

基于平面标靶的三维扫描与数据配准

袁聪聪, 张志毅⁺

(西北农林科技大学 信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为构建以三角测量为基础的结构光三维扫描系统, 实现多方位扫描结果的数据配准, 提出一种基于简易平面标靶的标定方法, 利用平面标靶中的特征点对扫描系统进行姿态和位置标定。在扫描时, 利用平面标靶上的特征点求出激光平面, 计算得到三维点云数据; 根据移动前后标靶图像上特征点信息, 计算扫描系统的外部参数, 即平移旋转矩阵, 实现多方位扫描数据的配准。实验结果表明, 在距离 45 cm 处, 几何投影变换求得的平面方程误差小于 0.5%, 每幅图像处理的时间小于 60 ms, 误差低于 1.15 mm, 基本满足三角测量稳定可靠、精度高、成本低、较适合现场标定等要求。

关键词: 结构光; 三维扫描; 平面标靶; 点云数据配准; 摄像机姿态

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2016) 02-0487-06

doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2016.02.039

3D scanning and data registration based on easy plane calibration board

YUAN Cong-cong, ZHANG Zhi-yi⁺

(College of Information Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: To build the structured light 3D scanning system based on triangulation and to realize the data registration of multidimensional scan results, a calibration method based easy plane calibration board was proposed. Naturally, the scanning system's pose and position were calibrated using the feature points in plane calibration board. When scanning, the laser plane was solved and the three-dimensional point-cloud data were obtained using information of the feature points in plane calibration board. According to the features information on the image by moving plane calibration board before and after, the scanning system of external parameters, namely translate and rotation matrix, could be obtained to achieve multiple scan data for registration. Experimental results show that the error of the solved plane equation is less than 0.5% through the geometric projective transformation at the distance of 45 cm. Each image processing time is less than 60 ms, while the error is less than 1.15 mm. The results show that the proposed method is stable, accurate, low-cost, and meets field calibration requirements.

Key words: structured light; 3D scanning; plane calibration board; point cloud registration; camera pose

0 引言

为获取待测物体表面三维坐标信息, 提出线结构光三维扫描, 可实现对待测物体的非接触测量, 在逆向工程发挥着越来越重要的作用, 在诸多领域都有着广泛的应用^[1-3]。随着近年来 CCD 传感器的迅猛发展, 激光器结合摄像机构建而成的三维扫描系统已经实现了低成本、高精度、易于携带和操作要求的部分理论探讨和技术研发。一般地, 每次扫描只能得到所测物体单侧表面离散点集的三

维坐标信息, 人们将这些三维信息称为点云。当要获得物体整体的三维点云数据时, 通常采用平移和旋转扫描方式来实现^[4]。扫描系统在移动之后进行再次扫描所获得的数据, 会因为与首次扫描的基准点和基准平面不统一而需要数据配准。为解决该问题, 需要获得每次扫描相对于首次扫描基准点和基准平面的位置和姿态信息。通常为获得这些姿态信息需要借助高精度的辅助设备, 比如惯导系统和陀螺仪, 这一方面增加了系统设计的成本, 另一方面还增加了系统校准的难度以及计算的复杂度。文献 [5, 6] 介

收稿日期: 2015-02-20; 修订日期: 2015-04-30

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划基金项目 (2013AA10230402); 中央高校西北农林科技大学基本科研业务费基金项目 (QN2013054)

作者简介: 袁聪聪 (1988-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为计算机图形学与数字图像处理; ⁺通讯作者: 张志毅 (1974-), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 会员, 研究方向为计算机图形学、机器视觉、精密仪器设计等。

E-mail: 815802490@qq.com

绍了基于图像的标定方法，但是其标定板和标定算法都很复杂，时间复杂度不好；文献 [7, 8] 也给出了三维激光扫描系统的设计，扫描精度高，但是所需设备成本太高。针对算法设计和系统校准的复杂度，以及降低设计成本的情况下，本文提出了一种手持式操作简单、精度高的设计方案——基于平面标靶的线结构光三维扫描系统的标定和构建，只需一些特征点就可以进行系统的标定和扫描结果的计算以及半球空间内 360° 自由配准。

1 三维扫描原理

本文采用三角法式三维激光扫描，三角法测距用在三维激光扫描技术上，利用三角形几何关系，计算获得扫描中心到扫描对象的距离。

1.1 系统设计

实验中采用一种线激光器，线激光器发射一束激光到物体表面上，由于表面的不同几何形状，激光条会发生变形而出现在摄像机视野的不同位置，然后通过摄像机获取含有激光光条的物体图像。物体表面的激光光条中心的各点、摄像机中心以及激光源原点组成一系列三角形，此技术称作三角法式测距^[9]。如图 1 所示的三维激光扫描系统构造原理。

