

PTZ 摄像机监控中的运动目标检测^①裴银祥^② 周 兵^③

(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

摘 要 为实现摄像机运动下的安全监控,提出了一种不需要摄像机标定的运动目标检测算法。该算法分两个阶段进行,第一阶段使用图像跟踪技术估算每一帧的摄像机转动量,当转动量累加到阈值时,抓取当前帧作为背景并用累加转动量标记该帧,重复此过程获取所有背景帧序列并建立索引;第二阶段根据当前摄像机的转动量选取最接近的背景帧,利用快速图像配准算法配准当前帧和背景,采用背景差分检测出变化像素和运动对象。实验表明,该算法在普通 PC 上能够实现实时检测。

关键词 运动对象检测,相位相关,图像配准,背景减

0 引言

PTZ(Pan/Tilt/Zoom)摄像机由于能提供更广阔的视野和更多的细节而被广泛用于视频监控和运动目标跟踪。摄像机运动情况下的运动目标检测是安全监控中的难点之一。动态背景下主要的检测和跟踪算法有光流法^[1,2]和运动背景差分方法^[3,4]等。光流法可以完整地检测到运动物体的轮廓,但是它的计算复杂度很高并且对噪声很敏感,难于实时处理。运动背景差分方法通过连续的多幅图像配准或者运动背景差分算法^[3,4],将动态背景下的运动目标检测问题变成了静态背景下的目标检测物体,但这类算法复杂度更高,难于实用。在大多数视频监控中,摄像机一般固定或者只有随云台转动和倾斜运动,由于背景是已知的,所以仍能使用背景差分算法检测运动对象。文献[5]提出了一种摄像机运动情况下的运动对象检测方法,通过在云台转动和倾斜运动路径上每隔一定角度抓取一个视频帧作为背景,当进行运动对象检测时,首先根据当前视频帧近似的转动和倾斜角,计算出最接近的背景帧,然后利用图像跟踪技术^[6]估计当前帧的运动参数,最后利用背景差分算法检测出运动对象。该方法的优点是速度快,缺点是需要摄像机标定。摄像机标定需要

具备一定的实验条件,标定过程也比较复杂,一般用户不易实现。针对这种情况,本文提出了一种不需要摄像机标定的运动对象检测算法。

1 算法概述

本文算法大致分预处理阶段和正式检测阶段两个阶段:第一阶段完成背景获取和建立索引;第二阶段根据摄像机当前位置选取背景帧,利用背景减算法发现运动像素。参考图 1 对该算法描述如下:

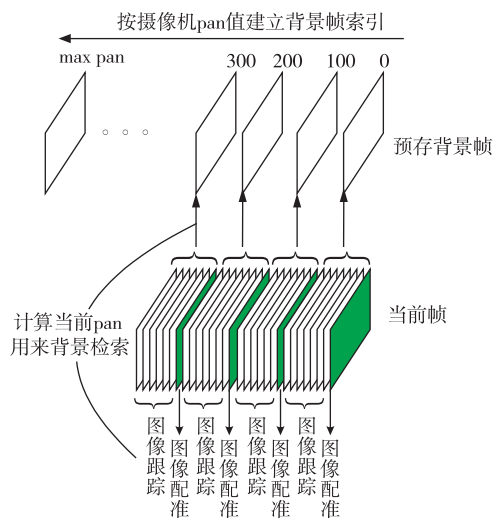


图 1 运动对象检测

① 863 计划(2008AA01A315)资助项目。

② 男,1989 年生,硕士;研究方向:视频监控;E-mail:yinxianpei@163.com

③ 通讯作者,E-mail:iebzhou@zhu.edu.cn

(收稿日期:2013-04-16)

第一阶段,获取背景帧并建立背景索引。这一步主要使用图像跟踪技术计算每一背景帧的摄像机运动参数(摄像机运动参数是指表示摄像机姿态的 pan/tilt/roll 值)。在实用监控系统中,一般摄像机只有 pan 转动,因此本文仅考虑这种情况。先向摄像机发复位命令,然后控制摄像机从初始角度开始,每采集一帧图像计算一次相邻图像帧之间的运动参数,并根据该运动参数中的 x 方向的平移分量估计 pan 的变化量,每当摄像机 pan 的累加值变化超过一定的数值时抓取一幅背景帧,并用当前的 pan 值标记该背景帧,即该背景帧的索引值。

