文章编号:1001-9081(2010)06-1610-03

基于 Matlab/Simulink 的二维圆标定法

杨 洁1,2,闫清东1,马 越1

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081; 2. 西南林业大学 交通机械与土木工程学院,昆明 650224) (yj030315@ yahoo. com. cn)

摘 要:为解决传统标定法难以处理比较灵活的标定环境,要求较低的标定精度但实时性要求较高的情况,以传统的二维平面标定法为基础,提出一种以小型地面无人机动平台的行驶环境为标定环境的改进的二维圆标定法。在Matlab/Simulink 环境下实现,将传统的标定特征点由检测方块的角点改为特征圆的圆心,从而将计算量缩小为以方格角点为标定特征点的1/4,缩短了特征点的提取时间,提高了标定系统的实时性。实验结果表明,这种方法简便、高效、实用、灵活,应用环境可为任意背景。

关键词:标定;实时性;Matlab/Simulink;二维圆标定

中图分类号: TP242.6 文献标志码:A

2D circle calibration method based on Matlab/Simulink

YANG Jie^{1,2}, YAN Qing-dong¹, MA Yue¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Transportation, Machinery and Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224, China)

Abstract: In order to handle relatively flexible calibration background, and meet relatively low calibration precision requirement but relatively high real-time requirement in traditional 2D plane drone calibration method, an improved calibration method on the basis of the traditional 2D calibration was put forward, which took small unmanned ground weapon mobile platforms' driving environment as calibration environment. Being realized in Matlab/Simulink environment, this method changed the traditional calibration's detecting diamonds' horn points into circle's center, at the same time reduced account quantity to quarter of diamond's horn point method, shortened the time of distilling character points and enhanced the real-time of the system. The experimental results demonstrate that this method is simple, effective, practical and flexible, and its application environment can be any background.

Key words: calibration; real-time; Matlab/Simulink; 2D circle calibration

0 引言

随着计算机视觉应用的不断普及,摄像机标定技术的研究受到国内外学者的广泛关注^[1-3]。小型地面无人机动平台的立体视觉导航中的摄像机标定会直接关系到系统是否实用,具有举足轻重的地位。从摄像机获取的图像信息来计算三维空间中物体的几何信息,并由此重建和识别物体,而空间物体表面某点的三维几何信息与其在图像中对应点间的关系是由摄像机成像的几何模型决定的,这些几何模型参数就是摄像机参数^[1-5]。这些参数要通过实验与计算才能得到,这个实验和计算的过程被称为摄像机的标定。其中比较常用的是传统标定法,即用经过精密加工的标定块,通过建立标定块上的三维坐标已知的点与其图像点间的对应来计算摄像机的内外参数。

1 标定法的选择

传统标定法中最经典的 2D 圆标定法^[3],其原理为:在一定的摄像机模型下,基于特定的实验条件和形状、尺寸已知的平面定标参照物,经过对其图像进行处理,利用系列数学变换

和计算方法,求取摄像机模型的内部参数和外部参数。它有 两大缺点:1)标定装置价格高;2)标定环境固定,标定不灵 活,没有自主性。人们常在传统标定的基础上,根据特定的任 务和实际应用的不同而衍生出各种标定法。这里以小型地面 无人机动平台的双目立体视觉导航的行驶环境为标定环境, 具有如下的特点:1) 小型无人机动平台的行驶速度低,对标 定的精度要求不太高;2)可视高度低,实际行驶环境比室内 复杂,摄像机的外参数变化比较大,标定方法需要具有较高的 灵活性和鲁棒性。这里将 2D 法进行了改进,将矩形平面模 板改为圆平面模板,检测的特征点由方格的角点改为特征圆 的圆心,因为基于方格的边缘模糊与畸变会造成提取的角点 坐标的误差较大,而图像的中心受外界噪声的影响要比边缘 小,且这样可将计算量缩小为以方格角点为标定特征点的 1/4,在 Matlab/Simulink 环境下实现比较简单,将标定的拍摄 环境直接选为小型地面无人机动平台自主行驶的路面,不再 拘泥于实验室环境。

2 基于 2D 平面靶标的摄像机标定和数学模型 将靶标平面上的第 i 个点的坐标记为:

收稿日期:2009-12-24;修回日期:2010-03-09。

作者简介: 杨洁(1973 -),女,河南光山人,副教授,博士研究生,主要研究方向: 小型无人地面武器机动平台立体视觉环境识别、工业自动化控制; 闫清东(1964 -),男,河南济源人,教授,博士生导师,主要研究方向:武器系统总体设计与仿真; 马越(1977 -),男,内蒙古通辽人,讲师,主要研究方向: 车辆传动与控制、车辆动力学、地面无人平台运动控制。

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

第 i 点的图像坐标为:

$$m = \begin{bmatrix} u_i & v_i \end{bmatrix}^T$$

相应的齐次坐标为:

$$\widetilde{\boldsymbol{M}} = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{m}} = \begin{bmatrix} u_i & v_i & 1 \end{bmatrix}^\mathsf{T}$$

摄像机基于针孔成像模型,空间点M与图像点m之间的射影关系为:

$$s \widetilde{m} = A[R \quad t] \widetilde{M} \tag{1}$$

其中 s 为一任意的非零尺度因子。旋转矩阵 R 与平移向量 t 称 为摄像机外部参数矩阵, A 称为摄像机内部参数矩阵, 定义为:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{x} & \beta & u_{0} \\ 0 & \alpha_{y} & v_{0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 (2)

其中: (u_0, v_0) 为主点坐标, (α_x, α_x) 分别是 u 轴和 v 轴的尺度 因子, β 是 u 轴和 v 轴不垂直因子。假设靶标平面位于世界坐标系的 xy 平面上,即 z=0。在标定过程中,假定摄像机的内部参数始终不变,即不论摄像机从任何角度拍摄靶标,摄像机内部参数都为常数,只有外部参数发生变化。记旋转矩阵的第 i 列为 r, ,由式 (1) 有:

$$s_{i}\begin{bmatrix} u_{i} \\ v_{i} \\ 1 \end{bmatrix} = A[\begin{array}{ccc} r_{1} & r_{2} & r_{3} & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i} \\ y_{i} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A[\begin{array}{ccc} r_{1} & r_{2} & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i} \\ y_{i} \\ 1 \end{bmatrix}$$

仍采用 M 来表示靶标平面上的点,但此时 $M = \begin{bmatrix} x_i & y_i \end{bmatrix}^T$, $\widetilde{M} = \begin{bmatrix} x_i & y_i & 1 \end{bmatrix}^T$,记靶标平面上的点 M与对应的图像点之间的变换矩阵为H:

$$s, \ \widetilde{m} = H\widetilde{M} \tag{4}$$

其中: $H = \lambda B[r_1 \quad r_2 \quad t]$ 为 3 × 3 的矩阵, λ 为常数因子。 将式(4) 展开:

$$s \begin{bmatrix} u_{i} \\ v_{i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i} \\ y_{i} \\ 1 \end{bmatrix}$$
 (5)

由式(5) 可得:

$$\begin{cases} s_{i}u_{i} = h_{11}x_{i} + h_{12}y_{i} + h_{13} \\ s_{i}v_{i} = h_{21}x_{i} + h_{22}y_{i} + h_{23} \\ s_{i} = h_{31}x_{i} + h_{32}y_{i} + h_{33} \end{cases}$$

$$(6)$$

将式(6) 中的第1 式除以第3 式,第2 式除以第3 式分别消去s后,可得如下关于 h_y 的线性方程:

$$\begin{cases}
h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13} - u_ix_ih_{31} - u_iy_ih_{32} - u_ih_{33} = 0 \\
h_{12}x_i + h_{22}y_i + h_{23} - v_ix_ih_{31} - v_iy_ih_{32} - v_ih_{33} = 0
\end{cases} (7)$$

