

基于光场成像的三点式光笔测量方法

于之靖¹, 郑建文², 陶永奎², 吴军^{2,3*}

¹中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300;

²中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

³天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 针对现有三点式光笔测量系统采用透视三点(P3P)算法求解出现多解的问题,提出一种基于光场成像的三点式光笔多解排除算法。对光场相机中心子孔径进行高精度内参标定;通过光场相机采集图像,运用 P3P 算法获得提取的中心子孔径图像中两组光笔激光点的摄像机坐标;利用高斯成像公式计算两组解的深度值,将区域窗口光场重聚焦到两组深度平面。选取合适的清晰度评价方法对两幅图像的清晰度进行比较,获得最终的光笔位姿矩阵,解算笔尖的三维坐标。选用精密三坐标平移台移动距离作为比对基准,实验结果表明:本实验测量系统与三坐标平移台在 X、Y、Z 方向的最大位置差值分别为 0.35、0.40、0.54 mm,该结果与运用四点重投影选取正解的结果相同,证明了所提出的方法的有效性和准确性。

关键词 光计算;光场成像;光笔;数字重聚焦;聚焦测距;透视三点

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.032001

Three-Point Light Pen Measurement Method Based on Light Field Imaging

Yu Zhijing¹, Zheng Jianwen², Tao Yongkui², Wu Jun^{2,3*}

¹College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

³National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Because the existing three-point light pen measurement system using perspective-three-point (P3P) algorithm to solve an equation is prone to the problem of multiple solutions, this paper proposes a three-point light pen multi-solution elimination algorithm based on light field imaging. First, high-precision internal reference calibration is performed for the central aperture of the light field camera. Second, the image is acquired by the light field camera, and the camera coordinates of the two sets of light pen laser points in the extracted central subaperture image are obtained by using the P3P algorithm. The Gaussian imaging formula is used to calculate the depth values of the two sets of solutions, and then the regional window light field is refocused to the two sets of depth planes. Finally, the appropriate sharpness evaluation method is selected to compare the sharpness of the two images, and the final light pen pose matrix is obtained to solve the three-dimensional coordinates of the pen tip. In this paper, the moving distance of the precision three-axis translation stage is selected as the comparison benchmark. The experimental results show that the maximum position differences between the experimental measurement system and the three-axis translation stage in X, Y, and Z directions are 0.35, 0.40, and 0.54 mm, respectively. At the same time, the same positive results are obtained by using four-point re-projection, which proves the validity and accuracy of the proposed method.

Key words optics in computing; light field imaging; light pen; digital refocusing; focus ranging; perspective-three-point

OCIS codes 200.4560; 120.3930; 110.1758

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-07-29; 录用日期: 2019-08-05

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(3122017033)

* E-mail: j_wu@cauc.edu.cn

1 引言

工业以及测量技术的迅速发展对三维坐标测量系统的便携性、实用性的要求越来越苛刻^[1]。然而,传统的三坐标测量机体积较大,不易携带^[2],无法满足当今制造业现场实时精确测量的要求,于是在测量领域中,便携式的光笔三坐标测量技术^[3-4]迅速发展起来。由于测量时摄像机只需采集到光笔标志点的图像,因此该系统可以完成测量孔、洞、复杂被测表面等现有测量系统无法完成的任务,在现场在线测量、微变量测量、汽车车身的整体误差测量等领域有着得天独厚的优势^[4]。

国内高校如天津大学、中南大学、中国海洋大学等在光笔测量领域开展了深入研究,取得了一定的成果。针对光笔测量系统,基于双目测量的研究较多。中国海洋大学的解则晓等^[4]提出了基于双目视觉的九点式直线光笔,其只考虑了径向畸变,且光笔模型较难加工。中南大学的刘一字^[5]基于双目视觉,以迈卓诺五点式光笔为基础,将迈卓诺五点式光笔改进为对称性的七点式光笔,提高了测量精度,然而其多孔式光笔设计也加大了制造难度。双目相机需要高精度标定,且体积大,不利于光笔系统的小型化。基于单摄像机的光笔测量,可以有效简化测量系统。天津大学的黄风山^[6]基于单目视觉测量,提出了“共线三点透视问题(P3CP)”的光笔数学模型,但是光笔构造要求较为苛刻。因此,光笔结构急需简单化,以减小加工误差。同时,为减小光笔体积、提高光