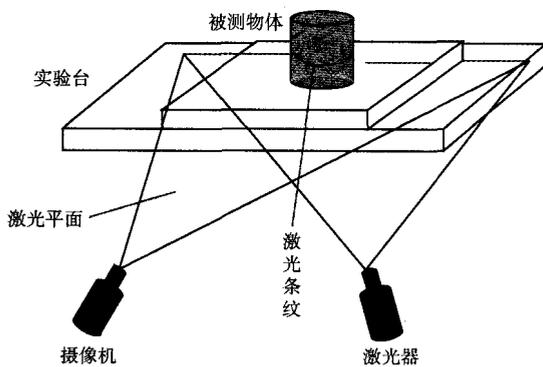


图 1 三维激光测量原理

从图 1 可以看出，三维激光扫描系统主要包含激光源、摄像机、被测物体以及参照物实验台等。作为激光三维扫描系统最基本的构造，扫描过程中激光源在物体上留有激光条纹，摄像机获取含有激光条纹的物体图像，之后提取图像中光条中心，最后根据一系列几何计算得到物体在空间中的三维坐标信息。

1.2 标定板设计

本文基于成本以及系统姿态的标定难易问题，自主设计了一个新式的标定板，抛弃价格昂贵的惯导设备。在对系统姿态的标定上完全采用标定点数来确定方位，标定点识别上面更加容易，只需提取标定板上的黑色圆圈圈心作为标定点，而且利用标定点可以实现数据配准，是一种新型的自主创新的方法。在本研究中设计了如图 2 所示

的平面标靶，在平面标靶中可以看到有主要的 4 个黑圆圈，以及周围一些相对较小的黑圆圈。

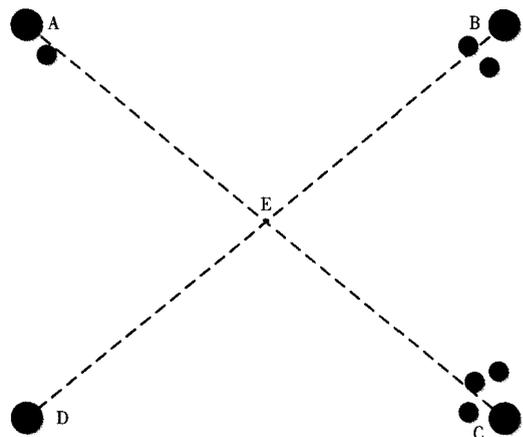


图 2 平面标靶

为了更好地描述本文的标定算法，在图 2 所示中的平面标靶上加入了主要点的表示符号 A-E，以及两条对角线。其中 A-D 位于矩形的 4 个顶点，E 为对角线的交点。A-E 这 5 个点主要用于计算平面标靶的平面方程、实验平台的平面方程以及激光平面方程，而其余相对较小的黑色圆圈主要用于标记系统姿态，以主点周围小点的数目 0-3 来表示 4 个方位，因此可以简单的获取扫描系统的位置姿态。

摄像机获取平面标靶的图像信息，求出标定板中的特征点，利用最小凸包算法求得本文所要使用的 A-D 这 4 个主点，以及它们周围小点的数目进行标记扫描系统姿态位置。本文采用 Zhang Zhiyi 等^[10]提出的几何投影变换算法求得 A-E 这 5 个点的空间坐标。

如图 3 所示，这是一个平面标靶上特征点 A、C、E 在摄像机上的成像模型。E 为 AC 的中点，O 为摄像机中心，A'、C'、E' 为 A、C、E 在投影图像平面上的投影点，其中 E' 虚拟的，是平面标靶上 A-D 在投影平面上的投影 A' C' 与 B' D' 的交点。需要通过两直线相交的算法求出 E'。设 AE=CE=d，距离 d 的值是已知的，O 到投影平面的距离即为摄像机焦距 f，A'、C'、E' 的坐标根据提取图像特征点可以得知，设坐标 A=t1 * A'，C=t2 * C'，E=t3 * E'，因为 E 是 AC 的中点，所以得出 t3=(t1+t2)/2。因此根据透视投影几何原理，可以得到方程^[9]

$$\begin{cases} |t1 * A' - t3 * E'| = d \\ |t2 * C' - t3 * E'| = d \\ |t1 * A' - t2 * C'| = 2d \\ t3 = \frac{t1 + t2}{2} \quad (t1, t2, t3 > 0) \end{cases} \quad (1)$$

