

doi:10.3788/gzxb20184709.0904001

基于单 PSD 的目标空间位姿测量方法

黄战华,张亚男,方石,蔡怀宇

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:为了克服图像传感器在位姿测量中存在响应速度与精度相互制约以及相应图像处理算法复杂的缺陷,提出一种基于单个位置敏感探测器的目标空间位姿测量方法.首先建立以位置敏感探测器光敏面中心为原点的传感器坐标系并在该坐标系下定义空间姿态角,然后将合作目标上 8 个循环交替点亮的红外 LED 光源作为探测对象,特征发光点经过会聚镜头成像于探测器光敏面上,经信号处理得到各点二维像坐标,并结合光源相对位置关系最终解算得到目标在传感器坐标系下的空间位置和姿态.在对系统稳定性进行验证后完成了位置平移与角度旋转的测量实验.实验结果表明:提出的方法在视场角为 16.3° 的范围内探测距离可达 10 m,沿深度方向的位置测量绝对误差最大为 36.2 mm,其他方向位置测量平均绝对误差最大为 7.1 mm,角度测量绝对误差优于 2° .该方法解算过程简单、实时性强,测量更新频率为 100 Hz,可以满足位姿检测的高速要求.

关键词:位置敏感探测器;位姿测量;单传感器;合作目标;红外 LED

中图分类号:TP212.9; TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0904001-9

Method of Object Pose Measurement Based on Single PSD

HUANG Zhan-hua, ZHANG Ya-nan, FANG Shi, CAI Huai-yu

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education,

School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A pose measurement method based on single position sensitive detector was proposed in order to overcome the limitation of image sensor response and precision and the defect of corresponding image processing algorithm. First, a coordinate system was established while the origin was based on detector photosensitive surface center and space attitude angle was defined in this coordinate system. Then eight infrared LED light sources of plane object glowed in circle were defined as detecting target and they were imaged on the active area of the positive sensitive detector via optic system. After the electricity digital signal had been processed by the program, using two-dimensional image coordinate of feature points and specific relative position relation of light sources, the position and attitude information of object in sensor coordinate system would be gained finally. Before the measurement experiment, the stability of the system was verified. Experimental results show that measurement distance of this method is 10 m in the depth direction within the detectable field angle of 16.3° while the maximum absolute error is 36.2 mm. The maximum position measurement mean absolute deviation in other direction is 7.1 mm and angle measurement error is higher than 2° . This method is simple while real-time frequency of measurement could achieve 100 Hz and it could meet the real-time requirements in pose measurements commendably.

Key words: Position sensitive detector; Pose measurement; Single-sensor; Plane object; Infrared LED

OCIS Codes: 040.5160; 230.5160; 120.4820; 120.1880

0 引言

目标空间位姿测量在军事、航天、民用等领域占据着重要的地位,特别是在导弹跟踪定位、航天器交互对

基金项目:国家自然科学基金(No. 61475113)资助

第一作者:黄战华(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为成像光学及光电探测技术. Email: zhanhua@tju.edu.cn

通讯作者:张亚男(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为传感器与光电检测技术. Email: yananzhang0310@163.com

收稿日期:2018-04-18; **录用日期:**2018-06-22

<http://www.photon.ac.cn>

接、机器人导航等方面有广泛的应用^[1-4].早在 20 世纪中后期,美国科学家 ALLAN Y^[5]等采用激光跟踪仪实现了对于目标点三维位置坐标和姿态角度的测量,这种方法存在光学系统复杂、适用性差的缺点,之后一些学者开始研制全球定位系统(Global Position System,GPS)位姿测量系统,例如 Ashtech^[6]的 3DF 系统能够有效获取目标空间位姿信息并且具有较高的测量精度,但是设备成本很高,不利于普及和推广,相关技术也不成熟.

随着光电子半导体器件的不断发展,利用光学成像传感器并结合视觉测量和图像处理技术来获取目标空间位置坐标和姿态角偏转参数成为更典型的测量方法^[7-10].胡英辉^[11]等提出了多个 CCD 相机组合的姿态测量系统,该方法中镜头的景深和畸变参数对实验精度的影响较大.为了弥补多目和双目视觉的位姿测量方法中探测视场受限的不足,王向军^[12]等采用单目相机的空间位姿测量方法,通过检测合作目标的若干特征光点进而解算出被测目标的空间位置及姿态.基于 CCD 探测器的位姿测量精度在很大程度上依赖高像素的图片,而高像素要求会影响传输帧频,因此其响应速度和测量精度互相制约.此外,CCD 像元尺寸限制其分辨率,而且对探测成像系统要求较高,对应图像处理算法相对复杂.

