基于自适应估计的光电平台目标跟踪方法

张 静 王宏伦 盖文东

(北京航空航天大学 无人驾驶飞行器设计研究所, 北京 100191)

摘 要: 在基于图像的目标跟踪系统中,跟踪器延迟对系统的稳定性和跟踪精度产生不利影响.通过对光电平台伺服系统的理想控制指令的分析,给出了一种基于自适应估计的跟踪器延迟补偿方法.该方法采用自适应估计器快速估计目标速度,预测目标位置,同时结合无人机位置和姿态信息预测控制指令实现延迟补偿.仿真结果表明:该方法在目标机动和载机机动情况下能够有效提高光电平台的跟踪精度.

关 键 词: 图像目标跟踪; 延迟补偿; 自适应估计; 跟踪精度; 光电平台

中图分类号: TP 274

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)12-1465-04

Ground target tracking method research based on adaptive estimation for electro-optical platform

Zhang Jing Wang Honglun Gai Wendong

(Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A harmful effect on stability and tracking accuracy of the system was produced by the time-delay of tracker in an image-based target tracking system. Analyzing the ideal control command of the electro-optical platform servo system, a delay compensation method based on adaptive estimation was proposed. This method used target position and unmanned aerial vehicle position and attitude to predict the control signals of the electro-optical platform. The target velocity was estimated by an adaptive estimation rapidly. The results of simulation show that the tracking accuracy of the electro-optic platform as the target maneuvers and the unmanned aerial vehicle maneuvers can be improved effectively.

Key words: image-based target tracking; delay compensation; adaptive estimation; tracking accuracy; electro-optical platform

图像跟踪作为一种目标精确跟踪方式[1],具有较高的稳定性和可靠性,是无人机实现侦察、监视任务的关键技术.光电平台通过接收图像处理器测得的目标脱靶量信号,按照伺服控制算法输出相应的控制信号,控制电机转动,完成对目标的实时跟踪.电视跟踪器由摄像机和信号处理电路组成,是一个误差检测元件,其光电传感器成像组件和图像处理跟踪器两个环节所带来的时滞直接导致了输出到光电平台伺服系统的脱靶量滞后于目标成像时间.光电成像跟踪器延迟所造成的系统相位滞后限制了系统位置带宽的提高,影响控制系统的稳定性和跟踪精度,使系统动态响应变差,甚至丢失目标[2].探求可行、实用的跟踪器延迟补偿方法,对提高光电平台的跟踪精度,减少目标丢失机会具有重要意义.

目前,解决光电成像跟踪器延迟问题的方法主要有预测目标运动信息对系统进行等效前馈[3]和直接或间接对脱靶量进行预测[2,4]等.这些方法主要考虑目标运动对脱靶量的影响,在载机平稳飞行时,能够有效提高光电平台的跟踪精度.然

收稿日期: 2009-10-21

基金项目: 国防重点预研基金资助项目

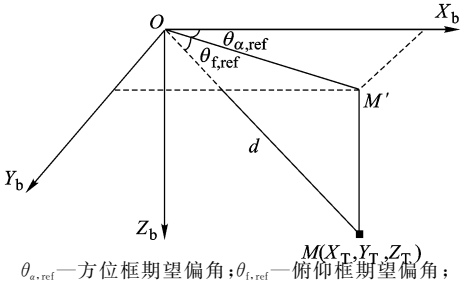
作者简介: 张 静(1984—),女,辽宁朝阳人,硕士生,msz0429@163.com.

而，飞行实验表明：载机的运动对脱靶量的影响更为明显，在载机有较大角运动时最容易丢失目标. 目前同时兼顾目标和载机运动对跟踪器延迟补偿的研究比较少.

针对现有方法的不足，本文通过对光电平台伺服系统理想控制信号的分析，提出了一种同时利用目标和载机信息对跟踪器延迟进行补偿的自适应延迟补偿方法并进行了仿真研究.

1 光电平台理想控制指令分析

对于光电平台伺服控制系统而言，方位和高低框架是相对于无人机机体坐标轴转动的，其期望偏角应该在机体坐标系内求解. 设 $OX_bY_bZ_b$ 为机体坐标系，$M(X_T,Y_T,Z_T)$ 为目标在 $OX_bY_bZ_b$ 的位置坐标，如图 1 所示.



