

基于粒子群算法的摄像机内参数优化方法

郭彤颖, 李宁宁*, 刘 雍

沈阳建筑大学信息与控制工程学院, 辽宁 沈阳 110168

摘要 针对 MATLAB 标定工具箱的标定精度与所拍图像数量成正比的问题, 即拍摄照片数量越多标定精度越高, 提出了一种基于粒子群算法的摄像机内参数优化方法, 从而达到拍摄少量图片也可以有较好精度的效果。首先摄像机从不同角度拍摄 4 张和 20 张标定板图片, 利用 MATLAB 标定工具箱分别求取它们的内参数。然后根据标定点的实际坐标和反投影坐标建立目标函数, 再由粒子群算法对标定箱求取的内参数进行优化。实验结果对比表明: 与 MATLAB 标定工具箱相比, 此方法能够在一定程度上提高少量标定板图片的标定精度。

关键词 机器视觉; 摄像机标定; 粒子群优化; 摄像机模型

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111504

Optimization of Camera Internal Parameters Based on Particle Swarm Algorithm

Guo Tongying, Li Ningning, Liu Yong

School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China

Abstract Aiming at the problem that the calibration accuracy of MATLAB calibration toolbox is proportional to the number of images taken, which means the larger the number of photo frames, the higher the calibration accuracy. A method of internal parameter optimization based on particle swarm algorithm is proposed, and the better effects can be achieved with few pictures. First the camera shoots 4 and 20 calibration plate pictures in different angles, and their internal parameters are obtained with the use of MATLAB calibration toolbox. The objective function is established through the calibration point of the actual coordinates and the back projection coordinates, and then the internal parameters obtained by calibration box are optimized by the particle swarm algorithm. The experimental results show that this method can improve the calibration accuracy of a small number of calibration plate pictures to a certain extent compared with the MATLAB calibration toolbox.

Key words machine vision; camera calibration; particle swarm optimization; camera model

OCIS codes 150.1488; 120.0120; 080.1753

1 引言

摄像机标定^[1]是机器视觉中的重要问题, 在定位、工业监测、三维重建以及质量控制等领域扮演着十分重要的角色。实际上, 摄像机标定就是求取摄像机内外参数的过程, 以便帮助复原空间物体, 即将二维平面信息转换成三维立体信息。另外, 机器视觉精度也受摄像机标定精度直接影响。

目前, Tasi^[2]的两步标定法和张正友平面标定法^[3]是较为人知的标定方法。Tasi 方法的优点是过程简单、标定精度高、稳健性高; 缺点是价格昂贵, 对标定设备的精度要求很高, 无法普遍适用。而张正友平面标定法, 只要获取标定模板两幅以上不同角度的拍摄图像, 就可得出摄像机的内参和外参, 而且所用的标定模板制作简单。但是这种方法的精确度往往取决于拍摄照片的质量和数量, 照片数量过少则精确度无法保证。为了解决这个问题, 近年来, 相关学者们在粒子群算法和摄像机标定研究方面取得了很大突破, 发现该算法

收稿日期: 2017-06-04; 收到修改稿日期: 2017-07-04

作者简介: 郭彤颖(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事机器人控制和模式识别方面的研究。E-mail: tyhchguo@126.com

* 通信联系人。E-mail: 1224271642@qq.com

稳健性强、流程简单,且易与具体问题相结合^[4-10]。

本文采用基于二维平面标靶的摄像机标定法,分别拍取4张和20张标定板图片,并借助MATLAB标定工具箱,首先通过摄像机线性模型分别求取初始参数,然后利用标定箱自带的梯度下降法优化得出内参,比较4张和20张标定板图片的标定结果,可以得到拍摄照片数量越多标定精度越高的结论。最后采用线性递减权值的粒子群算法对4张标定板图片的参数进行再优化,进而提高标定后的结果。但由于拍摄环境无法控制,必定会造成一定的误差。

