

# 基于双重虚拟圆靶标的激光扫描测头标定

陆敏恂<sup>1</sup> 葛卫梁<sup>1</sup> 周爱国<sup>1</sup> 吕刚<sup>2</sup> 周飞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804  
<sup>2</sup> 海克斯康测量技术(青岛)有限公司, 山东 青岛 266101)

**摘要** 提出了一种基于双重虚拟圆来标定光平面的新方法。该方法利用棋盘的角点在图像坐标系下构建双重虚拟圆, 虚拟圆与激光光条直线建立了相对的位置关系, 根据交比不变原理计算出光条上的特征点在摄像机坐标系下的坐标。在摄像机视场范围内多次变换棋盘位置, 构造出的虚拟圆也相应变换, 由此计算得到更多的特征点, 利用最小二乘法拟合光平面方程。实验表明, 该方法求得的精度要明显优于实际的圆形靶标标定的精度, 光平面标定的均方根误差为 0.04 mm, 且棋盘靶标更易于制作, 标定计算简单可靠, 适合现场标定。

**关键词** 机器视觉; 光平面标定; 双重虚拟圆; 交比不变; 棋盘角点

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1015005

## Calibrating Laser Scanning Probe with Double Virtual Circle Target

Lu Minxun<sup>1</sup> Ge Weiliang<sup>1</sup> Zhou Aiguo<sup>1</sup> Lü Gang<sup>2</sup> Zhou Fei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China  
<sup>2</sup> Hexagon Measurement Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266101, China)

**Abstract** A new calibration method for laser plane with double virtual circles is put forward. This method creates double virtual circles in the image coordinate using the corners of chessboard. Position relationship is established between the virtual circles and the laser stripes. The feature point coordinates of the laser stripe in the camera coordinate system are calculated according to the principle of cross-ratio invariance. The chessboard position is changed for several times within the field of the camera vision aiming to calculate more feature points. All these feature points are fitted to an ideal plane by the least square method (LSM). The experimental results indicate that the precision is obviously higher than the actual circle target. The root mean square (RMS) error of the laser plane calibration is 0.04 mm and the target is easier to make. It concludes that the calibration process is simple, reliable and suits for calibration on spot.

**Key words** machine vision; laser plane calibration; double virtual circles; cross-ratio invariance; chessboard corner

**OCIS codes** 150.0155; 040.1490; 010.3310; 280.3420

## 1 引言

在计算机视觉理论上发展起来的激光扫描测量技术具有非接触、速度快、精度始终等优点<sup>[1-5]</sup>, 已被广泛应用于各种工业产品的在线检测。激光扫描测头主要由摄像机和激光器组成<sup>[6-9]</sup>, 激光器产生的激光经柱面镜变成线结构光, 透射到被测区域形成一激光条, 用摄像机接收散射光, 从而获得被测物体的截面形状或轮廓。

激光扫描测头标定的目的是为了确定激光平面

的位置参数, 同时确定激光扫描测量系统进行空间测量的基准。标定结果会直接影响整个系统的测量精度。常用的光平面标定有立体靶标标定和平面靶标标定两种方法<sup>[10]</sup>。段发阶等<sup>[11]</sup>利用光条与齿形靶标相切来获取特征点的坐标, 但是点的数目较少。Huynh<sup>[12]</sup>提出基于三维靶标的交比不变原理来标定光平面, 可以获得精度较高的特征点的坐标。魏振忠等<sup>[13]</sup>提出的利用双重交比不变法, 使获得的标定特征点的精度大幅提升, 但立体靶标的制作成本

**收稿日期**: 2014-04-01; **收到修改稿日期**: 2014-05-26

**作者简介**: 陆敏恂(1949—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事液压传动与控制 and 机器视觉等方面的研究。

E-mail: luminxun@tongji.edu.cn

较高,在制作过程中必须保证每个特征点之间的相互空间对应位置,另外三维靶标的摆放位置也十分严格。因此近年来平面靶标的研究越来越多。Zhou等<sup>[10]</sup>提出的基于平面靶标的交比不变技术使得标定过程简单、标定精度较高,该方法已成为目前常用的标定方法。陈新禹等<sup>[14]</sup>提出的基于单个平面同心面靶标标定线结构光参数的新方法,获取标定点的效率较高,标定操作灵活。周富强等<sup>[15]</sup>提出的基于一维靶标的光平面标定技术在大尺寸视觉测量中有很好的应用。

