

文章编号:1007-2780(2016)10-0998-08

基于云台摄像机的快速移动人群的检测与跟踪

常 运^{1,2*}, 杜玉红^{1,2}, 焉台郎^{1,2}, 赵 地^{1,2}, 李 兴^{1,2}

(1. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

摘要:为了实现校园的安全监控,提出了基于云台摄像机的快速移动人群的检测与跟踪算法。介绍了云台摄像机用于校园安全监控的基本构成。为了更好地实现云台摄像头对于移动人群的检测与跟踪,建立了基于现实的精确摄像机模型,提出了摄像机自旋转角度约束的摄像机模型。通过最新的核相关滤波器跟踪算法(KCF)实现对运动着的人群检测与跟踪。运用 Matlab 仿真实验比较该方法和卡尔曼滤波跟踪算法,选择最优方法和相关滤波器跟踪算法来实现检测与跟踪要求。结果表明:相比较于传统的卡尔曼滤波跟踪算法,KFC 算法的跟踪精度优于传统方法,精度多数情况下能达到 90%以上,高于卡尔曼滤波跟踪算法的 60%,检测与跟踪效果达到要求。

关 键 词:云台摄像机;精确模型;目标检测与跟踪;核相关滤波器算法

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163110.0998

Detection and tracking of fast moving camera based on the PTZ camera

CHANG Yun^{1,2*}, DU Yu-hong^{1,2}, YAN Tai-lang^{1,2}, ZHAO Di^{1,2}, LI Xing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Electrical Equipment Technology,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to realize the campus safety monitoring, we put forward the detection and tracking of fast moving crowd algorithm based on the PTZ camera. Camera for basic construction of campus safety monitoring is introduced. In order to achieve PTZ camera for better detecting and tracking, the mobile population was established based on the reality of precision of the camera model, the camera rotation angle constraint, the camera model. Detection and tracking of moving people are implemented by using the latest kernel correlation filter tracking algorithm (KCF). The Matlab simulation experiment is used to compare the proposed method and Calman filter tracking algorithm, and the optimal

收稿日期:2016-06-24;修订日期:2016-07-15.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 预)(No.2010CB334711);国家自然科学基金项目(No.51205288);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(No.201510058053)

Supported by National Key Basic Research and Development Plan (973 pre) (No.2010CB334711); National Natural Science Foundation of China(No.51205288); Project Supported by National College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program(No.201510058053)

* 通信联系人, E-mail:691815779@qq.com

method is selected to detect and track the kernel correlation filter tracking algorithm. The results show that the method is feasible, compared with the traditional Kalman filter tracking algorithm, the tracking accuracy of KFC algorithm is superior to the traditional methods. The accuracy in most cases can reach more than 90%, higher than 60% of the Kalman filter tracking algorithm. Testing and track performance meet the requirements.

Key words: PTZ camera; precise model; target detection and tracking; KCF

1 引 言

近年来,随着计算机视觉领域的发展,目标检测与跟踪已广泛应用于实际生活当中,例如视频监控、机器人视觉和人机交互等多项领域^[1]。虽然现阶段相关科研人员已经提出多种跟踪算法,比较成熟的算法包括卡尔曼滤波、粒子滤波和 Mean Shift 等算法^[2-6]。但是目标跟踪易受到光照条件变化、目标无规律运动和目标物受到遮挡等因素的影响,需要指出的是 Mean Shift 算法虽然能克服上述有点,但是当目标尺度有所变化时,跟踪就会失败,所以精确目标跟踪仍是一项艰难的挑战。

在当前的安防领域,随着人们安防意识的提高和安防技术的高速发展,视频监控根据在安防系统中所扮演的角色越来越重要,用户不仅对图像能够看清楚提出了需求,同时希望能够看到更广泛的监控场景,虽然全景摄像头发展至今,但是视野的扩大却是以牺牲监控距离为代价,不满足本课题监控要求。在此背景下,云台摄像机成为校园安全监控的首选。校园道路上每天都会有大

