

# 基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量

肖永亮 苏显渝 陈文静

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量。利用带测头的摄像机拍摄二维正弦条纹, 根据傅里叶分析提取的平面特征点全局评估摄像机位姿, 进而测量测头的球心坐标。摄像机的位姿评估是条纹反向视觉测量的关键技术, 在测头标定和坐标测量中均需要进行位姿评估。位姿评估的误差函数包括重投影误差和物空间误差两类, 两者在基于平面的位姿评估中均存在两个局部极小值, 采用全局位姿评估算法可以避免误差函数陷入局部极小以高精度获取摄像机位姿, 完成测头标定和坐标测量。实验结果表明, 该方法可以高精度测量物体的三维坐标。

**关键词** 机器视觉; 反向视觉测量; 全局位姿评估; 正弦条纹; 傅里叶分析

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0808003

## Fringe Inverse Videogrammetry Based on Global Pose Estimation

Xiao Yongliang Su Xianyu Chen Wenjing

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

**Abstract** Fringe inverse videogrammetry based on global pose estimation is presented. The camera pose is estimated with planar characteristic points extracted from fringes by Fourier analysis. The fringes are captured using camera with probe, and the coordinates of probe can be measured with the help of the camera pose. The camera pose estimation is the key step in fringe inverse videogrammetry. The cost function for iterative pose estimation involves image-space error and object-space error, both having two local minima. The danger that the cost function converges to a local minimum can be avoided by use of global pose estimation. High-precision pose of camera can be obtained to accomplish the probe calibration and coordinate measurement. The experiments demonstrate that the method can measure the three-dimensional coordinates precisely.

**Key words** machine vision; inverse videogrammetry; global pose estimation; sinusoidal fringe; Fourier analysis

**OCIS codes** 150.0150; 120.0120; 070.0070; 100.0100

## 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>[1~6]</sup>。其中基于辅助标靶技术的视觉测量以其测量精度高、适用于工业现场测量以及便于对被测物上被遮挡的点进行精密测量而得到广泛应用。

传统的基于辅助标靶技术的视觉测量, 主要构成是标定的摄像机和辅助标靶<sup>[7,8]</sup>。测量时, 摄像机固定不动, 辅助标靶的测头与待测表面接触, 通过摄

像机对辅助标靶成像进行光学三维坐标测量。与此测量方案信息传递方向相反, 边心田等<sup>[9]</sup>提出反向视觉测量方案。反向视觉测量是指通过将带有摄像机的测头与待测表面接触, 拍摄固定参考靶进行三维坐标测量。条纹反向视觉测量的核心技术包括特征点提取和摄像机位姿评估。刘元坤等<sup>[10]</sup>提出利用傅里叶条纹分析高精度提取特征点的亚像素坐标, 其精度高于棋盘格的 Harris 角点提取算法。在摄像机位姿评估过程中, 边心田等<sup>[9]</sup>采用光束法平

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 肖永亮(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事计算机视觉和光学三维传感等方面的研究。

E-mail: yl.xiao@yahoo.com.cn

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学和光学三维传感等方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn(中国光学学会会员: 610015)

差<sup>[11]</sup>评估摄像机位姿。但是光束法平差过程中没有考虑旋转矩阵的正交约束条件,而且光束法平差属于局部优化算法,只有良好的初始值才能使光束法平差在正确解处收敛。因此,如果目标函数存在多个极值,光束法平差可能在局部极小处收敛。为了解决此问题, Lu 等<sup>[12]</sup>提出以物空间误差为目标函数的正交迭代算法,得到位姿评估的全局最优解,但此方案对于共面特征点的收敛性较差。而对于平面目标, Schweighofer 等<sup>[13]</sup>指出平面目标的重投影误差和物空间误差均存在两个局部极小值,并且这两个局部极小值在数值上相当接近,因而基于平面位姿评估的全局最优解显得尤为重要。

本文提出基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量。由计算机产生的二维正弦条纹显示在液晶显示器上。首先根据傅里叶分析提取二维平面特征点,完成摄像机的标定,然后将带有标定摄像机的测杆绕测头球心转动拍摄条纹,进行摄像机全局位姿评估,完成测头标定。测量时,将测头与待测表面接触,拍摄二维正弦条纹进行全局位姿评估,进而求解测头球心在世界坐标系的坐标。本文利用物空间误差目标函数,将旋转矩阵表示成四元数的非凸多项式,利用凸松弛的全局优化算法评估位姿,不需要提供初始值,收敛到全局最小值。

