

基于合作二维码的旋翼无人机室内定位研究

王树源, 胡天江*, 孔维玮, 唐邓清, 赵搏欣

国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073

E-mail: t.j.hu@nudt.edu.cn

摘要: 面向室内GPS拒止环境,以AR.Drone旋翼无人机平台为载体,研究机载摄像头获取二维码图源并解算自身位姿的相对定位算法,在Ubuntu 14.04和ROS Indigo架构下开展算法实现研究. 分别构建室内Gazebo仿真环境和实物飞行实验环境,开展相应的室内定位飞行实验,对比分析机载惯性测量数据和视觉辅助定位数据,深入分析定位误差原因,验证了二维码定位算法的有效性.

关键词: AR.Drone无人机, AprilTag算法, 二维码, GPS拒止环境, ROS, 室内定位

2D Tag Based Indoor Localization for Quadcopters

Shuyuan Wang, Tianjiang Hu*, Weiwei Kong, Dengqing Tang, Boxin Zhao

College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

E-mail: t.j.hu@nudt.edu.cn

Abstract: In indoor GPS-denied environment, we take AR.Drone quadcopter as the platform to research that the on-board camera captures 2D tag image sequence and the developed AprilTag algorithm is employed to achieve the position and posture of AR.Drone quadcopter. Furthermore, the algorithm and coordinates transformation is implemented in the Ubuntu 14.04 and ROS indigo framework. We build the gazebo simulation environment and indoor flight testing environment, carry out flight experiments. IMU data and AprilTag data are analyzed and compared, and the error in the experimental data is analyzed. The results verify the effectiveness of the localization algorithm.

Key Words: AR.Drone quadcopter, AprilTag algorithm, 2D tag, GPS-denied environment, ROS, indoor localization

1. 引言(Introduction)

随着小型无人机特别是旋翼无人机技术发展越来越成熟[1],旋翼无人机在复杂未知飞行环境,例如GPS信号弱或受干扰强的环境[2]中,利用视觉系统和机载传感器,如激光测距仪,MEMS传感器,RGB-D传感器等,共同组合实现无人机实时定位,越来越成为学界研究的热点.目前,国内外学者都已经对此开展研究并取得了一定的成果,定位方法大致分为依赖主动式传感器的主动定位和依赖被动式路标的视觉定位.

针对主动式定位,研究成果包括德国慕尼黑工业大学,美国犹他州立大学,日本千叶大学,还有我国的清华大学等.德国慕尼黑工业大学采用的四旋翼,以单目相机为主要传感器,利用集成了陀螺仪和加速度计的惯性测量单元IMU,气压传感器和超声波测高仪作为辅助定位[3].它采用了一种基于并行跟踪和地图重构(PTAM)算法[4],采用一个卡尔曼滤波器,融合所有可用的数据[5],克服数据传输过程中的延迟.美国犹他州立大学采用的四旋翼,主要机载传感器包括集成了陀螺仪和加速度计的惯性测量单元IMU,声呐传感器,摄像头和红外探测摄像头等.它采用了一种基于视

觉图像处理的SLAM定位算法.算法分为两个部分,分别实现定位导航和三维建图.前者通过对两帧连续的视频图像进行特征提取和匹配得到四旋翼的位置和姿态信息;后者利用机载摄像头获取图像关键帧进行四旋翼周围环境的三维重建[6].日本千叶大学的四旋翼,主要机载传感器是摄像头,惯性测量单元IMU,静态压力传感器以及全球定位系统GPS[7].提出一种基于三层卡尔曼滤波的光流算法来实现无人机视觉定位[8].我国的清华大学则利用了光流传感器来获取无人机的速度和位置,设计了一种鲁棒控制算法实现无人机的室内自主悬停[9].

上述定位技术,例如激光测距仪,红外摄像头,声呐传感器,MEMS传感器,RGB-D传感器等,要么虽然能提供精度比较高的定位,但是成本高,功耗、重量、尺寸大,计算过程复杂;要么定位精度不高,难以满足定位要求.

针对上述主动定位方法的不足之处,学界提出了基于被动式路标的视觉定位方法,该方法仅仅使用机载摄像头,避免了大功耗大尺寸的外部传感器,通过摄像头获取含有路标的图像,实时反解出摄像头的位置姿态[10],从而得到无人机的位姿.本论文的研究所采用的算法是一种基于二维码路标[11]的视觉定位算法.