量的人群出现,具有流动性大、运动不规范和衣着颜色多变等特征。本课题研究用到的云台摄像头有两个自由度,拍摄范围广,存在不同焦距下的不同场景下的细节信息,能满足监控要求。基于云台摄像机的目标检测与跟踪是指摄像机采集到的图片信息通过视频采集卡传送到主机,通过本算法对获取的图片做进一步的预处理、彩色图像分割和模式识别,最后对运动的目标物进行检测、分割和跟踪^[7-9],过程反馈给执法人员。要想使摄像机准确地实现对目标的快速检测,需要提前了解摄像头的旋转方向,才能确保快速、准确的检测到目标物。而本文用到的核相关滤波器相关算法能够适应跟踪环境的变化,提高了目标检测与跟踪的准确性和稳定性。

2 校园道路监控构成

本次监控采用的是 SONY 公司生产的 EVI-D100P 型号,云台摄像机是 CCD 摄像机、变焦变倍镜头、全景云台组成的一个系统,摄像头的视频信号采用国家电视标准委员会(NTSC)方式,摄像机的特征见表 1。

表 1 摄像头特征参数

Tab.1 Camera feature parameters

视频信号	摄像传感器	有效像素	水平分辨率	镜头	
NTSC	1/4type Super HAD CCD	768(H)×494(V)	470tv lines(Wide end)	10×optical Zoom, 40×with Digital Zoom,f=1.3-3.1	
水平视角	Pan/Tilt	视频输出	电源	外形尺寸	重量
6.6°to 65°	Horizontal±100°, Vertical±25°	VBS,Y/C	DC 10.8-13V	113(W)×120(H) ×132(D) mm	860g

2.1 构件组成

本摄像机的 0.25 in(1 in=2.54 cm)的 CCD

具有近 38 万个有效像素,为彩色视频摄像头,可以用于拍摄高分辨率的图像,而且能够处理镜像、存储的静止图像、彩色图像、正负片、加强对比度

等多种图像效果。摄像机的镜头具有 40 倍变焦, 内置宽视场角转换镜头, 同时具有高速、旋转安静等特点。摄像头的速率可达 30 frame/s, 可快速稳定地自动聚焦及自动曝光来控制背光补偿, 同时适于用光线发生变化和光线差的条件下。

2.2 工作原理

用于学校监控的摄像头采集到的视频通过连接传送到电脑上, 其工作系统框架和工作环境如图 1 所示。



(a) 工作系统框架

(a) Work system framework



(b) 摄像头工作环境

(b) Camera work environment

图 1 工作系统框架与环境

Fig.1 System framework and work environment

当云台摄像机正常工作时, 视频图像采集卡对摄像机所输入的视频数据进行实时的采集, 并提供与计算机的高速接口。视频采集卡是进行视频图像处理必不可少的硬件设备, 通过采集卡把摄像机拍摄的视频信息从摄像机上转存到主机中, 再对目标物进行检测与跟踪。此时, 当目标物即将脱离摄像头视线时, 再通过云台解码器控制摄像机沿目标物的方向旋转, 根据目标物的远近改变镜头的焦距、光圈大小等参数, 通过控制云台的转动来配合摄像机的目标采集, 直至目标物脱离摄像机的观察范围。

本文主要系统是由云台摄像机的转动和图像处理算法等相关内容组成的, 当摄像机采用本算法进行移动人群的监控时, 随着目标物的移动, 目标物在镜头中的位置发生改变, 此时通过控制云台和