位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)是一种基于横向光电效应的半导体器件,它能够光源照射在敏感面上的光斑强度和位移量转换成电流信号^[13].与 CCD 相比,PSD 是一种连续型模拟器件,其克服了阵列型器件分辨率受像元尺寸限制的缺陷,输出方式不需要扫描,从而提高了探测速度并简化了测量电路,对被测环境背景和光学系统要求较低^[14].目前 PSD 主要应用于目标位置的探测,而现有位姿检测技术大都采用多探测器测量系统,存在结构复杂以及数据处理工作量大的缺点^[15].为解决以上问题,本文提出了一种基于单 PSD 的目标空间位姿测量方法:该方法在 PSD 光敏面建立空间坐标系,不经过坐标系转换从而使得解算过程更加简单,沿深度方向的有效探测距离较相机测量法扩大一倍,测量实时更新频率为 100 Hz,在一定程度上提高了探测效率,可以较好地满足位姿检测的实时性要求.

1 位姿测量的基本原理

1.1 PSD 的基本原理

位置敏感探测器(PSD)是一种基于横向光电效应的连续型模拟器件,其结构是由 P 型半导体、N 型半导体和高阻 I 层形成的 P-I-N 结,其中 P 层作为感光面且为一面状均匀电阻层.选择使用双面型 PSD,在感光面和背面分别放置两条电极,并且两面的电极互相垂直,避免了电极间的相互影响.由于两面都要分配电流,因此没有公共电极.图 1 为双面型 PSD 的结构,四个电极的光电流输出为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 ,光敏面尺寸为 $L \times L$.以光敏面中心为参考点,入射光点在 PSD 光敏面的位置计算公式为^[16-17]

$$\begin{cases} x_p = \frac{L}{2} \times \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \\ y_p = \frac{L}{2} \times \frac{I_4 - I_3}{I_3 + I_4} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 位姿检测系统的工作流程

单 PSD 的目标空间位姿测量系统结构如图 2 所示,包括合作目标单元、光电探测单元、信号处理单元和位姿解算单元.本系统设计 8 个相对空间位置关系已知的红外 LED 光源与发光驱动模块组成合作目标单元,该单元与被测目标保持相对静止.由于 PSD 每一时刻只能探测一个光点位置,因此将 8 个光源按照复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device,CPLD)控制输出的指定分时顺序循环交替点亮.为了使探测器准确识别每个红外 LED 光源,在 CPLD 发光时序中,将起始位置的光源预点亮一定时间作为指示信号,光源发出的光经透镜会聚成像在位于焦平面处的 PSD 光敏面上,PSD 探测每个发光点的光电流信号.为了保证探测精度与信噪比,在 PSD 光敏面前设计了波长带宽与红外 LED 发光谱线宽度相匹配的窄带

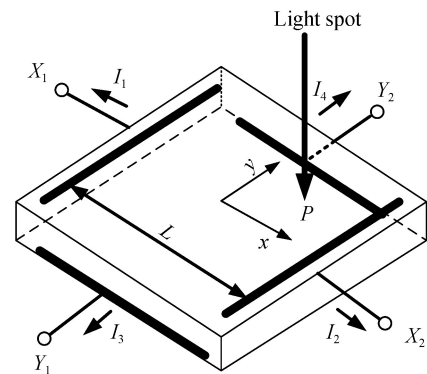


图 1 双面型 PSD 结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of two-type PSD

滤色片.信号处理单元首先将 PSD 四个电极的光电流信号转换为电压信号,再经过放大、滤波、差分消除背景光等处理后进行 A/D 转换,然后将 A/D 转换后对应的电压数字量存储到数据缓冲器 FIFO 中.ARM 控制器将其按电极顺序提取到上位机软件中,位姿解析算法按照光源指定的发光时序可以得到每个特征光点在 PSD 光敏面的二维像坐标值,结合光源已知的空间结构与相对位置关系可以解算出被测目标的空间三维位置和角度姿态,最后通过串口在上位机界面实时显示.

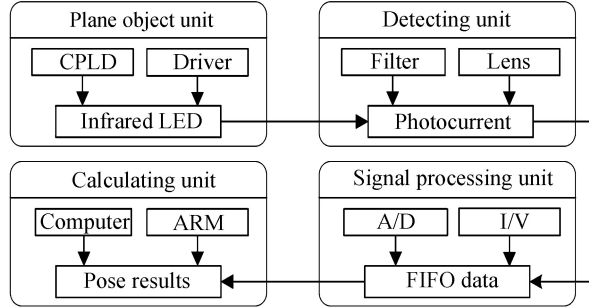


图2 位姿测量系统结构框图
Fig.2 Pose measurement system diagram

本系统采用 On-Track 公司的双面型 PSD 作为探测传感器,响应时间为 $0.8 \mu s$,位置分辨率为 $1 \mu m$.红外 LED 光源的中心辐射波长为 850 nm ,光谱半宽度约为 35 nm ,光辐射半宽角为 $\pm 45^\circ$,辐射功率可达 1 W ,可以满足本系统的远距离目标探测要求.

2 位姿解算的关键算法

以 PSD 光敏面中心为原点建立空间坐标系,如图 3, l_z 为合作目标中心到透镜的深度距离, f 为已知的会聚镜头焦距,定义光学系统的成像倍率为 k ,其关系满足

$$k = f/l_z \quad (2)$$

合作目标按照平面结构均匀排布 8 个红外 LED 光源,如图 4,每个 LED 光源到中心的距离为 R .

