

深度空间小视角摄像机标定

赵敏, 郑兴纯, 黄秋红, 朱凌建

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对深度空间小视角摄像机标定, 建立基于立体靶标的仿真分析方法, 深入分析了靶点的空间分布各因素对摄像机内参数标定精度的影响, 提出在摄像机标定之前合理设计靶点的数目及位姿分布的思想。分析表明, 靶点的空间分布范围对标定精度的影响最大, 靶点的数目对精度影响较小; 从最近测量距离开始布置靶点, 可提高标定精度。提出一种结合感兴趣区域和灰度矩亚像素边缘检测的图像光斑中心定位的算法, 有效保证了定位精度和运行效率。构建虚拟立体靶标对摄像机内参数进行了快速标定, 参数标定精度高, 具有实际应用价值。该方法也适用于无需靶标拼接的摄像机标定。

关键词 机器视觉; 摄像机标定; 立体靶标; 中心定位; 小视角; 仿真分析

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091502

Camera Calibration with Narrow Field of View for Deep Space

Zhao Min, Zheng Xingchun, Huang QiuHong, Zhu Lingjian

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract Aiming at the calibration of camera with a narrow field of view for deep space, the simulation analysis method based on stereo target is built. The spatial distribution influence of the target points on the accuracy of camera calibration is analyzed thoroughly. The number and position distribution of the target points are reasonably designed before camera calibration. The results show that spatial distribution scope of the target points has the greatest influence on the calibration accuracy while the number of target points has little influence. The calibration accuracy can be enhanced by arranging target points from the nearest measuring distance. A center location algorithm combining the region of interest with sub-pixel edge detection by the gray moment is proposed to locate the image target spot. The location accuracy and the processing efficiency of the image algorithm are improved effectively. The virtual stereo target is arranged to calibrate the intrinsic parameter of a camera quickly. The calibration precision is high and the method has practical application value. This method is also applicable to camera calibration without target stitching.

Key words machine vision; camera calibration; stereo target; center location; narrow field of view; simulation analysis

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135; 100.2000

1 引言

在视觉三维测量中, 为了提高空间分辨率常采用长焦距镜头^[1], 但其视场角相对较小, 由图像误差带来的摄像机标定误差非常明显^[2], 如何实现小视角摄像机高精度标定是亟待解决的问题。对于一定深度空间的视觉测量而言, 基于虚拟立体靶标的摄像机标定是保证测量精度的前提。小视角摄像机标定无需较大靶标或靶标拼接。如何简单高效地构建虚拟立体靶标以及提高图像处理算法的性能是实现快速高精度摄像机

收稿日期: 2017-03-24; **收到修改稿日期:** 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51405382)

作者简介: 赵敏(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事视觉测量、坐标测量方面的研究。

E-mail: zhaomin1973@xaut.edu.cn

标定所需解决的问题。

在标定方法确定的情况下,摄像机标定的精度取决于靶点图像光斑中心坐标的提取精度、靶点的数目以及位姿分布等因素。文献[3]对光斑中心定位是利用 7×7 模板与图像卷积的方法来计算前三阶灰度矩,进而通过判断边缘条件是否成立来求出边缘的相应信息,但此方法在计算时需访问图像中每一个像素,对于高分辨率成像图像来说,图像处理计算量大,效率低下。董明利等^[4]主要对靶点中心定位算法进行了讨论,将基于 Zernike 矩的亚像素边缘提取和改进后的最小二乘拟合相结合定位靶点中心,提高了摄像机内参数的标定精度。Chen 等^[5]主要研究将改进的两步法与精确控制点相结合来精确校准立体摄像机的新技术,实验采用了每层 42 个靶点,4 层分布,共 $42 \times 4 = 168$ 点的靶点布局,对靶点如何布局未进行说明。叶东等^[6]采用二次高斯曲面拟合,精确地提取 440 个靶点的质心坐标,校准过程包括线性参数估计和基于最大似然估计的非线性校正,也未对采用的 440 个靶点进行进一步解释。杨博文等^[7]在研究中采集了 $5 \times 7 \times 7 = 245$ 个靶点,采用高斯曲面拟合计算了光斑的中心,并指出靶点的采集过程相对比较费时。文献[8]采用了 20000 个空间标定点,靶点每层之间呈梯形分布的摄像机分区域标定方法,针对如此多的靶点,坐标机运动和摄像机采集必须自动配合,给实际应用带来困难。以上学者的研究对于靶点的数目和位姿分布并没有深入的分析,针对不同成像目标,结合算法的测量精度、稳定性和运算效率,采用了不同的中心定位算法。

