

# 基于定点旋转的显微三维数字图像相关系统标定方法

吴敏杨<sup>1</sup>, 郭建军<sup>2</sup>, 蒋明<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>苏州科技大学数理学院, 江苏 苏州 215009;

<sup>2</sup>苏州科技大学土木学院, 江苏 苏州 215009

**摘要** 显微三维数字图像相关系统中体视显微镜景深小, 光路复杂, 宏观标定方法不适用于该系统。针对此问题, 提出一种适用于显微立体视觉的定点旋转标定方法。基于体视显微镜放大倍率与景深的关系, 建立数学模型, 得到标定板与 XY 平面间的最大夹角, 设计定点旋转平台对标定板进行旋转标定, 通过系列实验对标定参数进行优化, 得出使标定参数整体误差最小的夹角。标定结果表明, 主点坐标误差不超过 1.8 pixel, Z 分量相对平移向量的最大偏差值小于 0.15 mm, 姿态数为 10 或 10 以上时标定结果趋于稳定。借助于精密位移台对标定结果进行了精度验证, 结果表明采用所提方法标定后位移测量的平均相对误差为 2.2%, 平均均方差为 0.36  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 机器视觉; 标定; 体视显微镜; 定点旋转; 旋转角度; 姿态数

中图分类号 TH742

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1215010

## Calibration Method of Microscopic Three-Dimensional Digital Image Correlation System Based on Fixed-Point Rotation

Wu Minyang<sup>1</sup>, Guo Jianjun<sup>2</sup>, Jiang Ming<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China

**Abstract** The macroscopic calibration method cannot be applied in the microscopic three-dimensional digital image correlation system due to the small depth of field and the complex optical paths of a stereo microscope. As for this problem, a fixed-point rotation calibration method is proposed, which is suitable for microscopic stereo vision. The mathematical model is established based on the relationship between magnification and depth of field, and thus the maximum angle between calibration plate and XY plane is obtained. In addition, the fixed-point rotation platform is designed to calibrate the calibration plate. The calibration parameters are optimized by a series of experiments and the inclination angle used for minimizing the overall error of the calibration parameters is obtained. The calibration results show that the main point coordinate error is not larger than 1.8 pixel, the maximum deviation of the relative translation vector of Z component is less than 0.15 mm, and the calibration result tends to be stable when the attitude number is 10 or above. The accuracy of the calibration results is tested by use of a precision displacement platform and the results show that the average relative error of displacement measurement by the proposed method is 2.2% and the mean square error is 0.36  $\mu\text{m}$ .

**Key words** machine vision; calibration; stereo microscope; fixed-point rotation; rotation angle; attitude number

**OCIS codes** 150.1488; 330.1400; 100.5760; 150.0155

## 1 引 言

显微三维数字图像相关方法是在三维数字图像相关方法的基础上, 结合体视显微系统, 实现对微小物体三维形貌、位移及应变的测量<sup>[1-4]</sup>, 是一种具有

非接触、高精度及全程测量等优点的光学测量方法, 在微操作、微型零件测量及装备和生命科学等领域应用广泛<sup>[5-8]</sup>。体视显微系统的标定是通过点的对应关系得出整个系统光路的几何模型、畸变模型及 CCD 间相对的几何位置关系参数, 标定准确度直接

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-07-31; 录用日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(11172193)

\* E-mail: jiangming@mail.usts.edu.cn

影响整个显微三维数字图像相关系统的测量精度<sup>[9]</sup>。目前,有诸多相对成熟的宏观标定方法,如 Matlab 的标定工具箱<sup>[10]</sup>、OpenCV 的标定<sup>[11]</sup>等。然而,显微三维数字图像相关系统中,体视显微镜的景深和视场较小<sup>[12-13]</sup>,为了使标定板可以清晰成像,标定板与 XY 平面所成夹角很小,达不到 Matlab 的识别范围,无法进行显微标定;OpenCV 自带的标定方法是张正友标定法<sup>[14]</sup>,标定板的最佳倾斜角度为 45°,远大于体视显微镜的景深范围。针对上述问题,在张氏标定的基础上,提出了一种适用于体视显微镜的定点旋转标定方法。根据体视显微镜放大倍率与景深的关系,研究标定板在不同放大倍率时与 XY 平面的最大夹角,利用定点旋转平台和棋盘格标定板进行内外参数标定。通过变倍率法对主点坐标进行优化,并对标定误差进行分析。研究了不同放大倍率下标定板与 XY 平面所成的最佳角度以及使标定结果稳定的姿态数。

## 2 内参标定

### 2.1 实验装置

显微三维数字图像相关系统由两个 CCD、CMO(Common Main Objective)型体视显微镜、计算机、旋转平台、标定板及背光源组成,如图 1 所示。

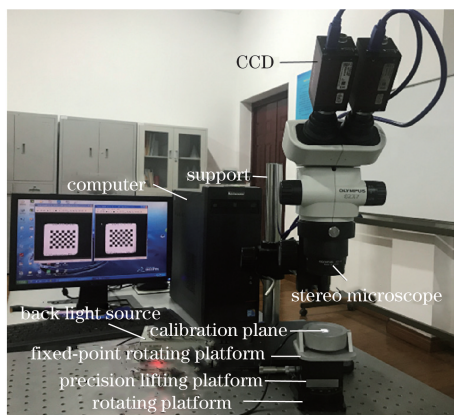


图 1 显微三维数字图像相关系统

Fig. 1 Microscopic three-dimensional digital image correlation system

采用 7×9 的棋盘格光学玻璃标定板,每个正方形边长为 0.8 mm,精度为 1 μm,如图 2 所示。选择 LED 背光源,通过背光源电源盒上的旋钮调节灯的亮度,使标定板在合适的光照下清晰成像。光源是标定精度的影响因素之一,LED 背光源的优势是:标定板嵌入光源圆盘,背光源的面积大于标定板的面积,使得光照均匀,从而减小因光照不均匀带来的标定误差。