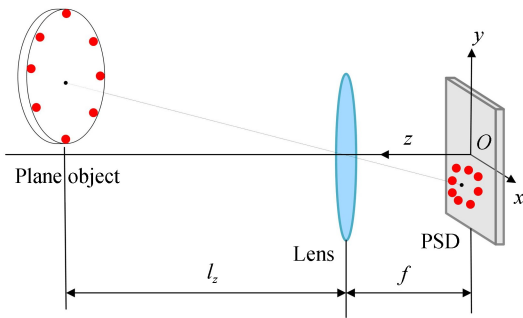


图3 系统成像示意图
Fig.3 Imaging diagram of system

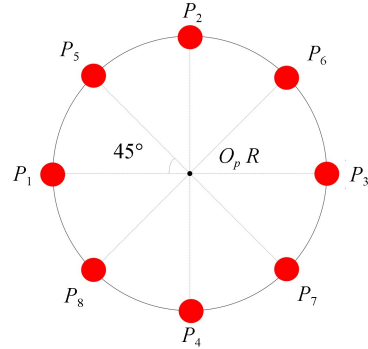


图4 红外 LED 位置示意图
Fig.4 Position diagram of Infrared LED

2.1 空间坐标求解算法

根据式(1)可知光源发光时在 PSD 光敏面上对应的像点二维坐标为 (x', y') , 8 个红外 LED 按照分时顺序依次发光,可以分别得到像点二维坐标值 $(x'_1, y'_1) \sim (x'_8, y'_8)$.具体在解算过程中,将 8 个红外 LED 分为两组分别求解.由于 PSD 不能直接探测出光源发光点的像方 z' 坐标值,因此先将其作为未知量.在光学系统像方空间, P_1, P_2, P_3 与 P_4 这四个光源中相邻两个满足位置关系

$$\begin{cases} (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2 = 2R'^2 \\ (x'_2 - x'_3)^2 + (y'_2 - y'_3)^2 + (z'_2 - z'_3)^2 = 2R'^2 \\ (x'_3 - x'_4)^2 + (y'_3 - y'_4)^2 + (z'_3 - z'_4)^2 = 2R'^2 \\ (x'_4 - x'_1)^2 + (y'_4 - y'_1)^2 + (z'_4 - z'_1)^2 = 2R'^2 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)中相邻两个方程相减,整理得

$$2(z'_1 - z'_3)(z'_2 - z'_4) = (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 - (x'_2 - x'_3)^2 - (y'_2 - y'_3)^2 + (x'_3 - x'_4)^2 + (y'_3 - y'_4)^2 - (x'_4 - x'_1)^2 - (y'_4 - y'_1)^2 \quad (4)$$

光源 P_1 与 P_3 、 P_2 与 P_4 的位置关系为

$$(x'_1 - x'_3)^2 + (y'_1 - y'_3)^2 + (z'_1 - z'_3)^2 = 4R'^2 \quad (5)$$

$$(x'_2 - x'_4)^2 + (y'_2 - y'_4)^2 + (z'_2 - z'_4)^2 = 4R'^2 \quad (6)$$

联立式(4)~(6)可同时解出 $z'_1 - z'_3$ 、 $z'_2 - z'_4$ 和 R' 。根据 R' 与光源到平面中心的实际距离 R 之间的关系可以求出成像倍率 k ，由式(2)可以计算得到合作目标中心到透镜的深度距离 l_z ，并且利用 k 可以解得这 4 个光源的 x 和 y 坐标值以及 $z_1 - z_3$ 、 $z_2 - z_4$ 的值，结合作目标中心 O_p 点的 z 坐标值

$$(z_1 + z_3)/2 = (z_2 + z_4)/2 = f + l_z \quad (7)$$

可以解得 z_1 、 z_2 、 z_3 和 z_4 。至此平面内 P_1 、 P_2 、 P_3 与 P_4 四个光源的坐标 $(x_1, y_1, z_1) \sim (x_4, y_4, z_4)$ 全部得出，四个光源的中心位置为 (x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) 。同样的关系和过程可以求出光源 P_5 、 P_6 、 P_7 与 P_8 的坐标 $(x_5, y_5, z_5) \sim (x_8, y_8, z_8)$ ，四个光源的中心位置为 (x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}) 。最后求解这两组 LED 中心位置的平均值即为合作目标中心坐标 (x_{op}, y_{op}, z_{op}) 。在实际测量过程中若某一个红外 LED 的有效光信号缺失，则采用不包括该光源在内的另一组红外 LED 的中心坐标作为合作目标的中心坐标，以保证该系统的适用范围与可行性。

