

# 基于光场极平面图像测距的三点式光笔 空间坐标测量

吴军<sup>1,2\*</sup>, 李泽川<sup>1</sup>, 郑建文<sup>1</sup>, 徐鋆<sup>1</sup>, 于之靖<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

<sup>2</sup>天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

<sup>3</sup>中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

**摘要** 为克服测量端的几何约束条件,需对现有的光笔系统布置多个测量光点,这会导致测量终端结构复杂,不利于光笔系统应用于测量空间受限的场合。针对这一问题,将光场成像方法引入到光笔式测量系统中,利用光场成像原理获取光笔上光点的极平面图像(EPI),并采用旋转平行四边形算子(SPO)计算 EPI 中斜线的斜率,从而估计出发光点的深度信息,排除了 PNP(perspective- $n$ -points)算法的误解,得到被测点的准确三维坐标。最后通过实验对所提方法进行了验证。所提方法仅需单目光场相机,并结合三点式光笔即可完成三维坐标值的测量,极大地简化了光笔测量系统。

**关键词** 测量; 光场相机; 极平面图像; 光笔; 旋转平行四边形算子

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0512002

## Three-Point Light Pen Space Coordinate Measurement Based on Light Field Epipolar Plane Image Ranging

Wu Jun<sup>1,2\*</sup>, Li Zechuan<sup>1</sup>, Zheng Jianwen<sup>1</sup>, Xu Jun<sup>1</sup>, Yu Zhijing<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>3</sup> College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China,  
Tianjin 300300, China

**Abstract** Existing light pen systems are required to arrange a plurality of measuring spots to overcome the geometric constraints of a measuring terminal. This will result in a complicated measuring terminal structure. Moreover, it is disadvantageous to use the light pen system in limited measurement space. In this work, the light field imaging method is introduced into a light pen type measurement system. The epipolar plane image (EPI) of the light spot on the light pen is obtained using the light field imaging principle, and the spinning parallelogram operator (SPO) is adopted to calculate the slope of diagonal line on EPI. Subsequently, the depth information of the light-emitting point is estimated and the wrong solution of the PNP (perspective- $n$ -points) algorithm is eliminated. Ultimately, accurate three-dimensional coordinate for the measured point are obtained. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments. The proposed method only requires a monocular light field camera combined with three-point light pen to complete the measurement of three-dimensional coordinate value. Thus, the operation of the light pen measurement system can be greatly simplified.

**Key words** measurement; light field camera; epipolar plane image; light pen; spinning parallelogram operator

**OCIS codes** 120.3930; 200.4560; 110.1758

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-10-29; 录用日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1533111)、国家重点实验室开放课题(PILAB1707)、天津市教委科研项目(2018KJ242)、中央高校基本科研业务费(3122019088)

\* E-mail: j\_wu@cauc.edu.cn

# 1 引 言

航空航天、自动驾驶、人工智能机器人等领域的技术水平的不断提高对制造装配过程中的空间测量技术的要求也不断提高<sup>[1]</sup>。随着人工智能、自动驾驶、VSLAM(即时定位与地图构建)等领域的不断发展,人们对三维重建精度和速度的要求也越来越高。传统的三维坐标测量系统体积过大、不易携带、计算效率低,已经不能满足现代工业的要求。而光笔测量系统<sup>[2-3]</sup>凭借其小巧便携的优点,可以完成各种大型、复杂机械装备中隐藏点的三维坐标测量及空间位姿变化的测量。目前,国外已经有许多成熟的商用光笔式三维坐标测量系统,如,美国的摄影测量系统 V-STARS,比利时的感应测量设备 Metris 系统以及德国的非接触式扫描系统 ATOS 等。国内关于光笔测量系统的研究虽然起步较晚,但是在全国科研人员的努力下,也不断有优秀的成果诞生。黄风山博士<sup>[4]</sup>,彭凯博士<sup>[5]</sup>对 PNP(perspective- $n$ -points)算法模型进行了深入的研究,基于此研制出第一代光笔模型,并不断对其进行改进。然而,为实现光笔的空间约束求解,现有的光笔系统必须采用双目或多目视觉测量系统,并配合简单的光笔结构或单目成像模型。这些均限制了光笔系统的便携性

