

新型三维视觉测量结构光平面标定方法

俞 乾 张旭苹 张益昕 王 顺 戚 力

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 结构光平面标定是结构光三维视觉测量中的重要环节。传统的标定方法需要昂贵的设备,效率低下,步骤复杂。提出了一种新的三维视觉系统中结构光平面的标定方法。该方法仅使用一个简单的二维平面靶标,在保证靶标与结构光相交的前提下,靶标在摄像机可视范围内自由移动数个位置。对于移动到各个位置的靶标平面,分别建立对应的世界坐标系,并计算该世界坐标系与摄像机坐标系、图像坐标系的转换关系。通过处理算法,可以将每一个位置得到的结构光平面与靶标平面的交线方程统一到摄像机坐标系下。使用最小二乘法拟合多条交线可以标定出结构光平面在摄像机坐标系下的方程。实验证明该方法效率高,步骤简单,具有很好的通用性。

关键词 机器视觉; 三维视觉测量; 结构光平面; 标定; 平面靶标

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s108006

Novel Method for Structured Light Plane Calibration in Three-Dimensional Vision Measurement

Yu Qian Zhang Xuping Zhang Yixin Wang Shun Qi Li

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract The calibration of structured light plane is the key technique in structured light three-dimensional vision measurement. The traditional methods require expensive equipments and complex procedure, and the efficiency is quite low. A novel method for structured light plane calibration is presented. In this method, a simple two-dimensional planar target is used. The target can be freely moved to different positions in the visible space of the camera if only the target and the structured light plane can intersect to each other. The corresponding world coordinate is set for each target in different positions. Transformation relation among the world coordinate, camera coordinate and image coordinate can be calculated. Through processing, the intersecting lines' equations of different positions are unified at the camera coordinate system. Then we can use least square method to fit the structured light plane's equation. The experimental results show that the proposed method is a universal method with high efficiency and simple procedure.

Key words machine vision; three-dimensional vision measurement; structured light plane; calibration; planar target

OCIS codes 120.6650; 150.1135; 150.6910

1 引 言

结构光三维视觉测量技术可以实现对被测物体三维形貌的快速非接触式测量,广泛应用于逆向工程、在线检测等领域。在进行结构光三维视觉测量之前,必须先对结构光平面的参数进行标定。目前,许多学者对结构光平面参数的标定方法进行了研究。Dewar^[1]提出了拉丝标定方法,刘凤梅等^[2]提

出了基于齿形靶标和一维工作台的标定方法,但是这两类方法均需要使用特殊的设备,操作步骤较复杂,不适合现场标定的使用。周富强等^[3]以及许丽等^[4]分别提出了基于交比不变性的标定方法,该方法使用二维平面靶标在观测范围内自由地移动数个位置,实现了对结构光平面的标定。但这类方法均通过标定靶标上至少 3 个共线特征点,并利用交比

收稿日期: 2012-01-06; 收到修改稿日期: 2012-02-24

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009257)和江苏省普通高校研究生科研创新基金(CX10B_020Z)资助课题。

作者简介: 俞 乾(1986—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: austin8396@126.com

导师简介: 张旭苹(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光电探测技术以及分布式光纤传感等方面的研究。

E-mail: xpzhang@nju.edu.cn(通信联系人)

不变性原理得到结构光平面与已知三点所在直线的交点坐标,获取特征点的效率仍然较低。

本文提出了一种新的三维视觉系统中结构光平面标定方法。该方法只需使用一个简单的二维平面靶标,且并不需要使靶标垂直于光平面,在保证靶标与结构光相交的前提下,靶标可在摄像机可视范围内自由移动数个位置。

2 结构光系统建模

结构光三维视觉测量系统中的透视成像过程通常可以近似地看作针孔成像^[5]。图1为摄像机小孔透视变换原理图。分别建立世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$, 摄像机坐标系 $o_c x_c y_c z_c$, 理想图像坐标系 $o_1 x_1 y_1$ 和计算机图像坐标系 $o_0 u_0 v_0$, 其中平面 $o_w x_w y_w$ 与靶标平面重合, 轴 $o_w z_w$ 垂直于靶标平面。

