

# 基于双目机器视觉的高精度激光充电瞄准系统

邓烈刚, 李文峰, 杨雁南\*

南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 211106

**摘要** 为了实现激光束对充电目标的高精度瞄准, 基于双目成像的几何光学原理, 提出了一种由两个相机组成的双目瞄准系统, 通过分析相机、激光发射端口、充电目标的相对位置关系, 优化双目相机与激光发射端口的位置, 得到实现高精度瞄准的技术方案, 从理论和实验上实现了横向、纵向较大范围内的高精度瞄准。理论计算和实验测量结果表明, 该系统在选用焦距为 20 mm 的相机镜头时, 对距离激光发射端口为 3 m 处、面积为 4 m×4 m 的平面上各点的瞄准误差不超过 1.6 mm; 使用焦距为 50 mm 的镜头时, 该系统对纵向区域上距离激光发射端口 10 m 内的目标的瞄准误差不超过 2 mm。因此该系统瞄准精度高, 且装置简单, 操作方便, 是一种可用于激光充电技术的高效便捷瞄准方法。

**关键词** 机器视觉; 激光充电; 双目视觉; 激光瞄准

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1415006

## High-Precision Aiming System For Laser Charging Based on Binocular Machine Vision

Deng Liegang, Li Wenfeng, Yang Yannan\*

College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

**Abstract** In this paper, based on the geometrical optics principle of binocular imaging, we propose a binocular aiming system composed of dual cameras, which realizes the large-range and high-precision aiming of the laser beam on the charging target. By analyzing the positional relationship among the camera, the laser emitting port, and the charging target, large scale horizontal and vertical aiming as well as high-precision aiming has been realized theoretically and experimentally. The theoretical and experimental results show that when the focal length of the camera lens is 20 mm, the aiming error of each point is less than 1.6 mm on the 4 m×4 m plane 3 m away from the laser emission port; when the focal length of the camera lens is 50 mm, for the target 10 m away from the laser emission port in longitudinal area, the aiming error of the target does not exceed 2 mm. The system has the advantages of high aiming accuracy, simple device, and convenient operation, and it is an efficient and convenient aiming method that can be used in laser charging technology.

**Key words** machine vision; laser charging; binocular vision; laser pointing

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.4232; 150.5758

## 1 引言

现代科技发展使人们的生活越来越离不开电能,但在有些场合,采用传统的有线电能传输会带来

一些不便,例如:在为手机、个人计算机等移动用电设备充电过程中,充电线会对它们的灵活使用带来一些束缚。无线充电技术(WCT)为人类提供了一种新的电能获取方式,该方式通过使用某种形式的

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-06; 录用日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(51577091)

通信作者: \*yangyn@nuaa.edu.cn

辐射场替代导线传递能量。目前常用的 WCT 有磁感应耦合、电场耦合、超声波辐射、微波辐射和激光辐射等<sup>[1-2]</sup>。其中磁感应耦合和电场耦合的方式只适用于近距离传输电能。超声波辐射、微波辐射和激光辐射的方式适用于远距离传输电能,但超声波和微波辐射所需的发射、接收装置复杂,不利于传输系统的小型化<sup>[3]</sup>。而激光具有发散角小、能量密度高的特点,其发射和接收设备易于小型化,因此激光无线充电技术(LWCT)更适用于对无人机、手机、航天模块等微小移动目标的电能传输<sup>[4-5]</sup>。很显然,在对这类移动目标的无线充电过程中,激光束对光电转换器件(光电池)的瞄准精度是确保系统能量高效传输的重要环节。对此,国内外学者提出多种解决方案,这些方案可被归纳为两类:一类要求充电目标上配置合作器件以反馈其位置信息,实现瞄准;另一类是利用发射系统对充电目标进行主动瞄准,无需配置合作器件。

2010 年,美国密西根大学 Becker 等<sup>[6]</sup>通过在充电目标上搭载合作器件,运用高精度的全球定位系统(GPS)技术精确获取目标位置,控制发射系统为 1 km 外的机器人实施激光充电。2019 年,西安科技大学的 Zhang 等<sup>[7]</sup>将四象限探测器装配在接收端,通过分析照射在其上的光斑位置分布,解算出目标位置的偏移,实现目标跟踪<sup>[7]</sup>。该类方案需要在接收目标上装载合作器件如全球定位系统(GPS)、接收器件、四象限探测器等以提供位置信息,因此增加了系统的复杂性。这些都是针对第一类瞄准方案的相关报道。

