

垂直起降无人机基于图像的目标跟踪控制

刘锦涛^{1†}, 高 丽¹, 吴文海¹, 李 静²

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 海军航空工程学院 战略导弹系, 山东 烟台 264200)

摘要: 针对安装有惯性测量单元和摄像机的低成本四旋翼无人机, 研究无位置、速度、航向测量情况下的机动目标基于图像的跟踪控制方法. 首先, 结合无人机的动力学方程在图像空间中推导了系统的误差方程. 其次, 为克服无航向测量的问题, 设计了一种位置控制器, 使用图像矩作为反馈输入并输出油门和姿态指令. 最后, 针对缺少图像速度测量问题, 设计了一种super-twisting滑模观测器和控制器, 生成的期望姿态和拉力指令无颤振, 并通过李雅普诺夫理论证明了控制系统的稳定性. 最终无人机通过调整倾斜姿态实现了跟踪飞行, 且避免了响应慢的航向调整. 跟踪机动目标的仿真结果验证了所提出方法的有效性.

关键词: 四旋翼无人机; 跟踪控制; 基于图像视觉伺服; 滑模控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Image-based target tracking control for vertical take-off and landing UAVs

LIU Jin-tao^{1†}, GAO Li¹, WU Wen-hai¹, LI Jing²

(1. Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao Branch, Qingdao Shandong 266041, China;

2. Naval Aeronautical Engineering Institute, Department of Strategic Missile Engineering, Yantai Shandong 264200, China)

Abstract: The low-cost quadrotor is equipped with inertial measurement unit (IMU) and camera, but there is no position, velocity or heading measurement. For this problem, an image-based control method is studied to track the maneuvering target. Firstly, the system error equations are proposed in the image space, which include the motion equations of quadrotor. Secondly, a position controller is designed, which takes image moments as inputs and attitude and thrust commands as outputs. Finally, for the problem of no measurement of image speed, a super-twisting sliding mode observer and controller are designed. The controller is robust to the unknown target maneuver and its output is chattering-free. The system stability is proven by Lyapunov theory. The unmanned aerial vehicle (UAV) completes the target tracking flight by fast tilt attitude change, not slow yaw change. The simulation results demonstrate the efficiency of proposed control scheme for quadrotor target tracking.

Key words: quadrotor UAVs; tracking control; image based visual servoing; sliding mode control

1 引言(Introduction)

四旋翼垂直起降(vertical take-off and landing, VTOL)无人机具有机动性强、可悬停、成本低等优点, 目前已在军事侦察、搜索、救援、监视等领域得到广泛应用. 传统的实施此类任务的无人机通常需要搭载多种昂贵的传感器, 这限制了无人机的成本和载荷. 当前, 在四旋翼机载传感器方面, 惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)已成为标准配置; 另外由于视觉系统可提供丰富的目标信息, 且重量轻、成本低, 得到了普遍装备. 因此, 近年来基于视觉的无人机自主控制技术受到人们的高度重视, 得到了

大量的研究.

基于图像的视觉伺服(image-based visual servoing, IBVS)具有不需要3D重构、不需要精确的目标模型、对相机校准误差不敏感等优点, 所以可以使用低成本、轻量级的相机, 这对于小型无人机非常具有吸引力. 但应用IBVS的困难是其非线性控制模型相对复杂; 另外由于四旋翼无人机的平移运动需要通过改变姿态实现, 当姿态变化时, 目标在象平面内的位置会发生变化, 导致图像的动力学方程复杂, 因而设计四旋翼无人机的IBVS控制器面临更多的挑战.

对已有的主要无人机IBVS文献设计进行分析, 图

收稿日期: 2016-07-07; 录用日期: 2017-03-15.

[†]通信作者. E-mail: top1944@163.com; Tel.: +86 15668059197.

本文责任编辑: 王正志.

国家自然科学基金项目(11461075)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (11461075).

像特征主要使用球面图像矩(spherical image moment)方法和透视矩(perspective moments), 处理方法有homography法、虚拟弹簧法和虚拟相机法。代表性工作有, Hamel和Mahony^[1]使用球面图像矩设计了一种稳定四旋翼无人机平移运动的IBVS控制方案, 并证明了质心图像特征可以保持系统的无源性并可简化控制设计; Bourquardez^[2]等在此基础上引入了新的图像误差项, 在实验中验证了使用球面矩时由于interaction矩阵会导致系统在垂直轴上出现不良行为, 而透视矩(perspective moments)在飞机平行于目标进行平滑而缓慢的运动时能够实现很好的稳定控制; Ozawa和Chaumette^[3]提出一种虚拟弹簧的方法, 利用图像特征矩推导出一个平移分量为单位阵的interaction矩阵, 此方法的局限是需要高度信息已知, 以及特征点共面且与飞机平行, 然而实际情况是四旋翼无人机需要横滚和俯仰运动来产生平移运动, 此时图像和目标平面将不再平行, 姿态的变化都会导致interaction矩阵产生很大的变化。另一种解决思路是Lee等^[4]在IBVS设计中引入虚拟图像平面的方法, 此虚拟平面与目标平面平行, 且与真实的摄像机平面具有相同的位置和偏航角, 使用虚拟平面的优点是避免了姿态变化对图像动态的影响, 便于图像点深度的估计以及实施控制; Jabbari等^[5]在虚拟图像平面中使用了透视矩, 并推导出了特征点的运动具有类无源的特性, 分析了虚拟图像平面中透视矩表示的图像误差动力学方程, 最后设计了一种自适应反演控制器; Abdelkader等^[6]使用虚拟图像平面和透视矩建立系统误差模型, 针对没有线速度测量以及存在外部干扰的问题, 设计了有界自适应控制器。

但以上方法都需要无人机的航向和姿态信息, 通常航向信息通过磁传感器获得, 但磁航向极易受到干扰, 当跟踪敌对目标或接近高压电线等磁场时, 磁传感器容易失灵导致无人机失控。

另外, 由于无人机的速度通常难以直接获得, 无法作为反馈直接使用。一些学者如Oriolo等^[7]以及Grabe等^[8]使用光流作为速度反馈对无人机进行控制, 光流法目前已经成熟并有相应的硬件产品可以使用^[9-10]。另外, 也可以设计Kalman滤波器^[11-12]估计图像的速度信息。但无论光流还是高阶的Kalman滤波器都需要消耗大量的计算资源, 如PX4Flow光流计^[10]就需要144 MHz的主频。为了减少资源消耗, 本文并不进行光流计算, 而是设计了一种无颤振的高阶super-twisting滑模观测器和控制器。

本文致力于外部传感器尽可能少的目标跟踪控制方法, 仅使用四旋翼无人机标配的IMU和摄像机, 无需其他额外的传感器, 如GPS(位置测量)、光流计(速度测量)、磁罗盘(航向测量)等; 通过建立系统误差模型, 使用蕴含相对位置信息的图像矩、以及IMU建立的倾斜矩阵和陀螺仪测得的三轴转动信息进行控制,

