

基于红外鱼眼探测系统的运动目标模型

严世华 何永强 周玉龙

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要 建立了适用于红外鱼眼系统的目标运动模型,在不影响精度的前提下减少计算量是达到实时稳定地跟踪红外目标的途径之一。分析了目标在该系统成像的运动特性,结合系统帧频采样率较高的特点,提出了一种改进的匀速运动模型,并从理论上与“当前”统计模型的跟踪精度进行了对比分析。结果表明,在红外鱼眼系统采样率较高的情况下,匀速运动模型可以达到与“当前”统计模型相当的跟踪精度;利用卡尔曼滤波对模拟轨迹进行跟踪实验,验证了上述分析结果的正确性。该模型结构简单、运算量少,对于红外鱼眼系统下目标实时跟踪具有重要的意义。

关键词 成像系统;红外鱼眼系统;自适应匀速运动模型;“当前”统计模型;跟踪精度分析

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0911002

Maneuvering Target Model of the Infrared Fisheye Detecting System

Yan Shihua He Yongqiang Zhou Yulong

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract In order to build a proper maneuvering target model for the infrared fisheye warning system, the target moving characteristics on the image surface are analyzed. A modified constant velocity model is presented by virtue of the system's higher sampling frequency. Comparing with the current statistical model, its tracking accuracy is analyzed theoretically. It is found that, for the infrared fisheye warning system with high sampling frequency, the tracking accuracy of the constant velocity model can reach that of the current statistical model. With Kalman filtering, the analog track is used for the tracking experiment, and it is proved that the result above is correct. Above all, this model, with its simple structure and less computation, is available for the infrared fisheye warning system.

Key words imaging systems; infrared fisheye warning system; adaptive constant velocity model; current statistical model; tracking accuracy analysis

OCIS codes 110.6820; 110.2970; 250.0040

1 引 言

红外鱼眼探测告警系统是在超广角鱼镜头技术^[1]和红外焦平面阵列技术的基础之上发展起来的。它巧妙地将鱼镜头的全方位凝视特性和红外系统的全天候工作特性结合起来,从而使其能够全方位、全天候地对半球空域威胁的目标进行跟踪告警。目标跟踪是告警系统智能性的重要体现,而目

标运动建模是目标跟踪需要解决的基本问题之一^[2,3],在目标跟踪领域中,它一直是人们研究的重点。模型建立的好坏将会直接影响目标的跟踪性能,建立目标运动模型的一般原则是所建立的模型既要符合机动实际,又要便于数学处理^[4]。也就是说,所建立的目标运动模型既要满足目标的跟踪精度要求又要使所需的运算量尽可能小。几十年来,

收稿日期: 2012-03-02; 收到修改稿日期: 2012-05-08

作者简介: 严世华(1980—),男,博士研究生,主要从事光电对抗和信息处理等方面的研究。

E-mail: ysh.work@163.com

导师简介: 王永仲(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信息技术方面的研究。E-mail: jipzyl@126.com

人们对基于雷达探测系统下的目标跟踪问题进行了大量的研究,并提出了许多切合实际的目标运动模型^[5~8],而对红外系统下目标跟踪问题的研究却相对较少^[9,10]。近年来,凝视型红外告警系统得到很大发展^[11~13],对于红外鱼眼系统而言,由于其将半球空域的红外辐射信息成像在有限的红外焦平面上,使得其红外图像与普通红外系统又有着不同的特点^[14],而对于此种情况下的目标跟踪问题的研究目前尚无报道。因此,本文在分析红外鱼眼系统下目标在像面上的运动特性的基础上,结合红外鱼眼系统的特点对目标的运动模型进行了研究。

2 目标成像点的运动特性分析

红外鱼眼系统由红外鱼眼镜头、红外探测器和数据处理单元组成^[15],其凝视视场可达半球空域,探测器面阵像素个数有限,故系统的空间分辨率比较低。由鱼眼理想成像公式^[1]得出,若焦距为 8 mm,探测器像素中心距离为 30 μm ,那么单个像素对应 10 km 处的背景面积则不小于 24 m \times 36 m。由此得出两个结论:1)通常空中飞行器的理想成像小于单个像素,可视作为点源成像;2)探测器帧频为 50 Hz,目标横向运动速度至少达到 1200 m/s 时,像点的运动速度才达到 1 pixel/frame,目标以 120 m/s² 加速度机动时,其在

