

doi: 10.7690/bgzd.2014.07.007

无人飞行器视觉导航半实物仿真系统

徐蓓蓓¹, 关震宇¹, 张赫², 杨欢¹, 李杰¹

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学计算机学院, 北京 100081)

摘要: 针对惯性导航系统(INS)和全球定位系统(GPS)构成的组合导航系统存在 GPS 信号丢失时 INS 测量值逐渐漂移直至发散的问题, 设计并开发了一种无人飞行器视觉导航半实物仿真系统。该系统硬件部分由直线运动机构、云台摄像机、采集和控制设备、投影设备和电力供应设备等组成, 软件部分由图形用户界面、数据采集模块、图像处理模块和运动控制模块组成, 利用多线程技术, 使各模块之间能够相互独立, 并通过模拟飞行器的飞行动态进行了实验。实验结果表明: 该系统真实反映了无人飞行器飞行过程中的动态特性以及姿态角等的变化, 并且具备良好的用户显控界面, 验证了该系统的有效性以及基于图像中地平线的姿态提取算法的可行性。

关键词: 无人飞行器; 视觉导航; 图像处理; 地平线提取; 半实物仿真系统

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Semi-physical Simulation System for the Visual Navigation of UAV

Xu Beibei¹, Guan Zhenyu¹, Zhang He², Yang Huan¹, Li Jie¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Computer Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For the problem of the integrated navigation system consisted of INS and GPS that when the signal of GPS is lost, the measurement values of INS gradually drift until the divergence, a semi-physical simulation system for the visual navigation of UAV is designed and developed. The hardware of the system is mainly consisted of linear motion mechanism, pan-tilt camera, acquisition and control equipment, projection equipment and power supply equipment, the software of the system is mainly consisted of GUI, data acquisition module, image processing module and motion control module. Through the multi-threading technique, it makes every module independent of each other. Besides, experiments of simulating UAV's flight dynamics were carried out. The experiment results show that: the system truly reflect the dynamic parameters of UAV during the flight and the change of attitudes, and also have a good user display and control interface. The experiment results verify the validity of the experiment system and the feasibility of the attitude extraction algorithm based on the horizon in the image.

Keywords: UAV; visual navigation; image processing; horizon extraction; semi-physical simulation system

0 引言

近年来, 微型无人飞行器(UAV)的发展极为迅速, 已经在军事、民用上得到广泛的应用。微型无人飞行器是指尺寸在米级、亚米级的无人飞行器, 是现今世界各国正在大力探索、研究的新一代飞行器, 可配备陆军师、团所属侦察分队, 在战场、城区或山地等复杂环境下实施战场侦察、目标定位、火炮较射、通信中继等任务, 换装任务载荷后, 还可执行诸如救援搜索、航拍监视、事故预警等任务^[1]。通常, 微型无人飞行器将惯性导航系统(INS)和全球定位系统(GPS)构成组合导航系统, 用 GPS 修正 INS 累积误差。然而当 GPS 信号丢失时, INS 测量值逐渐漂移直至发散。随着计算机视觉算法性能和计算机硬件性能的提高, 基于计算机视觉导航成为无人飞行器导航领域研究热点^[2]。

微型无人飞行器视觉导航^[3]是指飞行器依据自身携带的图像传感器获取图像信息, 然后利用图像处理技术对图像进行处理, 并且结合其他的数据处理算法提取出图像中包含的一些导航信息, 如飞行器的姿态角、滚转速度等信息, 继而将这些信息传送给飞行器的控制系统, 控制飞行器飞向目标区域, 完成既定任务。视觉导航中所用的视觉传感器, 如 CCD 摄像机, 由于信息丰富、成本低、可靠性高而被广泛应用于无人飞行器系统。而在无人飞行器飞行过程中, 由于摄像机随机体一同平移和旋转, 且其视野范围有限, 很容易使目标偏离摄像机的视野。为解决这一问题, 在地面移动机器人平台上, 一些研究通过控制云台改变摄像机的视野, 使目标可以始终位于图像中心^[4-6]。辛哲奎等人^[7]也设计研究了一种云台跟踪控制实验系统, 分析了基于视觉的小型无人直升机地面目标跟踪系统的特性, 验证

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-02-26

基金项目: 十二五国防基础科研项目“非瞄准线×××弹药技术”(B22233××××)

