

文章编号 1004-924X(2009)02-0306-08

结构光测量系统的误差传递分析

许 丽,张之江

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网省部级共建重点实验室,上海 200072)

摘要:针对基于交比不变原理的结构光平面标定方法,利用误差分析理论和矩阵扰动原理分别对系统的测量误差和光平面标定误差进行分析,提出了结构光测量系统的误差传递模型。给出了满足在 1 000 mm 的测量距离上获得 ± 0.5 mm 的测量精度情况下,各标定参数所需要的精度要求,以及标定样本提取的精度要求。通过实测实验结果,验证了误差分析的有效性。该误差分析为提高结构光系统的测量精度提供了理论依据。

关键词:结构光测量系统;误差传递分析;蒙特卡洛法;矩阵扰动;交比不变

中图分类号:TP391 文献标识码:A

Error propagation analysis of structured light system

XU Li, ZHANG Zhi-jiang

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To study the calibration accuracy of structured light system based on cross-ratio invariant, measuring error and light-plane calibration error of system are analyzed, and an error propagation model is established by employing theories of error and matrix disturbance. According to the error propagation model, the precision demands of calibration parameters and samples under a special condition in measuring distance of 1 000 mm and measuring accuracy of ± 0.5 mm is presented. The error propagation model is validated through experiments, experimental results show that proposed model can provide theory basis for improving measuring accuracy of structured light system.

Key words: structured light system; error propagation analysis; Mont Carlo method; matrix disturbance; cross-ratio invariant

1 引言

基于视觉的三维信息获取技术在逆向工程、虚拟现实、文物修复、机器人导航、在线产品检测等方面有着广泛的应用背景。基于视觉的三维信

息方法可分为主动式和被动式两种。相对主动式而言,被动式对硬件要求低,大多不需要另加光源。但由于存在多幅图像中不同视点下对应点的配准问题,使得被动式测量的精度和应用范围受到了一定的限制。克服对应点配准问题的一种有效方法是结构光主动三维信息获取技术。由于结

收稿日期:2008-04-07;修订日期:2008-05-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60772124)

构光测量系统具有结构相对简单、建模易实现以及精度适中等特点,已被广泛应用^[1-3]。

在结构光三维获取系统中,关键问题是通过建模和参数的标定获得高精度的物体表面形貌三维数据。在结构光系统标定过程中,由于靶标上已知的三维点很难恰好位于结构光光平面上,三维标定点很难直接获取。鉴于此,交比不变原理被广泛应用到获取结构光标定点中^[4-5],在此基础上又提出了基于双重交比不变原理获取标定点的标定方法^[6-7]。针对交比不变原理的结构光标定方法,从交比不变获取标定点的不确定度角度进行分析,得出了标定样本数据的精度对结构光系统标定精度的影响^[8-9]。

本文考察了系统测量和标定过程的误差来源、各误差源对系统精度的影响、以及标定过程中标定样本提取误差对标定参数的影响,从而推导出了标定样本提取误差对最终测量结果的误差传递关系,并根据误差传递关系设计了合理的标定实验过程。具体而言,本文是针对光平面建模和交比不变原理的结构光标定方法所进行的误差分析。在假设参予标定运算的样本点相互独立且服从已知概率随机分布的条件下,分析了光平面法向量误差对系统测量精度的影响以及标定样本点精度对点坐标估计和光平面法向量求解的影响程度,并分析了进一步提高标定精度的措施。确定了满足在 1 000 mm 的测量距离上获得 ±0.5 mm 的测量精度条件下,各标定参数所需的精度要求,以及标定样本的精度要求,同时对所提出的误差传递分析进行了实验验证。该误差传递关系为结构光系统的设计提供了一定的理论依据。

2 结构光系统建模和标定原理

2.1 系统建模

结构光系统的测量模型如图 1 所示,其中摄像机和投影仪分别被固定于 O 和 P 。以摄像机的光心 O 为坐标系的中心,光轴为 z 轴构成坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 。投影仪被近似认为一点光源, P 为投影仪投影中心的位置。

