

基于 AprilTag 的分体式飞行汽车自主导引对接方法研究

林 威, 王 琛, 胡良鹏

(长安大学 工程机械学院, 西安 710061)

摘要: 分体式飞行汽车作为一种新概念空中陆地交通工具, 可解决当前频繁发生的城市交通拥堵、城市郊区交通不便捷等问题; 针对分体式飞行汽车进行模态转换时涉及的模块间精准导引对接问题, 提出了一种基于 AprilTag 的视觉定位导航方案, 将 AprilTag 识别算法的解算结果进行坐标变换后, 得到模块间的相对位姿, 再结合基于无人机 PID 控制器的导引对接降落流程设计, 解决了因 GPS 定位误差大而无法达到厘米级精度的导引对接任务需求的问题, 并提升了导引对接降落过程的平稳性; 最后, 在 ROS 平台利用实物实验验证了该方案的可行性。

关键词: AprilTag; 视觉定位导航; 分体式飞行汽车; PID; ROS

Research on Auto-Docking Method of Split Flying Vehicle Based on AprilTag Algorithm

Lin Wei, Wang Chen, Hu Liangpeng

(Mechanical Engineering College, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: As a new concept of aerial and land transportation, split flying vehicles can solve the frequent urban traffic jams and the inconvenient traffic between urban and suburban areas. A vision positioning and navigation scheme based on AprilTag algorithm is proposed for the precise docking between modules involved in the modal transformation of split flying vehicles. After the coordinate transformation of the result of AprilTag algorithm, the relative position and attitude between modules was obtained. Then combined with the design of the UAV guidance process of landing based on PID controller, which solved the problem that is unable to meet the requirements of the task of guidance docking at centimeter level due to the large GPS positioning error, and the stability of the UAV guidance process of landing is improved. Finally, the feasibility of the scheme is verified by experiments on the ROS platform.

Keywords: AprilTag; visual positioning and navigation; split flying vehicles; PID; ROS

0 引言

近年来, 随着汽车销量的日益增加, 城市交通运输体系的发展速度远远跟不上车辆持续增长的需求, 因此, 城市交通拥堵这一问题凸显得越来越严重, 尤其在发达城市中, 交通拥堵问题俨然已成为一个世界性的难题。针对这一难题, 在第 87 届日内瓦车展上, 空中客车与奥迪联合推出了一款分体式飞行汽车 Pop Up^[1], 如图 1 所示。



图 1 Pop Up 分体式飞行汽车

分体式飞行汽车的概念打破了传统的交通模式, 将交通维度由二维转变为三维, 极大程度上扩展了行动空间, 有效减缓了道路交通负载。分体式的结构设计与传统的一体式飞行汽车结构设计对比优势在于: 极大减少了飞行模块的负载, 飞行模块以及乘员舱通过节省下的质量、空间可对能源供给部分进行性能优化, 并改善乘员舱空间布局, 以提高整机的续航时长和乘坐舒适度等; 同时分体式的模块化设计能够灵活应对突发情况; 分体式外形结构相较于一体式的更具有美观性等。

分体式飞行汽车包含 3 个模块: 飞行模块、乘客舱、地面行驶模块。如图 2 所示, 共有两种模态: 飞行模块与乘客舱可组成飞行模态, 地面行驶模块与乘客舱可组成行驶模态, 模态间的转换涉及模块间的精准导引对接与快速分离过程, 其中, 模块间的导引对接要求达到厘米级的精度。因此, 需要提出一种定位导航技术来精准测量对接模块与待对接模块间的相对位置偏差, 以指导对接模块精准

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2020-11-25。

作者简介: 林 威(1997-), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事无人机定位导航方向的研究。

引用格式: 林 威, 王 琛, 胡良鹏. 基于 AprilTag 的分体式飞行汽车自主导引对接方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 176-180.

