

基于双目视觉的无人船障碍物探测与地图构建

黄倚天¹, 朱晓辉^{1,2,3}, 王杰华¹, 刘瑞¹

(1. 南通大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南通 226019; 2. 南通先进通信技术研究院, 江苏 南通 226019;

3. 西交利物浦大学 计算机科学与软件工程系, 江苏 苏州 215123)

摘要: 在无人船的巡航过程中, 如何探测和躲避障碍物是必须解决的问题; 由于无人船自主巡航依赖于其自身对所处环境的精确探测, 而目前一般采用的超声波或雷达技术探测距离和精度较低, 避障功能弱, 因此需引入视觉方法来提升避障精度, 并用于轨迹生成、定位或路径规划; 为无人船搭建双目视觉系统, 提出采用双目直接稀疏里程计算法构建无人船所处三维空间模型, 将构建的三维点云图转化为二维网格图并标记障碍物, 为避障系统进行路径规划提供障碍物数据; 实验结果表明, 该系统对真实河流环境进行了地图构建, 并解决了水上环境构建存在的“虚拟障碍”等问题。

关键词: 无人船; 双目直接稀疏里程计算法; 障碍物探测; 地图构建

Obstacle Detection and Map Construction of Unmanned Boat Based on Stereo Vision

Huang Yitian¹, Zhu Xiaohui^{1,2,3}, Wang Jiehua¹, Liu Rui¹

(1. School of Computer Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. Nantong Research Institute for Advanced Communication Technologies, Nantong 226019, China;

3. Department of Computer Science and Software Engineering, Xian Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

Abstract: Obstacle detection and recognition during navigation is a key challenge for unmanned boat. Since the autonomous cruise of unmanned boat depends on their own accurate detection of their environment, and the ultrasonic or radar technologies commonly used at present have low detection distance and accuracy and weak obstacle avoidance function, so visual methods can be introduced to improve the obstacle avoidance accuracy and used for trajectory generation, localization or path planning. In this paper, stereo vision system is built for unmanned boat, and the 3D space model of the boat is constructed by using stereo direct sparse odometry (DSO) algorithm. Then the 3D point cloud map will be transformed into a 2D grid map and the obstacles will be marked. At last, the obstacle data for obstacle avoidance system is provided to plan path. Experimental results indicate that the system constructs a 2D grid map of the real river environment and solves the problem called “virtual obstacle” in the construction of water environment.

Keywords: unmanned boat; stereo direct sparse odometry algorithm; obstacle detection; map construction

0 引言

在智能化水质监测任务中, 无人船扮演着重要角色^[1-2]。无人水质监测船在其自主航行作业时需要自动巡航并自主避障, 周围环境感知是先决条件, 因此智能化识别周围环境是实现避障的关键技术^[3]。由于现有无人水质监测船一般采用超声波避障, 其只能探测船体前方障碍物, 且探测距离和精度较低、避障功能弱, 而雷达系统在近距

离内又存在盲区, 因此无人船真正实现自动巡航和自主避障需要引进视觉系统^[4-6]。

如今, 实时视觉测距 (Visual Odometry, VO) 和视觉实时定位与地图构建 (Visual Simultaneous Localization And Mapping, VSLAM) 已成为热门的研究课题。第一个实时 VSLAM 出现是在 2000 年左右, 其核心思想是选择一系列的关键点, 跟踪它们在帧间的运动, 联合推断它们的 3D 位置和相机运动。其后, 出现了性能不断提升的解决方案, 包括计算硬件和算法理念的升级。例如当前主流前沿算法 ORB-SLAM 算法, 其能够在小尺度和大尺度、室内和室外环境实时完成位姿确定的同时构建稀疏特征点地图, 执行宽基线的闭环检测和重定位, 并且能够实现全自动的初始化^[7]。

传统的 SLAM 算法是基于尝试选择关键点的, 而后出现的直接法旨在直接使用图像计算几何结构和运动, 跳过中间的关键点选取步骤。例如大规模单目直接法 LSD-SLAM, 其核心思想是跟踪相机增量运动, 同时执行位姿图优化以保持轨迹的全局一致性^[8]。SVO 属于半直接法, 仅

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-02-21。

基金项目: 南通大学-南通智能信息技术联合研究中心开放课题项目 (KFKT2017A06); 苏州市前瞻性应用研究项目 (SYG201837); 南通市应用基础研究计划项目 (GY12016015)。

