

超大尺度线结构光传感器现场标定技术

解则晓 刘静晓*

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 针对大尺寸三维物体的测量需求,提出了一种超大尺度的线结构光传感器标定方法。使用平面靶标定出摄像机内参数的初值,以相邻两控制点之间的距离为约束用LM优化算法对初值进行优化;采用准一维靶标进行结构光参数标定,提出了一种利用两行标记点求解控制点三维坐标的方法,该方法基于消隐点性质以及各控制点与标记点之间的几何约束。实验结果表明,所提出的标定方法和控制点三维坐标求解方法具有较高的精度和稳定性,且准一维靶标较平面靶标加工成本低、加工难度小、标定过程灵活方便,更适用于大尺度现场标定。

关键词 传感器;线结构光传感器;超大尺度标定;准一维靶标;消隐点

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1214001

Calibration Technology for Line Structured Light Sensor with Large Scale

Xie Zexiao Liu Jingxiao

Engineering College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract A calibration method for line structured light sensor with large scale is proposed for the requirement of large-size three-dimensional (3D) objects measurement. The initial values of camera intrinsic parameters are calibrated by planar target and optimized by Levenberg-Marquardt (LM) method based on the distance constrain between two adjacent control points. When calibrating structured light parameters using Quasi-one-dimensional target, a calculation method is proposed for solving the 3D coordinates of control points, which is based on the property of vanishing point and the geometric restrain between control points and coded points. The experimental results show that the proposed approach for calibrating the sensor and solving the 3D coordinates of control points can achieve good accuracy and stability, moreover, compared with the planar target, quasi-one-dimensional target has lower processing costs, can be used for calibration with more flexibility, and is more suitable for large scale field calibration.

Key words sensors; line structured light sensor; large-scale calibration; quasi-one-dimensional target; vanishing point

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.6910

1 引 言

线结构光传感器主要由摄像机和激光投射器组成,激光由激光投射器投射在待测物体表面并在摄像机像面上成像,通过摄像机内参数和结构光外参数并结合三角法测量原理即可求得被测点的空间坐标。线结构光传感器以其非接触、速度快和效率高等优点广泛应用于现代工业检测中^[1],而摄像机内参数和结构光参数的精确标定则是检测精度的关键所在。

为保证线结构光传感器大尺度现场测量的精度要求,结构光参数标定时靶标应较大比例地占据视场,传统的结构光传感器标定采用二维(2D)或三维(3D)靶标,随着靶标尺寸的增大,靶标加工难度增加,加工精

收稿日期: 2015-07-13; 收到修改稿日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(61171162)、教育部博士点专项基金(20110132110010)

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量等方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

*通信联系人。E-mail: jingxiaoliu123@163.com

度难以保证,且标定时操作不便。一维靶标以其加工成本低,加工精度高等优点而得到广泛研究。刘冲等^[2]采用多个相对位置固定的一维靶标标定结构光参数,可以保证标定的精度,但多个一维靶标的组合在大尺度现场标定时不够灵活方便;周富强等^[3]提出了一种使用单个一维靶标标定摄像机内参数和结构光参数的方法,满足了大尺度现场标定的要求,但单个一维靶标所含信息量少,且每次摆放只能获得一个光平面上的控制点,因此标定的精度受到一定制约。

为解决上述问题,本文提出一种超大尺度的线结构光标定方法。平面靶标在摄像机视场内移动,拍摄多幅图像标定出摄像机内参数,再利用准一维靶标标定结构光参数。平面靶标可以保证内参数标定的精度,准一维靶标灵活方便,可以满足大尺度现场标定的要求。针对本文结构光参数标定所采用的准一维靶标,提出了一种利用两行标记点求解控制点三维坐标的方法,相对传统交比不变的方法使用较少的标记点就可求解控制点坐标,标定过程更加灵活方便。

2 结构光传感器数学模型

结构光传感器的数学模型如图1所示, $o_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, OXY 为像面坐标系, ouw 为图像坐标系, $o_w x_w y_w z_w$ 为靶标坐标系。激光平面 π 上一点 P 在像面上的理想投影点为 p_i , 假设点 P 在摄像机坐标系下的坐标为 (x_c, y_c, z_c) , p_i 在图像坐标系下的坐标为 (u, v) , 则摄像机成像模型^[4]为