最终实现目标跟踪飞行。

2 四旋翼无人机动力学模型(Dynamics model of quadrotor UAV)

本文研究的四旋翼无人机结构如图1所示。图中: $\mathbf{W} = \{\mathbf{O}_w, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3\}$ 为惯性参考坐标系; $\mathbf{B} = \{\mathbf{O}_b, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3\}$ 为机体参考坐标系。 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ 位于4个旋翼中心确定的平面内, 分别与四旋翼无人机的两轴重合, 设 \mathbf{b}_1 为机头方向。第3轴 \mathbf{b}_3 与 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ 满足右手定则。 $m \in \mathbb{R}$ 为四旋翼无人机(以下简称无人机)质量; $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为相对机体坐标系的转动惯量矩阵, 由于所选的机体轴是惯性主轴, 因而可近似为对角阵 $\mathbf{J} = \text{diag}\{J_1, J_2, J_3\}$; $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$ 从机体系到惯性系的转换矩阵; $\boldsymbol{\Omega} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T \in \mathbb{R}^3$ 为机体系中的角速度; $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ 无人机质心在惯性坐标系中的位置矢量; $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ 无人机质心在惯性坐标系中的速度矢量; $f \in \mathbb{R}$ 总体升力大小; $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$ 机体坐标系内的总体力矩矢量。

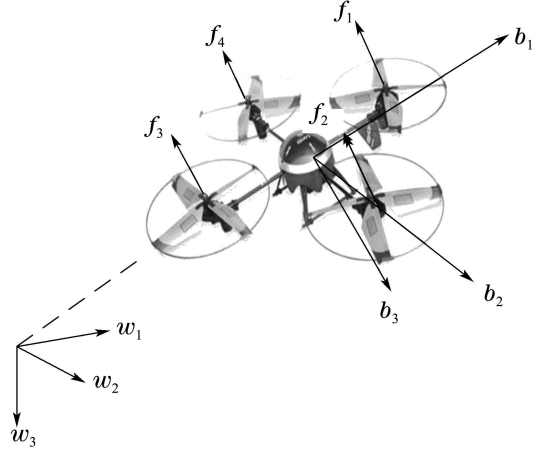


图1 四旋翼无人机模型

Fig. 1 Model of quadrotor UAV

假设以合力 $f \in \mathbb{R}$ 和力矩矢量 $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$ 作为四旋翼无人机系统的控制输入, 则四旋翼无人机的位置和姿态运动方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} = g\mathbf{w}_3 - \frac{f}{m}\mathbf{R}\mathbf{b}_3, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}sk(\boldsymbol{\Omega}), \\ \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{w}_3 = \mathbf{b}_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。

$sk(\cdot)$ 映射: $\mathbb{R}^3 \rightarrow \text{so}(3)$ 定义为

$$sk(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$sk(\cdot)$ 的逆映射为 $sk^{-1}(\cdot)$ 。

将旋转矩阵分解成 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_t = \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\phi$ 。 \mathbf{R}_t 为倾斜旋转矩阵, \mathbf{R}_ψ 为偏航旋转矩阵(绕 \mathbf{w}_3 轴转

动). ψ, θ, ϕ 分别为无人机的偏航角、倾斜角和横滚角.

R_ψ 的一阶微分动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{R}_\psi = R_\psi sk(\dot{\psi} \mathbf{b}_3), \\ \dot{\psi} = (\omega_2 \sin \phi + \omega_3 \cos \phi) / \cos \theta. \end{cases} \quad (4)$$

3 图像动力学(Dynamics of image)

3.1 虚拟图像平面(Virtual image plane)

为了简化图像动力学的分析, 可以建立虚拟图像平面, 计算图像在其投影的透视矩^[6], 首先建立图像坐标系及虚拟图像平面, 如图2所示.

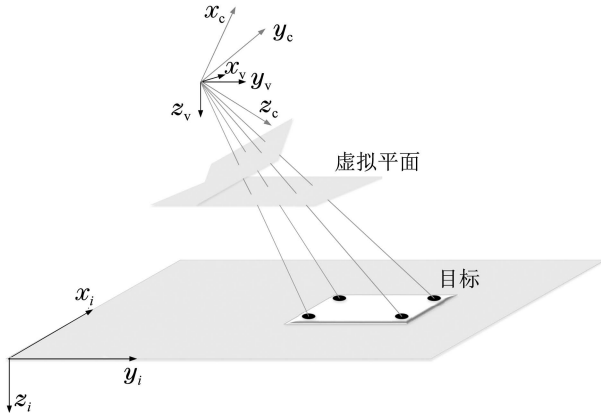


图2 摄像机坐标系与虚拟图像平面

Fig. 2 Camera frame and virtual image plane

假设摄像机安装于无人机底部中心位置, 且镜头垂直向下. 定义以下坐标系:

$C = \{O_c, x_c, y_c, z_c\}$ 为摄像机坐标系; O_c 位于摄像机平面后 λ (焦距) 处, x_c, y_c 分别与图像平面的 x, y 轴平行, z_c 与图像平面垂直.

$V = \{O_v, x_v, y_v, z_v\}$ 为虚拟摄像机坐标系; 原点与摄像机固连 $O_v = O_c$, $x_v - y_v$ 平面保持水平, 即与惯性坐标系的 $w_1 - w_2$ 平面平行, 且与摄像机具有相同的偏航角.

注1 在文献[6]中所建立的虚拟摄像机坐标系是与惯性参考坐标系平行的, 所以在计算中需要使用 R , 然而在没有航向信息的情况下, R_ψ 以及 R 无法获得. 因而本文采用了无人机方向固连的虚拟图像平面, 此时使用倾斜矩阵 R_t , 仅需使用IMU便能够可靠获得.

设移动目标上的一点 P 在惯性坐标系下的坐标为 P , 其在虚拟摄像机坐标系下的坐标为 $P_v = [x_v \ y_v \ z_v]^T$, 二者之间的关系为

$$P_v = R_\psi^T (P - O_v). \quad (5)$$

P_v 的一阶微分为

$$\begin{aligned} \dot{P}_v &= \dot{R}_\psi^T (P - O_v) + R_\psi^T (\dot{P} - \dot{O}_v) = \\ &= -sk(\dot{\psi}) R_\psi^T (P - O_v) + v_p - v_v = \\ &= -sk(\dot{\psi}) P_v + v_p - v_v. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: v_p 为移动目标在虚拟摄像机坐标系下的线速度

度, v_v 为摄像机在虚拟摄像机坐标系下的线速度.

