

熔覆层检测中单目视觉测量系统的简易标定

郭吉荣^{**}, 李长勇^{*}, 乌日开西·艾依提

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

摘要 在单目线结构光传感器测量熔覆层尺寸的实验中,为简化单目测量系统标定工具、快速调节测量系统的扫描方向,设计了十字标定板和位姿可变载物台。利用十字标定板可以标定相机和激光平面;将十字标定板和位姿可变载物台结合使用,可标定测量系统的扫描方向并进行调节,避免了激光投射器自身偏角带来的误差。整个标定过程只需要同一个标定板,简化了实验工具;载物台位姿可变,满足快速标定、实时调节扫描方向的条件;该装置操作简单、具有直观的标定结果,对熔覆层的测量误差小于0.05 mm。

关键词 测量; 标定; 位姿变换; 单目视觉

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081203

Simple Calibration of Monocular Vision Measurement System in Cladding Layer Detection

Guo Jirong^{**}, Li Changyong^{*}, Wurikaixi·Aiyiti

School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China

Abstract In order to simplify the monocular measurement system calibration tools and quickly adjust the scanning direction of measurement system, we design the “cross” calibration plate and pose-adjustable working stage in the experiment of measuring the cladding layer size through the monocular line structure-light sensor. The “cross” calibration plate can be used to calibrate the camera and the laser plane. The combination of the “cross” calibration plate with the pose-adjustable working stage is not only helpful to calibrate the scanning direction of the measurement system, but also avoids the errors caused by the deviation of the laser projector. In the whole calibration process, only the same calibration plate is required, so the experimental tools are simplified. Moreover, the pose-adjustable working stage satisfies the condition of fast calibration and real-time adjustment of scanning direction. The device is simple to operate, and presents intuitive calibration results. The measurement error of the cladding layer is less than 0.05 mm.

Key words measurement; calibration; pose transformation; monocular vision

OCIS codes 120.4820; 100.3010; 280.3400; 150.1488

1 引言

单目视觉测量系统测量精度高、速度快、结构简单,广泛应用于红外光技术、钢轨磨损检测、透明板厚度测量、隧道施工监测、机器人定位等方面^[1-5]。

在相机标定中,以棋盘格为标定板^[6-8]的方法获得广泛应用,但角点的识别对噪声、光照比较敏感;夏仁波等^[9]根据圆形目标易于识别、信息全面的特点,以圆心为特征代替棋盘格角点特征,但实心圆在相机模型中存在不对称投影^[10-12];Heikkilä等^[13]和Datta等^[14]对实心圆的不对称投影进行修正、迭代,提高了圆心精度;邢德奎等^[15]利用同心圆的圆心为

特征点,提高了识别精度,但未对所有特征的映射方法进行说明,这将影响标定过程的复杂程度。在激光平面标定中,有拉丝定位法^[16]和立体靶标法^[17-19],但对实验工具的加工精度有较高的要求;Zhou等^[20]提出平面靶标方法以后,文献[21-23]均用不同平面靶标标定激光平面,但其特征点三维坐标精度对相机外参数要求比较高;文献[24]将平面靶标和三坐标测量仪结合使用,要求准确定位靶标点;陈新禹等^[25]设计同心圆平面靶标,应用三点透视模型识别特征点的三维坐标,充分利用相机内参数条件提高了平面精度,但该靶标只能用于激光平面标定。对于外参数的标定,文献[26-28]借助一

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-02-02; 录用日期: 2018-03-16

* E-mail: 1451558955@qq.com; ** E-mail: gjrong_xd@163.com

维、二维靶标标定测量系统的扫描方向,结合内外参数计算被测点的空间位置,但该靶标只用于扫描方向的标定。

在熔覆层测量实验中,为集成多种标定功能、简化标定工具和快速调节扫描方向,本文基于熔覆实验板设计了十字标定板和位姿可变载物台。

2 标定板和载物台的应用策略

2.1 十字标定板构架

标定板的构成如图 1 所示,其中有 99 个特征圆环。在标定板中建立世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$,坐标系原点为中间圆环的圆心, X_w 轴方向有 11 个特征圆环, Y_w 轴方向有 9 个特征圆环;94 个小圆环为普通特征圆,由半径 2 mm 和 3 mm 的同心圆组成;各圆环之间的横向间距和纵向间距均为 5 mm;5 个大圆环为定位圆,呈十字分布,由半径为 3 mm 和 4 mm 的同心圆组成;圆环 IV 为坐标系原点,圆环 I 在 X_w 轴负方向上,圆环 II 在 X_w 轴正方向上,圆环 III 在 Y_w 轴正方向上,圆环 V 在 Y_w 轴负方向上。

