

面向大视场视觉测量的摄像机标定技术

杨博文 张丽艳 叶 南 冯新星 李铁林

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 提出了一种面向大视场高精度视觉测量的摄像机标定新方法,该方法采用亮度自适应的单个红外发光二极管(IR-LED)作为目标靶点,将该靶点固定在三坐标测量机的测头上,并依次精确移动至预先设定的空间位置,每次靶点到达设定的空间位置时,摄像机对靶点进行图像采集。利用三坐标测量机的精确位移,在三维空间构成一个虚拟立体靶标。针对虚拟立体靶标在大视场摄像机标定中只能覆盖一小部分标定空间的问题,通过自由移动摄像机在多个方位对虚拟立体靶标进行拍摄,使得多个虚拟立体靶标分布于整个标定空间。摄像机在每个方位对虚拟立体靶标的拍摄都标定出一组摄像机的内、外参数,然后以摄像机内参数和摄像机在各个方位下拍摄的虚拟立体靶标在摄像机坐标系下的位置及姿态参数为优化变量,建立以所有三维靶点位置重投影误差平方和为最小的目标函数,采用非线性优化方法求解摄像机标定参数的最优解。该方法较好地解决了大视场视觉测量中大尺寸靶标加工困难、摄像机标定精度难以保证的问题。仿真和实际标定实验均证明此方法可以有效提高大视场摄像机的标定精度。

关键词 视觉光学;机器视觉;摄像机标定;大视场视觉测量

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0915001

Camera Calibration Technique of Wide-Area Vision Measurement

Yang Bowen Zhang Liyan Ye Nan Feng Xinxing Li Tielin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract A new method is proposed for wide-area camera calibration using virtual calibration target created by one infrared light-emitting diode (IR-LED) marker fixed on the moving probe of a coordinate measuring machine (CMM). The camera takes an image when the IR-LED marker moves accurately with the CMM probe to each preset position in turn. Since the measurement space of common CMM is not large enough, the virtual calibration target is imaged in several camera poses to cover the whole measurement volume of the wide-area camera. The calibration parameters are initially obtained by using the 3D information of the virtual target and its image taken from each camera pose. The calibration parameters are finally solved by nonlinear optimization of the intrinsic parameters and the positions and orientations of the virtual calibration target with respect to the camera. The proposed method requires no large-size calibration target and can ensure the calibration accuracy. Experiments demonstrate the superior performance of the proposed method.

Key words vision optics; machine vision; camera calibration; wide-area vision measurement

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135

1 引 言

近年来基于机器视觉的测量系统已越来越多地

应用于航空工业的加工、装配以及质检等多个环节,其核心测量部件摄像机的标定精度直接影响着该类

收稿日期: 2012-03-14; **收到修改稿日期**: 2012-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(50875130)和国防技术基础科研项目(J152011C001)资助课题。

作者简介: 杨博文(1984—),男,博士研究生,主要从事非接触三维几何测量和机器视觉检测等方面的研究。

E-mail: yang_bw@qq.com

导师简介: 张丽艳(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事非接触三维几何测量、机器视觉检测和逆向工程等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

测量系统的测量精度。摄像机标定的过程就是根据若干三维空间点(靶点)及其在成像平面上对应的二维图像点来确定摄像机成像模型中的各参数的过程。摄像机标定一般可分为传统标定方法^[1~3]、主动视觉中的标定方法^[4~6]和自标定方法三类^[7,8]。传统标定方法需要在摄像机前放置一个标定参照物(又称靶标,靶标上具有多个已知其精确三维坐标的靶点),通过建立靶标上各靶点空间坐标与相应图像坐标间的关系,来计算摄像机模型中的内部参数和外部参数。主动视觉中的标定方法需要摄像机按照某种轨迹运动,利用运动轨迹的几何特性与图像点坐标的关系求解摄像机参数。自标定方法不需要已知靶点的三维坐标信息,只需利用多幅图像间一定数目对应点的图像坐标关系来求解摄像机参数。由于主动视觉中的标定方法需要精确控制摄像机的移动轨迹,通常实现难度较大,一般用于一些特定场合。而自标定方法虽然实现起来较为灵活方便,但标定结果稳定性不高。这两种标定方法的标定精度一般都不及应用标定靶标的传统标定方法,因此视觉测量系统中多采用标定靶标对摄像机进行标定。

航空工业中,部件装配以及检测对大空间的测量要求越来越高,测量范围通常为2~10 m,甚至更大。要通过视觉测量方法实现这样大范围内的零部件位置与姿态的跟踪、检测,需要以红外发光二极管(IR-LED)等主动发光目标为工作靶点,通过自适应控制发光靶点的亮度并进行离焦拍摄,使测量范围内无论靶点距离摄像机远近都能获得高质量的靶点图像,基于这些靶点图像和标定出的系统参数解算靶点的三维坐标,进而获得作为工作靶点载体的零部件的位置姿态信息。为了保证大视场视觉测量系统精度,参与系统标定的靶点需要与系统测量模式下的工作靶点相一致,并且由标定靶点分布构成的标定空间应与测量空间基本一致。目前应用较多的标定靶标可以分为三维靶标和二维靶标。以Tsay^[1,2]的方法为代表的基于三维靶标的标定方法要求已知靶标中多个靶点的三维坐标,通过建立与其图像点二维坐标的关系来求解摄像机参数。该方法的标定精度取决于三维靶标的大小和制作精度,满足大视场测量标定的靶标加工十分困难,并且靶点间易存在遮挡。为克服这些缺点出现了在三坐标测量机测头处固定一个靶点,利用三坐标测量机的高精度位移,在空间中构造出一个虚拟的立体靶标的方法^[9~11]。该方法一定程度上解决了三维靶标加工难度大和存在遮挡的问题,文献[10]提出了一

