

# 双目立体标定的姿态选择分析

解则晓 陆文娟\* 王晓敏 刘静晓

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

**摘要** 针对基于二维平面靶标的双目标定问题,为提高标定稳定性及标定精度,从单应性矩阵的角度分析了标定姿态的选择对标定结果的影响,提出对标定姿态进行规避的三个性质。三个性质分别指出,避免出现只平移靶标及在靶标平面内旋转靶标的姿态,尽量避免靶标平面与图像成像面平行的姿态。在此基础上,提出了一种五姿态集标定方法。实验结果表明,三个性质应用价值高,有利于保证标定精度;当每个姿态集下拍摄不少于三对图像时,五姿态集标定法能达到较高的标定稳定性与标定精度。

**关键词** 测量; 双目标定姿态; 五姿态集标定; 单应性矩阵; 标定精度; 标定稳定性

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0208003

## Analysis of Pose Selection on Binocular Stereo Calibration

Xie Zexiao Lu Wenjuan Wang Xiaomin Liu Jingxiao

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

**Abstract** In order to improve the stability and precision of binocular calibration based on two-dimensional plane target, the influence of pose selection on calibration is emphatically analyzed from homography matrix perspective. Then three properties are proposed to regulate calibration poses, which point out respectively, to avoid all poses of translating and rotating target only in its own plane and the parallel pose between target and image plane. On the basis of three properties, a strategy to select poses of binocular calibration called five poses set calibration is presented. Experimental results demonstrate that three properties have high application value, which is beneficial to ensure accuracy of calibration, and only if no less than three images are acquired in every pose set, five poses set calibration can reach high calibration reliability and accuracy.

**Key words** measurement; pose of binocular calibration; five poses set calibration; homography matrix; calibration accuracy; calibration reliability

**OCIS codes** 150.1488; 150.0155; 150.4232

## 1 引 言

在双目立体标定领域,以标定靶标的几何维度为依据,主要分为一维靶标<sup>[1-2]</sup>、二维平面靶标<sup>[3]</sup>和三维立体靶标<sup>[4]</sup>。二维平面靶标以其控制点数量较多、灵活方便的特点,被广泛应用于实验室、工厂等现场环境。基于二维平面靶标的标定精度主要取决于4方面:靶点自身三维坐标的精度、图像中提取的靶点像点坐标的精度<sup>[5-6]</sup>、标定算法以及标定时双目系统拍摄的姿态及图像数量。一方面,靶点自身三维坐标的精度由靶标的制作工艺所决定,目前文献主要集中于研究靶点像点的提取精度、标定算法,但很少讨论标定姿态的选择、标定图像数量的确定<sup>[7]</sup>。另一方面,关于双目立体标定的大部分文献是在Zhang等<sup>[3]</sup>提出的自由拍摄二维平面靶标的单目标定方法的基础上进行改进与优化,并逐渐产生了基于平面模板自由拍摄的双目立体测量

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61171162)、教育部博士点专项基金(20110132110010)

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量等方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: luwenjuan19900107@163.com

系统的现场标定<sup>[8]</sup>、双目立体系统三步法<sup>[9]</sup>等标定方法。虽然上述方法能得到较精确的标定结果,但其受靶标与双目系统的姿态、用于标定的图像数量影响较大,因此标定姿态的选择与图像数量的确定成为制约标定精度的一个瓶颈。

本文在现有的张正友标定方法的基础上,分析了标定姿态的选择依据,提出规范标定姿态的三个性质,并通过实验对性质进行了验证;在此基础上提出了一种五姿态集标定法,并通过对比每个姿态集下不同的图像数量对标定参数稳定性的影响,确定了五姿态集标定法合适的图像数量。

## 2 标定姿态选择的理论依据

本文所采用的双目立体标定算法分为以下两步:1) 求解单个摄像机的内外参数,利用文献[3]的单目标定方法获得左右两摄像机的内外参数;2) 求解并优化左右摄像机的相对位置关系,根据左右摄像机的外参数,求得左右摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移矢量,再以文献[9]所提方法对所有参数进行优化。由此可以看出,单个摄像机内外参数的精度对双目系统的标定精度至关重要。下文将从单目参数求解原理的角度讨论标定姿态选择的理论依据。