## 2 测量算法分析

### 2.1 条纹反向视觉测量原理

条纹反向视觉测量的原理如图 1 所示。显示条纹的液晶显示器可以通过计算机产生任意条纹,带有摄像机的测杆在底部安装球形测头。测量物体上某一点时,将测头接触待测点,拍摄条纹,估计摄像机的位姿,解算测头球心的三维坐标。其具体实现过程如图 2 所示。首先需要对测杆上的摄像机进行

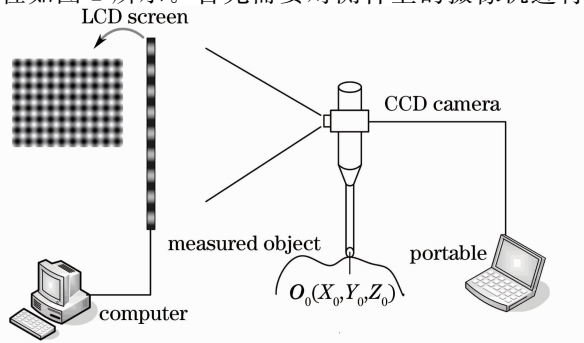


图 1 条纹反向视觉测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fringe inverse videogrammetry

标定,得到摄像机的等效焦距、主点以及畸变系数;然后利用全局位姿估计算法确定测头球心在摄像机坐标系下的坐标,完成测头标定。测量时,利用全局最优位姿评估结合测头标定的结果进行待测点坐标解算。



图 2 条纹反向视觉测量过程

Fig. 2 Process of fringe inverse videogrammetry

### 2.2 傅里叶分析提取特征点

采用二维正弦条纹,则其强度函数可表示为

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

式中  $x, y$  为液晶显示器上的坐标;  $a, b_1, b_2$  分别为正常数,令  $a = 1/2, b_1 = b_2 = 1/4; p_x, p_y$  分别为条纹周期;  $\varphi_{x0}(x, y), \varphi_{y0}(x, y)$  为对应的初始相位。由于光照背景,由摄像机获取的条纹图像强度函数为

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

式中  $u, v$  为摄像机的图像坐标。根据条纹图像的傅里叶变换分析方法<sup>[10]</sup>,通过傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换,提取出截断相位。当截断相位值为零时,对应着二维正弦条纹的最亮点。粗略估计最亮点的像素坐标,对亮点在宽度一定的窗口内进行相位展开,并进行二维线性拟合,构建局部窗口坐标系内相位与像素坐标的关系

$$\begin{cases} u = g_0 + g_1 \varphi_m(u, v) + g_2 \varphi_n(u, v) \\ v = j_0 + j_1 \varphi_m(u, v) + j_2 \varphi_n(u, v) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $g_0, g_1, g_2, j_0, j_1, j_2$  为拟合系数,  $n$  表示第  $n$  个亮点。当  $\varphi_m(u, v)$  和  $\varphi_n(u, v)$  均为零时,可以高精度提取特征点的亚像素坐标。

### 2.3 位姿评估算法

#### 2.3.1 摄像机成像模型

一般采用考虑像差的非线性像机模型描述成像关系,即基于中心透视投影的线性像机模型加上引起镜头畸变的像差。中心透视投影模型如图 3 所示,设空间点  $p$  在世界坐标系中的坐标为  $(X, Y, Z)$ ,其图像点在图像坐标系中的坐标为  $(x, y)$ 。对于二维平面空间点  $Z = 0$ ,则二维平面中心透视投影成像关系可以用齐次坐标表示为

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为比例因子, 摄像机内参数矩阵  $\mathbf{K} =$

$$\begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x \\ 0 & F_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R} \text{ 和 } \mathbf{T} \text{ 表示旋转矩阵和平移矢量。}$$

实际像点等于理想像点  $(x, y)$  与像差  $(\delta_x, \delta_y)$  之和。采用考虑了径向像差和切向像差的像差模型来描述像差的实际大小, 即

$$\begin{aligned} \delta_x &= k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + 2k_3 x_d y_d + \\ &\quad k_4 (r_d^2 + 2x_d^2), \\ \delta_y &= k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + k_3 (r_d^2 + 2y_d^2) + \\ &\quad 2k_4 x_d y_d, \end{aligned}$$

