

文章编号: 0253-2239(2009)11-3124-05

一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法

刘 震 张广军 魏振忠 江 洁

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要 针对现有线结构光视觉传感器标定方法存在的局限性, 提出一种不需要求解光平面标定点的标定方法。根据光条图像求解平面靶标上光条在摄像机坐标系下的 Plücker 矩阵。在视觉传感器前合适位置将平面靶标摆放多次, 联立所有光条空间直线的 Plücker 矩阵, 求解光平面在摄像机坐标系的平面方程。最后通过非线性优化方法得到光平面方程在最大似然准则下的最优解。在标定过程中, 所有光条点都参与光平面参数的计算过程, 因此该方法标定结果精度高、稳健性强。实验证明, 与现有方法相比该方法标定精度提高 30% 左右。

关键词 机器视觉; 线结构光视觉传感器; 平面靶标; Plücker 直线坐标

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092911.3124

An Accurate Calibration Method for Line Structured Light Vision Sensor

Liu Zhen Zhang Guangjun Wei Zhenzhong Jiang Jie

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract A calibration method for line structured light vision sensor that does not require extraction of control points in the light plane is proposed to solve the calibration problem of line structured light vision sensor. The planar target is placed in front of the vision sensor several times. The Plücker matrix of light strip on the target plane is computed. The equation of the light plane in the camera coordinate frame can be solved by combining the Plücker matrix of the light stripe on the target plane at different positions. The maximum likelihood estimation of the light plane equation is obtained through nonlinear optimization. The proposed method is robust and accurate because all of the light stripe image points are used to determine the equation of the light plane. Experimental results show that, compared with that of existing calibration methods, the calibration accuracy of the proposed method improves about 30%.

Key words machine vision; line structured light vision sensor; planar target; Plücker coordinate

1 引 言

在诸多的结构光视觉测量方法中, 结构光三维视觉测量以其大量程、非接触、快速、较高精度等特点, 近年来在工业环境中得到了广泛的应用^[1~6]。

线结构光视觉传感器是目前应用最广的一种结构光视觉传感器, 其标定过程主要分为摄像机内部参数标定和视觉传感器结构参数标定两个步骤。摄像机标定主要有基于径向约束的 Tsai 方法^[7]和基

于平面靶标的张方法^[8]。视觉传感器结构参数的标定方法, 如 Dewar R^[9] 使用了“拉丝法”; 段发阶等^[10] 根据线结构光视觉测量的特点提出了锯齿靶法等。这些方法都存在获取的光平面标定精度不够且数目较少等问题。Huynh^[11] 和徐光祐^[12] 分别提出了利用交比不变性原理获取光平面标定点的标定方法。该方法的基本思想是通过靶标上已知精确坐标的至少 3 个共线点, 利用交比不变性获得结构

收稿日期: 2008-10-30; 收到修改稿日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(50727502, 50805006)资助项目。

作者简介: 刘 震(1975—), 男, 博士研究生, 主要从事光电精密测试、机器视觉和动态三维测量等方面的研究。

E-mail: chichi008@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 张广军(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电精密测试和机器视觉等方面的研究。

E-mail: zgj310@eyou.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光光条与该已知 3 点所在直线的交点的坐标, 从而获得较高精度的光平面标定点。该方法也存在获取光平面标定点较少, 立体靶标加工困难等缺点。

周富强等^[13]提出了一种基于未知运动平面靶标的线结构光视觉传感器现场标定方法(下面简称周方法)。该方法通过交比不变性获得平面靶标上的光平面标定点, 经过多次移动平面靶标获得大量光平面标定点。但该方法在确定光平面标定点在摄像机坐标系下的三维坐标时, 需要进行多次坐标转换, 这样会增大光平面标定点的定位误差。在通过拟和多个光平面标定点确定光平面方程时, 每个光平面标定点的误差都会传递到光平面方程上。

针对现有线结构光视觉传感器标定方法存在的局限性, 提出一种不要求取光平面标定点的线结构光视觉传感器现场标定方法。该方法通过计算平面靶标上光条的 Plücker 直线坐标确定光平面方程, 光条图像中所有光条点都参与光平面方程参数的计算过程。因此该方法标定精度更高, 稳健性更强。

