

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104239

# 基于双 PSD 视觉的空间光点位置测量研究\*

刘瑾<sup>1</sup> 张鹏程<sup>1,2</sup> 程绍伟<sup>1</sup> 杨海马<sup>3</sup> 赵红壮<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学电子电气工程学院 上海 201620; 2. 上海仪电(集团)有限公司中央研究院 上海 200233;  
3. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

**摘要:**目前基于光学测量法的空间目标位姿探测系统主要采用单目视觉和双目立体视觉两种,其中双目视觉得益于利用仿生学视差原理,通过光学三角测量法即可计算出目标的空间相对位置,从而得到广泛应用。此外,针对于传统 CCD、CMOS 视觉相机繁杂的图像处理过程,提出了将双目视觉原理与位置敏感探测器(PSD)结合应用于空间光点位置的探测方法,利用 PSD 探测响应速度快、分辨率高等特性,将图像处理转换为光电探测器的信号处理过程,并搭建了具体的合作光点的位置探测系统。实验结果表明,PSD 视觉相  $X$  和  $Y$  方向坐标波动均在  $\pm 130 \mu\text{m}$ ,且探测系统精准还原了空间光点在距离 1 000 mm 的  $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  立方体空间内的运动轨迹,其定位误差为 4.35 mm,随深度每增加 50 mm,误差增加约 27%,系统的平均误差为 7.30 mm,稳定性较好。

**关键词:**位置敏感探测器(PSD);双目视觉;空间光点;信号处理;位置测量

**中图分类号:** TN366; TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Research on spatial spot position measurement based on dual PSD vision

Liu Jin<sup>1</sup> Zhang Pengcheng<sup>1,2</sup> Cheng Shaowei<sup>1</sup> Yang Haima<sup>3</sup> Zhao Hongzhuang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;  
2. INESA(Group) Co., Ltd. R&D Center, Shanghai 200233, China; 3. School of Optical-Electrical and Computer  
Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** At present, the spatial target position detection system based on optical measurement method mainly adopts monocular vision and binocular stereo vision, of which binocular vision benefits from the use of bionic parallax principle, and the spatial relative position of the target can be calculated by optical triangulation, which is widely used. In addition, in view of the complicated image processing process of traditional CCD and CMOS vision cameras, a detection method that combines the principle of binocular vision and PSD sensor to apply to the position of the light spot in space is proposed. The image processing is converted into the signal processing process of the photodetector, and a specific position detection system of the cooperative light spot is built. Experimental results show that the PSD visual phase  $X$  and  $Y$  direction coordinate fluctuations are within  $\pm 130 \mu\text{m}$ , and the detection system accurately restores the motion trajectory of the spatial light point in the  $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  cubic space at a distance of 1 000 mm, and its positioning error is 4.35 mm, with each 50 mm increase in depth, the error increases by about 27%, and the average error of the system is 7.30 mm, with good stability.

**Keywords:** position sensitive detector (PSD); binocular vision; spatial spot; signal processing; position measurement

## 0 引言

空间光点三维坐标测量技术在先进制造、机器人导航、航天器交会对接、导弹跟踪定位和医疗服务等领域有着广泛应用<sup>[1]</sup>。随着近几年航空航天科技的迅速发展,大国之间的“太空”硬实力比拼也愈发激烈,军事卫星、太空站的部署均离不开航天器的对接操作,而其核心思想——相对坐标系的刚体变换则离不开对对接目标上特征光源的三维位置测量。对接系统里常用的位置探测技术主要有遥测法和光学测量法两大类<sup>[2]</sup>。光学测量法又称视觉测量法<sup>[3]</sup>,依靠测量速度快、稳定性高、信息量大等优点,逐渐成为了近距离光点位置测量的主要方式。

目前空间目标位置的视觉测量系统主要采用单目视觉和多目立体视觉两种<sup>[4]</sup>。其中,单目视觉具有结构简单、测量范围大和标定快速的优点<sup>[5]</sup>。但只能直接获取目标的二维信息,无法直接获取纵向深度信息,而双目立体视觉利用探测器的视差和基线距离可计算出目标的空间位置坐标<sup>[6]</sup>。

若目标航天器上有尺寸、结构固定的特征可供识别称为合作目标,反之称为非合作目标。合作目标的特征信息通常为预先设计好并安装在目标航天器上的光源标靶,其光源排列形式、顺序和距离固定<sup>[7]</sup>。而非合作目标的特征信息为通过图像处理的手段获取的目标航天器自身的几何特征,如航天器的太阳能帆板、星箭对接环等特征<sup>[8]</sup>。因此,基于合作目标设计的立体视觉系统具有更好的稳定性和更高的探测精度,传统立体视觉相机采用 CCD 和 CMOS 作为成像传感器<sup>[9]</sup>,在特征提取过程中必须进行特征图像处理步骤<sup>[10]</sup>,增加了位姿解算工作量。位置敏感探测器(PSD)是一种具有连续光敏感表面的电流分配型光电信息转换器件,对投射至其光敏面的光斑的重心位置产生快速响应,在微位移测量、微弧度测量、导航制导、核物理科学等方面具有广泛的工程实际应用<sup>[11-12]</sup>。黄战华等<sup>[13]</sup>于 2018 年提出了基于单 PSD 相机的空间目标位姿测量方法。采用 8 个红外 LED 构成的合作目标,通过依次闪烁的方法进行调制,最后解算出目标的位姿信息。该方法解决了三角法探测范围小的问题,位置精度优于 36.2 mm、角度精度优于 2°。但位姿解算方法过于简单,合作目标更多意义上发挥的是标定作用,导致最后姿态的测量精度不理想。2016 年至今,AGV 团队<sup>[14-15]</sup>在国际高水平期刊上发表了多篇关于基于 PSD 的 IPS 研究成果。该 IPS 系统通过室内顶部安装的 PSD 相机检测安装于移动目标上的红外二极管(infrared emitting diodes, IRED)信号的到达角(angle of arrival, AoA)和相移(difference phase of arrival, PoA)实现移动目标的定位。该方案实现了 4~6 mm<sup>2</sup> 范围内每

