n) \quad (11)$$

三维图像数据的列平均  $\bar{S}(y)$  值

$$\bar{S}(y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(m, n) \quad (12)$$

整幅三维图像数据总噪声的均方值  $\delta^2$  为

$$\delta^2 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |f(m, n) - \bar{S}|^2 \quad (13)$$

行噪声均方值  $\delta_x^2$  为

$$\delta_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |f(m, n) - \bar{S}(x)|^2 \right] \quad (14)$$

列噪声均方值  $\delta_y^2$  为

表 2 路面裂缝数据去噪前后噪声比较

Tab. 2 Pavement crack data noise comparison between before and after denoising

噪声类型参数	$\delta$	$\delta_x$	$\delta_y$
去噪前	6.600 1	4.118 8	6.533 6
本文方法去噪后	1.087 1	1.045 2	0.469 2
中值滤波后	1.645 3	1.610 0	1.227 6

表 3 路面填缝料缺失数据去噪前后噪声结果

Tab. 3 Pavement surface voids data noise comparison between before and after denoising

噪声类型参数	$\delta$	$\delta_x$	$\delta_y$
去噪前	7.933 2	6.545 9	6.153 4
本文方法去噪后	5.361 0	5.202 6	1.699 0
中值滤波后	5.712 4	5.552 9	2.190 4

从表 1~表 3 可以看出,经过本文给出的去噪算法处理后,总噪声、行噪声、列噪声均比中值滤波取得了更好的去噪效果,尤其是对凹凸不平的路面表面去噪效果更显著。

由此可见,运用中值滤波可以较好地消除路面数据采集系统所采集到数据中的噪声,但仍存在一些比较明显的噪声点,而且模糊了路面表面的三维形态特征。经过对多种方法的多次试验、尝试,选取双相标准差滤波与形态学滤波相结合的去噪处理算法,先对采集到的三维数据进行双相标准差滤波处理,再对其进行形态学滤波处理,不仅消除了数据中的孤立噪声点,而且保留路面表面的三维形态特征,取得了较好的去噪效果。

4 结 语

(1) 对路面表面三维数据去噪方法中双相标准差滤波法能够很好地滤除高信噪比情况下的脉冲噪声干扰,同时保持路表完整的三维图像细节。

(2) 基于组合结构元素的级联形态学滤波是对三维信息数据采用灰度形态学滤波的方法,该方法在低信噪比情况下有明显的优势,能有效滤除路表三维数据毛刺类背景噪声的干扰。

(3) 双相标准差滤波法与基于组合结构元素的级联形态学滤波算法相结合方法,优势互补,使总噪声、行噪声、列噪声均获得了比中值滤波等更好的去噪效果,尤其是对凹凸不平的路面表面去噪效果更显著,为后续路表三维形态的重构和特征提取与检测提供了科学依据,具有较强的实用价值。

参考文献:

References:

[ 1 ] Klimanov M M. Triangulating laser system for meas-

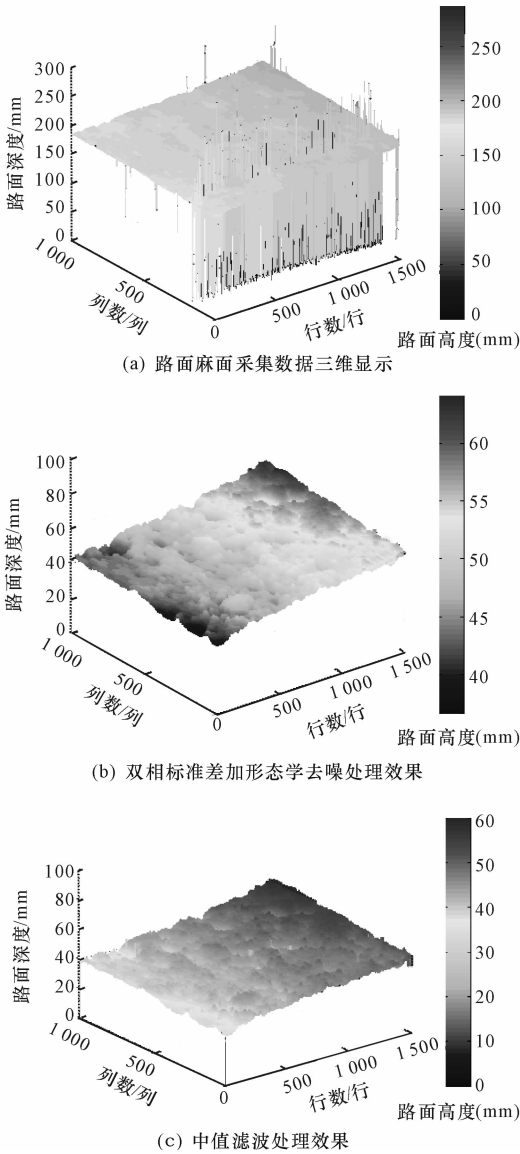


图 7 路面表面三维数据样本 3 处理效果图

Fig. 7 Pavement surface 3D data processing result of Sample 3

$$\delta_y^{\infty} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f(m,n) - \bar{S}(y)|^2 \right] \tag{15}$$