发展。

光场相机作为一种新型的计算成像相机,通过在成像元件与主透镜中间加入微透镜阵列,仅一次曝光就能记录空间中光线的方向信息。根据光场相机的成像原理,可以实现重聚焦等功能,并且利用它的特点可以进行深度估计。将光场成像引入到单目三点式光笔测量系统中,测量终端采用三点式光笔结构,通过光场极平面图像(EPI)对光点空间深度信息进行估计,从而解决 P3P 求解的多解问题,能实现单目、三点式光笔系统,并能极大简化光笔测量系统。

## 2 光场成像模型与深度估计方法

光场相机<sup>[6-7]</sup>是一种新型的计算成像相机,相比于普通相机,仅一次曝光拍摄的照片中就包含了丰富的三维信息,这些信息可以用来恢复目标点的三维信息<sup>[8]</sup>。光场相机的原理和普通的小孔成像模型有些区别,为了能够实现记录光线强度和方向这个目标,在光场相机中的成像传感器前面加了微透镜阵列,就是 micro-lens array。光场相机通过记录光线与主透镜平面和微透镜平面的两个交点,记录光线的方向信息,然后通过积分计算获得最后的图像,成像模型如图 1 所示。

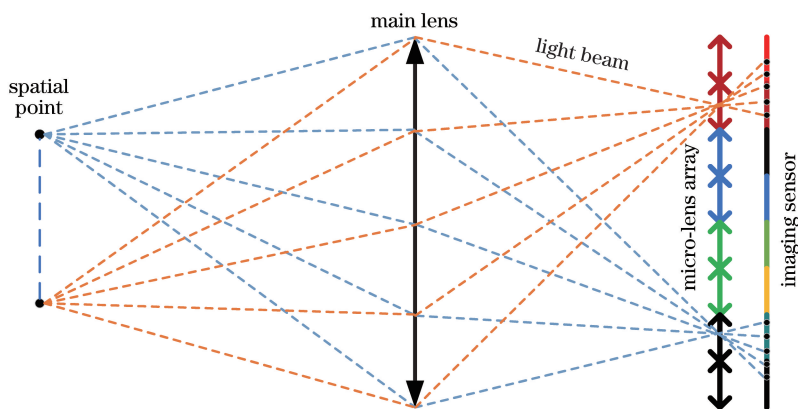


图 1 光场相机的成像原理图

Fig. 1 Imaging schematic of light field camera

如图 1 所示,来自三维空间中的目标点 (spatial point) 处不同方向的光线通过主透镜会聚在一个微透镜中心上,每个微透镜后都对应着一定数量的传感器像元,这些感光像元构成一个宏像素。这里使用的光场相机是二代 Lytro 相机,该相机的微透镜阵列为  $643 \times 425$ ,每个微透镜后分布着  $15 \times 15$  个像素,即其角度分辨率为  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ ,这可以记录一目标点发出的 225 条不同方向的光线。

### 2.1 光场极平面图像的深度估计

基于 EPI<sup>[9]</sup> 的深度估计<sup>[10-11]</sup>方法是一种基于视差线索的深度估计方法,此方法能把深度估计转换为求取直线斜率的问题,具有很强的稳健性。求取 EPI 中斜线的斜率,可恢复出光场的深度信息,EPI 中的斜率越大,就表示场景中目标点的深度越大。EPI 是四维 (4D) 光场的二维 (2D) 切片,通过固定 4D 光场中的主透镜平面和微透镜阵列平面的横、纵坐标可获得横向或者纵向的 EPI。图 2 为实验中通

过光场相机采集计算得到的水平方向和竖直方向的EPI,  $(u, v)$  为主透镜平面,  $(s, t)$  为微透镜平面, 即  $u$  和  $v$  控制角度分辨率,  $s$  和  $t$  控制空间分辨率。图 2 中细横线和细竖线即为固定横向或者纵向子孔径图像获取 EPI 的过程。

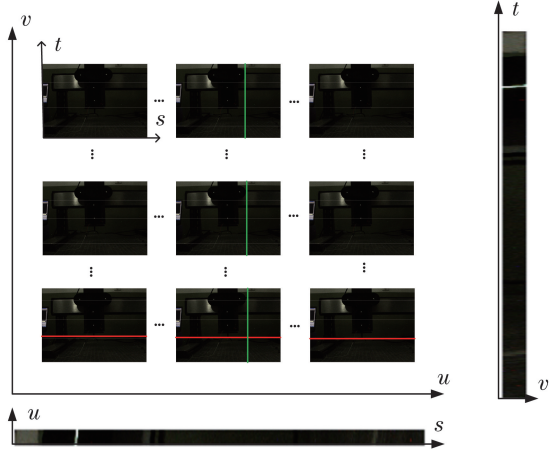


图 2 通过光场相机获得的 EPI

Fig. 2 EPI obtained by light field camera

因为 EPI 是通过固定两个透镜平面的横、纵坐标得到的, 其中不同斜率对应着场景中不同的深度, 利用这种特性可以建立数学模型, 利用数学模型中的几何对应关系可对目标点进行深度估计。

