

# 基于点阵编码的三维主动视觉标定\*

丁雅斌<sup>1,2</sup> 彭翔<sup>2,\*\*</sup> 田劲东<sup>2</sup> 武斌<sup>2</sup>

(1 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2 深圳大学光电子学研究所, 教育部光电子系统与器件重点实验室, 深圳 518060)

**摘要** 提出一种基于位错点阵编码三维成像系统的标定方法. 首先在物空间建立三维数据基准, 然后通过基准传递的概念标定摄像子系统, 再通过建立摄像子系统坐标系与投影子系统坐标系之间的约束关系, 将标定后的摄像子系统的准确度传递到投影子系统坐标系. 摄像子系统坐标系与投影子系统都具有标定的准确度之后, 可以根据位错点阵编码三维成像技术的解码算法获得深度图像空间坐标的计算值, 然后将其与物体空间的三维标定数据基准进行比较, 建立目标函数为误差平方和最小的非线性优化方程. 通过迭代求解这个优化方程, 最终获得三维系统的结构参量. 实验结果表明, 经过三维标定的位错点阵编码三维成像系统, 对  $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$  的测量体积内, 可以获得 X 方向的标准差为 0.29 mm 和 Y 方向的标准差为 0.24 mm, Z 方向的标准差为 0.29 mm 的测量准确度.

**关键词** 应用光学; 三维标定; 点阵; 深度图像; 三维轮廓测量

**中图分类号** TP247 **文献标识码** A

## 0 引言

基于主动视觉的光学三维成像技术具有速度快、分辨率高、非接触、和全场数据获取等优点而受到广泛关注和研究<sup>[1~7]</sup>. 最近, Tian 和 Peng 提出一种位错点阵编码的光学三维成像技术<sup>[8]</sup>. 与相位映射的光学三维成像技术相比, 位错点阵编码技术可以直接获得被测物体表面的三维绝对坐标. 然而, 任何一种光学三维成像技术应用于工业检测时, 它必须具有适当的测量准确度<sup>[9]</sup>. 因此, 本文提出一种对位错点阵编码的光学三维成像系统的有效标定方法. 位错点阵编码三维成像系统由摄像子系统和投影子系统组成, 两个子系统之间位置相对固定, 通过系统参量构成几何约束. 为标定上述三维数字成像系统, 首先需要建立标定的三维数据基准.

## 1 基准传递概念

### 1.1 三维标定数据基准

标定一个三维视觉系统的准确度, 首先需要建立一个三维数据基准, 以此来评判空间三个坐标分量的测量误差. 通过光刻技术制作一块平面方格阵列图案标定靶, 作为物空间 X-Y 方向的数据基准, 其中每个相邻方格的“角点”之间的准确度为 0.01 mm.

将标定靶放置在垂直于物空间 X-Y 平面(Z 方向), 纵向分辨率为 0.00125 mm 的电控平移台上, 由此形成 X-Y-Z 空间的三维标定的数据基准. 这样建立的三维数据基准比单独加工一个三维标定参照物简单且便于测量和控制, 同时降低了由于遮挡、噪音等为特征识别和匹配带来的影响.

### 1.2 基准传递

据几何原理, 位错点阵编码的三维成像系统涉及三个坐标系, 即, 物空间坐标系, 摄像子系统坐标系和投影子系统坐标系. 标定过程中, 采用了三维数据基准传递的概念, 通过三维数据基准在三个坐标系间的传递来确定整个三维视觉系统的准确度. 实际上, 基准的传递也可以理解为准确度的传递.

