

# 基于相位标靶的光学坐标测量方法

毛先富 苏显渝 刘元坤 陈文静

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出一种基于相位标靶的光学坐标测量方法,与有 3 个以上的标记点的辅助测量棒(传统标靶)相比较,由于相位标靶特征点数量的大量增多以及基于相位计算的精确的特征点的提取,使得用这种标靶进行测量时,其测量结果更为准确和可靠。在计算机屏幕上产生二维正弦条纹,并以此作为校准靶进行摄像机标定。设计制作的相位标靶由小型特征图象屏和测棒组成,采用相位测量技术及条纹处理方法计算特征图象屏各点的相位和面内坐标,进而计算测棒上测点的三维坐标。将该相位标靶用于光学坐标测量,提出了标靶移动时坐标变换的计算公式和移动距离的计算方法,分析了测量误差的成因。实验得到了准确的光学坐标测量结果,证明了该方法的有效性。

**关键词** 测量; 光学坐标测量; 相位标靶; 标定; 校准靶; 辅助测量棒

**中图分类号** TB82; O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2452

## Analysis on Optical Coordinate Measurement Based on Phase Target

Mao Xianfu Su Xianyu Liu Yuankun Chen Wenjing

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** On the basis of regarding traditional aided measuring probe as target, adopted phase and fringe technique to calibrate a camera system or to measure a 3-D object, A new target—phase target, is proposed. Comparing with traditional method, the new calibration result of camera system is more reliable because of more accurate to extract the grids based on fringe analysis and phase technique. Camera is calibrated by calibration target which is built by 2-dimensional sinusoidal fringe having been projected on the computer screen. A new and portable phase target is designed originally, optical coordinate measurement is carried through the phase target. Moreover, coordinate system transformation formula and the moving distance of phase target is calculated. Exact measuring result is obtained in our experiments, which proves that the method is effective.

**Key words** measurement; optical coordinate measurement; phase target; calibration; calibration target; aided measuring probe

## 1 引 言

光学三维传感在机器视觉、工业化自动加工、工业检测、实物仿型、生物医学等很多领域都有着广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。采用光学三维测量方法,要对测量系统进行标定,而对系统标定的精确与否,将直接影响测量时的最终测量精度。采用标靶进行标定时,由于三维立体标靶的制作成本较高,且加工精度受到

一定的限制,所以在应用中更多地采用制作相对容易的二维平面标靶<sup>[5~12]</sup>。基于二维正弦条纹,部分作者曾提出了一种新型二维计算机条纹显示屏作为校准靶<sup>[13~15]</sup>。采用这种校准靶,能得到更为准确的标定结果。

传统的视觉测量技术中(以单相机测量系统为例),采用 1 个校准后的摄像机和 1 个辅助测量棒

收稿日期: 2008-10-30; 收到修改稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 毛先富(1969—),男,博士研究生,主要从事光学三维传感及机器视觉方面的研究。

E-mail: mx9971f@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学、三维传感与机器视觉方面的研究。

E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

(辅助测量棒可视为一种传统二维标靶)可以进行光学坐标测量<sup>[16,17]</sup>。辅助测量棒上有 3 个以上的标记点和 1 个与被测物体接触的测点。标记点和测点在辅助测量棒坐标系中的坐标可预先精密测定。视觉测量系统只要测出标记点的坐标就可计算出测点坐标,进而得到物体表面该点的三维空间坐标。

提出一种新的基于相位技术及条纹处理技术的测量靶-相位标靶。标靶由小型的 LCD 显示屏作为特征图象屏,并和与之刚性连接的、带有测头的测量棒组成。该相位标靶工作原理是,由计算机产生出二维正弦条纹,制作成图片;再通过可移动存储设备将该条纹图片显示在轻便的特征图象屏上。

相位标靶上的二维正弦特征点可代替辅助测量棒上的标记点,并由这些特征点解决测点的数量、识别和测点的定位精度问题。这种方法利用相位标靶的条纹相位信息建立摄像机图像坐标和标靶平面上点的空间坐标关系,这也是将该标靶称为相位标靶的原因。该方法中测点数量最大值理论上等于相位标靶在摄像机成像区域中的像素点数,测点的识别由相位值自动识别,测点的定位精度由相位测量精度保证。因此新的方法具有更高的测量精度。