假设靶标点  $M = [X, Y, Z]$  在像面上的投影点为  $m = [u, v]$ , 它们的齐次表示形式为  $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]$  和  $\tilde{m} = [u, v, 1]$ 。根据透视投影模型<sup>[10]</sup>,  $s\tilde{m} = A[R \quad t]\tilde{M}$ , 其中  $s$  为比例系数,  $R$  和  $t$  分别为靶标坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$  与摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$  的旋转矩阵和平移矢量,  $A$  为内参数矩阵。由于靶标与摄像机的位置姿态是相对的, 为表述方便, 本文将假设摄像机固定, 通过旋转平移靶标改变两者相对的位置姿态。

对于二维平面靶标, 不失一般性, 将靶点在  $Z_w$  轴的坐标设为 0, 并将旋转矩阵  $R$  的第  $i$  列记为  $r_i$ , 则上述关系式可表示为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

设单应性矩阵  $H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3] = \lambda A [r_1 \quad r_2 \quad t]$ , 其中  $h_i = [h_{1i} \quad h_{2i} \quad h_{3i}]^T$ , 则

$$\begin{cases} r_1 = \lambda^{-1} A^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda^{-1} A^{-1} h_2 \end{cases}. \quad (2)$$

给定对应的靶标点世界坐标和像素坐标, 不考虑畸变, 可获得单应性矩阵  $H$  的初值。根据旋转矩阵  $R$  的正交性:

$$\begin{cases} r_1 \cdot r_2 = 0 \\ \|r_1\| = \|r_2\| \end{cases}, \quad (3)$$

由此可推导出(4)和(5)式两个约束, 由这两个约束可求解摄像机内参数矩阵的初始值, 进而求得  $R$  和  $t$  的初始值。初始值的精度将直接决定最终参数能否全局收敛, 因此获得相对准确的初始值至关重要, 故引出约束靶标与摄像机姿态的三个性质。

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0, \quad (4)$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2. \quad (5)$$

性质 1: 摄像机内参数矩阵只与靶标坐标系与摄像机坐标系的旋转矩阵  $R$  有关, 而与平移矢量  $t$  无关。

由(4)和(5)式可知, 摄像机内参数矩阵只与单应性矩阵  $H$  的第一列和第二列  $h_1, h_2$  有关, 而  $h_1, h_2$  只由内参数矩阵与旋转矩阵决定。从标定姿态的角度, 该性质可表述为若只沿着靶标坐标系  $X_w, Y_w, Z_w$  轴上下、前后、左右移动靶标来改变姿态, 对摄像机内参数的求解没有贡献。

性质 2: 如果第一个姿态下靶标所在的平面平行于第二个姿态所在的平面, 那么第二个姿态对内参数矩阵的求解没有贡献。为便于表述, 将第一个姿态和第二个姿态分别称作姿态 1 和姿态 2。该性质也可表述为, 当姿态 2 是由姿态 1 绕靶标坐标系的  $Z_w$  轴旋转而得时, 姿态 2 对应的约束可由姿态 1 的约束线性表示, 因此, 无法从姿态 2 获得更多的约束。

证明: 旋转矩阵  $R$  可通过绕靶标坐标系的  $X_w, Y_w, Z_w$  轴分别旋转角度  $\omega, \varphi, \kappa$  表示, 即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

设姿态1与姿态2与摄像机坐标系的旋转矩阵分别为 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ ,用上标'和"表示姿态1与姿态2的对应向量,  $\mathbf{R}_1 = [\mathbf{r}'_1 \ \mathbf{r}'_2 \ \mathbf{r}'_3]$ ,  $\mathbf{R}_2 = [\mathbf{r}''_1 \ \mathbf{r}''_2 \ \mathbf{r}''_3]$ 。若姿态2是由姿态1绕靶标坐标系的 $Z_w$ 轴旋转获得时,即:

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则由(7)式可得

$$[\mathbf{r}''_1 \ \mathbf{r}''_2 \ \mathbf{r}''_3] = [\mathbf{r}'_1 \cos \kappa + \mathbf{r}'_2 \sin \kappa \quad -\mathbf{r}'_1 \sin \kappa + \mathbf{r}'_2 \cos \kappa \quad \mathbf{r}'_3], \quad (8)$$

故:

$$\mathbf{h}''_1 = \lambda'' \mathbf{A} \mathbf{r}''_1 = \lambda'' [\mathbf{A}(\mathbf{r}'_1 \cos \kappa + \mathbf{r}'_2 \sin \kappa)] = \frac{\lambda''}{\lambda'} (\mathbf{h}'_1 \cos \kappa + \mathbf{h}'_2 \sin \kappa), \quad (9)$$

$$\mathbf{h}''_2 = \lambda'' \mathbf{A} \mathbf{r}''_2 = \lambda'' [\mathbf{A}(\mathbf{r}'_1 \sin \kappa + \mathbf{r}'_2 \cos \kappa)] = \frac{\lambda''}{\lambda'} (-\mathbf{h}'_1 \sin \kappa + \mathbf{h}'_2 \cos \kappa), \quad (10)$$

对于姿态2的第一个约束,将(9)和(10)式代入(4)式可得

$$\mathbf{h}_1^{\prime\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2^{\prime\prime} = \left( \frac{\lambda''}{\lambda'} \right)^2 [(\cos^2 \kappa - \sin^2 \kappa) \mathbf{h}_1^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_2 + \sin \kappa \cos \kappa (\mathbf{h}_2^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_2 - \mathbf{h}_1^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_1)], \quad (11)$$

对于姿态2的第二个约束,将(9)和(10)式代入(5)式,左边可得

$$\mathbf{h}_1^{\prime\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1^{\prime\prime} = \left( \frac{\lambda''}{\lambda'} \right)^2 [2 \sin \kappa \cos \kappa \mathbf{h}_1^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_2 + \cos^2 \kappa \mathbf{h}_1^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_1 + \sin^2 \kappa \mathbf{h}_2^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_2], \quad (12)$$

(5)式右边可得

$$\mathbf{h}_2^{\prime\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2^{\prime\prime} = \left( \frac{\lambda''}{\lambda'} \right)^2 [-2 \sin \kappa \cos \kappa \mathbf{h}_1^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_2 + \sin^2 \kappa \mathbf{h}_1^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_1 + \cos^2 \kappa \mathbf{h}_2^{\prime\text{T}} \mathbf{A}^{-\text{T}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}'_2]. \quad (13)$$

由(11)、(12)、(13)式可知,姿态2的约束可由姿态1的两个约束线性表示,因此姿态2对摄像机参数的求解没有贡献。然而,当姿态2由姿态1绕靶标坐标系的 $X_w$ 或 $Y_w$ 轴旋转而得时,姿态2对应的约束无法只用姿态1的约束表示,此时可由姿态2获得更多的约束。

根据性质1及性质2,在选择标定姿态时,一定避免出现只平移靶标及在靶标平面内旋转靶标的姿态。从物理意义角度而言,对于平面靶标,单应性矩阵表示的是图像成像面与靶标平面对应点的映射关系,当平移靶标及在靶标平面内旋转靶标时,对应点映射关系中的旋转矢量并没有改变。实际上,由于噪声和畸变的影响,平移或在靶标面内旋转靶标所获得的单应性矩阵可能并非完全而是近似地呈线性关系,导致求解摄像机参数的系数矩阵近似奇异,进而使求得的摄像机参数产生较大误差。

性质3: 标定时,尽量避免出现靶标平面与图像成像面平行的姿态,同时增加靶标坐标系与摄像机坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 具有绕 $X_w$ 或 $Y_w$ 轴的旋转角分量的姿态。

