

基于单目视觉的无人机自主跟踪降落研究

钟木财,何炳蔚,曾金源,陈福兴,邹诚
(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116)

摘 要:无人机对地面运动物体的跟踪研究一直是无人机自主控制领域重要的研究方向。以四旋翼无人机为平台,设计了无人机对地面目标的自主降落跟踪系统。在无人机上搭载单目相机获取地面移动机器人的图像信息,同时搭载的计算机实时计算获取地面移动机器人的运动状态数据,然后反馈给无人机运动控制系统,完成对地面移动机器人的跟踪。实验表明,该系统可以进行稳定的地面运动物体跟踪。

关键词:无人机;图像处理;ArUco 库;自主降落;跟踪系统

中图分类号:V279 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)04-0149-04

Study of Autonomous Tracking and Landing of Unmanned Aerial Vehicle Based on Monocular Vision

ZHONG Mucai, HE Bingwei, ZENG Jinyuan, CHEN Fuxing, ZOU Cheng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Tracking ground moving objects by unmanned aerial vehicles (UAV) is always an important research direction in the autonomous control field of UAV. In this paper, an autonomous landing and tracking system for the unmanned aerial vehicles (UAV) for ground targets is designed on the platform of the unmanned aerial vehicle with four rotors. A single camera carrying on the unmanned aerial vehicle is used to obtain the image information of the ground mobile robot. And real-time calculation of its motion state data is done with the on-board computer, then the data is fed back to the motion control system of the unmanned aerial vehicle (UAV), thus completing the tracking of the ground mobile robot. The experiment shows that the system can be used to stably track the ground motion objects.

Keywords: unmanned aerial vehicle; image processing; ArUco library; autonomous landing; tracking system

0 引言

随着无人机技术的进步,有关无人机领域的研究也受到越来越多学者和机构的重视,无人机智能化研究是无人机技术的一个重要研究方向。传统的无人机技术是利用GPS和惯性导航系统INS来对无人机进行导航控制的,但是将传统的INS/GPS组合导航系统用作无人机导航着陆时,只能定位无人机自身的位姿信息,缺少无人机相对于着陆平台的位姿参数,而且GPS的定位精度相对于小型无人机来说较低,很难满足小型无人机精确控制的需求,加上外界环境对GPS信号的影响,单独使用INS/GPS导航系统并不能完全提供无人机自主导航降落所需要的信息^[1]。利用GPS和传统的惯性导航系统进行无人机导航是传统无人机的主要导航方式,随着现代技术的不断发展革新,计算机视觉导航技术开始逐步走上无人机技术领域的舞台^[2]。

计算机视觉技术利用搭载的摄像头获取外界环境的数字图像信息,通过计算机算法分析解算获取图像的有效信息^[3],比如色彩、形状、尺度等,然后将解算的有效信息反馈给无人机控制系统,对无人机进行智能化控制操作。这一系列的过程称之为视觉导航技术。它与其他导航方式相比有自己优势。首先从精度上,通过特殊的图像算法

解算出来的标识物精度可以达到厘米级别,远远超过了GPS定位的精度,也能满足小型无人机在移动平台上的降落需求;再者利用视觉技术可以避免信号传输中的电子干扰,而且还可以利用无人机视觉系统的测量数据与惯性导航系统测量数据进行对比融合,提供给无人机控制系统获得更好的无人机导航参数。现在的图像获取设备造价低廉,搭载视觉系统的灵活性很强,十分适合在小型无人机上进行平台开发。

计算机视觉在机器人智能化领域的应用广泛,可对机器人进行导航,对机器人周边障碍物进行探测^[4],利用图像处理对机器人周边物体进行姿态估计。姿态估计这个过程实际上是基于真实环境,找到对应点在环境二维图像的投影。通常会使用一些特殊的标记图形作为检测标识用来简化整个检测和计算流程^[4-5]。最流行的方法之一是使用二维码标记,而且内部二进制编码使得这样的标记在使用过程中变得更加鲁棒。在遇到误检测和对误检测进行校正的时候具有很好的效果^[6]。当然也有其他学者使用不一样的标记方法,黄楠楠^[7]等人设计了一种“T”型的着陆地标,将地标轮廓提取和交点检测算法结合,保证了位姿解算的精度,但是该研究只对着陆系统进行了仿真研究。Tsai A C等研究的无人机自主着陆系统^[8],也设计了一个T型的着陆地标,通过提取着陆地标的平行线来得

