光流控制地形跟随与自动着陆

刘小明 陈万春 邢晓岚

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191) (空军装备研究院总体所, 北京 100076)

殷兴良

(中国航天科工集团公司, 北京 100830)

摘 要: 将一种自研的光流传感器安装到飞行平台上,利用光流信息控制飞行器的地形跟随和自动着陆. 测试了光流传感器的测量性能,建立了飞行器的运动模型,开发了基于光流反馈的地形跟随控制算法,提出了光流自动着陆的控制规律,并进行了数学仿真和硬件在回路的实时仿真验证,实验结果表明:光流信息可以一种相对简单的形式来巧妙地同时控制飞行速度和飞行高度,保证飞行器安全地执行多种飞行任务,实验证明了光流传感器在飞行控制中具有工程可行性.

关 键 词: 光流; 光流传感器; 地形跟随; 自动着陆; 硬件在回路仿真

中图分类号: V 249.122

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0098-08

Terrain following and autonomous landing using optical flow

Liu Xiaoming Chen Wanchun

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Xing Xiaolan

(System Analysis Institute, Air Force Armament Research Academy, Beijing 100076, China)

Yin Xingliang

(China Aerospace Science & Industry Corp, Beijing 100830, China)

Abstract: An optical flow sensor, which is fabricated by our laboratory, was mounted on a unmanned aerial vehicle (UAV) to implement terrain following and autonomous landing tasks by using optical flow as feedback. The performance of the optical flow sensor was tested and the UAV model was built. Control algorithm for terrain following based on optical flow was developed and landing strategies using optical flow as feedback was proposed. Mathematical simulations and hardware-in-loop tests show optical flow information can be used in a relatively simple form to control both the flying speed and altitude at the same time to ensure the safety of flying missions for the UAV. The optical flow sensor is proved available for flight control by the hardware tests.

Abstract: optical flow; optical flow sensor; terrain following; autonomous landing; hardware-in-loop simulation

受昆虫视觉系统的启发,光流技术是一种不需要精确地跟踪特征点而实现运动检测的仿生技术[1]. 飞行昆虫可以利用它们看似并不精确的传感器在复杂的自然环境中敏捷地运动,它们利用复眼检测光流,或者说是视场中物体的视在运动,从而得到自身相对于环境的运动状况. 由于昆虫的眼睛是定焦的,眼睛之间的距离是非常小,所以它们的立体视觉很差[2]. 尽管昆虫可以觉察到物

收稿日期: 2010-09-16; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:11; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1511.011
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1511.011.html
作者简介: 刘小明(1982 -),男,山东东营人,博士生,yuhang@sa.buaa.edu.cn.

体的远近,但它们不可能利用定焦眼睛来确定离物体的绝对距离. 即使昆虫具备立体视觉能力,它们感知绝对深度的这种能力也非常有限,因为它们的眼睛之间的距离实在是太小了. 尽管如此,昆虫却可以仅使用光流来做出诸如等高飞行、穿过走廊、着陆等复杂的行为. 许多飞行器的体积变得越来越小,这就限制了两个光学传感器之间的距离,立体视觉能力由此受限,况且立体视觉的计算量要比光流计算大得多,这也会限制立体视觉在微型飞行器上的应用. 于是,研究昆虫利用光流进行导航的机理,并将之用于飞行器控制中,变得很有意义.

目前,光流导航在地面机器人上的应用研究很多,尤其是使用光流传感器(OFS, Optical Flow Sensor)的室内机器人定位. 对于光流导航在飞行器上的应用,国外也有不少学者做了较为深入的研究,并做了不少物理样机实验.

文献[3-6]利用摄像头获取视频信息,通过光流算法来得到光流,进而实现避障、目标检测和空中悬停的功能,受计算量和硬件性能的影响,摄像头的帧率只有 30 帧/s,高速飞行时难以保证控制的实时性. 文献[7-9]使用了同样的光流传感器和飞行载体,结合陀螺仪、GPS、气压计等传感器,利用光流信息来估计距离和方位,研究了自动着陆、避障和风速估计的问题. 光流传感器当作距离传感器或者方位传感器来使用,未提出基于光流的控制算法. 文献[10]从仿生的角度提出了一种着陆策略并进行了硬件仿真,但其运动载体是一套机械臂,因而没有考虑基于动力学的控制问题.

本文使用的光流信息,并非通过光流算法对视频流进行处理得到,而是来自实验室开发的光流传感器,它具有体积小、重量轻、功耗小、成本低、无辐射、测量速度快(1 500 帧/s)的特点,适合于微小型飞行器使用. 此传感器的开发流程和性能指标在文献[11]中有详细介绍. 基于此光流信息,本文开发了光流控制算法和自动着陆规律,成功地在三自由度(3DOF)飞行平台上实现了地形跟随和自动着陆的飞行任务.