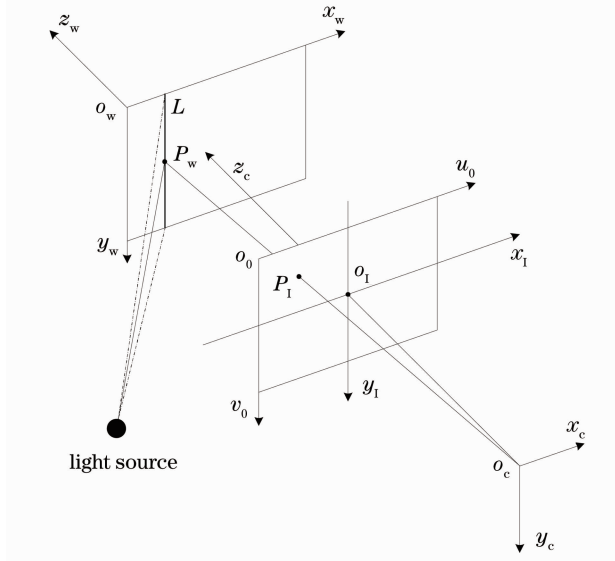


图1 摄像机小孔透视变换原理图

Fig. 1 Schematic of the camera's pinhole perspective transformation

以线结构光为例,光源投射出的结构光平面与靶标相交于直线 L 。 P_w 为直线 L 上一点,其在水世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$ 中的坐标为 $P_w(x_w, y_w, z_w)$,在摄像机坐标系 $o_c x_c y_c z_c$ 中的坐标为 $P_c(x_c, y_c, z_c)$,在理想图像坐标系 $o_1 x_1 y_1$ 中的坐标为 $P_1(x_1, y_1)$,在计算机图像坐标系 $o_0 u_0 v_0$ 中的坐标为 $P_0(x_0, y_0)$ 。世界坐标系与计算机图像坐标系的转换关系为^[6]

$$s \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & c & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 s 为比例系数。矩阵 \mathbf{A} 称为内部参数, (u_0, v_0) 为理想图像坐标系原点 o_1 在计算机图像坐标系下的坐标, α 和 β 分别为摄像机在 x, y 方向上的归一化焦距, c 为摄像机 x 轴和 y 轴之间的不垂直因子, 矩阵 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 称为外部参数, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别表示世界坐标系与摄像机坐标系之间的旋转和位移关系。

因为靶标平面与平面 $o_w x_w y_w$ 重合, 所以靶标在世界坐标系下的 z 轴坐标 z_w 为 0。令 r_i 表示旋转矩阵 \mathbf{R} 的第 i 列, 则对于靶标上任意一点, 其计算机图像坐标系和世界坐标系的坐标转换关系可以简化为

$$s \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [r_1 \quad r_2 \quad t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 3×3 矩阵 \mathbf{H} 称为从世界坐标系到计算机图像坐标系的单应矩阵。

3 结构光平面的标定

为了标定结构光平面的参数, 必须解决三个问题: 图像畸变的恢复、单应矩阵 \mathbf{H} 的求解以及特征点坐标的提取。

3.1 图像畸变的模型与恢复方法

以上所述的模型均是在理想像点与实际像点重合时的一种近似。实际使用中, 由于摄像机镜头存在光学畸变, 因此理想像点与实际像点之间存在着差异。为了提高测量精度, 需要引入摄像机镜头的畸变模型。在现有的技术条件下对于非高精度的测量, 由镜头缺陷造成的径向畸变是光学畸变的主要类型, 则畸变修正模型可表示为

$$x'_0 = x_0 + (x_0 - u_0) [k_1(x_1^2 + y_1^2) + k_2(x_1^2 + y_1^2)^2], \quad (3)$$

$$y'_0 = y_0 + (y_0 - v_0) [k_1(x_1^2 + y_1^2) + k_2(x_1^2 + y_1^2)^2], \quad (4)$$

式中 (x_0, y_0) 为计算机图像坐标系下的理想像点坐标, (x'_0, y'_0) 为实际观测得到的像点坐标。 $(x_1^2 + y_1^2)$ 为像点到像面中心极径的平方, k_1, k_2 为径向畸变系数。文献^[6]给出了径向畸变系数求取的详细方法。

3.2 单应矩阵 \mathbf{H} 的求解

单应矩阵 \mathbf{H} 拥有 8 个自由度, 只要能够获得 4

个以上的非共线对应点, 就可以由(2)式求出带比例项 s 的 \mathbf{H} 矩阵。定义

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{c}{\alpha^2 \beta} & \frac{cv_0 - \beta u_0}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{c}{\alpha^2 \beta} & \frac{c^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{c(cv_0 - \beta u_0)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{cv_0 - \beta u_0}{\alpha^2 \beta} & -\frac{c(cv_0 - \beta u_0)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(cv_0 - \beta u_0)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则 \mathbf{A} 的系数由下式所述的线性方法从矩阵 \mathbf{B} 中求解得到:

$$\begin{cases} v_0 = \frac{B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} \\ \lambda = B_{33} - \frac{B_{13}^2 + v_0 (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23})}{B_{11}} \\ \alpha = \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}} \\ \beta = \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2}} \\ c = -\frac{B_{12} \alpha^2 \beta}{\lambda} \\ u_0 = \frac{cv_0}{\alpha} - \frac{B_{13} \alpha^2}{\lambda} \end{cases}. \quad (6)$$

