

# 旋翼飞行机械臂系统的混合视觉伺服控制

孙敬陶<sup>†</sup>, 王耀南, 谭建豪, 钟 杭, 李瑞涵

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

湖南大学 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 旋翼飞行机械臂是一种具有强耦合特性的机器人系统, 借助视觉进行自主作业还存在诸多问题, 如实时深度估计、目标极易丢失以及目标笛卡尔空间模型重建等. 本文针对传统的基于图像与基于位置的视觉伺服的缺陷以及系统自身欠驱动等问题, 建立了运动学模型和提出了基于力平衡原理的动力学联合建模, 并通过欧几里得单应性矩阵分解设计出旋翼飞行机械臂系统的混合视觉伺服控制方法, 在图像空间控制平移、笛卡尔空间控制旋转, 减弱了平移与旋转之间的相互影响实现解耦效果, 改善了系统对非结构因素的抗扰性能和全局稳定性. 通过仿真和实验检验了系统鲁棒性和算法优越性.

**关键词:** 旋翼飞行机械臂系统; 动力学联合建模; 欧几里得重建; 视觉伺服; 手眼系统

**引用格式:** 孙敬陶, 王耀南, 谭建豪, 等. 旋翼飞行机械臂系统的混合视觉伺服控制. 控制理论与应用, 2019, 36(4): 505 – 515

中图分类号: TP273 文献标识码: A

DOI: 10.7641/CTA.2018.70857

## Hybrid visual servoing for rotor aerial manipulation system

SUN Jing-tao<sup>†</sup>, WANG Yao-nan, TAN Jian-hao, ZHONG Hang, LI Rui-han

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** Unmanned aerial manipulations are special robotic systems which exists strong coupling characteristics. There are many issues using the vision for actively manipulate in environment, such as real-time depth estimation, the target is extremely easy to lose and the target Cartesian space model reconstruction. We formulate the kinematic and joint dynamic equations of the system based on force balance principle, which could deal with the respective drawbacks of classical image-based and position-based visual servoing as well as the matter of the system itself under-driven. Then, Through the decomposition of Euclidean homography matrix, proposing a hybrid visual servoing control scheme for unmanned aerial manipulation, which controls pan in image space and controls rotation in Cartesian space to achieve decoupling effect, is proposed to improve the systems interference immunity to non-structural factors and global stability. Finally, simulation and experimental results validate the robustness of system and demonstrate the superiority of algorithm.

**Key words:** unmanned aerial manipulations; joint dynamic equations; scaled Euclidean reconstruction; visual servoing; eye in hand system

**Citation:** SUN Jingtao, WANG Yaonan, TAN Jianhao, et al. Hybrid visual servoing for rotor aerial manipulation system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(4): 505 – 515

## 1 引言

近年来, 来自诸多学科的研究人员对空中服务机器人的新型领域进行了深入的探讨, 在灾难救援、工业检测、农业运输以及地图遥感技术等方面取得了较快的发展. 无人飞行器机器人(unmanned aerial vehicles, UAVs)鉴于其优越的机动性能, 能够在各种飞行状况

下悬停和平移. 不同于依赖地面的可移动式机器人, 笔者可以将其工作空间扩展到三维非结构环境当中, 甚至可利用无人机到达极端环境进行作业.

随着电池技术的革新和舵机、传感器的小型化, 逐渐出现了作业型无人机, 这类无人机多数配置简易机械装置<sup>[1-3]</sup>或是数学模型并不复杂的抓取手<sup>[4]</sup>, 出现

收稿日期: 2017-11-21; 录用日期: 2018-05-22.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: sunjingtao@hnu.edu.cn; Tel.: +86 15084749659.

本文责任编辑: 苏剑波.

国家自然科学基金项目(61433016, 61573134, 61733004)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61433016, 61573134, 61733004).

最多的是将具有主动操作能力的多关节机械臂与飞机平台组成的欠耦合系统<sup>[5-9]</sup>,然而这种结构定位精度不够高,只适用于简单的抓取作业,随之提出了并联结构机械臂体系<sup>[10]</sup>诸多此类结构统称为旋翼飞行机械臂(unmanned aerial manipulations, UAMs).

虽然这种结构加强了UAVs的可操作性能,但多自由度机械臂和旋翼平台之间的强耦合性给动力学模型建立和系统精准控制增添了诸多困难,这方面已经有了大量的工作见文献[11-21].基于以上研究基础,同时借鉴移动机械臂的自主控制,结合视觉信息的半自主或全自动UAMs的趋势也逐渐升温.目前,视觉伺服机器人系统较成熟的方向有:基于位置的视觉伺服(position-based visual servoing, PBVS)和基于图像的视觉伺服(image-based visual servoing, IBVS).PBVS方法需要精确的相机参数校准和目标的3D模型重建,IBVS因有效的避免这些条件而得以广泛应用.文献[22]为了保持目标图像特征点始终处于相机视觉范围内,提出了基于虚拟图像平面与真实图像平面的误差消除的输入饱和视觉伺服,虽然当目标处在可观测范围内效果明显,但是当目标在较远距离时有较大的局限性.文献[23]实现了较完整的旋翼飞行机械臂的视觉伺服系统,为了克服系统欠驱动性和非结构性扰动可能造成的无法时刻保持目标位于图像平面内,利用鱼眼镜头的全方位视角进行了图像的修正,然而滚转和俯仰运动补偿被转换到图像平面进行投影变换,因此机械臂运动学的计算误差将被耦合并且变量值(如物相距离)只能间接得到.文献[24]为了避免未校正的相机带来的误差影响,提出了基于视觉的自校准方案(uncalibrated-image based visual servoing, UIBVS)和分层任务组合控制算法.文献[25]中,将相机的安装位置从机械臂的末端转移到飞行器平台上,使得末端执行机构和目标点能够同时投影到图像平面内,依靠纯粹的图像误差缩减来实现伺服.但是在没有运动捕获的实际情况下是很难实现的,此外该控制方案只是在仿真实验当中得到了验证并不具有实际代表性;并且期望的末端执行器位姿可能需要非水平机器人低级别控制器来进行配置补偿,Orsag等人见文献[26]提出了一个关于整体系统的控制器模型,然而在保证机械臂相对运动同时降低了飞行器的稳定性,在文献[10]提出的并联臂方案能够有效地解决此问题,但是其非线性运动模型难以处理高度问题,限制了工作空间.

针对上述研究状况和存在的问题,本文以旋翼无人机挂载四自由度串联机械臂构成的UAM系统为研究对象,相机安装在末端执行机构上(eye in hand)如图1所示.不同于上述研究,本文采用基于力平衡原理的动力学联合建模和运动学方程,见文献[27]中一种通过实时计算系统重心位置的变化来进行补偿的姿态稳定控制算法,相较于文献[28]的对相互扰动力学

作用分析建模,利用了无人机与机械臂之间的相互扰动,该建模方法最大的创新在于利用了系统的结构特点,使得轨迹跟踪速度和姿态稳定控制性能更具优越性.基于位置的视觉伺服以目标的精准三维模型和已校准的相机为基础,系统的收敛性存在着校准误差;同时基于图像的视觉伺服只是在目标期望位置附近有较好的鲁棒性.结合上述两种典型视觉伺服的缺陷和优点,本文提出了一种基于欧几里得单源性矩阵分解的混合视觉伺服控制方法,并通过仿真和实验证实了该混合方法相较于前两种经典的视觉伺服的明显优势.