摄像机的转动, 使得目标物尽量出现在屏幕合理的位置。整个系统的结构流程图如图 2 所示。

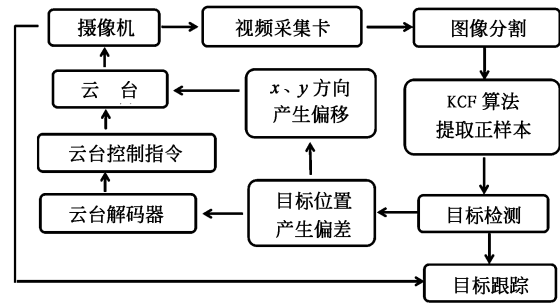


图 2 系统结构流程图

Fig.2 Flow chart of system structure

3 云台摄像机的数学模型

在理想的云台摄像机中, 转台的水平旋转轴 (Pan 轴) 与竖直旋转轴 (Tilt 轴) 和摄像机的光轴两两相互垂直且相交于一点 O , 三者满足笛卡尔坐标系, 摄像机坐标系的 X 轴、 Y 轴分别和 Tilt 轴、Pan 轴重合, 其中 Z 轴是摄像机的光轴。但是在实际情况中, 由于加工等误差的存在, 旋转轴的交点和摄像机的坐标系并不重合。如果按照理想的摄像机模型来进行云台摄像机的控制策略, 势必会对云台摄像机的控制产生影响, 也会对目标物的检测和跟踪产生影响^[10]。现提出精确的云台摄像机模型。Pan 轴和 Tilt 轴不相交且不垂直, 建立 Pan-Tilt 坐标系, 如图 3 所示。令新建坐标系中的 Pan 轴与摄像机坐标系中的 Y_t 轴重合, Z_t 轴与 Pan 轴和 Tilt 轴分别垂直, 交点分别为 O_p 和 O_t , 现过 O_p 点取 X_t 轴与 Y_t 轴和 Z_t 轴同时垂直, 满足右手定则。实际情况中云台结构中

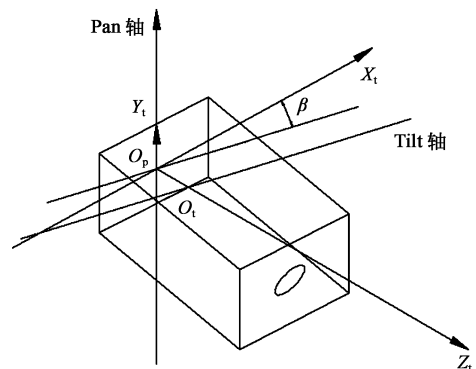


图 3 精确云台摄像机模型

Fig.3 Accurate camera model

的 Pan 轴与 Tilt 轴不相交且不严格垂直, Tilt 轴投影到 X_iY_i 平面的投影与 X_i 轴之间的夹角为 β 。

对目标物进行跟踪时, 因为目标物处于运动状态, 尽量使目标物处于摄像机的视野范畴内, 让目标物始终处于镜头的合理区域。若此时位置在图像中处于一个边缘位置, 那么就得控制摄像机做绕 Pan 轴和 Tilt 轴旋转的运动, 使得目标物的坐标位置处于图像的合理位置处, 这时坐标的变化量 $(\Delta x, \Delta y)$ 与摄像机旋转的角度 $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ 有关。现讨论 $\Delta\theta, \Delta\varphi$ 和 $\Delta x, \Delta y$ 之间的关系。

假设摄像机捕捉到图片的视野水平角度和垂直角度分别为 1 和 φ , 成像时摄像机焦距为 f 。图像水平方向长度为 L 个像素, 垂直方向长度为 h 个像素。其中只有 f 无法测量。现以面 X_iY_i 为例, 如图 4 所示。

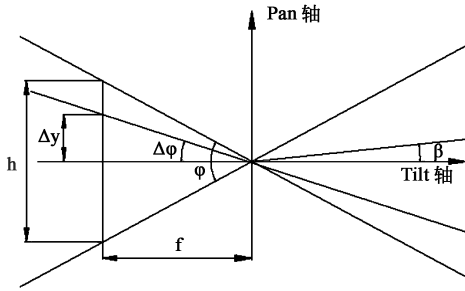


图 4 摄像机偏移量和转角的关系

Fig. 4 Relationship between camera offset and rotation angle

先假设摄像机的旋转轴是严格垂直的, 即 Pan 轴与 Tilt 轴是相交且相互垂直的, 得:

$$\begin{cases} f \times \tan(\varphi/2) = h/2 \\ f \times \tan\Delta\varphi = \Delta y \end{cases} \quad (3)$$

解得,

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{2\Delta y \tan(\varphi/2)}{h} \quad (4)$$

当旋转角度较小时, 可近似认为 $\tan(\varphi/2) \approx \varphi/2$ 则:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta y}{h} \varphi \quad (5)$$

在精确的摄像机模型中, 由于 Tilt 轴投影到 X_iY_i 面与 X_i 轴之间的夹角为 β , 于是得

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta y \tan(\varphi/2)}{h \tan(\varphi/2 + \beta)} \varphi \quad (6)$$

