

基于多传感器的无人机避障方法研究及应用

杨磊¹, 陈凤翔¹, 陈科羽¹, 刘胜南²

(1. 贵州电网有限责任公司 输电运行检修分公司, 贵阳 210046;

2. 天津航天中为数据系统科技有限公司, 天津 300000)

摘要: 随着无人机巡检作业方式应用越来越广泛, 巡检过程中对障碍物检测并进行避障显得愈发关键; 若无人机碰到杆塔或线路不仅会造成无人机自身的损坏, 还会对居民用电造成影响, 给检修带来麻烦; 毫米波雷达、激光雷达、双目视觉传感器在机器人避障中有广泛应用; 但是基于输电线路巡检的多旋翼无人机的实际情况, 传感器器件的选型、尺寸、重量, 以及障碍物信息与飞控的融合, 显得尤为重要; 通过对多旋翼无人机搭载毫米波雷达、双目视觉传感器、差分 GPS 进行了研究, 采用多传感器融合方法检测障碍物, 利用虚拟力场法(VFF)进行航迹重规划, 并实际飞行验证; 测试表明该方法对杆塔避障取得了较好的应用效果。

关键词: 多传感器融合; 避障; 双目视觉; 虚拟力场法

Research and Application of Obstacle Avoidance Method Based on Multi-sensor for UAV

Yang Lei¹, Chen Fengxiang¹, Chen Keyu¹, Liu Shengnan²

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Transmission Operation and Maintenance Branch, Guiyang 210046, China;

2. Tianjin Zhong Wei Aerospace Data System Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: With the wider application of unmanned aerial vehicle (UAV) inspection methods, obstacle detection and avoidance are becoming more and more important. If the UAV hits a tower or a line, it will not only cause its own damage, but also affect the electricity consumption of the residents, and also cause troubles for maintenance. Millimeter-wave radar, laser radar, and binocular stereo vision sensors are widely used in robot obstacle avoidance. But based on the actual conditions of multi-rotor UAVs for transmission line inspection, the model selection, size, weight, the integration of obstacle information and flight control are particularly important. The multi-rotor UAV equipped with millimeter-wave radar and binocular stereo vision and differential GPS were studied. Multi-sensor fusion method was used to detect obstacles, and virtual force field method (VFF) was used for track replanning, and conducting a flight test. The test result shows that this method has a good application effect on obstacle avoidance of towers.

Keywords: Multi-sensor fusion; obstacle avoidance; binocular stereo vision; VFF method

0 引言

随着无人机技术的发展, 无人机在电力巡检方面的应用越来越多, 国家电网、南方电网均有无人机巡检的应用。由于电力巡线现场环境复杂, 高山、树木、建筑物等环绕在输电线路周围, 对无人机尤其是多旋翼无人机的巡线作业提出了更高要求。无人机飞行过程中在线检测并规避障碍物成为了迫切需求。

相关文献表明, 针对多传感器融合的避障技术^[1-3], 国内已有研究人员开展了相关工作。Syed Ghafoor Shah 融合了立体视觉和三维激光扫描仪 2 个传感器的信息, 对无人机自主避障和导航技术进行了研究^[4], 研究了基于 SURF 方法提取立体图像特征点, 来匹配微型飞行器位置和方位角, 最终系统满足室内环境下的微型飞行器的自主实时避障和导航要求。由于飞行器只在室内飞行, 相比室外实际