本论文针对四旋翼室内定位问题,完成了两方面的研究:一是研究该算法在Ubuntu 14.04和ROS Indigo架构下实现的可行性.二是通过开展飞行实验,验证搭建的Gazebo仿真环境和实物验证环境,可以有效地支撑算法的验证.

2. 问题描述(Statement of the Problem)

2.1 算法原理(Algorithm Principle)

基于二维码进行定位,迄今为止国内外已经提出了多种算法.基本思想都是从摄像头获得的图像中提取出二维码矩形,从而确定图像中二维码矩形的四个顶点的坐标.通过图像识别技术确定二维码的边缘,因为二维码路标的物理尺寸是已知的,所以可以通过边缘的信息计算出二维码相对于摄像头的3D位置和方向.

AprilTag是近年来提出的一种新的基于二维码路标进行定位的视觉定位方法,它可以计算出相对于相机的二维码标签的精确的ID,3D位置和方向.所使用的二维码标签在概念上类似于QR码,如图1所示

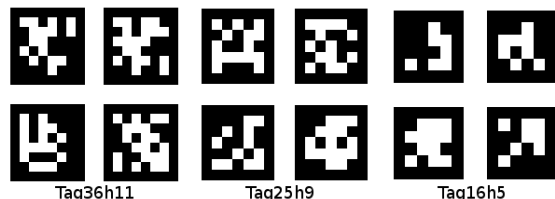


图 1: AprilTags 标签

AprilTag算法由十二个处理步骤组成,如图2所示.以图3所示的含有二维码标签的图像为例,下面分别对每一步的功能进行描述.

AprilTag算法输入为摄像头拍摄的含有二维码标签的彩色图像.

Step1-5:对图像进行滤波,去噪,计算像素的梯度以聚类提取边缘,拟合边缘线,为边缘线添加从暗区指向亮区的向量.

Step6-9:对边缘线进行连接得到quad回路,判别quad回路并进行解码,识别出二维码ID及旋转角度.

Step10-12:获取相机参数,构建位姿数据的PnP[12]方程,求解得到二维码坐标系在像平面坐标系中的位姿.

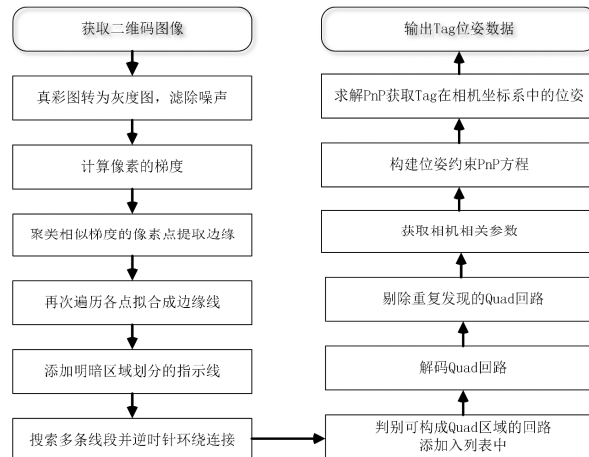


图 2: AprilTag 算法流程

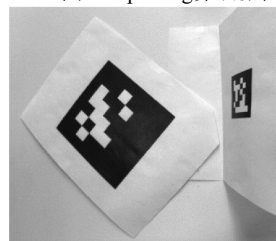


图 3: 示例图像

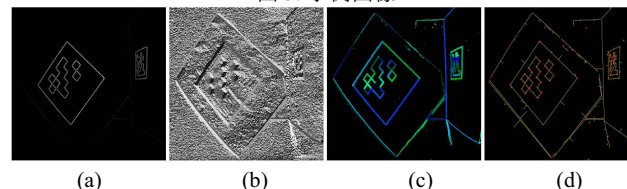


图 4: 算法检测过程

AprilTag算法输出为计算得到的二维码坐标系在像平面坐标系中的位置和姿态.