降落在待对接模块上。

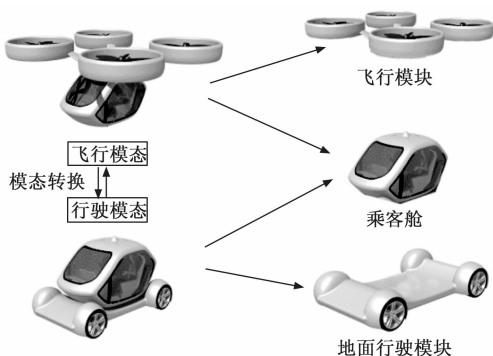


图 2 模态转换及模块组成

基于 GPS 的定位导航技术比较成熟, 但飞行模块在建筑物旁降落时, 往往会面临信号不佳甚至完全丢失等问题, 且目前依靠 GPS 的定位导航技术能达到的精度最高仅为分米级^[2], 不符合导引对接任务的需求。本文针对导引对接任务的多个自由度对接限制要求提出了一种基于 AprilTag 的视觉定位导航方案, 该方案具有自主性强、定位精度高、满足实时性要求、降落平稳性好、成本低廉等优点, 能够在满足多个自由度的限制要求下较精准地实现导引对接任务, 本文利用识别 AprilTag 标识码得到的位姿解算数据来替代传统方法上基于 GPS 及机载高度计的位置信息反馈, 并结合 PID 控制器使飞行模块在降落过程更加精确平稳。

本文对摄像头进行标定后, 使用限幅滤波法对 AprilTag 识别算法解算的数据进行处理, 并通过坐标变换得到飞行模块的相对位姿。最后, 设计好导引流程后, 在 ROS 平台上运用四旋翼无人机 PID 控制器实现整个精确导引对接降落流程, 通过实物实验验证了本文方案的可行性。

1 合作目标着陆标志设计

在视觉定位导航任务中, 本文选择 AprilTag 标识码作为合作目标。AprilTag 标识识别算法由密歇根州立大学 Olson^[3]团队于 2011 年提出, 它是一个视觉基准库, 能够快速检测识别标识码并计算相机与标识码间的相对位姿, 对标识码所处的光照条件容忍度高, 能够适应标识码的旋转、翘曲以及少量遮挡, 并具有高精度的局部准确性^[4]。2016 年, Olson 团队提出了 AprilTag 2.0^[5], 新的检测器检测率更高, 误报更少, 计算时间更短。

1.1 AprilTag 2.0 识别视觉原理

AprilTag 标识码有多个家族, 包括 tag36h11、tagStandard41h12、tag25h9、tagCustom48h12、tagCircle21h7 等, 不同的家族针对不同的视觉定位任务需求而设立^[6], 每个家族又包含不同的 ID。在本任务中, 由于飞行模块在导引降落过程中, 随着高度的下降必然会导致相机视角范围变小, 因而针对本文视觉定位任务的需求, 选择适合递归识别标识码任务的 tagCustom48h12 家族。合作目标外部标识码尺寸为 15 cm × 15 cm, 适用于 0.3 ~ 5 m 内的视觉识别任

务, 内部标识码尺寸为 3 cm × 3 cm, 适用于 0.05 ~ 0.3 m 内的视觉识别任务, 设计的复合 AprilTag 标识码如图 3 所示。

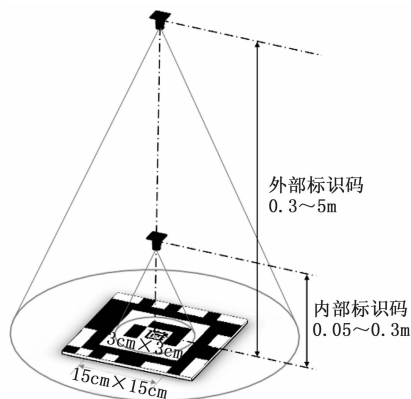


图 3 合作目标 AprilTag 示意图

算法识别原理如下: 相机开启并检测场景中的图像, 首先将图像转为灰度图像, AprilTag 识别算法利用自适应阈值方法将灰度输入图像转化为二值图像。

然后提取图像中的边缘, 对分割黑白像素点的连续边缘添加标记, 并利用哈希表将已标记的边缘两侧不同的黑白像素部分聚类为不同的簇。

接着为每个聚类的无序边缘点拟合出一个四边形。通过采用 PCA 主分析法对已知的边界聚类点围成的边框进行线段遍历拟合, 将拟合均方误差函数的峰值点识别为角点, 选择具有最小均方拟合误差的四个角点来组成拟合的四边形。