图 3 中,  $P$  为空间中的一点,  $c_1, c_2$  分别为右、左两相机的光心位置, 根据图 3 所示的几何关系, 可以获得  $P$  点的深度信息。

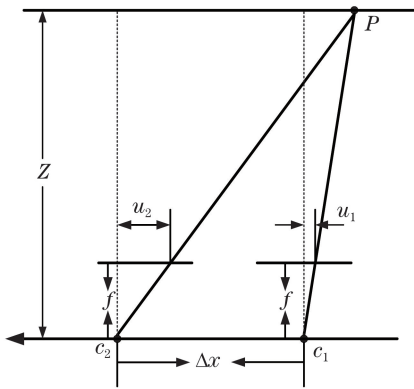


图 3 对极几何

Fig. 3 Epipolar geometry

图 3 中  $P$  点的深度  $Z$  为

$$Z = -f \frac{\Delta u}{\Delta x}, \quad (1)$$

$$\Delta u = u_2 - u_1, \quad (2)$$

式中:  $f$  为相机焦距;  $\Delta u$  为视差;  $\Delta x$  为两光心距离, 即基线长度;  $u_1$  和  $u_2$  分别为到右、左相机的光线偏转距离。

由图 4 可知, 在 EPI 中,  $\frac{\Delta u}{\Delta x}$  可以用斜线的斜率表示, 因此可以将深度估计转换为求取 EPI 中斜线的斜率问题。假如固定相同的  $\Delta u$ , 水平方向位移较大的 EPI 中斜线所对应的视差就越大, 深度就越小。当  $\Delta x_2$  大于  $\Delta x_1$ , 那么右边斜线所对应的空间点的深度要比左边斜线所对应的空间点的深度小。

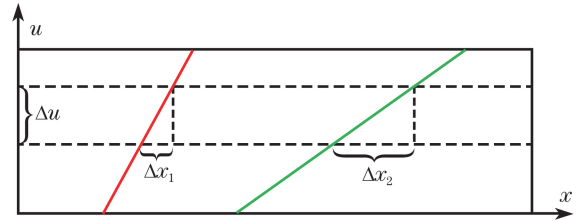


图 4 EPI 中斜线的斜率示意图

Fig. 4 Diagram of slope of diagonal line in EPI

## 2.2 旋转平行四边形算子

在 EPI 深度估计中, 国内外很多学者提出了不同的算法对图像中的斜率进行计算, 从而得到深度信息。比较有代表性的是 Wanner 等<sup>[12]</sup> 提出的结构张量法, 该方法通过对图像进行高斯滤波后的一阶、二阶梯度信息获得目标斜线的方向, 其精度依赖于光场图像的角度分辨率, 在合成光场图像和数据集上的表现较好, 但是由于真实光场图像中存在各种噪声干扰、边缘不够清晰等问题, 结构张量法并没有很好的稳健性。

不同于其他的 EPI 深度估计方法, 本文选用的旋转平行四边形算子 (SPO)<sup>[13]</sup> 充分考虑到了 EPI 的特点, 即 EPI 中的每一条斜线上的点都来自于真实世界坐标系中的同一点的不同视角, 因此 EPI 具有一定的线性结构。考虑到 EPI 的这种特殊性, 可以用 SPO 来求取斜线的角度, 具体的计算方法如下。

首先, 通过一个加权函数  $w(i, j)$  来定义平行四边形中不同像素点的权重值。距离目标像素点越近的像素点的权重越大, 相反, 越远的像素点的权重越小, 权重大小的分布服从高斯分布的一阶微分。EPI  $I_{y,v}(x, u)$  中的一点  $P(x_r, u_r)$  在平行四边形中相应的权重为

$$w(i, j) = c' \cdot d_\theta(i, j) \cdot \exp\left[-\frac{d_\theta^2(i, j)}{2\alpha^2}\right], \quad (3)$$

$$d_\theta(i, j) = i - [x_r + (j - u_r) \cdot \tan \theta], \quad (4)$$

式中:  $w(i, j)$  为每个像素点的权重;  $\theta$  为 EPI 中斜线的角度;  $(i, j)$  为 EPI 中像素的坐标;  $d_\theta(i, j)$  为位于  $(i, j)$  处像素与斜线的距离;  $x_r$  为要求的点  $P$

