

基于 PSD 和光源调制的合作目标位姿探测方法

程绍伟¹, 刘 瑾¹, 张鹏程^{1,2}, 杨海马³, 赵红壮¹, 袁雪琦⁴

(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; 4. 盐城工学院电气工程学院, 盐城 224051)

摘 要: 空间目标的相对位置与姿态探测是航天器对接领域的研究重点,探测方法主要分为遥测法和光学测量法两大类. 其中,后者依靠其速度快、稳定性高、信息量大等优势,成为了近距离位姿探测的主要方法. 我们通过双目视觉模型可计算出空间合作目标上特征光点深度信息,再根据特征光点间已知的结构、尺寸等约束信息,实现对目标姿态的解算. 本文依据 PSD 相较于 CCD 和 CMOS 传感器,有无需图像特征提取过程、响应速度快、位置分辨率高等优势,且双目立体视觉系统的仿生学结构可直接获取到探测目标的深度信息,提出了采用双 PSD 视觉模型,并配合特征光点的亮度与顺序联合调制实现对空间合作目标的位姿探测方法. 实验结果表明,当光标靶姿态调整 $\pm 30^{\circ}$ 时,系统的平均测量误差为 2.541° ,当姿态角小于 15° 时,俯仰角和偏航角的平均偏差分别为 0.923° 和 0.563° ;大于 15° 时,受限于光源发散角度的影响,俯仰角和偏航角平均偏差分别增加至 4.566° 和 4.106° ,系统能够快速、稳定解算光标靶的空间位姿.

关键词: 位置敏感探测器(PSD); 双目视觉; 合作目标; 联合调制; 位姿探测

中图分类号: TN366; TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.043002

Cooperative target pose detection method based on
PSD and light source modulation

CHENG Shao-Wei¹, LIU Jin¹, ZHANG Peng-Cheng^{1,2},
YANG Hai-Ma³, ZHAO Hong-Zhuang¹, YUAN Xue-Qi⁴

(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;
4. School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: The relative position and attitude detection of space targets is the focus of research in the field of spacecraft docking, and the detection methods are mainly divided into two categories: telemetry and optical measurement methods. Among them, the latter has become the main method for close-range position and attitude detection relying on its advantages of high speed, high stability and large amount of information. The depth information of the characteristic light points on the spatially cooperative target can be calculated using the binocular vision model, and the target attitude can be obtained based on the known structure, size and other constraint information among the characteristic light points. The PSD has the advantages of having no image feature extraction process, responding fast and having high reso-

收稿日期: 2022-03-29
基金项目: 中科院空间主动光电技术重点实验室开放基金(2021ZDKF4); 国家自然科学基金(U1831133); 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2020AAA0109301); 上海市科委科技创新行动计划(22S31903700, 21S31904200)
作者简介: 程绍伟(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术, 光电探测和深度学习. E-mail: luochen211203@163.com
通讯作者: 刘瑾. E-mail: flyingpine@sina.com; 杨海马. E-mail: snowymh@sina.com

lution for positions, compared with CCD and CMOS sensors, and the bionic structure of binocular stereo vision system can help directly obtain the depth information of the detection target. Therefore, this paper proposes a dual PSD vision model with joint modulation of luminance and order of feature light points to achieve the positional detection method of spatial cooperative targets. The experimental results show that the average measurement error of the system is 2.541° when the attitude of the cursor target is adjusted $\pm 30^\circ$. The average deviation of the pitch angle and yaw angle are 0.923° and 0.563° when the attitude angle is less than 15° . The average deviation of the pitch angle and yaw angle increase to 4.566° and 4.106° when the attitude angle is larger than 15° , restricted by the divergent angle of the light source; the system can quickly and stably solve the spatial attitude of the cursor target.

Keywords: Position sensitive detector; Binocular vision; Cooperative target; Joint modulation; Positional detection

1 引言

目前太空的部署离不开各种空间遥操作技术,主要包括航天器空间对接、轨道规避、近距离观测与检查、轨道与姿态重置等空间活动^[1]. 一个完整的空间操作任务往往涉及到两个及以上的航天器,需要多个遥操作技术的支持才能完成. 这使得航天器空间对接技术成为整个空间操作技术的基石,在实现稳定、安全和高效的对接要求下,如何探测航天器的空间位姿成为该技术的研究重点. 考虑到空间对接的一般情况,对接过程中需要明确航天器的相对位姿和速度等信息^[2]. 空间系统常用的位姿探测技术主要分为遥测法和光学测量法两大类^[3],其中,光学测量法又称视觉测量法,主要包括单目视觉技术^[4]、双目立体视觉技术^[5]等. 当前,视觉测量技术作为一种非接触式测量方法,在航空交汇对接、位姿探测等方面广泛应用^[6].