像面上的加速度不大于 0.1 pixel/frame。实际应用时,目标在像面上运动速度的大小取决于目标本身运动速度、目标运动方向与告警系统的相对角度以及红外告警系统的分辨率^[16]。总之,受目标在像面上运动速度缓慢以及机动性弱的启发,在目标跟踪中可以使用简化的目标运动模型以减少程序运算量,从而有助于提高系统的实时性。

3 自适应匀速运动(ACV)模型

匀速运动(CV)模型是机动目标模型中较常用也最简单的一种模型^[4],其离散时间状态方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi_{\text{CV}} \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k), \quad (1)$$

式中 $\Phi_{\text{CV}} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{x} = [\mathbf{x} \quad \dot{\mathbf{x}}^T]^T$, $\mathbf{w}(k) = \int_0^T \exp[\Phi_{\text{CV}} \times (T-\tau)] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{w}(kT+\tau) d\tau$, 则 $\mathbf{w}(k)$ 的协方差阵为

$$\mathbf{Q}_{\text{CV}} = E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(k)] = q \begin{bmatrix} T^3/3 & T^2/2 \\ T^2/2 & T \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 q 为常数。观测方程为

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (3)$$

则基于(1)式和(3)式的卡尔曼滤波方程为

$$\mathbf{x}(k+1|k) = \Phi_{\text{CV}} \mathbf{x}(k|k), \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(k+1|k+1) = \mathbf{x}(k+1|k) + \mathbf{K}_{\text{CV}}(k+1)[\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}\mathbf{x}(k+1|k)], \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{\text{CV}}(k+1|k) = \Phi_{\text{CV}} \mathbf{P}_{\text{CV}}(k|k) \Phi_{\text{CV}}^T + \mathbf{Q}_{\text{CV}}(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{\text{CV}}(k+1|k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{\text{CV}}(k+1)\mathbf{H}] \mathbf{P}_{\text{CV}}(k+1|k), \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_{\text{CV}}(k+1) = \mathbf{P}_{\text{CV}}(k+1|k) \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{\text{CV}}(k+1|k) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k+1)]^{-1}. \quad (8)$$

匀速运动模型通常情况下只适用于目标无机动,即目标作匀速直线运动情形,虽然在本系统下,目标在像面上的速度和机动性都较小,但若直接将其应用于目标跟踪,仍可能产生较大的跟踪误差,为此需要对原模型进行改进,以达到提高跟踪精度的目的。对(6)式和(8)式进行分析可知,过程噪声协方差阵 $\mathbf{Q}_{\text{CV}}(k)$ 的计算将会对增益阵 $\mathbf{K}_{\text{CV}}(k+1)$ 产生重要影响。因此,可以考虑构造一个函数 $f(k)$ 来自适应调整 $\mathbf{Q}_{\text{CV}}(k)$ 的大小以提高跟踪精度。结合文献^[17]的思想,构造函数 $f(k)$ 如下:

$$f(k) = \eta |\mathbf{x}(k|k) - \mathbf{x}(k|k-1)|/T, \quad (9)$$

式中 $\mathbf{x}(k|k-1)$ 和 $\mathbf{x}(k|k)$ 分别为 k 时刻目标速度预测值和估计值, T 为采样周期, η 为大于零的量纲变

换系数。

此时(2)式可变为

$$\mathbf{Q}_{\text{CV}} = [\eta |\mathbf{x}(k|k) - \mathbf{x}(k|k-1)|/T] \cdot \begin{bmatrix} T^3/3 & T^2/2 \\ T^2/2 & T \end{bmatrix}, \quad (10)$$

从式中可以看出,当目标没有发生机动时,速度估计预测值 $\mathbf{x}(k|k-1)$ 和速度估计值 $\mathbf{x}(k|k)$ 相差不大,故下一时刻过程噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}_{\text{CV}}(k)$ 较小,跟踪误差较小;当目标在 k 时刻发生机动时,显然速度估计值 $\mathbf{x}(k|k)$ 要偏离速度估计预测值 $\mathbf{x}(k|k-1)$,故下一时刻过程噪声协方差矩 $\mathbf{Q}_{\text{CV}}(k)$ 增大,机动越大,其偏离越大,过程噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}_{\text{CV}}(k)$ 就越大,自适应地调节滤波增益,从而提高状态突变时的