式中  $x_d = (x - C_x)/F_x, y_d = (y - C_y)/F_y, r_d^2 = x_d^2 + y_d^2, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  为畸变系数。

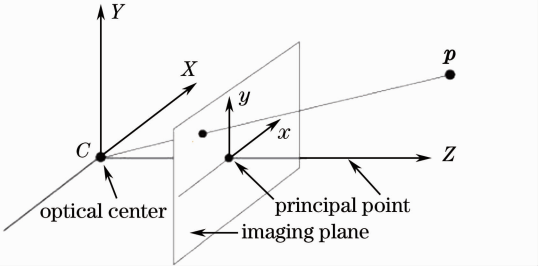


图3 中心透视投影成像模型

Fig. 3 Imaging model of central perspective projection

### 2.3.2 位姿评估

摄像机位姿评估是指给定一系列非共线的三维参考点  $p_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T, i = 1, \dots, n, n \geq 3$ , 和相应的摄像机坐标系下的坐标  $q_i = (X'_i, Y'_i, Z'_i)^T$ , 确定两坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R} = [R'_1, R'_2, R'_3]^T$  和平移矢量  $\mathbf{T}$ , 使其满足

$$q_i = \mathbf{R}p_i + \mathbf{T}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{R} \in SO(3)$ , 具有正交性;  $\mathbf{T} = [t_x, t_y, t_z]^T$ 。在摄像机标定的情况下, 可以将实际成像点统一到基于透视成像模型的归一化平面。位姿评估的误差目标函数包括重投影误差和物方距离误差。重投影误差的物理意义可以描述为: 以标定像机和评估的位姿作为透视成像模型的参数, 对已知参考点成像, 成像点与实际像点之间的误差就是重投影误差。物空间误差的物理意义可以用图4描述。对于某一给定三维参考点  $B$ , 其在归一化图像坐标系的理想成像点为  $A$ 。假设其对应的实际提取的归一化像点为  $A'$ , 摄像机光心  $C$  和实际提取像点  $A'$  确定的光线方向矢量为  $l'$ , 此光线同物点  $B$  和光心  $C$  确定的光线方向矢量  $l$  不重合。将三维参考点  $B$  向  $l'$  方向正交投影, 可以得到参考点  $B$  到  $l'$  的距离, 此距离称为物空间距离误差。光束法平差位姿评估采用的是重投影

误差  $E_{is}$ , 全局位姿评估算法采用的是物方误差  $E_{os}$ 。

设像点在归一化成像面的坐标为  $\mathbf{v}_i = (u_i, v_i, 1)^T$ ,

$$E_{is} = \sum_{i=1}^n \left[ \left( u_i - \frac{\mathbf{R}p_i + t_x}{\mathbf{R}p_i + t_z} \right)^2 + \left( v_i - \frac{\mathbf{R}p_i + t_y}{\mathbf{R}p_i + t_z} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$E_{os}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \| [I - V_i][\mathbf{R}p_i + \mathbf{T}] \|^2,$$

$$V_i = \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T}{\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i}. \quad (6)$$

光束法平差采用高斯-牛顿优化算法, 通过对旋转矩阵和平移矢量参数不断修正使  $E_{is}$  趋向于零。设  $E_{is}$  对应于参数空间  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  的雅可比矩阵为  $\mathbf{J}$ , 则修正参数的改正数为

$$\Delta \chi(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = -[\mathbf{J}^T \mathbf{J}]^{-1} \mathbf{J}^T \chi(\mathbf{R}, \mathbf{T}), \quad (7)$$

通过迭代使  $E_{is}$  趋近于零。但是, 光束法平差采用的是广义的非线性最小二乘优化算法, 属于局部优化算法, 需要提供精确的初始值保证其收敛性。如果初始值远离正确解, 则其收敛性在数学上得不到保证; 而且, 这里没有考虑透视成像过程中的具体约束关系, 如旋转矩阵的正交性等。