本文提出一种结合感兴趣区域扩展和灰度矩亚像素边缘检测的算法,实现光斑中心高精度定位,降低了图像处理时的计算量,节省了时间。建立基于立体靶标的仿真分析方法,通过仿真和实际实验验证,实现了虚拟立体靶标的高效构建,达到高效率高精度的摄像机标定。该方法不仅适合于深度空间小视角摄像机的内参数标定,而且对无需靶标拼接的摄像机标定均适用。

2 摄像机标定方法

2.1 摄像机成像模型

设空间中一点 P 在世界坐标系下的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) , 在摄像机坐标系下的坐标为 (X, Y, Z) , 在像面坐标系下的坐标为 (x, y) , 在图像像素坐标系下的坐标为 (u, v) , (x_d, y_d) 为因透镜畸变引起偏差的实际像面坐标。

忽略透镜畸变,求解摄像机针孔成像模型参数的过程就是空间点 P 在世界坐标系与图像像素坐标系之间的转换关系^[9-14],即:

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 f 为摄像机的焦距, (c_x, c_y) 为像平面坐标系的原点在像素坐标系下的坐标, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量,为摄像机外参数。 m_{ij} 是透视变换矩阵 \mathbf{M} 的元素。

在摄像机成像模型中需要考虑镜头的径向畸变和切向畸变^[11-12,15],畸变后的图像像素坐标 (u, v) 表示为

$$\begin{cases} u = fx_d + c_x \\ v = fy_d + c_y \end{cases} \quad (2)$$

令 $r^2 = x^2 + y^2$, k_1, k_2 分别为一、二阶径向畸变系数, p_1, p_2 分别为一、二阶切向畸变系数,则

$$\begin{cases} x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2(r^2 + 2x^2) + 2p_1 xy \\ y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{cases} \quad (3)$$

摄像机成像模型中 $c_x, c_y, f, k_1, k_2, p_1, p_2$ 即为摄像机内参数。摄像机内参数描述摄像机内部几何结构参数及镜头的光学特性,标定好内参数的摄像机即可应用于实际测量。

2.2 摄像机标定仿真方法

用 Matlab 软件编写摄像机标定仿真程序,本文标定仿真算法依照以下过程:

1) 设置摄像机初始内参数

设置摄像机内参数,包括摄像机像元大小 d ,主点 (c_x, c_y) ,焦距 f 以及径向畸变 k_1, k_2 和切向畸变 p_1, p_2 。

2) 设置摄像机相对于靶标的空间姿态

假设靶点绕摄像机坐标系 X, Y, Z 三个方向的转角分别为 α, β, γ , 则旋转矩阵 \mathbf{R} 可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

并设置相应的平移向量 $\mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_z$, 即摄像机坐标系和世界坐标系的平移关系。

3) 靶点空间数据的创建

预设好靶点数目 N 、靶点的空间分布范围和空间分布层,模拟创建空间点坐标,即构建一系列靶点空间点阵,得到它们的空间坐标 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) , 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

4) 靶点图像中心坐标的确定

由空间坐标 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) , 利用(1) ~ (4) 式可得理想图像坐标。考虑图像处理误差,给理想图像坐标增加符合正态分布的随机噪声,噪声标准差设为 0.05 pixel, 得到含噪声的图像坐标 (u_i, v_i) 。

5) 线性求解摄像机参数初值

利用 Abdel-Aziz 等^[16-17]提出的直接线性变换(DLT)方法,线性求解摄像机参数初值。把上述的数据 $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, u_i, v_i)$ 作为已知量,用最小二乘法可求出(1) 式中的 \mathbf{M} 矩阵,再通过参数分解^[12] 计算可求出共 13 个摄像机参数初始值 $X_0 = (t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma, c_x, c_y, f, k_1, k_2, p_1, p_2)$ 。

6) 求解摄像机参数最优解

建立使所有靶点图像像素坐标重投影误差平方和最小的目标函数 $g(X)$, 采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法解出摄像机标定的最优解^[13, 18-19]。目标函数表示为

$$g(X) = \min \left\{ \sum_{i=1}^N (u'_i - u_i)^2 + (v'_i - v_i)^2 \right\}, \quad (5)$$

