

# 基于双目线阵 CCD 的目标平面定位方法

贺玉泉, 张勇杰, 谢光奇, 段凌飞, 张宏桥\*

湘南学院物理与电子电气工程学院, 湖南 郴州 423000

**摘要** 近年来, charge coupled device (CCD) 在相关领域有着广泛的研究与应用。线阵 CCD 的成像形状为直线, 可以高效扫描空间平面。利用空间直线在线阵 CCD 的成像可积聚为同一个像素点的特性及空间平面原点位置的投影信息, 提出了一种基于投影积聚特性的目标平面位置测量方法。针对采集到的线阵图像, 使用直方图均衡化对数据进行对比度增强, 可以稳定提取测量目标的像素位置。在获取多个线阵 CCD 的直线解算矩阵后, 采集被测目标在各个线阵 CCD 上的像素位置, 便可得到穿过目标的多条平面直线方程, 最终利用最小二乘法计算出目标的平面位置。对目标在  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的平面区域内进行了双目测量, 实验结果表明, 对于线阵 CCD 模块 TSL1401, 所提方法的平均测量误差约为  $0.19\text{ cm}$ , 标准差约为  $0.09\text{ cm}$ , 验证了所提方法的有效性。

**关键词** 测量; 线阵 CCD; 目标检测; 积聚投影

中图分类号 TP23 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2212001

## Target Plane Positioning Method Based on Bi-Linear Charge Coupled Device

He Yuquan, Zhang Yongjie, Xie Guangqi, Duan Lingfei, Zhang Hongqiao\*

College of Physics and Electronic Electrical Engineering, Xiangnan University, Chenzhou 423000, Hunan, China

**Abstract** Recently, there have been widespread extensive research and application on charge coupled device (CCD). The imaging shape of linear CCD is a straight line, which can efficiently scan the space plane. This paper proposes a method for target plane positioning using the accumulation characteristics of points in a space line at the same pixel position and the projection information of the origin position of the spatial plane. For the obtained linear image, we used histogram equalization, which extracts the pixel position of the measured target stably, to enhance the contrast. After obtaining the straight line solving matrix and collecting the target's pixel position of each linear array CCD, we obtained line equations passing through the target object, and finally, we calculated its plane position using the least square method. The results show that for the linear CCD module TSL1401, the average measurement error of the measurement system is about  $0.19\text{ cm}$  and the standard deviation is about  $0.09\text{ cm}$  in the  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  measured area, proving the effectiveness of the proposed method.

**Key words** measurement; linear charge coupled device; target detection; cumulative projection

## 1 引言

线阵 charge coupled device (CCD) 是一类光检测像素在同一直线上的光感器件, 与面阵 CCD 相比具有更大的像素体积、更快的扫描速度和更高的灵敏度。其研究与应用范围主要包含参数标定、空间测量、路径规划与导航、调焦调平、光学拼接等。

在参数标定方面: 文献[1]通过小孔成像模型和垂线法提出了一种采用非参数模型的线阵 CCD 相机内

参校准方法, 该方法减少了对模型内部参数的依赖; 文献[2]提出了一种基于太阳漫反射板上相对辐射的定标方法, 该方法解决了推扫型光学遥感器成像光学系统中线阵 CCD 探测器各像元响应不一致的问题。在空间测量方面: 文献[3]在白炽光环境下, 利用线阵 CCD 对黑色物体的明显响应, 提出了一种新型无接触位移测量技术; 文献[4]利用高分辨率、高帧频线阵 CCD, 提出了一种基于线阵 CCD 像素数提取的高速运动目标形变测量方法; 文献[5]对 3 组线阵 CCD 相机

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-10; 录用日期: 2021-09-28

基金项目: 2018 年湖南省教育厅科学研究一般项目 (18C1013)、2019 年湘南学院校级实验室开放项目 (22)、2019 年湘南学院校级横向项目 (2019C212)

通信作者: \*174557505@qq.com

的坐标系进行统一化处理,建立新的误差评价函数,实现了对空间目标的高精度实时测量;文献[6]以非接触光学的方式对线阵 CCD 的采集数据进行处理得到角度信息;文献[7]对单线阵 CCD 相机双激光器立靶测量系统的误差进行了理论分析并建立数学模型,并通过仿真与实际数据对比,验证了数学模型的有效性;文献[8]用激光三角测量法设计了光学镜头,并结合 field programmable gate array(FPGA)实现了微小位移的高精度非接触测量;文献[9]针对吊装过程中获取吊物位置的相关问题,利用激光照射直线与线阵 CCD 投影直线相交的原理设计了一种基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统。在路径规划与导航方面:文献[10]采用 3 个线阵 CCD 和 3 个柱面透镜设计了一种新型的室内导航方法;文献[11]针对 TSL1401 线阵传感器提出了一种路径检测算法,该算法采用中值滤波算法保证了图像采集的稳定性;文献[12]通过线阵 CCD 传感器采集信号,利用 proportion integration differentiation(PID)算法调节传感器的前瞻和焦距,完成了无人小车的运行工作。其他方面:文献[13]基于光学三角法,设计了一种基于线阵 CCD 的高频高分辨率的调焦调平系统;文献[14]基于线阵 CCD 的高精度大范围测量拼接方案,设计了一种基于双目线阵 CCD 的光学拼接系统。