2 线结构光视觉传感器模型

线结构光视觉传感器模型的几何结构关系如图 1 所示。 $O_w x_w y_w z_w$ 为全局坐标系, $O_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, $O_u x_u y_u$ 为图像坐标系。

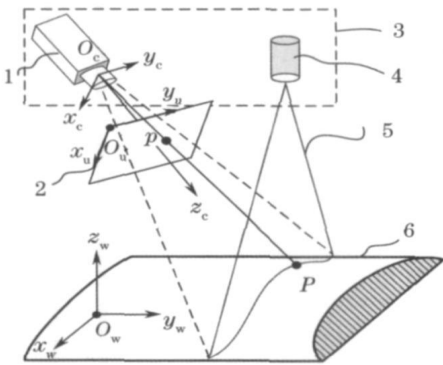


图 1 线结构光视觉传感器模型的几何结构关系图
Fig. 1 Geometric structure of line structured light vision sensor model

图 1 中 1 为摄像机; 2 为图像平面; 3 为线结构光视觉传感器; 4 为激光投射器; 5 为光平面; 6 为被测物体。设光平面上任意点 P 在图像平面上的投影点为 p , 在图像坐标系下的齐次坐标为 \mathbf{p} , 在全局坐标系下的齐次坐标为 $\mathbf{P}_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 。

根据摄像机成像模型可得

$$\rho \mathbf{p} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \mathbf{P}_w = \mathbf{M} \mathbf{P}_w, \tag{1}$$

式中 ρ 为比例系数, \mathbf{A} 为摄像机内参矩阵, \mathbf{R}, \mathbf{t} 为全

局坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵与平移矢量, \mathbf{M} 为摄像机投影矩阵。

P 点同时还满足所在光平面的平面方程, 设光平面在全局坐标系下的方程为

$$ax_w + by_w + cz_w + d = 0, \tag{2}$$

式中 a, b, c, d 分别表示光平面方程的四个系数。

联立(1), (2)式可得

$$\begin{cases} \rho \mathbf{p} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \mathbf{P}_w \\ ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \end{cases} \tag{3}$$

在 $O_w x_w y_w z_w$ 中, 由摄像机模型确定射线 $O_c p$ 的方程, 由(2)式确定光平面的方程。这样, 由 $O_c p$ 和光平面的交点可以唯一确定点 P 的三维全局坐标。

3 线结构光视觉传感器标定原理

将全局坐标系定义在线结构光视觉传感器中的摄像机坐标系下。视觉传感器结构参数的具体标定过程如图 2 所示。设 $O_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系。 $O_{i(i)} x_{i(i)} y_{i(i)} z_{i(i)}$ ($i = 1 \cdots m$) 为第 i 个摆放位置的平面靶标坐标系, 其中 $z_i = 0$, $\vec{o_{i(i)} z_i}$ 为平面靶标的法向。 Q 为光平面, $Q_{c(i)}$ 为靶标平面。 $l_{im(i)}$ 为光条图像直线。 $Q_{l(i)}$ 为过摄像机原点和 $l_{im(i)}$ 的平面。 $l_{(i)}$ 是由 $Q, Q_{c(i)}$ 和 $Q_{l(i)}$ 三个平面相交的空间直线, 称为光条直线。 $L_{(i)}$ 为 $l_{(i)}$ 的 Plücker 矩阵。 $T_{i(i),c}$ 为 $O_{i(i)} x_{i(i)} y_{i(i)} z_{i(i)}$ 到 $O_c x_c y_c z_c$ 的转换矩阵。

