基于视觉的无人作战飞机自主着陆导航方案

陈 磊 陈宗基

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：提出了基于视觉的无人作战飞机自主着陆组合导航方案.基于视觉的自主着陆组合导航系统，可以根据视觉、惯导、高度表等传感器系统的特点，融合各机载传感器的测量信息，在不依赖外部导航信息的情况下，得到无人作战飞机(UCAV)相对于跑道的着陆导航信息.由于视觉信息在导航系统中的重要作用，对计算机视觉算法及其实时性进行了讨论.对如何将视觉信息与惯导、高度表信息融合，构造多速率扩展 Kalman 滤波器进行了阐述.通过自主开发的“UCAV 自主着陆实时仿真验证平台”对该方案进行仿真，得到了满意的结果.

关 键 词：无人作战飞机；导航系统；计算机视觉；Kalman 滤波；自主着陆

中图分类号：V 249

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)02-0159-05

Vision-based autonomous landing integrated navigation scheme of unmanned combat aerial vehicles

Chen Lei Chen Zongji

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A computer-vision-based integrated navigation scheme for autonomous landing of an unmanned combat air vehicle (UCAV) was presented. Based on this scheme, vision information with measurements of other on-board sensors, including inertial navigation system (INS) and altimeter system, could be fused according to the characteristics of these sensor systems. The scheme gave navigation information without the help of external navigation equipments with high measurement accuracy. Since computer vision played an important role in this navigation scheme, the vision algorisms were complicated processes and were discussed, so that the vision sensor measurement could be output with a delay in a low bandwidth. A multi-rate extended Kalman filter was constructed to fuse multi-rate information and gave high bandwidth attitude and pose estimations based on the output bandwidth of INS. The navigation scheme could run properly on the real-time simulation system for autonomous landing of the UCAV.

Key words: unmanned combat air vehicle; navigation systems; computer vision; Kalman filtering; autonomous landing

无人作战飞机 UCAV(Unmanned Combat Aerial Vehicles)的着陆是复杂的飞行阶段，它要求在低空速和低高度的情况下，精确控制飞机的姿态和轨迹.所谓自主着陆导航，是指 UCAV 只依靠自身的机载设备，不依赖地面设备的辅助，与外界不发生任何光、电联系条件下完成的导航任务.常用的仪表着陆、微波着陆以及全球定位系统/差分全球定位系统(GPS/DGPS)等导航方式都要依赖飞机以外的设备所提供的信号进行导航，称为半自主着陆导航.

只依赖常规机载传感器(如惯导系统(INS)、高度表等)信息的情况下完成 UCAV 的自主着陆

收稿日期：2006-03-17

基金项目：航空科学基金资助项目(05E51019)

作者简介：陈 磊(1976－)，男，北京人，博士生，roger@buaa.edu.cn.

是不现实的,也是不可能的,所以必须引入其它的传感器设备.计算机视觉CV(Computer Vision)由于其经济、无源、信息丰富等特点,已成为无人机自主着陆中不可缺少的重要信息源.通过计算机视觉可以很容易的测量静态参考物,作为机载惯性元件漂移的补偿;而当由于高频干扰、参考物跟踪失败等原因使视觉效率下降或失效时,惯性元件可以准确的测量干扰,并在短时间内给出准确的导航信息,引导视觉系统正确工作.基于CV/INS的导航方案被许多研究机构采用,可以为各类无人机提供精确的导航信息[1-4].

可以看出,基于视觉的组合导航系统结构、实时计算机视觉处理算法和多传感器信息融合算法是自主着陆导航方案研究中的关键研究内容.本文对基于视觉的UCAV自主着陆组合导航方案进行了详细的论述,并在自主开发的"UCAV自主着陆实时仿真验证平台"上进行了验证.

1 坐标系系统

为了在导航过程中利用跑道上布置的特征信息来估计UCAV相对于跑道的位置和姿态,必须将地面上的特征与摄像机捕捉到的特征联系起来.因此,需要定义坐标系.不同坐标系的定义见图1,主要包括惯性坐标系 $Oxyz$,机体坐标系 $O_bx_by_bz_b$,以及摄像机坐标系 $O_cx_cy_cz_c$ 和视平面坐标系 O_1uv.

