

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.05.018

基于人工视觉的四旋翼飞行器室内定位与控制

陈小龙^{1,2}, 唐强^{1,2}, 车军^{1,2}, 刘林²

(1. 飞行器控制一体化国防科技重点实验室, 西安 710065;

2. 中航工业西安飞行自动控制研究所重点实验室管理办公室, 西安 710065)

摘要: 为提高室内四旋翼的定位精度, 提出一种基于人工视觉的四旋翼室内定位方法。在地面铺设与地面颜色有差别的参考线, 利用机载下视觉传感器采集图像, 并进行参考线特征提取, 确定参考线与机体的相对位置并与微惯性测量单元数据融合, 给出四旋翼飞行器的位置。使用 AR.Drone 四旋翼飞行器对该方法进行了验证。结果表明: 该方案能在室内实现精度较高的定位, 可以满足四旋翼航迹跟踪的精度要求。

关键词: 人工视觉; 室内导航; 四旋翼

中图分类号: TJ8 **文献标志码:** A

Localization and Control of Quadrotor Aircraft Based on Indoor Vision

Chen Xiaolong^{1,2}, Tang Qiang^{1,2}, Che Jun^{1,2}, Liu Lin²

(1. National Key Laboratory of Science & Technology on Aircraft Control, Xi'an 710065, China;

2. Management Office, Key Laboratory of AVIC Automatic Flight Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To improve the locating accuracy of quadrotor indoor, a locating algorithm based on vision is presented. Reference lines should be set on the ground and its color is different with ground, and quadrotor vision sensor is used to acquire images. Extract the reference line features, locates the relative positions between quadrotor and reference lines and compunds it with micro-inertia measuring unit data for actual position of the quadrotor. AR.Drone is used for validating this method and the result shows that this algorithm can realize high accuracy location meet accuracy requirements of trajectory tracking of quadrotor.

Key words: monocular vision; indoor navigation; quadrotor

0 引言

定位问题是在室内完成小型无人机实验的关键之一, 小型无人机通常使用微惯性(micro-electromechanical systems, MEMS)传感器作为主要测量传感装置, 但 MEMS 器件的量测误差往往较大, 只能满足小型无人机稳定飞行的需求, 不能进行高精度的航迹控制^[1]。因受到室内 GPS 的应用限制, 现在一般使用机载的视觉传感器或者外部的定位传感器, 如 Vicon 的视觉捕捉系统^[2]。Vicon 视觉捕捉系统具有精度高以及可跟踪多个对象的特点, 但是造价高, 只能在约 4 m×8 m 的范围内使用, 且不可移动。因此, 笔者介绍一种借助机载的视觉传感器来实现相关功能的低成本四旋翼室内控制与导航方案。

1 四旋翼飞行器简介

Parrot AR.Drone 是法国 Parrot 公司推出的一款基于真实视频游戏概念的四旋翼飞行器。该四旋翼飞行器使用 ipad/iphone/itouch 进行控制, 由于含有航姿控制单元, 使得四旋翼的控制较为简单, 飞机

通过 Wi-Fi 数据链与 iphone 等设备相连, 可以实时传送机载摄像头拍摄的图像, 产生第一视角操纵的效果。AR.Drone 机载 2 个摄像头, 前视摄像头为 93° 广角斜对角镜头, 分辨率为 640×480, 采样频率为 15 帧/s; 下视摄像头, 为 64° 斜对角摄像头, 分辨率为 176×144, 采样频率为 60 帧/s。

四旋翼机上含有控制姿态角与垂直速率的内回路, 可通过地面计算机发送控制指令控制。AR.Drone 可使用 3 个姿态角(俯仰角、滚转角、偏航角速率)和垂直速率共 4 个控制指令。地面计算机中可以处理四旋翼经由 Wi-Fi 传输的传感器数据, 包括图像传感器采集的图像和加速计陀螺的量测值。

