

doi:10.3788/gzxb20134211.1334

一字线结构光三维测量模型的新型标定方法

李冠楠¹, 谭庆昌¹, 寇莹¹, 张宇鹏²

(1 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:建立了一字线结构光的机器视觉测量模型,并提出了基于改进的 CCD 相机标定法的结构光平面精确标定方法.根据结构光沿光平面法线方向的能量分布规律,采用高斯拟合法提取图像中光条中心点的亚像素坐标.标定时,在自由移动的平面靶标上建立局部世界坐标系,利用结构光光条与标靶的共面性,将通过相机标定参量计算得到的光条中心点的局部世界坐标转换到相机坐标系中.利用光平面上求得的标定点的三维坐标,实现了一字线结构光平面在相机坐标系下的优化估计.该方法考虑了影响测量模型准确度的因素,可以获取大量的用于标定光平面参量的标定点坐标.标准量块和轴颈的测量结果表明,该方法在实际应用中具有较高的准确度.

关键词:结构光;平面靶标;标定;相机畸变;视觉测量

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)11-1334-6

A New Method for Calibrating Line Structured-light 3D Measurement Model

LI Guan-nan¹, TAN Qing-chang¹, KOU Ying¹, ZHANG Yu-peng²

(1 College of mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A machine vision measurement model of line structured-light was established. Based on the improved camera calibration method, an accurate calibration method of structured-light plane was proposed. According to the distribution of the structured-light's energy along the normal direction of the light's plane, Gauss fitting method was used to extract the sub-pixel coordinates of the light stripe's center point on the image. In the calibration, the local world coordinate system was established on the surface of the free-moving planar target. Then, the local world coordinates of the stripe's center point, which were obtained by the parameters of the camera calibration, were translated into the camera coordinate system. Using the obtained calibration points on the light plane, the plane of the structured-light was estimated in the camera coordinate system. The factors that would affect the precision of the measurement model were fully considered in this method, which could achieve a large number of calibration points. From the measurement of standard gauge block and shaft diameter, this method has high precision in practice.

Key words: Structured-light; Planar target; Calibration; Lens distortion; Machine vision measurement

0 引言

结构光视觉测量是非接触测量技术中一种重要

的测量方法^[1-3],具有大量程、速度快、系统柔性好和准确度适中优点,在工业在线测量领域得到了广泛的应用^[4-5].典型的结构光视觉测量系统主要由激

基金项目:吉林省科技发展规划(No. 20110304)资助

第一作者:李冠楠(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为结构光机器视觉测量. Email: lign09@mails.jlu.edu.cn

导师(通讯作者):谭庆昌(1957-),男,教授,博士,主要研究方向为机器视觉测量、结构光测量及应变散斑测量技术. Email: tanqc@jlu.edu.cn

收稿日期:2013-05-07;录用日期:2013-08-08

光器、CCD 相机和镜头等元件组成. 测量时, 激光器将图案投射到被测物体上, 利用 CCD 相机获取其图像, 经过图像处理得到目标点的亚像素坐标, 根据测量系统的模型, 就可以得到物体表面轮廓的三维信息^[6].

根据激光器的类型, 结构光视觉测量可分为点结构光(包括点阵结构光)和线结构光(包括线阵结构光)两种方法^[7]. 线结构光测量法具有光条图像易检测、测量装置简便、测量效率高等优点, 在实际测量中比点结构光测量法拥有更大的应用前景. 一字线结构光测量系统是线结构光测量法中最基础的一种测量系统, 也是目前应用最广的一种结构光测量系统, 其测量模型的标定分为相机内参及畸变系数的标定和结构光平面参量的标定两部分. Zhang^[8]提出的基于平面的两步标定法, 具有较高的标定准确度, 解决了相机内参及畸变系数的现场标定问题.