1　光流传感器

1.1　基本原理

光流是外界影像由于相对运动在视网膜上形成的视在运动,一般可以通过光流算法对视频流进行处理得到. 在图 1 中,外界影像相对于光流传感器以速度 v 向右运动,在传感器的感光平面上形成了速度为 v_{flow} 的像素运动,v_{flow} 正比于相对速度 v,而反比于相对距离 v,即

$$v_{\text{flow}} \propto \frac{v}{h} \tag{1}$$

光流定义为[4]

$$f = \frac{v}{h} \tag{2}$$

一旦光流传感器的相关参数确定后,光流便可直接测得. 图 2 是本实验室开发的光流传感器,通过它可以得到光流信息.

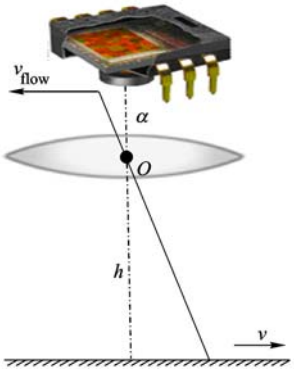

图 1　光流形成关系图

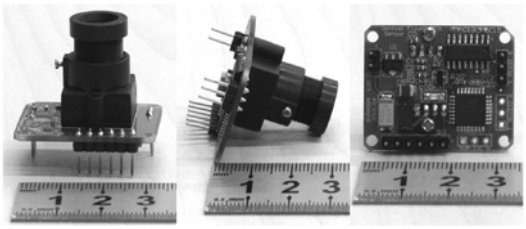

图 2　光流传感器

1.2　OFS 在 3DOF 飞行平台上的安装

3DOF 飞行控制平台是本实验室开发的一套受约束的实时飞行控制仿真平台,其机械运动部分如图 3 所示. 它由底座、旋转轴系、平行四边形摆臂、配重和双旋翼飞行器 5 部分组成.

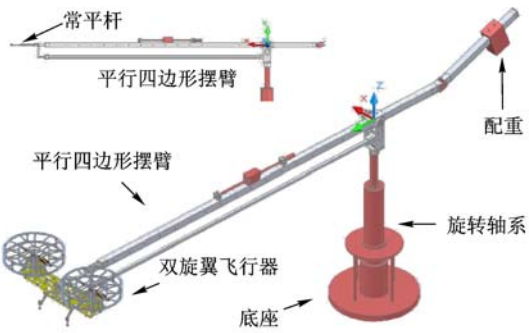

图 3　3DOF 飞行平台的机械部分

安装在摆臂前端的双旋翼飞行器能在空间中作俯仰、升降和进动 3 个自由度的运动,其转角位置可以由安装在各转轴上的角度传感器得到,并由此确定双旋翼飞行器的空间位置与姿态;飞行

平台上的两个旋翼由无刷直流电动机直联驱动,独立控制;旋转轴系中安装集电滑环,这种设计保证了 3DOF 飞行控制平台与控制器之间控制指令、反馈信号传递与电力供应不受摆臂转动的干扰.

文献[12 – 13]中都提出了与 3DOF 结构相似的飞行平台结构,而本文提出的 3DOF 飞行平台与这些平台最大的一个不同点在于,摆臂采用了平行四边形机构,这种机构保证了升力平台的姿态与其高度无关,相当于一个惯性平台,而其他结构的升力平台会随摆臂的高低转动而发生翻转. 3DOF 的这一特性,刚好适合安装光流传感器,将传感器安装在摆臂最前端的常平杆上,可以保证传感器镜头始终正对地面,而与摆臂的高低角无关. 光流传感器的安装位置如图 4 所示.

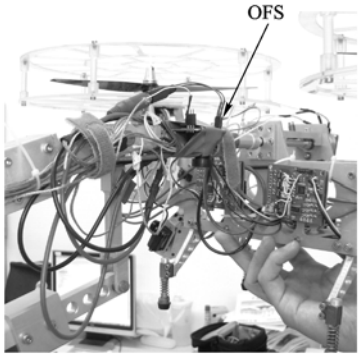

图 4 OFS 的安装位置

1.3 OFS 测量性能

为测试 OFS 的性能,现随意推动 3DOF 飞行平台,使得 OFS 在高度和速度上都有明显变化,得到光流测量值和标定值如图 5 所示. 图 5 证明了 OFS 测量光流的有效性. 标定值略有滞后,这是由于在光流的标定过程中使用了一阶滤波器的缘故.