到4个交点,来估计无人机的位姿状态,但运用线特征比点特征计算复杂,实时性不好。Serra^[9]等人采用图像处理获得着陆点位置,利用光流法计算速度信息,结合位置信息和速度信息计算保证无人机跟踪移动平台并保持相对移动速度,最终完成降落。

基于以上的研究基础,本文提出了一种基于单目视觉的无人机对地面移动物体的跟踪降落方法。

1 无人机视觉导航系统框架

系统的搭建总共可以划分为三大块(图1),一部分是视觉的图像处理部分,通过相机标定,图像校正,图像处理解算物体的运动姿态信息,返还给核心运动估计模块与第三部分的无人机本身GPS/INS数据融合进行计算,将最后的速度控制信号和状态控制信号传给无人机的逻辑控制实现飞行任务。

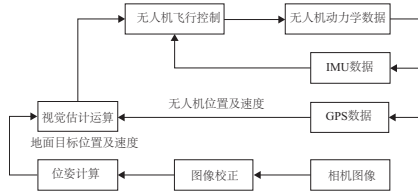


图1 系统框架图

1.1 图像标定

在整个相机导航系统中,需要利用搭载的单目相机获取地面目标的图像序列来解算物体运动信息,但由于受限于各种因素,相机本身的镜头在生产制造过程中不可避免会存在误差,导致图像与真实的物体之间会产生一定的成像偏差,从而对图像的解算造成不必要的误差。因此在每一个计算机视觉领域的应用问题中,相机标定都是最基本也是最重要的问题之一^[10-11]。通过对无人机机载相机的标定获得相机的内参数矩阵和畸变参数矩阵,为图像中物体的位姿解算提供必要的信息。

标定的过程就是求解相机几何模型参数的过程。利用最简单的小孔成像原理来拟合相机模型,如图2所示。

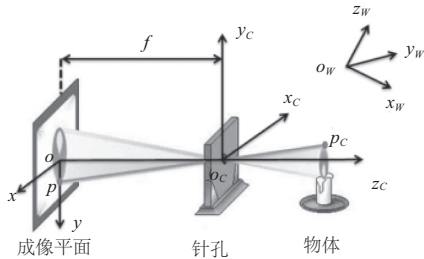


图2 小孔成像原理

通过坐标转换将成像平面的像素点还原到三维空间的实际物体坐标上,整个模型的表达方程为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_o \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} K P_c \quad (1)$$

矩阵 K 表示的就是相机的内参数矩阵,由 f_x, f_y, u_o, v_o

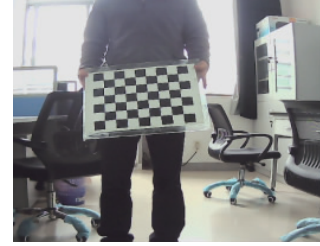
4个参数决定,再考虑相机的畸变影响,对相机模型引入畸变模型:

$$x_i = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2)$$

$$y_i = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (3)$$

其中: k_1, k_2 表示相机畸变系数。

本文主要涉及的标定方法是张氏标定法^[12],这种方法只需要打印一张棋盘格,利用相机视野里棋盘格不同视角的若干图像就可以很精确地得到相机的标定参数。标定板图片以及畸变校正的示例图如图3所示。



a) 标定板图像



b) 畸变图像



c) 畸变校正后图像

图3 标定板及畸变校正图像

1.2 ArUco 标识检测

ArUco 库是一种二维码标记库,它是由 Sergio Garrido 等人提出的一种适用于图形识别、图形位置以及姿态解算的应用方法。在实验中,将它放置于移动机器人的上表面作为无人机识别的标识,利用 ArUco 库算法可以大大节省对图像处理的难度。将第 i 个二维码检测的平移和旋转定义为:

$$H_i^c = \begin{bmatrix} R_i & T_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad i \in (1, n) \quad (4)$$

