

仿生扑翼飞行器的视觉感知系统研究进展

付 强^{1,2)}, 陈向阳¹⁾, 郑子亮¹⁾, 李 擎^{1,2)}, 贺 威^{1,2)}✉

1) 北京科技大学自动化学院, 北京 100083 2) 北京科技大学人工智能研究院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: weihe@iecc.org

摘 要 仿生扑翼飞行器是一类模仿鸟及昆虫通过机翼主动运动产生升力和推力的飞行器。因具有飞行效率高, 机动性强、隐蔽性好等优点, 扑翼飞行器近年来受到越来越多的关注和研究。小型扑翼飞行器由于其精巧的结构和可操作性, 能够适应更复杂的环境, 但也限制了其飞行负载能力和电池续航时间。在许多场景中, 高质量和高功耗的传感器不再适用于扑翼飞行器。自然界生物得到的信息绝大多数是通过视觉途径获取的。视觉作为一个获取信息的有效途径, 在扑翼飞行器的应用中有着不可替代的作用。视觉传感器具有质量轻、功耗低、图像信息丰富等优点, 因此非常适合于搭载在扑翼飞行器上。随着微电子、图像处理等技术的不断发展, 以扑翼飞行器为平台的视觉感知系统也取得了重要进展。本文首先介绍了国内外几款有代表性的扑翼飞行器的视觉感知系统, 分为机载视觉感知系统和外部视觉感知系统两类; 然后简述了三个系统关键技术即图像消抖技术、目标检测与识别技术、目标跟踪技术的发展现状, 进而总结发现扑翼飞行器的视觉感知系统研究目前还处于起步阶段; 最后指出图像消抖、机载实时处理、目标检测与识别、三维重建等可以作为扑翼飞行器视觉感知系统的未来研究方向。

关键词 扑翼飞行器; 视觉感知; 图像消抖; 目标检测; 目标跟踪

分类号 TP242.6

Research progress on visual perception system of bionic flapping-wing aerial vehicles

FU Qiang^{1,2)}, CHEN Xiang-yang¹⁾, ZHENG Zi-liang¹⁾, LI Qing^{1,2)}, HE Wei^{1,2)}✉

1) School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: weihe@iecc.org

ABSTRACT The bionic flapping-wing aerial vehicle (FWAV) is a kind of aerial vehicle that imitates birds and insects and generates lift and thrust forces using active wing movement. Given its advantages, such as high flight efficiency, strong maneuverability, and good imperceptibility, FWAVs have attracted considerable attention from researchers in recent years. Given its compact structure and easy operation, the small FWAV can adapt itself to complex environments. However, some restrictions are also imposed on its onboard load capacity and battery endurance time. That is, sensors with large weight and high power consumption are no longer suitable for FWAVs in many scenarios. To the best of our knowledge, most of the information obtained by organisms from nature is acquired through vision. As an efficient way to obtain information, vision plays an irreplaceable role in the application of FWAVs. Vision sensors have many advantages, such as light weight, low power consumption, and rich image information. Therefore, these sensors are suitable for FWAVs. With the development of microelectronics and image processing technologies, visual perception systems of the FWAV have also made important progress. First, this study introduces the visual perception system of several representative FWAVs at home and abroad, which can be classified into two categories, i.e., onboard and off-board visual perception systems. Then, this study briefly reviews three key technologies of the visual perception system of FWAVs, namely, image stabilization, object detection and recognition, and object tracking technologies. As a result, research on the visual perception system of FWAVs is still at the initial stage. Finally, this study

收稿日期: 2019-03-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1300102); 国家自然科学基金青年基金资助项目(61803025)

provides the future research directions of the visual perception system of FWAVs, such as image stabilization, onboard real-time processing, object detection and recognition, and three-dimensional reconstruction.

KEY WORDS flapping-wing aerial vehicle; visual perception; image stabilization; object detection; object tracking

扑翼飞行器具有仿生的外形, 早期在军事侦察领域受到一定的关注, 具有非常大的军事价值^[1]. 在工业界、政府和军队的不断推动下, 扑翼飞行器经历了一段快速发展的时期. 相比于旋翼飞行器和固定翼飞行器, 扑翼飞行器具有较高的飞行效率^[2], 而且扑翼飞行器飞行时的噪音相比于另外两者而言几乎可以忽略不计, 其仿生的外形在执行侦察任务时也具有得天独厚的优势. 在旋翼飞行器和固定翼飞行器大放异彩的今天, 扑翼飞行器也在朝着相似的方向不断发展, 即智能化. 视觉是实现智能化不可缺少的手段, 相较于其他传感器而言, 视觉传感器能够获取的信息非常丰富. 因此, 为扑翼飞行器装上一双“眼睛”是扑翼飞行器能够跃上新的发展阶段不可缺少的一环.