设摄像机所测量的特征点的图像坐标为 (u, v) :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}^T = \frac{\lambda}{z_c} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

由于 $(x_v \ y_v \ z_v)^T = R_t(x_c \ y_c \ z_c)^T$, 摄像机的测量转换到虚拟图像平面的坐标为

$$\begin{bmatrix} u_v \\ v_v \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{R}_3 p} \begin{bmatrix} \bar{R}_1 p \\ \bar{R}_2 p \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: $p = [u \ v \ 1]^T$; $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3$ 为 R_t 的行向量.

式(8)的一阶微分为^[13]

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_v \\ \dot{v}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & u_v \\ 0 & -\lambda & v_v \end{bmatrix} \frac{(v_v - v_p)}{z_v} + \begin{bmatrix} v_v \\ -u_v \end{bmatrix} \dot{\psi}. \quad (9)$$

3.2 图像特征选取(Selection of image feature)

前文分析推导了图像的动力学方程, 为了简化分析与计算, 需要进一步选取适当的图像特征作为目标的状态变量. 在IBVS中, 视觉特征的选取会直接影响系统动力学分析的难度和闭环系统的性能. 为了避免复杂的图像处理步骤(提取、匹配和跟踪), 可采用全局性的图像特征: 如傅里叶描述子^[14]、光强度^[15]、亮度信息^[16-17]和图像矩^[18]. 图像矩的优点是具有矩不变的重要特性, 即对特定的转换(旋转、平移、缩放)不变化. 不变矩理论在1962年由Hu M. K提出^[19], 并在图像识别和视觉控制中得到了广泛的运用. 为简化欠驱动的四旋翼无人机的全动态图像控制器设计, 同时保证无人机在笛卡尔空间具有良好的行为, 选用透视图像矩作为状态变量, 描述如下:

假设目标为平面物体, 有 N 个图像特征点 $p_k = [u_k \ v_k \ 1]^T$, 定义透视矩(perspective moments)如下^[20]:

$$m_{ij} = \sum_{k=1}^N u_k^i v_k^j. \quad (10)$$

中心距(centered moments)为

$$\mu_{ij} = \sum_{k=1}^N (u_k - u_g)^i (v_k - v_g)^j. \quad (11)$$

图像面积

$$a = \mu_{20} + \mu_{02}, \quad (12)$$

其中: $u_g = m_{10}/m_{00}$, $v_g = m_{01}/m_{00}$. 选择以下图像特征用于无人机的平移运动控制:

$$q_x = q_z u_g, \quad q_y = q_z v_g, \quad q_z = z^d \sqrt{a^d/a}. \quad (13)$$

其中: z^d 为摄像机与目标平面的期望垂直距离, a^d 为此时的期望面积.

则新的图像特征 $q = [q_x \ q_y \ q_z]^T$ 的动力学方程为

$$\dot{q} = -sk(\dot{\psi}) \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z^D \end{bmatrix} - v_v + v_p, \quad (14)$$

其中 q_z^D 可为任意值.

另外,由式(9)可得 $z_v \sqrt{a} = z^d \sqrt{a^d}$,进而有

$$z_v = z^d \sqrt{a^d/a}. \quad (15)$$

使用图像矩的另一个优点是,当 z^d, a^d 已知时,由测量值 a 及式(15)计算可得 z_v ,在本文的高度控制中主要将 z_v (即 q_z)作为控制变量,而非直接使用高度信息,控制目标是令 $z_v \rightarrow z_d$.

注2 (关于高度信息 z 估计的讨论)目前学者已经提出诸多方法来处理深度未知这一问题,主要可分为以下几种:

1) 通过计算机视觉方法进行估计.

如果相机内参数已知,可以利用 SFM(structure from motion)和光流计算获取深度信息^[21].或是使用立体匹配技术获取深度信息^[22].

2) 设计深度估计器.

可以创建深度估计器,如Kalman滤波器^[11-12],并使用机器人和图像运动的测量数据来在线估计深度值.

3) 使用自适应控制技术来估计深度^[23-24].

在文献[25]详细研究了深度误差对控制性能的影响,并发现在实际应用中IBVS对深度 z 的误差是非常宽容的.

3.3 图像误差方程(Image error equation)

首先定义在图像矩空间中的误差向量.假设本文希望无人机在目标上方中央飞行,距离目标高度为 z^d ,则期望图像特征如下:

$$\mathbf{q}^d = [q_x^d \ q_y^d \ q_z^d]^T = [0 \ 0 \ q_z^d]^T. \quad (16)$$

定义图像误差向量为

$$\delta = \mathbf{q} - \mathbf{q}^d. \quad (17)$$

令式(14)中的 $q_z^D = q_z - q_z^d$,则图像误差向量的微分为

$$\dot{\delta} = -sk(\dot{\psi} \mathbf{b}_3) \delta - \mathbf{v}_v + \mathbf{v}_p. \quad (18)$$

为得到图像特征在虚拟平面的完整动力学方程,考虑无人机在虚拟平面的平移运动方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{v}}_v = -sk(\dot{\psi} \mathbf{b}_3) \mathbf{v}_v + \mathbf{u}_v, \\ \mathbf{u}_v = \mathbf{R}_t \mathbf{u}_b, \end{cases} \quad (19)$$

其中 \mathbf{u}_b 为机体系下无人机所有外力合力:

$$\mathbf{u}_b = g \mathbf{R}^T \mathbf{e}_3 - \frac{f}{m} \mathbf{b}_3, \quad \mathbf{b}_3 = [0 \ 0 \ 1]^T.$$

将式(14)微分并将式(19)代入得:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta} &= -2\mathbf{M}_1 \dot{\delta} - \mathbf{M}_2 \delta - \mathbf{M}_1 \mathbf{v}_p - \dot{\mathbf{v}}_p + \mathbf{u}_v, \quad (20) \\ \mathbf{M}_1 &= sk(\dot{\Omega} \mathbf{b}_3), \\ \mathbf{M}_2 &= sk(\dot{\Omega} \mathbf{b}_3) + sk(\Omega \mathbf{b}_3) sk(\Omega \mathbf{b}_3), \\ \ddot{\delta} &= -2\mathbf{M}_1 \dot{\delta} - \mathbf{M}_2 \delta - \mathbf{M}_1 \mathbf{v}_p - \dot{\mathbf{v}}_p + \\ &\quad \mathbf{R}_t (g \mathbf{R}^T \mathbf{e}_3 - \frac{f}{m} \mathbf{b}_3). \end{aligned} \quad (21)$$

由于 $\mathbf{R}_\psi^T \mathbf{b}_3 = \mathbf{b}_3$,可得

$$\mathbf{u}_v = \mathbf{R}_t \mathbf{u}_b = \mathbf{R}_t (g \mathbf{R}^T \mathbf{e}_3 - \frac{f}{m} \mathbf{b}_3) =$$

$$(g - \frac{f}{m} \mathbf{R}_t) \mathbf{b}_3. \quad (22)$$

设 $\mathbf{R}_t = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3]$,有 $\mathbf{R}_t \mathbf{b}_3 = \mathbf{r}_3$,可得

$$\begin{aligned} \ddot{\delta} &= -2\mathbf{M}_1 \dot{\delta} - \mathbf{M}_2 \delta - \mathbf{M}_1 \mathbf{v}_p - \dot{\mathbf{v}}_p + \\ &\quad g \mathbf{b}_3 - \frac{f}{m} \mathbf{r}_3. \end{aligned} \quad (23)$$