跟踪性能。因此,与原模型相比,无论目标是否机动,ACV模型具有更高的跟踪精度。

4 ACV模型与“当前”统计(CS)模型跟踪精度的对比分析

在众多的机动目标模型中,CS模型是目前较好的实用模型^[17],若将其应用到红外鱼眼系统的跟踪系统当中,其跟踪精度是毋庸置疑的。因此,以CS模型为参照模型,对ACV模型的跟踪精度进行对比分析,以检验其有效性。

CS模型的系统状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1|k) = \Phi_{CS}\mathbf{X}(k|k) + \mathbf{U}(k+1)\mathbf{a}(k+1), \quad (13)$$

$$\mathbf{X}(k+1|k+1) = \mathbf{X}(k+1|k) + \mathbf{K}_{CS}(k+1)[\mathbf{Y}(k+1) - \mathbf{H}\mathbf{x}(k+1|k)], \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{CS}(k+1|k) = \Phi_{CS}\mathbf{P}_{CS}(k|k)\Phi_{CS}^T + \mathbf{Q}_{CS}(k), \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{CS}(k+1|k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{CS}(k+1)\mathbf{H}]\mathbf{P}_{CS}(k+1|k), \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_{CS}(k+1) = \mathbf{P}_{CS}(k+1|k)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}_{CS}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k+1)]^{-1}. \quad (17)$$

对于相同的观测数据而言,在利用卡尔曼滤波进行目标跟踪问题中,增益矩阵的求取体现了不同目标运动模型的跟踪性能。若两种运动模型的增益矩阵相同或相近,则说明两种模型的跟踪性能相当,反之,则说明其跟踪性能相差较大。分析 $\mathbf{P}(k+1|k)$,因为它反映了不同的 Φ_{CV} 、 Φ_{CS} 对 $\mathbf{P}_{CV}(k+1|k+1)$ 、 $\mathbf{P}_{CS}(k+1|k+1)$ 的影响。为了集中分析 Φ_{CV} 、 Φ_{CS} 所产生的影响,将 Φ_{CS} 的前两行两列与 Φ_{CV} 取成相同值。

当仅有位置作为观测数据时,由(8)式或(17)式可得

$$\mathbf{K}(k+1) = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{P}_{11}(k+1|k)}{\mathbf{P}_{11}(k+1|k) + \mathbf{r}(k+1)} \\ \frac{\mathbf{P}_{12}(k+1|k)}{\mathbf{P}_{11}(k+1|k) + \mathbf{r}(k+1)} \\ \frac{\mathbf{P}_{13}(k+1|k)}{\mathbf{P}_{11}(k+1|k) + \mathbf{r}(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{\ddot{x}} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中,由(8)式所得出的增益阵只有前两项。由(18)式可知,若观测协方差阵 $\mathbf{r}(k+1)$ 相同时,增益阵只与 $\mathbf{P}(k+1|k)$ 中的 $\mathbf{P}_{11}(k+1|k)$ 、 $\mathbf{P}_{12}(k+1|k)$ 、 $\mathbf{P}_{13}(k+1|k)$ 有关。而对于ACV模型来说,其增益矩阵只包含 k_x 、 $k_{\ddot{x}}$ 两项,为了将ACV模型和CS模型的跟踪精度进行比较,对 k_x 、 $k_{\ddot{x}}$ 进行讨论就足够了。设 k 时刻, $\mathbf{P}_{CV}(k|k)$ 与 $\mathbf{P}_{CS}(k|k)$ 的前两行两列相同(严格来说,当 $k=0$ 时成立),讨论 $k+1$ 时两者的差异。

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi_{CS}\mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k)\mathbf{a} + \mathbf{W}(k), \quad (11)$$

式中 $\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}(k) \quad \dot{\mathbf{x}}(k) \quad \ddot{\mathbf{x}}(k)]^T$, Φ_{CS} 、 $\mathbf{U}(k)$ 具体形式见文献[4]。

观测方程为

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k), \quad (12)$$

其中当仅有含噪声的目标位置数据可观测时,有 $\mathbf{H} = [1 \quad 0 \quad 0]$, $\mathbf{V}(k)$ 是均值为零、方差为 $R(k)$ 的高斯观测噪声。

