

加工中心工件在机三维检测系统的光平面标定

李 鹏, 种文艳, 马永军

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了满足加工中心在机检测的实时性需求, 实现高效率、低成本、高精度地标定线结构光传感器, 提出了一种基于同心圆平面靶标标定线结构光平面参数的新方法。该方法将三点透视模型和交比不变原理相结合, 在线结构光传感器的视觉范围内通过移动同心圆平面靶标, 计算得到光平面上多组标定点的三维坐标, 进而使用最小二乘算法确定光平面方程, 通过标定和检测实验分析并验证了该方法的有效性。该方法具有标定算法简单且操作灵活方便等优点, 适合加工检测等领域的现场标定。

关键词: 加工中心在机检测; 线结构光平面标定; 三点透视模型; 交比不变

中图分类号: TP212; TP242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0317002

Calibration of light plane in on-machine 3D inspecting system for workpiece of machining center

Li Peng, Chong Wenyan, Ma Yongjun

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to meet the real-time demand in on-machine inspection of machining center and calibrate the parameters of line structured-light plane with high efficiency, low-cost and high precision, a calibration method of light plane was proposed based on the planar target with concentric circles. Through moving freely the planar target at several arbitrary positions in the field of the camera's view, 3D coordinates of points on the line structured-light plane could be calculated by the calibration method integrated with the model of perspective-three-points (P3P) and the principle of cross-ratio invariance, then the equation of the line structured-light plane was fitted by least square method(LSM). Experiments showed the method's validity and feasibility by the analysis of calibration and inspection accuracy. It concludes that the method is suitable for the machining and inspecting field calibration with advantages in its simple algorithm and the flexible calibration process.

Key words: on-machine inspection of machining center; calibration of line structured-light plane; model of perspective-three-point; cross-ratio invariance

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51505055); 辽宁省自然科学基金(201602096); 中央高校科研基金(3132016211)

作者简介: 李鹏(1985-), 男, 讲师, 博士, 主要从事视觉测量、在机三维检测、逆向工程等方面的研究。Email: lp20131012@dlmu.edu.cn

0 引言

在当前制造加工领域,对工件实现在机三维检测是及时发现工件加工质量问题有效的手段,在保证加工精度和降低废品率等方面都有重要的意义。作为非接触检测的代表技术,线结构光三维视觉具有成本低、实时性强、激光图像易于提取、测量的信息量大等优点^[1-3]。线结构光视觉传感器主要由摄像机和线激光投射器构成,根据摄像机和激光器之间的相对位置关系,由激光三角法原理获取被测工件的三维形面信息。

线结构光视觉传感器的参数标定包括两部分,分别为摄像机参数的标定和光平面方程的标定。摄像机标定的研究开展较早,方法繁多且较为成熟^[4]。而关于光平面方程的标定,主要有拉丝标定法^[5]和齿形靶标定法^[6]、徐光佑等^[7]和 Huynh^[8]先后分别提出的基于交比不变性的标定方法,以及魏振忠等^[9]提出的双重交比不变法,而以上方法都需要精密的三维立体靶标辅助标定,过程繁琐,不适合现场标定。为此一些学者提出了基于平面靶标的光平面标定方法^[10-12],尽管这些方法适合现场标定,但在光平面参数求解的过程中会涉及到多次摄像机外参数求解,增加了标定的复杂度。为方便、快速地得到光平面参数,韩建栋等^[13]提出了一种光平面快速标定方法,该方法将三点透视模型(P3P)^[14]引入标定过程,拓宽了线结构光的应用领域。洪磊等^[15]通过计算成像平面与靶标平面之间的单应性矩阵,实现了光平面方程的标定。陈天飞等^[16]提出了基于共面靶标的线结构光传感器光平面标定方法。邝泳聪等^[17]基于线纹尺通过设计平面靶标特征点的提取算法和建立亚像素物象索引表,实现了线结构光传感器的直接标定。解则晓等^[18]针对结构光自扫描测量系统参数标定问题,提出了基于共面法的高精度标定方法,通过获取共面光条中心点求解光平面方程。