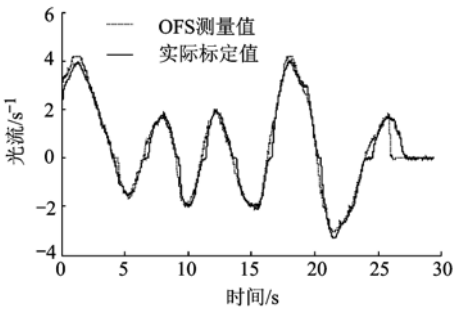

图 5 OFS 测量值与实际标定值的对比

2 光流控制地形跟随

2.1 飞行平台建模

定义 3DOF 飞行平台各参数如图 6 所示.

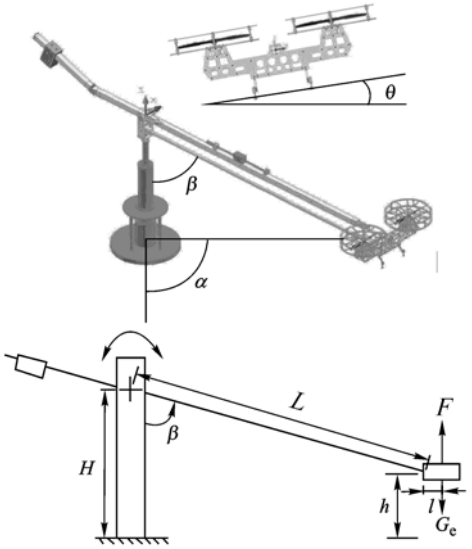

图 6 3DOF 飞行平台参数定义

摆臂的方位角 α 定义为进动角,升降角 β 定义为高低角,飞行器绕常平杆转过的角度 θ 定义为俯仰角.

在竖直方向:

$$\ddot{\beta}=\frac{(F\cos\theta-G_e-K_f\dot{\beta}L\sin\beta)\cdot(l+L\sin\beta)}{I_e} \tag{3}$$

式中,F 是两个旋翼的推力之和;G_e 为换算到飞行器上的重力;I_e 是系统在升降自由度上的转动惯量;K_f 是气动阻力系数.

过大的 θ 角会使飞行器无法在竖直方向上受力平衡,同时可能引起飞行器姿态失稳,出于安全考虑,θ 角在机械上被限制到 ±30°之内,所以可以认为 $\cos\theta\approx1$;在飞行器落地时,β 角最小,由几何关系可以算出 $\beta\geqslant62°$,可认为 $\sin\beta\approx1$;而 $l\ll L$,所以式(3)可以简化为

$$\ddot{\beta}=\frac{L}{I_e}(F-G_e)-\frac{K_fL^2}{I_e}\dot{\beta} \tag{4}$$

于是,以 $u=F-G_e$ 为输入,β 为输出的传递函数可以化成如下形式:

$$G_e(s)=\frac{B(s)}{U(s)}=\frac{K_e}{T_es+1}\cdot\frac{1}{s} \tag{5}$$

式中,K_e,T_e 为待定常数.

测量系统在竖直方向的阶跃响应,并利用文献[14]中的次割距法来估算这两个常数,最终得到系统在竖直方向的传递函数为

$$G_e(s)=\frac{4.6}{2.7s+1}\cdot\frac{1}{s} \tag{6}$$

同理,系统在进动方向上的传递函数可简化为

$$G_t(s)=\frac{W_\alpha(s)}{\vartheta(s)}\cdot\frac{A(s)}{W_\alpha(s)}=\frac{1.8}{4.7s+1}\cdot\frac{1}{s}\quad(7)$$

式中,$A(s)$和$W_\alpha(s)$分别为α和$\dot{\alpha}$的拉氏变换.

2.2　控制算法与仿真

由图 6,根据几何关系不难得出:飞行高度$h=H-L\cos\beta$,进动方向的飞行速度$v_t=\dot{\alpha}(L\sin\beta+l)$,于是可得系统控制框图如图 7 所示.

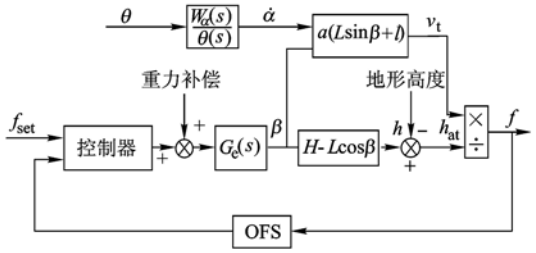

图 7　3DOF 系统控制框图

需要说明的是,在竖直方向,飞行平台始终受重力的作用,因此需要在控制器输出的控制量上加一个常数偏置来补偿重力,这就是图中的重力补偿项,而在数值算法仿真中,这一项可设置为 0;当地面上无地形起伏时,光流传感器与被测面的相对距离就是飞行器的飞行高度 h,而当在地面上设置起伏的地形时,相对距离则是飞行器比地形高出的距离 h_{at}(height above terrain). 在控制器的设计初期,可将地形高度设置为 0.