秒不低于 100 次的位置更新率,且成本相较于传统无线室内定位大大降低,但该定位系统不适用于室外空旷场地,同时无法获取空间物体的三维位置信息。2019 年,呼夏苗<sup>[16]</sup>设计了一种基于双 PSD 的半主动制导指示光源位姿探测系统。光学系统基于光学自准直原理设计,通过分光棱镜和直角棱镜组改进光回路实现整个系统的小型化。该方案实现了对光源位置和角度的微米和微弧度量级跟踪,且响应时间优于 10 ms,但该系统实质为对制导光源的偏离程度测量,无法对空中目标的位姿进行探测。综合上文所述,双 PSD 视觉响应速度快、算法复杂度低,且能够获得三维信息的优势,通过搭载双 PSD 相机的移动平台进行空间立体扫描,解算出特征光点三维空间坐标的相对变化轨迹,对空间目标的测量具有现实的研究意义。

## 1 PSD 基本工作原理

### 1.1 PSD 的结构模型

PSD 作为一种 p-i-n 结型光电探测器,拥有出色的响应速度与位置分辨率,主要应用于一维或二维的位置探测<sup>[17]</sup>。枕形 PSD 是对四边形 PSD 的一种改进型器件,背面设置有偏置电极,但光敏面为圆弧形电阻边框的枕形结构,满足 Gear 提出的不影响大区域内电场分布的边界条件,即 Gear 定理<sup>[18-19]</sup>。该定理可以描述为,若在电阻率  $r$  的无限均匀薄板上挖出一个半径  $a$  的圆形孔,且孔的边界线电阻满足  $R = r/a$  时,薄板上的流过密度均匀的电流将不受影响。因此,设计枕形边界的目的是减小电极之间的干扰,该结构的等效电路如图 1 所示。

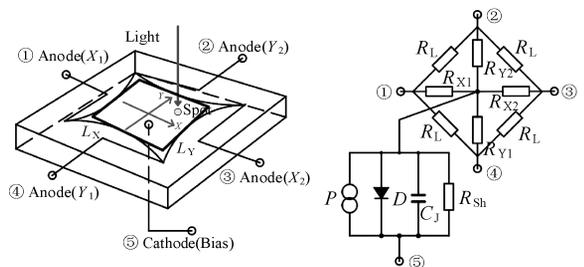


图 1 枕形 PSD 的结构模型及等效电路

Fig. 1 Structure model and equivalent circuit of pillow PSD

假设电极③和④接地,而电极①和②接电源保持在电位  $V$ ,那么  $x$  方向在均匀电阻分流层上的电势下降也将是均匀的,且任意位置  $P$  的  $x$  方向电压为  $Vx/L$ ,其中  $x$  定义为相距电极①和②邻边的距离。若此时将一个高阻值  $R_p$  的探针接触于  $P$  点,并连接电流计后接地,则电流计通过的电流为  $Vx/R_p L$ <sup>[20]</sup>。根据互易定理交换电源和电流计的位置,则从电极③和④流出的电流为:

$$I_{X2} + I_{Y1} = \frac{x}{L} \cdot \frac{V}{R_p} = \frac{x}{L} I_{sum} \quad (1)$$

式中:  $I_{sum}$  为流出 PSD 的总电流, 等于  $I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2}$ 。因此, 可从式(1) 计算出  $x$  的位置坐标, 同理可得点  $P$  的  $y$  坐标, 并将坐标系原点移至光敏面的几何中心, 得到枕形 PSD 的位置公式:

$$\begin{cases} x = \frac{(I_{X2} + I_{Y1}) - (I_{X1} + I_{Y2})}{I_{X1} + I_{Y1} + I_{X2} + I_{Y2}} \times \frac{L_X}{2} \\ y = \frac{(I_{X2} + I_{Y2}) - (I_{X1} + I_{Y1})}{I_{X1} + I_{Y1} + I_{X2} + I_{Y2}} \times \frac{L_Y}{2} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 枕形 PSD 的位置公式体现了输出电流归一化的思想, 建立了单方向电流与总电流的关系, 使得线性度和电极干扰远优于传统四边形 PSD。

### 1.2 双 PSD 信号调理方法

PSD 输出的是微弱电流信号, 微弱电流信号采集的前提是基于跨阻放大器(trans-impedance amplifier, TIA)的前置放大电路, 又称前级 I/V 转换放大电路。为了提高位置坐标的精度, 通过模拟电路实现前置 I/V 放大后的电极信号的加减法运算, 乘法运算部分则通过对模拟运算结果进行 A/D 转换, 再经软件计算完成。