## 2 摄像机标定

### 2.1 校准靶的生成

采用计算机条纹显示屏作为校准靶,其靶面为平板液晶显示屏,外接计算机。通过计算机控制,可在平板显示屏上显示标准的二维正弦条纹。

其强度函数为  $x$  及  $y$  方向的正弦光栅强度叠加<sup>[13]</sup>

$$I(x, y) = a + b_1 \cos[2\pi x/p_x + \varphi_{x0}(x, y)] + b_2 \cos[2\pi y/p_y + \varphi_{y0}(x, y)] \quad (1)$$

其中  $a, b_1, b_2$  分别为正常数;  $p_x, p_y$  分别为条纹周期;  $\varphi_{x0}(x, y), \varphi_{y0}(x, y)$  为对应初始相位。不失一般性,令  $a=1/2, b_1=b_2=1/4$ 。

由摄像机获取的标定靶图象的强度函数为

$$I(u, v) = a(u, v) + b_1(u, v) \cos[\varphi_u(u, v)] + b_2(u, v) \cos[\varphi_v(u, v)] \quad (2)$$

根据条纹图象的傅里叶变换分析方法<sup>[1,3]</sup>,通过傅里叶变换、空间频域滤波和逆傅里叶变换,提取出截断相位并进行相位展开,由(1),(2)式可得

$$\begin{cases} \phi_u(u, v) = 2\pi x/p_x + \varphi_{x0} + c_1 \\ \phi_v(u, v) = 2\pi y/p_y + \varphi_{y0} + c_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $c_1, c_2$  均为常数,与相位展开初始点有关。根据(3)式,由连续相位分布可得到摄像机各个像素点

对应的显示屏平面上各点的  $x, y$  坐标。即通过对计算机条纹显示屏制作的校准靶的测量,建立了摄像机图像像素位置与校准靶平面上坐标位置之间的对应关系。条纹的相位信息对建立和识别摄像机图像坐标和校准靶平面上点的空间坐标关系起了重要作用。

### 2.2 摄像机标定

将由计算机条纹显示屏制作的校准靶摆放在测量空间的不同位置,用摄像机拍摄下多张条纹图片后,根据上面所述的条纹图象的傅里叶变换分析方法,完成校准靶坐标系中标定点的提取。然后采用 Tsai<sup>[7]</sup>及张正友<sup>[9]</sup>等提出的二维共面参照物摄像机标定方法,解算出系统的参数矩阵,从而完成系统摄像机的标定。

采用计算机条纹显示屏制作的校准靶与棋盘格作为标靶进行标定比较,在标定所选特征点相同或相近的情况下,采用计算机条纹显示屏制作的校准靶所标定的结果比传统的棋盘格标靶标定的结果精度有明显的提高<sup>[13]</sup>。

## 3 相位标靶用于光学坐标测量

在传统的视觉测量技术中(以单摄像机系统为例),采用 1 个校准后的摄像机和 1 个辅助测量棒就可进行光学坐标测量,例如 V-Star 系统中的摄像机和辅助测量棒(如图 1 所示)。辅助测量棒上有 3 个以上的标记点和 1 个与被测物体接触的测点,标记点和测点在辅助测量棒坐标系中的坐标可预先精密测定,即是已知的。视觉测量系统只要测出标记点的坐标就可计算出测点坐标,进而得到物体表面该点的三维空间坐标。标记点的数量、识别和定位精度将影响坐标测量精度。