证明:当某姿态下靶标平面与图像成像面平行时,即靶标坐标系与摄像机坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 只有绕 $Z_w$ 轴的旋转角 $\kappa$ ,设 $t_1, t_2, t_3$ 为平移矩阵 $\mathbf{t}$ 的分量,此时单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 可表示为

$$\mathbf{H} = \lambda \mathbf{A} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & t_1 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & t_2 \\ 0 & 0 & t_3 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

由(14)式可得

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1 = \lambda [\alpha \cos \kappa & \beta \sin \kappa & 0]^{\text{T}} \\ \mathbf{h}_2 = \lambda [-\alpha \sin \kappa & \beta \cos \kappa & 0]^{\text{T}} \end{cases}, \quad (16)$$

可见 $\mathbf{h}_1$ 与 $\mathbf{h}_2$ 的第3项为0,设:

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1 = [h_{11} & h_{21} & 0]^T \\ \mathbf{h}_2 = [h_{12} & h_{22} & 0]^T \end{cases} \quad (17)$$

因此(4)和(5)式的两个约束可简化为

$$\frac{h_{11}h_{12}}{\alpha^2} + \frac{h_{21}h_{22}}{\beta^2} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{h_{11}^2}{\alpha^2} + \frac{h_{21}^2}{\beta^2} = \frac{h_{12}^2}{\alpha^2} + \frac{h_{22}^2}{\beta^2}. \quad (19)$$

由(18)和(19)式可知,当靶标平面与图像成像面平行时,两个约束仅与尺度因子  $\alpha, \beta$  有关,而与主点  $u_0, v_0$  无关;换言之,由(4)和(5)式的约束无法求得主点的初值。而尺度因子又与主点存在耦合关系,故该姿态会使求得的参数产生较大的误差。

当某姿态下靶标坐标系与摄像机坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  只有绕  $X_w$  轴的旋转角  $\omega$  时,由(4)和(5)式两个约束,可分别得

$$h_{12} - h_{32}u_0 = 0, \quad (20)$$

$$\frac{h_{12}^2 + h_{32}^2u_0^2 - 2h_{12}h_{32}u_0 - h_{11}^2}{\alpha^2} + \frac{h_{22}^2 + h_{32}^2v_0^2 - 2h_{22}h_{32}v_0}{\beta^2} + h_{32}^2 = 0, \quad (21)$$

当旋转矩阵  $\mathbf{R}$  只有绕  $Y_w$  轴的旋转角  $\varphi$  时,(4)和(5)式两个约束,可分别得

$$h_{21}h_{22} - h_{31}v_0 = 0, \quad (22)$$

$$\frac{h_{12}^2 + h_{31}^2u_0^2 - 2h_{12}h_{31}u_0}{\alpha^2} + \frac{h_{21}^2 + h_{31}^2v_0^2 - 2h_{21}h_{31}v_0 - h_{22}^2}{\beta^2} + h_{31}^2 = 0. \quad (23)$$

由(20)、(21)、(22)、(23)式可以看出,当靶标坐标系与摄像机坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  具有绕  $X_w$  或  $Y_w$  轴的旋转角分量时,正交约束可以将尺度因子  $\alpha, \beta$  与主点  $u_0, v_0$  综合起来,因此该姿态对各参数的求解有较大贡献。

### 3 五姿态集标定法

设双目系统中左右摄像机两光轴的夹角为  $\theta$ ,靶标与双目系统的距离为  $h$ ,将图 1(a)~(e)所示双目系统与靶标的姿态分别称为“系统正对”、“向上倾斜”、“向下倾斜”、“向左倾斜”和“向右倾斜”。系统正对姿态下,两摄像机光轴与靶标平面法向的夹角均为  $\theta/2$ ,双目系统与靶标的距离为  $h$ ;向上倾斜、向下倾斜姿态是在系统正对姿态的基础上分别绕  $X_w$  轴向上、向下旋转角度  $\omega$ ;向左倾斜、向右倾斜姿态是在系统正对姿态的基础上分别绕  $Y_w$  轴向左、向右旋转角度  $\varphi$ 。