采用第二类方案,如利用发射系统通过机器视觉对充电目标进行主动瞄准,则无需充电目标提供合作器件,仅利用相机拍摄图片,通过视觉算法对图片信息进行处理,实时检测目标位置<sup>[8-9]</sup>,并将其通过坐标变换转化为对发射端的控制,从而实现对目标的瞄准。该方案结构简单、系统稳定,但识别和瞄准精度依赖于高精度的识别检测算法和正确的坐标变换规则,二者缺一不可。该类方案的研究报道有:2020 年,日本千叶大学的 Liu 等<sup>[10-11]</sup>采用单目相机对高速移动的目标进行快速识别与跟踪;2018 年,武汉大学的李志鹏等<sup>[12]</sup>基于单目相机成像原理解算无人机的方位,利用振镜将激光反射到无人机所在的位置,实现激光无线传能;同年,大连理工大学的 Wang 等<sup>[13]</sup>采用双目相机获取目标的水平方位信息,再根据提出的算法,计算水平方向上的偏转角,实现了对水平方向上目标的识别和瞄准。

相比于单目相机,双目相机可以获得更多的空间信息。因此双目相机技术迅速发展起来,广泛应用于测量<sup>[14-16]</sup>、位置估计<sup>[17]</sup>等领域。

为保证接收目标结构简单、激光瞄准精度足够高,本文提出一种基于双目视觉的激光瞄准系统。通过分析相机和激光发射端口间相对位置与目标点的关系,合理选取两相机与激光发射端口的位置,实现了激光束对充电目标的高精度瞄准。该系统能够精确地将相机识别的充电目标位置信息转化为对激光发射系统的控制,从而实现激光对充电目标的高精度瞄准。

## 2 系统设计原理

为了实现采用激光对家用移动电子设备、小型无人机等负载的自主式无线充电,激光发射系统对充电目标的瞄准尤为重要。因此只有在光电池与激光光斑尺寸匹配,并且两者高精度对准的情况下,才能使光电转换效率达到最高。采用双目相机可以方便地实现对较大空间区域的快速搜索和高精度瞄准。

### 2.1 相机成像模型及激光瞄准原理分析

相机成像过程可用小孔成像模型来说明。如图 1 所示,将相机镜头等效为  $O$  点处的小孔,位于小孔右侧的物点  $P$ ,通过小孔在其左侧的像平面(真像平面)上成像。此像与物上下左右颠倒。像平面距小孔的距离为镜头的焦距  $f$ ,真像平面上的像素传感器利用接收到的光信号生成数字图像。

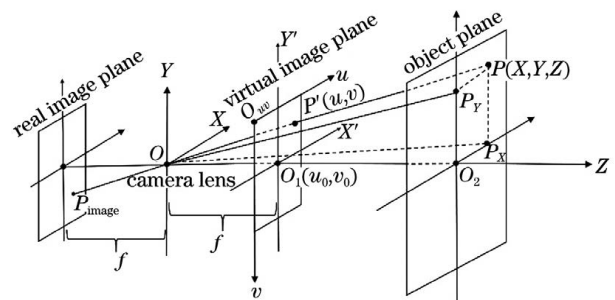


图 1 相机成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of camera imaging principle

在分析计算时,为消除物像间的颠倒效应,可通过几何变换,将镜头左侧的真像平面等效变换到镜头右侧的虚像平面,建立相机“成正像”的理论模型。

取  $O$  点为坐标原点、相机光轴为  $Z$  轴建立相机坐标系  $O-XYZ$ ,充电目标所在位置  $P(X, Y, Z)$  经  $O$  点成像于真像平面上的  $P_{\text{image}}$  点,  $P_x, P_y$  分别为  $P$  在坐标轴  $X$  和  $Y$  上的投影。取像素传感器在虚

像平面上最左上角处的映射为坐标原点,建立图像平面坐标系  $uov$ 。(  $u_0, v_0$  ) 为  $z$  轴与虚像平面的交点坐标,  $P_{\text{image}}$  在此平面上的对应点为  $P'(u, v)$ 。