本数学模型中,各坐标值均统一在摄像机坐标系下。摄像机的成像过程近似为小孔成像模型,一物点投影到 CCD 像面上会得到^[10]

$$\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $X(x, y, z)$ 为被测物点在摄像机坐标系下的值, (u, v, f) 为该点成像于 CCD 图像面上的点 X 在摄像机坐标系下坐标值, p 为该成像过程的径向放大倍数。

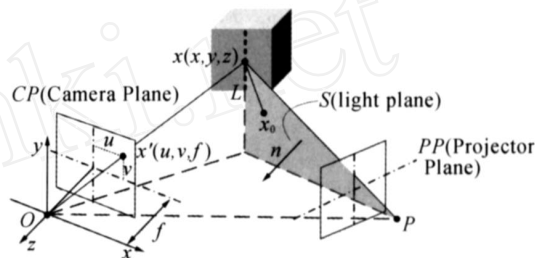


图 1 结构光系统测量模型

Fig. 1 Modeling of structured light system

点 P 和曲线 L 构成一光平面,取任意一点 X_0 为参考点, \bar{n} 为该光平面的法向量,条纹上任意一点 X 在其相对应的光平面上满足向量 $\overrightarrow{XX_0}$ 和法向量 \bar{n} 垂直。

$$n_x x + n_y y + n_z z = d, \quad (2)$$

其中, $d = \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}$, $n_x = \begin{vmatrix} y_0 & z_0 & 1 \\ y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \end{vmatrix}$,

$n_y = \begin{vmatrix} x_0 & z_0 & 1 \\ x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \end{vmatrix}$, $n_z = \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{vmatrix}$ 。

根据以上两公式可知,光平面测量公式可以表示为

$$\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & f \\ n_x & n_y & n_z & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pu \\ pv \\ p \\ d \end{bmatrix}. \quad (3)$$

考虑世界坐标系和摄像机坐标系之间的转换,公式(3)可以表示为

$$\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & f \\ n_x & n_y & n_z & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 & T_x \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & T_y \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pu \\ pv \\ p \\ d \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由公式(4)所示,结构光系统所需标定的参数为摄像机的内部参数 f ,外部参数 R 和 T ,光平面参数 $\vec{n}(n_x, n_y, n_z, d)$ 。

2.2 标定原理

在结构光标定过程中,由于已知点很难恰好位于测量光平面上,标定点的信息不能直接获得,所以结构光系统标定过程的关键部分是标定点的间接获取。如图 2 所示,本实验假设条纹编码光投射到平面靶标上为直线,靶标平面上有共线特征点 A_1, A_2, A_3 (位于拟合直线 L_{11} 上),光平面与靶标平面上共线特征点所在的直线的交点为 R_1 ,被称为标定点, r_1 为其相对应的图像坐标。图像点 (a_1, a_2, a_3) 可通过图像处理获得, r_1 图像坐标可通过共线特征点的拟合直线和光平面与靶标平面交线在摄像机成像平面的拟合直线的交点求得。当 3 个点 (A_1, A_2, A_3) 的世界坐标和 4 个共线点 (a_1, a_2, a_3, r_1) 图像坐标已知时,根据交比不变原理,可估计出点 R_1 的局部世界坐标值。

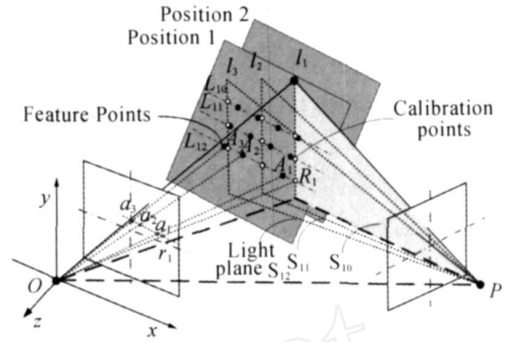


图 2 结构光标定原理

Fig.2 Calibration principle of structured light system

由 4 个共线点 (a_1, a_2, a_3, r_1) 定义的交比为

$$Cr(a_1, a_2, a_3, r_1) = \frac{a_1 - r_1}{a_2 - r_1} \frac{a_1 - a_3}{a_2 - a_3}, \quad (5)$$