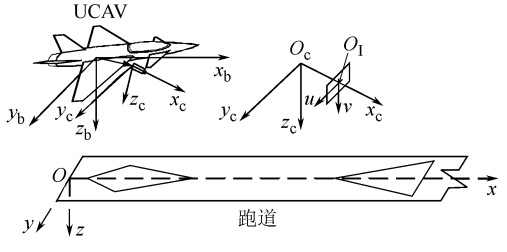


图1 坐标系定义示意图

2 自主着陆组合导航方案

2.1 假 设

UCAV在进入基于视觉的自主着陆阶段以前,一般会对机载导航系统进行多次空中校准,但由于此时UCAV飞行高度较高、速度较快,所以校准的精度还不足以导引UCAV完成着陆操作.本文假设UCAV在进入基于视觉的自主着陆阶段以前:

1) UCAV已被成功的导引到指定区域;

2) 机载导航系统进行了空中校准,其高度误差小于±30 m,水平方向的位置误差小于±200 m,速度误差小于±1 m/s,欧拉角测量误差小于±1°.

2.2 自主着陆导引过程描述

在UCAV进入基于视觉的自主着陆阶段后,机载摄像机系统根据导航系统的测量值,预估特征点的位置,并控制摄像机系统的云台,使摄像机在一定区域内搜索预先设置在机场跑道上的特征图像;当系统获取到特征图像后,摄像机系统进入跟踪模态,即控制云台以跟踪特征图像,并对图像进行相应的图像处理,提取特征图像上的特征点的信息;融合机载惯导系统信息,同时结合高度表系统、磁罗盘等机载传感器的测量信息,获得高精度的UCAV导航信息.

2.3 着陆组合导航系统要求

UCAV着陆过程中,对导航精度要求相当高,而目前还没有UCAV着陆导航精度的统一要求规范,因此参考国际民航组织精密进场着陆Ⅲ级精度要求,提出UCAV着陆组合导航系统导航精度要求:垂直精度高于0.5 m;横向精度高于4 m.

同时,为了不影响UCAV的飞行品质,应该保证组合导航系统导航信息输出频率高于50 Hz.

2.4 着陆组合导航系统构成

基于视觉的UCAV自主着陆组合导航系统结构如图2所示,主要包括:跑道特征、传感器子系统、信息融合子系统.传感器子系统通过机载惯导系统、高度表系统、磁罗盘等传感器对UCAV真实状态进行测量,通过机载摄像机系统对跑道特征进行跟踪与分析,得到跑道特征点的测量值,这些测量信息传给信息融合子系统;信息融合子系统根据对飞机状态的估计值,通过跑道模型、摄像机模型得到跑道特征点的估计值,与跑道特征点的测量值进行比较,并融合其他测量信息,最终得到高精度的导航信息.

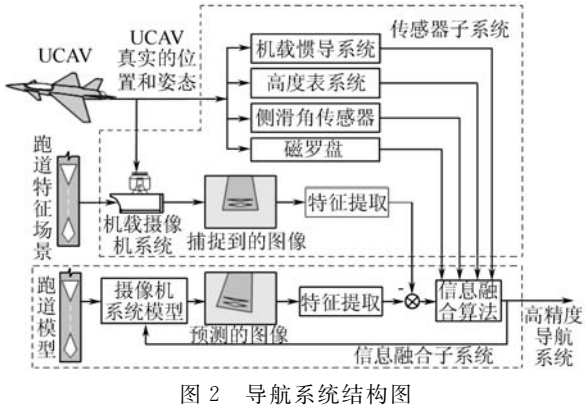


图2 导航系统结构图

3　计算机视觉技术

3.1　计算机视觉算法

在自主着陆过程中,机载摄像机系统根据对 UCAV 状态的估计值控制云台,使摄像机能够搜索、捕捉和跟踪跑道特征图案,得到用于 UCAV 位置和姿态估计的特征点坐标. 视觉处理过程主要分为图像预处理、区域分割与标记和特征提取与目标识别 3 个阶段.

1) 图像预处理.

根据 UCAV 机载视觉系统的任务特点,考虑到对灰度图的处理算法比较成熟,同时运算速度较快、运算量相对比较少,首先将获取的彩色图像转化为灰度图像.

由于获取的图像存在噪声,必须对其进行滤波处理. 本文选用 7×7 的中值滤波器对灰度图像进行处理,因为中值滤波器具有较好的低通特性,同时还能尽可能多的保存图像边缘细节.

图 3a 是一幅着陆过程中采集到的经预处理后的图像.

