

# 大视场三维姿态角光学测量系统设计

张永胜, 刘海珂, 赫海涛, 张亚军

(中国核工业二三建设有限公司, 北京 101300)

**摘要:** 三维姿态角光学测量通过对物体表面的光学图像处理, 实现对物体的角度姿态测量; 为提高目标三维姿态角光学检测的准确性, 提出基于立体视觉的大视场三维姿态角光学测量系统设计方法; 利用双基准平行准直光源与姿态敏感器, 通过图像传感器、USB 接口芯片等部件实现分割光斑、质心定位等功能; 在 Linux 内核基础上设计信号收集、数据移植、串口通信、姿态角分析 4 个软件模块, 同时引入立体视觉算法探究靶标点和图像像点对应关联, 运用视差定理确立空间角度的三维坐标, 实现大视场三维姿态角测量; 实验结果证明: 所建系统姿态角标定误差小、时间同步性强, 测量累计时间低于 15 s, 具有较高的测量精度和鲁棒性, 为机械设备精密部件尺寸测量提供了一种有效的技术手段。

**关键词:** 立体视觉; 三维姿态角; 光学测量; 系统构建; 姿态敏感器; 视差定理

## 3D Attitude Angel Optical Measurement System with Large Field of View

ZHANG Yongsheng, LIU Haike, HE Haitao, ZHANG Yajun

(China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China)

**Abstract:** The optical measurement of 3D attitude angles is to achieve the measurement of object angular posture by processing object's surface optical image. To improve the accuracy of 3D attitude angle optical detection, an optical measurement system design based on stereoscopic vision for large field of view is proposed. By using a dual baseline parallel collimating light source and attitude sensor, the system achieves the functions of spot segmentation and centroid positioning through components such as the image sensor and USB interface chip. On the basis of the Linux kernel, the system designs four software modules including the signal collection, data porting, serial communication, and attitude angle analysis. Meanwhile, a stereoscopic vision algorithm is introduced to explore the correspondence between target points and image pixels, a parallax theorem is used to establish the tridimensional coordinates of spatial angles, and realize the large-field 3D attitude angle measurement. Experimental results show that the system has small attitude angle calibration errors, strong time synchronization, and a measurement cumulative time of less than 15 s, with a high measurement accuracy and robustness, providing an effective technical means for measuring the precision parts of mechanical equipment.

**Keywords:** stereo vision; 3D attitude angle; optical measurement; system construction; attitude sensor; parallax theorem

## 0 引言

三维姿态角光学测量是一种重要的非接触式测量方法, 其应用广泛, 比如, 三维姿态角光学测量可实现对机器人姿态信息的实时获取和准确控制, 提高机器人操作的精度和效率。另外, 该技术可应用于大型工程建设, 通过对建筑物姿态的实时监测, 减少测量成本和时间, 提高精度。同时, 在现代制造、导航、航空航天等领域的应用具有广泛的前景和意义<sup>[1-2]</sup>。只有快速精准地测量三维姿态角, 才能降低相关误差, 保证目标设备正常使用<sup>[3-4]</sup>。但目前光电检测技术对滚转角的精准测量较为困难, 为进一步提高测量的精准度和稳定性, 需要对其持续性研究。

张佳宝等人<sup>[5]</sup>提出基于激光投射和视觉的无人机姿态角测量方法, 利用全站仪数据得到标记点世界坐标系下三

维方位, 使用激光发射器向幕布射出激光, 采用激光点、标记点几何关联和旋转公式输出姿态角数据。但该方法对应用环境的要求比较严格, 测量精度稳定性较差。任怀伟等人<sup>[6]</sup>提出基于深度视觉原理的工作面液压支架支撑高度与顶梁姿态角测量方法, 运用 RGB-D 相机和深度视觉技术明确目标彩色、深度信息, 提取与匹配特征点并判断相邻时段相机位姿变化, 完成待测目标姿态角参数解算。但该方法设计复杂, 存在一定应用局限。

因此, 设计一种基于立体视觉的大视场三维姿态角光学测量系统。该系统通过双基准平行准直光源和姿态敏感器的配合使用, 实现了对目标物体姿态角的测量, 以提供更准确和稳定的姿态角测量结果, 增强了系统的可靠性; 通过引入立体视觉算法, 实现了靶标点和图像像点之间的关联, 并运用视差定理确定了空间角度的三维坐标, 提高

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-09-04。

基金项目: 中核集团全产业链卡脖子攻关项目(CNI23-W-KY-2022-13)。

作者简介: 张永胜(1972-), 男, 大学本科, 研究员。

引用格式: 张永胜, 刘海珂, 赫海涛, 等. 大视场三维姿态角光学测量系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 20-26.

