

文章编号:1004-4213(2011)11-1761-6

一种基于积分直方图的粒子滤波跟踪方法

邱家涛¹, 李玉山¹, 王彩玲², 刘洋¹

(1 西安电子科技大学 电路 CAD 研究所, 西安 710071)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘要:用积分直方图技术提出了一种低复杂度的粒子滤波跟踪方法和基于积分颜色直方图的观测似然模型. 采用积分方向直方图建立一个检测响应图, 用其上的观测信息构建建议分布函数, 在状态空间中似然概率较大的子空间中进行粒子采样. 仿真结果表明, 在采用大量粒子跟踪大目标时, 提出的跟踪方法的计算复杂度明显低于直方图直接提取的粒子滤波方法, 而且在光照变化的条件下, 比采用传统颜色 Mean-Shift 的跟踪方法准确.

关键词:视觉跟踪; 粒子滤波; 建议分布函数; 积分直方图; 颜色直方图; 方向直方图

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114011.1761

0 引言

视觉跟踪在计算机视觉的许多领域里得到广泛应用, 如被应用于人机交互和视频监控领域, 在视频序列里进行目标定位、提取目标运动路径和识别目标身份.

在视觉跟踪方法中, 无参量密度估计的方法有基于 Camshift、Mean-Shift^[1]的方法和基于粒子滤波的方法^[2-11]. 采用传统颜色 Mean-Shift 的跟踪方法计算复杂度较低, 可以实时跟踪, 且对目标旋转和变形不敏感, 然而对快速目标运动和光照变化的鲁棒性较差, 且缺乏必要的模板更新算法. 文献[3-4]的粒子滤波方法用检测响应来引导跟踪. 基于粒子滤波的跟踪算法鲁棒性较好, 然而, 由于受直方图提取的制约运算复杂度较高, 如多目标跟踪需要计算成百的相互重叠的粒子区域上的直方图, 从而限制了粒子滤波跟踪方法在实时性要求较高的场合下的应用.

近年来, 积分图像技术^[12]和积分直方图技术^[13]被用来降低粒子滤波跟踪方法的计算复杂度. 文献[6]用一种级联机制构造出一种高辨别度的观测似然模型(Observation Likelihood Model, OLM)并用积分图像^[12]计算颜色直方图和方向直方图. 文献[7]提出了一种碎片式贝叶斯跟踪, 并用积分图像计算协方差描述子. 文献[8]运用一种运动链模型提出了一种人体姿态跟踪方法, 并用积分直方图技术

改善观测似然函数的计算效率. 文献[9]利用积分直方图技术^[13]进行粒子采样, 然而仍然采用直方图直接提取方法建立颜色观测似然模型.

尽管文献[1-13]对粒子滤波跟踪方法的效率有所改善, 但离实时粒子滤波跟踪还有很大差距. 本文提出了一种基于积分颜色直方图的观测似然模型, 并用方向直方图匹配目标搜索方法搜索整个像面内的所有可能区域, 建立了一个检测响应图. 这种穷举式搜索方式得益于积分直方图技术, 从检测响应图中提取出观测信息, 并利用这种观测信息实现一个多假设的粒子滤波跟踪.

用 CAVIAR 视频序列和文献[14]的视频序列对提出的粒子滤波跟踪方法进行仿真测试, 结果表明, 该方法在用大量粒子跟踪时的实时性较好, 在光照变化的条件下鲁棒性也较好.

1 直方图提取

1.1 从积分直方图中提取矩形区域的直方图

在积分直方图技术^[13]中, 积分直方图由各个 bin 的积分图像构成. 提取矩形区域上的直方图, 不需要对各个区域上的直方图单独计算, 只需从积分直方图中提取其四个角上的子积分直方图, 并施以三次算术运算, 如图 1.

矩形区域 \bar{x}_d^{q+1} 上直方图第 u 个 bin 上的频率值可表示为

基金项目:国家重点研究发展计划(No. 2009CB724005)资助

第一作者:邱家涛(1964-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为图像处理. Email: jtqiu@mail.xidian.edu.cn

