

基于相关双采样探测的非连续扫描方法研究

侯茂盛^{1*}, 吴坤¹, 张宏韬¹, 顾崇可², 段洁¹¹长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;²华东师范大学物理与电子学院, 上海 200241

摘要 为解决激光扫描投影系统标定过程中易受环境光干扰、合作目标扫描时间长等问题, 首先研究了应用于激光扫描投影合作目标定位的相关双采样探测方法, 设计了适用于激光扫描投影仪的探测模块, 经实验验证, 设计的相关双采样探测模块在输入信号干扰比为 -29.5 dB 时仍能稳定地检测出激光光斑是否落在合作目标的高反射区。然后, 针对相关双采样探测的特点, 设计了一种基于二分原理的非连续扫描方法, 以实现合作目标中心位置的快速提取。最后, 使用此方法与栅矩形扫描方法对投影距离为 3000 mm 处的三个合作目标进行扫描探测和中心位置提取, 实验结果表明, 栅矩形扫描方式需获取 10000 个扫描点, 而基于相关双采样探测的非连续扫描方法减少了 97.4% 的扫描点, 且中心定位偏差优于 0.06 mm。所研究的方法能够提高激光扫描投影系统合作目标探测过程的环境光自适应能力, 大幅减少扫描点的同时还能保证中心位置提取精度。

关键词 激光扫描投影; 相关双采样; 二分原理; 合作目标

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231371

1 引言

激光扫描投影系统通过光学扫描器件的高速转动控制激光束快速经过空间中一系列的指定点位, 由于人眼视觉暂留效应, 激光扫过的路径会形成完整画面从而辅助技术人员进行生产作业。为了精准地投影出待加工部位的轮廓, 需要在投影前标定投影系统与投影工作面的位置关系。标定过程首先需要在投影工作面的坐标系下设置多个位置已知的合作目标(简称靶标), 再获取多个靶标在投影系统坐标系下的坐标, 将它们代入坐标转换方程求解坐标转换参数即可完成标定^[1-2]。所以对靶标的扫描探测精度会直接影响激光扫描投影系统的投影精度。

现有对合作目标的定位方法通常需要对其进行连续扫描, 然后筛选出落在靶标边缘的点, 再通过圆心拟合得到合作目标中心位置。史铮雪等^[3]针对外摆线、栅矩形、太阳花线等扫描方法进行了实验, 结果表明, 使用太阳花形扫描路径能减少扫描时间并保证精度。但这三种方法都需要连续扫描然后筛选出边缘点, 而且为了降低环境光的干扰, 需要保留所有扫描点的数据来获取判断信号发生变化的阈值, 这一过程使得此类方法扫描时间长、所需算力多。

天津大学赵伟临^[4]研究了基于双目视觉的特征

点标定技术, 能够实现多点同时标定, 但是受限于双目相机的分辨率及其自身的定位精度, 在 70 mm 的摄影距离处, 标定点的定位误差为 0.1~0.4 mm, 而且未对室外等强光环境下的适应能力做进一步研究。

针对上述问题, 本文提出了一种基于相关双采样的靶标探测方法, 该方法能够在不同强度的环境光条件下, 实现对任意扫描探测点是否在靶标上的稳定识别, 基于该检测特性, 更进一步地设计了基于二分原理的非连续扫描方法, 实现了对合作目标中心的快速、高效、精准提取。

2 基本原理

2.1 激光扫描投影技术

激光扫描投影系统的结构如图 1 所示, 激光经扩束镜组、动态聚焦镜组投射到双轴振镜上, 振镜由主控控制可快速进行偏转, 使激光光束在投影面上扫描出预设的数字图像模型。

本文研究设计的相关双采样探测模块与非连续扫描方法可以实现对合作目标的快速准确定位。

2.2 相关双采样技术

相关双采样技术(CDS)最早应用于 CCD 的信号处理^[5-6], 其基本原理是在极短的时间内先后采集 CCD

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-01-26

基金项目: 吉林省技术创新引导项目(20230401101YY)、吉林省科技发展计划项目(20220201092GX)、吉林省教育厅重点项目(JJKH20230815KJ)

通信作者: *houmsh@cust.edu.cn

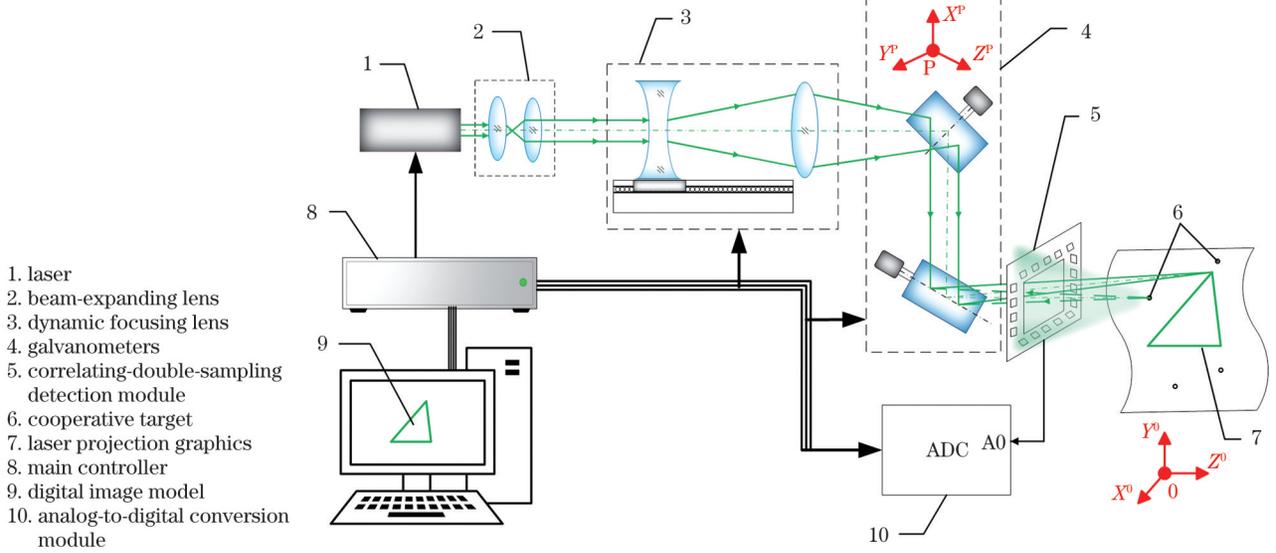


图 1 激光扫描投影系统

Fig. 1 Laser scanning projection system

的噪声和叠加噪声的信号,由于在较短的采样周期内噪声具有相关性^[7],将两次采样的值做差分即可得到有效信号的值。这一技术主要用于抑制 CCD 工作过程中的光子散粒噪声、暗电流噪声、输出放大器产生的复位噪声^[8-9]。

在本文的设计方案中,将激光调制为方波,在单个信号周期内,当激光信号的状态为 0 时,激光器关闭,可以采集到环境光强;当激光信号为 1 时,激光器开启,采集到的是环境光和合作目标反馈信号光的叠加光强。由于环境光的变化较为缓慢,在单个采样周期内的变化可忽略,因此通过将两次采样值进行差分,即可获得由合作目标反射的激光信号的强度,这一过程能够基本滤除环境光。

2.3 采样电路设计

根据光敏二极管的光照特性可知,在一定的辐射量范围内,其光生电流与入射光强度成正比,此特性可满足在不同强度的干扰光下定量检测输入光信号的变化量^[10]。因此本文采用硅光电二极管并使其工作在零偏置状态下。

为了滤除高频噪声,提高采样稳定性,研究使用积分电路实现电流/电压转换^[11]。图 2 为典型的电容反馈式跨导放大器 (CTIA),其基本电路由运算放大器、逻辑电平控制的开关和积分电容 C_1 、 C_2 、 C_3 构成。当 S_1 、 S_2 接入低电平时开关闭合。