笔的便携性,需尽可能地减少光笔的点光源数量。然而,对于现有光笔测量系统采用的多点透视模型,当点光源数量为3时,运用透视三点(P3P)算法求解光笔到摄像机的位姿变换矩阵时会出现多解的情况,如何选取正解是三点式光笔具备实用性的难点之一。

近年来,随着光场成像技术的不断发展,其先拍照后聚集的特性被逐渐引入视觉测量领域^[7]。光场成像系统由于在成像传感器前安装了微透镜阵列,与传统相机相比,可实现空间光线的追踪,在成像后采用重聚焦算法^[8-9]即可实现空间点的深度信息。

基于此,本文将光场成像与三点式光笔结合起来,提出了一种基于光场成像的三点式光笔测量系统。系统通过光场相机采集光场图像,运用区域窗口光场重聚焦并以基于索贝尔算子^[10]的Tenengrad灰度梯度函数作为清晰度评价方法,获得正确的光笔位姿矩阵,进而获得笔尖的三维坐标,解决了三点式光笔透视模型求解过程中正解选择的问题,极大地增加了三点式光笔的实用性。

2 光笔测量系统原理

光笔的三个标志点的世界坐标已知,通过高精度标定中心子孔径内参的光场相机采集图像,运用P3P算法求解出两组标志点摄像机坐标,利用数字重聚焦以及高斯公式将采集的光场图像局域重聚焦到两组深度平面,通过比较清晰度确定正解,进而得到光笔的位姿矩阵以及笔尖的三维坐标。本文方法的流程图如图1所示。

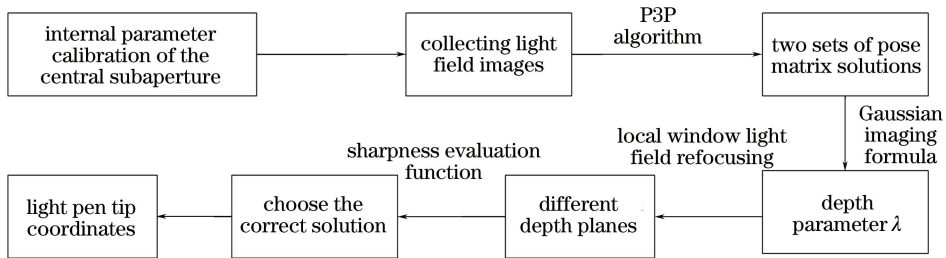


图1 测量系统流程图

Fig. 1 Flow chart of measurement system

2.1 P3P 求解算法

PNP(Perspective N Points)问题是由 Fischler 等^[11]在1981年首先提出的。PNP问题即下述的物体定位问题:假设坐标系下 N 个控制点的3D坐标和图像坐标系下的2D坐标已知,求解 N 个控制点在摄像机坐标系下的坐标。当 $N=3$ 时,即经典的P3P求解问题。

如图2所示,3个世界坐标系下的空间点 P_1 、

P_2 和 P_3 的三维坐标已知,构成的三角形三边长度分别为 a 、 b 和 c ,其对应的摄像机成像平面上的三个成像点分别为 P_{c1} 、 P_{c2} 和 P_{c3} 。空间点 $P_i[i=1, 2, 3]$,其坐标为 (x_i, y_i, z_i) 与摄像机的光轴中心点 O 之间构成的单位向量为 e_i ,可表示为

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + 1}} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

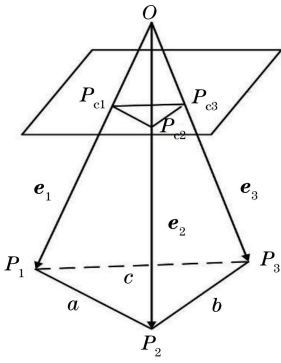


图2 P3P投影示意图

Fig. 2 Diagram of P3P projection

将 e_2 与 e_3 间的夹角记为 α , e_1 与 e_3 间的夹角记为 β , e_1 与 e_2 间的夹角记为 γ . 根据 e_i 和 e_j , 可