为了获取激光扫描测头标定所需的特征点,需要设计特征点获取简单,能够精确反映激光平面位置的标定靶标,靶标设计的好坏直接关系到光平面标定的精度。本文在分析已有标定方法的基础上,提出了利用棋盘角点构建双重虚拟圆靶标的新方法,该方法完全避免实体圆标定时需要拟合椭圆或圆而产生的不精确性。在摄像机视场范围内,移动棋盘两次以上,构建的双重虚拟圆靶标也相应地变换两次以上,根据交比不变原理就可以完成光平面的标定。通过实验验证,该方法操作简单灵活,适合现场标定。

## 2 激光扫描测头的数学模型及交比不变的原理

图1为激光扫描测头的数学模型。有三种坐标系:图像坐标系  $Ouv$ 、摄像机坐标系  $O_c - x_c y_c z_c$  以及靶标所在的世界坐标系  $O_w - x_w y_w$ 。激光光条上的一点  $P$  在世界坐标系下的坐标为  $P_w(x_w, y_w, z_w)$ ,图像坐标系下坐标为  $P_u(u, v)$ ,图像坐标系归一化后  $P$  点坐标  $P_n(x_n, y_n)$ ,摄像机坐标系下  $P$  点的坐标  $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 。则有

$$z_c [u \ v \ 1]^T = \mathbf{A} [x_c \ y_c \ z_c]^T, \quad (1)$$

$$[x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{A}$  为摄像机内参数矩阵,  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  分别为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。  $P_u$  与  $P_n$  的关系为

$$[u \ v \ 1]^T = \mathbf{A} [x_n \ y_n \ 1]^T. \quad (3)$$

(1)式和(2)式就是光平面的数学模型。图2是交比不变原理的示意图。

已知标靶坐标系下  $AB$  和  $BC$  的长度以及图像坐标系下  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$  和  $P'$  的坐标分别为  $A'(x_{cA'}, y_{cA'}, z_{cA'})$ ,  $B'(x_{cB'}, y_{cB'}, z_{cB'})$ ,  $C'(x_{cC'}, y_{cC'}, z_{cC'})$ ,

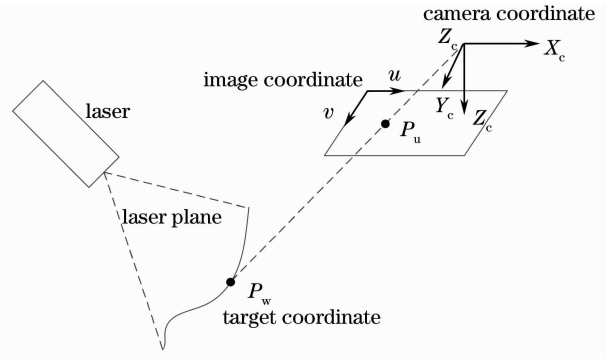


图1 激光扫描测头的成像模型

Fig. 1 Mathematical model of laser scanning probe

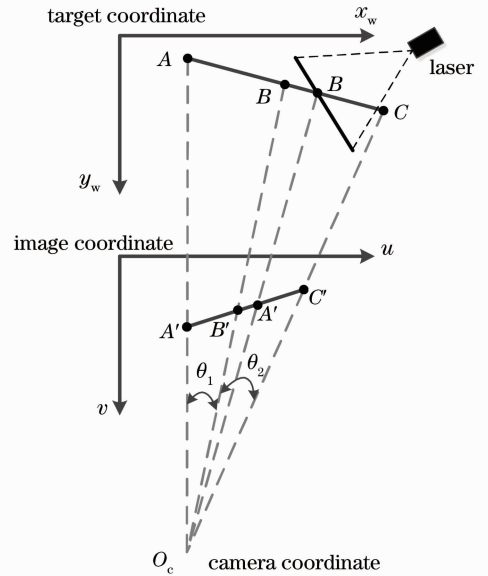


图2 交比不变原理图

Fig. 2 Cross-ratio invariance principle

$P'(x_{cP'}, y_{cP'}, z_{cP'})$ , 可以通过交比不变原理求出  $P$  点在摄像机坐标系下的坐标  $P_c$ 。具体是

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos\left(\frac{\mathbf{O}_c \mathbf{A} \cdot \mathbf{O}_c \mathbf{B}}{\|\mathbf{O}_c \mathbf{A}\| \times \|\mathbf{O}_c \mathbf{B}\|}\right), \\ \theta_2 = \arccos\left(\frac{\mathbf{O}_c \mathbf{B} \cdot \mathbf{O}_c \mathbf{C}}{\|\mathbf{O}_c \mathbf{B}\| \times \|\mathbf{O}_c \mathbf{C}\|}\right), \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\theta_1$  为靶标坐标系下  $A$ 、 $B$  两点到摄像机坐标系原点  $O_c$  连线之间的夹角,  $\theta_2$  为靶标坐标系下  $B$ 、 $C$  两点到摄像机坐标系原点  $O_c$  连线之间的夹角。根据向量知识和正余弦定理可以求得