S_2 闭合时对积分电容放电,即对采样电路复位; S_2 断开、 S_1 闭合时对电容充电,即积分过程; S_2 断开、 S_1 断

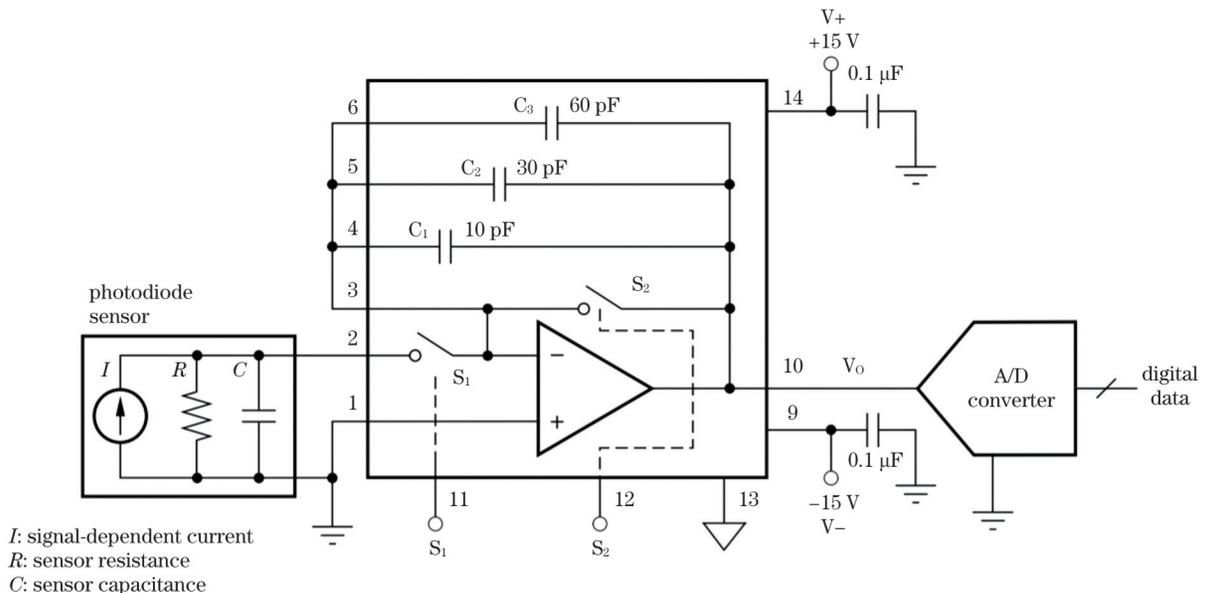


图 2 积分采样电路

Fig. 2 Integral sampling circuit

开时输出信号保持,此时输出端电压保持稳定,可使用模数转换器(ADC)进行采样。

积分采样过程中,光电探测器输出电流 I_m ,积分时间 T ,积分电容之和为 $\sum C_i$,则输出电压信号^[12]为

$$V_o = \left(\int_0^T I_m dt \right) / \left[\sum C_i + (\sum C_i + C_d) / A \right], \quad (1)$$

式中: C_d 为光电探测器电容与线路寄生电容总和; A 为运放开环增益。其输出信号的非线性度^[13]表示为

$$N_L = T / \left[R(C_d + (1 + A) \cdot \sum C_i) \right]. \quad (2)$$

式(2)表明,通过增大积分电容、减小积分时间、增大放大器增益这三个途径可增加探测器偏压的稳定性。但从式(1)可以看出,过大的积分电容会降低读出电路的灵敏度,所以应根据电路放大要求和输入电流大小设置合适的积分电容值。

在相关双采样系统中使用积分采样电路能够对信号的高、低电平进行积分平均^[14],其传递函数可表示为

$$|H(f)|^2 = 4 \sin^2(\pi f T) \cdot \sin^2(\pi f \Delta) / (\pi f T)^2, \quad (3)$$

式中: Δ 为相关双采样的周期; $\sin^2(\pi f \Delta)$ 能抑制积分电路复位过程中的热噪声(KTC)以及 $1/f$ 噪声; $4 \sin^2(\pi f T) / (\pi f T)^2$ 表明此系统可以实现低通滤波。

本文选用 BURR-BROWN 公司生产的精密开关积分集成电路芯片 IVC102 搭建采样电路。相较于传统跨阻放大器,积分放大器可以通过调整积分时间和积分电容大小来改变增益,例如使用 IVC102 内置 100 pF 电容对 10 nA 的输入电流进行积分,由式(1)可得,100 ms 后能够产生 10 V 的输出,对于相对缓变的信号,这样的检测方式能够提供相当于 1 G Ω 的有效跨阻,并且积分过程实现了对传感器、放大器、外部电源的输入噪声进行平均化处理,这从根本上提高了检测系统抗高频干扰的性能。

使用 TINA-TI 进行仿真,如图 3 所示,信号输入端对直流量进行阻隔,对电源加入 60 mV_{p-p}、130 kHz 的纹波模拟噪声。

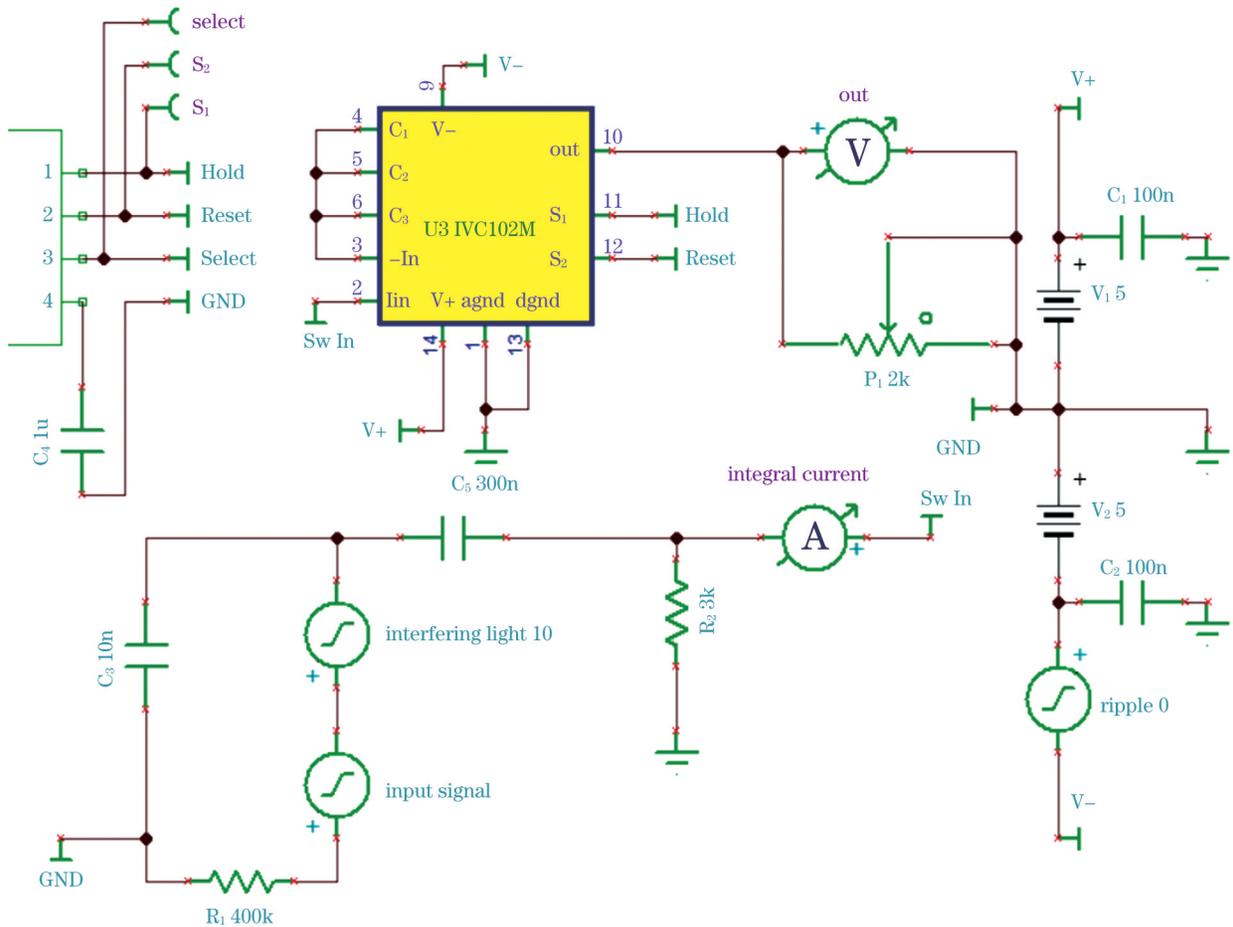


图 3 仿真电路

Fig. 3 Simulation circuit

当信号光约为环境光强度的 1/15 时,输出信号的差分值接近 200 mV。由图 4 可知,虽然受电源噪声的影响,输入端的积分电流波动较大,但积分过程使得最终的输出信号能够保持稳定,与式(3)的分析相符。