采用状态(11)式和观测(12)式,相应的卡尔曼滤波滤波方程为

对于CS模型有

$$\mathbf{P}_{CS}(k+1|k) = \Phi_{CS}\mathbf{P}_{CS}(k|k)\Phi_{CS}^T = \begin{bmatrix} 1 & T & l_1 \\ 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & l_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} & \mathbf{P}_{13} \\ \mathbf{P}_{12} & \mathbf{P}_{22} & \mathbf{P}_{23} \\ \mathbf{P}_{13} & \mathbf{P}_{23} & \mathbf{P}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ T & 1 & 0 \\ l_1 & l_2 & l_3 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式中 $l_1 = [-1 + \alpha T + \exp(-\alpha T)]/\alpha^2$, $l_2 = [1 - \exp(-\alpha T)]/\alpha$, $l_3 = \exp(-\alpha T)$, $\mathbf{P}_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ 中略去了时间标记 $(k|k)$ 。

将(19)式展开并整理,考虑到 $\mathbf{P}_{CS}(k+1|k)$ 为对称阵,得

$$\mathbf{P}_{CS11}(k+1|k) = \mathbf{P}_{11} + 2T\mathbf{P}_{12} + 2l_1\mathbf{P}_{13} + T^2\mathbf{P}_{22} + 2Tl_1\mathbf{P}_{23} + l_1^2\mathbf{P}_{33}, \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{CS12}(k+1|k) = \mathbf{P}_{CS21}(k+1|k) = \mathbf{P}_{12} + l_2\mathbf{P}_{13} + T\mathbf{P}_{22} + (Tl_2 + l_1)\mathbf{P}_{23} + l_1l_2\mathbf{P}_{33}, \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{CS22}(k+1|k) = \mathbf{P}_{22} + l_2\mathbf{P}_{23} + l_2\mathbf{P}_{32} + l_2^2\mathbf{P}_{33}. \quad (22)$$

同理,对ACV模型有

$$\mathbf{P}_{CV}(k+1|k) = \Phi_{CV}\mathbf{P}_{CV}(k|k)\Phi_{CV}^T = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{12} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T & 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\mathbf{P}_{CV11}(k+1|k) = \mathbf{P}_{11} + 2T\mathbf{P}_{12} + T^2\mathbf{P}_{22}, \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_{CV12}(k+1|k) = \mathbf{P}_{12} + T\mathbf{P}_{22}, \quad (25)$$

$$\mathbf{P}_{CV22}(k+1|k) = \mathbf{P}_{22}. \quad (26)$$

设 $\tilde{\mathbf{P}}(k+1|k)$ 为两者相应元素的差值,则

$$\tilde{\mathbf{P}}_{11}(k+1|k) = \mathbf{P}_{CS11}(k+1|k) - \mathbf{P}_{CV11}(k+1|k) = 2l_1\mathbf{P}_{13} + 2Tl_1\mathbf{P}_{23} + l_1^2\mathbf{P}_{33}. \quad (27)$$

由于系统的采样频率较高(至少为 50 frame/s),即其采样周期 T 很小,则

$$l_1 = O(T^2), \quad (28)$$

$$l_2 = T + O(\alpha T^2), \quad (29)$$

将 l_1, l_2 代入(27)式并进行整理得

$$\tilde{\mathbf{P}}_{11}(k+1|k) \approx \mathbf{0}. \quad (30)$$

同理

$$\tilde{\mathbf{P}}_{12}(k+1|k) = T\mathbf{P}_{13} + O(T^2)\mathbf{P}_{23}, \quad (31)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{22}(k+1|k) = T(\mathbf{P}_{23} + \mathbf{P}_{32}) + O(T^2)\mathbf{P}_{33}. \quad (32)$$

由(30)~(32)式可知,由于系统采样周期 T 较小, $\mathbf{P}_{CS}(k+1|k)$ 的前两行两列与 $\mathbf{P}_{CV}(k+1|k)$ 相差很小。将该结果与(18)式结合考虑可知,两种模型增益矩阵中的位置和速度增益即 k_x, k_x 几乎相同,该结果说明对于红外鱼眼告警系统而言,在采样频率为 50 frame/s 的情况下,ACV 模型的跟踪精度与 CS 模型的跟踪精度相当,且与机动频率 α 无关。同时,由于 ACV 模型的状态向量是两维的,即只含有目标的位置和速度,因此其计算量要大大小于 CS 模型。