最后对拟合出的四边形进行解码。将得到的解码结果与已知库内的 AprilTag 标签编码进行匹配, 以确定解码出的标识码是否为合作目标码。

1.2 相机位姿解算

根据已知的 Tag 坐标点及其在像素坐标系下的对应坐标, 利用 DLT 直接线性变换算法^[7]计算单应性矩阵 \mathbf{H} , 其用来描述物体在 Tag 坐标系和像素坐标系之间的位置映射关系。将单应性矩阵 \mathbf{H} (3×3 阶) 表示为相机投影矩阵 \mathbf{P} (3×4 阶) 与位置变换参数矩阵 \mathbf{E} (4×3 阶) 的乘积, 位置变换参数矩阵 \mathbf{E} 通常为 4×4 阶, 由于 Tag 上的每个点在 Tag 坐标系中 z 坐标都为零, 因此删除矩阵 \mathbf{E} 的第三列, 形成截断的位置变换参数矩阵。记 H_{ij} ($i, j \in \{0, 1, 2\}$) 为单应性矩阵 \mathbf{H} 中的元素, f_x 和 f_y 为相机焦距参数, R_{ij} ($i, j \in \{0, 1, 2\}$) 为位置变换参数矩阵 \mathbf{E} 中的旋转分量元素、 T_i ($i \in \{x, y, z\}$) 为平移分量元素, 未知尺度因子为 s , 则单应性矩阵 \mathbf{H} 可表示为:

$$\begin{bmatrix} H_{00} & H_{01} & H_{02} \\ H_{10} & H_{11} & H_{12} \\ H_{20} & H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = s\mathbf{PE} = \begin{matrix} s \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{00} & R_{01} & T_x \\ R_{10} & R_{11} & T_y \\ R_{20} & R_{21} & T_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

由于 P 不满秩, 故不能直接求出矩阵 E , 将式 (1) 展开得:

$$\begin{cases} H_{00} = sf_x R_{00} & H_{10} = sf_y R_{10} & H_{20} = sR_{20} \\ H_{01} = sf_x R_{01} & H_{11} = sf_y R_{11} & H_{21} = sR_{21} \\ H_{02} = sf_x T_x & H_{12} = sf_y T_y & H_{22} = sT_z \end{cases} \quad (2)$$

通过计算 s 作为前两列旋转矩阵大小的几何平均值并结合旋转矩阵每一列都为单位矩阵的性质求出前两列元素的值, 利用正交矩阵的性质进行叉积运算得出旋转矩阵第三列元素的大小, 由于直接线性变换过程和规范化过程不能保证旋转矩阵是严格正交的, 因此需要对 R 阵进行极坐标分解, 使它产生一个具有最小误差 Frobenius 矩阵范数^[8]的旋转矩阵。最终获得 Tag 坐标系到相机坐标系的变换矩阵 R_{Tag}^{cam} 、 T_{Tag}^{cam} 。

为了得到相机坐标系相对于 Tag 坐标系的 R 、 T 矩阵, 定义 X^{cam} 为相机坐标系, X^{Tag} 为 Tag 坐标系, 由式 (2) 变形可得 R_{Tag}^{cam} 、 T_{Tag}^{cam} 矩阵:

$$X^{cam} = R_{Tag}^{cam} X^{Tag} + T_{Tag}^{cam} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_{Tag}^{cam} = (R_{Tag}^{cam})^T \\ T_{Tag}^{cam} = (-R_{Tag}^{cam}) T_{Tag}^{cam} \end{cases} \quad (4)$$

2 系统实现

2.1 相机标定

为了获取相机的内参矩阵以及消除相机畸变效应的影响, 本文采用张正友标定法^[9]对相机进行标定, 相机标定过程及结果如图 4 所示。

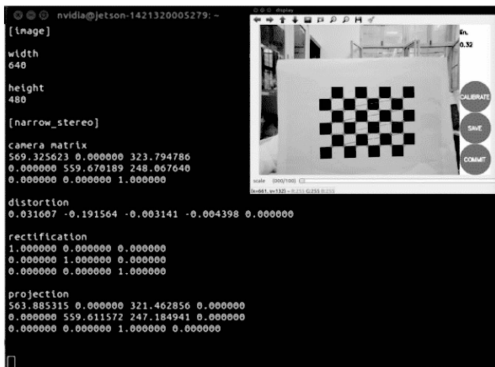


图 4 相机标定过程及结果

运行 ROS 自带的 camera_calibration 包, 将打印好的棋盘格尽量以不同角度出现在相机视野的各个位置中, 共采集 40 张图片, 去除误差较大的图片, 最终计算出相机的内参矩阵 K 以及畸变向量 P :

