

doi: 10.7690/bgzdh.2026.04.007

基于视觉伺服的无人机自主挂载电线方法

程中海^{1,2}, 洪华杰², 唐邓清², 韩崇伟¹, 申思雨³, 董金祥¹, 杨璇¹

(1. 西北机电工程研究所系统研究室, 陕西 咸阳 712099; 2. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073;
3. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650504)

摘要: 为实现无人机自主电线挂载, 提出一种基于视觉伺服的电线挂载无人机控制算法。该算法依托机载双目相机实现电线的视觉检测与定位, 依据电线理想位姿预先标定结果, 以电线的斜率、截距差值作为控制系统的主要输入, 实时解算无人机的位置和姿态控制量, 控制无人机靠近待挂载电线, 并使电线进入机载挂载机构挂载范围。试验结果表明: 该方法在误差允许范围内可满足无人机挂载电线的精度要求。

关键词: 自主挂载; 电线探测; 无人机姿态控制; 截距修正

中图分类号: V279; TP27 **文献标志码:** A

A Method for Autonomous Wire-mounted by UAV Based on Visual Servoing

Cheng Zhonghai^{1,2}, Hong Huajie², Tang Dengqing², Han Chongwei¹, Shen Siyu³, Dong Jinxiang¹, Yang Xuan¹

(1. *System Laboratory, Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an 712099, China;*
2. *College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*
3. *Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China*)

Abstract: In order to realize autonomous wire-mounted UAV, a control algorithm based on visual servoing for wire-mounted UAV is proposed. The algorithm relies on the airborne binocular camera to realize the visual detection and location of the wire, according to the pre-calibration results of the ideal position and attitude of the wire, takes the slope and intercept difference of the wire as the main input of the control system, calculates the position and attitude control quantity of the UAV in real time, controls the UAV to approach the wire to be mounted, and makes the wire enter the mounting range of the airborne mounting mechanism. The test results show that the method can meet the accuracy requirements of the UAV wire within the allowable error range.

Keywords: autonomous mounting; wire detection; UAV attitude control; intercept correction

0 引言

应急保障、抢险救灾、军事活动等各类野外作业, 电力保障都是必备的前提条件^[1-3]。而传统的油机发电, 不仅噪声大, 而且大量油料储备也存在安全隐患, 特别在军事领域, 热辐射还会成为遭受红外打击的不利因素^[4-5]。为了在野外环境进行能源补给, 笔者提出一种新的设想: 利用架空电线作为能量来源, 为地面储能设备进行充电。目前, 架空电线以交流输电方式为主, 输电频率为 50 Hz, 输电电压等级为几十到几百千伏、电流等级可为几百到几千安培等。根据架空电线的特点, 从架空电线中取电具备可行性。旋翼无人机飞行可控性较强, 且具备一定的负载能力, 利用旋翼无人机搭载电能传输装置, 通过挂载电线的方式架设电能传输通路^[6-11], 为地面储能设备传输电能, 具备较强的实际应用价值。无人机如何精准挂载架空电线是关键

环节。当前, 无人机电线挂载普遍存在顶部悬停挂载和底部物理挂载 2 种方式^[12-15]。顶部悬停挂载方法需无人机稳定悬停于架空电线上方, 故无人机续航时间直接限制了电能传输时间, 不适用于长时间电能传输应用场景。底部物理挂载运用无人机机载物理挂载装置将无人机悬挂于电线, 不仅具有较强的平衡性能, 具备一定的抗风扰能力, 而且传输电能过程中无人机无需提供动力, 摆脱了无人机续航对电能传输时间的限制。综上, 笔者采用底部物理挂载方式。

文献^[16-17]利用 OpenStreetMaps 云服务获取的精确地理数据, 将无人机导航至电线下方激光雷达可探测电线的范围内。一般场景下无法获取高精度的地理数据, 激光雷达远距离探测分辨率不足, 无法精确地探测电线。同时, 实现电线定位需要的 2 个激光雷达也会加重无人机的负载。由于无人机的有效载荷限制, 笔者采用重量更轻, 探测范围更

收稿日期: 2024-12-11; 修回日期: 2025-01-12

第一作者: 程中海(1998—), 男, 甘肃人, 硕士。

大的双目相机作为机载传感器探测电线，利用电线探测的结果引导无人机靠近待挂载电线，并使电线进入机载挂载机构挂载范围。

1 系统架构

1.1 问题建模

无人机自主挂载电线任务主要包含无人机系统、机载挂载系统和电能传输系统等硬件模块设计，以及电线探测、无人机自主挂载控制等算法软件设计，笔者重点针对电线探测及无人机自主挂载控制算法展开研究。无人机执行挂载任务时，首先，利用机载传感器探测电线；随后，机载计算机实时计算电线与无人机之间的相对位置和姿态；最后，依据相对位姿关系计算无人机控制量，控制无人机飞行使电线进入待挂载区域。