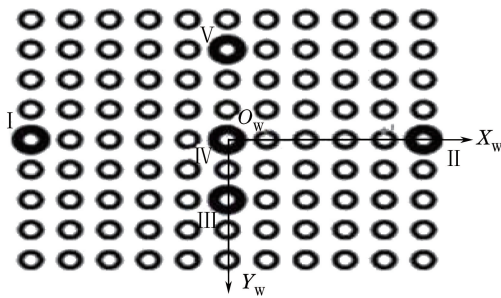


图 1 十字标定板

Fig. 1 Cross calibration plate

2.2 十字标定板的坐标映射

识别标定板中所有特征圆环并排序,主要有以下几个步骤:

1) 识别所有标志圆环的圆心。根据相机的不对称投影特点,当标定板所在平面的法线和相机光轴不平行时,圆形的投影图像均为椭圆。如图 2 所示,同心圆环投影在成像平面 π 中,内、外两圆的圆心分别为 O_1 、 O_2 ,大圆半径为 r_b ,小圆半径为 r_s 。

根据透视投影中的交比不变原理^[15]得到

$$\frac{aO_3/ac}{bO_3/bc} = \frac{r_b/r_b + r_s}{r_s/2r_s} \quad (1)$$

利用(1)式计算实际圆心的投影坐标 O_3 。

2) 分析 5 个定位圆的分布。根据轮廓大小确定 5 个最大的圆为定位圆。其中,间距最大的两个圆为 I、II 或 II、I;间距最小的两个圆为 III、IV 或 IV、III,余

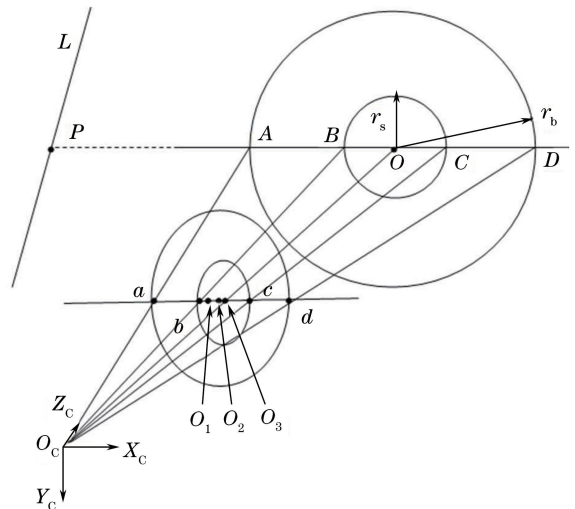


图 2 透视投影模型

Fig. 2 Perspective projection model

下的一个圆为 V;III、IV 中距离 V 最近的圆为 IV,另一个圆为 III;由 III、IV 可确定 Y_w 轴的方向,进而确定 X_w 轴的方向,以及 I、II 两个圆的位置。

3) 对所有特征圆环进行排序。沿 Y_w 轴按从小到大的顺序一次识别 9 行特征圆环,将每行 11 个特征圆环根据其圆心坐标 X_w 值从小到大的顺序排列。以此完成对所有标志圆由世界坐标到图像坐标的一一映射。

2.3 位姿可变载物台的构架

该载物台主要包括:可调三角架 1、转台 2、滑台 3、载物板 4、标定板 5,以及各连接件等(图 3)。通过 1 可调整整个载物台的俯仰角、偏转角和高度;将 2 固定在 1 中,可调整上半部分的回转角;3 固定于 2 中,实现扫描方向的运动;4 和 3 连接,将激光熔覆加工件或标定板固定在 4 上。标定板中世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的 Y_w 轴和 2 的轴线平行, X_w 轴和扫描方向平行。