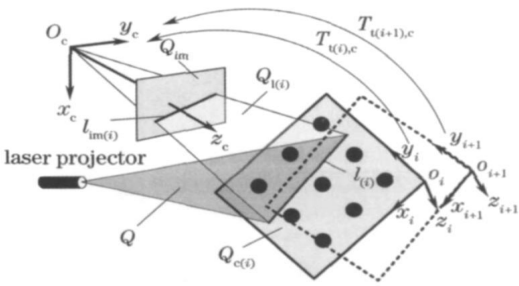


图 2 结构光视觉传感器标定过程示意图
Fig. 2 Calibration process of structured light vision sensor

线结构光视觉传感器结构参数标定的主要步骤是: 1) 将平面靶标在合适位置处摆放 2 次以上, 激光投射器将光条照射在靶标平面上。线结构光视觉传感器拍摄靶标的光条图像, 根据已知的摄像机内部参数校正图像畸变, 并提取光条中心点的图像坐标。2) 确定平面靶标每个摆放位置, 靶标平面上的光条直线 $l_{(i)}$ 的 Plücker 矩阵。3) 联立多根光条的 Plücker 直线坐标, 计算光平面 Q 在摄像机坐标系下的平面方程。4) 通过非线性优化方法得到平面方

程在最大似然准则下的最优解。

3.1 提取光条中心点图像坐标

根据摄像机标定结果,对线结构光视觉传感器采集到的光条图像进行畸变校正。采用 Steger^[15]提出的亚像素线条中心提取方法提取光条中心点图像坐标。

在标定过程中光条与平面靶标的标定相交会引起光条图像变形,影响光条质量。为了避免将这些光条数据带入标定过程中,在光条中心点链接阶段加入直线性约束。直线约束就是要保证所链接的光条中每个点的法向方向与光条第一个点的法向方向变化小于事先设定的阈值。通过以上光条中心提取方法可以有效保证所提光条中心的直线性,进而保证标定精度。

3.2 求解 $L_{(i)}$

靶标平面 $Q_{c(i)}$ 在平面靶标坐标系下平面方程的系数为 $Q_c = [0, 0, 1, 0]^T$, 在摄像机坐标系下平面方程的系数为

$$Q_{c(i)} = T_{l(i),c} Q_c, \quad (4)$$

式中 $T_{l(i),c}$ 的求解方法参照文献[8]

光条直线 l_i 经投影矩阵 $M_{(i)}$ 映射到摄像机图像平面上生成二维直线 $l_{m(i)}$ 。 $l_{m(i)}$ 与摄像机中心可形成平面 $Q_{l(i)}$,

$$Q_{l(i)} = M_{(i)}^T l_{m(i)}. \quad (5)$$

$l_{(i)}$ 可由 $\pi_{c(i)}$ 与 $\pi_{l(i)}$ 相交确定,则 $L_{(i)}$ 的对偶 Plücker 表示 $L_{(i)}^*$ 为

$$L_{(i)}^* = Q_{c(i)} (Q_{l(i)})^T - Q_{l(i)} (Q_{c(i)})^T, \quad (6)$$

则 $L_{(i)}$ 可根据 $L_{(i)}^*$ 通过简单的重写规则得到

$$\begin{aligned} l_{12(i)} : l_{13(i)} : l_{14(i)} : l_{23(i)} : l_{42(i)} : l_{34(i)} = \\ l_{34(i)}^* : l_{42(i)}^* : l_{23(i)}^* : l_{14(i)}^* : l_{13(i)}^* : l_{12(i)}^*. \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 确定光平面方程

将平面靶标在线结构光视觉传感器前合适位置摆放 m 次(其中 $m \geq 2$), 得到 m 个 $L_{(i)}$ 。根据所有光条共面的特性,光平面 Q 可通过求解 X^T 的零空间获得

$$X^T Q = 0, \quad (8)$$

式中 $X = [L_{(1)}, L_{(2)} \cdots L_{(m)}]$, X 为 $4 \times 4m$ 矩阵。

3.4 非线性优化

(8)式所求光平面的平面方程为最小代数意义下的最小解,可利用最大似然准则对平面 Q 进行优化得到平面 Q 在最大似然准则下的最优解。

由光平面 Q 与 $Q_{c(i)}$ 确定 $L_{(i)}^*$

$$L_{(i)}^* = Q_{c(i)} (Q)^T - Q (Q_{c(i)})^T M. \quad (9)$$

通过(9)式求解 $l_{(i)}$ 的 Plücker 矩阵 $L_{(i)}$ 。

设 $l_{(i)} = (l_{12(i)}, l_{13(i)}, l_{14(i)}, l_{23(i)}, l_{42(i)}, l_{34(i)})$ 为 $l_{(i)}$ 的 Plücker 直线坐标,它由 $L_{(i)}$ 的 6 个非零元素构成。通过一个线投影矩阵 $P_{(i)}$ 可以将用 Plücker 直线坐标表示的 $l_{(i)}$ 映射到图像直线 $l_{m(i)} = (A_{(i)}, B_{(i)}, C_{(i)})^T$,