虽然电线在 2 塔杆之间的状态是一条悬链线，但是在相机视场角内电线高度的变化对挂载任务的影响微乎其微；所以，可以认为相机拍摄的电线是平行于地面的。基于这个假设，笔者将电线在相机坐标系下的 3 维位姿分解为像素坐标系 UOV 下的 2 维直线方程 $V=a \cdot U+b$ 和电线距离 z 。其中 a 为 2 维直线方程的斜率，无人机当前的航向角； b 为 2 维直线方程的截距，无人机当前的横向位置；电线距离 z 表示当前电线与无人机的距离。以电线理想位姿预先标定的结果和实时电线检测的结果之差为系统输入，解算无人机的位置和姿态控制量，控制无人机靠近待挂载电线，并使电线进入机载挂载机构挂载范围。

1.2 总体方案设计

实现无人机自主挂载电线：

- 1) 笔者使用双目相机探测电线。
- 2) 机载挂载系统使用双 U 型挂载机构如图 1 所示。

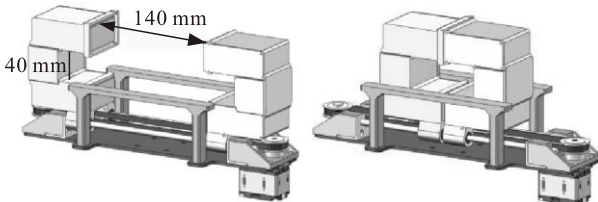


图 1 挂载机构

舵机驱动同步带轮，同步带轮带动 U 型机构开合。

- 3) 机载计算机负责接收、处理和发送来自各模块的数据。

4) 无人机的最大有效载荷 20 kg，悬停定位精度 0.1 m，续航时间 10 min，无人机飞控模块通过旋翼电机组控制无人机的位姿，系统组成如图 2 所示。

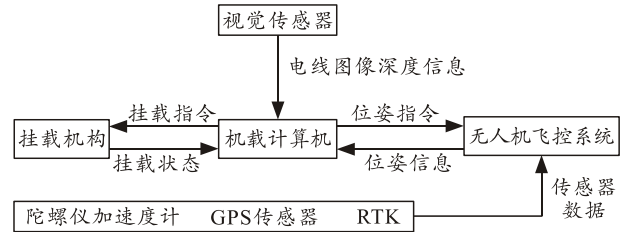


图 2 系统组成

2 电线探测与无人机挂载控制算法

2.1 电线理想位姿标定

由于无法准确计算相机坐标系与挂载机构坐标系之间的转换关系，使用“手眼标定”将相机定位电线的结果转换到挂载机构坐标系下会产生较大的误差。笔者提出一种以理想位姿电线 \tilde{L} 为参考的无人机挂载电线的方法。电线位于挂载机构内时称为理想位姿电线 \tilde{L} ，在此状态下对电线与相机的相对位姿进行标定，标定内容包括：① 相机与电线之间的距离 \tilde{z} ；② 电线在像素坐标系 UOV 下的 2 维直线方程表达式 $\tilde{V} = f(U, z)$ 。相机是一个小孔成像模型，电线在成像平面的位置与电线距离有关，推导出无人机仅在垂直方向上移动时，电线在像素坐标系下的直线方程表达式为：

$$\tilde{V} = f(U, z) = k \cdot U + \frac{1}{z} \cdot f_y \cdot B + v_0 - k \cdot u_0 \quad (1)$$

式中： k 为理想位姿电线在像素坐标系下的斜率； z 为电线距离； f_y 为等效焦距； B 为一个定值，其含义是理想位姿电线在相机坐标系下 2 维直线方程的截距； u_0 、 v_0 为光轴对于像素坐标系原点的偏移量。

通过标定计算出理想位姿电线 \tilde{L} 在像素坐标系下的 2 维直线方程 $\tilde{V} = f(U, z)$ 和电线距离 \tilde{z} ，由相机检测实时电线 L_k 在像素坐标系下的 2 维直线方程 $V_k = f(U)$ 和电线距离 z_k ，将实时电线 L_k 与理想位姿电线 \tilde{L} 各参数的误差 ΔL 转换为对无人机姿态的控制量， ΔL 为零时，电线处于挂载机构内，闭合挂载机构即完成挂载电线任务。整个过程中检测电线的结果在像素坐标系下进行运算，避免了坐标系之间转换产生的误差。