结构光平面的标定也一直受到许多学者的关注, 一些新的标定方法被相继提出. R. Dewar^[9]提出的拉丝标定法和段发阶等^[10]提出的齿形标定法是对此类问题较早期的研究. 这两种方法需要借助昂贵的外部设备, 且都存在获取的光平面标定点准确度不够且数目较少等问题. Huynh^[11]提出了利用交比不变原理获取光平面标定点的方法. 该方法需要两个相互垂直的平面构成的高准确度三维靶标, 加工难度大且容易产生遮挡. Zhou^[12]等提出了基于平面靶标的线结构光模型参量的标定方法. 该方法要求平面靶标上具有至少三个共线的已知特征点, 标定时只能获取与特征点所在行(或列)相交的标定点, 获取标定点的效率较低. 孙军华等^[13]提出了基于单应性矩阵的结构光视觉传感器通用现场标定法. 该方法认为靶标平面上的标定点与其所成图像成线性关系, 没有考虑畸变对模型的影响, 获得的标定点准确度有限.

针对现有结构光平面标定方法中存在的获取标定点效率低、标定准确度有限等问题, 本文提出了一种新的基于改进 CCD 相机平面标定法的结构光平面标定方法. 该方法使用高斯拟合提取光条中心点的亚像素坐标, 根据经典的相机成像模型, 确定与靶标共面的光条中心点在相机坐标系中的空间位置, 应用这些标定点的三维坐标计算结构光平面的参量.

1 光条中心点的提取

为了标定光平面, 首先要提取光条中心点的亚像素坐标. 图 1 为一字线结构光投射到黑色打印纸靶标平面上的图像灰度沿光条法线方向的分布. 从

图中可以看出, 像素点的灰度沿光条法线方向呈高斯函数分布, 这也符合结构光从光条中心向两侧高斯递减的能量分布形式. 因此, 本文选用高斯模型对图像的灰度分布进行最小二乘拟合.

在光条图像上, 首先应用 Hough 变换^[14]的方法确定光条的法线方向. 在光条法线方向上, 用于拟合的目标点 (x', y') 并不一定位于整像素位置, 因此需要使用插值方法计算该点的灰度值 $g(x', y')$, 本文选用双线性插值法^[15]. 根据其相邻的整像素点 (x, y) 、 $(x, y+1)$ 、 $(x+1, y)$ 、 $(x+1, y+1)$ 的灰度值, 双线性插值法的计算公式为

$$g(x', y') = (1 - \Delta x)(1 - \Delta y)g(x, y) + \Delta y(1 - \Delta x)g(x, y + 1) + \Delta x(1 - \Delta y)g(x + 1, y) + \Delta x \Delta y g(x + 1, y + 1) \quad (1)$$

式中: $\Delta x = x' - x$, $\Delta y = y' - y$, 当点 (x', y') 正好为整像素点时 $\Delta x = 0$, $\Delta y = 0$.

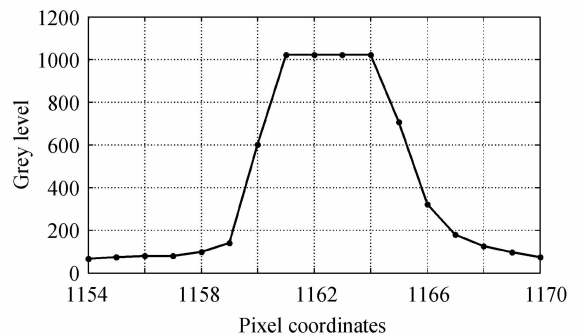


图 1 一字线结构光图像灰度分布

Fig. 1 Gray level distribution of line structured-light

设目标窗口区域的中心点坐标为 (x_0, y_0) , 光条法线方向 $\mathbf{s} = (s_x, s_y)$, 且 $\|\mathbf{s}\| = 1$, 则窗口内任意一点的灰度可以用高斯模型表示为

$$f(x_0 + t_i \cdot s_x, y_0 + t_i \cdot s_y) = a \cdot e^{-(t_i - b)^2 / c} \quad (2)$$

式中, t 为待求光条中心点. 到点 (x_0, y_0) 的距离, a 、 b 、 c 为高斯函数的系数. 通过对式(2)两边取自然对数, 可以根据同一法线上的 m 个点 ($m \geq 3$) 的灰度值得到参量的最小二乘解.

从图 1 可以看出, 光条中心处的像素点灰度值达到了图像灰度的最大值, 即中心处出现了过饱和现象. 这些过饱和点不但对高斯模型拟合提供不了信息, 而且有可能对光条中心点的提取准确度产生影响. 因此, 在拟合前应在目标点集中剔除过饱和点.