$$\begin{cases} \|\mathbf{O}_c \mathbf{A}\| = AB \cdot AC \cdot \sin \theta_2 / \sqrt{f_{\text{temp}}} \\ \|\mathbf{O}_c \mathbf{B}\| = AB \cdot BC \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) / \sqrt{f_{\text{temp}}}, \\ \|\mathbf{O}_c \mathbf{C}\| = AC \cdot BC \cdot \sin \theta_1 / \sqrt{f_{\text{temp}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $f_{\text{temp}} = AC^2 \cdot \sin^2 \theta_2 + BC^2 \cdot \sin^2 (\theta_1 + \theta_2) - 2BC \cdot AC \sin(\theta_1 + \theta_2) \cos \theta_1 \sin \theta_2$ , 则  $A, B, C$  三点在摄像机坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} [x_{cA} & y_{cA} & z_{cA}]^T = \|\mathbf{O}_c \mathbf{A}\| / \|\mathbf{O}_c \mathbf{A}'\| \cdot [x_{cA'} & y_{cA'} & z_{cA'}]^T \\ [x_{cB} & y_{cB} & z_{cB}]^T = \|\mathbf{O}_c \mathbf{B}\| / \|\mathbf{O}_c \mathbf{B}'\| \cdot [x_{cB'} & y_{cB'} & z_{cB'}]^T, \\ [x_{cC} & y_{cC} & z_{cC}]^T = \|\mathbf{O}_c \mathbf{C}\| / \|\mathbf{O}_c \mathbf{C}'\| \cdot [x_{cC'} & y_{cC'} & z_{cC'}]^T \end{cases} \quad (6)$$

设  $P$  点在摄像机坐标系下的坐标为  $(x_{cP}, y_{cP}, z_{cP})$ , 已知  $A, B, C, P$  共线及  $A', B', C', P'$  共线, 根据交比不变定理, 可得

$$\begin{cases} \frac{(x_{cP'} - x_{cB'}) (x_{cC'} - x_{cA'})}{(x_{cC'} - x_{cB'}) (x_{cP'} - x_{cA'})} = f_{CR} \\ \frac{(y_{cP'} - y_{cB'}) (y_{cC'} - y_{cA'})}{(y_{cC'} - y_{cB'}) (y_{cP'} - y_{cA'})} = f_{CR} \\ \frac{(z_{cP} - z_{cB}) (z_{cC} - z_{cA})}{(z_{cC} - z_{cB}) (z_{cP} - z_{cA})} = f_{CR} \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{(x_{cP} - x_{cB}) (x_{cC} - x_{cA})}{(x_{cC} - x_{cB}) (x_{cP} - x_{cA})} = f_{CR} \\ \frac{(y_{cP} - y_{cB}) (y_{cC} - y_{cA})}{(y_{cC} - y_{cB}) (y_{cP} - y_{cA})} = f_{CR}, \\ \frac{(z_{cP} - z_{cB}) (z_{cC} - z_{cA})}{(z_{cC} - z_{cB}) (z_{cP} - z_{cA})} = f_{CR} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $f_{CR}$  为交比的比值。根据(7)式可求出

$$\begin{cases} x_{cP} = \frac{f_{CR} \cdot (x_{cA} x_{cB} - x_{cA} x_{cC}) + x_{cB} x_{cC} - x_{cB} x_{cA}}{x_{cC} - x_{cA} - f_{CR} \cdot (x_{cC} - x_{cB})} \\ y_{cP} = \frac{f_{CR} \cdot (y_{cA} y_{cB} - y_{cA} y_{cC}) + y_{cB} y_{cC} - y_{cB} y_{cA}}{y_{cC} - y_{cA} - f_{CR} \cdot (y_{cC} - y_{cB})}, \\ z_{cP} = \frac{f_{CR} \cdot (z_{cA} z_{cB} - z_{cA} z_{cC}) + z_{cB} z_{cC} - z_{cB} z_{cA}}{z_{cC} - z_{cA} - f_{CR} \cdot (z_{cC} - z_{cB})} \end{cases} \quad (8)$$