目前在线阵 CCD 已知参数较少的条件下,对目标的平面位置测量的相关研究与应用较少。为此,本文提出了一种基于直线投影在像平面上积聚特性的平面定位方法。首先,使用线阵 CCD 获取目标所在空间平面直线的解算矩阵;接着,利用直方图均衡方法对图像对比度进行增强<sup>[15]</sup>,提取目标在各个线阵 CCD 上的成像位置;最终,解算得到目标的空间平面位置信息。该方法对线阵 CCD 的内部、外部参数依赖较少,并在原理上可以扩展为 3 个以上的多目测量来提高测量精度。

## 2 基本原理

### 2.1 线阵 CCD 直线解算矩阵

因为直线在投影幅面上具有积聚特性,所以可以通过调整直线的姿态,使其在线阵 CCD 的像平面上积聚为同一个像元。若可测定多组不同积聚直线的平面直线方程及对应积聚像素点位置,便可得到该线阵 CCD 的与目标位置无关的、用于计算目标所在空间直线的直线解算矩阵。

空间平面直线的积聚投影如图 1 所示,对于线阵 CCD 的内部像平面 VW,记横向像元的实际尺寸为  $m$ , $F$  为焦点,焦距为  $f$ ,且焦点在像平面垂直投影的像素位置为  $n$ ,并记  $n$  所在像元中心位置为像平面 VW 的原点。对于线阵 CCD 所处空间平面 XY,其中  $l$  为空间平面坐标系下的积聚线,其在线阵 CCD 的像平面上积聚为一个像素点。假设空间平面上一点  $(x, y)$  属于

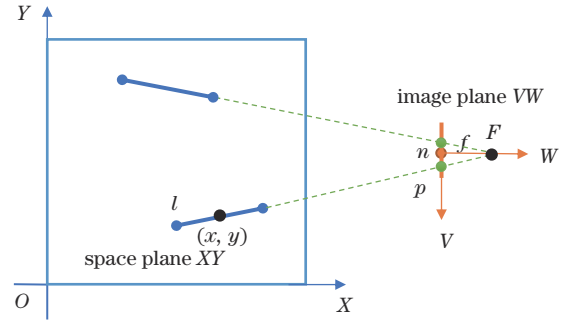


图 1 空间平面直线的积聚投影

Fig. 1 Cumulative projection of space plane lines

积聚直线  $l$ ,且积聚在像平面的像素位置为  $p$ ,则  $F$ 、 $p$  在像平面 VW 的坐标分别为  $(0, f)$  与  $[m(p - n), 0]$ 。

假设从空间平面 XY 到像平面 VW 的仿射变换矩阵为  $M$ ,则 XY 坐标系下的坐标  $(x, y)$  与其对应在 VW 坐标系下的坐标  $(v, w)$  的关系为

$$\begin{bmatrix} v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & g \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $a, b, d, e$  与两个平面坐标系转换的旋转缩放、翻转错切相关;  $c, g$  与坐标系之间的相对平移位置有关。在 VW 平面内,点  $(0, f)$ 、 $[m(p - n), 0]$ 、 $(v, w)$  共线,则它们的坐标满足如下关系:

$$m(p - n)(f - w) = fv. \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中,有

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} af + m(p - n)d \\ bf + m(p - n)e \end{bmatrix} = m(p - n)(f - g) - cf. \quad (3)$$

考虑空间平面 XY 的  $(0, 0)$  点,若测得  $(0, 0)$  点在线阵 CCD 上的像素位置  $p^{(0)}$ ,当 CCD 内部参数  $f, m, n$  及外空间参数不变时,  $p^{(0)}$  也将固定。将  $(0, 0)$  点的平面坐标  $x = 0, y = 0$  及像素位置  $p^{(0)}$  代入式(3),有

$$m(p^{(0)} - n)(f - g) = cf. \quad (4)$$

再将式(4)代入式(3)中,可得一个直线方程式,其中的  $K$  就是线阵 CCD 的直线解算矩阵:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} K \begin{bmatrix} 1 \\ p - n \end{bmatrix} = \frac{p - n}{p^{(0)} - n} - 1 \\ K = \begin{bmatrix} a/c & (dm)/(cf) \\ b/c & (em)/(cf) \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (5)$$