种基于虚拟立体靶标的校准控制点到对应反投影射线距离最小的相机参数校准方法,文献[11]将遗传算法应用于基于虚拟立体靶标的相机参数校准方法中。但是对于大视场的摄像机标定,常见的三坐标测量机的测量空间相对较小,靶点的移动范围无法覆盖整个标定空间,因此标定精度相对较低(实验验证见4.2节)。以Zhang^[3]的方法为代表的基于二维靶标的标定方法要求摄像机在3个以上不同方位拍摄一个已知靶点坐标的二维靶标,利用不同图像对应点之间的关系求解标定参数。该方法简单灵活,但应用于摄像机大视场测量标定则存在难以克服的问题:1)大尺寸二维靶标加工困难,靶点位置精度难以保证;2)使用尺寸较小的二维靶标,虽然能通过增加靶标的摆放位置使其充满整个标定空间,但是由于各个摆放位置之间没有联系与约束,不能有效描述整个标定空间的摄像机模型,影响标定精度。对于二维靶标用于大视场摄像机标定存在的问题,文献[12]进行了深入分析和实验验证,并提出通过在标定空间中摆放多个较小的二维靶标,利用小靶标之间固定的相对位置建立起靶标之间的联系,使多个靶标分布于整个标定空间,从而更为准确地求解标定参数的方法。但是该方法使用的二维靶标不能主动发光,当标定空间较大时靶点图像提取精度相对较低。而要以主动发光目标作为靶点制作多块标定靶标,一方面作为电子元件的发光靶点,即使在每块小标定板上,各个靶点间准确的相对位置关系也难以获得;另一方面,对大量标定靶点同时进行亮度自适应控制以保证其成像光斑质量难度较大。

针对以IR-LED为工作靶点的大视场视觉测量中存在的摄像机标定问题,本文提出一种新的标定方法。采用亮度自适应控制的单个IR-LED作为标定靶点,在利用三坐标测量机形成虚拟立体靶标的基础上,摄像机根据标定空间大小,在多个方位对虚拟立体靶标进行图像采集,各个摄像机方位下拍摄的虚拟立体靶标在标定空间中构成一个大型靶标,该大型虚拟立体靶标可以根据标定空间的大小改变大小及形状,同时也可以根据三坐标测量机的大小改变该大型虚拟立体靶标中小靶标的数量(即摄像机拍摄方位的数量)。摄像机在每个方位都标定出一组摄像机的内、外参数,然后以摄像机内参数和摄像机在各个方位下拍摄的虚拟立体靶标在摄像机坐标系下的位置及姿态参数为优化变量,建立以所有三维靶点位置重投影误差平方和为最小的目标函数,采用非线性优化方法求解摄像机标定参数的最优解。

2 摄像机模型

摄像机标定的任务是确定摄像机成像模型中的各参数。图 1 为针孔摄像机模型,涉及 5 个坐标系,即以像素(pixel)为单位的图像坐标系 o_0uv 、以毫米(mm)为单位的图像坐标系 o_1xy 、归一化图像坐标系 $o_nx_ny_n$ 、摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 和世界坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$ 。 π 为摄像机图像平面, π_n 为焦距归一化图像平面。设空间点 P 在世界坐标系的坐标为 $\mathbf{P}_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$,在摄像机坐标系下的坐标为 $\mathbf{P}_c =$

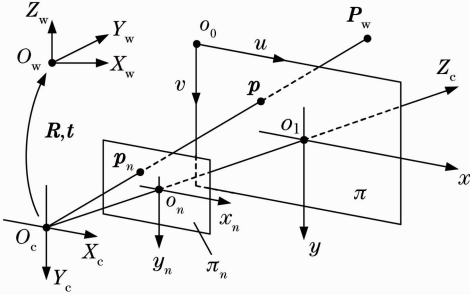


图 1 针孔摄像机模型示意图

Fig. 1 Schematic of pinhole camera model

$[X_c, Y_c, Z_c]^T$,在图像坐标系下投影点 p 的无畸变图像齐次坐标为 $\mathbf{p} = [u, v, 1]^T$,在归一化图像坐标系下投影点 p_n 的归一化图像齐次坐标为 $\mathbf{p}_n = [x_n, y_n, 1]^T$ 。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。

根据摄像机透视投影模型可得

$$Z_c \mathbf{p} = Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \mid \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{A}[\mathbf{I} \mid \mathbf{0}]\mathbf{P}_c = \mathbf{A}[\mathbf{R} \mid \mathbf{t}]\mathbf{P}_w, \quad (1)$$