由于单目视觉只能直接获得目标的平面信息,无法直接获取到纵向的深度信息,在三维空间测量领域的应用受到限制. 而双目立体视觉利用仿生学的原理,可以通过三角测量原理直接获得目标的空间相对位置信息,再通过特征约束解算目标的姿态信息^[7],由此成为了空间目标位姿探测的重点研究方案. 并且视觉位姿探测的关键在于目标的特征提取,若目标航天器上有尺寸、结构等固定特征的可被识别称为合作目标,合作目标的特征信息可以是预先设计好的光源标靶,其光源排列形式、顺序和距离固定. 而非合作目标的特征信息为通过图像处理的手段获取目标航天器的几何特征. 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与探测精度. 传统的双目视觉相机一般采用的是 CCD 电耦合元件 (Charge-coupled Device, CCD)

和 CMOS 互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 作为成像传感器^[8,9],随着研究的不断深入,其局限性也逐渐显现出来. 首先,当测量环境复杂时,特征点的识别和匹配会面临很大挑战,容易导致测量精度不高;其次,在特征提取过程中以像素为单位进行特征图像处理,位姿解算过程中计算量庞大,很难满足实时性要求^[10]. 光电位置敏感探测器是一种基于横向光电效应、对投射至光敏面的光斑重心位置产生快速响应,具有较高的灵敏度和响应速度,极大地简化了解算步骤,优化解算时间^[11-13]. 采用光电位置敏感探测器替代传统双目视觉中采用的 CCD 和 CMOS 相机,通过两个不同视角的 PSD 位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD) 相机来对特征点光源快速响应,为实时测量提供了可能. 秦兴等^[14]提出了基于 LED 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 光的室内定位系统,系统主要利用 LED 矩阵通过光学系统聚焦到 PSD 光敏面,通过 PSD 处理电路输出光斑的触发信号,对光斑编号信息解码,通过连续获得的 LED 光斑坐标信息推算出 PSD 靶面的二维坐标和方向性. 该方法可动态伸缩可定位区域,且避免了信号间的互相干扰,能够实现一定空间范围内的准确定位. 但是无法应用于空间目标姿态角的测量. 天津大学的黄战华教授团队^[15-17]提出了基于单 PSD 相机的空间目标位姿测量方法,采用 8 个 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. 杨鲁新等^[18]提出了利用调制光源去除 PSD

背景光的方法,通过光源调制和信号处理的方式,将光源调制为脉冲光,实现对背景光进行动态检测和消除,该方法硬件结构简单,且测量精度较高,能够适用于背景光变化的场景,扩大了 PSD 的应用范围.综上所述,本文提出了基于 PSD 和光源调制的合作目标位姿探测方法,利用双目视觉能够获得三维空间位置信息、以及 PSD 具有响应速度快的优势,设计双 PSD 光点相机配合 LED 光源调制的合作光源标靶的姿态角解算,实现了空间目标相对位置的测量与姿态的估计,提高了探测速度,能够较好地满足实时性要求,对空间目标的位姿测量具有现实的研究意义.

2 PSD 基本工作原理

2.1 PSD 结构模型

PSD 是一种基于半导体横向光电效应的光斑位置探测器,其结构是由 P 型半导体、N 型半导体和高阻层 I 层形成的 P-I-N 结^[19]. 相比于 CCD,其响应速度快且 PSD 光敏面无分割,能够进行连续测量.如图 1 所示,采用的二维枕形 PSD 基本结构,二维 PSD 有 4 个电流输出脚 X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 . 当有光束照射到光敏面时,PSD 产生光生电荷,形成电流流向 PSD 引脚^[20].

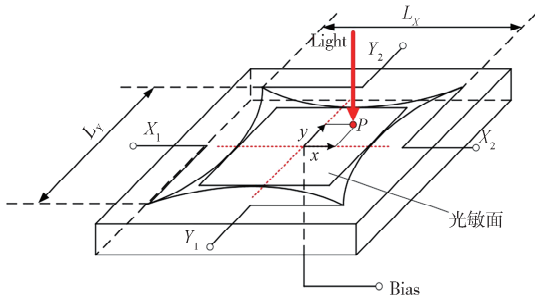


图 1 枕形 PSD 的结构模型

Fig. 1 Structure model of Pin-cushion PSD

光斑中心在 PSD 光敏面上的位置坐标 x 和 y 为

$$\begin{cases} x = \frac{(U_{X2} + U_{Y1}) - (U_{X1} + U_{Y2})}{U_{X1} + U_{Y1} + U_{X2} + U_{Y2}} \times \frac{L_X}{2} \\ y = \frac{(U_{X2} + U_{Y2}) - (U_{X1} + U_{Y1})}{U_{X1} + U_{Y1} + U_{X2} + U_{Y2}} \times \frac{L_Y}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 、 y 是入射光束的在光敏面上的位置坐标; U_{X1} 、 U_{X2} 、 U_{Y1} 、 U_{Y2} 分别为 PSD 电极 X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 输出的电流经过 I/V 转换和 A/D 的转换后的数字电压信号; L_X 、 L_Y 分别是二维 PSD 光敏面的边长,通常 $L_X = L_Y$ ^[21].