将空间平面上的第  $i$  条积聚直线记作  $l_i$ ,并记  $l_i$  上第  $j$  个点为  $(x_i^{(j)}, y_i^{(j)})$ 。这些点在线阵 CCD 像平面上积聚的像素位置均为  $p_i$ 。一般情况下,在直线上取 2 个不同位置点  $(x_i^{(1)}, y_i^{(1)})$ 、 $(x_i^{(2)}, y_i^{(2)})$  便可确定该直线信息,记这两点坐标组成的矩阵为  $L_i$ ,同时避免该积聚直线在空间平面上穿过原点,这样可保证  $L_i$  矩阵的秩为 2,结合式(5)可得

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = \begin{bmatrix} x_i^{(1)} & y_i^{(1)} \\ x_i^{(2)} & y_i^{(2)} \end{bmatrix} \\ R_i = K \begin{bmatrix} 1 \\ p_i - n \end{bmatrix} \\ R_i = (L_i^T L_i)^{-1} L_i^T \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times \left( \frac{p_i - n}{p^{(0)} - n} - 1 \right) \end{array} \right. \quad (6)$$

然后,若可得到  $k$  个不同的积聚直线,则式(6)可以扩展为

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{2 \times k} = [R_1 \cdots R_k] \\ Q_{2 \times k} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ p_1 - n & \cdots & p_k - n \end{bmatrix} \\ S = KQ \end{array} \right. \quad (7)$$

在保证所选积聚线的个数为两条以上且互不共线时,利用式(7)可求解得到线阵 CCD 的直线解算矩阵:

$$K = S \times Q^T (QQ^T)^{-1}. \quad (8)$$

从式(8)可以看出,矩阵  $K$  是 CCD 内部参数  $f, m$  及外部空间矩阵  $M$  的元素的组合,且在计算过程中无需知道这些参数的具体值。即直线解算矩阵可由以下 3 组信息直接计算得到:

- 1) 焦距在线阵 CCD 直线图上的像素位置  $n$ ;
- 2) 空间平面  $(0,0)$  点在线阵 CCD 上的像素位置  $p^{(0)}$ ;
- 3) 两条以上不过  $(0,0)$  且互不共线的积聚线,获取每条线上的不同两点在空间平面的坐标及每条直线积聚在线条图像上的像素位置  $p_i$ 。

## 2.2 最小二乘法解算目标位置

将  $N$  个线阵 CCD 与目标区域放置在同一平面上,并保证每个 CCD 均能看到目标区域。若获得的  $N$  个线阵 CCD 的直线解算矩阵为  $K_1, K_2, \dots, K_N$ , 记空间平面  $(0,0)$  点与目标点  $P$  在各个 CCD 的像素位置分别为  $p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, \dots, p_N^{(0)}$  与  $p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*$ , 同时令  $s_i = (p_i^* - n) / (p_i^{(0)} - n)$ , 根据式(5)进行整理后,  $N$  个空间平面直线方程组为

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{1 \times N} = [s_1 - 1 \quad s_2 - 1 \quad \cdots \quad s_N - 1] \\ H_{2 \times N} = \left[ K_1 \begin{bmatrix} 1 \\ p_1^* - n \end{bmatrix} \quad K_2 \begin{bmatrix} 1 \\ p_2^* - n \end{bmatrix} \quad \cdots \quad K_N \begin{bmatrix} 1 \\ p_N^* - n \end{bmatrix} \right] \\ [x_P \quad y_P] H = G \end{array} \right. \quad (9)$$

利用最小二乘法,可求解得到  $N$  条空间平面直线的交点,即目标点  $P$  在空间平面坐标系下的位置  $(x_P, y_P)$ 。

$$[x_P \quad y_P] = G \times H^T (HH^T)^{-1}. \quad (10)$$

## 3 系统实现

### 3.1 硬件结构

测量系统空间平面的基准采用规格为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的铝制方格标定板,用于线阵 CCD 直线解算矩阵的获取与目标点测量位置的校验。

线阵 CCD 使用模块 CJMCU-1401, 该模块以 TSL1401 芯片作为采集传感器,使用高清无畸变窄角镜头,视角为  $46^\circ$ 。为了让标定板的整个有效区域均可见,需将 CCD 安装在距离板的有效边缘中点  $24.5 \text{ cm}$  以外的位置,如图 2 所示。由于该线阵 CCD 的分辨率为  $1 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ , 则认为焦点  $F$  对应的像素位置  $n$  为成像范围  $[0, 127]$  的中心,即  $n = 63.5$ 。

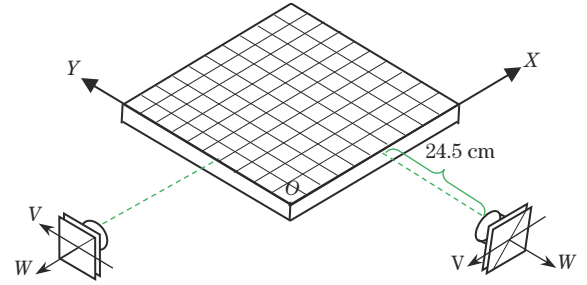


图 2 测量系统结构

Fig. 2 Measurement system structure

获取直线解算矩阵时,在标定板周围布以白色背景,使用  $70 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的黑色平板采集积聚线信息,如图 3 所示:

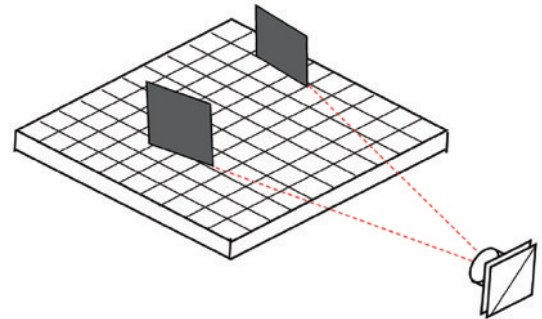


图 3 线阵 CCD 积聚线采集示意

Fig. 3 Schematic diagram of linear CCD accumulation line acquisition

测量时,使用两组线阵 CCD 分别布置在标定板的相邻两侧,让每个 CCD 均能看到标定板的全部有效区域。实际采用高为  $30 \text{ mm}$ 、直径为  $5 \text{ mm}$  的黑色圆柱体作为测量目标,如图 4 所示。

使用 STM32F103RCT6 单片机,通过 I<sup>2</sup>C 协议对线阵 CCD 模块进行驱动,以 AD 采集的方式获取图像像素信息。两个 CCD 采用分时复用的形式进行实时数据采集,采集帧率约为  $20 \text{ frame/s}$ , 最终搭建的实验系统结构如图 5 所示:



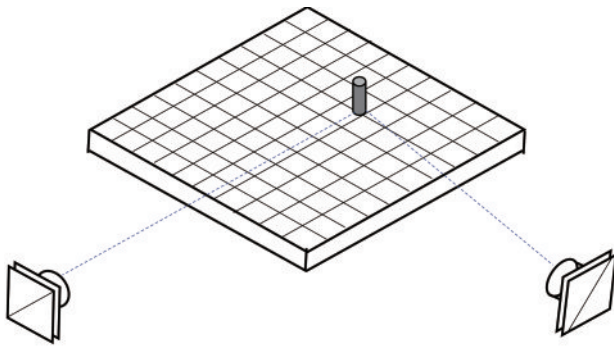


图 4 双目线阵 CCD 解算示意

Fig. 4 Schematic diagram of bi-linear array CCD solution

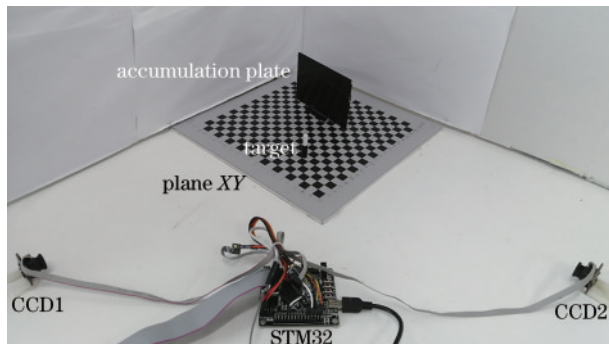


图 5 系统实物结构

Fig. 5 Real system structure

### 3.2 CCD 采集增强

由于实验采集时的光源类型主要为自然光,有光照不均的现象出现,原始图像的灰度分布在边缘区域的波动较大,图像采集时黑白背景之间差别较小,不利于像素位置的判别。所以实验时一方面使用白炽灯作为环境较暗时的补充,另一方面采用直方图均衡化,利

用最近 3 帧采集到的像素分布计算得到映射关系,然后对最新一帧的数据进行像素重映射,以增强数据的对比度,如图 6、7 所示。从图中可以看出,直方图均衡化后,数据的对比度明显增强,便于积聚位置的判断及解算时目标像素位置的获取。

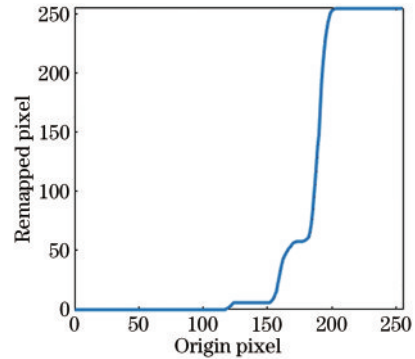


图 6 直方图均衡重映射

Fig. 6 Histogram equalization remapping



图 7 增强前后数据对比

Fig. 7 Data comparison before and after remapping

### 3.3 直线解算矩阵获取与目标平面定位

在标定平面内,放置一块垂直于标定板的黑色平板,在平面内不断调整姿态,在线阵 CCD 上投影产生积聚线,接着在上位机中观察对应像素区域的变化,使之成像能够集中在同一个位置,如图 8 所示。