2 一字线结构光测量模型

一字线结构光的数学模型如图 2. $O_w X_w Y_w Z_w$ 为局部世界坐标系, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $O_x y$ 为图像坐标系, $O_u uv$ 为像素为坐标系. 结构光平面与靶标平面交线上任意一点 P 在 $O_w X_w Y_w Z_w$ 下的

坐标为 $\mathbf{P}_w^i = (X_w^i, Y_w^i, Z_w^i)^T$, 在 $O_c X_c Y_c Z_c$ 下的坐标为 $\mathbf{P}_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$. 点 P 在图像平面上的理想投影点为 P' , 在 Oxy 下的坐标为 $\mathbf{P}_u = (x_u, y_u)^T$; 该点在图像平面上的实际投影点为 P'' , 在 Oxy 下的坐标为 $\mathbf{P}_d = (x_d, y_d)^T$, 在 $O_0 uv$ 下的坐标为 $\mathbf{P}_f = (u_f, v_f)^T$.

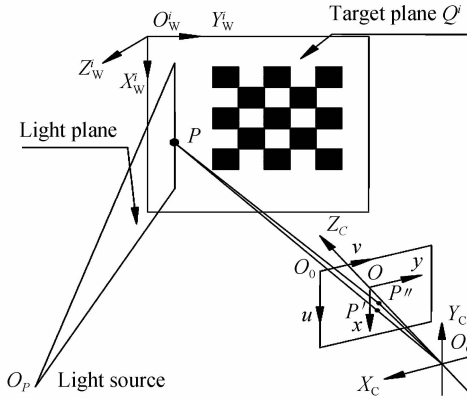


图2 一字线结构光成像模型

Fig. 2 Imaging model of line structured-light

采用平面靶标进行标定时, 通常将 $O_w^i X_w^i Y_w^i Z_w^i$ 建立在靶平面 Q^i 上, 此时 P 的 $Z_w^i = 0$. 大多数的相机模型都是基于小孔成像模型和畸变模型而建立的. 根据该模型, 靶标上特征点坐标与其对应像素坐标之间的转化关系如表 1.

表 1 相机成像模型坐标变换

Table 1 Coordinate transformation of camera model

No.	Formula	Transformation
(3)	$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_{1i} \ \mathbf{r}_{2i} \ \mathbf{T}_i] \begin{bmatrix} X_w^i \\ Y_w^i \\ 1 \end{bmatrix}$	From world coordinates to camera coordinates, by rigid transformation
(4)	$\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix}$	From camera coordinates to image coordinates, by triangle similarity
(5)	$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix}$	Introduce the distortion model, where, $r = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$
(6)	$\begin{bmatrix} u_f \\ v_f \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix}$	From image coordinates to pixel coordinates, by interior parameters \mathbf{A}

表 1 给出了上述模型实现点 P 从 $O_w^i X_w^i Y_w^i Z_w^i$ 到 $O_c X_c Y_c Z_c$, 再到 Oxy , 最后到 $O_0 uv$ 的坐标转换过程. 表中, $\mathbf{r}_{1i}, \mathbf{r}_{2i}$ 是旋转矩阵 \mathbf{R}_i 的第 1 列和第 2 列, \mathbf{T}_i 是平移向量, k_1, k_2 是径向畸变系数, \mathbf{A} 是相机的内参矩阵. 在应用该模型求解点 P 在 $O_c X_c Y_c Z_c$ 下的坐标时, 需要在已知角点的实际坐标的情况下求解角点理想坐标, 如果按照表 1 中式 (5) 进行畸变修正, 就要求解二元高次方程组, 这对

标定准确度和计算时间都会产生影响. 因此, 在不降低标定准确度的情况下, 本文修改了畸变模型的投影方向. 为了更好地修正畸变, 在保留径向畸变模型的基础上进一步考虑两项切向畸变. 最终, 采用的畸变模型为

$$\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_d y_d + p_2 (r^2 + 2x_d^2) \\ p_1 (r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$, p_1, p_2 是切向畸变系数.

