「巡线」

基于三维路径规划的旋翼无人机避障技术

文/中国南方电网有限责任公司超高压输电公司柳州局　周经中　阳仁庆　向兰仕

提出了一个多旋翼无人机在未知环境巡线查找物件故障的综合导航技术。D Lite和概率地图相结合的路径规划，结合立体视觉的障碍物检测和动态路径更新。三维占用图用于表示环境，并使用立体声数据在线更新。应用目标是自主结构检查，它要求无人机安全地接近正在检测的物体。仿真结果和实际飞行硬件安装在一个电缆阵列机器人内，显示导航过程中未知环境所包含的障碍物。*

无人机的使用越来越广泛，人们正在进一步推动无人机在民用领域的应用，特别是对电力线、管道、冷却塔和桥梁等结构的检查。在应用无人机之前，我们用载人直升机对电力线路进行检查，这是一项花费高昂并且危险性较高的工作。我们利用现有的技术，遥感、地图构建和路径规划等，寻找一种能够在未知环境下结合旋翼无人机三维导航技术的新方法。本文描述了我们如何集成这些技术以得到适用电网实际工作环境的无人机相关技术。

简介

在实际无人机巡线场景中，无人机被要求接近其所检查的结构，因此会有碰撞危险。对于无人机飞手视线以外的检查，这个问题尤其困难，比如长输电线检查时就会有这个问题。

我们利用立体视觉技术来检测障碍物，以建立一个三维地图。路径规划使用概率地图（PRMS）与D*Lite来搜索无碰撞的最短路径。根据占用地图中存储的信息更新路线图。

下面我们回顾了这方面的相关工作；详细介绍了基于立体视觉的占用映射技术；概述了路径规划技术；给出了试验结果和结论。

相关工作

无人机障碍物检测与规避技术近年来得到了广泛的研究，许多相关技术被提出。光流的使用已经被提出来，并已被证明是有效的反应性避障。它的主要缺点是摄像机产生时流场对于平移运动的依赖，因此不能用于旋翼无人机悬停或缓慢移动。此外，这种技术不能产生绝对距离测量，因此不适用于无人机悬停时的结构检测应用，需要对所检测的结构进行精确的距离测量。

同样，渡边利用单目视觉产生一个旋翼无人机的避障视觉印象深刻的模拟结果的方法。如果摄像机的运动是已知的，交叉矩阵结构（SFM）可以用来衡量一个场景深度。运动预测中的小错误会导致大范围的错误。对于固定翼无人机，在稳定飞行时，用惯性传感器测量摄像机运动是可行的，因为运动基本上受限于一维空间。当摄像机的运动是可以不受约束的时候，这就不再是归属于旋翼无人机的问题。艾尔提出了一种基于运动的无人机避障方法，并给出了三维仿真结果。虽然他们假定摄像机运动是已知的，但由于匹配错过匹配，仍会产生较大范围的读数误差。

基于障碍物检测和直升机旋翼无人机动态规划激光测距结果是由Scherer等人提出的。在这两种情况下，雅马哈r－max无人机的使用，能够

提升该类型传感器。我们提出了基于立体视觉的障碍物检测方法的使用，并在后面列出了它的几个优势，立体视觉在使用小型无人机激光测距仪（重量、功率效率等），也有一些使用这种技术的挑战。立体视觉技术先前已被用于旋翼无人机高度和运动估计，检测安全着陆场，地形测绘和避障。总的来说，它提供了小型无人机不能携带重型激光测距避障情况下最合适的解决方案，但仍然需要在基于环境特征的绝对距离内测量。

无人机的三维路径规划问题已解决。此外，无人机的运动规划问题也已被解决。对于检测应用程序，无人机通常在获取检测图像时以低速飞行或悬停。因此，我们不讨论进行侵略性演习或高速飞行的问题。同时，由于直升机可以悬停转弯的地方，它可以按点对点式轨迹规划完整的飞行路线。