5 仿真结果及分析

为了证明上述理论分析结果的正确性,对目标几种典型的运动(匀速、匀加速、变加速和圆机动)进行了计算机仿真实验,并与 CS 模型进行了比较。假设目标在视场中横向运动,系统的采样频率为 50 frame/s,目标与系统的距离为 5 km,目标做初速度为 10 pixel/s 的匀速直线运动,第 $51T$ 至 $200T$ 为变加速运动(其中在第 $51T$ 至 $100T$,加速度增量为 0.5 pixel/s^3 ,在第 $101T$ 至 $150T$,加速度增量为 1 pixel/s^3 ,在第 $151T$ 至 $200T$,加速度增量为 1.5 pixel/s^3),第 $201T$ 至 $800T$ 为匀速圆周运动,向心加速度为 3.5 pixel/s^2 ,第 $801T$ 至 $950T$ 为匀加速运动,加速度为 -3 pixel/s^2 ,第 $951T$ 至 $1000T$ 恢复成速度为 4.5 pixel/s 的匀速直线运动。在二维直角坐标系下, x 轴、 y 轴上的量测噪声是均值为零、误差为 1 pixel 的高斯白噪声序列,观测方差为 1 pixel。在 CS 模型中,取 $\alpha=0.1$,最大向心加速度 $a_{\max} = |a_{-\max}| = 4.5 \text{ pixel/s}^2$ 。在 ACV 模型中,取 $\eta=0.5$,仿真次数为 100 次。仿真结果如图 1~4 所示,图 1 和图 2 分别给出了周期为 0.025 时 ACV 模型和 CS 模型的 x 方向和 y 方向上的位置估计均方根误差(RMSE),图 3 和图 4 分别给出了 x 方向和 y 方向上 ACV 模型与 CS 模型的 RMSE 之差。由仿真结果进行分析可知,对于红外鱼眼系统,在采样

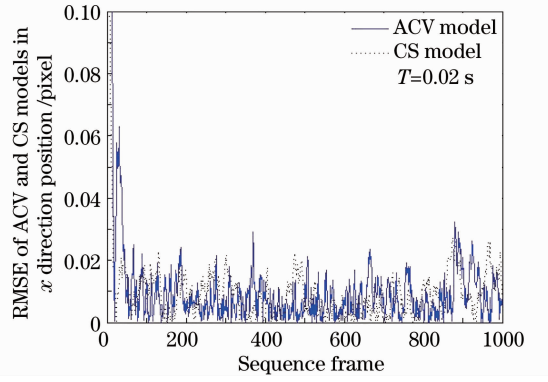


图 1 ACV 和 CS 模型的 x 方向位置 RMSE

Fig. 1 RMSE of ACV and CS models in x direction position

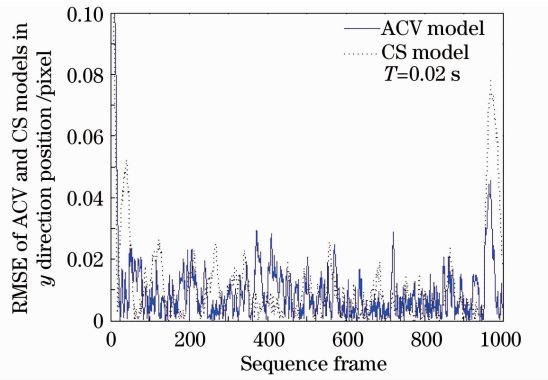


图 2 ACV 和 CS 模型的 y 方向位置 RMSE

Fig. 2 RMSE of ACV and CS models in y direction position

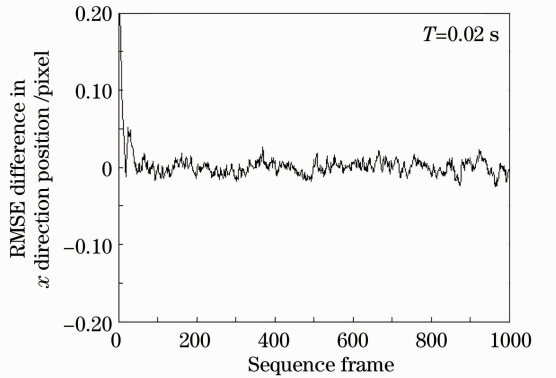


图 3 ACV 与 CS 模型 x 方向位置 RMSE 之差

Fig. 3 RMSE difference between the ACV and the CS models in x direction position

率为 50 frame/s 的情况下,ACV 模型与 CS 模型的跟踪精度相当,这与前面的理论分析结果相一致。

另外,从前面的分析可知,ACV 模型只有在采样周期较小的情况下才能达到与 CS 模型相当的跟踪精度,若采样周期变大,其跟踪性能将变差。图 3、图 5 和图 6 分别给出了采样周期为 0.02、0.1