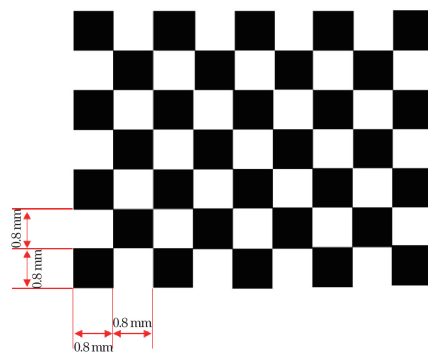


图 2 棋盘格标定板

Fig. 2 Chess board calibration plate

实验要求标定板中心固定且可绕 X、Y、Z 轴自由旋转。为此,设计了定点旋转平台,如图 3 所示,标定板嵌在正方形凹槽中,中心固定,可绕 XY 平面及过中心点的任意一条轴线转动。

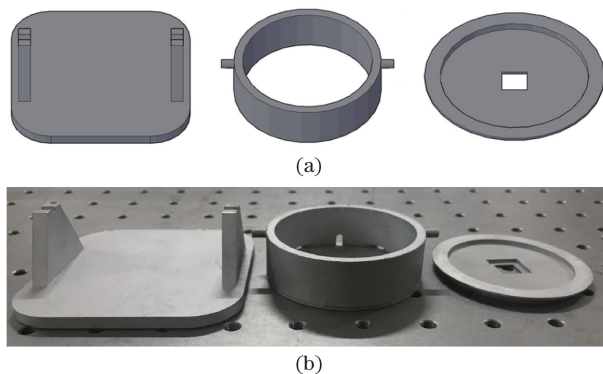


图 3 定点旋转平台。(a) CAD 图;(b)实物图

Fig. 3 Fixed-point rotation platform. (a) CAD diagram; (b) physical drawing

为了使标定板在成像清晰的条件下获得一系列不同的姿态,还需要升降位移台和旋转台。实验中采用美国 Newport 公司的 MVN-50 位移台和 M-481-A 旋转台。位移台的精度为 20 μm,灵敏度为 1 μm,旋转平台的精度为 5'。

### 2.2 标定方法

针对显微标定过程中易产生模糊和畸变的情况,提出了基于旋转不变性的角点检测方法,对棋盘格角点进行检测,在分析棋盘格角点几何特征的基础上,以特征向量的置信度为衡量标准,对候选特征点进行筛选,实现棋盘格角点的自动提取<sup>[15]</sup>。

实验采用奥林巴斯体视显微镜,型号为 SZX7,光路为 CMO 型(图 4),变焦倍率为 7:1,放大倍率为 0.8~5.6,数值孔径为 0.1,工作距离为 90.0 mm。体视显微镜的放大倍率范围为 0.8~5.6 时,视场范围从 15.7 mm×13.2 mm 到 2.3 mm×1.9 mm 变化,而景深从 2.520 mm 减小到 0.087 mm。不同放

大倍率下的景深与视场如表 1 所示。

以任意放大倍率  $\beta$  为例,得出标定板与 XY 平面的夹角  $\alpha$  值如图 5 所示。

图 5 中,  $D$  为摄像机景深,  $L$  为标定板对角线的长度。理想情况下,标定板中心固定,在  $1/2$  景深处成像最清晰,这时可得到倾斜角的正切值与景深、标定板长度的关系为

$$\tan \alpha = \frac{D/2}{L/2} = \frac{D}{L}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{180^\circ}{\pi} = \arctan \frac{D}{L}。 \quad (2)$$

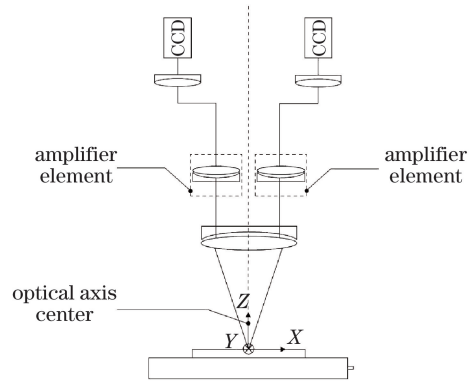


图 4 体视显微镜光路

Fig. 4 Optical path of stereo microscope

表 1 不同放大倍率下的景深与视场

Table 1 Depths of field and fields of view under different magnification

Magnification	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.2	4	5	5.6
Field of view $x$ /mm	15.7	13.0	10.1	8.1	6.5	5.2	4.0	3.2	2.6	2.3
Field of view $y$ /mm	13.2	10.9	8.5	6.8	5.4	4.3	3.4	2.7	2.2	1.9
Depth of field /mm	2.520	1.380	0.881	0.490	0.434	0.244	0.200	0.129	0.100	0.087

