

# 一种线结构光视觉传感器标定方法<sup>\*</sup>

魏振忠 张广军 徐 园

(北京航空航天大学自动化学院 北京 100083)

**摘要:**在线结构光视觉传感器的标定中,结构光光平面上三维世界标定点的获取一直是一个难题。主要是因为靶标上已知的三维世界点很难恰好位于结构光光平面上。针对这个问题,提出了一种基于双重交比不变的线结构光视觉传感器的标定方法,设计了相应的标定靶标。利用双重交比不变性,可以获取光平面上任意数量的高精度的三维标定点,从而解决了线结构光视觉传感器三维标定不易获取且数量少的问题,提高了线结构光视觉传感器的标定精度。试验结果表明该方法可以满足大型工件的结构光三维视觉检测精度的要求。

**关键词:**双重交比不变 线结构光视觉传感器 标定 视觉检测

**中图分类号:**TP242.62

## 0 前言

结构光视觉检测技术为主要代表的主动视觉检测技术在工业检测中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。线结构光视觉传感器由于具有结构简单、模型易于建立以及信息量较大等特点,在结构光视觉检测中应用最为广泛。

线结构光视觉传感器的标定是一项关键技术,是国内外学者研究的重点。其中足够数量的高精度标定点的获取是标定的难点,这主要是因为靶标上已知的三维世界点很难恰好位于结构光光平面上,使得三维标定点的获取变得困难。现有的方法如拉丝法<sup>[2,3]</sup>和锯齿靶法<sup>[4,5]</sup>等获得的标定点的精度往往较低,且数量较少,限制了标定精度的提高。标准靶尺结合精密移动台法、光电瞄准装置结合精密移动台法等<sup>[6,7,8]</sup>需要精密移动台,成本高,操作不方便,标定费时,尽管能够获得较高精度的标定点的,但不适合现场标定。

1995年清华大学的徐光祐等<sup>[9]</sup>、1999年澳大利亚的D. Q. Huynh<sup>[10]</sup>先后提出了利用交比不变性原理来获取线结构光传感器标定点的办法。这种方法通过高精度的三维立体标定靶标可以获得高精度的标定点的。但存在的问题仍然是标定点的数量较少,因此标定精度还有待提高。

基于此,提出了一种新的基于双重交比不变性的线结构光视觉传感器标定点的获取方法。利用该方法可获取光平面上任意多的、高精度的标定点的,解

决了难于获取大量高精度的标定点的的问题,从而提高了线结构光视觉传感器的标定精度。

## 1 线结构光视觉传感器的数学模型

图1为线结构光视觉传感器的透视投影变换模型。 $O_c$ 为摄像机透视投影中心,摄像机的像平面到 $O_c$ 点的距离为 $f$ ,称为有效焦距。 $O_w x_w y_w z_w$ 为世界坐标系, $O_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, $O_{xy}$ 为摄像机像平面坐标系, $x_c$ 轴和 $y_c$ 轴分别平行于 $x$ 轴和 $y$ 轴且方向相同, $z_c$ 轴与摄像机镜头主光轴重合。

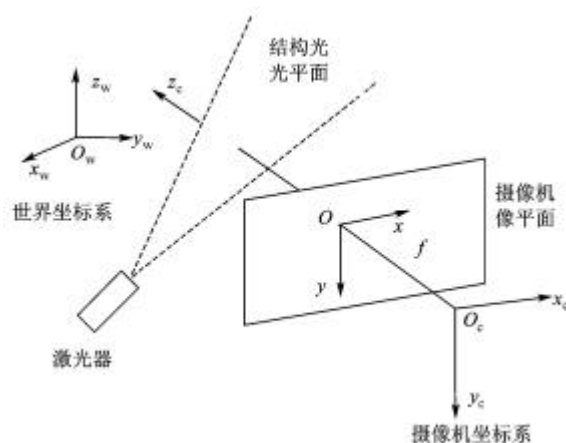


图1 线结构光视觉传感器模型

线结构光视觉传感器的数学模型由两部分组成: 摄像机的透视投影成像模型。 结构光光平面方程。

根据摄像机针孔成像原理及透视投影变换原理,摄像机的透视投影成像模型可描述如下<sup>[11]</sup>

<sup>\*</sup> 教育部跨世纪优秀人才培养计划基金和国家杰出青年科学基金资助项目(50125518)。20040619 收到初稿,20041030 收到修改稿