根据(8)式可以算出  $P$  点在摄像机坐标系下的坐标  $(x_{cP}, y_{cP}, z_{cP})$ 。设光平面方程为

$$z_c = Ax_c + By_c + C. \quad (9)$$

在标定板变换多个位姿时可以获得更多的  $P$  点坐标  $P_{ci} (x_{cPi}, y_{cPi}, z_{cPi})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 利用最小二乘法将这些求取的  $P$  点坐标代入到(9)式可得光平面方程系数  $A, B, C$ 。

### 3 光平面的标定

在光平面标定之前需要对激光扫描测头中的摄像机进行标定, 利用文献[16]的标定方法可以得到摄像机的内参数及畸变参数。

#### 3.1 图像坐标系下构建双重虚拟圆

利用交比不变原理进行光平面标定需要已知共线的三个参照点以及激光光条与直线相交的交点的图像坐标, 还需知道共线的三个参照点之间的实际距离。大多数利用该方法进行标定的情况都选择用圆形或者椭圆型的靶标来获取圆心作为参照点, 实际情况下在图像坐标系下采集的圆或椭圆变形很大, 这样拟合圆或者椭圆会存在非常大的误差, 甚至可能拟合失败。这就造成参照点的提取精度很低, 最终影响光平面的标定精度。

棋盘角点的提取<sup>[17]</sup>已经非常成熟, 提取精度早已达到亚像素级。利用提取的棋盘角点在图像坐标系下构建虚拟圆来作为光平面标定所用的靶标, 虚

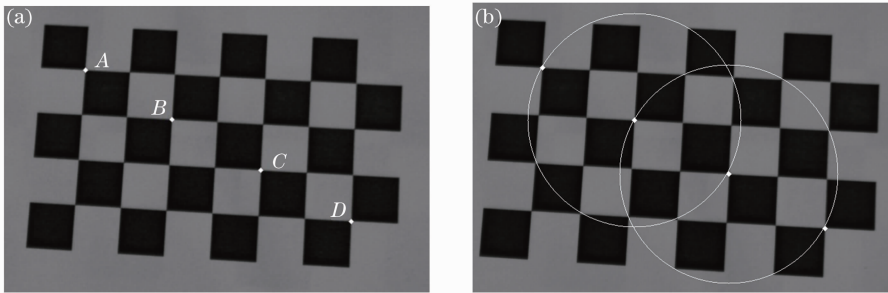


图3 提取棋盘角点构建双重虚拟圆。(a)提取的棋盘角点; (b)构建的双重虚拟圆

Fig. 3 Constructing double virtual circles using the extracted chessboard corners. (a) Extracted chessboard corners; (b) double virtual circles

拟圆不受变形影响,因而可以通过计算获得较高精度的参照点,同时已知实际圆的半径,这样就满足了交比不变原理需要已知的参数。具体构建虚拟圆的方法如图3所示,图3(a)提取了棋盘的对角线上的4个点依次为A、B、C、D,以B点为圆心,AB和BC长度的平均值为半径构建虚拟圆,同理应用在C点上。

### 3.2 光平面方程各系数的确立

建了虚拟圆之后,激光光条投射在靶标上,如图4所示。 $P'$ 为图像坐标系下激光光条上的一点, $B'$ 点为棋盘上一个角点,也是虚拟圆的圆心,直线 $P'B'$ 与圆 $B'$ 的交点 $A'$ 、 $C'$ 可以通过计算求出。虚拟圆的实际半径可根据棋盘的尺寸确定,这样根据图2和(4)~(8)式就可以计算出实际靶标上P点在摄像机坐标系下的坐标。同一条激光光条上均匀选取8个点 $P'_i$ ,按照上述方法求得这8个点在摄像机坐标系下的坐标 $P_i$ 。变化棋盘所在位置8~10次,求取大约80个特征点,根据这些特征点代入(8)式利用