在实际的加工周期中,为实现工件快速的形面检测和实时的加工质量反馈,减少与参数标定等相关的加工辅助时间,需要线结构光传感器在保证标定和检测精度的同时,标定过程具有灵活性和效率高的特点。

因此文中在总结归纳以上光平面标定方法的基

础上,结合实际的加工检测需求,基于同心圆平面靶标,提出了将三点透视模型与交比不变原理相结合,在加工中心下实现光平面参数的标定方法。该方法适用于加工现场空间小的区域标定,灵活方便,实时性强。

1 线结构光传感器的数学模型

加工中心工件在机三维检测系统示意如图 1 所示,其中非接触检测部分主要由线结构光传感器构成,实现对工件在粗加工及半精加工阶段的在机检测。

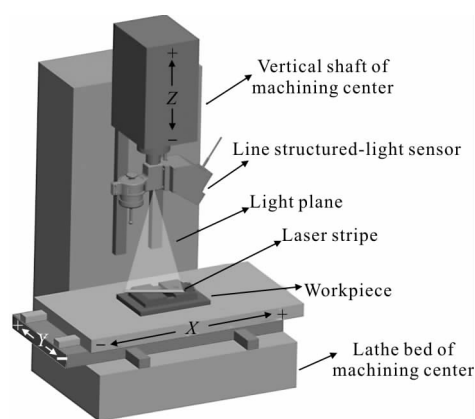


图 1 加工中心在机非接触检测三维示意图

Fig.1 3D sketch map of on-machine non-contact inspection

线结构光传感器的数学模型如图 2 所示。图中, O_c 点为光学透视中心, $O_c-X_cY_cZ_c$ 为摄像机坐标系, $O-uv$ 是以像素为单位的图像坐标系, O_o-XY 为像平面坐标系。

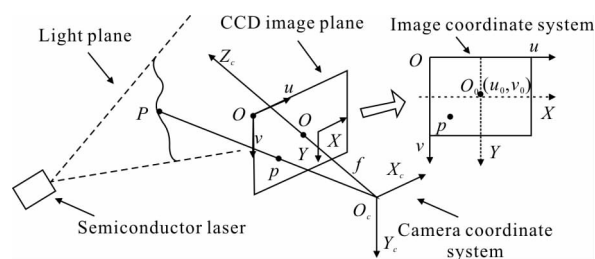


图 2 线结构光传感器数学模型

Fig.2 Mathematical model of line structured light sensor

设点 P 为线结构光与工件表面相交曲线上的一点,由透视投影变换可得图像坐标系与摄像机坐标系之间的齐次转换关系为:

$$Z_c p = K [I \ 0] P_c \quad (1)$$

式中: $P_c = (X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$ 为空间点 P 在摄像机坐标系

下的齐次坐标; $p=(u,v,1)^T$ 为像点的齐次坐标; I 为 3×3 单位矩阵; K 为摄像机的内参数矩阵, 其表示为:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & S & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: α 和 β 分别为 u 、 v 轴上的归一化焦距; S 为摄像机的畸变因子; u_0 和 v_0 是像平面的中心点坐标。

激光平面在摄像机坐标系下的方程为:

$$aX_c + bY_c + cZ_c + d = 0 \quad (2)$$

如果摄像机内参数矩阵 K 和光平面方程已知, 根据公式(1)和公式(2), 由激光条纹上任意一点的图像坐标 p , 即可唯一确定光平面上点 P 在摄像机坐标系下的三维坐标。

2 光平面方程的标定

在标定线结构光平面方程参数之前首先需要完成摄像机内参数矩阵的标定, 可参考张正友提出的基于平面点阵靶标的标定技术^[19], 该方法以其高精度、高灵活性、低成本等优点成为近年来应用较广的方法之一。本节主要介绍线结构光平面方程参数的标定方法。

