

文章编号 1004-924X(2007)01-0112-05

# 背景运动补偿和假设检验的目标检测算法

赖作镁<sup>1,2</sup>, 王敬儒<sup>1</sup>, 张启衡<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 光电技术研究所 国家 863 计划光束控制  
重点实验室, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 根据背景与目标具有不同的运动特性这一事实, 提出一种基于背景运动补偿和假设检验的目标检测算法。首先, 采用特征点对应法求相邻帧间的运动; 然后, 用最小二乘法计算出摄像机仿射运动参数, 利用此参数进行帧间背景运动补偿后得到稳定的背景; 最后, 用假设检验方法检测补偿后的帧差图像, 经过简单的形态学和连通区域处理后检测出运动目标。仿真表明, 该运动补偿算法能有效消除背景突出目标, 补偿前后的差分图像信噪比提高了 14.71 dB。该算法计算量小, 可以成为一种通用的实时目标检测算法。

**关键词:** 目标检测; 运动补偿; 假设检验; 最小二乘法

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A

## Object detection algorithm based on background motion compensation and hypothesis test

LAI Zuo-mei<sup>1,2</sup>, WANG Jing-ru<sup>1</sup>, ZHANG Qi-heng<sup>1</sup>

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** According to the fact that background and object have different motion features, an object detection algorithm was proposed based on background motion compensation and hypothesis test. Motion vector was detected by a feature point corresponding algorithm and affine motion parameters were calculated through least square method. Difference image after compensation was detected by hypothesis test. After a series of morphological process, we obtained the intact moving object. Experimental results indicate that this algorithm can eliminate background motion effectively because of moving cameras and segment object under complex environment. The peak signal noise ratio has been improved 14.71 dB compared with two difference images.

**Key words:** object detection; motion compensation; hypothesis test; least square method

## 1 引言

复杂背景下的运动目标检测是目标检测与跟踪领域的一个重点和难点,背景的复杂多样性以及摄像机的复杂运动都进一步增加了目标检测的难度。本文所讨论的背景纹理复杂,其典型实物有森林、房屋、高山、河流等,背景与目标在某些特征上存在较大的相似性,往往难以从形状亮度等加以区分,但由于摄像机的高采样频率,被拍摄背景本身可以认为是不动的,帧间背景的运动可以认为完全是由于摄像机的运动引起的,而目标能独立运动。

复杂背景下运动目标的检测主要有以下三种方法:背景模型法<sup>[1]</sup>、运动场法<sup>[2]</sup>和帧间差分法<sup>[3]</sup>。背景模型法主要应用于静态或准静态的视频监控场合,能得到运动物体很全面的特征数据,但却对光线变化和其他外部的动态场景变化非常敏感,且需要用到很多帧的数据,不适合实时实现。运动场法通用性强,能在摄像机做复杂运动时有效检测目标,但计算复杂,很难实时实现;帧间差分法用连续的二到三帧图像相减实现时域差分,这种方法对动态变化的场景非常有效,但一般不能很好地提取出运动目标的所有特征像素,并且基于帧间差分的检测方法的前提是背景本身是相对静止的。

当摄像机运动时,必须先进行帧间图像的配准,即背景全局运动的补偿,文献<sup>[4]</sup>理论上阐明了运动补偿的必要性。经过全局背景运动补偿后,帧间图像背景相对静止,可以差分检测出目标。对补偿后的差分图像的处理是这种方法的又一重要步骤,有人采用基于正态分布的 $3\sigma$ 特性来区分差分图像的噪声和目标,也有人采用基于直方图的自适应阈值技术<sup>[5]</sup>和模糊聚类<sup>[6]</sup>等等。当场景中出現多目标时,很多方法都变得很复杂,例如模糊聚类法由于类别数目很大且未知,难以实现。本文提出采用 $F$ 假设检验的方法检测补偿后帧差结果,适合于多目标的检测问题。该方法计算简单,易于硬件实现。