以计算出两个向量间夹角的余弦值:

$$\begin{cases} \cos \alpha = \mathbf{e}_2^\top \mathbf{e}_3 \\ \cos \beta = \mathbf{e}_1^\top \mathbf{e}_3 \\ \cos \gamma = \mathbf{e}_1^\top \mathbf{e}_2 \end{cases} \quad (2)$$

将 P_1 、 P_2 和 P_3 与 O 之间的距离记为 d_1 、 d_2 和 d_3 . 根据三角余弦公式, 有

$$\begin{cases} d_2^2 + d_3^2 - 2d_2d_3 \cos \alpha = b^2 \\ d_1^2 + d_3^2 - 2d_1d_3 \cos \beta = c^2 \\ d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos \gamma = a^2 \end{cases} \quad (3)$$

假设

$$\begin{cases} d_2 = jd_1 \\ d_3 = ld_1 \end{cases} \quad (4)$$

由(3)式和(4)式可得

$$j = \frac{[(b^2 - c^2 - a^2)/c^2]l^2 - 2\cos \beta [(b^2 - a^2)/c^2]l + (b^2 + c^2 - a^2)/c^2}{2(\cos \gamma - l \cos \alpha)} \quad (5)$$

$$a_1 l^4 + a_3 l^3 + a_2 l^2 + a_1 l + a_0 = 0, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } a_0 &= \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{c^2}\right)^2 - \frac{4b^2}{c^2} \cos^2 \gamma, a_1 = 4 \left[-\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{c^2}\right) \left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right) \cos \beta + \frac{2b^2}{c^2} \cos^2 \gamma \cos \beta + \right. \\ &\left. \left(\frac{b^2 - c^2 + a^2}{c^2}\right) \cos \alpha \cos \gamma \right], a_2 = 2 \left[\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right)^2 - 1 - 4 \left(\frac{b^2 + a^2}{c^2}\right) \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma + 2 \left(\frac{c^2 - a^2}{c^2}\right) \cos^2 \alpha + \right. \\ &\left. 2 \left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right) \cos^2 \beta + 2 \left(\frac{c^2 - b^2}{c^2}\right) \cos^2 \gamma \right], a_3 = 4 \left[-\left(\frac{b^2 - c^2 - a^2}{c^2}\right) \left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right) \cos \beta + \frac{2a^2}{c^2} \cos^2 \alpha \cos \beta + \right. \\ &\left. \left(\frac{b^2 - c^2 + a^2}{c^2}\right) \cos \alpha \cos \gamma \right], a_4 = \left(\frac{b^2 - c^2 - a^2}{c^2}\right)^2 - \frac{4a^2}{c^2} \cos^2 \alpha. \end{aligned}$$

由(6)式可解得实数解 l , 代入(5)式可得 j . 然后将 j 和 l 代入(3)式和(4)式可以求出 d_1 、 d_2 和 d_3 . 则各个特征点在摄像机坐标系中的坐标为

$$\mathbf{p}_{ci} = d_i \mathbf{e}_i. \quad (7)$$

$N=3$ 构成了 PNP 问题的最小单位, 由一元四次方程[(6)式]可知, 该方程最多有 4 个满足已知条件的解, 当三个特征点不共线时, 其最少有两组解^[12]. 采用传统摄影成像方式, 虽然 P3P 算法有唯一解的情况, 但是对摄像机与目标的约束条件较为苛刻, 必须在特定条件与视场环境下才能实现, 并不具有普适性. 本文将光场成像与 P3P 算法结合起来, 仅需使用光场相机进行单次拍摄, 对光笔上的三点无任何约束条件, 即可得到相机的正确位姿, 该方法增加了三点式光笔测量系统的便携性和适用性, 为 P3P 问题正解的求取提供了一种正确有效的新方法.