式中 (u'_i, v'_i) 为利用优化后摄像机参数并结合(1)、(3)、(4) 式求得的图像像素坐标;将步骤 5) 求解的 X_0 作为 X 的优化初值, $X = (t'_x, t'_y, t'_z, \alpha', \beta', \gamma', c'_x, c'_y, f', k'_1, k'_2, p'_1, p'_2)$ 为优化后的摄像机内外参数。

7) 内参数标定精度分析

参数标定精度是同步变化的,因此通过观察主点和焦距精度来评判内参数标定精度。比较标定参数与初始设置参数 $\Delta c_x = c'_x - c_x, \Delta c_y = c'_y - c_y, \Delta f = f' - f$, 依此选择合理的靶点空间分布。

3 靶点分布设计

为了保持结论的一致性,仿真研究采用的参数与标定实验系统的参数基本一致,如表 3 所示。成像视角小于 12° , 测量深度大于 1 m。若无特殊说明,仿真研究时摄像机正对靶点标定,世界坐标系与摄像机坐标系间的距离 $t_z = 1500$ mm。

3.1 靶点数目

在设置相关初始参数之后,设定靶点空间分布范围 $320 \times 240 \times 600$, 空间分布层数随靶点数目的增加而增加。运行仿真程序,经过 200 次仿真标定后,不同靶点数目内参数标定精度如图 1 所示。

选取靶点数目依次为 40、50、100、200、500、1000、2000 个点,三条曲线分别表示摄像机中心 (c_x, c_y) 和焦距 f 标定精度的标准差 S_{c_x}, S_{c_y}, S_f 。由图 1 可知,靶点数目增加标定精度提高,当靶点数目大于 100 后,增加点数对提高标定精度影响不大。

3.2 空间分布范围

空间分布范围包括 X, Y 方向空间范围、 Z 深度空间范围以及空间分布形状。对于 X, Y 方向,随着成像范围的增大,摄像机内参数的标定精度提高,目前已经达成共识,在此不再赘述。

设定靶点数目为 100, 2 层均匀分布,图 2 为世界坐标系下的靶点 Z 方向范围(深度空间范围) D_z 与标定精度的关系图。深度空间范围 D_z 和标定精度的关系比较显著,随着深度空间范围增大,内参数标定精度提高,尤其是焦距 f 的标定精度和深度空间范围的相关性增大。因此,在摄像机标定中依据标定系统配置

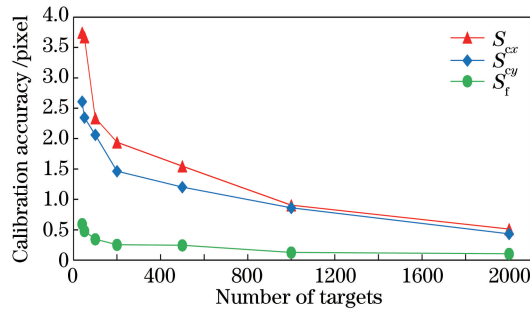


图1 靶点数目与标定精度的关系

Fig. 1 Relationship between the number of targets and calibration accuracy

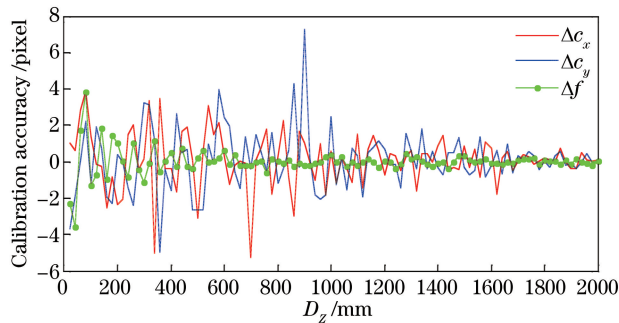


图2 靶点深度空间范围与标定精度的关系

Fig. 2 Relationship between the deep space scope of target point and calibration accuracy