根据仿真结果搭建实物如图 5 所示,其中:1 为 STM32F4 系列开发板,用于输出时序信号以及对采样结果进行处理;2 为积分采样电路;3 为正负电源模块;4 为光敏二极管阵列;5 为发散的光源,用于模拟经

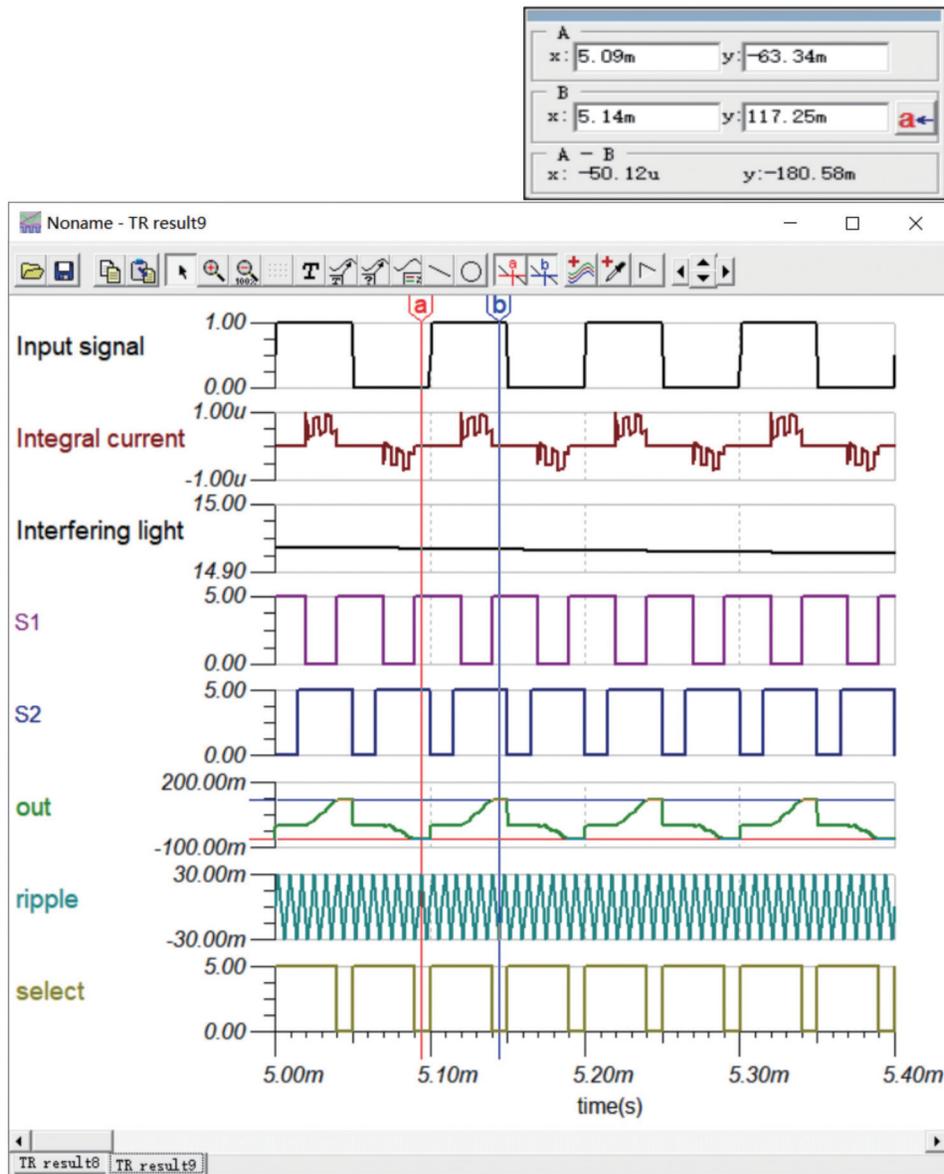


图 4 采样电路时序与输出仿真

Fig. 4 Timing and output simulation of sampling circuit

- 1: development board
- 2: integral sampling circuit
- 3: power supply modules
- 4: an array of photodiodes
- 5: divergent light source

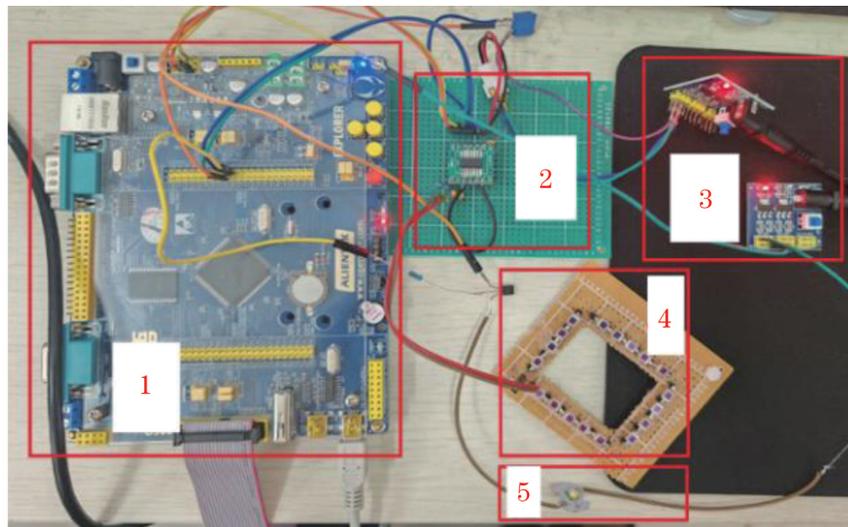


图 5 相关双采样模块实物

Fig. 5 Correlation double sampling detection prototype module

合作目标反射的激光信号。

使用 THORLABS 公司生产的 532 nm、5 mW 的激光器,模拟经光学系统衰减后投影仪出射的激光光束,照射位于 3 m 处的合作目标,光斑落在高反射区的反射光会使光敏二极管阵列的短路电流增加约 2 μA ,如图 6 所示。

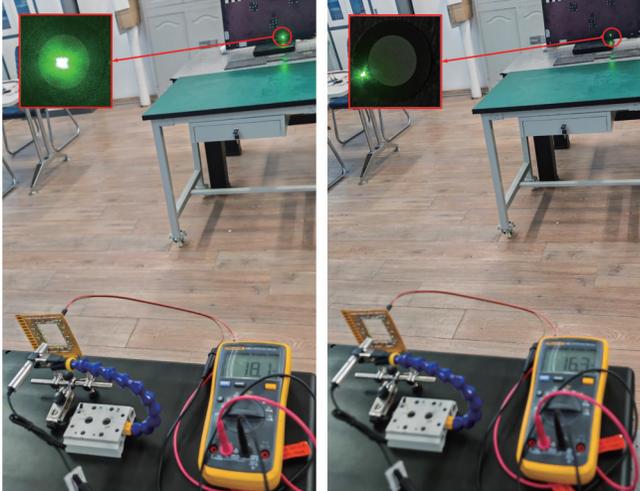


图 6 激光会聚在合作目标上

Fig. 6 Laser converges on the reflective target

对相关双采样模块在不同环境光强下的检测能力进行实验,使用艾菲特光电公司生产的 AFT-RL5428 环形光源,最大功率为 29 W,模拟不同强度的环境光,如图 7 所示。

环境光的光生电流为 20~1800 μA 时输出电压的差分值如表 1、2 所示。其在环境光光生电流为 1800 μA 时仍能够稳定地判断出激光光斑是否在合作目标的高反射区域内,此时光信号的信号干扰比 (SIR) 为 -29.5 dB。