由几何关系可知,物平面任意一点的坐标与该点在虚像平面上的像点坐标<sup>[18]</sup>满足

$$Z \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

但是,要完成激光束对充电目标的瞄准,必须已知该目标与激光发射端口的相对位置,即已知激光束到目标点的俯仰角和方位角,如图 2 所示。

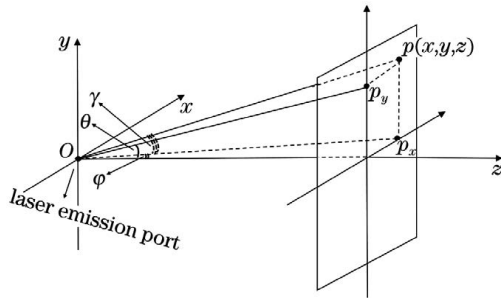


图 2 激光束与充电目标空间关系的几何模型  
Fig. 2 Geometric model of spatial relationship between laser and charging target

为此,选取激光发射端口  $o$  为原点,初始激光束发射方向为  $z$  轴,充电目标  $p$  点所在的与  $z$  轴垂直的平面为  $oxy$  平面,构建另一新的空间直角坐标系——激光坐标系  $o-xyz$ 。为方便定量描述,设  $x$  轴沿水平方向、 $y$  轴沿竖直方向,充电目标  $p$  在此坐标系下的位置坐标为  $(x, y, z)$ ,  $p_x, p_y$  分别为  $p$  在坐标轴  $x$  和  $y$  上的投影。

通过将图 1 中的  $O-XYZ$  进行旋转平移变换,即可得到  $o-xyz$ 。二者之间的变换关系<sup>[19]</sup>为

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{M}\tilde{\mathbf{X}}, \quad (2)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{x}}$  为物点  $p$  在  $o-xyz$  下的坐标,  $\tilde{\mathbf{x}} = [x, y, z]^T$ ;  $\tilde{\mathbf{X}}$  为其在  $O-XYZ$  下的坐标,  $\tilde{\mathbf{x}} = [X, Y, Z]^T$ ;  $\mathbf{M}_{3 \times 4} = [\mathbf{R}_{3 \times 3} | \mathbf{T}_{3 \times 1}]$  为  $O-XYZ$  到  $o-xyz$  的坐标变换矩阵,其中  $\mathbf{R}_{3 \times 3}$  为旋转矩阵,  $\mathbf{T}_{3 \times 1}$  为平移矩阵。

### 2.2 双目激光瞄准系统原理

根据(3)式的坐标变换关系,可得

$$\begin{cases} x = r_1 X + r_2 Y + r_3 Z + t_x \\ y = r_4 X + r_5 Y + r_6 Z + t_y \\ z = r_7 X + r_8 Y + r_9 Z + t_z \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $r_1 \sim r_9$  为旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的元素;  $t_x, t_y, t_z$  为平移矩阵  $\mathbf{T}$  的三个分量。由于单目相机无法感知空间

深度信息,故(3)式中  $x, y, z$  无法由(1)式计算得出。

因此,设计了一种由两个相机和激光发射器共同构成的双目激光瞄准系统。在该系统下,令两相机各自的相机坐标系和激光坐标系对应的坐标轴均保持平行,如图 3 所示。

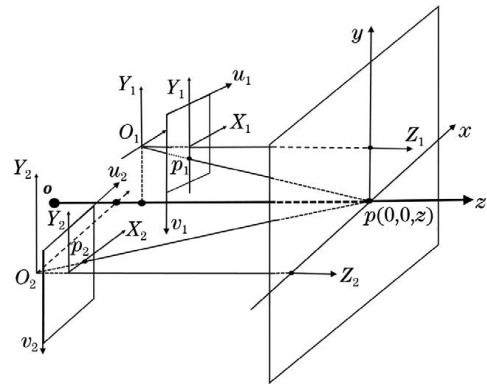


图 3 双目瞄准系统的几何原理图

Fig. 3 Geometric diagram of binocular aiming system

图 3 中,  $O_1-X_1Y_1Z_1$  和  $O_2-X_2Y_2Z_2$  为相机 1、2 的相机坐标系;  $o$  为激光发射端口,相机 1、2 的坐标原点分别在  $yoz$  面、 $xoz$  面上的  $O_1$  点和  $O_2$  点,  $u_1v_1$  和  $u_2v_2$  为相机 1、2 的图像坐标系。  $p$  点在相机 1 虚像平面上的像为  $P_1$ ,在相机 2 虚像平面上的像为  $P_2$ 。图 3 中,相机 1、2 的坐标系与  $o-xyz$  的坐标轴平行,故相机与激光坐标系之间的旋转矩阵均为单位矩阵,即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_{x,1(2)} \\ 0 & 1 & 0 & t_{y,1(2)} \\ 0 & 0 & 1 & t_{z,1(2)} \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1(2)} \\ Y_{1(2)} \\ Z_{1(2)} \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x = X_1 + t_{x,1} \\ y = Y_2 + t_{y,2} \\ z = Z_{1(2)} + t_{z,1(2)} \end{cases} \quad (4)$$