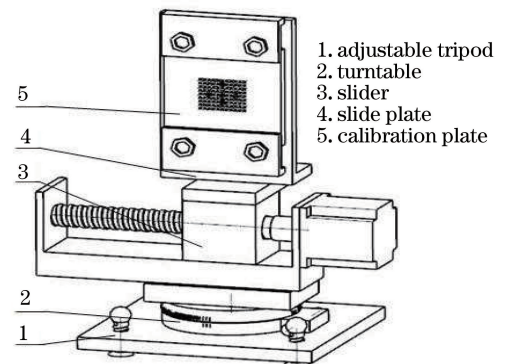


图 3 位姿可变载物台

Fig. 3 Variable objective table

2.4 位姿可变速物台的应用策略

相机透镜投影模型中,令图像坐标系为 $O-UV$,世界坐标系为 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。从标定板的二维平面上的点 Q 映射到相机图像平面 q ,这两个平面的单应性可表示为

$$s\tilde{q} = MW\tilde{Q}, \quad (2)$$

式中: \tilde{q} 为 q 在图像坐标系下的齐次坐标; \tilde{Q} 为 Q 在世界坐标系下的齐次坐标; s 为当前的尺度比例; M 为 3×3 的内参数矩阵,在相机标定中得到; W 为外

参数,包括旋转矩阵 $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ 和平移矩

阵 $t = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$;当世界坐标系中各点均在平面 $X_wO_wY_w$ 内时, $Z_w = 0$;由(2)式可得

$$s \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} = MW \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \Delta x \\ r_{21} & r_{22} & \Delta y \\ r_{31} & r_{32} & \Delta z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在内参数已知条件下,由十字标定板中5个定位圆的坐标映射即可求解 W 。根据固定角坐标系转换法,相机坐标系绕 X_c 轴旋转 γ 角,再绕 Y_c 轴旋转 β 角,最后绕 Z_c 轴旋转 α 角转化为当前世界坐标系的旋转姿态。则旋转矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \beta = \arcsin(-r_{31}) \\ \alpha = \arcsin(r_{21}/\cos \beta) \\ \gamma = \arcsin(r_{32}/\cos \beta) \end{cases} \quad (5)$$

由(5)式的计算结果,可实时标定当前载物台绕三个轴的旋转角度,便于调节。

3 实验应用

3.1 相机标定

张氏标定法^[29]以其简便性、可靠性成为广泛应

用的标定方法之一。该方法只需采集3张或3张以上任意不同姿态的二维标定板特征点即可计算相机内外参数,采集标定板较多时,越容易避免标定结果的偶然性。

以两幅标定板图像为例,如图4(a)、(b)所示,采用2.2节中的方法对其特征点的映射坐标进行排序,效果如图4(c)、(d)所示,将结果代入张氏算法计算相机内外参数。