图1 旋翼飞行机械臂系统

Fig. 1 Unmanned aerial manipulations

## 2 建模分析

本文采用的旋翼飞行机械臂系统结构如图2所示,采用典型的单挂臂旋翼结构.系统的坐标系建立如下所示:

惯性坐标系 $I: \{O_I; X_I, Y_I, Z_I\}$ ,是固定在地面上的基座坐标系,即世界坐标系.满足右手定则,机臂动作都是相对于该坐标系执行的.

机载坐标系 $B: \{O_B; X_B, Y_B, Z_B\}$ ,坐标原点位于机载平台的重心位置上. $Z_B$ 轴垂直于机载平台水平面竖直面竖直向上, $X_B$ 轴和 $Y_B$ 轴方向类同于惯性坐标系.

机械臂各关节坐标系 $I_i: \{O_i; X_i, Y_i, Z_i\}, i = 0, 1, 2, 3, 4$ ,其中 $\{I_0\}$ 是基坐标系,其原点与机载坐标系 $\{B\}$ 重合,坐标轴方向与第一关节坐标系 $\{I_1\}$ 完全相同.其他各关节坐标系描述如图2所示.

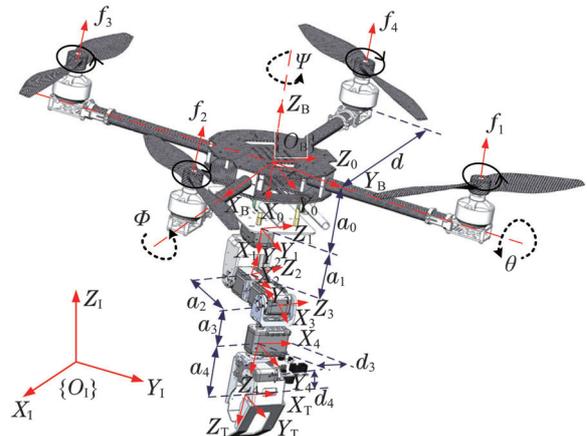


图2 系统坐标系建立

Fig. 2 System coordinate established of UAM



常见的动力学建模方法主要是牛顿-欧拉迭代动力学算法和拉格朗日公式法. 由于旋翼飞行机械臂能量计算相对复杂, 本文采用基于力平衡思想的牛顿-欧拉方法进行建模. 其牛顿方程和欧拉方程如下:

$$\begin{cases} F = m\dot{r}_G + m\ddot{r}_{GC} + m\dot{\Omega} \times r_G + \\ \quad 2m\Omega \times \dot{r}_G + m\Omega \times (\Omega \times r_G), \\ M = I\dot{\Omega} + \Omega \times I\Omega + \dot{r}_G \times B + r_G \times \dot{B} + \\ \quad (\Omega \times r_G) \times B + r_G \times (\Omega \times B), \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $m$ 是整体质量;  $F$ 是使系统运动产生的外作用力;  $\Omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T = [p \ q \ r]^T$ 是飞行平台在惯性系下的角速度矢量;  $I$ 为系统惯性张量;  $B = mp^T$ 是重心偏移造成的额外推动力.

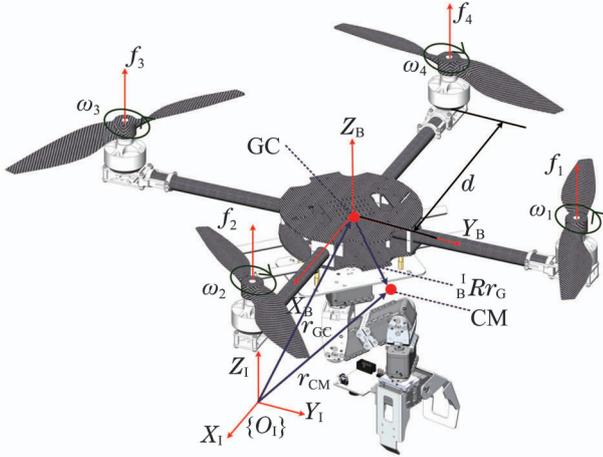


图3 重心漂移动态图

Fig. 3 Center of gravity drift dynamic chart

由图3可得, 电机1号和3号逆时针转动, 电机2号和4号顺时针转动. 假设旋翼转速为 $\omega_i$ , 各电机分别会产生一个向上的推力向量并指向 $z$ 轴的负方向:

$$T_i = b\omega_i^2, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (9)$$

这里 $b$ 为升力常数, 取决于空气密度、旋翼叶片半径的立方、叶片数量和叶片弦长. 根据牛顿第二定律, 可以推导出旋翼飞行器的运动模型为

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b & -b & -b & -b \\ 0 & -db & 0 & db \\ db & 0 & -db & 0 \\ k & -k & k & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

在上式中:  $f$ 指的是总的向上推力;  $\tau_x, \tau_y, \tau_z$ 分别是横滚力矩、俯仰力矩和旋转载矩. 通过分析系统受力可知外力 $F$ 和外部转矩 $\Gamma$ 分别为

$$F = {}^B R_{XYZ}(\varphi, \theta, \psi)[0 \ 0 \ f]^T, \quad (11)$$

$$\Gamma = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z], \quad (12)$$

其中 $d$ 是电机到飞行器质心的距离.

联立方程(1)(8)-(12)可以推导得到基于力平衡的联合动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{f}{m}(\cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \phi \sin \varphi) + A_1, \\ \dot{v} = \frac{f}{m}(\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \phi \sin \varphi) + A_2, \\ \dot{w} = \frac{f}{m}(\cos \psi \cos \theta) - g + A_3, \\ \dot{p} = \frac{\tau_x}{I_{xx}} - \frac{I_{zz} - I_{yy}}{I_{xx}}qr - \frac{B_1}{I_{xx}} - \frac{mC_1}{I_{xx}}, \\ \dot{q} = \frac{\tau_y}{I_{yy}} - \frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{yy}}pr - \frac{B_2}{I_{yy}} - \frac{mC_2}{I_{yy}}, \\ \dot{r} = \frac{\tau_z}{I_{zz}} - \frac{I_{yy} - I_{xx}}{I_{zz}}pq - \frac{B_3}{I_{zz}} - \frac{mC_3}{I_{zz}}, \\ \begin{cases} A_1 = -2(wq - vr) + x_G(q^2 + r^2) - \\ \quad y_G(pq - \dot{r}) - z_G(pr + \dot{q}), \\ A_2 = -2(ur - wp) - x_G(pq + \dot{r}) + \\ \quad y_G(r^2 + p^2) - z_G(qr - \dot{p}), \\ A_3 = -2(vp - uq) - x_G(pr - \dot{q}) - \\ \quad y_G(qr + \dot{p}) + z_G(p^2 + q^2), \\ B_1 = I_{xx}(pq + \dot{r}) + I_{yz}(r^2 - q^2) + I_{xy}(pr - \dot{q}), \\ B_2 = -I_{xy}(qr + \dot{p}) + I_{xz}(p^2 - r^2) + I_{yz}(pq - \dot{r}), \\ B_3 = -I_{yz}(pr + \dot{q}) + I_{xy}(q^2 - p^2) + I_{xz}(qr - \dot{p}), \\ C_1 = x_G(wr + vq) + y_G(\dot{w} - uq) - z_G(\dot{v} + ur), \\ C_2 = -x_G(\dot{w} + vp) + y_G(up + wv) + z_G(\dot{u} - vr), \\ C_3 = x_G(\dot{v} - wp) - y_G(\dot{u} - wq) + z_G(vq + up), \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 表示的是整个系统质心在机载坐标系的3个坐标轴 $X_B, Y_B$ 和 $Z_B$ 上的线加速度分量; 余项 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ 是由于重心时变漂移而产生的额外作用项, 由重心动态位置和姿态角决定.