式中 \mathbf{A} 为摄像机的内参数矩阵, \mathbf{I} 为 3 阶单位矩阵, $\mathbf{0} = [0, 0, 0]^T$, α_x, α_y 分别为图像坐标系 u 轴、 v 轴方向上的有效焦距, u_0, v_0 是摄像机主点坐标, γ 为图像坐标系 u 轴、 v 轴的不垂直因子。由于摄像机成像系统存在畸变,考虑径向畸变、切向畸变、薄透镜畸变,空间点 P 在图像坐标系下带畸变的投影点 p_d 的齐次坐标为 $\mathbf{p}_d = [x_d, y_d, 1]^T$,摄像机成像系统的畸变模型^[13]为

$$\begin{cases} u_d = u_0 + \alpha_x x_{nd} \\ v_d = v_0 + \alpha_y y_{nd} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{nd} = x_n + k_1 x_n r^2 + k_2 x_n r^4 + p_1 (3x_n^2 + y_n^2) + 2p_2 x_n y_n + s_1 r^2 \\ y_{nd} = y_n + k_1 y_n r^2 + k_2 y_n r^4 + 2p_1 x_n y_n + p_2 (x_n^2 + 3y_n^2) + s_2 r^2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$, $[x_{nd}, y_{nd}, 1]^T$ 是空间点 P 在归一化图像坐标系下带畸变的投影点的齐次坐标, k_1, k_2 为径向畸变参数, p_1, p_2 为切向畸变参数, s_1, s_2 为薄透镜畸变参数。

3 标定原理

在三坐标测量机的测头处固定一个 IR-LED 靶点,设定世界坐标系为三坐标测量机原点,靶点在测量机坐标系下的坐标即为该靶点在世界坐标系下的坐标。在三坐标测量机的测量空间内均匀取 n 个预定位置 $P_{wi} (i = 1, 2, \dots, n, n \geq 6)$,但是为保证标定精度通常会选取上百个不等的预定位置作为靶点坐标。同时设定 m 个摄像机拍摄方位,要求摄像机在 m 个拍摄方位下拍摄的虚拟立体靶标组合在一起能够充满整个标定空间。赋予靶点初始预设位置标志 $i = 1$ 、初始拍摄方位标志 $j = 1$ 。将摄像机根据测量空间大小固定于第 $j (j = 1, 2, \dots, m)$ 个拍摄方位,三坐标测量机按照事先设定的轨迹移动测头,每移

动到一个预定位置 P_{wi} ,摄像机采集一幅靶点图像,由此在三坐标测量机的移动空间中形成一个虚拟的三维靶标 T [如图 2(a) 所示]。图 2(a) 中, π_j 表示第 j 个拍摄方位的摄像机成像平面, $\mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$ 分别表示第 j 个拍摄方位下摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。根据每个靶点的三维坐标与其图像点的二维坐标建立摄像机模型关系,计算出摄像机在此方位下的摄像机内参数 ($\mathbf{A}_j, k_{1j}, k_{2j}, p_{1j}, p_{2j}, s_{1j}, s_{2j}$)、外参数 ($\mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$)。根据第 j 个方位下拍摄的虚拟三维靶标求解摄像机内外参数的过程主要基于两步法来实现,即第一步基于不含畸变的摄像机模型,根据 Abdel-Aziz 和 Karara^[14] 提出的直接线性变换 (DLT) 方法计算出摄像机非畸变模型下的内外部参数 ($\mathbf{A}_j, \mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$)。第二步以这些参数作为初始值,再基于包含各种畸变的摄像机模型,对内外参数进行非线性最优估计,获得摄像机在该方位下的内、外参数的最优解。改变摄像机的方位,重复拍摄虚拟三维靶标过程,使虚拟的三维靶标经过多个摄像

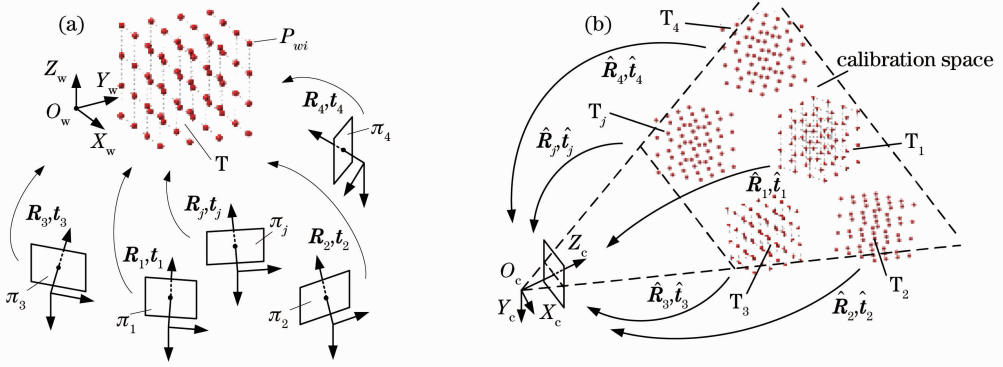


图 2 摄像机大视场标定示意图。(a) 在世界坐标系下；(b) 在摄像机坐标系下

Fig. 2 Schematic of wide-area calibration of camera in world coordinate system (a) and camera coordinate system (b)