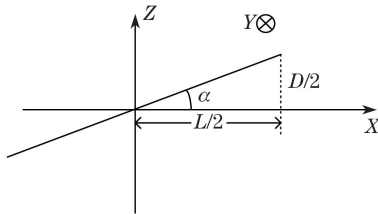


图 5 倾斜角与景深的关系

Fig. 5 Relationship between inclination angle and depth of field

具体标定过程为:1) 标定板绕 Z 轴旋转和倾斜,具体操作如图 6 所示;2) 标定板绕 Z 轴每  $5^\circ$  旋转一次,共旋转  $90^\circ$ ;3) 在进行步骤 1) 的同时倾斜标定板,注意标定板所在平面与 XY 平面的夹角最大不超过  $\alpha$ 。

在上述过程中,为了保证标定板的中心始终处于成像清晰的状态,标定板中心固定,只将标定板旋转和倾斜。每一个位置都用安装在体视显微镜上的两个 CCD 记录,一共 19 个位置,共采集 19 对图像。对每一幅图的棋盘格进行角点检测,由角点坐标矩阵计算出内部参数,如表 2 所示。

表 2 内部参数

Table 2 Internal parameters

CCD	$f_x$ /pixel	$f_y$ /pixel	$u_0$ /pixel	$v_0$ /pixel	$k_1 / 10^{-2}$
Left CCD	8076.51	8276.64	1223.75	1026.61	2.8
Right CCD	8071.94	8276.07	1224.19	1024.78	3.2
Relative error /%	0.029	0.020	0.166	0.166	0.530

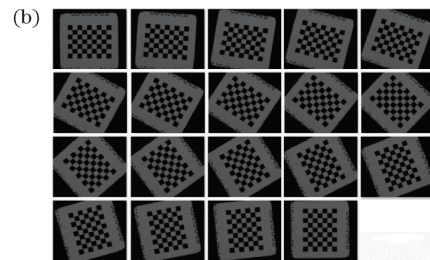
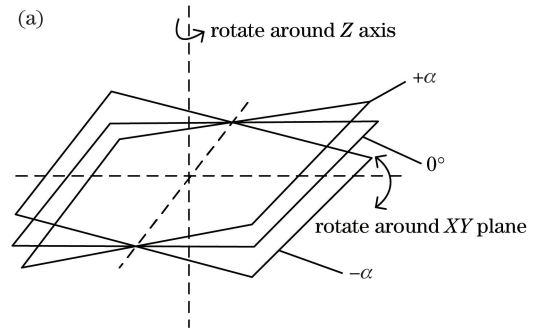


图 6 标定板图像采集过程。(a) 标定板定点转动;

(b) 标定板图像采集(左 CCD)

Fig. 6 Process of image acquisition of calibration plate.

(a) Fixed-point rotation of calibration plate; (b)

image acquisition of calibration plate (left CCD)

由于显微立体视觉存在弱视差,无法准确得到焦点的位置;主点坐标即为焦点在图像平面的投影,也无法准确得到。因此,还需要对主点坐标进行进一步优化。分析针孔光路模型,可以得到摄像机的光心、焦点以及焦点在图像平面的投影点主点在同一条直线上,这条直线便是光轴。因为焦点以及主点是摄像机坐标系和图像坐标各自的原点,所以在很大程度上影响成像和畸变矫正,因此,主点坐标位置的准确性成为显微三维数字图像相关系统标定准确性的决定性因素。采用变倍率法<sup>[16]</sup>标定主点坐标,体视显微镜放大倍率的变化范围为0.8~5.6。体视显微镜的放大倍率变化时,由于光轴位置不变,因此主点的坐标位置始终不变。可以利用在一定倍率下投影到图像平面不同点的连线的交点位置求解主点坐标。

设空间中任意一点的摄像机坐标为 $(X_c, Y_c, Z_c)$ ,理想情况下,该点的图像坐标可表示为

$$\begin{cases} u' = \beta X_c + u_0 \\ v' = \beta Y_c + v_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\beta$ 为体视显微镜的放大倍率, $(u', v')$ 为图像坐标, $(u_0, v_0)$ 为主点坐标。将(3)式中 $\beta$ 消去,可得

$$\frac{u' - u_0}{X_c} = \frac{v' - v_0}{Y_c}. \quad (4)$$

由(4)式可知,主点坐标位置与放大倍率无关,所以在图像平面不同的放大倍率下, $n$ 个不同点在空间中形成的投影点连线必过同一点,该点即为摄

像机的主点,如图7所示。

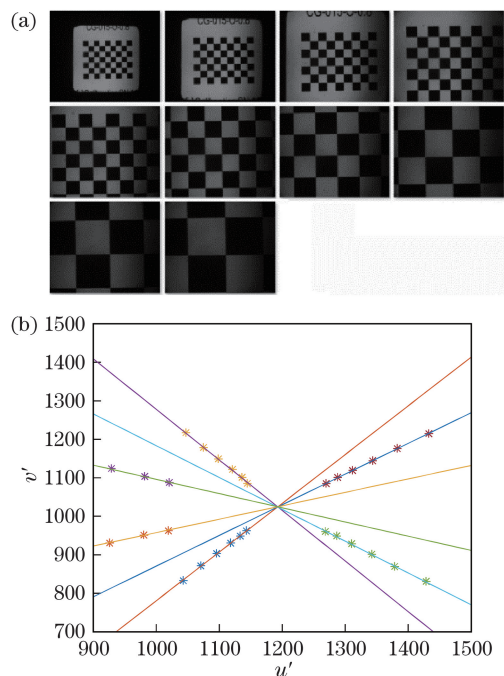


图7 主点标定示意图。(a)不同倍率的标定图像;  
(b)投影点坐标拟合

Fig. 7 Schematic of main point calibration. (a) Calibration images under different magnification; (b) fitting of projection point coordinates