2 导航方案

虽然 AR.Drone 输出的传感器信息中含有机体坐标系下的 xy 方向的速率^[3], 但是直接对两方向速率进行坐标转换并积分计算得到的飞机相对于初始位置的位移误差较大, 不能用于位置控制。因此笔者设计了利用 AR.Drone 机载摄像头实现基于室内地面参考线的人工视觉导航解决方案。

收稿日期: 2011-12-13; 修回日期: 2012-01-19

作者简介: 陈小龙(1988—), 男, 安徽人, 助理工程师, 从事微小飞行器的飞行控制研究。

3 导航方案

AR.Drone 底部摄像头的分辨率低, 帧率高, 可以实现较快的数据处理与更新。根据这个特点, 利用地面参考网格建立导航基准, 地面导航区域与地面参考线如图 1。导航方案的实现步骤如下:

1) 设置导航区域: 在地面设置一个导航区域, 导航区域由横纵向参考线构成, 参考线的间隔为 1 m, 如 0, 2 个方向的参考线条数可以根据实际场地的大小进行调整;

2) 确定初始位置: 四旋翼在导航区域内飞行, 其下视摄像头拍摄到的图像中含有地面参考线的相关特征。将四旋翼第一次检测到的一对垂直参考线的交点作为四旋翼位置量测平面坐标系的原点 O , 将四旋翼首次检测到的与机身中轴平行的地面参考线方向作为 x 轴方向, 以此定义平面坐标系 R_0 ;

3) 确定定位结果: 处理四旋翼惯性传感器的量测结果和对四旋翼下视摄像头特征提取的结果, 得到四旋翼相对于原点 O 的位移, 即为四旋翼的定位结果。

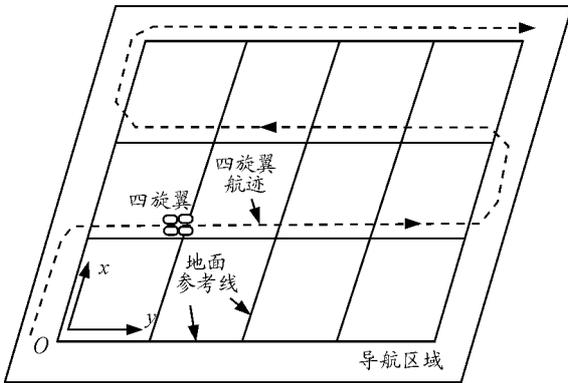


图 1 地面导航区域与地面参考线

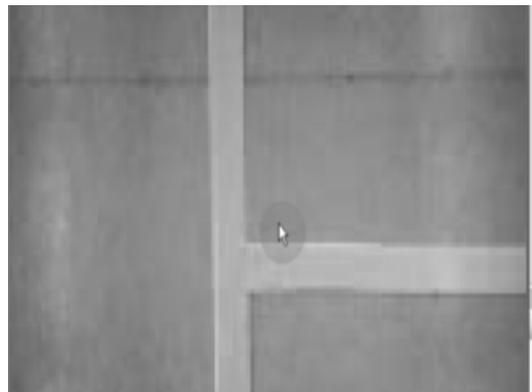
4 图像预处理与参考线特征提取

导航方案中的视觉算法需要提取下视摄像头图像中的地面参考线的特征, 考虑到鲁棒性与快速性的要求, 笔者选择了 OpenCV 的函数 $cvHoughLines2^{[4]}$ 实现直线的检测, 该函数可以根据图片边缘检测的结果给出在图像中出现的直线。AR.Drone 传输的图像数据经过压缩, 含有噪声, 为了进一步提高检测的准确性, 需要在检测直线前对图像进行预处理。预处理步骤为滤除图像噪声, 提取图像中与参考线颜色相同的部分, 计算边缘, 使用该方法避免因直接使用灰度图而带来的误判。