和实际测量要求,尽可能选取大的空间范围,以实现高精度的参数标定。

3.3 空间分布层与形状

取 100 个靶点来分析靶点的空间分布层数与形状对标定精度的影响。先设置靶点均匀分布,但分布层数不同;再设定靶点空间梯形分布,第 1 层和第 2 层靶点投影范围基本覆盖整个成像视场。运行仿真程序,经过 200 次仿真标定后,标定精度如表 1 所示。随着空间分布层数的增加,内参数的标定精度有轻微降低的趋势,为提高标定效率和精度,实际采用 2 层空间分布层即可。在本文方法下,空间梯形分布和空间均匀分布内参数标定精度没有太大差别,而靶点空间均匀分布的像点较分散,有助于提高标定精度。因此采用易构建的空间均匀分布即可,只要保证第 1 层靶点构像基本覆盖整个成像视场即可有效保证标定精度。

表 1 不同靶点空间分布层数、形状的标定精度

Table 1 Calibration accuracy of spatial distribution layer and shape of different target points

pixel

Calibration accuracy	Uniform 2 layers	Uniform 4 layers	Uniform 5 layers	Ladder 2 layers
S_{cx}	1.23	1.52	1.90	1.35
S_{cy}	1.49	1.58	2.19	1.41
S_f	0.29	0.32	0.36	0.27

3.4 靶点相对成像面的角度和距离

设定靶点数目为 100, 2 层均匀分布,靶点相对成像面的角度和距离(即摄像机位置)与标定精度的关系如图 3 所示,图 3(a)为倾角 α 与标定精度的仿真图,由图 3 可知,靶点相对于摄像机成像面小的倾角对内参数的精度影响小,因此对标定角度没有精确的要求,摄像机近似正对靶点标定即可。

为了保证标定的精度,靶点应该分布在整个待测空间范围内,有些情况下无法构建深度空间较大的立体靶标,此时应该考虑世界坐标系与摄像机坐标系间的距离 t_z 。如图 3(b)所示,即使考虑了靶点 X、Y 方向分布范围随距离 t_z 增大而增大,但是,增大靶点和摄像机间的距离,还是会降低摄像机标定精度。因此,在坐标机深度范围小于摄像机测量范围的情况下,从最近测量距离开始布置靶点,在坐标机最大的深度范围进行标定就可以得到最高的标定精度。

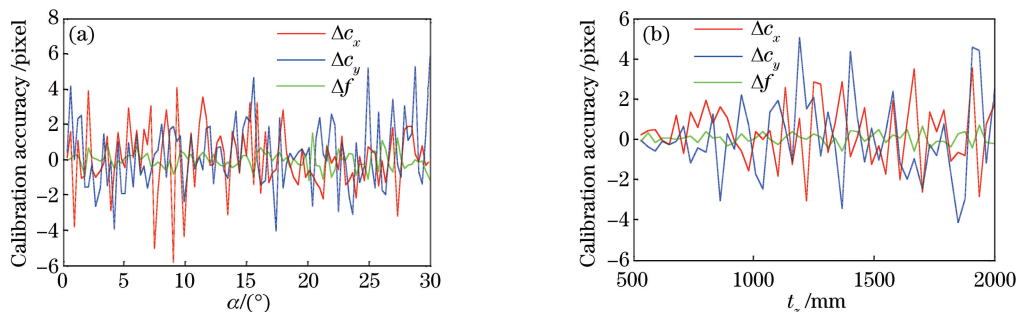


图3 摄像机位置与标定精度的关系。(a)倾角 α ;(b)距离 t_z

Fig. 3 Relationship between the camera position and calibration accuracy. (a) Angle α ; (b) distance t_z

4 靶点图像中心定位

在2.2节靶点图像坐标的确定过程中加入标准差 $\sigma=0.05$ 的图像随机噪声来模拟实际得到含噪声的图像坐标,图像噪声标准差表示靶点中心定位误差。为了分析靶点中心定位误差与标定精度的关系,设定靶点数目为100,按照 $10 \times 5 \times 2$ 的布局均匀分布,图像噪声标准差 σ 从0到0.25连续变化,运行仿真程序,观察不同靶点中心定位误差与标定精度的关系,如图4所示。随着图像噪声的增大,摄像机标定精度明显降低,因此,在标定过程中需保证靶点中心的定位精度。