传统的控制器,比如 PID 控制器,是以期望值和反馈值之差作为输入,经过一些典型环节的处理,得到控制量. 而在图 7 中,控制量增大→β 增大→h_{at}增大→光流反馈减小,即控制量与反馈量的变化方向是相反的,因此应当引入正反馈,控制器结构如图 8a 所示. 由于校正环节的输入是期望值与反馈值的差,这种结构可称为差反馈式控制器. 文献[12]中使用的就是这种控制器.

事实上,控制光流的目的是保证飞行器的安全飞行高度,在速度不变或者改变不大的情况下,影响光流大小的主要因素是飞行高度,在图 7 的控制回路中,光流的大小也是通过调节高度来控制的,因此可以考虑将光流反馈通过一定的变换,使之与飞行高度成正比例关系. 由于

$$f_{feedback}-f_{set}=\frac{v-h_{at}f_{set}}{h_{at}}$$

为了将其分母去除,可考虑上式再与光流反馈相除,即

$$\frac{f_{feedback}-f_{set}}{f_{feedback}}=\frac{v-h_{at}f_{set}}{h_{at}}=1-\frac{h_{at}f_{set}}{v}$$

也就是

$$1-\frac{f_{set}}{f_{feedback}}\quad(8)$$

这就是本文提出的商反馈式控制器,控制器结构如图 8b 所示.

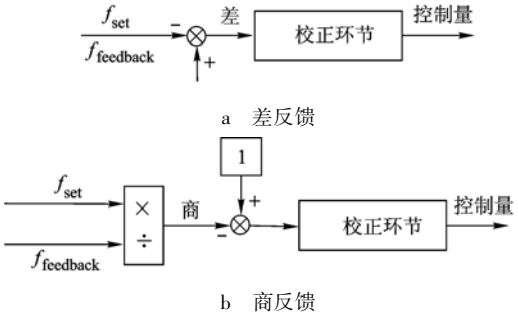

图 8　两种反馈结构的控制器

为了比较这两种控制方法的性能,做如下仿真:差反馈法中,参照文献[12]中的设计,校正环节:

$$C_\omega(s)=K_C\left(\frac{\tau_1 s+1}{\tau_2 s+1}\right)\left(\frac{1}{\tau_3 s+1}\right)$$

式中,$K_C=0.1;\tau_1=1.5;\tau_2=0.12;\tau_3=0.05$.

商反馈法中,校正环节采用 PID 控制,其中,比例系数 $K_p=1$,积分系数 $K_i=0$,微分系数 $K_d=3$,微分算子使用带限微分环节:

$$\frac{s}{0.2s+1}$$

设光流期望值$f_{set}=2\text{s}^{-1}$,双旋翼飞行器在进动方向上的角速度 $\dot{\alpha}=0.5$ rad/s,保持地形高度始终为 0,得到两种方法的光流控制效果如图 9 所示.

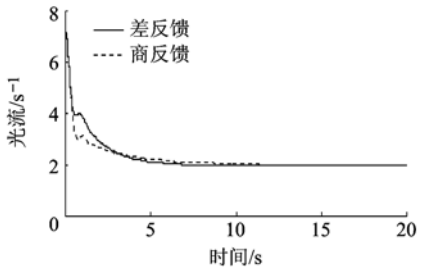

图 9　无地形变化时光流控制效果比较

由图 9 可以看出,在初始阶段,偏差较大,两种方法都以较大速度使偏差变小;当反馈值接近期望值时,偏差较小,商反馈法有更快的收敛速度;最终两种方法都可以使反馈值平衡地达到期望值.

现在,令地形高度按正弦规律变化,幅值为 0.3,角速度为 1 rad/s,保持其它参数不变,再进行一次仿真,得到的光流控制效果如图 10 所示.

由图 10 可以看出,商反馈法比差反馈法有更高的鲁棒性,当地形高度发生变化时,商反馈法可以立即调整飞行高度来控制光流与期望值一致,而差反馈法则无法保证光流不变. 绘出地形高

度和两种控制方法的飞行高度,如图 11 所示. 由图 11 可以看出,差反馈的控制高度变化滞后于商反馈,也就是说,当地形发生高度变化时,商反馈控制能够更快地作出反应,调整飞行器的飞行高度,保证飞行安全;而差反馈控制比商反馈反应慢一些,如果出现剧烈变化的地形,发生撞地的概率要大一些.

