

基于图像的 VTOL 飞行器视觉伺服控制^①

邹立颖^② 刘真海 林钰川

(齐齐哈尔大学通信与电子工程学院 齐齐哈尔 161006)

摘要 针对垂直起降(VTOL)飞行器的定点降落控制问题,本文提出一种基于图像的视觉伺服控制方法。对于 VTOL 飞行器视觉伺服控制系统,利用机载摄像头采集图像信息,将反步法与滑模控制技术相结合,设计了视觉伺服控制器。由于该方法采用的视觉模型中包含与深度无关的图像雅克比矩阵,从而避免了特征点深度的测量与估计。利用李雅普诺夫理论证明了在控制器的作用下,VTOL 飞行器视觉伺服系统渐近稳定;同时保证图像误差渐近收敛为零,飞行器最终到达期望降落位置。最后的仿真结果表明了所提出的控制方法实际有效。

关键词 垂直起降(VTOL)飞行器;视觉伺服;反步法;欠驱动

0 引言

近些年来,垂直起降(vertical take-off and landing, VTOL)飞行器,由于具有对起降环境依赖小、机动性强等优点,被广泛应用于军事和民用等领域^[1]。随着应用领域的不断扩大,VTOL 飞行器的控制问题成为飞行器控制领域的研究热点^[2]。VTOL 飞行器是典型的欠驱动、非最小相位系统^[3,4],这给其控制研究带来了极大困难。目前为止,已有文献对其进行了深入研究^[1-12]。文献[6]提出了一种非线性控制器,实现了全局渐进镇定控制。文献[7]采用模型分解的方法研究了输出轨迹跟踪问题。文献[8]采用观测器重构速度信号,实现了 VTOL 飞行器全局输出渐近跟踪。文献[9]应用饱和函数法进一步解决了输入受限情况下 VTOL 飞行器的轨迹跟踪问题。文献[11]基于最优控制提出了一种非线性状态反馈控制律,实现了 VTOL 飞行器的镇定控制。上述工作都没有考虑 VTOL 飞行器的定点降落问题。

本文对 VTOL 飞行器的定点降落问题展开研究。一般来说,VTOL 飞行器的位置和姿态都是由全球定位系统(GPS)和惯性测量单元(IMU)获取^[12],但是 GPS 实时性差,IMU 的精度低,对于定位精度高和实时性强的特殊任务(如定点降落)难以胜任。作为一种强大的感知环境的有效工具,视觉传感器具有精度高、实时性强等优点^[13,14],适合于执行特殊任务。近 10 年来,视觉伺服技术已经广泛地被应用于控制领域^[15-20],视觉伺服技术主要分为 2 类^[15],即基于位置的视觉伺服(position-based visual servo, PBVS)和基于图像的视觉伺服(image-based visual servo, IBVS)。PBVS 需要精确的物体模型,且对图像误差及摄像机标定误差敏感。IBVS 将误差直接定义在图像空间,对图像误差及摄像机标定误差不敏感。本文采用 IBVS 方法解决 VTOL 飞行器的定点降落问题。文献[21]于 2008 年提出了一种新的双目视觉伺服模型,由于该模型不需要未知点的深度信息,模型维度低,易于计算。因此本文采用该双目视觉模型。

对于 VTOL 飞行器的定点降落控制问题,本文

① 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135309454)资助。

② 女,1980年生,博士,副教授;研究方向:飞行器控制,非线性控制;联系人,E-mail: zouliping2007@126.com
(收稿日期:2019-08-29)

提出了一种基于图像的视觉伺服控制方案。其主要贡献是将基于图像的视觉伺服控制方法推广到 VTOL 飞行器系统。利用机载摄像头获取图像信息,基于反步法设计了视觉伺服控制器,引导 VTOL 飞行器定点降落在期望位置。所采用的视觉模型中不包含深度信息,从而避免了未知点深度信息的测量或估计。利用李雅普诺夫理论证明了,在所提出控制器作用下 VTOL 飞行器闭环系统渐近稳定,图像误差最终收敛为 0,实现了基于图像视觉伺服控制。