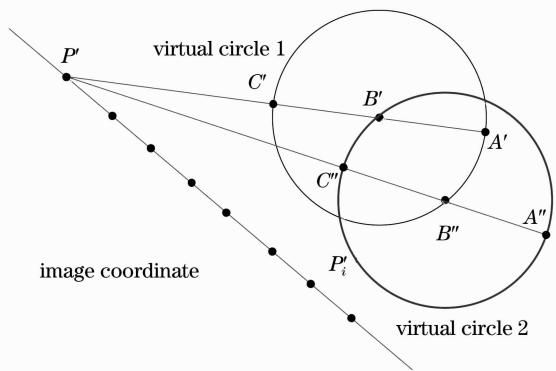


图4 激光光条与虚拟圆位置的示意图

Fig. 4 Position relationship between laser stripe and virtual circles

最小二乘法求取光平面的系数A、B、C。

摄像机在不同位置拍摄棋盘图像时,棋盘的形状会发生相应的变化。但是并不影响棋盘角点的提取,也就不影响虚拟圆的构建。构建双重虚拟圆可以求得同一点在两个虚拟圆靶标下算得的摄像机坐标系下的坐标,通过取平均的方法使得算得的数据更加精确,也可以抑制棋盘变形带来的影响。

## 4 实验与精度分析

本实验室研制的激光扫描测头如图5所示。摄像机采用的为凯视佳USB3.0工业相机,型号是MU3E200M(EGYYO),像素分辨率为1600 pixel×1200 pixel,像素尺寸为4.5 μm×4.5 μm,镜头采用日本的Computer 8 mm镜头。激光器为定制的,波长为635 nm,功率为5 mW。摄像机与激光器夹角为25°。在进行光平面标定前先用文献[16]的方法标定摄像机的内参数和畸变参数,如表1所示。

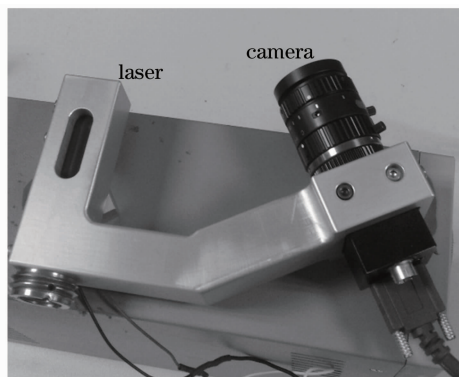


图5 激光扫描测头实物图

Fig. 5 Physical map of laser scanning probe

表1 摄像机内参数及畸变系数标定结果

Table 1 Calibration result of the camera intrinsic and distortion parameters

Parameter	Focus length $x$	Focus length $y$	Principle point $u_0$	Principle point $v_0$	Radial distortion $k_1$	Radial distortion $k_2$	Tangential distortion $p_1$	Tangential distortion $p_2$
Value	1867.8957	1867.5961	769.2698	540.8618	-0.1129	0.1738	0.0001	0.0006

根据标定好的镜头畸变系数,利用(10)式对图像进行畸变矫正。

$$\begin{cases} x_n = x_u + (k_1 r^2 + k_2 r^4)x_u + 2p_1 x_u y_u + p_2 (r^2 + 2x_u^2) \\ y_n = y_u + (k_1 r^2 + k_2 r^4)y_u + 2p_2 x_u y_u + p_1 (r^2 + 2y_u^2) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $r^2 = x_u^2 + y_u^2$ 。

### 4.1 标定流程

光平面的标定算法流程如下:

1) 拍摄棋盘图像,绘出棋盘上指定的角点。棋盘格角点个数为  $7 \times 4$ ,单格尺寸为 10 mm ×

10 mm,选取外形为长方形的棋盘是因为在长度方向上棋盘只有一个对称轴,从而棋盘角点的搜寻顺序可以唯一确定<sup>[18]</sup>,这样可以避免将需要的棋盘角点找错。使用OpenCV中提取角点的函数可以找到棋盘上所有角点,然后将棋盘对角线上的角点绘

出；

2) 构建双重虚拟圆。根据绘出的 4 个棋盘对角线上的角点构建两个虚拟圆，并在图像坐标系中绘出；

3) 打开激光器，提取激光光条的中心。提取光条中心采用改进的灰度重心法<sup>[19]</sup>，该方法提取速度很快，满足数据实时传输的要求；

4) 等距选择光条上的 8 个中心点，过这些点与两个虚拟圆的圆心作直线，求取直线与圆的交点并

绘出，如图 6(a)所示；

5) 根据交比不变原理，先利用(10)式对第 4)步求取的点进行畸变矫正，矫正后再求取光条上的点在摄像机坐标系下的坐标；

6) 沿着正对摄像机的方向平移棋盘靶标位置 8 次，其中两次移动的位置如图 6(b)、(c)所示，移动过程中保证棋盘靶标在摄像机视场范围内。重复步骤 1)~5)，共求取光条上 64 个特征点，对这些特征点进行最小二乘平面拟合，得到光平面方程。