其中: H_i^c 表示相机和标记之间的单应性矩阵,也可以称为相机的外部参数; R_i 表示旋转矩阵; T_i 表示平移矩阵,这样就可以表达整个二维码标记相对于单目相机的姿态。效果如图4所示。

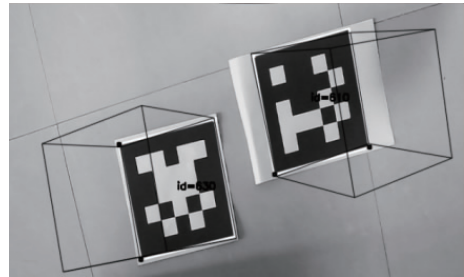


图4 二维码检测

在实际应用中,单个的二维码作为移动平台的降落标

识是不够的。相机的视野是固定的,因此在低空飞行时很容易就丢失掉视野内标识的图像,高空飞行时也容易出现分辨率的问题检测不到地面标识。因此需要考虑改变标识的尺度,故设计了二维码的组合视觉标识,如图5所示。考虑将2种或者多种尺度不同的二维码通过组合固定在更大的标识板上作为降落标识。在高空飞行时可以通过大尺度的二维码板解算姿态,而低空降落时则可以利用小尺度二维码解算信息。

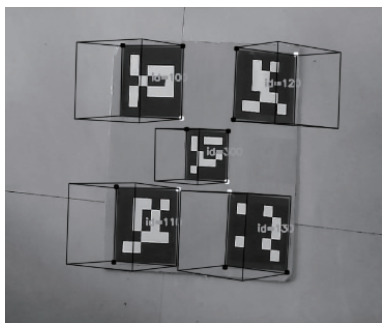


图5 组合二维码标识板

1.3 粒子滤波器

在系统中,对地面移动物体的状态估计用的主要是粒子滤波方法,假设在场景中目标二维码的位置坐标:

$$s_t = (x_t, y_t, z_t) \quad (5)$$

将粒子滤波模型表示为:

$$p = \langle s_t, w \rangle \quad (6)$$

则粒子 p 用来表示二维码的位置估计,其中 w 表示估计的权重值,则二维码的运动模型可描述为:

$$s(k+1) = s(k) + \Delta(x, y) + w_0 \quad (7)$$

$$\Delta(k) = \vec{v}^t(k) \cdot \delta(k) \quad (8)$$

其中: k 表示离散时间点; $v(k)$ 表示当前目标速度; $\delta(k)$ 表示与上一个更新时间的时间间隔。定义一个集合 P 表示 n 个粒子用来近似所有目标位置的分布。

$$P = \{ \langle s_i, w_i \rangle \}_{i=1:n} \quad (9)$$

当前 k 时刻计算机器人位置的条件概率是由 k 时刻标记观测值及其先前位置决定。集合 P 就是使用运动模型和里程计记录从先前的位置估计中的重新采样数据。那么目标在 t 时刻目标的预测位置 s_t 是由先前的位置概率 $P_r(s_{t-1})$ 和条件概率 $P_r(\hat{S}_t | S_t, S_u(k))$ 联合概率得到,其中 $S_u(k)$ 表示无人机在 k 时刻的位置坐标,那么就可以得到:

$$P_r(s_t / \hat{S}_t, s_{t-1}) = P_r(s_{t-1} / \hat{S}_{t-1}) P_r(\hat{S}_t / s_t) \quad (10)$$

将每个粒子的概率 $P_r(s_t)$ 进行归一化作为每一个粒子的计算权重用来计算下一个粒子的位置数据就可以得到所需要预测的下一个目标位置 s_{t+1} 。

1.4 无人机自主飞行控制

这部分系统的开发只要依托于 M100 无人机的软件开发平台 Onboard SDK,飞行逻辑模块主要设定编写无人机在没有视觉反馈信息时的自主飞行路径(图6),通过设

定任务点,与 GPS、Guidance 传感器的测量信号计算飞机当前位置到任务点的距离,实时地发给无人机的位置 PID 控制器,输出速度信号和状态控制信号用于无人机飞行。