了测量系统的精度和稳定性, 能够实现大视场下的三维姿态角测量, 为机械设备精密部件尺寸测量提供了一种有效的技术手段。

## 1 系统核心硬件设计

大视场三维姿态角光学测量系统硬件通过双基准平行准光源与姿态敏感器构成, 该设计相对于其他复杂的系统结构, 具有结构简单、调整方便等优点, 有助于降低系统的复杂度和维护成本, 提高系统的稳定性和可靠性。双基准平行准光源能够提供高度准直且稳定的光线, 保证了测量光束的平行性和稳定性, 对于确保测量结果的一致性和可靠性非常重要, 特别是在进行高精度姿态测量时。三维姿态角光学测量系统硬件如图 1 所示。

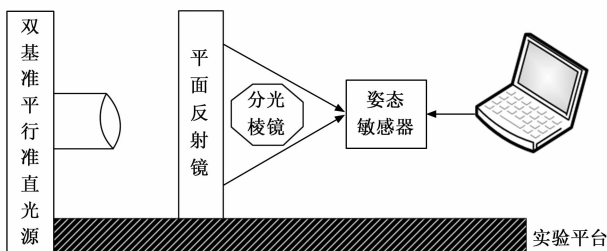


图 1 三维姿态角光学测量系统硬件

该系统硬件的工作原理是利用双基准平行准光源发出平行光线照射在待测物体表面, 反射回来的光线通过平面反射镜与分光棱镜组成像, 形成一个图像。姿态敏感器通常使用摄像头来获取物体的图像信息, 图像中包含物体在空间中的几何形状和纹理等视觉特征信息, 通过对该图像检测和处理, 可以得到物体的姿态信息, 包括 3 个方向上的旋转角度和平移距离。利用计算机对姿态信息处理和分析, 其具有强大的数据处理和计算能力, 能够快速高效地处理大量的图像和数据, 通过对获取的传感器姿态信息进行处理和分析, 可以提取出与物体姿态相关的特征和信息, 从而得到物体的三维姿态角度。由于光源的位置、亮度、发射角度等参数对于测量系统的精度有很大影响, 在整个过程中需要保证光源和姿态敏感器之间的位置不变, 并且测量环境的光照条件稳定, 并通过校准光源可以确保光线在测量过程中的稳定性和一致性, 减少光源引起的误差, 也可以帮助消除光线的非均匀性和漂移现象。因此, 为了提高测量精度, 还需要对光源和姿态敏感器校准和调整。

双基准平行准光源中涵盖氙灯光源与分光光路, 分光光路系统中具备分光棱镜和平面反射镜。分光棱镜主要用于将氙灯光源发出的白光分解成不同波长的光谱成分。通过使用分光棱镜, 可以将光谱分解成不同波长的成分, 选择所需的特定波长来照明目标物体, 以获得更精确和准确的姿态角测量结果; 而平面反射镜通常位于分光光路系统中的关键位置, 用于引导光线的传播和反射, 其可以将光线从光源引导到姿态敏感器处, 确保在测量姿态角过程

中光线的平行性和稳定性。光纤夹角与视场密切相关<sup>[7-8]</sup>, 夹角越大视场越小, 光路长短也随之改变, 因此也会对测量精度产生影响。视场较小可能会限制系统对目标物体的覆盖范围, 从而导致测量结果的不完整或不准确。同时, 光路长度较长可能会增加光线传播过程中的能量损失和干涉噪声, 进而影响测量精度。因此, 在系统硬件设计过程中需要综合考虑光纤夹角、视场大小和光路长度等因素, 以获得最佳的测量精度。确保大视场范围趋近  $30^{\circ} \times 30^{\circ}$  基础上, 让搭建的光路为最短, 两束光纤的最优夹角是  $10^{\circ}$ , 平面反射镜和分光棱镜的间距是 8.8 cm, 分光棱镜和姿态敏感器的间距是 110 cm。直接穿透分光棱镜的光束强度高, 经过分光棱镜与平面反射镜照射的光束强度偏弱, 划分两束光线构成的光斑<sup>[9]</sup>。

姿态敏感器由光学成像系统、硬件电路组成。光学成像系统的作用是将目标物体的姿态信息转化为数字信号。通过使用光学元件, 可以实现对目标物体的成像和影像采集。通过获取姿态敏感器所需的图像, 提供对目标物体姿态变化的可见信息; 硬件电路用来处理和分析由光学成像系统提供的姿态信息。姿态敏感器通常配备了专门的电路板和芯片, 用于进行图像信号的处理、数据采集和姿态计算, 从而提取出物体的姿态信息。光学成像系统为一个针孔光阑<sup>[10]</sup>, 其优点为可以控制光线的传播方向和散焦范围, 从而扩大了成像系统对目标物体的深度范围, 通过调整针孔尺寸和位置, 可以实现不同深度区域的清晰成像, 提高成像系统的可视深度范围。利用光学系统的模型构建与数值模拟获得光阑孔径、针孔间距、焦距等参数, 拟定焦距大小是 16.3 mm, 让三维姿态角测量视场达到  $20.4^{\circ} \times 20.4^{\circ}$ , 硬件电路结构如图 2 所示。