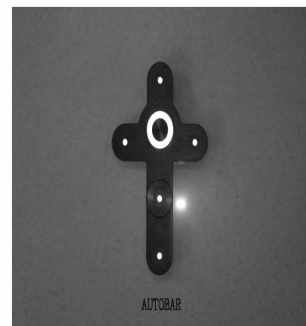


图 1 辅助测量棒

Fig. 1 Aided measuring probe

鉴于条纹相位信息有利于建立摄像机图像坐标和标靶平面上点的空间坐标关系,提出一种采用相

位标靶的光学坐标测量方法。标靶由小型的特征图象屏和与之刚性连接的、带有测头的测量棒组成,如图2所示。在这种方法中,用相位标靶代替辅助测量棒上的标记点,同时解决标记点的数量、识别和定位精度问题。在新的方法中,测点数量最大值理论上等于相位标靶在摄像机成像区域中的像素点数,测点的识别由相位值区别,测点的定位精度由相位测量精度保证。



图2 相位标靶图

Fig. 2 Phase target picture

### 3.1 相位标靶坐标系、像素坐标系、摄像机坐标系间的关系

在摄像机针孔模型下,建立如图3所示坐标系。其中  $Oxyz$  三维直角坐标系为摄像机坐标系,  $O_1uv$  二维直角坐标系为图象像素坐标系。在  $O_1uv$  二维直角坐标系中,  $O_1$  为图象内某一点,  $u, v$  轴分别平行图象面的像素阵列的水平与垂直方向;在  $Oxyz$  三维直角坐标系中,  $O$  点为摄像机光心,  $x$  轴与  $y$  轴分别平行图象面所在的图象像素坐标系的  $u$  轴与  $v$  轴,  $z$  轴为摄像机光轴,它与图象平面垂直。

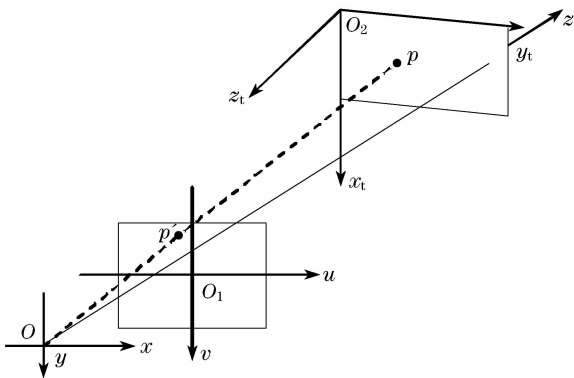


图3 相位标靶局部世界坐标系、图象像素坐标系、摄像机坐标系

Fig. 3 local world coordinate system of phase target, pixel coordinate system of image and camera coordinate system

$O_2x_t y_t z_t$  三维直角坐标系为相位标靶局部世界坐标系,  $O_2$  为标靶面上的一点,  $x_t, y_t$  轴分别沿标靶面的水平与竖直靶(亮点)方向,  $z_t$  轴垂直标靶所在的平面且指向摄像机。靶面上一点  $p$  在图象面上成象于  $p'$ 。

#### 3.1.1 相位标靶坐标系与像素坐标系间的关系

在摄像机针孔模型下,理想的像素坐标与建立在标靶面上的相位标靶局部世界坐标间的关系为<sup>[13~15]</sup>

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $s$  为非零尺度因子,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_x & \gamma & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  为系统内

参数,其中  $a_x, a_y$  分别为  $u, v$  轴的尺度因子,  $\gamma$  为  $u, v$  轴间的不垂直因子,  $(u_0, v_0)$  为主点坐标。旋转矩阵  $\mathbf{R}$  与平移向量  $\mathbf{t}$  则为摄像机外部参数矩阵。

当考虑到摄像机镜头畸变因素时,则有

$$\begin{cases} X'_u = X_u + \delta_u \\ Y'_u = Y_u + \delta_v \end{cases} \quad (5)$$

其中  $X_u, Y_u$  分别为针孔成像时的归一化平面像素坐标,  $X'_u, Y'_u$  为考虑畸变因素后的归一化平面实际像素坐标,  $\delta_u, \delta_v$  则分别为沿  $u, v$  方向的畸变量,该畸变量又分为沿摄像机径向的畸变  $\delta_{ur}, \delta_{vr}$  与沿摄像机切向的畸变  $\delta_{ur}, \delta_{vr}$ ,且

$$\begin{cases} \delta_u = \delta_{ur} + \delta_{vr} \\ \delta_v = \delta_{vr} + \delta_{ur} \end{cases} \quad (6)$$