注3 在本文中假设已知期望高度 z^d 及与之对应的 a^d ,如果是合作目标通常可以在地面实现测量得到.但如果 a^d 未知或不准确,会对图像矩(13)的计算造成比例误差.首先这会造成式(16)中的 q_z^d 计算不准确,进而产生高度通道的稳态误差.而由于 $q_x^d = q_y^d = 0$,因此 \mathbf{x}, \mathbf{y} 通道的稳态误差最终是趋近于0的.另外,由于比例误差的影响,会对系统的动态造成一定的影响,尤其是当实际用于计算的名义 a_c^d 小于真实的 a^d 时,会造成实际飞行高度大于期望的飞行高度(稳态误差),加上比例误差的作用,这又会进一步加剧对整个系统动态性能的影响.在仿真中也验证了这一分析.

4 四旋翼无人机控制器设计(Robust controller design of quadrotor UAV)

4.1 控制系统结构(Structure of control system)

本文采用IBVS位置控制器+姿态控制器的结构,由于四旋翼无人机自身欠驱动的动力学特点,其平移运动需通过改变姿态来实现,位置控制器输出指令经转化后作为姿态控制器的输入指令.四旋翼转动运动的状态量相对于平移运动是相对独立的,因而可进行解耦,分别设计IBVS位置控制器和姿态控制器.

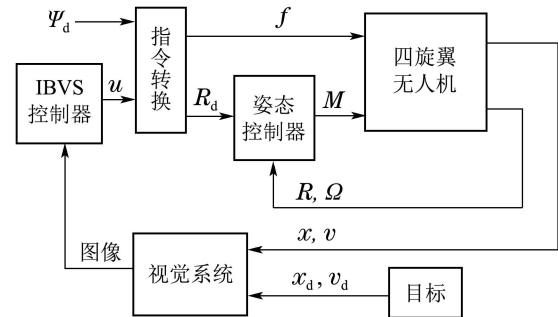


图3 四旋翼无人机控制系统结构图

Fig. 3 Structure of quadrotor UAV control system

4.2 IBVS控制器设计(IBVS controller design)

考察二阶摄动系统(20),由于 $\dot{\delta}$ 未知,所以首先设计高阶滑模观测器(high order sliding mode observer, HOSMO)得到速度量 $\dot{\delta}$ 的鲁棒估计 \hat{x}_2 ,再设计高阶滑模控制器(HOSMC)^[26],得到无颤振的连续输出.下面设计HOSMO:

取 $e_1 = \delta - \hat{x}_1, z_1 = k_1 |e_1|^{2/3} \text{sgn } e_1, z_2 = k_2 |e_1|^{1/3} \text{sgn } e_1, z_3 = k_3 \text{sgn } e_1$,HOSMO为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + z_1, \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + u + f(\delta, \hat{x}_2) + z_2, \\ \dot{\hat{x}}_3 = z_3, \end{cases} \quad (24)$$

其中 $f(\delta, \hat{x}_2) = -2\mathbf{M}_1\hat{x}_2 - \mathbf{M}_2\delta + \mathbf{g}\mathbf{b}_3$.

选择恰当的参数 k_1, k_2, k_3 , 可在有限时间内使得 $\hat{x}_2 \rightarrow \delta^{[27]}$, 证明略.

由于目标运动速度和加速度 $\mathbf{v}_p, \dot{\mathbf{v}}_p$ 未知, 可将图像误差方程(20)中的与二者相关的项合并, 视为未知扰动项 $\mathbf{D} = -(\mathbf{M}_1\mathbf{v}_p + \dot{\mathbf{v}}_p)$.

假设 1 假设扰动 \mathbf{D} 有界, $|\mathbf{D}| < \sigma_d$, 其中 $|\cdot|$ 代表向量2范数.

假设 2 假设无人机飞行时的角加速度有界, $|\dot{\omega}_3| < \sigma_r$. 由于 $\dot{\omega}_3$ 可由输出力矩控制, 因而可在航向通道主动抑制 $\dot{\omega}_3$, 将其控制在较小的范围内.

设虚拟指令 $\mathbf{u} = -\frac{f_d}{m}\mathbf{r}_d$, 由 \mathbf{u} 生成姿态指令 \mathbf{r}_d 和拉力指令 f_d . 则式(23)改写为

$$\ddot{\delta} = -2\mathbf{M}_1\dot{\delta} - \mathbf{M}_2\delta - \mathbf{M}_1\mathbf{v}_p - \dot{\mathbf{v}}_p + \mathbf{g}\mathbf{b}_3 - \left(\frac{f}{m}\mathbf{r}_3 - \frac{f_d}{m}\mathbf{r}_d\right) + \mathbf{u}. \quad (25)$$

控制器设计 设位置控制器输出为 \mathbf{u} , 设滑模面为

$$\mathbf{s} = c_1\delta + \hat{\mathbf{x}}_2. \quad (26)$$

设计连续高阶滑模控制器为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & -c_1\hat{\mathbf{x}}_2 - \int_0^t k_3 \operatorname{sgn} \mathbf{e}_1 d\tau - \\ & k_2 |\mathbf{e}_1|^{1/3} \operatorname{sgn} \mathbf{e}_1 - \lambda_1 |\mathbf{s}|^{1/2} \operatorname{sgn} \mathbf{s} - \\ & \int_0^t \lambda_2 \operatorname{sgn} \mathbf{s} d\tau - f(\delta, \hat{\mathbf{x}}_2). \end{aligned} \quad (27)$$

假设 3 观测器的动态远快于位置控制器, 在有限时间内可使 $\hat{\mathbf{x}}_2 = \dot{\delta}$.

假设 4 姿态系统的动态远快于位置系统, 在极短时间可使 $f \rightarrow f_d, \mathbf{r}_3 \rightarrow \mathbf{r}_d$, 假设 $\frac{f}{m}\mathbf{r}_3 - \frac{f_d}{m}\mathbf{r}_d \approx \mathbf{0}$.

定理 1 对于四旋翼无人机IBVS目标跟踪问题, 假设所设计的姿态控制器和速度观测器的收敛时间远小于位置回路, 则位置控制器(27)能够使得 $\delta \rightarrow \mathbf{0}$.