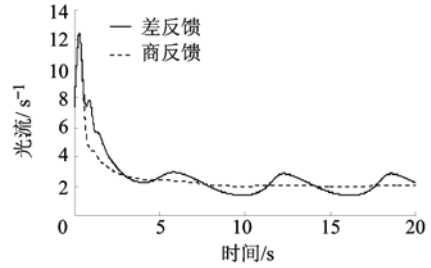

图 10 地形正弦变化时光流控制效果比较

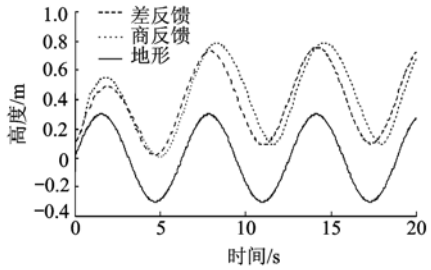

图 11 飞行高度比较

综上所述,本文提出的商反馈控制方案相对于传统的差反馈控制方案在快速性和平稳性上占有明显优势,故后文的硬件在回路仿真中,将选用商反馈控制器.

2.3 硬件在回路仿真实验

出于安全考虑,同时也为了减小离心力对双旋翼飞行器的影响,飞行器在进动方向上的线速度不可太大,假设为 0.5 m/s,当飞行高度为 1 m 时,光流为 0.5 s^{-1},现在,设光流期望值 f_{set} = 0.4 s^{-1},飞行器俯仰角 θ = 20°,经在线调试,取 K_p = 1,K_i = 0.2,K_d = 0.5,得到的光流控制效果如图 12 所示.

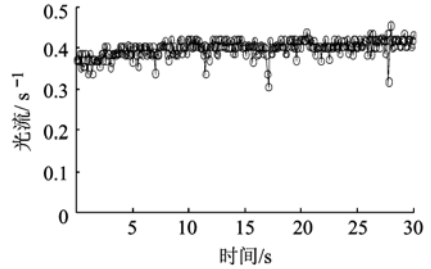

图 12 期望值为 0.4s^{-1}的光流控制效果

由图 12 可以看出,光流测量值可以控制在期望值附近,测量值存在一定的噪声,这是由于环境光线变化、计算过程的量化误差、飞行器的振动等多方面的原因造成的,但测量噪声不影响光流控制的稳定性.

飞行器的实时飞行高度如图 13 所示. 飞行器可以稳定地飞行在一定的高度上,大约为 1.07 m,高度的波动不超过 1 cm. 图 13 证明了利用光流的确可以实现飞行器的高度控制.

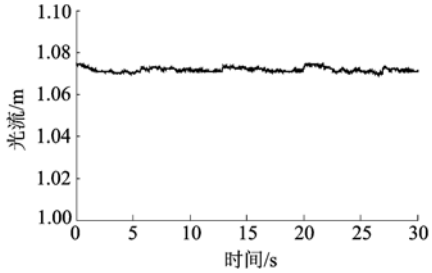

图 13 飞行高度控制效果

为了验证控制器对变化地形的跟随性能,现搭建一梯形坡地形,如图 14 所示.

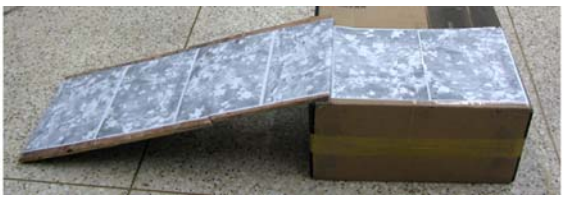

图 14 梯形坡地形

图 14 中,梯形高 0.25 m,斜坡长 0.75 m,坡度 20°,坡顶长 0.45 m.

为进一步降低飞行高度,一方面要增大光流期望值,设置 f_{set} = 0.5 s^{-1},另一方面要减小飞行速度,设置飞行器俯仰角 θ = 15°. 利用与前文相同的控制器结构和参数,进行实物实验,得到的实验结果如图 15 所示.

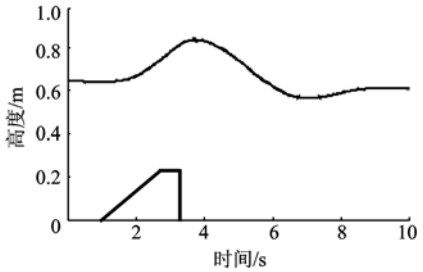

图 15 光流控制爬坡实验

由图 15 可以看出,光流控制器可以有效地对地形变化作出反应,控制飞行器在相对安全的高度稳定飞行. 但在爬坡阶段,飞行高度的变化明显滞后于地形高度的变化,究其原因,一方面是光流传感器的采样率太低,每 0.1 s 更新一次数据,延误了控制器的调节时机;另一方面,也是更重要的是 3DOF 飞行平台摆臂和配重的惯量太大,双旋翼飞行器的气动力无法快速改变飞行器的飞行

速度,进而带来了飞行高度的严重滞后. 在地形高度突变为 0 时,光流突然变小,控制器控制飞行器降低飞行高度,同样是由于摆臂和配重的惯量太大,下降到合适高度后无法立即“刹车”,高度的变化出现了超调量.