1 VTOL 飞行器数学模型

通常讨论的 VTOL 飞行器动力学模型是由文献[5]提出的简化模型:

$$\begin{aligned} -\ddot{y} &= -u_1 \sin\phi + \varepsilon u_2 \cos\phi \\ -\ddot{z} &= u_1 \cos\phi + \varepsilon u_2 \sin\phi - g \end{aligned} \quad (1)$$

$$\ddot{\phi} = u_2$$

其中, (y, z) 是 VTOL 飞行器质心的水平和垂直方向位置, ϕ 为滚转角, u_1 和 u_2 为飞行器底部推力控制输入和滚动控制输入, g 为重力加速度, ε 是描述滚动控制输入和横向加速度关系的耦合系数。

本文解决的是 VTOL 飞行器的定点降落问题,给定飞行器的目标降落位置 $Y_d = (Y_{1d}, Y_{2d})$, 控制目标为设计控制律使得 VTOL 飞行器系统平稳降落到目标位置。

对系统式(1),采用输入变换:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi & \varepsilon \cos\phi \\ \cos\phi & \varepsilon \sin\phi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 + g \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, v_1 和 v_2 为新的控制输入,则系统式(1)变为

$$\begin{aligned} -\ddot{y} &= v_1 \\ -\ddot{z} &= v_2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\varepsilon} v_1 \cos\phi + \frac{1}{\varepsilon} v_2 \sin\phi + \frac{g}{\varepsilon} \sin\phi$$

令 $w_1 = -y$, $w_2 = -\dot{y}$, $w_3 = -z$, $w_4 = -\dot{z}$, $w_5 = \phi$, $w_6 = \dot{\phi}$, $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6]^T$, 则有

$$\begin{cases} \dot{w}_1 = w_2 \\ \dot{w}_2 = v_1 \\ \dot{w}_3 = w_4 \\ \dot{w}_4 = v_2 \\ \dot{w}_5 = w_6 \\ \dot{w}_6 = \frac{1}{\varepsilon} v_1 \cos w_5 + \frac{1}{\varepsilon} v_2 \sin w_5 + \frac{g}{\varepsilon} \sin w_5 \end{cases} \quad (4)$$

整理得:

$$\dot{\mathbf{w}} = F(\mathbf{w}) + G(\mathbf{w})\mathbf{v} \quad (5)$$

其中,

$$F(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} w_2 & 0 & w_4 & 0 & w_6 & \frac{g}{\varepsilon} \sin w_5 \end{bmatrix}^T,$$

$$G(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{\cos w_5}{\varepsilon} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{\sin w_5}{\varepsilon} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{v} = [v_1 \ v_2]^T.$$

2 双目视觉模型

根据文献[20],双目视觉模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_2 - x_1}{B} & 0 & \frac{x_1(x_1 - x_2)}{fB} \\ 0 & \frac{x_2 - x_1}{B} & \frac{y_1(x_1 - x_2)}{fB} \\ \frac{x_2 - x_1}{B} & 0 & \frac{x_2(x_1 - x_2)}{fB} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{x_1 y_1}{f} & -\frac{f^2 + x_1^2}{f} & y_1 \\ \frac{f^2 + y_1^2}{f} & -\frac{x_1 y_1}{f} & -x_1 \\ \frac{y_1 x_2}{f} & -\frac{f^2 + x_1 x_2}{f} & y_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{m}_i = [x_i \ y_i \ x_2]^T \in R^3$ 表示目标物体上一个特征点的图像坐标, $\mathbf{V}_c = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \in R^6$ 为摄像机相对于世界坐标系的运动速度,则下式成立:^[21]

$$\dot{\mathbf{m}}_i = J_i(\mathbf{m}_i)\mathbf{V}_c \quad (7)$$

式中, $J_i(\mathbf{m}_i) \in R^{3 \times 6}$ 表示特征点 m_i 的图像雅可比

矩阵。

该视觉模型不包含深度信息,避免了深度信息的测量与估计。

由于摄像机安装在飞机质心位置,则有:

$$V_c = [0 \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \dot{\phi} \quad 0 \quad 0]^T = A\mathbf{w} \quad (8)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