作者简介: 徐蓓蓓(1988—), 女, 山东人, 在读硕士, 从事飞行器视觉导航研究。

了各种机载云台控制方法的稳定性及其实际跟踪效果。不过由于这些实验系统的平台都比较复杂，搭建和携带都不方便，所以应用上不是很广泛。

为应对上述问题，笔者设计并开发了一种无人飞行器视觉导航半实物仿真系统。该系统可用来模拟无人飞行器在飞行过程中的姿态的变化，通过视频采集系统将图像信息采集下来，进行图像处理，进而进行飞行器导航参数的解算。为了测试该仿真系统的有效性以及基于图像中地平线的姿态提取算法的可行性，模拟飞行器的飞行动态进行了实验，通过实验结果验证了该系统的有效性以及图像处理算法的可行性。

1 仿真系统设计与实现

1.1 整体方案

该仿真系统主要是模拟无人飞行器视觉导航系统的动态特性以及验证各种图像处理算法的可行性，并且根据图像处理算法解算出导航参数。该系统首先利用投影仪模拟真实的地平线场景，然后利用计算机通过控制接口控制直线运动机构带动云台及摄像头运动，模拟无人飞行器的空中直线飞行姿态；计算机同时控制云台转动，模拟无人飞行器的飞行姿态角的变化；同时通过视频采集卡将采集的图像信息传送到计算机中，利用图像处理算法进行导航数据的解算。该系统整体组成如图1所示。

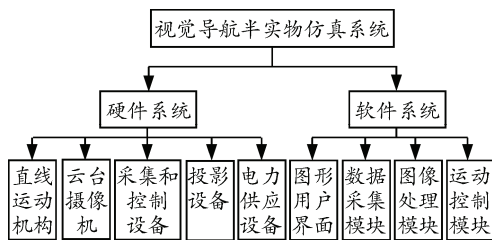


图1 系统整体组成

1.2 系统硬件组成

笔者设计的无人飞行器视觉导航半实物仿真系统主要由直线运动机构、云台摄像机、采集和控制设备、投影设备和电力供应设备等组成，如图2。

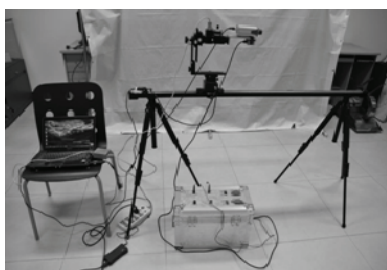


图2 仿真系统硬件组成

1.2.1 直线运动机构

直线运动机构主要是模拟飞行器空中飞行动态，并且其作为云台摄像机等设备的载体，需要具有一定的负载能力和一定的稳定性。其参数如表1。

表1 直线运动机构的参数

参数	数据
导轨长度/m	4
有效负载/kg	6
速度/(m/min)	3~10
驱动装置	步进电机

1.2.2 云台摄像机

云台摄像机主要是模拟飞行器飞行过程中的滚转角和俯仰角的变化。其中双自由度数字云台是安装和固定摄像机的支撑设备，可使摄像机进行水平和垂直两轴随动。云台的姿态变化由2台执行电动机接收控制指令实现。其参数表如表2所示，组成如图3所示。

表2 云台摄像机的参数

参数	数据
视场角/(°)	30
信号制式	PAL
有效像素	1 024 × 768
视频输出	BNC
工作电压/V	DC12
镜头大小/mm	12
标配	1/3"CCD
输入电压/V	DC12V~27
最大输入电流/A	2
最大负载/kg	5
最高转速/((°)/s)	10
俯仰角度/(°)	-36~36
滚转角度/(°)	-157~157
角分辨率/(°)	0.012 9

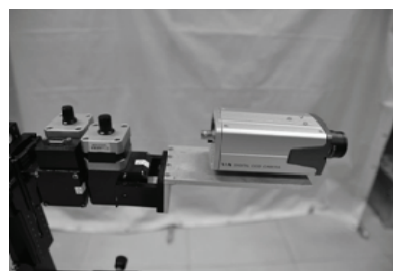


图3 云台摄像机

1.2.3 采集和控制设备

采集和控制设备接收来自直线运动机构以及云台的运动状态，目标图像以及传感器等数据，然后根据相应的控制算法以及图像处理算法计算出直线运动机构和云台运动的控制指令以及导航数据。其中直线运动机构以及云台是通过串口与计算机之间进行通信，图像数据是通过视频采集卡连接计算机进行采集的，云台姿态角的变化是通过传感器采集