$\theta_{\alpha,ref}$—方位框期望偏角；$\theta_{f,ref}$—俯仰框期望偏角；d—激光测距获得的目标与无人机的距离

图 1 目标在机体坐标系的位置

由图 1，可以解算出

$$\left.\begin{aligned}\theta_{\alpha,ref}&=\arctan(Y_T/X_T)\\ \theta_{f,ref}&=\arcsin(Z_T/d)=\arcsin\frac{Z_T}{\sqrt{X_T^2+Y_T^2+Z_T^2}}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta\theta_\alpha&=\theta_{a,ref}-\theta_\alpha\\ \Delta\theta_f&=\theta_{f,ref}-\theta_f\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中，$\Delta\theta_\alpha$ 和 $\Delta\theta_f$ 为驱动方位框和俯仰框运动的理想控制偏角；θ_α 和 θ_f 为光电平台上的光电编码器测得的方位角和俯仰角.

2 基于自适应估计的目标跟踪方法

基于自适应估计的脱靶量延迟补偿方法如图 2 所示.

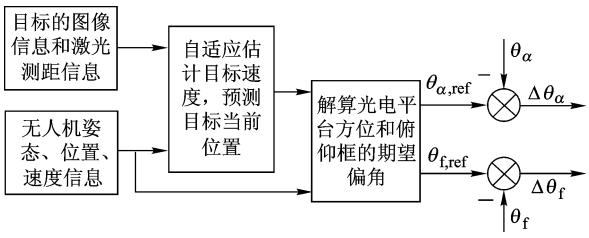
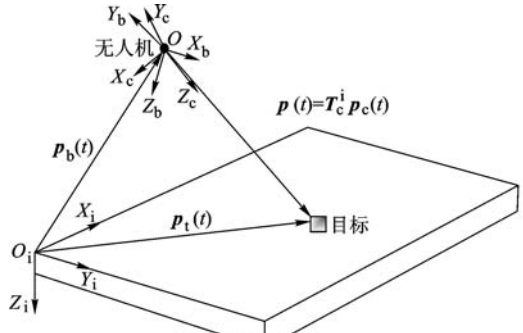


图 2 基于自适应估计的延迟补偿方法

该延迟补偿方法利用 CCD(Charge Coupled Device)获得的滞后 τ 值的图像信息和激光测距信息以及无人机的位置、姿态、速度信息，采用自适应估计方法估计目标速度进而得到其当前位置. 目标的当前位置与无人机姿态、位置信息联合解算当前光电平台方位和俯仰框的期望偏角，该期望偏角与光电编码器测得的当前信号的偏差驱动光电平台伺服机构运动，实现对脱靶量延迟的等效补偿.

2.1 目标速度模型建立

目标速度模型的建立涉及惯性坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$，$OX_bY_bZ_b$ 和摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$，$O_cX_cY_cZ_c$ 随 $OX_bY_bZ_b$ 旋转，其原点 O_c 设为光电平台框架的旋转中心，与 $OX_bY_bZ_b$ 的原点 O 重合，如图 3 所示.



$\boldsymbol{p}_b(t)$—无人机质心 O 相对 $O_iX_iY_iZ_i$ 中心 O_i 的位置矢量；$\boldsymbol{p}(t)$—目标相对无人机质心 O 的位置矢量；$\boldsymbol{p}_t(t)$—目标相对 $O_iX_iY_iZ_i$ 中心 O_i 的位置矢量；$\boldsymbol{T}_c^T$—从 $O_cX_cY_cZ_c$ 到 $O_iX_iY_iZ_i$ 的转换矩阵；$\boldsymbol{p}_c(t)$—目标在 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的坐标，$\boldsymbol{p}_c(t)=[x_c(t),y_c(t),z_c(t)]^T$.

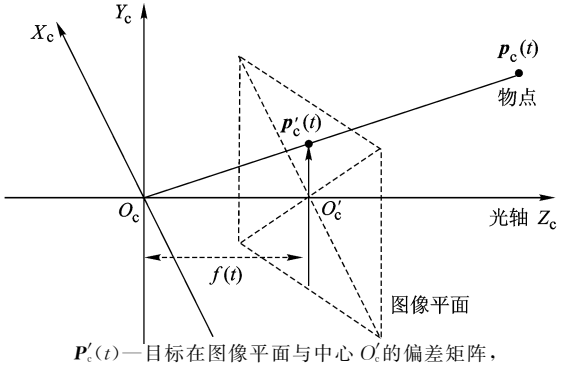
图 3 目标与无人机位置关系示意图

无人机距目标的相对高度 $h(t)$ 为

$$h(t)=-x_c(t)\sin\beta-y_c(t)\sin\alpha+z_c(t)\cos\alpha\cos\beta\tag{3}$$

式中，α 和 β 为光电平台视轴在 $O_iX_iY_iZ_i$ 中的方位角和俯仰角.