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fN_x & \gamma & u_0 \\ 0 & fN_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 ρ 为比例因子, (u_0, v_0) 是主点坐标, f 是摄像机焦距, N_x, N_y 为像平面上单位距离上的像素数, γ 描述 u, v 方向上的偏斜。

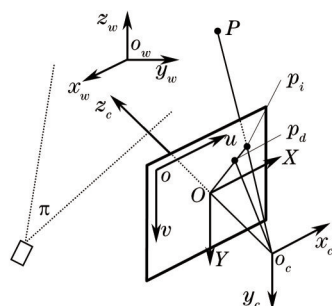


图1 结构光传感器数学模型

Fig.1 Structured light sensor mathematical model

对于镜头的畸变,为简化畸变模型,仅考虑一阶和二阶畸变。假设点 P 的理想成像点 p_i 在 OXY 坐标系下的坐标为 (x_i, y_i) , 点 P 的实际成像点 p_d 在 OXY 坐标系下的坐标为 (x_d, y_d) , 根据以下畸变模型^[5]对畸变进行校正:

$$\begin{cases} x_i = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x_d y_d + p_2(r^2 + 2x_d^2) \\ y_i = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \end{cases}, \quad (2)$$

式中 k_1, k_2 分别为一阶、二阶径向畸变系数, p_1, p_2 分别为一阶、二阶切向畸变系数, $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ 。

设激光平面 π 在摄像机坐标系下的方程为

$$z_c = Ax_c + By_c + C, \quad (3)$$

式中 A, B, C 为方程系数。

由(1)、(3)式可得结构光传感器数学模型为

$$\begin{cases} [A(u - u_0) - fN_x]x_c + [B(u - u_0) - \gamma]y_c + C(u - u_0) = 0 \\ [A(v - v_0)]x_c + [B(v - v_0) - fN_y]y_c + C(v - v_0) = 0 \\ z_c = Ax_c + By_c + C \end{cases}. \quad (4)$$

根据结构光传感器的数学模型,已知点 P 在图像坐标系下的坐标,就可求得点 P 的三维坐标。

摄像机内参数标定即为 $f, u_0, v_0, k_1, k_2, p_1, p_2$ 的求解过程,结构光外参数标定即为 A, B, C 的求解过程。

3 结构光传感器标定过程

标定过程用到两种靶标,采用编码点作为标记点,其中摄像机内参数标定采用图 2(a)所示的平面靶标,结构光参数标定时采用图 2(b)所示的准一维靶标。准一维靶标的两行编码点之间有一白色矩形区域,结构光参数标定时激光投射在该区域内。两种靶标的每行每列编码点相互平行,且编码点之间的距离已知。

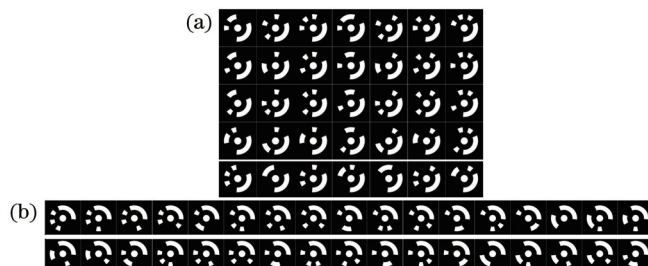


图 2 靶标示意图。(a) 平面靶标;(b) 准一维靶标

Fig.2 Target schematic. (a) Planar target; (b) quasi-one-dimensional target

用张正友的平面靶标法^[4]标定出摄像机内参数的初值,以相邻两控制点之间的距离为约束用 LM 优化算法^[6-7]对摄像机内参数进行优化。根据消隐点性质以及各编码点和控制点之间的几何关系,用优化后的摄像机内参数求解控制点在摄像机坐标系下的坐标,拟合得到光平面方程。

3.1 摄像机内参数标定

3.1.1 摄像机内参数求解

平面靶标在摄像机视场内自由移动多个位置,拍摄多幅靶标图像,提取编码点的圆心和码值信息^[8-9],利用编码点的码值对应可以得到编码点的世界坐标,用张正友的平面靶标法即可求得摄像机内参数的初值。