## 2 背景运动补偿算法

### 2.1 特征点法计算帧间运动的检测

本文利用复杂背景图像中背景纹理复杂,对

比度好,特征明显且容易提取,采用角点作为特征,从角点的位移得到帧间的运动。具体做法是:采用Moravec算子提取两图像中的角点,然后用块相关匹配的方法找到第一幅图像中的角点在第二幅图像中对应的角点。即以第一幅图像角点 $(u, v)$ 为中心,构造大小为 $(2m+1)(2n+1)$ 的图像块,在第二幅图像的范围 $(2dx+1)(2dy+1)$ 内进行搜索,来求取对应的候选特征点。块大小一般取 $7 \times 7$ ,搜索范围一般取 $10 \times 10$ 。

### 2.2 最小二乘法估计仿射运动参数

在目标检测与跟踪系统中,通常可用仿射参数模型来模拟摄像机运动导致的场景运动,所以帧间两图像的所有特征点对都满足如下仿射关系:

$$\begin{bmatrix} xx_2 \\ yy_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} xx_1 \\ yy_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $(xx_1, yy_1)$ 为前一时刻图像的某一特征点坐标, $(xx_2, yy_2)$ 为当前时刻图像的某一特征点坐标。式中只有 $a_1, a_2, a_3, a_4, u, v$ 六个未知数。理想情况下,只要三个对应特征点就可解出式(1)中的六个未知数。但是由于摄像机运动模型不可能非常完善,而且受图像噪声,目标局部运动,遮挡等影响,很难准确得到最能代表摄像机真实运动的三个特征点,所以本文先求得许多这样的特征点对,然后采用了最小二乘法极小化补偿后的均方根残差来估计出比较精确的仿射运动参数。式(1)写成向量形式,可以得到:

$$y_i = Ax_i + t \quad i=1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$A$ 是可逆的线性变换(对应 $2 \times 2$ 矩阵), $t$ 为二维平移向量, $x_i, y_i$ 分别为前一时刻和当前时刻图像的第 $i$ 对特征点坐标的向量形式, $m$ 为前一时刻和当前时刻图像的特征点对的总数。所要解决的问题就是估计极小化补偿后的均方根残差式(3)的仿射变换参数 $A, t$ 。

$$\mathcal{F}(A, t) = \left( \frac{1}{m} \sum \| y_i - (Ax_i + t) \|^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

按式(2)那样,所有特征点对组合起来写成如下形式:

$$[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{m-1} \ y_m] = A[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{m-1} \ x_m] + t$$

记 $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ ,  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$ , 则上式又可以写成: $Y = AX + tL^T$ , 其中 $L$ 是元素全为1的 $m$ 维列向量,因此问题又等价于极小化误差函数:

$$\phi(\mathbf{A}, t) = m \mathcal{F}(\mathbf{A}, t) = \text{tr}(\mathbf{Y} - (\mathbf{A}\mathbf{X} + t\mathbf{L}^T))(\mathbf{Y} - (\mathbf{A}\mathbf{X} + t\mathbf{L}^T))^T, \quad (4)$$

其中  $\text{tr}(\mathbf{A})$  表示方阵的迹, 即  $\mathbf{A}$  的主对角线元素之和。 $\phi(\mathbf{A}, t)$  是关于  $\mathbf{A}$  和  $t$  的元素的多元函数。极小化  $\phi(\mathbf{A}, t)$  的  $\mathbf{A}^*$ ,  $t^*$  应满足下列条件:

$$\left. \frac{\partial \phi(\mathbf{A}, t)}{\partial \mathbf{A}} \right|_{\mathbf{A}=\mathbf{A}^*} = 0, \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \phi(\mathbf{A}, t)}{\partial t} \right|_{t=t^*} = 0. \quad (6)$$

由式(6)可以导出:

$$t^* = \frac{1}{m}(\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X})\mathbf{L}, \quad (7)$$

令  $\mathbf{J} = \mathbf{I} - \frac{1}{m}\mathbf{L}\mathbf{L}^T$ ,  $\mathbf{I}$  为单位阵, 则  $\mathbf{J}\mathbf{J}^T = \mathbf{J}^T\mathbf{J} = \mathbf{J} = \mathbf{J}^T$ , 从而将式(7)代入式(4)并作一些化简可得:

$$\phi(\mathbf{A}, t^*) = \text{tr}((\mathbf{Y}\mathbf{J} - \mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{J})(\mathbf{Y}\mathbf{J} - \mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{J})^T) = \text{tr}(\mathbf{Y}\mathbf{J}\mathbf{Y}^T) + \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{J}\mathbf{X}^T\mathbf{A}^T) - 2\text{tr}(\mathbf{Y}\mathbf{J}\mathbf{X}^T\mathbf{A}^T)$$

