

基于单目视觉的微型空中机器人自主悬停控制

张洪涛, 李隆球, 张广玉, 王武义

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对微型空中机器人在室内环境下无法借助外部定位系统实现自主悬停的问题, 提出一种基于单目视觉的自主悬停控制方法. 采用一种四成分特征点描述符和一个多级筛选器进行特征点跟踪. 根据单目视觉运动学估计机器人水平位置; 根据低雷诺数下的空气阻力估计机器人飞行速度; 结合位置和速度信息对机器人进行悬停控制. 实验结果验证了该方法的有效性.

关键词: 微型空中机器人; 单目视觉; 悬停控制; 特征点跟踪; 低雷诺数

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

Autonomous hovering control based on monocular vision for micro aerial robot

ZHANG Hong-tao, LI Long-qiu, ZHANG Guang-yu, WANG Wu-yi

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: ZHANG Guang-yu, E-mail: zgyqx@hit.edu.cn)

Abstract: A hovering control method based on onboard monocular vision is proposed to hover a micro aerial robot autonomously, in which there is no external positioning system in indoor environments. A descriptor with four components and a multi-stage filter are used for feature tracking. Horizontal position is estimated according to monocular vision kinematics. Flight speed is estimated according to aerodynamic drag at low Reynolds number. Position and velocity informations are fused to hover the robot. Experimental results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: micro aerial robot; monocular vision; hovering control; feature tracking; low Reynolds number

0 引言

微型空中机器人(或称为微型飞行器^[1])是一种高智能的自主飞行器. 随着地面移动机器人在未知环境下自主导航技术的发展^[2], 越来越多的研究者开始关注空中机器人在室内环境下的自主飞行问题^[3-4]. 对于野外工作的空中机器人而言, 通常采用惯性传感器测量值与GPS数据相互融合的方法实现飞行器全状态的稳定与控制^[5]. 然而, 由于室内无法接收到GPS信号, 无法依靠GPS接收机进行位置反馈. 地面移动机器人或者常规尺寸的空中机器人可以搭载激光雷达来感知环境, 而微型空中机器人有限的负载能力使其无法使用类似的传感器. 另一种得到广泛研究的方法是基于视觉的导航技术, 包括依靠运动捕捉系统的导航^[6-7]以及依靠板载视觉系统的导航^[8-9]. 依靠运动捕捉系统的方法需要预先安装外部视觉定位系统, 并需要地面服务器进行位置解算, 限制了其应

用场合. 基于板载单目视觉的方法可以在鲁棒性与效率之前达到较好的平衡^[10], 硬件结构相对简单, 便于微型化, 是微型空中机器人在未知环境下自主导航的理想选择.

本文针对微型空中机器人在室内环境下的应用背景, 提出一种基于单目视觉的自主悬停控制方法. 通过对单目视觉运动学的分析, 建立图像特征点位置、飞行高度、飞行姿态与机器人实际位置之间的关系. 采用一种四成分特征点描述符和一个多级筛选器确定特征点的图像位置. 根据机器人小尺度的特点, 利用空气阻力的测量估计机器人飞行速度. 通过自主悬停实验验证了本文算法的有效性.

1 微型空中机器人架构

1.1 机器人平台

图1为自行研制的4旋翼微型空中机器人平台,

收稿日期: 2013-04-16; 修回日期: 2013-07-04.

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20110491036).

作者简介: 张洪涛(1984-), 男, 博士生, 从事微型飞行器导航技术的研究; 张广玉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事航天地面装备技术等研究.

其4个旋翼直径为45 mm, 对角线电机轴距为12 cm, 整机重量约35 g(包括机身、飞行控制器、330 mAh锂电池和微型单目视觉模块), 飞行时间约6 min. 飞行控制器的硬件包括: 3轴陀螺仪和3轴加速度计组合模块MPU-6050, ARM 32位微处理器STM32F103CBT6, 3轴磁力计HMC5883, 气压计MS5611, 2.4 G无线接收器nRF24L01, 超声波收发电路以及电机驱动电路.



图1 微型空中机器人平台

1.2 微型单目视觉模块

微型单目视觉模块如图2所示, 由摄像头模组OV7670和微处理器STM32F207VGT6组成. 模块尺寸为30 mm × 25 mm × 10 mm, 重2.9 g, 镜头焦距为4.49 mm, 视场角为67°, 像素尺寸为3.6 μm × 3.6 μm. 摄像头模组输出的图像数据被设置为RGB565格式, 分辨率为160 × 120像素. 微处理器集成的数字摄像头接口(DCMI)与摄像头模组直接连接, 实现图像的实时采集. 采集到的数据经DMA存储在微处理器的内部RAM中.