第二阶段,运动对象检测。开始检测前,还是先将摄像机复位,选取第一幅背景帧作为当前背景;摄像机启动后,每采集一帧图像进行一次当前图像与当前背景帧之间的运动参数估计,该运动参数有两个用途,一是用于按背景帧矫正当前帧,从而能够使用背景减算法发现运动像素,二是用来更新摄像机的运动参数 pan 值,确定是否需要更换背景帧。当背景不需要更换时,下一次当前帧和背景之间运动参数的估计可以利用上一次估计的结果快速计算,因此称为图像跟踪。当新的背景更换进来时,第一次计算背景帧和当前帧之间的运动参数称为图像配准,通过配准得到运动参数,作为随后的图像运动参数跟踪的初始化参数,一直到新的背景帧更换进来。

2 背景 的表示与索引

虽然从云台控制器可以获取摄像机的当前状态,但要获得精确的状态值需要停止云台转动,因为当云台运动时由于控制结构机械误差和通信延迟,获得的状态值不是当前最新值。本文的监控背景帧的表示类似参考文献[5],即通过在云台转动和倾斜运动路径上每隔一定角度抓取一个视频帧作为背景,所不同的是背景帧的索引,本文利用图像跟踪技术估算摄像机的转动参数,不需要摄像机的提前标定。

$I(p, t)$ 表示像素位置 $p = (x, y)^T$ 在 t 时刻的亮度值, $R = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 表示 N 个图像点。相邻图像帧之间的运动关系使用一个参数运动模型函数 $f(p, \rho)$ 表示,其中 $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$ 称为运动参数矢量(n 为运动参数个数),用 $\rho(t)$ 表示 t 时刻的运动参数,根据亮度不变性假设,即 t_0 时刻以后的各帧图像亮度不变,则有:

$$I(p, t_0) = I(f(p, \rho(t)), t) \quad (1)$$

当前时刻的运动参数通过目标函数

$$O(\rho) = \sum_{p \in R} (I(p, t_0) - I(f(p, \rho(t)), t))^2 \quad (2)$$

最小化求得。

采用矢量表示,图像亮度不变性假设式(1)可以简写成

$$I(\rho(t), t) = I(0, t_0) \quad (3)$$

假定在任意的时刻 $t > t_0$, 目标图像以 $\rho(t)$ 描述,则下一时刻 $t + \tau$ 目标图像可用 $\rho(t + \tau) = \rho(t) + \sigma\rho$ 描述。参数求解目标函数可以简写为

$$O(\rho) = \|I(\rho(t) + \delta\rho, t + \tau) - I(0, t_0)\|^2 \quad (4)$$

当 $\sigma\rho$ 足够小时,上式用 Taylor 级数展开成

$$I(\rho + \sigma\rho, t + \tau) = I(\rho, t) + H(\rho, t)\delta\rho + \tau I_t(\rho, t) + h. o. t \quad (5)$$

其中 $h. o. t$ 是高阶项, H 称为 I 的关于 ρ 的 Jacobian 矩阵,它是一个 $N * n$ 的偏导数矩阵

$$H(\rho, t) = [I_{\rho_1}(\rho, t) I_{\rho_2}(\rho, t) \dots I_{\rho_n}(\rho, t)] \quad (6)$$

将式(5)代入式(4)中并忽略高阶项得

$$O(\rho) \approx \|H\sigma\rho + I(\rho, t + \tau) - I(0, t_0)\|^2 \quad (7)$$

采用线性回归求解上述等式得最小平方解:

$$\delta\rho = -(H^T H)^{-1} H^T B \quad (8)$$

其中 $B = I(0, t) - I(\rho, t + \tau)$, $\delta\rho$ 为所求结果,即相邻两帧运动参数的变化。上式成立的条件是 $H^T H$ 必须是满秩的,否则目标图像的结构不足以唯一确定运动参数。

用 (X, Y, Z) 表示初始摄像机坐标系中的一个三维坐标点,其在二维图像坐标系的成像点为 (u, v) ,由针孔成像原理

$$\frac{u}{x} = \frac{v}{y} = \frac{f}{z} \quad (9)$$

表示成齐次坐标形式

$$\begin{pmatrix} wx \\ wy \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中 f 是镜头焦距,若摄像机分别绕坐标轴 (x, y, z) 旋转 α, β, γ 角度,点 (X, Y, Z) 在新摄像机坐标系的坐标 (X', Y', Z') ,二者之间的关系为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (11)$$