第一步需要验证摄像子系统坐标系的准确度. 将物体空间的标定数据基准传递到摄像子系统坐标系, 得到摄像机的内外参量, 并将此作为投影子系统的次级标定数据基准. 由于仿射变换和固有因素等的影响(例如镜头的畸变不可能完全得到补偿), 准确度传递的过程中, 会有准确度的损失, 但是通过摄像机标定的算法, 可以知道准确度下降的具体数值, 摄像机标定算法越好, 准确度下降的就越少. 在机器视觉领域, 由于摄像机标定方法已得到广泛研究<sup>[10~14]</sup>, 因此可以通过现有技术, 以相应的准确度获得摄像机内外参量. 第二步, 通过光线追迹建立摄像子系统与投影子系统的对应关系, 从而将标定后的摄像子系统的准确度传递到投影子系统. 当摄像子系统与投影子系统都具有测量准确度后, 整个三维视觉系统的准确度就可以进行评价.

\* 国家自然科学基金(60275012)、广东省普通高校自然科学基金研究重点项目(04Z010)、广东省自然科学基金(031804)和深圳市科技计划项目(200341)资助

\*\* Tel: 0755-26538548 Email: xpeng@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-01-10

## 2 基于点阵投影的三维标定几何模型

位错点阵编码三维成像技术的解码过程<sup>[8]</sup>是:根据点阵在不同位置时参考平面上点像在  $X$  方向的位错,建立数学模型求解出  $Z$  方向的深度变化,进而推出点阵投影到参考平面不同位置时的空间坐标.根据同样的解码算法获得深度图像空间坐标的计算值,然后与三维标定的数据基准进行比较,由此建立目标函数为误差平方和最小的非线性优化方程.通过迭代求解这个优化方程,最终获得三维系统的结构参量.当标定出三维系统的结构参量以后,就可以利用点阵编码技术以相应的准确度来重建三维物体.

图1表示基于点阵投影的三维标定系统结构原理.其中,成像单元子系统由成像透镜组和成像传感器(CCD)组成;投影单元子系统由数字微型反射镜阵列(DMD)和场镜组构成.成像单元和投影单元相对位置固定,形成约束条件.点  $S$  和点  $E$  分别是成像单元入瞳和投影单元出瞳的光心;成像子系统所在坐标系为  $SX_cY_cZ_c$ ,投影子系统所在坐标系为  $EX_pY_pZ_p$ ,  $SZ_c$  轴和  $EZ_p$  轴交于点  $O_w$ ,两轴夹角为  $\alpha$ ,以点  $O_w$  为原点建立参考平面的初始位置,使参考平面垂直于  $EZ_p$  轴,在参考平面的初始位置建立物坐标系  $O_wX_wY_wZ_w$ ;参考平面初始位置原点  $O_w$  到出瞳  $E$  的距离为  $D_p$ ,参考平面初始位置原点  $O_w$  到入瞳  $S$  的距离为  $D_c$ ,  $I_p$  为成像平面.

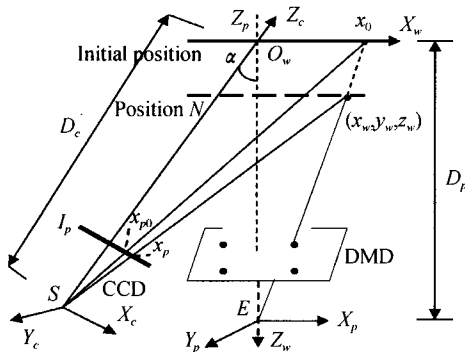


图1 标定结构原理图  
Fig. 1 Diagram of system layout

为了得到投射到参考平面上的点阵  $P(x_w, y_w, z_w)$  在 CCD 成像平面  $I_p$  上的投影  $Q(x_p, y_p, z_p)$ ,需要进行仿射变换为

$$\lambda \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & D_c \\ \frac{1}{f} \sin \alpha & 0 & \frac{1}{f} \cos \alpha & \frac{1}{f} D_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为任意参量,  $f$  为摄像机焦距.