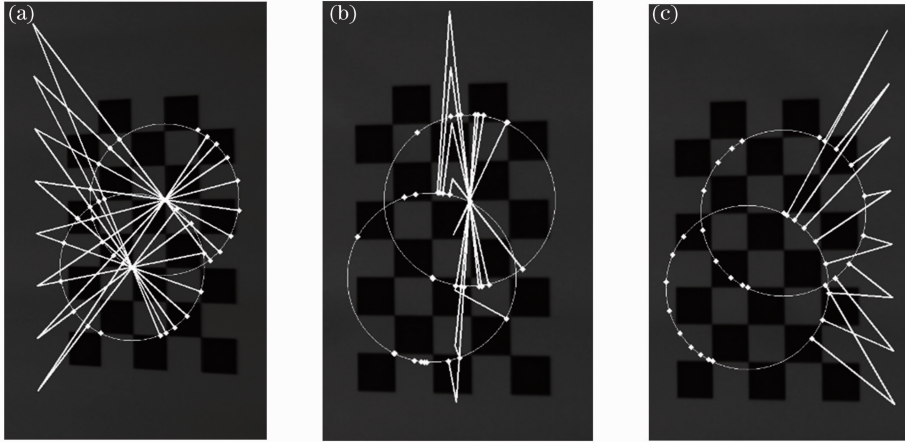


图 6 不同位置下圆与直线的交点。(a)位置 A；(b)位置 B；(c)位置 C

Fig. 6 Intersections of line and circle at different positions. (a) Position A; (b) position B; (c) position C

## 4.2 光平面标定精度分析

实验采集了 8 组棋盘靶标在不同位姿下的图片。表 2 列出了一组光条中心点在摄像机坐标系下

的坐标。光平面的标定方程为

$$z_c = 2.2268x_c - 0.0419y_c + 194.9788. \quad (11)$$

表 2 特征点在摄像机坐标系下的坐标

Table 2 Feature points in the camera coordinate system

Point No.	$x_c/mm$	$y_c/mm$	$z_c/mm$	Point No.	$x_c/mm$	$y_c/mm$	$z_c/mm$
1	41.76539	-52.42478	287.76862	9	53.41188	-57.26204	314.54834
2	41.97819	-37.10756	287.78209	10	53.79611	-40.53045	314.54753
3	42.40675	-21.81428	287.73085	11	54.25410	-23.82271	314.54273
4	42.68542	-6.53614	287.75172	12	54.28716	-7.11128	314.53909
5	43.05077	8.73996	287.74873	13	54.89115	9.54470	314.54280
6	43.38597	24.04182	287.74846	14	55.26161	26.25584	314.54558
7	43.56172	39.35561	287.77815	15	55.46613	42.98057	314.54164
8	43.88228	54.67515	287.76509	16	55.72144	59.71056	314.54432

图 7 为拟合的光平面。以所有特征点到拟合平面的距离作为误差的评价标准。光平面标定的误差主要来自两个方面：1) 棋盘靶标的制作精度，高精度的棋盘靶标能够提高光平面标定的精度；2) 摄像机的畸变，虽然之前对棋盘图像做过畸变矫正的处理，但是现有的摄像机畸变模型并不能完全描述摄像机真实的畸变，这样必然会对光平面标定带来一定的误差。图 8 为所有特征点到光平面的距离，从图 8

中可以看出大多数点到平面的距离集中在 0.02~0.05 mm 之间。所有特征点到光平面的距离的平均值为 0.024 mm，均方根 (RMS,  $\epsilon_{RMS}$ ) 误差为 0.0439 mm。精度满足现场测量的要求。

## 4.3 单虚拟圆与双虚拟圆的比较

实验比较了单个虚拟圆和两个虚拟圆分别作为靶标时的精度对比。两个虚拟圆编号为圆 1 和圆 2。实验采集并计算出了 96 个特征点用于光平面的拟合。图 9(a)为采用圆 1 进行计算的各点到光平