2) 区域分割与标记.

本阶段任务是从经过预处理后的图像中得到特征识别所需的候选区域,需要经过阈值化分割和区域生长与标记两个过程.

将灰度图经过阈值化转化为二值图,可以有效减少后续处理工作的运算量. 经过对不同的阈值选取方法的实验比较,使用设置处于图像最大与最小灰度之间固定比例的灰度值作为阈值的方法进行阈值化,可以较好地适应光照变化.

经过阈值化得到的种子区域,采用区域生长的方法,得到包括完整跑道特征图案在内的待处理区域. 标识就是在区域生长完成后给每个不相邻的区域标志一个唯一的整数.

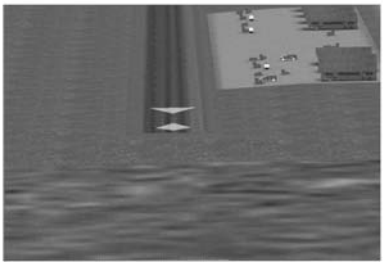
经过区域分割与标记的图像见图 3b.

3) 特征提取与目标识别.

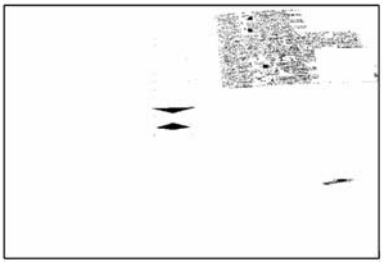
本阶段的任务就是从多个候选区域中提取特征,识别出跑道特征区域,最后得到所需的 7 个特征点在 O_1uv 中的坐标值.

根据跑道标志的特点,选择下面几种区域的描述作为特征[5]:区域的面积、细长度、方向、紧致度、区域的位置、投影和两个区域之间相对位置等. 得到区域的特征后,与由预估跑道特征点坐标导出的特征值作比较,最终确定两个跑道标志区域.

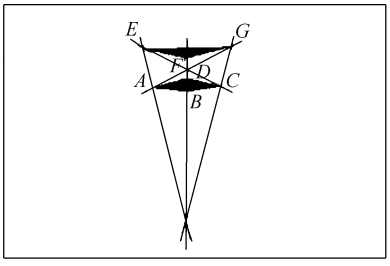
使用 SUSAN 原则[6]检测特征区域的边界和角点,并选择每个区域曲率最大的两个角点与点 A,C,E 和 G 相对应;由于着陆过程 UCAV 与跑道之间夹角较小,跑道特征区域成像时沿跑道方向会有较大的压缩,使得布置在跑道中心线上的 3 个顶点(点 B,D 和 F)难以准确检测. 可以使用如图 3c 所示的方案予以检测.



a　预处理后的图像



b　区域分割后的图像



c　特征提取与目标识别(经放大)

图 3　计算机视觉算法示意

3.2　视觉算法的实时性要求

视觉处理过程一般运算量较大,要做到较高的帧率(如高于 30 帧/s)是非常困难的,需要有非常高性能的图像处理硬件,因此视觉系统的测量信息一般输出频率较低,而且有一定的延迟. 同时,由于环境的变化或处理任务的变化,图像处理的时间也是不定的. 根据对现有的原型系统进行测试,系统在搜索目标过程中,图像处理的帧率约 8 帧/s,延迟约 150 ms(包括采集卡采集时间);在跟踪目标过程中,图像处理的帧率约 18 帧/s,延迟约 75 ms(包括采集卡采集时间).

4　信息融合和状态估计算法

随着机载传感器数量的增多,多传感器信息融合技术已成为状态估计的重要手段. 作为信息

融合中进行位置估计的有效方法——Kalman滤波算法，由于采用了递推形式，数据存储量小，不仅可以处理平稳随机过程，而且可以处理多维和非平稳随机过程. 目前Kalman滤波技术已成为实现多传感器信息融合的主要技术手段. 本节主要论述如何将视觉信息与INS、高度表信息融合，构造适合于UCAV自主着陆的多传感器多速率扩展Kalman滤波器.