分别选取了棋盘格上行列为(3,4)、(3,5)、(4,4)和(4,5)的4个棋盘格角点,通过最小二乘法对不同倍率下的对应点进行直线拟合(表3),得到精确的直线方程,再通过最小二乘法获得直线的交点,便可以得到摄像机主点坐标。

表3 直线拟合表

Table 3 Line fitting table

Magnification	(3,4)		(3,5)		(4,4)		(4,5)	
	$x$ /pixel	$y$ /pixel	$x$ /pixel	$y$ /pixel	$x$ /pixel	$y$ /pixel	$x$ /pixel	$y$ /pixel
0.8	1276.12	1096.65	1281.10	1474.08	1655.77	1090.19	1661.06	1469.81
1.0	1263.61	1078.29	1267.42	1379.60	1565.05	1074.77	1569.10	1376.05
1.25	1253.96	1065.85	1256.93	1306.72	1494.75	1063.10	1497.95	1303.89
1.6	1246.74	1055.62	1248.89	1243.27	1434.14	1053.42	1436.64	1240.87
2.0	1241.04	1048.46	1243.02	1198.27	1390.51	1046.68	1392.60	1196.32
2.5	1236.40	1043.66	1238.11	1165.87	1358.33	1042.21	1359.80	1164.43
Line fitting	$y = 1.3004x - 564.9919$		$y = 7.2x - 7789.3$		$y = 0.1619x + 821.5713$		$y = 1.0159x - 218.0002$	

对主点进行22次重复标定实验,每次标定得到的主点坐标结果如图8所示,主点坐标误差不超过1.8 pixel,均方差为0.47 pixel。

将得到的显微棋盘格图像角点进行重投影实

验,重投影误差如图9所示,图中 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别为X轴和Y轴方向的重投影误差。棋盘格角点在X轴和Y轴的重投影误差均小于0.5 pixel,角点重投影误差小于0.2 pixel,重投影误差的均方差在X轴和

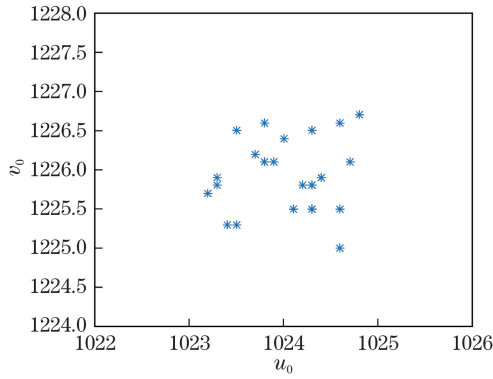


图 8 22 次标定的主点坐标

Fig. 8 Main point coordinates for 22 times calibration

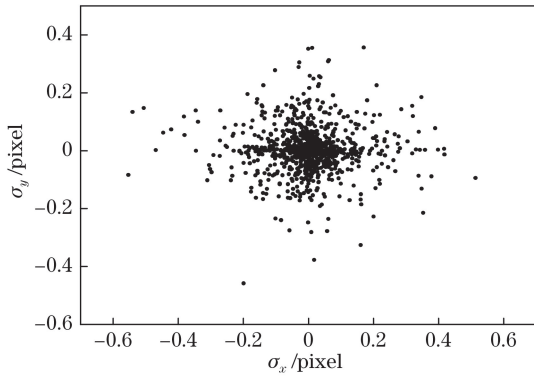


图 9 重投影误差

Fig. 9 Reprojection errors

Y 轴均约为 0.10 pixel。

### 3 外参标定

摄像机的外参由旋转矩阵和平移向量组成,用来描绘世界坐标系相对于摄像机坐标系的位置关系的参数。标定用的棋盘格平面与图像平面具有单应性关系,可以用单应性矩阵  $\mathbf{H}$  来描述,即

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] = \lambda \mathbf{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}], \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为摄像机的内参矩阵,由尺度因子和用变倍率法得到的主点坐标构成,并通过张氏标定法计算获得;  $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_2$ 、 $\mathbf{r}_3$  为旋转矩阵,  $\mathbf{t}$  为平移向量,可分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \lambda \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1, \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2, \\ \mathbf{r}_3 &= \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2, \mathbf{t} = \lambda \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_3. \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可以计算出采集的每一幅图像对应的外参矩阵  $\mathbf{RT} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{t}]$ , 其中  $\mathbf{R}$  为总的旋转矩阵,  $\mathbf{T}$  为平移矩阵。三维空间中的旋转可看作是绕坐标轴的二维旋转。若绕 X、Y、Z 轴旋转的角度分别为  $\psi$ 、 $\varphi$  和  $\theta$ , 则  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\psi) \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_z(\theta)$ ,  $\mathbf{R}_x(\psi)$ 、 $\mathbf{R}_y(\varphi)$ 、 $\mathbf{R}_z(\theta)$  分别为绕 X、Y、Z 轴的旋转矩阵。依据像素误差最小化原则,采用 L-M 迭代算法<sup>[17]</sup> 对外参矩阵进行优化。