2.2 双 PSD 视觉探测模型

双目视觉是通过摄像机采集两幅图像,通过计算视差得到空间三维信息^[22]. 在此基础上构建双 PSD 视觉探测模型,如图 2 所示. 其中 PSD 光敏面位于透镜的焦平面上,透镜焦距为 f . 以左右 PSD 相机的基线中点为球心建立空间坐标系 $O-XYZ$, 空间光点 P 通过左右透镜坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 和 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 在光敏面上的投影点分别为 $P_L(u, v)$ 和 $P_R(u', v')$. 以左 PSD 为例,光点 P 在水平方向的偏转角 α_1 和竖直方向的偏转角 β_1 分别为

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

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (3)$$

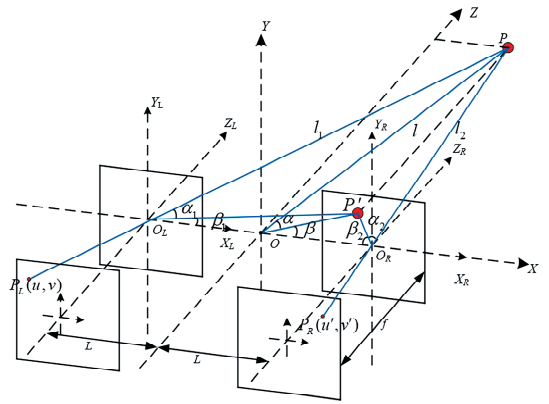


图 2 双 PSD 视觉探测模型

Fig. 2 Dual PSD visual detection model

根据空间光点 P 在球坐标系下 X 、 Y 、 Z 轴方向的位置关系可解算出空间光点 P 在 $O-XYZ$ 坐标系下的坐标 (l, α, β) 为

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

3 空间合作目标的姿态角模型

在双 PSD 视觉探测模型的基础上,定义合作目标的三维姿态角模型. 如图 3 所示,建立与位置坐标系 $O-XYZ$ 三轴平行、原点为正方形特征几何中心 (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0}) 的姿态坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$, 即两坐标系之间只存在平移关系、无旋转关系,其坐标转换可由下式得到

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{P0} \\ y_{P0} \\ z_{P0} \end{bmatrix}$$

(5)

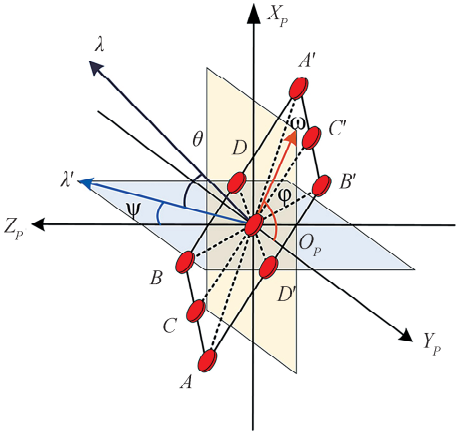


图 3 空间合作目标的姿态角模型
Fig. 3 Attitude angle model of space cooperative target

在姿态坐标系 $O_P\text{-}X_PY_PZ_P$ 下,对模型姿态角-俯仰角 θ 、偏航角 ψ 和翻滚角 φ 的解算方法进行定义.将图 3 中除中心光点外的特征分为 AA' 和 BB' 、 CC' 和 DD' 两组正交特征信标,一组作为主解,另一组作为辅助解,通过平均法得到最终解.以 AA' 和 BB' 确定的单位向量 l_A 和 l_B 为例,即:

$$l_A = \frac{AA'}{|AA'|}$$

(6)

$$l_B = \frac{BB'}{|BB'|}$$

(7)

根据向量叉乘的定理,可以确定合作目标空间平面的方向向量为:

$$\lambda = l_A \times l_B$$

(8)

合作目标方向向量 λ 在 $O_P\text{-}Y_PZ_P$ 平面上的投影为 λ' , X_P 轴的方向单位向量为

$$i = (1, 0, 0)$$

(9)

俯仰角 θ 为方向向量 λ 与 $O_P\text{-}Y_PZ_P$ 平面的夹角,即

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{\lambda \cdot i}{|\lambda| |i|}\right)$$

(10)

Z_P 轴的方向单位向量为

$$k = (0, 0, 1)$$

(11)

偏航角 ψ 为方向向量 λ 的投影向量 λ' 与 Z_P 轴的夹角,即:

$$\psi = \arccos\left(\frac{\lambda' \cdot k}{|\lambda'| |k|}\right)$$

(12)

特征信标向量 l_B 在 $O_P\text{-}X_PY_P$ 平面上的投影为 ω , Y_P 轴的方向单位向量为

$$j = (0, 1, 0)$$

(13)

翻滚角 φ 为信标向量 l_B 的投影向量 ω 与 Y_P 轴的夹角,即

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\omega \cdot j}{|\omega| |j|}\right)$$