作者简介: 黄倚天(1995-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事计算机应用方向的研究。

朱晓辉(1976-), 男, 江苏南通人, 硕士, 副教授, 主要从事计算机软件与理论方向的研究。

通讯作者: 王杰华(1965-), 男, 江苏南通人, 硕士生导师, 教授, 主要从事信息安全, 计算机应用方向的研究。

在前端的部分使用了直接法,之后的位姿估计等则仍旧使用传统的最小化重投影误差的方式^[9]。DSO 是少数使用纯直接法计算视觉里程计的系统之一,其无论是在精确度还是稳健性上都超过了基于特征方法的 ORB-SLAM。但 DSO 等直接方法在没有光度校准的情况下性能会明显下降,单目 DSO 存在无法估计重建场景的尺度和相机运动的单位、估计的轨迹有较大的尺度漂移等问题^[10]。

本文采用的双目 DSO 算法相较于单目 DSO,通过引入额外的传感器信息优化上述缺点,提供了更精确并且更快收敛的尺度估计,对卷帘曝光或没有光度标定敏感度降低^[14]。当前该算法多运用于陆地环境,本文将运用于水面建图,并针对水上环境的特殊情况(如光强不断变化、存在较多反光等)对算法功能进行了优化,实现了更适用于水上环境的地图构建方法。

1 双目视觉测距

1.1 双目测距原理

如图 1 所示,设点 P 沿垂直于相机中心的直线上下移动,则其在左右相机上成像点的位置将随之不断改变,即视差的大小会不断改变。点 P 与相机间的距离 Z 和视差 d 之间存在反比关系,视差 d 可通过左右相机的中心距 T 减去点 P 在左右相机上的投影点到各自中心点的距离值获得。因此,只要获得左右相机的中心距 T ,即可估计出点 P 到相机的距离。

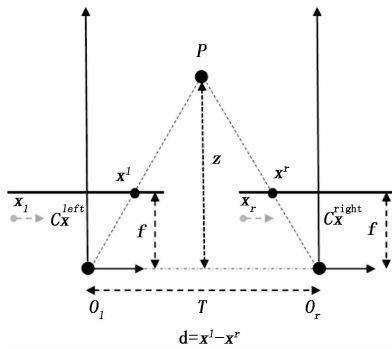


图 1 双目测距原理

上文所述有个前提,就是在左右相机的成像上要定位到同一点 P ,即要把左右两个图像上的点进行匹配,这就需要双目校正的操作。假如根据左图像上一个点的特征到右图像上匹配对应点,该过程将非常耗时。因此利用极线约束来减少搜索匹配的运算量。如图 2 所示,空间中任意一点在图像平面上的投影点,必然处于由该点和两个相机中心组成的对极平面上。对于图像上的某一特征点,其在另一视图上的匹配点必处于对应的极线上,称为极线约束原理^[11]。极线约束使得只需在一维空间中搜索匹配对应点,从而显著提升了运算效率并减少了误匹配。

此时用双目校正把左右两幅图像在水平方向上严格对齐,使得左右图像的对极线在同一水平线上。根据极线约束原理,此时一幅图像上任意特征点与其在另一图像上的

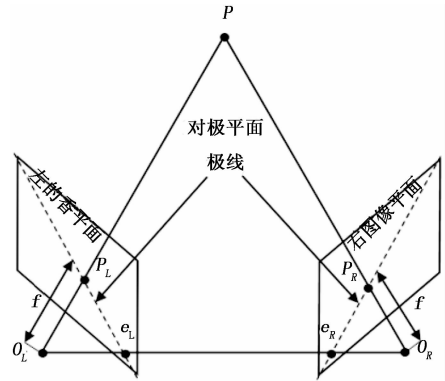


图 2 极线约束原理

匹配点必然在同一行上,因此只需要在该行搜索即可匹配到对应点。

1.2 双目摄像头参数标定

双目标定的第一步是分别获取左右相机的内外参数,然后通过立体标定对左右两幅图像进行立体校准和对齐,最后一步是确定两个相机之间的相对位置关系,即中心距。为了消除畸变以及得到内外参数矩阵,双目相机需要标定的参数有内参数矩阵、畸变系数矩阵、本征矩阵、基础矩阵、旋转矩阵和平移矩阵。内参数矩阵与焦距相关,内参数矩阵得到镜头的信息,并消除畸变,使得到的图像更为准确,它是一个从平面到像素的转换。为了最终的测距,通过外参数矩阵得到相机相对于世界坐标的联系,实现相机坐标系与世界坐标系的转换,畸变参数一般包含在内参数矩阵中^[12]。