图2 微型单目视觉模块

2 单目视觉运动学分析

以单目视觉模块的摄像头光心为原点, 光轴为Z轴, 建立摄像机坐标系, 如图3所示. 假设单目视觉模块固连于机器人质心, 即摄像机坐标系与机器人机体坐标系重合.

令 $P(X, Y, Z)$ 表示摄像机坐标系下的地面上一点, $p(x, y, f)$ 为该点在像平面上的投影. 假设摄像头符合针孔模型, 有

$$p = f \frac{P}{Z}. \quad (1)$$

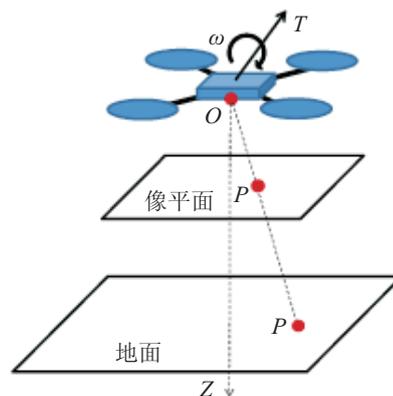


图3 摄像机坐标系下的相对运动

将式(1)对时间求导, 得

$$v = f \frac{VZ - PV_Z}{Z^2}. \quad (2)$$

设飞行器平动速度为 T , 角速度为 ω , 则 P 点在摄像机坐标系下的运动速度为

$$V = -T - \omega \times P. \quad (3)$$

将式(3)代入(2), 并写成分量形式, 有

$$v_x = \frac{T_z x - T_x f}{Z} - \omega_y f + \omega_z y + \frac{\omega_x x y - \omega_y x^2}{f}, \quad (4)$$

$$v_y = \frac{T_z y - T_y f}{Z} + \omega_x f - \omega_z x + \frac{\omega_x y^2 - \omega_y x y}{f}. \quad (5)$$

飞行航向可由磁力计锁定, 即 $\omega_z = 0$. 飞行高度可由超声波锁定, 即 $T_z = 0$. 忽略高阶小量, 式(4)和(5)可简化为

$$v_x = \frac{-T_x f}{Z} - \omega_y f, \quad (6)$$

$$v_y = \frac{-T_y f}{Z} + \omega_x f. \quad (7)$$

将式(6)和(7)对时间求积分, 得

$$x_{t_1} - x_{t_0} = \frac{-f}{Z} (X_{t_1} - X_{t_0}) - f(\theta_{y t_1} - \theta_{y t_0}), \quad (8)$$

$$y_{t_1} - y_{t_0} = \frac{-f}{Z} (Y_{t_1} - Y_{t_0}) + f(\theta_{x t_1} - \theta_{x t_0}). \quad (9)$$

可以看出, 如果得到了地面某特征点在任意两个时刻的图像坐标, 以及机器人在这两个时刻的飞行姿态和高度, 即可计算出机器人在这两个时刻之间的相对位移, 进而进行位置控制. 因此, 位置控制的关键问题可转换为特征点的跟踪问题.

3 特征点跟踪

3.1 特征点选择

接近图像边缘的点容易在机器人移动过程中超出视野区导致跟踪丢失, 因此选择图像中心120 × 80像素区域为有效跟踪区, 在该区域内进行特征点的选择与跟踪. 特征点的选择采用多尺度的策略, 首先将原始图像降采样为四分之一原始尺寸, 然后使用Harris角点探测器^[11]提取多个角点, 选择具有最大角点响应值的点, 将其图像坐标映射至原始图像. 在原始图像中该点周围5 × 5像素的邻域内, 选取具有最

大 Harris 角点响应值的点作为特征点.

3.2 特征点描述符

描述符是特征点匹配的基础, 一个好的描述符需要具有独特性和不变性. 对于悬停控制而言, 航向和高度都已被锁定, 因此可以忽略图像的旋转和缩放变形. 为了提高特征点的匹配成功率, 其描述符使用 4 种成分构成, 即亮度的交流分量、色调、Harris 角点响应值和邻域模板. 使用亮度的交流分量 (I_{AC}) 可以削弱帧间亮度变化的影响, 其计算公式为

$$I_{AC} = I_f - I_{DC}. \quad (10)$$

其中: I_f 代表特征点的亮度值, I_{DC} 代表特征点的 7×7 像素邻域的亮度平均值. 色调 (H) 描述了特征点纯色的属性. 使用分段定义法将 RGB 彩色空间转换为 HSL 彩色空间, 可得到色调值, 公式为

$$H = \begin{cases} \frac{\pi}{3} \times \frac{G - B}{\max - \min}, & \max = R; \\ \frac{\pi}{3} \times \frac{B - R}{\max - \min} + \frac{2\pi}{3}, & \max = G; \\ \frac{\pi}{3} \times \frac{R - G}{\max - \min} + \frac{4\pi}{3}, & \max = B; \end{cases} \quad (11)$$

$$H = H + 2\pi, H < 0.$$

$\max = \max(R, G, B)$, $\min = \min(R, G, B)$. 角点响应值 (RC) 反映了特征点与其邻域点的一种关系, 使用 Harris 角点探测器对其进行计算. 邻域模板 (T) 反映了特征点邻域的属性, 取特征点周围的 7×7 邻域作为模板.