2.2 研究思路(Research Idea)

以AR.Drone四旋翼无人机平台为研究载体[13],同时在gazebo仿真环境和实验室中构建具有二维码标志的室内飞行试验环境,如图5所示,一方面,通过机载摄像头获取含有二维码的图像,应用AprilTag算法对图像进行解算,得到无人机相对二维码坐标系的位姿信息;另一方面,无人机本身带有IMU,将飞行过程中IMU数据进行记录和提取,经过数据处理,可以得到无人机在世界坐标系下的位姿信息,经坐标系转换矩阵,转换到二维码坐标系中.将IMU位姿数据和AprilTag算法位姿数据进行对比分析,以验证该算法在ROS架构下实现的可行性.整个实验过程,首先在gazebo中进行飞行仿真实验,然后在实验室内开展实际飞行试验,对比分析位姿数据,验证搭建的仿真环境和实物环境,可以有效支撑该算法的验证工作.

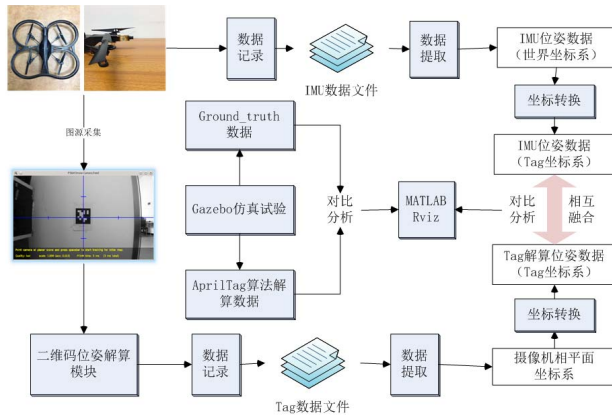


图 5: 本文研究思路

3. 定位算法 ROS 实现 (ROS-based Implementation)

整个实验研究依托于 Ubuntu 14.04 和 ROS Indigo[14]架构,具体包括系统架构的ROS实现、AprilTag定位算法的ROS实现和gazebo仿真试验的ROS实现,以及ROS环境下的数据记录与提取,rviz中轨迹的对比分析。

在ROS上安装tum_ardrone包,该包由德国慕尼黑工业大学的学者开发,构建在著名的单目SLAM框架下,集成了PTAM算法,包里包括了AR.Drone 1.0 & 2.0的ROS驱动ardrone_automaty。在本文的研究中,该算法包主要为四旋翼提供ROS驱动,键盘控制以及四旋翼与地面计算机之间的通信。启动算法包后,地面计算机界面出现tum_ardrone GUI,PTAM Drone Map View和PTAM Drone Camera Feed三个窗口,其中tum_ardrone GUI窗口提供人机交互界面,界面提供四旋翼当前状态参数,可通过键盘控制无人机飞行轨迹。PTAM Drone Camera Feed窗口实时显示四旋翼前置摄像头拍摄到的图像。

在ROS上安装AprilTag包,该包能够解算出相对于摄像头的AprilTags标签精确的ID,3D位置和方向。为了将该算法包在AR.Drone四旋翼[15]上实现,需要在AprilTag_detector.cpp文件中,修改算法订阅的摄像

头为四旋翼的前置摄像头/ardrone /front /image_raw。同时对四旋翼摄像机进行标定,得到摄像机的内参数模型与畸变参数,写入ardrone_front.yaml文件中。

为了便于将IMU数据及AprilTag数据进行对比分析,在进行飞行试验时,利用ROS环境中的rosvbag工具对/tag_detections和/ardrone/navdata话题进行记录,记录得到的包文件能够离线回放试验并模拟真实的实验状态。使用ROS环境中的rxrbag工具可以对记录得到的包文件进行查看。在ROS环境中将包文件中的数据记录到txt文件,读入到MATLAB中,绘制2维和3维曲线图对比IMU数据和AprilTag数据。处理过程如图6所示。

4. 实验验证 (Experimental Validation)

本文设计了四旋翼室内定位实验的实验场景,搭建了仿真实验环境和实物环境,并通过仿真实验和实际飞行实验验证了研究目标。

4.1 实验场景构建 (Experiment Environment Establishment)

本文研究环境是墙壁上贴有二维码的实验室室内环境,示意图如图7所示,实物图如图8所示。

为准确描述无人机位置姿态,对研究过程中涉及到的坐标系进行定义如下:

像平面坐标系 (camera image plane frames) $S_c - O_c x_c y_c z_c$ 为机载摄像头成像平面坐标系,该坐标系原点 O_c 在摄像头光轴与成像平面交点处, z_c 轴与光轴方向平行并指向摄像头头部,当无人机置于水平地面时, y_c 轴垂直于光轴并指向水平地面, x_c 轴由右手定则确定。二维码坐标系 (tag coordinate system) $S_t - O_t x_t y_t z_t$, 与二维码标签固连。当二维码标签无旋转,平贴于垂直墙壁时,以二维码标签中心为坐标系原点 O_t , z_t 垂直于二维码标签平面指向外侧, y_t 在二维码平面内垂直地面指向上方, x_t 由右手定则确定。机体坐标系 (body axis system)

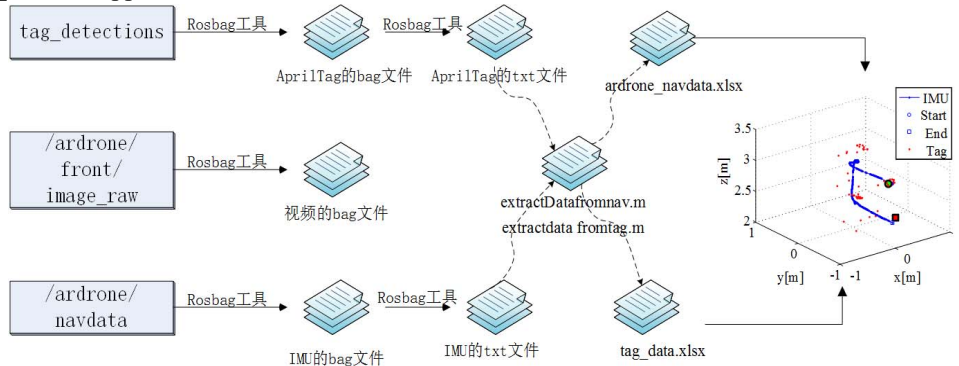


图 6: 数据提取与记录处理过程

$S_b - O_b x_b y_b z_b$, O_b 位于飞机质心处, 坐标系与飞机固连. x_b 轴在飞机对称平面内, 平行于飞机理论纵轴, 指向摄像头方向. y_b 垂直于飞机对称平面, 指向机身右方. z_b 在飞机对称平面内由右手定则确定. 世界坐标系(world coordinate system) $S_w - O_w x_w y_w z_w$, 在实验室地面上选一点 O_w , x_w 位于地平面内并垂直指向贴有二维码的墙壁, z_w 垂直于地平面并指向地心, y_w 方向由右手定则确定. 二维码坐标系原点 O_t 在世界坐标系 S_w 中坐标为 (x_{w1}, y_{w1}, z_{w1}) .

在本文中, 为减少计算量, 引入尽量少的坐标系, 设定在初始时刻 t_0 时, 无人机在水平地面时的机体坐标系为世界坐标系, 即

$$S_w = S_b(t_0) \quad (1)$$

在实际飞行实验中, 无人机机载IMU得到无人机在世界坐标系中的位姿数据, AprilTag算法得到的是二维码标签相对于无人机摄像头的像平面坐标系位姿数据, 为便于比较, 统一将位姿数据转换到二维码坐标系中. 设无人机在世界坐标系 S_w 中位置为 $[x_w \ y_w \ z_w]^T$, $[x_w \ y_w \ z_w]^T$ 经转换矩阵可计算得到无人机在二维码坐标系 S_t 中位置为 $[x_t \ y_t \ z_t]^T_{IMU}$. 两者之间转换矩阵 $C_{S_w}^{S_t}$ 如下

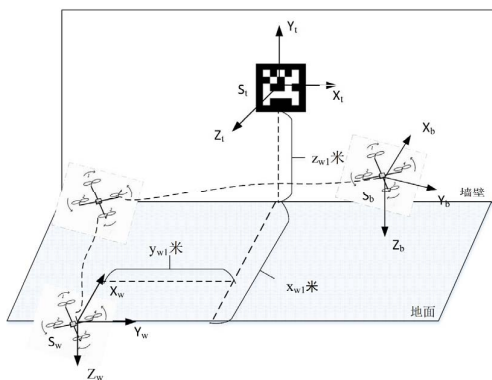


图7: 室内定位实验示意图



图8: 室内定位实验实物图

$$C_{S_w}^{S_t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & -\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos 0 & 0 & -\sin 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 0 & 0 & \cos 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} & 0 \\ -\sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由IMU得到的无人机在世界坐标系下的位置转换为无人机在二维码坐标系 S_t 中的位置

$$[x_t \ y_t \ z_t]^T_{IMU} = C_{S_w}^{S_t} [(x_w - x_{w1}) \ (y_w - y_{w1}) \ (z_w - z_{w1})]^T \quad (3)$$

