

基于多关联模板匹配的火箭目标跟踪算法

尹宏鹏, 柴毅, 屈剑锋, 翟茹玲

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对火箭目标在复杂场景的跟踪问题, 提出一种基于多关联模板匹配的模板匹配策略, 通过仿射变换从上帧最优模板中产生多关联模板以自适应火箭目标的大小和姿态改变, 提高算法的匹配精度。采用 Kalman 滤波器对火箭飞行进行轨迹预测。多个火箭飞行录像跟踪实验表明, 该算法具有很好的匹配精度与实时性, 对火箭目标的状态、大小变化与云层遮挡现象具有较好的鲁棒性。

关键词: 火箭目标跟踪; 多关联模板; 模板匹配; Kalman 滤波器; 轨迹预测

Rocket Target Tracking Algorithm Based on Multiple Related Template Matching

YIN Hong-peng, CHAI Yi, QU Jian-feng, ZHAI Ru-ling

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044)

【Abstract】 Aiming at the tracking problem of the rocket target in complex scene, this paper proposes a template matching strategy based on multiple related template matching. This strategy can improve the track accuracy by getting the best template from the previous frame using the mapping transform, which can fit rocket's size and state automatically. The Kalman filter is used to predict the track of the rocket. Several tracking experiments show the approach is accurate and fast, and it has a better robust performance during the state changing, the size changing and the shelter instance.

【Key words】 rocket target tracking; multiple related template; template matching; Kalman filter; track prediction

1 模板匹配算法基本思想

火箭目标的位置信息是火箭目标跟踪过程中所需要的重要信息之一, 它可由匹配得到的图像相对于原图像的偏移量确定。模板匹配是衡量模板与待配图像的相似程度, 是在计算机视觉和自动目标识别跟踪中广泛应用的定位识别技术。由于各种原因如成像条件的差异、图像预处理引入的误差等, 参与图像匹配的模板与潜在的匹配子图像间通常存在着程度不同的不一致, 因此, 根据模板在一幅陌生图像中检测出潜在的匹配对象并得出它在图像中的位置的过程较为复杂。实际中通常考虑的图像匹配要求: 模板 T 与潜在匹配对象 p 间存在下述关系:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial_1 \\ \partial_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $(x, y) \in T$; $(x', y') \in p$, β_{ij} , ∂_i 是常数; 约等号两边的差别可由一与 (x, y) 及其领域有关的高阶多项式近似。以上限定表明模板与潜在匹配子图像间允许存在旋转、位移、缩放、倾斜和可以描述的非线性变形。然后给出一种误差评价函数^[1-7], 通过将模板在输入图像中滑动, 在每个滑动位置处计算当前区域和模板的互相关值, 从中找出最优的一个位置参数 (x', y') , 即当前目标位置。模板匹配算法无需复杂的图像预处理, 直接在像素灰度特征上测量参考图像与实时图像的相似程度, 在信噪比较低的情况下仍有较可靠的工作性能; 当参考图像中包括的目标结构和形状较复杂时, 基于模板匹配的跟踪仍能稳定地给出目标的位置信息。而且跟踪的抗干扰能力强, 对目标的急剧变化和景物不连续部分不敏感。

2 多关联模板匹配算法及其实现

2.1 问题的提出

火箭飞行中随着飞行姿态的改变和离摄像机的距离远近的变化, 火箭图像的角度、大小也在不停的改变。同时火箭目标匹配问题是一个复杂背景的运动目标匹配问题, 火箭的背景图像是在随时改变的。传统的固定模板匹配方式是以目标第一次出现时的图像形态作为模板, 并且在以后的跟踪过程中保持不变, 这种方法记住的是目标的初始形态, 不能适应环境照度和目标形态的变化, 在长时间跟踪过程中不稳定。而逐帧更新模板方法, 以当前最佳匹配子区图像作为模板, 而抛弃目标以往的所有信息, 这样会因为遮挡的发生或是匹配误差的累积, 造成跟踪的漂移甚至失败。针对该问题, 研究者分别提出基于目标模板缓冲区的模板更新法^[8]、基于最小梯度下降法的模板更新法^[9]和基于 Kalman 滤波的模板更新法^[10]。上述方法虽然能较好的解决模板图像的更新问题, 但模板一旦确定模板的大小和方向就已经确定。只能对模板内的图像进行更新, 而无法实现模板大小和方向针对模板目标的自适应更新。当目标图像小于模板尺寸时, 模板中引入了很多与目标特征无关的背景信息, 如图 1 所示; 当目标图