(14)

4 合作光源标靶的亮度与顺序联合调制方法

为了配合 PSD 进行位姿的解算,在有背景光的探测环境下,我们为提升系统的信噪比,减小定位误差,基于 PSD 的快响应速度特性,对光源进行调制.本文采用基于 PWM 的亮度与顺序联合调制方法.传统的合作标靶只考虑特征光点之间的几何约束关系,用于尺寸的比例计算.针对 PSD 的连续探测特性,在设计二维光点阵列约束上,改进增加了独立亮度和闪烁顺序控制,实现了更多特征信息的携带.我们选取大功率 LED 作为特征光源,采用 PWM 的恒流驱动方式,从而实现对光源的亮度调制,并通过嵌入式 MCU 控制系统进行光源的顺序调制.并且我们对发散角进行优化,增加探测光源和环境背景光的对比度,采用调制光源能够有效降低背景光的影响,提高系统的定位精度,提升位姿解算系统的信噪比.以四通道为例分析,具体的联合调制时序如图 4 所示.

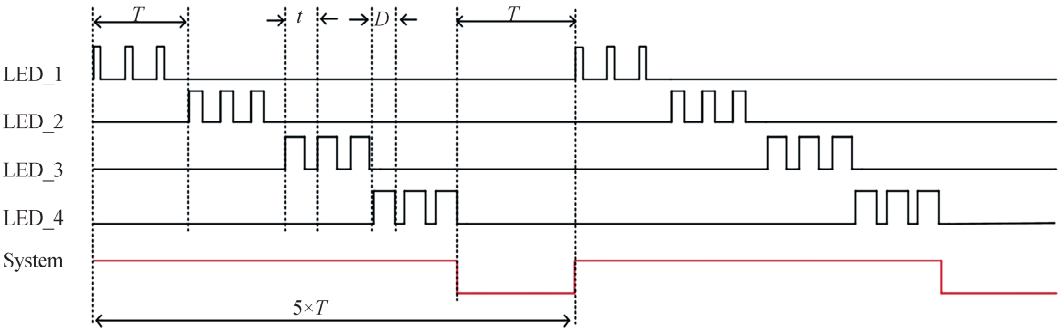
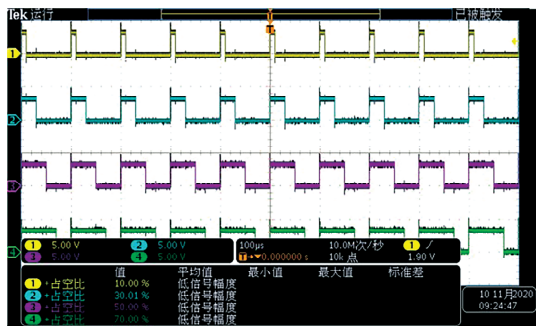


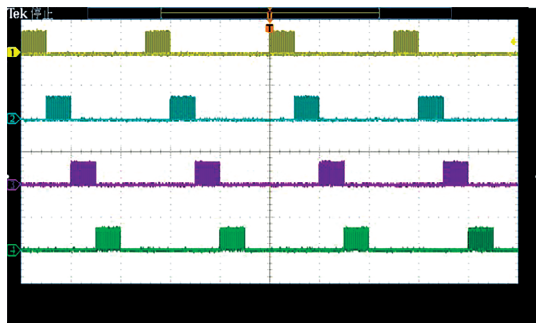
图 4 亮度(PWM)与顺序的联合调制时序图
Fig. 4 Timing diagram of joint modulation of brightness (PWM) and sequence

图 4 中, t 为 PWM 信号的一个基本脉冲宽度, T 为一路 LED 的有效调光时间, 时间内的发光强度由每一路的占空比 D 决定. 完整调制过程为: 四路 LED 依次发光 T 时间, 再衔接一个时间 T 的无动作周期, 作为调制的结束标志, 即总的时间长度为 $5 \times T$.

图 5 为示波器检测结果, 其中(a)和(b)中的水平时间标尺分别为 $100\mu\text{s}$ 和 20 ms , 由图(a)可知单个定时器同时输出四路 PWM 脉冲并无明显时延的存在, 根据 MCU 72MHz 主频时钟和 Cortex-M3 内核的平均执行速度 1.25 MIPS/MHz 可计算出一条指令执行时间约为 11 ns , 也验证了调光系统多路 PWM 模式并发的性能. 其次, 图(b)中 MCU 对四路脉宽、顺序的实际控制情况与规定的时序逻辑一致, 完整调制周期为 50 ms , 满足系统的设计要求.