2 线性摄像机模型

模型建立的过程实质上是完成空间点到图像平面的投影,其数学形式表示为几个坐标系之间的转换。为了定量的描述光学成像过程,首先定义图像坐标系、摄像机坐标系与世界坐标系,然后用数学公式表示出图像点与空间点的对应几何位置关系。摄像机针孔透视模型是普遍应用的摄像机线性成像模型^[11-12]。

单目摄像机模型如图1所示,空间中任意点在该摄像机模型下,从世界坐标系到计算机图像坐标系的转换需要以下步骤^[13]:

1) M 点的世界坐标系向摄像机坐标系转换。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移向量 \mathbf{t} 来描述, \mathbf{R} 为 3×3 正交单位矩阵, \mathbf{t} 为三维平移向量, $\mathbf{0} = (0, 0, 0)^T$, \mathbf{M}_1 为 4×4 矩阵。

2) M 点摄像机坐标系向理想成像点的平面图像坐标系转换。

空间中任一点 M 在图像上的成像位置可以近似地用针孔模型表示,即任何点 M 在图像上的投影位置 m 为光心 O_c 与 M 点的连线 O_cM 与图像平面的交点。这种关系也叫做中心摄影或透视投影。由比例关系可知:

$$x = \frac{fX_c}{Z_c}, \quad (2)$$

$$y = \frac{fY_c}{Z_c}, \quad (3)$$

式中 (x, y) 为 M 点的图像坐标, (X_c, Y_c, Z_c) 点 M 在摄像机坐标系的坐标, f 为焦距。采用齐次坐标与矩阵表示上述透视投影关系:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

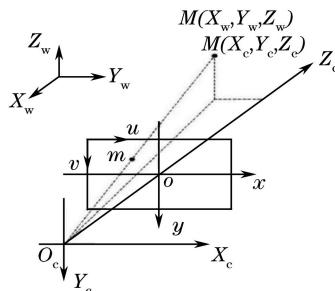


图1 单目摄像机模型

Fig. 1 Monocular camera model

3) M 点理想成像点平面坐标系向图像平面坐标系转换。

$$u = \frac{x}{d_x} + u_0, \quad (5)$$

$$v = \frac{y}{d_y} + v_0, \quad (6)$$

式中 d_x 与 d_y 是每一个像素在 x 轴与 y 轴上的物理尺寸, (u_0, v_0) 为 O 点的坐标。

3 带线性递减权值的粒子群算法

3.1 粒子群算法

粒子群算法源于对鸟群捕食行为的研究,它是一种进化计算技术,亦是一种全局智能优化算法,由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士于 1995 年提出。

其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解。鸟被抽象为没有质量和体积的微粒,每个粒子都有一个由目标函数决定的适应值,并且知道自己到目前为止发现的最好位置(p_{best}),除此之外,每个粒子还知道到目前为止整个群体中所有粒子发现的最好位置(g_{best}),然后通过迭代找到最优解。在每次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己。也就是说在 D 维搜索空间中,由 N 个粒子组成的群落在找到两个最优值后,粒子通过两个公式更新自己的速度和位置,公式如下:

$$v_i^{k+1} = W \cdot v_i^k + c_1 \cdot x_{rand} \cdot (p_{best} - x_i^k) + c_2 \cdot x_{rand} \cdot (g_{best} - x_i^k), \quad (7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}, \quad (8)$$

式中 W 称为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子,通常取常数 2; x_{rand} 是服从 $U(0,1)$ 分布的随机数。将最大迭代次数或者预设的适应值作为终止条件。

3.2 惯性权重 W 的调整

在速度更新公式中,可以看到惯性权重 W 不仅影响着粒子的飞行速度,也是调节算法收敛性质的重要参数。权重 W 较大,则全局寻优能力强,局部寻优能力弱;权重 W 较小则反之。实验发现,动态 W 能够获得比固定 W 更好的寻优结果。如今,采用较多的是线性递减权值,其公式如下:

$$W = W_{max} - \left[\frac{W_{max} - W_{min}}{N_{itermax}} \right] \cdot N_{iter}, \quad (9)$$