需要说明的是,尽管光流传感器的测量速度可以达到 1 500 帧/s,而此处的采样率却仅仅设置为 10 Hz,这是因为在实验室内设备运行时产生的实际光流太小,光流传感器的输出为整数,过高的采样率意味着光流的累积时间太短,会导致光流传感器的输出不稳健. 所以这种传感器更适合于飞行器低空巡航时大光流的场合. 要想同时提高采样率而又保证输出的稳健性,可以加大镜头的焦距,从而增加光流传感器的增益 μa,提高其测量的灵敏度[11]. 这是下一步的研究工作要涉及的内容.

可以从 3 个方向着手来解决这种滞后问题. 一是提高光流传感器的采样率;二是减小 3DOF 飞行平台摆臂和配重的惯量,这个问题在真正的无约束飞行中是不存在的,也就是说,在无约束飞行中,其爬坡效果要比当前的实验效果好;三是改变光流传感器的姿态,不再让它始终正对地面,而是使之有一个安装前置角,相当于巡航导弹中的前视雷达,这样,光流传感器可以在飞行器到达障碍之前提前做出反应,控制飞行器提前拉高,从而避免这种滞后问题. 就目前的实验室环境来讲,这一点也不好实现,尽管可以给光流传感器一个前置安装角,但由于实验室内的实验设备太多,飞行过程中,各种实验台的底座处在了光流传感器的视场之内,严重影响了光流测量效果,使得飞行变得很不稳定,这一点得到了飞行实验的证实.

3　光流控制自动着陆

有关研究表明,对于垂直着陆,昆虫利用视网膜上影像的膨胀速度来估计着陆时机,而无需获知精确的相对速度和距离. 对于滑翔着陆,平动光流远大于膨胀光流,可以在保持光流不变的情况下减小平动速度,由于光流与相对速度的比例关系,飞行高度也就下降了. 这样做的优点是:飞行高度降低时,飞行速度自然也跟着降低了[15],事实上,通过保持光流不变,水平速度与高度成正比,所以当着陆时,高度为 0,速度也就为 0 了,这就保证了着陆的平稳性[10]. 蜜蜂按指数规律减小它们的飞行速度并以固定角度降落. 无论蜜蜂还是蝗虫,这种降落方式都是为了保持光流不变[13].

假设飞行器的水平速度为 V_x,竖直速度为 V_y,向上为正,飞行高度为 y,初始飞行高度为 H,如图 16 所示.

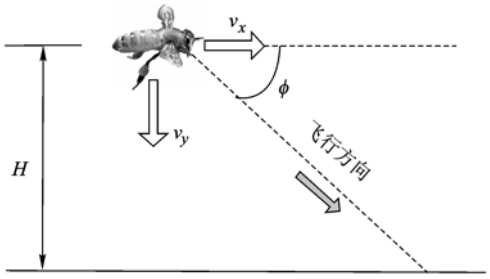

图 16　着陆运动学示意图

欲使飞行器在保持光流不变的情况下以角度 ϕ(逆时针为正)着陆,则必须满足以下方程:

$$\left.\begin{aligned} f=\frac{v_x}{y}=f_{\text{set}} \\ \tan\phi=\frac{v_y}{v_x} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中　　$\dot{y}=v_y=v_x\tan\phi=yf_{\text{set}}\tan\phi$

求解以上微分方程并将初始条件:$y(0)=H$ 代入可得

$$\left.\begin{aligned} y=H\mathrm{e}^{kt} \\ k=f_{\text{set}}\tan\phi \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

在着陆下降过程中,$\tan\phi<0$,所以 $k<0$,飞行高度按指数规律收敛到 0,光流期望值和下降角度共同决定了飞行高度的收敛速度.

在上一节的地形跟随控制器设计中,光流控制器可以保证光流不变,但在没有速度传感器的情况下,是无法通过调节纵向速度来实现指数着陆方案的. 3DOF 飞行平台中的双旋翼飞行器,俯仰角 θ 是可调的,它决定了飞行器进动方向的速度,两者之间存在一个一阶滞后环节. 于是可以考虑通过调节进动速度来实现指数着陆.