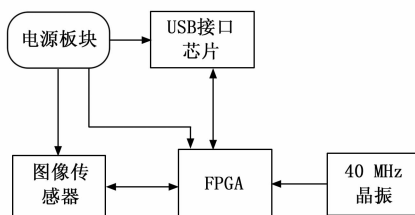


图 2 姿态敏感器硬件电路结构示意图

将单板架构作为姿态敏感器硬件电路设计理念, 通过采用单板架构, 各种硬件组件之间的连接和通信更加简便和灵活。将 40 MHz 的晶振输入至现场可编程逻辑门阵列 (FPGA, field programmable gate array) 中, 其可以实现可编程的逻辑功能, 在测量系统内部对图像信号进行处理和算法计算; 图像传感器负责图像采集; USB 接口芯片提供与外部设备的通信接口, 完成对目标物体的成像和影像采集。

FPGA 为全局系统的主控芯片, 其在执行复杂的算法和逻辑任务方面具有卓越的性能。同时, 由于大视场三维姿态角光学测量系统需要在多个功能模块之间进行高速数据处理, 并且要求采集、分析和传输的过程中尽可能降低功耗, 而 FPGA 的功耗通常较低, 可以确保持续稳定的工

作时间和效果,其还可实现多个功能,如图像传感器驱动成像、分割光斑、质心定位等。

图像传感器具备时序逻辑分析、快门模式、多斜率积分与降采样等功能。在大视场三维姿态角光学测量系统中,时序逻辑分析功能可以用来识别光斑移动的速度和方向,捕捉目标物体的运动轨迹,并从中提取姿态信息,能够实时监测和测量目标物体的动态姿态;快门模式功能通过控制快门的开启和关闭时间,可以有效地控制图像的曝光时间和采样窗口,获得清晰、稳定的图像,以减少拍摄过程中的运动模糊和光斑扩散现象,提高成像的质量和准确性;多斜率积分功能允许在不同的光强条件下采用不同的积分时间,确保成像系统可以适应不同亮度条件,并提供准确的光斑信息用于姿态测量;降采样功能可以减少图像数据的量,降低系统的数据处理需求和存储成本,提高系统的实时性和效率。

USB 接口芯片可以实现与上位机的软件交互和控制,实现应用程序和图像数据之间的连接,并利用芯片将数据传输到上位机,从而实现对目标物体的成像和影像采集。

## 2 系统软件设计

系统软件通过信号收集、数据移植、串口通信、与姿态角分析 4 个板块构成。信号采集使用 A/D 转换器来实现,利用串口达到数据通信目标;计算平台软件为 Linux 内核操作系统,立体视觉定位技术同样在 Linux 系统完成。系统软件框架结构如图 3 所示。

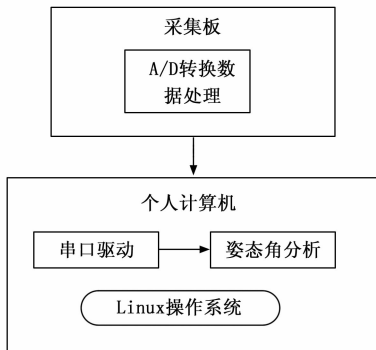


图 3 系统软件框架结构

### 2.1 信号采集板块

信号采集板块的核心是通过 A/D 转换处理信息<sup>[11]</sup>,依照 A/D 转换时序图,描述转换通道内部操作过程,发送 8 位控制指令,同时消除剩余的无效数据。伪代码如下:

```
while True:
    # 读取传感器数据
    signal = read_sensor()
    # 处理传感器数据
    processed_signal = process_signal(signal)
    # 存储数据
    save_data(processed_signal)
    # 延迟一段时间再进行下一次采集
```

```
delay(time_interval)
```

```
...
```

其中:‘read\_sensor ()’函数用于读取传感器数据,‘process\_signal (signal)’函数用于对采集的信号进行处理,‘save\_data (processed\_signal)’函数则用于存储处理后的数据。在信号采集过程中,一般需要设置采集时间间隔‘time\_interval’,以控制采集速率。

### 2.2 嵌入式的数据移植

为提升三维姿态角光学测量系统检测效率,将 Linux 作为实时操作系统,将其内核转移至计算机板上。转移过程需要注意如下几点:

1) 晶振频率匹配。改变内核晶振频率,让其内振频率和真实晶振频率相符<sup>[12]</sup>。

2) u-boot 和内核时钟不匹配。譬如 u-boot 将时钟设定成 205 MHz,内核启动时采用的是 203 MHz,这时就要调整 u-boot 让二者时钟保持相等。

3) 参数配准。u-boot 参数在传递给内核时,倘若和内核参数不符,内核将无法保持运转,因此要调配好参数。

### 2.3 串口驱动程序设计

利用串口驱动板块将 A/D 转换计算后的姿态角数据输送给计算机软件平台板块。把串口作为主机设定程序,PC 机作为从机接收程序<sup>[13-15]</sup>。为了更精确地完成通信任务,创建一个通信协议,内容为:主机首先传输信号“HH”,从机接收信号后回复“KK”,主机收到回复后开始传送姿态角信息,每次发送均验证信息;从机接收信息后将其保存在数据缓冲区,每接收一次信息就对比一次验证信息,若主、从机验证信息相同,证明信息发送成功,反之主机重新传输信息。