的横坐标,  $u_r$  为该点的纵坐标;  $y$  为光场相机成像平面上的纵坐标,  $x$  为横坐标;  $\alpha$  为超参数, 即没有确定的数值, 需要通过实验来获得效果最好的数值, 由数据的复杂程度决定, 通过选取不同  $\alpha$  进行实验观察, 发现当  $\alpha$  为 0.8 时的实验效果最好, 因此  $\alpha$  选 0.8;  $c'$  为归一化常数。选取的平行四边形的高为 15, 即 EPI 的高度, 宽为  $3\alpha$ 。

然后, 选用  $\chi^2$  卡方距离 (Chi-square distance) 来衡量 EPI 中所求目标斜线两侧颜色分布直方图的差异, 并将这种差异值最大化来确定其精确的斜率, 即通过改变不同的斜率来获得不同的  $\chi^2$ , 当其最大时所对应的斜率即为所求。实验证明, 对直方图选用不同的间距会对结果的精确度有不同的影响, 间距越小, 结果的精度越高, 但是因为计算机计算能力的限制和真实光场相机空间分辨率的限制, 最多只能选用 32 个间隔, 即把颜色分为 32 份来计算目标斜线两侧的差异。

$$\chi^2(g_\theta, h_\theta) = \sum_i \frac{[g_\theta(i) - h_\theta(i)]^2}{g_\theta(i) + h_\theta(i)}, \quad (5)$$

$$\Theta_{y,v}(x, u) = \arg \max_\theta d_{y,v}(x, u, \theta), \quad (6)$$

式中:  $\chi^2(g_\theta, h_\theta)$  为衡量目标斜线两侧颜色分布直方图的卡方距离;  $g_\theta(i)$  和  $h_\theta(i)$  为被斜线分割成两侧的颜色分布直方图;  $\Theta_{y,v}(x, u)$  为待求的角度。如图 5 所示,  $\chi^2$  越大表示目标点两侧颜色分布差异越大, 此时平行四边形的倾斜角为目标点倾斜角的概率就越大, 因此可以通过简单地对  $\chi^2$  最大化来求得精确的斜线角度  $\theta$ , 从而获得视差线索。在计算时, 通常采用卷积核, 使得计算效率更高。

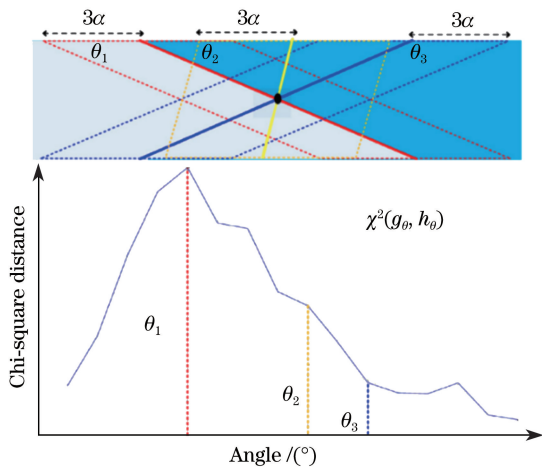


图 5 SPO 的示意图

Fig. 5 Schematic of SPO

传统的立体视觉匹配算法都通过最小化代价函数来获取最优的匹配, 这种方法的计算量过大, 而且

在有遮挡的情况下会有很大的匹配误差。相反, 即使在有遮挡或者模糊的情况下, SPO 算法最大化两个区域的距离依然有很强的稳健性。

SPO 算法引入置信度来对所求结果进行评价, 并根据置信度分配横向、纵向 EPI 深度估计结果的不同权重值, 使结果更加精确。横向 EPI 和纵向 EPI 对该像素点进行深度估计, 然后定义一个置信度  $c$  来衡量可靠性, 最后把两个深度估计的结果求加权, 得到的结果就是最终精确的深度估计结果, 即

$$c = \exp\left(-\frac{\bar{d}/d_{\max}}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