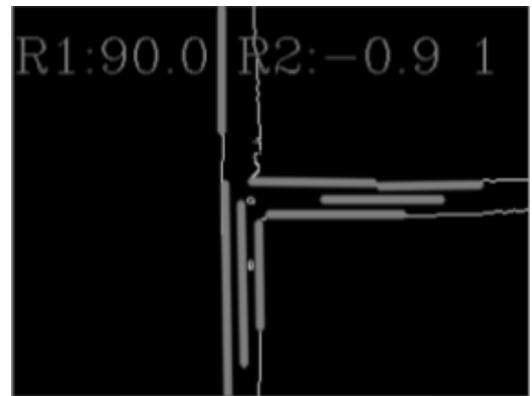
检测直线结果以 OpenCV 存储直线的 $CvLine$

数据结构存储, 包含检测到直线(实际为线段)的 2 个端点。直线检测算法可能返回若干条并不平行但夹角较小的直线。可对检测结果进行分类, 将夹角在一定阈值下的直线归为一类。

图 2(a)为下视摄像头采集图像, 图 2(b)为检测结果。图中检测出线段分为 2 类 $R1$ 、 $R2$, 图 2(b)中“ $R1:90.0$ ”代表 $R1$ 类中线段平均偏角为 90° , 该偏角为线段与图片垂直方向的夹角 (OpenCV 的 $-y$ 方向); 图 2(b)图中“ $R2:-0.9$ ”代表 $R2$ 类的平均偏角。图 2(b)中地面参考线轮廓中心的 2 条线段, 即为求出的相应类别的平均线。



(a) 视频输出



(b) 边缘检测及直线检测结果

图 2 检测效果示意图

5 视觉定位算法

视觉定位算法能够给出在四旋翼距离参考线的实际距离。计算分为 2 个步骤: 确定直线检测结果方向、确定下视摄像头中心到直线检测结果的 实际距离。

5.1 直线检测结果的方向

四旋翼在飞行过程中航向在变化, 因此拍摄到的地面参考线与图像 y 轴(指 OpenCV 的 y 轴)的夹角不一定在 90° 或 0° 附近。在有较大的偏航角改变

时, 需进行坐标系转换。虽然机载微惯性测量单元测出的偏航角也有噪声和漂移问题, 但从目前的试验结果看, 能够满足计算精度要求。

定义 ψ_l 为检测直线结果在平面坐标系 R_a 中相对 x 轴的偏角。则 ψ_l 的计算公式为:

$$\psi_l = \psi_{ce} + \psi_a$$

其中 ψ_{ce} 是前一步视觉计算中检测直线结果与图片 y 轴的夹角; ψ_a 是飞机目前的偏航角; 为了方便判断, 得出的 ψ_l 如果位于三四象限, 还应该将其镜像到第二一象限。

使用如下的判断准则:

1) 如果 $75^\circ < |\psi_l| < 105^\circ$ 则检测出来的线在平面坐标系 R_a 中处于 y 轴方向;

2) 如果 $0^\circ < |\psi_l| < 15^\circ$, 则检测出的线在平面坐标系 R_a 中是位于 x 轴方向。

为了能够计算出飞机相对于地面参考线的位置, 还需要对前一步视觉计算中输出的线端点进行处理, 有 2 种处理方法: 一种是计算图像中心到检测出的地面参考线的距离, 再根据相应检测直线结果的属性 (位于 x 方向或 y 方向) 来确定飞机距离平面坐标系 x 轴与 y 轴的距离; 另一种是将计算出的线的端点进行坐标变换, 然后根据检测直线结果的属性计算飞机距离平面坐标系 x 轴与 y 轴的距离。笔者使用第 2 种方式。

设偏航角的误差为 $\delta\theta$, 图像中心到检测直线结果的距离为 d , 则可计算出由于偏航角测量误差所造成的计算结果误差近似为:

$$\delta d = d(1 - \sin \delta\theta)$$

当 $d = 160$ 像素, $\delta\theta = 10^\circ$ 时, 测算出的误差为 28 像素, 换算到实际的测量误差约为 7.301 9 cm。

