

一种对光照变化鲁棒的均值漂移跟踪方法

王永忠 潘泉 赵春晖 程咏梅
(西北工业大学自动化学院 西安 710072)

摘要: 颜色作为一个有效的视觉特征,被广泛的用于基于表面模型的跟踪中。但在跟踪过程中,由于光照、视角及摄像机参数等的变化,往往会造成目标颜色的改变,使得跟踪不稳定。该文提出了一种新的基于局部背景动态修正模糊颜色直方图的均值漂移跟踪方法,在颜色-空间域运用核密度估计建立目标的模糊颜色直方图模型,利用目标的局部背景动态修正目标模型,克服了基于传统颜色直方图建立目标模型时对于光照变化较为敏感的缺点。实验验证了该文算法可以平滑相似性表面,减小局部极值点对跟踪的影响,在光照剧烈变化的情况下能够实时鲁棒地跟踪目标。

关键词: 跟踪;光照变化;动态修正模糊颜色直方图;均值漂移

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2287-05

A Robust Mean Shift Tracking Method Under Varying Illumination

Wang Yong-zhong Pan Quan Zhao Chun-hui Cheng Yong-mei
(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Color can provide an efficient visual cue for tracking based on appearance models. However, the apparent color of an object depends upon the illumination conditions, the viewing geometry and the camera parameters, all of which can vary during tracking and therefore make the tracking based on apparent color models unreliable or even failed. In this paper a mean shift tracking algorithm is proposed based on dynamic corrected fuzzy color histogram, which employs local background information around the target to correct the apparent models and overcomes the sensitive of conventional color histogram to illumination change and noise. The algorithm is tested on several image sequences and the results show that it can smooth the similarity surface and achieve robust and reliable frame-rate tracking under varying illumination conditions.

Key words: Tracking; Varying illumination; Dynamic corrected fuzzy color histogram; Mean shift

1 引言

视觉跟踪是视频监控、基于视觉的人机交互、智能视频会议等计算机视觉应用领域中的关键研究内容。在实际场景中,由于噪声、遮挡、背景干扰及目标变化等往往会造成跟踪算法的不稳定。为了实现视觉目标的鲁棒跟踪,研究者提出了各种各样的方法^[1,2]。其中Comaniciu等^[1]提出的均值漂移跟踪算法利用颜色直方图描述跟踪目标,通过均值漂移算法迭代的搜索与跟踪目标具有最大相似度的候选目标区域,实现对目标的跟踪。该方法对目标形变及旋转具有较好的适应性,且计算简单快捷,因此近年来获得了广泛的应用。尽管人们对均值漂移跟踪算法做了各种各样的改进^[3,4],但在跟踪过程中,由于受光照、视角及摄像机参数改变的影响,目标的表面颜色是变化的,这往往造成目标颜色直方图的剧烈变化,使得基于颜色直方图的均值漂移跟踪方法变得不稳定,甚至造成跟踪失败。

为了克服跟踪过程中目标表面颜色变化带来的影响,研究者提出了很多方法,一般分为在线模型更新方法和建立颜色不变特征模型的方法。在线模型更新方法是通过在跟踪过程中根据当前目标实时更新目标的颜色模型以适应目标表面颜色的变化,如McKenna等^[5]采用自适应混合高斯模型对目标的表面颜色进行建模,使用统计更新方法使目标模型能在线适应光照、视角等的变化。Collins等^[6]通过在线选取最能区分跟踪目标和背景的特征用于描述跟踪目标的表面模型,克服目标表面改变以及背景干扰对跟踪的影响。虽然基于在线模型更新的方法对跟踪过程中的表面模型的变化有一定的自适应性,但由于受模型的更新速度限制,不能很好地克服目标表面颜色快速变化带来的影响,从而造成跟踪不稳定。而颜色不变特征模型不受目标表面颜色变化速度的影响,如Freedman等^[7]通过计算目标的光照不变光流场,克服光照变化造成的目标颜色分布概率密度的变化,可以实现目标在剧烈光照变化情况下的跟踪,但计算量较大。Han等^[8]在图像检索中利用模糊C-均值聚类方法建立目标的模糊颜色直方图(Fuzzy Color Histogram, FCH),克服了传统颜色