式中 $W_{max} = 0.9$, $W_{min} = 0.5$, N_{iter} 为迭代次数, $N_{itermax} = 200$ 。

4 基于粒子群算法的摄像机内参优化

4.1 利用 MATLAB 标定箱求取内参

摄像机标定工具箱^[14]采用基于二维标定板的摄像机标定,通过线性初始化以及非线性优化的方法求取摄像机的内参数。

1) 加载图像

将摄像机拍好的标定板图片保存到 MATLAB 目录下,运行标定工具箱中的主程序,并通过 Image names 按钮加载图像数据,如图 2 所示。

2) 角点提取

在完成图像加载后,单击 Extract grid corner 按钮,分别提取 4 张图像的 4 个角点,而其他点电脑会自动提取,如图 3 所示。

3) 校准

点提取后,单击 Calibration 按钮,计算机会先求出没有畸变的初始参数,再通过迭代梯度下降法优化求出含有畸变的内参。

4.2 基于粒子群算法优化

利用实际测量的标定点坐标 (x, y) 和模型计算得到的投影坐标 (x', y') 之间的残差建立目标函数:

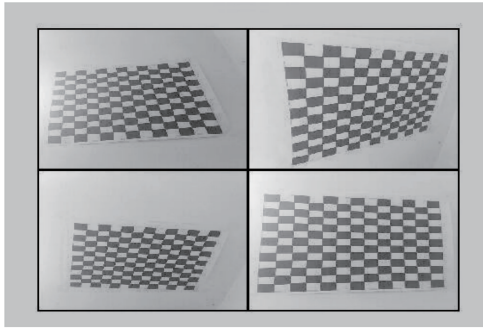


图 2 加载图像

Fig. 2 Load the images

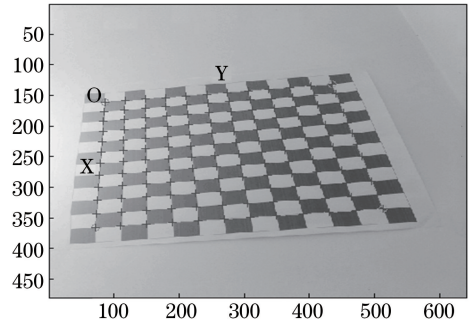


图 3 角点提取

Fig. 3 Corner extraction

$$f(X) = \sum_i^N [(x - x')^2 + (y - y')^2]. \quad (10)$$

根据(10)式建立粒子群算法的优化模型,模型中的参数包括摄像机的8个内参和标定点的反投影坐标共10个参数, $f_1, f_2, c_1, c_2, k_1, k_2, k_3, k_4$ 为MATLAB标定箱求取的内参数, x', y' 为反投影坐标。式中 $N=20$,代表标定点(粒子)个数, X 代表视觉测量系统参数,即 $X=[f_1, f_2, c_1, c_2, k_1, k_2, k_3, k_4, x', y']$,其范围为 $[X_{up}, X_{down}]$, $X_{up}=[f_1+3, f_2+2, c_1+2, c_2+1, k_1+0.02, k_2+0.04, k_3+0.002, k_4+0.001, x', y']$, $X_{down}=[f_1-3, f_2-2, c_1-2, c_2-1, k_1-0.02, k_2-0.04, k_3-0.002, k_4-0.001, x', y']$ 。

通过粒子群算法对已求的内参数进行优化,是为了找到使 $f(x)$ 值最小的参数,从而组成最优组合。具体实验步骤如下:

- 1) 从MATLAB标定工具箱角点提取步骤中求得的标定坐标中随机选取20个点,即粒子群的个数 N 。
- 2) 利用标定工具箱求取摄像机的内参数,并找到和1)步20个点对应的标定坐标反投影坐标。
- 3) 初始化粒子群,将内参数和反投影坐标等10个参数作为粒子群一个微粒的 i 个分量,并以2)步作为初始值随机生成20个粒子。
- 4) 根据(10)式计算每个粒子的适应度,即将每个公式带入目标函数。
- 5) 根据(7)、(8)式计算粒子所经历的最好位置 p_{best} 和群体中所有粒子经过的最好位置 g_{best} 。
- 6) 采用线性递减权值,计算 W 值。
- 7) 根据公式对粒子位置和速度进行更新。
- 8) 判断目标函数适应度是否足够好或者达到最大迭代次数,如果满足结束运行,不满足则返回4)步继续运行。

5 仿真结果

基于上述原理与流程,采用每格大小为30 mm×30 mm的棋盘格作为标定板,按照上述标定箱方法,在MATLAB2010b环境下分别运行求取4张图片和20张图片的摄像机内参数,结果分别如表1、2所示。

表 1 4张图片的标定箱内参数结果

Table 1 Internal parameters of four pictures by the calibration box

Internal parameter	Initial internal parameter	Optimized internal parameters by the calibration box
f_1	347.45752	693.94495 ± 3.66954
f_2	347.45752	390.62218 ± 2.15588
c_1	319.50000	320.88460 ± 3.60133
c_2	239.50000	239.89918 ± 2.16245
k_1	0	0.08659 ± 0.01981
k_2	0	-0.12041 ± 0.07626
k_3	0	0.00209 ± 0.00266
k_4	0	0.00257 ± 0.00175

表 2 20 张图片的标定箱内参数结果

Table 2 Internal parameters of 20 pictures by the calibration box

Internal parameter	Initial internal parameter	Optimized internal parameters by the calibration box
f_1	433.13251	694.58616 ± 1.60273
f_2	433.13251	391.50948 ± 0.89854
c_1	319.50000	320.91702 ± 1.43920
c_2	239.50000	239.23089 ± 0.89007
k_1	0	0.07339 ± 0.00736
k_2	0	-0.08090 ± 0.02639
k_3	0	0.00159 ± 0.00114
k_4	0	0.00166 ± 0.00078

采用焦距为 3.8 mm,感光尺寸为 1/3.06 的 Cool1 dual 手机拍照,像元尺寸为 $6.72 \mu\text{m}$,实验图片大小为 640×480 。焦距公式为

$$f = (f_1 \cdot d_x + f_2 \cdot d_y) / 2. \quad (11)$$

比较表 1、2 可知,根据 4 张图片所求内参数的不确定值远大于由 20 张图片所求内参数的不确定值。再根据(11)式可得,4 张图片求取的平均焦距为 3.644 mm,20 张图片求取的平均焦距为 3.649 mm。由此可见,标定箱的标定精度与所拍图片数量成正比,即所拍照片数量越多,标定精度越高,不确定值越小。为了提高 4 张图片的标定精度,运行粒子群程序优化标定箱求得的内参数,7 次实验后的内参结果如表 3 所示。

表 3 粒子群优化后的 7 次内参数结果

Table 3 Internal parameters of particle swarm optimization after seven times

Internal parameter	The first time	The second time	The third time	The fourth time	The fifth time	The sixth time	The seventh time
f_1	695.0135	693.8495	690.3923	696.4635	694.6998	692.8073	693.7739
f_2	391.5613	391.7222	392.2500	387.9241	388.5055	392.1620	391.3439
c_1	320.1461	320.8836	317.4493	320.6263	323.5114	322.2298	318.5872
c_2	238.4664	240.4473	240.0970	241.6584	240.4020	239.2605	240.3426
k_1	0.0915	0.0867	0.0864	0.0814	0.0903	0.0793	0.0839
k_2	-0.1189	-0.1239	-0.1298	-0.1154	-0.1125	-0.1297	-0.1178
k_3	0.0054	0.0032	0.0019	0.0021	0.0039	0.0011	0.0041
k_4	0.0031	0.0028	0.0037	0.0049	0.0015	0.0024	0.0011