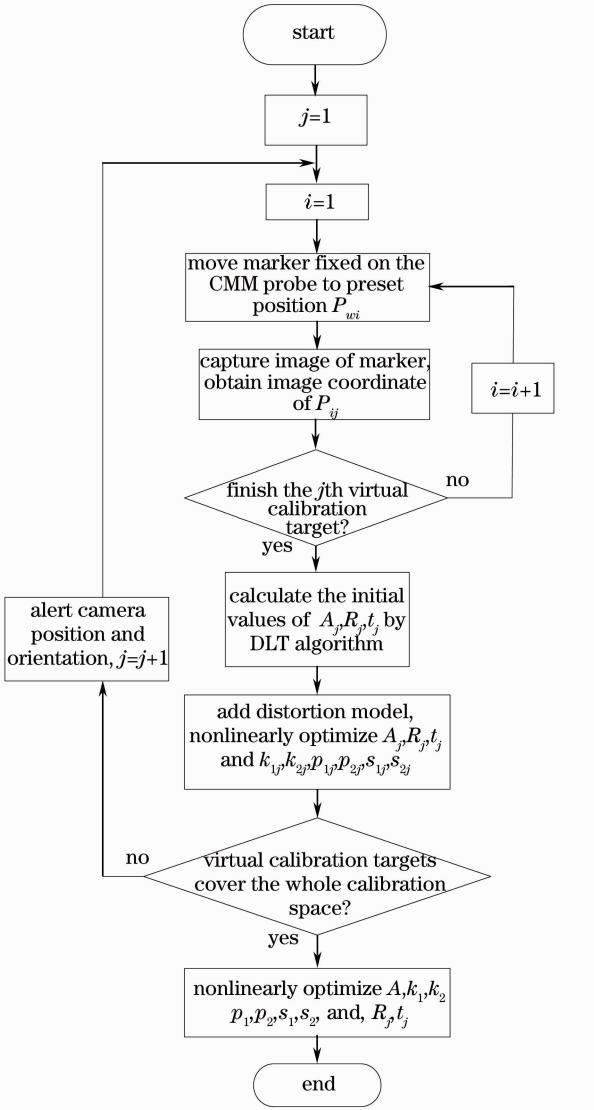


图 3 摄像机大视场标定流程图

Fig. 3 Flow chart of wide-area calibration of camera

机方位的拍摄充满整个摄像机的测量空间[如图 2(b)所示],即 $j=m$ 。每一个摄像机方位下的虚拟立体靶标 T_j 及其对应的二维图像反映了靶标所

占测量空间区域的成像关系。将虚拟立体靶标统一转换到摄像机坐标系下,所有虚拟立体靶标组成一个充满整个测量空间的大型立体靶标。以摄像机内参数和摄像机在各个方位下拍摄的虚拟立体靶标在摄像机坐标系下的位置及姿态参数为优化变量,建立以所有三维靶点位置重投影误差平方和为最小的目标函数,采用非线性优化方法求解摄像机标定参数的最优解。标定方法的基本流程如图 3 所示。

3.1 求解单个摄像机方位下摄像机内外参数

摄像机非畸变模型(1)式可表示为

$$Z_{ci} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $[X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1]^T$ 为虚拟立体靶标第 i 个靶点在世界坐标系下的齐次坐标。将世界坐标系设在三坐标测量机原点处,则 $[X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1]^T$ 即为靶点在测量机坐标系下的坐标; $[u_i, v_i, 1]^T$ 为第 i 个靶点的齐次图像坐标; Z_{ci} 为第 i 个靶点在摄像机坐标系下的 Z_c 轴分量; \mathbf{M} 为投影矩阵。将(4)式整理可得如下两个关于 m_{ij} 的线性方程:

$$\begin{cases} X_{wi}m_{11} + Y_{wi}m_{12} + Z_{wi}m_{13} + m_{14} - u_iX_{wi}m_{31} - u_iY_{wi}m_{32} - u_iZ_{wi}m_{33} - u_im_{34} = 0 \\ X_{wi}m_{21} + Y_{wi}m_{22} + Z_{wi}m_{23} + m_{24} - v_iX_{wi}m_{31} - v_iY_{wi}m_{32} - v_iZ_{wi}m_{33} - v_im_{34} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

(5)式表示,若已知靶标上的 n 个靶点的空间坐标 $[X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1]^T (i = 1, 2, \dots, n)$ 和它们的图像点坐标 $[u_i, v_i, 1]^T$, 则有 $2n$ 个关于 \mathbf{M} 的线性方程。当 $2n > 11$, 即已知 6 个以上空间靶点与它们的图像点,便可以求解出投影矩阵 \mathbf{M} 。

记第 j 个摄像机方位求出的投影矩阵为 \mathbf{M}_j ，对矩阵 \mathbf{M}_j 进行 RQ 分解，即可求出摄像机在非畸变模型下的内、外参数 $\mathbf{A}_j, \mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$ 。