当摄像机运动较小,即 α, β, γ 都很小时,由三角函数近似公式($\sin x \approx x, \cos x \approx 1$),上式简化为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (12)$$

设新图像坐标为 (x', y') , 则它与 (x, y) 的关系由式(11)、(12)可得

$$\begin{pmatrix} w'x' \\ w'y' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{f'wx}{f} \\ \frac{f'wy}{f} \\ \frac{f'w}{f} \end{bmatrix} \quad (13)$$

常用的运动参数估计模型为 8 参数投影变换模型^[7],此模型函数 f 使用 2D 齐次坐标,表示为

$$\mathbf{p}' = f(\mathbf{p}, \boldsymbol{\rho}) = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 & m_5 \\ m_6 & m_7 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其非其次坐标表示为

$$\begin{cases} x' = \frac{m_0x + m_1y + m_2}{m_6x + m_7y + 1} \\ y' = \frac{m_3x + m_4y + m_5}{m_6x + m_7y + 1} \end{cases} \quad (15)$$

当 $m_0 = m_4, m_1 = -m_3$ 时称为 4 参数模型,8 参数模型包含较多的自由参数,除非初始结果非常接近最优解,否则参数求解很容易陷入局部最优解循环。为了实现优化,本文采用 4 参数模型。采用 4 参数模型,式(13)可以写成

$$\begin{cases} x' = m_4x + m_3x + m_1 \\ y' = -m_3y + m_4y + m_2 \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} m_1 = -\frac{f'w}{fw'\beta} \\ m_2 = \frac{f'w}{fw'\alpha} \\ m_3 = \frac{f'w}{fw'\gamma} \\ m_4 = \frac{f'w}{fw'} \end{cases} \quad (17)$$

显然, α, β, γ 的变化分别反映在 m_1, m_2, m_3 中,如果在监控过程中摄像机的焦距保持不变,则 $\frac{f'w}{fw'} \approx 1$, 这样能够根据 m_1, m_2, m_3 的值近似估计出

α, β, γ 的值,即 m_1, m_2, m_3 的累加值可以作为背景帧的近似索引。

3 相位相关法图像配准

在运动对象检测阶段,每当重新选择一幅背景图像时,我们使用速度相对较快的基于相位相关^[7]思想的图像配准算法计算摄像机的初始运动参数。

设 $f_2(x, y)$ 为图像 $f_1(x, y)$ 在 x 和 y 方向分别平移 x_0 和 y_0 后的图像,即

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (18)$$

令 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的傅里叶变换^[8],由式(8)得

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} \quad (19)$$

图像的互功率谱^[9,10]为

$$\frac{F_1^*(u, v) F_2(u, v)}{|F_1^*(u, v) F_2(u, v)|} = e^{-j(u x_0 + v y_0)} \quad (20)$$

式中 $F_1^*(u, v)$ 为 $F_1(u, v)$ 的复共轭。互功率谱的傅里叶逆变换为一个二维脉冲函数^[11,12] $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 。相位相关算法就是找到 δ 函数的位置来确定平移参数 x_0 和 y_0 。

4 算法详细过程

4.1 背景生成算法

在摄像机复位后,启动摄像机每隔一定角度生成一副背景帧,间隔角度的确定以相邻两幅背景帧重叠像素数不少于总像素数的 2/3 为宜。为简单起见,本文假定摄像机仅做 pan 运动。背景生成算法步骤如下:

步骤 1: 向云台控制器发送复位命令,等待云台复位完成。

步骤 2: 运动参数初始化 $t = 0, \boldsymbol{\rho}(t) = (m_1, m_2, m_3, m_4) = (0, 0, 0, 0)$; pan 初值 $S = 0, S_{old} = 0$; 捕获一帧图像 $I(t)$, 保存运动参数 $\boldsymbol{\rho}(t)$ 和当前图像 $I(t)$ 作为第一幅背景帧。

步骤 3: 捕获下一帧图像 $I(t + 1)$ 。

步骤 4: 计算运动参数变化 $\sigma\boldsymbol{\rho} = -(\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'(I(t + 1) - I(t)); S = S + \sigma m_1$ 。

步骤 5: 更新运动参数 $\boldsymbol{\rho}(t + 1) = \boldsymbol{\rho}(t) + \sigma\boldsymbol{\rho}$ 。