由于  $\delta_u, \delta_v$  都为沿径向或切向的非线性方程,一般难以直接通过计算方程组解出,通常的计算是采用如迭代法、多项式近似等方法求解<sup>[5]</sup>。

当得到  $\delta_u, \delta_v$  后,通过(5)式可算出  $X'_u, Y'_u$ ,则考虑畸变校正后的计算机图像坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X'_u \\ Y'_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(4~7)式表征了相位标靶上的局部世界坐标与含畸变的图象像素坐标间的对应关系。

#### 3.1.2 相位标靶坐标系与摄像机坐标系的关系

在相位标靶局部世界坐标系中,设  $p$  为相位标靶上的任意标定点,它在相位标靶上的相位标靶局部世界坐标与它在摄像机坐标系中的坐标关系可以用下式表示<sup>[7,9]</sup>

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} + \mathbf{t} \quad (8)$$

其中  $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$  为  $p$  在摄像机坐标系下的坐标,  $\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix}$  为  $p$

在相位标靶上的相位标靶局部世界坐标系下的坐标。 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  分别为对应的旋转矩阵与平移向量, 另外注意到标靶面上的点在标靶上的局部世界坐标系下的  $z_t = 0$ 。

通过以上计算, 可建立相位标靶局部世界坐标系、摄像机坐标系、图象像素坐标系间的转换关系。

### 3.2 相位标靶移动距离的测量

采用相位标靶进行测量时, 摄像机保持不动, 采用步进电机驱动的电控平移台控制标靶在平直轨道上移动。选相位标靶在第 1 次位置时为基准位置, 由(8)式找出其相位标靶局部世界坐标系到摄像机坐标系下的平移向量。然后在平直轨道上任意移动, 可由(7), (8)式找出标靶移动到任意位置下的对应平移向量。此时由于标靶的移动是刚体平动, 靶面在不同位置间移动, 如图 4 所示。设  $O_{t1}, O_{t2}$  为标靶移动前后的标靶局部世界坐标系的原点,  $O$  为摄像机坐标系原点。由矢量关系知

$$\mathbf{OO}_{t2} = \mathbf{OO}_{t2} - \mathbf{OO}_{t1} \quad (9)$$

设  $O_{t1}, O_{t2}$  到摄像机坐标系的平移向量分别为  $\mathbf{OO}_{t1} = (x_1, y_1, z_1)$ ,  $\mathbf{OO}_{t2} = (x_2, y_2, z_2)$ , 则标靶移动向量  $O_{t1}O_{t2}$  所代表的移动距离可由下面的代数表达式表示

$$d_{21} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (10)$$

其中  $d_{21}$  即 1, 2 两次拍摄时标靶移动的距离。

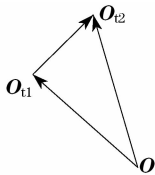


图 4 坐标系间的向量图

Fig. 4 Vector picture among different coordinate system

同样的, 对第  $i$  次移动标靶后产生的距离, 可相应表示如下

$$d_{i1} = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2} \quad (11)$$

其中  $d_{i1}$  表示第  $i$  次标靶所在位置与第 1 次标靶所在位置间的距离。

由于电控平移台可以精确控制移动距离, 即

步进电机移动的距离可以视为已知量。用相位标靶对这个已知量进行测量时, 可以采用(11)式计算对应的移动距离。计算出来的距离与步进电机控制标靶移动的距离之差反映了本文测量方式的准确性。