设无人机质心在像平面坐标系 S_c 中的坐标为 $[x_{c1} \ y_{c1} \ z_{c1}]^T$, 设AprilTag算法解算的二维码标签在像平面坐标系 S_c 中位置为 $[x_c \ y_c \ z_c]^T$, 由AprilTag算法得到的无人机摄像头在二维码坐标系 S_t 中位置为 $[x_t \ y_t \ z_t]^T_{Apr}$. 定义 ψ 、 θ 、 φ 分别为绕 z 轴、 y 轴、 x 轴旋转的欧拉角. 两者之间转换矩阵 $C_{S_c}^{S_t}$ 如下

$$C_{S_c}^{S_t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由AprilTag算法解算的无人机质心在二维码坐标系 S_t 中的位置

$$[x_t \ y_t \ z_t]^T_{Apr} = C_{S_c}^{S_t} [-(x_c - x_{c1}) \ -(y_c - y_{c1}) \ -(z_c - z_{c1})]^T \quad (5)$$

至此, 从IMU和AprilTag算法分别得到了无人机在二维码坐标系 S_t 中的位置 $[x_t \ y_t \ z_t]^T_{IMU}$ 和 $[x_t \ y_t \ z_t]^T_{Apr}$, 对两者绘制曲线进行对比分析, 以验证基于二维码的无人机室内定位算法在ROS架构下实现的有效性.

4.2 仿真实验 (Simulation)

Gazebo是ROS中的物理仿真环境, 它能够在三维环境中对机器人、传感器及物体进行仿真, 产生实际传感器反馈和物体之间的物理响应. 本文在gazebo中

搭建与实际飞行实验场景相一致的仿真场景.如图9所示.

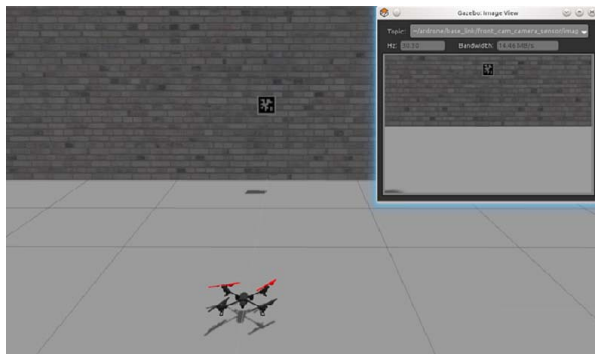


图9: 仿真实验图

本文为四旋翼飞行设计两种运动模式,直线飞行模式和自由飞行模式,如图10(a)、(b)所示.

在仿真环境中进行飞行实验时,利用rviz工具实时绘制出四旋翼的Ground truth轨迹和AprilTag算法的解算轨迹,轨迹分别用红色和绿色表示,如图11(a)所示.由Ground truth得到四旋翼在世界坐标系 S_w 中的轨迹,经公式(3)转换到二维码坐标系 S_t 中,由AprilTag算法解算得到四旋翼在二维码坐标系 S_t 中的轨迹,如图11(b)所示.分别绘制这两条三维轨迹在x、y、z轴上的分量,并进行对比,如图11(c)所示.通过对比,可以看到,直线飞行模式与自由飞行模式,在摄像头视野中始终有AprilTags标签的飞行过程中,Ground truth轨迹和AprilTag算法的解算轨迹吻合性均较好,位置误差始终保持在5cm之内,完全满足实际飞行实验定位要求,仿真实验验证了AprilTag定位算法在ROS架构下实现的有效性.