根据交比不变原理可知,

$$Cr(a_1, a_2, a_3, r_1) = Cr(A_1, A_2, A_3, R_1), \quad (6)$$

由式(5)和(6)可得 R_1 的坐标为

$$R_1 = \frac{(a_1 - r_1)(a_2 - a_3)(A_2 A_1 - A_2 A_3) + (a_1 - r_1)(a_1 - a_3)(A_1 A_3 - A_1 A_2)}{(a_1 - r_1)(a_2 - a_3)(A_1 - A_3) + (a_1 - r_1)(a_1 - a_3)(A_3 - A_2)}. \quad (7)$$

在实际计算中,参与交比计算的特征点只有 3 个,计算结果很容易受到特征点噪声的影响。为了克服偶然误差的影响,靶标上共线特征点多于 3 个。取 $N > 3$ 个共线特征点与 $M (M = C_N^3)$ 组合进行计算,得到交比计算值的均值作为标定点的坐标值^[6]。

$$\overline{R_{1k}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_{1i}. \quad (8)$$

如图 2 所示,利用多组平行直线 $(L_{10}, L_{11}, L_{12}, \dots)$ 和平移平面靶标 (Position1, Position2, ...), 获得结构光光平面上任意多组标定点的世界坐标 $(x_i, y_i, z_i) (i = 1, 2, \dots, m)$, 利用光平面方程估计光平面参数 (n_x, n_y, n_z, d) 。用于估计的目标函数为点到平面的欧式距离的平方和,即

$$e(\) = \sum_{i=1}^m D_i^2. \quad (9)$$

通过最小化目标函数,可得到结构光光平面方程的系数。

$$\min e(\) = \min \sum_{i=1}^m D_i^2. \quad (10)$$

其中, $\vec{n} = [n_x, n_y, n_z, d], D_i =$

$$\frac{|n_x x_{wi} + n_y y_{wi} + n_z z_{wi} - d|}{\sqrt{(n_x)^2 + (n_y)^2 + (n_z)^2}}.$$

3 误差传递分析

根据以上系统建模和标定原理分析可知,系统的测量误差主要来源为系统建模误差、标定误差和图像处理误差,本文主要考察系统标定误差对测量精度的影响。结构光标定过程可分为摄像机标定和光平面标定两部分,其中摄像机标定的较为详细^[11],这里不做分析。重点分析满足光平面法向量误差对系统测量精度的影响程度,样本提取精度对光平面标定的影响程度,以及在 1 000 mm 的测量距离上获得 ± 0.5 mm 的测量精度情况下各标定量的精度要求。

3.1 测量误差分析

本节首先分析光平面标定参数精度对结构光系统测量误差的影响程度。根据式(1)和式(2),可以得出齐次方程组(1)中系数 p 为

$$p = \frac{1}{n_x u + n_y v + n_z f}. \quad (11)$$

其中, p 可称为摄像机成像过程中的径向放大倍数。对式(11)关于光平面标定参数 $\bar{n}(n_x, n_y, n_z, d)$ 进行泰勒展开为

$$p = \frac{\partial p}{\partial n_x} n_x + \frac{\partial p}{\partial n_y} n_y + \frac{\partial p}{\partial n_z} n_z + R = \frac{-(u n_x + v n_y + f n_z)}{(n_x u + n_y v + n_z f)^2} + R. \quad (12)$$

其中, R 为各项的泰勒级数高阶余项。径向放大倍数 p 的相对误差为

$$\frac{-p}{p} = \frac{-(u n_x + v n_y + f n_z)}{(n_x u + n_y v + n_z f)}. \quad (13)$$

用 a 来近似表示法向量的相对误差, 其中

$$a = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{-n_x}{n_x}\right)^2 + \left(\frac{-n_y}{n_y}\right)^2 + \left(\frac{-n_z}{n_z}\right)^2}. \quad (14)$$