设计的双 PSD 处理电路通过 VGA 连接器将运算后的模拟信号传出。一共分为八路: PSD\_1 的  $Y$  坐标分子  $P1Y$ 、 $X$  坐标分子  $P1X$ 、两路坐标分母  $P1S$  及  $P1P$ ; PSD\_2 的  $Y$  坐标分子  $P2Y$ 、 $X$  坐标分子  $P2X$ 、两路坐标分母  $P2S$  及  $P2P$ 。每一路信号范围  $-5 \sim +5$  V, 带宽 30 kHz。所以, A/D 采集芯片需支持双极性模拟输入, 且具备至少高于两倍信号带宽的采样频率, 其次, 微控制器单元需要拥有足够高的主频实现对 A/D 芯片数据的快速读取, 并将数据初步处理后传输给 PC 机。数据采集系统框架如图 2 所示。

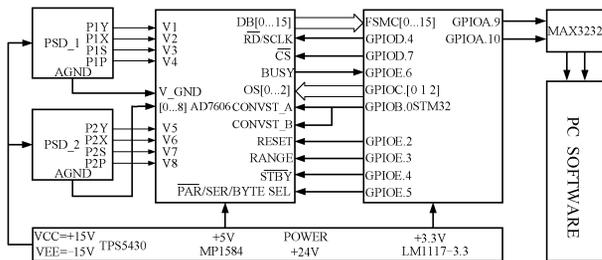


图 2 双 PSD A/D 采集处理系统框图

Fig. 2 Block diagram of dual PSD A/D acquisition and processing system

## 2 双 PSD 视觉测量原理

### 2.1 单相机模型

PSD 相机模型描述的是目标光点  $P$  的空间三维位置

坐标与 PSD 光敏面上二维位置坐标的映射关系。模型结构如图 3 所示, 建立透镜中心的坐标系  $O$ - $XYZ$  和 PSD 光敏面中心的坐标系  $o$ - $uw$ , PSD 置于透镜的焦平面上, 其焦距为  $f$ 。

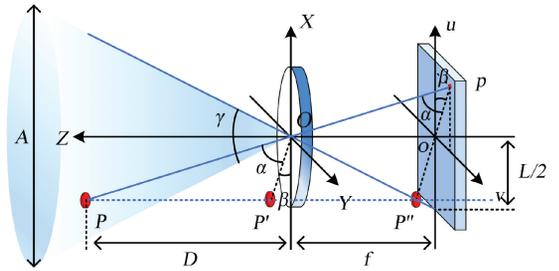


图 3 PSD 相机的空间光点成像模型

Fig. 3 Spatial light point imaging model of PSD camera

空间光点  $P$  在透镜坐标系  $O$ - $XY$  平面的投影点为  $P'(x, y)$ , 在 PSD 光敏面坐标系  $o$ - $uw$  平面的像点为  $P''(u, v)$  则光点  $P$  在水平方向上的偏转角  $\alpha$  和在竖直方向的偏转角  $\beta$  可由下式计算:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{f}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) \quad (3)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (4)$$

光学透镜的作用是将视场范围内的光点能量汇聚在 PSD 光敏面上, 焦距  $f$  和视场角  $\gamma$  可通过探测区域的最大宽度  $A$  和探测深度  $D$  进行估计:

$$f = \frac{D}{A} \times L \quad (5)$$

$$\gamma = 2\arctan\left(\frac{L}{2f}\right) \quad (6)$$

由式(5)和(6)可知, 当光敏面尺寸一定时, 视场角的大小与焦距成反比, 即焦距越短, 视场越大, 且对远点进行观测, 需要选择焦距较大的镜头, 但此时的测量范围较小, 反之亦然。

### 2.2 双 PSD 视觉模型

在 PSD 相机模型的基础上构建双 PSD 视觉位置探测模型, 该模型利用双目立体视觉的原理实现空间光点  $P$  的三维位置测量。如图 4 所示, 在左右 PSD 相机球坐标系  $O_L$ - $X_L Y_L Z_L$  和  $O_R$ - $X_R Y_R Z_R$  的基础上, 以基线中点为球心建立光点的空间位置坐标系  $O$ - $XYZ$ 。根据 PSD 相机模型可知空间光点  $P$  在光敏面上的像坐标为  $P_1(u, v)$  和  $P_2(u', v')$ , 以其中一个光敏面为例, 计算出此时的方向角为:

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{f}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) \quad (7)$$

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (8)$$

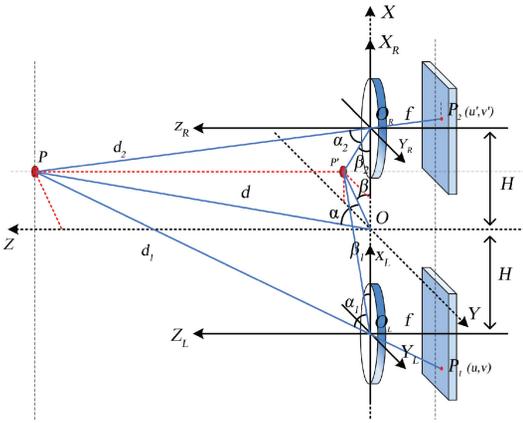


图 4 基于双 PSD 视觉的空间光点位置探测模型  
Fig. 4 Spatial spot position detection model based on dual PSD vision