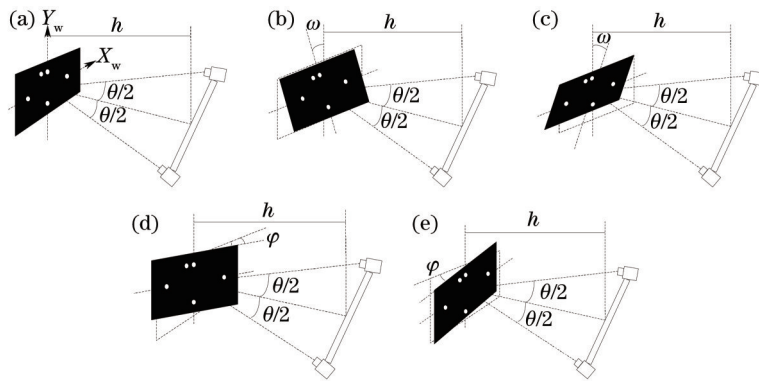


图 1 靶标与双目系统姿态示意图。(a) 系统正对姿态; (b) 向上倾斜姿态; (c) 向下倾斜姿态; (d) 向左倾斜姿态; (e) 向右倾斜姿态  
Fig.1 Scheme of pose between target and binocular system. (a) Over against pose; (b) upward-sloping pose; (c) downward-sloping pose;

(d) leftward-sloping pose; (e) rightward-sloping pose

为提高标定精度,本文提出在图 1 所示的五姿态集上拍摄标定图像的方法。根据性质 1 及性质 2,图 1 中 5 种姿态集互不相关。标定时,在全部包含以上 5 种姿态的基础上,每种姿态拍摄一定数量的图像,避免出现左摄像机或者右摄像机正对靶标的姿态,从而获得精确、稳定的标定结果。由于实验所用的双目系统两摄

像机光轴的夹角为  $38^\circ$ , 标准工作距离为 250~350 mm, 因此将上下倾斜角  $\omega$ 、左右倾斜角  $\varphi$  变化区间分别设定在  $(5^\circ, 30^\circ)$  和  $(5^\circ, 15^\circ)$  内, 这样既能保证倾斜姿态, 又不会因倾斜角太大导致靶标图像严重变形, 同时避免了性质 3 提到的靶标平面与图像成像面平行的姿态。拍摄第一组图像时, 在系统正对姿态下, 靶标与双目系统的距离  $h$  变化区间在 (250 mm, 350 mm) 内, 以保证在近处、远处及中间距离下均获取图像; 拍摄第二组和第三组图像时, 分别在向上倾斜和向下倾斜姿态下,  $\omega$  在区间  $(5^\circ, 30^\circ)$  内变化角度, 尽可能在对称的角度下拍摄图像, 例如若在向上倾斜  $10^\circ$  姿态下拍摄一对图像, 那么在向下倾斜  $10^\circ$  姿态下也拍摄一对图像; 拍摄第四组和第五组图像时, 分别在向左倾斜和向右倾斜姿态下,  $\varphi$  在区间  $(5^\circ, 15^\circ)$  内变化角度, 同样尽可能在对称的角度下拍摄图像。最后, 将所拍摄的 5 组图像全部用于标定。

## 4 实验验证

为了验证三个性质和五姿态集标定法的稳定性及精度, 实验主要分为三部分: 1) 三个性质的验证实验; 2) 针对五姿态集标定法, 为获得较稳定的标定参数, 确定每个姿态集较为合适的图像数量; 3) 通过与任意姿态标定法对比, 验证五姿态集标定法具有较高的测量稳定性与精度。因双目系统参数较多, 以下实验中的标定参数只列出左右摄像机的焦距。各组实验精度的测试基于相同的标准, 双目系统在不同角度、不同姿态下对长度为 100 mm 的标准工件进行 13 次测量, 将测量值与真实值比较, 以相对误差  $R_d = \frac{|d_i - d_m|}{d_i} \times 100\%$  为评价标准之一, 其中  $d_i$  为真实值,  $d_m$  为测量值。