3.1.2 摄像机内参数的优化

考虑到线结构光传感器是单目系统,对不参与标定的靶标图像无法求出编码点圆心的三维坐标,因此以相邻两控制点之间的距离为约束,用 LM 法对摄像机焦距和结构光外参数同时进行优化。目标函数可表示为

$$F(f, A, B, C) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [D_i^2(f, A, B, C) - d_i^2]^2, \quad (5)$$

式中 $D_i(f, A, B, C)$ 为用标定结果反求的相邻两控制点之间的距离, d_i 为用交比不变所求相邻两控制点之间的距离, n 为距离的个数。其中光平面方程求解过程如下:

激光投射在平面靶标两行编码点中间的白色区域上,靶标在传感器视场内以不同位姿多次移动,标定出每个位姿下摄像机坐标系与靶标坐标系之间的转换关系。控制点在世界坐标系下的坐标由交比不变的方法求出,假设第 n 个靶标位置上第 m 个控制点在世界坐标系下的坐标为 P_{nm} ,取第一个靶标位置作为全局坐标系,将所有的控制点坐标都转换到全局坐标系下:

$$P_{nm}(R_n, T_n) = P_{1m}, \quad (6)$$

式中 (R_n, T_n) 为第 n 个靶标位置上的世界坐标系到全局坐标系的转换关系。

根据相机坐标系与全局坐标系之间的转换关系可得到所有控制点在相机坐标系下的坐标,利用最小二乘法拟合光平面得到结构光平面在相机坐标系下的方程。

3.2 结构光参数标定

3.2.1 编码点在相机坐标系下的坐标

如图 3 所示, $D_{1i}, D_{1j}, D_{2i}, D_{2j}$ 为准一维靶标上的四个编码点, $d_{1i}, d_{1j}, d_{2i}, d_{2j}$ 为对应的投影点,准一维靶标上两行编码点的消隐点为 d_v 。以 D_{1i}, D_{1j} 为例阐述求解编码点在摄像机坐标系下坐标的方法。

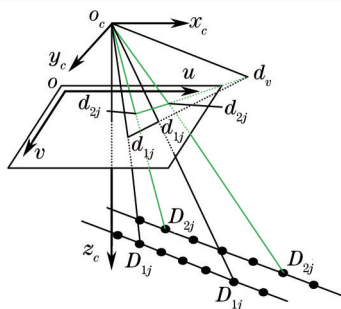


图3 编码点摄像机坐标求解示意图

Fig.3 Scheme of solving camera coordinate of coded points

假设 d_{1i}, d_{1j}, V 在图像坐标系下的坐标分别为 $(u_{1i}, v_{1i}), (u_{1j}, v_{1j}), (u_v, v_v)$, D_{1i}, D_{1j} 的摄像机坐标分别为 $(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}), (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j})$, 根据 o_c, d_{1i}, D_{1i} 三点、 o_c, d_{1j}, D_{1j} 三点分别共线以及 $D_{1i}D_{1j}$ 平行于 o_cV 可列方程组:

$$\begin{cases} (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) = \lambda_1 \left(\frac{u_{1i} - u_0}{N_x}, \frac{v_{1i} - v_0}{N_y}, f' \right) \\ (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}) = \lambda_2 \left(\frac{u_{1j} - u_0}{N_x}, \frac{v_{1j} - v_0}{N_y}, f' \right) \\ (x_{1j} - x_{1i}, y_{1j} - y_{1i}, z_{1j} - z_{1i}) = \lambda_3 l \left(\frac{u_v - u_0}{N_x \Delta}, \frac{v_v - v_0}{N_y \Delta}, \frac{f'}{\Delta} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\Delta = \sqrt{(u_v - u_0)^2 + (v_v - v_0)^2 + f'^2}$, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为比例系数, f' 为优化后的摄像机焦距, l 为 D_{1i}, D_{1j} 之间的距离。求解非线性方程组可得编码点 D_{1i}, D_{1j} 在摄像机坐标系下的坐标, 每两个编码点可求得它们在摄像机坐标系下的坐标, 若准一维靶标每一行上有 K 个编码点, 则对每个编码点可求得 $K-1$ 个坐标, 取 $K-1$ 个坐标的平均值作为该编码点在摄像机坐标系下的坐标。