由此可知,空间光点  $P$  在  $O_L-X_L Y_L Z_L$ 、 $O_R-X_R Y_R Z_R$  和  $O-XYZ$  球坐标系下的坐标分别为  $(d_1, \alpha_1, \beta_1)$ 、 $(d_2, \alpha_2, \beta_2)$  和  $(d, \alpha, \beta)$ , 其中  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, H$  为已知量,  $(d, \alpha, \beta)$  为待求未知量。

根据  $X$  轴方向上的位置关系可得:

$$\begin{cases} d \cos \alpha \cos \beta = d_1 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - H \\ d \cos \alpha \cos \beta = H - d_2 \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \end{cases} \quad (9)$$

根据  $Y$  轴方向上的位置关系可得:

$$\begin{cases} d \cos \alpha \sin \beta = d_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \\ d \cos \alpha \sin \beta = d_2 \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \end{cases} \quad (10)$$

根据  $Z$  轴方向上的位置关系可得:

$$\begin{cases} d \sin \alpha = d_1 \sin \alpha_1 \\ d \sin \alpha = d_2 \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (11)$$

化简式(9)和(10)可得:

$$\begin{cases} d_1 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 + d_2 \cos \alpha_2 \cos \beta_2 = 2H \\ d_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 - d_2 \cos \alpha_2 \sin \beta_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中正弦、余弦值可根据图 4 中的几何关系解三角形获得,解得:

$$\begin{cases} d_1 = \frac{2Hv' \sqrt{f^2 + u^2 + v^2}}{uv' + u'v} \\ d_2 = \frac{2Hv \sqrt{f^2 + u'^2 + v'^2}}{uv' + u'v} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(9)~(11)中  $O_L - X_L Y_L Z_L$  坐标系的 3 个方程联立方程组,解算出光点  $P$  在  $O - XYZ$  坐标系下的坐标  $(d, \alpha, \beta)$  为:

$$\begin{cases} d = \frac{H \sqrt{u^2 v'^2 - 2uu'vv' + u'^2 v^2 + 4v^2 v'^2 + 4v'^2 f}}{uv' + u'v} \\ \alpha = \arcsin \left( \frac{2v'f}{\sqrt{u^2 v'^2 - 2uu'vv' + u'^2 v^2 + 4v^2 v'^2 + 4v'^2 f}} \right) \\ \beta = \arcsin \left( \frac{2vv'}{\sqrt{u^2 v'^2 - 2uu'vv' + u'^2 v^2 + 4v^2 v'^2 + 4v'^2 f}} \right) \end{cases} \quad (14)$$

根据坐标系的变换公式,可得光点  $P$  的欧氏坐标:

$$\begin{cases} x = d \sin(\pi/2 - \alpha) \cos \beta = d \cos \alpha \cos \beta \\ y = d \sin(\pi/2 - \alpha) \sin \beta = d \cos \alpha \sin \beta \\ z = d \cos(\pi/2 - \alpha) = d \sin \alpha \end{cases} \quad (15)$$

### 2.3 模型的有效视场分析

双 PSD 探测模型成立的基本要求是空间光点  $P$  在左右 PSD 光敏面上同时成像,即存在对应的二维位置坐标。因此,有必要对模型的有效探测范围进行分析,建立探测视场模型,有效的深度视场为左、右单 PSD 视场的重叠部分。其中,单 PSD 的视场角为  $\gamma$ ,在深度  $D$  范围内有效深度视场的直径为  $M$ 、无效视场的直径为  $M'$ 、双 PSD 的视场角为  $\delta$ 。当两 PSD 光敏面完全平行 ( $\gamma = \delta$ ) 的理想情况下,可得有效深度视场为:

$$M = 2D \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) - 2H \quad (16)$$

由式(16)可知,  $D \leq \tan(\gamma/2)$  时,为模型的探测盲区,无法成像。

假设左、右 PSD 探测器共光轴,设单 PSD 视场角  $\gamma$ 、光轴偏差  $\varepsilon$ 、基线距离  $2H$ 、空间光点深度  $d$ ,如图 5 所示。

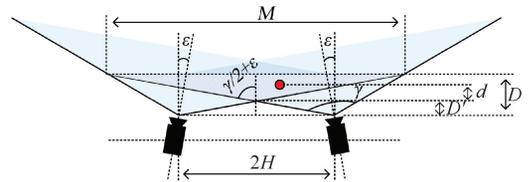


图 5 双 PSD 视觉的可见性约束条件模型

Fig. 5 Visibility Constraint Model of Dual PSD Vision

当  $d \in [0, D')$  范围时,在 PSD 光敏面上不成像,即有效视场直径  $M = 0$ 。其次,分界线  $D$  和  $D'$  的表达式可以根据图中的几何关系进行推导:

$$\begin{cases} D' = \frac{H}{\tan(\gamma/2 + \varepsilon)} \\ D = \frac{2H(\cos \gamma + \cos 2\varepsilon)}{\cos 2\varepsilon} \end{cases} \quad (17)$$