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 569.33 & 0 & 323.79 \\ 0 & 559.67 & 248.07 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad p_1 \quad p_2] =$$

$$[0.0316 \quad -0.1916 \quad -0.0031 \quad -0.0044 \quad 0] \quad (6)$$

式中, f_x 和 f_y 为 x 和 y 方向上的焦距, c_x 和 c_y 为相机光轴与成像平面交点距离原点的偏移量, k_1 、 k_2 、 k_3 为径向畸变参数,

p_1 、 p_2 为切向畸变参数。

2.2 坐标变换

由 1.2 节已得出相机坐标系相对于 Tag 坐标系的转换矩阵 R_{cam}^{Tag} 、 T_{cam}^{Tag} , 由相机在无人机上实际的安装位置, 如图 5 所示, 可得无人机坐标系相对于相机坐标系的转换矩阵 R_{UAV}^{cam} 、 T_{UAV}^{cam} 。

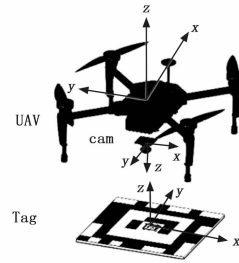


图 5 坐标系定义

定义 X^{UAV} 为无人机坐标系, 则有:

$$X^{cam} = R_{UAV}^{cam} X^{UAV} + T_{UAV}^{cam} \quad (7)$$

将式 (5) 代入式 (2), 可得无人机坐标系相对于 Tag 坐标系的转换矩阵 R_{UAV}^{Tag} 、 T_{UAV}^{Tag} :

$$\begin{cases} R_{UAV}^{Tag} = R_{cam}^{Tag} R_{UAV}^{cam} \\ T_{UAV}^{Tag} = R_{cam}^{Tag} T_{UAV}^{cam} + T_{cam}^{Tag} \end{cases} \quad (8)$$

R_{UAV}^{Tag} 矩阵可通过旋转矩阵—欧拉角变换^[10]得到无人机相对于 Tag 坐标系的三个姿态参数: 俯仰角 (pitch)、偏航角 (yaw)、滚转角 (roll), 而 T_{UAV}^{Tag} 矩阵可分解为无人机相对于 Tag 坐标系的三个位置参数 ($x-y-z$)。

2.3 数据滤波处理

在相机抖动或快速移动时, 会出现 AprilTag 识别算法计算错误的情况, 使返回的相机相对于 Tag 的位姿具有噪点数据, 本文采用限幅滤波算法对 AprilTag 识别算法解算出的位姿数据进行滤波处理。算法实现如式 (9):

$$x = \begin{cases} x & |x - x_{pre}| \leq A \\ x_{pre} & |x - x_{pre}| > A \end{cases} \quad (9)$$

式中, x 为当前时刻采集到的数据, x_{pre} 为上一时刻的数据, A 为限幅阈值。该算法有效克服了因 AprilTag 识别算法计算错误引起的脉冲干扰, 提高了位姿数据的准确性。

2.4 飞行模块 PID 控制

飞行模块在水平方向 ($x-y$)、偏航方向 (yaw) 和垂直方向 (z) 上均采用 PID 的输出量 $u(t)$ 进行速度控制, 来实现飞行模块的精确导引对接降落过程。

PID 控制是一种广泛应用在工业控制中的反馈回路。比例环节的输出与输入偏差成正比, 能迅速反映偏差, 从而减小偏差, 但不能消除静差。积分环节用于消除静差提高系统的无差度。微分环节能反映偏差信号的变化趋势, 有助于系统减小超调, 克服振荡, 加快系统的响应速度, 从而改善系统的动态性能^[11]。PID 的控制规律如式 (10) 所示:

$$u(t) = K_p (err(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t err(t) dt + T_D \frac{derr(t)}{dt}) \quad (10)$$