2.2 电线探测

电线探测时，相机对环境的视觉感知可能会受

到各种背景噪音(如阳光、云)的干扰,这可能会使自动检测电线变得困难^[18];因此,电线检测算法应具有可靠性和鲁棒性,以实现实时电线检测。

获取精确的电线定位是无人机挂载电线的基础,通过 Canny 边缘检测和 Hough 直线检测算法检测 RGB 图像中的电线并表示为 2 维直线方程,将检测的结果与同一时刻拍摄的深度图像进行融合以获取精确的电线距离信息。利用电线的 2 维直线方程与电线距离信息即可确定电线在 3 维空间中的姿态。

2.2.1 电线检测

图像在传输过程中,受成像设备或外部环境的干扰影响会产生噪声。鉴于高斯滤波去噪效果好、保留图像细节、计算简单、参数易调整的特点,笔者选用高斯滤波器对图像进行去噪。此外,在拍摄过程中可能存在背景杂乱的问题,这会影响图像中电线区域的检测;因此,采用二值化方法将电线区域从背景中分离出来,以提高目标检测的精度。

为了准确检测出电线区域,需要先获取电线的边缘线。边缘提取是实现这一目标的重要步骤,可对图像进行高精度的边缘点检测,并将灰度值连续变化的位置转换成二值边缘,从而得到整幅图像的边缘信息。在该过程中,保留目标物体的框架结构并减少图像中的数据量,使得图像处理工作更加简便。由于 Canny 算法因具有高精度,低误差和良好的局部响应特征,笔者采用 Canny 算法进行边缘检测,以获取电线区域的精确边缘线信息。为了将电线图像中的边缘线信息转换为可用的坐标信息,采用 Hough 变换的方式进行直线检测。计算检测到的全部边缘直线的平均斜率和平均截距作为表示这条电线的直线方程。

2.2.2 电线距离计算

双目相机的测距原理是 (semi-global block matching, SGBM) 算法^[19],通过匹配左、右 2 幅图像的同名点计算每个像素点的深度值。实际情况下,图像中的电线较细,特征不明显会导致测距结果存在误差;光线干扰会导致深度图像中出现空洞。

为了提高电线距离的准确度,采用一种融合同一时刻的 RGB 图像和深度图像的方法,如图 3 所示。该方法在 RGB 图像中进行电线检测,计算出电线在像素坐标系下的 2 维直线方程,然后在深度图像中选择该直线方程两侧的 10 个像素点(根据电线在图像中的宽度调整),最后计算这些像素点深度

值的均值作为电线距离 z_k :

$$z_k = \sum_{i=1}^N z_i / N. \quad (2)$$

式中: N 为选择的像素点个数; z_i 为第 i 个像素点的深度值。

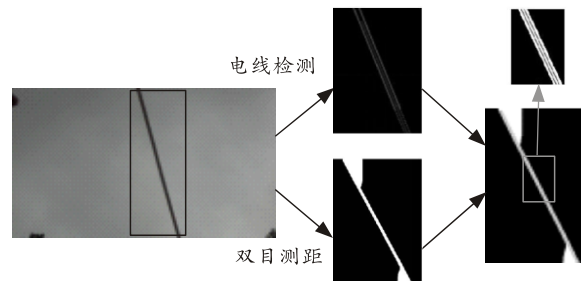


图3 图像融合

无人机执行任务过程中,电线距离是连续变化的。为了应对可能存在的深度图像丢失和电线误检测,如式(3)所示。

$$\left. \begin{aligned} z_k &= z_k, & |z_k - z_{k-1}| &\leq z_{\text{threshold}} \\ z_k &= z_{k-1}, & |z_k - z_{k-1}| &> z_{\text{threshold}} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

采用一种滤波方法以保证机载计算机发送至无人机飞控系统的数据是连续的。该方法使用当前帧的数据 z_k 与上一帧的数据 z_{k-1} 进行比较,两者差值大于阈值时,用上一帧的数据代替当前帧的数据。阈值 $z_{\text{threshold}} = \Delta k \cdot v$, Δk 为帧间隔, v 为无人机的上升速度。

2.3 无人机挂载控制算法

无人机水平运动时机身会倾斜,会导致视觉传感器测量不准确,并且在距离电线较近时无人机的机身和桨叶有触碰到电线的风险。出于安全考虑,在无人机靠近电线的过程中,期望无人机尽早位于电线正下方并且挂载机构的方向与电线方向保持一致,距电线较近时尽量只进行上升,避免进行大幅度的横向位移和偏航运动。