(a) PWM 波形
(a) PWM waveform



(b) 联合调制时序
(b) Joint modulation timing

图 5 四通道联合调制

Fig. 5 Four-channel joint modulation

5 位姿测量实验系统

根据文中提出的空间合作目标位姿探测方法, 搭建了如图 6 所示的空间位姿探测实验平台. 系统由双 PSD 视觉相机、合作光标靶姿态控制系统和精密数控平台组成. PSD 选用日本滨松光子的

S5991-01 二维枕形 PSD, 其有效光敏面尺寸 $9\text{ mm} \times 9\text{ mm}$, 响应时间 $2\text{ }\mu\text{s}$, 光谱响应范围为 $320\text{--}1100\text{ nm}$. 光标靶上的光源采用美国科锐公司 CREE XP-E2 系列红色 LED 作为光源, 其中心辐射波长 635 nm , 有效发射半宽角度 $\pm 65^\circ$. 并采用均匀出光全角 60° 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 $340\text{ mm} \times 340\text{ mm}$, 3×3 特征光点间距 15 mm . 数控平台可移动范围 200 mm , 精度为 0.001 mm .

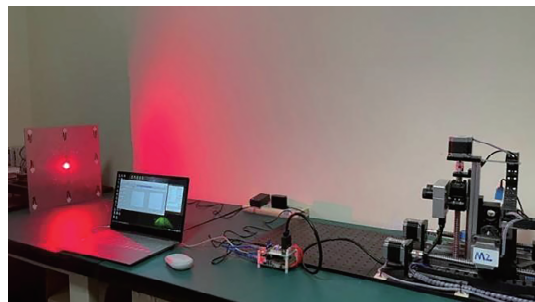


图 6 合作光标靶的空间位姿探测系统
Fig. 6 Spatial pose detection system of cooperative cursor target

为了验证对调制光源的响应, 搭建了调制光源的响应测量实验平台. 利用设计的合作目标调光控制系统, 配置一路 10 KHz 的 PWM 信号对 LED 进行调制, 并通过支架将光源固定于 PSD_1 的正上方 15 cm 处, 如图 7 所示.

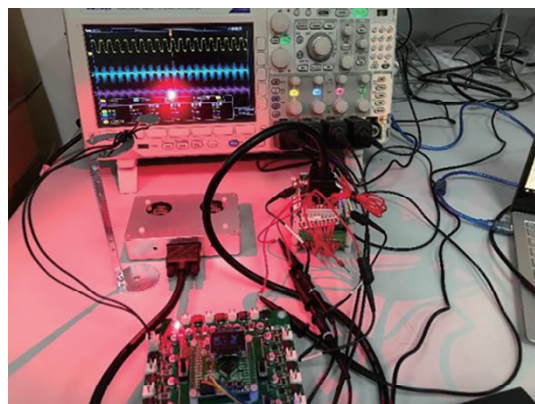


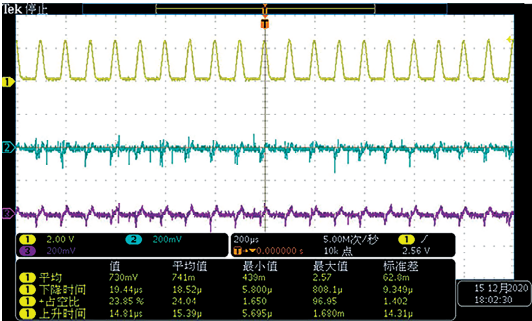
图 7 调制光源的响应测量实验平台
Fig. 7 Experimental platform for response measurement of modulated light source

其次, 示波器的前三个通道探头依次连接经模拟运算后 PSD_1 位置信号的分母项 $U_{X1} + U_{X2} + U_{Y1} + U_{Y2}$ (总光信号)、 X 分子项 $U_{X2} + U_{Y1} - U_{X1} - U_{Y2}$ 和 Y 分子项 $U_{X2} + U_{Y2} - U_{X1} - U_{Y1}$. 根据 PSD_1 对调制光源的响应趋势特点, 得到占空比分别为

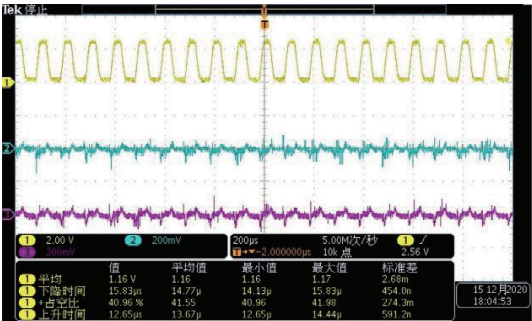
20%、40%、60%和 80%的示波器波形结果,如图 8 所示.

其中,水平时间标尺为 200 μ s,通道一总光电电压的垂直电压标尺为 2 V,通道二和通道三的垂直电压标尺为 200 mV,并且 PSD_1 电极信号经 I/V

反向放大、模拟运算处理后,示波器实测的信号极性与产生的光电流信号极性相反. 在 10 KHz 调制 LED 光源的辐射下,PSD_1 的响应整体呈周期性变化,且能够明显的分辨出不同的占空比信号.