在实际使用中, 由于噪声的影响, (6) 式的结果往往不够理想。文献[6]给出了优化的方法。首先使用(6)式解得线性解, 再用得到的结果作为初始值, 通过 Levenberg-Marquardt 算法对 \mathbf{A} 的系数进行非线性优化。

得到内部参数矩阵 \mathbf{A} 之后, 就可以进一步从 \mathbf{H} 中分解出外部参数矩阵 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 。令 h_i 表示矩阵 \mathbf{H} 的第 i 列, 则外部参数矩阵的系数由下式给出:

$$\begin{cases} r_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 r_2 \\ t = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_3 \\ \lambda = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} h_1\| = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} h_2\| \end{cases}. \quad (7)$$

由于噪声的影响, (7) 式得到的旋转矩阵一般不满足正交特性的约束, 可以通过奇异值分解对其进行正交化。

3.3 特征点坐标的提取

采用灰度重心法提取结构光条中心点, 可以准确获得结构光平面与靶标平面交线 L 上的某一点在计算机图像坐标系下的坐标。由

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = s \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

可得到 x_w, y_w 。再加上约束条件 $z_w = 0$, 就可以得到该点在世界坐标系下的坐标 $P_w(x_w, y_w, 0)$ 。

对于单幅靶标图像, 几乎所有位于交线 L 上的点均可以作为特征点被保留下来, 这样单幅图像即可获得数百至上千个特征点, 标定效率大大提高。为了得到结构光平面的方程, 最少需要将靶标放置在两个不同的位置分别进行计算, 以获得非共线点。对于每一个位置得到的特征点, 总可以通过

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将其坐标从各自的世界坐标系统一到摄像机坐标系下, 再通过最小二乘法拟合得到光平面方程。

4 实验与结果

采用 Sensor Technologies 的 STC-CLC152A 型 CMOS 摄像机, 桂林光学 5~100 mm 变焦镜头和东莞市三鼎光电技术有限公司 TLH650-150-3 型线结构光激光器搭建实验系统进行了实验。实验中使用了如图 2(a) 所示的 16×12 格的棋盘状平面靶标, 每一格的间距为 10 mm。在标定时保证光平面与靶标的交线能够在图像上被观测到, 如图 2(b) 所示。

为了便于后续的图片处理, 分别在结构光光源打开和关闭时拍摄了靶标的图像, 并将两者相减, 提取得到了图 2(c) 所示的待处理光条图。使用文献[7]所述的光条提取算法, 可以获得光条中心的亚像素精度坐标。锁定镜头焦距, 使用文献[6]所述方法对摄像机内部参数和径向畸变系数进行标定, 标定结果如表 1 所示。

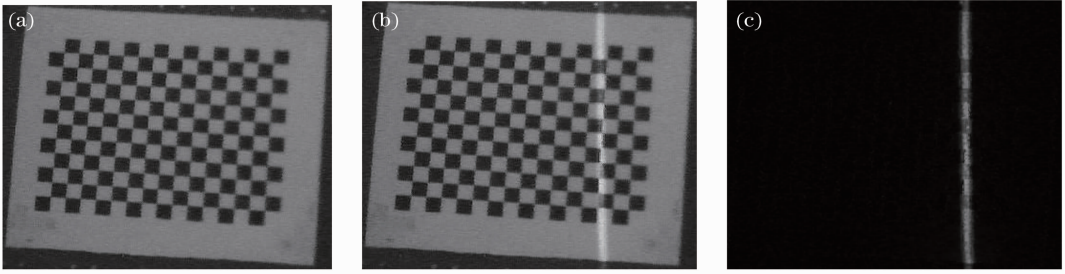


图 2 实验图像。(a)结构光关闭时的靶标；(b)结构光打开时的靶标；(c)提取得到的光条图像

Fig. 2 Experimental images. (a) target when the structured light is off; (b) target when the structured light is on; (c) image of extracted light strip

表 1 内部参数与径向畸变系数标定结果

Table 1 Calibration result of the internal parameters and radial distortion coefficients

Parameter	Value
α	1359.9 /pixel
β	1357.4 /pixel
c	0
u_0	533.9 /pixel
v_0	394.4 /pixel
k_1	-0.09732
k_2	0.41023