### 3.1 旋转矩阵标定结果分析

标定在光学防震平台上进行,世界坐标系的 Z 轴是垂直于标定板平面的,将标定板绕 Z 轴分别以间隔  $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  旋转。图 10 为左右两个子光路中标定板绕 Z 轴旋转  $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  的情况下每幅图对应的标定板旋转的角度。当标定板绕 Z 轴每  $5^\circ$  进行一次旋转时,左边光路中旋转角度的拟合直线为  $y = 5.0043x - 4.3712$ , 右边光路中旋转角度的拟合直线为  $y = 4.9953x - 4.1007$ 。当标定板绕 Z 轴每  $10^\circ$  旋转一次时,左边光路中旋转角度的拟合直线为  $y = 10.0572x - 9.9268$ , 右边光路中旋转角度的拟合直线为  $y = 10.0190x - 9.9134$ 。当标定板绕 Z 轴每  $15^\circ$  进行一次旋转时,左边光路中旋转角度的拟合直线为  $y = 14.9850x - 14.8209$ , 右边光路中旋转角度的拟合直线为  $y = 14.9871x - 14.7518$ 。通过观察直线方程可以发现,不管每次旋转多少角度,直线斜率都与旋转角度逼近。

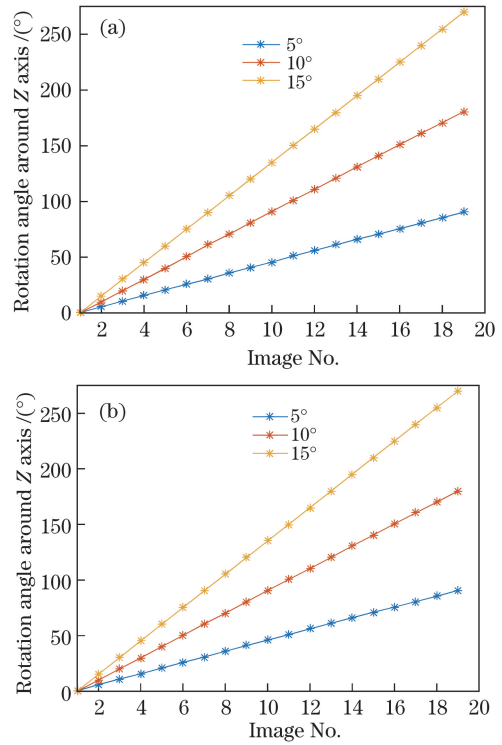


图 10 标定板绕 Z 轴每旋转  $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时每幅图对应的标定板旋转的角度。(a) 左子光路; (b) 右子光路

Fig. 10 Rotation angle of calibration plate around Z axis when intervals of calibration plate rotation around Z axis are  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  and  $15^\circ$ , respectively. (a) Left sub optical path; (b) right sub optical path

### 3.2 平移向量标定结果分析

平移向量是一个  $3 \times 1$  的向量,描述了摄像机坐

标原点相对于世界坐标原点  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的相对偏移量,单位为 mm。因为标定板在旋转过程中,原点的位置在改变,但每一幅图与第一幅图位置的偏差理论上是相同的,因此将每一幅图与第一幅图的平移向量作差,并且将左右两个光路的平移向量偏差相减,从而获得一组相对平移量。图 11 中分别为每一幅图的光心位置与第一幅图的光心位置的矢量差在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的分量,由图可知, $\Delta x$  和  $\Delta y$  都近似等于 0。每次旋转  $5^\circ$  时  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的最大偏差值为 0.014 mm,每次旋转  $10^\circ$  时  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的最大偏差值为 0.015 mm,两种情况  $\Delta z$  的最大偏差值  $\leq 0.15$  mm。

## 4 标定姿态与姿态数分析

### 4.1 标定姿态分析

在显微三维数字图像相关系统中,摄像机进行内参矩阵的标定时,将标定板绕  $Z$  轴旋转之后,还需要倾斜标定板,使其与  $XY$  平面呈一定的角度,第 2.2 节中给出放大倍率与景深的关系,根据图 5 计算出放大倍率为 0.8, 1.0, 1.25 时对应的  $\alpha$  的值分别为  $12^\circ$ 、 $7^\circ$  和  $4^\circ$ ,因此对三个放大倍率下  $\alpha$  以内的角度的内参误差进行分析。以焦距、主点坐标和重投影误差的均方差实际值与其均值的偏差程度作为总体误差  $\epsilon$ ,确定标定板的最佳倾斜角度。 $\epsilon$  可表示为

$$\epsilon = \sqrt{\frac{(f_{xi} - \bar{f}_x)^2 + (f_{yi} - \bar{f}_y)^2 + (u_{oi} - u_0)^2 + (v_{oi} - v_0)^2 + (\sigma_{xi} - \bar{\sigma}_x)^2 + (\sigma_{yi} - \bar{\sigma}_y)^2}{6}}, \quad (7)$$

式中: $f_{xi}$  和  $f_{yi}$  分别为左、右 CCD 测得的焦距; $\bar{f}_x$  和  $\bar{f}_y$  分别为左、右 CCD 测得的焦距平均值; $u_{oi}$  和  $v_{oi}$  分别为左、右 CCD 测得的主点坐标值; $u_0$ 、 $v_0$  为理想的主点坐标值; $\sigma_{xi}$  和  $\sigma_{yi}$  分别为左、右 CCD 测得重投影误差的均方差,  $\bar{\sigma}_x$ 、 $\bar{\sigma}_y$  分别为左、右 CCD 测得重投影误差的均方差平均值。理想情况下,主点坐标为 CCD 靶面的中心点, CCD 的像素为 2452 pixel  $\times$  2054 pixel,因此主点坐标分别为 1226 pixel 和 1024 pixel。