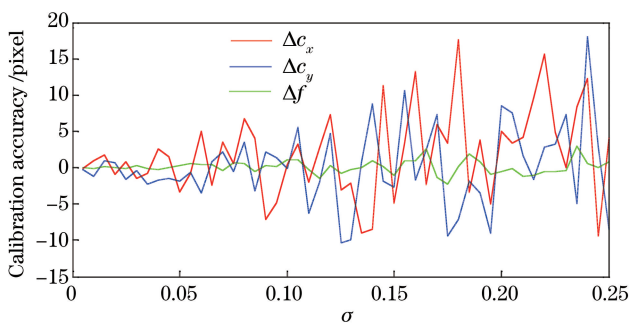


图4 靶点中心定位误差与标定精度的关系

Fig. 4 Relationship between the location error of target point center and calibration accuracy

靶点图像光斑中心定位算法的精度和效率影响着整个摄像机标定系统的性能,本文采用基于感兴趣区域扩展和灰度矩亚像素边缘检测算法相结合^[3,20]的方法对光斑中心进行快速高精度定位。该算法首先对摄像机采集到的原灰度图像进行高斯滤波预处理,通过最大类间方差阈值分割技术对预处理后的图像进行二值化,计算图像中目标光斑的边界特征参数,提取出光斑所在的矩形感兴趣区域,为了保证图像处理精度,将该区域扩展 7×7 的模板大小,以充分利用光斑所在矩形感兴趣区域中每一点有用信息,得到扩展后的待处理感兴趣区域,图像范围大大缩小,节省了图像处理算法计算的时间。然后通过 7×7 模板在待处理区域图像上移动并进行卷积运算,计算其前三阶灰度矩来寻找边缘^[20],再利用改进的边缘判断条件^[3]得到边缘亚像素坐标,当模板沿整个图像移动后,就得到了整个图像的边缘亚像素坐标,最后通过最小二乘拟合椭圆方程,求取光斑中心坐标。该算法流程如图5所示。

为验证该中心定位算法的运行效率和精度,结合本文的深度空间小视角摄像机内参数标定,将摄像机和红外发光二极管(IR-LED)相对位置保持不变(像距约为1.8 m),连续静态拍摄20幅图像。其中一幅靶点光斑成像如图6(a)所示,图6(b)是扩展后的感兴趣区域,图6(c)是检测到的边缘亚像素坐标,得到的边缘效果较好。在相同计算机Matlab运行环境下,用文献^[6]的二维高斯拟合提取光斑中心的方法、基于前三阶灰度矩亚像素边缘拟合求取中心的方法以及本文方法分别处理这20幅含有一个靶点的实测图像,计算 u 、 v 两个方向坐标的标准差 S_u 、 S_v 和程序处理所需的时间,如表2所示。

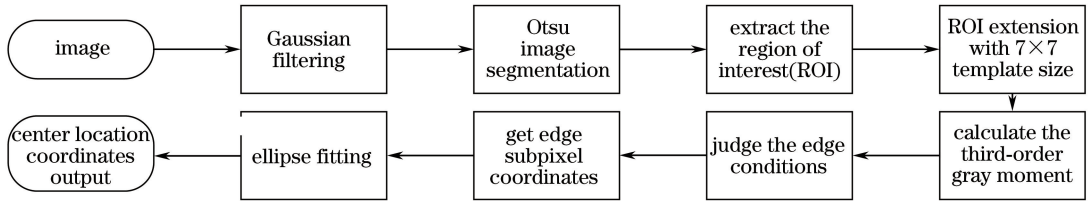


图5 靶点中心定位算法流程图

Fig. 5 Flow chart of target point center location algorithm

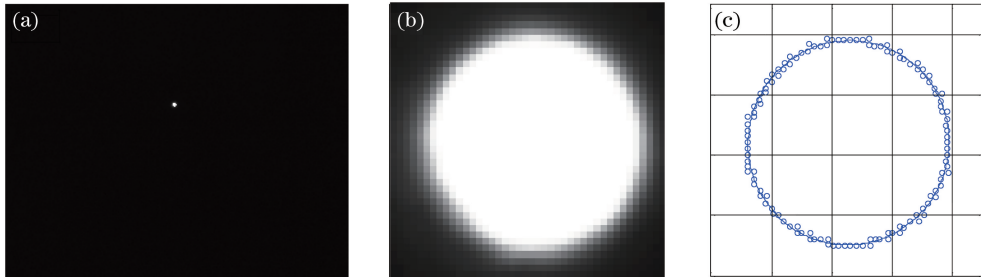


图6 靶点光斑图。(a)原灰度图像;(b)扩展后的感兴趣区域;(c)边缘亚像素坐标

Fig. 6 Image of the target spot. (a) Original gray image; (b) extended region of interest; (c) edge subpixel coordinates