由于摄像机系统存在非线性畸变，因此还需要对线性模型标定结果再考虑非线性畸变的情况做进一步优化。引入 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 畸变参数，与线性模型的参数 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 一起构成非线性模型的摄像机内部参数，并建立以空间点重投影误差为最小的目标函数，其表达式为

$$\min \sum_{i=1}^n \text{dis}_i(\mathbf{A}_j, k_{1j}, k_{2j}, p_{1j}, p_{2j}, s_{1j}, s_{2j}, \mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j), \quad (6)$$

式中 $\text{dis}_i(\mathbf{A}_j, k_{1j}, k_{2j}, p_{1j}, p_{2j}, s_{1j}, s_{2j}, \mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j)$ 为在第 j 个摄像机拍摄方位下空间点 P_{wi} 根据非线性成像模型重投影到归一化图像平面的图像点 \hat{p}_{Nij} ，与 P_{ij} 在归一化图像平面上的实际图像点 p_{Nij} 之间的距离的平方和。本文采用 Levenberg-Marquardt 迭代算法获得(6)式的最优解。

3.2 多方位拍摄的摄像机标定参数优化

如图 2(b)所示，根据测量空间与虚拟立体靶标大小，灵活放置摄像机对虚拟立体靶标进行图像采集，使得靶标经过摄像机在多个方位的拍照充满整个测量空间。摄像机在第 j 个摄像机方位下根据 3.1 节方法计算出摄像机内外参数 $\mathbf{A}_j, k_{1j}, k_{2j}, p_{1j}, p_{2j}, s_{1j}, s_{2j}, \mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$ 。为了更精确的反映整个测量空间的摄像机模型，将所有虚拟立体靶标的坐标统一转换到摄像机坐标系下，则摄像机在世界坐标系下相对虚拟立体靶标的方位 $\mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$ 转换为虚拟立体靶标在摄像机坐标系下相对摄像机的方位 $\hat{\mathbf{R}}_j, \hat{\mathbf{t}}_j$ 。其中 $\hat{\mathbf{R}}_j = \mathbf{R}_j^{-1}, \hat{\mathbf{t}}_j = -\mathbf{R}_j^{-1}\mathbf{t}_j$ 。虚拟立体靶标经过摄像机在多个方位下的拍摄，形成一个充满整个测量空间的大型虚拟立体靶标。其中每一个小虚拟靶标能够精确反映其所占空间的摄像机模型，并且各小虚拟靶标之间相对位置关系固定，因此该大型虚拟立体靶标能够更好地反映整个测量空间的摄像机模型。

考虑到每一个摄像机方位下，虚拟的三维靶标图像点只能占据 CCD 成像靶面的一部分，而通常图像中心区域畸变小，更接近线性成像模型，图像边缘区域则更能反映摄像机系统的畸变情况。因此选取图像点集中在 CCD 靶面中间区域的摄像机方位下（记其方位序号为 ζ ）所获得的线性内参数矩阵 \mathbf{A}_ζ ，以及图像点靠近 CCD 靶面边缘区域的摄像机方位下（记其方位序号为 η ）所获得的畸变系数 $k_{1\eta}, k_{2\eta}, p_{1\eta}, p_{2\eta}, s_{1\eta}, s_{2\eta}$ ，连同坐标变换后虚拟立体靶标相对

摄像机的方位参数 $\hat{\mathbf{R}}_j, \hat{\mathbf{t}}_j$ 作为优化初值，统一建立以所有靶点重投影误差平方和为最小的目标函数，其表达式为

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \text{dis}_{ij}(\mathbf{A}, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2, \hat{\mathbf{R}}_j, \hat{\mathbf{t}}_j), \quad (7)$$

式中 j 表示摄像机的第 j 个拍摄方位， i 表示每个摄像机方位下拍摄的第 i 个靶点。采用 Levenberg-Marquardt 迭代算法获得(7)式的最优解，此解即为摄像机的最终标定参数。

4 实 验

4.1 实验设置及靶点提取

光学测量中背景光通常会对测量精度产生干扰，采用添加红外滤镜的 CCD 摄像机，过滤掉室内绝大部分可见光线，以 IR-LED 发光点作为标定靶点，有效降低背景光对标定的干扰。IR-LED 发光单元极小，距离摄像机较远时可视为点光源。在大视场视觉测量与标定中，对 IR-LED 靶点进行离焦拍摄，使其图像所呈光斑近似符合二维高斯分布。通过特别设计的硬件电路，使 IR-LED 的亮度控制与摄像机采集建立反馈机制，自动调节 IR-LED 靶点的亮度，保证在 2~10 m 范围内无论标定靶点距离摄像机远近其成像光斑灰度分布始终与图 4 所示近似。