方程组 (1) 只有 t1, t2, t3 是未知的，因此三组方程加上一个辅助方程可以唯一的求解出 t1, t2, t3，又因为 A=t1 * A', C=t2 * C', E=t3 * E'，因此可求出 A、C、

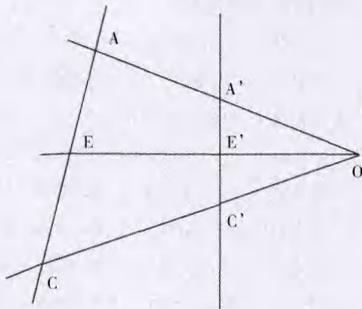


图 3 几何投影变换

E 三点的相对于摄像头中心原点的空间位置坐标值。同理求出 B、D 相对于摄像头中心原点的空间位置坐标值。至此可以求出平面标靶上的 4 个主要点 A-D 相对于摄像机中心的空间三维坐标, 因此利用空间四点最小二乘法平面拟合的算法求出平面标靶的方程。令空间平面方程为

$$Ax + By + Cz + 1 = 0 \quad (2)$$

由方程 (2) 可以得出平面法向 $n = (A, B, C)$, 设测量点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 点 P_i 到拟合平面的有向距离为 $d_i = nP_i + 1$, 根据最小二乘法原理, $S = \sum d_i^2$ 要最小, 因此用 S 分别对 A、B、C 求偏导, 得出三组三元一次方程

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial C} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由方程 (3) 可以求出平面标靶的平面方程, 记为方程 $F(P)$ 。

1.3 激光平面标定

在计算激光平面方程的时候, 需要借助一个平台, 此平台与平面标靶平行, 平台平面与平面标靶平面的距离为 m 已知, 因此利用两平面平行以及已知其中一平面的方程和两平面的距离可以求出另一个平面^[10], 因此, 由平面标靶平面方程 $F(P)$ 和距离 m 可以求出平台平面方程, 记为方程 $F(P')$ 。激光平面的求解如图 4 所示。



图 4 激光平面标定

在图 4 中, 激光条纹分别落在物体、平面标靶以及辅助平台上, 在平面标靶上和辅助平台上分别找到激光条中心上的两个点, 如图 4 中的白色激光条上的黑色点, 然后利用平面标靶的平面方程 $F(P)$ 以及辅助平台平面方程 $F(P')$ 求出这 4 个点的空间三维坐标, 最后利用方程 (2)、方程 (3), 采用最小二乘法拟合平面的方法求出激光平面方程。为了精确求出激光平面方程必须准确的提取光条中心点。

1.4 半球空间内 360° 点云配准

三维旋转和平移配准是本文的一个重要研究内容, 因为我们要把所有三维坐标在一个坐标系下表示, 因此会假设摄像机初始位置的摄像机坐标系为世界坐标系, 然后在摄像机和扫描仪移动过程中, 将其它姿态下获得的点云转换到世界坐标系下, 因此需要三维旋转和平移配准。其中旋转参数和旋转参数的计算是通过一次移动之间获得的不同两个标定板上的标定, 通过标定之间的几何关系, 解方程组求得平移和旋转参数。本文采用罗德里格矩阵法计算转换参数^[11], 转换过程如方程 (4)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_T = \lambda \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \lambda R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_S \quad (4)$$

式 (4) 左边是目标坐标系下的坐标, 右边 (下标为 S) 原坐标系坐标, λ 为尺度因子, 表示两坐标系上的单位大小之比, R 为旋转矩阵, $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]^T$ 为平移矩阵。

已知基本转换过程 (4) 以及平面标靶平移旋转前后两次标定 A-D 这 4 个点的空间坐标, 采用文献 [7] 使用的方法三点法计算转换参数, 即可计算出旋转矩阵以及平移矩阵。其中三对配准点的选择采用 4 个点中取 3 个, 可以取 4 组, 计算的结果求平均。在此, 以初始摄像头中心位置为世界坐标系, 之后在扫描移动过程中都要利用这种配准方法是目标物体上的点云数据全在这个世界坐标系下。