当  $d \in [D', D)$  范围时,根据正切关系有:

$$\tan\left(\frac{\gamma}{2} + \varepsilon\right) = \frac{M}{2(d - D')} \quad (18)$$

结合式(17)和(18)解得:

$$M = 2d \tan\left(\frac{\gamma}{2} + \varepsilon\right) - 2H \quad (19)$$

当  $d \in [D, \infty)$  范围时,根据正切关系有:

$$\tan\left(\frac{\gamma}{2} - \varepsilon\right) = \frac{M}{2(d + D')} \quad (20)$$

结合式(17)和(20)解得:

$$M = 2d \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \varepsilon\right) + 2H \quad (21)$$

综上所述,整理得到模型有效视场的可见性约束条件:

$$M = \begin{cases} 0, d < D' \\ 2d \tan\left(\frac{\gamma}{2} + \varepsilon\right) - 2H, D' \leq d < D \\ 2d \tan\left(\frac{\gamma}{2} - \varepsilon\right) + 2H, D \leq d \end{cases} \quad (22)$$

在镜头选型结束后,单 PSD 相机的视场角  $\gamma$  和基线距离  $2H$  也随着确定,可通过式(22)结合期望的探测深度  $d$ ,对合作目标光源靶面的尺寸大小进行控制,从而实现最佳的探测效果。

### 3 空间光点位置探测系统

根据本文提出的双 PSD 视觉的空间光点位置探测方法,搭建了图 6 所示的空间光点探测实验平台。系统装置由日本滨松光子的 S5991-01 二维枕形 PSD、美国科锐公司 CREE XP-E2 系列红色 LED 作为光源和精密数控平台组成。采用的 PSD S5991-01 有效光敏面尺寸  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ,响应时间  $2 \mu\text{s}$ ,光谱响应范围为  $320 \sim 1100 \text{ nm}$ 。红色 LED 中心辐射波长  $635 \text{ nm}$ ,光谱半宽  $15 \text{ nm}$ ,有效发射半宽角度  $\pm 65^\circ$ ,采用 PWM 的恒流驱动方式,从而实现光源的亮度调制,并通过嵌入式 MCU 控制系统进行光源的顺序调制。并用均匀出光全角  $60^\circ$  的 PMMA 光学透镜对发散角进行优化,提升光源与背景光的对比度,提升位置解算系统的信噪比。标靶面板的尺寸为  $340 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$ , $3 \times 3$  特征光点间距  $15 \text{ mm}$ ,面板材质采用航天铝材。3-D 数控平台三轴可移动范围  $200 \text{ mm}$ ,单轴最小位移为  $0.01 \text{ mm}$ ,精度为  $0.001 \text{ mm}$ 。其中,光标靶与双 PSD 相机平行放置,初始深度距离  $1000 \text{ mm}$ 。

首先对装上光学镜头的 PSD\_1 和 PSD\_2 的稳定性验证,系统打开后,对准特征光点于双 PSD 相机视场的中间垂线之上,即调整至  $X$  方向坐标互为相反数,记录运行  $15 \text{ min}$  内探测器的电压数据,计算出的位置变化如图 7 所示。从总体上看,双 PSD 的  $X$  和  $Y$  方向坐标波动均稳定在  $\pm 130 \mu\text{m}$ ,波动较小,且位姿解算软件设有均值

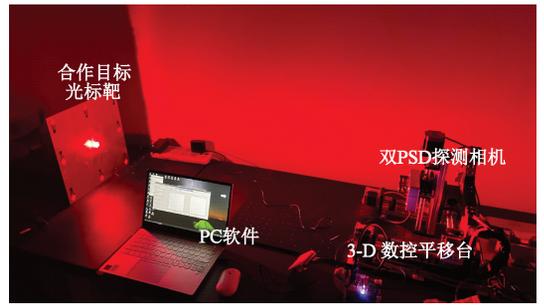


图 6 空间光点探测实验平台

Fig. 6 Space spot detection experimental platform

滤波环节,可进一步减小探测误差。此外, $X$  方向的坐标波动趋势基本对称, $Y$  方向坐标的平均差值为  $184 \mu\text{m}$ ,符合双目视觉的成像规律。

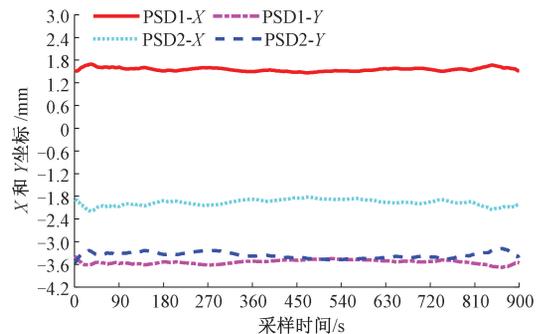


图 7 双 PSD 视觉相机的稳定性验证

Fig. 7 Stability verification of dual PSD vision camera

### 4 实验与分析

由于合作光标靶的面积较大,根据相对移动的原理,以光标靶的中心特征光点作为探测目标静止固定,通过搭载双 PSD 探测相机的数控平移台进行空间立体的扫描运动,从而解算特征光点三维空间坐标的相对变化轨迹。以垂直光标靶的方向建立  $Z$  轴,扫描空间为  $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,控制平移台  $X$  和  $Y$  轴以步长  $40 \text{ mm}$  进行“弓”字形扫描, $Z$  轴在初始距离  $1000 \text{ mm}$  的基础上依次步进  $50 \text{ mm}$  移动,实现目标区域的测量。