### 3 混合视觉伺服

该系统主要工作环境是具有复杂干扰的非结构三维空间, 同时自身的耦合特性对伺服控制造成了极大的局限性. PBVS需要以被抓取目标物体在笛卡尔空间的三维模型为前提, 然而实际生产作业当中难以实现. 同时, IBVS方法始终在二维图像空间进行伺服迭代, 并且仅在目标期望位置周围才具有良好的收敛性, 所接收的相机图像会因外界干扰而存在较多失真现象, 目标很容易逃离视野范围, 另外实时精确的深度估计对于其而言也是较复杂的问题.

综合这两种方法的优劣, 本文在此基础上提出了混合视觉伺服的方法. 有效的避免了它们的缺陷和不

足, 尤其是在强干扰环境下还能够保持良好的全局收敛性; 特别当机体起飞初始位置离期望目标点较远时, 依然能够保持目标识别点始终位于相机图像平面内。

### 3.1 欧几里得扩充分解

假设在平面 $\mu$ 中存在一个由4个圆点组成的三维目标点 $P_0$ , 如图4所示. 可以得到该目标点在当前机载相机平面 $F$ 和期望机载相机平面 $F^*$ 上的映射点 $p_0$ 和 $p_0^*$ . 它们之间的关系可以通过一个非奇异的 $3 \times 3$ 的矩阵 $H$ 表示为

$$p_0 = Hp_0^*, \quad (15)$$

矩阵 $H$ 称为平面单应性矩阵。

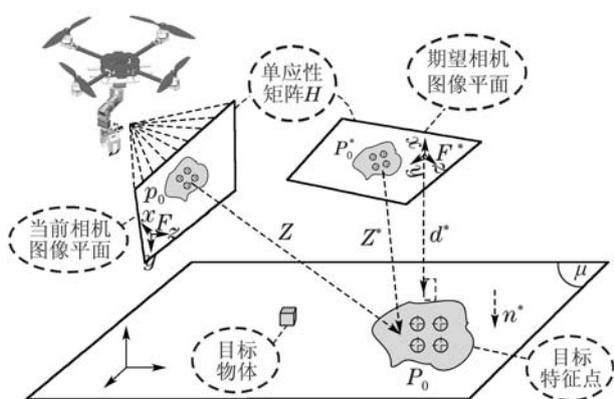


图4 UAM混合视觉伺服原理图

Fig. 4 Hybrid visual servo schematic of UAM

由旋翼飞行机械臂末端机载相机的内在参数矩阵为 $K$ , 可知

$$K = \begin{bmatrix} fk_u & fk_u \cot \beta & u_0 \\ 0 & \frac{fk_v}{\sin \beta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_{uv} & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中:  $(u_0, v_0)$ 是主点像素坐标, 主点是图像平面与光轴的交点;  $k_u$ 和 $k_v$ 分别是沿图像平面 $x$ 轴和 $y$ 轴的缩放因子;  $\beta$ 是轴间角(在这里 $\beta = \frac{\pi}{2}$ );  $f$ 是焦距长度. 同时, 矩阵 $K$ 也为像素点的像素坐标 $p$ 和归一化坐标 $m$ 之间的变换矩阵

$$p = Km. \quad (17)$$

假设该相机已经标定, 即参数矩阵 $K$ 已知, 则欧几里得单应性矩阵 $H_E$ 和平面单应性矩阵 $H$ 之间的关系可表示为

$$H_E = K^{-1}HK. \quad (18)$$

当计算得到欧几里得单应性矩阵 $H_E$ , 可将其分解为一个旋转矩阵 $R$ 和一个秩为1的矩阵:

$$H_E = R + t_d n^{*T}. \quad (19)$$

这里:  $R$ 是当前图像 $F$ 和期望图像 $F^*$ 坐标之间的旋转矩阵; 平面 $\mu$ 在期望图像平面中的表面法线为 $n^*$ ;  $t_d$  ( $t = t_d n^{*T}$ )表示 $F$ 和 $F^*$ 之间的三维平移向量;  $d^*$ 是平面 $\mu$ 到期望相机平面坐标系 $F^*$ 原点处的距离。

通过欧几里得单应性矩阵 $H_E$ 的分解和目标点图像特征提取, 能够确定系统机体运动参数和相关图像平面的结构参数. 例如, 虽然距离 $d$ 和 $d^*$ 在飞行过程中很难准确测量( $d$ 是平面 $\mu$ 到当前相机平面坐标系 $F$ 原点处的距离), 但是比率 $r = \frac{d}{d^*}$ 容易得到, 若平面 $\mu$ 在当前图像平面中的表面法线为 $n = Rn^*$ , 则

$$r = \frac{d}{d^*} = 1 + n^T t_d = \det(H), \quad (20)$$

而且目标点到相机未知的深度信息 $Z$ 与 $d^*$ 之间的比率可通过下式计算得到:

$$\rho_1 = \frac{Z}{d^*} = \frac{r}{n^T m}. \quad (21)$$

最后, 也可以得到

$$\rho_2 = \frac{Z}{Z^*} = r \frac{n^{*T} m^*}{n^T m} = \rho_1 n^{*T} m^*. \quad (22)$$

这些参数的得到对于接下来设计的混合视觉伺服控制方法是十分重要的。

### 3.2 控制器设计

为了能够得到机载相机的运动速度, 进而间接控制旋翼飞行机械臂系统向指定目标伺服运动, 通常要通过三维估计旋转矩阵(即得到一个特征矩阵), 这里用 $u$ 表示旋转轴、 $\theta$ 表示从矩阵 $R$ 中提取到的相对应旋转轴的旋转角度. 相比较不同于经典的表示方法 $u \sin \theta$ 和 $u \sin \frac{\theta}{2}$ 的是向量 $u\theta$ 表示法使得整个工作空间中不存在奇点.  $u\theta$ 的一阶导数可以表示为机载相机速度 $\nu = [v^T \ \omega^T]^T$ 的相关函数:

$$\frac{\partial(u\theta)}{\partial t} = [0 \ L_\omega] \nu, \quad (23)$$

其中雅克比矩阵 $L_\omega(u, \theta)$ 可以由下式得到:

$$L_\omega = I_3 - \frac{\theta}{2} [u]_\times + \left(1 - \frac{\sin c(\theta)}{\sin c^2(\frac{\theta}{2})}\right) [u]_\times^2. \quad (24)$$

这里 $\sin c(\theta) = \sin \frac{\theta}{2}$ ,  $[u]_\times$ 是与向量 $u$ 相关的反对称矩阵. 雅可比矩阵 $L_\omega$ 的行列式为

$$\det(L_\omega) = 1/\sin c^2(\frac{\theta}{2}). \quad (25)$$

当 $\theta = 2k\pi, \forall k \in Z^*$ , 它是唯一的. 同时当 $\theta$ 取值极小时,  $L_\omega$ 近似约等于 $I_3$ .