这样根据靶标上 n 个特征点的空间坐标 (x_i, y_i, z_i) $(i=1,2,\cdots,n)$ 与它们的图像点坐标 (u_i,v_i) $(i=1,2,\cdots,n)$,采用直接线性变换 (Direct Linear Transform, DLT) 方式来解出 M 矩阵元素。对于 n 个特征点,则有 2n 个关于 M 矩阵元素的线性方程,见下面的矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_{1} & y_{1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{1}x_{1} & -u_{1}y_{1} & -u_{1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{1} & y_{1} & 1 & -v_{1}x_{1} & -v_{1}y_{1} & -v_{1} \\ \vdots & \vdots \\ x_{n} & y_{n} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{n}x_{n} & -v_{n}y_{n} & -u_{n} \\ 0 & 0 & 0 & x_{n} & y_{n} & 1 & -u_{n}x_{n} & -v_{n}y_{n} & -v_{n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = 0$$

$$(8)$$

H矩阵与摄像机内外参数的关系如下:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = A[r_1 \quad r_2 \quad t] = \begin{bmatrix} \alpha_x & r & u_0 \\ 0 & \alpha_x & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1^T \\ r_2^T \\ 1 \end{bmatrix}$$
(9)

因假定摄像机为线性模型,只有内参数不变所以这里只给出了内参数的标定结果,其中:

$$\begin{split} \alpha_x &= \left(\left(\left(h_{11} h_{33} - \left(h_{13}^2 + v_0 \left(h_{12} h_{13} - h_{11} h_{23} \right) \right) \right) / h_{11}^2 \right)^{0.5} \\ r &= \left(\left(\left(h_{11} h_{33} - \left(h_{13}^2 + v_0 \left(h_{12} h_{13} - h_{11} h_{23} \right) \right) \right) \\ & \left(h_{11} h_{22} - h_{12}^2 \right) \right)^{0.5} \\ \alpha_\gamma &= - \left(h_{11} h_{12} \alpha_x^2 r \right) / \left(h_{11} h_{33} - \left(h_{13}^2 + v_0 \left(h_{12} h_{13} - h_{11} h_{23} \right) \right) \right) \\ u_0 &= r v_0 / \alpha_x - h_{11} h_{13} \alpha_\tau^2 / \left(h_{11} h_{33} - \left(h_{13}^2 + v_0 \left(h_{12} h_{13} - h_{11} h_{23} \right) \right) \right) \\ v_0 &= \left(h_{12} h_{13} - h_{11} h_{23} \right) / \left(h_{11} h_{22} - h_{12}^2 \right) \end{split}$$

3 改进的 2D 圆标定法的实现及特点

针对传统 2D 圆标定法的不足,将其进行改进,改进后的标定法具有以下特点:1)标定环境为小型无人地面移动机器人行驶的真实路面环境,因为天气、光线、实验拍摄角度、周围的楼房和树木的遮挡原因以及路面颜色、平整度等诸多干扰因素的存在,得到的图像不再具有标准的背景,会有很多各种各样真实的背景噪声。2)不限制拍摄角度,导致要确定图像与三维环境中的实际特征点坐标间的——对应关系成为难题。3)将经典的张正友 2D 圆标定法中采用的矩形平面靶标换成特征圆平面,这样将每处理4个特征点的问题降为处理一个特征点的问题,它将计算量缩小为以方格角点为标定特征点的1/4,缩短了提取特征点的时间,提高了标定系统的实时性。具体实现流程见图 1。

在算法设计上重点解决以下 3 个问题:1) 因标定拍摄图像的环境比室内环境复杂,尤其在环境比较复杂、噪声很大的情况下,仅采用常规滤波方法不能解决背景噪声的干扰问题。从而难以准确提取特征点的坐标。2) 将采集到的图像特征圆的圆心坐标进行排序以找到其与实际世界坐标的对应关系。3) 这里的标定精度要求不太高,故摄像机模型采用线性模型,标定的前期过程中不考虑各种各样的畸变,对标定结果进行非线性优化处理,非线性优化方法有许多种都可以用,在

此选用其中最快的一种算法: Levenberg-Marquardt 优化算法。 这里的 2D 标定是在 Matlab/Simulink 环境中实现,具体标定 流程的实现见图 1。

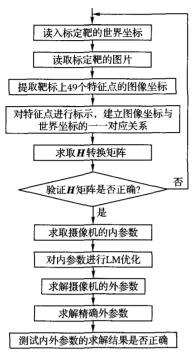


图 1 改进后的 2D 圆标定法的算法实现流程

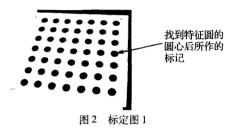
针对上面的问题,在程序设计中采用了这些解决办法: 1)增加了图像分割算法,将靶标与标定环境直接进行分离,然后提取靶标图像上的特征圆的圆心坐标。图 2 为提取图中的一幅。2)将靶标图像的 4 个点固定在一个标准表面上,然后求出每个点与标准平面上的映射矩阵,然后在标准平面上将这些特征点进行排序,从而可以很容易地找到实际世界中的特征点在图像平面上的对应特征点。3)为解决复杂背景的强噪声问题,解决办法是将靶标直接与背景进行分离,然后提取靶标上的特征点,这里是通过鼠标手动取标定靶的 4 个边界点连成一个四边形从而将其与背景分割。