需要特别说明的是,在单目相机情况下,单目相机的坐标系与激光坐标系之间的平移矩阵  $\mathbf{T}$  不为 0,即在(4)式中,  $t_x, t_y, t_z$  不同时为 0。但在图 3 所示的双目情况下,相机 1、2 的平移矩阵分别为  $\mathbf{T}_1 = [0, t_{y,1}, t_{z,1}]^T$  和  $\mathbf{T}_2 = [t_{x,2}, 0, t_{z,2}]^T$ ,因此位于  $z$  轴上的任何目标  $p$ ,其像点  $P_1$  点落于  $Y_1$  轴上,  $P_2$  点落于  $X_2$  轴。即,当  $P_1 = (0, Y_1, Z_1)$  和  $P_2 = (X_2, 0, Z_2)$  时,  $p = (0, 0, z)$ 。

基于上述性质,令激光坐标系和两个相机坐标系三者间的相对位置(图 3)保持固定。多次调整瞄准系统坐标系的姿态,使目标点在两相机中的像分别落于两虚像平面的  $Y_1$  和  $X_2$  轴上。结合(1)式,只要让充电目标的像点在图像坐标系中满足

$u_1 = u_{10}, v_2 = v_{20}$ , 其中,  $u_{10}$  和  $v_{20}$  为相机 1 和 2 各自的  $Z$  轴与虚像平面的交点坐标, 就可使得充电目标调整到激光坐标系的  $z$  轴上, 从而实现高精度瞄准。

### 2.3 瞄准误差分析

根据图 3 所示的双目瞄准系统及旋转平移矩阵, 欲尽量使相机 1、2 的坐标系与  $o-xyz$  间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  为单位矩阵以及平移矩阵  $\mathbf{T}_1 = [0, t_{y,1}, t_{z,1}]^T$  和  $\mathbf{T}_2 = [t_{x,2}, 0, t_{z,2}]^T$ , 可首先进行如下校准:

- 1) 调节相机 1、2, 使其分别与激光坐标系原点尽量地共竖直、水平面;
- 2) 打开激光器发射激光束, 在远处光屏上形成光斑;
- 3) 调节相机 1 的位置姿态, 让光斑所成的像落于其虚像平面的  $Y'$  轴上;
- 4) 调节相机 2 的位置姿态, 让光斑所成的像落于其虚像平面的  $X'$  轴上;
- 5) 改变光屏与激光发射端口的远近位置, 重复步骤 3)~4)。

经过上述校准, 只能使得两相机坐标系和激光坐标系的位置姿态趋近于图 3 的关系。下面分析校准后的坐标系姿态偏差对瞄准精度的影响。

在(3)式中, 相机坐标系向激光坐标系转化的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  由分别绕  $x, y, z$  的旋转矩阵  $\mathbf{R}_z(\theta_z), \mathbf{R}_y(\theta_y), \mathbf{R}_x(\theta_x)$  左乘得到, 即  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\theta_z)\mathbf{R}_y(\theta_y)\mathbf{R}_x(\theta_x)$ , 其中,  $\theta_x, \theta_y$  和  $\theta_z$  分别为相机坐标系绕三个坐标轴的旋转角度。平移矩阵  $\mathbf{T}$  为激光坐标系原点在相机坐标系各方向的平移量构成的矩阵。在实际情况下, 旋转角度为一个较小的值,  $\mathbf{R}$  不是单位矩阵; 且激光发射端口在相机坐标系各方向均有平移, 故平移矩阵  $\mathbf{T}$  的三个分量都不为 0。因此  $x, y, z$  与  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  的各参数相关, 即

$$\begin{cases} x = f_1(X_1, Y_1, Z_1, \theta_{1x}, \theta_{1y}, \theta_{1z}, t_{x,1}) \\ y = f_2(X_2, Y_2, Z_2, \theta_{2x}, \theta_{2y}, \theta_{2z}, t_{y,2}) \\ z = f_3(X_1, Y_1, Z_1, \theta_{1x}, \theta_{1y}, \theta_{1z}, t_{z,1}) \\ z = f_4(X_2, Y_2, Z_2, \theta_{2x}, \theta_{2y}, \theta_{2z}, t_{z,2}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $f_n$  为函数映射关系;  $\theta_{1x}, \theta_{1y}, \theta_{1z}$  和  $\theta_{2x}, \theta_{2y}, \theta_{2z}$  分别为相机 1、2 绕坐标轴  $x, y, z$  的旋转角度;  $t_{x,1}, t_{y,2}, t_{z,1}, t_{z,2}$  代表相机 1、2 在对应坐标轴上的平移量。