把无人机靠近电线的过程解耦为:旋转对齐、横向对齐和上升 3 阶段,如图 4 所示。

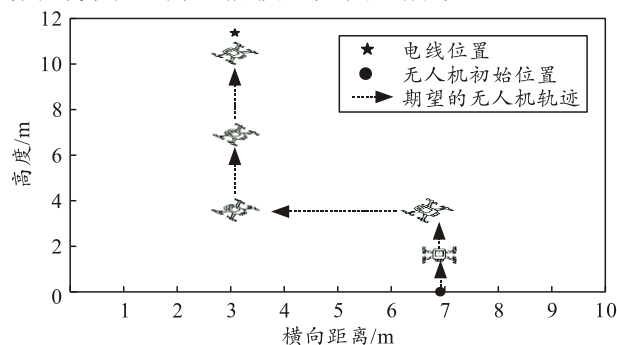


图4 无人机靠近电线的3阶段

无人机距离电线较远时进行旋转对齐和横向对齐, 在上升阶段对偏航角和横向位移只进行微调。无人机完成以上 3 阶段需要的参数有偏航角、横向位移量和电线距离。笔者将详细介绍利用电线检测的结果计算出无人机的偏航角和横向位移量。

2.3.1 旋转对齐阶段

旋转对齐的目的是使实时电线与理想位姿电线保持平行。计算出理想位姿电线在像素坐标系(原点位于图像的左上角, 从左至右是 U 的正方向, 从上至下是 V 的正方向)下的直线方程为:

$$v = a \cdot u + b. \quad (4)$$

实时电线在像素坐标系下的直线方程为:

$$v = c \cdot u + b. \quad (5)$$

实时电线与理想位姿电线如图 5 所示。

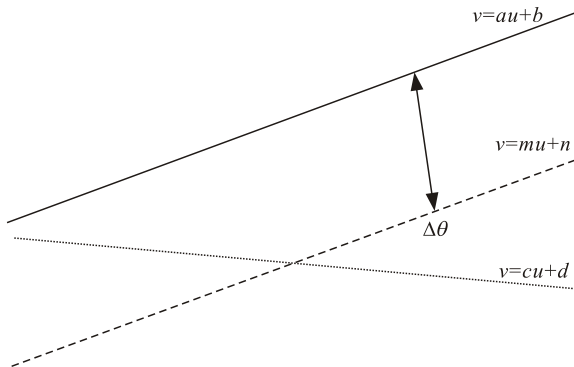


图 5 实时电线与理想位姿电线

直线为理想位姿电线, 点线为相机检测的实时电线, 理想位姿电线与实时电线的倾斜角之差为:

$$\Delta\theta = \arctan(a) - \arctan(c). \quad (6)$$

将 $\Delta\theta$ 作为无人机偏航通道的输入, 调整姿态后挂载机构的方向与电线方向保持一致。

2.3.2 横向对齐阶段

无人机在偏航方向上旋转 $\Delta\theta$ 角度后, 相机检测的实时电线与理想位姿电线平行, 如图 5 中的虚线所示。此时, 理想位姿电线与实时电线的截距之差换算到相机坐标系下的横向位移量 L 为:

$$L = (b - n) \cdot \cos(\arctan(a)) \cdot z / f_y. \quad (7)$$

式中: b 为理想位姿电线在像素坐标系下直线方程的截距; n 为实时电线在像素坐标系下直线方程的截距; a 为理想位姿电线在像素坐标系下直线方程的斜率; z 为电线距离; f_y 为等效焦距。

根据式(1), 无人机仅在垂直方向上移动时, 电线在像素坐标系下的直线方程的斜率保持不变, 截距随着电线距离变化, 数值仿真测试结果如图 6 和 7 所示。

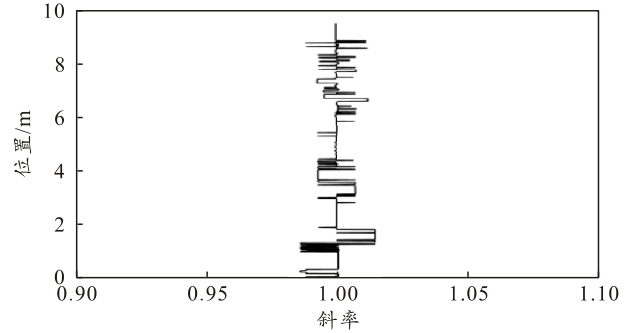


图 6 斜率与高度的关系

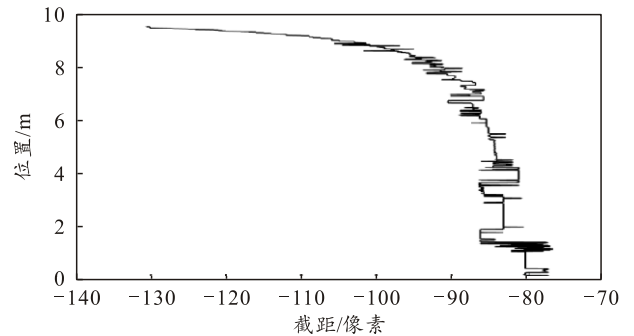


图 7 截距与高度的关系

这意味着如果采用式(7)作为横向位移量会因为电线距离变化导致无人机在横向方向上的对齐存在误差, 在上升阶段产生控制耦合。

为了消除式(7)产生的静差, 采用式(1)中的截距部分作为理想位姿电线在像素坐标系下直线方程的截距, 修正后的横向位移量 L_c 为:

$$L_c = (b_c - n) \cdot \cos(\arctan(a)) \cdot z / f_y. \quad (8)$$

式中 $b_c = f(z) = \frac{1}{z} \cdot f_y \cdot B + v_0 - k \cdot u_0$ 。

2.3.3 上升阶段

假定电线方向与世界坐标系的 X 方向平行, 电线足够长, 无人机挂载电线时对位置 X 无特殊要求; 因此, 设置无人机的位置 X 保持不变, 对位置 Y 和 Z 进行调整即可。

上升阶段采用闭环控制器以保持无人机与电线对齐, 高度反馈采用 P 控制器, 横向位移由 P 控制器调节。在距离电线较近的时候, 控制器采用较小的增益, 对偏航角和横向位移只进行微调。无人机挂载电线控制算法的伪代码:

```

1) 双目相机, 挂载机构, 无人机处于工作状态。
2) 靠近电线:
while true
由相机数据获取电线距离  $d$  (发布频率 10 Hz)
if 无人机与电缆的距离:  $d \geq 7$  m do
    无人机高度上升
    
```

```

 $z=z+d/10$ 
 $y=y$ 
    计算当前航向角  $\theta$ 
 $\theta=\theta+\Delta\theta$ 
if 相对偏航角  $\Delta\theta>$  阈值( $1^\circ$ )
    控制无人机与电缆对齐
else
    偏航角保持
if 无人机与电线的距离:  $0.7\text{ m}\leq d<7\text{ m}$  且相
对偏航角  $\Delta\theta<$  阈值( $1^\circ$ ) do
    计算横向位移距离  $L_c$ , 控制无人机移动到
    电缆下方(在横向方向上处于中间位置);
    if  $L_c>0.2\text{ m}$ 
        无人机高度不变
         $z=z$ 
        无人机在  $y$  方向上移动
         $y=y+L_c/10$ 
    else
        无人机高度上升
         $z=z+d/10$ 
        无人机在  $y$  方向上移动
         $y=y+L_c/10$ 
if 无人机与电线的距离:  $0.3\text{ m}\leq d<0.7\text{ m}$  do
    无人机高度缓慢上升
     $z=z+d/20$ 
    偏航角保持
     $\theta=\theta$ 
    无人机在  $y$  方向上保持
     $y=y$ 
if 无人机与电线的距离:  $0.29\text{ m}\leq d<0.3\text{ m}$  do
    悬停, 等待闭合挂载机构的指令
     $z=z$ 
     $\theta=\theta$ 
     $y=y$ 
if 无人机与电线的距离:  $d<0.29\text{ m}$  do
    防止碰到电线
     $z=z-0.05$ 
     $\theta=\theta$ 
     $y=y$ 
3) 闭合挂载机构。

```

3 无人机挂载电线仿真试验

3.1 实验环境搭建

Gazebo 是一款功能强大的 3 维物理仿真平台, 具备强大的物理引擎、高质量的图形渲染、方便的

编程与图形接口, 支持传感器数据的仿真; 因此, 笔者选择 Gazebo 作为仿真平台。Rotors_simulator 是一个支持 ROS 和 Gazebo 的无人机仿真平台, 该平台内包含多旋翼无人机模块和传感器模块, 这些模块之间通过 ROS 通信。试验环境如图 8 所示。

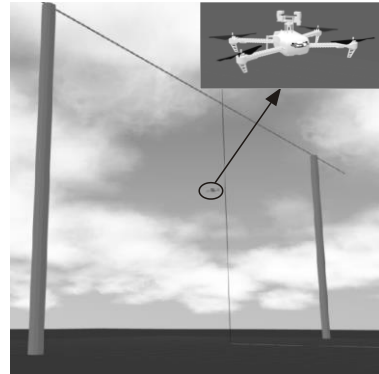


图 8 试验环境

无人平台采用四旋翼无人机搭载用于检测电线的双目相机和用于将无人机挂载在电线上的挂载机构。无人机采用 Iris 模型; 双目相机的水平视场角为 72° , 分辨率为 $640*480$, 深度探测范围为 $0.3\sim 10\text{ m}$, 10 m 内的探测精度为 2% 。双目相机和挂载机构安装在无人机的顶部, 无人机从地面起飞靠近电线。使用 SolidWorks 绘制距地面 10 m 的电线模型并导入 Gazebo。