4 标定和实验结果分析

标定环境选为小型地面移动机器人行驶的真实环境,因 为机器人在实际行驶过程中的光照条件会剧烈变化、路面具 有不同的平整度以及导航用摄像头在实际行驶过程中拍摄角 度经常变化等原因,故在采集标定图像时,先把标定靶放置在小型机器人行驶路面的一个有楼房或树木阴影的地方,保持靶标不动,采用普通的 CCD 数码相机,分辨率大小选为 640 × 480,从不同的方位拍摄了 8 幅图像;然后将靶标移动到一个路面平整度不同且没有楼房、树木阴影的位置上,再从不同角度、不同距离拍摄 8 幅图像。实验取其中的 5 幅图按图 1 所示的流程进行标定,用相同的相机,分辨率大小也相同,采用基于方格的经典 2D 标定,两种标定法得到的标定结果见表 1。图 2 为 5 幅标定图中的一幅。

表1 摄像机内参数标定结果

标定法	α_{x}	α_{y}	r	u_0	v_0	运行时间/ms
改进的标定法	492.4	1151.2	-95.7	-616.2	178.7	200
经典 2D 圆标定法	489.2	1131.4	- 97.5	-613.5	181.7	350



5 结语

实验结果表明:采用这种改进后的标定法,以小型地面移动机器人的行驶环境为标定背景,应用场景大大扩展,标定所需要的计算量和时间较传统的 2D 矩形平面标定法^[3] 小很多,处理时间大大缩短(由 350 ms 缩短到 200 ms)。标定程序在 Matlab 的 Simulink 平台中编写、实现,比采用传统方法编程简单且易于实现。

参考文献:

- [1] 张艳珍, 欧宗瑛. 一种新的摄像机线性标定方法[J]. 中国图象图 形学报: A 辑, 2001, 6(8): 25 27.
- [2] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 69-97.
- [3] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [4] 全红艳, 张田文. 基于运动的摄像机定标方法的综述[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(22):113-115, 128.
- [5] 刘金颂, 原思聪, 张庆阳, 等. 双目立体视觉中的摄像机标定技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(6): 237 239.

(上接第1609页)

- [4] LI QINGQUAN, LIU XIANGIONG. Novel approach to pavement image segmentation based on neighboring difference histogram method [C]// 2008 Congress on Image and Signal Processing. Washington, DC: IEEE, 2008: 792 – 796.
- [5] 王强,王风. 一种保持图像几何特征的去噪模型[C]// 中国通信学会第五届学术会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2008: 433 438.
- [6] 仵冀颖, 阮秋琦. 基于整体变分和变换域分析的复合去噪模型 [J]. 信号处理, 2008, 24(2): 277 280.
- [7] 李俊山,李旭辉.数字图像处理[M].北京.清华大学出版社, 2007.
- [8] FIORE L, CORSINI G, GEPPETTI L. Application of non-linear fil-

- ters based on the median filter to experimental and simulated multiunit neural recordings [J]. Journal of Neuroscience Methods, 1996, 70(2):177-184.
- [9] 丁亚军,谢可夫.改进型中值滤波和形态学组合降噪方法[J]. 计算机与现代化,2007(2):41-45.
- [10] 刘华军,任明武,杨静宇.一种改进的基于模糊聚类的图像分割方法[J].中国图象图形学报,2006,11(9):1312-1316.
- [11] YIN L, YANG B, CABBOUJ M. Weighted median filters: a tutorial[J]. IEEE Circuits and Systems Society, 1996, 43(3): 157 192.
- [12] 孙波成, 邱延峻. 路面裂缝图像处理算法研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2):64-68.
- [13] 张强, 那彦, 李建军. 基于边缘几何特征和频域相关技术的图像 匹配方法[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 285-288.