步骤 6: 如果 $|S - S_{old}| \geq \frac{1}{3}W_{size}$ (W_{size} 为图像帧宽度),保存运动参数和当前图像 $I(t + 1)$ 作为背景帧; $S_{old} = S$ 。

步骤 7: 如果 $\text{sign}(\delta m_1) = \text{sign}(S)$ (注: sign 为符号检测函数) 转步骤 3, 否则结束。

4.2 运动对象检测算法

首先估计摄像机当前状态 (pan、tilt), 以此为参数选择合适的背景帧。假定摄像机仅有 pan 运动, 检测算法描述如下:

步骤 1: 向云台控制器发送复位命令, 等待云台复位完成, 捕获一帧图像 $I(t)$ 。

步骤 2: 摄像机运动参数初始化 $\rho(t) = (m_1, m_2, m_3, m_4) = (0, 0, 0, 0)$; 读取首幅背景帧 I_b ; 初始 pan 值 $S = 0$ 。

步骤 3: 捕获下一帧图像 $I(t+1)$ 。

步骤 4: 计算摄像机运动参数变化 $\sigma\rho = -(H'H)^{-1}H'(I(t+1) - I(t))$ 。

步骤 5: 更新运动参数 $S = S + \sigma m_1$ 。

步骤 6: 根据 S 检索最合适背景帧, 判断是否需要更换背景, 如果需要更换则读取新背景赋予 I_b ,

否则转步骤 8。

步骤 7: 使用相位相关技术估计运动参数初始点 $\rho_0, \rho_0 = \text{esitmate}(I(t+1), I_b)$, 转至步骤 10。

步骤 8: 估计运动参数 $\sigma\rho = -(H'H)^{-1}H'(I(t+1) - I(t))$ 。

步骤 9: 更新运动参数 $\rho(t+1) = \rho(t) + \delta\rho$ 。

步骤 10: 使用背景减检测运动对象, 转步骤 3。

5 实验及结果分析

实验摄像机为一台 PTZ 的网络摄像机, CIF 图像尺寸。实验计算机为 Intel E6700 3.2GHz/2GB RAM。设当摄像机转动累加值达到图像 1/4 宽度时, 抓取一幅背景帧。图 2 中最上一排图像为背景生成算法所生成的部分背景序列。