串口参数包含串口号挑选、波特率设定、起始位个数等。设定串口工作处于模式 1 阶段,且波特率为可调状态。如果在 Linux 操作系统中已经完成串口驱动,仅需对每个串口采取恰当调配,就能完成串口通信。驱动程序伪代码如下:

```
# 初始化串口
ser = serial.Serial(port="COM1", baudrate=9600, timeout=0.5)
# 打开串口
ser.open()
while True:
    # 读取串口数据
    data = ser.read(size=1024)
    # 处理串口数据
    processed_data = process_data(data)
    # 输出处理后的数据
    print(processed_data)
    # 关闭串口
    ser.close()
```

其中,‘serial.Serial ()’函数用于初始化串口,‘ser.open ()’函数用于打开串口。在循环中,使用‘ser.read

(size=1 024)' 函数读取最多 1 024 个字节的串口数据。接下来, 使用 'process\_data (data)' 函数对数据进行处理后, 再输出到控制台。最后, 利用 'ser.close ()' 函数关闭串口。

## 2.4 姿态角测试的软件设计

姿态角分析是实现三维姿态角测量必不可少的重要板块, 本文在板块中引入立体视觉算法。

为了更精确地测量待检测目标三维姿态角, 获得人工标记在三维空间坐标值<sup>[16]</sup>, 运用立体视觉技术明确目标三维数据, 实现大视场相机标定。在相机成像和三维重构中, 需要使用到 3 个坐标系: 图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系, 并且需要了解图像点与空间点之间的映射关联, 并通过计算得到物体在 3 个方向上的旋转角度和平移距离, 从而得到物体的三维姿态角。具体步骤如下:

1) 设定图像坐标系原点处于  $(a_0, b_0)$  像素点,  $(x, y)$  是图像坐标系内的某个坐标, 二者之间的三维耦合关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k & 0 & a_0 \\ 0 & 1/l & b_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $k$  为横坐标  $a_0$  像素点物理尺寸 (mm);  $l$  为纵坐标  $b_0$  像素点物理尺寸 (mm)。

对相机立体标定, 得到图像坐标系到相机坐标系的变换矩阵。相机坐标系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  的原点是图像的中心点, 为相机镜头光心,  $X_c, Y_c$  轴与图像坐标系的  $x, y$  轴平行,  $Z_c$  轴和图像平面直角呈垂直关系, 则图像坐标系与相机坐标系  $Z_c$  轴的内在关联为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f/k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $f$  为相机焦距 (mm)。

2) 世界坐标系  $(X_w, Y_w, Z_w)$  是把空间中的任意点拟作空间坐标系原点, 对该点进行三维重构, 得到一组三维坐标系, 该坐标系与相机坐标系的关系为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{D}_{3 \times 1} \\ f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{R}_{3 \times 3}$  为旋转矩阵;  $\mathbf{D}_{3 \times 1}$  为平移矩阵。

一般状态下成像模型遵照线性针孔成像原理, 镜头畸变是由于光线通过透镜时产生的物理现象导致的, 当相机镜头产生光学畸变时, 导致立体视觉下图像处理产生偏差, 必须矫正光学畸变<sup>[17]</sup>。通过将图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系之间相互转换后, 才能进行精准的镜头畸变校正。透镜畸变可划分为两种: 切向畸变与径向畸变。径向畸变是一种从光心出发, 沿径向逐渐增加的对称畸变, 通常由于大角度、镜头加工等因素所致; 切向畸变是由于镜头组内的镜头轴线不一致形成的。分析畸变参数得到如下

定论: 切面畸变与摄像机内部参数的主点位具有一定内在关系, 径向畸变的一级、二级和三级畸变之间相关指数较高<sup>[18]</sup>。畸变矫正结果与畸变参数阶数密切相关, 通常设定矫正系数为二阶。由此, 将镜头畸变矫正模型记作:

$$\begin{cases} a_p = (1 + g_1 r^2 + g_2 r^4) a_d + p_2 (r^2 + 2a_0^2) + 2p_1 a_d b_d \\ b_p = (1 + g_1 r^2 + g_2 r^4) b_d + p_1 (r^2 + 2b_0^2) + 2p_2 a_d b_d \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $a_p$  为横坐标镜头畸变矫正结果 (mm);  $b_p$  为纵坐标镜头畸变矫正结果 (mm);  $a_d$  为真实图像横坐标 (mm);  $b_d$  为真实图像纵坐标 (mm);  $r$  为理想图像像素点参数;  $g_1, p_1$  分别为二阶径向与切向畸变指数;  $g_2, p_2$  分别为三阶径向与切向畸变指数。