这时, 径向放大倍数 p 的相对误差可表示为

$$= \left| \frac{-p}{p} \right| = \left| \frac{-(u n_x + v n_y + f n_z)}{n_x u + n_y v + n_z f} \right| = a. \quad (14)$$

当系统测量的相对误差满足

$$< ,$$

则法向量相对偏移量满足

$$a < . \quad (15)$$

当测量距离为 $z = 1\ 000\ \text{mm}$, z 方向最大误差为 $|z| = 1.0\ \text{mm}$ 时, 系统测量的相对误差最大值 $= 10^{-3}$, 则径向放大倍数的相对误差为

$$\left| \frac{-p}{p} \right| = \left| \frac{-z}{z} \right| = \frac{1}{1\ 000} = 10^{-3}.$$

要保证测量精度的情况满足

$$\begin{cases} 0 & 10^{-3} \\ 0 & a \cdot 10^{-3} \end{cases}, \quad (16)$$

可得到在 $1\ 000\ \text{mm}$ 的测量距离上获得 $\pm 0.5\ \text{mm}$ 的测量精度。

3.2 光平面误差分析

根据 2.1 系统建模分析可知, 光平面方程(2)可写为线性方程组求解:

$$A_i \times 3 \ n = b_i \ x1, \quad (17)$$

其中, $A_i \times 3 = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{i-1} & y_{i-1} & z_{i-1} \end{bmatrix}$ 为标定点点所构成

的系数矩阵, i 为标定点的个数, $n(n_x, n_y, n_z, d)$ 为光平面参数, b 为单位向量。

设系数矩阵 A 有扰动 ΔA , 以 n 和 $n + \Delta n$ 分别表方程组 $An = b$ 及扰动方程组 $(A + \Delta A)(n + \Delta n) = b$ 的精确解和近似解, 则有^[12]

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\text{cond}(A) \frac{\Delta A}{A}}{1 - \text{cond}(A) \frac{\Delta A}{A}}, \quad (18)$$

其中, $\text{cond}(A)$ 为系数矩阵 A 的条件数。

由式(18)可知, $\text{cond}(A)$ 决定解的相对误差最大值, 即 $\text{cond}(A)$ 越大, A 对线性方程组(17)的解的影响越大。根据矩阵论可知, 系数矩阵 A 的条件数 $\text{cond}(A)$ 接近于 1 时, 系数矩阵 A 受噪声的鲁棒性最强。对于 $\text{cond}(A)$ 大的矩阵, 小的误差可能引起解的失真, 矩阵 A 为病态矩阵。

对于长系数矩阵 A 的条件数达到极小值 1 所要满足的充要条件是 A 为列满秩, 且为正交矩阵^[12]。为了尽量满足该条件, 本系统的标定实验设计采用多条平行线和条纹直线相交获取多组标定点和对平面靶标从 y_w 方向和 z_w 方向移动获取标定点点两种方式(如图 3, 4), 尽量使获取的标定点点分布满足该充要条件(如 2.2 节系统标定原理分析)。

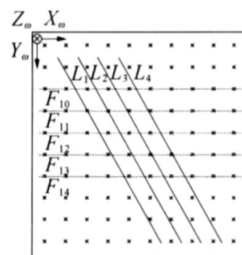


图 3 靶标平行直线分布

Fig. 3 Parallel lines on coplanar target

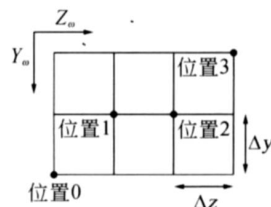


图 4 靶标的移动位置

Fig. 4 Positions of coplanar target

这样系数矩阵 A 可表示为

$$A_n \times 3 = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_0 + 0 \times \Delta y + 1 \times \Delta z & z_0 + 0 \times \Delta y + 1 \times \Delta z \\ \dots & \dots & \dots \\ x_p & y_0 + 0 \times \Delta y + j \times \Delta z & z_0 + 0 \times \Delta y + j \times \Delta z \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n-1} & y_0 + i \times \Delta y + j \times \Delta z & z_0 + k \times \Delta z \end{bmatrix} =$$

$$P^T = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 - x_0 & 0 \times y + 1 \times d & 0 \times z \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_p - x_0 & 0 \times y + j \times d & 0 \times z \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n-1} - x_0 & i \times y + j \times d & k \times z \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中, i, j 和 k 分别为同一平面靶标上平行直线的选取个数, 平面靶标分别在 y_w 和 z_w 方向上的移动次数, d, y 和 z 分别表示平行直线和靶标在 y_w 和 z_w 方向移动的距离, P 为置换矩阵。