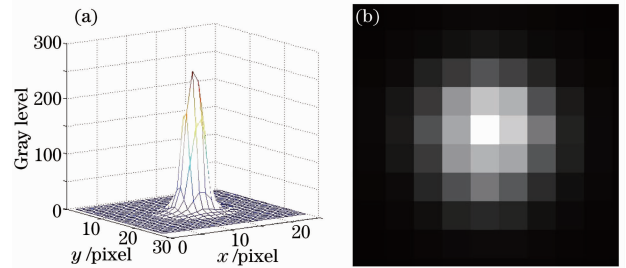


图 4 IR-LED 靶点成像光斑灰度分布

Fig. 4 Gray distribution of IR-LED target image

LED 靶点成像光斑的中心提取有多种方法，包括灰度质心法、高斯曲面拟合法、抛物面拟合法等^[15~18]。灰度质心法的抗噪能力较弱，精度有限；高斯曲面拟合法精度高、稳定性好；而抛物面拟合法则是高斯曲面拟合法的一种简化算法，精度和稳定性相对较差。因此本文采用精度及稳定性相对较高的高斯曲面拟合法来求取 LED 发光点的中心。IR-LED 投射在 CCD 平面上的光斑能量近似于(8)式所示的二维高斯函数分布，即

$$I(x,y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (8)$$

式中 (x_0, y_0) 为真实光斑中心坐标, σ 为高斯函数的标准差, I_0 为 LED 投射在 CCD 平面上的总能量。对成像光斑像素进行内插细分, 然后将灰度数值拟合成二维高斯曲面 $I(x, y)$, 进而求出曲面的极值点 (x_0, y_0) , 也就是光斑的中心。距离摄像机 7500 mm 左右, 对 IR-LED 靶点重复采集 100 次, 采用高斯曲面拟合方法求得的光斑中心的重复定位均方根(RMS)误差、最大误差如表 1 所示。表 1 数据说明高斯曲面拟合法求取光斑中心具有较高的稳定性, 同时该数据也直接反映光斑中心提取的随机噪声水平, 为 4.2 节仿真实验中对靶点图像坐标添加噪声大小提供依据。由于 IR-LED 靶点发射角度有限, 通常在 $\pm 45^\circ$ 以内, 一旦摄像机的拍摄方位超出这一角度, 就无法拍摄到靶点, 因此摄像机拍摄方位设置在每个靶点的发射角内。

表 1 高斯曲面拟合法求取光斑中心的重复定位误差

Table 1 Re-location error of spot center by Gaussian centroid fitting method

	RMS /pixel	Max error /pixel
x	0.0044	0.0109
y	0.0043	0.0127

实验摄像机采用 Basler A102f 数码摄像机, 像素物理尺寸为 $0.00645 \text{ mm} \times 0.00645 \text{ mm}$, 图像分辨率为 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$, 镜头标称焦距为 12.5 mm。采用意大利 DEA 公司生产的 GAMMA1103 型三坐标测量机构造虚拟立体靶标, 虚拟立体靶标的靶点按照 X 方向点间距 300 mm、Y 方向点间距 100 mm、Z 方向点间距 100 mm 分布, 共 $5 \times 7 \times 7 = 245$ 个靶点。整个标定由 18 个摄像机方位组成, 沿摄像机 Z_c 轴方向分为两个排面。每一排的 9 个虚拟立体靶标的图像在摄像机成像平面的分布如图 5 所示。

4.2 仿真实验

仿真摄像机内部参数参照实际实验所用的摄像机参数, 设定为 $\alpha_x = 1945.233$ 、 $\alpha_y = 1944.927$ 、 $\gamma = 0$ 、 $u_0 = 657.221$ 、 $v_0 = 547.674$ 。畸变参数 $k_1 = -0.149$ 、 $k_2 = 0.171$ 、 $p_1 = -0.011$ 、 $p_2 = 0.002$ 、 $s_1 = 0.014$ 、 $s_2 = -0.002$ 。参考 IR-LED 靶点采用高斯曲面拟合方法求得光斑中心的重复定位均方根误差量级(见表 1), 在获得的靶点图像坐标上添加期望为 0.00 pixel、标准差 σ 为 0.01 pixel 的随机高斯噪声, 重复 100 次

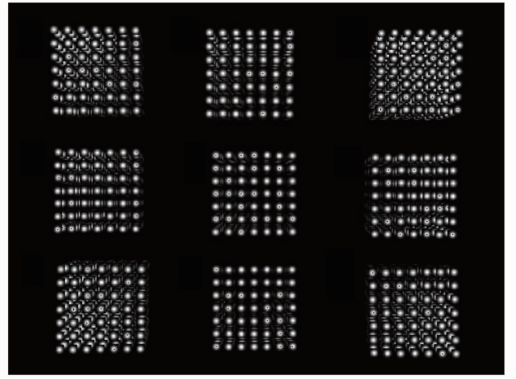


图 5 多摄像机方位下拍摄虚拟立体靶标成像示意图

Fig. 5 Image of virtual calibration stereo-target in multiple camera poses

标定实验。

表 2 为面向大视场视觉测量的摄像机标定方法的 100 个标定结果中随机选取的 10 个标定结果。可见该方法标定结果与摄像机设定参数接近, 并且由图 6 可见, 标定结果稳定。