由于飞行机制相较于其他无人飞行器有所不同, 扑翼飞行器可以做到很小的尺寸, 同时在室内飞行的能力允许扑翼飞行器执行人类不能做的任务. 对于一些较为危险的地方, 例如即将倒塌的建筑物, 扑翼飞行器可以充分利用其灵活的飞行方式进行侦察, 也可以对敌方的领土进行侦察. 但是由于扑翼飞行器的尺寸较小, 载荷量较低, 难以搭载较为先进的传感器以及应对计算量较大的视觉信息处理, 进而导致采用视觉传感器较难完成预定的任务. 然而, 一些学者另辟蹊径, 通过其他途径成功实现了一些视觉任务.

本文组织结构如下: 第1部分列举了目前较为典型的扑翼飞行器视觉感知系统的基本概况、原理以及其优缺点; 第2部分介绍了视觉感知系统中的关键技术; 第3部分归纳总结了扑翼飞行器视觉感知系统现阶段的不足及未来的发展方向; 第4部分为论文的总结.

1 扑翼飞行器视觉感知系统的概况

1.1 机载视觉感知系统

1.1.1 DelFly II

荷兰代尔夫特理工大学的 DelFly II^[3], 包含一个机载立体视觉感知系统(如图1所示). 该系统包括两个以 30 Hz 同步运行的采用互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)图像传感器的摄像头(分辨率为 720×240 像素). 由于系统只有一个发射器, 两个摄像头的视频流

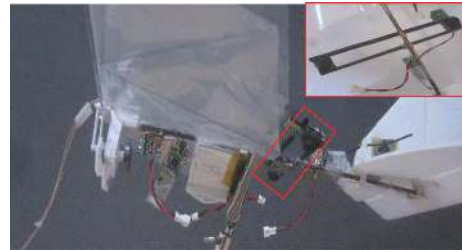


图1 DelFly II 扑翼飞行器及立体视觉感知系统

Fig.1 DelFly II flapping-wing aerial vehicle and stereo visual perception system

合并为一个, 由来自左右摄像头的图像线交替组成^[4].

在 72 s 的飞行实验中, DelFly II 多次成功地避开了室内办公空间 7.3×8.2 m² 的墙壁. 相比于单目视觉解决方案有了相当大的改进, 甚至可以对低纹理白墙进行合理的障碍物检测. 实验清楚地展示了立体视觉用于扑翼飞行器自主避障的潜力.

结合现有的速度和高度控制方法, 该系统使扑翼飞行器完全自主控制成为可能. 但是该扑翼机续航时间较短, 且该视觉感知系统成像质量很差, 测量距离仅为 4 m, 误差达到了 30 cm, 只能应用于简单的避障任务中, 不能胜任较为复杂的任务, 这需要在未来的研究中继续改进.

1.1.2 X 翼型扑翼机

韩国首尔大学的 Seungwan Ryu 等人改装了一款已经商用的 X 翼型扑翼机^[5](如图2所示), 为其配备了轻量级的第一人称视角(first person view, FPV)摄像头. 这款扑翼飞行器能够实现基本的目标跟踪功能. Seungwan Ryu 等人为其构建了一个控制和视觉算法集成的系统, 该系统的地面站部分(如图3所示)由视频转换单元、运动捕捉系统和地面控制系统(ground control system, GCS)组成.

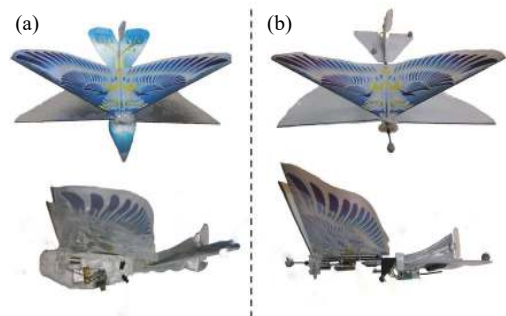


图2 修改过的 X 翼扑翼机的实验平台. (a) 原始模型; (b) 修改模型
Fig.2 Experimental platform of modified X-wing FWAV: (a) original model; (b) modified model

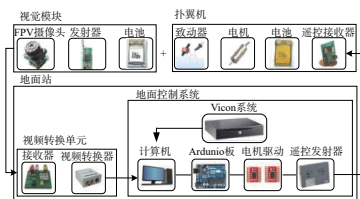


图 3 X翼扑翼飞行器与地面站的集成架构

Fig.3 Integration architecture of the X-wing FWAV platform with ground station

该视觉感知系统有很多优点. 首先, 可以通过与地面站的通信实时查看飞行器拍摄的图像. 其次, 将复杂的图像处理移至地面站进行. 此外, 将视觉检测算法应用到 FPV 摄像头拍摄的图像上来检测静态目标. 实验结果也验证了这套视觉感知系统的目标检测和跟踪功能达到了令人满意的性能. 但是它使用的轻量级第一人称主视角摄像头依然存在成像质量较差的问题, 同时其使用的图传系统传输距离较短难以实现远距离的目标跟踪. 此外, 对动态目标检测功能的缺失使其实用性不高.