进而得:

$$\dot{\mathbf{m}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{m}_i)V_c = \mathbf{J}_i(\mathbf{m}_i)A\mathbf{w} = \mathbf{K}(\mathbf{m}_i)\mathbf{w} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{K}(\mathbf{m}_i) = \mathbf{J}_i(\mathbf{m}_i)A$

3 视觉伺服系统控制器设计

为了实现定点降落的控制目标,本文利用机载摄像头获取目标物体的图像信息,采用基于图像的视觉伺服控制方法,同时结合反步法设计出视觉伺服控制器,引导飞行器系统自主降落在目标位置。

为了便于研究,取目标上一个特征点进行研究,令目标点的图像特征 $\mathbf{m} = \mathbf{y}_1$, $\mathbf{w} = \mathbf{y}_2$, 由式(5)和式(9)得 VTOL 飞行器视觉伺服系统:

$$\dot{\mathbf{y}}_1 = \mathbf{K}(\mathbf{y}_1)\mathbf{y}_2 \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{y}}_2 = \mathbf{F}(\mathbf{y}_2) + \mathbf{G}(\mathbf{y}_2)\mathbf{v}$$

令目标点的期望图像特征 $\mathbf{m}_d = \mathbf{y}_{1d}$, 并定义视觉伺服系统的图像误差:

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{y}_{1d} - \mathbf{y}_1 \quad (11)$$

由于目标点在图像平面的期望位置为定值,即

$\dot{\mathbf{m}}_d = \dot{\mathbf{y}}_{1d} = 0$, 因此对上式求导可得:

$$\dot{\mathbf{e}}_1 = \dot{\mathbf{y}}_{1d} - \dot{\mathbf{y}}_1 = -\dot{\mathbf{y}}_1 = -\mathbf{K}(\mathbf{y}_1)\mathbf{y}_2 \quad (12)$$

定义 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}\mathbf{e}_1^T\mathbf{e}_1 \quad (13)$$

对上式求导,并将式(12)代入可得:

$$\dot{V}_1 = \mathbf{e}_1^T\dot{\mathbf{e}}_1 = -\mathbf{e}_1^T\mathbf{K}(\mathbf{y}_1)\mathbf{y}_2 \quad (14)$$

基于反步法,选取虚拟控制量:

$$\mathbf{y}_{2d} = \mathbf{K}^+(\mathbf{y}_1)A\mathbf{e}_1 \quad (15)$$

其中, $\mathbf{K}^+(\mathbf{y}_1)$ 为 $\mathbf{K}(\mathbf{y}_1)$ 的伪逆矩阵, A 为待设计的正定矩阵。

定义误差变量:

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{y}_{2d} - \mathbf{y}_2 \quad (16)$$

将式(15)和(16)代入式(14)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -\mathbf{e}_1^T\mathbf{K}(\mathbf{y}_1)(\mathbf{y}_{2d} - \mathbf{e}_2) \\ &= -\mathbf{e}_1^T A\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T\mathbf{K}(\mathbf{y}_1)\mathbf{e}_2 \end{aligned} \quad (17)$$

为了保证系统的稳定性,将滑模面设计为

$$\mathbf{S} = \mathbf{e}_2 + \mathbf{K}_1 \int_0^t \mathbf{e}_2 dt \quad (18)$$

其中, \mathbf{K}_1 为待设计的正定矩阵。

定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2}\mathbf{S}^T\mathbf{S} \quad (19)$$

对上式求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \mathbf{S}^T\dot{\mathbf{S}} \\ &= \mathbf{S}^T(\dot{\mathbf{e}}_2 + \mathbf{K}_1\mathbf{e}_2) \\ &= \mathbf{S}^T(\dot{\mathbf{y}}_{2d} - \dot{\mathbf{y}}_2 + \mathbf{K}_1\mathbf{e}_2) \\ &= \mathbf{S}^T[\dot{\mathbf{y}}_{2d} - \mathbf{F}(\mathbf{y}_2) - \mathbf{G}(\mathbf{y}_2)\mathbf{v} + \mathbf{K}_1\mathbf{e}_2] \end{aligned} \quad (20)$$