3.2 激光平面标定

令定位圆III、IV和IV中 O_1 、 O_2 所在直线和

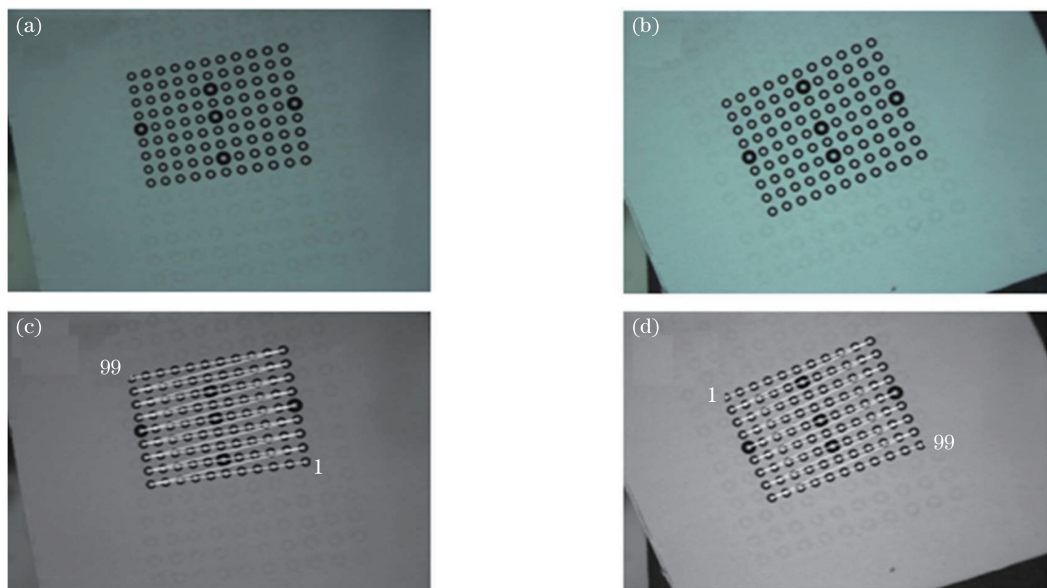


图4 特征点映射。(a)(b)映射前;(c)(d)映射后

Fig. 4 Feature point mapping. (a)(b) Before mapping; (c)(d) after mapping

光条中线 L 的交点为 P_{III} 、 P_{IV} 和 P_V 。由图 2 所示, A 、 O 、 D 和 O_C 满足三点透视模型原理^[25], 由相机内参数公式得

$$\begin{cases} |O_C A| = |AO| \cdot |AD| \cdot \sin \angle OO_C D / \sqrt{\delta} \\ |O_C D| = |AD| \cdot |OD| \cdot \sin \angle OO_C A / \sqrt{\delta} \\ |O_C O| = |AO| \cdot |OD| \cdot \sin \angle AO_C D / \sqrt{\delta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\delta = |AD|^2 \cdot \sin^2 \angle OO_C D + |OD|^2 \cdot \sin^2 \angle AO_C D - 2|AD| \cdot |OD| \cdot \sin \angle OO_C D \cdot \sin \angle AO_C D \cdot \cos \angle OO_C A$ 。将 A 、 O 、 D 的空间坐标值记为 (x_A, y_A, z_A) , (x_O, y_O, z_O) , (x_D, y_D, z_D) , 分别满足

$$\begin{cases} (x_A, y_A, z_A)^T = (x_a, y_a, z_a)^T \cdot \frac{|O_C A|}{|O_C a|} \\ (x_D, y_D, z_D)^T = (x_d, y_d, z_d)^T \cdot \frac{|O_C D|}{|O_C d|} \\ (x_O, y_O, z_O)^T = (x_{O_3}, y_{O_3}, z_{O_3})^T \cdot \frac{|O_C O|}{|O_C O_3|} \end{cases} \quad (7)$$

式中: (x_a, y_a, z_a) , (x_d, y_d, z_d) , $(x_{O_3}, y_{O_3}, z_{O_3})$ 分别为 a 、 d 、 O_3 的坐标值。 A 、 O 、 D 和 P 满足交比定理, 代入(1)式即可求得 P 的空间坐标。取 N ($N \geq 2$) 幅图像, 计算每幅图像中 P_{III} 、 P_{IV} 和 P_V 的空间坐标, 采用最小二乘法即可拟合光平面在相机坐标系中的方程。得到平面方程:

$$-0.0107827x - 0.000795797y - 0.00828195z + 1 = 0. \quad (8)$$

由(8)式可得 Z_C 轴和激光平面的夹角为 52.473° , Y_C 轴和激光平面的夹角为 0.33° 。

3.3 扫描方向的标定

令扫描方向和激光平面的夹角为 θ , 则 Z_C 轴和平面 $X_w O_w Y_w$ 的夹角 φ 为

$$\varphi = 180^\circ - \alpha - \theta. \quad (9)$$

在 θ 为 90° 的条件下进行实验, 则 $\varphi = 90^\circ - \alpha = 37.527^\circ$ 。将十字标定固定在位姿可变载物台中, 调整当前世界坐标系, $\beta = 52.473^\circ$, $\alpha = 0.33^\circ$, 即可满足扫描方向和激光平面垂直。