## 4 实验及误差分析

### 4.1 摄像机标定

摄像机标定采用(1)式所示的沿  $x, y$  方向正弦条纹图象的叠加, 然后将其显示在 Philips170S7 液晶显示器上作为校准靶, LCD 分辨力为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。采用 uEye cmos 摄像机拍得的校准靶显示图如图 2 的计算机屏幕所示, 条纹周期为  $50 \text{ pixel}$ 。对 6 张拍得的图片进行标定, 利用傅里叶变换轮廓术算出标靶面上的相位分布; 再由(3)式算出相位分布所对应的校准靶面上的二维坐标分布; 然后提取标定, 最后采用张正友等<sup>[9]</sup>提出的二维共面参照物摄像机标定方法, 算出考虑畸变后的系统的内参数为: 1) 焦距为  $(3071.53 \pm 1.54) \text{ pixel}$ ;  $(3071.20 \pm 1.49) \text{ pixel}$ ; 2) 主点为  $(623.19 \pm 1.10) \text{ pixel}$ ;  $(521.13 \pm 0.90) \text{ pixel}$ 。

与传统的棋盘格作为标靶进行标定相比, 在标定特征点相同或相近的情况下, 采用的校准靶的标定结果在精度上有明显的提高<sup>[13]</sup>。正是由于这种高精度的标定, 为后面的测量得到更可靠的结果打下了良好的基础。

### 4.2 采用相位标靶进行光学坐标测量

由于电控平移台能准确地显示它所控制的相位标靶每次移动时的距离, 采用它控制的相位标靶在平直轨道上移动, 分析电控平移台记录的移动距离值与用本文理论计算得到的移动距离值以检验本文理论所提的测量方式的准确性。

仍根据(1)式所示的沿  $x, y$  方向正弦条纹图象的叠加, 通过计算机产生出图片。条纹周期为  $25 \text{ pixel}$ , 特征图象屏为  $480 \text{ pixel} \times 270 \text{ pixel}$  (如图 2 所示)。移动该相位标靶使其在不同位置可分别进行拍摄。

采用 TSA-200 组合正交平移台(该平移台沿每个方向移动的重复定位精度小于  $0.003 \text{ mm}$ )控制相位标靶进行实验, 组合正交平移台由步进电机控制, 可在 2 个正交轴上任意移动相位标靶。测量系统如图 5 所示。

以第 1 次拍摄时标靶所在位置为基准位置, 在不同的位置共进行了 9 次拍摄。实验由步进电机记

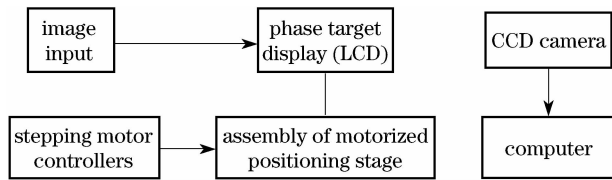


图 5 测量系统图

Fig. 5 Measuring system

录下各次标靶移动的准确值。再采用(11)式,分别计算出 2 个正交方向(设分别为 X, Y 方向)移动的距离,然后根据直角三角形知识算出斜边的长度,这个长度即为不同位置与第 1 次基准位置间的距离,此距离表示测量的计算值。测量对应的准确值、计算值及相应误差如表 1 所示。

表 1 测量结果 /mm

Table 1 Measuring results /mm

| Serial Number          | 1      | 2      | 3      | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
|------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| X Real moving distance | 25.000 | 50.000 | 75.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 |
| X Measuring distance   | 24.998 | 50.009 | 74.986 | 99.991  | 99.991  | 99.991  | 99.991  | 99.991  |
| Y Real moving distance | 0      | 0      | 0      | 0       | 50.000  | 75.000  | 100.000 | 125.000 |
| Y Measuring distance   | 0      | 0      | 0      | 0       | 50.091  | 75.025  | 99.936  | 125.020 |
| Real moving distance   | 25.000 | 50.000 | 75.000 | 100.000 | 111.803 | 125.000 | 141.421 | 160.078 |
| Measuring distance     | 24.998 | 50.009 | 74.986 | 99.991  | 111.836 | 125.008 | 141.370 | 160.088 |
| Error                  | -0.002 | 0.009  | -0.014 | -0.009  | 0.033   | 0.008   | -0.051  | 0.010   |