### 4.1 三个性质的验证实验

由于所用双目系统左右摄像机夹角为  $38^\circ$ , 故当靶标平面与左右图像成像面平行时, 对应的姿态分别为向左倾斜  $19^\circ$  和向右倾斜  $19^\circ$ 。设置 5 组对比实验: 系统正对、向上倾斜  $19^\circ$ 、向下倾斜  $19^\circ$ 、向左倾斜  $19^\circ$  和向右倾斜  $19^\circ$  姿态下, 仅仅通过沿着靶标坐标系的  $X_w$ 、 $Y_w$ 、 $Z_w$  轴平移靶标及在靶标平面内旋转靶标, 左右摄像机均获取 12 幅图像, 5 组实验依次记为标定 1、标定 2、标定 3、标定 4 和标定 5。左右摄像机的焦距如表 1 所示, 对 100 mm 工件的精度测试结果如表 2 及图 2 所示, 图 2 横轴表示双目系统在不同姿态下的每次测量, 纵轴表示相对误差。

表 1 5 次标定实验参数对比结果

Table 1 Parameters contrast results of five calibration experiments

Parameters for comparison	Left camera $f$ /mm	Right camera $f$ /mm
Calibration 1	8.280972	8.313489
Calibration 2	8.243713	8.232542
Calibration 3	8.268333	8.282329
Calibration 4	14.53007	8.29055
Calibration 5	8.323241	16.38114

表 2 5 次标定实验测量结果误差对比

Table 2 Measurement deviation contrast results of five calibration experiments

Parameters for comparison	Average deviation /mm	Standard deviation /mm	Max deviation /mm
Calibration 1	0.129862	0.029926	0.172382
Calibration 2	0.145791	0.039778	0.20951
Calibration 3	0.12228	0.025136	0.157796
Calibration 4	2.624246	0.808904	3.798221
Calibration 5	1.629554	0.741292	2.606386

由表 1 可以看出, 标定 4 左摄像机的焦距、标定 5 右摄像机的焦距远远偏离镜头的焦距标称值 8 mm; 由表 2 及图 2 可以看出, 标定 4、标定 5 测量 100 mm 标准工件的平均误差达到 1.5 mm 以上, 相对误差大部分在 0.1% 以上, 精度较差。而标定 4 的靶标平面与左摄像机的图像成像面平行, 标定 5 的靶标平面与右摄像机的图像成像面平行, 由此可以看出, 当靶标平面与图像成像面平行时, 会影响标定参数, 从而使测量精度变差,

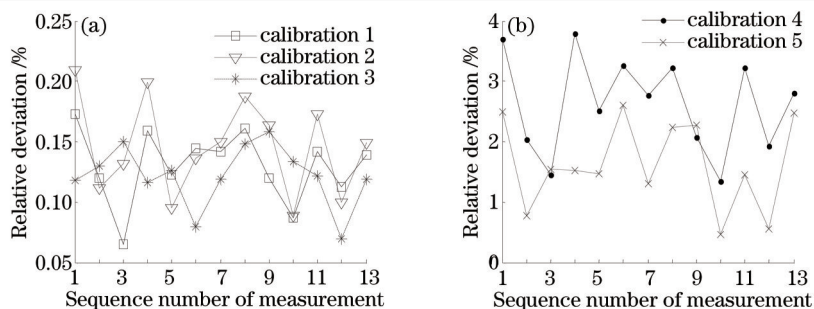


图2 5次标定实验测量精度对比结果

Fig.2 Measurement accuracy contrast results of five calibration experiments

因此证实性质3。

表1中,对于左摄像机,标定1、标定2、标定3、标定5的焦距虽较标定4接近标称值,但上下波动达0.08 mm,对于右摄像机,标定1、标定2、标定3、标定4的焦距也上下波动达0.08 mm,参数标定结果不稳定。表2及图2中标定1、标定2、标定3的平均误差在0.1 mm以上,每次测量的相对误差大部分在0.1%以上,平均误差、标准差虽较标定4、标定5小,但仍不满足工业生产精密测量对精度、稳定性的要求。由此可见,仅仅通过平移靶标及在靶标平面内旋转靶标改变姿态,获得的标定参数误差较大、精度较差,证实性质1及性质2。