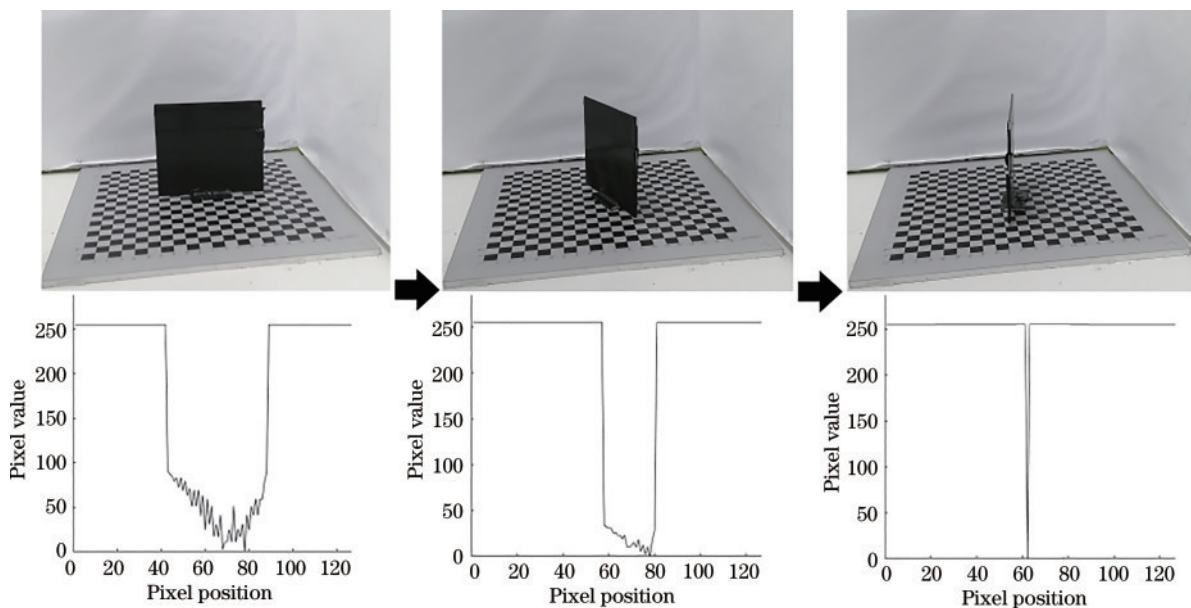


图 8 积聚线采集过程

Fig. 8 Process of getting cumulative lines

调整时,观察到的板像素投影会从宽变窄,直至成为一个点或者消失,其中消失是由于所用 CCD 自身分辨率较低导致窄面无法完整成像。

然后,读取黑色垂直板面与标定板平面交线上的两组坐标,同时记录积聚在 CCD 上对应的像素位置。重复多组实验,得到多条积聚线信息,最后用式(8)对线阵 CCD 的直线解算矩阵进行求解。

在得到每个线阵 CCD 的直线解算矩阵后,在测量空间平面内放置目标柱体,通过获取增强后的成像数据,得到目标在各 CCD 中的像素位置。综合以上所有信息,利用式(10)解算得到目标的平面坐标,如图 9 所示。

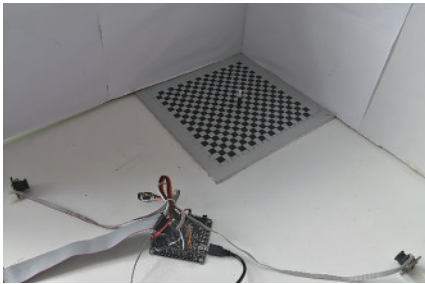


图 9 目标平面定位

Fig. 9 Target plane positioning

## 4 系统验证

### 4.1 直线解算矩阵相关数据采集

使用双目线阵 CCD 对目标位置进行测量,其中用于计算 CCD1 与 CCD2 各自的直线解算矩阵所采集的积聚投影线信息如表 1、2 所示。

理想情况下,积聚线应交会于 CCD 的焦点,而实际情况由于系统安装、操作及读数误差等原因,直线无法准确相交于焦点。例如,CCD 分辨率较低时,无法得到准确的积聚效果,该情况下可以使用分辨率更高的线阵 CCD 获取较为准确的积聚位置。或由于积聚线采集时读数位置不准,或选取两点距离过近,导致得到的直线发生偏移。该情况下可在取点时采集板交线上多个位置的点,还可使用更薄的采集板,下端读数区域采用透明材料,降低引入的读数误差。或由于线阵 CCD 安装时并未很好与标定板平面平齐,存在滚转或者俯仰方向上的安装误差。该情况下可以考虑引入水平仪配合安装,或者高精度步进电机实验平台进行限位调整。图 10 为实验环境下两个线阵 CCD 采集的积聚线位置分布情况。从图中可以看出,相交位置均在距离测量区域 24.5 cm 左右,采集数据较符合预期。