由以上实验可看出,采用本文提出的相位标靶和相关算法进行测量时,测量结果与真实值间的差距很小,这表明了用本文所提标靶进行测量,可以得到较好的测量结果。

### 4.3 实验误差分析

虽然用这种相位标靶能进行正确的测量,但仍然会有一定的误差。用相位标靶进行测量时,其误差的产生主要来自于以下 2 个方面:1) 相机标定时的标定误差;2) 电控平移台在步进电机控制下移动时,其移动距离与步进电机所记录的移动数据间的误差,即电控平移台自身移动精度所带来的误差。

由上面的实验方法可以看出,除相机的标定误差<sup>[13]</sup>外,电控平移台移动时的绝对误差将在移动方向上等值地影响最终的测量精度。在电控平移台精度控制范围内,实验结果已经表明相位标靶的坐标测量方法具有相当高的精度,如果采用更高定位精度的工作台(例如用激光干涉仪),可以更严格的评价采用相位标靶的坐标测量方法的精度。

## 5 结 论

用计算机条纹显示屏制作的校准靶进行摄像机系统的标定,同时用自行研制的相位标靶进行光学坐标测量,提出相位标靶移动时坐标变换的计算公式和移动距离的计算方法。与传统的摄像机与辅助测量棒构成的测量系统相比,当用本系统进行测量时,由于将相位测量技术引入到了标定靶的制作中,这样标定特征点数量可以大量增多,且依据相位技术对标定特征点的提取也更准确,从而使得标定结

果更为可靠。进而在采用相位技术及条纹分析技术后,进行相关测量时能得到更为精确的测量结果。实验证明了本文所提方法的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999:332~335  
苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社,1999:332~335
- 2 Zhang Guangjun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005:24~27  
张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005:24~27
- 3 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-Object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977~3982
- 4 Li Wangsong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):792~796  
李万松,苏礼坤,苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, **20**(6):792~796.
- 5 Liu Yuankun, Su Xianyu. New camera calibration technique based on phase measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11):65~69  
刘元坤,苏显渝. 基于相位测量的摄像机标定方法[J]. 光电工程, 2007, **34**(11):65~69
- 6 Janne Heikkilä, Olli Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[J]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, **1**:1106~1112
- 7 Tsai R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, **3**(4):322~344
- 8 Zhan Zongqian. Research on camera calibration based on completely flat liquid crystal display [D]. PhD dissertation of Wuhan University, 2007:38~46  
詹总谦. 基于纯平液晶显示器的相机标定方法与应用研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2007:38~46
- 9 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration

- [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **22**(11):1330~1334
- 10 Zhu Jigui, Tang Dalin, Bai Yang *et al.*. The drone control of VCMM which is based on bluetooth technology[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2005, **3**:28~30  
郝继贵, 唐大林, 白洋等. 基于蓝牙技术的光学测量机无线靶标控制[J]. *现代科学仪器*, 2005, **3**:28~30
- 11 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):81~86  
徐巧玉, 叶东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):81~86
- 12 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single-camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):697~701  
李为民, 俞巧云, 刘超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):697~701
- 13 Liu Yuankun, Su Xianyu. A new camera calibration technique using FTP method [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(6):149~153  
刘元坤, 苏显渝. 基于傅里叶条纹分析的摄像机标定[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, **39**(6):149~153
- 14 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1162~1166  
李勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1162~1166
- 15 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Multi-camera calibration by FTP technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9):1734~1737  
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于傅里叶条纹分析的多摄像机标定方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9):1734~1737
- 16 Feng Qiqiang, Li Guangyun, Huang Guiping. Single image space resection in digital Industrial photogrammetry[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2008, **6**:4~6  
冯其强, 李广云, 黄桂平. 数字工业摄影测量中的单向空间后方交会[J]. *测绘通报*, 2008, **6**:4~6
- 17 Huang Guiping, Li Guangyun, Wang Baofeng *et al.*. Evolution for monocular vision Measurement[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(4):314~317  
黄桂平, 李广云, 王保丰等. 单目视觉测量技术研究[J]. *计量学报*, 2004, **25**(4):314~317