1.1.3 Dove

国内西北工业大学宋笔锋教授团队研发了一款名为 Dove 的扑翼飞行器^[6](如图 4 所示). Dove 机载摄像头使用 OV7725 感光器, 可以将现场稳定的彩色视频传输到 4 km 以外的地面站.

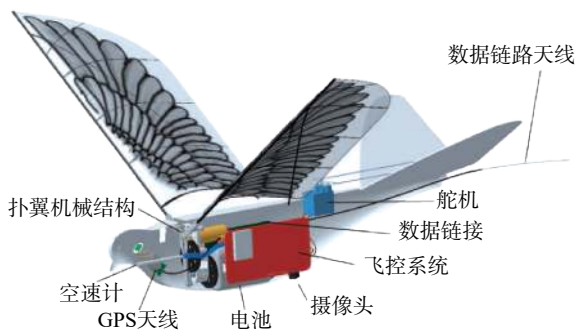


图 4 Dove 的结构图

Fig.4 Structure of Dove

Dove 的视觉感知系统是由一个微型彩色摄像机和图像处理单元相结合的数字数据链子系统组成. 数字数据链子系统用于执行可靠的数字通信, 以此来传输远程控制命令、遥测数据以及视频流数据. 经过实验验证, Dove 已经具备了一定的执行视觉任务的能力, 不仅飞行时长长达 30 min, 视频传输距离也达到了 4 km 以上. 但 Dove 的视觉感知系统的功能目前还仅限于航拍, 功能还较为单一, 仍有广阔的发展空间.

1.2 外部视觉感知系统

1.2.1 BinoicFlyingFox

德国 Festo 公司的 BinoicFlyingFox(如图 5 所

示)仿照蝙蝠的外形, 并以技术手段模拟了它独特的飞行模式^[7]. 通过一个外置运动捕捉系统, BinoicFlyingFox 能够在特定空间内进行半自主飞行. 这套运动捕捉系统主要由两台红外相机组成, 如图 5 所示. 通过与运动捕捉系统相互配合, BinoicFlyingFox 的整个飞行过程都能够被实时捕捉. 主机会对 BinoicFlyingFox 的运动路径进行实时计算, 预先确定下一时刻的飞行轨迹. 主机能对算法进行学习, 同时这套算法也能通过自主学习被不断改进. 通过运动捕捉系统, BinoicFlyingFox 可在飞行中不断地优化飞行轨迹, 更精准地沿着既定轨迹进行绕圈飞行.



图 5 BinoicFlyingFox 与外部红外相机系统

Fig.5 BinoicFlyingFox and off-board infrared camera system

BinoicFlyingFox 具有十分优秀的飞行能力, 且 BinoicFlyingFox 的外观与自然界的蝙蝠十分相似, 具有良好的仿生性. 然而 BinoicFlyingFox 使用的红外相机场景信息还原性较差, 由于没有机载摄像头, 视觉应用的场景较为单一^[8].

1.2.2 H2Bird

美国加州大学伯克利分校 Julian 等人开发了一款名为 H2Bird 的扑翼飞行器^[9](如图 6 所示), 针对该扑翼机开发了一个地面站. H2Bird 的板载控制器携带一个采用视频图形阵列(video graphics array, VGA)接口的摄像头. 在常规飞行中, H2Bird 的平均地面速度为 1.2 m·s⁻¹, 飞行时间约为 10 min.

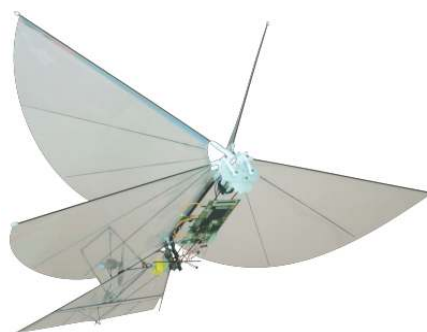


图 6 H2Bird 扑翼机

Fig.6 H2Bird ornithopter MAV

地面站使用基于粒子滤波的运动跟踪算法^[10]配合机载的采用视频图形阵列接口的摄像头及地面摄像头对 H2Bird 进行简单的二维姿态估计. 整个协作系统如图 7 所示. 在实际飞行实验中, H2Bird 与地面站配合实现了飞跃窗口等动作, 并使用计算机视觉技术成功完成了目标搜索任务, 为扑翼飞行器提供航向估计.

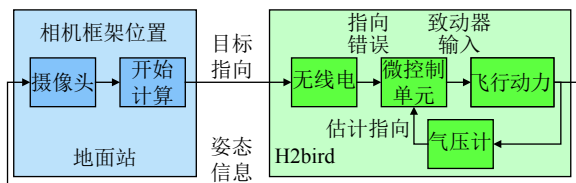


图 7 H2Bird 的协同控制系统

Fig.7 Cooperative control system of H2Bird

Julian 为整个协作系统开发了一个动力学模型来确定真实系统的模型参数, 并使用狭窄通道飞行实验来验证了这个模型. 该模型准确地预测了 H2Bird 的飞行路径, 使其成功飞过了狭窄的通道. 这种建模方法可用于以低计算成本预测协作系统的性能, 即使缺乏关于扑翼飞行器完整的姿态信息, 此模型也可用于确定何时开始控制具有较高的成功率. 但是这种控制系统的实用性还有待进一步提高.