目标的透视成像图如图 4 所示.



$\boldsymbol{P}'_c(t)$—目标在图像平面与中心 O'_c 的偏差矩阵，$\boldsymbol{p}'_c(t)=[u(t),v(t)]^T$；$f(t)$—摄像机焦距.

图 4 透视成像图

当目标被锁定后,由图 4 的几何关系以及式(3)可得

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \\ h(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(t)x_c(t)/z_c(t) \\ f(t)y_c(t)/z_c(t) \\ -x_c(t)\sin\beta - y_c(t)\sin\alpha + z_c(t)\cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \tag{4}$$

设$-u(t)\sin\beta - v(t)\sin\alpha + f(t)\cos\alpha\cos\beta = \rho(t) \neq 0$,得

$$\boldsymbol{p}_c(t) = \begin{bmatrix} x_c(t) \\ y_c(t) \\ z_c(t) \end{bmatrix} = \frac{h(t)}{\rho(t)} \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \\ f(t) \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{p}(t) = [p_x(t), p_y(t), p_z(t)]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{T}_c^i \boldsymbol{p}_c(t) \tag{6}$$

将式(5)代入式(6),可得

$$\boldsymbol{p}(t) = \boldsymbol{T}_c^i \left(\frac{h(t)}{\rho(t)} \right) \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \\ f(t) \end{bmatrix} \tag{7}$$

由图 3,可知

$$\boldsymbol{p}_t(t) = \boldsymbol{p}_b(t) + \boldsymbol{p}(t) \tag{8}$$

对式(8)移项求导可得

$$\dot{\boldsymbol{p}}(t) = -\dot{\boldsymbol{p}}_b(t) + \dot{\boldsymbol{p}}_t(t) \tag{9}$$

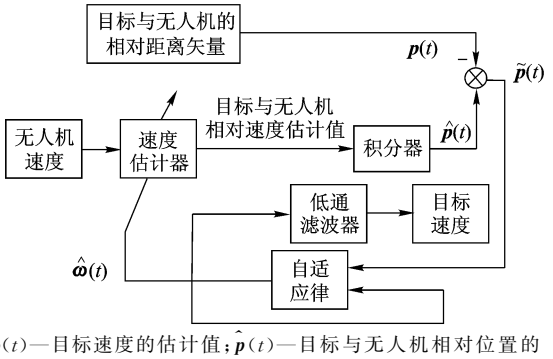
令 $\boldsymbol{v}(t) = -\dot{\boldsymbol{p}}_b(t)$,$\boldsymbol{\omega}(t) = \dot{\boldsymbol{p}}_t(t)$可得

$$\dot{\boldsymbol{p}}(t) = \boldsymbol{v}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \tag{10}$$

其中,$\boldsymbol{\omega}(t)$为待估计的目标速度. 由于图像跟踪器延迟,$\boldsymbol{p}(t)$,$\boldsymbol{v}(t)$和 $\boldsymbol{\omega}(t)$均为 τ 值前的值.

2.2　快速估计目标速度的自适应估计方法

快速估计目标速度的自适应估计方法[5-6]的关键步骤包括:状态估计、自适应律和低通滤波器,其原理框图如图 5 所示.



$\hat{\boldsymbol{\omega}}(t)$—目标速度的估计值;$\hat{\boldsymbol{p}}(t)$—目标与无人机相对位置的估计值;$\widetilde{\boldsymbol{p}}(t)$—系统估计状态和实际状态的误差.

图 5　自适应估计方法原理

1) 状态估计.