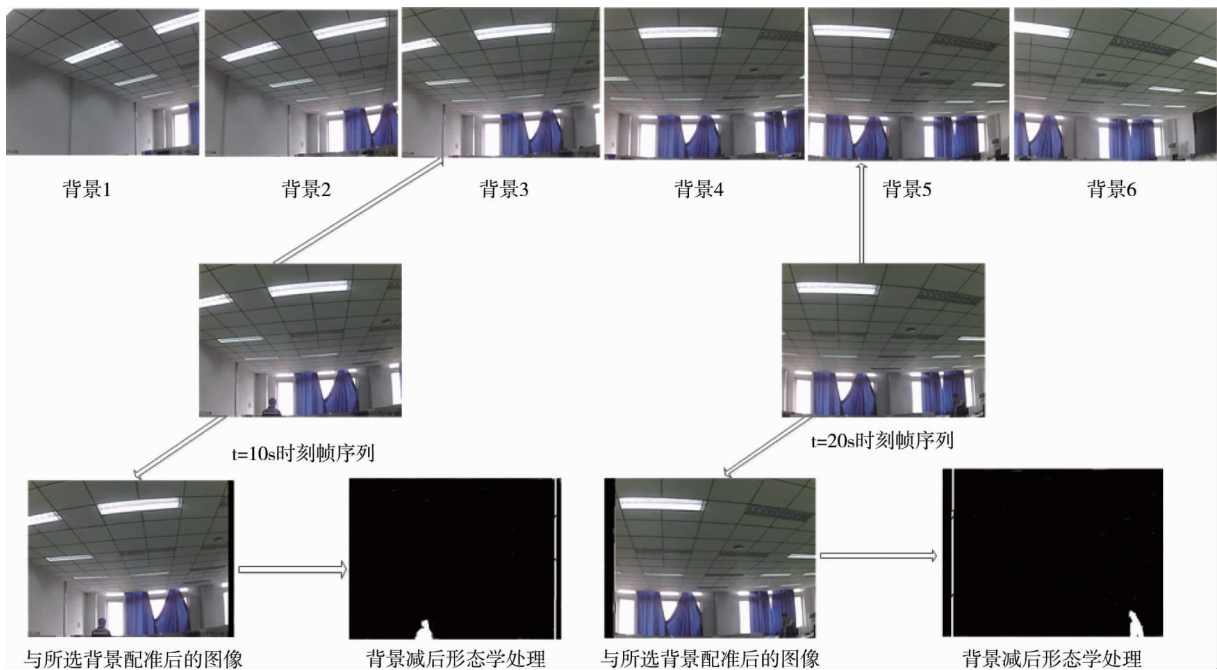


图 2 运动检测算法实验流程和结果

当开始运动对象检测时, 首先根据摄像机的运动参数求出 pan 值, 从而找到背景帧的索引, 找到的即是和当前帧最为相近的背景帧, 然后用图像配准方法将背景帧和当前帧配准, 然后利用背景差分算法检测运动对象。图 2 中间两幅图分别为 $t = 10s$ 和 $t = 20s$ 两个时刻的当前帧。第三排图像分为两组, 每组包括两张图像, 左边图像是当前帧和索引到的背景经相位相关配准之后的结果, 右边为配准后

的图像与背景图像进行背景差分运算后再进行尺寸滤波后的结果。算法平均每帧计算时间大约 38ms, 满足实用性要求。

6 结论

本文提出的这种无需摄像机标定的背景索引和摄像机运动跟踪算法, 采用运动参数 pan 值来索引

背景帧并用背景减算法来检测运动对象,能够达到在运动背景下检测运动目标的目的。算法充分利用了背景减算法速度快、检测效果好的优点,满足实用系统的要求。另外,需要指出的是,本文算法没有考虑到背景的更新问题,背景更新是运动目标检测算法的很重要的一部分,未来的工作将研究一种合适的背景更新策略,使之适于更复杂的背景下的运动目标检测。

参考文献

- [1] Kanawathi J, Mokri S S, Ibrahim N, et al. Motion detection using Horn-Schunck algorithm and implementation. In: International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Selangor, Malaysia, 2009. 83-87
- [2] Schreiber D. Motion detection generalizing the Lucas-Kanade algorithm for histogram-based tracking. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(7): 852-861
- [3] 周许超,屠大维,陈勇等. 基于相位相关和差分相乘的动态背景下运动目标检测. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 980-983
- [4] 陆军,李凤玲,姜迈. 摄像机运动下的动态目标检测与跟踪. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(8): 831-835
- [5] Dellaert F, Collins R T. Fast image-based tracking by selective pixel integration. In: ICCV99 Workshop on Frame-Rate Applications, Corfu, Greece, 1999. 1-22
- [6] Li X H, Chen Q L, Chen H Y. Detection and tracking of moving object based on PTZ camera. In: IEEE 5th International Conference on Advanced Computational Intelligence, Nanjing, China, 2012. 493-497
- [7] Szeliski R. Video mosaics for virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, 16(2): 22-30
- [8] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1266-1271
- [9] Rajaguru D, Manimuthu S D, Rajkamal A, et al. Moving object detection using drawpad. In: International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, Tamil Nadu, India, 2012. 39-42
- [10] Do B H, Huang S H. Dynamic background modeling based on radial basis function neural networks for moving object detection. In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Barcelona, Spain, 2011. 1-4
- [11] Kim J, Ye G, Kim D. Moving object detection under free-moving camera. In: IEEE International Conference on Image Processing, Hong Kong, China, 2010. 4669-4672
- [12] Noh S W, Oh T H, Kweon I S. Moving object detection under moving camera by rank minimization. In: International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Daejeon, Korea, 2012. 586-587

Moving object detection in PTZ camera surveillance

Pei Yinxiang, Zhou Bing

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

Abstract

The moving object detection under free-moving camera was studied, and a new moving target detection algorithm without camera calibration was presented to realize the video surveillance with a PTZ camera. The algorithm is divided into two stages. In the first stage, background sequences were snapped and indexed. Camera motion parameters were estimated through tracking each background image. Once the camera pan parameter accumulation was up to a threshold, a background frame was captured and indexed with the pan value. In the second stage, the moving object detecting was carried out. Firstly, the closest background frame was chosen with the camera's current pan value, and then, the motion parameters were estimated between the current frame and the background picture based on the image registration algorithm, which was used as an initial parameter to track the camera and detect moving objects until a new background frame was replaced. The experimental result showed that the proposed algorithm can be applied to real-time moving object detections with common PCs.

Key words: moving object detection, phase correlation, image registration, background subtraction