通过比较不同放大倍率下左、右 CCD 在不同倾斜角度时的总体误差(图 12),可得:在 0.8 的放大倍率下,当标定板与  $XY$  平面的夹角为  $6^\circ$  时,左、右两个 CCD 的总体误差最小;在 1.0 的放大倍率下,当标定板与  $XY$  平面的夹角为  $5^\circ$  时,总体误差最小;在 1.25 的放大倍率下,当标定板与  $XY$  平面的夹角为  $3^\circ$  时,左、右 CCD 的总体误差最小。由此可见,随着放大倍率的增大,标定板与  $XY$  平面的夹角逐渐减小。

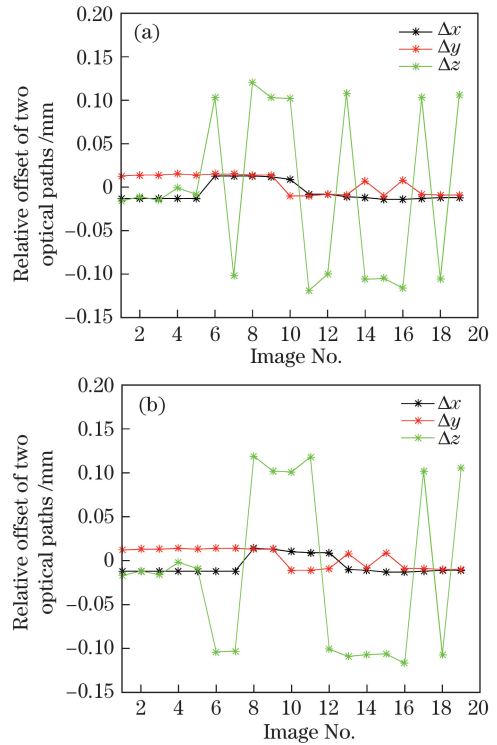


图 11 左右子光路的相对平移量。(a)标定板绕  $Z$  轴旋转  $5^\circ$ ;  
(b)标定板绕  $Z$  轴旋转  $10^\circ$

Fig. 11 Relative translation quantities of left and right sub optical paths. (a) Calibration plate rotating around  $Z$ -axis with  $5^\circ$ ; (b) calibration plate rotating around  $Z$ -axis with  $10^\circ$

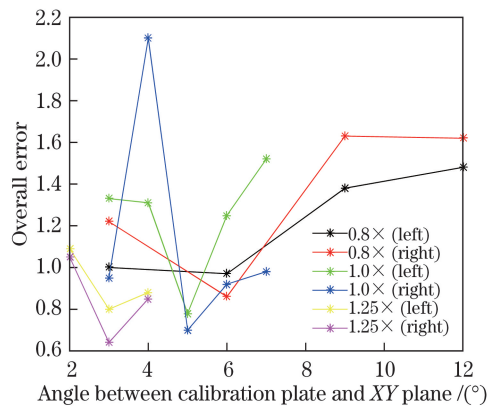


图 12 标定板不同姿态的总体误差  
Fig. 12 Overall errors of calibration board under different attitudes

### 4.2 标定姿态数分析

标定结果一定程度上受标定姿态的影响:标定姿态太少,会因缺少信息而使标定结果不准确;标定

姿态过多,会使计算周期变得冗长,导致计算的效率变低。在放大倍率为0.8、标定板与XY平面的夹角为6°时,标定板绕Z轴每5°旋转一次,共旋转90°,

左右两个 CCD 采集 19 对图,比较  $f$ 、 $u_0$ 、 $v_0$  及  $k_1$  在不同标定姿态数下的稳定性,如图 13(a)~(d)所示(以右 CCD 为例)。