从这个简短的文献回顾中，我们看到许多技术已经被开发出来，以解决未知环境中无人机安全导航所需的技术。我们精心挑选其中的部分技术作为基础，提供我们认为对于无人机电力线巡检最适合的技术解决方案。

基于立体视觉的占用映射

立体视觉的优点是使用无源传感器，相对于扫描激光器而言，它更轻便、省电、便宜。此外，照相机没有扫描激光中发现的灵敏反射镜和光学元件，因此对振动和冲击更具鲁棒性。然而，立体技术依赖于场景中足够的纹理和光照来进行相关匹配。同时，测距精度也随摄像机距离等比减小，立体视觉被广泛应用于地面机器人障碍物检测。他们发现，用320×240像素的图像分辨率与30 cm基线立体系统能够检测到25 m以外的狭窄PVC管，和20 m外的灌木。这种性能是足够应对电力线检查任务的。

路径规划

路径规划允许无人机在未知环境中找到到达目标的潜在路径。如果环境是无障碍的，那么规划的路径将只是从开始到目标的一条直线。当获得关于环境中障碍物的信息，对路径进行修改，以确保其保持无碰撞。我们在环境中建立一个概率图（PRM），然后使用D*Lite算法应用于初始路径的规划以及在被立体声系统检测到故障后系统不断更新出的新路径中。

1. 概率路线图规划

一个概率路线图规划程序由两个阶段组成：首先，路线图是从环境空间随机抽取样点建立的，如果它们之间存在无碰撞路径，则将它们连接到相邻点。目标点被添加到路线图中，然后在查询阶段，通过路线图从开始到目标找到路径。由于路线图是一个图形，传统的图搜索技术如A*算法可以用来寻找路径。构建图表可能是一项花费较大的操作，但是一旦构建，它就可以用于比较经济的多个查询。如果环境发生变化（例如检测到一个新的障碍），则必须重新运行查询，以确保路径仍然是无冲突的。在这种情况下，使用A*算法是低效的，因为必须重复整个查询。更高效的技术已被开发，只需要重新规划路径的一部分区域。D*Lite是这些技术之一。我们选择了一个用于规划查询和更新的技术，因为它比以前的技术更容易实现。

首先用D*Lite规划初始路径，然后平滑地消除不必要的中间点，D*Lite用于修改路径。当无人机在某一特定点周围时，接下来就可出发。如前所述，我们假设直升机可以飞到点并按照这些计划的路径做完整的巡线。

由于我们使用的是一个规则的三维栅格来表示占用地图的环境，所以在这个基于网格的表达中直接执行路径规划似乎是合乎逻辑的。路径规划在很大程度上依赖于搜索。

然而，通过状态空间使用三维占用图，状态空间的大小会严重影响搜索速度。采用像PRMs一样的随机规划方法可以使维度问题减少。如果需要增加更多的采样点，同时减少它们之间的最大距离，可以生成更精细的分辨率路线图。最终，设计者必须在分辨率和复杂度之间做出选择。

2. 基于立体规划

有一个常规的基于网格的环境表达和路径规划的随机抽样表达会带来额外的复杂性，因为在测试无冲突路径并评估路线图是否需要更新时，必须从一个表达转换到另一个表达。

试验结果

我们进行了大量的试验来评估这种合成技术在未知环境中导航的有效性。试验分别使用露台环境模拟软件进行模拟仿真，以及对CSIRO飞行器模拟器缆机器人。

1.软件仿真结果

软件仿真试验，在一个虚拟的三维环境5 m×8 m×10 m中进行。环境（如图1所示）包含3个极为相似的障碍物，一个1.5 m高的墙和一个大的矩形障碍物。这种环境代表了短程电力线路检查可能遇到的一种情况。