空间光点在双 PSD 光敏面上经曲面插值优化后的扫描轨迹如图 8 所示,PSD\_1 和 PSD\_2 轨迹的  $Y$  坐标基本一致,等同于双目视觉中的极线校正的环节, $X$  坐标之间的差值即为视差值,用于三维坐标解算过程中还原  $Z$  轴的深度距离信息。其次,随着  $Z$  轴深度的增加,轨迹呈现“近大远小”的变化,此时只需根据实际空间的已知距离和成像光点距离的比值关系,即可将轨迹转换至实际坐标系下。进行空间光点位置测量时,比值关系由步进值决定,而合作目标姿态探测时,比值则由光标靶上设计的几何特征距离计算。根据双 PSD 位置探测模型,解算结果如图 9 所示。

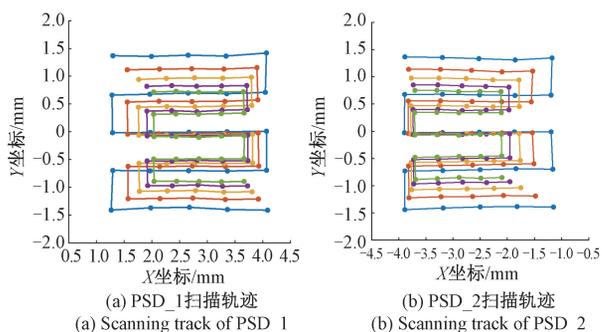


图 8 PSD 相机光敏面的扫描轨迹

Fig. 8 Scanning track of photosensitive surface of PSD camera

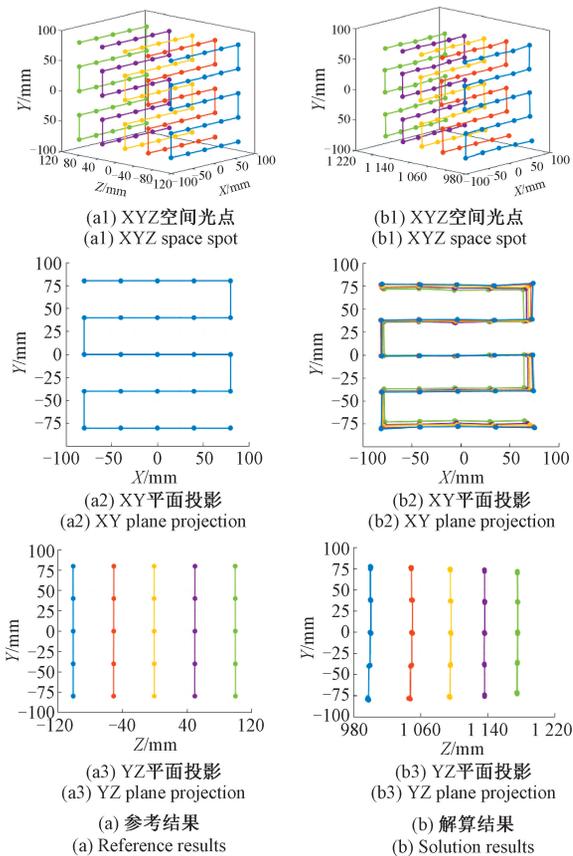


图 9 空间特征光点的位置探测

Fig. 9 Position detection of spatial characteristic light points

其中,图 9(a1)为平移台运动参考的三维轨迹,图 9(b1)为解算出光点的空间轨迹,其余子图为对应的  $O$ - $XY$  平面和  $O$ - $YZ$  平面二维图。经对比可知,随着  $Z$  轴深度的增加,光敏面成像轨迹缩小,PSD 的定位误差增大,导致解算值相较于参考值偏小,当  $Z > 1100$  mm 时, $Z$  方向误差将超过 10%,且  $X$  方向的位置偏差整体大于  $Y$  方向。

将参考轨迹转换至解算轨迹坐标系下,定义对应点的空间欧氏距离为解算误差,结果如图 10 所示。图 10(a)~(c)分别为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的距离误差,由图 10 可知,