1.5 摄像机标定

在三维扫描过程中摄像机的标定是必不可少的一环。摄像机标定是计算机视觉中一个非常基础和关键的问题, 目的是为了计算出摄像机的参数, 即内部和外部参数。外部参数描述摄像机在世界坐标系中的位置和方向, 内部参数主要描述摄像机内部光学和几何特性。通过构建适当的几何数学模型, 得到世界坐标系与二维图像坐标系之间的几何映射关系, 最后能够快速计算得到摄像机内外参数。常用的标定算法主要有张正友标定算法和基于一阶径向畸变的 Tsai 标定算法。这两种标定过程比较难以控制, 计算复杂, 因此本文采用了 ZHANG Zhiyi 设计的一种标定算法^[10], 此标定算法需要一个类似棋盘格性质的人工参照物, 而本文所设计的平面标靶正好适用于此算法的摄像机标定。

2 测量实验与结果

上述一节描述了三维扫描的原理，根据这些扫描方法，在微软的 Windows 7 操作系统下开发工具选用 VS2008，开发语言是 C/C++ 以及 OpenCV 2.4 版本的图像处理库。采用罗技 Pro9000 摄像机以及 650 nm 的 5 mw 一字线激光笔，自制平面标靶并构建实验平台。

2.1 扫描过程

扫描系统首先在扫描物体的一个方向，然后手持激光器上下扫描物体，在物体上显现激光条纹，摄像机提取含有激光条纹的物体，接着对激光条纹中心点进行提取，光条中心的提取方法采用灰度重心法^[10,12-15]，计算出光条在第 k 列的中心点，采用跟踪法计算第 $k+1$ 列，采用在第 k 列中心点的基础上的一定阈值内进行搜索。摄像机中心与成像平面上激光条纹中心的任一点可确定一条直线，此直线与上节所求激光平面相交于一点，利用已知直线方程和平面方程相交的几何关系，求解得到的交点就是物体表面相应点的三维坐标值，上述是在以摄像机中心为原点的坐标系中计算。

通过上述求解方法可计算出待测量物体的表面三维坐标集合，设为点云 $P_1\{p_1, p_2, p_3 \dots\}$ 。然后将扫描系统变换到其它方位进行扫描，连续变换三次，得到物体表面三维坐标集合分别为点云 $P_2\{p_1, p_2, p_3 \dots\}$, $P_3\{p_1, p_2, p_3 \dots\}$, $P_4\{p_1, p_2, p_3 \dots\}$ ，就可以在 4 个方位扫描完成整个物体，最后利用前面所介绍的点云配准，将 P_2 、 P_3 、 P_4 经过平移旋转到 P_1 所在的坐标系下得到物体完整的点云数据。即可完成半球空间内 360° 点云数据配准，重建时对冗余数据进行处理即可。

三维扫描系统如图 5 所示。

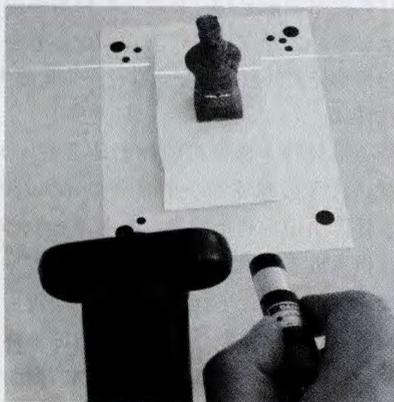


图 5 三维扫描系统

2.2 点云配准参数

以下 RT_1 , RT_2 , RT_3 分别是逆时针旋转平移 3 次后所求的旋转平移矩阵。计算过程采用文中的算法进行求取

结果，所得到的结果如下所示

$$RT_1 = \begin{bmatrix} 0.4035 & -0.8892 & -0.4555 & 676.598 \\ 0.9493 & 0.1053 & -0.2963 & 589.8 \\ 0.3114 & -0.4453 & 0.9395 & 486.64 \end{bmatrix}$$

$$RT_2 = \begin{bmatrix} 0.6587 & -0.0760 & -0.2741 & 531.91 \\ -0.1655 & -0.7329 & -0.3200 & 142.7 \\ -0.2314 & 0.3521 & -0.4069 & 582.24 \end{bmatrix}$$

$$RT_3 = \begin{bmatrix} 0.9969 & 0.9173 & -0.0370 & 496.52 \\ 0.8859 & -0.2916 & -0.2488 & 564.04 \\ -0.2402 & 0.0716 & -0.2681 & 414.28 \end{bmatrix}$$