从公式(19)可知, 系数矩阵的特性主要取决于标定点之间的分布, 因此, 可以以系数矩阵 A 的条件数为参考依据来合理移动二维工作台求得多组标定点。在实际实验的过程中, 为了保证法向量受到扰动的影响最小, 应在测量视场限制条件下尽可能地扩大标定点之间的位置(即在视场满足的条件下扩大 y 和 z 的距离), 保证用于求解法向量标定点数据的有效性。

若取 $A = e \cdot A$, 其中 $e = 0, -1$, 代入线性方程组, 可得线性方程组的相对误差为^[9]

$$\frac{n}{n} = \frac{|e|}{|1+e|}. \quad (20)$$

从该式可知, 相对误差 e 与系数矩阵 A 的条件数无关。对于任意非奇异矩阵 A , 该线性方程组的相对误差取决于系数矩阵 A 的相对扰动量。

因此, 可根据系统的测量误差(最大相对误差)要求, 根据公式(15)确定光平面标定参数(法向量)相对扰动的精度要求, 从而根据公式(20)确定标定点的相对误差扰动要求。

由 3.1 节分析可知, 满足系统在 1 000 mm 的测量距离上获得 ± 0.5 mm 的测量精度要求的情况下, 法向量的标定误差满足式(16)。为了得到该精度的测量系统, 光平面标定点的相对扰动满足

$$\begin{cases} \frac{n}{n} = \frac{|e|}{|1+e|} < 10^{-3} \\ 0 < |e| < 10^{-3} \end{cases}. \quad (21)$$

当用于求解光平面法向量的标定点的相对扰动满足式(21)时, 可得到满足式(16)的法向量标定精度, 即可在 1 000 mm 的测量距离上获得 ± 0.5 mm 以内的测量精度。

3.3 标定点误差分析

由系统标定原理可知, 标定点获取是结构光

系统标定过程的关键。从 2.2 光平面标定原理分析可知, 标定点是共线特征点的拟合直线与平面靶标测量直线的交点, 可借助辅助特征点间接获取。标定点图像坐标提取是在图像处理和直线拟合的基础上得到的。如图 2 共线特征点的拟合直线方程(如直线 L_{11}) 和光平面测量直线(如直线 l_1) 分别为 $k_1 u_r + v_r = b_1$ 和 $k_2 u_r + v_r = b_2$, 特征点图像坐标 (u_r, v_r) 满足:

$$\begin{bmatrix} k_1 & 1 \\ k_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

为了避免引入数值计算带来的误差, 要保证两组直线斜率满足如下要求:

$$\begin{cases} 0 < |k_1| < \\ 0 < |k_2| < \\ \begin{vmatrix} k_1 & 1 \\ k_2 & 1 \end{vmatrix} \neq 0 \end{cases}. \quad (23)$$

因此, 在实验过程中共线特征点的拟合直线和光平面的夹角满足 $0^\circ < < 90^\circ$ (即出现直线垂直和水平的情况), 本文实验取 θ 约为 30° 。

对影响标定点精度的各因素进行了分析。由式(7)可得, 利用交比不变计算标定的误差主要来源于特征点的图像提取误差和特征点的三维坐标提取误差。这里对单次交比不变计算标定点误差进行分析。