表 1 CCD1 积聚线信息

Table 1 Information of cumulative projection lines on CCD1

Line No.	1st point in line $(x, y)$ / (cm, cm)	2nd point in line $(x, y)$ / (cm, cm)	Projection pixel of line on CCD1
1	(15.40, 10.00)	(17.10, 19.80)	39
2	(14.00, 2.00)	(16.80, 11.50)	40
3	(13.80, 5.20)	(15.20, 15.10)	44
4	(11.20, 6.00)	(11.90, 15.90)	57
5	(15.70, 4.60)	(18.80, 19.20)	33
6	(16.30, 0.70)	(19.00, 10.20)	23
7	(7.10, 1.50)	(5.90, 11.30)	81
8	(7.40, 8.00)	(6.80, 17.80)	77
9	(4.00, 6.00)	(2.20, 16.00)	95
10	(5.60, 9.00)	(4.00, 18.90)	85
11	(3.10, 6.10)	(1.00, 13.00)	100
12	(2.00, 2.00)	(0.60, 7.00)	111
13	(3.40, 2.00)	(2.00, 8.00)	103
14	(10.30, 3.80)	(10.00, 13.80)	61
15	(9.90, 5.60)	(9.30, 15.50)	65
16	(9.10, 5.90)	(8.60, 15.80)	68
17	(8.10, 7.00)	(7.90, 16.90)	73
18	(5.10, 6.00)	(4.50, 15.70)	89
19	(1.00, 1.00)	(0.70, 2.00)	119
20	(19.00, 3.00)	(19.40, 4.50)	12

表 2 CCD2 积聚线信息

Table 2 Information of cumulative projection lines on CCD2

Line No.	1st point in line (x, y)/(cm, cm)	2nd point in line (x, y)/(cm, cm)	Projection pixel of line on CCD2
1	(8.00, 9.30)	(18.00, 8.70)	61
2	(5.80, 7.00)	(15.30, 5.00)	47
3	(1.00, 17.50)	(8.00, 19.10)	111
4	(5.00, 16.10)	(14.90, 17.90)	98
5	(10.20, 13.70)	(18.00, 14.50)	82
6	(9.20, 9.80)	(19.00, 9.30)	63
7	(7.00, 7.90)	(18.00, 6.60)	54
8	(8.10, 4.90)	(17.80, 2.00)	39
9	(6.20, 6.00)	(16.00, 4.10)	44
10	(1.00, 3.10)	(6.00, 19.20)	21
11	(2.00, 16.80)	(11.00, 19.00)	105
12	(1.00, 17.30)	(7.00, 19.00)	110
13	(5.30, 16.80)	(15.00, 1.90)	101
14	(2.00, 2.30)	(3.00, 1.90)	19
15	(1.00, 2.10)	(4.00, 1.00)	15
16	(8.20, 8.30)	(18.00, 7.00)	57
17	(9.00, 10.20)	(19.00, 9.60)	66
18	(9.00, 12.50)	(18.00, 13.30)	77
19	(4.00, 19.00)	(6.00, 19.80)	115
20	(1.00, 18.30)	(5.00, 19.80)	118

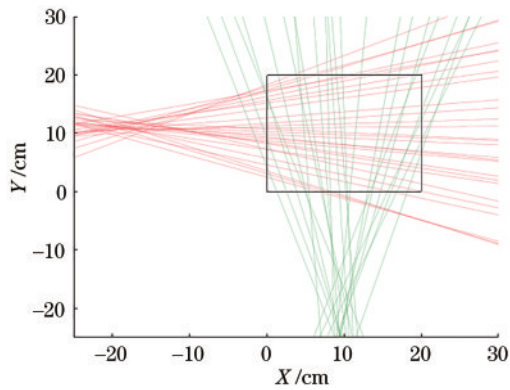


图 10 积聚线位置分布图

Fig. 10 Distribution of calibration cumulative projection lines

根据表 1、2 测得的像素点与积聚线信息,再结合

式(8),最终计算得到的两个线阵 CCD 的直线解算矩阵  $K_{CCD1}$ 、 $K_{CCD2}$  为

$$\begin{cases} K_{CCD1} = \begin{bmatrix} -6.3212 & 0.0032 \\ 0.1554 & -0.0416 \end{bmatrix} \\ K_{CCD2} = \begin{bmatrix} 0.2680 & -0.0493 \\ 6.2233 & 0.0064 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

#### 4.2 目标的平面位置测量

将测量区域分为 4 部分,范围分别为  $x \in [0, 10) \cap y \in [0, 10)$ 、 $x \in [10, 20] \cap y \in [0, 10)$ 、 $x \in [0, 10) \cap y \in [10, 20]$ 、 $x \in [10, 20] \cap y \in [10, 20]$ ,每个子区域测试 10 组数据,采样位置相对均匀。各区域的目标定位测量数据如表 3~6 所示,其中误差值以目标在标定板上的坐标与测量结果之间的欧氏距离表示。