4.1 系统测量方程和动态方程构造

由图2可知，状态估计中最重要的是机载摄像机系统通过计算机视觉技术得到的特征点信息，将这7个特征点在O_1uv中的测量值以及高度表系统得到的飞行高度和由磁罗盘得到的偏航角的测量值组成系统测量值$\boldsymbol{Z}(k)$，通过关系式$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{X}(k))$与UCAV在$Oxyz$中的位置和姿态信息联系起来，在$k$时刻，可以表示为

$$\boldsymbol{Z}(k)=\boldsymbol{h}(\boldsymbol{X}(k))+\boldsymbol{\zeta}_{\boldsymbol{Z}}(k) \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{X}(k)$是系统的状态向量，包括UCAV在惯性坐标系中的位置(x,y,z)、速度(V_x,V_y,V_z)以及姿态角(ϕ,θ,ψ)；$\boldsymbol{\zeta}_{\boldsymbol{Z}}(k)$是白噪声向量. 特征点测量值由机载摄像机通过图像处理直接得到，而特征点测量值的估计值是根据系统状态$\boldsymbol{X}(k)$，按照图2所示，由跑道模型和摄像机系统模型，通过计算得到.

在状态估计中，通过UCAV的运动学关系，得到系统的动态方程：

$$\boldsymbol{X}(k+1)=\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}(k))+\boldsymbol{\zeta}_{\boldsymbol{X}}(k) \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{\Phi}(\cdot)$是系统的非线性状态方程；$\boldsymbol{\zeta}_{\boldsymbol{X}}(k)$是白噪声向量.

4.2 多速率扩展Kalman滤波器

通过式(1)给出的测量方程和式(2)给出的动态方程，利用扩展Kalman滤波器(EKF)，建立UCAV的动态估计器，从而可以估计出UCAV在空间的位置和姿态. 但是，由于各传感器系统给出的信息具有不同的更新频率，不同时间延迟特性，因此需要根据信息的特点，对EKF进行改进，设计出能真正处理UCAV多传感系统信息的多速率EKF(MEKF)[7].

由式(2)可知，系统状态变量可由惯导系统给出. 惯导系统具有较高的输出频率，这里假设为$1/T_1$. 式(1)的输出频率由机载摄像机系统、高度表系统和磁罗盘的更新频率决定，而摄像机系统相对于其它两个传感器输出频率较低，延迟最大，不妨假设3个传感器都与摄像机系统输出频率$1/T_V$相同，输出延迟都与摄像机系统延迟时间T_d相同. 为了简便起见，设$T_V=pT_1$，$T_d=qT_1$，其中p，q为可变正整数.

MEKF对多速率测量和测量延迟的处理，主要体现在下面两个运行机制上：

1) 基于事件驱动：当没有视觉测量数据时，滤波器只进行状态预估和误差协方差的传播；当测量发生后，用测量的数据去校正滤波器的预估状态和误差协方差，如式(3)所示：

$$\boldsymbol{X}(k+1)=\begin{cases}\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}(k)) & \text{无测量输出}\\ \boldsymbol{\Phi}_d(\boldsymbol{X}(k-q),\boldsymbol{X}(k-q+1),\cdots,\boldsymbol{X}(k)) & \text{有测量输出}\end{cases} \tag{3}$$

2) 基于延迟校正的数据平滑：由于摄像机系统存在T_d，kT_1时刻获得的测量值与状态$\boldsymbol{X}(k-q)$相对应，因此需要利用存储的各个时刻的状态值$\boldsymbol{X}(i)$，$i=(k-q),\cdots,k$，先对原来的状态和误差协方差进行校正，再使用滤波器动态方程进行数据平滑，更新当前的状态估计和协方差，即求得式(3)中的$\boldsymbol{\Phi}_d(\cdot)$.

导航系统虽然存在输出速率较低的测量信号，但通过MEKF的处理，使得整个导航系统不但具有与惯导系统相同的输出带宽(一般大于50 Hz)，同时由于视觉系统的存在，可以修正惯导系统的漂移，得到高频率高精度的导航信息.

5 仿真与结果

为了对方案进行验证，本文在自主开发的“UCAV自主着陆实时仿真验证平台”上进行了仿真.

UCAV自主着陆实时仿真验证平台系统框架如图4所示[8]. 本文所涉及的着陆组合导航方案的验证主要是在传感器模块中实现，跑道特征的视觉反馈信息由虚拟环境子系统实时产生，UCAV飞行轨迹由着陆控制器模块控制.