由文献[8]知,在同一条投影光线上,投影点阵的  $z_w$  坐标(即点的深度信息)可以通过这一位置与初始位置的对应“点对”在成像平面  $I_p$  上点像的  $X$  方向位置错动表示,即

$$z_w = \frac{D_p(x_0 \cos \alpha - D_c C - C x_0 \sin \alpha)}{C(D_p \cos \alpha - x_0 \sin \alpha) + x_0 \cos \alpha + D_p \sin \alpha} \quad (2)$$

式中  $C = \frac{\delta x_p}{f} + \frac{x_0 \cos \alpha}{D_c + x_0 \sin \alpha}$ ,  $\delta x_p = x_p - x_{p0}$  在同一条投影光线上,  $x_0$  表示点阵投影到参考平面初始位置时的  $X$  方向空间坐标,它可以利用已标定的摄像机参量转换求得,  $x_{p0}$  表示它在成像平面  $I_p$  上的点像的  $X$  方向坐标,  $x_p$  表示参考平面在某一位置时投影到它上面的点阵点像的  $X$  方向坐标,它与  $x_{p0}$  形成对应“点对”.  $\delta_p$  表示对应点像的横向错动.

进而,由图1,利用相似三角形关系,可以得到在同一条投影光线上,点阵在某一参考平面上的物坐标

$$\begin{cases} \frac{z_w}{D_p} = \frac{x_0 - x_w}{x_0} \Rightarrow x_w = \frac{D_p - z_w}{D_p} x_0 \\ \frac{z_w}{D_p} = \frac{y_0 - y_w}{y_0} \Rightarrow y_w = \frac{D_p - z_w}{D_p} y_0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)和(3),可以得到点阵投影到任意参考平面上的空间坐标.但是前提是已知点阵投影到初始位置( $z_w = 0$ )时的三维坐标,即  $(x_0, y_0, 0)$  已知并且精确.为此基准传递的概念将被应用到这里.首先标定摄像机的内部参量和外部参量,得到摄像机的焦距  $f$  以及摄像机与参考平面初始位置的空间变换关系.如前所述,摄像机的标定方法已经有了广泛的研究,本文采用 Heikkila<sup>[14]</sup> 的方法标定摄像机,由此获得所需的参量,使得摄像子系统的坐标系具有准确度.进而,通过逆变换计算在参考平面初始位置时,投射出的点阵的  $x_0$  和  $y_0$  坐标,同时将摄像单元子系统的准确度传递到投影单元子系统,用于随后的三维系统结构参量的标定.

## 3 两步法求解三维系统结构参量

### 3.1 结构参量

由图1可见,系统的结构为一个三角形结构,其中包括参量为:  $D_c$ : 成像单元入瞳的光心到参考平面初始位置原点的距离;  $D_p$ : 投影单元出瞳的光心到参考平面初始位置原点的距离;  $\alpha$ : 成像单元和投影单元两光轴的夹角.

通过直接测量的方法不能得到这三个结构参量的精确值,因此需要用间接的方法对它们进行标定.为此,采用两个步骤求解结构参量.首先,计算三个结构参量的近似初值.然后,构造投射点阵标靶的测量值与精确值误差最小的非线性目标函数,并迭代求

解结构参数的最优值. 由于目标函数是一个非线性函数, 求解此函数时, 不同的初值可能有不同的收敛性态, 有的初值使迭代收敛, 有的则不收敛. 一般来说, 为使迭代法收敛, 初值应取在解的附近. 因此, 在运用最优化方法之前, 先寻找迭代初值是必须的.