式中:  $\bar{d}$  为距离的均值;  $d_{\max}$  为最大值;  $\sigma$  为可调节参数。

### 3 P3P 算法

PNP<sup>[14]</sup> 是一种根据 3D 到 2D 点对求解相机位姿的算法。它对当有  $N$  对空间和图像匹配点的时候如何求解相机的姿态进行描述, 因为在光笔式三坐标测量系统中, 光笔上特征激光点的世界坐标和图像坐标是已知的, 所以可以用这种需要很少匹配点求解相机位姿的算法。当点对减少到 3 对时, PNP 算法就简化为 P3P 算法, 这种算法只需要 3 对 3D-2D 匹配点就可以求解相机的外参矩阵, 从而求出被测点的空间坐标。

如图 6 所示, 在三角形  $OAB$  和  $Oab$  中, 由余弦定理可得

$$d_{OA}^2 + d_{OB}^2 - 2d_{OA} \cdot d_{OB} \cdot \cos\langle a, b \rangle = d_{AB}^2. \quad (8)$$

同理, 考虑到其他的三角形, 有

$$\begin{aligned} d_{OB}^2 + d_{OC}^2 - 2d_{OB} \cdot d_{OC} \cdot \cos\langle b, c \rangle &= d_{BC}^2, \\ d_{OA}^2 + d_{OC}^2 - 2d_{OA} \cdot d_{OC} \cdot \cos\langle a, c \rangle &= d_{AC}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $d_{OA}$ 、 $d_{OB}$ 、 $d_{OC}$ 、 $d_{AB}$ 、 $d_{BC}$ 、 $d_{AC}$  分别为边  $OA$ 、 $OB$ 、 $OC$ 、 $AB$ 、 $BC$ 、 $AC$  的长度。

设  $n = d_{OA}/d_{OC}$ ,  $m = d_{OB}/d_{OC}$ , 记  $q = d_{AB}^2/d_{OC}^2$ ,  $pq = d_{BC}^2/d_{OC}^2$ ,  $rq = d_{AC}^2/d_{OC}^2$ , 整理得

$$\begin{aligned} (1-p)y^2 - pn^2 - 2\cos\langle b, c \rangle m + \\ 2pnm \cos\langle a, b \rangle + 1 &= 0 \\ (1-r)n^2 - rm^2 - 2\cos\langle a, c \rangle n + \\ 2rnm \cos\langle a, b \rangle + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

因为 2D 点图像坐标已知,  $\cos\langle a, b \rangle$ ,  $\cos\langle a, c \rangle$ ,  $\cos\langle b, c \rangle$  已知, 所以可以对 (10) 式进行消元求解出  $n, m$ , 进而求出  $p, q$ , 最终可以解出  $d_{OA}$ ,  $d_{OB}$  及  $d_{OC}$ , 最多可以得到 4 组解, 然后用第 4 对匹配点验证, 获得唯一最优解。采用传统摄影成像方式, 虽然 P3P



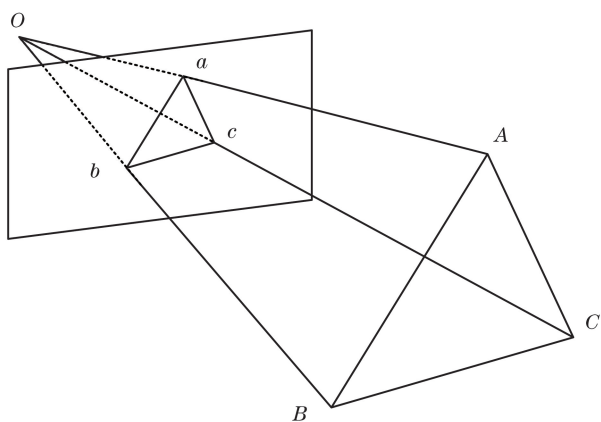


图 6 P3P 投影示意图

Fig. 6 Schematic of P3P projection

算法有唯一解的情况,但是对摄像机与目标的限制关系较为苛刻,必须在特定条件与视场环境下才能实现,并不具有普适性。本文将光场 EPI 深度估计与 P3P 算法结合起来,为正解求取 P3P 问题提供了一种正确有效的新方法,因此可以在光笔只有三个特征点的时候获得精确解,这能优化光笔的设计结构,增强算法的稳健性。