根据此计算结果, 偏航角的误差对于计算的结果有一定影响, 但在四旋翼运行过程中, 可以根据地面参考线的方向对四旋翼的航向测量值进行修正, 因此误差不会随时间变大。

5.2 飞机实际位置估算

可以解决图像与实际位置映射问题的摄像头标定算法较多。笔者使用的计算方法如下:

1) 测量不同高度下摄像头拍摄到的图像所代表的实际尺寸 w_r 和 h_r ;

2) 根据公式 $w_r = h_r \cdot \tan(\theta_{width} / 2) \cdot 2$ 计算出不同高度下近似的横向张角 θ_{width} , 同理计算出不同高

度下近似的纵向张角 θ_{height} , 这里的横向纵向指从摄像头位置向地面观察所得到的矩形区域的横向和纵向;

3) 根据不同高度进行选择, 得出不同高度下的近似张角, 然后计算拍摄到图像所代表的实际尺寸, 根据像素距离就可以计算出实际的尺寸距离。

这种算法存在一定的误差, 没有考虑摄像头畸变。在实际高度测量不准的情况下, 这种算法的误差还可能进一步增大。但是对于在室内的飞行, 四旋翼的飞行高度为 1 m 左右, 当使用视觉算法测出值为 0.25 m (即图像中心到测出的参考线的估算距离) 时, 摄像头已经无法捕捉到地面的参考线, 这种小尺度上的测量对摄像头畸变并不敏感。

上面的算法得出的是飞机摄像头看到的地面参考线的相对位置, 还需要结合四旋翼机载微惯性测量单元的量测结果得到飞机的在平面坐标系 R_a 的绝对位置。如图 3 所示, 如果四旋翼从 P_A 点运动到 P_B 点, 那么在 P_A 处, 可以检测到参考线 L_2 , 在 P_B 处检测到参考线 L_3 , 从 P_A 到 P_B , 其实际距离为 l_1 , 四旋翼机载微惯性测量单元给出的定位结果 (速度积分) 后得到的距离为 l_{ii} , 根据测量数据, $l_{ii} < l_1$ 。

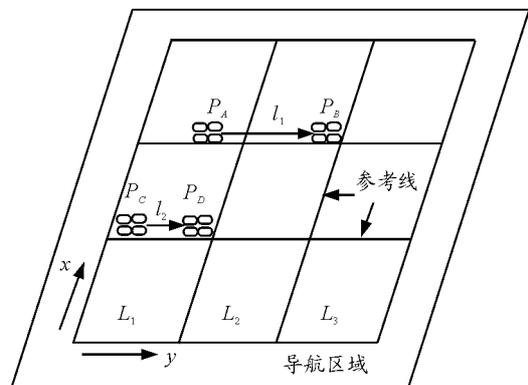


图 3 飞机与参考线相对位置示意图

由相对位置计算得到绝对位置的算法如下:

1) 第 1 次检测到地面的 2 个不同方向的参考线时输出有效四旋翼位置 (x_v, y_v) , 此前四旋翼位置的量测值均置为 0;

2) 当四旋翼下视摄像头图像中未出现地面参考线时, 使用微惯性测量单元速度量测值的校正值得 V'_x 、 V'_y 计算四旋翼位置;

3) 当四旋翼下视摄像头图像中出现地面参考

线时，则四旋翼的绝对位置为：

$$(r(x_v) + \delta_x, r(y_v) + \delta_y)$$

其中 $r(\bullet)$ 为四舍五入取整函数。微惯性测量单元量测速度的校正值为 $V'_x = (x_v / x_i)V_x$ ， $V'_y = (y_v / y_i)V_y$ ，其中 V_x 和 V_y 为微惯性测量单元量测速度值， (x_i, y_i) 为微惯性测量单元的位置量测值。