表2 不同方法的精度和处理耗时对比

Table 2 Comparison of accuracy and processing time using different methods

Parameter	2D-Gaussian fitting	Gray moment	Proposed method
S_u /pixel	0.0159	0.0119	0.0127
S_v /pixel	0.0308	0.0186	0.0189
Time /s	10.27	693.52	15.64

由表2可知,本文方法相对于直接使用灰度矩检测亚像素边缘进而拟合求出中心的方法,在时间上仅需1/44,精度上相差无几,均可达0.01~0.02 pixel,并且精度优于二维高斯拟合求取光斑中心的方法。因此,本文方法有绝对的优势,更加适合于快速高精度标定摄像机。

5 标定实验

为了验证本文方法和上述仿真分析的正确性,实验采用JAI GO-5000M-USB工业摄像机,摄像机分辨率为2560 pixel×2048 pixel,像元大小为5 μm,物镜焦距为50 mm。高精度三坐标测量机(CMM)定位精度是0.005 mm,外形尺寸为500 mm×400 mm×600 mm。将单个亮度自适应的IR-LED固定在三坐标测量机的测头立柱上,实验过程中固定摄像机位置不变,摄像机正对靶点进行图像采集和标定,200个靶点的空间分布范围为320 mm×240 mm×600 mm,靶点按10×5×4的布局形成空间均匀分布,每层之间的间距为200 mm,则第1层和第4层之间的间距为600 mm,如图7所示。

预设好靶点的数目和位置等因素,通过高精度三坐标测量机精确移动到每一指定位置,拍摄靶点单幅图像,构成虚拟立体靶标,记录各靶点对应的世界坐标 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) ,并完成各靶点中心定位的解算,再根据摄像机标定原理解出摄像机内参数的最优解。已知靶点中心坐标,设定已知的空间截面,根据(1)~(3)式,可以反求出靶点的世界坐标 $(X'_{wi}, Y'_{wi}, Z'_{wi})$,则实际坐标与计算坐标的距离的平均值,即绝对误差 E 可表示为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(X_{wi} - X'_{wi})^2 + (Y_{wi} - Y'_{wi})^2 + (Z_{wi} - Z'_{wi})^2}}{N}, \quad (6)$$

式中 E 越小,说明标定精度越好。图8为200个靶点空间重建误差图。

图9为200个靶点图像重投影的误差,先用第1、4层组合的100点标定摄像机内参数,再用标定出的参数对空间200个靶点投影,得到200个点的图像坐标与原图像坐标的误差,如图9(a)所示;再用实际采集的

200 个靶点进行摄像机内参数标定,其图像重投影误差如图 9(b)所示。表 3 给出了 u 、 v 方向具体的标准差 S_u 、 S_v ,其图像重投影整体精度几乎一致。