设计滑模控制律为

$$\mathbf{v} = \mathbf{G}^+(\mathbf{y}_2)[\dot{\mathbf{y}}_{2d} - \mathbf{F}(\mathbf{y}_2) + \mathbf{K}_1\mathbf{e}_2 + \mathbf{M}\mathbf{S}] \quad (21)$$

其中, \mathbf{M} 为待设计的正定对角矩阵。

将式(21)代入式(20)得:

$$\dot{V}_2 = -\mathbf{S}^T\mathbf{M}\mathbf{S} < 0, \text{ 即 } \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{S} = 0, \text{ 由此可得, } \mathbf{e}_2$$

$= -\mathbf{K}_1 \int_0^t \mathbf{e}_2 dt$, 进而有 $\dot{\mathbf{e}}_2 = -\mathbf{K}_1\mathbf{e}_2$, 由 $\mathbf{K}_1 > 0$, 可得

$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_2 = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{y}_2 = \mathbf{y}_{2d} = \mathbf{K}^+(\mathbf{y}_1)A\mathbf{e}_1$ 。由 $\dot{\mathbf{y}}_1 =$

$\mathbf{K}(\mathbf{y}_1)\mathbf{y}_2$ 得, $\dot{\mathbf{y}}_1 = \mathbf{K}(\mathbf{y}_1)\mathbf{y}_{2d} = A\mathbf{e}_1$, 即 $\dot{\mathbf{e}}_1 = -A\mathbf{e}_1$,

$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_1 = 0$, 又由 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{y}_2 = \mathbf{K}^+(\mathbf{y}_1)A\mathbf{e}_1$ 得, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{y}_2 = 0$,

$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{w} = 0$, 即 $w_1 \rightarrow 0, w_2 \rightarrow 0, w_3 \rightarrow 0, w_4 \rightarrow 0, w_5 \rightarrow 0, w_6 \rightarrow 0$ 。即系统最终降落在期望位置。

下面以定理 1 形式给出本文主要成果。

定理 1 对于 VTOL 飞行器视觉伺服系统式(10), 如果采用式(21)控制器, 则闭环系统是渐近稳定的, 即 $\mathbf{m} \rightarrow \mathbf{m}_d, \mathbf{w} \rightarrow 0$ 。

4 仿真结果

为验证本文所提出控制策略的效果, 在 Matlab/

Simulink 环境下进行了 VTOL 飞行器仿真实验。设定期望位置为 $y_{d1} = 0.1 \text{ m}$, $y_{d2} = 0.3 \text{ m}$, 模型参数为 $\varepsilon = 0.5$, $f = 900 \text{ pixel}$, 初始状态为 $w_0 = [3.5 \ 0.01 \ 3.0 \ 0.01 \ 0.05 \ 0]^T$, 控制器参数为 $M = 10\text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$, $K_1 = 20\text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$, $A = 5\text{diag}(1, 1, 1)$ 。

仿真结果如下。

图 1 为特征点在左右摄像机图像平面的轨迹曲线, 圆圈为初始点位置, 星号为期望点位置, 由图可见, 特征点由初始点顺利到达期望点。图 2 表示图像误差曲线, 可以看出, 图像误差快速收敛为 0, 收

敛精度高。图 3 表示飞行器滚转角及其角速度变化曲线, 图 3 表明滚转角及其角速度收敛速度快, 稳定性好。图 4 和图 5 分别表示飞行器的水平和垂直方向位置和速度收敛曲线, 由图 4 和图 5 可以看出, 飞行器的位置和速度收敛速度快, 在 10 s 内完成收敛, 动态过程平稳。图 6 为 VTOL 飞行器控制输入曲线, 可以看出控制器响应迅速、稳定收敛。仿真结果表明 VTOL 飞行器能够快速、准确地到达目标位置, 同时保证滚转角及其角速度渐近收敛到 0, 系统内部动态稳定, 本文设计的控制器效果良好。