根据(5)式, 可通过数值计算得到瞄准精度随目标在不同空间位置上的变化规律。数值计算中, 各参数的选择数值及依据如下: 理论上  $t_z$  对瞄准误差

的影响较小, 设  $t_{z,1}$  和  $t_{z,2}$  为  $\pm 20$  mm; 根据几何关系,  $t_{x,1}, t_{y,2}$  的理论误差极限为相机像元尺寸量级, 设其误差为  $\pm 0.5$  mm;  $\theta_{1y}, \theta_{2x}$  的误差为相机像元尺寸  $s$  与相机焦距的比值  $s/f$ , 选用焦距为 20 mm 的相机镜头时, 其值约为  $\pm 0.014^\circ$ ;  $\theta_{1z}, \theta_{2z}$  与  $\theta_x$  在同一量级, 也取该值为  $\pm 0.014^\circ$ 。而通过几何原理分析和程序计算可知,  $\theta_{1x}$  与  $\theta_{2y}$  对瞄准误差的影响较小, 设该值为  $\pm 1^\circ$ 。数值计算结果表明,  $\theta_{1x}, \theta_{2y}, t_{x,1}, t_{y,2}, t_{z,1}$  和  $t_{z,2}$  对瞄准精度的贡献都较小, 故上述取值合理。

在选取上述各参数的情况下, 计算了激光束对  $z=3$  m 处面积为  $4$  m $\times$  $4$  m 的区域上瞄准误差的分布, 结果如图 4 所示。图中的瞄准误差  $\Delta$  定义为激光瞄准点与实际目标点间的距离。

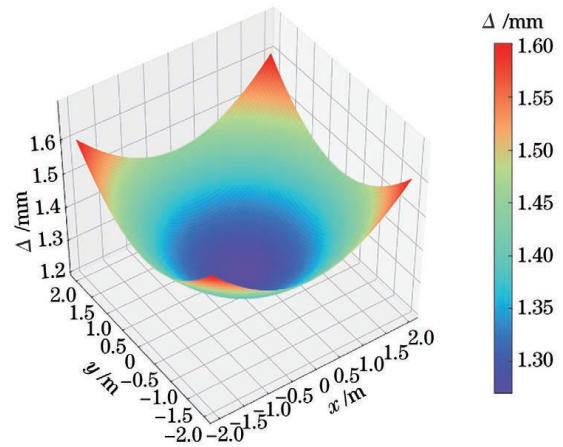


图 4  $z=3$  m 处的瞄准误差分布的仿真结果  
Fig. 4 Simulation results of aiming error distribution at  $z=3$  m

由图 4 可知, 充电目标在  $z$  轴附近半径小于 1 m 的区域内, 激光束对目标的瞄准误差约为 1.3 mm; 在远离  $z$  轴时误差略微增大, 距  $z$  轴 1.5 m 的区域内误差超过了 1.45 mm。也就是说, 激光束对位置在横向较大范围内的目标点都可实现高精度瞄准, 这为确保激光充电的效率提供了一种良好的技术保障。

需要进一步指出的是, 瞄准精度  $\Delta$  还与目标点到激光发射端口的纵向距离以及相机的焦距  $f$  有关。为此, 对目标点到激光发射端口直线距离 10 m 内不同位置处的瞄准误差进行计算, 所得结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 激光发射点与目标的距离越大, 瞄准精度越低, 但增大相机焦距, 瞄准精度会有提升。在距离激光发射端口 2, 6, 10 m 处, 选用焦距为 20 mm 的相机, 得到的瞄准误差约为 1.1, 2.4,