2006-11-07 收到, 2007-04-27 改回

国家自然科学基金重点项目(60634030)和陕西省科学技术研究发展计划(2003K06-G15)资助课题

直方图对光照变化及噪声较敏感的缺点。

虽然研究者提出了许多解决跟踪过程中目标表面颜色变化的方法,但在均值漂移跟踪算法框架下如何有效地克服跟踪过程中目标表面颜色变化带来的影响,依然是个需要深入研究的课题。本文研究表明直接用 Han 等提出的模糊颜色直方图会减弱目标模型对前景及背景的可分性,无法实现对目标的稳定跟踪,因此本文在颜色-空间域运用核密度估计建立目标的模糊颜色直方图模型,利用目标的局部背景动态修正目标模型,建立了一种新的基于动态修正模糊颜色直方图的均值漂移算法,实现了对光照变化下的目标稳定跟踪。实验验证了本文方法对光照变化引起的目标表面颜色模型变化不敏感,较原有的基于传统颜色直方图均值漂移跟踪方法及未加动态修正的模糊直方图方法更为鲁棒。

2 颜色直方图与模糊颜色直方图

颜色直方图是对图像在颜色空间分布的一种简单的非参数密度估计,其描述了图像的全局统计特征,具有旋转及平移不变性,且计算简单快捷,被广泛地作为图像特征用于图像检索及目标跟踪中。但颜色直方图存在边界问题:当两个像素的颜色非常相近时,有可能被分在不同的颜色区间;而当两个像素的颜色相距较远时,也有可能被分在相同的颜色区间。因此当光照或噪声引起图像像素的颜色发生较小变化时,图像的颜色直方图也有可能发生剧烈的改变,这就造成了基于颜色直方图的图像检索及跟踪算法易受光照变化及噪声的影响。

为了使颜色直方图对光照变化及噪声更鲁棒,研究者们提出了很多改进的方法,如颜色比率直方图、累计颜色直方图及模糊颜色直方图等。其中 Han 等^[8]运用模糊 C-均值聚类方法计算图像的模糊颜色直方图,克服了传统颜色直方图对光照变化及噪声敏感的缺点,且可以有效地降低直方图的维数。如果将图像的颜色空间量化为 n 个颜色区间,目标图像表示为 $I_x = \{\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j\}_{j=1}^l$, 其中 \mathbf{x}_j 为像素点 j 的二维坐标, \mathbf{u}_j 为其相应的颜色向量, l 为目标图像中所包含的像素个数,则目标 I_x 的模糊颜色直方图可以表示为 $\mathbf{F}(I_x) = \{f_i\}_{i=1, \dots, m}$, 其中 f_i 表示为

$$f_i = \sum_{j=1}^l P_j P_{ij} = \sum_{j=1}^l P_j \mu_{ij} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \mu_{ij} \quad (1)$$

式(1)中 P_j 为目标图像中选中第 j 个像素的概率, P_{ij} 为第 j 个像素属于第 i 个颜色区间的条件概率, μ_{ij} 为第 j 个像素属于第 i 个直方图区间的模糊隶属度。在传统的颜色直方图(Conventional Color Histogram, CCH), $P_{ij} \in \{0,1\}$, 即像素 j 要么属于第 i 个颜色区间,要么不属于第 i 个颜色区间,对于那些分布在颜色区间 i 边界附近的像素点,当光照变化或噪声引起像素颜色发生微小变化时,其分布极易从其颜色区间 i 落入相邻的颜色区间,从而造成传统颜色直方图的剧烈变化。而在模糊颜色直方图中, $P_{ij} = \mu_{ij}$, 从而把传

统颜色直方图中的条件概率 P_{ij} 从 $\{0,1\}$ 二值扩展到模糊直方图的模糊隶属函数 μ_{ij} 的 $[0,1]$ 区间,图像中的某个像素是根据其颜色与各颜色区间的距离计算其隶属度,像素颜色的较小变化不会引起隶属度的剧烈变化,使得模糊直方图对噪声及光照变化不敏感。

3 目标的模糊颜色直方图及动态修正

3.1 目标的模糊颜色直方图

计算图像的模糊直方图最主要的是求取像素对每个颜色区间的隶属函数 μ_{ij} , 即像素 j 的颜色 \mathbf{u}_j 与颜色区间 i 的相似度。由于 RGB 空间是个非均匀的颜色空间,其颜色空间上的距离不能正确度量人对颜色相似性的感知。故文献[8]将图像像素颜色由 RGB 空间转换到 CIELab 空间, CIELab 是个感知均匀的颜色空间,可以用该颜色空间上两点的欧氏距离作为两种颜色差别的度量。