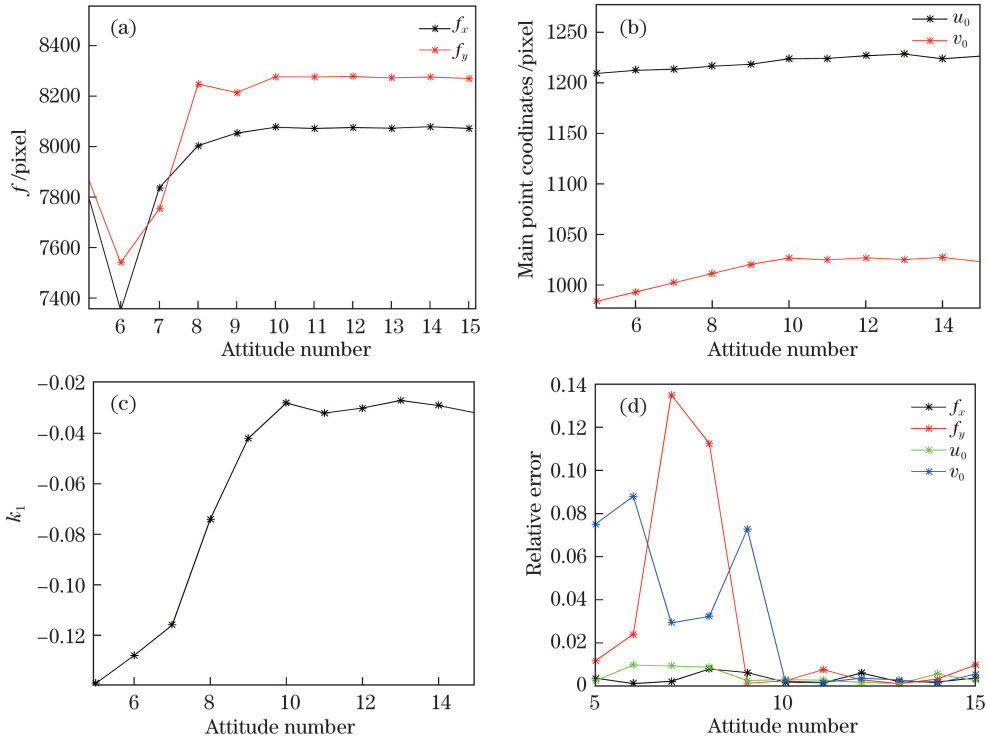


图 13 右 CCD 姿态数对标定结果稳定性的影响。(a)焦距随姿态数的变化;(b)主点坐标随姿态数的变化;  
(c)径向畸变系数随姿态数的变化;(d)相对误差随姿态数的变化

Fig. 13 Influence of attitude number of right CCD on stability of calibration results. (a) Focal length versus attitude number; (b) main point coordinate versus attitude number; (c) radial distortion coefficient versus attitude number; (d) relative error versus attitude number

因此,当姿态数为 10 及以上时,CCD 的各项参数都达到一个相对稳定的值,并且总误差也趋于稳定,减少了因姿态数过少或过多带来的麻烦,为图像匹配提供了保证。

### 5 三维形貌测量

体视显微镜采用 1.0 的放大倍率,棋盘格标定板的尺寸为 5.6 mm×7.2 mm。在标定板与 XY 平

面的夹角为 5°时,利用 Pike F-505B 相机对棋盘格标定板进行了 10 组不同姿态的采集,内参标定结果如表 4 所示。

两个 CCD 之间相对的旋转和平移矩阵分别为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9997 & 0.0209 & -0.0010 \\ -0.0207 & 0.9986 & 0.0492 \\ -0.0020 & 0.0491 & -0.9988 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -23.8706 \\ -6.1645 \\ 3.6063 \end{bmatrix}.$$

表 4 CCD 内参标定结果

Table 4 Internal parameter calibration results of CCD

CCD	$\sigma_x$ /pixel	$\sigma_y$ /pixel	$f_x$ /pixel	$f_y$ /pixel	$u_0$ /pixel	$v_0$ /pixel
Left CCD	0.11	0.10	23186.92	23189.27	1225.89	1023.75
Right CCD	0.11	0.10	23187.58	23189.19	1226.27	1024.16

利用 NEWPORT 精密移动平台对棋盘格标定板分别进行 X、Y、Z 方向的移动,其中 X、Y 方向每次移动 10  $\mu\text{m}$ ,Z 方向每次移动 20  $\mu\text{m}$ ,一共进行 10 组测量,测得棋盘格上 48 个角点在三个方向的平均

位移向量如图 14 所示,计算得到 X、Y 方向的相对误差小于 1.5%,均方差小于 0.22  $\mu\text{m}$ ,Z 方向的相对误差小于 1.8%,均方差为 0.26  $\mu\text{m}$ 。

对第 5 套人民币的 1 角硬币的局部进行三维形

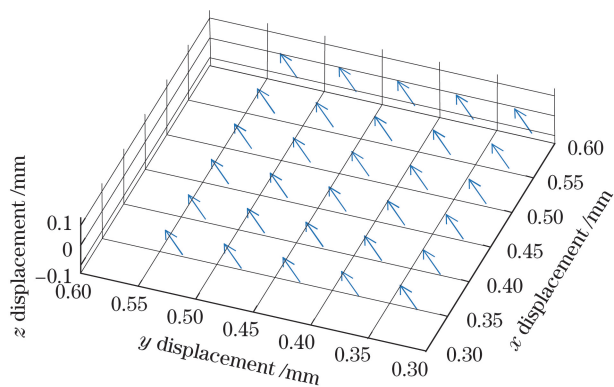


图 14 三维平均位移向量

Fig. 14 Three-dimensional average displacement vector

貌测量。实验中采用直径为 19 mm 的 1 角硬币,材质为不锈钢,背面为兰花图案。图 15 为左、右 CCD 获得的喷有人工散斑的硬币图像,测量视场范围为 13.0 mm×10.9 mm。

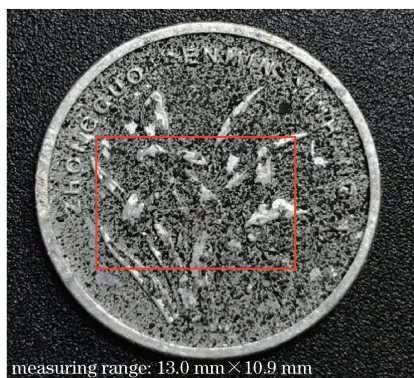


图 15 硬币实物图

Fig. 15 Picture of coin

图 16 是由左、右两个 CCD 各自采集的硬币图像,将得到的标定数据用来进行三维 DIC 计算,最

终获得硬币的三维形貌图(图 17)。

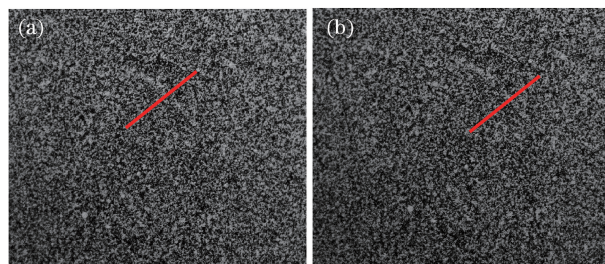


图 16 左、右 CCD 获得的硬币散斑图。

(a)左 CCD; (b)右 CCD

Fig. 16 Coin speckle maps from left and right CCDs.