1.2.3 哈佛仿昆虫飞行器

哈佛微机器人实验室 Rosen 等研发了一种新型仿昆虫扑翼微型飞行器^[11](如图 8 所示). 这款扑翼飞行器的重量仅为 3.2 g, 翼展为 16 cm. Rosen 等利用 Vicon 搭建了一套视觉运动捕捉系统(如图 9 所示), 扑翼飞行器在十个 Vicon T 系列摄像机的运动捕捉区域中飞行. 在实验中, 扑翼飞行器能够进行一系列稳定飞行. 飞行的数据被 Vicon 系统、高速摄像机和机载传感器同时捕获^[12].

这套基于视觉的运动捕捉系统, 在研究扑翼

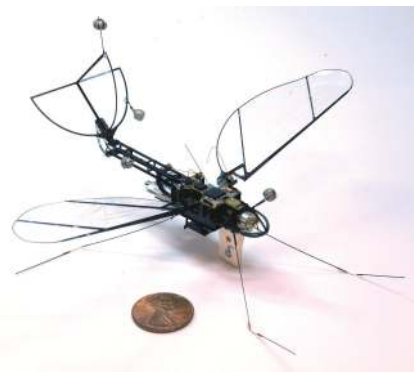


图 8 哈佛仿昆虫飞行器

Fig.8 Insect-scale flapping-wing aerial vehicle by Harvard

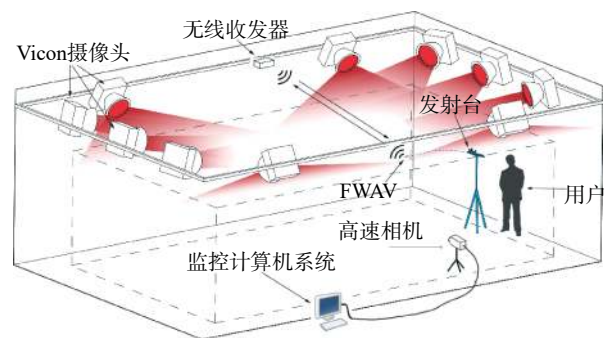


图 9 仿昆虫飞行器的 Vicon 运动捕捉系统

Fig.9 Vicon motion capture system of insect-scale flapping-wing aerial vehicle

飞行器的推力产生、空气动力学特性和飞行性能等方面具有非常大的价值. 另一方面, 目前面向扑翼飞行器的建模研究还处于起步阶段, 这套运动捕捉系统对扑翼飞行器建模领域具有重要的意义^[13].

从上面的描述和表 1 可以看出, 目前以扑翼飞行器为平台的视觉感知系统功能还相对单一, 对于在旋翼和固定翼飞行器平台上应用较为成熟的目标跟踪、导航定位等实用性较高的视觉功能, 扑翼飞行器仍未大规模使用.

表 1 视觉感知系统对比

Table 1 Comparison of visual perception systems

系统平台	制作单位	种类	摄像头数量	消抖	跟踪
DelFly II	Delft	机载	双目	有	无
X翼扑翼机	首尔大学	机载+外部	单目+地面Vicon系统	无	有
Dove	西北工业大学	机载	单目	有	无
BinoicFlyingFox	Festo	外部	双红外镜头	无	无
H2Bird	UC Berkeley	外部	单目	无	无
仿昆虫飞行器	哈佛大学	外部	10个Vicon摄像头	无	无

2 系统关键技术

2.1 图像消抖技术

无人机在飞行过程中, 由于驱动结构的高速

运转, 不可避免地会有一定程度的振动. 尤其是扑翼飞行器采用扑动翅膀来产生升力的飞行机制, 会产生十分强烈的振动. 这就造成了机载摄像头

拍摄出来的视频会有抖动^[14]。想要获得清晰稳定的航拍图像, 消抖是其中重要的一环。目前采用云台消抖和图像算法消抖已经成为主流的手段。

无人机在飞行过程中, 如果向某一角度倾斜时, 陀螺仪捕捉到这个变化后会利用算法加强倾斜角度方向的动力, 通过补偿使无人机恢复平衡^[15]。无人机机载云台正是利用了类似的原理^[16]。一般无人机云台都能满足相机活动的三个自由度: 绕 X、Y、Z 轴旋转, 每个轴心内都安装有电机或者舵机。如图 10 所示为国内生产的一款微型机载云台, 重量只有 30 g 左右。当无人机倾斜时, 控制系统会配合陀螺仪给相应的云台舵机发出信息以加强反方向的动力^[17], 防止相机跟着无人机“倾斜”, 从而避免相机剧烈抖动。