为了进一步验证相关双采样探测方法的环境光适

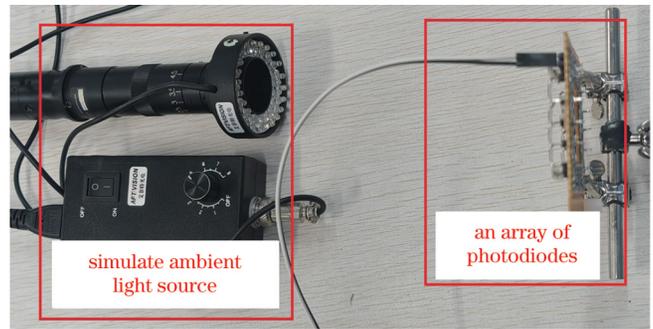


图 7 环境光模拟实验

Fig. 7 Ambient light simulation experiment

表 1 激光光斑在高反射区采样结果

Table 1 Sampling results of laser spot in high reflection area

| Measure | Ambient photocurrent / μA | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 20 | 100 | 200 | 600 | 1000 | 1400 | 1800 |
| Measure 1 / V | 0.23 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.21 |
| Measure 2 / V | 0.23 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.24 | 0.21 |
| Measure 3 / V | 0.25 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.24 | 0.21 |

表 2 激光光斑在低反射区采样结果

Table 2 Sampling results of laser spot in low reflection area

| Measure | Ambient photocurrent / μA | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 20 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 1400 | 1800 |
| Measure 1 / V | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| Measure 2 / V | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Measure 3 / V | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |

应能力,使用雪崩光电二极管探测模块对合作目标进行扫描,扫描过程中分别施加不同强度的环境光,环境光强的标定以相关双采样探测模块测试时的光生电流为准,分别为 100 μA 、600 μA 、1000 μA ,测量结果如图 8 所示,在环境光光生电流为 1000 μA 时,雪崩光电二极管接近饱和,因此难以适应强光环境。

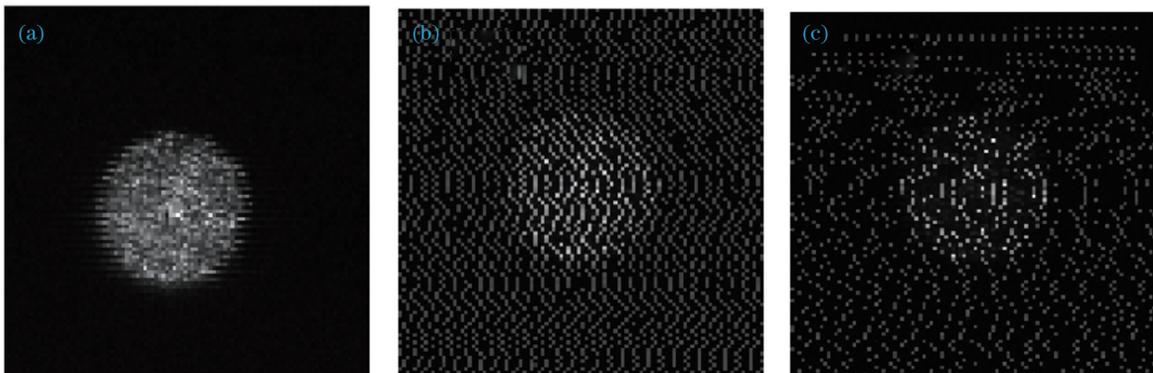


图 8 雪崩光电二极管在不同环境光强下的扫描结果。(a)环境光光生电流 100 μA ; (b)环境光光生电流 600 μA ; (c)环境光光生电流 1000 μA

Fig. 8 Scanning results of avalanche photodiodes under different ambient light intensities. (a) Ambient light generated current is 100 μA ; (b) ambient light generated current is 600 μA ; (c) ambient light generated current is 1000 μA

根据搭建的电路原型绘制相关双采样探测模块的印刷电路板,以便于安装在扫描投影仪的激光出射窗

口,如图 9 所示。

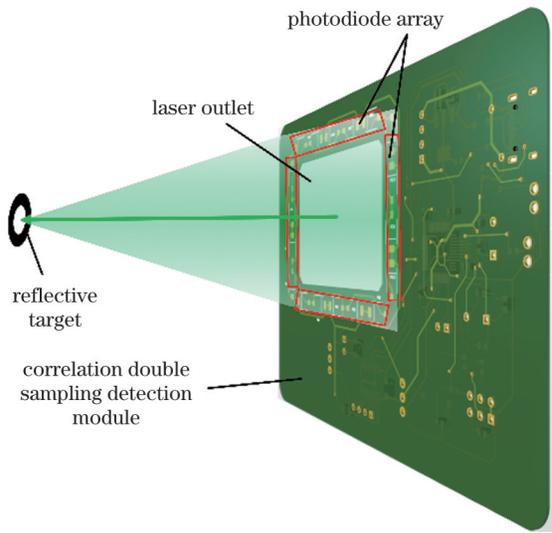


图 9 相关双采样探测模块

Fig. 9 Correlation double sampling detection module

3 非连续扫描方法

相关双采样探测能够直接判断出单个激光光斑是否在合作目标上,应用于合作目标的扫描中时可省去阈值计算过程。

靶标中心的定位需要获取位于靶标边缘的点来拟合圆心,这些点的获得依赖于特定的扫描路径,现有的扫描方式都属于连续扫描^[3],但它们存在扫描点数量多、数据点利用率低等问题,有鉴于此,本文研究了一种非连续扫描方法,其扫描流程及示意图如图 10 所示。先按点阵扫描,当扫描到第一个在靶标上的点即停止,此点记为 A;过 A 点以二分原理做纵向扫描,获得此扫描路径上处于靶标边缘的两点,取它们的中点 B;过 B 点以同样方式做横向扫描,获得横向的边缘点,取它们的中点 C 即为合作目标的中心。

点阵扫描时的点密度取决于合作目标的直径,即至少要有一个点落在靶标上,如图 11(a)所示,点间

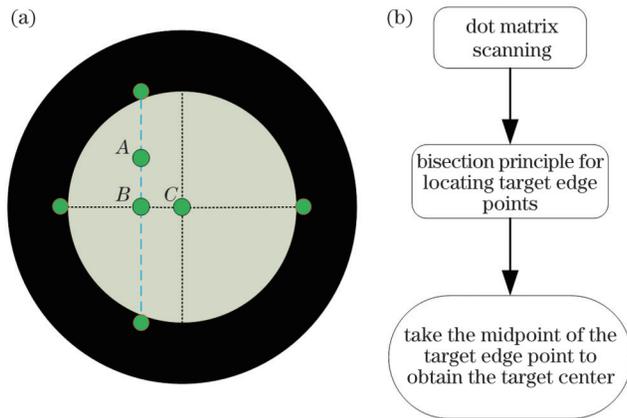


图 10 扫描过程。(a)扫描示意图;(b)扫描流程图

Fig. 10 Scanning process. (a) Scanning diagram; (b) scan flowchart

距为 d , 本文所采用的合作目标直径为 6 mm, 则 $d = \sqrt{2}r = 4.24$ mm。

点阵扫描点起始点需要手动调整,实际工况下,操作人员与投影工作面距离通常为 5 m,为便于操作,点阵的边长 L 需大于 $10d$ 。在实际扫描投影中,需要计算 d 所对应的振镜偏转角度,即点阵扫描步进角 α ,如图 11(b)所示,若振镜与投影面的距离为 D (通常 $2\text{ m} < D < 10\text{ m}$),此时 D 远大于 d ,则 α 近似为

$$\alpha = \arctan(d/D) \quad (4)$$

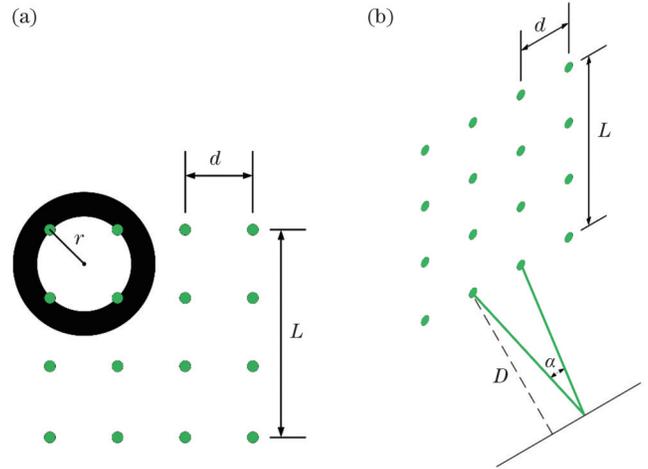


图 11 点阵扫描示意图。(a)主视角;(b)侧视角

Fig. 11 Schematic diagram of dot matrix scanning. (a) Main view angle; (b) side view angle