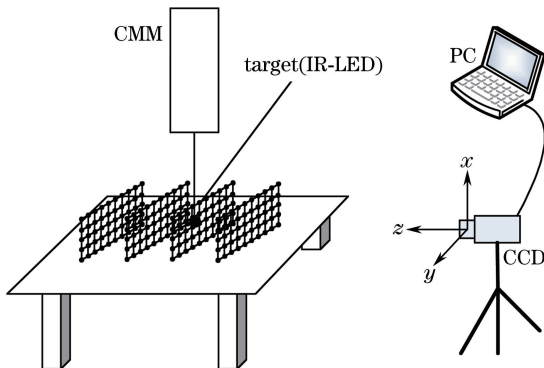


图 7 基于虚拟立体靶标的摄像机标定

Fig. 7 Camera calibration based on virtual stereo targets

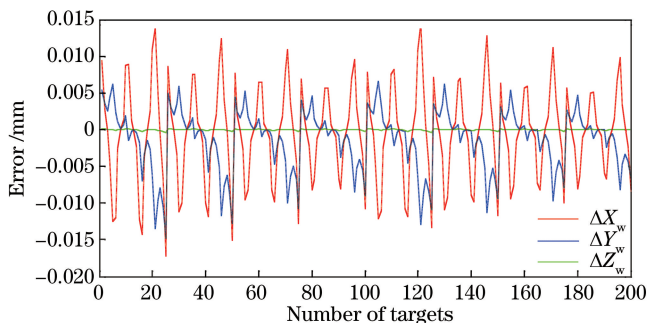


图 8 200 靶点空间重建误差

Fig. 8 Space reconstruction error of 200 target points

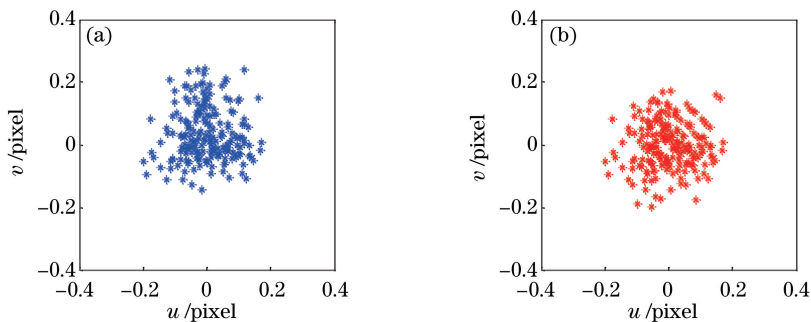


图 9 200 靶点重投影误差。(a) 100 点标定的参数计算;(b) 200 点标定的参数计算

Fig. 9 Reprojection error of 200 target points. (a) Calculation of 100 points calibration; (b) calculation of 200 points calibration

表 3 摄像机内参数标定结果对比

Table 3 Comparison of camera intrinsic parameter calibration results

Parameter	100 points with 2 layers	200 points with 4 layers
c_x / pixel	1312.78	1312.64
c_y / pixel	1003.79	1005.03
f / mm	52.50	52.50
k_1	4.93×10^{-5}	5.33×10^{-5}
k_2	-3.75×10^{-7}	-4.21×10^{-7}
p_1	5.95×10^{-6}	5.11×10^{-6}
p_2	2.72×10^{-5}	3.21×10^{-5}
E / mm	0.0060	0.0063
S_u / pixel	0.054	0.056
S_v / pixel	0.096	0.091

100 靶点标定的摄像机参数和 200 靶点标定的摄像机参数结果如表 3 所示, 二者的标定结果具有较好的一致性, 空间坐标的绝对误差 E 可达 $6 \mu\text{m}$, 验证了立体靶标仿真设计的正确性。为了提高标定效率, 不必选择大量的标定靶点, 即可达到较高精度的标定要求。

6 结 论

针对深度空间小视角摄像机标定, 提出了基于立体靶标的仿真分析方法, 通过仿真研究指出在实际摄像机标定之前靶点的数目和位姿布局等因素的合理化设计。得到以下结论:

- 1) 靶点的空间分布范围对标定精度的影响最大, 因此标定时尽可能采用分布范围较大的立体靶标;
- 2) 增大靶点数目可提高标定精度, 但效果不显著;
- 3) 在靶点数目确定的情况下, 为实现简单快速高效标定, 靶点采用均匀分布的 2 层空间分布层即可;
- 4) 摄像机近似正对靶点成像即可, 从最近测量距离开始布置靶点, 可提高标定精度。

提出基于感兴趣区域扩展和灰度矩亚像素边缘检测相结合的方法, 中心坐标精度单点稳定性可达 $0.01 \sim 0.02 \text{ pixel}$, 有效提高了图像处理的效率。通过现场实验实现了对摄像机内参数的快速标定, 设定已知的空间截面后, 空间的测量精度可达 $6 \mu\text{m}$, 参数标定精度较高。同时证明了在进行标定之前对靶标靶点高效构建的必要性, 相比于标定过程中采集大量的靶点图像等, 大大节省了时间、提高了效率, 同时又保证了精度, 具有实际应用价值。该方法不仅适合于深度空间小视角摄像机的内参数标定, 而且对无需靶标拼接的摄像机标定也适用。