2.2 空间姿态角度求解算法

姿态角度的求解方法与 2.1 节中位置坐标类似，同样利用两组 LED 分别解算最后取平均结果。本方法求解合作目标在传感器坐标系下的姿态，姿态角定义如图 5 所示，以 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 这四个光源为例，俯仰角、偏航角和滚转角分别为 θ 、 ψ 和 φ 。根据 2.1 节中平面内光源的位置坐标， P_1P_3 与 P_2P_4 确定的向量分别表示为 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} ，可以求出其法向量 \mathbf{r} 以指示合作目标的姿态，即

$$\mathbf{r} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} \quad (8)$$

y 轴方向向量 \mathbf{j} 为

$$\mathbf{j} = (0, 1, 0) \quad (9)$$

俯仰角为指示向量与平面 xoz 的夹角，即

$$\theta = 90^\circ - \arccos \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}}{|\mathbf{r}| |\mathbf{j}|} \quad (10)$$

指示向量在平面 xoz 的投影向量为 \mathbf{r}_1 ， z 轴方向向量为

$$\mathbf{k} = (0, 0, 1) \quad (11)$$

则偏航角为

$$\psi = \arccos \frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{k}}{|\mathbf{r}_1| |\mathbf{k}|} \quad (12)$$

P_1 和 P_3 两点确定的向量在平面 xoy 内的投影可用 \mathbf{t} 表示

$$\mathbf{t} = \left(\frac{x_1 - x_3}{2}, \frac{y_1 - y_3}{2}, 0 \right) \quad (13)$$

x 轴方向向量为

$$\mathbf{i} = (1, 0, 0) \quad (14)$$

由此可得滚转角为

$$\varphi = \arccos \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{t}| |\mathbf{i}|} \quad (15)$$

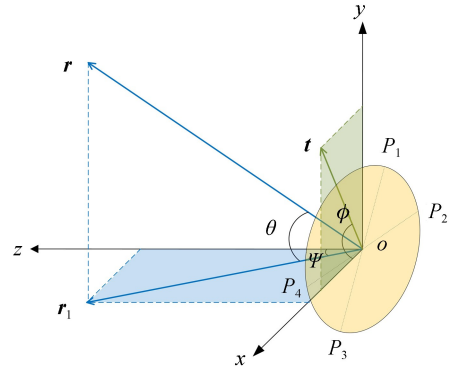


图 5 姿态角度示意图
Fig.5 Attitude angle diagram

3 位姿测量实验与分析

搭建基于单 PSD 的目标空间位姿测量实验平台，如图 6(a)，信号处理单元采集合作目标光源的发光点

在 PSD 光敏面上的电极信号,利用上位机软件进行目标中心的空间位姿解算.合作目标的实物模型如图 6 (b),8 个红外 LED 光源固定于同一平面内,每个光源到表面中心的距离为 300 mm.实验所选用 PSD 的感光面边长为 10 mm,会聚镜头焦距为 35 mm,即系统探测的视场角范围为 16.3° .在进行测量实验之前完成了系统标定工作^[18].

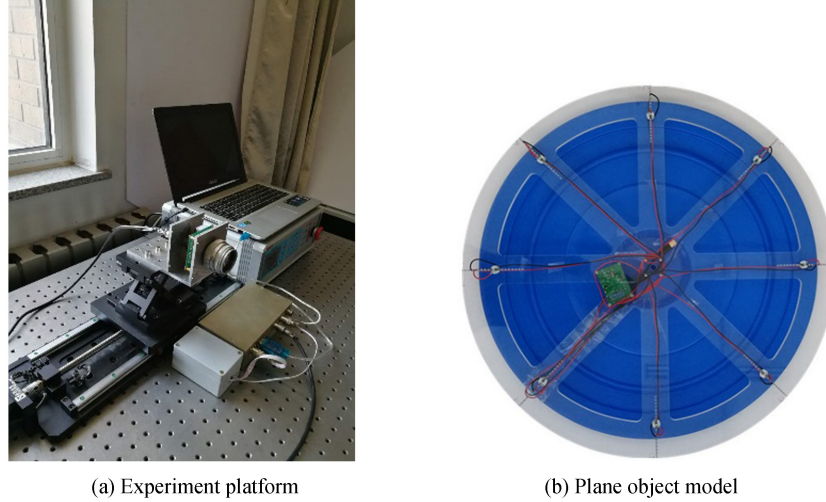


图 6 位姿测量实验装置

Fig.6 Pose measurement experiment equipment

3.1 系统稳定性测试实验

为了保证系统获取的数据准确可靠,先对其稳定性进行验证.保持合作目标单元与光电探测单元相对静止,在深度方向(z 轴)探测距离 10 m 远处,系统连续采集 100 次合作目标中心位置和姿态角度,样本中 x 和