证 式(26)的一阶微分为

$$\dot{\mathbf{s}} = c_1\dot{\delta} + \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2. \quad (28)$$

由于观测器可以在极短的有限时间 T_0 内使得 $\hat{\mathbf{x}}_2 \rightarrow \dot{\delta}$, 当 $t > T_0$ 时有

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} = & c_1\hat{\mathbf{x}}_2 + \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 = \\ & c_1\hat{\mathbf{x}}_2 + \hat{\mathbf{x}}_3 + \mathbf{u} + f(\delta, \hat{\mathbf{x}}_2) + \mathbf{z}_2 = \\ & c_1\hat{\mathbf{x}}_2 + \int_0^t k_3 \operatorname{sgn} \mathbf{e}_1 d\tau + \mathbf{u} + f(\delta, \hat{\mathbf{x}}_2) + \\ & k_2 |\mathbf{e}_1|^{1/3} \operatorname{sgn} \mathbf{e}_1 = \\ & -\lambda_1 |\mathbf{s}|^{1/2} \operatorname{sgn} \mathbf{s} - \int_0^t \lambda_2 \operatorname{sgn} \mathbf{s} d\tau. \end{aligned} \quad (29)$$

式(29)为标准的 super-twisting 方程, 按照 Moreno^[28] 的方法选取控制器参数 λ_1, λ_2 , 可以保证在有限时间内使得 $\mathbf{s} = \mathbf{0}$.

当 $\mathbf{s} = \mathbf{0}$ 时, δ 指数收敛至 $\mathbf{0}$. 证毕.

4.3 姿态指令生成(Abstraction of attitude command)

由位置控制器输出指令 \mathbf{u} 生成姿态指令 \mathbf{r}_d 和拉力指令 f_d , 设 $\mathbf{u} = -\frac{f_d}{m}\mathbf{r}_d$, 则有

$$\mathbf{r}_d = -\frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|}, f_d = m \|\mathbf{u}\|. \quad (30)$$

由式(30)–(32)可将 \mathbf{r}_d 转换成姿态控制器的输入指令 \mathbf{R}_d^T .

$$\theta_d = \arctan \frac{r_{d1}}{r_{d3}}, \quad (31)$$

$$\phi_d = \arctan \frac{-\cos(\theta_d)r_{d2}}{r_{d3}}, \quad (32)$$

$$\mathbf{R}_d^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & 0 & -\sin \theta_d \\ \sin \phi_d \sin \theta_d & \cos \phi_d & \sin \phi_d \cos \theta_d \\ \cos \phi_d \sin \theta_d & -\sin \phi_d & \cos \phi_d \cos \theta_d \end{bmatrix}. \quad (33)$$

四旋翼无人机只需要较小的电机转速改变便可产生足够的俯仰和滚转力矩, 而产生航向力矩则需要电机转速做较大改变, 且调节时间长^[29]. 由式(23)可知无人机的图像矩以及相对位置误差只与 \mathbf{r}_3 及 f 有关, 而与航向无关, 因而可不改变航向, 而只是通过改变姿态实现误差跟踪控制. 因而姿态控制部分将倾斜部分和航向部分解耦.

航向通道可解耦作为自由量进行控制, 在无航向测量(磁罗盘)的情况下可按照以下方式实施控制:

1) 转动抑制. 在航向通道主动抑制转动, 控制目标为 $\omega_3 = 0$.

2) 航向跟随. 由视觉信息可计算出无人机相对于目标的相对航向 α ^[18]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}. \quad (34)$$

设 ψ_t 为目标偏航角, 则有 $\psi = \psi_t - \alpha$, 当控制目标为 $\alpha = 0$ 时, 可使 $\psi = \psi_t$.

4.4 姿态控制器设计(Attitude controller design)

控制目标是从当前的倾斜姿态 \mathbf{R}_t 转动至期望的倾斜姿态 \mathbf{R}_d , 定义姿态误差

$$\mathbf{R}_e = \mathbf{R}_t \mathbf{R}_d^{-1}. \quad (35)$$

将跟踪问题转换为调节问题, 姿态控制目标为 $\mathbf{R}_e \rightarrow \mathbf{I}$.

为了实现从 $\text{SO}(3)$ 上的一个点到另一个点平滑地运动, 设计如下 $\text{SO}(3)$ 控制器^[30].

定理 2 对于式(2)的 $\text{SO}(3)$ 系统, 设计控制器为

$$\mathbf{M} = -\Omega \times J\Omega - K_p sk^{-1}(\log(R)) - K_d\Omega. \quad (36)$$

其中 $\mathbf{K}_d, \mathbf{K}_p$ 为正定对称阵. 当初始姿态 $\text{tr}(\mathbf{R}_0) \neq -1$ 时, 系统可从任意初始姿态 \mathbf{R}_0 指数收敛至 \mathbf{I} .

证明略, 参见文献[30].

5 仿真(Simulation)

设目标无人机的转动惯量矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} 0.43 & 0 & 0 \\ 0 & 0.43 & 0 \\ 0 & 0 & 1.02 \end{bmatrix} \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

质量 $\text{mass} = 0.455 \text{ kg}$.

取移动目标上4个特征点, 相对于目标中心的距离为 $[0.5 \ 0.25 \ 0]^T$, $[-0.5 \ -0.25 \ 0]^T$, $[-0.5 \ 0.25 \ 0]^T$, $[0.5 \ -0.25 \ 0]^T$.

假设希望在目标上方5 m处飞行, 设无人机初始位置为 $\mathbf{x}_0 = [6 \ 5 \ -10]^T$, 则期望位置为 $\mathbf{x}_d = \mathbf{x}_p + [0 \ 0 \ -5]^T$, 其中 \mathbf{x}_p 为目标位置.

在仿真中观测器的参数使用了较大的增益以加快状态估计的收敛速度, 而控制器的参数则选取较小的增益, 以避免无人机姿态出变化幅度过大. 通过调试最终参数设置为 $k_1 = 20, k_2 = 10, k_3 = 10, \lambda_1 = 3, \lambda_2 = 6$.

5.1 目标直线运动(Linear movement of target)

设目标进行直线运动, 速度为3 m/s, 仿真时长设定为 $T = 40 \text{ s}$. 在第9 s, 19 s, 29 s时刻分别平滑转动 90° .

无人机和目标的飞行轨迹如图4所示, 位置跟踪误差如图5所示, 在转弯阶段会出现较大的位置误差, 约1.5 m. 位置控制器的输出指令 \mathbf{u} 及由此生成的拉力指令 f 和姿态控制输出的 \mathbf{M} 如图6-8所示; 无人机的角速度、欧拉角、速度如图9-11所示, 可见输出指令较为平滑, 避免了无人机姿态的激烈变化. 通过虚拟摄像机平面的转换, 图像矩误差和笛卡尔空间的位置误差具有近似的动态特性, 控制器能实现平稳的跟踪飞行.