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目“GIS 支持下的卫星发射场及火箭发射飞行安全控制应急保障系统”(2003AA132050)

作者简介: 尹宏鹏(1981-), 男, 博士, 主研方向: 计算机视觉, 数字图像处理; 柴毅, 教授、博士、博士生导师; 屈剑锋, 博士研究生; 翟茹玲, 硕士研究生

收稿日期: 2009-01-16 **E-mail:** yinhongpeng@gmail.com

像大于模板尺寸时，模板中只包括了目标图像的部分特征信息，如图 2 所示。



图 1 目标小于模板尺寸



图 2 目标大于模板尺寸

当火箭发生姿态的改变时，模板不能在方向上适应目标的变化使模板特征信息的不完备并引入大量无关的背景特征。如何使模板能够自适应目标大小和姿态的变化保证模板特征的唯一性和完备性是本文的主要研究内容。而当前对变模板模型研究较多的主动轮廓模型又称 SNAK 模型^[11]，通过求解一个最小能量问题来迭代地逼近目标的边界，能较好地逼近目标轮廓但是计算量较大，而且对于弱边缘的目标图像依赖性质的能量函数难以建立。

2.2 多关联模板的生成

火箭的飞行姿态和飞行轨迹是一个渐变的过程，通过摄像机采集的火箭图像可以理解为火箭在三维空间在二维空间上的投影。在二维空间上火箭的姿态大小变化可分为：放大，缩小，左旋，右旋。火箭的姿态大小变化可由原始姿态经二维仿射变换中的拉伸和旋转构造。设对原始火箭图像 $I(x, y)$ 拉伸 t 旋转 θ ，则其数学模型描述为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & t \sin \theta \\ \sin \theta & t \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

为使模板图像能更好地在大小和方向上拟合待匹配图像，提高匹配的精度，本文对原始模板图像进行二维的仿射变化，对火箭姿态变化的 4 种状态进行预测。产生多个关联模板。由火箭姿态大小变化的渐变性的，根据式(2)分别取 $t=0.9$ ； $t=1.1$ ； $\theta=+1^\circ$ ； $\theta=-1^\circ$ 构建 4 个关联模板对于无效区域，用掩膜图像作标识。如图 3 所示。

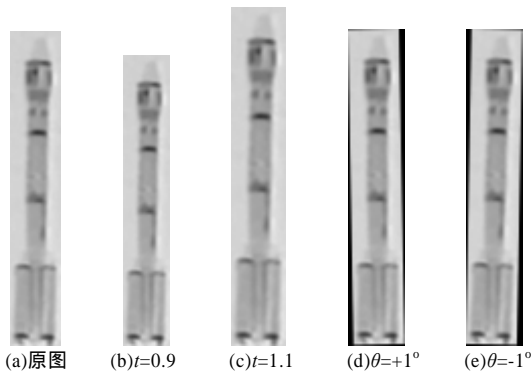


图 3 多关联模板的构建

由这 4 个关联模板与原始模板来拟合火箭姿态与大小的变化。当然可以构造更多的模板，但基于效率与实际应用效果考虑本文中只生成 4 个关联模板。

2.3 匹配算法

检测算法的基本思路是，对原始模板图像进行二维的仿射变化产生 4 组关联模板，以拟合火箭姿态和大小变化。通过使用各个关联模板和原始模板对待匹配的图像进行匹配，选取匹配程度最高的模板对应区域为目标区域。对于模

板更新策略，为充分利用帧间灰度分布的相关性。本文采用基于目标模板缓冲区的模板更新法，其模板更新公式如下：

$$M_{\text{new}} = \alpha \times M_{\text{old}} + (1 - \alpha) \times M_{\text{cur}} \quad (3)$$

其中， M_{new} 为新模板，即在该帧时存入模板缓冲区的模板； M_{old} 为旧模板，即在模板缓冲区内，选出对应的匹配程度最高的一个做为当前帧的旧模板； M_{cur} 为当前帧切割模板； α 为加权的权值。然后由 M_{new} 进行二维的仿射变化产生 4 组关联模板。模板的更新通过 2 个部分来完成，对于火箭姿态，大小的变化由关联模板来拟合。对于图像的灰度分布变化由式(3)来拟合，其算法流程如图 4 所示。