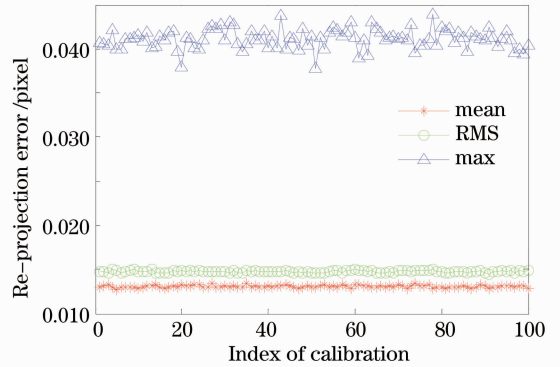


图 6 该方法标定结果的重投影误差

Fig. 6 Re-projection error of the wide-area camera calibration result

表 3 为 18 个摄像机方位中随机选取 9 个摄像机方位, 各自利用单个虚拟立体靶标对摄像机进行标定的结果, 可见单个摄像机方位的标定结果与设定的摄像机参数差别均较大, 并且各摄像机方位的标定结果之间也有较大差别。该结果说明单一摄像机方位下拍摄虚拟立体靶标的标定结果只能较为精确地反映立体靶标成像区域内的摄像机模型, 不能用于整个大视场的摄像机标定。

4.3 实际标定实验

在三坐标测量机的测头处固定一个 IR-LED 靶点, 三坐标测量机按照 4.1 节实验设置的要求移动靶点。实验设备如图 7 所示。

表 2 该大视场标定方法标定结果

Table 2 Calibration results of wide-area camera calibration

	α_x	α_y	u_0	v_0	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2
Nominal value	1945.233	1944.927	657.221	547.674	-0.149	0.171	-0.011	0.002	0.015	-0.002
Result 1	1945.263	1944.887	653.439	547.185	-0.148	0.169	-0.012	0.002	0.016	-0.002
Result 2	1945.224	1944.856	652.799	545.324	-0.148	0.169	-0.012	0.001	0.016	-0.001
Result 3	1945.148	1944.813	653.839	546.337	-0.149	0.169	-0.012	0.001	0.016	-0.001
Result 4	1945.175	1944.850	654.271	545.307	-0.148	0.169	-0.011	0.001	0.015	-0.002
Result 5	1945.186	1944.818	653.263	543.209	-0.149	0.170	-0.011	0.001	0.015	-0.001
Result 6	1945.255	1944.944	655.712	545.450	-0.149	0.170	-0.011	0.001	0.015	-0.001
Result 7	1945.335	1944.969	652.594	542.072	-0.148	0.170	-0.012	0.001	0.016	-0.001
Result 8	1945.241	1944.897	653.806	543.758	-0.148	0.170	-0.011	0.002	0.016	-0.001
Result 9	1945.290	1944.971	655.116	545.469	-0.148	0.170	-0.011	0.001	0.015	-0.001
Result 10	1945.262	1944.842	652.560	544.829	-0.148	0.169	-0.011	0.001	0.016	-0.001
Mean	1945.238	1944.885	653.740	544.894	-0.148	0.170	-0.011	0.001	0.016	-0.001
RMS	0.054	0.070	3.622	3.126	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001

表 3 单个虚拟立体靶标摄像机大视场标定方法标定结果

Table 3 Calibration results of wide-area camera with single virtual calibration stereo-target

	α_x	α_y	u_0	v_0	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2
Nominal vale	1945.233	1944.927	657.221	547.674	-0.149	0.171	-0.011	0.002	0.015	-0.002
Result 1	1945.065	1944.880	674.339	544.591	-0.116	-1.099	-0.007	0.000	0.011	-0.000
Result 2	1947.210	1946.594	571.838	465.212	-0.179	0.337	-0.031	-0.016	0.038	0.019
Result 3	1946.466	1947.139	681.736	415.599	-0.171	0.463	-0.006	-0.024	0.007	0.032
Result 4	1944.916	1945.791	796.454	459.718	-0.172	0.375	0.017	-0.017	-0.019	0.022
Result 5	1949.765	1947.374	863.368	523.338	-0.179	0.583	0.030	-0.003	-0.038	0.004
Result 6	1944.484	1945.474	820.480	608.311	-0.174	0.394	0.022	0.015	-0.025	-0.018
Result 7	1944.615	1944.086	710.387	633.580	-0.185	0.347	-0.001	0.021	0.001	-0.024
Result 8	1947.787	1946.342	576.297	612.028	-0.176	0.313	-0.029	0.016	0.037	-0.018
Result 9	1948.108	1947.598	552.145	522.129	-0.172	0.323	-0.034	-0.003	0.042	0.004
RMS	2.156	1.652	114.084	73.358	0.028	0.479	0.023	0.015	0.029	0.019

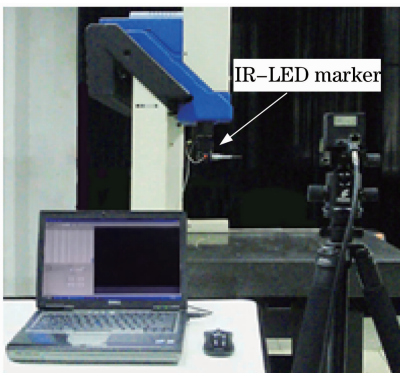


图 7 标定实验示意图

Fig. 7 Schematic of calibration experiment

为了对比标定效果,实验分为三组。实验一采用本文方法对摄像机进行标定,标定中的虚拟靶标布点与仿真实验一致,摄像机摆放位置(18个方位)也与仿真实验大致相同,该实验中多个虚拟立体靶标基本分布于整个标定空间,图像覆盖整个成像平