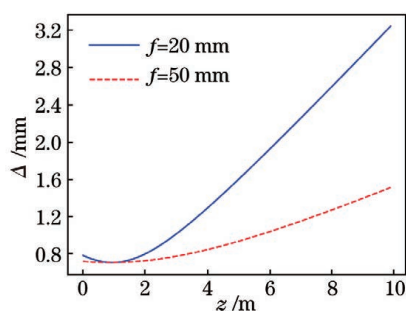


图 5 目标点与激光发射端口的不同距离处的瞄准误差  
Fig. 5 Aiming error at different distances between target point and laser emission port

3.6 mm; 而选用焦距为 50 mm 的相机时, 得到的瞄准误差为 0.8, 1.2, 1.6 mm。因此, 选用大焦距的相机有助于提高瞄准精度。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验装置

根据上述研究结论, 设计了一种高精度的双目激光瞄准实验系统, 通过多次调整瞄准系统姿态, 使目标点在相机 1 中的像落于虚像平面  $Y_1$  轴上, 在相机 2 中的像落于虚像平面  $X_2$  轴上, 实现对充电目标的高精度瞄准。

根据上述双目激光瞄准系统的工作原理, 设计了如图 6 所示的搭载激光发射器和双目相机的多维度可调支架。将两相机和激光发射器依照图 6 所示方案安装于支架之上, 通过对双目相机的多维度调节, 可使整个系统满足高精度瞄准要求。

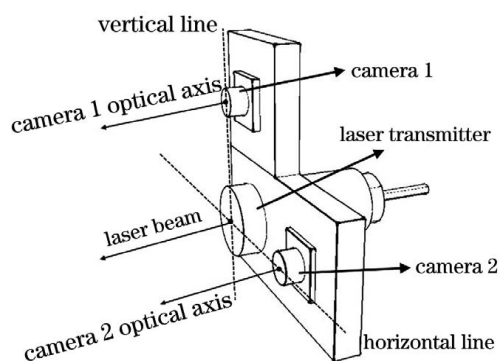


图 6 激光瞄准实验系统的结构示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of laser aiming experimental system structure

图 6 中相机 1、2 的型号为 RER-USB1080P01-LS43, 其内置索尼 IMX291 芯片, 像元尺寸为  $3\ \mu\text{m}$ , 最大像素为  $1920\ \text{pixel} \times 1080\ \text{pixel}$ , 配有 20 mm、50 mm 等不同焦距的镜头。激光发射器为一个光束准直器, 输出的激光直径为 40 mm, 激光波长为

808 nm。整个系统安装于 PTU57 型数字云台上, 由云台进行驱动。系统实物如图 7 所示。

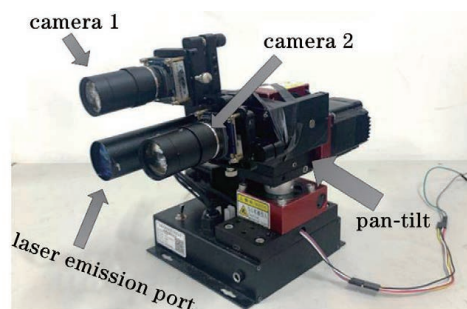


图 7 双目激光瞄准系统实物图

Fig. 7 Physical image of binocular laser aiming system

#### 3.2 高精度激光瞄准的实现过程

为实现高精度瞄准, 对激光瞄准系统相关器件进行调整, 具体步骤为:

1) 对系统进行校准和标定。打开激光器, 使激光束照射在光屏上, 调节支架上的相机姿态, 让激光斑落在相机 1 虚像平面的中心垂直轴线上和相机 2 虚像平面的中心水平轴线上。改变光屏与激光发射端口的距离, 在远近不同的位置进行多次调节。校准完成后, 即可关闭激光器。

2) 运行目标检测程序, 不断读取目标的像点坐标, 通过控制激光发射端口转动, 使得目标的像点落在两个相机的像平面中心轴线上, 完成精瞄。

3) 再次打开激光器, 激光由发射端口对准充电目标射出, 实现高精度瞄准充电。

#### 3.3 瞄准误差实验结果

使用 20 mm 焦距的相机镜头, 对距离激光发射端口为 3 m 的平面上若干位置进行瞄准误差为  $\Delta$  的实际测量, 结果在图 8 中用实心点标出(其中曲面