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} \\ \mathbf{w} \cdot \mathbf{y} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{R}$  —— 旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{t}$  —— 平移矢量

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

$w$  —— 比例因子，是一个常数

光平面方程的方程可描述为

$$ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \quad (2)$$

式(1)和式(2)构成了线结构光视觉传感器一完整的数学模型。根据这一模型，线结构光视觉传感器的标定分为两步：一是摄像机成像模型参数  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  的标定，二是结构光光平面方程的标定。求解式(1)中的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  至少需要 6 个非共面的三维世界点及其对应的二维像点；确定式(2)至少需要光平面上的 3 个非共线的三维世界点。为了提高标定的精度，往往需要获取更多的高精度标定点。

## 2 双重交比不变原理

在透视投影变换下，长度以及长度之间的比率是可以改变的，但两个关于长度的比率之间的比值具有不变性<sup>[12]</sup>。

如图 2 所示，平面  $\pi_1$  上有三条非重合直线  $A_i B_i C_i$  ( $i=1,2,3$ )，直线  $D_1 D_2 D_3$  与这三条直线分别交于点  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$ 。通过透视投影中心  $O$ ，它们在平面  $\pi_2$  上的像分别为  $A'_i B'_i C'_i$  和  $D'_1 D'_2 D'_3$ 。

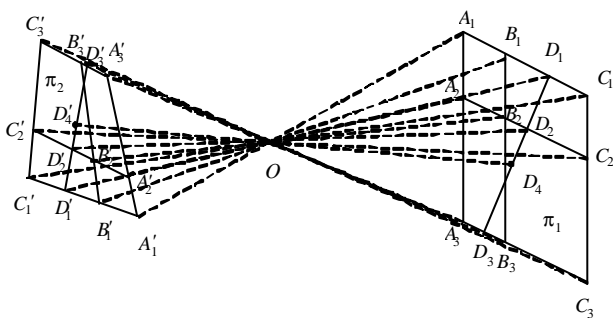


图 2 交比不变性原理

根据透视投影定理，直线经过透视投影变换仍

然为直线。因此点  $A'_i$ 、 $B'_i$ 、 $C'_i$ 、 $D'_i$  ( $i=1,2,3$ ) 共线。共线四点的交比定义为

$$r(A, B, C, D) = \frac{AC}{CB} / \frac{AD}{DB} \quad (3)$$

根据透视投影变换下交比不变原理，有下式成立

$$r(A_i, B_i, C_i, D_i) = r(A'_i, B'_i, C'_i, D'_i) \quad (4)$$

在点  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  的坐标及点  $A'_i$ 、 $B'_i$ 、 $C'_i$ 、 $D'_i$  的坐标已知的条件下，利用式(4)可获得  $D_i$  的坐标。这样可分别获得点  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  的坐标。

在直线  $D_1 D_2 D_3$  上任取一点  $D_4$ ，对应  $O$  点的透视投影点为  $D'_4$ 。再次利用交比不变原理，有

$$r(D_1, D_2, D_3, D_4) = r(D'_1, D'_2, D'_3, D'_4) \quad (5)$$

由式(4)一次交比不变可获得点  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  的坐标，在其对应的像点  $D'_1$ 、 $D'_2$ 、 $D'_3$  的坐标及点  $D'_4$  的坐标已知的条件下，则再次利用交比不变式(5)可求出  $D_4$  的坐标。依此类推，可获取直线  $D_1 D_2 D_3$  上任意一点的坐标，把交比的上述特性称为双重交比不变性。