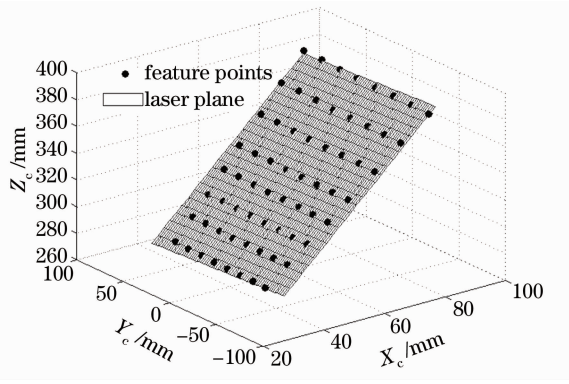


图 7 拟合的光平面

Fig. 7 Fitted laser plane

面的距离分布图。平均距离为 0.0190 mm, RMS 误差为 0.0208 mm。图 9(b)为采用圆 2 进行计算

的各点到光平面的距离分布图。平均距离为 0.0289 mm, RMS 误差为 0.0633 mm。图 9(c)为采用圆 1 和圆 2 同时参与计算并取平均值的各点到光平面的距离分布图。其平均距离为 0.0205 mm, RMS 误差为 0.0502 mm。

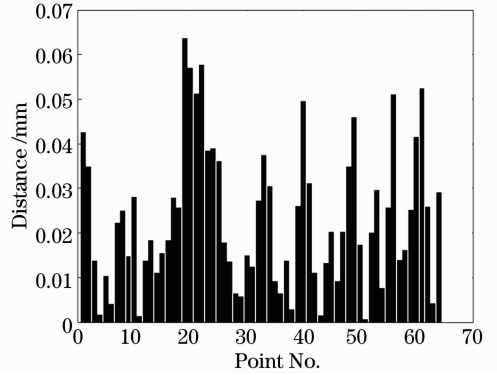


图 8 各点到拟合平面的距离

Fig. 8 Distance between points and the fitted plane

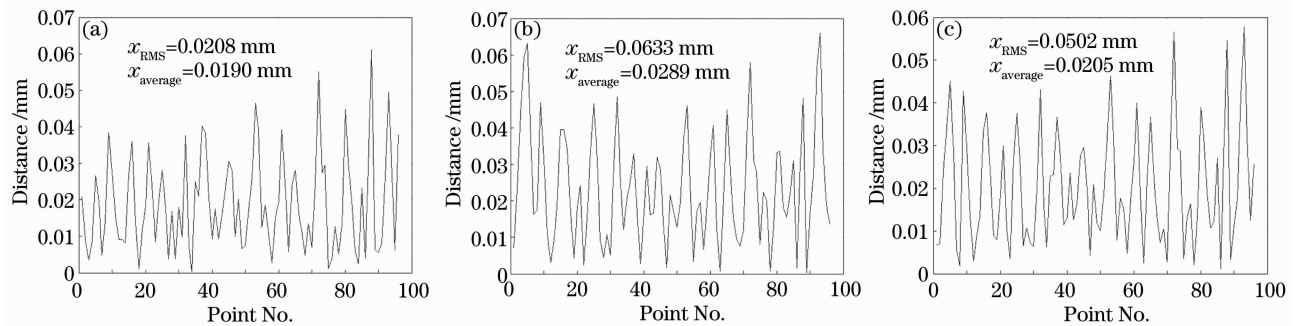


图 9 不同数量虚拟圆作为靶标时的精度对比。(a)单独虚拟圆 1; (b)单独虚拟圆 2; (c) 双重虚拟圆 1,2

Fig. 9 Precision comparison as the number of virtual circle target changes. (a) Single virtual circle 1;

(b) single virtual circle 2; (c) double virtual circles 1,2

从数据分析来看,双重虚拟圆的精度介于两个单圆之间。使用双重虚拟圆可以有效避免单个虚拟圆引起的极端误差,同时使标定的精度更加稳定。

#### 4.4 激光扫描测头测距实验精度验证

为了进一步验证标定精度和激光扫描测头的测

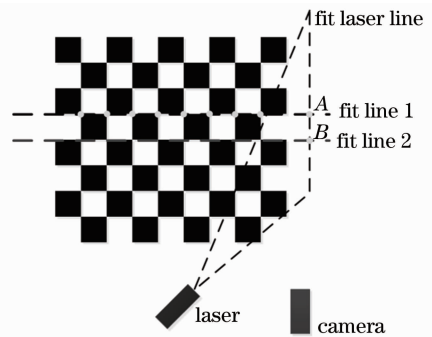


图 11 测量单个棋盘格的尺寸

Fig. 11 Measuring dimension of single chessboard

量精度,测量如图 10 所示的棋盘格,单个棋盘格尺寸为 6 mm×6 mm,加工精度为 2 μm。测量示意图如图 11 所示。测试实验之前,调整棋盘格位置以使激光光条与棋盘格竖直方向平行。寻找棋盘角点,利用这些角点拟合出两条直线 fit line 1 和 fit line