假设图像提取过程中所引起的误差相同, 特征点三维坐标提取误差相同, 且考虑到 a_1, a_2, a_3 和 A_1, A_2, A_3 数据对式(7)的对称性, 则对式(7)的各误差源的一阶泰勒展开可近似表示为

$$R_1 = \left\{ \frac{\partial R_1}{\partial a_1} + \frac{\partial R_1}{\partial a_2} + \frac{\partial R_1}{\partial a_3} \right\}_1 + \frac{\partial R_1}{\partial n} \cdot 2 + \left\{ \frac{\partial R_1}{\partial A_1} + \frac{\partial R_1}{\partial A_2} + \frac{\partial R_1}{\partial A_3} \right\}_3. \quad (24)$$

其中, \cdot_1, \cdot_2 和 \cdot_3 分别为标定过程中特征点的图像提取误差, 最小二乘意义下直线交点的提取误差和特征点三维坐标提取误差。

从式(24)可得出, 提高图像提取精度和靶标上特征点的三维坐标精度可以提高标定点的计算精度。最小二乘意义下直线交点的提取误差 \cdot_2 远小于图像提取误差 \cdot_1 ^[14]。因此, 下面分析主要关注特征点的图像提取误差和特征点三维坐标提取误差误差对标定点求解误差的影响。

为了克服单次测量所带来的偶然误差对计算结果的影响,本文借助式(7)对多次计算的结果求其均值作为标定点的坐标值,如式(8)。

假设共线特征点图像坐标和世界坐标相互独立,且服从高斯分布,误差为加性高斯函数。根据蒙特卡罗统计方法,分析以上所分析的误差分布^[15]。取标定三维坐标为(-8.40, -13.79, 897.40),共线的特征点的图像坐标分布为(230, 538.04)、(341, 520.98)、(451.02, 502.99)、(559.98, 486)、(769.01, 452.02)、(871, 436.02)、(970.99, 420.01)、(1 069, 404.99)和(1 165, 389.99),共线特征点的三维坐标为(-122.23, 4.84, 864.21)、(-93.77, 0.18, 872.51)、(-65.31, -4.47, 880.81)、(-36.86, -9.13, 889.11)、(20.05, -18.44, 905.70)、(48.50, -23.10, 913.99)、(76.97, -27.76, 922.29)、(105.42, -32.41, 930.60)和(133.88, -37.07, 938.89)。

在 $a_1 \sim a_9$ 的图像坐标中加入相应的高斯分布误差(图像坐标的提取绝对误差为 $| \delta_1 | \in [0, 1.5]$ pixels)。改变不同的图像提取误差,根据公式(6)和(7)计算 R 的世界坐标,重复计算 N 次(取 $N = 1\ 000$)。考察图像提取误差 δ_1 对标定世界坐标求解误差的影响,如图 5 所示。

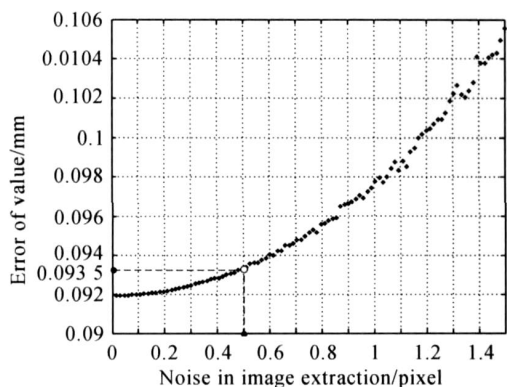


图 5 图像提取误差对求解点坐标的影响

Fig. 5 Effect of image extraction error on calibration points

从实验分析可看出,点坐标误差随着特征点图像提取误差大小同方向变化。因此减少靶标图像特征点的提取误差,可相应地降低标定求解误差 R_1 。当图像提取误差 δ_1 在 $(-0.5, +0.5)$

pixels 以内时,所引起的标定点计算误差约在 $(-0.093\ 5, +0.093\ 5)$ mm。

在特征点 $A_1 \sim A_9$ 的世界坐标上加入相应的高斯分布误差(三维坐标的获取绝对误差为 $| \delta_3 | \in [0, 0.5]$ mm)。改变三维坐标获取绝对误差,计算 R 的世界坐标,重复计算 N 次(取 $N = 1\ 000$)。特征点坐标获取误差 δ_3 对点坐标求解误差的影响如图 6 所示。