图 10 微型机载云台

Fig.10 Miniature onboard pan-tilt

电子稳像算法的过程就是通过对系统捕捉到的视频进行运动补偿^[18], 之后输出补偿过的视频。通过这种补偿方法, 能够在一定程度上消除抖动^[19]。视频图像消抖的方法一般是通过相邻两帧图像的信息计算出一个全局运动参数, 之后对全局运动参数进行滤波操作来达到消除抖动的效果。如何通过相邻两帧的信息得到全局运动参数是视频消抖的关键^[20]。

目前针对旋翼和固定翼飞行器已经有很多成熟的消抖算法。例如, 西班牙加泰罗尼亚理工大学 Aguilar 与 Angulo 提出了一种新的视频稳定方法, 可以实时使用而不会产生错误的运动, 采用几何变换和拒绝异常值的组合来获得帧间运动估计^[21]。新加坡国立大学 Lim 等设计了一个适用于无人机全局运动的模型并提出了一种新的稳像算法, 以解决无人机的实时视频稳定问题^[22]。如今面向扑翼飞行器的消抖算法较少, 国内西北工业大学为其 Dove 扑翼飞行器设计了一款图像消抖软件, 可以在地面站计算机上实时运行^[6], 进行图像的消抖处理。机载摄像头拍摄的图像清晰可辨(如图 11 所示), 消除了抖动飞行引起的大部分图像抖动问

题, 消抖算法在完成航拍及其它任务中起着至关重要的作用。



图 11 Dove 的机载摄像头捕获的图像

Fig.11 Image captured by the onboard camera of Dove

扑翼机要获得清晰的航拍图像, 消抖是迫切需要解决的问题。对于扑翼机突然变化飞行动作, 硬件消抖主要能够对机载相机拍摄图像起着缓冲的作用, 保证相机的平缓拍摄。后期算法的消抖, 主要是对飞行器自身规律的飞行动作进行图像的消抖处理^[23]。通过硬件上缓解相机的抖动和图像后期算法的消抖处理, 有望得到理想的航拍图像。

2.2 目标检测与识别技术

当下旋翼飞行器和固定翼飞行器的快速发展, 使无人机对地面目标检测和识别技术成为研究的热点^[24]。传统的基于图像特征的视觉检测算法由于其速度快的优点, 在无人机领域应用较多。随着人工智能的兴起, 计算机视觉得到了极大的发展, 涌现出了许多优秀的目标检测算法^[25], 基于深度学习的目标检测算法也逐渐在无人机领域应用开来^[26]。

目前的目标检测与识别技术在旋翼和固定翼飞行器平台应用较多。例如, 亚利桑那大学 Minacian 团队提出了一种新的基于视觉的目标检测和定位系统, 充分利用了无人机和无人车协同作战的能力^[27]。澳大利亚新南威尔士大学 Lin 等设计了一种新的视觉感知系统, 将目标的边缘信息用于线段检测, 特征点映射和聚类, 然后将级联滤波方案应用于目标识别^[28]。对于扑翼飞行器, 目标检测与识别技术应用较少。加州大学伯克利分校 Baek 等利用小型 X 翼扑翼机及摄像头实现了扑翼飞行器自主飞向指定目标的功能^[29]。利用机载视觉传感器等检测目标的位置信息, 同时利用机载处理器实现对扑翼飞行器的控制。Baek 等利用卡尔曼滤波方法和摄像头开发了一种航位推算算法, 即使目标信息暂时丢失, 也能够使扑翼飞行器飞向目标。实验结果显示, 飞向目标的 28 cm 翼展扑翼飞行器能降落在离目标 0.5 m 半径范围内, 成功率超过 85%。

随着计算机视觉技术的不断发展, 目标检测与识别技术的准确率不断地增长. 在 2015 年的 ImageNet 的分类比赛中, 由微软亚洲研究院何恺明团队提出的深度残差网络 (deep residual networks)^[30] 取得了 3.57% 的分类错误率, 不仅夺得了当年的 ImageNet 的分类大赛冠军, 同时这个成绩更是超过了接受过训练的人在 ImageNet 数据集上对图片进行分类的成绩 (5.1%). 2015 年美国华盛顿大学 Redmon 等提出的 YOLO 目标检测算法^[31] 代表着当下目标检测算法的最高水平之一, 同时, YOLO 算法较高的运行速度以及较高的准确率已经满足了工业应用的要求. 随着深度学习技术的不断发展, 速度更快、准确率更高的算法将会越来越多.

将优秀的目标检测与识别算法应用到无人机平台, 能够使无人机更加智能. 扑翼飞行器的视觉感知系统要实现智能化, 首先就要将目标检测与识别技术成功的移植到扑翼飞行器上. 由于扑翼飞行器自身的载重问题限制, 无法搭载高性能处理器进行实时检测, 所以现阶段的目标检测与识别的中间计算过程大多需要地面计算机辅助处理.