接下来考虑位置控制向量, 如图4所示, 在平面 $\mu$ 中存在目标特征点 $p_0$ , 其坐标 $m = [X \ Y \ Z]^T$ 的导数在当前相机平面中表示为

$$\dot{m} = [-I_3 \quad [X]_x] \nu. \quad (26)$$

定义图像扩充坐标 $m_e$ 如下:

$$m_e = [x \ y \ z]^T = \left[ \frac{X}{Z} \ \frac{Y}{Z} \ \log Z \right]^T, \quad (27)$$

这里 $z = \log Z$ 表示补充标准坐标, 图像扩充坐标 $m_e$ 的导数推导如下:

$$\dot{m}_e = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -X/Z \\ 0 & 1 & -Y/Z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = -\frac{1}{d^*} L_v \dot{m}. \quad (28)$$

而深度信息 $d^*$ 是未知的, 由式(21)中比率 $\rho_1$ 可知上三角矩阵 $L_v$ 为

$$L_v = \frac{1}{\rho_1} \begin{bmatrix} -1 & 0 & x \\ 0 & -1 & y \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

最后, 根据式(26)和式(28)可以推导出

$$\dot{m}_e = \left[ \frac{1}{d^*} L_v \ L_{(v,\omega)} \right] \nu, \quad (30)$$

其中矩阵 $L_{(v,\omega)}$ 表示为

$$L_{(v,\omega)} = \begin{bmatrix} xy & -(1+x^2) & y \\ 1+y^2 & -xy & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

简而言之, 系统混合伺服任务可以描述为以下误差函数 $\varepsilon$ 趋近于零:

$$\varepsilon = [(m_e - m_e^*)^T \ \theta u^T]^T. \quad (32)$$

上述式子第1项可以直接由当前图像平面和期望图像平面得到; 第2项可以由公式(22)间接得到, 约等于 $\log(\rho_2)$ , 误差函数 $\varepsilon$ 的导数和机载相机的速度之间的函数关系是

$$\dot{\varepsilon} = L \nu. \quad (33)$$

同样地, 根据式(23)和式(30)可以得到矩阵 $L$ , 是一个上三角矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} \frac{1}{d^*} L_v & L_{(v,\omega)} \\ 0 & L_\omega \end{bmatrix}, \quad (34)$$

当且仅当相机光学中心处于平面 $\mu$ 上时, 该矩阵才是奇异的.

综上, 图像坐标 $m_e$ 指数收敛于 $m_e^*$ 以及 $\theta u$ 指数趋近于0, 都可以通过 $\dot{\varepsilon} = -\lambda \varepsilon$ 调整它们的收敛速度, 尤其是针对被抓取的地面固定目标而言. 联立方程(33)可得到

$$\nu = -\lambda L^{-1} \varepsilon. \quad (35)$$

最终, 机载相机的速度转换成机械臂各关节速度和飞行器的运动, 以达到控制整个系统的目的. 然而 $L^{-1}$ 只是近似值, 因为矩阵 $L$ 取决于 $d^*$ 的准确度, 而在本文提出的方法中,  $d^*$ 是无法测量的, 因此在实验之前要对 $d^*$ 初始值进行近似估计, 这样会对系统前期稳

定性造成轻微的影响. 系统完整的控制律可表示为

$$\nu = -\lambda \begin{bmatrix} d^* L_v^{-1} & -d^* L_v^{-1} L_{(v,\omega)} \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_e - m_e^* \\ \theta u \end{bmatrix}. \quad (36)$$

由于当 $\theta$ 取值极小时,  $L_\omega$ 近似约等于 $I_3$ , 所以这里令 $L_\omega^{-1} \approx I_3$ .

图5给出了本文提出的混合视觉伺服方法的控制框图. 矩阵是 $L^{-1}$ 一个上三角矩阵, 在整个工作空间中不存在奇点, 这对于旋翼飞行机械臂系统的强耦合特性而言, 则能使相机在笛卡尔空间具有较光滑的运动轨迹. 若能够完整地得到目标位姿, 则无论起飞的初始位置在何处, 系统总能够保证目标特征点始终保持在相机视野范围内, 并能够保证全局收敛性.

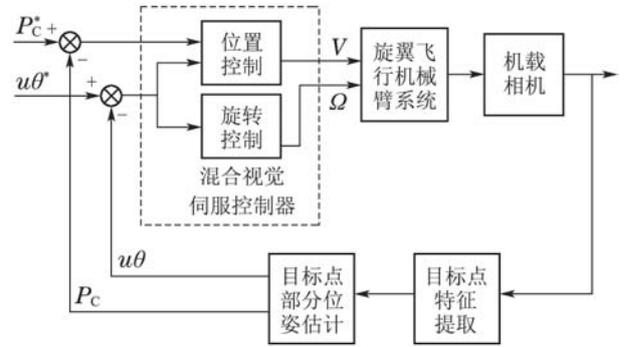


图5 UAM混合视觉伺服控制器框图

Fig. 5 Hybrid vision servo controller block diagram of UAM

## 4 仿真结果分析

### 4.1 仿真环境

为了验证本文提出的混合视觉伺服方法对于旋翼飞行机械臂系统控制的稳定性和优越性, 采用MATLAB/simulink仿真环境进行了整个伺服过程的验证. 并通过改变飞行器的初始起飞位姿和机载臂的姿态来验证算法的可行性.

经实际测量可知, 旋翼飞行机械臂系统的各项参数和指标如表2所示.

表2中:  $I_b$ 是桨叶转动惯量;  $m_b$ 是静态桨叶力矩;  $I_r$ 是总桨叶惯量;  $C_t$ 和 $C_q$ 分别是推力系数和扭矩系数.

表3中:  $h$ 是支撑架底部到电机底部的距离;  $m_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ )分别是基座和各关节臂质量.

这里, 为了验证该方法的稳定性, 系统的初始坐标位置被设置为 $P_0 = [-0.4, 0.4, 2]$ , 同时机械臂的关节角度初始值为 $\eta_0 = [0 \ -\frac{\pi}{4} \ 0 \ \frac{\pi}{2}]$ , 以便于相机快速找到目标特征点. 末端执行器的俯仰、横滚和偏航参考姿态角全部设为0. 所要伺服到达的目标包括4个特征点, 形成一个位于 $xy$ 平面上方0.3 m处的边长为0.1 m的正方形, 其中心坐标是 $[0.6, 0.3, 0.3]$ .