记  $\overset{\circ}{\mathbf{X}} = \mathbf{X}\mathbf{J}\mathbf{X}^T$ ,  $\overset{\circ}{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}\mathbf{J}\mathbf{Y}^T$ , 得:

$$\phi(\mathbf{A}, t^*) = \text{tr}(\mathbf{Y}\mathbf{J}\mathbf{Y}^T) + \text{tr}(\mathbf{A}\overset{\circ}{\mathbf{X}}\mathbf{A}^T) - 2\text{tr}(\overset{\circ}{\mathbf{Y}}\mathbf{A}^T), \quad (8)$$

可以证明:

$$\left. \frac{\partial \phi(\mathbf{A}, t^*)}{\partial \mathbf{A}} \right|_{\mathbf{A}=\mathbf{A}^*} = 2(\mathbf{A}\overset{\circ}{\mathbf{X}} - \overset{\circ}{\mathbf{Y}}), \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)得:  $\mathbf{A}^* \overset{\circ}{\mathbf{X}} = \overset{\circ}{\mathbf{Y}}$ . 对于一般位置上的点,  $\overset{\circ}{\mathbf{X}}$  为非奇异阵, 因此有:  $\mathbf{A}^* = \overset{\circ}{\mathbf{Y}}\overset{\circ}{\mathbf{X}}^{-1}$

$$\text{进而, } t^* = \frac{1}{m}(\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X})\mathbf{L} = \frac{1}{m}(\mathbf{Y} - \overset{\circ}{\mathbf{Y}}\overset{\circ}{\mathbf{X}}^{-1}\mathbf{X})\mathbf{L}.$$

至此, 就求出了极小化补偿后的均方根残差  $\mathcal{F}(\mathbf{A}, t)$  的仿射参数  $\mathbf{A}^*$ ,  $t^*$ . 归纳起来, 最小二乘法估计仿射参数  $\mathbf{A}, t$  的步骤如下:

(1) 构造  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ ,  $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]$ ,  $\mathbf{J} = \mathbf{I} - \frac{1}{m}\mathbf{L}\mathbf{L}^T$ .

(2) 求出  $\overset{\circ}{\mathbf{X}} = \mathbf{X}\mathbf{J}\mathbf{X}^T$ ,  $\overset{\circ}{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}\mathbf{J}\mathbf{Y}^T$ .

(3) 线性变换  $\mathbf{A} = \overset{\circ}{\mathbf{Y}}\overset{\circ}{\mathbf{X}}^{-1}$ ,

$$\text{平移矢量 } t = \frac{1}{m}(\mathbf{Y} - \overset{\circ}{\mathbf{Y}}\overset{\circ}{\mathbf{X}}^{-1}\mathbf{X})\mathbf{L}.$$

### 2.3 运动补偿

得到仿射变换参数以后, 就可以补偿摄像机引起的背景运动。由于通过以上方法估算出运动位移矢量并非整数, 所以必须对图像中的每个像素点采用向前或向后映射来解决这个问题。常用的灰度插值方法有: 最近邻插值、双线性插值和高

阶插值。由于双线性插值方法即可达到像素之间比较平滑的目的, 所以本文也采用了双线性插值方法来得到运动补偿帧。

### 3 假设检验方法检测目标

假定帧差后的噪声服从均值为零的高斯正态分布, 帧差后的运动目标引起的灰度变化与噪声独立同分布, 服从均值未知的高斯分布, 即噪声和目标分别服从  $N \sim (0, \sigma_1^2)$ ,  $D \sim (\mu, \sigma_2^2)$ , 则由统计学原理, 帧差图像服从两个正态总体的混合分布。以大小为  $n$  的观察窗口对帧差图像取样, 得到  $n$  个随机样本  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。而运动目标引起的方差变化要显著大于由于噪声引起的背景的方差变化。如果窗口内和窗口外的区域服从方差相同或相近的分布, 可以把它设为窗口内和窗口外服从相同的分布, 否则服从不同的分布。为此, 取假设检验  $H_0$  为:  $H_0: \sigma_2^2 = \sigma_1^2$ ,  $H_1: \sigma_2^2 > \sigma_1^2$ 。