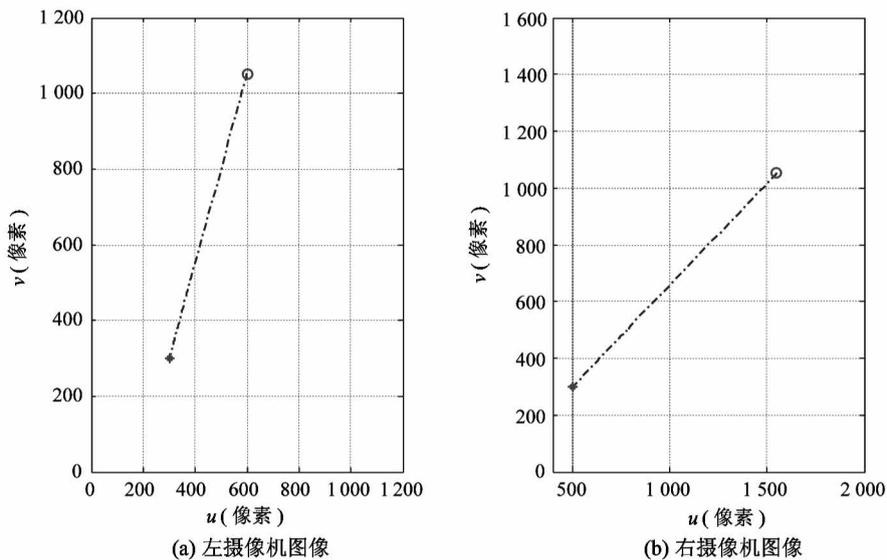


图 1 特征点在左右摄像机图像平面轨迹

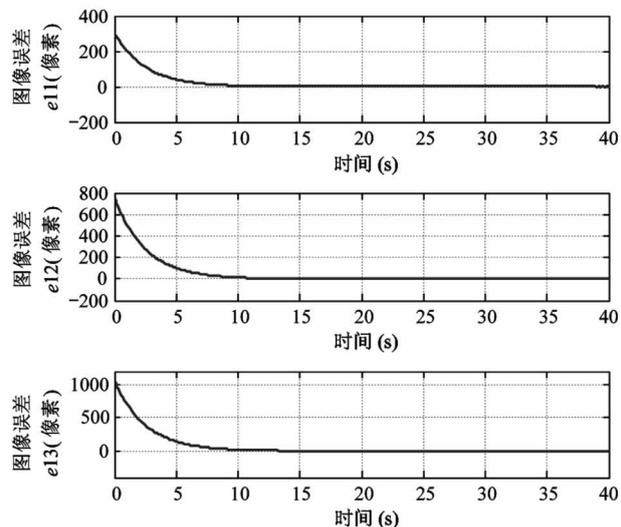


图 2 图像误差曲线

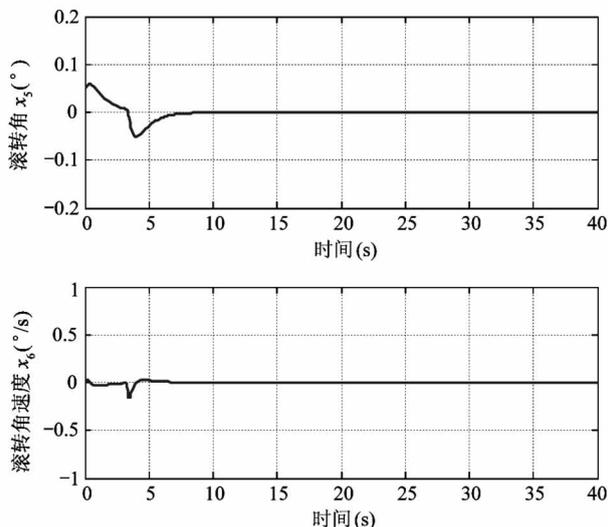


图 3 滚转角及滚转角速度

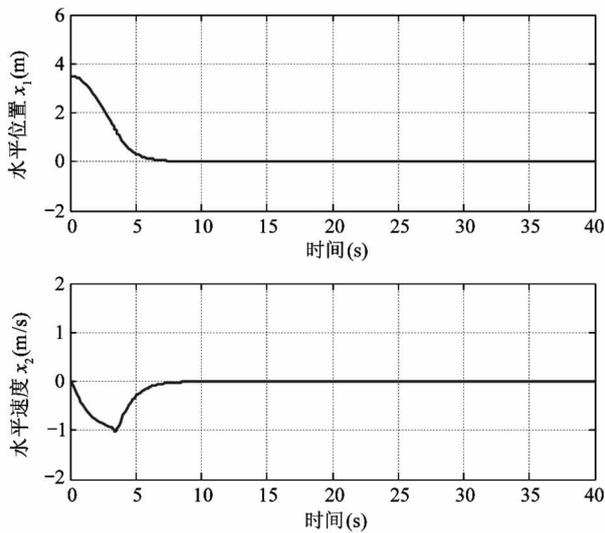


图4 水平位置和速度曲线

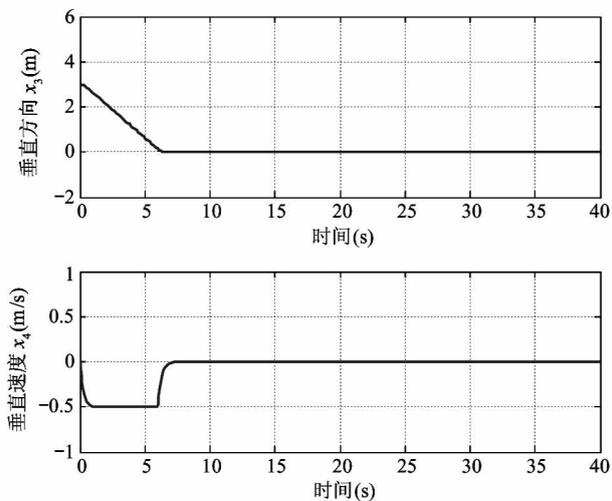


图5 垂直位置和速度曲线