(a) Left CCD; (b) right CCD

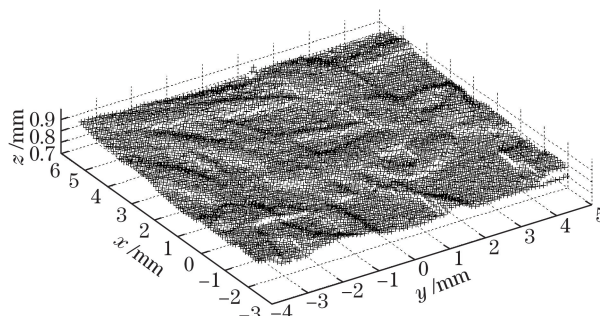


图 17 硬币三维形貌测量图

Fig. 17 Three-dimensional shape measurement chart of coin

对硬币进行 Z 方向的移动,实验共进行了 10 次平移测量,每次移动 20 μm,共移动 200 μm。在断面上(图 16 中红色部分)选取 8 个点,分别计算每次移动 20 μm 时位移的最大偏差、平均相对误差和均方差,如表 5 所示,可得计算结果的平均相对误差为 2.2%,平均均方差为 0.36 μm。

表 5 Z 向移动的测量结果

Table 5 Measurement results for movement in Z direction

Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Maximum deviation /μm	0.77	0.53	0.65	0.83	0.7	0.36	0.67	0.71
Average relative error /%	2.6	2.2	1.9	2.1	3.0	1.4	2.0	2.3
Mean square error /μm	0.49	0.49	0.31	0.27	0.34	0.42	0.23	0.32

## 6 结 论

提出了一种定点旋转的显微标定方法。在分析放大倍率与景深关系的基础上,计算不同放大倍率下标定板与 XY 平面的最佳角度,利用设计的定点旋转台将标定板绕 Z 轴旋转和倾斜,以实现显微立体视觉的标定。实验结果表明,所提方法可有效进行显微立体视觉内外参数标定。主点坐标误差在

1.8 pixel内,均方差为 0.47 pixel,Z 轴相对平移向量的最大偏差值不超过 0.15 mm,姿态数为 10 或 10 以上时标定结果趋于稳定。

## 参 考 文 献

- [1] Lunt A J G, Salvati E, Ma L F, *et al.* Full in-plane strain tensor analysis using the microscale ring-core FIB milling and DIC approach[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2016, 94: 47-67.



- [2] Wu H, Zhang X, Gan J, *et al.* Displacement measurement system for inverters using computer micro-vision[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 81: 113-118.
- [3] Apolinar J, Rodríguez M. Three-dimensional microscope vision system based on micro laser line scanning and adaptive genetic algorithms[J]. *Optics Communications*, 2017, 385: 1-8.
- [4] Sha X P, Li W C, Lü X, *et al.* Research on auto-focusing technology for micro vision system[J]. *Optik*, 2017, 142: 226-233.
- [5] Peng C, Ren T, Duan C. Micro stereovision system based on a stereo light microscope[J]. *Qinghua Daxue Xuebao/Journal of Tsinghua University*, 2015, 55(2): 223-230.
- [6] Fan X J, Sun M M, Lin Z H, *et al.* Automated noncontact micromanipulation using magnetic swimming microrobots[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2018, 17(4): 666-669.
- [7] Dong S, Dai Y T, Dong E L, *et al.* Three-dimensional reconstruction of dental impression based on multi-camera three-dimensional digital image correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812006.  
董帅, 戴云彤, 董萼良, 等. 应用多相机三维数字图像相关实现口腔印模三维重构[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812006.
- [8] Jain R K, Saha S, Ghosh B. A piezoelectric actuator based compact micro-manipulation system for robotic assembly[M]//Jain R K, Saha S, Ghosh B. eds. *Lecture notes on multidisciplinary industrial engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2018: 73-97.
- [9] Chen H J. Study on stereo matching in micro stereo vision system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004.  
陈宏江. 显微立体视觉系统中立体匹配的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2004.
- [10] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for Matlab[J]. *High Speed Vision System & Object Tracking*, 2013.
- [11] Sun S J, Yang X D. Method of CCD camera calibration based on OpenCV[C]. *International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration*, 2015: 34-37.
- [12] Li M J, Xiong X M, Zhang S B. A novel method of camera calibration based on OpenCV [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(12): 99-102.  
李明金, 熊显名, 张绍兵. 一种基于 OpenCV 的摄像机标定新方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(12): 99-102.
- [13] Liu X J. Research on stereo matching technology for the stereo microscope[D]. Ningbo: Ningbo University, 2013.  
刘湘军. 体视显微镜立体匹配技术研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [14] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] Wu M Y, Ji F, Jiang M. Corner detection method based on rotation invariance[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(2): 150-155.  
吴敏杨, 季锋, 蒋明. 一种基于旋转不变性的角点检测方法研究[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(2): 150-155.
- [16] Xu H M. Study on calibration technology of the microscopic system used in micro-assembly[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.  
许红梅. 用于微装配的显微视觉系统标定技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [17] Wu F C. *Mathematical methods in computer vision*[M]. Beijing: Science Press, 2008.  
吴福朝. *计算机视觉中的数学方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2008.