如图 6 所示,特征点世界坐标误差对交比不变原理求解点坐标的影响近似为线性,减小标定点世界坐标的误差可以降低标定点求解的误差。当特征点世界坐标提取偏差为 0.05 mm(即 $\delta_3 \in (-0.05, +0.05)$ mm)时,标定点计算误差为 $(-0.092, +0.092)$ mm。

综合考虑特征点的图像提取误差 δ_1 和世界坐标获取误差 δ_3 的情况下,标定点的计算误差在 $(-0.185\ 5, +0.185\ 5)$ mm 以内。也就是说,在不考虑摄像机标定误差的情况下,当特征点的图像提取误差在 $(-0.5, 0.5)$ pixels 以内,世界坐标提取误差在 $(-0.05, 0.05)$ mm 以内,标定点的计算误差 R_1 约为 $(-0.2, +0.2)$ mm 以内。使用所得到的标定点进行光平面参数标定,可得到在 1 000 mm 的测量距离上获得 ± 0.5 mm 以内的测量精度。

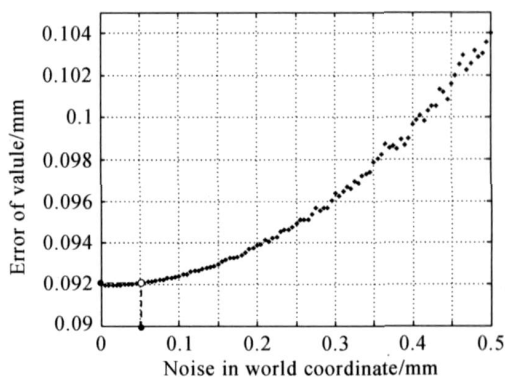


图 6 特征点世界坐标误差对求解点坐标的影响

Fig. 6 Effect of 3D extraction error on calibration points

4 实验验证

本实验采用 EPSON EMP-821 LCD 投影机

和 CoolSNAP cf CCD 摄像机组成的结构光测量系统,摄像机和投影仪的分辨率分别为 1 040 pixels \times 1 392 pixels (像素尺寸为 4.65 μm \times 4.65 μm) 和 1 024 pixels \times 768 pixels。测量距离在 1 000mm 以内,测量范围为 40 cm \times 30 cm \times 20 cm。

在特征点的图像提取精度为 (-0.5, 0.5) pixels,世界坐标精度为 (-0.05, 0.05) mm 的标定样本精度的情况下,根据 2.2 节标定原理,估计系统的标定参数,利用所得到的标定参数,根据 2.1 节的测量建模在 900 mm 的测量距离附近对不同位置的平面物体进行测量,测量数据统计结果如表 1 所示。该实验中所使用的单次测量样本约为 23 500 个,3 次测量过程共用的测量样本约为 70 000 个。表 1 中,单次测量值 d 为单次测量的统计均值,误差 $|d|$ 为单次测量的统计均值误差,相对误差为测量误差均值与测量距离的比值,而均方根误差 RMS 为整体实验结果的统计结果。

参考文献:

- [1] MOUADDIB E B, SALVI J. Recent progress in structured light in order to solve the correspondence problem in stereo vision[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997, 1: 130-136.
- [2] 祝世平, 强锡富. 工件特征点三维坐标视觉测量方法综述[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(2): 192-197.
ZHU SH P, QIAN X F. Analysis of 3D coordinate vision measuring methods with feature points and workpiece[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 192-197. (in Chinese)
- [3] 田庆国, 葛宝臻, 杜朴, 等. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(1): 84-88.
TIAN Q G, GE B ZH, DU P, *et al.*. Measuring of human figure size based on laser 3D scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 84-88. (in Chinese)
- [4] HU YN H D Q. Calibration of a structured light system: A projective approach[C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997: 225-230.