### 3.2 计算结构参数初值

如图 2, 计算参数  $D_c$  和  $\alpha$  的初值. 在参考平面的初始位置, 由 DMD 的中心点向参考平面投射出一个亮点. 调节步进电机使得参考平面在垂直于

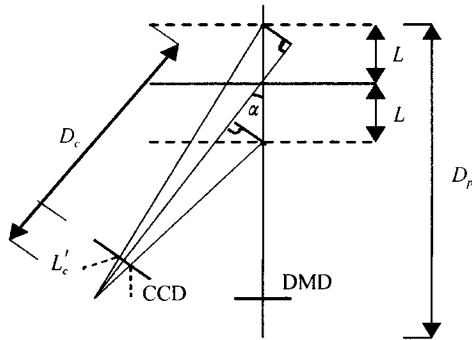


图 2 求初值示意图

Fig. 2 Setup for the initial measurement

DMD 光轴的方向前后等距移动  $\pm L$ . CCD 分别探测这两个位置时亮点的图像位置, 得到对应的位移  $L_c$  和  $L'_c$ , 由三角形的相似关系得到

$$\begin{cases} \frac{L'_c}{f} = \frac{L \sin \alpha}{D_c + L \cos \alpha} \\ \frac{L_c}{f} = \frac{L \sin \alpha}{D_c - L \cos \alpha} \end{cases} \quad (4)$$

进而, 可以推出

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{2L'_c L_c}{f(L_c - L'_c)} \right], D_c = \frac{(L_c + L'_c)L \cos \alpha}{L_c - L'_c}$$

由于光学系统的三角结构近似是直角三角形, 所以  $D_p$  可以近似表示为

$$D_p = D_c \cos \alpha$$

根据上述方法得到的结构参数的准确度虽然不高, 但是作为后面求解目标函数的初始值, 其准确度已经足够了.

### 3.3 迭代求解精确的结构参数

将参考平面固定在电控平移台上, 由步进电机控制沿  $Z$  方向顺次移动参考平面到  $N$  个位置, 在每一个位置用 CCD 采集投影仪投射到参考平面上的点阵图案. 从图 3 可以看到, 采集到的图案包括黑方格和点阵交错分布. 经过“角点检测”和质心检测得到两组数据, 即方格的角点和点阵的点像.

利用方格角点和投影点阵在同一平面内这一特点, 通过与标定数据基准进行比较, 结合点阵位错差计算得到的  $Z$  方向误差以及通过方格角点判断  $X$  和  $Y$  方向的误差, 建立误差平方和最小的目标函数

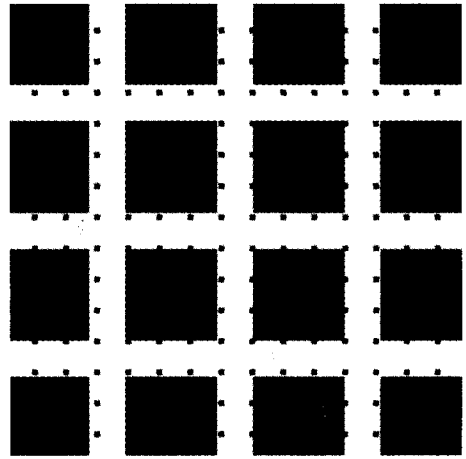


图 3 投影到参考平面上的点阵

Fig. 3 Point array projected onto the reference plane

迭代求解三维系统的结构参数

$$I(D_c, D_p, \alpha) = \min \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i=1}^M (H_j - z_{ui})^2 + \sum_{k=1}^G (X_k - x_k)^2 + \sum_{k=1}^G (Y_k - y_k)^2 \right] \quad (5)$$

式中  $N$  为参考平面放置的位置,  $M$  为点阵包含的点的个数,  $G$  为方格的角点个数.  $H_j$  表示参考平面在第  $j$  个位置时, 相对于初始位置的位移,  $z_{ui}$  表示第  $i$  个点的深度信息.  $X_k$  和  $Y_k$  是方格角点的精确坐标,  $x_k$  和  $y_k$  是与之对应的测量值.