#### 4.2 五姿态集标定法图像数量对标定结果的影响实验

图3表示标定结果与五姿态集标定法采集图像数量的关系,横轴表示每个姿态集不同的图像数量,纵轴为五姿态集的图像全部参与标定获得的焦距,为测试其稳定性,进行4组实验,每组实验都是相似的。当双目系统在每个姿态集拍摄多对图像时,系统正对姿态时改变双目系统与靶标的距离 $h$ ,其他姿态改变倾斜角度 $\omega$ 和 $\varphi$ 。可以看出,当双目系统在每个姿态集上拍摄的图像数量为1对或2对时,不同组实验获得左右摄像机的焦距有较大波动;当拍摄4对图像时,标定参数的稳定性并没有比拍摄3对图像时有大的提高,且此时双目系统与靶标间变化的姿态增多,从而使标定愈加繁琐;而拍摄3对图像时,标定参数的波动范围可满足标定参数对稳定性的要求,因此建议每个姿态集拍摄3对图像。

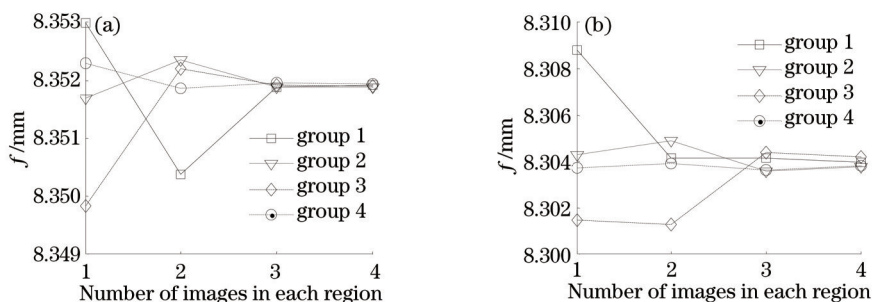


图3 五姿态集标定法不同图像数量对标定结果的影响。(a)左摄像机焦距随每个姿态集图像数量不同的变化;

(b)右摄像机焦距随每个姿态集图像数量不同的变化

Fig.3 Influence of different number of images on calibration parameters for the method of five poses set calibration.

(a) Variation trend of left camera's focal length; (b) variation trend of right camera's focal length

#### 4.3 五姿态集标定法稳定性及精度测试实验

为进一步测试五姿态集标定方法的稳定性及精度,设置对比实验:(a)对五姿态集标定法拍摄15对图像的标定结果进行精度检验,(b)从不同角度任意拍摄15对图像的标定结果进行精度检验;两组实验均包含4次标定:标定1、标定2、标定3和标定4,实验结果如表3及图4(a),(b)所示。

图4(a),(b)横轴表示双目系统不同姿态下的每次测量,纵轴表示相对误差。对于双目系统的每次测量,五姿态集标定法4次标定参数下的测量结果相差不大;而任意多姿态标定法4次标定参数下的测量结果起伏变化较大,其中标定1与标定4的测量精度相差较大;与此同时,表3中五姿态集标定法的标准差明显小于任意姿态下的标准差,证明与任意姿态标定法相比,五姿态集标定法具有较高的稳定性。同时,由图4及表3的平均误差、最大误差均可以看出,五姿态集标定法的测量精度整体高于任意姿态标定法。虽然受工件两

端圆心提取精度的影响,图4(a)中第3、4、7次测量相对误差较大,然而双目系统不管在何种角度、姿态下,标定结果的测量相对误差均小于0.015%,满足工业生产精密测量对精度的要求。

表3 五姿态集标定法与任意多姿态标定法测量结果误差对比

Table 3 Measurement deviation contrast results of five poses set calibration and random pose calibration methods

Parameters for comparison	Five poses set calibration			Random pose calibration		
	Average	Standard	Max	Average	Standard	Max
	deviation /mm	deviation /mm	deviation /mm	deviation /mm	deviation /mm	deviation /mm
Calibration 1	0.00557	0.002754	0.012787	0.016016	0.006139	0.033253
Calibration 2	0.005673	0.002539	0.0121	0.011112	0.00573	0.0265
Calibration 3	0.005624	0.002773	0.012371	0.008795	0.003721	0.018889
Calibration 4	0.005622	0.002671	0.012419	0.037875	0.003975	0.046511