参 考 文 献

- [1] Stamatopoulos C. Orientation and calibration of long focal length cameras in digital close-range photogrammetry[D]. Melbourne: The University of Melbourne, 2011: 1-2.
- [2] Yang X L, Fang S P. Effect of field of view on the accuracy of camera calibration[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(2): 844-849.
- [3] Luo Jun, Hou Yan, Fu Li. An improved algorithm for subpixel edge detection using gray moment[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008, 31(5): 549-553.
罗 钧, 侯 艳, 付 丽. 一种改进的灰度矩亚像素边缘检测算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2008, 31(5): 549-553.
- [4] Dong Mingli, Liu Piaofeng, Lü Naiguang. Camera calibration based on virtual target[J]. Journal of Beijing Information Technology University (Natural Science Edition), 2010(1): 11-15.
董明利, 刘镖峰, 吕乃光. 基于虚拟靶标的摄像机标定[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2010(1): 11-15.
- [5] Chen Hua, Ye Dong, Che Rensheng, *et al.* Stereo camera calibration based on accurate control points[J]. Optics & Precision Engineering, 2006, 14(5): 903-909.
陈 华, 叶 东, 车仁生, 等. 基于精确控制点的立体像机校准技术[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 903-909.
- [6] Ye Dong, Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Camera calibration technique for vision measurement system[J]. Optics & Precision Engineering, 2006, 14(5): 883-890.
叶 东, 徐巧玉, 车仁生. 视觉测量系统的相机校准[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 883-890.
- [7] Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.* Camera calibration technique of wide-area vision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
杨博文, 张丽艳, 叶 南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- [8] Liu Shugui, Jiang Zhenzhu, Dong Yinghua, *et al.* Sub-regional camera calibration based on moving light target[J]. Optics & Precision Engineering, 2014, 22(2): 259-265.
刘书桂, 姜珍珠, 董英华, 等. 采用移动光靶标的分区域相机标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 259-265.
- [9] Semeniuta O. Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy[J]. Procedia Cirp, 2016, 41: 765-770.
- [10] Wang Z, Wu Z, Zhen X, *et al.* A two-step calibration method of a large FOV binocular stereovision sensor for onsite measurement[J]. Measurement, 2015, 62: 15-24.

- [11] Hassan M F A, Ma' Arof I, Samad A M. Assessment of camera calibration towards accuracy requirement [C]. IEEE International Colloquium on Signal Processing & ITS Applications, 2014.
- [12] Lai Hanxuan, Zhang Zhengyu, Zhu Long, *et al.* Nonlinear distortion correction of camera based on linear characteristic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021502.
赖瀚轩, 张征宇, 朱 龙, 等. 基于直线特征的摄像机非线性畸变自校正 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021502.
- [13] Shan Baohua, Yuan Wenting, Liu Yang. A calibration method for stereovision system based on solid circle target [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0915001.
单宝华, 袁文厅, 刘 洋. 一种基于实心圆靶标的立体视觉系统标定方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0915001.
- [14] Wang Yan, Yuan Feng. Novel camera calibration method based on cooperative target pose measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1115002.
王 艳, 袁 峰. 基于合作目标姿态测量的新型摄像机校准方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1115002.
- [15] Hu Lihua, Zhang Jifu, Zhang Sulan. Simulation and precision analysis of visual measurement for large objects [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015(12): 2272-2281.
胡立华, 张继福, 张素兰. 大型物体视觉测量模拟和精度分析 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015(12): 2272-2281.
- [16] Abdel-Aziz Y I, Karara H M, Hauck M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
- [17] Zhang Hui, Zhang Liyan, Wei Hu. Three-step calibration for binocular stereo system [J]. China Mechanical Engineering, 2009(16): 1899-1903.
张 辉, 张丽艳, 韦 虎. 双目立体测量系统标定的三步法 [J]. 中国机械工程, 2009(16): 1899-1903.
- [18] Wu Fanlu, Liu Jianjun, Ren Xin, *et al.* Deep space exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115002.
吴凡路, 刘建军, 任 鑫, 等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115002.
- [19] More J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory [J]. Lecture Notes in Mathematics, 1978, 630: 105-116.
- [20] Zhang Yonghong, Hu Dejin, Zhang Kai, *et al.* Gray moment operators for subpixel edge detection on CCD images [J]. Optical Technique, 2004, 30(6): 693-695.
张永宏, 胡德金, 张 凯, 等. 基于灰度矩的 CCD 图像亚像素边缘检测算法研究 [J]. 光学技术, 2004, 30(6): 693-695.