式中, K_p 、 T_i 、 T_d 分别为比例增益、积分时间常数、微分时间常数, $err(t)$ 为水平方向、偏航方向和垂直方向上与期望值的偏差, $u(t)$ 为经 PID 控制调节后的各自方向上的输出量。综合考虑导引对接过程的平稳性及灵敏度, 设置水平方向和偏航方向 PID 控制参数为:

$$\begin{bmatrix} K_{pxy} & K_{pyaw} & K_{pz} \\ T_{txy} & T_{tyaw} & T_{tz} \\ T_{Dxy} & T_{Dyaw} & T_{Dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.001 & 0.006 \\ 100 & 200 & 120 \\ 20 & 10 & 60 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 实验结果与分析

3.1 实验环境及平台

基于 AprilTag 的视觉导引对接降落系统包含三个部分, 分别是硬件系统、信息交流、算法处理, 如图 6 所示。硬件系统包含一架 DJI M100 无人机、单目摄像头、机载计算机 (NVIDIA Jetson TX2)、乘客舱以及地面行驶模块。机载计算机安装有 Ubuntu16.04 系统并已搭建好 ROS 运行环境, M100 通过 UART 串口与机载计算机进行通信, 摄像头通过 USB 数据线与机载计算机连接, 摄像头视频流分辨率 640×480 , 视频格式为 yuyv, 硬件设备间的信息通过 ROS 的消息发布订阅机制进行交互及处理。地面行驶模块上搭载合作目标 AprilTag 标识码, 外部标识码尺寸为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, 内部标识码尺寸为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。

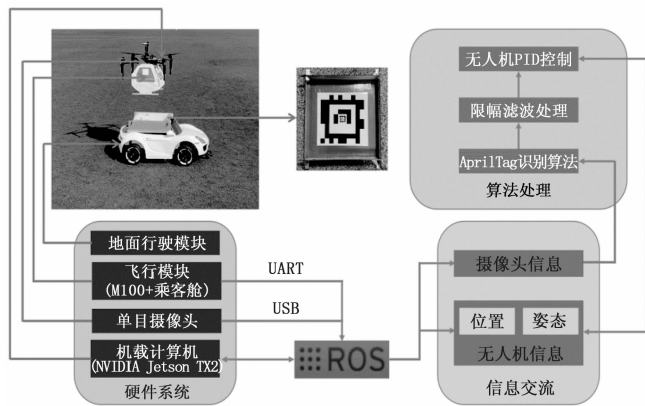


图 6 视觉导引对接降落系统

3.2 实验步骤和方法

本文所设计分体式飞行汽车自主导引对接降落实验步骤流程如图 7 所示。飞行模块（无人机与乘客舱组合体）起飞后通过 GPS 导引到地面行驶模块上方指定高度并悬停，然后在相机视野内寻找合作目标，当识别到 AprilTag 标签后，通过算法解算出飞行模块位姿。先只进行飞行模块水平方向上 ($x-y$) 的校正，以避免出现进行偏航方向的校正时由于飞行模块机身的旋转导致相机丢失 AprilTag 标签视野信息的情况。当水平方向上的精度满足要求时，再同时进行水平方向和偏航方向 ($x-y-yaw$) 三个参数的校正工作，设置水平方向上的偏差阈值为 8 cm ，偏航方向上的偏差阈值为 5° ，当 $x-y-yaw$ 偏差满足精度要求时，飞行模块降落一定的高度，直至飞行模块精准地降落在待对接

的地面行驶模块上后，飞行模块停机。

其中，导引对接降落流程高度控制策略为：当偏差满足精度要求时，期望高度值减小，此时利用获取的高度信息与期望高度值的差值作为 PID 控制器的输入，最终结合 PID 控制器的输出实现对导引对接降落流程高度的控制。