本文采用传统的棋盘作为标定板,规格为 5×7 方格,棋格尺寸间距为 $4.2\text{cm} \times 4.2\text{cm}$,通过左右摄像机(间距 8 厘米)采集图像对。双目摄像机内部参数矩阵标定结果如表 1 所示。

表 1 内部参数标定结果

		内部参数矩阵		
内部参数矩阵	左摄像机	$\begin{bmatrix} 665.78 & 0 & 340.01 \\ 0 & 662.5 & 204.42 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
	右摄像机	$\begin{bmatrix} 665.54 & 0 & 339.07 \\ 0 & 662.4 & 205.51 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		

右摄像机相对于左摄像机的平移外部参数矩阵标定结果如表 2 所示。

表 2 外部参数标定结果

		外部参数矩阵		
外部参数矩阵	平移向量	$[232.013 \quad 1.343 \quad 0.795]$		
	旋转矩阵	$\begin{bmatrix} 0.9657 & -0.3025 & 0.4901 \\ 0.4865 & 0.9201 & -0.4201 \\ -0.3841 & 0.5457 & 0.9507 \end{bmatrix}$		

由以上两表中数据可知,摄像机的旋转矩阵接近于单

位矩阵, 所以摄像机的位置较为理想。

1.3 立体匹配与测距

在摄像机标定结束后, 开始对拍摄的图像进行匹配。立体匹配算法计算基准图像中所有像素的视差值, 得到视差图, 从而得到基准图像的三维信息。由于水面情况复杂(如障碍物特征不明显, 低纹理区较多, 水面存在倒影等), 而局部立体匹配对噪声或特征要求较高, 所以采用全局立体匹配算法。

根据视差图上的深度信息及摄像机内参即可计算任一像素点与摄像机间的距离。

2 双目直接稀疏里程计

2.1 双目 DSO 系统

直接稀疏里程计(Direct Sparse Odometry, DSO)是近年来发展起来的一种新方法, 它利用非线性优化算法, 通过最小化由直接图像对齐得到的光度误差来估计相机的位姿和像素深度^[13]。本文运用的是双目立体扩展的 DSO 算法实现无人船所处水上环境的实时三维重建。

双目 DSO 系统概述如图 3 所示。系统使用固定的双目立体匹配获得的深度估计。基于直接图像对齐公式, 首先新的双目帧会对参考关键帧进行跟踪, 所得到的位姿估计用于调整和改进最近选定点的深度。然后系统检查当前活动窗口是否需要插入新的关键帧, 如果不需要, 则将创建一个普通帧, 否则将生成一个新的关键帧并添加到当前的活动窗口。活动窗口中的所有关键帧联合优化位姿, 调整亮度参数以及所有可观察到的三维点的深度。为了保持活动窗口为固定尺寸, 使用 Schur 方法边缘化旧的关键帧和三维点^[14]。

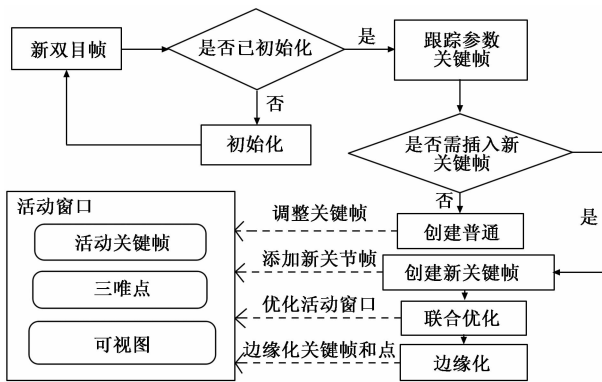


图 3 系统概述

2.2 直接图像对齐

系统通过直接图像对齐获得光度误差, 进而通过最小化光度误差来估计相机的位姿和像素深度。假设参考帧 I_i 中的点集 P_i 在另一帧 I_j 中被观察到, 则直接图像对齐的基本思想可表示为光度损失能量函数为:

$$E_{ij} = \sum_{p \in P_i} \omega_p \| I_j[p'] - I_i[p] \|_\gamma \quad (1)$$

式中, $\| \cdot \|_\gamma$ 是 Huber 范数, ω_p 权值会减弱梯度大的地方的影响, p' 是 p 在 I_j 中的投影。

双目 DSO 每帧选取固定数量的点, 均匀分布在所有区域并且梯度明显, 然后在每个点周围的很小邻域内计算光度误差。由于光度误差是直接根据像素强度计算的, 对帧间光照变化比较敏感。因此对每帧图像引入了两个参数 a_i 和 b_i 建模亮度变化, 修改后的光度损失能量函数如下:

$$E_{ij} = \sum_{p \in P_i} \sum_{p \in N_p} \omega_p \| I_j[\tilde{p}'] - b_j - \frac{e^{a_i}}{e^{a_i}} (I_i[\tilde{p}] - b_i) \|_\gamma \quad (2)$$

式中, N_p 是点 \tilde{p} 的邻域点集, \tilde{p}' 是 \tilde{p} 在 I_j 中的投影。

2.3 帧管理与窗口优化

每当有新的双目帧时, 系统使用直接图像对齐跟踪它和活动窗口内的最新关键帧。活动窗口内所有的点都被投影到新帧, 在深度值保持固定的情况下, 通过最小化能量函数计算新帧的位姿^[14]。

为了构造新的关键帧, 需要从图像上选择一系列的稀疏点, 称为候选点。当时间较长的点从活动窗口边缘化时, 候选点会被激活并加入联合优化。每一个激活点存储在一个关键帧中并且可以被活动窗口内的其它一些关键帧观测。每当一个激活点被另外的关键帧观测到时, 就会创造光度损失函数内部的光度能量因子, 公式如下:

$$E_{ij}^p = \omega_p \| I_j[p'] - b_j - \frac{e^{a_i}}{e^{a_i}} (I_i[p] - b_i) \|_\gamma \quad (3)$$

将所有的因素联合起来, 在窗口优化中最小化的最终能量函数为:

$$E = \sum_{i \in F} \sum_{p \in P_i} \sum_{j \in obs(p)} E_{ij}^p \quad (4)$$

式中, F 是当前窗口的关键帧集, $obs(p)$ 是 F 中的可观测到 p 的关键帧。

为了保持活动窗口大小不变, 时间较长的帧需要 Schur 边缘化。在关键帧边缘化之前, 需先将两个最新的关键帧未观测到的全部激活点边缘化。

3 系统功能优化

3.1 三维点云过滤

水面建图的一个重要问题是水面反光的影响。河岸、船只或杂草的倒影会严重误导建图过程, 造成“虚拟障碍”问题, 在实验中会发现有些点出现在河流下方, 如图 4 所示。为了消除河岸建筑在水面上的倒影的影响, 系统在生成点云之前对点进行了过滤。由于相机只能观察水面, 所以所有实际物体的点都应该在水面上。因此, 任何具有负 y 坐标的点都可以确定为反射点。通过比较点云的坐标, 可以估算出曲面的 y 坐标。然后, 通过删除所有相关值较低的点来过滤点云^[15]。实际实验表明该方法有效且不会影响表面障碍物的探测。

3.2 生成二维网格图

水面建图的另一个问题是, 不同于无人机等运动范围相对较大的自动巡航设备, 无人船仅在固定河道航行, 因

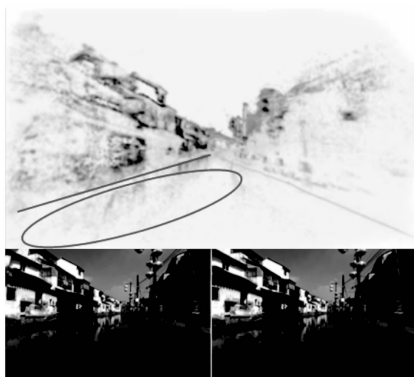


图 4 水面倒影造成“虚拟障碍”

此可以假设无人船是在二维平面 (x, z) 上运动的, 具有相同 (x, z) 坐标而 y 坐标不相同的点对于无人船的障碍意义相同。所以将三维点云图转换成二维网格图可以简化计算, 并且不影响无人船实现避障功能^[16]。