采用 Levenberg-Marquart (LM) 方法迭代求解目标函数, 以第一步得到的结构参数测量值作为迭代的初值, 当函数计算的误差限小于  $10^{-6}$  时, 迭代停止, 得到结构参数的最优值. 经过实验, 摄像机的焦距  $f=25$  mm, 参数的迭代初值为,  $D_c=1308.6$  mm,  $D_p=1300$  mm,  $\alpha=0.1149$  rad. 点阵有  $16 \times 16$  个点, 当参考平面移动 3 个位置时, 迭代得到  $D_c=1301.4$  mm,  $D_p=1293.0$  mm,  $\alpha=0.1082$  rad. 当参考平面移动 6 个位置时,  $D_c=1300.7$  mm,  $D_p=1286.3$  mm,  $\alpha=0.1103$  rad. 结果说明, 初值选取较为准确, 且优化算法合理, 检验多组数据迭代结果偏差不大.

## 4 三维标定的实验结果及讨论

实验装置包括, 投影单元子系统采用 DMD 数字投影设备 Benq 2125, 所需的二维空间点阵图案由计算机产生; 摄像单元子系统由 CCD (JVC TK-C1481BEC) 和 25 mm 的成像透镜构成, 采集到的点阵像通过图像采集卡送到计算机. 标定靶图案是黑色方格阵列 (准确度为 0.01 mm), 将其作为参考平面, 利用步进电机 SC3 控制的电控平移台 TSA100-A (分辨率为 0.00125 mm) 在物空间形成三维标定的数据基准. 实验中投影单元投射的是带有标记的二维点阵. 例如, 将某个点被标记成红色, 经过滤波

处理,可以分别得到标记点在不同位置参考平面上点像的位置. 以标记点为参考点,即可建立两个点像之间点的对应关系.

用均值和标准差来评价标定的准确度. 此三维视觉系统的标定范围为宽 300 mm,高 300 mm,深度 80 mm 的测量空间,参考平面的初始位置被放置在距离系统 1300 mm 的位置. 最后的标定统计结果如图 4~6,表明 X 方向的测量误差的均值为 0.3418 mm,标准差为 0.2881 mm;Y 方向的测量误差的均值为 0.0936 mm,标准差为 0.2383 mm;Z 方向的测量误差的均值为 0.0074 mm,标准差为

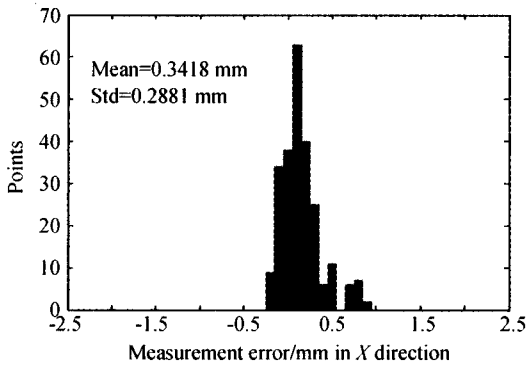


图 4 X 方向上的测量误差  
Fig. 4 Histogram of the measurement error for point array in X direction

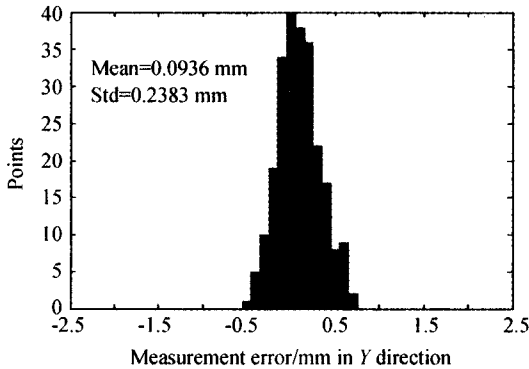


图 5 Y 方向上的测量误差  
Fig. 5 Histogram of the measurement error for point array in Y direction