光平面参数标定原理如图 3 所示。取同心圆靶标上 3 个同心圆的圆心点: A_1, B_1, C_1 , 三点确定的直线设为 L_1 。激光条纹与 L_1 的交点为 P_1 。靶标上共线的四点 A_1, B_1, C_1, P_1 在 CCD 像平面上分别成像于 a_1, b_1, c_1, p_1 , 四点确定的直线设为 l_1 。由图像处理技术提取同心圆图像的圆心坐标, 相应的图像坐标为 $(u_i, v_i), (i=a_1, b_1, c_1, p_1)$, 由透视投影变换得像点在摄像机坐标系下的坐标为 $(x_i, y_i, f), (i=a_1, b_1, c_1, p_1)$, 其中 f 为光心 O_c 与 CCD 像平面的距离(即: 摄像机透镜的焦距)。

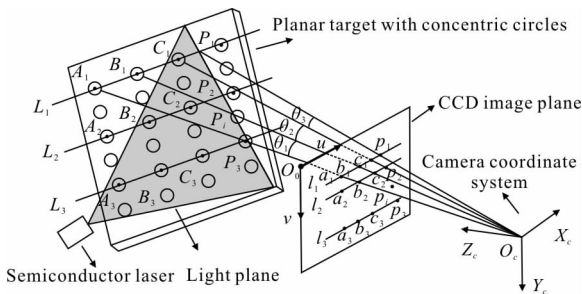


图 3 光平面参数标定原理

Fig.3 Calibration principle of light plane parameters

由射影几何知, 直线 L_1, l_1 和 O_c 必定在同一平面内, 因 A_1, B_1, C_1 共线且相互之间距离已知, 点 P_1 可利用三点透视原理求出。在图 3 中, 取空间点与 O_c 之间构成的单位向量为:

$$e_i = \frac{[x_i \ y_i \ f]}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \quad (i=a_1, b_1, c_1, p_1) \quad (3)$$

设向量 $O_c A_1, O_c B_1, O_c C_1, O_c P_1$ 之间的夹角分别为 θ_1, θ_2 和 θ_3 。根据向量点积的定义得:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos(e_{a_1}^T e_{b_1}) \\ \theta_2 = \arccos(e_{b_1}^T e_{c_1}) \\ \theta_3 = \arccos(e_{p_1}^T e_{c_1}) \end{cases} \quad (4)$$

由射影变换下的交比不变原理^[20]有:

$$CR(O_c A_1, O_c B_1; O_c C_1, O_c P_1) = CR(A_1, B_1; C_1, P_1) \quad (5)$$

其中

$$CR(O_c A_1, O_c B_1; O_c C_1, O_c P_1) = \frac{\sin \angle A_1 O_c C_1 / \sin \angle B_1 O_c C_1}{\sin \angle A_1 O_c P_1 / \sin \angle B_1 O_c P_1} = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2) / \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) / \sin(\theta_2 + \theta_3)} \quad (6)$$

$$CR(A_1, B_1; C_1, P_1) = \frac{A_1 C_1 / B_1 C_1}{A_1 P_1 / B_1 P_1} \quad (7)$$

在同心圆靶标上, A_1, B_1, C_1 之间距离已知, 且 $A_1 B_1 = B_1 C_1$, 又因 $A_1 P_1 = A_1 C_1 + C_1 P_1, B_1 P_1 = B_1 C_1 + C_1 P_1$, 因此由公式(5)~(7)可求得线段 $C_1 P_1$ 的长度。并由正弦定理知:

$$\begin{cases} \frac{\sin \angle O_c B_1 P_1}{\|O_c C_1\|} = \frac{\sin \theta_2}{B_1 C_1} \quad (\text{在 } \Delta O_c B_1 C_1 \text{ 内}) \\ \frac{\sin \angle O_c B_1 P_1}{\|O_c P_1\|} = \frac{\sin \angle O_c P_1 B_1}{\|O_c B_1\|} \quad (\text{在 } \Delta O_c B_1 P_1 \text{ 内}) \Rightarrow \\ \frac{\|O_c P_1\|}{\|O_c B_1\|} = \frac{C_1 P_1 \sin \theta_2}{B_1 C_1 \sin \theta_3} \\ \frac{\sin \angle O_c P_1 B_1}{\|O_c C_1\|} = \frac{\sin \theta_3}{C_1 P_1} \quad (\text{在 } \Delta O_c C_1 P_1 \text{ 内}) \end{cases} \quad (8)$$