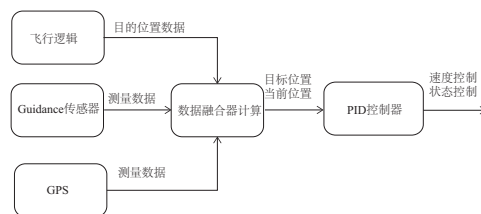


图6 自主飞行控制

2 实验分析

2.1 实验平台

实验中无人机选用了 DJI M100 无人机, M100 无人机配备 Guidance 视觉定位系统,具有稳定的操作性能,提供超声和双目测距数据。单目摄像机主要安装于机体下方(下视相机),安装光心位于机体坐标轴的 x 轴上,光轴垂直 x 轴,分辨率为 1280×720 、帧率为 30 帧/s,无人机上搭载 1 架主频 2.8G,拥有 4 核 8 线程,内存 8G 的 Intel NUC, PC 上拥有的 USB 接口用于传输单目相机图像信息以及无人机控制模块的飞机飞行数据,包括 GPS、IMU,飞行姿态等数据,最后由机载计算机在线完成所有的运算操作和数据处理。整个搭载的无人机硬件系统如图7所示。



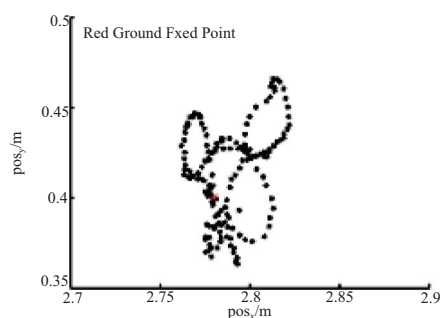
图7 M100 无人机

机载计算机上安装有 Linux 操作系统,整个系统的软件开发是基于机器人开源操作系统 ROS (robot operating system) 的 Indigo 版本。为了在实验中操作方便,在移动机器人平台的选择上,使用了 Turtlebot 移动机器人平台,在同一个 ROS 操作系统上进行地面移动机器人平台的移动路径控制。

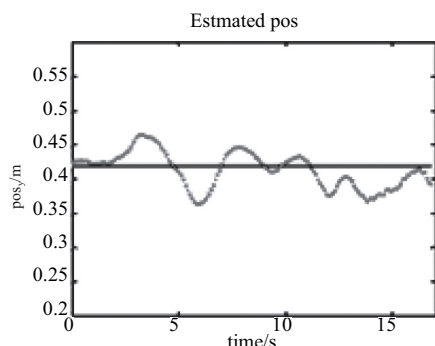
2.2 实验描述

第1个实验完成的是无人机对视觉标识的定点悬停精度控制实验,数据分析见图8。将无人机的高度固定在标识上方的 1.8m 水平面,设定无人机路径自主飞行靠近二维码标识,当无人机视觉检测到地面标识的时候,自主切换成视觉控制模式将无人机悬停于二维码标识的正上方位置,实验结果如图8所示。深色的轨迹点表示无人机飞行位置的采样点,浅色固定点是二维码的放置位置。从图8b)和图8c)中可以看出,无人机在定点悬停的时候, x, y 方向上的误差可以控制在 10 cm 以内。