本文利用 P3P 方法求解光笔的位姿矩阵. 将

光场相机中心子孔径作为求解 P3P 问题的子孔径相机, 事先通过张正友标定算法^[13]进行高精度标定, 得到子孔径相机的内参矩阵以及畸变系数. 利用光场相机采集图像, 经解码校正等得到光笔的中心子孔径图像, 运用椭圆重心定位算法^[14]得到三个激光标志点的畸变的二维像素坐标, 对提取的二维像素坐标进行去畸变处理, 得到未畸变的像素坐标. 根据三组世界坐标和图像坐标的位姿转化关系, 求得世界坐标系相对于摄像机坐标系的位姿矩阵 \mathbf{M} :

$$\begin{bmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_{wp} \\ Y_{wp} \\ Z_{wp} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wp} \\ Y_{wp} \\ Z_{wp} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中： $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ ，代表两个坐标系间的旋

转矩阵； $\mathbf{T} = (t_1 \ t_2 \ t_3)^T$ 代表其对应的平移向量； (X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp}) 代表光笔笔尖在世界坐标系中的坐标，经过事先标定，该坐标已知。由(8)式得到光笔笔尖的最终摄像机三维坐标 (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) 。

2.2 光场成像及其数字重聚焦

光场是空间中所有光线的光辐射函数的总体^[15]，它同时包含被测物体的位置信息 (x, y) 以及角度信息 (u, v) 。光场的概念最早用于描述光在三维空间中的辐射传输特性。Adelson^[16] 在 1991 年根据人眼对外部光线的视觉感知，提出了用七维函数表征空间分布的几何光线，该函数被称为全光函数。假设只考虑光线在自由空间的传输，它的波长一般不会发生变化，则任一时刻的光线可以由五维坐标表示。更进一步地，Levoy 等^[17] 忽略了光线在传输过程中的衰减，将五维的全光函数降到四维，并且提出用两个相互平行的平面参数化表示四维光场。

由于微透镜阵列的存在，光场相机可以同时捕获光线的位置信息和角度信息，成像原理如图 3 所示。图中 D 表示主透镜平面到微透镜阵列的距离，一般与主透镜的焦距接近，稍大于焦距； d 表示微透镜阵列平面到传感器像面的距离。来自被测目标一点各个方向的光线通过主透镜会聚到一个微透镜上。不同方向的光线散射到微透镜后面所对应的若干传感器像元上，这些传感器像元共同组成了一个宏像素。每个宏像素的坐标对应被测目标的位置信息，用 (x, y) 表示，宏像素的个数代表最终图像的空间分辨率。每个宏像素对应的传感器像元则代表被测目标的角度信息^[18]，用 (u, v) 表示，也代表图像的角度分辨率。因而，光场记录了被测场景的四维信息，传感器单个像素的坐标用 (x, y, u, v) 表示，灰度值用 $L(x, y, u, v)$ 表示。本文采用的光场相机是二代 Lytro 相机，采集的光场图像经解码校正后图像大小为 $7728 \text{ pixel} \times 5368 \text{ pixel}$ ，光场相机是通过牺牲传感器空间分辨率来记录角度分辨率的，其空间分辨率为 $625 \text{ pixel} \times 434 \text{ pixel}$ ，角度分辨率为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 。

光场相机采集目标的光场数据后，需要经过后续特殊的图像计算处理才能得到最终的四维光场数据。宏像素下所覆盖的子像素实际来自于同一位置不同方向的光线信息，通过(9)式可以得到通过主透