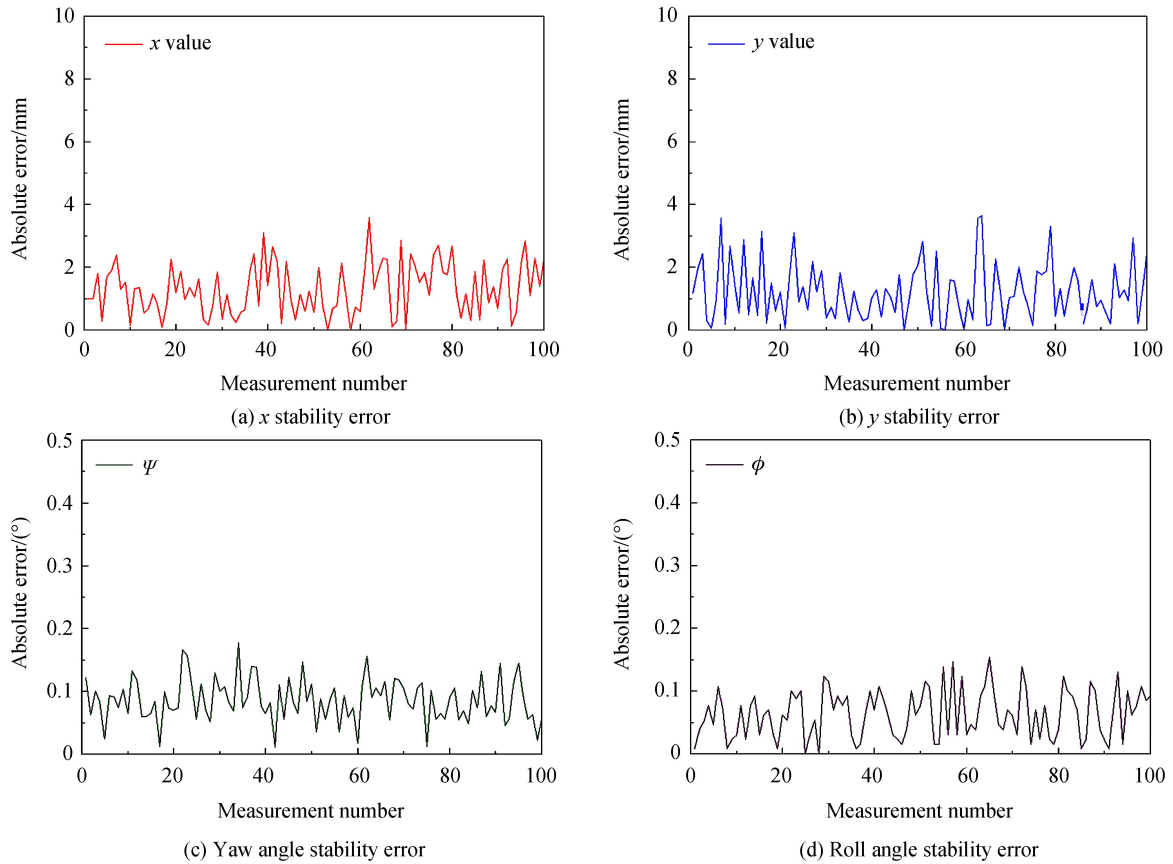


图 7 系统稳定性测试误差

Fig.7 Measurement error of system stability

y 坐标值的绝对误差如图 7(a)与 7(b)所示,其平均值为 1.8 mm 和 1.6 mm,图 7(c)与 7(d)为偏航角和滚转角的绝对误差,其平均值分别为 0.086° 和 0.097° .该结果表明数据波动较小,系统稳定性较高.

3.2 位置测量实验结果

对位置进行了沿深度方向和其他方向的测量实验.首先固定光电探测单元静止不动,在深度距离为 10 m 的测量范围内,随机选取 28 个待测点,将深度方向的探测结果与精密激光测距仪的测量结果作比较,实验测量的绝对误差分布如图 8(a)所示,绝对误差的最大值为 36.2 mm.系统探测距离的最大范围以及相应误差主要由 PSD 可接收到的红外 LED 光能量所决定.当距离增加时,红外 LED 光能量因与距离的二次方成反比而减小,从而使 PSD 探测器的电极电流分配比例精度下降,最终导致误差相应增大.实验测得在探测距离最远 10 m 处 PSD 的光电流信号大约为 $6 \mu\text{A}$,而设备噪声的偏置电流为 $0.12 \mu\text{A}$,至少可以保证 50 倍的信噪比,该方向测量精度优于 0.4%.将光电探测单元固定在精密电动位移台上,由电机带动其相对于合作目标进行位置移动,该位移平台移动的电机重复定位精度为 $5 \mu\text{m}$.在沿深度方向的探测距离 5 m 和 10 m 处,以静态初始位置为基准点,光电探测单元沿某一直线方向在 $0\sim 200 \text{ mm}$ 范围内以 10 mm 间距平移,系统采集 20 个相对于基准点的位置坐标,并与位移台控制输出的实际位置进行比较,图 8(b)为每个测量点的位置测量绝对误差分布,由图可知在探测距离 5 m 和 10 m 处位置测量的绝对误差平均值分别为 1.8 mm 和 7.1 mm.