(a) 占空比 $D=20\%$ 调制光源响应
(a) Duty cycle $D=20\%$ modulated light source response



(b) 占空比 $D=40\%$ 调制光源响应
(b) Duty cycle $D=40\%$ modulated light source response



(c) 占空比 $D=60\%$ 调制光源响应
(c) Duty cycle $D=60\%$ modulated light source response



(d) 占空比 $D=80\%$ 调制光源响应
(d) Duty cycle $D=80\%$ modulated light source response

图 8 不同占空比下 PSD_1 的调制光源响应
Fig. 8 Modulated light source response of PSD_1 with different duty cycle

6 实验与分析

6.1 调制光源的响应分析

通过分析 PSD 的解调性能,绘制出探测器响应波形的占空比和能量峰值、上升时间和下降时间特征参数与调制 LED 光源占空比的关系. 图 9 中,Stand-D 为理想情况下占空比的解调结果,当 $D < 20\%$ 时,调制的有效电平时间 Effective Time $< 20 \mu$ s,结合图 10 知此时上升时间 Rise Time $> 14.81 \mu$ s,PSD_1 的响应结果较差,即 Rise Time/Effective Time > 0.75 时,探测器的解调能力较差. 当 $D > 80\%$ 时,下降时间 Fall Time $> 18.08 \mu$ s,由于高占空比与下降时间的叠加作用,波形的等效能量最低点提升,即解调过程中无效电平的基准电压的增加,探测器的解调结果仍较为准确,当有效电

平的差值处于 A/D 转换后的可分辨范围内时,探测系统均可实现解调.

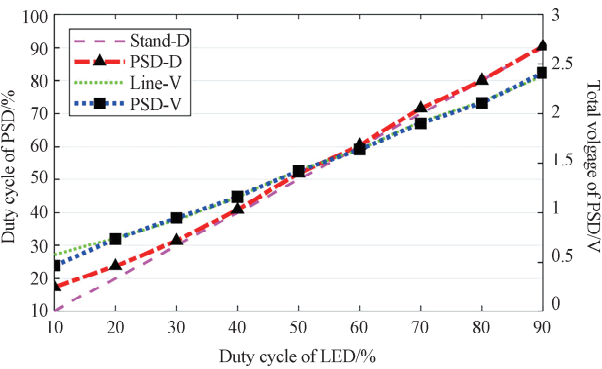


图 9 PSD_1 解调特性与调制占空比的关系
Fig. 9 Relationship between demodulation characteristics of PSD_1 and modulation duty cycle

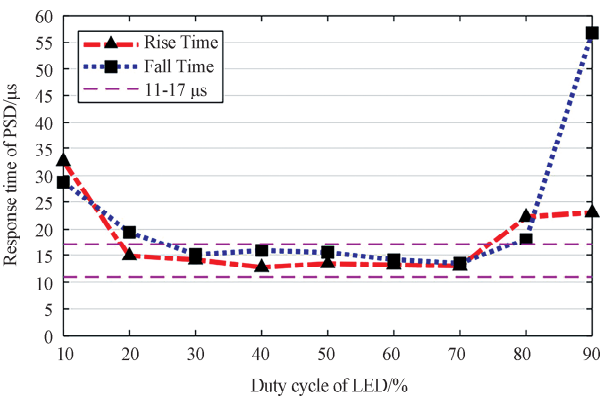


图 10 PSD₁ 信号的响应时间与调制占空比的关系
Fig. 10 Relationship between PSD₁ signal response time and modulation duty cycle

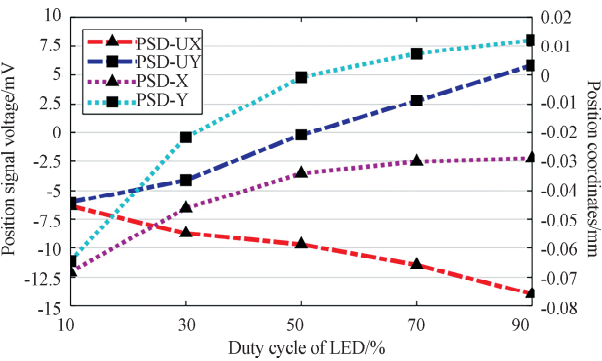
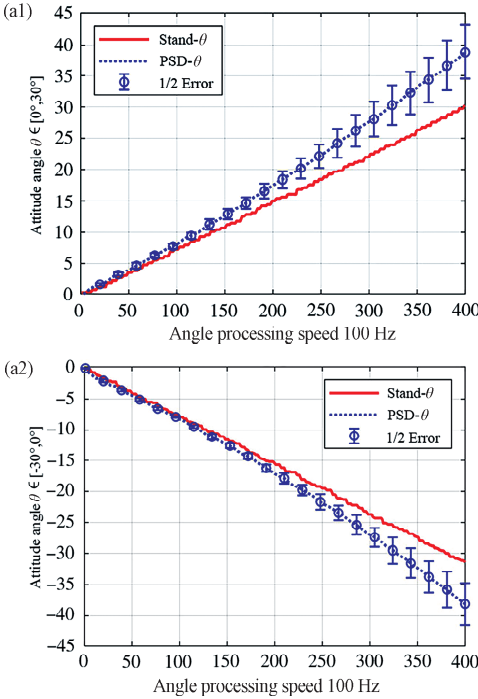
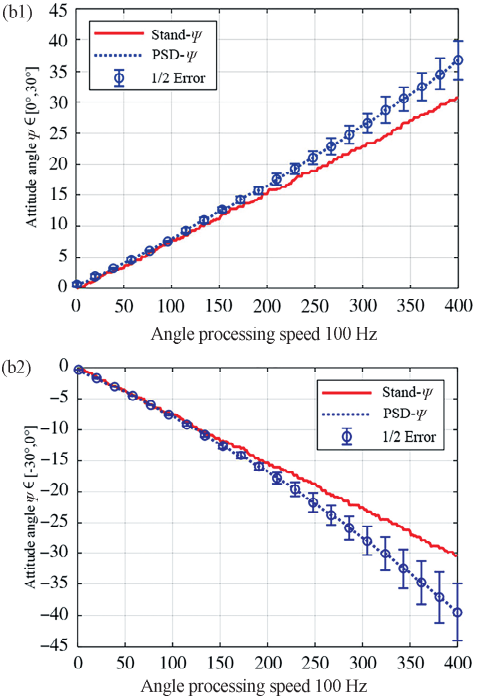