式 (7) 可以通过二维的棋盘格标定板进行标定. 标定板在 Q^i 位置时, 设角点个数为 m , 则可以建立如下目标函数

$$\min \sum_{j=1}^m \left\| \mathbf{P}_{W_j}^i - \hat{\mathbf{P}}_{W_j}^i(\mathbf{A}, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{r}_{1i}, \mathbf{r}_{2i}, \mathbf{T}_i, P_{fj}) \right\| \quad (8)$$

式中, $\hat{\mathbf{P}}_{W_j}^i(\mathbf{A}, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{r}_{1i}, \mathbf{r}_{2i}, \mathbf{T}_i, P_{fj})$ 是角点检测得到的像素坐标点 \mathbf{P}_{fj} 通过表 1 的非线性成像模型投影得到的世界坐标, $\mathbf{P}_{W_j}^i$ 是理想的世界坐标. 这个多参量非线性优化问题采用 Levenberg-Marquardt 法^[16] 进行求解, 参量的初值应用文献 [8] 的方法计算得到.

在标定得到相机内参 \mathbf{A} 和畸变系数 k_1, k_2, p_1, p_2 后, 根据标靶在 Q^i 位置时的外参 $\mathbf{r}_{1i}, \mathbf{r}_{2i}$ 和 \mathbf{T}_i , 将光条中心点 P 在图像平面上的亚像素坐标 \mathbf{P}_f 带入到表 1 中的式 (6), 再依次通过表 1 中式 (5)、(4)、(3) 的运算, 即可计算出光条中心点 P 在 $O_c X_c Y_c Z_c$ 下的坐标 \mathbf{P}_c . 根据上述方法, 对于每个固定位置的平面靶标, 都可以获得光条中心线上若干点的坐标 \mathbf{P}_c . 改变靶标的位置, 重新对外参进行标定, 通过上述操作, 就能确定一字线结构光光平面与不同位置的靶标交线上光条中心点的位置.

使用采集到的光平面上的几组空间点, 便可以求解光平面方程, 设待求平面在 $O_c X_c Y_c Z_c$ 下的方程为

$$b_1 X_c + b_2 Y_c + b_3 Z_c + 1 = 0 \quad (9)$$

则可以建立如下目标函数

$$\min \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n \left\| b_1 X_{Ck}^i + b_2 Y_{Ck}^i + b_3 Z_{Ck}^i + 1 \right\|^2 \quad (10)$$

式中, l 为平面靶标的摆放次数, n 为靶标在第 i 个位置时光条中心点的数目, $\mathbf{P}_{Ck}^i = (X_{Ck}^i, Y_{Ck}^i, Z_{Ck}^i)^T$ 为平面靶标在第 i 个位置第 k 个光条中心点在 $O_c X_c Y_c Z_c$ 下的坐标. 根据最小二乘原理^[10], 解得光平面方程的系数为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n X_{Ck}^i & \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n X_{Ck}^i Y_{Ck}^i & \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n X_{Ck}^i Z_{Ck}^i \\ \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n X_{Ck}^i Y_{Ck}^i & \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n Y_{Ck}^i & \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n Y_{Ck}^i Z_{Ck}^i \\ \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n X_{Ck}^i Z_{Ck}^i & \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n Y_{Ck}^i Z_{Ck}^i & \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n Z_{Ck}^i \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n X_{Ck}^i \\ \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n Y_{Ck}^i \\ \sum_{i=1k=1}^l \sum_{j=1}^n Z_{Ck}^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

完成相机参量和结构光参量的标定之后,通过式(4)、(6)确定光条中心点与光心连线 O_cP 在 $O_cX_cY_cZ_c$ 下的直线方程,联立该直线方程与结构光平面方程即可求得二者交点的三维坐标。

3 实验

实验所用硬件及其主要参量如表 2。标定时,设计如图 3 所示的平面标靶装置,将标定板和贴有黑色打印纸的玻璃平面固定在玻璃框的同一平面上,这样保证了光条打到黑色打印纸上的图案与标定板棋盘格共面。测量系统的标定分为两个部分:首先,采集平面标定板在被测物体附近不同姿态下的图像 10 幅,应用表 1 中改进的经典平面标定法计算相机内参及畸变系数;其次,采集不同位置处标定板和光

条的共面图像(如图 4)5 幅,应用本文方法计算结构光平面参量,标定结果如表 3。

表 2 实验设备及主要参量

Table 2 Experimental equipment and their parameters

Equipment	Model No.	Main performance
CCD camera	MER-125-30UM	Resolution: 1 292×964
Lens	M0814-MP	Focal length: 25 mm
Line projector	LH650-80-3	Wavelength: 650 nm
Model plane	CBC75mm-2.0	Grid size: 2 mm