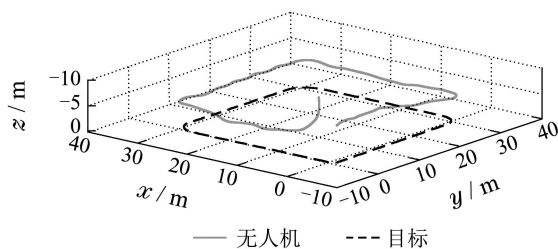


图4 无人机与目标的运动轨迹

Fig. 4 Trajectory of UAV and target

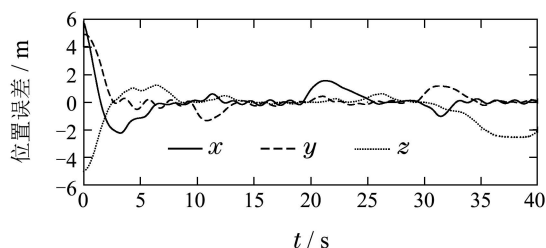


图5 位置跟踪误差

Fig. 5 Trajectory tracking error

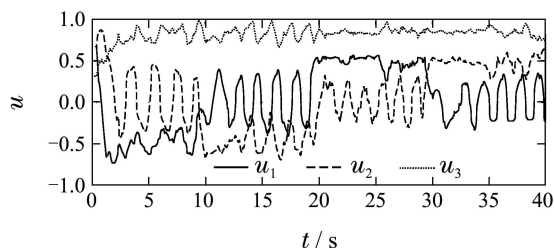


图6 位置控制器输出

Fig. 6 Output of position controller

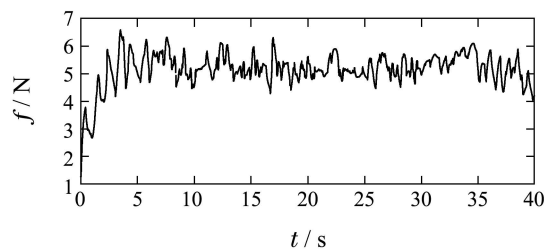


图7 拉力输出

Fig. 7 Output of thrust

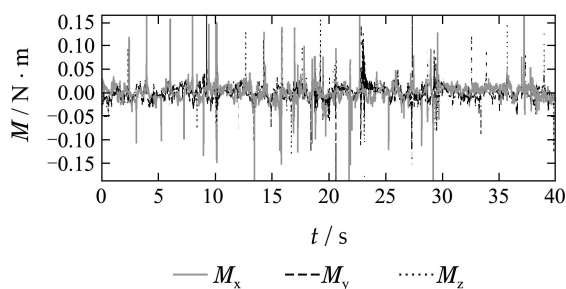


图8 力矩输出

Fig. 8 Output of torques

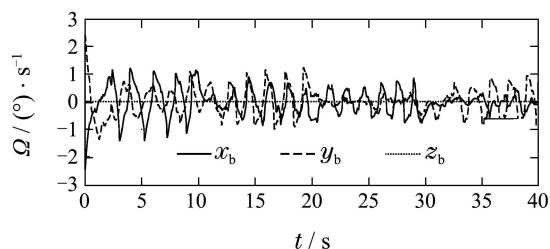


图9 无人机转动角速度(机体系)

Fig. 9 Output of UAV's rotation speed (Body frame)

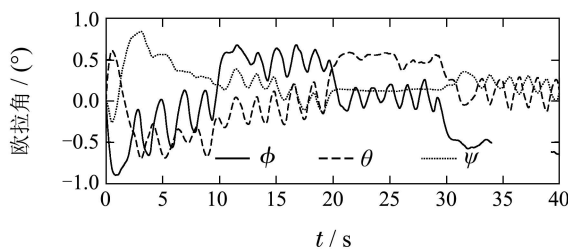


图10 无人机欧拉角

Fig. 10 Euler angles of UAV

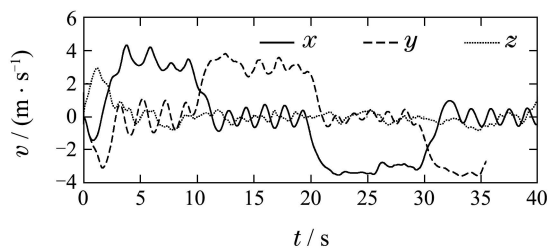


图 11 无人机速度(惯性系)

Fig. 11 Velocity of UAV (Inertial frame)

5.2 目标S形机动(S-type movement of target)

设目标进行S形机动, 运动速度为3 m/s. 仿真时长设定为 $T = 20$ s.

无人机和目标的飞行轨迹如图12所示, 位置跟踪误差如图13所示, 位置控制器的输出指令 u 及由此生成的拉力指令 f 和姿态控制输出的 M 如图14–16所示; 无人机的角速度、欧拉角、速度如图17–19所示, 可见输出指令较为平滑, 避免了无人机姿态的激烈变化, 能够实现较好的跟踪飞行.