以二分原理进行非连续扫描能够快速、精准地定位靶标边缘,其扫描路径如图 12 所示。

首先从点 A 步进一段距离进行检测,直到检测到第一个不在靶上的点 A_1 ,则取 AA_1 的中点 A_2 ,此时靶

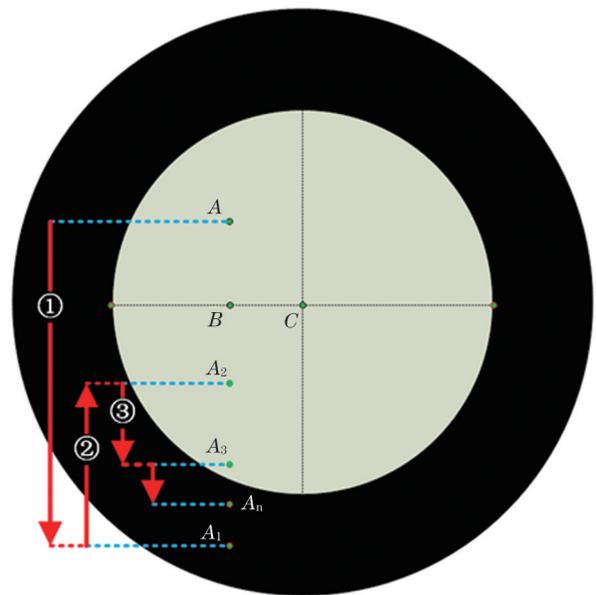


图 12 二分非连续扫描路径

Fig. 12 Discontinuous scanning path based on bisection principle

标的边缘在 A_1A_2 之间。再取 A_1A_2 的中点 A_3 进行检测, A_3 是否在靶上决定了靶标边缘在 A_1A_3 还是 A_2A_3 之间。以此类推继续取中点进行检测, 实现逐次逼近靶标边缘。其程序流程如图 13 所示。

设定首次步进角 $V_d = \arctan(d/D)$, 经过 n 次二分后达到振镜分辨率 ΔV , 则存在关系式

$$\arctan(d/D) \leq \Delta V \cdot 2^n. \quad (5)$$

具体实验中选用德国 RAYLASE 公司生产的 MINISCAN III-10 双轴振镜, 其分辨率为 $12 \mu\text{rad}$, 若投影距离为 $D=5000 \text{ mm}$, 由式 (5) 可得 $n \geq 6.14$, 即最多经 7 次二分可定位到靶标边缘。由此可得本方法的扫描点数量至多为 $4 \times 8 + 100 = 132$ 个。

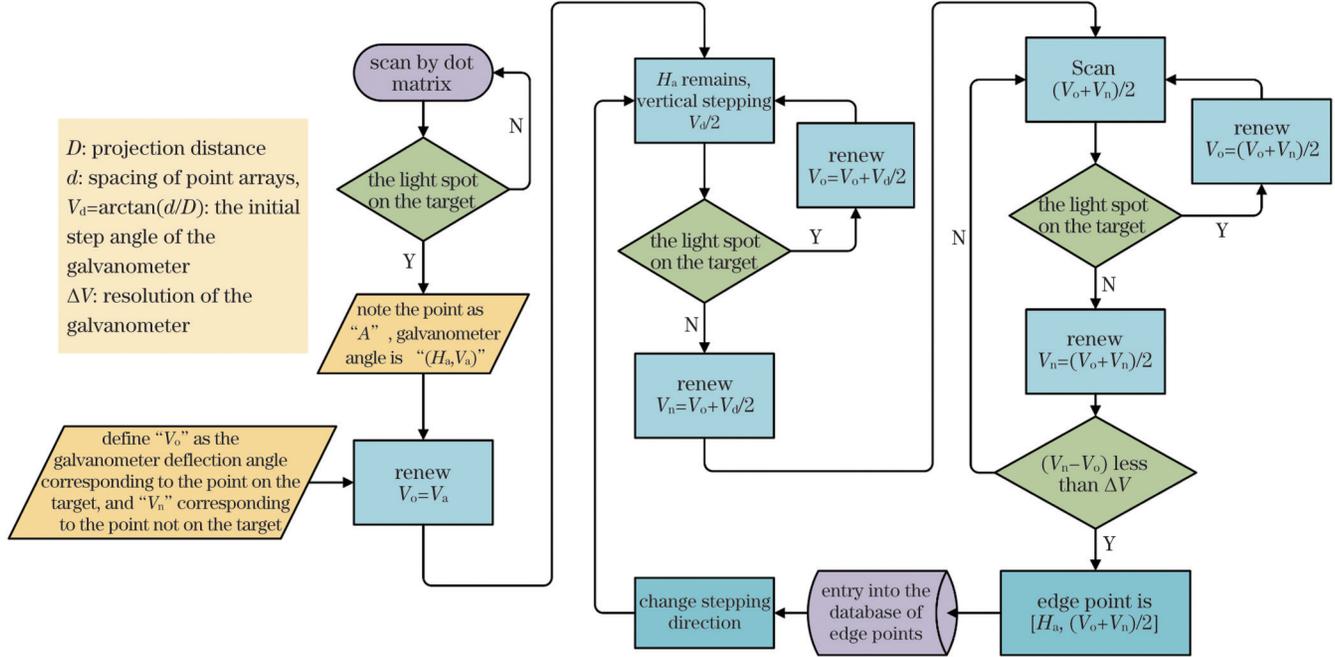


图 13 二分非连续扫描程序流程

Fig. 13 Discontinuous scanning process based on bisection principle

由此扫描路径的几何关系不难看出, C 点的定位精度依赖于如下几点:

1) 纵向或横向扫描路径的直线度。本研究中使用双轴振镜对靶标进行扫描, 只需单独偏转某一片扫描振镜, 而另一片静止不动, 就能使扫描路径为直线。

2) 纵向与横向扫描路径的垂直度。此项参数取决于两振镜的回转轴线的异面垂直度, 此误差来源于双轴振镜加工、装配过程, 属于可矫正的系统误差。

3) 对线段取中点的精度。双轴振镜只能得到偏转角的角平分线, 无法直接得到两投影点的中点。若将角平分线近似为中线, 在不同的投影条件下误差也有所不同。

4) 边缘点的定位精度。理想状态下获取的边缘点应刚好落在靶标反射面的边缘上, 此时其定位精度取决于激光光斑的半径。

4 透视关系产生的误差

激光对合作目标的扫描过程类似于透视投影成像, 由射影几何原理可知, 空间圆的物理平面与激光投射平面不平行时, 所投影或者扫描得到的图形会存在椭圆畸变^[15-16], 如图 14 所示。