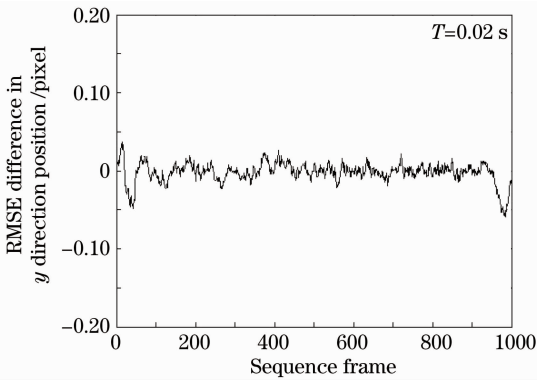


图4 ACV与CS模型y方向位置RMSE之差
Fig. 4 RMSE difference between the ACV and the CS models in y direction position

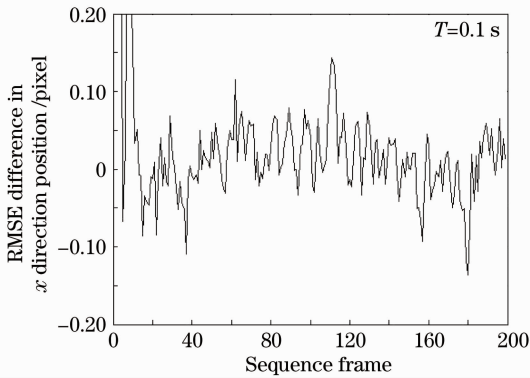


图5 ACV和CS模型的x方向位置RMSE之差
Fig. 5 RMSE difference between the ACV and the CS models in x direction position

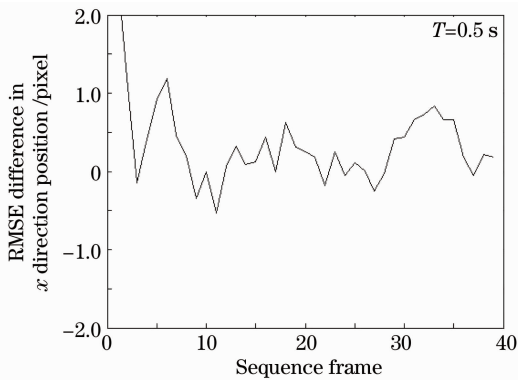


图6 ACV和CS模型的x方向位置RMSE之差
Fig. 6 RMSE difference between the ACV and the CS models in x direction position

和0.5 s时ACV模型和CS模型的x方向位置RMSE之差。对这三幅图进行对比分析可知,在采样周期为0.1 s时,ACV模型与CS模型相比,其跟踪精度开始变差;随着采样周期的变大,当采样周期为0.5 s时,这种差别更加明显。因此,在采样周期小于0.1 s时,ACV模型的跟踪精度才能与CS模型相近或相当。由于ACV模型比CS模型结构简

单且参数设置也较少,因此其耗时要小于CS模型。表1给出了在三种不同的采样周期下,对相同的模拟轨迹进行跟踪的计算耗时,表中结果与理论分析相一致。

表1 ACV模型和CS模型耗时比较

Table 1 Time consuming comparison for ACV and CS models

Sampling period T/s	0.02	0.1	0.5
CS model /s	0.120951	0.018540	0.003602
ACV model /s	0.105288	0.016057	0.002918