表 2 仿真使用的动力学参数  
Table 2 Kinetic parameters used for simulation

|    |                                          |                                          |                                          |                                       |
|----|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| 参数 | $I_{xx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ | $I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ | $I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ | $I_b/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ |
| 取值 | 0.082                                    | 0.082                                    | 0.149                                    | $3.24 \times 10^{-5}$                 |
| 参数 | $m_b/(\text{N} \cdot \text{m})$          | $I_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$    | $C_t$                                    | $C_q$                                 |
| 取值 | $4.43 \times 10^{-3}$                    | $6.5 \times 10^{-7}$                     | $4.8 \times 10^{-3}$                     | $2.35 \times 10^{-4}$                 |

表 3 系统尺寸指标  
Table 3 System size indicator

|    |                 |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |
|----|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 参数 | $m/\text{kg}$   | $d/\text{m}$   | $h/\text{m}$   | $m_0/\text{kg}$ | $m_1/\text{kg}$ | $m_2/\text{kg}$ | $m_3/\text{kg}$ | $m_4/\text{kg}$ |
| 取值 | 4.6             | 0.275          | 0.216          | 0.3161          | 0.1764          | 0.1551          | 0.1144          | 0.1342          |
| 参数 | $m_d/\text{kg}$ | $a_0/\text{m}$ | $a_1/\text{m}$ | $a_2/\text{m}$  | $a_3/\text{m}$  | $a_4/\text{m}$  | $d_3/\text{m}$  | $d_4/\text{m}$  |
| 取值 | 0.1194          | 0.038          | 0.08           | 0.089           | 0.078           | 0.079           | 0.015           | 0.068           |

### 4.2 鲁棒性仿真分析

算法的稳定性和可行性分析是在真实模型参数基础上建立的仿真对象,在仿真开始之前预设 $d^*$ 的参考值为1.9(实际值应该是2.0).对于机载相机和机械臂末端执行器之间的转换矩阵,其平移运动的误差精度不大于1 cm,旋转运动的误差精度小于 $5^\circ$ .仿真时间为15 s,仿真步长为30 ms.

仿真实验结果如图6至图11所示.为了更好地体现出该混合视觉伺服算法对旋翼飞行机械臂系统的伺服控制效果,这里飞机在开始的0s至0.5s内起飞并升高到固定高度 $h_{0.5s} = 2.4$ .图6所示为系统在整个伺服过程中的三维空间轨迹图,红线表示机械臂末端执行器的运动轨迹,从图中可以看出系统最终精确的悬停在目标特征点的正上方,其控制的精确度完全满足抓取任务的要求.

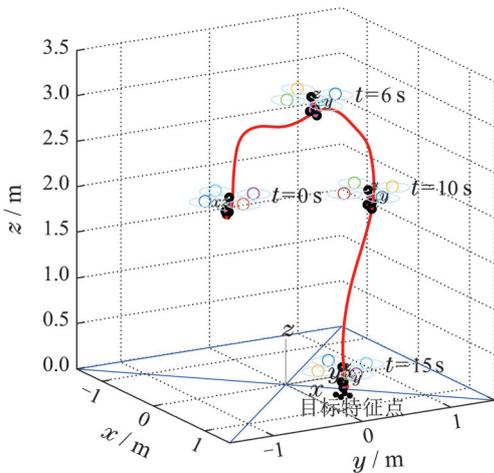


图 6 三维空间轨迹图

Fig. 6 Three-dimensional space trajectory

图7反映的是目标特征点在相机图像平面内的轨迹图,黑色圆点表示仿真开始阶段(0~0.5s)目标点呈

像:蓝色方点和红色叉点分别表示当前相机实时呈像和伺服终止时(15.0s)期望图像平面内呈像.从图中可以看出,特征点的轨迹呈现光滑的运动曲线,说明在整个伺服过程中飞行器的扰动和机械臂的震动对相机成像干扰较小,这也间接地说明相比较单纯的基于图像的视觉伺服,该方法对于强耦合系统的控制性能更为优越.

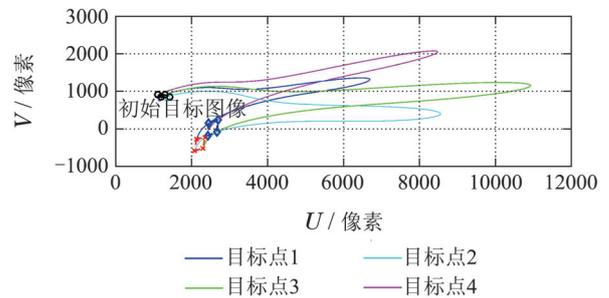


图 7 图像平面目标点轨迹图

Fig. 7 Trajectory of image plane Target point

飞行器带臂伺服过程中的位置运动变换和姿态角变化如图8和图9所示.为了验证系统对外界复杂非结构环境(比如方位和强度不确定的风浪、地磁强弱的干扰等)的抗干扰能力,在起飞后的0.5s到3s时间内,增加了地面对旋翼气流的反射扰动,即模拟地效扰动.该扰动可以考虑为具有一定不确定边界的正弦扰动组合,对滚转和俯仰姿态产生加性扭矩扰动,对垂直方向的偏航是加性力扰动.该模拟扰动满足如下形式:

$$\begin{cases} T_x = \theta_{CM} T_{x,0} (1 + \sin(\omega_i \pi t / 30)), \\ T_y = \theta_{CM} T_{y,0} (1 + \cos(\omega_i \pi t / 30)), \\ f_z = \theta_{CM} T_{z,0} (1 + \cos(\omega_i \pi t / 30)), \end{cases} \quad (37)$$

其中:  $T_x$ 和 $T_y$ 分别是滚转和俯仰通道加性扭矩扰动,  $f_z$ 是垂直方向的加性扰动,  $T_{x,0}$ ,  $T_{y,0}$ ,  $T_{z,0}$ 分别是(0,1)的随机数;  $\theta_{CM}$ 为可调增益.