表 3 区域 1 测量结果

Table 3 Measured result in first part

Point No.	Real (x, y)/(cm, cm)	Measured (x, y)/(cm, cm)	Pixel position of CCD1 and CCD2	Error /cm
1	(4.00, 2.00)	(4.06, 2.10)	99/22	0.12
2	(6.00, 2.00)	(6.15, 1.96)	87/25	0.16
3	(3.00, 4.00)	(3.10, 4.00)	102/30	0.10
4	(5.00, 4.00)	(4.79, 3.90)	93/32	0.23
5	(7.00, 4.00)	(7.20, 3.60)	80/34	0.45
6	(4.00, 6.00)	(3.80, 6.10)	96/42	0.22
7	(6.00, 6.00)	(6.20, 5.90)	84/44	0.22
8	(3.00, 8.00)	(3.00, 8.10)	98/52	0.10
9	(5.00, 8.00)	(5.10, 7.98)	88/53	0.10
10	(7.00, 8.00)	(7.20, 8.10)	78/55	0.22

表 4 区域 2 测量结果

Table 4 Measured result in second part

Point No.	Real ( $x, y$ ) / (cm, cm)	Measured ( $x, y$ ) / (cm, cm)	Pixel position of CCD1 and CCD2	Error / cm
1	(14.00, 2.00)	(14.04, 1.89)	39/35	0.12
2	(16.00, 2.00)	(16.03, 1.94)	27/37	0.07
3	(13.00, 4.00)	(13.00, 3.69)	47/41	0.31
4	(15.00, 4.00)	(15.15, 3.87)	35/43	0.20
5	(17.00, 4.00)	(16.86, 3.81)	25/44	0.24
6	(14.00, 6.00)	(14.00, 5.60)	43/49	0.40
7	(16.00, 6.00)	(16.15, 5.98)	32/51	0.15
8	(13.00, 8.00)	(13.19, 7.96)	49/57	0.19
9	(15.00, 8.00)	(15.20, 7.85)	39/58	0.25
10	(17.00, 8.00)	(16.99, 7.89)	30/58	0.11

表 5 区域 3 测量结果

Table 5 Measured result in third part

Point No.	Real ( $x, y$ ) / (cm, cm)	Measured ( $x, y$ ) / (cm, cm)	Pixel position of CCD1 and CCD2	Error / cm
1	(3.00, 12.00)	(2.88, 12.20)	95/75	0.23
2	(5.00, 12.00)	(5.00, 12.32)	86/75	0.30
3	(7.00, 12.00)	(7.17, 12.25)	77/75	0.30
4	(4.00, 14.00)	(4.00, 14.40)	89/87	0.40
5	(6.00, 14.00)	(6.04, 14.20)	81/85	0.20
6	(3.00, 16.00)	(2.90, 16.10)	92/98	0.14
7	(5.00, 16.00)	(5.10, 16.20)	84/96	0.22
8	(7.00, 16.00)	(7.20, 16.10)	76/94	0.22
9	(4.00, 18.00)	(3.90, 18.30)	87/109	0.32
10	(6.00, 18.00)	(5.95, 18.21)	80/106	0.21

表 6 区域 4 测量结果

Table 6 Measured result in fourth part

Point No.	Real ( $x, y$ ) / (cm, cm)	Measured ( $x, y$ ) / (cm, cm)	Pixel position of CCD1 and CCD2	Error / cm
1	(13.00, 12.00)	(13.20, 11.90)	51/73	0.22
2	(15.00, 12.00)	(15.30, 11.90)	42/73	0.32
3	(17.00, 12.00)	(17.00, 11.88)	34/73	0.12
4	(14.00, 14.00)	(14.10, 13.90)	48/81	0.14
5	(16.00, 14.00)	(16.10, 14.03)	40/81	0.10
6	(13.00, 16.00)	(13.10, 16.07)	53/90	0.12
7	(15.00, 16.00)	(15.10, 16.07)	45/89	0.12
8	(17.00, 16.00)	(17.20, 16.03)	37/88	0.20
9	(14.00, 18.00)	(14.10, 17.90)	50/97	0.14
10	(16.00, 18.00)	(16.00, 18.00)	43/96	0.00

最后,整个标定板的角点位置测量数据的误差分布如图 11 所示,其中暗处表示误差值较小,亮处表示误差值相对较大。对于误差较大的区域,一方面与积聚线的采集分布有关,CCD 的积聚线在该区域的采集数量越多,这个区域的解算误差越小,反之解算误差越大。因此在采集积聚线时,应在保证有较多积聚线的

情况下,均匀采样;另一方面,实验中被测柱体的直径为 0.5 cm,离摄像头越近成像粒度较大,对中心线的像素位置获取也容易出现波动。最终,整个标定板面测量的最小误差为 0 cm,最大误差为 0.45 cm,平均误差为 0.19 cm,标准差为 0.09 cm。