零假设  $H_0$  是指若检测区域为“未变化”区域, 则其背景方差  $\sigma_1^2$  应等于观察窗口方差  $\sigma_2^2$ 。备择假设  $H_1$  表示检测区域是“变化了”的区域, 即如果观察窗滑过运动对象区域, 那么观察窗口内的方差  $\sigma_2^2$  应该大于背景方差  $\sigma_1^2$ 。

由于两总体方差均服从方差为未知的正态分布, 该假设检验可用  $F$  检验来进行。设  $S_1^2$  和  $S_2^2$  分别是样本方差  $\sigma_1^2$  和  $\sigma_2^2$  的估计值,  $n_1$  和  $n_2$  为各自的样本数, 则随机变量  $\frac{S_2^2}{\sigma_2^2}$  和  $\frac{S_1^2}{\sigma_1^2}$  服从自由度分别为  $n_2 - 1$  和  $n_1 - 1$  的  $\chi^2$  分布。因此统计量:  $F = \frac{S_2^2/\sigma_2^2}{S_1^2/\sigma_1^2} = \frac{S_2^2\sigma_1^2}{S_1^2\sigma_2^2} \sim F(n_2 - 1, n_1 - 1)$ , 即  $F$  服从自由度为  $n_2 - 1$  和  $n_1 - 1$  的  $F$  分布。设定置信度为  $\alpha$ , 则若  $F = \frac{S_2^2}{S_1^2} > F_{(1-\alpha)}(n_2 - 1, n_1 - 1)$ , 则拒绝假设  $H_0$ , 否则接受  $H_0$ 。

在零假设条件下, 由于  $\sigma_2^2 = \sigma_1^2$ , 说明不必用真实的方差作为先验知识来计算  $F$ , 因此, 可设置一门限  $F_{th}$  来决定是否接受  $H_0$  判决, 若  $F < F_{th}$  则接受  $H_0$ , 否则拒绝  $H_0$ 。本文取置信度为  $10^{-2}$ , 窗口大小为  $5 \times 5$ 。因为该区域出现运动物体的概率较低, 选定距上下边界 10 个像素宽的区域作为背景区域, 估计其方差作为噪声方差。具体计算步骤如下:

(1) 首先计算得到连续两帧的帧差图像, 并取其绝对值。

(2)取图像上下左右离边框 10 pixel 的区域作为背景区域,计算其方差,作为背景方差。

(3)依次扫描每个像素点并以其为中心点,构造  $m \times m$  的观察窗口,计算窗口内的方差。

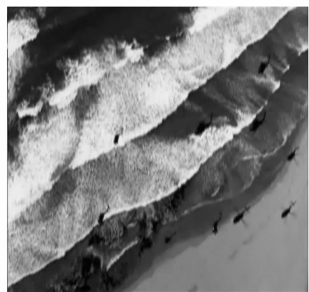
(4)用第 3 步得到的数除以第 2 步得到的数,再与一个预设的阈值比较,如果大于阈值,则把该像素点标记为运动像素点;否则标记为背景点。对以上处理结果进行简单的形态学和连通性检测就可以检测出最终的目标。

## 4 实验结果及分析

为了验证算法的有效性,以下是一组典型的仿真结果。视场中有 11 架飞机在复杂背景下运



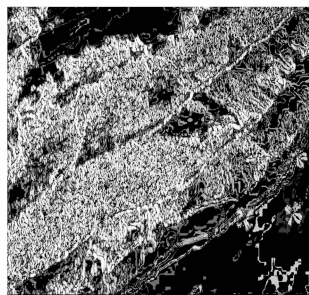
(a) 参考帧  
(a) Reference frame



(b) 当前帧  
(b) Current frame



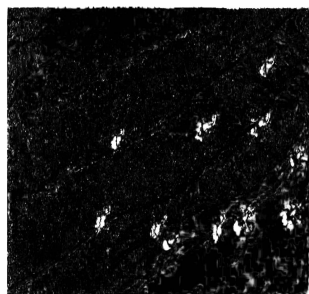
(c) 补偿后的当前帧  
(c) Current frame after compensation