表 1 结构光系统测量精度评价实验结果

平面间距	测量值	误差	测量距离	相对误差
$d(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	$D(\text{mm})$	$d/D(10^{-3})$
10	9.917 9	0.082 1	890	0.092 25
20	19.896 7	0.103 3	900	0.114 78
30	29.881 4	0.118 6	910	0.130 33
RMS(mm)			0.333 4	

5 结 论

本文在光平面测量模型和交比不变原理进行结构光标定的基础上,对结构光测量系统的误差进行了定量分析。利用误差传递和矩阵扰动理论分别对系统的测量误差和光平面标定误差进行了误差传递分析。给出了满足在 1 000 mm 的测量距离上获得 ± 0.5 mm 的测量精度时,各标定参数所需满足的精度要求,以及标定样本的精度要求,并通过实测实验数据验证了分析结果的有效性。

- [5] 徐光祐, 刘立峰, 曾建超, 等. 一种新的基于结构光的三维视觉系统标定方法[J]. *计算机学报*, 1995, 18(06): 450-456.
XU G Y, LIU L F, ZENG J CH, *et al.*. A new method of calibration in 3D vision system based on structure-light[J]. *Chinese J. Computers*, 1995, 18(6): 450-456. (in Chinese)
- [6] ZHANG G, WEI Z. A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(5): 373-380.
- [7] ZHOU F, ZHANG G, JIANG J. Constructing feature points for calibrating a structured light vision sensor by viewing a plane from unknown orientations[J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2005, 43(10): 1056-1070.
- [8] 周富强, 刘珂, 张广军. 交比不变获取标定点的不确定性分析[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(12): 1524-1528.
ZHOU F Q, LIU K, ZHANG G J. Uncertainty analysis of constructing calibration points based on invariance of cross ratio[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(12): 1524-1528. (in Chinese)
- [9] 刘珂, 周富强, 张广军. 线结构光传感器标定不确

- 定度估计[J]. 光电工程, 2006, 33(8):79-84.
LIU K, ZHOU F Q, ZHANG G J. Estimation of uncertainty in calibrating line structured light sensor [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2006, 33(8):79-84. (in Chinese)
- [10] 贺忠海, 王宝光. 线结构光传感器的模型及成像公式[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3):269-272.
HE ZH H, WANG B G. Model and imaging formula of the line structured light sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3):269-272. (in Chinese)
- [11] LI Y, ZHANG M, YANG B, et al.. Noise analysis in camera calibration [C]. 2001 *International conference on Infotech and Infonet*. Beijing: ICII 2001, 533:536-542.
- [12] 孙继广. 矩阵扰动分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1987:321-324.
SUN J G. *Matrix disturbance analysis* [M]. Beijing: Science Press, 1987:321-324. (in Chinese)
- [13] MA Y BANK S J. Probabilistic analysis of the application of the cross ratio to model based vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, 16(1):5-33.
- [14] HEATH M T. *Scientific computing: an introductory survey* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] QIAN S S. *Uncertainty of measurement processing and expression of experiment* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:80-82.

作者简介:



许 丽(1978 -),女,河南郑州人,博士研究生,主要从事图像处理、视觉检测、三维建模等方面的研究。E-mail: xuli_yh@shu.edu.cn

导师简介:



张之江(1968 -),男,上海人,博士,博士生导师,主要从事图像处理、视觉检测、数字全息和三维显示等方面的研究。E-mail: zjzhang@shu.edu.cn

下期预告

ICF 束靶耦合监测方法及其精度分析

刘炳国,刘国栋,浦昭邦,庄志涛,陈凤东

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001)

介绍了几种束靶耦合监测方法,包括靶室外直接监测,靶室内直接监测,靶室内基于共轭原理的传感器监测等 3 种方法。分析了各方法的优缺点,并重点对基于光学共轭原理的传感器的耦合精度进行了研究,分析了图像测量误差,CCD 保护玻璃引入的误差,调焦导轨运动时引入误差及传感器标定装校时引入的误差。经过实验测试及精度分析,共轭式传感器引入的束靶耦合误差为 ± 10 mm。采用这种基于光学共轭原理的传感器,可以实现大型激光驱动装置的快速、高精度束靶耦合。