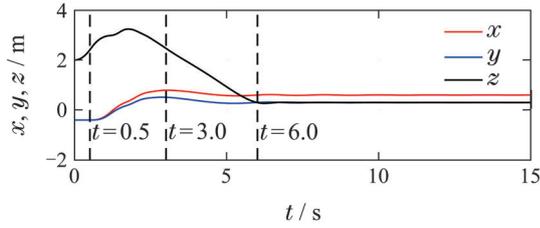


图8 位置变化曲线

Fig. 8 Location curve

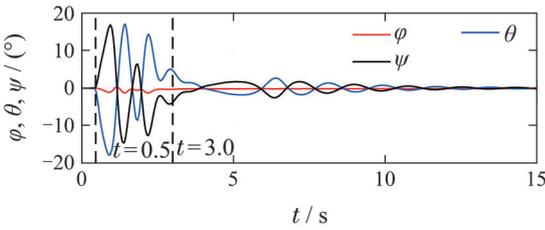
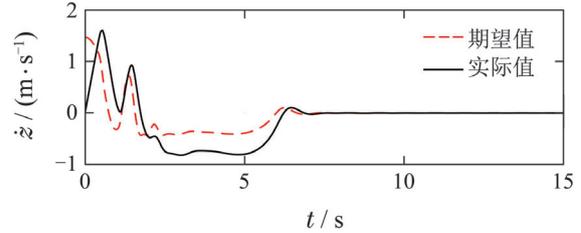


图9 地效扰动下姿态角曲线

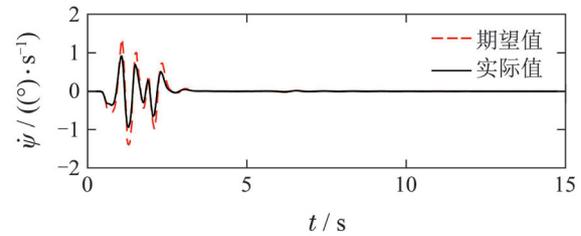
Fig. 9 Attitude angle curve under ground effect disturbance

由图9可知,显然在扰动阶段,由于在3个方向上的不确定性扭矩扰动的加入以及调整相机方位造成姿态角的变化相对剧烈,但后期仅仅出现了姿态误差不超过8%的波动,随之便趋向收敛,说明该伺服算法由于不依赖笛卡尔空间模型,基本能够保证全局稳定性.类似的,在图8中也可以看出,由于姿态的扰动导致位置的摆动很微小,系统最终大致在6.0s时刻依旧到达了预期的目标点中心[0.6, 0.3, 0.3]位置上方,更加说明混合伺服对欠驱动系统的控制鲁棒性.

由于系统是欠驱动的,这里只考虑了平移线速度和偏航角速度与期望速度值对比图,如图10所示.可以得到实际的速度基本拟合期望要求值,这也意味着能够准确到达指定位姿并抓取目标,但是实际值跟期望参考值之间有一定的延迟,主要是由于整个系统的欠驱动结构造成的.



(c) z轴方向速率 $\dot{z}$

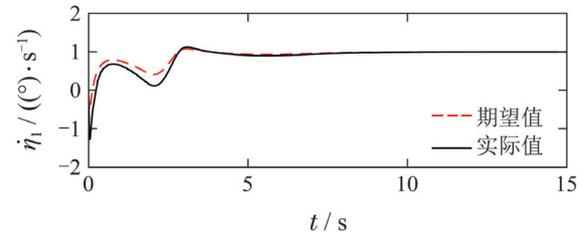


(d) 偏航角速率 $\dot{\psi}$

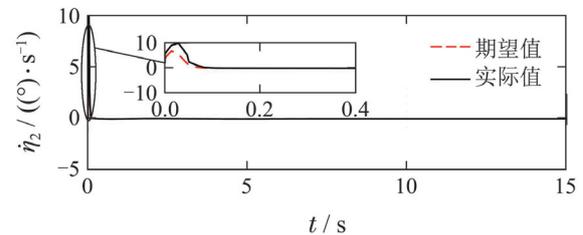
图10 实际与期望速度对比图

Fig. 10 Comparison actual speed with expected speed

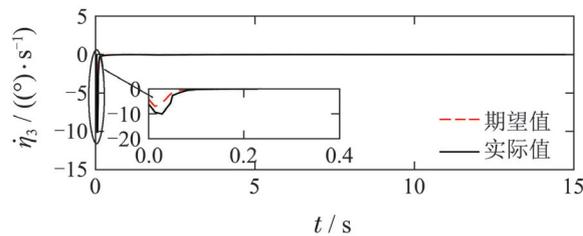
图11是机载机械臂各关节角速度对比图,这里实际值和期望值之间的误差较小,不存在时间延迟.从图中可以看出,关节 $\eta_1$ 和 $\eta_4$ 变动相对频繁,而 $\eta_2$ 和 $\eta_3$ 只是在仿真初期有所变化,之后保持相对静止状态,以使得末端相机镜头能够正对着目标点.说明该方法对机械臂的伺服控制基本上是线性同步的.