的。参数表如表 3 所示，组成如图 4 所示。

表 3 采集和控制设备的参数

参数	数据	
视频采集卡	采样频率/(帧/s)	25
	接口	USB
	数据传输	两路实时
计算机	内存主频/GHz	2
	CPU	Intel core2 T6500



图 4 采集和控制设备

1.2.4 投影设备

本仿真系统采用投影仪模拟出真实地平线场景，使用方便，并且可以随时更换模拟场景。其参数表如表 4 所示。

表 4 投影设备的参数表

参数	数据
标准分辨率	SVGA
功耗/W	270
投影距离/m	0.88~10.44
频率/Hz	50/60
供电电源/V	AC100~240
供电电流/A	1.3~2.9
投影画面尺寸/英寸	23~350

1.2.5 电力供应设备

电力供应设备主要负责给整个仿真系统供电。采用逆变器将 DC12V 直流电转换为 AC220V 交流电，然后再将电压分配给各个模块系统进行使用。

1.3 软件平台设计

根据本仿真系统的硬件特点，笔者基于 C++MFC 进行软件平台的设计。根据功能划分，该软件平台由 4 个模块组成，分别为图形用户界面、数据采集模块、图像处理模块和运动控制模块，如图 5 所示。为了提高系统的可用性及程序运行的效率，采用多线程进行开发。

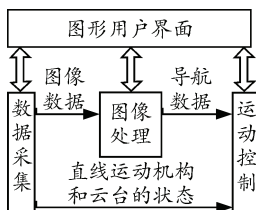


图 5 软件平台结构

1.3.1 图形用户界面

图形用户界面分为初始化界面、云台控制界面、直线运动机构控制界面、实时图像界面、姿态提取界面。其中，初始化界面主要实现对视频采集卡、云台、直线运动机构、姿态提取设备的初始化以及对串口通信的波特率和传感器采样频率进行设置。云台控制界面主要负责云台的运动方向，速度的控制，水平、倾斜边界的设定。直线运动机构控制界面主要负责直线运动机构的运动，主要控制其运动的方向和速度。实时图像界面可以显示由视频采集卡采集而来的一路实时图像，在本系统的设定中，预留了 3 个图像显示位置，为以后系统的扩展准备。在该界面上，还有保存视频的功能，从而实现实时存储，可以将采集到的视频保存到硬盘上。姿态提取界面是传感器将云台模拟无人飞行器的参数如俯仰角度等进行实时显示，并可以选择保存这些姿态数据供以后数据处理使用。如图 6 所示。



图 6 图形用户界面

1.3.2 数据采集模块

本系统中，涉及 2 部分的数据采集功能。第一部分是摄像头采集的图像，由于采集到的是模拟信号，故使用了视频采集卡进行处理，将模拟信号转化为数字信号，从而进行实时显示和存储。第二部分是姿态的提取，将传感器的数据交付图形界面进行显示和存储。

1.3.3 图像处理模块

由数据采集模块采集的数据将交给图像处理模块进行相应的处理。本系统中，采集的数据将由 Matlab 做进一步的处理，实现地平线的提取以及导航参数的解算。由于采用了多线程的处理方式，数据采集和图像处理可以并行处理，或者离线处理采集回来的视频。

1.3.4 运动控制模块

运动控制模块主要实现图形用户界面中关于云

台以及直线运动机构的控制方面的一些操作，这里使用云台以及直线运动机构开发商的一些接口进行实现。

2 无人飞行器导航参数的解算

笔者选择图像信息中特殊的地平线作为导航参数解算的基准，首先提取出所采集图像的地平线，然后根据地平线的参数解算出无人飞行器的飞行姿态角。

2.1 地平线检测算法

地平线是图像中显著的分天地的边缘特征，地平线检测方法大致可以分为基于区域特征的算法和基于边缘特征的算法^[8]。文中地平线检测方法采用基于边缘特征的算法。该算法先对图像进行边缘检测，然后利用最小二乘法拟合直线，得到地平线的斜率和截距等参数。

2.1.1 Canny 边缘检测

文中，边缘检测选用 Canny 边缘检测算子。Canny 边缘检测算子是一个既能滤去噪声又保持边缘特性的边缘检测最优滤波器，其采用一阶微分滤波器。

Canny 边缘检测算法实现的具体步骤如下：

1) 用高斯滤波器平滑图像。

二维高斯函数为： $G(x, y) = \frac{2}{2\pi\sigma^2} \exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2})$ ，