扫描投影仪所在的坐标系为 $O\text{-}XYZ$, 激光由 P 点

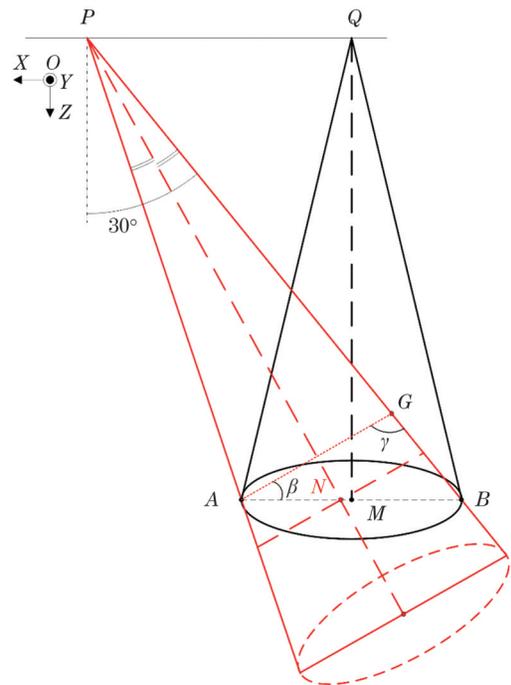


图 14 圆中心投影模型

Fig. 14 Perspective projection model of target

出射, 对 $\odot M$ 进行扫描, 由此产生的圆心提取误差即是 M 与 N 点的距离。为了便于计算, 假设扫描得到的

圆心 N 与实际圆心 M 在同一 $O-XZ$ 平面上。为了保证合作目标反射的激光能够被接收到,靶圆平面与激光束的夹角^[17]应不小于 60° 。此时畸变模型被简化为:在 $\triangle PAB$ 中顶角平分线同底边 AB 的交点与底边中点的距离。由角平分线的几何特性可知:

$$AN / BN = PA / PB. \quad (6)$$

进而有

$$BN - AN = \frac{PB - PA}{PB + PA} (BN + AN), \quad (7)$$

式中: $BN + AN = 2r = 6 \text{ mm}$; $PB + PA \approx 2D$, 即投影距离的 2 倍。进一步变换:

$$\frac{PB - PA}{AB} = \frac{(BN - AN) \times 2D}{AB^2}. \quad (8)$$

由于畸变误差最大时取 $\angle ABP = 60^\circ$, 则过 A 点作 PN 的垂线 AG , 在 $\triangle ABG$ 中, 整理式(8)得:

$$\frac{PB - PA}{AB} = \frac{BG}{AB} = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{\sin(120^\circ - \gamma)}{\sin \gamma}. \quad (9)$$

易知 $90^\circ < \gamma < 120^\circ$, 得:

$$0 < \left(\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{\sqrt{3}}{2 \tan \gamma} + \frac{1}{2} \right) < \frac{1}{2}. \quad (10)$$

则综合式(8)~(10)可得:

$$0 < BN - AN < (r^2 / D). \quad (11)$$

而 $BN - AN = 2MN$, 则当投影距离 $D = 5000 \text{ mm}$ 时, 由式(11)可得透视关系产生的圆心定位误差为 $0.9 \mu\text{m}$ 。由振镜分辨率 $12 \mu\text{rad}$ 计算其投影分辨率为

$$\Delta x = D \cdot \tan(12 \mu\text{rad}) = 60 \mu\text{m}. \quad (12)$$

所以此项原理误差已经远小于双轴振镜分辨率的 $1/10$, 可以忽略。

5 实 验

为了验证所研究方法的合作目标定位精度, 使用栅矩形扫描方法在 $D_0 = 3000 \text{ mm}$ 的投影距离下, 对三个不同位置 $N_1 \sim N_3$ 的合作目标进行扫描, 获得的位置作为真值, 相同条件下再使用本文方法进行扫描。实验现场照片如图 15 所示。

栅矩形扫描方式会对靶标所在的区域以栅形路径

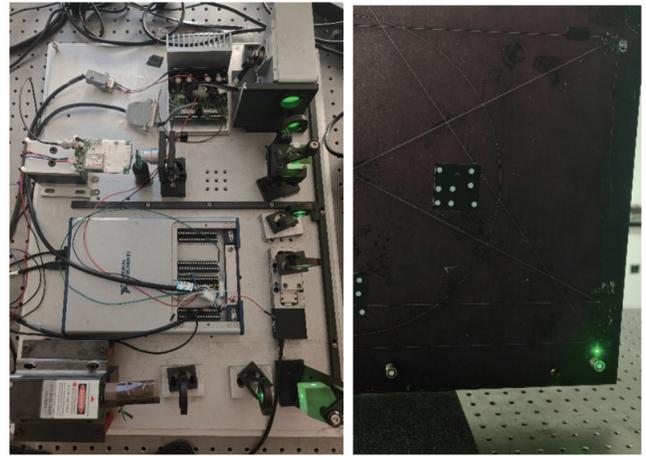


图 15 激光扫描投影系统

Fig. 15 Laser scanning projection system

进行扫描, 如图 16 所示, 使用雪崩光电二极管探测模块可将各扫描点的光强信号转为 100×100 的电压数据表, 将数据表转为灰度图后可进行图像中心提取。

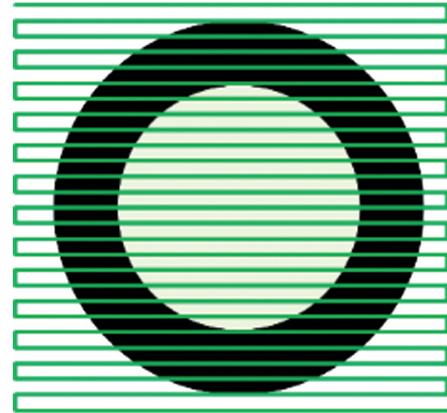


图 16 栅矩形扫描路径

Fig. 16 Grid scanning path

使用 Matlab 软件运行 Canny 算子^[18]以及三角剖分获取合作目标的图像边界, 如图 17 所示, 再通过最小二乘法拟合圆心, 如图 18 所示, 其中“*”为靶标中心, 再根据像素中心转换得到对应的双轴振镜的偏转角如表 3 所示。

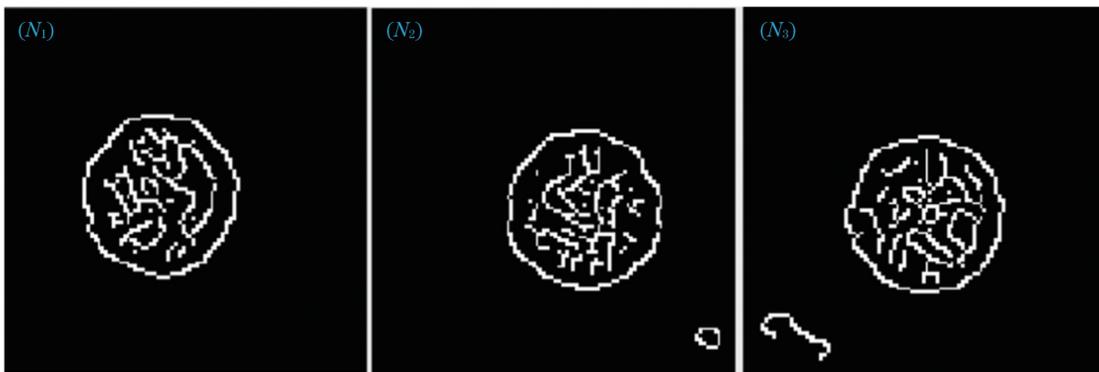


图 17 使用 Canny 算子进行边界提取

Fig. 17 Boundary extraction using Canny operator

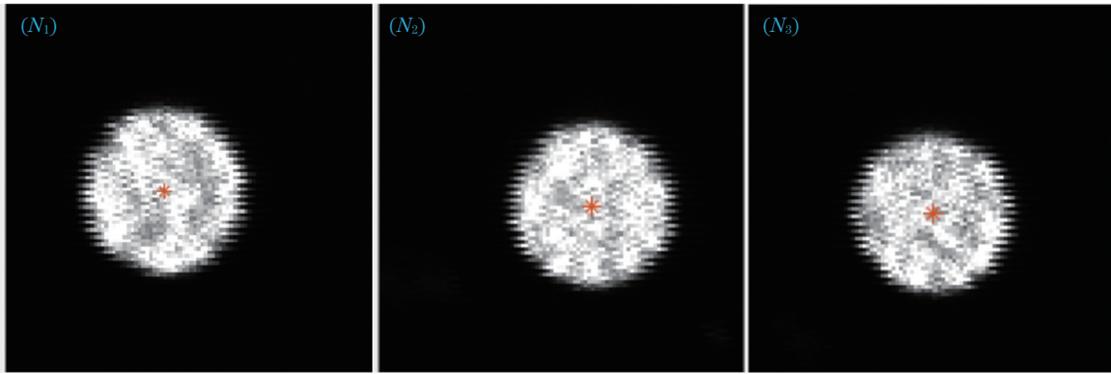


图 18 栅矩形扫描结果灰度图
Fig. 18 Gray-scale maps of raster scanning results

表 3 栅矩形扫描方式测量结果
Table 3 Measurement results of raster scanning method

| Cooperative target | X-coordinate of the pixel point at the center of the target | Y-coordinate of the pixel point at the center of the target | Angle of the galvanometer (H_G, V_G) / ($^\circ$) |
|--------------------|---|---|---|
| N_1 | 43.712 | 51.761 | (20.0284, 20.5458) |
| N_2 | 58.935 | 55.722 | (20.0627, 26.3487) |
| N_3 | 50.960 | 57.254 | (28.2339, 26.2807) |