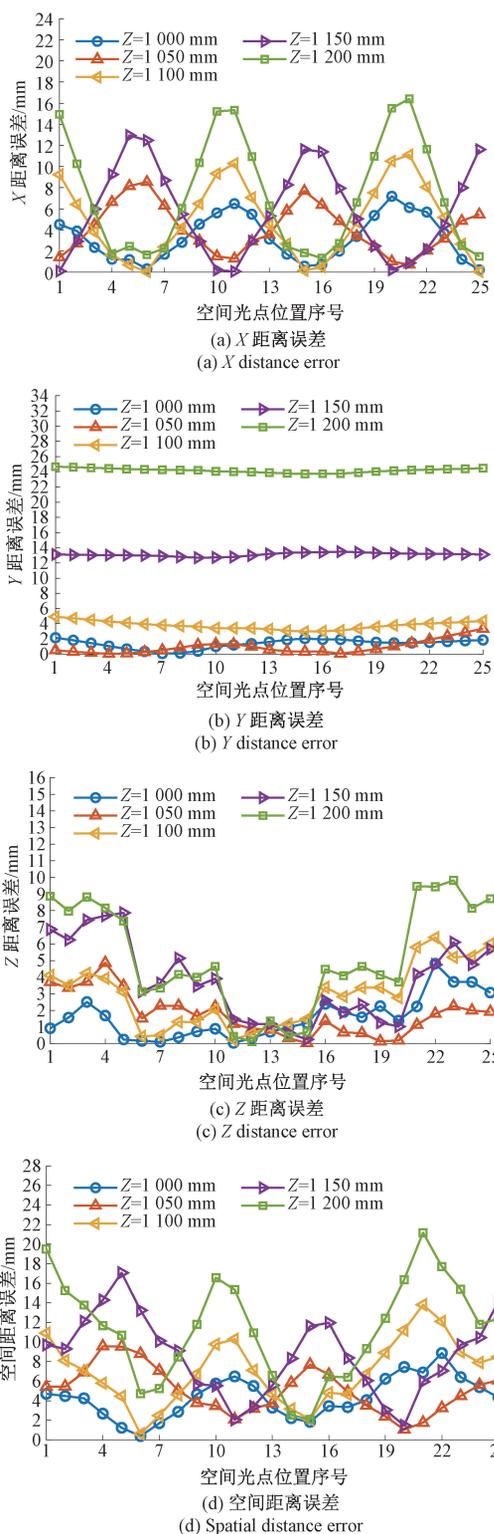


图 10 空间光点位置的误差分布

Fig. 10 Error distribution of spatial spot position

沿着  $X$  方向左右两边缘的光点精度会有明显降低,随着每次深度的增加, $Y$  方向各特征光点无明显偏差,但总体精度逐渐降低, $Z$  方向靠近中心的光点精度较高。整

体上,不同深度对应的平均误差分布在 $[4.35\text{ mm}, 11.39\text{ mm}]$ ,且靠近 PSD 线性度 A 区,即对应空间 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 范围的解算结果明显优于其余位置,距离每增加 $50\text{ mm}$ ,误差增加约 $27\%$ 。由此可见,在探测深度 $Z>1\ 000\text{ mm}$ 时,探测系统的平均误差为 $7.30\text{ mm}$ ,能够准确的还原特征光点的空间轨迹。

## 5 结 论

基于双 PSD 视觉的空间光点位置探测相比于单目视觉有着可直接获得空间位置深度信息的测量优势,且响应速度快,算法复杂度低。实验以平行放置的两个单 PSD 成像模型的基线中点为原点,建立空间光点三维坐标的双 PSD 视觉探测模型,对空间光点的三维坐标测量和分析。通过数控平移台进行空间立体的扫描运动,解算得到空间光点的变化轨迹,对空间目标的测量具有现实的研究意义。

## 参考文献

- [ 1 ] 向刚,韩峰,周虎,等.数据驱动的航天器故障诊断研究现状及挑战[J].电子测量与仪器学报,2021,35(2):1-16.  
XIANG G, HAN F, ZHOU H, et al. Status and challenges of data-driven spacecraft fault diagnosis research [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 ( 2 ) : 1-16.
- [ 2 ] 李晶.基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
LI J. Research on multi-point cooperative target-based multi-line array CCD spatial object attitude measurement [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [ 3 ] 束安,裴浩东,丁雷,等.空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法[J].光学学报,2020,40(17):107-117.  
SHU AN, PEI H D, DING L, et al. A binocular visual positional measurement method for spatial noncooperative targets [ J ]. Journal of Optics, 2020, 40 ( 17 ) : 107-117.
- [ 4 ] 石磊,朱洪海,于雨,等.基于双目立体视觉的波浪参数遥测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(3):99-104.  
SHI L, ZHU H H, YU Y, et al. Research on the telemetry of wave parameters based on binocular stereo vision [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 ( 3 ) : 99-104.
- [ 5 ] 袁媛,刘柯,孙增玉,等.单目视觉三维运动位姿测量方法研究[J].宇航计测技术,2019,39(6):1-6.  
YUAN Y, LIU K, SUN Z Y, et al. Research on monocular vision 3D motion position measurement method [ J ]. Astronautical Measurement Technology, 2019, 39 ( 6 ) : 1-6.
- [ 6 ] CHEN X, TIAN G, WU J, et al. Feature-based registration for 3D eddy current pulsed thermography [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 ( 16 ) : 6998-7004.
- [ 7 ] 程文华,姚红,张雅声.基于特征光流信息的空间非合作目标相对位姿估计[J].上海航天,2015,32(5):9-14.  
CHENG W H, YAO H, ZHANG Y SH. Relative position estimation of spatial non-cooperative targets based on characteristic optical flow information [ J ]. Shanghai Space, 2015, 32 ( 5 ) : 9-14.
- [ 8 ] 孙增玉,高越.基于视觉技术的非合作航天器相对位姿测量方法[J].宇航计测技术,2017,37(4):1-6.  
SUN Z Y, GAO Y. A vision-based method for relative attitude measurement of non-cooperative spacecraft [ J ]. Astronautics Measurement Technology, 2017, 37 ( 4 ) : 1-6.
- [ 9 ] 马精格.CCD与CMOS图像传感器的现状及发展趋势[J].电子技术与软件工程,2017(13):103.  
MA J G. The current status and development trend of CCD and CMOS image sensors [ J ]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017 ( 13 ) : 103.
- [ 10 ] 冯鹏,高峰.高分遥感影像中道路信息提取方法综述[J].现代电子技术,2015,38(17):53-57.  
FENG P, GAO F. A review of road information extraction methods in high-definition remote sensing images [ J ]. Modern Electronic Technology, 2015, 38 ( 17 ) : 53-57.
- [ 11 ] 张敏,梁雁冰.二维四边形位置敏感探测器实验研究[J].红外与激光工程,2013,42(2):459-464.  
ZHANG M, LIANG Y B. Experimental study of two-dimensional quadrilateral position-sensitive detector [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 ( 2 ) : 459-464.
- [ 12 ] 周森,张志伟,蔡睿博.基于PSD的高精度微位移测量系统研究[J].光学与光电技术,2020,18(5):22-27.  
ZHOU S, ZHANG ZH W, CAI R B. Research on PSD-based high-precision micro displacement measurement system [ J ]. Optics and Optoelectronics Technology, 2020, 18 ( 5 ) : 22-27.
- [ 13 ] 黄战华,张亚男,方石,等.基于单PSD的目标空间位姿测量方法[J].光子学报,2018,47(9):160-168.  
HUANG ZH H, ZHANG Y N, FANG SH, et al. A single PSD-based method for spatial positional measurement of targets [ J ]. Journal of Photonics, 2018, 47 ( 9 ) : 160-168.
- [ 14 ] RODRÍGUEZ-NAVARRO D, LÁZARO-GALILEA J, IGNACIO B M, et al. Mathematical model and calibration procedure of a PSD sensor used in local positioning systems [ J ]. Sensors, 2016, 16 ( 9 ) : 1484.
- [ 15 ] RODRÍGUEZ-NAVARRO D, LÁZARO-GALILEA J, DE-LA-LLANA-CALVO Á, et al. Indoor positioning system based on a PSD detector, precise positioning of