通讯作者:李玉山(1945-), 男, 教授, 主要研究方向为图像处理和信号完整性分析. Email: ysl@xidian.edu.cn

收稿日期:2011-07-11; **修回日期:**2011-09-16

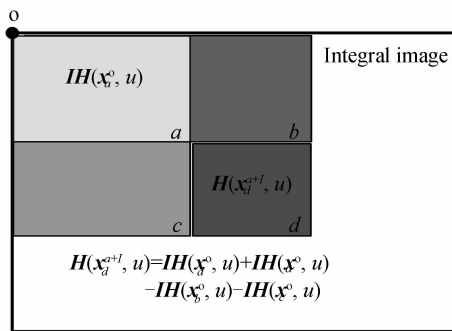


图1 用积分图像提取直方图示意图

Fig. 1 Illustration of the extraction of histograms using integral images

$$\mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}_d^{a+1}, u) = \mathbf{IH}(\bar{\mathbf{x}}_d^o, u) + \mathbf{IH}(\bar{\mathbf{x}}_a^o, u) - \mathbf{IH}(\bar{\mathbf{x}}_b^o, u) - \mathbf{IH}(\bar{\mathbf{x}}_c^o, u) \quad (1)$$

式中 $\bar{\mathbf{x}}^o$ 表示矩形区域, 其左上角和右下角的坐标分别表示为 $(x(o), y(o))$ 和 $(x(*), y(*))$, \mathbf{I} 表示单位坐标矢量 $(1, 1)$, $\mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}_d^{a+1}, U)$ 和 $\mathbf{IH}(\bar{\mathbf{x}}^o, U)$ 分别表示直方图和积分直方图. 因而, 一旦积分直方图构建出来后, 提取一个矩形区域的直方图只需要三次算术运算, 占用的计算资源可以忽略, 而且在每个图像的直方图匹配搜索过程中, 只需要一次积分直方图计算.

1.2 积分直方图构建

在积分直方图技术^[13]中, 积分直方图构建是占用计算资源比例最大的过程. 在不考虑图像尺度变化的条件下, 积分直方图可以表示为一个二维的描述子: $\mathbf{Ih}(R, U)$, 其中 $R = P \times Q$ 为图像的分辨率, 即数字图像有 P 行 Q 列. 积分直方图 $\mathbf{Ih}(R, U)$ 有 R 个像素位置, U 个 bin, $\mathbf{Ih}(R, U)$ 的第 u 列中保存第 u 个 bin 的积分图像, 第 r 行中保存第 r 个像素上的子积分直方图.

本文套用文献^[15]的方向梯度子积分直方图 (Integral Histograms of Oriented Gradients, IHOG^[16]) 构建方法, 构建积分颜色直方图. 对图像 $\mathbf{I}(x, y)$ 量化, 计算各个 bin 图像, 第 u 个 bin 的 bin 图像可表示为

$$\mathbf{Iu}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if the } \mathbf{I}(x, y) \text{ falls into the } u\text{-th bin} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中像素坐标 (x, y) 对应于积分直方图 $\mathbf{Ih}(R, U)$ 的行索引 r , 例如在 Matlab 中 r 为: $r = P \times (y - 1) + x$. 对 $\mathbf{Iu}(x, y)$ 积分构建第 u 个 bin 的积分图像, 并保存于 $\mathbf{Ih}(R, U)$ 的第 u 列中. 在实际代码执行中, 先把各个 bin 图像 $\mathbf{Iu}(x, y)$ 保存到空积分直方图 $\mathbf{Ih}(R, U)$ 中, 积分过程只对二维的积分直方图 $\mathbf{Ih}(R, U)$ 操作并从中存取数据. 积分直方图计算从

$\mathbf{Ih}(R, U)$ 的第一列开始, 自左至右一列一列的更新其内容, 直至最后一列第 U 列, 亦即一个积分图像一个积分图像的计算. 如一个 bin 图像 $\mathbf{Iu}(x, y)$ 只包含零元素, 跳过这一列, 因为零图像的积分图像仍然是它自身零图像.

采用上述积分颜色直方图构建过程, 无需任何辅助加速技术, 易于用普通计算软件 (如 Matlab) 在个人电脑上实现. 然而, 文献^[15]仍然沿用文献^[13]的 wavefront 扫描方式一个积分图像一个积分图像的计算, 不会对 IHOG 描述子的构建效率有显著改善, 应用 wavefront 扫描方式还需采用硬件级存储复制功能模块 (Hardware-level Memory Copy Functions, HMCF). 关于积分直方图构建的问题, 超出了本文的研究范围, 不作深入讨论. 本文中积分方向直方图采用如文献^[9]的构建过程.

2 基于积分直方图的粒子滤波跟踪

本文提出的积分直方图粒子滤波跟踪的理论依据和公式推导见文献^[11]. 积分方向直方图用于粒子采样, 用积分颜色直方图构造颜色观测似然模型.