3) 在立体视觉标定过程中, 要明确相机处于世界坐标系的方位、姿态、焦距等参数, 采用的工具是标定标靶, 将世界坐标系变换至图像坐标系, 创建靶点与图像像素点的相对关联, 计算相机内外参数。固定相机后, 空间点坐标的旋转角度矩阵与平移距离矢量均为相机外部参数, 将三维世界坐标到二维图像坐标的投影解析式记作:

$$\begin{bmatrix} a_p \\ b_p \\ 1 \end{bmatrix} = qU[\mathbf{G} | \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $q$  为比例指数;  $U$  为相机标定参数;  $\mathbf{G}$  为相机外参数矩阵;  $\mathbf{T}$  为相机内参数矩阵。

测量三维姿态角时, 无需匹配整个图像, 只要得到图像坐标编码, 并对其交汇即可。但在操作中, 因视觉遮挡或视场等因素, 导致部分编码标志仅能在一张图像上呈现而不能匹配<sup>[19-21]</sup>。所以, 当左右两个相机图像均可见时, 才被视为可交汇, 并剔除不交汇点。立体视差定理前提下, 让已实现标定的左右相机摄制相同场景的点  $S$ , 获得左相机图像  $I_1$  与右图像  $I_2$ , 探寻  $S$  点在图像  $I_1, I_2$  的相对像点  $s_1(a_1, b_1)$  与  $s_2(a_2, b_2)$ , 通过标定参数和两个图像点明确  $S$  点的空间三维坐标数据, 完成三维姿态角测量目标。计算公式为:

$$\begin{cases} x = \frac{a_p z x_l}{f_l I_1} \\ y = \frac{b_p z y_l}{f_l I_1} \\ z = \frac{f_l I_2 U(f_l t_x - x_l t_x)}{x_r r(x_l + y_l + f_l) - f_l r(x_l + y_l + f_l)} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $f_l, f_r$  为左右相机的焦距 (mm),  $x_l, y_l$  为空间点处于左相机像面的横、纵坐标,  $x_r, y_r$  为空间点处于右相机像面的横、纵坐标。通过计算两部相机内外参数, 实现大视场三维姿态角测量。

根据以上各个小节的模块设计过程, 绘制系统软件设计流程如图 4 所示。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验步骤与方法

1) 将 Blender 作为实验的仿真环境, 其是一种功能强

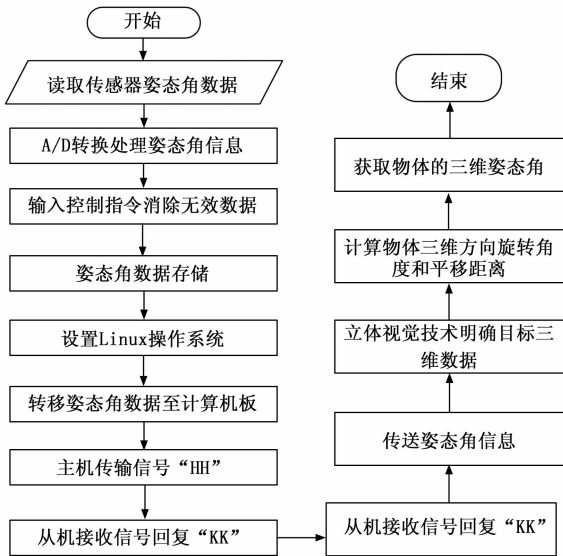


图 4 系统软件设计流程图

大的开源三维计算机图形软件，可以用于创建和渲染虚拟场景和物体。借助 Blender，可以构建虚拟的三维场景和运动模型，对大视场三维姿态角光学测量系统进行仿真测试。在进行实验时，要注意控制实验环境的光线和温度等因素，有助于减少干扰和误差，提高实验结果的准确性。选取光源的光强为 50~200 lm、光斑大小调整为 2~20 mm 的实验光学成像平台如图 5 所示。

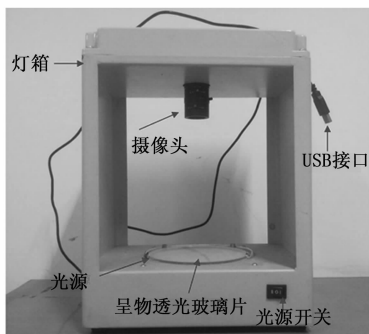


图 5 实验光学成像平台

由于立方体的棱角和面纹理可以提供清晰的特征点和特征线，有利于进行图像处理和立体视觉算法的特征提取和匹配，以测试系统对于明显特征的检测、跟踪和定位能力。并且其表面通常较为平整，对光线的反射、折射和散射影响较小，有助于减少测量误差并提高测量精度。

2) 选择一个立方体模型作为测量对象，该模型具有简单的几何形状和尺寸，表面具有明显的棱角和面纹理，且对光线的反射、折射和散射影响较小。将立方体模型放置在光学成像平台中心位置，并通过高精度转台控制其旋转角度和平移距离，以获得不同姿态角度下的图像数据。利用所建系统对立方体模型像，并通过图像处理和计算得到其在 3 个方向上的旋转角度和平移距离，从而得到立方体