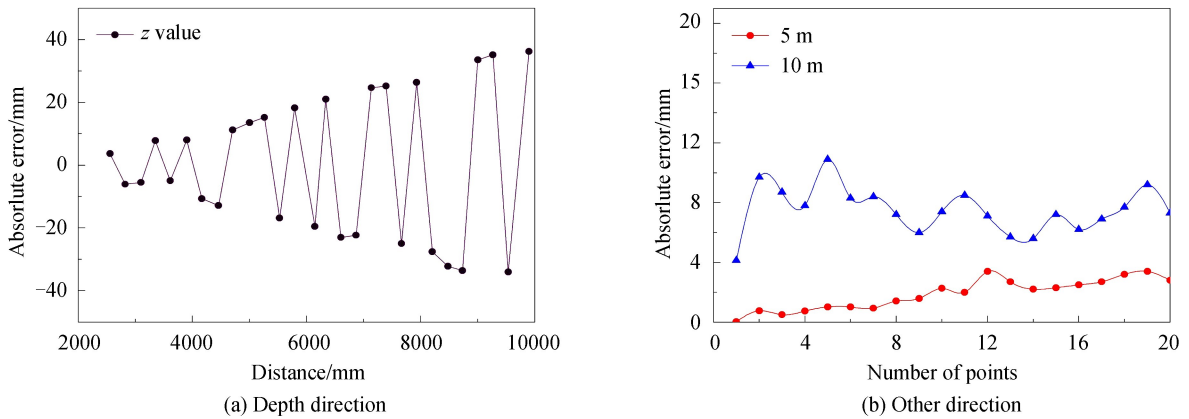


图 8 位置测量误差

Fig.8 Measurement error of position

合作目标中心位置测量值与实际位置的对应关系如图 9 所示,从图中可以看出测量值与实际值总体上满足线性关系.由于系统在深度方向 10 m 处的探测范围是 2.857 m,于是根据绝对误差值可以求出位置平移精度为 0.25%,该结果与标定后的 PSD 本身的典型非线性误差 0.2%较为接近.

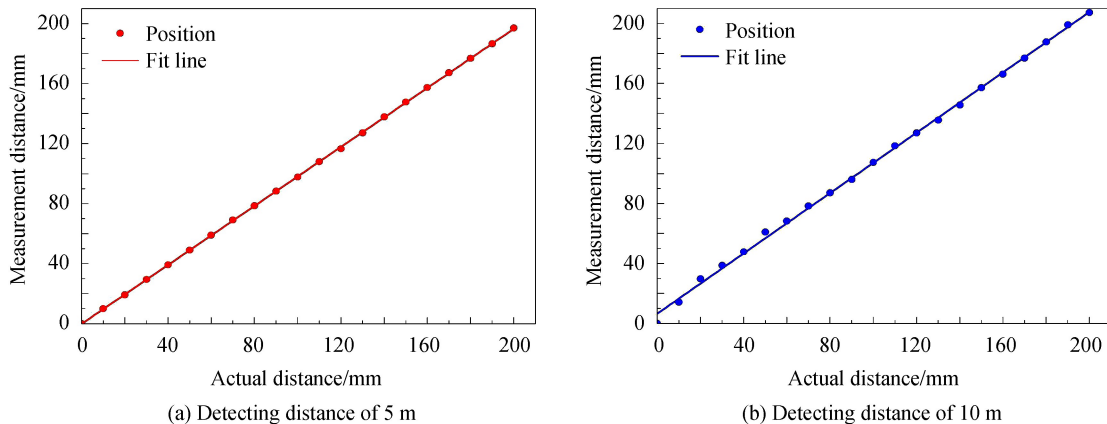


图 9 位置测量值与实际值对应关系

Fig.9 Correspondence between position measurement and actual value

3.3 姿态角度测量实验结果

将光电探测单元固定在精密电动旋转台上,由电机带动其相对于合作目标进行转动实验,该旋转平台的电机重复定位精度为 0.05° 。由于装置限制,对偏航角和滚转角这两个角度在沿探测距离方向 5 m 和 10 m 处分别进行测量实验,以静态初始角度值为基准点,偏航角测量的变化范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$,每次偏转 10° ;滚转角测量的变化范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,每次偏转 10° ;测量时保持其他两个角度不变。图 10 是偏航角和滚转角的测量误差分布,横坐标表示实验测量角度,纵坐标表示测量角度相对于旋转台控制输出的实际角度的绝对误差(每个角度的测量误差均是各位置对应角度的误差平均值)。从图中可得出偏航角和滚转角绝对误差平均值分别为 1.846° 和 1.906° ,满足系统对于姿态角在探测距离 10 m 范围内误差小于 2° 的要求。由于红外 LED 的光辐射半宽角为 $\pm 45^\circ$,则在角度旋转测量实验的过程中,当合作目标倾斜 $\pm 30^\circ$ 时,经过测算大约 80% 的光能量能被 PSD 探测器接收,因此可以保证系统对于姿态角度探测的可靠性。