式中: $M$ 、 $N$  分别为图像的行数、列数; $m$ 、 $n$  分别为行、列序号; $f(m,n)$  为灰度函数。

对系统采集的 3 组路面三维图像数据,采用基于形态学的激光三维数据去噪算法前后和中值滤波后分别利用式(10)~式(15)求总噪声  $\delta$ ,行噪声  $\delta_x$ ,列噪声  $\delta_y$ ,噪声结果如表 1~表 3 所示。

表 1 路面脱皮数据去噪前后噪声比较

Tab. 1 Pavement surface peeling data noise comparison between before and after denoising

噪声类型参数	$\delta$	$\delta_x$	$\delta_y$
去噪前	13.419 7	12.069 2	13.132 0
本文方法去噪后	3.716 2	3.603 0	2.818 1
中值滤波后	6.183 6	6.120 3	5.755 3

- urements and inspection of turbine blades[J]. Measurement Techniques, 2009, 52(7): 725-731.
- [2] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(1): 50-53.  
LU Jin-ren, HUANG Yuan-qing. The surface morphology using laser triangulation measurement[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2004, 43(1): 50-53. (in Chinese)
- [3] 王晓嘉, 高 隼, 王 磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4S): 601-608.  
WANG Xiao-jia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation[J]. Instrument Journal, 2004, 25(4S): 601-608. (in Chinese)
- [4] 唐 戎, 王方程, 李小鹏, 等. 基于激光三角法原理的轮对几何参数自动检测系统[J]. 制造业信息化, 2009(7): 92-94.  
TANG Rong, WANG Fang-cheng, LI Xiao-peng, et al. Based on laser triangulation method principle of wheelset geometric parameters automatic detection system[J]. Manufacturing Informatization, 2009(7): 92-94. (in Chinese)
- [5] Acosta D, Acosta D, Garcia O, et al. Laser triangulation for shape acquisition in a 3D scanner plus scan [C]//IEEE. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. New York: IEEE Press, 2006: 14-19.
- [6] 英 红, 谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 247-252.  
YING Hong, TAN Zhi-ming. Cement concrete pavement in the dislocation detection based on binocular vision method [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(2): 247-252. (in Chinese)
- [7] 张广军, 魏振忠, 孙军华. 一种光栅投射与识别方法: 中国, 1928491[P]. 2007-03-14.  
ZHANG Guang-jun, WEI Zhen-zhong, SUN Jun-hua. A grating projection and recognition method: China, 1928491[P]. 2007-03-14. (in Chinese)
- [8] 周富强, 李 颖, 蔡斐华. 一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法: 中国, 101762243A[P]. 2010-06-30.  
ZHOU Fu-qiang, LI Ying, CAI Fei-hua. A constrained space three-dimensional morphology structure light vision measuring method: China, 101762243A[P]. 2010-06-30. (in Chinese)
- [9] 马荣贵. 路面三维检测系统原理及方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- MA Rong-gui. Research on the theory and method of the pavement 3D detection system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [10] 孙朝云, 沙爱民, 姚秋玲, 等. 沥青混合料自动检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(4): 353-357.  
SUN Zhao-yun, SHA Ai-min, YAO Qiu-Ling, et al. Research on the automatic measurement system of the asphalt mixture[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(4): 353-357. (in Chinese)
- [11] 张 娟, 沙爱民, 高怀钢, 等. 基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(2): 18-22.  
ZHANG Juan, SHA Ai-min, GAO Huai-gang, et al. Automatic pavement crack recognition and evaluation system based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 18-22. (in Chinese)
- [12] 陈晓明, 蒋乐天, 应忍冬. 基于 Kinect 深度信息的实时三维重建和滤波算法研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(4): 1212-1218.  
CHEN Xiao-ming, JIANG Le-tian, YING Ren-dong. Research of 3D reconstruction and filtering algorithm based on depth information of Kinect[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(4): 1212-1218. (in Chinese)
- [13] 陈大力. 数字图像处理中去噪算法的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
CHEN Da-li. Research on de-noising algorithms in digital image processing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
- [14] 刘立国. 点云模型的光顺去噪研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
LIU Li-guo. Studies on denoising and smoothing of point-based mode[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [15] 王丽辉. 三维点云数据处理的技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
WANG Li-hui. Study on data processing technology of 3D cloud points[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [16] Rafael C G, Richard E W. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮智宇, 译. 2 版. 北京: 北京电子工业出版社, 2007.  
Rafael C G, Richard E W. Digital image processing [M]. Translated by Ruan Qiu-qi, Ruan Zhi-yu, 2nd. Beijing: Electronic Industry Press, 2007. (in Chinese)