使用本文方法对合作目标 $N_1 \sim N_3$ 扫描得到边缘点、靶标中心所对应的振镜偏转角,如表 4 所示。将两种方法的扫描点转换到同一像素图中,如图 19 所示,其中“*”为栅矩形扫描获得的中心,“+”为本文方法扫描得到的边缘点与中心点。

表 4 本文方法单次测量结果
Table 4 Single measurement results of proposed method
unit: ($^\circ$)

| Target | Vertical edge points | Horizontal edge points | Target center (H_D, V_D) |
|--------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| N_1 | (20.0064, 20.5135) | (19.9872, 20.5472) | (20.0263, 20.5472) |
| N_2 | (20.0311, 26.3249) | (20.0236, 26.3493) | (20.0641, 26.3493) |
| N_3 | (28.2446, 26.2416) | (28.1924, 26.2811) | (28.2331, 26.2806) |

为提高靶标的定位精度,在单次测量的基础上进行多次测量,即以表 4 中横向边缘点取 5 等分点,将所得点的坐标作为初始点(即第 3 节中的 A 点)再进行 4 次扫描,测量结果如表 5 所示,依据狄克逊准则 $\gamma_0(5, 0.05)$ 剔除粗大误差^[19],所有测量点位置如图 20 所示。

由于投影距离为 $D_0 = 3000$ mm,则可计算本文投影方法得到的靶标中心位置偏差为

$$\nu = D_0 \cdot \sqrt{\tan^2(H_G - H_D) + \tan^2(V_G - V_D)} \quad (13)$$

如表 6 所示,以栅矩形扫描方法得到的合作目标中心位置为真值,本文提出的非连续扫描方法的中心定位偏差优于 0.06 mm。

栅矩形扫描需要获取 10000 个测量点,而本文方法经 5 次测量仅需 $132 + 4 \times 32 = 260$ 个点,扫描点的数量减少了 97.4%。

根据本实验所使用的 MINISCAN III-10 双轴振

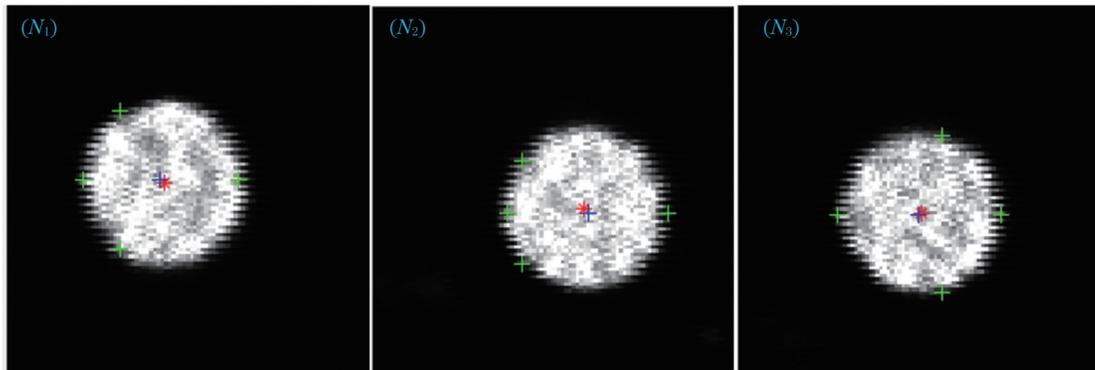


图 19 两种方法对靶标的中心定位结果
Fig. 19 Results of the two methods for the centering of these targets

表 5 本文方法的 5 次测量结果

Table 5 Five measurement results of proposed method

unit: (°)

| Measurement result | N_1 | | N_2 | | N_3 | |
|--------------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| | H_D | V_D | H_D | V_D | H_D | V_D |
| Measure 1 | 20.0263 | 20.5472 | 20.0641 | 26.3493(reject) | 28.2333 | 26.2803 |
| Measure 2 | 20.0270 | 20.5462 | 20.0631 | 26.3480 | 28.2329 | 26.2800 |
| Measure 3 | 20.0277 | 20.5453 | 20.0626 | 26.3479 | 28.2336 | 26.2798 |
| Measure 4 | 20.0279 | 20.5447 | 20.0624 | 26.3483 | 28.2331 | 26.2806 |
| Measure 5 | 20.0274 | 20.5440 | 20.0633 | 26.3482 | 28.2331 | 26.2805 |
| Average | 20.0273 | 20.5455 | 20.0631 | 26.3481 | 28.2332 | 26.2802 |

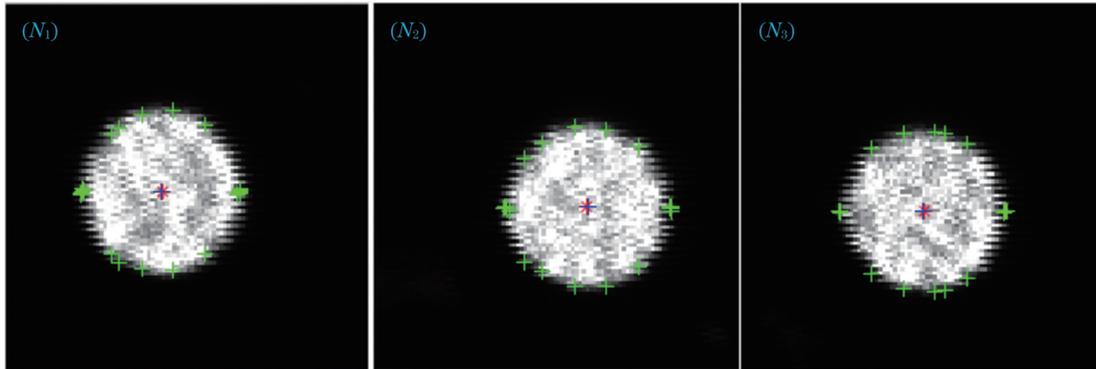


图 20 本文方法所得测量点

Fig. 20 Measurement points obtained by proposed method

表 6 本文方法的测量偏差

Table 6 Measurement deviations of proposed method

| Deviation | N_1 | N_2 | N_3 |
|------------|-------|-------|-------|
| ν / mm | 0.060 | 0.038 | 0.044 |

镜的性能参数,其阶跃响应时间为 0.3 ms,使用栅矩形扫描方法,并使用雪崩光电二极管进行采样,所以单点采样时间约 0.3 ms,则此扫描方法的时间至少为

$$10000 \times 0.3 \text{ ms} = 3 \text{ s}. \quad (14)$$

实际应用中还需要将采集的电压数据表进一步处理才能得到合作目标中心位置,这一过程的处理速度取决于上位机的算力。

而使用本文提出的探测方法对单点的采样时间约 0.4 ms,则所用总时间为

$$260 \times 0.4 \text{ ms} = 0.104 \text{ s}. \quad (15)$$

而且本文所提扫描方法可以直接得出合作目标中心位置,无需对大量采样数据进行解算,从而实现了靶标准确、快速的定位。

6 结 论

本文提出了一种基于相关双采样的合作目标探测方法,实现了在环境光干扰下(SIR 为 -29.5 dB)对靶标的探测扫描。然后针对现有的栅矩形扫描方法存在扫描时间长、所需算力多的问题,提出了一种利用二分原理的非连续扫描方法。最后使用栅矩形扫描与本文扫描探测方法,对不同位置的三个合作目标进行中心

位置提取实验,结果表明,在减少 97.4% 的扫描点数量的情况下,本文方法的中心提取偏差优于 0.06 mm,且极大地减少了运算过程,将该方法应用于激光扫描投影系统中能提升标定过程中的抗干扰性能,减少标定的时间并保证定位精度。