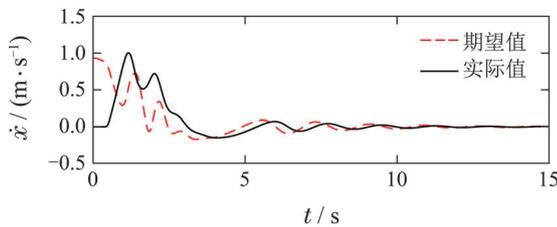
(a) 第1关节角速度 $\dot{\eta}_1$



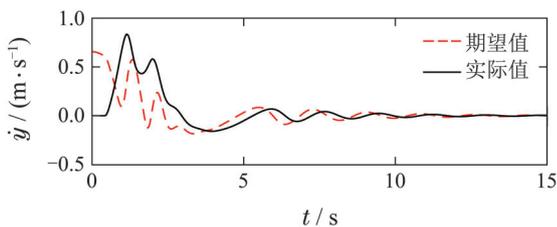
(b) 第2关节角速度 $\dot{\eta}_2$



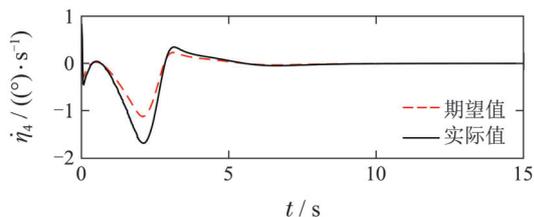
(c) 第3关节角速度 $\dot{\eta}_3$



(a) x轴方向速率 $\dot{x}$



(b) y轴方向速率 $\dot{y}$



(d) 第4关节角速度 $\eta_4$

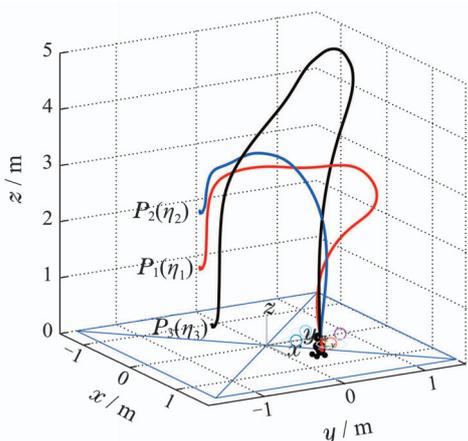
图11 机械臂关节角速度对比图

Fig. 11 Compare the angular velocity of the mechanical joint

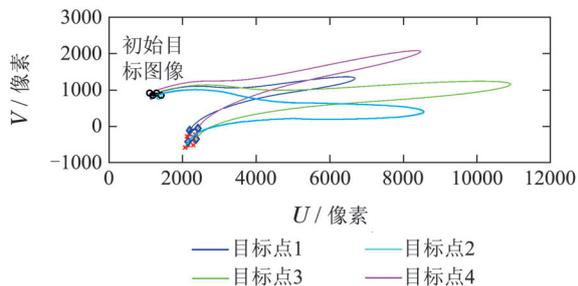
### 4.3 对比跟踪仿真分析

图12所示是系统在不同初始位置和姿态下的三维轨迹和图像平面轨迹. 这3种初始状态分别是

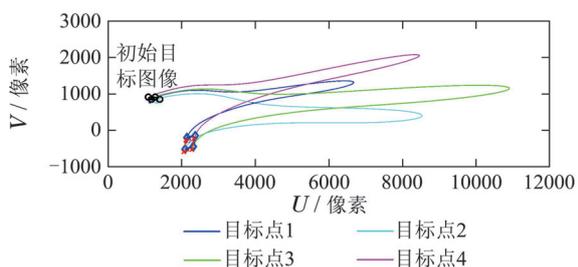
$$\begin{cases} (P_{0,1}, \eta_{0,1}) = (-0.5, -0.5, 1.5, 0, \frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{2}), \\ (P_{0,2}, \eta_{0,2}) = (-0.5, -0.5, 2.5, 0, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, 0), \\ (P_{0,3}, \eta_{0,3}) = (1.5, -1.5, 1.5, 0, \frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{2}). \end{cases} \quad (38)$$



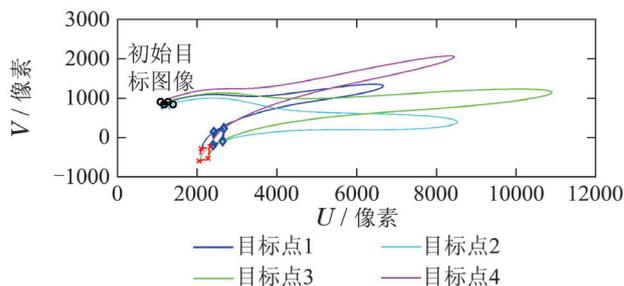
(a) 不同初始位姿下三维轨迹



(b)  $(P_{0,1}, \eta_{0,1})$ 图像轨迹



(c)  $(P_{0,2}, \eta_{0,2})$ 图像轨迹



(d)  $(P_{0,3}, \eta_{0,3})$ 图像轨迹

图12 对比跟踪仿真结果

Fig. 12 Simulation result of comparison

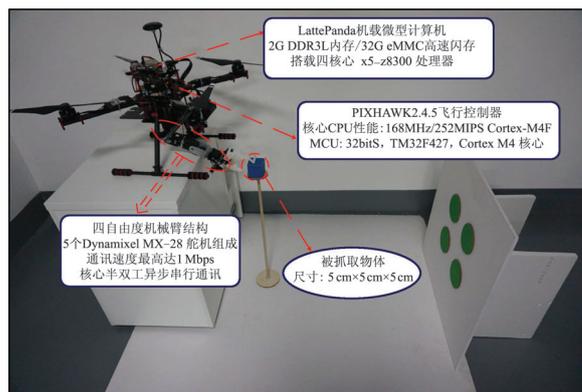
由图12可知, 初始位姿的变化对伺服的可靠性并没有太大的影响. 对比 $(P_{0,1}, \eta_{0,1})$ 和 $(P_{0,2}, \eta_{0,2})$ 两种状态下, 可以明显看出因为要较多的去调整末端相机视角, 意味着机械臂初始姿态的不同对图像轨迹有较大影响; 对比 $(P_{0,1}, \eta_{0,1})$ 和 $(P_{0,3}, \eta_{0,3})$ 两种状态, 无论初始起飞位置的远近高低, 该方法总能保持目标特征点始终在相机图像平面内, 并具有良好的收敛性.

## 5 实验验证和方法评述

### 5.1 实验平台

为了验证该混合视觉伺服控制算法对真实对象的实用性, 本课题小组自主设计并研发了基于机器人操作系统平台(robot operating system, ROS)开发环境的旋翼飞行机械臂系统(见图13). 板载计算机采用Intel生产的LattePanda微型电脑, 搭载Windows 10系统; 飞行控制器采用PIXHAWK2.4.5; 传感器包括ST公司L3GD20H 16bit陀螺芯片、LSM303D 14bit加速度/磁场芯片和MEAS公司MS5611气压芯片; 机械臂是由5个DynamixelMX-28舵机组成, 位置和速度1024等分控制.

同时, 为了能够高效的获取图像信息, 又考虑到体积小、质量轻等因素. 本文采用了Pixy CMUcam5图像识别传感器, 自带图像处理芯片和跟踪算法, 每秒可以处理50帧画面, 基本能够满足视觉伺服实验要求.



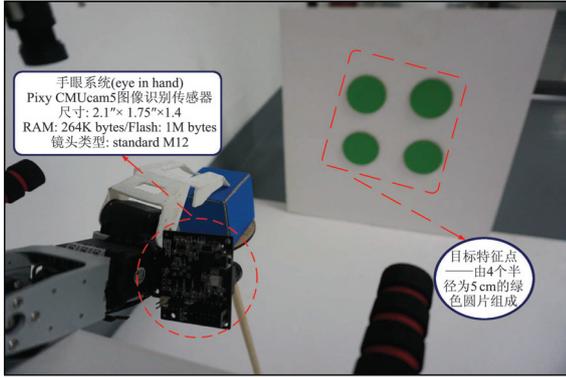


图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

## 5.2 视觉伺服抓取实验

抓取实验环境和测试结果如图14所示, 实验场地由 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的白色KT板构成. 首先, 系统从地面起飞并逐渐靠近到能够检测到目标物体和目标特征点的大概位置; 然后转换到混合视觉伺服模式, 末端执行器逐渐靠近物体并进行抓取; 最后系统安全返航.

对比图(a)–(c), 可以明显的看到从起飞至检测到目标点, 虽然机械臂的姿态没有太明显变化, 但随着距离逐渐缩小, 特征点图像信息越来越明显; 从图(c)时刻开始, 系统转换到伺服模式; 飞行平台优先伺服, 而后悬停转到机械臂伺服; 从图(d)和图(e)伺服到达预期位姿并抓取目标蓝色物块.



(d)



(e)



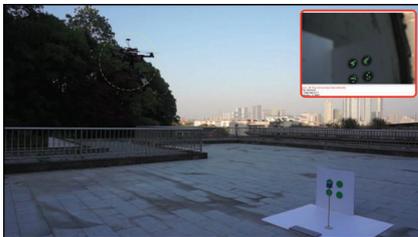
(f)

图 14 实验结果

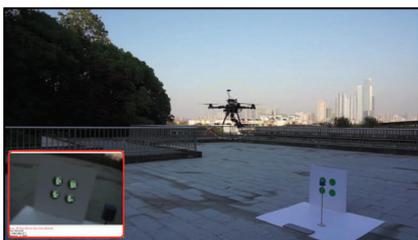
Fig. 14 Experimental results



(a)



(b)



(c)

## 6 结论

本文提出的基于单应性矩阵分解的旋翼飞行机械臂混合视觉伺服控制算法, 巧妙的避免了 IBVS 和 PBVS 这两种方法的不足和缺陷, 解决了 UAMs 系统视觉伺服中的深度估计和易丢失目标等问题, 从而实现了旋翼无人机与特殊环境作用来完成一些精确操作性任务, 大幅提升了系统性能, 通过仿真和实验验证充分验证了相较前两种视觉伺服算法的优越性和全局稳定性.