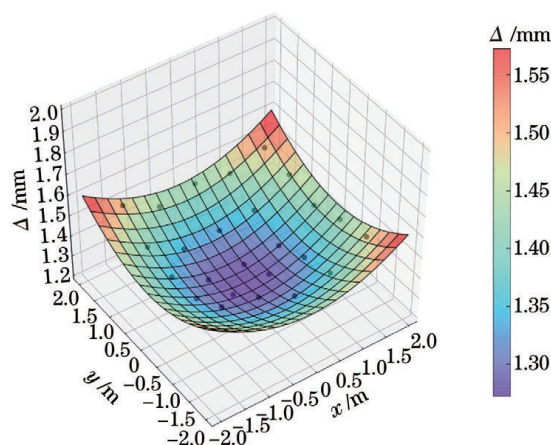


图 8 距激光发射端口 3 m 处平面上瞄准误差的理论计算与实验结果

Fig. 8 Theoretical calculation and experimental results of aiming error on plane at  $z=3\ \text{m}$

为图 4 所示的数值计算结果)。

由图 8 可知,实验测量下的瞄准误差略大于数值计算的结果,约为 1.3~1.6 mm。实验测量的瞄准误差的横向分布呈现一个凹面,其与理论计算结果基本吻合,具体表现为靠近平面中心处的瞄准误

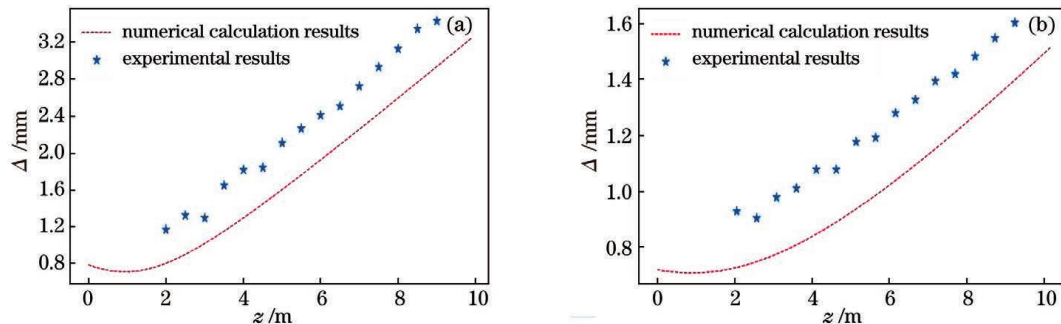


图 9 目标点与激光发射端口不同直线距离处瞄准误差的实验结果。(a)直线距离为 20 mm;(b)直线距离为 50 mm  
Fig. 9 Experimental results of aiming errors at different linear distances from laser emission port to target. (a) Linear distance is 20 mm; (b) linear distance is 50 mm

由图 9 可知,在距离激光发射端口不同距离处:选用焦距为 20 mm 的相机得到的瞄准误差为 1.2~3.6 mm;选用焦距为 50 mm 的相机得到的瞄准误差下降为 0.9~1.7 mm。瞄准误差值的变化趋势与理论计算结果吻合。

### 3.4 瞄准精度分析

由于本文采用尺寸为 20 mm×20 mm 的方形光电电池,激光光斑直径为 40 mm,根据 2.3 节数值模拟和 3.3 节实验测量结果,在 3 m 距离处面积为 4 m×4 m 的区域上的瞄准误差小于 1.6 mm。在 10 m 距离内使用 20 mm 焦距的相机,此时的瞄准误差在 3.6 mm 之内,而使用 50 mm 焦距的相机得到的瞄准误差将减小为 1.7 mm 以下。这表明光斑在该区域上总是能够实现对该光电电池的覆盖,从而获得较高的光电转换效率。瞄准精度与双目瞄准系统的光轴平行度和相机焦距等参数高度相关。保证相机光轴与激光束的平行度足够高以及采用较大焦距的相机镜头都是有效的提高瞄准精度的方法。

## 4 结 论

提出并研究了一种采用双目相机对激光充电目标进行高精度瞄准的技术方案。首先通过分析相机成像原理,提出了可用于激光充电的双目瞄准系统的结构。经过理论分析和数值计算,论证采用该系统实现高精度瞄准的可行性;并根据瞄准误差产生的原因,通过改进瞄准方案,从理论和实验上分析测量了相关因素对瞄准误差的影响,实现了横向、纵向