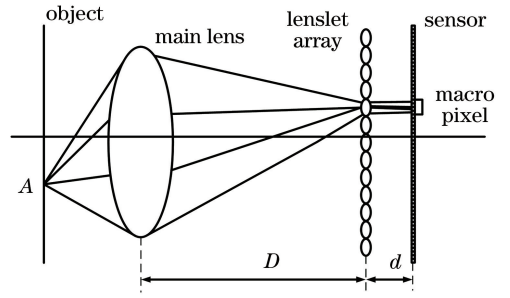


图 3 光场成像原理示意图

Fig. 3 Diagram of principle of light field imaging
镜的所有光线的总和，即场景的四维光场信息：

$$E(x, y) = \iint L(x, y, u, v) du dv. \quad (9)$$

光场成像是一种计算成像方式，可以采用光线追踪的方式对采集的原四维光场信息进行重采样和适当计算处理，以得到聚焦于某一深度平面的清晰图像^[19]，原理图如图 4 所示。 F 是光场相机的初始成像面，当新的成像面移动到 $F' = \tau F$ 处时，根据三角形相似原理，同时利用光线追踪技术，可得投影到新的成像平面 (x, y) 处的光线实际上来自于初始成像面 $\left[u' \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{x}{\tau}, v' \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{y}{\tau} \right]$ 处，此时的四维光场为

$$L_{\tau F}(x, y, u', v') = L_F \left[u' \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{x}{\tau}, v' \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{y}{\tau}, u', v' \right], \quad (10)$$

式中： (u', v') 是光线通过主透镜平面时的交点坐标。基于(9)式和(10)式并经过重采样，可得新的成像面的图像场景信息为

$$E_F(x, y) = E_{\tau F}(x, y) = \iint L_{\tau F}(x, y, u', v') du' dv' = \iint L_F \left[u' \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{x}{\tau}, v' \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{y}{\tau}, u', v' \right] du' dv'. \quad (11)$$

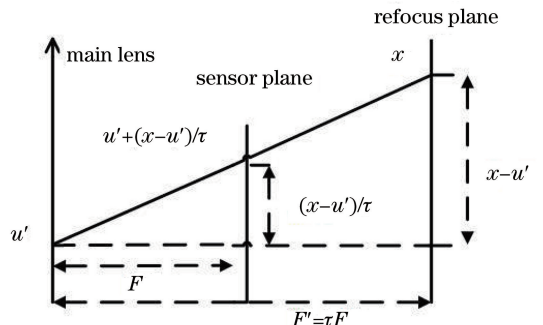


图 4 数字重聚焦过程

Fig. 4 Digital refocusing

可以看到,重聚焦就是对光场在位置维度进行平移并在方向维度进行积分的过程。(11)式中 τ 代表不同的成像平面,即不同的像距,通过设置不同的 τ 值,可以得到同一目标场景下的聚焦在不同深度处的图像序列。

2.3 局域窗口重聚焦选取 P3P 正解

通过 P3P 算法得到两组光笔特征点的摄像机三维坐标。光场相机依然遵循高斯成像,即

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{c} + \frac{1}{s}. \quad (12)$$

成像最清晰处是在理想景深范围内,如果被测物体偏离理想像面,就会出现散焦模糊^[20]。采集图像时要保证光场相机的标称焦距 f 不变,即相机的 f 是已知的,另外,将 P3P 方法测得的两组解的深度值作为物距 s ,由(12)式计算此时的像距 c 。进一步地,利用 $F' = \tau F$ 计算两组深度参数值 τ 。

由于光场四维数据较大,对全部光场数据进行数字重聚焦,计算量过大,效率不高,本文运用一种局域窗口的数字重聚焦,在保证正确度的前提下,仅对特征点所在目标区域窗口进行数字重聚焦,在简化计算量的同时,也在一定程度上消除了非目标区域的干扰。当原始光场数据大小为 $15 \times 15 \times 625 \times 434$ 时,选取 5×5 窗口的数字重聚焦在 Matlab 上的运行时间仅为 0.253466 s。图 5 是全部的光场图像,图像大小为 $15 \times 15 \times 625 \times 434$ 。为了方便显示,选取局域窗口 100×100 时重构的 RGB 光场图像,其大小为 $1500 \times 1500 \times 3$,如图 6 所示。

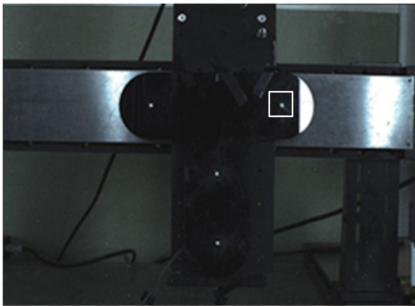


图 5 全部窗口光场图像

Fig. 5 Light field images of all windows

根据(11)式,通过局域重聚焦可得到两幅聚焦于不同深度参数值 τ 的重聚焦图像。目前,对图像清晰度的评价方式主要有三种:1)基于灰度差值的函数评价;2)基于边缘锐利程度的函数评价;3)信息论指标的函数评价^[21]。本实验是对重聚焦图像清晰度进行测量比较,具有小范围调焦、高稳定性、高