2.3 目标跟踪技术

目标跟踪技术是目标检测与识别技术的一种延伸, 但对于无人机而言是一个巨大的挑战. 在高空飞行时, 摄像头的视野极其开阔, 但是目标的面积相对于视野的面积而言, 显得很小. 同时由于建筑物遮挡, 相似的背景干扰, 光照问题等, 使得目标跟踪变得十分困难^[32].

大多数无人机目标跟踪算法都会包括图像输入、外观特征描述、环境信息集成、决策和模态更新等过程. 对于不同的方法, 重点不一样, 因此设计的目标跟踪的方案会有所不同. 早期的目标跟踪多以经典跟踪方法为主, 如粒子滤波 (particle filter)、均值漂移 (meanshift) 等. 粒子滤波方法在目标跟踪领域取得了巨大成功, 它首先对跟踪目标进行建模, 并定义一种相似度度量确定粒子与目标的匹配程度来确保在更大概率上跟踪上目标^[33]. 近几年来深度学习的高速发展也带动了目标跟踪算法的发展. 斯坦福大学 David Held 提出了 GOTURN 算法, 该算法将上一帧图像中的目标和当前帧的图像同时输入卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 的卷积层 (conv layers), 然后将直接传入通过全连接层 (fully-connected layers), 通过这种方法得到当前帧中目标的位置信息. 同时网络的训练是离线的, 在跟踪

的时候没有更新网络, 只有一个计算前馈网络的过程, 使得算法运行速度达到了 100 fps^[34], 克服了基于深度学习的目标跟踪算法速度较慢的缺点.

目前已经有了许多以旋翼飞行器为平台的目标跟踪技术的应用. 例如, 澳大利亚阿德莱德大学 Milan 等提出了一种基于循环神经网络的在线多目标跟踪的新方法^[35], 用以解决多目标跟踪时应用复杂模型需要繁琐的参数调整问题. 浙江大学陈朋等基于高通公司的 Snapdragon 飞控平台提出了一种目标跟踪方法, 通过融合惯性测量单元数据、全球定位系统数据和运动物体检测结果来计算物体坐标系与无人机之间的相对位置, 所有算法都在 Qualcomm 平台上实时运行^[36]. 目标跟踪技术对于小型扑翼飞行器的室内飞行是不可或缺的. 例如, 代尔夫特理工大学 Schepers 等利用 DelFly Explorer 来执行室内自主多房间导航探索任务^[37]. 使用基于单目彩色图像的 Snake-gate 检测算法得到门的位置, 触发基于航向的门通道算法, 并朝着门的方向飞行. 实际测试中, 在由走廊隔开的两个房间之间, 扑翼飞行器可以连续成功导航, 展示了扑翼飞行器进行自主导航的潜力.

目标跟踪技术是实现扑翼飞行器自主飞行的关键技术^[38], 例如对于障碍物的躲避, 需要目标检测与识别算法能够发现和识别障碍物, 而对于移动的物体, 则需要目标跟踪技术预测物体的移动方向, 及时调整扑翼飞行器的方向. 扑翼飞行器在这个技术上主要的问题是在高空飞行时, 目标物体在全局下不明显, 存在遮挡、光照等影响跟踪效果的问题, 要通过选用较高像素的摄像头以及鲁棒性更高、稳定性更强的算法来提高跟踪效果, 保证自主飞行的安全性^[39].

3 未来发展趋势

通过第 1 节和第 2 节的内容介绍, 我们可以看出现阶段扑翼飞行器的视觉感知系统研究还处于一个起步阶段^[40]. 尽管近几年来出现了一些突破性成果, 但是相比于旋翼和固定翼飞行器的视觉感知系统而言, 仍处于一个较低的水平. 扑翼飞行器的视觉感知系统仍有大量问题有待进一步的深入研究, 主要涉及以下几个方面:

(1) 目前的图像消抖技术还不足以应对扑翼飞行所带来的剧烈抖动. 图像的剧烈抖动一方面会造成图像模糊, 另一方面对图像处理单元造成较大的负担^[41]. 目前的微型云台虽然一定程度上能够减轻抖动, 但随着扑翼飞行器的不断发展, 其

不够灵活、质量依然过重的缺点也暴露出来。同时,针对扑翼飞行器剧烈的图像抖动,目前暂无消抖算法能够很好的处理。要完成预定的视觉任务,保证扑翼飞行器的视觉感知系统能够稳定的获取图像是关键^[42]。如何通过质量更轻、转动更加灵活的云台和消抖效果更好的软件算法结合起来输出清晰稳定的图像,是扑翼飞行器视觉感知系统下一步要解决的问题。