图 10 高精度棋盘

Fig. 10 High accuracy chessboard

2,激光光条投射到棋盘格上,并拟合出一条直线 fit laser line, fit line 1 和 fit line 2 与 fit laser line 相交于 A、B 两点,则 A、B 两点在摄像机坐标系下的距离即为单个棋盘格的尺寸。激光测头在不同位置下对棋盘格测量 10 次,6 次测量结果如表 3 所示。单

个棋盘格尺寸测量的平均值为 0.011892 mm,最大误差为 0.028827 mm,测量精度比文献[14]采用实际圆靶标标定的精度高出一倍,说明本文的方法具有较高的标定精度。

表 3 单个棋盘格尺寸

Table 3 Dimensions of single chessboard

	1	2	3	4	5	6	Average /mm	Max /mm
AB /mm	5.994438	6.028827	5.989548	6.016531	5.998487	5.991531	6.003227	6.028827
AB-6  /mm	0.005562	0.028827	0.010452	0.016531	0.001513	0.008469	0.011892	0.028827

## 5 结 论

提出了一种基于双重虚拟圆靶标的光平面标定方法。靶标制作简单,获取特征点的效率较高。标定操作简便易行,通过实验证明该标定方法适合现场标定。实验结果表明,光平面标定的 RMS 误差约为 0.04 mm,测距精度最大误差为 0.029 mm,说明该方法具有较高的标定精度。

## 参 考 文 献

- 1 S Seokbae, P Hyunpung, H L Kuanh. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 889-897.
- 2 Chen Hui, Mi Baoxiu, Gao Zhiqiang. Calibration of 3D structured light measurement system based on the properties of lens distortion [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1215002. 陈会, 密保秀, 高志强. 基于畸变规律的三维结构光测量系统标定[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1215002.
- 3 Liu Chang. Two parallel planes calibration for two-dimensional object vision measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115004. 刘昶. 二维目标视觉测量的双平行平面标定[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115004.
- 4 Sun Changku. Laser Measurement Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2008. 138-139. 孙长库. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2008. 138-139.
- 5 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. 刘震, 张广军, 魏振忠, 等. 一种高精度线结构光传感器视觉传感器现场标定方法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3124-3128.
- 6 J Santolaria, J-J Aguilar, D Guillomia, et al.. A crenellated-target-based calibration method for laser triangulation sensors integration in articulated measurement arms [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 282-291.
- 7 Wu Qinghua, He Tao, Shi Tielin. A calibration method for line structured-light vision sensor based on a plane target [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(2): 297-301. 吴庆华, 何涛, 史铁林. 一种基于平面标靶的线结构光视觉传感器标定方法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(2): 297-301.
- 8 Liu Zhen, Shang Yanna. Novel calibration method for stereo vision sensor using flexible target [J]. Acta Optica Sinica, 2013,

- 33(3): 0315001. 刘震, 尚砚娜. 立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315001.
- 9 N V Gestel, S Cuypers, P Bleys, et al.. A performance evaluation test for laser line scanner on CMMS [J]. Optical and Lasers in Engineering, 2009, 47(3-4): 336-342.
- 10 F Zhou, G Zhang. Complete calibration of a structured-light stripe vision sensor through planar of unknown orientations [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 59-67.
- 11 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. 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.
- 12 D Q Huynh. Calibrating a structured light stripe system: A novel approach [J]. Internal J Computer Vision, 1999, 33(1): 73-86.
- 13 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. 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.
- 14 Chen Xinyu, Ma Zi, Wang Yang, et al.. A simple method to calibrate 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.
- 15 Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 7-12. 周富强, 蔡斐华. 基于一维靶标的结构光视觉传感器标定[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 7-12.
- 16 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 17 A Garrido, N Blanca, M Vente. Boundary simplification using a multiscale dominant-point detection algorithm [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(6): 791-804.
- 18 G Bradski, A Kaehler. Learning OpenCV [M]. New York: O'Reilly Media Press, 2008. 416-419.
- 19 Cui Xijun, Yang Chuan, Liu Baohua, et al.. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light stripe [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 73-76. 崔希君, 杨川, 刘保华, 等. 线性结构光心的自适应迭代提取法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 73-76.