$$l_{m(i)} = P_{(i)} l_{(i)} = \begin{Bmatrix} [M_{(i)}^2 \wedge M_{(i)}^3 | l_{(i)}] \\ [M_{(i)}^3 \wedge M_{(i)}^1 | l_{(i)}] \\ [M_{(i)}^1 \wedge M_{(i)}^2 | l_{(i)}] \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

式中线投影矩阵 $P_{(i)} = \begin{bmatrix} M_{(i)}^2 \wedge M_{(i)}^3 \\ M_{(i)}^3 \wedge M_{(i)}^1 \\ M_{(i)}^1 \wedge M_{(i)}^2 \end{bmatrix}$, $[M_{(i)}^{ij}]^T$ 为

摄像机投影矩阵 $M_{(i)}$ 的第 ij 行。 $M_{(i)}^i \wedge M_{(i)}^j$ 表示平面 $M_{(i)}^i$ 与 $M_{(i)}^j$ 交线的 Plücker 直线坐标 $l_{(i)}$ 。

(10)式中 $[M_{(i)}^{ij} \wedge M_{(i)}^{kl} | l_{(i)}]$ 可通过下式求解

$$\begin{aligned} [M_{(i)}^{ij} \wedge M_{(i)}^{kl} | l_{(i)}] &= [l_{(i)} | l_{(i)}] = \\ & l_{12(i)} l_{34(i)} + l_{13(i)} l_{42(i)} + l_{14(i)} l_{23(i)} + \\ & l_{23(i)} l_{14(i)} + l_{42(i)} l_{13(i)} + l_{34(i)} l_{12(i)}, \end{aligned} \quad (11)$$

设平面靶标第 i 个位置,第 j 个光条图像中心点在 $O_u x_u y_u$ 下的齐次坐标为 $p_{i,j} = [x_{i,j}, y_{i,j}, 1]^T$, 假设图像噪声服从零均值的高斯分布且独立分布,为了得到光平面方程在最大似然准则下的最优解,建立以图像光条中心点 $p_{i,j}$ 到图像直线 $l_{m(i)}$ 距离为最小的优化目标函数

$$f(\alpha) = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{|x_{i,j} A_i + y_{i,j} B_i + C_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \right], \quad (12)$$

式中 $\alpha = (Q, T_{l(1),c}, T_{l(2),c} \cdots T_{l(m),c})$; m 为平面靶标摆放次数, n 为平面靶标第 i 个位置,光条图像中心点的数目。以光平面方程为初解,非线性优化方法(例如 Leven-berg-Marquardt 法)可求解 α 在最大似然准则下的最优解。

4 实验结果

线结构光视觉传感器结构如图 3 所示。CCD 摄像机采用一台配用 55 mm Computar 光学镜头的大恒 SV 1040FM 数码摄像机。摄像机图像分辨率为 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$, 视场为 $50 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$, 测量距离为 540 mm 左右。激光器采用两个 Stocker Yale 单线激光器。标定用平面靶标标定点数量为 23×11 个, 横向与纵向间距皆为 2.5 mm, 精度为 $2 \mu\text{m}$ 。