粒子滤波可以简要表述为: 粒子滤波的状态可定义为: $\mathbf{x}^i = \{x^i, y^i, w^i, h^i\}$. 在状态 \mathbf{x}^i 对应的矩形区域假设中, (x^i, y^i) , w^i 和 h^i 分别表示中心位置, 宽度和高度. 在粒子滤波中, 状态的后验概率分布 $p(x_t | y_{1:t})$ 用粒子集 $\{\mathbf{x}_t^{(i)}, w_t^{(i)}\}_{i=1, \dots, N}$ 近似. 以 $t-1$ 时刻的粒子集 $\{\mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, w_{t-1}^{(i)}\}_{i=1, \dots, N}$ 为起点, t 时刻的新粒子从一个适当设计的建议分布函数 $\mathbf{x}_t^{(i)} \sim q(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, y_t)$, $i=1, \dots, N$ 中抽样, 新粒子的权重用如下的迭代方程计算

$$w_t^{(i)} \sim w_{t-1}^{(i)} \frac{p(y_t | \mathbf{x}_t^{(i)}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)})}{q(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, y_t)}, \quad \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} = 1 \quad (3)$$

这样就得到 t 时刻的新粒子集 $\{\mathbf{x}_t^{(i)}, w_t^{(i)}\}_{i=1, \dots, N}$, 蒙特卡罗技术就可以用来求取近似点估计.

本文用方向直方图匹配进行目标检测得到观测信息, 并把观测信息集成到一个建议分布函数里, 以引导跟踪器到似然概率较大的区域作精细跟踪.

通过匹配候选目标方向直方图和参考方向直方图建立一个检测响应图, 利用积分直方图技术, 能够采用一种近似蛮力搜索方法建立这个检测响应图. 如图 2 和图 3, 候选区域的中心选在栅格节点上, 只有这些候选区域的方向直方图需要从积分方向直方图中提取, 并计算其与参考方向直方图间的直方图距离, 从而构造出一个检测响应图. 得到的和参考目

标最匹配的候选目标,可作为最终的检测结果,一个检测实例如图 2,深色方框表示检测到的目标,白色方框表示跟踪结果.

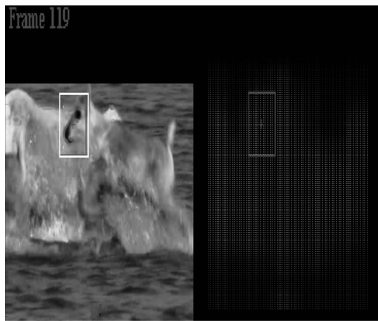


图 2 目标检测实例
Fig. 2 Example of the object detection

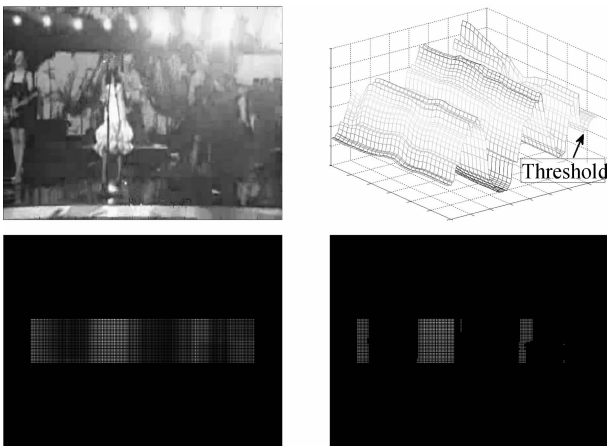


图 3 阈值选取实例
Fig. 3 Example of the threshold selection

然后,对检测响应图作阈值化处理,表示为

$$d(\mathbf{h}_{ref}; \mathbf{h}_x) < \text{Thr} \tag{4}$$

式中 $d(\ast)$ 表示直方图距离,本文采用文献[11]定义基于 Bhattacharyya 相似系数的直方图距离. \mathbf{h}_{ref} 和 \mathbf{h}_x 分别表示参考方向直方图和候选目标的直方图, Thr 表示阈值,响应图中低于 Thr 的予以保留.

实验根据全局极小值选择阈值 Thr,见图 3,图中共有 4 个全局极小值点,每个极小值点对应一个目标,阈值 Thr 可表示为

$$\text{Thr} = \max_{1 \leq k \leq n_m} m(k) + d\Delta \tag{5}$$

式中 $m(k)$ 表示第 k 个全局极小值, $d\Delta$ 表示由试验确定的常量, n_m 为选用的全局极小值的数目,只有 n_m 个较小的全局极小值被选用. Thr 为选择范围内最大的全局极小值与 $d\Delta$ 之和.图 3 中 n_m 选为 4, n_m 不宜选得过小,以发挥粒子滤波多假设的优势.