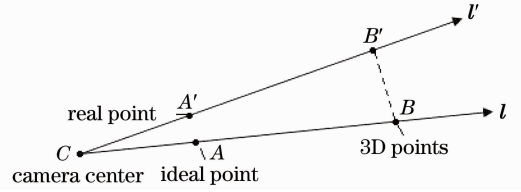


图4 物空间误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of object-space errors

全局位姿评估的误差  $E_{os}$  是参考点到实际光线矢量的距离。固定旋转矩阵  $\mathbf{R}$ , 可以得到平移矢量  $\mathbf{T}$  的最优闭合解  $\mathbf{T}_{opt} = -\mathbf{A}^{-1} \left( \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i \mathbf{R} p_i \right)^{-1}$ ,  $E_{os}$  可以转化为只关于旋转矩阵的函数:

$$\begin{aligned} E_{os}(\mathbf{R}) &= \sum_{i=1}^n \| \mathbf{A}_i \mathbf{Q}_i p_i \|^2 = \\ &= p_i^T \left( \sum_{i=1}^n \mathbf{Q}_i^T \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i \mathbf{Q}_i \right) p_i, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i, \mathbf{A}_i = I - V_i, \mathbf{Q}_i = \mathbf{R} - \frac{\sum \mathbf{A}_i \mathbf{R}}{\sum \mathbf{A}_i}$ 。

$E_{os}(\mathbf{R})$  是关于  $\mathbf{R}$  的9个矩阵元的非凸多项式, 将旋转矩阵采用四元数表示, 可以将参数维度降到4。采用四元数  $e = [q_1, q_2, q_3, q_4]$  表示法描述旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 。经过仿射变换, 将  $\mathbf{R}$  的参数向量化。由于旋转矩阵正交, 因此需要迫使四元数满足正交约束  $q_1^2 +$

$q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1$ 。并且,由于参考点位于相机前面,令  $q_1 > 0$ 。因此,求解旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的问题转化为

$$\begin{aligned} & \min E(\mathbf{e}) \\ & \text{subject to } \begin{cases} q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1 \\ q_1 > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$E_{os}(\mathbf{R})$  的全局最优解可以通过非凸多项式的凸松弛全局最优解法求得,具体的计算过程可以采用 Henrion 等发布的 GloptiPoly 3 软件包<sup>[14]</sup>。最后,可以求得平移矢量的最优闭合解。由于此解法是将位姿评估抽象为纯数学的多项式全局最优,其算法对于共面和非共面特征点均可以适用。

为了对比光束法平差和全局优化算法在位姿评估中的差异,利用 Matlab 7.9 进行了数值模拟。为了准确模拟实际物理过程,采用考虑畸变的成像模型,畸变系数采用实际摄像机标定的结果,对实际条纹提取的均匀分布平面参考点成像。然后,对 10 幅图像利用 Zhang<sup>[15]</sup> 的标定算法进行摄像机标定,利用标定的数据使用光束法平差和全局优化算法对另外一幅图像进行位姿评估。为了评估算法的精度,分别定义旋转矩阵和平移矢量的相对误差为  $E_R$  和  $E_{trans}$ ,可表示为

$$\begin{aligned} E_R &= \|\mathbf{R}_{true} - \mathbf{R}\| / \|\mathbf{R}_{true}\|, \\ E_{trans} &= \|\mathbf{T}_{true} - \mathbf{T}\| / \|\mathbf{T}_{true}\|. \end{aligned}$$

图 5 描述了两种不同算法评估的旋转矩阵和平移矢量对噪声的稳健性。图 5 仿真曲线中的每一个点是在均匀随机产生 200 次旋转角,对相对误差求平均的结果。随着图像噪声的增加,摄像机标定结果会受到影响,利用相应的标定结果对增加噪声的图像进行位姿评估。随着噪声的增加,全局位姿评估的结果要略好于光束法平差的结果。而且,由于全局位姿评估算法中考虑了正交约束条件,因而求解的旋转矩阵具有正交性;而光束法平差求解过程使用的是广义的非线性最小二乘算法,并没有考虑其旋转矩阵参数的正交约束关系。因此,从整体上说,全局位姿评估的旋转矩阵比光束法平差评估的结果更加接近真实值。

两种算法在执行时间方面的差异如图 6 所示。图 6 是取 10~500 个共面参考点进行摄像机位姿评估时的执行时间对比,其运行硬件环境为华硕 A8N, 2 G 内存。图 6 表明,光束法平差在执行速度方面要比全局优化算法稍快,但实际差异不大,在实际测量应用中属于次要问题。