## 3 线结构光视觉传感器的标定

### 3.1 标定靶标的设计

根据线结构光视觉传感器的数学模型及双重交比不变原理，设计了如图 3 所示样式的靶标，以提供标定所需的高精度的标定点。

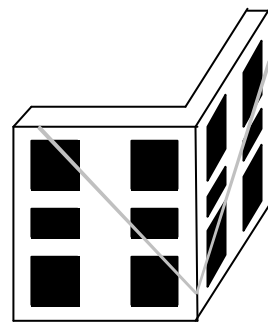


图 3 标定靶标

该靶标由相互垂直的两个刚性平面构成。每个平面上有 6 个黑色正方形，其中第一、三行的四个为 40 mm×40 mm，第二行的两个为 20 mm×16 mm。第一、二行和第二、三行的间距均为 7 mm。两列的间距为 20 mm，靶标加工精度为 0.005 mm。方块的角点做为标定特征点，一方面避免了由于透视投影变换所引起的畸变误差，另一方面其二维图像点易于提取，可以达到很高的精度。整个靶标可以提供 48 个非共面的三维世界点及其对应的二维像点，用于线结构光视觉传感器的摄像机成像模型参数的标

定, 远远超过所需最少 6 个非共面点的要求, 能够有效提高参数标定的精度。

靶标面上两条灰色的直线示意了线结构光视觉传感器投射结构光光平面而形成结构光光条的情形。光条与方块的边缘相交产生的交点, 利用式(4)一次交比不变可以由方块共线的已知顶点求得。每个靶标面上获取至少 3 个这样的交点后, 就可以根据前面所分析的双重交比不变原理式(5), 求得光条上其他位置任意一点。如此便可以获得光平面上任意多的非共线的点, 用于结构光光平面方程的标定, 从而有效提高结构光光平面的标定精度。

### 3.2 线结构光视觉传感器的标定

#### 3.2.1 摄像机成像模型的标定

由式(1), 可以得到如下两个方程

$$\begin{aligned} x_w r_1 + y_w r_2 + z_w r_3 + t_x - x_w r_7 x / f - \\ y_w r_8 x / f - z_w r_9 x / f = t_z x / f \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_w r_4 + y_w r_5 + z_w r_6 + t_y - x_w r_7 y / f - \\ y_w r_8 y / f - z_w r_9 y / f = t_z y / f \end{aligned} \quad (7)$$

由标定靶标提供的 48 个标定点的空间三维世界坐标 $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ 及其像坐标 $(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, 48)$ , 并且式(6)、(7)两边同除以  $t_z$ , 可以得到如下由 96 个方程组成的非齐次线性方程组

$$AX = B \quad (8)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{w48} & y_{w48} & z_{w48} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w48} & y_{w48} & z_{w48} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{w1}x_1/f & -y_{w1}x_1/f & -z_{w1}x_1/f & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{w1}y_1/f & -y_{w1}y_1/f & -z_{w1}y_1/f & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{w48}x_{48}/f & -y_{w48}x_{48}/f & -z_{w48}x_{48}/f & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{w48}y_{48}/f & -y_{w48}y_{48}/f & -z_{w48}y_{48}/f & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$X = [r'_1 \ r'_2 \ r'_3 \ r'_4 \ r'_5 \ r'_6 \ r'_7 \ r'_8 \ r'_9]^T$$

$$B = [x_1/f \ y_1/f \ L \ x_{48}/f \ y_{48}/f]^T$$

$$r'_i = r_i / t_z \ (i=1 \sim 9)$$

$$t'_i = t_i / t_z \ (i=x, y)$$

利用最小二乘法可以求出上述方程组的 11 个解, 这 11 个解包含了一个比例系数  $1/t_z$ 。虽然它并不影响式(1)的映射关系, 但求解这些参数的时候却

忽略了旋转矩阵  $R$  的正交性。基于这一点, 在式(8)的基础上增加如下 6 个正交约束方程

$$\begin{cases} t_z^2((r'_1)^2 + (r'_4)^2 + (r'_7)^2) - 1 = 0 \\ t_z^2(r'_1 r'_2 + r'_4 r'_5 + r'_7 r'_8) = 0 \\ t_z^2((r'_3)^2 + (r'_6)^2 + (r'_9)^2) - 1 = 0 \\ t_z^2(r'_1 r'_3 + r'_4 r'_6 + r'_7 r'_9) = 0 \\ t_z^2((r'_2)^2 + (r'_5)^2 + (r'_8)^2) - 1 = 0 \\ t_z^2(r'_3 r'_2 + r'_6 r'_5 + r'_9 r'_8) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可构成由 102 个方程组成的非线性方程组, 采用如 Levenberg-Marquardt 等非线性方程组的优化解法, 可以进一步得到  $r'_i = r_i / t_z (i=1 \sim 9)$ ,  $t'_i = t_i / t_z (i=x, y)$  和比例系数  $t_z$  的优化解, 进而可以求得旋转矩阵  $R$  和平移矢量  $t$ 。