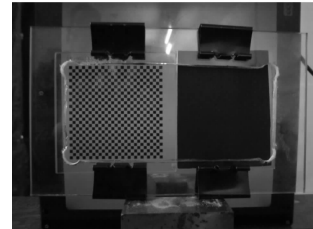


图 3 平面标靶装置

Fig. 3 The device of plane target

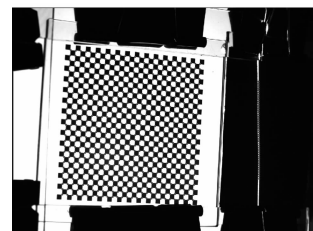


图 4 标定板和光条的共面图像

Fig. 4 Coplanar image of model plane and structured-light strip

表 3 标定结果

Table 3 Results of calibration

Camera parameters	Structured-light plane parameters
Interior parameters: $A = \begin{bmatrix} 6\ 983.02 & 0.59 & 641.75 \\ 0 & 6\ 983.29 & 493.01 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	Experiment 3.1: Structured-light plane 1: $10^{-3} \times (3.875x + 0.073y + 2.18z) = 1$ Structured-light plane 2: $10^{-3} \times (5.393x + 0.058y + 2.011z) = 1$
Distortion coefficients: $k_1 = 0.180\ 3, k_2 = 3.250\ 8$ $p_1 = 0.001\ 2, p_2 = 0.000\ 5$	Experiment 3.2: $10^{-3} \times (5.267x + 0.051y + 2.169z) = 1$

3.1 标准量块尺寸测量

为了评价本文提出的一字线结构光测量模型的准确度,应用该模型对一级准确度量块的尺寸进行测量,测量装置的摆放如图 5。保持相机和量块的位置不动,在被测量块上投射位置不同的两条一字线光条图案,应用表 3 中的标定结果分别计算两条光条上被测点在相机坐标系下的坐标,用量块 A 和 B 表面的被测点三维坐标分别拟合两平面在相机坐标系下的方程,两平面间的距离即为量块 A 的厚度。本实验对 5 种尺寸的量块进行测量,结果如表 4,从表中可以看出,本文方法测量结果的最大误差为 0.014 5 mm。

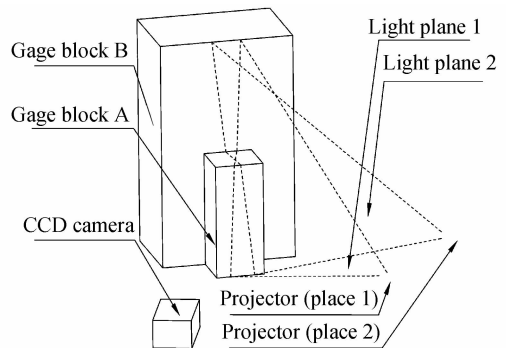


图 5 量块尺寸测量方法

Fig. 5 Method of measuring gauge block

表4 量块测量结果(单位:mm)

Table 4 Measurement results of gauge blocks(Unit: mm)

Gage block size M_1	Measurement by the proposed method M_2	Absolute error $ M_1 - M_2 $
2	2.014 5	0.014 5
4	3.994 8	0.005 2
8	8.011 1	0.011 1
10	10.012 7	0.012 7
20	20.013 4	0.013 4

3.2 轴径测量

实际上,量块尺寸的测量是一个二维测量问题,并不需要应用结构光三维测量系统,因此实验 3.1 只能从理论上验证本文标定方法的准确度.本实验将一字线结构光测量系统应用于轴径的三维测量中,并将测量结果与千分尺测量结果进行对比,以此评价本文标定方法在实际测量中的准确度.实验现场如图 6.