## 2.4 测头标定

在工程应用中,为了测量的方便,一般在测杆底

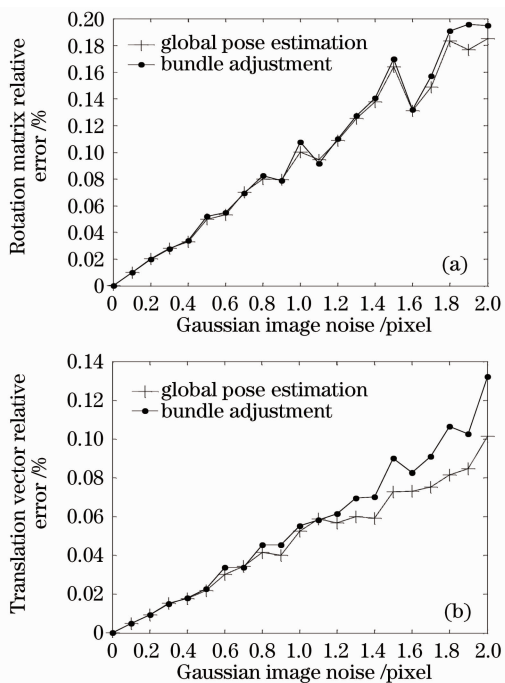


图 5 (a) 旋转矩阵对噪声的稳健性, (b) 平移矢量对噪声的稳健性

Fig. 5 Robustness of (a) rotation matrix and (b) translation vector to noise

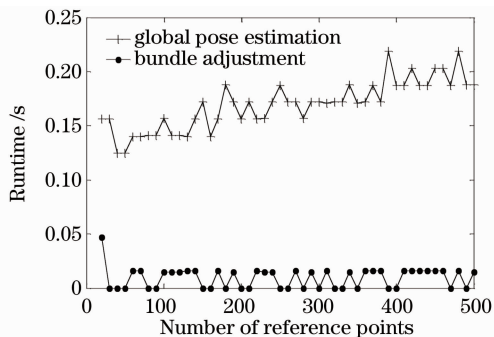


图 6 算法执行时间对比

Fig. 6 Comparison of runtime

部安装球形测头。测头标定是指确定测头球心在摄像机坐标系下的坐标。摄像机、测杆和测头在经过加工固定后,在整个测量过程中其相对位置关系保持不变。测头标定时,将测杆绕测头球心转动,不同位姿的摄像机光心位于以测头球心为中心的球面上。假设拍摄第  $n$  张图片 ( $n \geq 4$ ) 时的摄像机旋转矩阵和平移向量分别为  $\mathbf{R}_n$  和  $\mathbf{T}_n$ , 则其光心在世界坐标系下的坐标为  $[X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn}]^T$ , 即

$$[X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn}]^T = -\mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{T}_n. \quad (10)$$

摄像机旋转前后光心到测头的球心距离保持不变,由此可以建立关于球心坐标  $\mathbf{O}_0 = [X_0, Y_0, Z_0]$  的超定方程,即

$$\mathbf{AO}_0 = \mathbf{b}, \quad (11)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_{c2} - X_{c1} & Y_{c2} - Y_{c1} & Z_{c2} - Z_{c1} \\ X_{c3} - X_{c2} & Y_{c3} - Y_{c2} & Z_{c3} - Z_{c2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{cn} - X_{c(n-1)} & Y_{cn} - Y_{c(n-1)} & Z_{cn} - Z_{c(n-1)} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \frac{1}{2} \times$$

$$\begin{bmatrix} (X_{c2}^2 + Y_{c2}^2 + Z_{c2}^2) - (X_{c1}^2 + Y_{c1}^2 + Z_{c1}^2) \\ (X_{c3}^2 + Y_{c3}^2 + Z_{c3}^2) - (X_{c2}^2 + Y_{c2}^2 + Z_{c2}^2) \\ \vdots \\ (X_{cn}^2 + Y_{cn}^2 + Z_{cn}^2) - (X_{c(n-1)}^2 + Y_{c(n-1)}^2 + Z_{c(n-1)}^2) \end{bmatrix}.$$