本文根据激光投射器外形固定激光器理想光轴和相机光轴夹角为 60° , 相机光轴偏角为 -3.506° , 而 $\beta = 52.473^\circ$, 说明激光投射器存 3.421° 的偏角。该方法有效避免了激光偏角带来的误差。

4 分析与讨论

4.1 相机标定结果分析

为验证相机标定结果的准确性, 分别以圆环中

大圆圆心、小圆圆心和 2.2 节中圆环圆心为标定板特征点代入张氏算法, 分别标定相机内参数。计算三种标定结果的反投影误差并进行比较。如图 5 所示, 以小圆圆心的反投影误差小于大圆圆心的反投影误差, 并和圆环圆心的投影误差比较接近; 圆环圆心更接近于实际圆心, 将其作为特征点有效降低了反投影误差。

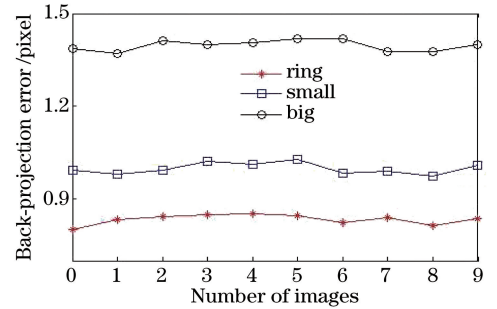


图 5 反投影误差

Fig. 5 Back-projection error

4.2 激光平面标定结果分析

任取 5 幅标定板图像, 以图中平面拟合点到激光平面的距离为指标, 验证该平面的精度。每幅图中拟合点到激光平面距离的平均误差和方均根 (RMS, R_{MS}) 误差如表 1 所示。

表 1 光平面标定误差

Table 1 Calibration error of optical plane

Calibration error	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4	Image 5
Mean error / mm	0.0367	0.0310	0.0345	0.0119	0.0248
RMS error / mm	0.00045	0.00032	0.00058	0.00031	0.00023

各点到平面的平均距离小于 0.036 mm, R_{MS} 小于 0.0006 , 说明每幅图像中各拟合点在相机坐标系中的坐标值比较精确, 为拟合激光平面提供了比较精确的参数。

4.3 角度测量系统和被测物定位精度分析

将所有标志圆的坐标信息和 M 代入(3)~(5)式计算当前标定板的回转角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时的测量角度, 并与上述利用定位圆测量的测量角度进行对比。

由图 6(a)可以看出: 1) $0^\circ \sim 30^\circ$ 时, 仅利用定位圆的坐标信息测量角度值的方法, 稳定, 呈线性增长; 2) $0^\circ \sim 15^\circ$ 时, 利用所有标志圆的坐标信息测量角度值在实际角度值附近波动, $15^\circ \sim 30^\circ$ 时, 测量角度值与实际角度值偏差越来越大。受相机景深、相机畸变等因素影响, 相机光轴附近标志点信息相对精确。实验中, 世界坐标系的原点尽量靠近相机光轴。

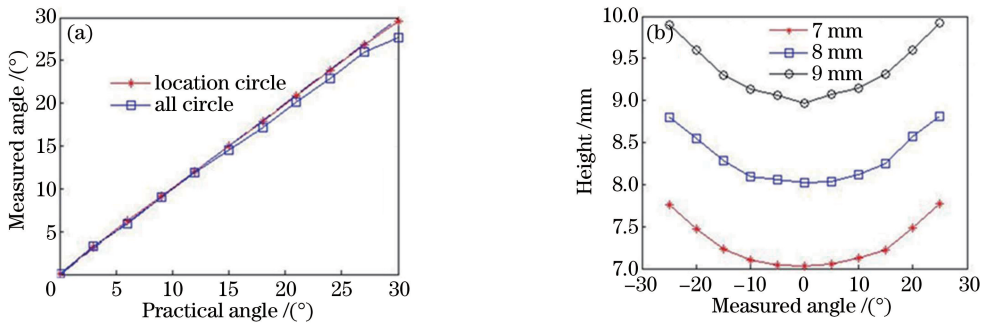


图 6 (a)测量角度和实际角度的关系;(b)量块高度和测量角度的关系

Fig. 6 (a) Relationship between the measured angle and the practical angle; (b) relationship between the height of the gauge block and the measured angle