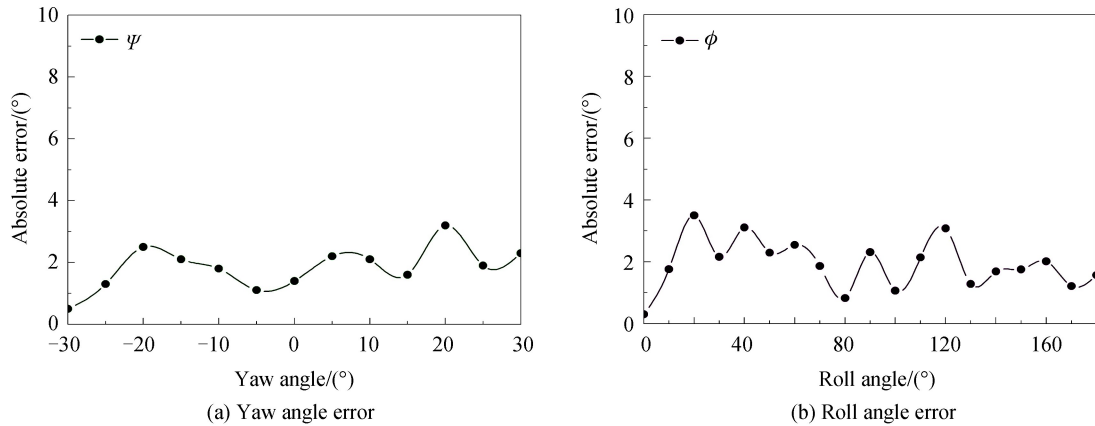


图 10 角度测量误差

Fig.10 Measurement error of angle

3.4 多自由度有效性验证实验

为了验证系统对于不同自由度测量的有效性,具体在位置测量实验过程中,保持合作目标的姿态角度不变,记录其在 10 m 处所有测量位置对应的偏航角和滚转角的实际值,误差结果如图 11(a)所示,绝对误差平均值分别为 0.121° 和 0.143° 。同理,在沿探测距离 10 m 处的滚转角测量实验过程中,保持合作目标中心与探测单元之间的距离不变,记录其 x 和 y 位置坐标值,误差结果如图 11(b)所示,绝对误差平均值分别为 4.2 mm 和 4.3 mm。结果表明该系统对于不同空间自由度的测量是有效可行的,在测量位置或姿态角某一自由度时,其他自由度基本稳定不变。

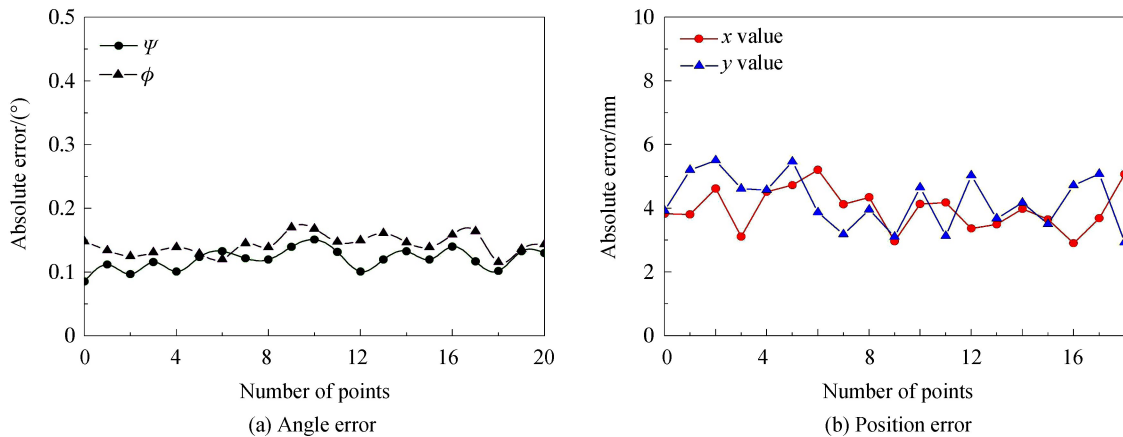


图 11 多自由度有效性验证实验

Fig.11 Multidimensional verification experiment

将本文所提方法与文献[12]中的单相机位姿测量方法进行比较,在测量精度方面,本方法中深度方向 z 值测量的绝对误差的最大值为 36.2 mm,其他方向位置测量平均绝对误差在 10 m 探测范围内最大仅为

7.1 mm, 优于其 5 m 探测范围内位置测量平均绝对误差 13.7 mm, 角度测量精度有待改进. 探测距离和系统测量频率见表 1, 本文方法沿深度方向的有效探测距离增加了一倍, 实时测量更新频率为 100 Hz, 探测速度相比于单相机测量法可提高约两倍.