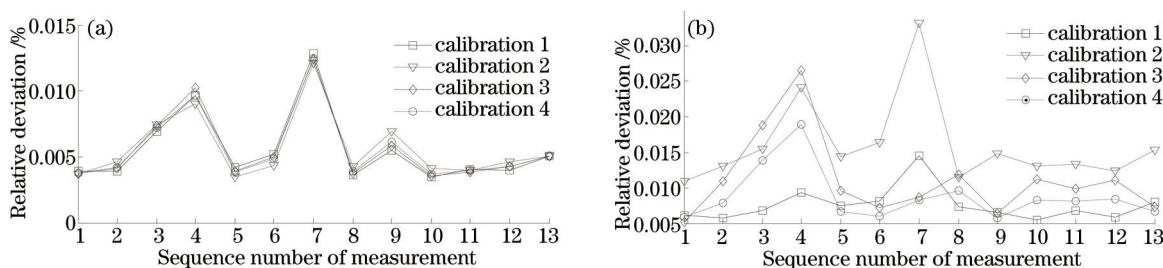


图4 五姿态集标定法与任意多姿态标定法的精度对比结果。(a) 五姿态集标定法4次标定参数的测量精度;  
(b) 任意多姿态标定法4次标定参数的测量精度

Fig.4 Measurement accuracy contrast results of five poses set calibration and random pose calibration methods. (a) Measurement accuracy of four calibration experiments for the method of five poses set calibration; (b) measurement accuracy of four calibration experiments for the method of random pose calibration

## 5 结 论

为提高标定稳定性与标定精度,根据单应性矩阵的两个约束,提出规范靶标与双目系统标定姿态的三个性质。三个性质对不合理的标定姿态进行了规避,避免出现只平移靶标及在靶标平面内旋转靶标的姿态,尽量避免标定平面与图像成像面平行的姿态。进而提出了五姿态集标定方法。5个姿态集互不相关,有助于提高标定稳定性及精度。理论分析与实验结果表明,三个性质正确可靠,具有较高的应用价值。当每个姿态集拍摄图像不少于3对时,基于三个约束性质的五姿态集标定法能获得较高的稳定性与标定精度,测量长度为100 mm的标准工件,相对误差能控制在0.015%以内,满足工业生产精密测量对精度的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Fu Zhongliang, Zhou Fan, Xie Yanfang, *et al.*. One-dimensional multi-camera calibration based on fundamental matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0615003.  
付仲良,周 凡,谢艳芳,等. 基于像对基础矩阵的多像一维标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0615003.
- 2 Z Zhang. Camera calibration with one-dimensional objects[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(7): 892-899.
- 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 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.
- 5 Xie Zexiao, Gao Xiang, Cui Jian. Extraction algorithm of circular targets used for mobile 3D measurement[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208002.  
解则晓,高 翔,崔 健. 移动式三维测量用圆形标记点提取算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208002.

- 6 Xie Zexiao, Lu Wenjuan. A binocular matching algorithm based on similar image geometric features[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508002.  
解则晓, 陆文娟. 基于图像相似几何特征的双目匹配算法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508002.
- 7 J H Wang, Y C Liu. Characteristic line of planar homography matrix and its applications in camera calibration[C]. 18th International Conference on Pattern Recognition, IEEE, 2006, 1: 147-150.
- 8 Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jiang, *et al.*. Field calibration of binocular stereo system based on planar template and free snapping [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 695-701.  
张 辉, 张丽艳, 陈 江, 等. 基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 695-701.
- 9 Zhang Hui, Zhang Liyan, Wei Hu. Three-step calibration for binocular stereo system[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(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, 20(16): 1899-1903.
- 10 Zhang Guangjun. Vision Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008. 33-36.  
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 33-36.

栏目编辑: 张浩佳