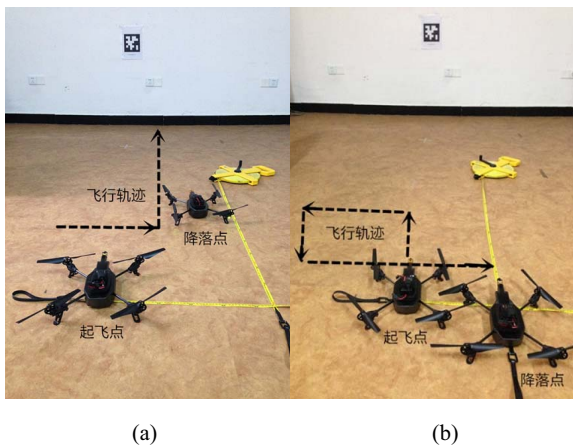
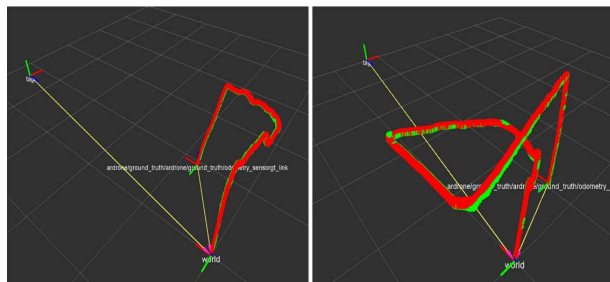
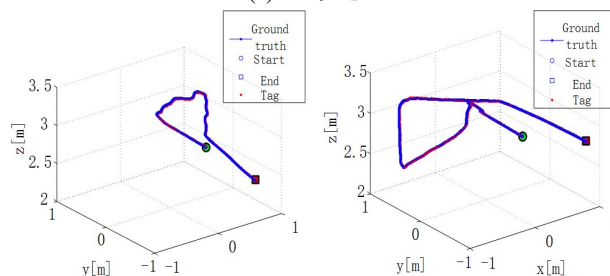


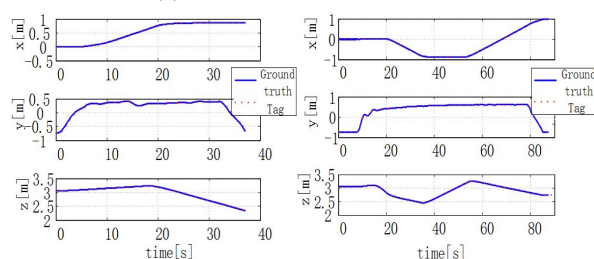
图10: 两种运动模式



(a) rviz轨迹



(b) 二维码坐标系中轨迹对比



(c) 三个分量对比

图11: 仿真实验结果

4.3 实物飞行验证 (Flight Experiment)

对照仿真实验,得到直线飞行模式和自由飞行模式下四旋翼的轨迹对比如下: 由无人机IMU得到四旋翼在世界坐标系 S_w 中的轨迹,经公式(3)转换到二维码坐标系 S_t 中,由AprilTag算法解算得到四旋翼在二维码坐标系 S_t 中的轨迹,如图12(a)所示.分别绘制这两条三维轨迹在x、y、z轴上的分量,并进行对比,如图12(b)所示.在实际飞行实验中,因四旋翼平台数据传输能力有限,AprilTag算法解算数据频率约为8hz,所以红色轨迹点相对稀疏.

通过对比,可以看到,直线飞行模式与自由飞行模式,在摄像头视野中始终有AprilTags标签的飞行过程中,除几个明显偏离的数据点外,IMU轨迹和AprilTag算法的解算轨迹均基本吻合,基本满足实际飞行实验定位要求,实际飞行实验验证了AprilTag定位算法在ROS架构下实现的有效性.