差较低,而远离平面中心处的瞄准误差逐渐增大。

此外,分别选用焦距为 20 mm、50 mm 的相机镜头,在与激光发射端口不同直线距离处对瞄准误差  $\Delta$  进行测量,所得结果如图 9 所示。

上较大范围内的高精度瞄准。选用焦距为 20 mm 的相机镜头时,双目相机对距离激光发射端口为 3 m 的面积为 4 m×4 m 的平面上各点的瞄准误差低于 1.6 mm。在距离激光发射端口 2,6,10 m 处:选用焦距为 20 mm 的相机得到的瞄准误差分别约为 1.2,2.4,3.6 mm;选用焦距为 50 mm 的相机得到的瞄准误差分别约为 0.8,1.2,1.6 mm。该方案所需设备简单,易于实现,对激光充电过程中高精度瞄准的实现有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Costanzo A, Dionigi M, Masotti D, et al. Electromagnetic energy harvesting and wireless power transmission: a unified approach[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(11): 1692-1711.
- [2] Lu X, Niyato D, Wang P, et al. Wireless charger networking for mobile devices: fundamentals, standards, and applications[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 126-135.
- [3] Zhao Z M, Zhang Y M, Chen K N. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 1-13, 21.  
赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-13, 21.
- [4] Li W, Wu L Y, Wang W P. Research progress of laser wireless power transmission [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020008.  
李巍, 吴凌远, 王伟平. 激光无线能量传输研究进展

- [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020008.
- [5] Schäfer C A, Gray D. Transmission media appropriate laser-microwave solar power satellite system[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 79: 140-156.
- [6] Becker D E, Chiang R, Keys C C, et al. Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1230: 271-281.
- [7] Zhang W G, Guo W, Zhang C W, et al. An improved method for spot position detection of a laser tracking and positioning system based on a four-quadrant detector[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4722.
- [8] Ju M R, Luo J N, Wang Z B, et al. Multi-scale target detection algorithm based on attention mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1315002.  
鞠默然, 罗江宁, 王仲博, 等. 融合注意力机制的多尺度目标检测算法[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1315002.
- [9] Yang Q L, Zhou B H, Zheng W, et al. Dim and small target detection based on fully convolutional recursive network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1310002.  
杨其利, 周炳红, 郑伟, 等. 基于全卷积递归网络的弱小目标检测方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1310002.
- [10] Liu Y, Namiki A. High-speed target tracking of 3D object by monocular camera[C]//2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), January 12-15, 2020, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2020: 121-126.
- [11] Liu Y, Sun P, Namiki A. Target tracking of moving and rotating object by high-speed monocular active vision[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6727-6744.
- [12] Li Z P, Zhang Y G, Ai Y, et al. Laser tracking and wireless power supply system for unmanned aerial vehicles[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(3): 306-310.  
李志鹏, 张燕革, 艾勇, 等. 无人机激光跟踪与无线供能系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(3): 306-310.
- [13] Wang C, Zhu L, Wang D, et al. Horizontal relative posture recognition based on binocular camera[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC), July 25-27, 2018, Wuhan. New York: IEEE Press, 2018: 18148778.
- [14] Cheng Z Y, Lu R S, Mao C L. Measurement method of three-dimensional shape of bright surface with binocular stereo vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071202.  
程子怡, 卢荣胜, 毛翠丽. 光亮表面双目立体视觉三维形貌测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071202.
- [15] Lei J F, Wei W, Li Y L, et al. Dimensionality measurement of weak texture hydraulic components based on binocular vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181511.  
雷经发, 韦旺, 李永玲, 等. 基于双目视觉的弱纹理液压元件尺寸测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181511.
- [16] Liu S T, Jin W Q, Li L, et al. Ranging method based on binocular zoom super-resolution imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1411004.  
刘诗婷, 金伟其, 李力, 等. 基于双目变焦超分辨率成像的测距方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1411004.
- [17] Chen Y C, Liu B Q, Huang F Y. Ultra-wide field infrared binocular vision epipolar constraint and spatial positioning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0211003.  
陈一超, 刘秉琦, 黄富瑜. 超大视场红外双目视觉极线约束与空间定位[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 0211003.
- [18] Xie Z X, Wang X D, Gong H L. Round-hole profile measurement of thin-walled parts based on binocular vision[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204004.  
解则晓, 王晓东, 宫韩磊. 基于双目视觉的薄壁零件圆孔轮廓测量[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1204004.
- [19] Guo Q D, Quan Y M, Yu G P, et al. Improved binocular calibration based on ICP algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1215003.  
郭清达, 全燕鸣, 于广平, 等. 基于 ICP 算法的双目标定改进方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1215003.