6 结 论

在对红外鱼眼系统下目标的运动特性进行分析的基础上,结合其采样率较高的特点,提出了一种改进的自适应匀速运动模型,并与CS模型进行了对比分析。理论分析和实验结果表明,在红外鱼眼系统及其较高的采样频率条件下,ACV模型与CS模型具有相当的跟踪精度,且具有较少的参数设置和计算量,从而证明了该模型的有效性。对于红外鱼眼告警系统下目标运动模型的选取具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Yongzhong. Fisheye Lens Optics [M]. Beijing: Science Press, 2006
王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- 2 Pan Quan, Liang Yan, Yang Feng. Modern Target Tracking and Information Fusion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009
潘泉, 梁彦, 杨峰. 现代目标跟踪与信息融合[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009
- 3 Zhang Hui, Zhao Baojun, Tang Linbo *et al.*. Infrared object tracking based on adaptive multi-features integratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1291~1296
张辉, 赵保军, 唐林波等. 基于自适应多特征整合的红外目标跟踪[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1291~1296
- 4 Zhou Hongren, Jing Zhongliang, Wang Peide. Tracking of Maneuvering Targets [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991
周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
- 5 Qiao Xiangdong, Wang Baoshu. A CS-Jerk model for tracking highly maneuvering targets [J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2002, **24**(6): 53~56
乔向东, 王宝树. 高度机动目标的“当前”统计 Jerk 模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2002, **24**(6): 53~56
- 6 Pan Pingjun, Feng Xinxi. A modified maneuvering target model and adaptive filtering algorithm [J]. *Modern Defense Technology*, 2007, **35**(4): 132~136
潘平俊, 冯新喜. 一种修正的机动目标模型及自适应滤波算法 [J]. *现代防御技术*, 2007, **35**(4): 132~136
- 7 Zhang Jianqiang, Zhang Pingding, Wang Rui. A novel maneuvering target model and adaptive tracking algorithm [J]. *Command Control & Simulation*, 2007, **29**(2): 29~30

- 张建强, 张平定, 王 睿. 一种新的机动目标模型及其自适应跟踪算法[J]. 指挥控制与仿真, 2007, **29**(2): 29~30
- 8 Pan Pingjun, Feng Xinxi, Liu Jia *et al.*. A modified current statistical Jerk model for tracking highly maneuvering targets [J]. *Electronics Optics & Control.*, 2008, **15**(6): 37~40
- 潘平俊, 冯新喜, 刘 佳等. 高度机动目标的改进 CS-Jerk 模型 [J]. 光电与控制, 2008, **15**(6): 37~40
- 9 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. Infrared target tracking algorithm based on algorithm fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 860~865
- 管志强, 陈 钱, 钱惟贤等. 一种基于算法融合的红外目标跟踪方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 860~865
- 10 Luo Huan, Yu Lei, Liao Jun *et al.*. Tracking framework for small infrared multi-target in complex background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1536~1541
- 罗 寰, 于 雷, 廖 俊等. 复杂背景下红外弱小多目标跟踪系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1536~1541
- 11 M. Everett, D. Manson, A. Brook *et al.*. A naval infrared search and track demonstrator and its fusion with other ship sensors [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 620626
- 12 G. Tidhar, H. Shfaram. Optimizing optics forIRST with small fill-factor focal plane arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 620623
- 13 Fan Jinxiang, Yue Yanju. Development in new concepts and new schemes for military infrared imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(1): 1~6
- 范晋祥, 岳艳军. 军用红外成像系统新概念新体制的发展 [J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(1): 1~6
- 14 Wang Yongzhong. Biomimetic staring infrared imaging omnidirectional detection technology [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, **55**(19): 1859~1865
- 王永仲. 模仿生物视觉的凝视红外成像全向感知技术 [J]. 科学通报, 2010, **55**(19): 1859~1865
- 15 Yan Zongqun, Li Gang, Shen Hongbin *et al.*. Study on the effect of harsh meteorologic conditions upon the infrared fish-eye lens tracking system [J]. *Optical Instruments*, 2010, **32**(4): 33~37
- 闫宗群, 李 刚, 沈洪斌等. 恶劣气象条件对红外鱼眼跟踪系统影响的研究 [J]. 光学仪器, 2010, **32**(4): 33~37
- 16 Jiang Tao. Detection of Targets with Ultra-Wide-FOV Staring Infrared Thermal Imaging System [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2006
- 江 涛. 超大空域凝视热像式红外目标侦测技术研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2006
- 17 Wang Fang, Feng Xinxi, Li Hongyan. A novel adaptive filtering algorithm [J]. *Modern Radar*, 2003, **25**(7): 33~35
- 王 芳, 冯新喜, 李鸿艳. 一种新的自适应滤波算法 [J]. 现代雷达, 2003, **25**(7): 33~35

栏目编辑: 李文喆