模型的三维姿态角度。

3) 在 Blender 软件中搭建实验光学成像平台仿真架构，并将立方体模型作为输入，将其放置于透光玻璃片上，将 USB 插口与姿态敏感器硬件的电源板块、FPGA 相连，打开光源开关，该架构的光源即为实验设计硬件部分的双基准平行准直光源，通过反射原理，利用摄像头采集物体姿态的图像信息，最后利用计算机对该信息处理，以获取物体姿态相关信息，由此测量物体的姿态角。

4) 将本文方法作为实验组，选取文献 [5] 激光投射法和文献 [6] 深度视觉法作为对照组，对比 3 种方法的角度测量结果，分别选取标定误差、滚转角、俯仰角和偏航角作为实验重要的评价参数，验证方法的测量准确性。

5) 将实验结果绘制成图，观察结果，对数据进行统计和分析。

### 3.2 实验分析

为了验证三维成像性能优劣，设定所建系统姿态敏感器焦距是 16.1 mm，视场范围是  $20.2^\circ \times 20.2^\circ$ ，把姿态敏感器安置于高精度转台，推算弱光线成像光斑质心坐标。在  $\pm 5^\circ \times \pm 5^\circ$  视场范围内，每间隔  $0.2^\circ$  就采集一组数据，平均划分采集的光斑质心数据，一组用来标定姿态敏感器内外参数，另一组为测试数据，用于推算光斑标定误差，并与激光投射法和深度视觉法的测量结果进行对比，成像光斑角度测量结果对比如图 6 所示。

根据图 6 的实验结果可知，通过与激光投射法和深度视觉法的对比，在弱光线成像条件下，所提方法的实际所测中心与标准模版中心点相重合，光斑标定误差较小，说明在测量光斑质心方面具有优越性能，测量精度和稳定性均更好，从而能够提供更快速、实时的光斑质心坐标推算结果，获取的三维姿态角度更加精准。

将实验环境设置为同一状态，为了进一步验证所提方法的精准度，选取标定误差作为实验指标，标定误差可以用来评估方法的测量准确性，通过比较 X 轴与 Y 轴的光斑质心坐标与真实标定值之间的差异，了解方法的测量误差大小。标定误差越小表示方法测量准确性更高。弱光线成像光斑标定误差如图 7 所示。

观察图 6~7 看出，所提方法在 X、Y 轴方向的标定误差均为最小的，证明其在同一实验状态下可捕捉到更多三维物体信息，提升了测量工作质量。而对方方法在现场和统计结果中，均出现较大角度测量误差。由此可知所提方法相对于其他方法具有更小的误差，可以证明所提方法的鲁棒性较高，能够更稳定地应对噪声、干扰和其他不确定性因素，从而提供更准确的测量结果。

在三维姿态角测量精度实验中，引入一定的白噪声，探讨干扰环境下 3 种方法姿态角光学测量的整体性能。由于真实环境中一定存在各种干扰和噪声，如光线变化、震动、尘埃等。通过引入适量的白噪声，可以更好地模拟这些干扰环境，使实验更贴近实际应用场景。滚转角、俯仰角和偏航角是描述物体在三维空间中的旋转姿态的重要参

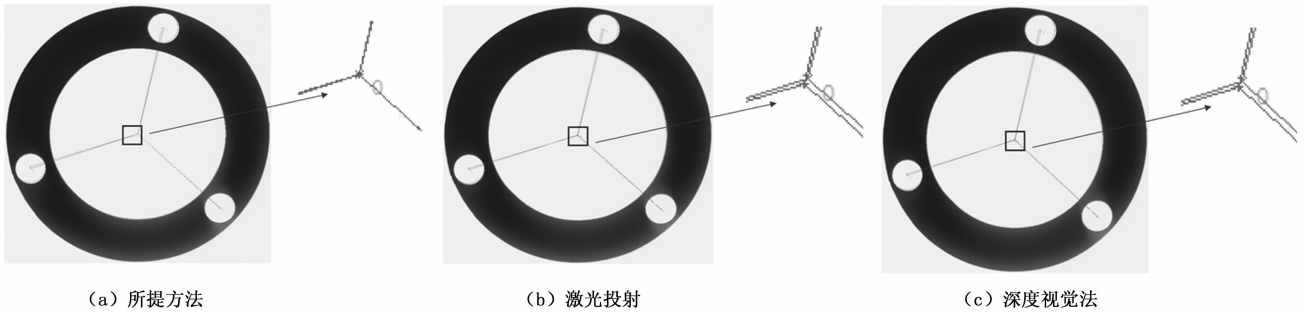
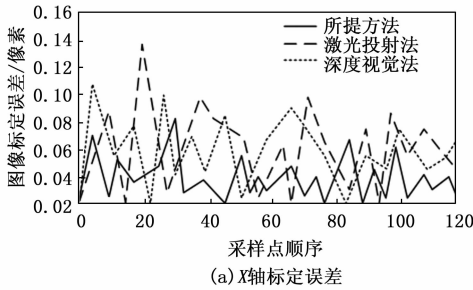
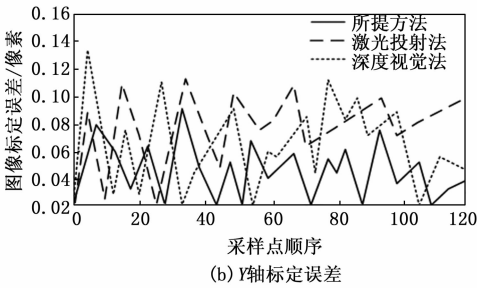