将平面靶标在线结构光视觉传感器前自由摆放 5 次。提取靶标标定点图像坐标, 标定摄像机内部参数。打开激光器让光条打在平面靶标上, 靶标自

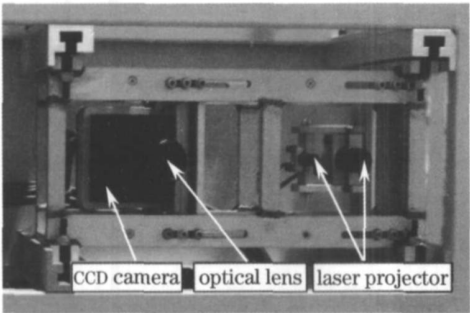


图 3 线结构光视觉传感器结构示意图

Fig.3 Structure of line structure light vision sensor

由移动 4 次。摄像机分别拍摄 4 张有光条的光条图像和 4 张只有靶标标定点没有光条的靶标图像。取前 3 个平面靶标摆放位置的图像数据标定视觉传感器结构参数。第 4 个摆放位置的图像数据用来评价标定精度。线结构光视觉传感器拍摄的标定用图像如图 4、图 5 所示。

实验得到摄像机内部参数矩阵

$$A=\begin{bmatrix}11053.4047&1.1053&705.7599\\0&11054.8414&522.1598\\0&0&1\end{bmatrix},$$

摄像机畸变系数: $k_1=0.1372,k_2=23.68609$, 表 1 为线结构光视觉传感器中两个光平面的标定结果。

表 1 光平面方程

Table 1 Equation of the light plane

		Equation of the light plane
Light plane 1	Closed solution	$x+6.0647y+1.9838z-1025.2454=0$
	Non linear solution	$x+6.0365y+2.0378z-1054.6467=0$
Light plane 2	Closed solution	$x+5.3035y+1.6861z-947.2299=0$
	Non linear solution	$x+5.2845y+1.7322z-971.9137=0$

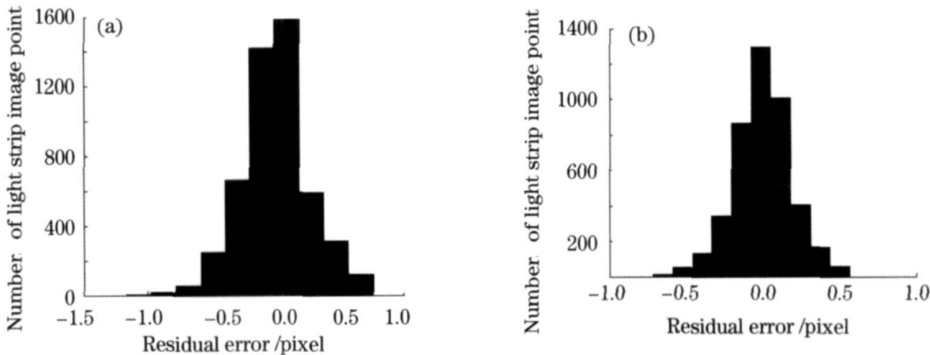


图 6 标定残差。(a) 光平面 1 的标定残差; (b) 光平面 2 的标定残差

Fig.6 Residual error. (a) the residual error of light plane 1; (b) the residual error of light plane 2

为了与周方法^[13]进行更直观的比较,介绍一种评价方法:在图像中提取光条直线与平面靶标垂直方向网格线交点的图像坐标(又称为光平面标定点的图像坐标)。根据计算得到的光平面方程通过(3)

两个光平面的标定残差分别为 0.26 pixel 和 0.19 pixel, 如图 6 所示。

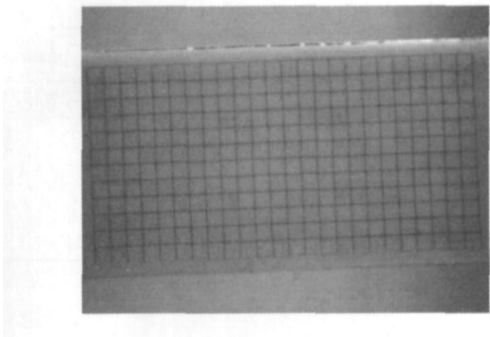


图 4 靶标图像

Fig.4 Target image

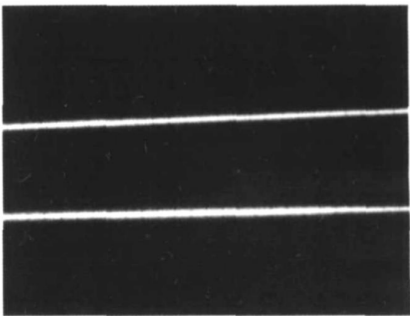


图 5 光条图像

Fig.5 Light strip image

式得到光平面标定点在摄像机坐标系下的三维坐标。根据交比不变性,计算光平面标定点在平面靶标坐标系下的局部坐标。计算任意两个光平面标定点在摄像机坐标系下的绝对距离,通过与平面靶标