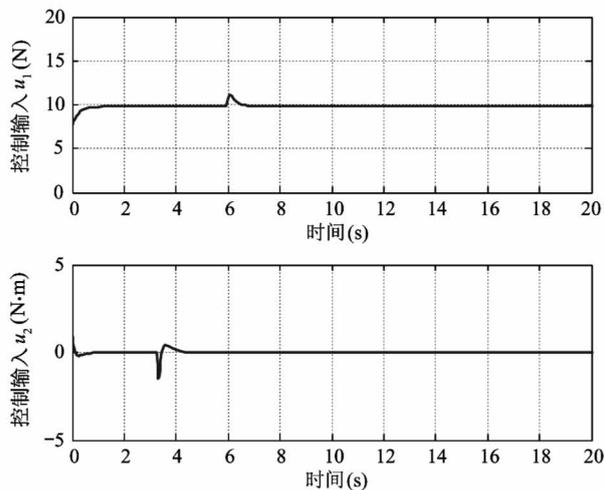


图6 控制输入

5 结论

本文提出一种基于图像视觉伺服技术与反步控制方法相结合的控制策略,将基于图像的视觉伺服控制方法应用到 VTOL 飞行器系统。将反步法与滑模控制技术相结合设计了视觉伺服控制器,解决了飞行器自主定点降落控制问题。该方法所采用视觉模型不含深度信息,直接利用图像信息即可获得图像雅克比矩阵,无需测量或估计未知点的深度信息,因而提高了系统的控制性能。利用李雅普诺夫理论给出了闭环系统的稳定性证明。仿真结果表明,所提出的方法能够保证 VTOL 视觉伺服系统快速、稳定地到达期望目标位置,图像误差渐近收敛为 0,实现了基于图像的视觉伺服控制。