在方向 n 上的一阶导数为： $G_n = \frac{\partial G}{\partial n} = n\Delta G$ 。其中，

$$n = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \text{ 是方向矢量, } \Delta G = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial G}{\partial y} \end{bmatrix} \text{ 是梯度矢量。}$$

将图像 $f(x, y)$ 与 G_n 作卷积，同时改变 n 的方向， $G_n * f(x, y)$ 取得最大值时的 n 就是正交于检测边缘的方向。

2) 用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向。

$$E_x = \frac{\partial G}{\partial x} \times f(x, y), E_y = \frac{\partial G}{\partial y} \times f(x, y) \quad (1)$$

$$A(x, y) = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{E_x}{E_y}\right) \quad (2)$$

$A(x, y)$ 反映了图像 (x, y) 点处的边缘强度， θ 是图

像 (x, y) 点处的法向矢量。

3) 对梯度幅值进行非极大值抑制。

仅得到全局梯度并不足以确定边缘，还必须保留局部梯度最大点，将其他非局部极大值置 0，在此利用梯度方向。将 3×3 邻域的中心像素 M 的梯度值与沿着梯度线的 2 个像素相比，若 M 较小，令 $M=0$ ，从而得到细化的边缘。

4) 用双阈值算法检测和连接边缘。

给定高阈值 τ_1 和低阈值 τ_2 ，分别得到 2 个阈值边缘图像 $G_1(x, y)$ 和 $G_2(x, y)$ 。 $G_2(x, y)$ 用高阈值得到，含有很少的假边缘，但有间断(不闭合)。所以要在 $G_2(x, y)$ 中把边缘连接成轮廓，当到达轮廓的端点时，就在 $G_1(x, y)$ 的 8 邻点位置寻找可以连接到轮廓上的边缘，不断在 $G_1(x, y)$ 中收集边缘，直到将 $G_1(x, y)$ 连接起来为止^[9]。

2.1.2 最小二乘法拟合直线

边缘检测后，得到包含地平线边缘的图像。这时要给出地平线的精确描述，就要对提取的地平线进行拟合，从而得到地平线的精确方程。最常用的一种数据拟合方法就是最小二乘法^[10]。

已知 m 个点，坐标分别为 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, m)$ 。设所拟合的直线方程为： $y=a_0+a_1x$ 。一般采用点到直线的最小均方距离作为误差函数 E ，使得 E 最小的直线就是最佳拟合。设：

$$E(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^m [(a_0+a_1x_i)-y_i]^2 \quad (3)$$

对上式进行极值求取可得：

$$a_1 = \frac{m \sum_{i=1}^m x_i y_i - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2}, a_0 = \sum_{i=1}^m y_i - a_1 \sum_{i=1}^m x_i \quad (4)$$

文中所得地平线的直线方程是图像像素坐标系下的，在此将地平线表示为 $y = kx + b$ (其中 k 为直线斜率， b 为 y 轴上的截距)。

然而，直接拟合图像中可能存在非地平线的干扰边缘。为了减小干扰边缘的影响，将对图像进行 2 次直线拟合：首先，对降采样图像进行 Canny 边缘检测，并对检测后的图像 G_1 进行最小二乘法直线拟合，得到地平线 l_1 的参数 (k_1, b_1) ；然后对原图像进行 Canny 边缘检测，得到检测后图像 G_2 。设定距离阈值 D_0 ，计算 G_2 中灰度不为 0 的像素点与 l_1 之

间的距离 D , 若 $D \geq D_0$, 则将该像素点的灰度置为 0, 否则灰度值不变, 计算后得到图像得 G_2 . 利用 G_2 中非 0 像素点进行第二次最小二乘法直线拟合, 得到地平线 l_2 参数 (k_2, b_2) , 即为所求地平线的直线参数.