3.3 特征点搜索与匹配

悬停时机器人仅会缓慢漂移, 相邻帧间的对应点不会产生较大的像素偏移, 因此可以在特征点周围选定一个 15×15 像素的搜索区域, 无需对整个图像进行搜索, 以便提高处理速度. 在选定的搜索区域内, 采用一种多级筛选器的策略. 首先计算每个点的 I_{AC} 值, 将其与初始特征点的 I_{AC} 值相比较, 若偏差小于设定阈值 ΔI_{AC} , 则将其保留, 否则丢弃, 经此筛选过程后得到点集 P_1 . 对于 P_1 的每个点, 计算相对特征点的 H 值偏差, 用阈值 ΔH 筛选, 得到点集 P_2 . 对于 P_2 的每个点, 计算相对特征点的 RC 偏差, 用阈值 ΔRC 筛选, 得到点集 P_3 . 对于 P_3 的每个点, 计算其与初始特征点模板的归一化互相关 (NCC) 系数作为匹配值, 用阈值 ΔNCC 筛选, 得到点集 P_4 . 再从 P_4 中, 选择具有最大 NCC 系数的点作为最终匹配点. 若逐级筛选未进行到最后一层, 则说明匹配失败. 如果连续两帧图像均匹配失败, 则重新初始化一个特征点来进行跟踪和匹配. 多级筛选器的特点在于, 各筛选器的运算量逐级递增, 需处理的点集逐级递减, 匹配程度逐级提升, 避免了对每个点都计算 4 种描述符成分产

生的大量计算.

4 自主悬停控制

4.1 基于空气阻力的速度估计

取微型空中机器人对角电机轴距为其特征尺寸, 即 $L = 0.12 \text{ m}$, 空气运动粘度 $\nu = 14.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, 飞行速度 $T = 0.01 \text{ ms}^{-1}$. 机器人雷诺数为

$$\text{Re} = \frac{TL}{\nu} = 81.08. \quad (12)$$

该雷诺数远小于紊流雷诺数 (4000), 机器人受到的空气阻力近似为黏滞阻力, 其大小与飞行速度成正比, 方向与速度方向相反, 即

$$F_{\text{drag}} = -bT. \quad (13)$$

通过板载加速度传感器对水平方向的空气阻力进行测量, 即可估计水平飞行速度.

4.2 控制器设计

控制器由水平位置控制器和高度控制器组成, 原理如图 4 所示. 机器人姿态由板载惯性传感器经非线性互补滤波器进行解算, 高度由超声波传感器测量. 由单目视觉模块得到特征点图像位置, 再结合机器人姿态和高度, 得到机器人的水平位置. 水平位置控制器由两部分构成, 一部分是位置误差的比例-积分 (PI) 控制项, 另一部分是水平速度的比例控制项. 使用水平速度比例控制, 可以产生一个漂移抑制力, 在特征点跟踪错误或丢失的情况下减小位置漂移. 水平位置控制器的输出作为姿态控制器的输入, 形成一个双回路结构. 高度控制器由简单的 PI 控制实现.