对于广义超定方程  $\mathbf{A}\mathbf{O}_0 = \mathbf{b}$  可采用  $\mathbf{O}_0 = [\mathbf{A}^T\mathbf{A}]^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{b}$  最小二乘法求解。最小二乘法是基于只有  $\mathbf{b}$  存在噪声的假设,但是系数矩阵  $\mathbf{A}$  和向量  $\mathbf{b}$  均是关于光心的函数,会同时存在噪声,此时采用基于  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{b}$  均存在噪声假设的总体最小二乘法求解<sup>[16]</sup>。令  $\boldsymbol{\Omega} = [-\mathbf{b}, \mathbf{A}]$ ,  $\boldsymbol{\xi} = [\mathbf{O}_0, 1]$ , 则  $\mathbf{A}\mathbf{O}_0 = \mathbf{b}$  的超定方程可以转化为带约束的最小二乘问题

$$\min \|\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\xi}\|_2^2, \text{subject to } \boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi} = 1. \quad (12)$$

对矩阵  $\boldsymbol{\Omega}$  进行奇异值分解,  $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^H$ , 并且其奇异值按照顺序  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{n+1}$  排列, 奇异值对应的右奇异向量为  $[v_1, v_2, \dots, v_{n+1}]$ , 超定方程的解为

$$\mathbf{X}_0 = \frac{1}{v(1, n+1)} \begin{bmatrix} v(2, n+1) \\ \vdots \\ v(n+1, n+1) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

由测头球心在世界坐标系下的坐标, 根据(4)式, 可以求得测头球心在摄像机坐标系下的坐标, 完成测头标定。

## 2.5 坐标测量

利用条纹反向视觉测量方法测量坐标时, 将测头与待测点接触, 由摄像机拍摄条纹以确定摄像机的位姿。根据摄像机的位姿和测头球心在摄像机坐标系下的坐标, 解算测头球心在世界坐标系下的坐标。根据2.4节, 假设测头球心在摄像机坐标系下的坐标为  $[X'_c, Y'_c, Z'_c]^T$ , 测量某点时解算的摄像机位姿为  $\{\mathbf{R}, \mathbf{T}\}$ , 那么, 测头球心在世界坐标系下的坐标  $[X_w, Y_w, Z_w]^T$  满足

$$\mathbf{R}[X_w, Y_w, Z_w]^T + \mathbf{T} = [X'_c, Y'_c, Z'_c]^T. \quad (14)$$

对不同的点逐次接触测量, 可以得到被测物体的三维坐标点云。

## 3 实验

### 3.1 摄像机和测头的标定

摄像机标定采用基于二维共面参照物摄像机标

定方法。将已知相位分布的平面二维正弦灰度调制条纹图显示在液晶显示器上, 对拍摄的条纹通过傅里叶分析方法计算出两个截断的正交相位分布, 利用截断正交相位分布提取相应的图像特征点, 建立像素坐标与二维平面坐标的对应关系, 根据Zhang<sup>[15]</sup>的标定算法实现摄像机的标定。标定结果的重投影误差精度比基于棋盘格提取特征点的重投影误差精度提高1个数量级, 可达到0.01 pixel。实验中, 采用JAI CV-A50黑白摄像机拍摄傅里叶条纹, 摄像机的分辨率为640 pixel × 480 pixel, 像素尺寸为8.3 μm × 8.6 μm。采用Philips 170S87液晶显示器作为平面标靶, 分辨率为1024 pixel × 1280 pixel, 显示器的点间距为0.264 mm。傅里叶平面相位靶的周期为48 pixel。利用15幅条纹图像完成标定, 图7为其中一幅图像特征点的示意图。摄像机参数标定结果如表1所示。

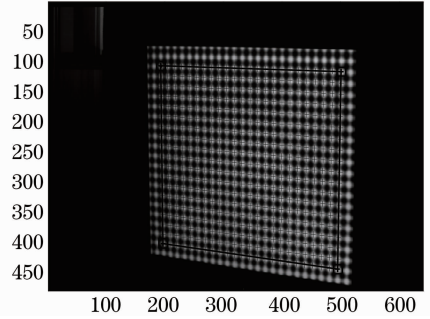


图7 用于摄像机标定的其中一幅图像的特征点  
Fig. 7 One of the images including characteristic points for camera calibration