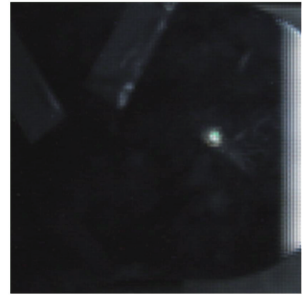


图 6 局域窗口光场图像

Fig. 6 Light field image of local window

灵敏性的特点,以适用于小范围内精确聚焦的 Tenengrad 灰度梯度函数作为评价函数。首先对重聚焦图像进行灰度化,将其转化为灰度图,重聚焦图像的清晰度 $F(\tau)$ 为

$$F(\tau) = \sum_x \sum_y \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (13)$$

式中: G_x 、 G_y 为像素点水平方向和垂直方向的梯度值,其所用的卷积模板为

$$\mathbf{g}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{g}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Tenengrad 函数先对重聚焦图像进行加权平均,再计算其微分值,并采用模板分别对其垂直和水平方向进行卷积运算,从而在一定程度上抑制噪声。根据(14)式比较两幅图像的清晰度,清晰度大的重聚焦图像的参数 τ 所对应的三维坐标解即为最终的正解。

3 实验结果及分析

本文实验所用采集设备为 Illum 二代光场相机,其空间分辨率为 $625 \text{ pixel} \times 434 \text{ pixel}$,角度分辨率为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$,重构的光场图像大小为 $9375 \times 6510 \times 3$,固定 35 mm 等效焦距为 70 mm ,等效转换系数为 3.19 ,即标称焦距 $f = 21.944 \text{ mm}$,传感器像元尺寸为 $17.312 \mu\text{m}$ 。重聚焦图像与合成孔径成像相等,所以有极浅的景深,可以消除相机自身景深带来的测量误差影响。红外 LED 激光光源具有体积小、波长固定、亮度稳定、发光点小、后续提取像素点精确等诸多优点,可作为光笔上的主动发光标志点。

采用张氏棋盘格标定法对中心子孔径进行精确标定,标定参数包括起始像距 c 、等效焦距 f_c 、主点坐标 c_c 、畸变量 k_c 、像素误差 e_{rr} ,标定结果如表 1 所示。

表 1 标定结果

Table 1 Calibration results

Internal parameter	Calibration value
c /mm	22.441
f_c /mm	(1296.24851, 1296.28441)
c_c /mm	(311.53056, 223.32054)
k_c /mm	(-0.29994, 0.78014, 0.00012, -0.00133, 0.00000)
e_{rr} /pixel	(0.05143, 0.05310)

选用精密三坐标平移台进行对比实验。光笔设计时采用 4 个激光点,采用重投影以验证选取正解的正确率,对比测量系统如图 7 所示。现对在某个位置的实验过程进行详细介绍。光场相机采集某个位置处的光笔光场数据,经过标定解码校正后,提取的中心子孔径图如图 8 所示,选取 1、2、3 点,根据 P3P 算法解得 3 点的两组摄像机坐标系下的三维坐标,同时选取 1、2、3、4 并根据重投影选取正解,将 4 点世界坐标代入(8)式并由摄像机坐标与像素坐标之间的关系求得像素坐标,对提取的像素坐标进行重投影误差比较,选取位姿正解,进而解得三维坐标。2 点的两个 z 值分别为 $z_1 = 1313.7$ 和 $z_2 = 1263.5$,已知焦距 f ,根据高斯成像[(12)式]可得 $\tau_1 = 0.99446$, $\tau_2 = 0.99514$,选取 2 点像素点周围 5×5 窗口重构出局域四维光场,如图 9 所示。根据(11)式,将区域窗口光场重聚焦到两组深度平面,根据清晰度评价函数[(13)式]得到的两个清晰度值分别为 343.1985 和 341.9691,二者的差值为 1.2294,与重投影结果一致。选取第一组解为正解,根据(8)式计算出光笔笔尖的摄像机坐标。