无人机自主挂载电线建立在机器人操作系统 (ROS) 的基础上, 可以分解为更小的任务, 并利用发布-订阅机制在程序 (称为节点) 之间进行通信。节点分为电线检测节点, 电线距离计算节点, 无人机位姿控制节点和无人机飞控节点。电线检测节点和电线距离计算节点根据相机数据实时更新检测结果并发布话题, 无人机位姿控制节点从以上 2 个节点订阅检测结果处理后发布位姿控制话题, 无人机飞控节点订阅到位姿控制话题后, 控制无人机调整到期望位姿。

3.2 电线理想位姿标定试验

理想位姿电线取决于挂载机构和相机的安装位置。为了验证算法的适应能力, 选择无人机的位置为 $(1.0, 0.0, 9.7)$, 欧拉角为 $(0^\circ, 0^\circ, 45^\circ)$ 时的电线为理想位姿电线, 此时电线恰好位于挂载机构的中间位置。理想位姿电线的电线距离 $\tilde{z}=0.3$ 。式(1)中, 由相机内参矩阵获得等效焦距 $f_y=205.469\ 637$; 光轴对于像素坐标系原点的偏移量 u_0 、 v_0 分别为 320 和 240 ; 无人机在垂直方向上移动时, 相机检测电线并记录理想位姿电线在像素坐标系下的斜率 k , 电线

距离 z 和像素坐标系中电线上一点的坐标 (U, V) ; 由多组数据可以计算出 B 。通过试验和计算得到理想位姿电线在像素坐标系下的直线方程 \tilde{V} 为:

$$\tilde{V} = 0.999\ 085 \cdot U - 33.286/z - 80。 \quad (9)$$

则修正后的横向位移量 L_c 中的 b_c 为:

$$b_c = f(z) = -33.286/z - 80。 \quad (10)$$

横向位移量修正前和修正后无人机横向位置 Y 和高度 Z 的关系分别如图 9(a)、(b) 所示。

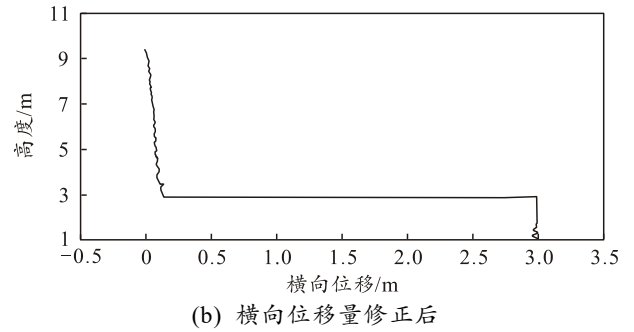
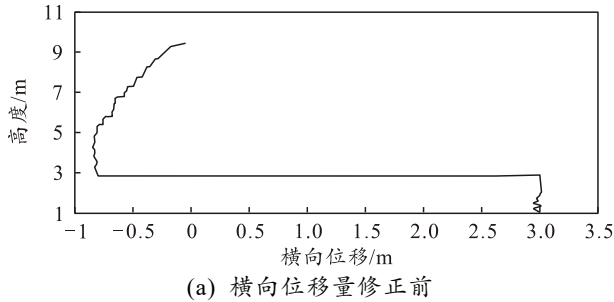