图 11 PSD₁ 的定位坐标与调制占空比的关系
Fig. 11 Relationship between PSD₁ position coordinates and modulation duty cycle



(a) 俯仰角变化
(a) Pitch angle change



(b) 偏航角变化
(b) Yaw angle change

图 13 合作光标靶的姿态探测
Fig. 13 Attitude detection of cooperative target

由于位姿探测系统的光源采用亮度与顺序联合调制方案,解调过程关注的是单亮度调制的平均值,即顺序调制中不同占空比对应 PSD 响应信号的平均电压值,根据位置信号的平均值可计算出定位坐标的变化情况,如图 11 所示.随着占空比的增加, X 和 Y 方向的坐标分子项电压均呈现线性增加的趋势.当占空比减小时,受探测器接收光强减弱的影响,定位误差在 $\pm 100\text{ }\mu\text{m}$ 左右.

6.2 合作光标靶的位姿探测

为了提供姿态探测的参考标准,搭建了图 12 中的合作目标姿态控制系统, λ 为光标靶的方向向量,定义的姿态角为:俯仰角 θ 、偏航角 ψ 和翻滚角 φ .配有三轴角度传感器的光标靶固定于两轴大扭矩数字舵机上,B 舵机控制 $\theta \in [-30^\circ, 30^\circ]$ 范围运动,A 舵机控制 $\psi \in [-30^\circ, 30^\circ]$ 范围运动.

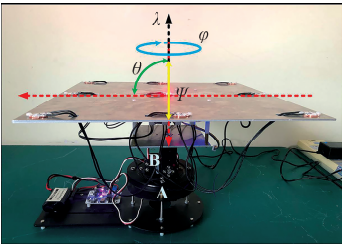


图 12 合作光标靶的姿态控制系统
Fig. 12 Attitude control system of cooperative cursor target

解算出光标靶俯仰角和偏航角的变化如图 13 所示,其中,(a1)、(a2)分别为为俯仰角 θ 在 $[0^\circ, 30^\circ]$ 和 $[-30^\circ, 0^\circ]$ 的角度变化,(b1)、(b2)分别为为偏航角 θ 在 $[0^\circ, 30^\circ]$ 和 $[-30^\circ, 0^\circ]$ 的角度变化趋势.从角度参考值 Stand 线性度可知,姿态控制系统的精度达到参考要求,且解算出姿态角的偏差均随角度的增大而增加,超过 15° 后呈现出明显的指数增加趋势,最大偏差在 10° 左右.

俯仰角和偏航角的 4 个方向角度解算的偏差值如图 14 所示,当方向角小于 15° 时,所有特征光点均在系统探测视场之内,且光强基本一致, θ 和 ψ 的平均偏差分别为 0.923° 和 0.563° ;方向角大于 15° 时,受限于光源发散角度的影响,PSD 相机探测到的不同特征光点的光强产生较大差异,即光斑的重心位置产生微小漂移,导致 θ 和 ψ 的平均偏差分别增加至 4.566° 和 4.106° .综上所述,搭建的双 PSD 合作光标靶位姿探测系统测量,在深度 1000 mm 处的空间 $160\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 内单光点定位误差为 7.296 mm,垂直 PSD 相机光轴方向姿态调整 $\pm 30^\circ$ 的测量误差为 2.541° ,能够稳定解算光标靶的空间位姿.