为验证当前被测物基面和激光平面垂直,选取高度为 7,8,9 mm 量块,在当前角度条件下,将被测平面分别左转 25°、右转 25°,并对其测量,如图 6(b)所示。被测物基面和激光平面标定的角度为 90°,光条投射在被测物的横截面上,测量高度最小;转动后,光条倾斜投射在被测物表面,高度会随着倾斜角的增大而增大。

4.3 测量精度的验证

本文通过 VS2010 配置图形程序接口 OpenGL

对熔覆层三维建模,如图 7 所示。图 7(a)中红色方框内熔覆层的模型如图 7(b)所示,用区别较为明显的颜色显示不同高度的部分。图 7(b)中不同颜色代表不同高度,单位为 mm。由图 7 可知,该段熔覆层的加工并不均匀,熔覆层截面最高点从右向左慢慢分层变高。模型中大部分数据测量误差不超过 0.05 mm。该图有效凸显了局部熔覆层的高度趋势。

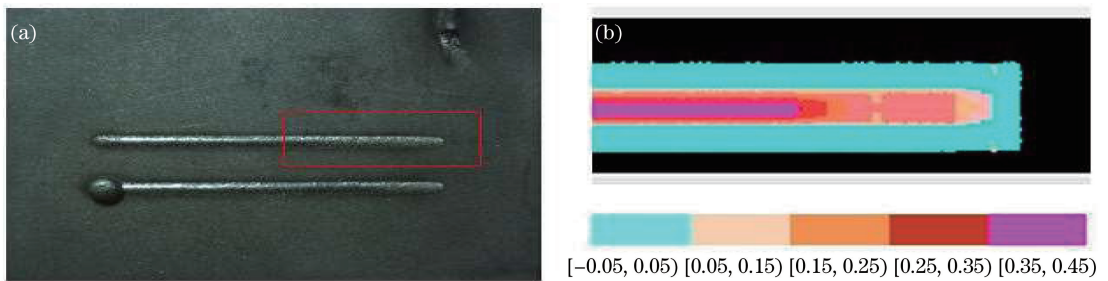


图 7 熔覆层的重建图。(a)实物图;(b)模型图

Fig. 7 Reconstruction of the cladding layer. (a) Photo graph; (b) model

5 结 论

设计的十字标定板和位姿可变载物台,实现了对测量系统的快速标定,简化了标定工具。其特点为:1)该装置只有一个标定板,集成了测量系统的多种标定功能;2)有效避免激光器偏角对测量系统的影响;3)可对扫描路径进行标定,并进行调节,方便了实验操作;4)可变位姿载物台对现有尺度控制器材的结合应用,降低了对载物台各部件加工精度的要求,节约了实验成本。该装置主要针对熔覆实验板进行实验,满足了实验需求。

参 考 文 献

[1] Lei H, Lan H, Cai Z, *et al.* Laserranging system

based on monocular camera OV7725 [J]. Journal of Jiangnan University, 2017, 45(2): 120-126.

[2] Tan Z W, Guo Y Y F. Study on rail wear detection system of laser triangulation method[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(5): 20-24.

谭周文, 郭雁一夫. 激光三角法钢轨磨耗检测系统研究[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(5): 20-24.

[3] Yan G S, Chen T, Zhang Z F. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708004.

杨桂栓, 陈涛, 张志峰. 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708004.