飞行环境, 障碍物较单一, 避障要求较低。陈奕君选取超声波和红外开关作为测距系统的传感器, 选取 CCD 摄像机作为视觉传感器, 设计了一种两级信息融合的结构, 能够充分的利用传感器获取的外部信息并满足实时避障的要求, 通过改进的 BP 神经网络对测距传感器采集的信息进行融合, 并且以旅行家 II 移动机器人作为研究平台, 实现了机器人在实际环境中的避障^[5]。张煜基于多传感数据融合的技术, 对无人车避障导航进行了研究, 对模糊神经网络的 A * VFF 避障导航算法进行改进, 最后通过构建仿真实验平台, 在较为复杂的环境下完成了无人车避障导航的仿真实验^[6]。杨福增、王涛等人申请了一项基于多传感器信息融合的山地农业机器人避障系统的发明专利^[7], 该系统主要包括视觉传感器、超声波、红外传感器、数据融合模块和控制器 ARM 模块, 通过多 DSP 处理器对多传感器信息进行并行处理, 控制器 ARM 模块进行避障决策控制, 满足了对山地农业机器人实时避障的要求。在基于毫米波雷达多旋翼自主避障方面, 李圆圆分析了无人机巡线避障系统理论, 包括毫米波避障雷达方案、毫米波避障雷达在无人机

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-08-07。

作者简介: 杨磊(1973-), 男, 贵州六盘水人, 主要从事输电线路运行维护及无人机行业应用方向的研究。

巡线应用中的功能要求以及高压输电线的 RCS 特性, 采用 GO-CFAR 检测算法解决了无人机避障系统在超低空复杂地面背景下障碍物的预报问题^[8]。王滨海等人研究了一种基于毫米波雷达的无人机巡线走廊方法与装置, 它包括巡线无人直升机, 在无人直升机上设有有机载毫米波雷达装置和高清摄像机检测设备, 机载毫米波雷达装置包括机载天线, 并且公开了一种利用这种装置所实现的一种基于毫米波雷达的无人机巡线走廊方法^[9]。在基于双目视觉避障方面, 周士超研究了基于双目立体视觉的无人机避障算法, 利用光流法的景深感知模型提前感知前景电力塔, 然后利用 SIFT 算法提取塔的特征点并匹配, 最后结合相机参数计算出塔目标的深度信息^[10]。这种方法需要提前输入特定已知模型, 对模型依赖较高, 但是得到的距离精度较高。杨维、朱文球等人提出了基于 RGB-D 相机的多旋翼无人机自主避障算法, 采用分层策略区分障碍物与非障碍物, 再用区域块方法搜索避障路径, 最终调用 ROS 系统的 gazebo 仿真环境模拟无人机飞行场景进行了仿真实验, 并在仿真环境中加入了障碍物, 最终通过变换得到实际路径需要的偏移距离, 从而达到避障和路径规划的目的^[11]。史浩明针对导航避障策略问题, 采用改进的人工势场法, 结合最优控制思想设计控制器, 引导无人机自主避障到达目标点。同时, 针对障碍物检测问题, 提出改进的金字塔光流算法, 通过对摄像机标定, 得到几何参数, 完成距离的精确解算。最终, 基于 EDA 实验箱在搭建的嵌入式平台上, 对设计算法进行了验证, 仿真结果表明系统可以识别目标场景中的障碍物, 并更新路径进行自主避障^[12]。

但是目前国内无人机对障碍物检测, 大多采用单一传感器对单一障碍物进行检测, 或者采用少数几种传感器对日常使用中障碍物进行检测, 针对电力巡线应用设计的无人机障碍物检测方法^[13], 也只是采用电磁场检测传感器和超声波传感器对输电线路本身和大目标障碍物进行检测, 现有的这些方法存在 2 个问题: 1) 没有综合考虑电力巡线现场复杂环境, 对障碍物检测方法及避障策略过于简单; 2) 采用的 GPS 精度不高, 导致无人机绝对位置检测误差太大, 直接影响无人机避障。

为了方便电力巡线作业, 执行巡线任务的多旋翼无人机通常较灵活, 载重能力有限, 因此较重的激光雷达及毫米波雷达并不适用于多旋翼, 只能选择轻量化的毫米波雷达。但是轻量化毫米波的测量距离及精度有限, 而且只能检测出距离, 不能实现自主避障。因此加入双目视觉传感器, 通过检测障碍物的方向和距离, 从而得到最佳避障绕行路线。由于双目视觉的检测距离较短, 与毫米波雷达融合测距, 对障碍物实现不同梯度的深度测量, 及早发现障碍物并进行躲避, 差分 GPS 使无人机定位精度更高, 从而实现多旋翼无人机自主避障。