对于二维网格图而言, 超出船体高度的点不仅会增加计算量, 有时 (尤其是穿越桥体时) 会对建图以及标记障碍物产生误导。因此将高出船体一定距离的空间忽略, 仅取船体前方 $10 \times 10 \times 2$ 的空间, 将该空间垂直分割成 20×20 个的方格, 若方格内存在关键点, 则标记此空间为存在障碍物, 最终得到一个 20×20 的二维数组, 存在障碍物的区域标记为 1, 不存在障碍物的区域标记为 0, 即为二维网格图。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

图 5 为无人船在河上行驶时某一时刻的左右摄像机拍摄的图像以及此时刻的关键帧选点图。



图 5 左右摄像机拍摄图像 (左图) 和关键帧选点 (右图)

以图中拍摄到的桥为例, 此时无人船距离桥较远, 为 23 m, 系统未完整构建桥的空间模型, 如图 6 所示。

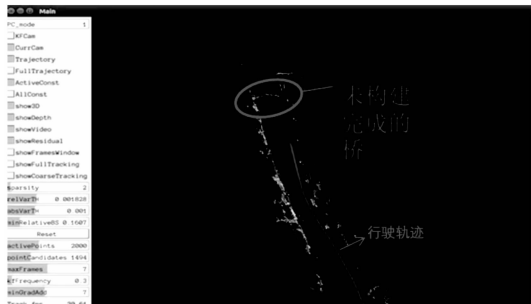


图 6 三维重建点云图 (1)

图 7 为无人船继续向前行驶后左右摄像机拍摄的图像以及此时刻的关键帧选点图, 由图可知此时与桥的距离缩短, 为 8.5 m。



图 7 左右摄像机拍摄图像 (左图) 和关键帧选点 (右图)

如图 8 所示, 此时系统基本构建完成桥的三维模型, 并估计出了这段距离船的行驶轨迹。



图 8 三维重建点云图 (2)

与图 8 相对应, 系统输出此时的二维网格地图, 运用二维数组 M 存储二维网格地图的信息。其中每个元素表示该空间是否被占用, 即在相机坐标系下的坐标为 (x, z) 其对应二维网格中的 $M(i, j)$, 示例输出如图 9 所示。

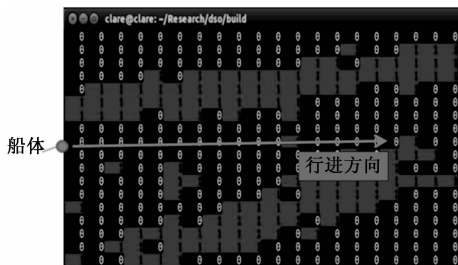


图 9 二维网格地图 (1)

二维地图中船体行进方向为由左至右, 图中二维数组中 1 用红色标记, 表示有障碍物。建图是动态的且只收集关键帧所有活动点的信息, 而不是每次都计算整张地图, 这意味着数组将在每一组关键帧插入之后输出和刷新, 如图 10 即为图 9 下一组关键帧输出的二维地图。

由图 9 与图 10 可以看出, 由于预先过滤了超出船体一定高度 (本文设定为 2 m) 的点云, 在生成的二维网格图中, 对应桥洞位置的 $M(7, 17)$ 、 $M(8, 17)$ 、 $M(9, 17)$ 的值均为 0, 并未被标记为障碍物, 因此二维地图在传输数据给避障系统后, 避障系统会判定此处为可通行, 证明了此方法的可行性。

4.2 实验分析

本文系统对真实河流环境进行重建。通过优化改进算

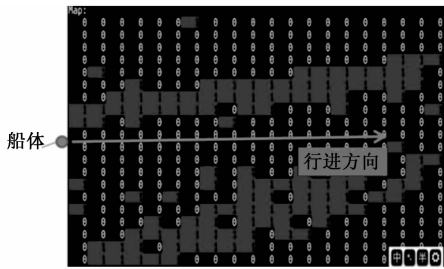


图 10 二维网格地图 (2)