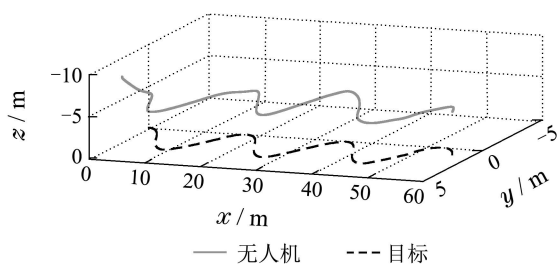


图 12 无人机与目标的运动轨迹

Fig. 12 Trajectory of UAV and target

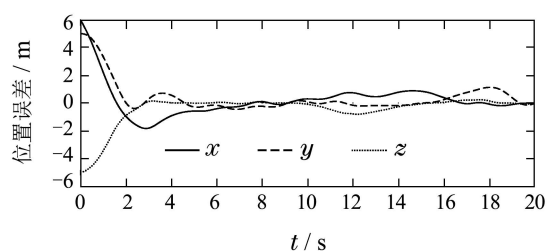


图 13 位置跟踪误差

Fig. 13 Trajectory tracking error

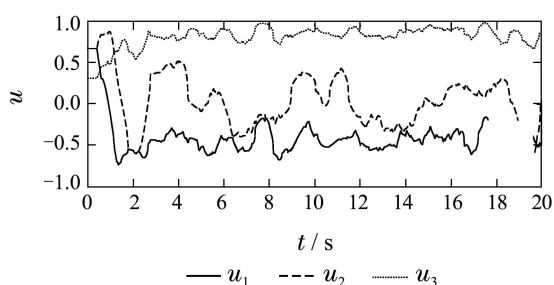


图 14 位置控制器输出

Fig. 14 Output of position controller

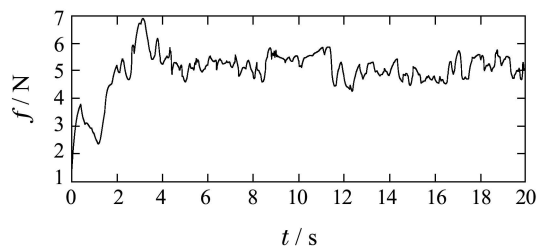


图 15 拉力输出

Fig. 15 Output of thrust

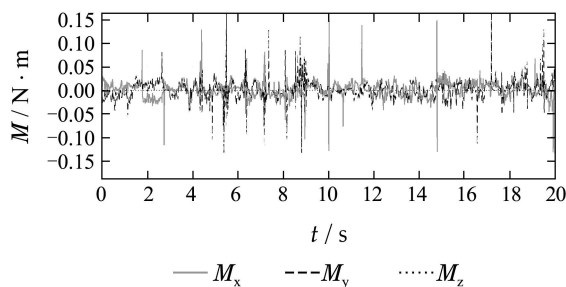


图 16 力矩输出

Fig. 16 Output of torques

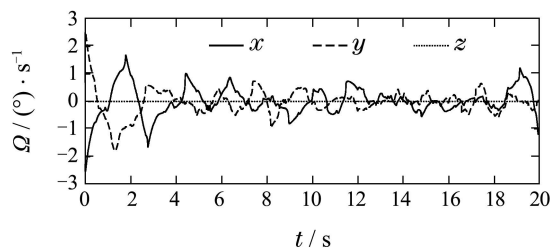


图 17 无人机转动角速度(机体系)

Fig. 17 Output of UAV's rotation speed (Body frame)

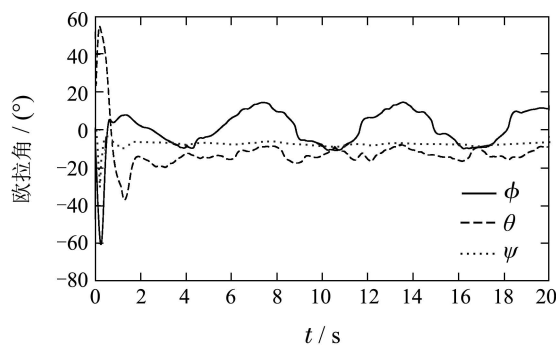


图 18 无人机欧拉角

Fig. 18 Euler angles of UAV

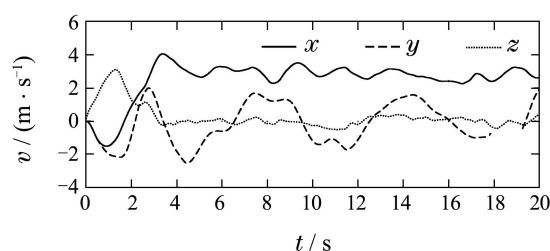


图 19 无人机速度(惯性系)

Fig. 19 Velocity of UAV(Inertial frame)

5.3 速度估计存在延迟时的仿真(Simulation with velocity estimation delay)

考虑到速度量 δ 通过状态观测器所获取的速度估计信息 \hat{x}_2 可能具有较大的延时(滞后),在式(24)速度估计后加入延迟环节,进行了两组仿真,分别延迟时间为50 ms和100 ms. 飞行轨迹分别如图20–22所示,轨迹跟踪误差分别如图21、图23所示. 通过仿真可以发现,延迟越大,跟踪误差越大,当延迟100 ms时,位置跟踪会出现小幅震荡.

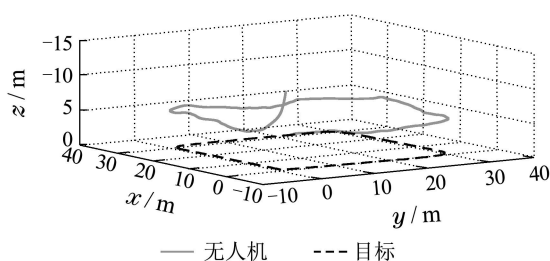


图 20 延迟50 ms时的飞行轨迹

Fig. 20 Flight trajectory with 50 ms delay

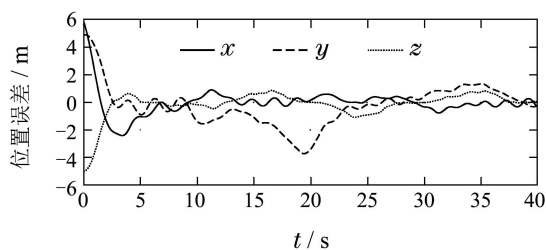


图 21 延迟50 ms时的轨迹跟踪误差

Fig. 21 Trajectory tracking error with 50 ms delay

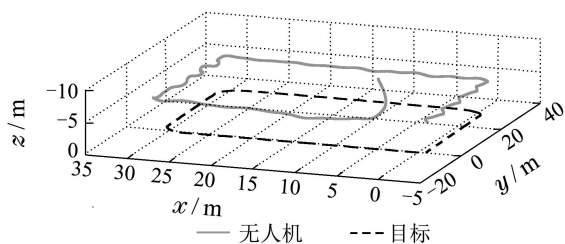


图 22 延迟100 ms时的飞行轨迹

Fig. 22 Flight trajectory with 100 ms delay

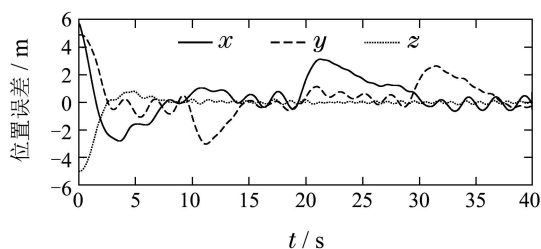


图 23 延迟100 ms的轨迹跟踪误差

Fig. 23 Trajectory tracking error with 100 ms delay

5.4 实景仿真与C代码生成(Virtual simulation and C code generation)

为了验证视觉系统,在V-rep进行了实景仿真,模拟摄像机的输出,进行了目标识别,并在其上方悬停,如图24所示,详细设置步骤及部分代码见网页^[31].

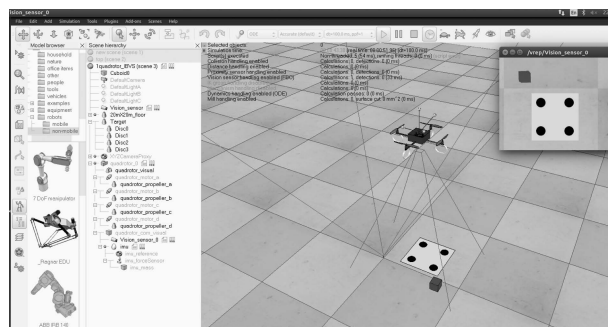


图 24 V-rep仿真环境

Fig. 24 V-rep simulation environment

最后,为了验证第4.2节小结中所设计的位置控制器(包括观测器)在嵌入式控制器上的运行速度能否满足无人机控制性能的要求,使用了Si mulink[®] Coder[™]和Embedded Coder[™]将Simulink程序中的位置控制转换成了C代码,并将C代码编译至目标处理器(型号: STM32F407, 主频: 168 MHz),使用模拟的输入数据运行了10,000次,通过RTC(实时时钟)记录运行前后的时间,得到总计消耗时间为12 s,则估算单次运行平均消耗CPU的时间为1.2 ms. 考虑到位置控制回路的运行周期通常为10~100 Hz,所以所设计的控制算法可满足实时性要求.