式中: Δy 为目标物在镜头中 y 轴方向的变化量,

$\Delta\varphi$ 为 y 轴方向的旋转角度。

同理亦可得 $\Delta\theta$ 与 Δx 之间的关系。

4 KCF 跟踪算法

KCF 算法是一种检测跟踪的跟踪算法, 其核心思想是将跟踪目标区域进行循环位移, 以跟踪对象为正样本, 周围其余环境均为负样本, 即正样本为 1, 负样本为 0, 以此来构造训练判别分类器^[11]。是该样本标记方法对于每个负样本的权重能很好的反映出来, 在此使用根据样本中心附近目标的远近分别赋值 $[0, 1]$ 。距离目标越近, 值越趋近于 1, 反之值趋近于 0。实验证明能很好的解决上述问题。本跟踪方法通过循环偏移构建出了分类器的训练样本, 选取相似度最大的候选区域为新的跟踪目标从而使得数据矩阵变成了一个循环矩阵。然后基于循环矩阵的特性把问题的求解变换成了离散傅里叶变换域, 从而避免了求逆矩阵的过程, 降低了多个数量级的算法复杂度, 大大提高了处理速度。

4.1 引入核函数

KCF 算法中的分类器训练过程需要一张为 $1 \times n$ 的向量目标区域的样本图像 x 。在分类器的训练过程中, KCF 并不严格区分正样本和负样本。样本训练过程实际是一个正则化最小二乘问题^[12-13]。给定一些训练样本及回归值 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots\}$, 这样训练的最终目标是找到一个函数 $f(z) = \omega T_z$, 满足下列残差函数最小

$$\min_{\omega} \sum_i^n |f(X_i) - y_i|^2 + \|\lambda \omega\|^2 \quad (7)$$

即找到最优解 ω , 式中, λ 是正则化参数, 防止过拟合。

以上是在线性回归的情况下, 在引入核函数的情况下, 分类器的性能会更好。核函数的引入是把特征空间映射到一个高维的空间, 假设该映射函数为 $\varphi(x)$, 分类器的权重向量为:

$$\omega = \sum_i \alpha_i \varphi(X_i) \quad (8)$$

其中: $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots\}$, α_i 为对应训练样本 X_i 的系数, $\varphi(x)$ 是将训练样本 x 映射到高纬度特征空间的函数^[14-15]。核函数间的乘积结果构成的矩阵为:

$$K_{ij} = \kappa(x_i, x_j) \quad (9)$$

最终的回归函数变为:

$$f(z) = \omega^T z = \sum_{i=1}^n \alpha_i \kappa(z, x_i) . \quad (10)$$

4.2 快速训练

基于核函数下的岭回归的解为:

$$\alpha = (K + \lambda I)^{-1} y , \quad (11)$$

其中: K 为核函数矩阵, 见式(9)则上式得求解可转换到 DFT 域, 即:

$$\hat{\alpha}^* = \hat{y} / \hat{k}^{xx} + \lambda , \quad (12)$$

其中: k^{xx} 是核函数矩阵 K 的第一行元素的向量。

4.3 快速检测

KCF 对于新输入的图像 z 计算回归函数(10)时, 计算量大且耗时, 需要对图像 z 进行构建测试样本和训练样本的核函数来求解, 建立的核函数矩阵如下:

$$K^z = C(k^{xz}) , \quad (13)$$

其中: k^{xz} 是这个循环矩阵的第一行的向量。那么这样可以同时计算基于测试样本 z 的循环偏移构成的所有测试样本的响应, 并且根据循环矩阵的性质得:

$$f(\hat{z}) = C(\hat{f}^{xz}) * \hat{a} . \quad (14)$$

可知 $\hat{f}(\hat{z})$ 是 $1 \times n$ 的向量, 其元素值对应所有候选区域成为跟踪目标的概率值, 该向量取得最大值的元素所对应区域即为跟踪目标。本算法的框架如图 5 所示。