如果对 RGB 空间中的每个颜色求取对应于 CIELab 空间颜色区间的隶属度,会使得模糊隶属度矩阵过大,从而在计算模糊直方图时带来很大的计算量。因此首先将 RGB 颜色空间均匀量化为 n 个颜色区间,然后将这 n 个颜色区间转换到 CIELab 空间,在 CIELab 空间对这 n 个颜色区间用模糊 C-均值聚类算法(FCM)聚类为 m 类,通常 $m \ll n$, 从而获得在 RGB 空间的颜色区间 j 对 CIELab 空间模糊直方图区间 i 的模糊隶属矩阵 $\mathbf{U}_{m \times n} = [\mu_{ij}]_{m \times n}$, 具体方法见文献[8]。求取了颜色空间转换的模糊隶属度矩阵 $\mathbf{U}_{m \times n}$, 可以直接通过目标在 RGB 空间的 n 维传统颜色直方图 $\mathbf{H}_{n \times 1}$ 求取目标在 CIELab 空间的 m 维模糊颜色直方图 $\mathbf{F}_{m \times 1}$,

$$\mathbf{F}_{m \times 1} = \mathbf{U}_{m \times n} \mathbf{H}_{n \times 1} \quad (2)$$

需要指出的是,模糊隶属度矩阵只与 RGB 空间中颜色区间的量化及 CIELab 空间的聚类中心数有关,整个跟踪过程中只需要离线计算一次,所以模糊聚类过程对目标跟踪的实时性没有影响。

从式(2)可以看出,为了计算目标的模糊颜色直方图,需要计算目标在 RGB 空间的传统颜色直方图,同文献[1]一样,本文采用核密度估计在颜色-空间域计算目标在 RGB 空间的传统颜色直方图。给定目标区域 I_x 及核函数 $k(x)$, 则目标的传统颜色直方图 $\mathbf{H}(I_x) = \{h_u\}_{u=1, \dots, n}$ 为

$$h_u(\mathbf{y}_0) = C \sum_{j=1}^l k\left(\frac{\mathbf{y}_0 - \mathbf{x}_j}{\sigma}\right) \delta[b(\mathbf{x}_j) - u] \quad (3)$$

其中 σ 为核函数的带宽, δ 为 Kronecker 函数, \mathbf{y}_0 为目标区域的中心位置, $b(\mathbf{x}_j)$ 表示坐标为 \mathbf{x}_j 的像素对应的直方图颜色区间, u 表示颜色区间, C 为归一化系数。获得目标的传统颜色直方图后,利用式(2)计算目标的模糊颜色直方图

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= \{q_v\}_{v=1, \dots, m} \\ q_v(\mathbf{y}_0) &= \sum_{u=1}^n \mu_{vu} h_u(\mathbf{y}_0) \\ &= C \sum_{j=1}^l \sum_{u=1}^n \mu_{vu} k\left(\frac{\mathbf{y}_0 - \mathbf{x}_j}{\sigma}\right) \delta[b(\mathbf{x}_j) - u] \quad (4) \end{aligned}$$

其中 C_q 为相应的归一化系数, μ_{vu} 为 RGB 空间的颜色区间 u 对于 CIELab 空间的颜色区间 v 的隶属函数。

同样可以求得中心位置在 \mathbf{y} 的候选目标区域的模糊颜色直方图 $\mathbf{p} = \{p_v\}_{v=1, \dots, m}$ 为

$$p_v(\mathbf{y}) = C_p \sum_{j=1}^l \sum_{u=1}^n \mu_{vu} k \left(\frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_j}{\sigma} \right) \delta [b(\mathbf{x}_j) - u] \quad (5)$$

3.2 目标模糊颜色直方图的动态修正

模糊颜色直方图一方面克服了光照变化及噪声等对传统颜色直方图的影响, 另一方面模糊颜色直方图也减弱了前景与背景的可分性, 增大了背景对目标跟踪的干扰。为了消除背景干扰的影响, 本文利用局部背景动态修正目标模糊颜色直方图的方法, 对于那些相对于背景在目标中分布较多的像素给予较大的权值, 而那些相对于背景在目标中分布较少的像素给予较小的权值。假设背景区域的模糊颜色直方图表示为 $\mathbf{O} = \{o_v\}_{v=1, \dots, m}$, 背景区域为围绕目标的局部图像区域, 本文设定背景区域的范围为目标大小的 2.5 倍, 相应的背景修正因子表示为

$$s_v = \frac{q_v}{o_v + q_v} \quad (6)$$

则修正后的目标模糊直方图 $\mathbf{q}' = \{q'_v\}_{v=1, \dots, m}$ 为

$$q'_v(\mathbf{y}_0) = s_v \cdot q_v(\mathbf{y}_0) = C'_q \sum_{j=1}^l \sum_{u=1}^n s_v \mu_{vu} k \left(\frac{\mathbf{y}_0 - \mathbf{x}_j}{\sigma} \right) \delta [b(\mathbf{x}_j) - u] \quad (7)$$