面,如图 8(a)所示。实验二采用单一摄像机方位在大视场中拍摄虚拟立体靶标进行摄像机标定,该实验中虚拟立体靶标图像仅覆盖成像平面的部分区域,如图 8(b)所示。实验三采用单一摄像机方位在近距离拍摄虚拟立体靶标,对摄像机进行标定,由于拍摄距离近,单个虚拟立体靶标也基本覆盖整个成像平面,如图 8(c)所示。

三组实验的标定结果如表 4。分别利用三组标定参数,对由三坐标测量机构建的虚拟立体检验靶标采用求解 PNP 问题^[19]的方法进行空间点重建。虚拟立体检验靶标的靶点,由三坐标测量机的行程空间中随机选取的 100 个空间点组成,这些点未参与摄像机的标定,且各检验靶点在测量机坐标系中的坐标已知。本文利用正交迭代算法^[20]计算 PNP 问题,并最终计算出三组标定结果的空间点在世界坐标系下的重建误差,结果如表 5 所示。从表 5 的

三维重建误差结果可见,该方法更能准确地反应整个测量空间的摄像机模型,因此经该方法标定的系

统进行大视场三维测量的误差明显小于其他两种方法的测量误差。



图 8 实验中摄像机采集的靶点图像。(a)第一组拍摄图像;(b)第二组拍摄图像;(c)第三组拍摄图像

Fig. 8 Virtual calibration target images acquired by camera in experiment (a) The first, (b) second and (c) third group

表 4 三组标定实验结果

Table 4 Results of 3 group calibration experiments

Group	α_x	α_y	u_0	v_0	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2
1	1945.421	1945.124	660.885	540.427	-0.149	0.180	-0.011	0.001	0.015	-0.001
2	1948.167	1946.675	844.315	527.431	-0.197	0.765	0.027	-0.002	-0.034	0.004
3	1945.416	1944.443	671.264	526.441	-0.151	0.187	-0.008	-0.002	0.011	0.004

表 5 标定结果的重建误差

Table 5 Reconstruction errors of calibration results

Group	Mean /mm	RMS /mm	Max /mm
1	0.168	0.183	0.365
2	0.655	0.697	1.225
3	0.242	0.268	0.574

由于本文标定过程不要求实时计算,大量采集了靶点数据以后,可以离开测量机工作环境进行标定计算,标定方法的计算过程 1 min 以内可以完成。由于靶点数量较多,且需要每采集一个位置的靶点后,测量机移动靶点到下一个位置再进行采集,针对上千个靶点,这一过程相对比较费时,通常 300 个靶点的采集会在半个小时左右。由于标定目标为摄像机固有的内部参数,只要摄像机的内部结构不发生变化,一旦标定结束后,很长一段时间不需要再进行这一标定过程,因此本文未将算法效率作为讨论的重点。

5 结 论

提出一种面向大视场高精度视觉测量的摄像机标定新方法,该方法利用一台三坐标测量机与一个 IR-LED 靶点,虚拟出一个高精度立体靶标,利用摄像机在不同方位下对虚拟立体靶标的拍摄,使得在摄像机坐标系下,各个拍摄方位拍摄的虚拟立体靶标分布于整个标定空间,从而实现对摄像机的大视

场标定。该方法克服了摄像机大视场标定中,大型靶标制造困难、小型靶标标定精度低的缺点。实验表明,该方法标定精度明显高于单一虚拟立体靶标和近距离标定等标定方法,适合于大视场视觉测量中的摄像机标定。

参 考 文 献

- 1 R. Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986. 364~374
- 2 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- 3 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 4 S. De Ma. A self-calibration technique for active vision systems [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, **12**(1): 114~120
- 5 R. I. Hartley. Self-calibration of stationary cameras [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **22**(1): 5~23
- 6 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314
- 姜广文, 晁志超, 伏思华 等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314
- 7 S. J. Maybank, O. D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. *International J. Computer Vision*, 1992, **8**(2): 123~151
- 8 O. D. Faugeras, Q. T. Luong, S. J. Maybank. Camera self-calibration: theory and experiments [J]. *Computer and Information Science*, 1992, **588**(1): 321~334
- 9 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
- 10 Ye Dong, Xue 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
- 11 Ye Dong, Liu Changying, Che Rensheng *et al.*. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 485~489
- 叶东, 刘长英, 车仁生等. 基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(3): 485~489
- 12 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3433~3439
- 孙军华, 刘震, 张广军等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3433~3439
- 13 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- 14 Y. I. Abdel-Aziz, H. M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]. Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971. 420~475
- 15 Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(9): 812~815
- 魏新国, 张广军, 江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **29**(9): 812~815
- 16 Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1672~1677
- 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1672~1677
- 17 Feng Xinxing, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512002
- 冯新星, 张丽艳, 叶南等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512002
- 18 M. R. Shortis, T. A. Clarke, T. Short. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images[C]. *SPIE*, 1994, **2350**: 239~250
- 19 M. Fischler, R. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Commun. ACM*, 1981, **24**(6): 381~395
- 20 B. K. P. Horn, H. M. Hilden, S. Negahdaripour. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(7): 1127~1135

栏目编辑：李文喆