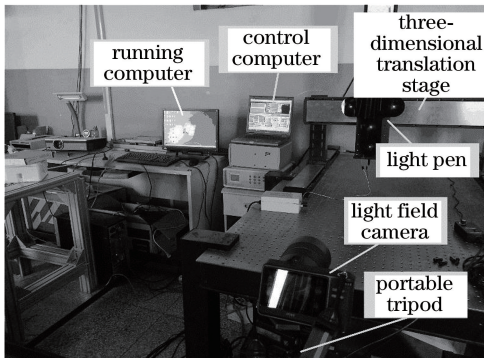


图 7 对比测量系统

Fig. 7 Contrast measurement system

实验时,将光笔固定在三坐标平移台的 Z 轴,并以一定的步长依次沿三坐标平移台的 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,并采集图像,同时用测量系统以及

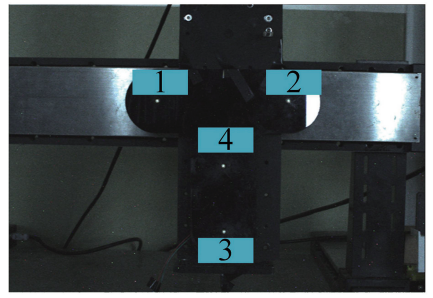


图 8 光笔设计图

Fig. 8 Design of light pen

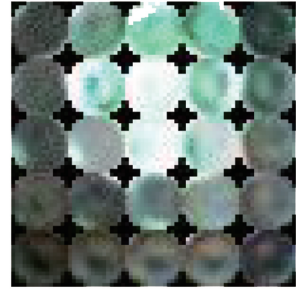


图 9 局域四维光场

Fig. 9 Local four-dimensional light field

四点重投影计算出每个位置的光笔笔尖坐标,进而通过计算得出测量距离。每组实验重复 5 次,其平均值、最大值和最小值分别记录在表 2、3、4 中。

通过分析比较表 2、3、4 可知,在测量有效距离 3 m 内,本实验测量系统与三坐标平移台在 X 、 Y 、 Z 方向的最大差值为 0.35, 0.40, 0.54 mm,该结果与运用四点重投影选取正解的结果相同,证明了本文方法的有效性和准确性。此外,国内天津大学、中南大学等提出的光笔测量系统的测量精度^[4-6]为 0.20 mm,与之相比,本实验在测量精度方面存在一定的测量误差,产生测量误差的主要原因有以下几点:

1) 光场相机的空间分辨率不高^[22]。本实验采用的二代光场相机空间分辨率为 $625 \text{ pixel} \times 434 \text{ pixel}$,而 P3P 算法求解位姿与其分辨率有关,若提高光场相机的空间分辨率,则会进一步提高测量精度。

2) 图像坐标提取误差。本实验中,像素坐标提取采用椭圆重心定位算法,有一定的测量误差。后续可改进像素坐标提取算法,以提高测量精度。

3) 光笔制造误差。虽然在设计时严格控制光笔的世界坐标,但是在制造装配时仍然有一定的制造误差。

本实验确保光场相机的内参数不变,即保证其焦距等不变,这也是保证后续测量精度的关键部分。

表 2 沿 X 轴方向对比实验的结果

Table 2 Results of contrast experiments along X-axis direction

mm

Reference data of translation stage		50	100	150	200
Measurement results	Maximum	50.336	100.546	150.428	200.215
	Minimum	49.536	100.131	150.224	199.343
	Average value	50.250	100.346	150.334	199.655
Correct rate (compared with reprojection results)		True	True	True	True

表 3 沿 Y 轴方向对比实验的结果

Table 3 Results of contrast experiments along Y-axis direction

mm

Reference data of translation stage		50	100	150	200
Measurement results	Maximum	50.426	100.525	150.328	200.316
	Minimum	50.224	100.136	149.860	200.024
	Average value	50.336	100.395	150.157	200.254
Correct rate (compared with reprojection results)		True	True	True	True