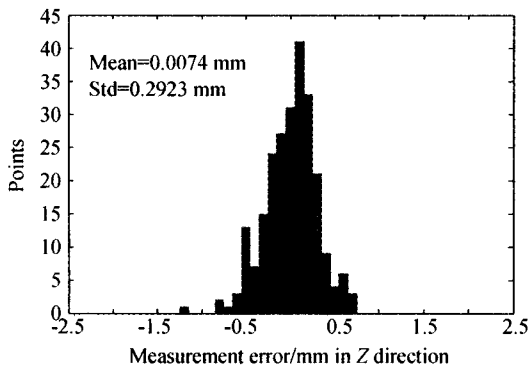


图 6 Z 方向上的测量误差  
Fig. 6 Histogram of the measurement error for point array in Z direction

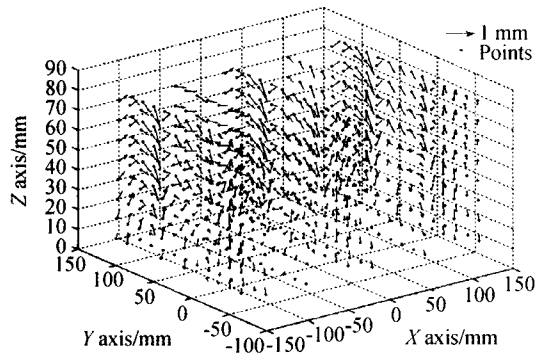


图 7 空间点阵的测量误差分布  
Fig. 7 Measurement error for point array

0.2923 mm. 图 7 表示用向量的形式说明的空间点阵测量误差的变化方向和大小. 随着 Z 值的增加,即参考平面离初始位置越来越远,误差逐渐增大. 当 Z 方向的位置固定时,误差在 X-Y 平面内,由中心向四周逐渐增大.

由于实验中使用的 CCD 成像器件的参量为 1/2 型 752(H)×582(V),成像透镜焦距为 25 mm,为了能够实现标定范围为 300×300×80 mm<sup>3</sup> 的测量空间,参考平面初始位置位于距离成像系统 1300 mm 的位置. 由理想情况下透镜成像原理可推知,物体横向每 0.442 mm 能够成像到 CCD 的一个象素上,也就是物空间横向分辨率为 0.442 mm. CCD 的分辨率是决定点阵投影成像方法准确度的一个重要方面. 因此,为了近一步提高系统的准确度可以使用更高分辨率的 CCD 摄像机.

### 5 结论

本文提出一种对位错点阵编码的光学三维成像系统进行标定的方法. 通过标定数据基准在三个坐标间的传递来确定整个三维视觉系统的准确度. 标定靶是通过光刻技术制作出来的平面方格阵列图案,其中每个方格的角点之间的测量准确度为 0.01 mm. 将标定靶放置在垂直于物空间 X-Y 平面,纵向分辨率为 0.00125 mm 的电控平移台上,由此形成 X-Y-Z 空间的三维标定的数据基准. 在标定过程中,首先需要验证摄像机系统坐标系的准确度. 将物空间的标定数据基准传递到摄像机坐标系,得到摄像机的内外参量,并将此作为投影子系统的次级数据基准. 然后,通过光线追迹建立摄像机系统与投影子系统的对应关系,从而将标定后的摄像机系统的准确度传递到投影子系统. 当摄像机系统与投影子系统都具有测量准确度后,整个三维视觉系统的准确度就可以进行评价. 利用位错点阵编码的光学三维成像的解码算法,可以获得深度图像空间坐标的计算值,然后与三维标定数据基准进

行比较,由此建立目标函数为误差平方和最小的非线性优化方程. 两步法求解非线性方程,首先通过测量得到所求参量的初值,保证随后的迭代求解能够收敛到全局最优解,然后用 LM 最优化迭代求解获得三维系统的结构参量. 实验结果表明,经过三维标定的位错点阵编码三维成像系统,对  $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$  的测量体积内,可以获得 X 方向的标准差为 0.29 mm 和 Y 方向的标准差为 0.24 mm, Z 方向的标准差为 0.29 mm 的测量准确度.