表 1 探测距离和更新频率

Table 1 Measurement distance and update frequency

	Measurement distance of depth direction/m	Update frequency/Hz
Single PSD algorithm	10	100
Monocular algorithm	5	35

4 结论

本文提出了一种基于单 PSD 的目标空间位姿测量方法. 以 PSD 光敏面中心为原点建立空间坐标系, 目标空间位置和姿态在该坐标系下直接表示. 合作目标上 8 个按照指定分时顺序循环交替点亮的红外 LED 为探测对象, PSD 探测得到相应发光点在光敏面的二维像点坐标, 结合成像原理及光源之间相对位置关系, 最终解算得到目标的空间位置和姿态. 验证系统稳定性后进行了位置平移与角度旋转的测量实验. 实验结果表明: 本文所提出的单 PSD 位姿检测法在视场角为 16.3° 的探测范围内沿深度方向的探测距离可达 10 m, 深度方向位置测量绝对误差最大为 36.2 mm, 其他方向位置测量平均绝对误差最大为 7.1 mm, 角度测量绝对误差优于 2° , 该误差随着探测距离范围增加会逐渐增大. 相比文献[12]中的单相机测量方法, 本文方法不需要进行坐标系变换, 因此解算过程更加简单, 深度方向探测距离增加了一倍, 测量更新频率可达 100 Hz, 即探测速率提高了约两倍, 可以满足位姿测量的实时性要求.

参考文献

- [1] FENG Yu. Research of pose calculation algorithm based on DSP platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
冯禹. 基于 DSP 平台的位姿解算算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [2] HARALICK R M, LEE C, OTTENBERG K, *et al.* Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem[C]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Lahaina, HI, United States of America; 1991: 592-598.
- [3] LIU Wei, MA Xin, CHEN Ling, *et al.* Remote-controlled flexible pose measurement system and method for a moving target in wind tunnel[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, **31**(1): 89-98.
- [4] LEE J J, HO H N, LEE J H. A vision-based dynamic rotational angle measurement system for large civil structures [J]. *Sensors*, 2012, **12**(6): 7326-7336.
- [5] ALLAN Y, LEE J W, KAHN P B, *et al.* Space interferometry mission spacecraft pointing error budgets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 502-514.
- [6] FERGUSON K, GOUREVITCH S, KUHL M, *et al.* Attitude determination with Ashtech 3-D direction finding system [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 1993, **119**(1): 22-39.
- [7] MIAO Xi-kui, ZHU Feng, HAO Ying-ming, *et al.* Pose measurement method of non-cooperative space vehicle using multiple non-overlapping cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(3): 709-715.
苗锡奎, 朱枫, 郝颖明, 等. 多像机非共视场的非合作目标飞行器位姿测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(3): 709-715.
- [8] GAO Xu-hai, XU Ke-jun, ZHANG Han, *et al.* Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(8): 1479-1485.
- [9] LI S Z, LIANG B, WANG X H, *et al.* Pose measurement method of non-cooperative circular feature based on line structured light [C]. 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Ningbo, China; 2016: 374-381.
- [10] WU Bin, YE Dong, ZHANG Xin, *et al.* Embedded algorithm for relative pose measurement between non-cooperative target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(11): 2804-2813.
吴斌, 叶东, 张鑫, 等. 非合作目标姿态测量的嵌入式算法[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(2): 2804-2813.
- [11] HU Ying-hui, YUAN Feng, LI Kai, *et al.* Multiple linear CCD pose measuring optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10z): 16-21.
胡英辉, 袁峰, 李凯, 等. 多线阵 CCD 位姿测量光学系统[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(10z): 16-21.
- [12] WANG Xiang-jun, CAO Yu, ZHOU Kai. Methods of monocular pose measurement based on planar objects[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(1): 274-280.
王向军, 曹雨, 周凯. 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法[J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(1): 274-280.

- [13] SALLES L P, MONTERIRO D W. Designing the response of an opticalquad-cell as position-sensitive detector[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, **10**(2): 286-293.
- [14] DAI Bin, SUN Zhi-bin, WANG Fei-long, *et al.* Design of measurement and control system of position of electrostatic levitation based on PSD[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, **34**(3): 97-99.
代斌, 孙志斌, 王飞龙, 等. 基于 PSD 的静电悬浮位置测量与控制系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2015, **34**(3): 97-99.
- [15] SUN Xian-kui, QIN Lan. New system of non-contact pose measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(1): 50-54.
孙先逵, 秦岚. 一种新型非接触位姿检测系统研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(1): 50-54.
- [16] DE BAKEER M, VERBEEK P W. The PSD transfer function[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, **49**(1): 202-206.
- [17] CHIANG C T, HOU Y T. A CMOS monolithic position-sensitive detector with stray illumination noise removal for light-spot position detection applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(6): 1918-1924.
- [18] SONG C, YENG C S. Linearity indices and linearity improvement of 2-D tetralateral position-sensitive detector[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010, **57**(9): 2310-2316.

Foundation item: National Nature Science Foundation of China (No. 61475113)

引用格式: HUANG Zhan-hua, ZHANG Ya-nan, FANG Shi, *et al.* Method of Object Pose Measurement Based on Single PSD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0904001

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):0904001