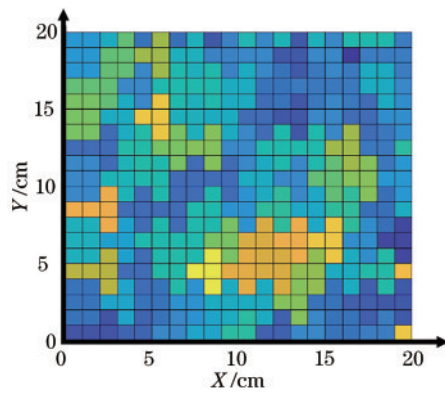


图 11 测量误差分布图

Fig. 11 Measurement error distribution

## 5 结 论

提出了一种基于直线投影在像平面上积聚特性的平面定位方法。利用积聚直线的图像投影特性及空间平面原点的成像位置,使用线阵 CCD 进行目标定位。此外,利用直方图均衡法处理采集数据,提取目标在线阵 CCD 上的成像,可以有效抑制环境光对采集数据的影响。最终实现了双目线阵 CCD 对目标在空间平面上位置的测定,并在标定板平面内对目标定位精度进行了实验验证。实验结果表明,该测量系统具有一定的测量精度,验证了所提方法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] 吴军, 徐鋈, 李雁玲, 等. 采用非参模型的线阵 CCD 内参校准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041507.  
Wu J, Xu J, Li Y L, et al. Internal calibration method of linear array CCD using nonparametric model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041507.
- [2] 许和鱼, 张黎明, 李鑫, 等. 基于太阳漫反射板线阵 CCD 相对辐射定标方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0628002.  
Xu H Y, Zhang L M, Li X, et al. A relative radiometric calibration method based on solar diffuser research for a linear array CCD detector[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0628002.
- [3] 黄健, 张广鹏. 基于线阵 CCD 的直线位移测量仪的研究[J]. 光学技术, 2019, 45(6): 677-682.  
Huang J, Zhang G P. Research on linear displacement measuring instrument based on linear array CCD[J]. Optical Technique, 2019, 45(6): 677-682.
- [4] 徐成强, 王营博, 曹杰, 等. 基于线阵 CCD 像素数提取的高速运动目标形变测量方法研究[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1097-1102.  
Xu C Q, Wang Y B, Cao J, et al. Research on deformation measurement method of high-speed moving target based on linear CCD pixel number extraction[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 1097-1102.
- [5] 王艳, 袁峰, 姜宏, 等. 基于三线阵 CCD 空间目标的高精度位姿解算[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0515004.  
Wang Y, Yuan F, Jiang H, et al. High precision pose calculation of space target based on three linear array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0515004.
- [6] 程瑶, 赵建, 米曾真. 基于线阵 CCD 的光学测角嵌入式系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 650-654.  
Cheng Y, Zhao J, Mi Z Z. Design of embedded system for optical angle measurement based on linear array CCD [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 650-654.
- [7] 董涛, 杜王强, 李海. 单线阵 CCD 相机双激光器立靶测量系统误差分析[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 240-245.  
Dong T, Du W Q, Li H. Error analysis on measuring system of vertical target with single-linear array CCD camera and dual-laser[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(2): 240-245.
- [8] 廖平, 任成, 杨小雨. 基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端设计[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 498-504, 561.  
Liao P, Ren C, Yang X Y. Front-end design of high precision displacement sensor based on linear array CCD [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(5): 498-504, 561.
- [9] 田小超, 李忠科. 基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统[J]. 光电与控制, 2015, 22(4): 100-104.  
Tian X C, Li Z K. A two-dimensional outline scanning system based on linear CCD[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(4): 100-104.
- [10] 王闯, 屠晓伟. 基于三线阵 CCD 的室内导航方法研究[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(4): 312-320, 327.  
Wang C, Tu X W. Research on indoor navigation method based on three linear CCDs[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(4): 312-320, 327.
- [11] 叶立威. 针对 TSL1401 线阵传感器的路径检测算法设计[J]. 福建电脑, 2020, 36(6): 84-86.  
Ye L W. Design of path detection algorithm for TSL1401 linear array sensor[J]. Journal of Fujian Computer, 2020, 36(6): 84-86.
- [12] 宋朋, 麦云飞. 基于 NXP 无人小车 CCD 导航系统的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(10): 53-55.  
Song P, Mai Y F. Research on NXP unmanned car CCD navigation system[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(10): 53-55.
- [13] 周佐达, 陈迪虎, 路美娜, 等. 调焦调平线阵 CCD 成像系统超频读出设计[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1822001.  
Zhou Z D, Chen D H, Lu M N, et al. Overclocking readout design of focusing and leveling linear array CCD imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1822001.
- [14] 何娜娜, 艾雪雯. 双线阵 CCD 光学拼接与误差分析研究[J]. 光学技术, 2021, 47(2): 159-162.  
He N N, Ai X W. Research on optical splicing system and error of double-line array CCD[J]. Optical Technique, 2021, 47(2): 159-162.
- [15] 杨嘉能, 李华, 田宸玮, 等. 基于自适应校正的动态直方图均衡算法[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(5): 1264-1270.  
Yang J N, Li H, Tian C W, et al. Adaptive correction based dynamic histogram equalization[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(5): 1264-1270.