通过移动靶标位置并进行数据处理,获得了摄像机坐标系下的三条不同直线上共 1530 个特征点,对这些特征点进行拟合,得到结构光平面方程:

$$32x - 2y - 18z + 10000 = 0. \quad (10)$$

图 3 为拟合得到的平面与特征点之间的关系。其中深色点为实际测量得到的特征点,浅色点组成的平面为拟合得到的光平面。

为了验证标定结果的精度,选取某一位置靶标平

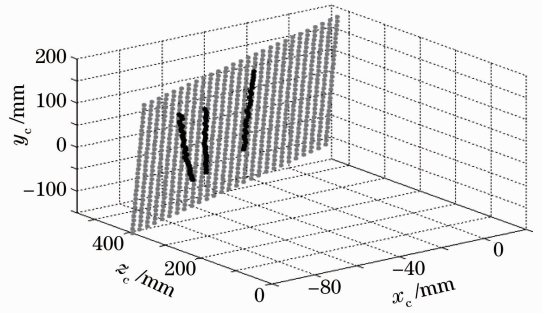


图 3 拟合得到的光平面与特征点之间的关系

Fig. 3 Relation between the feature points and the fitted light plane

面方程与拟合得到的光平面方程联立,得到靶标在该位置处与光平面交线的方程,使用该方程计算交线上点的坐标。同时,使用经过标定的经典双目立体视觉测量系统^[8]来实际测量相同位置处靶标平面与线结构光平面交线上点的坐标。表 2 显示了实际测量结果和计算结果,在 450 个光条点中随机抽取了 15 个点进行对比,其距离的均方根误差为 0.028 mm。

表 2 内部参数与径向畸变系数标定结果

Table 2 Calibration result of the internal parameters and radial distortion coefficients

Measured point coordinates /mm			Calculated point coordinates /mm			Error /mm
x_c	y_c	z_c	x_c	y_c	z_c	Δd
-26.843	-8.107	509.090	-26.851	-8.110	509.067	0.0245
-26.845	-12.657	509.658	-26.817	-12.660	509.642	0.0323
-26.845	-10.025	509.283	-26.837	-10.010	509.307	0.0294
-26.841	-7.743	509.029	-26.854	-7.730	509.019	0.0209
-26.846	-10.377	509.375	-26.834	-10.390	509.355	0.0267
-26.842	-5.839	508.795	-26.868	-5.830	508.779	0.0318
-26.840	-13.035	509.700	-26.814	-13.040	509.690	0.0283
-26.469	-56.687	515.229	-26.490	-56.690	515.210	0.0285
-26.846	-5.073	508.698	-26.873	-5.070	508.683	0.0310
-26.847	-5.454	508.743	-26.871	-5.450	508.731	0.0271
-26.841	-7.368	508.987	-26.857	-7.350	508.971	0.0289
-26.845	-10.781	509.419	-26.831	-10.770	509.403	0.0239
-26.846	-6.945	508.934	-26.859	-6.970	508.923	0.0302
-26.478	-57.439	515.328	-26.485	-57.450	515.306	0.0256
-26.457	-57.061	515.264	-26.487	-57.070	515.258	0.0319

5 结 论

提出了一种新的应用于三维视觉测量系统中的结构光平面标定方法。该方法对靶标的要求较低,且不依靠精密的机械结构来保证标定的精度,仅需要使用一个简单的二维平面靶标。对于单幅靶标图像,几乎所有位于结构光平面与靶标交线上的点均可以作为特征点被保留下来,这样单幅图像即可获得数百至上千个特征点,标定效率大大提高。对大量的特征点进行拟合从而得到结构光平面的方程,可以大大减小测量误差。实验结果也显示该方法效率高,步骤简单,通用性好并且具有较好的标定精度。

参 考 文 献

- 1 R. Dewar. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate systems[C]. Robots and Vision'88 Conf. Proceedings, Detroit, 1988, 5~13
- 2 Liu Fengmei, Duan Fajie, Ye Shenghua. New accurate calibration technique for the light-strip sensors[J]. *J. Tianjin University*, 1999, **2**(5): 547~550
- 刘凤梅, 段发阶, 叶声华. 一种新的高精度的线结构光传感器标定方法[J]. *天津大学学报*, 1999, **2**(5): 547~550
- 3 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Facilitated method to calibrate model parameters of vision sensor for surface measurement[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2005, **41**(3): 175~179
- 周富强, 张广军. 表面视觉传感器模型参数的简易标定方法[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(3): 175~176
- 4 Xu Li, Zhang Zhijiang. Calibration in structured light system using coplanar target [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(8): 1063~1069
- 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
- 5 Sun Changku, He Mingxia, Wang Peng. Laser Measurement Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2008. 144~151
- 孙长库, 何明霞, 王 鹏. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2008. 144~151
- 6 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [C]. Seventh International Conference on Computer Vision (ICCV99), Corfu, Greece, 1999, 666~673
- 7 C. Stetger. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Trans. Pattern Analys. Mach. Int.*, 1998, **20**(2): 113~125
- 8 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 134~137
- 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社, 2008. 134~137

栏目编辑: 李文喆