2.2 姿态角的解算

经过坐标系变换以及地平线成像投影等变换得到地平线在图像坐标系 (u, v) 中的直线方程为

$$v = \left(\frac{a_y}{a_x} \tan \phi\right)u + v_0 - \left(\frac{a_y}{a_x} \tan \phi\right)u_0 - \frac{a_y}{\cos \phi} \tan \theta \quad (5)$$

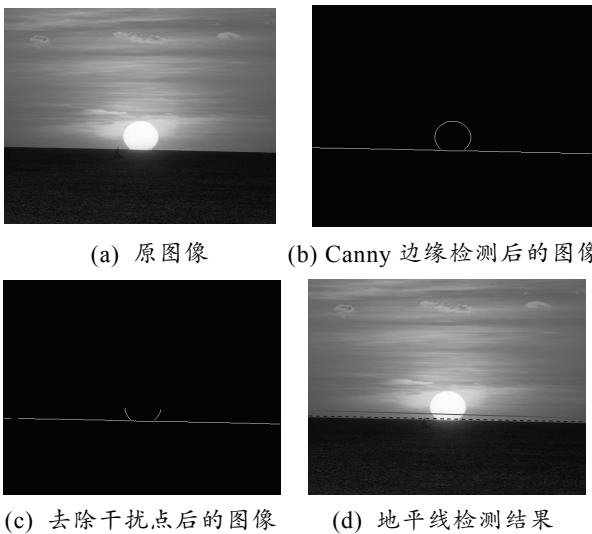
从而得到无人飞行器的滚转角和俯仰角为:

$$\begin{cases} \phi = \tan^{-1}\left(k \frac{a_x}{a_y}\right) \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{(v_0 - ku_0 - b) \cos \phi}{a_y}\right) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 为摄像机内部参数, 经摄像机标定可求得; k, b 为地平线的斜率和截距^[11].

3 实验结果分析

将采集到的图像数据进行图像处理, 处理结果如图 7.



说明: 其中实线为直接拟合曲线, 虚线为去除干扰点后的拟合曲线

图 7 图像处理过程

根据 2.1.2 中原理得到图 7(d)的地平线参数为 $(k, b) = (0.021\ 545, 305.36)$.

根据地平线参数以及式 (6) 解算得飞行器姿态角为: 滚转角 $\phi = 1.126\ 5^\circ$, 俯仰角 $\theta = 3.224\ 1^\circ$.

由图 7(b)可以看出, Canny 边缘检测算法能很

好地检测出图像的边缘. 由 7(d)可以看出, 地平线检测结果(图中虚线)比较理想. 由控制界面显示的云台参数可知云台的滚转角为 $\phi = 1.24^\circ$, 俯仰角为 $\theta = 3.37^\circ$. 计算结果与其基本符合, 实验结果验证了该算法的可行性.

4 结论

该半实物仿真系统可以真实反映无人飞行器飞行过程中的动态特性以及姿态角等的变化, 并具备良好的用户显控界面, 能方便地进行各种图像处理算法的测试. 笔者模拟飞行器的飞行动态进行了实验, 系统的运行情况以及解算出的导航参数验证了该仿真系统的有效性以及图像处理算法的可行性. 下一步, 笔者将针对该系统的不足进行改进, 使其能应用在更多的图像处理以及视觉导航领域.

参考文献:

- [1] 韦秀光. Sender 无人机研究计划即将启动[J]. 雷达科学与技术, 2002(2): 27.
- [2] 徐伟杰, 李平, 韩波. 扩展 Kalman 滤波框架下的地平线检测算法[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 225.
- [3] 吴显亮, 石宗英, 钟宜生. 无人机视觉导航研究综述[J]. 系统仿真学报, 2010(2): 62.
- [4] Freda L, Oriolo G. Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55: 419-432.
- [5] Coue C, Bessiere P. Chasing an Elusive Target with a Mobile Robot[C]. Proc. Of the 2001 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001: 1370-1375.
- [6] Tsai C, Song K, Dutoit X, Brussel H. Robust Mobile Robot Visual Tracking Control System using Self-tuning Kalman Filter[C]. Proc. of IEEE Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2007: 161-166.
- [7] 辛哲奎, 方勇纯, 张葛, 等. 小型无人直升机云台跟踪控制系统实验平台设计[C]. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing, China, July 2010: 29-31.
- [8] 程序, 郝群, 宋勇. 一种基于类间方差的地平线检测算法[J]. 航空学报, 2012, 31(10): 2056.
- [9] 叶俊. 基于 Canny 算子的图像边缘检测与提取的算法[J]. 科技资讯, 2007(34): 69.
- [10] 宋蕾, 史忠科, 尚佳佳. 无人机自主着陆跑道识别[C]. 中国航空学会控制与应用第十三届学术年会论文集. 北京, 2008: 3-4.
- [11] 程序, 郝群, 宋勇. 基于直线模型的微型飞行器姿态角计算[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(7): 2-3.