表1 摄像机标定结果

Table 1 Camera calibration results pixel

Focal length	Principal point	Reprojective error	Distortion coefficient
1255.01 ± 0.36	323.67 ± 0.13	0.018	[-0.2703, 0.0728,
1513.68 ± 0.24	284.22 ± 0.52	0.009	-0.00034, 0.0]

进行测头标定时, 将球形测头放在精密光学隔振平台上的螺纹孔内, 由于球形测头的半径大于螺纹孔半径, 这样有利于固定测头球心。旋转测杆, 多次拍摄液晶显示器上的条纹。实验中, 使用6幅如图8所示的条纹图完成测头的标定。在拍摄条纹时, 没有必要将整个条纹完全显示在摄像机的成像面内。但是, 对条纹提取特征点时, 必须选择某一固定点作为世界坐标系的原点, 这样, 所有的位姿评估都会统一在同一个世界坐标系内。

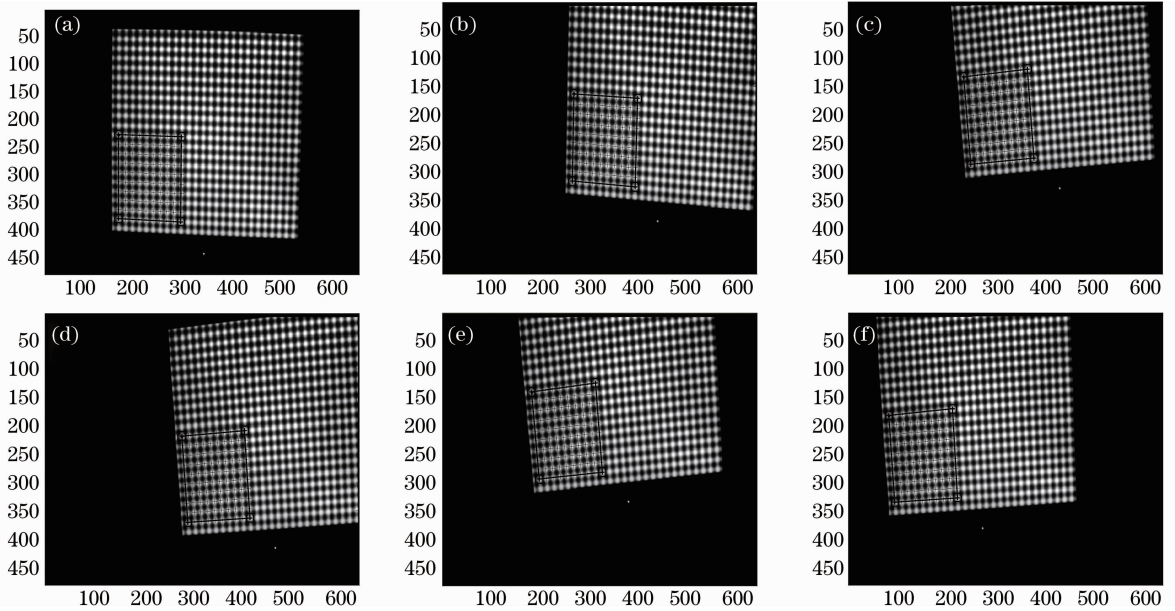


图 8 完成测头标定的 6 幅条纹图特征点

Fig. 8 Six fringes for probe calibration

### 3.2 坐标测量

实验中测量的对象为精密光学隔振平台上的螺纹孔间距,实际标准的螺纹孔间距为 25 mm。测量时,将球形测头放在螺纹孔上,对液晶显示器上的条纹成像。本实验测量 5 个螺纹孔之间的相对位置关系,其标号如图 9 所示。标号 1 到液晶显示器的距离为 1 m 左右。其他所有螺纹孔的测量均是从不同方位拍摄条纹计算测头的球心坐标。以标号 1 测得的三维坐标为基准值,其余位置测量的三维坐标值与此基准值的差值就是每个螺纹孔球心到标号 1 球心的测量距离。测量对应的误差对比结果如表 2 所示。表 2 中误差结果  $\Delta X$  与  $\Delta Z$  是测量的坐标与标准螺纹空间距离之间的差值; $\Delta Y$  是将垂直于隔振平台方向上的坐标测量结果进行平面拟合,然后计算各测量点到拟合平面的距离。表中的误差和方