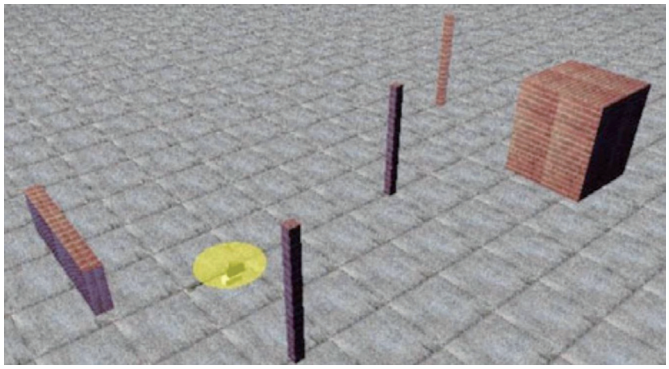

图 1

为了在模拟环境中测试我们的导航技术，我们使用了三种不同的起点和终点位置对，每对三个试验运行，总共提供27次运行。无人驾驶飞机的任务是规划一条通往目标的路线，然后飞向目标，同时避开沿途的障碍物。建立了一个路线图，在0.1～1.3 m之间建立3 000个点。路线规划程序在2.4 GHz奔腾D型PC上花了146.9 s规划初始路线，并且此后每一次重新规划平均用时0.4 s。

2. 航空模拟器的结果

AVS是一个工作空间10 m×5 m×5 m的线阵列机器人。它可以通过位置或速度指令移动20 kg负载，在它被真正应用于无人机之前，以闭环的方式用于评估硬件、软件和算法。由于AVS工作区的大小是有限的，环境的特点是缩小这些因素，并将AVS的速度适当减少（限速0.1 m/s）。

我们评估了基于AVS的立体声的导航技术，然后在我们的微型直升机平台上进行测试，因为当时直升机不能自主飞行。我们拆除了直升机的航空电子箱和立体声对，并将它们安装到一个可以由AVS暂停的帧。这种飞行硬件与基于 AVS试验所使用硬件相同，将被用在真正的无人机上。状态预测使用扩展卡尔曼滤波器的IMU数据作为输入，而位置和速度信息的读取则来自AVS摇柄控制计算机。

两个缩放的电线杆和一个立方体被放置在环境中作为障碍物，AVS负责在每个起点和目标位置之间规划路径，以便在检测障碍物和动态更新计划路径时贯穿工作区的长度。所提出的技术不太适合于检测电力线的细物体，所以在这个试验中并没有涉及电源杆的电线串。显然，在执行检查任务时，无人机将需要检测电力线，因此我们将在将来利用基于视觉的技术来解决这个问题，这些技术是专门用来检测它们的。没有给定的环境的先验知识，也就是说，它被假定为无障碍。随着初期路线更可能与障碍物相撞，更深入的动态重新规划是被允许的。对于一个真正的检验任务，然而，任何关于电线或其他障碍物位置的信息都会出现在地图上以确保最初的路径绕过它们。

结论和日后工作

一种使旋翼无人机安全地在电力线检查等未知环境中探测障碍物的组合方法已被提出，我们将概率路线图和路径规划的D*Lite技术与基于立体动态规划的占用映射相结合。这种组合允许一个低分辨率的规划图搭配高分辨率的栅格地图来使用，从而减少规划的状态空间和规划成本。在仿真和电缆阵列机器人上的试验表明，为了达到目标位置，可以检测和避免诸如电线杆等障碍物。然而，在实际的检验任务中，我们需要进一步改进和完善，以使其更加实用。这些试验强调了保持立体相机沿着速度矢量避免碰撞的必要性，这是我们将来将要实现的一个改进。我们承认，3D占用的地图是一个很有代表性的内存密集型环境，在未来将探讨对其更有效的使用。由于立体技术是不可能检测到如电源线那样细的障碍物的，我们打算将它与其他的专为电力线检测设计的视觉技术相结合，以使得这项技术为电网的巡线工作做出更多实际贡献。**EA**

（收稿日期：2017.10.30）
（编辑：白文亭）