agents in motion using AoA techniques [J]. Sensors, 2017, 17(9):2124-.

[16] 呼夏苗. 基于双二维 PSD 的位姿探测系统的设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.

HU X M. Design of a dual 2-D PSD-based positional detection system [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019.

[17] 程智,董登峰,周维虎,等. 基于位置敏感器件的高精度激光位置检测系统[J]. 激光与光电子学进展, 2016,53(8):152-160.

CHENG ZH, DONG D F, ZHOU W H, et al. High-precision laser position detection system based on position-sensitive devices [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2016, 53(8):152-160.

[18] 张鹏程,刘瑾,杨海马,等. 基于 PSD 的非均匀激光光斑中心定位研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(8): 941-947.

ZHANG P CH, LIU J, YANG H M, et al. Research on PSD-based nonuniform laser spot center localization[J]. Laser and Infrared, 2020, 50(8):941-947.

[19] 黄烈云,莫彦祎,向勇军. 大面积枕型二维位敏探测器的研制[J]. 半导体光电, 2014, 35(2):211-213.

HUANG L Y, MO Y Y, XIANG Y J. Development of large-area pillow-type two-dimensional bit-sensitive detector [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2):211-213.

[20] 杨海燕,汤国建. 立体视觉系统的目标可见性及测量精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1889-1894.

YANG H Y, TANG G J. Analysis of target visibility and measurement accuracy of stereo vision system [J]. Systems Engineering and Electronics Technology, 2012, 34(9):1889-1894.

作者简介



刘瑾, 现任上海工程技术大学副教授, 主要研究方向为光电精密测试技术、分布式传感器网络、以及测试信息采集和处理。

E-mail: flyingpine@sina.com

Liu Jin is currently an associate professor at Shanghai University of Engineering and

Technology. Her main research interests include optoelectronic precision test technology, distributed sensor networks, and test information acquisition and processing.



张鹏程, 毕业于上海工程技术大学, 现为上海仪电(集团)有限公司中央研究院工程师, 主要研究方向为光电检测装置与物联网技术。

E-mail: wuliluluo@gmail.com

Zhang Pengcheng graduated from Shanghai University of Engineering and Technology, is now an engineer in INESA(Group) Company Limited. His main research interests include photoelectric detection device and Internet of Things technology.



程绍伟, 上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术, 光电探测, 嵌入式系统和深度学习。

E-mail: 1196535550@qq.com

Cheng Shaowei is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Engineering and Technology. His main research interests include sensor technology, photoelectric detection, embedded system and deep learning.



杨海马, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为空间目标探测、数字信号分析和处理、模式识别算法研究等。

E-mail: snowyhm@sina.com

Yang Haima is an associate professor at University of Shanghai for Science and Technology. His main research interests include spatial target detection, digital signal analysis and processing, pattern recognition algorithm research, etc.



赵红壮, 上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统、三维重建与缺陷检测。

E-mail: 1273911148@qq.com

Zhao Hongzhuang is a M. Sc. candidate of School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science. His research interests include embedded systems, 3D reconstruction and defect detection.