1 自主避障控制系统

图 1 为自主避障控制系统连接框图。毫米波雷达和双

目视觉传感器实现障碍物检测功能。通过电脑棒对多传感器数据进行融合, 识别威胁后调整航线, 并将处理的结果传送到飞行控制器。电脑棒与飞行控制器实现通信, 并采用差分 GPS 提高多旋翼无人机的定位精度, 最终飞行控制器控制多旋翼无人机躲避障碍物。

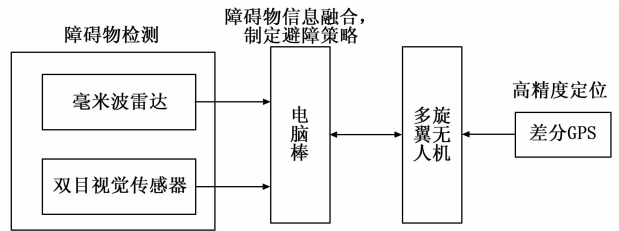


图 1 自主避障控制系统连接框图

差分 GPS 的工作原理如下: RTK 基准站通过中转装置, 将接收到的卫星载波信号和自身坐标信息, 传送给多旋翼无人机的接收机。多旋翼无人机信号发送接收天线接收 GPS 卫星载波信息和 RTK 基站信息, 利用相位差分算法, 实时计算出无人机的精确定位数据。差分 GPS 的工作过程是, 首先, 在无人机 GPS 接收机附近设置一个已知精度坐标的差分基准站; 其次, 基准站的接收机连续接收 GPS 导航信号, 将测得的位置或距离数据与已知的位置、距离数据进行比较, 确定误差, 得出准确改正值; 最后, 将这些改正数据通过数据链发播给覆盖区域内的用户, 用以改正用户的定位结果。结合差分 GPS 的精确定位, 飞行控制器在飞行到障碍物区域进行航迹重规划, 保证多旋翼无人机的安全避障。通过研究航迹实时重规划方法, 实现对障碍物的及时躲避绕行。根据无人机输电线路巡检的避障要求, 结合多旋翼无人机的有效载荷, 在确保续航时间的前提下, 通过分析传感器的指标, 对障碍物探测的传感器进行选型, 确定传感器类型和挂载方式。通过障碍物检测数据信息融合, 无人机进行动态避障, 进行航迹重规划, 最终绕过障碍物到达目标点。设计流程图如图 2 所示。

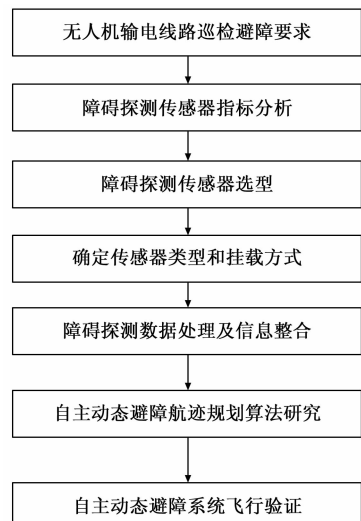


图 2 自主避障控制系统设计流程图

2 障碍物检测

基于毫米波雷达和视觉传感器的融合技术，实现了多线程的障碍物相对方位检测。

2.1 双目视觉传感器

双目立体视觉技术借鉴人通过双眼感知立体空间的能力，经过双目定标、图像采集、畸变校正、立体匹配等步骤得到了视差结果，并计算出场景的景深图，进而重建出空间景物的三维信息。采用栅格法检测障碍物，得到障碍物的距离及方向。双目视觉检测障碍物的示意图如图 3 所示。