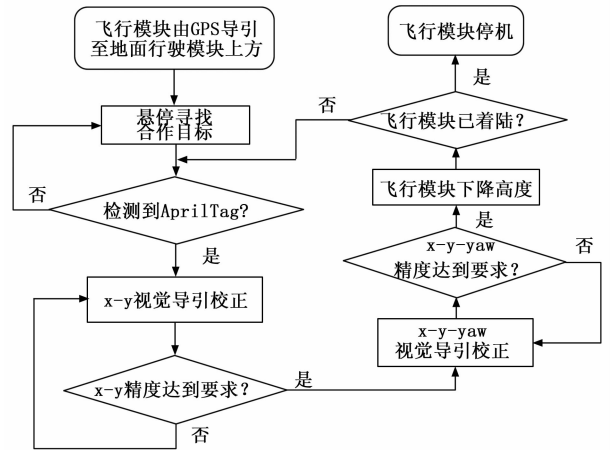


图 7 视觉导引对接降落流程图

3.3 实验过程与结果分析

基于 AprilTag 的分体式飞行汽车自主导引对接降落实验过程如图 8 所示。飞行模块在设置的不同初始偏航角导引对接降落任务中，其偏航角随时间的变化曲线如图 9 所示。由图可以看出，经过导引对接降落算法的控制，飞行模块在不同的初始偏航角条件下其偏航角均可较平稳地转变到 $0 \sim 5^\circ$ ，使飞行模块与地面行驶模块在偏航方向上满足对接精度需求。

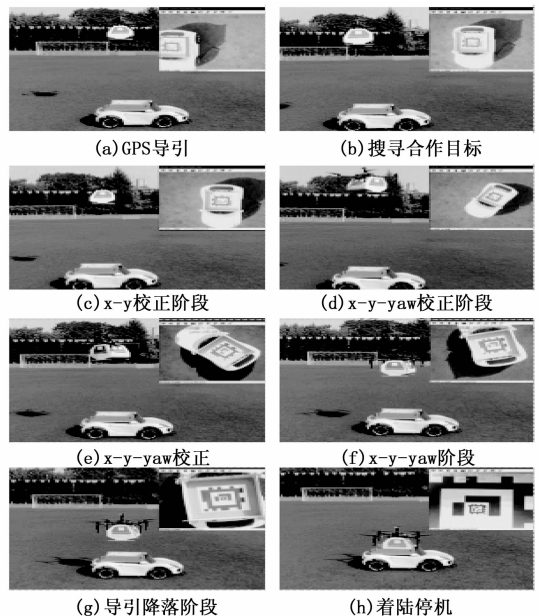


图 8 自主导引对接降落实验过程

飞行模块在导引对接降落过程中的水平位置偏移量如图 10 所示。由图可以看出，经过导引对接降落算法的控

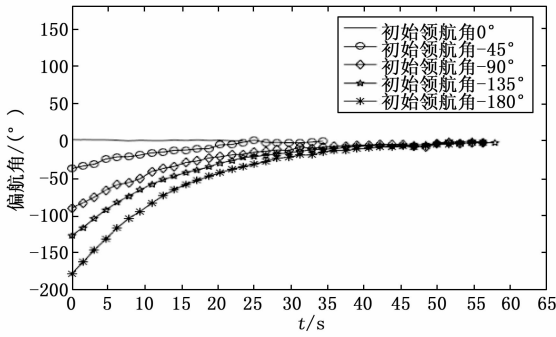


图 9 偏航角变化曲线

制, 水平位置 $x-y$ 方向上的偏移量缩减至 $0\sim 5$ cm, 满足导引对接降落任务水平方向上的精度需求。但从图中也看出, 水平位置 $x-y$ 方向上偏移量呈现波浪式的起伏状, 经过多次实验发现其原因主要是因为摄像头的安装平面与 M100 飞行器飞行平面不平行导致的, 飞行器在前一阶段满足 $x-y$ 方向上的精度后, 执行高度下降程序, 因为平面间存在夹角的问题从而在高度下降过程中在 $x-y$ 方向上又产生了新的偏移量, 后期将针对此问题进行改进。