对式(10)求导并结合式(9)不难得出:

$$v_x=H\cdot f_{\text{set}}\mathrm{e}^{kt} \tag{11}$$

式(11)表明,通过俯仰角 θ 来控制进动速度按指数规律衰减,同样可以实现式(10)表示的指数规律着陆方案. 接下来的问题是如何通过调节 θ 角来实现进动速度的指数衰减. 由式知

$$\frac{W_\alpha(s)}{\vartheta(s)}=\frac{1.8}{4.7s+1} \tag{12}$$

式中,$W_\alpha(s)$为进动方向角速度的拉氏变换;而 v_x 为进动方向的线速度,于是

$$W_\alpha(s)\approx\frac{V_x(s)}{L} \tag{13}$$

式中,$V_x(s)$为 v_x 的拉氏变换.

对式(11)进行拉氏变换可得

$$V_x(s)=\frac{H\cdot f_{\text{set}}}{s-k}=\frac{H\cdot f_{\text{set}}}{s+f_{\text{set}}\tan(-\phi)} \tag{14}$$

将式(14)代入式(13),进而代入式(12),可以解得

$$\vartheta(s)=\frac{H}{1.8L\tan(-\phi)}\times \left(4.7f_{\text{set}}\tan(-\phi)+\frac{1-4.7f_{\text{set}}\tan(-\phi)}{\frac{1}{f_{\text{set}}\tan(-\phi)}s+1}\right) \tag{15}$$

由式(15)可以看出,双旋翼飞行器的俯仰角 θ 的变化规律由两部分组成,一部分是时域上的理想脉冲函数,另一部分是时域上的指数衰减函数. 由于理想脉冲函数无法在工程中实现,况且俯仰角的变化范围是有限制的,此处不妨暂且忽略该项,只取指数衰减部分来控制俯仰角的变化,即令俯仰角 θ 按指数规律由初始角度衰减到 0,探讨飞行器能否在保持光流不变的情况下安全着陆.

设期望光流 $f_{\text{set}}=0.5\ \text{s}^{-1}$,飞行器俯仰角 $\theta=15°$,仍然采用前文设计的光流控制器,当飞行状态稳定后,控制俯仰角 θ 由 15°按指数规律衰减到 0,时间常数取 10 s. 首先,将这些初始条件代入数学模型中进行仿真,得到的仿真结果如图 17 所示.

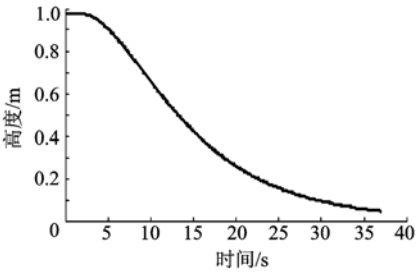

图 17 光流控制自动着陆数学仿真结果

由图 17 可以看出,当飞行器俯仰角按指数规律衰减时,在保持光流不变的情况下,飞行高度也在近似按指数规律衰减,高度越低,飞行速度也越低,保证了自动着陆的安全性. 由于光流传感器的安装位置距离起落架底部约 18 cm,所以到 23 s 左右的时刻,飞行器已经完成了降落过程,整个降落过程用时 21 s. 图 17 证明了忽略式中的时域理想脉冲项是合理的.

现在,将同样的初始条件代入到硬件在回路的实时仿真实验中来,得到的飞行高度变化如图 18 所示.

由图 18 可以看出,在 2 s 时刻,施加了俯仰角

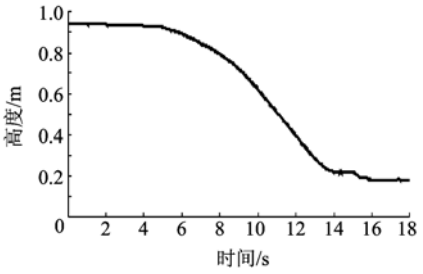

图 18 光流控制自动着陆硬件在回路实验结果

指数衰减规律后,接下来的 3 s 内飞行高度几乎没有变化,这是因为 3DOF 飞行平台的摆臂和配重部分相对于双旋翼飞行器来说有很大的惯性,俯仰角的变化无法迅速地降低速度,也就无法迅速降低飞行高度;在第 16 s 时刻,飞行器平稳安全地成功着陆,整个降落过程用时 14 s,比前面的数学仿真结果要好一些;在最后的 2 s 时间里,飞行器已经完成了着陆,但飞行高度有一些振动,这是由摆臂和起落架的弹性造成的. 总而言之,图 18 证明了光流控制自动着陆的工程可行性.

4 结 论

本文力图利用光流信息控制飞行平台的地形跟随和自动着陆,以光流传感器为反馈元件的双旋翼飞行器成功地完成了既定任务,实验结果证明了光流可以控制飞行器安全地进行地形跟随和自动着陆.