#### 3.2.2 结构光光平面的标定

基于双重交比不变原理, 可以获得结构光光平面上任意多的三维标定点  $(x_{pwi}, y_{pwi}, z_{pwi}) (i=1, L, m)$ 。利用式(2)描述的结构光光平面的方程来拟合这些  $m$  个点。目标函数为点到平面的欧式距离的平方和, 即

$$e(a) = \sum_{i=1}^m d_i^2 \quad (10)$$

式中  $a = [a, b, c, d]$

$$d_i = |ax_{pwi} + by_{pwi} + cz_{pwi} + d| / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

使式(9)达到最小的解  $a^* = [a^*, b^*, c^*, d^*]$  即为结构光光平面方程的系数。令

$$d_i = 0 \quad (11)$$

$m$  个结构光光平面上的标定点点带入式(11)可以得到由  $m$  个非线性方程构成的非线性方程组, 采用如 Levenberg-Marquardt 等非线性方程组的优化解法就可以得到的最优解  $a^*$ 。

标定完毕后, 就可以利用式(2)和式(6)、(7), 由二维像坐标 $(x_i, y_i)$ 重构三维世界坐标 $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ , 实现三维测量。

## 4 试验

### 4.1 标定试验

根据线结构光视觉传感器测量原理, 设计了一线结构光视觉传感器, 其实物如图 4 所示。摄像机型号为 MS-368P, 分辨率 420 线, 像元数为 537(h)×597(v)(CCIR)。激光器为半导体红光激光器, 波长为 650 nm, 线宽小于 1 mm。图 5 为设计的标定靶标实物, 利用该靶标提供的标定点, 对所设计的线结构光视觉传感器进行了标定, 结果如下。

#### (1) 内部参数

$f = 16.192\ 337\ S_x = 1.005\ 320\ k = 0.000\ 543$   
 $U_0 = 396.954\ 757\ V_0 = 254.007\ 269$

(2) 摄像机成像模型参数

$$R = \begin{bmatrix} 0.135832 & 0.171788 & 0.975725 \\ 0.843045 & -0.537361 & -0.022753 \\ 0.520408 & 0.825670 & -0.217816 \end{bmatrix}$$

$t = [-61.971294\ 8.464447\ 601.586335]^T$

(3) 线结构光平面方程系数

$[a\ b\ c\ d] = [-0.000769\ 0.056868$   
 $-0.584231\ 10.404217]$



图 4 传感器实物图

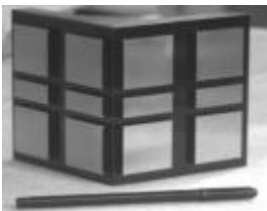


图 5 靶标实物图

4.2 重复性测试试验

对所标定的线结构光视觉传感器光平面上的某一点进行了 10 次重复测量，重构了其三维世界坐标，以测试该传感器测量的重复性。试验数据如表 1 所示。

表 1 线结构光视觉传感器重复性测试数据 mm

测试次序	x	y	z
1	-1.896	-25.482	15.330
2	-1.903	-25.501	15.328
3	-1.889	-25.471	15.331
4	-1.889	-25.463	15.332
5	-1.904	-25.493	15.329
6	-1.893	-25.496	15.329
7	-1.884	-25.477	15.330
8	-1.888	-25.481	15.330
9	-1.895	-25.483	15.330
10	-1.902	-25.483	15.330
3σ	0.021	0.034	0.003

由表 1 可以看出，三维世界坐标的重复性测试误差 3σ 不超过 0.034 mm，具有较好的重复性。

4.3 线结构光视觉传感器测量精度评价试验

利用经纬仪对三坐标测量系统，对所标定的线结构光视觉传感器的测量精度进行了评价试验。所建立的经纬仪对三坐标测量系统的测量精度为 0.032 mm。用经纬仪对三坐标测量系统和所标定的线结构光视觉传感器分别测量了结构光平面上的四个共线的点，并计算出每两个点之间的距离。对距离进行比对，以评价所标定的线结构光视觉传感