差数据结果表明,沿 Z 轴方向的测量结果要差于 Y 轴和 X 轴方向的结果,这是二维平面参考靶在 Z 轴方向没有数据量造成的。由光束法平差和全局位姿测量结果可以看出,基于全局位姿评估的测量结果要略好于光束法平差测量结果。

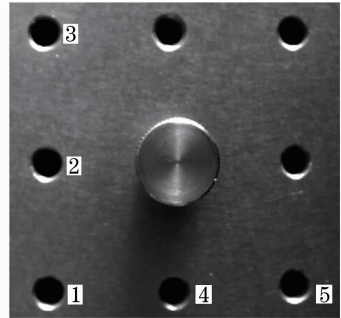


图 9 测量标号

Fig. 9 Label of measurement

表 2 利用光束法平差和全局位姿测量的误差对比

Table 2 Error comparisons using bundle adjustment and global pose estimation

Coordinate	Method	1	2	3	4	5	Std
$\Delta Y$	Bundle	0.046	0.075	0.084	0.057	0.076	0.0157
	Global	0.023	0.044	0.032	0.026	0.028	0.0082
$\Delta X$	Bundle	0.042	0.083	0.058	0.067	0.053	0.0154
	Global	0.041	0.051	0.023	0.038	0.031	0.0105
$\Delta Z$	Bundle	0.112	0.084	0.062	0.066	0.103	0.0220
	Global	0.072	0.043	0.034	0.048	0.063	0.0153

Std: standard deviation.

## 4 结 论

提出利用凸松弛全局位姿评估算法实现条纹反

向视觉测量,此系统非常适合于测量对象不在摄像机视场范围的情形。与光束法平差位姿评估相比,

全局位姿评估在确保误差函数全局收敛的同时,考虑旋转矩阵的正交约束条件,使条纹反向视觉测量中的关键技术——位姿评估结果更加可靠。在进行测头标定时,根据方程的结构,采用总体最小二乘法代替一般最小二乘法求解。实验对光束法平差和全局位姿两种算法的测量结果进行了对比。结果表明,全局位姿算法的测量精度较光束法平差的测量精度有一定提高。

### 参 考 文 献

- 1 A. Gruen. Fundamentals of videogrammetry-a review [J]. *Human Moments Science*, 1997, **16**(2-3): 155~187
- 2 T. Luhmann. Close range photogrammetry for industrial applications [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, **65**(6): 558~569
- 3 Zhang Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2005  
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 4 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876  
郝继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- 5 Fu Sihua, Yu Qifeng, Wang Mingzhi *et al.*. Railway geometric parameters measurement system based on videometrics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3203~3208  
伏思华, 于起峰, 王明志等. 基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3203~3208
- 6 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. Study of deformation measurement of position and attitude based on monocular vision[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(6): 775~778  
姜广文, 晁志超, 伏思华等. 基于单摄像机的物体位置和姿态变形测量研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(6): 775~778
- 7 Xu Qiaoyu, Che Rengsheng. Study of stereo vision coordinate measurement system based on optical probe [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2181~2186  
徐巧玉, 车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2181~2186
- 8 Mao Xianfu, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Analysis on optical coordinate measurement based on phase target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2452~2457  
毛先富, 苏显渝, 刘元坤等. 基于相位标靶的光学坐标测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2452~2457
- 9 Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. A novel three-dimensional coordinates measurement method based on inverse photogrammetry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1832~1836  
边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于反向摄影测量的三维坐标测量方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1832~1836
- 10 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Multicamera 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
- 11 Mamolis I. A. Lourakis, Antonis A. Argyros. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment [J]. *ACM Transaction on Mathematical Software*, 2009, **36**(1): 1~30
- 12 C. P. Lu, G. Hager, E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(5): 610~620
- 13 G. Schweighofer, A. Pinz. Robust pose estimation from a planar target [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(12): 2024~2030
- 14 D. Henrion, J. B. Lasserre. GloptiPoly 3: moments, optimization and semidefinite programming [J]. *Optimization Methods and Software*, 2009, **24**(4-5): 761~779
- 15 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 16 I. Markovsky, S. Van Huffel. Overview of total least-squares methods [J]. *Signal Processing*, 2007, **87**(10): 2283~2302