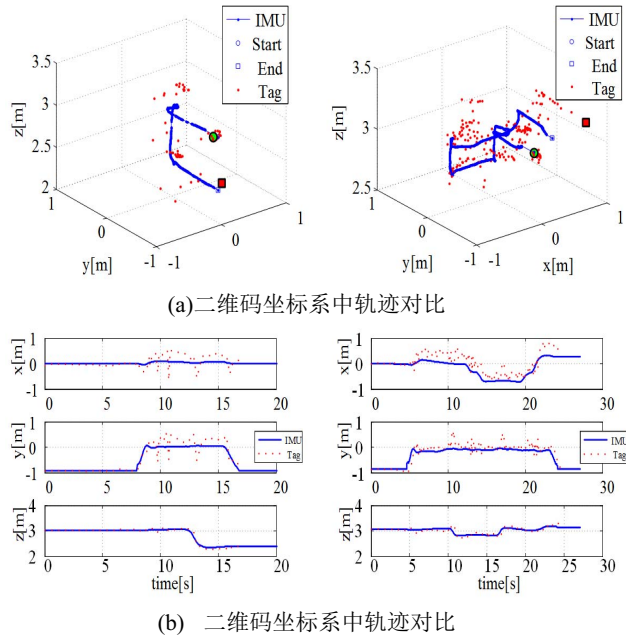


图12: 实际飞行实验结果

分析这几个明显偏离的数据点,产生的可能原因如下:(1)IMU 存在漂移,单一地从 IMU 数据得到无人机位置是有偏差的.本文针对室内环境短期导航的条件,只使用 IMU 数据作为真实基准,与 AprilTag 数据进行比较,不可避免地存在一定偏差.(2)四旋翼飞行过程中震颤引起摄像头振动,从而造成摄像头采集的图像与实际位置有偏差,导致 AprilTag 算法解算数据有偏差.

5. 结论及展望(Conclusion and Prospect)

本文对一种基于二维码标签进行定位的 Apriltag 算法进行描述,通过 ROS 包的安装与改写,以及摄像头的标定,将该算法在 AR.Drone 四旋翼平台和 ROS 架构上进行实现.针对四旋翼室内定位,设计了实验场景,在 gazebo 仿真环境进行仿真实验,然后进行实际飞行实验,初步验证了该算法在 ROS 架构下实现的可行性.通过对数据进行对比分析,ROS 架构下该算法定位误差满足实际定位需求.

但是由于在实际飞行实验中,四旋翼只使用 IMU 数据作为真实基准,与 AprilTag 数据进行比较,不可避免地存在一定偏差.并且在飞行过程中,无人机震颤引起摄像头振动的问题没有很好地解决.在后续研究工作中,将在室内布置一套外部运动捕捉系统,提供无人机位置的真实基准,与 AprilTag 算法的解算数据比较;并且会将 AprilTag 定位数据与 IMU 数据进行融合,通过拓展卡尔曼滤波,为四旋翼室内定位与导航提供一种新的解决方案.

参考文献

- [1] M. Muller, S. Lupashin, and R. D'Andrea. Quadcopter ball juggling. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 25-30, 2011, San Francisco, USA. 5113-5120.
- [2] M. Achtelik, M. Achtelik, S. Weiss, and R. Siegwart, Onboard IMU and monocular vision based control for MAVs in unknown in- and outdoor environments. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011.
- [3] J. Engel, J. Sturm, D. Cremers. Scale-aware navigation of a low-cost quadcopter with a monocular camera[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(11): 1646-1656.
- [4] Nick Dijkshoorn. Simultaneous localization and mapping with the AR.Drone. PhD Dissertation of University of Amsterdam, Netherland, 2012.
- [5] M. W. M. G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 229-241.
- [6] 郭芳. 复杂环境下四旋翼无人机定位研究[D]. 天津大学硕士学位论文, 2012.
- [7] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices[J]. Personal Communications, IEEE, 2000, 7(5): 28-34.
- [8] F. Kendoul, Z. Yu, K. Nonami. Guidance and nonlinear control system for autonomous flight of minirotorcraft unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(3): 311-334.
- [9] Z. Fang, X. Wang, J. Sun. Design and nonlinear control of an indoor quadrotor flying robot[C]. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), IEEE, 2010: 429-434.
- [10] E. Olson. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011: 3400-3407.
- [11] Y. Liu, J. Yang, M Liu, Recognition of QR Code with mobile phones[C]. Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2008, Yantai:203-206.
- [12] D. Xu, M. Tan, Y. Li. Visual measurement and control for robots[J]. National Defense Industry Press, Beijing (In Chinese), 2008.
- [13] Tomas Krajnik, Vojtech Vonasek, Daniel Fiser, and Jan Faigl. AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education. Research and Education in Robotics: EU-ROBOT 2011, Heidelberg, Springer, 2011.
- [14] A .Martinez, E. Fernández. Learning ROS for robotics programming[M]. Packt Publishing Ltd, 2013.
- [15] Stephane Piskorski, Nicolas Brulez, Pierre Eline, Frederic D'Haeyer. AR.Drone Developer Guide, SDK 2.0, 2012.