(2)现阶段大部分扑翼飞行器的视觉感知系统都是采用机载摄像头与地面站配合的方式来完成预定的任务。借用地面计算机端进行图像处理固然是一个好办法,但是这也限制了扑翼飞行器不能进行远距离飞行。一旦离开视频接收的范围,整个系统便会失去用武之地,这使其实用性大大降低。面对扑翼飞行器本身载重不足的问题,如何通过质量更轻性能更强的处理器和提高算法的运行效率使视觉感知系统能够做到机载实时处理,仍是一个巨大的挑战。

(3)现有的扑翼飞行器视觉感知系统功能较为单一,只能实现一些简单的任务,如航拍等。虽然已经出现了如 Delfly II 这样的双目视觉感知系统,但功能也仅限于简单的避障。使扑翼飞行器的视觉感知系统能够像鸟类的双眼一样,能够完成多种视觉任务,进行智能的检测、识别、跟踪以及进行三维重建来智能地规划飞行路径^[43],是研究者们努力的方向。

(4)旋翼飞行器如四旋翼飞行器很容易实现悬停。然而由于飞行机制的不同,悬停是扑翼飞行器面临的一项重大挑战^[44],这大大提高了扑翼飞行器集群控制的危险程度。在进行基于多视觉感知系统的集群控制时,如何获取各子感知系统之间的相对位置、相对姿态等信息^[45],从而提前预知危险以及计算不同扑翼飞行器的预定飞行路径,将是未来扑翼飞行器视觉感知系统研究的发展方向。

4 结束语

本文主要讨论了基于扑翼飞行器的视觉感知系统的研究进展以及一些亟待解决的问题。对于传统的以旋翼及固定翼飞行器为平台的视觉感知系统,不管是从算法还是硬件来说都已经相对成熟。但是面对扑翼飞行器载荷量较低等诸多限制条件,现有的视觉感知系统在扑翼飞行器上的实际应用中仍然未达到理想的效果。目前以扑翼飞行器为平台的视觉感知系统还仅限于完成航拍等简单的任务,不能胜任一些复杂任务如目标跟踪、

三维重建等。在扑翼飞行器的载重无较大提升的情况下,如何研究和设计更优秀的视觉感知算法、质量更小且性能更强的硬件系统是未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Lee N, Lee S, Cho H, et al. Effect of flexibility on flapping wing characteristics in hover and forward flight. *Comput Fluids*, 2018, 173: 111
- [2] Zhang C, Rossi C. A review of compliant transmission mechanisms for bio-inspired flapping-wing micro air vehicles. *Bioinspir Biomim*, 2017, 12(2): 025005
- [3] De Croon G, Perçin M, Remes B D W, et al. *The Delfly: Design Aerodynamics and Artificial Intelligence of a Flapping Wing Robot*. Netherlands: Springer, 2016
- [4] Tijmons S. *Stereo Vision for Flapping Wing MAVs: Design of an Obstacle Avoidance System* [Dissertation]. Delft: Delft University of Technology, 2012
- [5] Ryu S, Kwon U, Kim H J. Autonomous flight and vision-based target tracking for a flapping-wing MAV // 2016 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. Daejeon, 2016: 5645
- [6] Yang W Q, Wang L G, Song B F. Dove: a biomimetic flapping-wing micro air vehicle. *Int J Micro Air Veh*, 2018, 10(1): 70
- [7] Festo AG & Co. KG. BionicFlyingFox: ultra-lightweight flying object with intelligent kinematics[EB/OL]. Festo (2018-03)[2019-03-08].<https://www.festo.com/group/en/cms/13130.htm>
- [8] McCurdy L Y, Maniscalco B, Metcalfe J, et al. Anatomical coupling between distinct metacognitive systems for memory and visual perception. *J Neurosci*, 2013, 33(5): 1897
- [9] Julian R C, Rose C J, Hu H, et al. Cooperative control and modeling for narrow passage traversal with an ornithopter MAV and lightweight ground station // *Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*. St. Paul, 2013: 103
- [10] Bourque A E, Bedwani S, Carrier J F, et al. Particle filter-based target tracking algorithm for magnetic resonance-guided respiratory compensation: robustness and accuracy assessment. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2018, 100(2): 325
- [11] Rosen M H, le Pivain G, Sahai R, et al. Development of a 3.2 g untethered flapping-wing platform for flight energetics and control experiments // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Stockholm, 2016: 3227
- [12] Dorociak R D, Cuddeford T J. Determining 3-D system accuracy for the Vicon 370 system. *Gait Posture*, 1995, 3(2): 88
- [13] Touré B, Schanen J L, Gerbaud L, et al. EMC modeling of drives for aircraft applications: modeling process, EMI filter optimization, and technological choice. *IEEE Trans Power Electron*, 2013, 28(3): 1145
- [14] Tran X T, Oh H, Kim I R, et al. Attitude stabilization of flapping