参考文献

- [1] Gupte S, Mohandas P I T, James M C. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles[C] // Proceedings of IEEE Southeastcon, Orlando, USA, 2012: 1-6
- [2] 蒋元庆,杨浩,姜斌. 基于级联观测器的垂直起降飞机鲁棒容错控制[J]. 信息与控制,2015,44(1): 76-82
- [3] Zhu B, Cai K Y. Approximate trajectory tracking of input-disturbed PVTOL aircraft with delayed attitude measurements[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 20(14): 1610-1621
- [4] Al-Hiddabi S A, McClamroch N H. Output tracking for nonlinear nonminimum phase VTOL aircraft[C] // Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, Tampa, USA, 1998: 4573-4578
- [5] Olfati-Saber R. Global configuration stabilization for the VTOL aircraft with strong input coupling [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47 (11): 1949-1952
- [6] Hauser J, Sastry S, Meyer G. Nonlinear control design for slightly nonminimum phase systems[J]. *Automatica*, 1992, 28(4): 665-679
- [7] Huang C S, Yuan K. Output tracking of a nonlinear nonminimum phase PVTOL aircraft based on nonlinear state feedback[J]. *International Journal of Control*, 2002, 75 (6): 466-473

- [8] Al-Hiddabi S A, McClamroch N H. Tracking and maneuver regulation control for nonlinear nonminimum phase system: application to flight control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(6): 780-792
- [9] Wang X H, Liu J K, Cai K Y. Tracking control for a velocity-sensorless VTOL aircraft with delayed outputs[J]. *Automatica*, 2009, 45(12): 2876-2882
- [10] Ailon A. A control for autonomous VTOL aircraft with restricted inputs[C]//Proceedings of the 17th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Thessaloniki, Greece, 2009: 1569-1574
- [11] Do K D, Jiang Z P, Pan J. On global tracking control of a VTOL aircraft without velocity measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(12): 2212-2217
- [12] Lin F, Zhang W, Brandt R. Robust hovering control of a PVTOL aircraft [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 23(7): 343-351
- [13] Wang X H. Takeoff/landing control based on acceleration measurements for control for a VTOL aircraft[J]. *Journal of Franklin Institute*, 2013, 350(10): 3045-3063
- [14] Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control, part I: basic approaches [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82-90
- [15] Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control, part II: advanced approaches[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109-118
- [16] Jananbi-sharifi F, Deng L F, Wilson W J. Comparison of basic visual servoing methods[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(5): 967-983
- [17] 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
- [18] Ostrowski J P, Taylor C J. Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2005, 24(5): 329-341
- [19] Hamel T, Mahony R. Image based visual servo control for a class of aerial robotic systems[J]. *Automatica*, 2007, 43(11): 1975-1983
- [20] Astolfi A, Hsu L, Netto M, et al. Two solutions to the adaptive visual servoing problem[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(3): 387-392
- [21] Li H G, Jin M, Zou L Y. A new binocular stereo visual servoing model[C]//Proceedings of IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, Wuhan, China, 2008: 461-465

Image-based visual servo control for a VTOL aircraft

Zou Liying, Liu Zhenhai, Lin Yuchuan

(College of Communication and Electronic Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006)

Abstract

A robust controller for image-based visual servo of a vertical take-off and landing (VTOL) aircraft is presented, which can accomplish the pinpoint landing task. The controller is based on the backstepping technique, but its design differs from the existing methods because the controller maps the image errors onto the actuator space via a visual model which can not contain the depth information of the feature point. The proposed method is to apply the image-based visual servo technique to VTOL aircraft control. In addition, Lyapunov theory is used to prove the asymptotic stability of the VTOL aircraft visual servo system, while the image errors can be converged to zero. Furthermore, simulation results have been also conducted to demonstrate the performances of the proposed method.

Key words: vertical take-off and landing (VTOL) aircraft, visual servoing, backstepping method, under-actuated