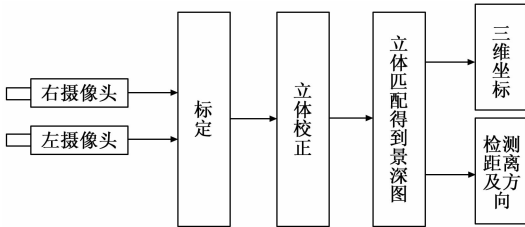


图 3 双目视觉传感器检测障碍物示意图

在实际应用过程中，双目视觉传感器检测障碍物的过程如下：(1) 标定：使用数学方法消除径向和切线方向上的镜头畸变，输出无畸变图像。需要先对 2 个摄像头做单目标定，再做双目标定。双目标定依赖于 2 个摄像头之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T ，从而计算出这 2 个摄像头在空间上的几何关系。(2) 立体校正：由于 2 个摄像头在安装时几乎不存在准确的共面和行对准的成像平面，这就需要调整 2 个摄像头的角度和距离，保证图像平面精确落在同一个平面上，而且图像的行完全地对准到前向平行结构，目前有很多算法实现了立体校正，如 Hartley 算法和 Bouguet 算法。(3) 立体匹配：查找左右摄像头视场中的 3D 点，只计算它们的重叠视图内的可视区域。对于处理非畸变的校正立体图像，往往使用块匹配的算法，分为一下 3 个步骤^[14]。预过滤，使图像亮度归一化并加强图像纹理；沿着水平极线用 SAD 窗口匹配搜索；再过滤，去除坏的匹配点。(4) 重投影：当得到摄像头的相对几何位置后，通过 2 个摄像头视图中的匹配点之间的三角测量转换，就可以将视差图转换为深度值。图像中的每个像素点转换后的图像即为景深图。(5) 三维坐标：通过坐标转换得到物理坐标系下的障碍物的三维坐标。(6) 通过景深图检测障碍物的深度，通过栅格法得到障碍物与摄像头光心的方向。

设 A 为双目视觉传感器得到的图像景深图，景深即距离障碍物的深度；在 A 中建立系统直角坐标系，以图像的左上角为坐标原点，以横向为 X 轴，纵向为 Y 轴，则最大值 x_{max}, y_{max} 。以 R 为步长对 A 图进行划分，由此形成一个栅格。每行的栅格数 $N_x = x_{max}/R$ ；每列的栅格数 $N_y = y_{max}/R$ 。所谓栅格法^[15-16]是给整个景深图建立栅格索引，如图 4 所示，使得每个像素点都包含在某一个栅格中。

建立栅格索引之后，开始遍历图像景深图。首先判断栅格内像素点的深度是否为零，若不为零，判断与阈值之

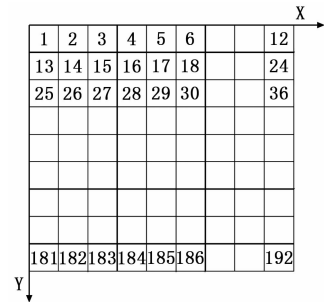


图 4 栅格坐标与序号关系

间的大小（所谓阈值就是事先定义好的一个距离）。如果存在大于阈值的深度，则记录下该像素点所在的栅格索引。其次，遍历图像过程中记录下每个栅格里符合要求的像素点个数，计算栅格里的平均深度。最终，根据邻近栅格决定是否进行合并。约束条件是栅格的邻近 8 个栅格是否都有深度值。由此，得到了最终的障碍物的深度和方向。

2.2 毫米波雷达

毫米波雷达传感器是指工作在毫米波波段的雷达，工作频率通常在 30~300 GHz 范围内，相比与红外、激光等传感器具有较强的穿透灰尘、烟雾的能力，以及较强的抗干扰能力。由于毫米波雷达体积小、分辨率高、功耗低等特点，满足中小型无人机对体积功耗的要求，可以用来检测无人机机头方向障碍物距离和相对运动速度。可以根据应用需求同步安装一个或多个毫米波雷达，达到检测多方向障碍物的目的。