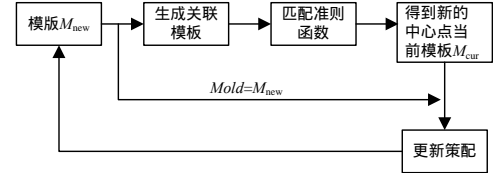


图 4 算法流程

一般而言，模板匹配算法的传统的评判准则有：归一化互相关函数，均方误差评价函数，绝对差累加和评价函数，零均值差的平方和相关函数、零均值差的绝对值和相关函数等^[4-6, 11]。对于背景相对简单、平均灰度变化不大的情况，用均方误差和绝对差累加和的相关方法可以获得较好的跟踪结果，用这类方法可以简单实现算法的硬件结构，提高实时性；但当图像的平均灰度发生较大变化时，用零均值差的平方和，和零均值差的绝对值和效果较好；归一化互相关法对上述情况均具有良好的抗干扰性，但运算较复杂，不易应用到实时处理系统中。本文考虑到火箭跟踪的实时性的要求，其复制背景和图像灰度的变化可以通过模板的更新策略进行补偿。而对于多关联模板的模板像素尺寸的不同，为对各关联模板匹配效果客观量化的进行评价文中提出了像素平均绝对差累加和评价函数。其数学表示为

$$R(x, y) = \frac{\sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V |M(u, v) - S(x+u, y+v)|}{U \times V} \quad (4)$$

其中， u 和 v 分别表示模板图像的横坐标大小与纵坐标大小； $M(u, v)$ 与 $S(x+u, y+v)$ 分别表示模板图像和待匹配区域； x, y 表示待匹配区域在待匹配图像中的偏移量。

3 基于 kalman 滤波的轨迹预测

为了从陌生图像中找到与模板匹配的子图像，往往要进行大范围内的搜索。以尺寸为 $N \times N$ 的陌生图像和尺寸为 $M \times M (N > M)$ 的模板为例，在不计旋转、缩放等因素影响的情况下进行逐点比较的平均次数为 $(N-M+1) \times (N-M+1) \times (M \times M) / 2$ 。其计算量较大，而利用 Kalman 滤波器来对运动目标的运动轨迹进行预测，就可以在相对较小的区域内进行匹配，而且当目标被遮挡时可以在特定区域内搜索目标等待目标的重新出现。

假设火箭目标的运动专题参数为某一时刻火箭的位置和速度。在跟踪过程中，由于相邻 2 帧图像的时间间隔比较短，目标在这么短的时间间隔内状态变化比较小，可以假设火箭在单位时间间隔内是匀速运动，所以可以用速度来表示火箭的运动趋势。假设火箭运动轨迹服从高斯分布，火箭的位置 (x_1, y_1) 可以表示为火箭上一时刻位置加上火箭的速度 (dx_1, dy_1) 乘单位时间再加上噪声 w ，则火箭的状态方程 $x_k = Ax_{k-1} + w_{k-1}$ 可表示为

$$\begin{bmatrix} x_1(k) \\ y_1(k) \\ dx_1(k) \\ dy_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k-1) \\ y_1(k-1) \\ dx_1(k-1) \\ dy_1(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} wx_1(k-1) \\ wy_1(k-1) \\ wdx_1(k-1) \\ wdy_1(k-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, Δt 为图像的采样间隔。利用图像匹配, 只能得到目标的位置信息。所以定义 2 维观测向量 $z_k = Hx_k + v_k$ 可表示为

$$\begin{bmatrix} x_2(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ y_1(k) \\ dx_1(k) \\ dy_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} vx_1(k) \\ vy_1(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设 w_k 和 v_k 都是 0 均值且独立的噪声向量, 设 w_k 和 v_k 的协方差矩阵为

$$Q_k = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则火箭目标轨迹预测中的 Kalman 滤波公式描述如下:

系统状态预测方程:

$$\hat{x}_k' = A\hat{x}_{k-1} \quad (9)$$

误差协方差预测方程:

$$P_k' = AP_{k-1}A^T + Q \quad (10)$$

Kalman 增益系数方程:

$$K_k = P_k'H^T(HP_k'H^T + R)^{-1} \quad (11)$$

状态修正方程:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k' + K_k(z_k - H\hat{x}_k') \quad (12)$$

误差协方差修正方程:

$$P_k = (I - K_kH)P_k' \quad (13)$$

基于 Kalman 滤波的火箭轨迹预测分为 4 个阶段: 滤波器的初始化, 状态预测, 匹配和状态修正。具体实现步骤如下:

(1)初始化: 在第一次使用 Kalman 滤波器时要对滤波器进初始化, 将 x_0 赋初值为目标的初始位置和速度。一般速度未知, 可以设为 0, 并记录当前图像时刻。同时设误差协方差 $P_0=0$ 。

(2)预测: 在新输入的每帧图像中进行匹配搜索之前, 获取图像采样间隔, 即 Δt , 代入(5)式中, 将(5)和 x_0 代入状态预测方程(9), 预测当前的目标运动状态 \hat{x}_k' 。将状态转移矩阵 A 和(7)式一起代入误差协方差预测方程(10), 对误差协方差进行预测。

(3)匹配: 设定以 \hat{x}_k' 中的 (\hat{x}, \hat{y}) 为中心的区域为搜索区域, 在该区域内寻找最佳匹配位置, 得到 (x, y) 。

(4)修正: 求出式(11)所示的 Kalman 滤波器增益系数。将 $z_k=(x, y)$ 代入式(12)中, 得到由当前实际观测修正后的状态向量, 同时按式(13)修正误差协方差矩阵。回到(2), 重复预测、匹配、修正过程, 完成运动目标的跟踪。

4 仿真实验

为验证算法的有效性和可行性, 本文以某基地提供的公开火箭发射录像为实例。使用 Matlab 7.0 为仿真工具, 在 Semprorr 1.81 GHz 512 MB 内存的 PC 平台上进行仿真实验。采用像素平均绝对差累加和作为匹配准则函数, 其模板更新加权因子 α 取值为 0.8。

图 5 为采用传统算法和本文算法匹配时某录像第 600 帧

匹配效果; 图 6 为采用传统算法和本文算法对某段公开录像共 766 帧图像的匹配误差曲线。

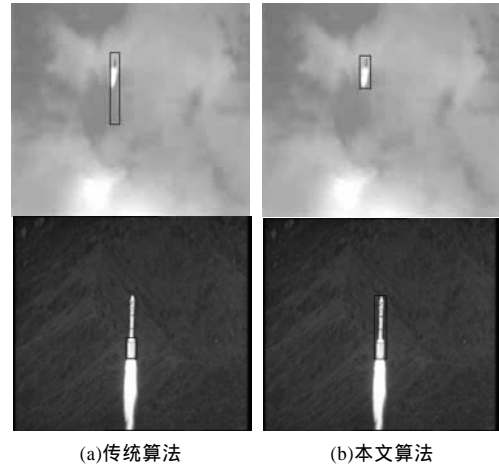


图 5 匹配结果

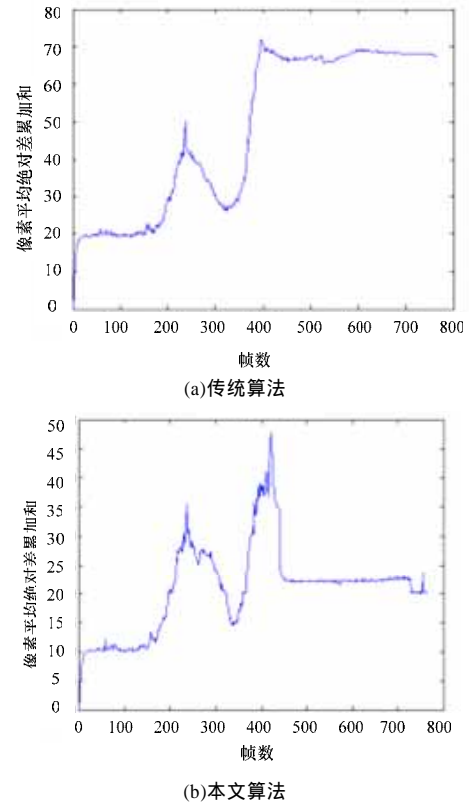


图 6 匹配误差曲线

可见, 本文所提算法在匹配精度上要优于传统算法。为验证算法的实时性, 对传统的匹配方法、采用多关联匹配的方法、采用 Kalman 轨迹预测的传统匹配方法以及采用多关联模板匹配与 Kalman 轨迹预测的匹配方法分别对录像中 766 帧图像处理的平均每帧时耗进行比较, 其结果见表 1。

表 1 使用不同匹配策略的平均每帧时耗

算法	平均每帧时耗/s
传统的匹配方法	1.578
采用多关联匹配的方法	4.094
采用 Kalman 轨迹预测的传统匹配方法	0.023
采用多关联模板匹配与 Kalman 轨迹预测的匹配方法	0.041

(下转第 36 页)