又由余弦定理知

$$B_1 P_1^2 = \|O_c B_1\|^2 + \|O_c P_1\|^2 - 2\|O_c B_1\| \times \|O_c P_1\| \times \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (9)$$

由公式(8)和公式(9), 可求得距离 $\|O_c P_1\|$ 。激光条纹上点 P_1 在摄像机坐标系下的三维坐标为:

$$P_1 = \|O_c P_1\| e_{p_1} \quad (10)$$

同理, 由以上方法可求得激光条纹与直线 L_2, L_3 的交点 P_2, P_3 。设点 P_i 为激光条纹上的任意点, 在 CCD 像平面上的像点为 p_i 。根据交比不变原理有:

$$CR(P_1, P_2; P_i, P_3) = CR(p_1, p_2; p_i, p_3) \quad (11)$$

将已求点 P_1, P_2, P_3 和像点 p_1, p_2, p_i, p_3 坐标代入公式(11), 即可得任意点 P_i 的三维坐标。在单一靶标姿态下, 由以上方法可得到激光条纹上任意数目点的三维坐标。

按照上述方法, 移动平面靶标于任意姿态, 可以获得光平面上多个点的三维坐标 $(X_i, Y_i, Z_i), (i=1, \dots, n)$, 由公式(2)所描述的光平面方程拟合这 n 个空间点。目标函数为点到平面欧式距离的平方和, 即:

$$\min f(a, b, c, d) = \min \sum_{i=1}^n \frac{(aX_i + bY_i + cZ_i + d)^2}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (12)$$

公式(12)可转化为最小二乘问题进行求解。最优解 $[a, b, c, d]$ 即为所求的光平面方程参数。

3 实验与检测精度分析

实验所用的线结构光传感器如图 4 所示, 包括型号为 WAT-5352EX2 (分辨率为 768×576) 的 CCD 摄像机、波长 650 nm 的线式激光器及 12 mm 定焦 Computar 镜头。摄像机与激光器的中心距离约为 80 mm, 夹角约为 30° 。在实验过程中, 线结构光传感器的工作距离约为 200 mm, 将其集成安装于加工中心主轴构成了图 5 所示的在机三维检测系统。

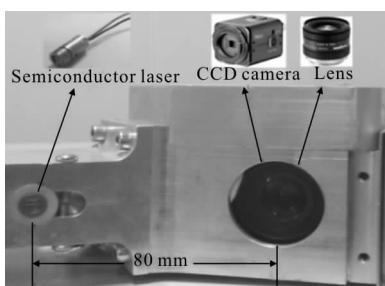


图 4 线结构光传感器

Fig.4 Line structured-light sensor



图 5 加工中心在机三维检测系统

Fig.5 On-machine 3D inspecting system of machining center

3.1 标定实验

加工中心下摄像机内参数的标定如图 6 所示。实验采用的平面靶标由为 6 行 4 列的同心圆组成, 其中行间距为 10 mm, 列间距为 20 mm。在摄像机标定过程中自由移动同心圆平面靶标, 为提高摄像机内参数的标定精度, 在不同位姿拍摄 9 幅图像。以其中一幅拍摄的图像为例, 提取并排序同心圆圆心后的图像, 如图 7 所示。采用张正友的摄像机内参数标定方法, 可得摄像机内参数的标定结果, 如表 1 所示。



图 6 摄像机内参数的标定

Fig.6 Calibration for camera intrinsic parameters

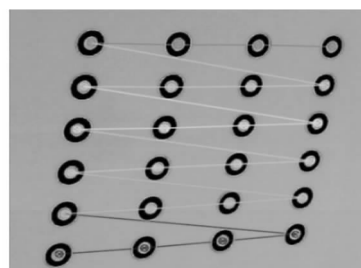


图 7 同心圆图像的处理

Fig.7 Image processing of concentric circle

表 1 摄像机内参数标定结果

Tab.1 Calibration result of camera intrinsic parameters

α	S	u_0	β	v_0
1 931.128 1	0.402 3	412.975 6	1 931.690 8	305.093 7

光平面参数的具体标定过程如下:

(1) 靶标图像采集。打开波长为 650 nm 的线式激光器, 加工中心下光平面参数的标定状态如图 8 所示。在摄像机视场范围内, 将激光条纹投射在平面靶标上的某两列同心圆之间, 为提高光平面拟合的精度, 将靶标置于不同位置和不同的姿态下, 由摄像机拍摄 9 幅图像。

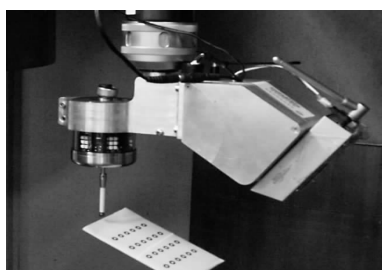


图 8 光平面参数的标定

Fig.8 Calibration for light plane parameters

(2) 靶标图像处理。对 Step1 中采集的 9 幅图像进行同心圆圆心和激光条中心线的提取。为标识每一幅靶标图像中的同心圆圆心起始顺序, 并便于标定计算, 对提取后的同心圆圆心进行排序。以 Step1 中采集的其中一幅光条纹靶标图像为例, 如图 9 所示, 经图像处理, 实现了激光条纹中心线的提取, 并用彩色线型对提取的同心圆圆心进行了排序。

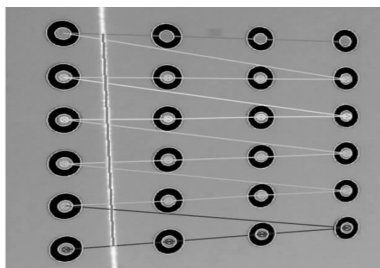


图 9 同心圆和激光条纹图像的处理

Fig.9 Image processing of concentric circle and laser stripe

(3) 光平面上点的三维坐标的计算。在每一幅靶标图像中, 计算在 Step2 中提取的 6 行同心圆圆心所在直线与光条纹中心线相交后的交点图像坐标, 得到的 9 幅靶标图像中的交点图像坐标如图 10 所示; 在此基础上, 根据图 3 所示的光平面参数标定原理, 可求得与交点图像坐标对应的摄像机坐标系下的三维坐标。

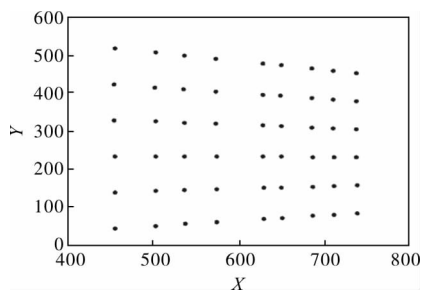


图 10 光平面上交点的图像坐标

Fig.10 Image coordinates of intersection points on light plane

(4) 光平面方程的拟合。将 Step3 中求得的 9 组三维坐标代入公式(12), 拟合光平面在摄像机坐标系下的方程。三维坐标及拟合的光平面如图 11 所示。

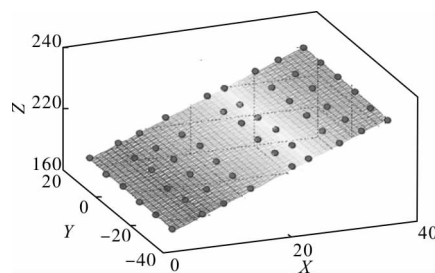


图 11 三维坐标及拟合的平面

Fig.11 3D coordinates and light plane fitted

拟合的光平面方程为:

$$-1.620 \ 8X_c - 0.016 \ 2Y_c + Z_c - 161.929 \ 7 = 0$$

即光平面方程参数 $[a,b,c,d]$ 为 $[-1.620 \ 8, -0.016 \ 2, 1, -161.929 \ 7]$ 。

至此, 线结构光传感器的光平面参数标定完成。

3.2 检测精度分析

在摄像机内参数和光平面参数标定完成后, 即可对工件进行非接触检测。为了验证上述标定方法的可行性, 以图 12 所示的特殊加工的锯齿型标准件作为检测精度的分析评价依据, 锯齿型标准件各相邻棱线之间的距离 10 mm, 公差为 ± 0.01 mm。对非接触检测后得到的点云数据, 如图 13 所示。对点云数