3.2.2 控制点在相机坐标系下的坐标

如图4所示, D_{1i}, D_{2i} 分别为准一维靶标第一行、第二行上的第 i 个编码点, 红色虚线为激光光条, D_{ci} 为第 i 个控制点, d_{1i}, d_{2i}, d_{ci} 分别为其对应的投影点, 两行编码点上对应编码点之间的连线相互平行, 它们的消隐点为点 d'_v 。

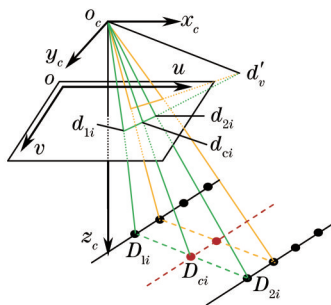


图4 控制点摄像机坐标求解示意图

Fig.4 Scheme of solving camera coordinate of control points

理论上多组平行直线的消隐点都相交于一点, 但由于拍摄角度、镜头畸变、编码点圆心提取误差等问题导致平行直线的消隐点并不交于一点。使用文献[10]中的方法求解多组平行直线的消隐点。

由于点 D_{ci} 为直线 $D_{1i}D_{2i}$ 与直线 $O_c d_{ci}$ 的交点, 因此求解控制点 D_{ci} 的摄像机坐标只需求解如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{x - x_{1i}}{(u'_{1i} - u_0)/(N_x)} = \frac{y - y_{1i}}{(v'_{1i} - v_0)/(N_y)} = \frac{z - z_{1i}}{f'} \\ \frac{x}{(u_{ci} - u_0)/(N_x)} = \frac{y}{(v_{ci} - v_0)/(N_y)} = \frac{z}{f'} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) 为点 D_{1i} 的摄像机坐标, (u'_v, v'_v) 为消隐点 d'_v 的像素坐标, (u_{ci}, v_{ci}) 为点 d_{ci} 的像素坐标。用最小二乘法即可求得控制点 D_{ci} 的一个摄像机坐标。同理, 利用点 D_{2i} 的摄像机坐标 (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) 也可求得控制点 D_{ci} 的一个摄像机坐标, 取二者的平均值作为 D_{ci} 最终的摄像机坐标。

3.2.3 光平面拟合

拍摄多幅靶标图像, 可以得到光面上多组不共线的控制点的摄像机坐标, 用最小二乘法拟合得到光平面在摄像机坐标系下的方程。

4 实 验

实验所用相机为加拿大 Point Grey Research 公司所生产的 GRAS-20S4M-C 相机, 镜头采用日本 μ tron 生产的 HF0818J 镜头。靶标上相邻编码标记点之间的距离为 38.5 mm。

内参数标定时, 平面靶标在摄像机视场内以不同位姿^[11]摆放 15 个位置, 拍摄图像, 采用张正友的方法进行内参数标定, 用 LM 法优化后的摄像机内参数为: $f = 8.4713$; $u_0 = 809.7725$; $v_0 = 604.7226$; $k_1 = -0.0622479469$; $k_2 = 0.1843670756$; $p_1 = -0.0014530809$; $p_2 = 0.0037917979$ 。

外参数标定时, 在保证激光投射在准一维靶标白色区域内的前提下, 准一维靶标在测量范围内自由移动, 利用 3.2 节中提出的方法进行结构光参数标定, 得到光平面在摄像机坐标系下的方程为

$$z = 1.230731x + 0.026341y + 526.604787 \quad (9)$$

4.1 两行标记点求解控制点精度及稳定性实验

为便于与交比不变的方法进行比较, 采用平面靶标进行实验。线结构光传感器从不同距离及不同角度获取靶标图像, 对同一副靶标图像, 分别采用交比不变的方法和本文提出的方法求解控制点三维坐标, 分别拟合直线, 以控制点到所拟合直线的距离的标准差作为评价标准。

实验时, 靶标与摄像机之间的距离取 110、100、90、80 cm 四个距离, 靶标姿态取正对摄像机以及与摄像机成大约 15° 夹角倾斜两个姿态, 实验结果如图 5 所示。