器的测量精度。试验数据如表 2 所示。

表 2 线结构光传感器测量精度评价试验数据 mm

测量点之间的 距离 d	经纬仪的 测量结果	结构光传感 器测量结果	比对偏差 d
d <sub>1</sub>	41.038	41.069	0.031
d <sub>2</sub>	61.339	61.348	0.008
d <sub>3</sub>	102.068	101.877	-0.190
d <sub>4</sub>	20.301	20.278	-0.022
d <sub>5</sub>	61.029	60.808	-0.221
d <sub>6</sub>	40.728	40.529	-0.198
RMS 误差			0.145

由表 2 的试验数据可以看出，该标定的线结构光视觉传感器测量两点间绝对距离的方均根值误差不大于 0.145 mm，对于单点的测量精度应该优于此值。因此，完全可以满足大型工件结构光三维视觉检测精度的要求。

5 结论

提出的基于双重交比不变的线结构光视觉传感器的标定方法，解决了线结构光视觉传感器标定点不易获取、数量少、精度低的问题。所实施的重复性及测量精度评价试验均表明，所提出的标定方法切实可行，具有较高的精度，两点间距离的测量精度可达 0.145 mm，并且很适合现场标定。目前，由多个结构光视觉传感器构成的大型工件三维视觉检测的精度一般在 0.5 mm，因此所提出的标定方法能够很好地满足大型工件的结构光三维视觉检测任务的要求。

参 考 文 献

- 1 Jarvis R A. A perspective on range finding techniques for computer vision. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(2): 122~139
- 2 Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system. In: Proceedings of Robots and Vision'88 Conf. Proceedings, Detroit, 1988: 5~13
- 3 James K W. Noncontact machine vision metrology within a CAD coordinate system. In: Proceedings of Autofact'88 Conference, Chicago Illinois, 1988(12): 9~17
- 4 段发阶. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 108~110
- 5 刘凤梅, 段发阶, 叶声华. 利用齿形靶标定线结构光传感器结构参数的新方法. 计量技术, 1999, 7: 3~6
- 6 Chang M, Tai W C. 360-deg profile noncontact

- measurement using a neural network. Optical Engineering 1995, 34(12) : 3 572~3 576
- 7 邓文怡, 吕乃光. 三维测量技术中采用反向传播神经网络方法. 华中理工大学学报, 1999,27(1) : 78~80
- 8 张广军, 魏振忠, 孙志武, 等. 基于 BP 神经网络的结构光三维视觉检测方法研究. 仪器仪表学报, 2002, 23(1) : 31~35
- 9 徐光祐, 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. 计算机学报, 1995,18(6) : 450~456
- 10 Huynh D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach. International Journal of Computer Vision, 1999, 33(1) : 73~86
- 11 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1997
- 12 丘维声. 解析几何. 北京: 北京大学出版社, 2001

## CALIBRATION APPROACH FOR STRUCTURED-LIGHTED-STRIPE VISION SENSOR

Wei Zhenzhong Zhang Guangjun Xu Yuan  
( School of Automation, Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083 )

**Abstract** : The problem associated with calibrating a structured-light-stripe vision sensor is that known world points on the calibration target do not normally fall onto the light stripe plane illuminated from the projector. To address this problem, a method basing on the invariance of double cross ratio is proposed for calibrating structured-light-stripe vision sensor, and the calibration target is designed. By this method, arbitrary amount of 3D world calibration points on the structured light plane can be easily obtained, thus the problem that it is difficult to obtain adequate 3D world calibration points is settled and the calibration accuracy of structured-light-stripe vision sensor is definitely improved. The experiments conducted suggest that the proposed calibration method is of high accuracy and is applicable to many structured light based 3D visual inspection tasks about large workpieces.

**Key words** : Invariance of double cross ratio

Structured-light-stripe vision sensor

Calibration Visual inspection

作者简介: 魏振忠, 男, 1972 年出生, 博士后。主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail : zhenzhongwei@eyou.com