2.3 系统扫描精度分析

在平面标靶上， $AB = CD = 236.5\text{mm}$, $AD = BC = 174.5\text{mm}$ ，在系统中主要用到的几何投影变换方法得到的结果如表 1 所示，其中“ d_1, d_2, d_3, d_4 ”表示 AB、BC、CD、AD 计算出来的长度。“ E_A ”表示最大绝对误差，“ E_R ”表示最大相对误差，见表 1。

表 1 投影变换法标定结果

d_1	d_2	d_3	d_4	E_A	$E_R/\%$
237.65	173.81	237.54	180.23	1.15	0.486

表 1 中的 3 组标定数据，在距离 45 cm 处扫描最大绝对误差为 1.15 mm，相对误差小于 0.5%，标定点的精确度决定了整个系统的扫描精度。

2.4 扫描结果

用本文所述方法开发的三维扫描系统，在室内扫描了一个兵马俑模型。图 6 是待扫描原始模型，图 7 显示扫描的结果，在位置 1 处显示图像共有 14 879 个数据点，在位置 2 处有 13 765 个数据点，在位置 3 处有 13 843 个数据点，在位置 4 有 13 276 个数据点。



图 6 原图像

3 结束语

本文提出一种基于平面标靶的线结构光三维扫描的标

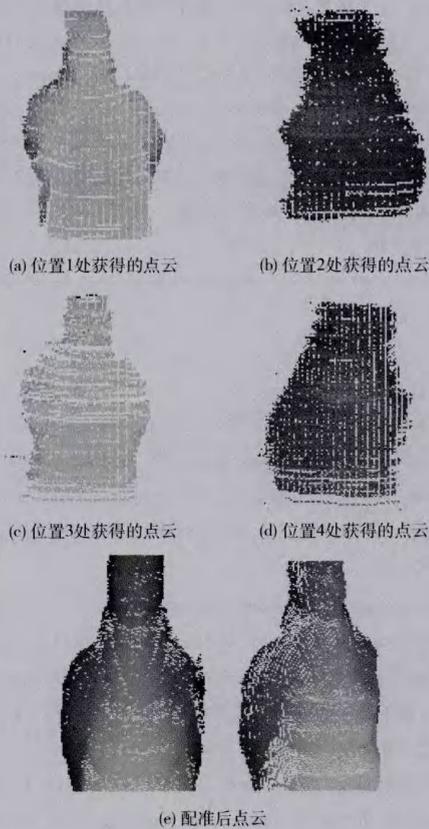


图7 扫描结果图像

定方法以及利用平面标靶上的特征点计算三维坐标的完整方法。改进了标定板设计的复杂度以及点云配准的难度。经过几何投影变换求解平面标靶的平面方程的精度最大相对误差小于0.5%，巧妙地借用了平面标靶与实验台这两个平面，实现了一种快速的激光平面标定方法。利用平面标靶标定扫描系统的位置和姿态的方法，能够简单快速的进行半球空间内360°点云配准，具有很高的应用价值。实验结果表明，在距离45 cm处扫描最大绝对误差为1.15 mm，相对误差小于0.5%，每副图像的处理时间少于60 ms，操作简单，稳定可靠，并且使硬件成本大大降低，比较适合现场标定。

参考文献:

- [1] ZHOU Sen, GUO Yongcai, GAO Chao. Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder work-pieces based on 3D laser scanning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 22 (6): 1524-1530 (in Chinese). [周森, 郭永彩, 高潮. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22 (6): 1524-1530.]
- [2] LAO Dabao, YANG Xueyou, ZHU Jigui, et al. Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinates measurement system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 19 (4): 870-877 (in Chinese). [劳达宝, 杨学友, 郑继贵, 等. 扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19 (4): 870-877.]
- [3] WANG Ying, ZHANG Rui. In-pipe surface circular structured light 3D vision inspection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 891-896 (in Chinese). [王颖, 张瑞. 管道内表面圆结构光视觉三维测量系统 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (3): 891-896.]
- [4] TIAN Li, DIAO Changyu. An automatic calibration method for structure light 3D-scanner [J]. *Computer applications and software*, 2011, 28 (4): 98-100 (in Chinese). [田里, 刁常宇. 一种结构光三维扫描仪系统自动标定法 [J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28 (4): 98-100.]
- [5] ZENG Xiangjun, HUO Jincheng, WU Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (1): 0108002-1-0108002-5 (in Chinese). [曾祥军, 霍金成, 吴庆阳. 线结构光量系统扫描方向的标定 [J]. *中国激光*, 2012, 39 (1): 0108002-1-0108002-5.]
- [6] YUAN Jianying, GUO Jin, WANG Wei, et al. A new calibration method for structured light 3D scanning system [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30 (3): 151-153 (in Chinese). [袁建英, 郭进, 王伟, 等. 一种结构光三维扫描系统新标定方法 [J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30 (3): 151-153.]
- [7] Tian Qingguo, Yang Yujie, Zhang Xiangyu, et al. An experimental evaluation method for the performance of a laser line scanning system with multiple sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52: 241-249.
- [8] Li Xudong, Zhao Huijie, Liu Yang, et al. Laser scanning based three dimensional measurement of vegetation canopy structure [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 152-158.
- [9] Emam SM, Khatibi S, Khalili K. Improving the accuracy of laser scanning for 3D model reconstruction using dithering technique [J]. *Procedia Technology*, 2014, 12: 353-358.
- [10] ZHANG Zhiyi, YUAN Lin. Build a 3D scanner system based on monocular vision [J]. *Applied Optics*, 2012, 51 (10): 1638-1644.
- [11] ZHAO Qilong. Applied research of 3D coordinate conversion model based on rodrig matrix [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2014, 28 (5): 29-30 (in Chinese). [赵启龙. 罗德里格矩阵在三维坐标转换中的应用研究 [J]. *北京测绘*, 2014, 28 (5): 29-30.]
- [12] LV Zhihua, ZHANG Zhiyi. Build 3D scanner system based on binocular stereo vision [J]. *Journal of Computers*, 2012, 7 (2): 399-404.
- [13] SUN Junhua, WANG Heng, LIU Zhen, et al. Rapid extrac-

tion algorithm of laser stripe center in rail wear dynamic measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19 (3): 691-694 (in Chinese). [孙军华, 王恒, 刘震, 等. 钢轨磨耗动态测量中激光光条中心的快速提取 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19 (3): 691-694.]

[14] WANG Jianwen, DU Chunmei. Three-dimensional laser scanning image processing algorithms to mend [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31 (17): 3929-3931 (in Chi-

nese). [王建文, 杜春梅. 激光三维扫描图像处理改进算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2010, 31 (17): 3929-3931.]

[15] LI Yingying, ZHANG Zhiyi, YUAN Lin. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 10 (50): 100002-1-100002-10 (in Chinese). [李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 10 (50): 100002-1-100002-10.]

(上接第 464 页)

参考文献:

[1] CHEN Jianpeng, BI Duyan, ZHANG Shengchong, et al. Fast haze removal algorithm using dark channel prior [J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 35 (6): 2047-2051 (in Chinese). [陈剑鹏, 毕笃彦, 张晟翀, 等. 基于暗通道理论的快速单幅图像去雾算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2014, 35 (6): 2047-2051.]

[2] AI Mingjing, DAI Longzhong, CAO Qinghua. A self-adaptation image enhancement method for fog elimination in foggy environment [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26 (7): 244-247 (in Chinese). [艾明晶, 戴隆衷, 曹庆华. 雾天环境下自适应图像增强去雾方法研究 [J]. *计算机仿真*, 2009, 26 (7): 244-247.]

[3] Matan Sulami, Itamar Glatzer, Raanan Fattal, et al. Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images [C] // *IEEE International Conference on Computational Photography*. Santa Clara: IEEE, 2014: 1-11.

[4] Tarel J, Hauti N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*. Kyoto: IEEE Computer Society, 2009: 2201-2208.

[5] YU Jing, LI Dapeng, LIAO Qingmin. Physics-based fast single image fog removal [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37 (2): 1561-1576 (in Chinese). [禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法 [J]. *自动化学报*,

2011, 37 (2): 1561-1576.]

[6] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior [C] // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.

[7] LI Xingxing. The research and application of single image defogging algorithm based on the depth of field [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013 (in Chinese). [李兴兴. 基于景深的单幅图像去雾算法研究及应用 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.]

[8] SUN Xiaoming, SUN Junxi, ZHAO Lirong, et al. Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19 (3): 381-385 (in Chinese). [孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 等. 按原色先验单幅图像去雾改进算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19 (3): 381-385.]

[9] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35 (6): 1397-1409.

[10] LIU Qiaoling, ZHANG Hongying. Single image fast dehazing algorithm [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2014, 29 (3): 76-81 (in Chinese). [刘巧玲, 张红英. 单幅图像快速去雾算法 [J]. *西南科技大学学报*, 2014, 29 (3): 76-81.]