#### 4 实验结果与分析

实验系统包括一台 Illum 相机,便携式三脚架,三坐标测量机以及带有激光特征点的光笔。光场相机角度分辨率为  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ ,空间分辨率为  $625 \text{ pixel} \times 434 \text{ pixel}$ ,即每个子孔径图像的大小为  $625 \text{ pixel} \times 434 \text{ pixel}$ ,重构出来的光场图像为 3 通道  $9375 \text{ pixel} \times 6510 \text{ pixel}$ ,固定焦距为  $35 \text{ mm}$ ,等效焦距为  $70 \text{ mm}$ ,等效转换系数为 3.19,即标称焦距  $f$  为  $21.944 \text{ mm}$ ,传感器像元尺寸为  $17.312 \mu\text{m}$ 。以光笔上点 1 为原点建立世界坐标系,光笔上三个特征点的世界坐标已知,分别为  $(0,0,0)$ 、 $(0,200,0)$ 、 $(200,100,0)$ 、 $(100,100,0)$ ,对光场相机拍摄得到的 5 维数据包解码获得中心子孔径图像,对图像标定得到相机内参矩阵。运用 P3P 算法求得两组坐标,然后根据光场 EPI 深度估计出的深度值分别计算和两组坐标深度值的欧氏距离,从而排除一个错误解,最终得到光笔相对于相机的位姿矩阵和光笔笔尖的精确坐标。实验系统如图 7 所示。

##### 4.1 实验流程

实验流程图如图 8 所示。

首先对光场相机进行内参标定<sup>[15]</sup>,获取相机内参矩阵用来进行后续的 P3P 和 EPI 深度估计,用光场相机采集的 20 张棋盘格中心子孔径图像进行标

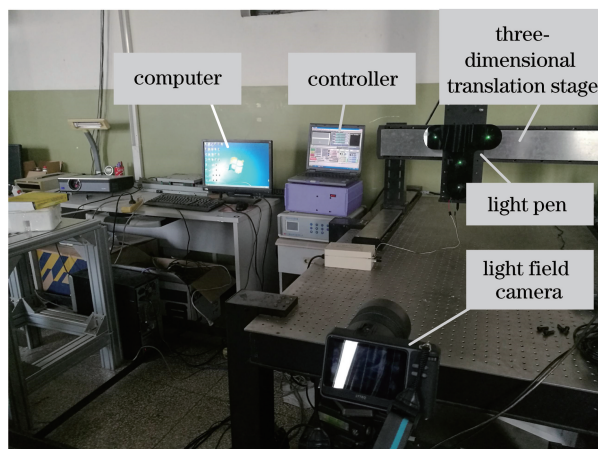


图 7 实验系统

Fig. 7 Experiment system

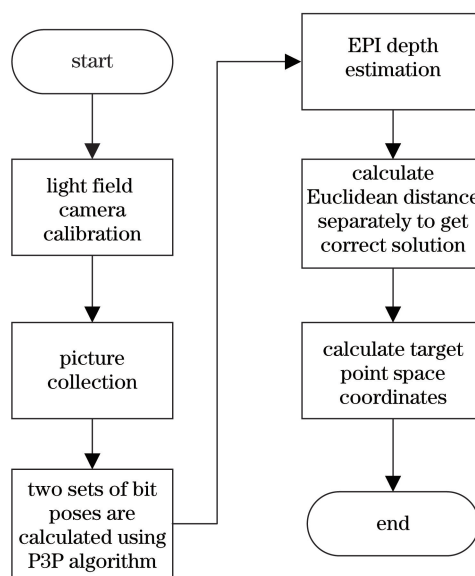


图 8 测量系统的流程图

Fig. 8 Flow chart of measurement system

定,得内参矩阵  $\mathbf{K}$  为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 916.5775 & 0 & 321.2124 \\ 0 & 916.2973 & 224.8092 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

把光笔固定在精密三坐标平移台上进行对比实验,分别在 X、Y、Z 方向 50、100、150、200 mm 进行图像采集,每组采集到 15 张光笔测量图片,和标定时一样,使用解码获得中心子孔径照片。对每个光笔进行 P3P 计算,获得两个位姿矩阵,即可计算出两组不同的深度值。同时使用 SPO 算法对目标点进行深度估计,获得深度信息,再分别计算 P3P 两个解与 SPO 所求解的欧氏距离,其中距离小的解即为所求。实验时只使用光笔上的三个激光点,用第四个激光点进行重投影来验证算法的正确性。