毫米波雷达传感器通过 UART 接口把数据实时传递给 STM32 电路板，目标刷新率为 50 Hz。电路板对障碍物进行数据处理后，诊断是否有障碍物并分析障碍物信息，再将信息传递给电脑棒。毫米波雷达在工作过程中，向周围发射低功率电磁波束，捕获回波信号计算障碍物的距离。电脑棒制定避障策略从而引导无人机飞行控制系统快速做出调整飞行方向的决策。

3 无人机避障航迹规划算法

虚拟力场法 (virtual force field method, VFF) 是一种实时性非常好的局部避障算法^[17-18]，其基本思想是构造目标方位的引力场和障碍物周围的斥力场，两者共同作用形成虚拟的人工力场，搜索势函数的下降方向来寻找无碰撞路径，最终使多旋翼无人机沿着合力方向运动^[19]。VFF 算法使用栅格来表示环境，同时使用力场法对多旋翼无人机进行局部避障控制。假设障碍物会对无人机施加一定的排斥力，用 $repulse(x, y)$ 来表示，目标点会对无人机产生一定的吸引力，用 $attract(x, y)$ 来表示，它们的合力决定了无人机行进的方向。这里用球形坐标表示目标点、障碍物与无人机之间的空间关系。设目标点的坐标为 $target(\theta, \varphi, r)$ ，障碍物的坐标为 $obstacle(\theta, \varphi, r)$ ，吸引力和排斥力的相关公式如下：

$$Attract.x = K * \theta_t * (e^{(-c1 * r)} + c2) \quad (1)$$

$$Attract.y = K * \varphi_t * (e^{(-c1 * r)} + c2) \quad (2)$$

式中, $K, c1, c2$ 均表示系数, θ_t 为目标点坐标的 θ 值, φ_t 为目标点坐标的 φ 值。

$$Repulse.x = -k_0 * sign(\theta_o) * \frac{1}{1 + e^{-(s1 * (1.0 - |\varphi_o|) / 2)}} * e^{(-c3 * r_o)} * e^{(-c4 * |\theta_o|)} \quad (3)$$

$$Repulse.y = -k_0 * sign(\varphi_o) * \frac{1}{1 + e^{-(t1 * (1.0 - |\theta_o|) / 2)}} * e^{(-c3 * r_o)} * e^{(-c4 * |\varphi_o|)} \quad (4)$$

式中, $K_0, c3, c4, s1, s2, t1, t2$ 均表示系数, θ_o 为障碍物坐标的 θ 值, φ_o 为障碍物坐标的 φ 值。

吸引力 and 排斥力的合力 $rate(x, y)$ 如下:

$$rate.x = Attract.x + Repulse.x \quad (5)$$

$$rate.y = Attract.y + Repulse.y \quad (6)$$

设多旋翼无人机当前点为 $view_dir(x, y, z)$, 躲避障碍物时航迹重规划, 则新的航迹目标点为 $new_waypoint(x, y, z)$ 。

$$mw.x = vd.x * \cos(rate.x) - vd.y * \sin(rate.x) \quad (7)$$

$$mw.y = vd.x * \sin(rate.x) - vd.y * \cos(rate.x) \quad (8)$$

$$mw.z = 0 \quad (9)$$

式中 $(nw.x, nw.y, nw.z)$ 表示生成的新的航迹点, $(vd.x, vd.y, vd.z)$ 表示当前点。

在遇到障碍物时, 采用虚拟力场法得到新的目标点, 避开该障碍物以后再回归到原航点。由于毫米波雷达检测的距离较远, 在距离 12 m 的时候飞控控制无人机开始减速, 等到 6m 时双目视觉可以检测到障碍物信息, 此时无人机开始避障绕行。