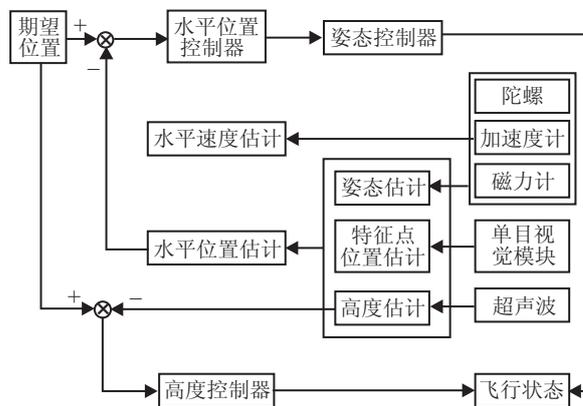


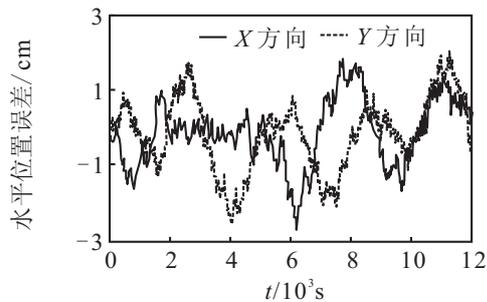
图 4 控制器原理图

4.3 悬停实验

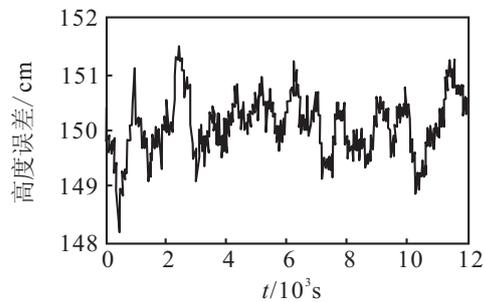
为验证单目视觉控制方法的效果, 使用 4 旋翼微型空中机器人进行室内自主悬停实验. 实验环境为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的办公室. 在机器人悬停点上方的房间棚顶处安装一摄像机, 摄像机镜头垂直向下面向机器人, 机器人机身安装一红色标志物. 通过摄像机采集机器人图像并计算标志物的图像重心, 得到机器人的图像坐标; 用摄像机与地面之间的距离减去超声

波反馈的机器人高度,得到摄像机到机器人的垂直距离;结合以上两个信息得到机器人的位置测量值。

实验中,通过手动遥控使机器人到达摄像机下方,飞行高度约1.5m。设定悬停点为当前位置,悬停高度为1.5m,然后启动自主悬停模式。记录开启自主悬停模式后2min内的机器人位置误差,如图5所示。计算悬停位置的均方根误差(RMSE),并与文献[8]和文献[9]算法的控制结果进行对比,如表1所示。通过对比可以看出,本文算法的位置控制精度优于文献[8]和文献[9]算法,帧率介于二者之间。



(a) 水平位置误差



(b) 高度误差

图5 自主悬停位置误差

表1 本文算法与文献[8]和文献[9]算法对比

算法	水平位置 RMSE/cm	高度 RMSE/cm	帧率/(帧/s)
本文算法	1.33	0.53	30
文献[8]算法	3.88	0.57	60
文献[9]算法	6.9	0.9	10

5 结论

本文针对微型空中机器人尺寸小、负载有限的特点,提出一种基于单目视觉的自主悬停控制方法。使用单目视觉进行位置估计,通过测量空气阻力进行速度估计,将位置与速度信息相结合进行悬停控制。实验表明本文控制方法的位置控制精度优于文献[8]和文献[9]的控制方法。

参考文献(References)

- [1] McMichael J M, Francis M S. Micro air vehicle-toward a new dimension in flight[R]. Unmanned System, 1997, 15(3): 10-17.
- [2] 王立,熊蓉,褚健,等.基于模糊评价的未知环境地图构建探测规划[J].浙江大学学报:工学版,2010,44(2): 253-258.
(Wang L, Xiong R, Chu J, et al. Fuzzy evaluation based exploring planning for map building in unknown environment [J]. J of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(2): 253-258.)
- [3] Lindsey Q, Mellinger D, Kumar V. Construction of cubic structure with quadrotor teams[J]. Autonomous Robots, 2012, 33(3): 323-336.
- [4] Bills C, Chen J, Saxena A. Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues[C]. 2011 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE Press, 2011: 5776-5783.
- [5] Qi J T, Song D L, Dai L, et al. The new evolution for SIA rotorcraft UAV project[J]. J of Robotics, 2010(1): 1-9.
- [6] Mellinger D, Shomin M, Kumar V. Control of quadrotors for robust perching and landing[C]. Int Powered Lift Conf. Philadelphia, 2010: 119-126.
- [7] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards a swarm of agile micro quadrotors[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(4): 287-300.
- [8] Yang S W, Scherer S A, Zell A. An onboard monocular vision system for autonomous takeoff, hovering and landing of a micro aerial vehicle[J]. J of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 69(1/2/3/4): 499-515.
- [9] Achtelik M, Achtelik M, Weiss S, et al. Onboard IMU and monocular vision based control for MAVs in unknown and outdoor environments[C]. 2011 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE Press, 2011: 3056-3063.
- [10] 夏庭楷,杨明,杨汝清.基于单目视觉的移动端机器人导航算法研究进展[J].控制与决策,2010,25(1): 1-7.
(Xia T K, Yang M, Yang R Q. Progress in monocular vision based mobile robot navigation[J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 1-7.)
- [11] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]. Proc of the 4th Alvey Vision Conf. Manchester: CiteSeerX, 1988: 147-151.

(责任编辑:孙艺红)