接下来的工作, 将在此基础上构建搭载双臂的无人机系统, 进行数学模型构建和协同控制算法设计. 同时, 结合分层任务控制方法来进一步优化该耦合特性对象的视觉伺服控制, 并在新的实际飞行平台上进行测试.

## 参考文献:

- [1] SHIMAHARA S, SUPHACHART L, LADIG R, et al. Aerial torsional manipulation employing multi-rotor flying robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Daejeon, Korea: IEEE, 2016: 1595 – 1600.
- [2] MELLINGER D, LINDSEY Q, SHOMIN M, et al. Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation.

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura, Algarve, Portugal: IEEE, 2011: 2668 – 2673.
- [3] KAMEL M, COMARI S, SIEGWART R. Full-body multi-objective controller for aerial manipulation. *Mediterranean Conference on Control and Automation*. Athens, Greece: IEEE, 2016: 659 – 664.
- [4] BACKUS S B, ODHNER L U, DOLLAR A M. Design of hands for aerial manipulation: Actuator number and routing for grasping and perching. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, Illinois, USA: IEEE, 2014: 34 – 40.
- [5] FANNI M, KHALIFA A. A new 6-DOF quadrotor manipulation system: design, kinematics, dynamics and control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(3): 1315 – 1326.
- [6] KIM S, CHOI S, KIM H J. Aerial manipulation using a quadrotor with a two DOF robotic arm. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, Illinois, USA: IEEE, 2013: 4990 – 4995.
- [7] KHALIFA A, FANNI M, RAMADAN A, et al. Controller design of a new quadrotor manipulation system based on robust internal-loop compensator. *IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*. Espinho, Portugal: IEEE, 2015: 97 – 102.
- [8] MENG X, HE Y, GU F, et al. Design and implementation of rotor aerial manipulator system. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Parisian, Macao, China: IEEE, 2017.
- [9] BELLICOSO C D, BUONOCORE L R, LIPPIELLO V, et al. Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation. *Control and Automation*. Woburn, MA, USA: IEEE, 2015: 853 – 858.
- [10] DANKO T W, CHANEY K P, OH P Y. A parallel manipulator for mobile manipulating UAVs. *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications*. Woburn, MA, USA: IEEE, 2015: 1 – 6.
- [11] KANNAN S, ALMA M, OLIVARES-MENDEZ M A, et al. Adaptive control of aerial manipulation vehicle. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2015: 273 – 278.
- [12] KHALIFA A, FANNI M, RAMADAN A, et al. Adaptive intelligent controller design for a new quadrotor manipulation system. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Kowloon Tong, Hong Kong: IEEE Computer Society, 2013: 1666 – 1671.
- [13] LEE H, KIM H J. Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, PP(99): 1 – 1.
- [14] HEREDIA G, JIMENEZ-CANO A E, SANCHEZ I, et al. Control of a multirotor outdoor aerial manipulator. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, Illinois, USA: IEEE, 2014: 3417 – 3422.
- [15] KHALIFA A, FANNI M, RAMADAN A, et al. Controller design of a new quadrotor manipulation system based on robust internal-loop compensator. *IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*. Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 97 – 102.
- [16] MUSCIO G, PIERRI F, TRUJILLO M A, et al. Coordinated control of aerial robotic manipulators: theory and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, PP(99): 1 – 8.
- [17] PEREIRA P O, ZANELLA R, DIMAROGONAS D V. Decoupled design of controllers for aerial manipulation with quadrotors. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Daejeon, Korea: IEEE, 2016: 4849 – 4855.
- [18] KAMEL M, COMARI S, SIEGWART R. Full-body multi-objective controller for aerial manipulation. *Mediterranean Conference on Control and Automation*. Athens, Greece: IEEE, 2016: 659 – 664.
- [19] KHALIFA A, FANNI M, NAMERIKAWA T. MPC and DOB-based robust optimal control of a new quadrotor manipulation system. *Control Conference*. Hong Kong: IEEE, 2017: 483 – 488.
- [20] LUNNID, SANTAMARIA-NAVARRO A, ROSSI R, et al. Nonlinear model predictive control for aerial manipulation. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Dallas, TX, USA, 2017: 87 – 93.
- [21] ORSAG M, KORPELA C, PEKALA M, et al. Stability control in aerial manipulation. *American Control Conference*. Washington, USA: IEEE, 2013: 5581 – 5586.
- [22] XIE H, LYNCH A. Input saturated visual servoing for unmanned aerial vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, (99): 1 – 1.
- [23] KIM S, SEO H, CHOI S, et al. Vision-guided aerial manipulation using a multirotor with a robotic arm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(4): 1912 – 1923.
- [24] SANTAMARIA-NAVARRO A, GROSCHE P, LIPPIELLO V, et al. Uncalibrated visual servo for unmanned aerial manipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1610 – 1621.
- [25] MEBARKI R, LIPPIELLO V. Image-based control for aerial manipulation. *Asian Journal of Control*, 2014, 16(3): 646 – 656.
- [26] ORSAG M, KORPELA C, PEKALA M, et al. Stability control in aerial manipulation. *American Control Conference*. Washington, USA: IEEE, 2013: 5581 – 5586.
- [27] ZHONG Hang, WANG Yaonan, LI Ling, et al. Rotor-flying manipulator modeling and control with dynamic compensation for gravity offset. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(3): 311 – 320. (钟杭, 王耀南, 李玲, 等. 孔旋翼飞行机械臂建模及动态重心补偿控制. *控制理论与应用*, 2016, 33(3): 311 – 320.)
- [28] SONG Dalei, MENG Xiangdong, QI Juntong, et al. Strategy of dynamic modeling and predictive control on 3-DoF rotorcraft aerial manipulator system. *Robot*, 2015, 37(2): 152 – 160. (宋大雷, 孟祥冬, 齐俊桐, 等. 3自由度旋翼飞行机械臂系统动力学建模与预测控制方法. *机器人*, 2015, 37(2): 152 – 160.)

#### 作者简介:

**孙敬陶** 硕士研究生, 目前研究方向为机器人建模和视觉伺服控制、机器学习等, E-mail: sunjingtao@hnu.edu.cn;

**王耀南** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制、模式识别技术, E-mail: yaonan@hnu.edu.cn;

**谭建豪** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为模式识别与自然计算、数据挖掘与系统辨识, E-mail: tanjianhao@hnu.edu.cn;

**钟杭** 博士研究生, 目前研究方向为飞行器建模和控制、机器人技术等, E-mail: zhonghang@hnu.edu.cn;

**李瑞涵** 硕士研究生, 目前研究方向为飞行器控制和嵌入式系统设计等, E-mail: liruihan@hnu.edu.cn.