6 结论(Conclusions)

针对没有目标以及无人机直接的位置、速度和航向测量,研究仅使用IMU和目标视觉信息的IBVS控制方法. 通过使用目标的透视矩以及虚拟图像平面的方法,简化了四旋翼无人机的全动态图像控制器设计,同时能够保证无人机在笛卡尔空间具有良好的行为. 通过推导系统的误差方程,并针对目标机动的不确定性,设计了一种带有观测器的高阶super-twisting控制器,其输出姿态指令较为平滑,避免了无人机姿态的激烈变化. 所设计的姿态控制器能够迅速跟踪姿态指令,最后在四旋翼无人机上进行跟踪飞行仿真验证,结果显示,所提出的控制律具有较好的跟踪控制性能,且对目标不确定的机动具有较好的鲁棒性.

目前,控制算法所生成的C代码在STM32飞控上运行良好,未来将继续编写视觉软件,并在所搭建的四旋翼无人机平台上进行飞行验证.

参考文献(References):

- [1] HAMEL T, MAHONY R. Visual servoing of an under-actuated dynamic rigid-body system: an image-based approach [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(2): 187–198.

- [2] BOURQUARDEZ O, MAHONY R, GUENARD N, et al. Image-based visual servo control of the translation kinematics of a quadrotor aerial vehicle [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(3): 743 – 749.
- [3] OZAWA R, CHAUMETTE F. Dynamic visual servoing with image moments for a quadrotor using a virtual spring approach [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai: IEEE, 2011: 5670 – 5676.
- [4] LEE D, RYAN T, KIM H J. Autonomous landing of a VTOL UAV on a moving platform using image-based visual servoing [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Paul: IEEE, 2012: 971 – 976.
- [5] JABBARI H, ORIOLO G, BOLANDI H. An adaptive scheme for image-based visual servoing of an underactuated UAV [J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2014, 29(1): 92 – 104.
- [6] ABDESSAMEUD A, JANABI-SHARIFI F. Image-based tracking control of VTOL unmanned aerial vehicles [J]. *Automatica*, 2015, 53(3): 111 – 119.
- [7] ASL H J, ORIOLO G, BOLANDI H. Output feedback image-based visual servoing control of an underactuated unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2014, 228(7): 435 – 448.
- [8] GRABE V, BULTHOFF H H, GIORDANO P R. On-board velocity estimation and closed-loop control of a quadrotor UAV based on optical flow [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Paul: IEEE, 2012: 491 – 497.
- [9] CHASE J, NELSON B, BODILY J et al. Real-time optical flow calculations on FPGA and GPU architectures: a comparison study [C] // *Proceedings of the 16th IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*. California: IEEE, 2008: 173 – 182.
- [10] HONEGGER D, MEIER L, TANSKANEN P et al. An open source and open hardware embedded metric optical flow cmos camera for indoor and outdoor applications [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe: IEEE, 2013: 1736 – 1741.
- [11] BENINI A, MANCINI A, LONGHI S. An IMU/UWB/vision-based extended kalman filter for mini-UAV localization in indoor environment using 802.15.4a wireless sensor network [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2013, 70(1–4): 461 – 476.
- [12] MIRZAEI F M, ROUMELIOTIS S I. A Kalman filter-based algorithm for IMU-camera calibration: Observability analysis and performance evaluation [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(5): 1143 – 1156.
- [13] JABBARI H, ORIOLO G, BOLANDI H. Dynamic IBVS control of an underactuated UAV [C] // *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. St. Paul: IEEE, 2012: 1158 – 1163.
- [14] COLLEWET C, CHAUMETTE F. Positioning a camera with respect to planar objects of unknown shape by coupling 2-D visual servoing and 3-D estimations [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(3): 322 – 333.
- [15] KALLEM V, DEWAN M, SWENSEN J P, et al. Kernel-based visual servoing [C] // *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego: IEEE, 2007: 1975 – 1980.
- [16] COLLEWET C, MARCHAND E. Photometric visual servoing [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(4): 828 – 834.
- [17] BAKTHAVATCHALAM M, CHAUMETTE F, MARCHAND E. Photometric moments: new promising candidates for visual servoing [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe: IEEE, 2013: 5241 – 5246.
- [18] CHAUMETTE F. Image moments: a general and useful set of features for visual servoing [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(4): 713 – 723.
- [19] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2): 179 – 187.
- [20] TAHRI O, CHAUMETTE F. Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(6): 1116 – 1127.
- [21] HUO Zhiyong. *Research on key technologies of depth-map estimation for free viewpoint video* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
(霍智勇. 自由视点视频深度图估计的关键技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.)
- [22] ZHANG Kang. *Stereo matching and depth enhancement in image-based depth perception* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
(张康. 基于图像深度感知中的立体匹配和深度增强算法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.)
- [23] PAPANIKOLOPOULOS NP, KHOSLA P. Adaptive robot visual tracking: theory and experiments [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, 38(3): 429 – 445.
- [24] ASL H J, YOON J. Robust image-based control of the quadrotor unmanned aerial vehicle [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 85(3): 2035 – 2048.
- [25] MAREY M, CHAUMETTE F. Analysis of classical and new visual servoing control laws [C] // *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. California: IEEE, 2008: 3244 – 3249.
- [26] NAGESH I, EDWARDS C. A multivariable super-twisting sliding mode approach [J]. *Automatica*, 2014, 50(3): 984 – 988.
- [27] LEVANT A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control [J]. *International Journal of Control*, 2003, 76(9–10): 924 – 941.
- [28] MORENO J, OSORIO M, OTHERS. Strict Lyapunov functions for the super-twisting algorithm [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(4): 1035 – 1040.
- [29] YU Y, YANG S, WANG M, et al. High performance full attitude control of a quadrotor on SO (3) [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington: IEEE, 2015: 1698 – 1703.
- [30] BULLO F, MURRAY R M. Proportional derivative (PD) control on the Euclidean group [C] // *European Control Conference*. Rome: IEEE, 1995: 1091 – 1097.
- [31] LIU Jintao. ROS and MATLAB 2: connect to vrep simulator [EB/OL]. 2016, <http://blog.exbot.net/archives/2619>.
(刘锦涛. ROS与MATLAB系列2: 连接vrep仿真器[EB/OL]. 2016, <http://blog.exbot.net/archives/2619>.)

作者简介:

刘锦涛 (1981–), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为导航、制导与控制, E-mail: top1944@163.com;

高丽 (1982–), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为导航、制导与控制;

吴文海 (1962–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精确制导与飞行控制;

李静 (1982–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为导航、制导与控制。