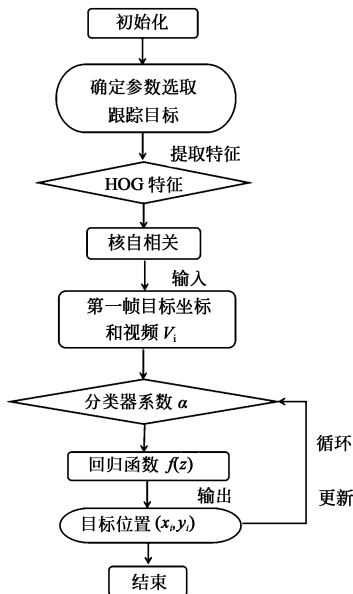
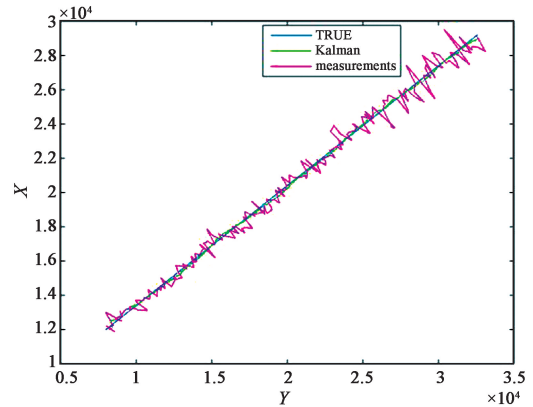


图 5 KCF 算法的框架

Fig.5 Framework of KCF algorithm

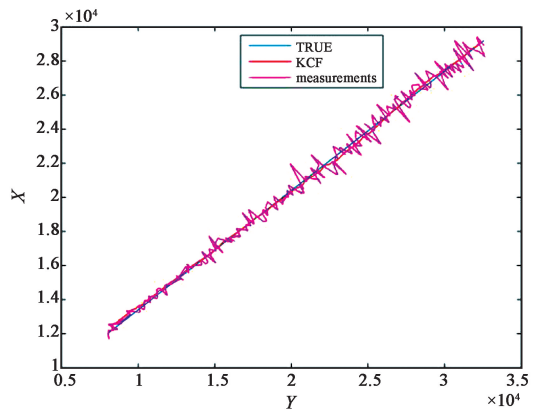
5 算法的应用

为验证该算法的可行性和优越性, 首先通过 Matlab 对本文的算法和传统的卡尔曼滤波目标跟踪算法进行仿真, 比较二者在相同原始轨迹下的跟踪轨迹, 算法的参数保持不变, 比较二者的中心距离偏移量, 选择收敛性更强的算法。首先是运用卡尔曼滤波算法来进行目标的模拟跟踪, Matlab 运行仿真结果见图 6。



(a) 卡尔曼滤波轨迹跟踪结果

(a) Calman filter tracking results



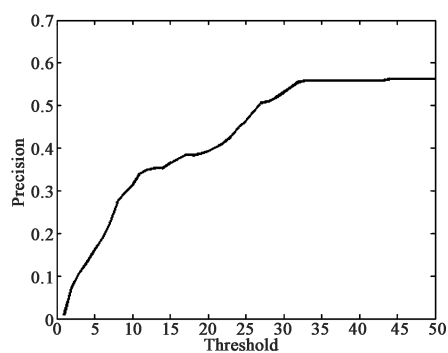
(b) KCF 算法轨迹跟踪结果

(b) KCF algorithm for trajectory tracking results

图 6 卡尔曼滤波和本文算法跟踪仿真结果

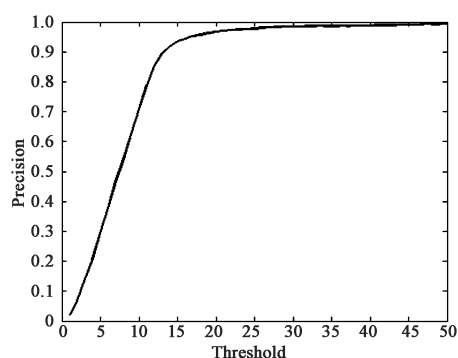
Fig.6 Simulation results of Calman filter and the algorithm of this paper

在实验中, 目标轨迹为近似匀速直线运动, 扫描周期为 1 s。从图 6(a)中可以看出, 卡尔曼滤波算法基本上能跟踪目标物, 前期轨迹跟踪性较强, 出现的波动较小, 但是中期和后期出现较大的