- micro-air vehicles via an observer-based sliding mode control method. *Aerosp Sci Technol*, 2018, 76: 386
- [15] Grip H F, Fossen T I, Johansen T A, et al. Attitude estimation using biased gyro and vector measurements with time-varying reference vectors. *IEEE Trans Autom Control*, 2012, 57(5): 1332
- [16] Wang T. *Stabilizing Platform*: U.S. Patent, 8938160. 2015-1-20
- [17] Koh L P, Wich S A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Trop Conserv Sci*, 2012, 5(2): 121
- [18] Dong J, Liu H B. Video stabilization for strict real-time applications. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol*, 2017, 27(4): 716
- [19] Aguilar W G, Angulo C, Pardo J A. Motion intention optimization for multirotor robust video stabilization // 2017 *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies*. Pucon, 2017: 1
- [20] Minghwan E, Khawsuk W. Digital image stabilization technique for fixed camera on small size drone // 2017 *Third Asian Conference on Defence Technology*. Phuket, 2017: 12
- [21] Aguilar W G, Angulo C. Real-time model-based video stabilization for microaerial vehicles. *Neural Process Lett*, 2016, 43(2): 459
- [22] Lim A, Ramesh B, Yang Y, et al. Real-time optical flow-based video stabilization for unmanned aerial vehicles. *J Real-Time Image Process*, 2017: 1
- [23] Pae D S, An C G, Kang T K, et al. Advanced digital image stabilization using similarity-constrained optimization. *Multimedia Tools Appl*, 2018, 78(12): 16489
- [24] Han J H, Ma Y, Zhou B, et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2014, 11(12): 2168
- [25] Zorbas D, Razafindralambo T, Luigi D P P, et al. Energy efficient mobile target tracking using flying drones. *Procedia Comput Sci*, 2013, 19: 80
- [26] Chen S Z, Wang H P, Xu F, et al. Target classification using the deep convolutional networks for SAR images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2016, 54(8): 4806
- [27] Minaeian S, Liu J, Son Y J. Vision-based target detection and localization via a team of cooperative UAV and UGVs. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2016, 46(7): 1005
- [28] Lin S G, Garratt M A, Lambert A J. Monocular vision-based real-time target recognition and tracking for autonomously landing an UAV in a cluttered shipboard environment. *Auton Robot*, 2017, 41(4): 881
- [29] Baek S S, Bermudez F L G, Fearing R S. Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter // 2011 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, 2011: 2674
- [30] He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Las Vegas, 2016: 770
- [31] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Las Vegas, 2016: 779
- [32] Liu Y, Jing X Y, Nie J H, et al. Context-aware three-dimensional mean-shift with occlusion handling for robust object tracking in RGB-D videos. *IEEE Trans Multimedia*, 2019, 21(3): 664
- [33] Gan M G, Cheng Y L, Wang Y N, et al. Hierarchical particle filter tracking algorithm based on multi-feature fusion. *J Syst Eng Electron*, 2016, 27(1): 51
- [34] Held D, Thrun S, Savarese S. Learning to track at 100 fps with deep regression networks // *European Conference on Computer Vision*. Amsterdam, 2016: 749
- [35] Milan A, Rezatofighi S H, Dick A, et al. Online multi-target tracking using recurrent neural networks // *Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*. San Francisco, 2017: 4225
- [36] Chen P, Dang Y J, Liang R H, et al. Real-time object tracking on a drone with multi-inertial sensing data. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2018, 19(1): 131
- [37] Scheper K Y W, Karásek M, De Wagter C, et al. First autonomous multi-room exploration with an insect-inspired flapping wing vehicle // 2018 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, 2018: 5546
- [38] Lee J, Ryu S, Kim T, et al. Learning-based path tracking control of a flapping-wing micro air vehicle // 2018 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Madrid, 2018: 7096
- [39] Butt A A, Collins R T. Multi-target tracking by lagrangian relaxation to min-cost network flow // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Portland, 2013: 1846
- [40] He W, Ding S Q, Sun C Y. Research progress on modeling and control of flapping-wing air vehicles. *Acta Automatica Sin*, 2017, 43(5): 685
(贺威, 丁施强, 孙长银. 扑翼飞行器的建模与控制研究进展. 自动化学报, 2017, 43(5): 685)
- [41] Lukin V P, Nosov V V, Torgaev A V. Features of optical image jitter in a random medium with a finite outer scale. *Appl Opt*, 2014, 53(10): B196
- [42] He W, Huang H F, Chen Y N, et al. Development of an autonomous flapping-wing aerial vehicle. *Sci China Inform Sci*, 2017, 60(6): 063201
- [43] Tijmons S, de Croon G C H E, Remes B D W, et al. Obstacle avoidance strategy using onboard stereo vision on a flapping wing MAV. *IEEE Trans Robot*, 2017, 33(4): 858
- [44] Ryu S, Kim H J. Development of a flapping-wing micro air vehicle capable of autonomous hovering with onboard measurements // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vancouver, 2017: 3239
- [45] Harik E H C, Guérin F, Guinand F, et al. UAV-UGV cooperation for objects transportation in an industrial area // *IEEE International Conference on Industrial Technology*. Seville, 2015: 547