参 考 文 献

- [1] 侯茂盛,刘继强,刘大礼,等.基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究[J].中国激光,2019,46(10):1004002.
Hou M S, Liu J Q, Liu D L, et al. Research on calibration technology of laser scanning projection system based on laser ranging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004002.
- [2] Hou M, Shi Z X, Liu J Q, et al. Development of a laser scanning projection system with a dual-diameter fitting method and particle swarm optimization[J]. Applied Optics, 2021, 60(5): 1250-1259.
- [3] 史铮雪,杨嘉亮,李天雄,等.激光扫描投影系统背向反射目标扫描方法[J].光子学报,2022,51(6):0612005.
Shi Z X, Yang J L, Li T X, et al. Retroreflective targets scanning methods for developed laser scanning projection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6): 0612005.
- [4] 赵祎临.基于双目视觉的三维投影标示技术研究[D].天津:天津大学,2019.
Zhao Y L. Research on 3D projecting indication technique based on binocular vision[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [5] 张晨,孙世磊,石文轩,等.工业线阵 CCD 相机系统测试与噪声评估[J].光学精密工程,2016,24(10):2532-2539.
Zhang C, Sun S L, Shi W X, et al. Linear CCD camera system for industry measurement and its noise evaluation[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2532-2539.
- [6] 李少蒙,聂凯明,徐江涛.用于微光 CMOS 图像传感器的相关多采样技术[J].激光与光电子学进展,2023,60(12):1228005.
Li S M, Nie K M, Xu J T. Correlated multiple sampling technique for low-light CMOS image sensors[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2023, 60(12): 1228005.
- [7] 李洪波, 胡炳樑, 余璐, 等. 基于类对比度的 CCD 相关双采样自适应技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0320003.
Li H B, Hu B L, Yu L, et al. Adaptive technique based on pseudo-contrast for determining CCD correlated double sampling[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0320003.
- [8] 王诗哲. 低噪声高增益仪表放大器研究及其开关电容电路实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Wang S Z. Research on low noise and high gain instrumentation amplifiers and their switched capacitor realizations[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [9] 高坤, 徐江涛, 高志远. 脉冲序列图像传感器的噪声和误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 1011003.
Gao K, Xu J T, Gao Z Y. Noise and error analyses of a pulse sequence image sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(10): 1011003.
- [10] 陈舒凡, 房丰洲. 激光功率计发展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900003.
Chen S F, Fang F Z. Development and applications of laser power meter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900003.
- [11] 唐玉俊, 周晓萱, 倪歆玥, 等. 红外探测灵敏度自适应优化方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2110001.
Tang Y J, Zhou X X, Ni X Y, et al. Research on adaptive optimization method for infrared detection sensitivity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2110001.
- [12] 潘银松, 宋晓亮, 何晓龙, 等. 抑制背景电流的红外焦平面单元读出电路[J]. 激光与红外, 2015, 45(3): 315-319.
Pan Y S, Song X L, He X L, et al. Readout circuit of infrared focal plane unit for restraining background current[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(3): 315-319.
- [13] 王铁德. 有机光电探测器读出电路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Wang Y D. A design for readout circuit of organic photodetector[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [14] Duan W, Song Q, Wei M Z, et al. Research on the readout noise suppression method for digital correlated double sampling[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(1): 13.
- [15] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304008.
Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304008.
- [16] 吕钧瀚, 娄群, 校金友, 等. 大倾角靶标的双目相机高精度标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2312002.
Lü J H, Lou Q, Xiao J Y, et al. High-precision calibration method of binocular cameras for large inclination targets[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2312002.
- [17] 史铮雪. 新型激光扫描投影系统关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
Shi Z X. Research on key technology of novel laser scanning projection system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [18] 于新善, 孟祥印, 金腾飞, 等. 基于改进 Canny 算法的物体边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 2212002.
Yu X S, Meng X Y, Jin T F, et al. Object edge detection algorithm based on improved canny algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(22): 2212002.
- [19] 马宏, 王金波. 仪器精度理论[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 87-89.
Ma H, Wang J B. Instrument accuracy theory[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2014: 87-89.

Research on Discontinuous Scanning Method Based on Correlated Double Sampling Detection

Hou Maosheng^{1*}, Wu Kun¹, Zhang Hongtao¹, Gu Chongke², Duan Jie¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract

Objective A laser scanning projector can deflect a laser beam quickly and accurately, and the path of the laser spot can be shaped into a pattern, thereby facilitating processing and assembly. To ensure the precise calibration of the projection system, several cooperative targets should be scanned to solve the coordinate transformation equations between the world and projector frames. Typically, two calibration methods are employed: One involves manipulation of the laser to scan the cooperative target area, identify points on the edge of the target, and determine the center of the circle through least-squares fitting. This approach requires numerous scanning points, leading to an ineffective calibration process. The alternative approach utilizes binocular cameras for simultaneous multipoint positioning, which results in a reduced calibration time. However, identifying cooperative targets requires significant arithmetic resources. In addition, limited by the performance of the camera, this method is restricted to the calibration distance, and its ability to adapt to ambient light is poor. The correlated double-sampling (CDS) technique can be adopted to enhance the anti-interference ability of the system. Furthermore, a discontinuous scanning method based on the bisection principle is proposed. This technique can precisely identify the boundaries of cooperative targets as well as considerably reduce the number of scanning points, thereby guaranteeing the precision of cooperative target localization.

Methods CDS was investigated to realize band-pass filtering and enhance the adaptability of the detection system to ambient light. Subsequently, an integral sampling circuit was designed to reduce the effects of high-frequency noise. The silicon photodiode operates in a zero-bias state and can produce an output signal proportional to the incident light intensity. According to the abovementioned

features, a change in the signal light can be detected under different lighting conditions. TINA-TI was used for circuit simulation (Fig. 3), and a circuit prototype (Fig. 5) was constructed to verify the performance of the detection module. The control program is written to a 32 bit microcontroller to realize integrated functions, such as the output of control signals, signal acquisition, and information transmission. The designed printed circuit board was placed in the light-exit window of a laser scanning projector (Fig. 9). When the scanning point is within the high-reflection area of the target, the CDS module can stably detect the reflected signal. According to this feature, a scanning method based on the bisection principle was proposed (Fig. 13). This can improve the positioning speed and accuracy of the scanning projection systems for target detection. The theoretical error of this scanning method was analyzed, and a comparison experiment between the grid-scanning method and the proposed method was conducted. The grid-scanning method can be used to obtain detailed point-cloud data for cooperative targets. The Canny operator and triangulation algorithm were implemented in MATLAB to extract the edges of the targets. These measurement results were adopted as benchmarks, and the same cooperative targets were measured using the proposed method under the same conditions. Finally, the number of scanned points and positioning deviations of the two methods were compared.

Results and Discussions The sampling circuit designed for this study is capable of withstanding the power ripple influence of $60 \text{ mV}_{\text{pp}}$ (Fig. 4). Furthermore, although the signal-to-interference ratio (R_{SI}) of -29.5 dB was calculated (Tables 1, 2), the CDS detection module can stably output the signal. In this study, the scanning positioning error resulting from the perspective projection relation was determined as less than $1/10$ of the galvanometer resolution. This suggests that the theoretical accuracy of laser scanning positioning is sufficiently high. Compared with the 10000 scanning points of the grid scanning method (Fig. 18), the number of scanning points in the proposed approach is decreased by 97.4%. Moreover, the positioning deviation of the cooperative target is less than 0.06 mm (Tables 5, 6). The new scanning method minimizes the irrelevant scanning regions and eliminates the image calculation process, thereby reducing the need for computational resources.

Conclusions In this study, a novel method for detecting cooperative targets using CDS is proposed, which can achieve reliable detection even in the presence of ambient light interference ($R_{\text{SI}} = -29.5 \text{ dB}$). In addition, a discontinuous scanning method based on the bisection principle is introduced and verified. The results show that with the reduction of 97.4% in the number of scanning points, the deviation of the proposed method is better than 0.06 mm and simplifies the arithmetic process. Applying this technique to the developed laser scan projection system can improve the anti-interference performance during calibration. In addition, the proposed method can reduce time consumption and ensure position accuracy.

Key words laser scanning projection; correlated double sampling; bisection principle; cooperative target