(a) 卡尔曼滤波精度曲线

(a) Kalman filtering accuracy curve



(b) KCF 精度曲线

(b) KCF accuracy curve

图 7 精度曲线变化

Fig.7 Variation of accuracy curve

波动,收敛性不强。而本文算法轨迹在跟踪的全过程都保持较稳定的跟踪状态,锯齿变化较小且较密集,跟踪效果更明显。KCF 算法比卡尔曼滤波算法有更高的轨迹跟踪准确性,同时收敛性更好,随着时间的推移,本方法的稳定性越来越高且趋于稳定。跟踪精度是通过跟踪结果和目标真实位置之间的欧氏距离衡量的。当测量位置误差小于位置误差阈值时,则认为跟踪结果是符合要求的。从图 7 中可以看出,随着位置误差阈值的增大,跟踪精度也增大,但是本算法跟踪精度达到 90% 以上,明显优于卡尔曼滤波算法跟踪精度的 60%。对于快速移动的物体的跟踪有更好的跟踪效果,不容易跟丢。现在为了验证本文算法的有效性,在 Visual Studio 环境下编写程序,采用本设备在某一广场录制一段视频,给出了实验结果。图 8 为一段对复杂环境下的周围环境发生变化的对一个人的跟踪视频。



(a) 强光条件下

(a) Under strong light conditions



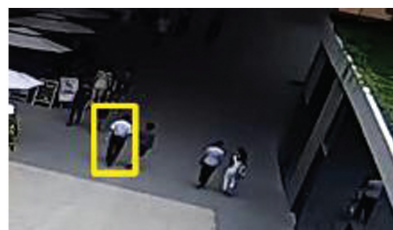
(b) 遮挡物干扰

(b) Occlusion interference



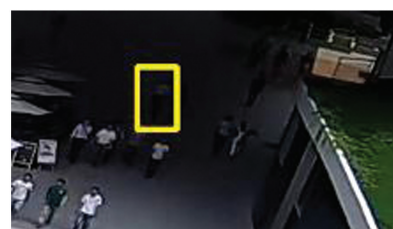
(c) 脱离遮挡物

(c) Out of the shelter



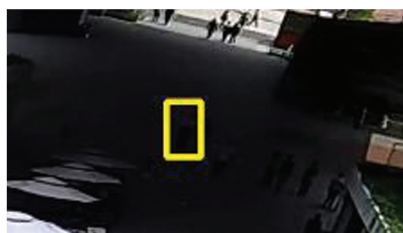
(d) 光照开始变暗

(d) Light began to dim



(e) 出现相同颜色的干扰物

(e) The same color distractors



(f) 准确跟踪

(f) Accurate tracking

图 8 KCF 跟踪算法结果

Fig.8 Results of KCF tracking algorithm



(a) 正常跑步条件下

(a) Under normal running conditions



(b) 进入遮挡物

(b) Enter obstructions



(c) 脱离遮挡物

(c) Out of the shelter



(d) 跟踪失败

(d) Tracking failure

图 9 KCF 跟踪算法结果

Fig.9 Results of KCF tracking algorithm

从图 8 中可以看出,本视频中的穿白色上衣的男子行走在云台监控下的街道上,使用本算法能够很准确的捕捉移动的个人,并且能够准确的实现移动目标跟踪。从图(b)到图(c)看出,虽然有体型类似的非目标物对跟踪的目标人进行遮挡干扰,但是跟踪效果并未发生严重偏移,依然能够准确的跟踪目标人,保证了算法的准确性,节省大量时间。同时,在图(e)中,目标人周围画面中也有大量与目标物在颜色上类似的非目标物,依然没有受到颜色的干扰,未产生跟踪其他类似颜色的非目标物。从图(f)以后,随着目标光线逐渐变暗,整个跟踪环境变暗,在目标人距离云台摄像机越来越远的情况下,摄像机实现自动变焦功能下,跟踪效果受到的影响不大,具有很好的鲁棒性。同时,由于云台摄像机建立了精确的摄像机模型参数,通过更准确的控制云台和摄像机的转角,使得目标人一直处于视频中合理的位置。当对跑步的人进行检测与跟踪时,没有障碍物遮挡时能够准确的跟踪,如图 9(a)所示,但是当出现障碍物时,由于目标人运动速度过快,导致目标跟踪失效,如图 9(c)、(d)结果所示。