使用 SPO 算法进行 EPI 深度估计时, 选用 32 个 bins 来划分颜色空间, 同时使用 64 个 labels 来标记深度值, 在不同的斜率下计算差异, 得到差异的极大值, 找到最大值对应的 label 就是所求目标点的深度。

如图 9 所示, 使用 SPO 算法估计某一点的深度时, 差异最大值所在的标签为 47, 即初始值斜线所在位置旋转 47 次时所处的角度, 根据 depth table 即可反求出此位置处 EPI 斜线的倾斜角为  $264^\circ$ , 从而可以计算出斜率, 估计出深度信息。

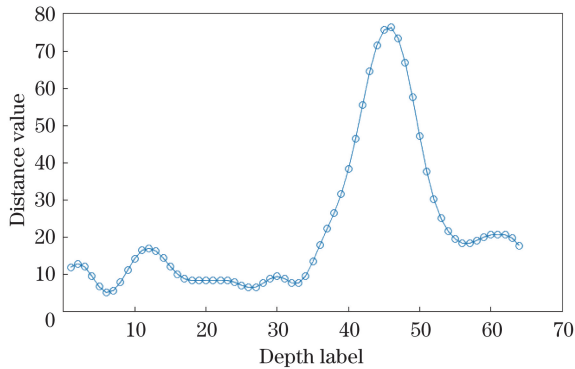


图 9 SPO 深度标签图

Fig. 9 SPO depth label image

图 10 为光笔设计图, 选取 1、2、3 点为世界坐标系中已知的三个点, 由 P3P 算法计算得到三个点在相机坐标系下的坐标。某次测量中, 由 P3P 计算出 2 点的两组  $Z$  值分别为  $Z_1=1313.7$ 、 $Z_2=1263.5$ , 然而由 SPO 计算得到的深度为 1230, 对这深度分别求与  $Z_1=1313.7$ 、 $Z_2=1263.5$  的差, 显然与  $Z_2$  距离更小。此时, 相机的位姿<sup>[16]</sup>为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.99 & 0.03 & -0.05 \\ -0.03 & 0.99 & 0.13 \\ 0.06 & -0.13 & 0.98 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -122.88 \\ -205.00 \\ 1263.58 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为相机相对于光笔坐标系的旋转矩阵;  $\mathbf{T}$  为平移向量。再将点 4 投影在相机平面上验证结果, 获取正确的外参后即可求得笔尖所在位置的世界坐标, 实验证明该方法具有稳健性。

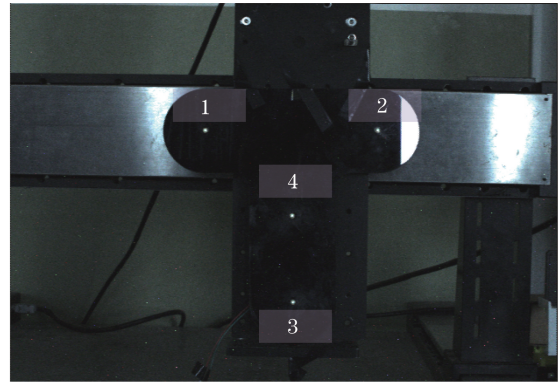


图 10 光笔设计图

Fig. 10 Design image of light pen

#### 4.2 实验结果

实验过程中, 将图 10 所示的光笔固定在三坐标测量机上, 每次以 50 mm 的步长依次沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向移动, 将三坐标平移台的移动距离作为基准数据, 严格固定光场相机采集图像, 同时用测量系统以及四点重投影, 即使用具有唯一正解的 P4P 算法<sup>[17]</sup>计算出每个位置光笔笔尖的坐标, 进而计算出测量距离。每组实验重复进行 5 次, 其平均值、最大值和最小值分别记录在表 1~3 中。

表 1 沿  $X$  轴方向的对比实验

Table 1 Comparison test along the  $X$ -axis direction

Translation stage reference data		50	100	150	200
Measurement value	Maximum	50.345	100.846	150.754	199.896
	Minimum	49.772	100.341	149.924	199.123
	Average	50.138	100.554	150.534	199.423
Correct rate (compared with reprojection results)		True	True	True	True

表 2 沿  $Y$  轴方向的对比实验

Table 2 Comparison test along the  $Y$ -axis direction

Translation stage reference data		50	100	150	200
Measurement value	Maximum	50.634	100.565	150.322	200.396
	Minimum	49.824	99.788	149.860	200.044
	Average	50.445	100.245	150.220	200.254
Correct rate (compared with reprojection results)		True	True	True	True