由式(10)以 IBO(Identifier-Based Observer)[7]原理可得

$$\left.\begin{aligned} \dot{\hat{\boldsymbol{p}}}(t) &= \boldsymbol{A}_m \widetilde{\boldsymbol{p}}(t) - \boldsymbol{v}(t) + \hat{\boldsymbol{\omega}}(t) \\ \widetilde{\boldsymbol{p}}(t) &= \hat{\boldsymbol{p}}(t) - \boldsymbol{p}(t) \\ \hat{\boldsymbol{p}}(0) &= \boldsymbol{p}_0 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{A}_m$ 为已知的 $n \times n$ 的赫尔维兹矩阵,它的选择要满足系统性能的要求.

2) 自适应律[8-9].

$$\left.\begin{aligned} \dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}(t) &= \boldsymbol{\Gamma}_c(\mathrm{Proj}(\hat{\boldsymbol{\omega}}(t), \boldsymbol{P}\widetilde{\boldsymbol{p}}(t))) \\ \hat{\boldsymbol{\omega}}(0) &= \hat{\boldsymbol{\omega}}_0 \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中,$\boldsymbol{\Gamma}_c \in \mathbf{R}^+$ 决定系统收敛的速度,选择足够大的 $\boldsymbol{\Gamma}_c$ 可以保证系统快速收敛,相应地对计算速度的要求也越高. 所以 $\boldsymbol{\Gamma}_c$ 的选择以满足对目标速度估计精度的要求为宜. $\boldsymbol{P}$ 为代数方程 $\boldsymbol{A}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_m^{\mathrm{T}} = -\boldsymbol{Q}$ 的解,其中 $\boldsymbol{Q}$ 为大于 0 的任意矩阵.

3) 低通滤波器.

$$\boldsymbol{\omega}_e(s) = \boldsymbol{C}(s)\hat{\boldsymbol{\omega}}(s) \tag{13}$$

式中,$\boldsymbol{C}(s)$是一个对称矩阵,它的第 i 个元素 $C_i(s)$严格正则;$\boldsymbol{\omega}_e(s)$为经过滤波后的目标速度;s 为拉氏变量.

$$C_i(s) = \frac{c}{s+c} \qquad i = 1,2,3; c > 0 \tag{14}$$

2.3　预测光电平台的理想控制信号

利用自适应估计得到的目标 τ 值前速度估计值预测目标当前时刻的位置.

$$\boldsymbol{p}_t(t) = \boldsymbol{p}_t(t-\tau) + \boldsymbol{\omega}_e(t-\tau)\tau \tag{15}$$

根据实际情况,一般图像脱靶量延迟时间$\tau = 0.06$ s. 利用无人机的姿态、位置信息,将上述目标位置转换到 $OX_bY_bZ_b$ 坐标系,由式(1)和式(2),解算理想偏差信号驱动光电平台伺服机构运动,实现对脱靶量延迟的等效补偿.

3　仿真验证

本文采用两轴光电平台/无人机六自由度非线性综合控制模型进行仿真验证,考虑了风扰动及测量噪声的影响. 摄像机的帧频为 50 Hz,跟踪器延迟为 60 ms. 仿真中目标运动速度以及方向分别为 $V_t(t) = 12 + 5\sin(\pi t/12)$ 和 $\varphi_t(t) = \sin(\pi t/30)$. 载机的运动分为以下两种情况:匀速直线接近目标和以较大过载跟踪目标. 以光电平台方位轴为例,对本文的基于自适应估计算法、直接预测脱靶量的自适 LMS(Least Mean Square)滤波算法[2]和未对跟踪器延迟进行补偿 3 种情况进行了仿真分析.

基于自适应估计算法的参数选取为

$$\boldsymbol{A}_m = -\boldsymbol{I}_{2\times 2}$$

$$\boldsymbol{P}=0.5\boldsymbol{I}_{2\times2}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_c=1\times10^5$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}(0)=(0,0)$$

$$c=20$$

自适应LMS滤波算法的参数选取为:滤波器阶数为10,收敛参数为0.015.

1) 假设载机匀速直线接近目标.方位环脱靶量误差曲线和跟踪误差对比曲线如图6所示.