图 6 角度测量结果对比



(a) X轴标定误差



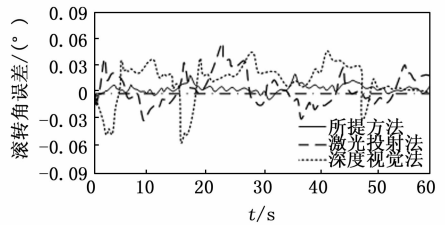
(b) Y轴标定误差

图 7 弱光线成像光斑标定误差

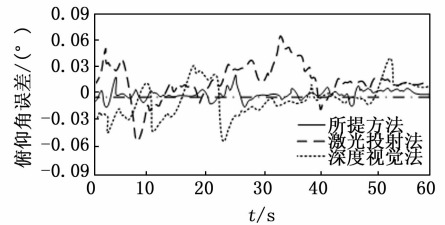
数, 通过分析其光学测量误差, 可以评估姿态角测量精度。精确测量姿态角是该实验的目标, 白噪声对于姿态角光学测量会引入随机误差, 通过分析测量数据可以了解 3 种方法在干扰环境下的测量精度。把高精度转台主轴设定成竖直状态, 让待测试轴和转台主轴平行, 设置转台角速率与转动方向, 角速率稳定后, 输出 3 种方法下三维姿态角测量误差数据, 结果如图 8 所示。

从图 8 看到, 两个文献方法的测量误差大于所提方法, 证明所提方法具备优秀的抗干扰能力, 在不同时段下可依照噪声的多少自主调节姿态角测量模式, 把误差控制在最低。这是由于所提方法使用立体视觉技术确立目标物体的空间三维坐标, 极大提高了测量系统准确性。通过根据不同时段噪声的多少调节姿态角测量模式, 可以针对不同环境条件选择合适的测量模式, 以最小化噪声对测量结果的影响, 并进一步提高姿态角测量的精度, 由此说明所提方法可以在复杂的实际环境中实现更准确和稳定的姿态角测量。

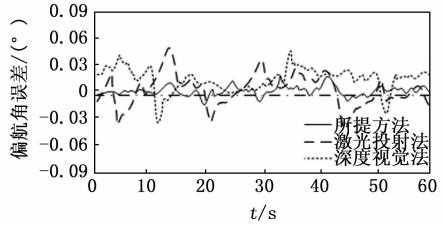
在实际应用中, 物体的姿态变化可能非常快, 特别是在高速运动或快速动作的情况下。如果姿态角测量方法处



(a) 滚转角光学测量误差



(b) 俯仰角光学测量误差



(c) 偏航角光学测量误差

图 8 三维姿态角测量误差对比

理和提供结果的速度过慢, 就会导致信息滞后, 从而影响实时控制和决策的准确性。因此, 为展现方法数据处理能力, 将检测时效性作为三维姿态角测量的重要评估指标, 检测时效性越高意味着方法能够在实时操作要求下快速且准确地提供姿态角信息。设定共进行光学测量 80 次, 取每 10 次测量累计时间为一个实验周期进行对比, 测量累计时间对比结果如图 9 所示。

在图 9 中看出, 在每个测量周期中, 所提方法的测量累计时间低于 15 s, 而另外两种方法的测量累计时间则在 15~30 s 之间, 通过对比可知, 所提方法的测量时间最短, 证明其系统内每个软硬件都能在第一时间进行数据处理分析, 以最快速度呈现测量结果, 该实验结果对于实时反馈和控制非常重要。例如, 在无人驾驶车辆中, 快速获取并准确反映车辆的姿态角信息可以实时调整车辆的方向、加

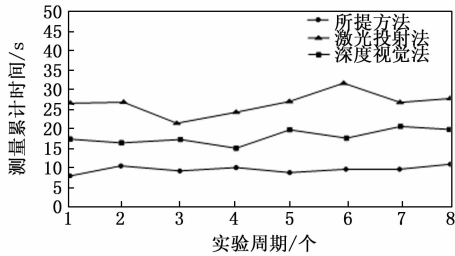


图 9 测量累计时间对比

速度等参数, 确保车辆的稳定性和安全性。

#### 4 结束语

根据视差定理创建一个基于立体视觉的大视场三维姿态角光学测量系统, 用于精准获得姿态角数值。分析影响系统测量精度的主要因素, 采用不同的软硬件设备搭建系统架构, 通过立体视觉算法增强三维姿态角定位能力, 提升测量系统整体检测精度。实验结果表明, 所建系统测量误差小、及时性强的操作优势, 最大限度保证大视场范围下三维姿态角的有效测量。