法, 过滤点云, 解决了水面反光造成的“虚拟障碍”问题, 最终生成了准确、鲁棒的相关点云, 使其适用于水上环境重建。其次根据三维点云图生成二维网格图, 优化了避障所需的计算量, 同时解决了二维建图所带来的“障碍误导”问题, 即在压缩过程中将整个桥体压缩至平面导致避障系统判定此路不通的情况。最终该系统生成的二维地图以二维数组的形式传输给避障系统用来进行规避障碍物与路径规划。实验结果证明了本文系统的可行性以及稳定性。

5 结束语

本文采用双目 DSO 系统, 主要用于无人船自动巡航。作为一种可视化的、实时的环境重建方法, 其在深度的精确化、光线的鲁棒性等方面都具备了较好的性能。在此基础上, 本文优化了系统功能, 解决了水上环境构建存在的“虚拟障碍”等问题, 并且优化了地图信息, 由三维点云图生成二维网格图, 简化了计算量, 使其更适用于水上环境的地图构建, 最终为避障系统提供数据信息。

在未来的研究中, 可以将重点放在优化从图像中选择关键点的算法, 通过光度校准来减少来自不同光照强度下的动态物体和预处理图像。

参考文献:

- [1] Yan R J, Pang S, Sun H B. Development and missions of unmanned surface vehicle [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2010, 9 (4): 451-457.
- [2] 杨一鹏, 王 桥, 王文杰. 水质遥感监测技术研究进展 [J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20 (6): 6-12.
- [3] 齐 峰, 王学军. 内陆水体水质监测与评价中的遥感应用 [J]. *环境工程学报*, 1999, 7 (3): 90-99.
- [4] 张浩昱, 刘 涛. 一种微小型无人船控制系统设计及航向控制方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (1): 88-90.
- [5] 冯浩明. 水面无人船航行控制器开发研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [6] 张 融, 郑宏远, 李 录. 一种计量青鲈鱼胸鳍和尾鳍摆动频率和幅值的计算机视觉算法 [J]. *生态毒理学报*, 2015, 10 (4): 154-161.
- [7] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardos J D. ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31 (5): 1147-1163.
- [8] Engel J, Sch T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM [A]. *Computer Vision ECCV [C]*. 2014: 834-849.
- [9] Forster C, Pizzoli M, Scaramuzza D. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry [A]. *Hong Kong: IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA) [C]*. 2014.
- [10] Engel J, Koltun V, Cremers D. Direct Sparse Odometry [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2017 (99): 611-625.
- [11] 白 明, 庄 严, 王 伟. 双目立体匹配算法的研究与进展 [J]. *控制与决策*, 2008, 23 (7): 721-729.
- [12] 蔡健荣, 赵杰文. 双目立体视觉系统摄像机标定 [J]. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2006, 27 (1): 6-9.
- [13] Gao X, Wang R, Demmel N, et al. LDSO: Direct sparse odometry with loop closure [A]. *IEEE/RSS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [C]*. 2018: 2198-2204.
- [14] Wang R, Schworer M, Cremers D. Stereo dso: Large-scale direct sparse visual odometry with stereo cameras [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision [C]*. 2017: 3903-3911.
- [15] 赵平建. 基于三维散乱点云的曲面重构技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [16] 周 蕾. 基于未标定图像序列的三维重建相关技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [7] Fathabadi H. Novel solar powered electric vehicle charging station with the capability of vehicle-to-grid [J]. *Solar Energy*, 2017: 142.
- [8] 张国栋. 太阳能电动汽车充电站监控系统研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2018: 38-40.
- [9] 艾明浩. 基于云计算平台的电动汽车有序充电监控系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015: 17-19.
- [10] 袁希武, 冯 刚. 基于微信服务号和二维码技术的医疗设备管理 [J]. *中国医疗设备*, 2016, 31 (11): 155-157+169.
- [11] 曾 坤. 电动汽车充电站运行管理平台设计 [D]. 四川成都: 西南交通大学, 2017: 39-41.
- [12] 徐 立, 靖鹏君. 设备管理巧用“二维码” [J]. *中国设备工程*, 2017 (24): 4.
- [13] 俞恩军, 吴飞青, 俞明辉, 等. 基于二维码技术的实验设备管理系统设计 [J]. *科技视界*, 2018 (13): 18-19+8.
- [14] 谢 超, 奚晓轶, 严 丹. 基于二维码技术的设备运维信息管理系统设计与应用 [J]. *视听界*, 2017 (2): 111-116.

(上接第 192 页)