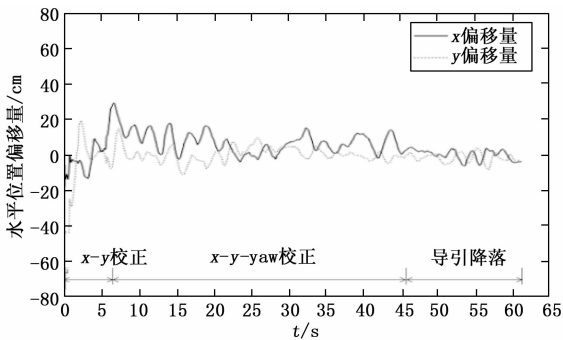


图 10 水平位置偏移量

针对本文的导引对接降落流程高度控制策略, 分别选用 AprilTag 识别算法解算得到的飞行模块相对于 Tag 的距离信息和机载高度计的数据信息作为高度反馈, 得到飞行模块在导引对接降落过程中高度变化曲线如图 11 所示。

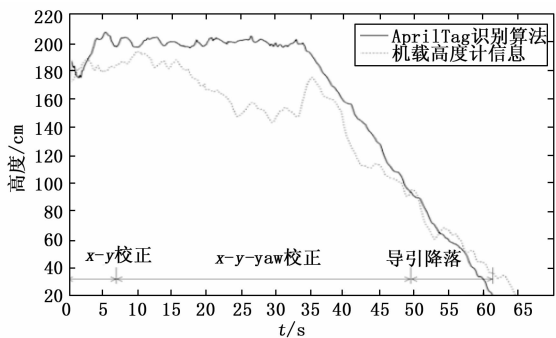


图 11 高度变化曲线

由图 11 可以得出, 以 AprilTag 识别算法位姿解算数据为高度信息反馈的导引对接降落过程, 解决了因机载高度

计信息误差大而导致的飞行模块在导引对接降落过程中出现上下颠簸的情况, 导引对接降落过程更加平稳, 提升了降落品质。

通过上述分析得出, 在导引对接降落过程中使用 AprilTag 识别算法的位姿解算数据来替代基于 GPS 数据及机载高度计的位置信息反馈, 解决了由于 GPS 信息误差大而无法实现精确的导引对接任务的问题, 并且通过视觉获取的信息也更加稳定, 降落过程更加平稳, 降落品质更优。

4 结束语

本文针对分体式飞行汽车进行模态间的转换时涉及的模块间的精准对接问题, 提出了一种基于 AprilTag 的视觉定位导航方案, 实验结果表明: 该方案实现了飞行模块以较高的精度自主降落在地面行驶模块上, 验证了本方案具有定位精度高、满足实时性要求、降落平稳性好等优点, 为后续的模式转换相关工作做好铺垫。

由于基于 AprilTag 的视觉定位方案的有效识别距离短的问题, 使得该方案还不足以完美衔接于整个的飞行汽车自主导引对接流程中, 下一阶段将进行中近程的定位导航研究, 以解决飞行汽车经 GPS 导引后如何从中程高度精准导引下降到地面近程高度的问题。

参考文献:

- [1] 马 宁. 空客 Pop. Up 抢镜日内瓦车展 [J]. 产品可靠性报告, 2017 (4): 112-113.
- [2] 陈菲雨. 无人机自主精准定点降落中图像处理技术的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [3] Olson E. Apriltag: A robust and flexible visual fiducial system [A]. International Conference on Robotics and Automation [C]. 2011: 3400-3407.
- [4] 梁 宵, 陈国栋, 赵诗柔. 基于 AprilTags 的 UAV 运动目标跟踪方法 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36 (4): 62-68.
- [5] Wang J, Olson E. Apriltag 2: Efficient and robust fiducial detection [A]. International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. 2016: 4193-4198.
- [6] 高嘉瑜, 袁苏哲, 景 鑫, 等. 基于 AprilTag 二维码的无人机着陆引导方法 [J]. 现代导航, 2020, 11 (1): 20-25.
- [7] Hartleyand R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision [M]. Cambridge University Press, 2004.
- [8] Shoemake K, Duff T. Matrix animation and polar decomposition [A]. Proceedings of the conference on Graphics interface [C]. 1992: 258-264.
- [9] 刘 艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究 [J]. 光学技术, 2014, 40 (6): 565-570.
- [10] 张荣辉, 贾宏光, 陈 涛, 等. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算 [J]. 光学精密工程, 2013, 16 (10): 1963-1970.
- [11] 贾配洋, 彭晓东, 周武根. 四旋翼无人机自主移动降落方法研究 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (s2): 520-523.