图 9 无人机横向位置 Y 和高度 Z 的关系

横向位移量修正前会因式(7)产生的误差在 Y 方向出现超调, 修正后不会出现超调。试验过程中采用了修正后的横向位移量 L_c 以保证在横向方向上不会出现超调。

3.3 电线检测试验

电线检测试验如图 10 所示。

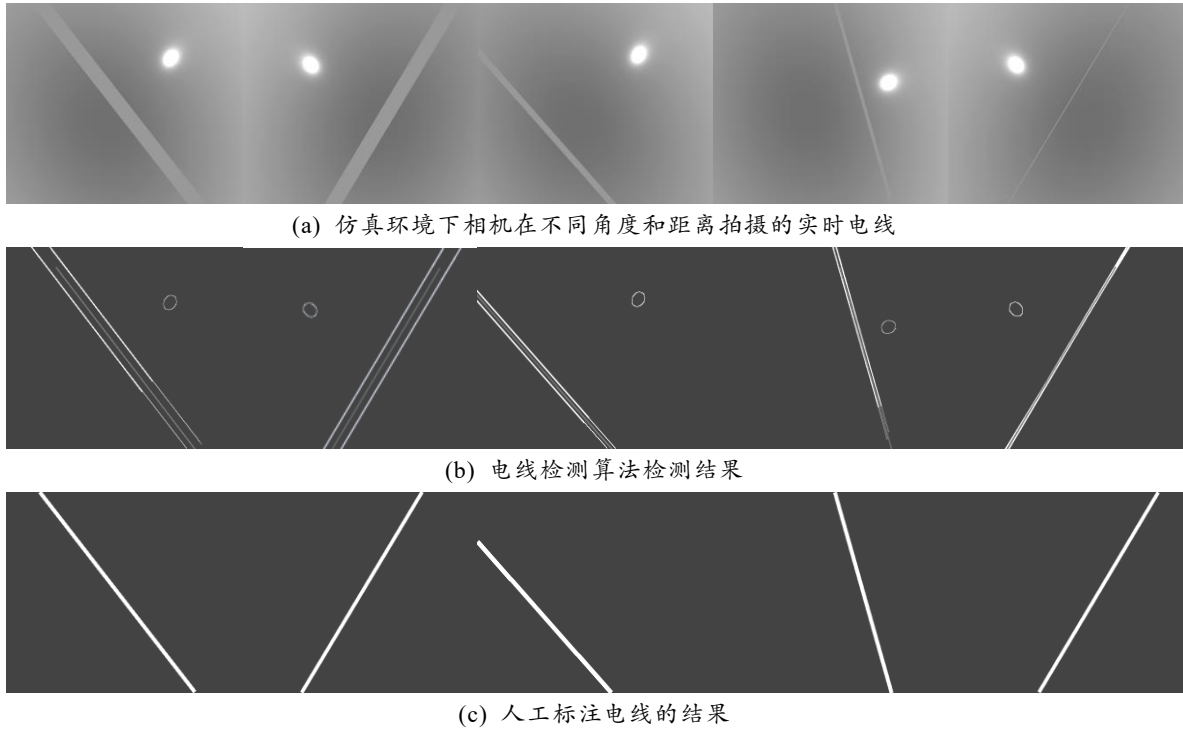


图 10 电线检测试验

图 10(a) 中坐标系原点在图像的左上角, 从左至右为 u 的正方向, 从上至下为 v 的正方向; 图 10(b) 中 2 条边缘直线的平均斜率和平均截距作为电线的直线方程。表 1 中的精度由电线检测算法与人工标注电线的绝对误差除以人工标注电线的结果计算得。

采集不同角度和距离的图像进行电线检测的结果显示: 斜率和截距的精度均在 98% 以上, 可以认为电线检测算法是可靠的。

表 1 电线检测算法与人工标注电线的对比

组别	项目	检测结果/像素	标注结果/像素	精度/%
1	斜率	1.151 145	1.1503 810	99.93
	截距	-108.086 259	-109.942 748	98.31
2	斜率	-1.481 216	-1.479 893	99.91
	截距	842.415 026	842.262 937	99.98
3	斜率	0.999 999	0.999 999	99.99
	截距	115.999 999	115.999 999	99.99
4	斜率	3.076 051	3.074 445	99.94
	截距	-1011.868 932	-1013.906 148	99.79
5	斜率	-1.462 454	-1.481 216	98.73
	截距	713.073 175	721.466 905	98.83

3.4 无人机挂载电线综合试验

在仿真环境下对无人机挂载电线操作进行试验验证。设置无人机初始位置为(1.0, 2.0, 1.0)，初始欧拉角为(0°, 0°, 30°)，通过 Launch 文件加载模型并启动所有节点，无人机开始自主挂载电线。无人机靠近电线时，按照旋转对齐、横向对齐和上升 3 阶段进行操作。无人机靠近电线过程中，无人机位姿随时间序列变化如图 11 所示。