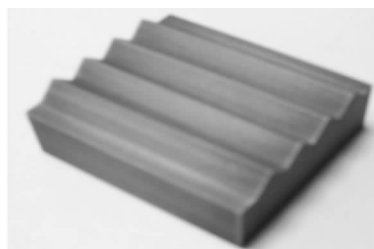


图 12 锯齿型标准件实物图

Fig.12 Physical figure of serrate standard part

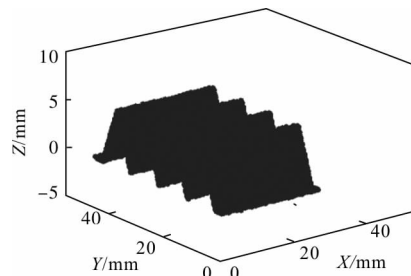


图 13 锯齿型标准件的点云数据

Fig.13 Point cloud data of serrate standard part

据进行后处理,提取标准件的棱线数据,并分别标示四条棱的点云数据为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 ,如图 14 所示。计算相邻棱线间的距离,并与真实距离值做差,得到棱间距的平均误差及最大最小相对误差结果,如表 2 所示。

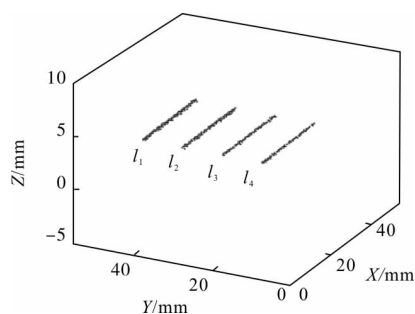


图 14 锯齿型标准件棱线提取

Fig.14 Ridge extracting of serrate standard part

表 2 棱线间距的测量误差

Tab.2 Measuring error of distance between ridges

Distance	Mean distance/mm	Absolut value of mean error/mm	Absolut value of min and max relative error
$ l_1-l_2 $	9.953 7	0.046 3	0.23%~0.69%
$ l_2-l_3 $	10.048 2	0.048 2	0.31%~0.72%
$ l_3-l_4 $	10.035 4	0.035 4	0.21%~0.63%

由表 2 中的实验数据可知,线结构光传感器经过标定后,其平均误差绝对值最大为 0.048 2 mm,相对误差绝对值最大为 0.72%。实验结果表明,在当前实验条件下线结构光传感器的检测精度可满足大多数工件在粗加工及半精加工阶段的在机检测精度要求。

影响检测精度的主要因素包括:(1)加工中心本体的定位精度;(2)摄像机镜头的微小畸变;(3)平面靶标的制作精度不高;(4)激光条纹中心线的提取误差;(5)摄像机内参数的标定精度;(6)线式激光器的投射质量。通过改进实验条件并减小上述误差,可进一步提高线结构光传感器的检测精度。

4 结 论

为缩短加工中心工件的在机检测时间,提高线结构光传感器标定的效率和灵活性,文中基于同心圆平面靶标,将三点透视模型与交比不变原理相结合,实现了线结构光平面参数模型的简易标定,通过实验分析并验证了该方法的可行性。该标定方法操

作过程灵活方便、标定算法简单,满足了工件加工后在机检测的现场快速标定需要。文中旨在保证粗加工及半精加工等工序中的检测精度同时,力求解决实际检测过程中线结构传感器标定的效率和灵活性问题,而如何有效地减小影响线结构光传感器检测精度的误差,尚需进一步研究。

参 考 文 献:

[1] Li Peng, Ma Zi, Chen Yuqing, et al. Application of composite inspecting equipment in on-line inspection of machining center [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2013, 19(3): 577-587. (in Chinese)
李鹏, 马孜, 陈余庆, 等. 复合式检测装置在加工中心在线检测中的应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 577-587.