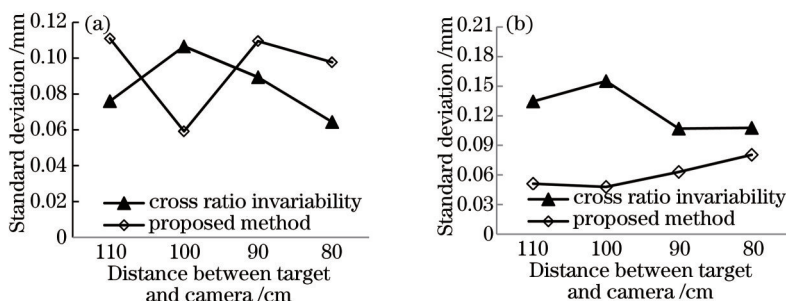


图 5 控制点求解对比实验。(a) 靶标正对姿态; (b) 靶标倾斜姿态

Fig.5 Contrast experiment of control points calculation. (a) Over against pose; (b) sloping pose

由图 5(a)可知, 在靶标正对摄像机时, 四个距离下交比不变所求控制点精度与本文方法所求控制点精度相当, 由图 5(b)可知, 当靶标以一定角度倾斜时, 四个距离下利用本文方法所求控制点的精度均高于交比不变所求控制点的精度。对比图 5(a)与图 5(b)可知, 靶标倾斜姿态时, 用交比不变法求解的控制点精度低于靶标正对姿态的精度, 而用本文方法求解的控制点精度要高于靶标正对姿态的精度, 且在各个距离下的标准差比靶标正对姿态时更加稳定, 这是因为在靶标倾斜姿态下各标记点所连直线的消隐点的求取比靶标正对姿态下的求取更加准确。在结构光外参数的标定中, 靶标倾斜姿态要远远多于正对姿态, 因此使用本文求解控制点的方法可以有效地提高控制点求解的精度。相对交比不变的方法, 本文方法只需两行标记点即可求解控制点三维坐标, 使得大尺寸靶标的加工制作难度减小, 同时标定过程也更加灵活方便, 相对交比不变的方法具有明显的优势。

4.2 线结构光传感器标定结果精度及稳定性实验

按照 3.1 节和 3.2 节提到的方法, 传感器内外参数各采集 15 幅靶标图像进行标定, 为验证标定结果的精度和稳定性, 设置了两组实验。

实验一:精度实验。

对不参与标定的靶标图像进行测量,其中一幅靶标图像如图6所示,图中 $C_1\sim C_7$ 为七个控制点。

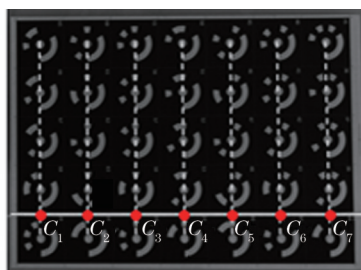


图6 靶标图像

Fig.6 Target image

实验时,将激光投射在靶标上白色区域内,由于7行编码点的连线相互平行,因此相邻两个控制点之间的距离理论上相等的。线结构光传感器对5个不同位姿下的靶标进行测量,测得相邻两控制点之间的距离结果如表1和图7所示。

表1 5个位姿误差结果

Table 1 Deviation results of five poses

	Pose 1	Pose 2	Pose 3	Pose 4	Pose 5
Max /mm	38.54239	38.58572	38.58872	38.52855	38.53574
Min /mm	38.50771	38.55051	38.55490	38.49887	38.50142
Deviation /mm	0.03468	0.03520	0.03382	0.02968	0.03432

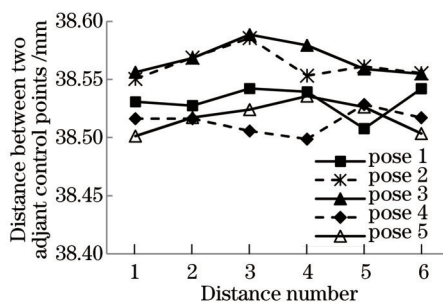


图7 测量实验精度测试结果

Fig.7 Experimental measurement accuracy of the test results

表1给出了每个姿态下相邻两控制点之间距离的最大值,最小值以及他们的差值。由表1和图7可知,五个位姿下相邻两控制点距离的最大误差在0.036 mm以内,且变化较为平稳,表明该标定方法具有较高的精度。