在粒子群算法中,当迭代次数大于 200 或者 $f(X)$ 小于设置值时,程序停止运行。根据焦距(11)式可知,7 次实验优化后的焦距分别为 3.651,3.648,3.638,3.644,3.640,3.645,3.646 mm。

由表 1~3 可知,MATLAB 标定箱根据不同图片求得的内参数与粒子群算法优化后的内参数存在些许变化。但焦距的计算结果表明,粒子群方法的焦距结果大多数情况下要比 4 张图片的焦距准确,甚至有时其焦距还高于 20 张图片所求得的焦距。同时,从表 1~3 也可以看出,粒子群优化后的大多数参数更加接近表 2 的参数范围。因此,粒子群算法可以在一定程度上提高摄像机的标定精度。

6 结 论

阐述了摄像机线性模型的构建和摄像机标定的原理,介绍了 MATLAB 标定工具箱的用法,并分别求出了 4 张图片和 20 张图片的内参数。对摄像机标定精度的相关问题进行了研究,得到了拍摄照片数量越多标定精度越高的结果。为了克服拍摄照片少、精度无法保证的缺点,将粒子群算法用于摄像机标定中,并给出了具体的实验步骤。实验结果表明,粒子群算法可以在一定程度上提高摄像机的标定精度。

参 考 文 献

- [1] 马颂德,张正友. 计算机视觉—理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社,1998.

- [2] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [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] Yin Chunping, Chen Yifeng, Wu Liaoni. Optimization of camera calibration process based on PSO algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(1): 100-103.
殷春平, 陈艺峰, 吴了泥. 基于粒子群算法的摄像机标定过程优化[J]. 机电工程, 2012, 29(1): 100-103.
- [5] Zhu Bing, Qi Mingjun. Hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(9): 47-50.
朱冰, 齐名军. 混合粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(9): 47-50.
- [6] Wang Juanqin, He Dongjian, Sun Jianmin. Research of effectiveness of five particle swarm optimization models[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(33): 62-65.
王娟勤, 何东健, 孙建敏. 五种粒子群优化模型效率的而研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(33): 62-65.
- [7] Zhang Tao, Yan Zhiyang, Zhang Liang. Method of camera calibration based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Video Engineering, 2013, 37(23): 234-237.
张涛, 闫志扬, 张良. 基于改进粒子群优化算法的摄像机标定[J]. 电视技术, 2013, 37(23): 234-237.
- [8] Zhang Qiang, Wang Xin, Li Haibin. Calibration algorithm of underwater imaging system based on PSO[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0111004.
张强, 王鑫, 李海滨. 基于粒子群优化的水下成像系统标定[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0111004.
- [9] Lu Jin, Sun Huibin, Chang Zhiyong. A novel method for camera calibration with orthogonal vanishing points[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0208001.
卢津, 孙惠斌, 常智勇. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0208001.
- [10] Zhu Jia, Li Xingfei, Xu Yingxin. Camera calibration technique based on active vision[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1297-1303.
朱嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1297-1303.
- [11] Lei C. A new camera self-calibration method based on active vision system[J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(11): 1130-1139.
- [12] Zhang Guangjun. Visual measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008: 14-32.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 14-32.
- [13] Xu Jie. Analyzing and improving the Tsai camera calibration method in machine vision[J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(4): 45-48.
徐杰. 机器视觉中摄像机标定 Tsai 两步法的分析与改进[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 45-48.
- [14] Sun Ting, Bu Fanliang. Camera calibration based on MATLAB toolbox[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2016, 11: 75-77.
孙婷, 卜凡亮. 基于 MATLAB 工具箱的摄像机标定[J]. 电脑编程技巧与维护, 2016, 11: 75-77.