C'_q 为相应的归一化系数, 同样可得修正后的候选目标模糊颜色直方图 $\mathbf{p}' = \{p'_v\}_{v=1, \dots, m}$ 为

$$p'_v(\mathbf{y}_0) = C'_p \sum_{j=1}^l \sum_{u=1}^n s_v \mu_{vu} k \left(\frac{\mathbf{y}_0 - \mathbf{x}_j}{\sigma} \right) \delta [b(\mathbf{x}_j) - u] \quad (8)$$

通过在每帧中根据目标的局部背景动态地修正目标及候选目标的模糊颜色直方图, 使得本文提出的动态修正的模糊颜色直方图目标模型既可以克服传统颜色直方图的对光照及噪声敏感的缺点, 又具有良好的可分性, 同时对背景具有一定的自适应性。

4 基于动态修正模糊颜色直方图的均值漂移跟踪算法

4.1 相似性度量

目标及候选目标的模糊颜色直方图表示的是图像在颜色空间的概率密度分布, 度量目标与候选目标颜色概率密度分布的相似性有多种方法, 如 Bhattacharyya 系数^[1], KL 散度等^[3]。本文采用 Bhattacharyya 系数度量目标与候选目标模糊颜色直方图的相似性, 则目标与候选目标的相似性表示为

$$\rho(\mathbf{y}) = \rho[\mathbf{q}'(\mathbf{y}_0), \mathbf{p}'(\mathbf{y})] = \sum_{v=1}^m \sqrt{q'_v(\mathbf{y}_0) p'_v(\mathbf{y})} \quad (9)$$

4.2 目标跟踪

基于动态修正模糊颜色直方图的跟踪就是在当前帧寻找使相似性系数 ρ 最大的候选目标区域。将 ρ 在 $\mathbf{p}'(\mathbf{y}_0)$ 处进行一阶泰勒展开, 则 ρ 可以表示为

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{y}) &\approx \frac{1}{2} \sum_{v=1}^m \sqrt{p'_v(\mathbf{y}_0) q'_v} + \frac{1}{2} \sum_{v=1}^m p'_v(\mathbf{y}) \sqrt{\frac{q'_v}{p'_v(\mathbf{y}_0)}} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^m \sqrt{p'_v(\mathbf{y}_0) q'_v} + \frac{C'_p}{2} \sum_{j=1}^l \omega_j k \left(\frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_j}{\sigma} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\omega_j = \sum_{v=1}^m \sum_{u=1}^n s_v \mu_{vu} \sqrt{\frac{q'_v}{p'_v(\mathbf{y}_0)}} \delta [b(\mathbf{x}_j) - u] \quad (11)$$

对于确定的 \mathbf{y}_0 , 式(10)的第 1 项是定值, 要使目标模型与候选目标区域的相似性 ρ 最大, 也就是使式(10)的第 2 项取最大值。而式(10)的第 2 项可以看作是加权的非参数核密度估计, 因此可以通过均值漂移算法求得此密度估计的最近邻众数^[9], 从而获得新的候选目标位置

$$\mathbf{y}_1 = \frac{\sum_{j=1}^l \mathbf{x}_j \omega_j g \left(\frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_j}{\sigma} \right)}{\sum_{j=1}^l \omega_j g \left(\frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_j}{\sigma} \right)} \quad (12)$$

其中 $g(x) = -k'(x)$, $k(x)$ 称为 $g(x)$ 的影子核。通过循环迭代式(12)直至收敛到正确的目标位置, 从而实现对目标的跟踪。

5 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 测试了多个视频序列, 对基于传统颜色直方图(CCH)及本文基于动态修正模糊颜色直方图(CFCH)的均值漂移跟踪方法进行了比较, 测试序列均为实地拍摄的 320×240 像素的 MPG 视频。在大多数测试序列中, 选择 RGB 空间建立目标的 CCH, 颜色区间为 $32 \times 32 \times 32$ 个; 为了比较本文算法与基于 HS 空间 CCH 的均值漂移跟踪算法在光照变化下的跟踪效果, 在 OFFICE 测试序列中选择 HS 空间建立目标的 CCH, 颜色区间量化为 32×32 个。所有测试序列所采用的 CFCH 的颜色区间均为 64 个, 空间加权的核函数采用 Epanechnikov 核, 跟踪的初始目标为手动选择。