表 3 沿 Z 轴方向的对比实验  
Table 3 Comparison test along the Z-axis direction

mm

Translation stage reference data		50	100	150	200
Measurement value	Maximum	50.533	100.523	150.436	200.555
	Minimum	49.982	100.144	149.926	200.021
	Average	50.322	100.322	150.283	200.321
Correct rate (compared with reprojection results)		True	True	True	True

通过分析实验数据得出,在有效测量距离内,本实验系统在与精密三坐标平移台的对比实验中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的最大差值为 0.55、0.44、0.32 mm,与 P4P 算法得到的正确结果均相同,证明本文实验系统具有有效性和准确性。

## 5 结 论

针对传统光笔式测量系统采取 P3P 算法出现多个解的问题,提出一种基于光场 EPI 的新型光笔式三坐标测量系统。对光场相机进行标定获取内参,并结合三坐标移动台对所提方法进行验证。实验表明,基于 SPO 算法的光笔系统测量结果与采用第四点重投影算法计算出的结果相同,证明了所提方法的有效性。所提方法可以有效地减少光笔上标志点的数量,增强光笔测量系统的稳健性,能把光笔小巧、便携、可测量隐藏点的优点进一步扩大,有较高的实用性。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang G X. The development tendency of coordinate measuring machines[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1/2): 222-226.  
张国雄. 三坐标测量机的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 222-226.
- [2] Feng P, Wei Z Z. Light probe based large FOV 3D vision measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2217-2224.  
冯萍, 魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2217-2224.
- [3] Liu Y Y. Research on light pen binocular vision measurement system[D]. Changsha: Central South University, 2010: 15-54.  
刘一字. 光笔双目视觉测量系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 15-54.
- [4] Huang F S. Study on the key technique of single camera 3D coordinate vision measurement system using a light pen[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005: 10-50.  
黄风山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005: 10-50.
- [5] Peng K. Study of the key technique on 3D coordinates vision measurement system using light pen. Tianjin: Tianjin University, 2004: 15-35.  
彭凯. 光笔三坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 15-35.
- [6] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C] // Proceedings of the 23rd annual conference on computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH '96, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM, 1996: 31-42.
- [7] Zhou Z L. Research on light field imaging technology [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2012: 25-39.  
周志良. 光场成像技术研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2012: 25-39.
- [8] Wang W F, Zhang Y X, Chen Y, et al. Wide field-of-view image stitching algorithm based on depth sequence of light field[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0915003.  
王文锋, 张焱鑫, 陈瑜, 等. 基于光场深度序列的大视野图像拼接算法[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0915003.
- [9] Nie Y F, Xiangli B, Zhou Z L. Advances in light field photography technique[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(5): 563-572.  
聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 563-572.
- [10] Chen Z Z, Cai Z W, Liu X L, et al. Active method for accurate light field depth computation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0209001.  
陈智振, 蔡泽伟, 刘晓利, 等. 主动光场精确深度计算方法[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0209001.
- [11] Sun S Y, Kuang C F, Liu X. Three dimensional surface reconstruction based on light field imaging [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 210-214.  
孙试翼, 匡翠方, 刘旭. 基于光场成像的表面三维重构[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 210-214.
- [12] Wanner S, Goldluecke B. Variational light field analysis for disparity estimation and super-resolution[J].

- IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 36(3): 606-619.
- [13] Zhang S, Sheng H, Li C, et al. Robust depth estimation for light field via spinning parallelogram operator[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2016, 145: 148-159.
- [14] Xie Z X, Jin M, Xin Y X. Study on 3D: coordinate measurement technology using light: pen based on binocular stereoscopic vision system[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 896-899.  
解则晓, 金明, 辛悦向. 基于双目立体视觉的光笔式三坐标测量系统[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 896-899.
- [15] Zhu J, Li X F, Xu Y X. Camera calibration technique based on active vision[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1297-1303.  
朱嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1297-1303.
- [16] Zhou R, Zhang Z Y, Huang X H. Weighted orthogonal iteration algorithm for camerapose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0515002.  
周润, 张征宇, 黄叙辉. 相机位姿估计的加权正交迭代算法[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0515002.
- [17] Zhu F, Yu F S, Wu Y M, et al. Analysis of attitude calibration precision of P4P camera[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1115005.  
朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P法相机姿态标定精度分析[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1115005.