#### 参考文献

- 1 Chen F, Brown M G, Song M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Opt Eng*, 2000, **39**(1):10~22
- 2 Valkenburg J R, McIvor M A. Accurate 3D measurement using a structured light system. *Image Vis Comput*, 1998, **16**(2):99~110
- 3 彭翔,张宗华,朱绍明,等. 三维光学数字像的一种解析逼近模型. *光学学报*, 1999, **19**(11):1571~1575  
Peng X, Zhang Z H, Zhu S H, et al. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11):1571~1575
- 4 张宗华,彭翔,胡小唐. 一种新型的彩色三维光学成像系统. *光学学报*, 2002, **22**(8):994~998  
Zhang Z H, Peng X, Hu X T. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8):994~998
- 5 李方,周灿林. 一种新的双频光栅轮廓术. *光子学报*, 2005, **34**(4):154~157  
Li F, Zhou C L. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):154~157
- 6 马丽华,梁志毅,熊仁生,等. 虚拟制造技术在高速摄影机研制中的应用. *光子学报*, 2005, **34**(8):160~162  
Ma L H, Liang Z Y, Xiong R S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8):160~162
- 7 常凌颖,杨建峰,赵葆常,等. 一种新型面阵 CCD 航天立体摄影测量光学系统. *光子学报*, 2005, **34**(8):47~50  
Chang L Y, Yang J F, Zhao B C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8):47~50
- 8 Tian J D, Peng X. 3-D digital imaging based on shifted point-array encoding. *Appl Opt*, 2005, **44**(26):5491~5496
- 9 Osten W. Application of optical shape measurement for the nondestructive evaluation of complex objects. *Opt Eng*, 2000, **39**(1):232~243
- 10 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, **3**(4):323~344
- 11 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans PAMI*, 2000, **22**(11):1330~1334
- 12 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机标定综述. *自动化学报*, 2000, **26**(1):44~55  
Qiu M L, Ma S D, Li Y. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1):44~55
- 13 Salvi J, Armangue X, Batlle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(7):1617~1635
- 14 Heikkila J, Sliven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97)*, San Juan, Puerto Rico, 1997. 1106~1112

## Calibration method for 3-D vision system using point array encoding

Ding Yabin<sup>1,2</sup>, Peng Xiang<sup>2</sup>, Tian Jindong<sup>2</sup>, Wu Bin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072

<sup>2</sup> Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Education Ministry, Shenzhen 518060

Received date: 2006-01-10

**Abstract** An approach of calibration method for three-dimensional (3-D) vision system based on shifted point array encoding was presented in this paper. Initially a 3-D calibration benchmark was established in object space, thus the camera subsystem can be calibrated with the benchmark in light of the concept of benchmark transmission. Furthermore the projection subsystem could be calibrated according to the constraint condition between the camera and the projection subsystems. Once both subsystems have been calibrated, in light of the shifted point-array encoding method the 3-D coordinates of range image could be obtained with moderate accuracy, which could be used to compare with the prescribed benchmark in order to build up a square-error based objective function, leading to a non-linear equation. By solving this equation, all structural parameters involved in 3-D vision system could be determined with appropriate accuracies. Experiment results showed that, after proposed calibration procedure, the 3-D vision system based on point array encoding was able to achieve such accuracy as the standard deviation in  $X$  direction is 0.29 mm, 0.24 mm in  $Y$  direction, and 0.29 mm in  $Z$  direction, respectively, for a measuring volume of  $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$ .

**Keywords** Applied optics; 3-D calibration; Point array; Range image; 3-D profilometry measurement



**Ding Yabin** was born in 1979. He received his B. S. degree from Jilin University in 2001 and his M. S. degree from Tianjin University in 2004. At present, he is a Ph. D. student in the national key laboratory of precision measuring technology and instruments, Tianjin University, China. His research interests include optical and laser metrology, three-dimensional imaging and modeling.