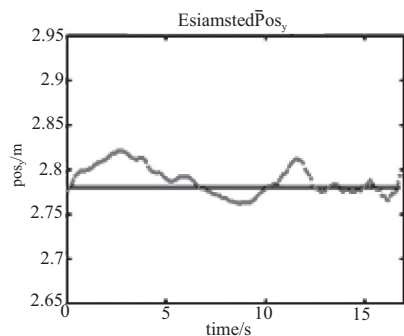
第2个实验描述的是无人机追踪地面移动机器人实



a) 定点悬停轨迹



b) x方向定点示意

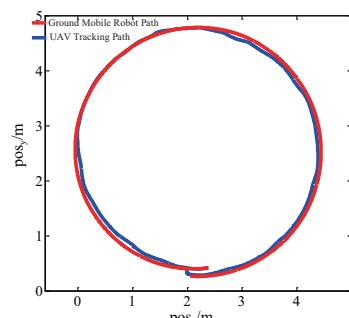


c) y方向定点示意

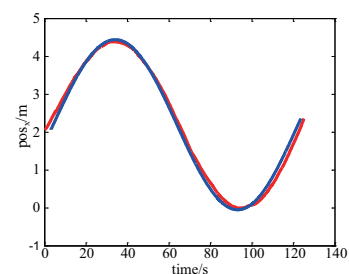
图8 实验1 定点悬停实验

验,实验数据分析如图9所示。将二维码标识放置于地面移动机器人的上表面,通过相机检测二维码标识解算移动机器人此时的运动姿态,将解算数据实时返还给无人机控制系统完成对移动机器人的跟踪实验。实验中将地面移动机器人的移动路径设置成一个近似圆的曲线运动,实验过程中无人机可以很及时地根据实时反馈的运动消息来调整自身的位置控制,很好地验证了无人机视觉导航系统的实时性。

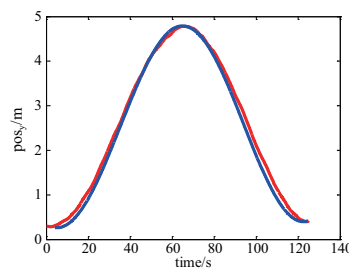
实验3进行的是无人机在移动机器人平台的降落实验,实验数据分析如图10所示。利用一个小型的 Turtlebot 机器人搭载一块具有多重二维码标识的降落板,在无人机降落到标识板上的同时控制地面移动机器人在水平面运动,从图10a)中可以看到,无人机在起飞后,先上升到指定的飞行高度,向前飞行搜索到移动机器人的降落标识并迅速向移动机器人靠近,确定降落目标后开始降落。为了保证无人机在实验中的安全保护,选择在距离降落板垂直高度5 cm的空中切断电机电源,完成整个降落实验。



a) 圆形轨迹跟踪

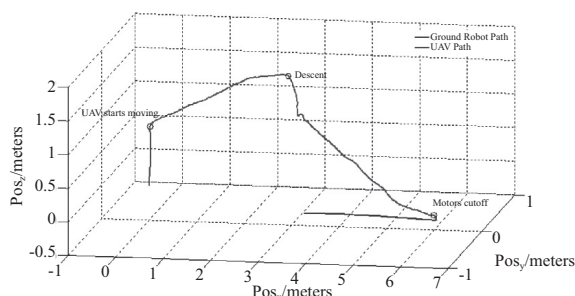


b) x方向跟踪示意

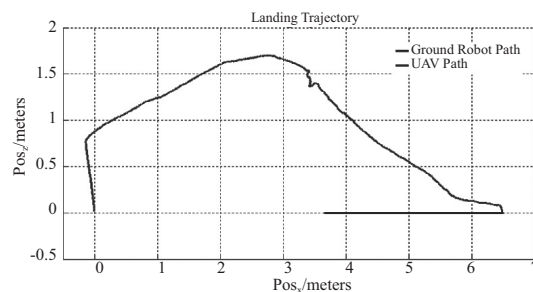


c) y方向跟踪示意

图9 实验2 跟踪实验



a) 三维降落轨迹



b) x-z平面降落示意

图10 实验3 无人机降落实验

(下转第187页)

变换取代先验概率产生重要性函数,利用当前的状态观测信息,使多数粒子向高似然区域运动,更能反映真实分布;二是通过遗传算法选择代替重采样技术,而后进行大权值粒子交叉、小权值粒子变异来丰富粒子的多样性,改进粒子滤波的退化问题。提高滤波精度的同时运行时间也变长,降低了实时性,有一定的缺陷,最后通过似然函数评价,在连续搅拌反应 CSTR 中能够快速地检测到故障的发生。

参考文献:

- [1] 王法胜,鲁明羽. 粒子滤波算法[J]. 计算机学报,2014,27(8):1679-1694.
- [2] Gordon N J, salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear non-Gaussian Bayesian State estimation[J]. IEEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 1993, 140(2): 107-113.
- [3] 刘志仓,张玲霞. 非线性系统故障诊断的粒子滤波方法[J]. 电子学报,2015,43(3):615-619.
- [4] 蒋栋年,李炜. 基于自适应阈值的粒子滤波非线性系统故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(10):2099-2106.
- [5] 王进花,曹洁. 强噪声环境下自适应 CRPF 故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报,2018(5):32-39.
- [6] Jie CAO, Mingming WU, Jinhua Wang. Novel particle filter algorithm based on invasive weed optimization [J]. Journal of Information and Computational Science, 2015, 12(12): 25-27.
- [7] 曹洁,吴明明. 基于高斯 UT 变换 H_{∞} 滤波的改进 PF 算法[C]. 青岛:中国第七届信息融合大会,2015.
- [8] 骆荣剑. 一种改进的自适应重采样粒子滤波算法[J]. 光电工程,2014,41(4):36-40.
- [9] 吴昊. 保持粒子多样性的非退化粒子滤波方法研究[J]. 电子学报,2016,44(7):1735-1741.
- [10] Wan L, Yang Y, Li Y M. Actuator fault diagnosis of automatic under water vehicle using Gaussian particle filter[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(7): 1072-1076.
- [11] 杨宁. 基于遗传算法的改进粒子滤波算法[J]. 上海交通大学学报,2011,45(10):527-530.

收稿日期:2018-03-19

(上接第 152 页)

2.3 算法适用

控制算法主要是依托 DJI 的开发平台实现的,在实验过程中将无人机的飞行速度限制在 2 m/s,可以保证无人机在飞行定位过程中有很高的精度。在无人机降落过程中,飞行过高或者过低都可能导致标识信息的不完整从而影响位姿的解算。通过复合的二维码标识组合可以有效地解决这个尺度问题。但是当无人机的速度限制放开、无人机飞行速度过高的时候,无人机的控制系统就很难自己调控将无人机拉回计算的目标位置,导致跟踪过程中位置跟踪不连续,影响控制效果。

3 结语

本文提出了一种视觉辅助系统的无人机对地面移动目标的跟踪降落方法,利用 ArUco 标识解算提供地面移动机器人的运动姿态,结合粒子滤波算法估计无人机运动姿态,从而解决了无人机跟踪降落问题,在跟踪过程中具有稳定地跟踪效果,实时性强,也能很好地保证无人机在自主降落过程中的精度,满足了无人机自主跟踪和降落的实时性要求,算法稳定。

参考文献:

- [1] 吴显亮,石宗英,钟宜生. 无人机视觉导航研究综述[J]. 系统仿真学报,2010,22(1):62-65.
- [2] Hutchinson S, Hager G, Corke P. A Tutorial on Visual Servo Control[C]// IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996:651-670.
- [3] Stockman G, Shapiro L G. Computer Vision[M]// Computer vision, Prentice Hall, 2001.
- [4] 王振,王化明. 基于单目视觉的障碍物定位和测量[J]. 机械制造与自动化,2015,44(1):198-201.
- [5] Araar O, Aouf N, Vitanov I. Vision based autonomous landing of multirotor UAV on moving platform[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 85(2): 369-384.
- [6] Garrido-Jurado S, Muñoz-Salinas R, Madrid-Cuevas F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion [J]. Pattern Recognition, 2014, 47(6): 2280-2292.
- [7] 黄楠楠,刘贵喜,张音哲,等. 无人机视觉导航算法[J]. 红外与激光工程,2016,45(7):269-277.
- [8] Tsai A C, Gibbens P W, Stone R H. Terminal Phase Vision-Based Target Recognition and 3D Pose Estimation for a Tail-Sitter, Vertical Takeoff and Landing Unmanned Air Vehicle[C]// Pacific Rim Conference on Advances in Image and Video Technology, Springer-Verlag, 2006:672-681.
- [9] Serra P, Cunha R, Hamel T, et al. Landing of a Quadrotor on a Moving Target Using Dynamic Image-Based Visual Servo Control [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 99:1-12.
- [10] 张丹,段锦,顾玲嘉,等. 基于图像的模拟相机标定方法的研究[J]. 红外与激光工程,2007,36(S1):561-565.
- [11] 牛海涛,赵勋杰. 采用棋盘格模板的摄像机标定新方法[J]. 红外与激光工程,2011,40(1):133-137.
- [12] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. Tpami, 2000, 22(11):1330-1334.

收稿日期:2018-03-26