实验二:稳定性实验。

线结构光传感器在不同位姿下对一个标准球体进行10次测量,每次测量得到一条圆弧,以相对误差 $R_d = d_m / r_f \times 100\%$ 为评价标准,其中 d_m 为测量点到拟合圆的最大距离, r_f 为拟合圆的半径,实验结果如表2所示。

表2 测量实验稳定性测试结果

Table 2 Experimental measurement stability of the test results

Measurement number	Maximum distance /mm	Radius /mm	Relevant deviation
1	0.1844	19.9542	0.92%
2	0.1763	20.0723	0.88%
3	0.1798	19.9708	0.90%
4	0.1733	19.8585	0.87%
5	0.1781	19.3178	0.92%
6	0.177	19.6395	0.90%
7	0.1839	19.9565	0.92%
8	0.1644	19.942	0.82%
9	0.1883	19.8805	0.94%
10	0.1832	19.5034	0.93%

由表2可知,对标准球进行10次测量,测量结果的相对误差均在1%以内,测量结果重复性好,表明结构光传感器标定结果具有较高稳定性。

5 结 论

1) 提出了利用两种靶标分别标定摄像机内参数和结构光参数的大尺度线结构光传感器现场标定方法,摄像机内参数采用平面靶标进行标定,保证了内参数的标定精度;结构光参数采用准一维靶标进行标定,方便灵活,适用于大尺度现场标定。利用标定结果进行测量实验,所测相邻两控制点之间距离的最大误差在0.036 mm以内,对标准球进行10次测量,相对误差在1%以内,表明该标定方法具有较高的精度和稳定性。

2) 提出一种利用两行标记点求解控制点三维坐标的方法,相对交比不变的方法使用较少的标记点就可求出控制点的三维坐标,通过实验表明,综合考虑各种姿态,本文提出的方法在精度和稳定性方面要优于交比不变的方法,且对于同样尺寸的靶标,准一维靶标比平面靶标标定过程更加灵活方便。因此本文方法相对传统交比不变的方法具有明显的优势。

参 考 文 献

- 1 Seokbae S, Hyunpung P, Kuanh H L. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2002, 42(8): 889-897.
- 2 Liu Chong, Sun Junhua, Liu Zhen, *et al.*. A field calibration method for line structured light vision sensor with large FOV[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(1): 106-112.
刘 冲, 孙军华, 刘 震, 等. 大视场线结构光视觉传感器的现场标定[J]. *光电工程*, 2013, 40(1): 106-112.
- 3 Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 7-12.
周富强, 蔡斐华. 基于一维靶标的结构光视觉传感器标定[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18): 7-12.
- 4 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 5 Moumen A, Aly F. Nonmetric of calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2005, 14(8): 1215-1230.
- 6 Ranganathan A. The Levenberg-Marquardt Algorithm[OL]. User-phys.au.dk/jensjh/nu,eric/project/10.1.1.135.865.pdf.[2015-10-10].
- 7 Lourakis M, Argyros A. The design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm[R]. Technical Report 340, Institute of Computer Science-FORTH, 2004.
- 8 Xie Zexiao, Gao Xiang, Cui Jian. Extraction algorithm of circular targets used for mobile three-dimensional measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208002.
解则晓, 高 翔, 崔 健. 移动式三维测量用圆形标记点提取算法[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208002.
- 9 Xie Zexiao, Gao Xiang, Zhu Ruixin. Efficient extraction and robust recognition algorithm of circle coded target[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(3): 559-566.
解则晓, 高 翔, 朱瑞新. 环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 559-566.
- 10 Lu Jin, Sun Huibin, Chang Zhiyong. A novel method for camera calibration with orthogonal vanishing points[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0208001.
卢 津, 孙惠斌, 常智勇. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0208001.
- 11 Xie Zexiao, Lu Wenjuan, Wang Xiaomin, *et al.*. Analysis of pose selection on binocular stereo calibration[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0208003.
解则晓, 陆文娟, 王晓敏, 等. 双目立体标定的姿态选择分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0208003.

栏目编辑: 何卓铭