[2] Jason G. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2):128-160.

[3] Nie Jianhui, Ma Zi, Hu Ying. Line structured light parameter calibration based on stereo vision [J]. *Journal of Optoelectronic · Laser*, 2011, 22(12): 1836-1841. (in Chinese)
聂建辉, 马孜, 胡英. 利用立体视觉的线结构光参数标定 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(12): 1836-1841.

[4] Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(1): 43-55. (in Chinese)
邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.

[5] Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system [C]//Robots and Vision'88 Conf, Proceedings, 1998: 5-13.

[6] Duan Fajie, Liu Fengmei, Ye Shenghua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21 (1): 108-110. (in Chinese)
段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 108-110.

[7] Xu Guangyou, Liu Lifeng, Zeng Jianchao, et al. A new method of calibration in 3D vision system based on structured-light [J]. *Chinese J Computers*, 1995, 18 (6): 450-456. (in Chinese)
徐光佑, 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(6): 450-456.

- [8] Huynh D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 33(1): 73–86.
- [9] Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun, Xu Yuan. Calibration approach for structured lighted stripe vision sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(2): 210–214. (in Chinese)
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.
- [10] Xu Li, Zhang Zhijiang. Calibration in structured light system using coplanar target [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(8): 1063–1069. (in Chinese)
许丽, 张之江. 基于共面靶标的结构光标定方法 [J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1063–1069.
- [11] Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, et al. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3124–3128. (in Chinese)
刘震, 张广军, 魏振忠, 等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3124–3128.
- [12] Wang Ying, Zhang Yuan. A calibration method for circle structure light based on coplanar reference object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 174–178. (in Chinese)
王颖, 张园. 一种基于平面靶标的圆结构光标定方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 174–178.
- [13] Han Jiandong, Lv Naiguang, Dong Mingli, et al. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 949–963. (in Chinese)
韩建栋, 吕乃光, 董明利, 等. 线结构光传感系统的快速标定方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 949–963.
- [14] Huang Fengshan, Qian Huifen. Single camera 3D coordinate vision measuring system using a light pen [J]. *Opto - Electronic Engineering*, 2007, 34(4): 69–72. (in Chinese)
黄凤山, 钱惠芬. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统 [J]. 光电工程, 2007, 34(4): 69–72.
- [15] Hong Lei, Tian Qiliang, Ji Baojian. Calibration method for line structured-light parameters based on homography matrix [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 44(12): 1212003. (in Chinese)
洪磊, 田啟良, 嵇保健. 基于单应性矩阵的线结构光参量标定法[J]. 光子学报, 2015, 44(12): 1212003.
- [16] Chen Tianfei, Zhao Jibin, Wu Xiang. New calibration method for line structured light sensor based on planar target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112004. (in Chinese)
陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112004.
- [17] Kuang Yongcong, Cui Liangchun. A new calibration method for line-structured light vision sensor based on Llinear scale [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2016, 44(1): 71–77. (in Chinese)
邝泳聪, 崔亮纯. 基于线纹尺的线结构光视觉传感器标定新方法[J]. 华南理工大学学报, 2016, 44(1): 71–77.
- [18] Xie Zexiao, Chi Shukai, Wang Xiaomin, et al. Calibration method for structure -light auto -scanning measurement system based on coplanarity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 176–183. (in Chinese)
解则晓, 迟书凯, 王晓敏, 等. 基于共面法的结构光自扫描测量系统参数标定方法[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 176–183.
- [19] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [20] Zhou Fuqiang, Liu Ke, Zhang Guangjun. Uncertainty analysis of constructing calibration points based on invariance of cross ratio [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(12): 1524–1528. (in Chinese)
周富强, 刘珂, 张广军. 交比不变获取标定点的 uncertainty 分析[J]. 光电子·激光, 2006, 17(12): 1524–1528.