4 实验结果与分析

4.1 实验步骤和方法

图 5 是飞行实验所用的多旋翼无人机, 安装了毫米波雷达、guidance 双目视觉模块、差分 gps 天线、intel 电脑棒等, 轴距为 1.2 m, 空机重量为 6kg。guidance 双目视觉模块输出的图像大小为 $320 * 240$, 即 $x_{max} = 240, y_{max} = 320$, 选择的步长 $R = 20$ 。



图 5 多旋翼无人机

实验步骤如下:

- 1) 检查飞机状态确保各连接处连接可靠无松动。
- 2) 安装电脑棒, 选择 6 s 电池给电脑棒供电, 由于电压不匹配, 选择电源板对电压及电流进行转换。电脑棒与 guidance 进行连接。基于 opencv 的图像采集处理程序 exe 文件安装在电脑棒里, 设置为自启动模式。
- 3) 连接飞控与地面站软件, 启动 flightgear 软件, 首

先对自主避障程序进行半实物仿真, 以验证自主避障算法是否准确, 以及控制策略是否符合逻辑。

4) 执行完步骤 3 后, 将飞控安装在飞机平台上, 电池通电, 等待飞机自检通过。

5) 规划飞机航迹点, 2 个航迹点 1 点及 2 点分别位于杆塔的两侧。通过遥控器解锁电机, 电机怠速旋转, 轻推油门至中间位置。

6) 缓慢控制飞机推近杆塔。设定无人机减速的距离阈值为 12 m, 执行避障的距离阈值为 6 m, 当毫米波雷达及视觉模块检测到障碍物时, 会自主执行避障策略;

8) 重复进行上述过程 20 次, 记录 20 组测试数据;

有风速大于 5 m/s 的环境下, 风向会对飞机的避障产生一定影响, 需时刻关注电池电压, 一旦电量过低飞机必须降落, 防止出现摔机风险。

4.2 实验数据及结果分析

飞行前多旋翼无人机位于 home 点, 起飞后首先飞至 1 点、再飞向 2 点目标点, 飞行实验的航迹如图 7 所示。白色直线为飞行前规划的航迹点, 在这种情况下, 如果 1 点和 2 点没有杆塔或者其它障碍物, 多旋翼无人机应该直线飞行, 最终到达 2 点目标点。由于飞行的航迹中存在杆塔这个障碍物, 因此多旋翼无人机在飞行过程中自主进行避障, 黑色曲线为实际飞行的航迹点。

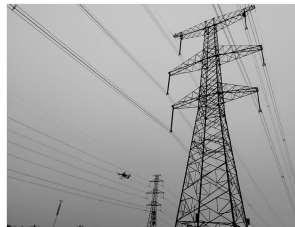


图 6 飞行实验

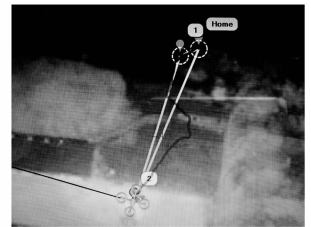


图 7 避障航迹对比

实验结果表明, 自主避障模块可以实现对多旋翼无人机前向环境信息的实时采集, 多旋翼无人机通过融合毫米波雷达及双目视觉传感器检测的障碍物信息, 在飞行过程中实时的对杆塔进行自主避障, 最终绕过杆塔这个障碍物到达了目标航点。

5 结束语

本文针对传统无人机避障传感器单一、适应性差的问题, 提出了一种基于多传感器的多旋翼无人机自主实时的避障方法。方法中结合毫米波雷达检测的障碍物信息及双目视觉传感器栅格法检测的障碍物信息, 采用虚拟力场法对杆塔实现了避障, 能满足多种条件下的避障需求, 例如树木、建筑物、杆塔等。实验证明该避障方法可实现无人机自主避障。但是, 在无人机巡检过程中, 除了树木、杆塔, 还有交叉线缆, 由于小型的毫米波雷达传感器并不能保证完全识别细小的导线, 视觉传感器检测障碍物的距离又较短, 因此如何采用多传感器识别导线实现无人机避障, 还有待进一步研究。

(下转第 287 页)