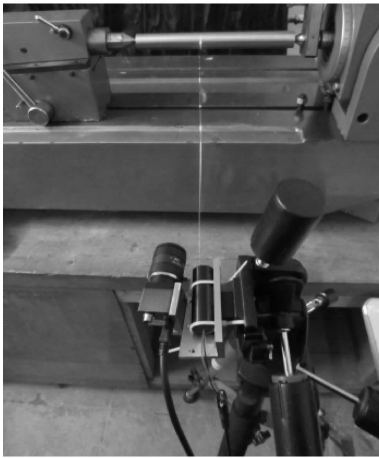


图6 实验装置

Fig. 6 Experimental equipment

测量时,首先通过本文模型计算得到被测轴表面光条中心点的三维坐标;然后,将这些点投影到光平面上;最后,在光平面上应用投影点拟合二维椭圆方程,椭圆的短轴长度即为被测轴的直径.实验对 4 种不同的轴径进行测量,测量结果见表 5.从表 5 可以看出,本文测量结果与千分尺测量结果的最大偏差为 0.015 6 mm.

表5 轴径测量结果(单位:mm)

Table 5 Measurement results of shaft diameters(Unit: mm)

Measurement by micrometer M_1	Measurement by the proposed method M_2	Absolute error $ M_1 - M_2 $
30.459	30.454 0	0.005 0
32.461	32.468 3	0.007 3
34.550	34.563 8	0.013 8
38.077	38.092 6	0.015 6

4 结论

本文建立了一字线结构光测量系统的数学模

型,提出了基于改进的 CCD 相机平面标定法的结构光参量标定方法,并将 CCD 相机标定和结构光参量标定统一在一起.该方法在提取光条中心点时,不受中心点位置的限制,提高了标定点的获取效率.在模型中考虑了光条中心点畸变对标定准确度的影响,提高了标定准确度.对结构光平面参量的标定,不需要增加额外的辅助设备,可以用于结构光视觉测量模型的现场标定.实验结果表明,该方法在实际测量中具有较高的准确度.

参考文献

- [1] GUI Jin-bin, LI Jun-chang, SONG Qing-he, *et al.* Color digital holographic high quality reconstruction of large size object[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1409-1412. 桂进斌, 李俊昌, 宋庆和, 等. 大尺寸物光波面彩色数字全息高质量重建研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1409-1412.
- [2] CHEN Liang-feng, LI Yong. Rapid subsequence match in pseudo random sequence projection based three-dimensional measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1702-1705. 陈良锋, 李勇. 伪随机序列投影三维测量中的快速子序列匹配[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1702-1705.
- [3] YANG Chu-ping, WENG Jia-wen, LI Hai, *et al.* The phase demodulation using a single deformed fringe pattern by wavelet analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1211-1216. 杨初平, 翁嘉文, 李海, 等. 单幅条纹图相位解调的小波分析方法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1211-1216.
- [4] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can. Dynamic 3-D shape measurement method: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2): 191-204.
- [5] DING Ling-yan, WU Yu-lie, LI Sheng-yi. Surface measurement for long focal length mirror with phase retrieval [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1431-1437. 丁凌艳, 吴宇列, 李胜怡. 相位恢复测量长焦距镜面[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1431-1437.
- [6] LIU Ning, LU Rong-sheng, XIA Rui-xue, *et al.* A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 179-184. 刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 179-184.
- [7] ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. New method for calibrating cross structured-light sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(11): 52-56. 周富强, 张广军. 标定十字结构光传感器的新方法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(11): 52-56.
- [8] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1333.
- [9] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate systems [C]. *Robots and Vision' 88 Conference Proceedings*, 1988: 5-13.
- [10] DUAN Fa-jie, LIU Feng-mei, YE Sheng-hua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, **21**(1): 108-110. 段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参

- 量标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2000, **21**(1): 108-110.
- [11] HUYNH D Q. Calibration a structured light stripe system: A novel approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, **33**(1): 73-86.
- [12] ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**(1): 59-67.
- [13] SUN Jun-hua, ZHANG Guang-jun, LIU Qian-zhe, et al. Universal method for calibrating structured-light vision sensor on the spot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3): 174-177.
- 孙军华, 张广军, 刘谦哲, 等. 结构光视觉传感器通用现场标定方法[J]. 机械工程学报, 2009, **45**(3): 174-177.
- [14] DUDA R O, HART P E. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1971, **15**(1): 11-15.
- [15] 张韵华, 奚梅成, 陈长松. 数值计算方法和算法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [16] MORE J J. The levenberg-marquardt algorithm, implementation and theory[J]. *Numerical Analysis*, 1978, **630**(1): 105-116.