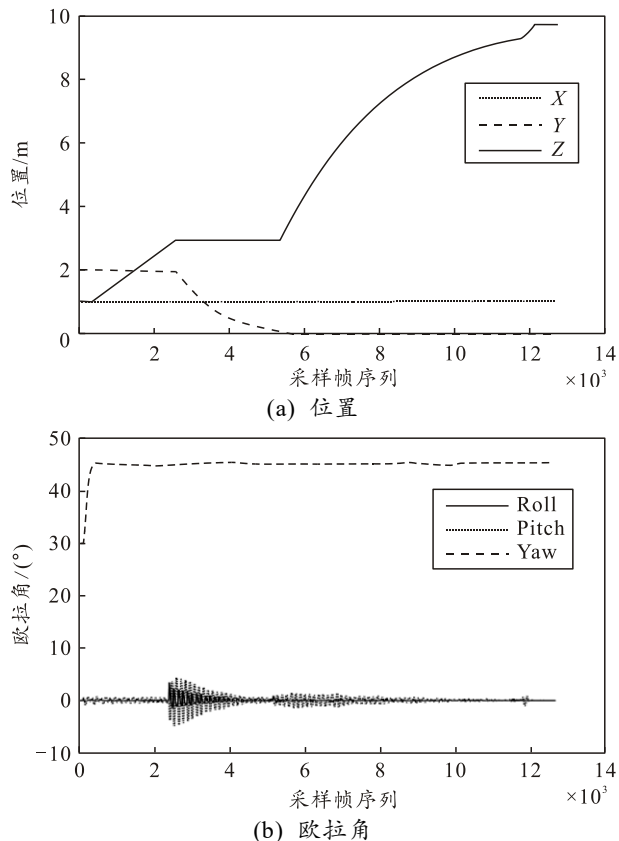


图 11 无人机位姿随时间序列变化

在旋转对齐阶段，位置 Y 保持不变，随位置 Z 增大，无人机姿态迅速调整为期望值，偏航角小于阈值(设置为 1°)时保持。在横向对齐阶段，无人机高度不变，位置 Y 通过控制器调节实现平滑地趋于 0。当横向位移量 L_c 小于 0.2 m 时无人机开始上升阶段，同时对位置 Y 和偏航角 θ 进行微调，相机与电线的距离为 0.29~0.3 m 时无人机悬停，等待挂载指令。

设置 20 组不同的无人机初始位姿进行自主挂载电线试验，采用平均绝对误差(MAE)：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - P| \quad (11)$$

式中： p_i 为测量值； P 为真值。试验结果如图 12 所示。

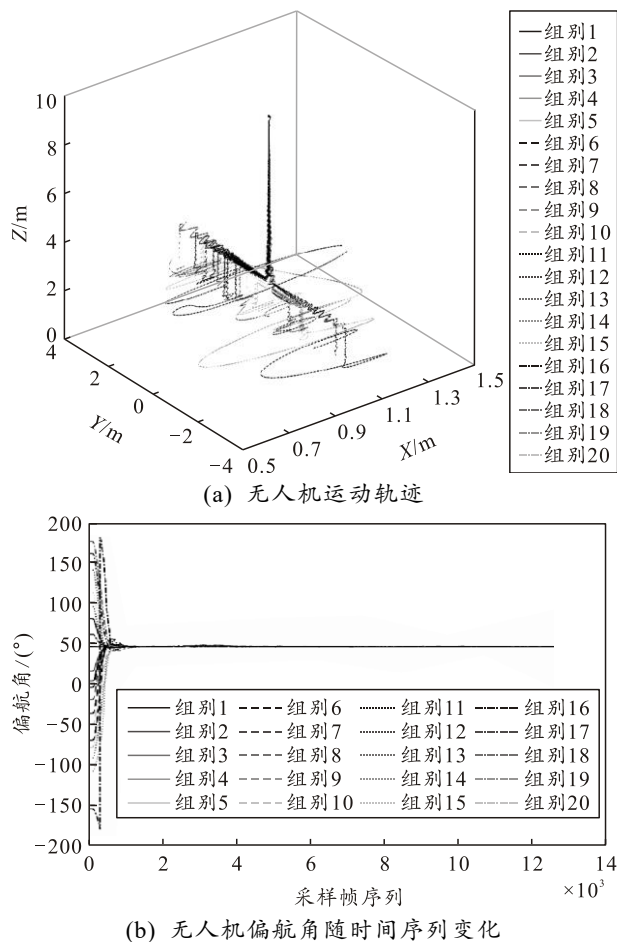


图 12 20 组自主挂载电线试验

图 12(a)中，描绘了 20 次试验的轨迹，无人机最终到达的待挂载位置与标定的位置在横向方向上的平均绝对误差为 0.001 3 m，在高度上的平均绝对误差为 0.008 7 m。图 12(b)中，描绘了 20 次试验的偏航角随时间序列的变化情况，无人机依据不同的初始偏航角最终调整为 45°，平均绝对误差为 0.197 8°。无人机最终到达的待挂载位姿满足挂载电线的精度要求。

4 结论

笔者提出一种基于视觉伺服的无人机挂载电线方法，设计了基于视觉传感器获取电线位置信息的方法和利用电线位置信息控制无人机姿态的策略，并采用了截距修正方法以消除横向对齐阶段的超调。在仿真环境中对无人机挂载电线方法进行了试验，试验结果表明：该方法在误差允许范围内可以满足无人机挂载电线的精度要求。未来的工作将致力于改进电线检测算法以提高电线检测的鲁棒性，同时将已有的研究成果在真实场景下进行测试。