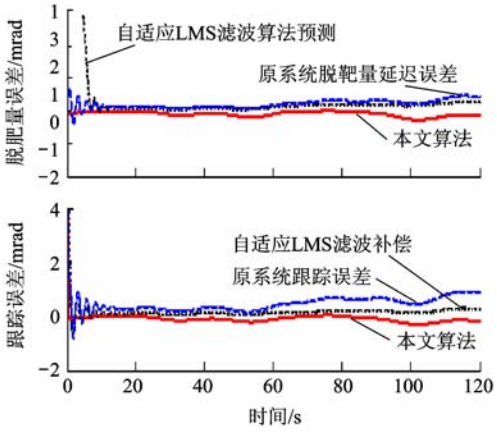


图6 载机匀速直线运动误差对比曲线

仿真结果表明:在目标速度时变,载机匀速直线运动情况下,与未进行补偿的原系统相比,本文算法和自适应LMS滤波算法都能有效预测补偿脱靶量延迟,提高了光电平台的目标跟踪精度.

2) 假设载机以较大过载跟踪接近目标.方位环脱靶量误差曲线和跟踪误差对比曲线如图7所示.

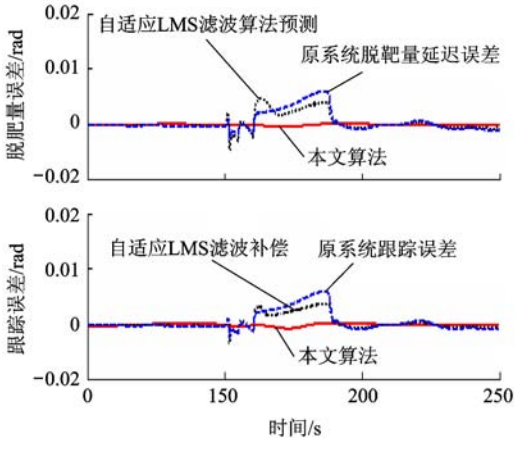


图7 载机机动误差对比曲线

仿真结果表明:在载机机动较大时,自适应LMS滤波算法对脱靶量的预测误差随载机机动的增强而增大,可能导致目标丢失.本文算法对脱靶量的预测误差随载机机动变化较小,跟踪误差曲线相对平稳,具有较强的鲁棒性,能够有效避免载机机动丢失目标.

4 结 论

光电平台中跟踪器延迟使得输入的控制指令本身存在滞后,限制系统跟踪精度的提高.采用基于自适应估计的跟踪器延迟补偿方法,充分利用了机载光电平台获得的目标图像信息以及无人机的信息,实现了对控制信号的有效预测.仿真结果表明:该方法在目标速度时变、载机匀速直线飞行和机动情况下都能有效补偿图像跟踪器延迟,具有较高的鲁棒性,能有效提高光电平台目标跟踪精度.

参考文献(References)

[1] 马佳光.捕获跟踪瞄准系统的基本技术问题[J].光电工程,1989,16(3):1-41
Ma Jiaguang. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems [J]. Opto-Electronic Engineering,1989,16(3):1-41(in Chinese)

[2] 王连明,葛文奇,李杰.跟踪系统中跟踪器延迟的自适应预测补偿方法[J].光电工程,2002,29(4):13-16
Wang Lianming, Ge Wenqi, Li Jie. Adaptive prediction and compensation method for delay of tracker in tracking system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(4): 13-16(in Chinese)

[3] 孙丽娜,宋悦铭,戴明.采用复合控制提高机载光电平台的数引跟踪精度[J].光学精密工程,2008,16(2):265-269
Sun Lina, Song Yueming, Dai Ming. Improving digital leading tracking precision for photoelectric platform by complex control [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2): 265-269(in Chinese)

[4] Sankary K E, Alamdari H H, Masry E I E. An adaptive ELD compensation techinique using a predictive comparator[J]. IEEE Tracnsaction on Circutts and Systems, 2009, 56(8): 619-623

[5] Pomet P J. Adaptive nonlinear regulation: estimation from the lyapunov equation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(6): 729-740

[6] Chen Lingji, Mehra R K. Adaptive control design for nonaffine models arising in flight control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(2): 209-217

[7] Jankovic M, Ghosh B K. Visually guided ranging from observations of points, lines and curves via an identifier based nonlinear observer[J]. Systems & Control Letters, 1995, 25: 63-73

[8] Madyastha V K. Adaptive estimation for control of uncertain nonlinear system with application to target tracking[D]. Georiga State: School of Aerospace Engineering Georiga Institue of Technology, 2005

[9] Dobrokhodov V N, Kaminerer I I. Rapid motion estimation of a target moving with time-varying velocity[R]. AIAA-07-6746, 2007

(编 辑:赵海容)