表 4 沿 Z 轴方向对比实验的结果

Table 4 Results of contrast experiments along Z-axis direction

mm

Reference data of translation stage		50	100	150	200
Measurement results	Maximum	50.725	100.634	150.536	200.465
	Minimum	49.982	100.152	149.826	200.036
	Average value	50.535	100.462	150.235	200.240
Correct rate (compared with reprojection results)		True	True	True	True

4 结 论

针对光笔测量系统采用 P3P 算法求解出现多解的问题,提出一种基于光场成像的三点式光笔多解排除算法。对光场相机中心子孔径进行高精度标定,建立光场相机采集系统,对中心子孔径图像运用 P3P 算法获得两组光笔上三个激光点的摄像机坐标。最终应用高斯成像公式、区域窗口光场重聚焦并将基于索贝尔算子的 Tenengrad 灰度梯度函数作为清晰度评价方法,获得最终的光笔位姿矩阵,进而获得笔尖的三维坐标。测量系统结构简单,易操作,便于携带。选用精密三坐标平移台进行对比实验,实验结果表明:本实验测量系统与三坐标平移台在 X、Y、Z 方向的最大差值分别为 0.35, 0.40, 0.54 mm,该结果与运用四点重投影选取正解的结果相同,证明了本文方法的有效性和准确性。

参 考 文 献

- [1] Zhang G X. The development tendency of coordinate measuring machines [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1): 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): 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] Zhang W X, Zhong S D, Sui L B, et al. Noncontact measurement of big dimension object based on coordinate measuring machine[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2004, 37(5): 112-115.
张望先, 仲思东, 隋莉斌, 等. 基于三坐标测量机的大尺寸非接触测量[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(5): 112-115.
- [4] 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.
- [5] Liu Y Y. Research on binocular vision measurement system using light pen[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.
- [6] 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.

- 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.
- [7] 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.
- [8] Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 99-106.
- [9] Chen Q, Xu X P, Jiang Z G, et al. Watermarking scheme for four dimensional light field imaging based on light field camera and its evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0411003.
陈琦, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于光场相机的四维光场图像水印及质量评价[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0411003.
- [10] Hua C J, Xiong X M, Chen Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on Sobel operator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021011.
化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021011.
- [11] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [12] Kraus S, Arkin R C. Strategic negotiation in multiagent environments [M]. Massachusetts: MIT Press, 2001.
- [13] 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.
- [14] Chen J F, Chen H Q. Study of measuring instrument for an intelligent infrared imaging facula[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9): 37-40.
陈家凤, 陈海清. 智能化红外成像光斑测试仪的研究[J]. *光电工程*, 2004, 31(9): 37-40.
- [15] 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.
- [16] Adelson E H. The plenoptic function and the elements of early vision[J]. *Computational Models of Visual Processing*, 1991: 3-20.
- [17] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering [C] // *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM, 1996: 31-42.
- [18] Zhou Z L. Research on light field imaging technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 25-39.
周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 25-39.
- [19] Zhou Y, Yuan Y, Hu H H, et al. Focusness evaluation for digital refocusing light field photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 1094-1098.
周宇, 袁艳, 胡煌华, 等. 数字对焦光场成像清晰度评价方法研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(6): 1094-1098.
- [20] Xiao X G, Wang Z H, Sun C D, et al. A range focusing measurement technology based on light field photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2539-2543.
肖相国, 王忠厚, 孙传东, 等. 基于光场摄像技术的对焦测距方法的研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(12): 2539-2543.
- [21] Zheng X, Ai L F, Liu K, et al. Auto-focusing function for microscopic images based on global and local gray-scale variation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081801.
郑馨, 艾列富, 刘奎, 等. 结合全局和局部灰度变化的显微图像自动聚焦函数[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081801.
- [22] Wang Y Z, Zhang X D, Xiong W, et al. Error analysis of vision measurement based on the light field camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1112004.
汪义志, 张旭东, 熊伟, 等. 光场相机视觉测量误差分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 1112004.