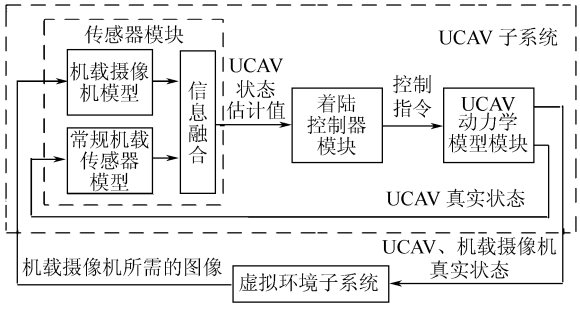
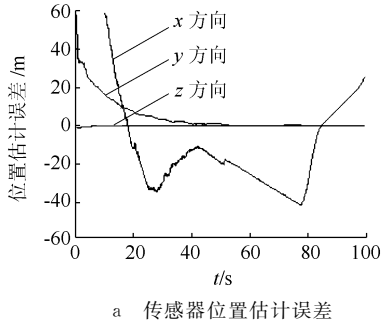


图4 UCAV自主着陆实时仿真验证平台框架图

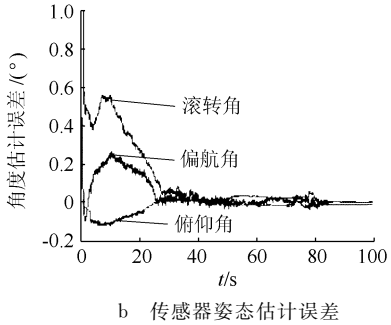
UCAV自主着陆仿真想定如下：UCAV初始状态为等速平飞，相对于跑道起点的初始位置为

(−8 200,−200,−480)(单位:m),偏航角为 0°,速度为 110 m/s;预计下滑角为 10°;机载传感器经过校准,其位置测量初始误差为(−200,−200,−30)(单位:m),速度测量初始误差为(1,1,1)(单位:m/s),欧拉角测量初始误差为(1,1,1)(单位:(°)).

仿真过程中组合导航系统导航信息输出频率为 83 Hz.导航信息误差见图 5.由图 5 可知,尽管仿真开始时,各机载传感器均存在不同程度的初始误差,但随着时间的推进,组合导航系统的状态估计值可以逐渐接近真实值,当飞机距离跑道小于 4 770 m 后,导航系统的横向估计误差小于 4 m,高度估计误差小于 0.5 m,满足设计要求.导航系统对沿跑道方向的估计精度稍低,究其原因,主要是由于摄像机成像时沿跑道方向分辨率较低造成的,但还是可以满足着陆要求的.因此该组合导航系统在着陆过程中能够给出精确的导航信息.



a　传感器位置估计误差



b　传感器姿态估计误差

图 5　UCAV 自主着陆仿真曲线

6　结 束 语

本文提出了基于视觉的无人作战飞机自主着陆组合导航方案,并对方案进行了详细地论述,提出了自主着陆组合导航系统结构.由于视觉信息在导航系统中的重要作用,对计算机视觉算法及其实时性进行了论述.对如何将视觉信息与 INS、高度表信息融合,构造 MEKF 进行了阐述.最后,在自主开发的“UCAV 自主着陆实时仿真验证平台”上对本文提出的基于视觉的组合导航方案进行了仿真验证,从仿真结果看,可以得到精度足够高的着陆导航信息.

参考文献(References)

[1] Amidi O. An autonomous vision-guided helicopter[D]. Pittsburgh: Electrical & Computer Engineering Department, Carnegie Mellon University, 1996

[2] Schell F R, Dickmanns E D. Autonomous landing of airplanes by dynamic machine vision [J]. Machine Vision and Applications, 1994, 7(3): 127−134

[3] Sharp C S, Shakernia O, Sastry S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001: 1720 − 1727

[4] Hespanha J M, Yakimenko O A, Kaminer I I, et al. Linear parametrically varying system with brief instabilities: an application to vision/inertial navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3): 889−902

[5] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. 2nd ed.[S.l.]: Brooks/Cole Publishing Company, 1999

[6] Smith S M, Brady J M. SUSAN-a new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1):45−78

[7] 李绍燕. 基于机器视觉的无人战斗机自主着陆研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2004
Li Shaoyan. Research on machine vision-based autonomous landing of unmanned combat air vehicle[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

[8] 陈磊,陈宗基. 基于视觉的无人作战飞机自主着陆仿真系统研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(7):1815−1819
Chen Lei, Chen Zongji. Study on simulation system for vision-based autonomous landing of unmanned combat aerial vehicles[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1815−1819(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)