图 1 显示了在 CAMPUS 序列上基于 CCH 的跟踪算法及本文基于 CFCH 跟踪算法的跟踪比较结果。当目标在 192 帧由强阴影区域走入强光照区域时, 表面颜色产生了剧烈的变化, 此时基于 CCH 的均值漂移跟踪算法不能正确地跟踪目标, 在 236 帧目标进入强光照区域后完全丢失了跟踪目标。而本文基于 CFCH 跟踪算法在目标由强阴影区进入强光照区以及再次步入弱阴影区整个过程中, 均能稳定地跟踪住目标。

图 2 显示了对室内 OFFICE 序列的跟踪结果, 当室内灯光未开启时基于 HS 空间 CCH 的均值漂移算法及本文基于 CFCH 跟踪算法均能稳定的跟踪目标, 但在第 164 帧开启室内灯光造成光照突然变化时, 即使 HS 空间对光照的变化有一定的鲁棒性, 但对于剧烈的光照变化, 基于 HS 空间 CCH 的均值漂移跟踪算法仍然产生了较大的跟踪误差, 而本文基于 CFCH 的跟踪比较稳定。随着摄像机光圈的自动调整, 也会造成目标区域亮度的变化, 如图 2 的第 209 帧所示, 在此

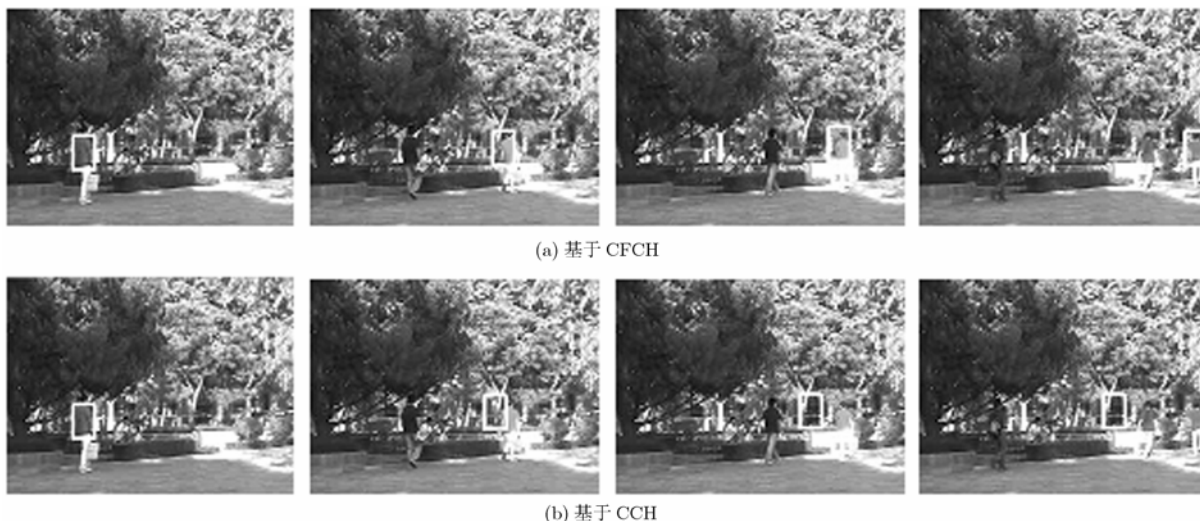


图 1 CAMPUS 序列跟踪结果(分别为 82, 192, 236, 316 帧)