[4] He F Y, Lin J R, Gao Y, *et al.* Optimized pose

- measurement system combining monocular vision with inclinometer sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1215002.
- 何斐彦, 林嘉睿, 高扬, 等. 单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1215002.
- [5] Xie Z X, Chen W Z, Chi S K, et al. Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1015001.
- 解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1015001.
- [6] Shen X J, Cheng M J, Xiao J J, et al. Corner detection for fisheye checkerboard images based on iterative correction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091501.
- 申夏晶, 程梦娇, 肖江剑, 等. 基于迭代校正的鱼眼棋盘格图像角点检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091501.
- [7] Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.
- 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002.
- [8] Wang Y, Yuan F. Novel camera calibration method based on cooperative target pose measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1115002.
- 王艳, 袁峰. 基于合作目标姿态测量的新型摄像机校准方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1115002.
- [9] Xia R B, Liu W J, Zhao J B, et al. Fully automatic camera calibration method based on circular markers [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(2): 368-373.
- 夏仁波, 刘伟军, 赵吉宾, 等. 基于圆形标志点的全自动相机标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(2): 368-373.
- [10] Chen Z K, Hu L J, Wang Y, et al. Solution of duality in pose estimation of a single circle using rectangle constrain [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101501.
- 陈至坤, 胡连军, 王一, 等. 单圆位姿识别二义性的矩形约束消除[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101501.
- [11] An J J, Gao N, Chen C, et al. Correcting method and evaluation of eccentricity error of circle target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041203.
- 安晶晶, 高楠, 陈超, 等. 圆环标识的离心偏差校正方法与评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041203.
- [12] Duan Z Y, Wang N, Zhao W H, et al. Calibration method based on lattice calibration plate in vision measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0515004.
- 段振云, 王宁, 赵文辉, 等. 基于点阵标定板的视觉测量系统的标定方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0515004.
- [13] Heikkilä J. Geometric camera calibration using circular control points [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(10): 1066-1077.
- [14] Datta A, Kim J S, Kanade T. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points [C] // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), September 27-October 4, 2009, Kyoto, Japan, New York: IEEE, 2009: 1201-1208.
- [15] Xing D K, Da F P, Zhang H. Research and application of locating of circular target with high accuracy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(12): 2593-2598.
- 邢德奎, 达飞鹏, 张虎. 圆形目标精密定位方法的研究与应用[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(12): 2593-2598.
- [16] Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system [M]. Detroit: Society of Manufacturing Engineers, 1988.
- [17] Wei Z Z, Zhang G J, Xu Y. Calibration approach for structured light stripe vision sensor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(2): 210-214.
- 魏振忠, 张广军, 徐园. 一种线结构光视觉传感器标定方法[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(2): 210-214.
- [18] Mcivor A M. Nonlinear calibration of a laser stripe profiler [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(1): 205.
- [19] Huynh D Q, Owens R A, Hartmann P E. Calibrating a structured light stripe system: a novel approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 33(1): 73-86.
- [20] Zhou F, Zhang G. 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.

- [21] Li W B, Cao G Z, Sun J D, *et al.* A calibration algorithm of the structured light vision for the arc welding robot[C]. 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), June 28-July 1, 2017, Jeju, South Korea, New York: IEEE, 2017: 481-483.
- [22] Zhang X, Zhou T. Center detection algorithm and knife plane calibration of flat top line structured light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 512001.
- [23] Kuang Y C, Cui L C. A new calibration method for line-structured light vision sensor based on linear scale [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2016, 44(1): 71-77.
- [24] Li S, Yang X, Cheng S, *et al.* The integrated calibration method of CMM and line structured light integrated system [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016, 12: 128-132.
- [25] Chen X Y, Ma Z, Wang Y, *et al.* A simple method to calibration parameters of the line structured light [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(3): 563-568.
陈新禹, 马孜, 汪洋, 等. 线结构光参数的简易标定方法[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(3): 563-568.
- [26] Zeng X J, Huo J C, Wu Q Y. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement on linear-structure light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0108002.
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定 [J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108002.
- [27] Chen X Y, Ma Z, Chen T F, *et al.* Novel calibration method for axes in line structured light vision measurement system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1108014.
陈新禹, 马孜, 陈天飞, 等. 线结构光视觉测量系统运动轴线的简易标定方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108014.
- [28] Xie Z X, Zhu R X, Zhang A Q. Extrinsic parameters calibration of three-dimensional measurement system for ultra-large scale line-structured light sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1004003.
解则晓, 朱瑞新, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器三维测量系统外参数标定 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1004003.
- [29] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.