坐标下的两点之间绝对距离进行比较得到绝对距离的均方根误差(RMS)。分别根据本文方法和周方

法标定线结构光视觉传感器,具体结果见表2。

表2 两种方法的试验结果

Table 2 Experimental results by two methods

		Equation of the light plane	RMS error / mm	Maximal error / mm
Our method	Light plane 1	$x+6.0365y+2.0378z-1054.6467=0$	0.009	0.026
	Light plane 2	$x+5.2845y+1.7322z-971.9137=0$		
Zhou's method	Light plane 1	$x+6.0474y+2.0467z-1059.7347=0$	0.013	0.046
	Light plane 2	$x+5.3104y+1.7302z-971.4088=0$		

4 结 论

提出了一种不需计算光平面标定点的线结构视觉传感器标定方法。详细介绍了算法的基本原理及具体实施步骤,实验证明了该方法的有效性。

该方法的主要优点是:1)不需计算光平面标定点。光条上每一个点都可参与了光平面参数的求解过程,因此可以大大提高标定精度和标定结果的鲁棒性。实验证明该方法相比周方法提高30%左右。2)平面靶标不需要大量标定点,因此标定成本低,效率高。

该方法的主要缺点是,当由于激光器自身问题导致光平面在标定区域不是平面而是曲面时标定结果会变差。该缺点也是现有结构光视觉传感器标定方法都会遇到的问题,虽然可以通过将光平面拟和为二次曲面等方式来解决,但经过多次试验证明效果不理想。因此如果需要得到高精度的测量精度,仍需选用性能较好的激光器。

参 考 文 献

1 Geary G. M., Cowley D. C. The implementation of automated vision inspection systems in a modern manufacturing plant and their effect on efficiency[C] . *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1996; 669~673

2 Lu R. S., Li Y. F., Yu Q. On-line measurement of straightness of seamless steel pipe using machine vision technique[J] . *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, **94**(1-3): 95~101

3 Zhang Guangjun, Sun Junhua, Chen Dazhi *et al.*. Flapping motion measurement of honeybee bilateral wings using four virtual structured-light sensors[J] . *Sensors and Actuators: A Physical*, 2008, **148**: 19~27

4 Yang Rongqian, Chen Sheng, Wei Yang *et al.*. Robust and accurate surface measurement using structured light [J] . *IEEE Trans. Instrum. and Measure.*, 2008, **57**(6): 1275~1280

5 Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration [J] . *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 482~486

吴 迪, 吕乃光, 欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方

法[J] . *光学学报*, 2008, **28**(3): 482~486

6 Zhang Qichan, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination [J] . *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 207~211

张启灿, 苏显渝, 曹益平等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形[J] . *光学学报*, 2005, **25**(2): 207~211

7 Tsai R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J] . *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, RA-3(4): 323~344

8 Zhang Z. Y. A flexible new technique for camera calibration[J] . *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330

9 Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system [C] . *Proc. Robots and Vision'88 Conf.*, 1988, 5~13

10 Duan Fajie, Liu Fengmei, Ye Shenghua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor [J] . *Chinese Journal Science and Instrument*, 2000, **21**(1): 108~113

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): 108~113

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

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

13 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J] . *Image and Vision Computing*, 2005, **23**: 59~67

14 Wu Qingyang, Su xianyu, Xiang Liquan *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light [J] . *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 619~623

吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J] . *中国激光*, 2007, **34**(2): 619~623

15 Steger C. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures[J] . *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1998, **20**(2): 113~125

16 Harley R, Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M] . Cambridge: Cambridge University Press, 2000