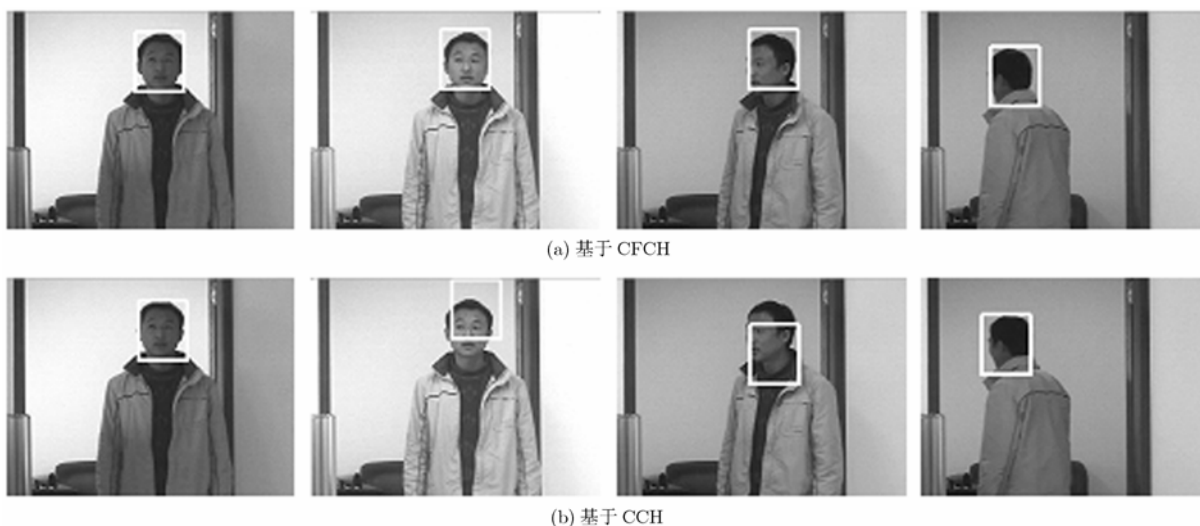


图 2 OFFICE 序列跟踪结果(分别为 135, 164, 209, 300 帧)

过程中, 基于 CCH 的跟踪结果随着亮度的变化也会产生较大的波动, 而本文算法能稳定地跟踪目标。

我们在 P4 3.0GHz 768M 的计算机上同时运行基于 CCH 的均值漂移跟踪算法及本文基于 CFCH 的均值漂移跟踪算法, 上述实验均可满足实时性的要求。

6 结束语

在各种基于目标表面颜色的跟踪方法中, 由于光照、视角及摄像机参数的变化, 会造成目标表面颜色的改变, 特别是在发生剧烈光照变化时, 往往造成基于表面颜色的目标模型突然变化, 使得跟踪算法失效。本文将模糊颜色直方图与均值漂移算法框架结合起来, 并注意到直接利用模糊颜色直方图会减弱前景与背景的可分性, 使得跟踪无法实现。因此引入了利用目标的局部背景动态修正目标模型的方法, 提出

了基于局部背景动态修正模糊颜色直方图的均值漂移跟踪算法, 克服了基于传统颜色直方图的均值漂移跟踪算法对光照变化较为敏感的缺点, 实验显示了本文所提算法能够克服光照变化对目标表面颜色模型的影响, 即使在剧烈的光照变化条件下也能够稳定地跟踪住目标。

参考文献

- [1] Comaniciu D, Ramesh V, and Meer P. Kernel-based tracking. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5): 564-577.
- [2] Isard M and Blake A. Condensation-conditional density propagation for visual tracking. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 29(1): 2-28.
- [3] Yang C, Duraiswami R, and Davis L. Efficient mean-shift tracking via a new similarity measure. *Proc. of IEEE*

- Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Los Alamitos, California, 2005, vol. I: 176-183.
- [4] Collins R T. Mean-shift blob tracking through scale space. Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, 2003, vol. I: 234-240.
- [5] McKenna S, Raja Y, and Gong S. Tracking colour objects using adaptive mixture models. *International Journal of Image and Vision Computing*, 1999, 17: 225-231.
- [6] Collins R T and Liu Y. On-line selection of discriminative tracking features. Proc. of IEEE Conference on Computer Vision, Nice, France, 2003: 346-352.
- [7] Freedman D and Turek M. Illumination-invariant tracking via graph cuts. Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Los Alamitos, California, 2005, vol. II: 10-17.
- [8] Han J and Ma K. Fuzzy color histogram and its use in color image retrieval. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(8): 944-952.
- [9] Cheng Y. Mean shift mode seeking and clustering. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8): 790-799.
- 王永忠：男，1971年生，博士生，研究方向为视觉目标跟踪、序列图像处理与模式识别等。
- 潘泉：男，1961年生，教授，博士生导师，研究方向为动态系统建模、估计与控制、信息融合、图像处理、识别、多目标跟踪等。
- 赵春晖：男，1973年生，讲师，博士生，研究方向为智能视频监控、图像理解等。
- 程咏梅：女，1960年生，教授，博士生导师，研究方向为主/被动式多目标跟踪、数据融合、图像处理等。