(d) a 和 b 的差  
(d) Difference before compensation



(e) a 和 c 的差  
(e) Difference after compensation



(f) 假设检验的结果  
(f) Results of hypothesis test



(g) 最终检测结果  
(g) Final result

图 1 本文算法的目标检测结果

Fig. 1 Detection results based on the proposed algorithm

动,摄像机做复杂运动,背景本身基本不动,背景的运动是由于摄像机的运动引起的,而淹没在背景中的目标能独立运动。图 1 中可以看出,有些目标甚至很难用肉眼识别出来,普通的分割算法也无法检测出所有目标。原始图像的分辨率为  $640 \times 480$ ,调节角点算子参数得到 50 个特征运动矢量用来计算仿射参数,算法总耗时小于 20 ms。用更少的角点来计算仿射运动参数,算法的耗时可以进一步减少,目标检测的精度不会受到严重影响。仿真表明:20 个以上的角点都可以达到比较好的检测效果。

用补偿前后差分图像的峰值信噪比来测量补偿算法的性能,峰值信噪比公式定义如下:

$$\text{SNR} = 20 \log \frac{255}{\sigma}$$

其中 255 为 8 比特灰度图像的峰值,  $\sigma$  为噪声标准差。经计算,信噪比从 90.93 dB 提高到了

105.64 dB,提高了 14.71 dB。实验中还发现,检测结果对假设检验中的预设阈值的具体取值不敏感,这表明算法具有一定的鲁棒性。

## 5 结 论

本文充分利用了背景与目标的运动特性,运用运动补偿算法能较好地消除复杂背景下摄像机的运动带来的背景运动,抑制了背景,突出了目标。假设检验方法进一步区分了补偿后帧差图像的噪声和目标。针对复杂背景下目标的纹理复杂且特征明显的特点,采用特征点法计算相邻帧间的运动比块匹配法、光流法更有效。由于只使用了运动和灰度等低层特征,所以得到的目标不够完整,需要在检测过程中加入符合人类视觉的一些高层特征信息,这也是有待进一步研究的问题。

## 参考文献:

- [1] 韩鸿哲,王志良. 基于自适应背景模型的实时人体检测[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(4): 384-386.  
HAN H Z, WANG Z L. Real-time body detection based on adaptive background model [J]. *J. Beijing Univ. Sci. Technol.*, 2003, 25(4): 384-386. (in Chinese)
- [2] 孙辉,赵红颖. 基于光流模型的图像运动估计方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 443-447.  
SUN H, ZHAO H Y. Method of estimating image motion based on the optical flow model [J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2002, 10(5): 443-447. (in Chinese)
- [3] 王洪建,李志敏. 基于视频图像的车辆流量实时检测系统[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 222-226.  
WANG H J, LI Z M. Real-time measuring system based on vehicle flow video image [J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2005, 13(supp.): 222-226. (in Chinese)
- [4] 游安清,程义民. 基于背景运动补偿的红外运动分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 431-434.  
YOU A Q, CHENG Y M. Motion analysis and tracking infrared target based on compensation with background movement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 431-434. (in Chinese)
- [5] KIM J B. *Efficient region-based motion segmentation for video monitoring system* [D]. Kyungpook National University, 2001.
- [6] 朱辉,陈坚,李在铭,等. 一种视频对象生成方法的研究与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 15(1): 21-24.  
ZHU H, CHEN J, LI Z M, et al.. Study and implementation of a video object generation algorithm [J]. *Syst. Eng. Electron.* 2003, 15(1): 21-24. (in Chinese)
- [7] SHAPIRO L G, STOCKMAN G C. *Computer vision* [M]. NJ: Upper Saddle River, Prentice-Hall, 2001, 275-402.

作者简介:赖作镁(1978—),男,江西安远人,中国科学院光电技术研究所信息与信号处理专业博士研究生,主要从事目标检测与跟踪研究工作;E-mail: laizuomei888@163.com