文中将光流传感器直接安装在了常平杆上,避开了传感器与飞行器姿态的耦合问题. 而在实际中,这一问题是不可避免的,除非把光流传感器安装在一惯性平台上,但那样会使得硬件系统变得复杂,不适于小型飞行器的使用.

参考文献(References)

[1] Ortiz A E, Neogi N. Color optic flow: a computer vision approach for object detection on UAVs[C]//25th Digital Avionics Systems Conference. Portland: IEEE/AIAA, 2006: 1 - 12

[2] Srinivasan M V, Poteser M, Kral K. Motion detection in insect orientation and navigation[J]. Vision Research, 1999, 39: 2749 - 2766

[3] Barrows G L, Chahl J S, Srinivasan M V. Biologically inspired visual sensing and flight control[J]. The Aeronautical Journal, 2003, 107(1069): 159 - 168

[4] Ortiz A E, Neogi N N. Object detection and avoidance using optical techniques in uninhabited aerial vehicles[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head, Soth Carolina: [s. n.], 2007: 20 - 23

[5] Watanabe Y, Fabiani P. Air-to-Ground target tracking in a GPS-Denied environment using optical flow estimation[C]//AIAA Guidance, navigation, and Control Conference. Chicago, llinois:

AIAA,2009

[6] Romero H, Salazar S, Lozano R. Real-time stabilization of an eight-rotor UAV using optical flow[J]. IEEE Transactions on Robotics,2009,25(4):809 - 817

[7] Barber D B, Griffiths S R, McLain T W, et al. Autonomous landing of miniature aerial vehicles[J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication,2007,4(5):770 - 784

[8] Griffiths S, Saunders J, Curtis A, et al. Maximizing miniature aerial vehicles[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine,2006,13(3):34 - 44

[9] Rodrguez A F, Andersen E, Bradley J M, et al. Wind estimation using an optical flow sensor on a miniature air vehicle[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina: AIAA,2007

[10] Srinivasan M V, Zhang S W, Chahl J S. Landing strategies in honeybees and possible applications to autonomous airborne vehicles[J]. The Biological Bulletin,2001,200:216 - 221

[11] Liu Xiaoming, Chen Wanchun, Yin Xingliang, et al. Optical flow sensor designed for altitude-holding flight[C]//2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control. Zibo:[s. n.],2010:114 - 117

[12] Ruffier F, Franceschini N. Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance[J]. Robotics and Autonomous Systems,2005,50:177 - 194

[13] Netter T, Franceschini N. A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. EPFL Lausanne Switzerland:[s. n.],2002:129 - 134

[14] 孙虎章. 自动控制原理[M]. 北京:中央广播电视大学出版社,2002:59
Sun Huzhang. Auto control theory[M]. Beijing: Central Radio & TV University Press,2002: 59 (in Chinese)

[15] Barrows G L, Chahl J S, Srinivasan M V. Biomimetic visual sensing and flight control[C]//Proceedings Seventeenth International Unmanned Air Vehicle Systems Conference. Bristol, UK:[s. n.],2002:1 - 15

(编　辑:张　嵘)

(上接第 68 页)

[9] Li Zhen, Liu Bin, Ma Ning, et al. Formal testing applied in embedded software[C]//8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Washington, DC: IEEE Computer Society,2009,2:1 - 5

[10] Ma Ning, Bao Xiaohong, Li Zhen, et al. Verification of safety-critical software requirement based on Petri-net model checking [C]//Supplemental Proceedings 20th International Symposium on Software Reliability Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society,2009

[11] 李震,刘斌,殷永峰,等. 基于扩展 Petri 网的安全关键软件需求模型检验[J]. 沈阳工业大学学报,2011,33(1):113 - 120
Li Zhen, Liu Bin, Yin Yongfeng, et al. Requirement model checking of safety-critical software based on expanded Petri net [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2011, 33(1):113 - 120(in Chinese)

[12] 古天龙. 软件开发的形式化方法[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社,2005:47 - 51
Gu Tianlong. Formal methods of software development[M]. 1st ed. Beijing: Higher Education Press, 2005: 47 - 51 (in Chinese)

[13] 沈胜宇. 模型检验的反例解释[D]. 长沙: 国防科学技术大学计算机学院,2005:1 - 7
Shen Shengyu. Explaining counterexample of model checking [D]. Changsha: School of Computer, National University of Defense Technology,2005:1 - 7(in Chinese)

[14] Roberto C, Alessandro C, Charles A J, et al. NuSMV 2.4 user manual [EB/OL]. Italy, Trento: CMU and ITC-irst, 2005 [2009]. http://nusmv. irst. itc. it/

(编　辑:赵海容)