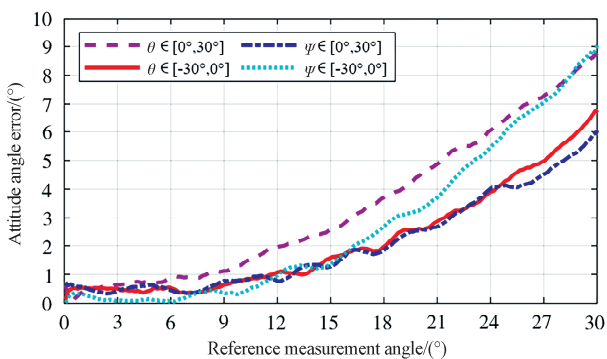


图 14 方向角度解算偏差值

Fig. 14 Directional angle solving deviation value

7 结 论

基于双 PSD 视觉的空间合作目标光标靶位姿探测系统借助光学手段和调制方式,相比于单目视觉探测系统能够快速获得空间位置深度信息的优势,且相较于 CCD 和 CMOS 传感器需要对图像进行特征提取过程,双 PSD 视觉还具有响应速度快,算法复杂度低的优势.在光源点亮的时序控制和亮度控制的基础上,利用光学透镜对发散角进行优化,使光源的能量重心空间分布更加集中,从而降低背景光的影响,有效提高了光源与背景光的对比

度.在调制光源下,对空间目标姿态角进行分析,能够稳定解算光标靶的空间位姿,对空间目标的位姿测量具有现实的研究意义.

参考文献:

- [1] Brandan M A M. Influence of spatial orientation and spatial visualization abilities on space teleoperation performance [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [2] Pan H, Huang J Y, Qin S Y. Relativepose estimation under monocular vision in rendezvous and docking [J]. Appl Mech Mater, 2013, 433: 799.
- [3] Peng J, Xu W, Yuan H. An efficient pose measurement method of a space non-cooperative target based on stereo vision [J]. IEEE Access, 2017, 5: 22344.
- [4] 劳达宝,张慧娟,熊芝,等.基于单目视觉的姿态自动测量方法[J].光子学报,2019,48:165.
- [5] Albert B, Manuel R. Obstacle detection using binocular stereo vision in trajectory planning for quadcopter navigation [J]. J Phys, 2018, 976: 012008.
- [6] 刘岩,雷柏平,杜俊峰,等.基于特征点识别的位姿测量数据处理方法研究[J].半导体光电,2021,42:568.
- [7] Liu L X. Lane offset survey for one-lane horizontal curvatures using binocular stereo vision measurementsystem [J]. J Surv Eng, 2021, 147: 04021017.
- [8] 熊平. CCD 与 CMOS 图像传感器特点比较[J]. 半导体光电,2004,25:1.
- [9] Zhan H, Zhang X, Cao L. Intrapixel effects of CCD and CMOS detectors [J]. J Instrum, 2017, 12: C04010.
- [10] 郑军,李文庆.基于双 PSD 的三维测量系统的标定方法[J].清华大学学报:自然科学版,2018,58:411.
- [11] Xin Z, Jinxue S, Li Y. Application of PSD in Space Point Position Measurement [J]. IEEE, 2007, 4: 538.
- [12] Zhang F, Liu J, Yang H M. Attitude measurement and simulation of two-dimensional position sensitive detector [J]. Optik, 2019, 184: 399.
- [13] 高丙朋,王维庆.基于分数阶混沌系统的风力机叶片微弱间歇故障幅值检测[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,42:438.
- [14] 秦兴,戴泓.基于 LED 光的室内定位系统的设计与分析[J].杭州电子科技大学学报:自然科学版,2017,37:6.
- [15] 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: 166.

[16] 高玉娥, 刘伟, 吕世猛, 等. 基于位置敏感探测器的六自由度精密位姿测量系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26: 2930.

[17] 黄战华, 李兴达, 蔡怀宇, 等. 基于 PSD 的强背景下光点位置探测技术研究[J]. 光电工程, 2012, 275: 89.

[18] 杨鲁新, 董文博. 空间载荷中利用调制光源去除 PSD 背景光影响的方法[J]. 载人航天, 2018, 24: 55.

[19] Zhang P C, Liu J, Yang H M. Position measure-

ment of laser center by using 2-D PSD and fixed-axis rotating device [J]. IEEE Access, 2019, 7: 140319.

[20] 唐九耀. 枕型二维位敏探测器的结构和性能研究[J]. 光子学报, 2001, 30: 735.

[21] 颜超超, 刘瑾, 杨海马, 等. ATP 跟瞄系统中位置敏感探测器测量精度研究[J]. 激光与红外, 2015, 45: 524.

[22] Huang P, Yang B, Wan X, *et al.* The measurement system of multi-point three-dimensional vibration based on binocular vision [J]. Opt Tech, 2018, 44: 448.

引用本文格式:

中 文: 程绍伟, 刘瑾, 张鹏程, 等. 基于 PSD 和光源调制的合作目标位姿探测方法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 043002.

英 文: Cheng S W, Liu Ji, Zhang P C, *et al.* Cooperative target pose detection method based on PSD and light source modulation [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 043002.