#### 参考文献:

- [1] 胡浩, 魏斌, 梁晋, 等. 大视场远距离视觉测量系统的分步标定 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (4): 478-488.
- [2] 孙江, 曾亮, 焦少妮, 等. 球压试验压痕直径的视觉测量方法 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (5): 69-74.
- [3] 崔海华, 姜涛, 杜坤鹏, 等. 基于深度学习位姿估计的多视结构光三维成像方法 [J]. 光学学报, 2021, 41 (17): 72-81.
- [4] 刘泉新, 林世治, 吴光强, 等. 大视场光电测量系统广角相机标定方法研究 [J]. 光学技术, 2022, 48 (4): 452-458.
- [5] 张佳宝, 傅骁, 段发阶, 等. 基于激光投射和视觉的无人机姿态角测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (8): 397-405.
- [6] 任怀伟, 李帅帅, 赵国瑞, 等. 基于深度视觉原理的工作面液压支架支撑高度与顶梁姿态角测量方法研究 [J]. 采矿与安全

工程学报, 2022, 39 (1): 72-81.

- [7] 刘宇承, 王春泽, 宋有建, 等. 适用于高精度激光测距的光学系统设计 [J]. 应用光学, 2022, 43 (2): 191-197.
- [8] 杨慧敏, 张春梅. 基于数据挖掘的高精度脉冲激光测距系统 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (11): 52-57.
- [9] 杨旭, 李艳红, 张远健, 等. 基于自由曲面双波段离轴三反光学系统的优化设计 [J]. 红外技术, 2022, 44 (11): 1195-1202.
- [10] 董伟东, 郭浩, 罗海波, 等. 主动铰接型盾构机自动导向系统测量与姿态精密解算方法 [J]. 测绘通报, 2022 (1): 149-154.
- [11] 王海霞, 李凯勇, 陈佳舟. 基于机器学习的高速线阵 CCD 图像数据采集系统 [J]. 现代电子技术, 2022, 45 (10): 160-164.
- [12] 黄克亚. 基于 FSMC 总线的嵌入式系统多显示终端驱动设计 [J]. 液晶与显示, 2022, 37 (6): 718-725.
- [13] 梁哲, 周召发, 徐志浩, 等. 基于多区间参数修正的角速率姿态算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (5): 1636-1643.
- [14] 孟卫锋, 李静, 史永杰, 等. 基于跟踪微分器的载体角速率算法研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (1): 228-232.
- [15] 齐乐, 袁宝玺, 郭凤娟, 等. 固定翼无人机着陆姿态角测量算法研究 [J]. 导航定位学报, 2022, 10 (4): 56-64.
- [16] 孙令翠, 冯辉宗. 基于编码量化参数调节的图像清晰化处理 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (4): 180-184.
- [17] 汤辉, 晋严尊, 刘赛华. 导弹舱段对接姿态偏差测量方法研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (5): 24-27.
- [18] 陈超, 李小平, 雷杰杰. 引线滚转姿态测量抗电机干扰补偿方法 [J]. 探测与控制学报, 2022, 44 (5): 10-13.
- [19] 邵斌, 郭利强, 贺杰, 等. 矿用脉冲激光测距系统研究 [J]. 自动化仪表, 2023, 44 (2): 17-20.
- [20] 杨倩, 冯佳. 基于嵌入式数控的远距离脉冲激光测距研究 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (7): 41-44.
- [21] 杜明鑫, 闫钰锋, 张燃, 等. 基于透镜阵列的三维姿态角度测量 [J]. 中国光学, 2022, 15 (1): 45-55.

(上接第 13 页)

- [12] 黄娟, 李文臻. 基于 VISA 及 IVI 技术的仪器仪表自动测试系统软件设计 [J]. 电子质量, 2012 (5): 12-15.
- [13] 蒋冬婷. 基于 VISA 技术与 LXI 总线的测试系统设计 [J]. 河南科技, 2016, 2: 35-36.
- [14] 杜建礼, 秦固平, 李振星. 大数据技术在频谱监测中的应用研究 [J]. China Radio, 2018, 10: 52-53.
- [15] 张平, 刘献杰, 李佳. 基于大数据架构的军民融合频谱综合利用分析 [J]. 无线电工程, 2018 (5): 419-423.
- [16] 张辉, 陈少刚, 谭乐. 数据挖掘技术在频谱监测数据分析中的应用 [J]. 中国科技信息, 2014 (22): 135-136.
- [17] 满方微. 基于数据挖掘的无线电频谱预测及应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

- [18] 王丽娜, 王兵. 卫星通信系统 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [19] ETSI EN 302 307-2 V1.1.1 (2014-10). Digital video broadcasting (DVB), second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications [S]. Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X).
- [20] ETSI T R. 101 545-4 V1.1.1 (2014-04) Digital video broadcasting (DVB); second generation DVB. Interactive satellite system (DVB-RCS2) [S]. Part 4: Guidelines for Implementation and Use of EN 301 545, 2.
- [21] 孙亚飞, 陈仁文, 周勇, 等. 测试仪器发展概述 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (5): 480-484.