6 仿真实验

根据在四旋翼下视摄像头图像中地面参考线和摄像头的中心点的位置偏差对四旋翼水平和侧向的速度进行控制，可以使参考线位于四旋翼下视摄像头图像的中央。使用 AR.Drone 四旋翼沿图 1 中的 S 形航迹运动，实验中记录的实验数据如图 4 所示。

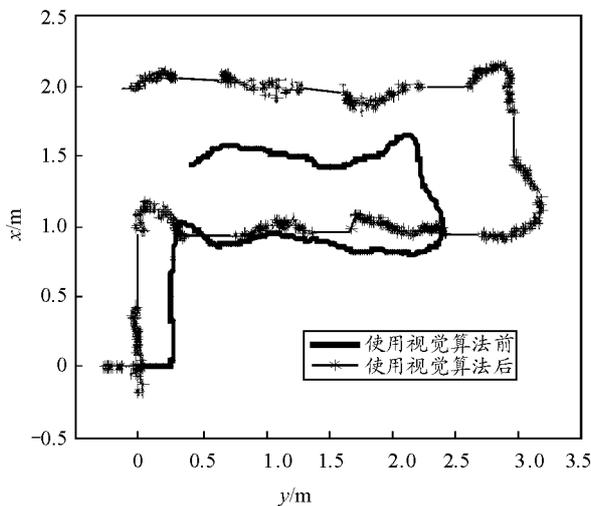


图 4 使用视觉算法前后结果对比

使用视觉算法前的结果，即惯性测量单元定位结果是由 AR.Drone 输出的前向和侧向速度积分得到，在使用文中的视觉算法前，定位误差为 ± 50 cm，在使用视觉算法后，定位误差为 ± 10 cm。分析误差的原因如下：

1) 惯性测量单元加计的精度有限，测量的速度值存在误差；

2) 惯性测量单元加计的测量结果会有缓慢的漂移，只使用加计量测值，得不到准确的结果，

AR.Drone 四旋翼给出的速度测量结果为光流法和微惯性测量单元加速度计的测量值的融合结果，由于光流法能够在一定程度上稳定加计的输出生，避免发散，因此可得到稳定的输出结果。但地面场景变化不明显时，光流法输出结果偏小。

四旋翼位于地面参考线上方时，视觉算法可以准确给出当前四旋翼的位置，并且可以估计出惯性测量单元定位结果的误差；四旋翼下视摄像头图像中无地面参考线时，可以对量测的速度进行补偿，从而得到较为准确和平滑的结果。试验结果表明：使用视觉算法可以大幅度提高四旋翼定位的精度，其误差在 ± 10 cm。

7 结论

基于地面参考线与机载视觉的四旋翼室内导航的解决方案，解决了四旋翼在室内定位的问题，可以用于四旋翼与小车的室内协同、多个四旋翼的编队。该方法对于光照变化等有一定的鲁棒性，但如果地面参考线被遮蔽，也可能造成定位丢失，以及定位不够准确的问题。目前的算法是在地面计算机运行，由于 AR.Drone 底部摄像头拍摄的图像较小（分辨率为 176×144 ），其传送的图像经过了压缩，因此延时较小，可以保证控制的稳定性，但是如果四旋翼的机载硬件资源可以满足实时处理视频的要求，也可以使用机载的硬件进行处理，能得到更好的控制效果。

参考文献：

- [1] Erdinc Altug, James P.Ostrowski, Camillo J.Taylor. Quadrotor Control Using Dual Camera Visual Feedback[C]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September, 2003: 14-19.
- [2] Brett Bethke. Persistent Vision-Based Search and Track Using Multiple UAVs[D]. USA: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2005: 22.
- [3] Stephane Piskorski. Drone Developer Guide[M/CD]. October 5, 2010. <http://ardrone.parrot.com>.
- [4] Willow Garage. OpenCV Reference Manual[M/CD]. March 18, 2010. <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>.