6 结 论

本文介绍了云台摄像机的工作系统框架以及硬件构成,构造了精确的摄像机模型,对于摄像机的监控控制提供了更准确的理论方法。针对目标物体的无规律的运动,通过控制摄像机镜头以及云台的转动,实现对目标物的跟踪。同时,采用 KCF 跟踪算法,对于移动目标物的检测与跟踪具有很高的准确性,跟踪精度达到 90% 以上,又不易受到其他干扰物和周围环境变化的影响,具有很好的鲁棒性,最大的优势是处理速度快,保证了算法的实时性。KCF 算法通过核函数对多通道的 Hog 特征进行了融合,使得训练所得的分类器对待检测目标的分析能力更强。KCF 跟踪算法对光照变化、干扰物遮挡、运动模糊和背景杂乱等视频都展现出良好的跟踪能力,但对快速运动等视频跟踪效果良好难以达到人们的要求。该跟踪算法还存在每

帧训练的权重向量更新问题,需要在以后的工作中解决该问题。

参 考 文 献:

- [1] 侯志强,韩崇昭.视觉跟踪技术综述[J].自动化学报,2006,32(4):603-617.
HOU Z Q, HAN C Z. A survey of visual tracking[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(4): 603-617. (in Chinese)
- [2] WELCH G, BISHOP G. An introduction to the kalman filter [R]. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [3] CEN G H, MATSUHIRA N, HIROKAWA J, *et al.* An improved particle filter for service robot self-localization [J]. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 2009, 2(1): 56-63.
- [4] 王田,刘伟宁,韩广良,等.基于改进 MeanShift 的目标跟踪算法[J].液晶与显示,2012,27(3):396-400.
WANG T, LIU W N, HAN G L, *et al.* Target tracking algorithm based on improved MeanShift[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(3): 396-400. (in Chinese)
- [5] 杨亮,周勇,刘歆浏.基于 PTZ 摄像机的运动目标跟踪控制[J].兵工自动化,2014(3):65-68.
YANG L, ZHOU Y, LIU X L. Moving object tracking control based on PTZ camera[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014(3): 65-68. (in Chinese)
- [6] 郭已秋,许廷发,王洪庆,等.改进的粒子群优化目标跟踪方法[J].中国光学,2014,7(5):759-767.
GUO S Q, XU T F, WANG H Q, *et al.* Object tracking method based on improved particle swarm optimization [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 759-767. (in Chinese)
- [7] WU Y, LI M J, YANG M H. Online object tracking: a benchmark[C]//Proceedings of 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Portland: IEEE, 2013:2411-2418.
- [8] BOLME D, BEVERIDGE J R, DRAPER B A, *et al.* Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]//Proceedings of 2010 IEEE Conference On Computer Vision And Pattern Recognition (CVPR), San Francisco: IEEE, 2010:2544-2550.
- [9] 柯洪昌,孙宏彬.图像序列的显著性目标区域检测方法[J].中国光学,2015,8(5):768-774.
KE H C, SUN H B. A saliency target area detection method of image sequence[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 768-774. (in Chinese)
- [10] 郑红,刘振强.基于精确模型的云台摄像机自标定[J].机器人,2013,35(3):326-331,338.
ZHENG H, LIU Z Q. Self-calibration of pan-tilt camera based on accurate model [J]. *Robot*, 2013, 35(3): 326-331, 338. (in Chinese)
- [11] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.* High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583-596.
- [12] CESA-BIANCHI N. Applications of regularized least squares to classification problems[M]//BEN-DAVID S, CASE J, MARUOKA A. *Algorithmic Learning Theory*[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2004, 3244: 14-18.
- [13] RIFKIN R M, YEO G, POGGIO T. Regularized least-squares classification[M]//*Advances in Learning Theory: Methods, Model and Applications*. Nato Science Series III: Computer and Systems Sciences. Amsterdam: IOS Press, 2003: 131-154.
- [14] YU L Y, FAN C X, MING Y. A visual tracker based on improved kernel correlation filter[C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Internet Multimedia Computing and Service*, New York: IMCS, 2015: 51-54.
- [15] MAHALANOBIS A, KUMAR B V K V, CASASSENT D. Minimum average correlation energy filters[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(17): 3633-3640.

作者简介:常运(1990—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要从事图像处理、目标检测与跟踪方面的研究。E-mail: 691815779@qq.com

杜玉红(1974—),女,黑龙江绥化人,博士,副教授,主要从事机器视觉及图像处理、模式识别方面的研究。E-mail: DYH202@163.com