得到一个阈值化的检测响应图后,再通过一个

非极小值抑制过程,得到一系列极小值点, $p_j = \{x_j, y_j\}$, 其中 $j=1, \dots, N_p$, 利用这些极小值点来实现一个多假设的粒子滤波跟踪. 定义一个基于方向直方图的建议分布函数,表示为

$$q(x_t, y_t, x_{t-1}, y_{t-1}, \mathbf{y}_t) \sim \xi N((x_t, y_t) | (x_{t-1}, y_{t-1}), (\sigma_x^2, \sigma_y^2)) + \frac{1-\xi}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} N((x_t, y_t) | p_j, (\sigma_x^2, \sigma_y^2)) \tag{6}$$

式中 $N(\cdot | \mu, \Sigma)$ 表示均值为 μ 协方差矩阵为 Σ 的高斯函数, 对角阵 Σ 对角线上的元素为 σ_x^2 和 σ_y^2 , 分别表示 x 和 y 方向上的方差, p_j 表示检测到的响应图的极小值点. 式子右边第一项是状态动态模型, 第二项是包含观测信息的混合高斯函数. $\xi \in \{\xi: 0 \leq \xi \leq 1\}$ 表示由试验确定的混合系数, 确定 ξ 得根据所采用视频序列的实际内容, 对于包含快速运动目标的视频序列, ξ 宜选小一点, 以跳转到目标所在的子空间中进行粒子抽样.

3 实验结果与分析

用多个视频序列对提出的跟踪方法进行测试. 本文只列出四个视频序列, 即 CAVIAR 的 OneStopNoEnter2cor 和 ShopAssistant2cor 视频序列, 文献[14]的 Singer1 和 Shaking 视频序列. 两个 CAVIAR 视频序列的分辨率均为 384×288 , 把文献[14]的视频序列的分辨率也缩放到 384×288 . 本文中采用 36-bin 的方向直方图, 颜色直方图采用 RGB 颜色空间, 每个颜色分量均采用 8-bin 的直方图.

图 4 为采用传统颜色 Mean-Shift 跟踪算法和本文提出的跟踪方法跟踪结果对比. 第一、二、三和四行分别示出了跟踪 OneStopNoEnter2cor、ShopAssistant2cor、Singer1 和 Shaking 视频序列的几个实例, 深色方框是采用 Mean-Shift 的算法的结果, 白色方框表示本文跟踪方法的结果, 对每个视频序列, 采用 Mean-Shift 跟踪算法的模板均取自左边第一帧. 对于 OneStopNoEnter2cor 和 ShopAssistant2cor 视频序列, 当目标进入阴影区域光照发生变化时, 采用 Mean-Shift 的跟踪算法没有本文跟踪方法准确. 在 Singer1 视频序列光照剧烈变化的环境中, 采用传统颜色 Mean-Shift 的跟踪算法会失跟, 而且对目标的尺寸大小变化没有适应性. 对于 Shaking 视频序列, 当光照变化时采用 Mean-Shift 的跟踪算法也没有本文跟踪方法准确.



图 4 对提出跟踪方法和采用传统颜色 Mean-Shift 的跟踪算法跟踪结果的对比

Fig. 4 Comparison the tracking results between the proposed tracking and that using traditional color Mean-Shift method

采用传统颜色 Mean-Shift 的跟踪算法和本文跟踪方法跟踪两个 CAVIAR 视频序列的误差如图 5, 第一行和第二行分别是跟踪 OneStopNoEnter2cor

和 ShopAssistant2cor 视频序列的误差. 误差是用跟踪结果和 ground truth 位置比较计算出来的, 粗点划线表示提出跟踪方法的误差, 粗实线表示采用 Mean-Shift 的跟踪方法的误差, 细实线表示用方向直方图匹配得到的检测误差. 显然, 当光照发生变化时, 提出的跟踪方法比采用 Mean-Shift 的跟踪算法准确. 特别是最后几帧当目标变小时, 采用传统颜色 Mean-Shift 的跟踪算法由于不能适应目标尺寸大小的变化, 跟踪性能会明显下降.

用仿真时间, 对提出的跟踪方法和基于直方图直接提取的粒子滤波方法的计算复杂度作粗略的对比, 只列出其中三个视频序列的仿真结果(见表 1~3).

表 1 列出了提出的似然模型对基于直方图直接提取的似然模型的速度倍数, 可以看出速度倍数随粒子数成线性的增长. 当粒子数大于 300 时, 采用积分直方图才有加速效果, 否则, 速度会变慢. Singer1 序列歌手的尺寸大于 CAVIAR 序列行人的尺寸, 加速效果更为明显.

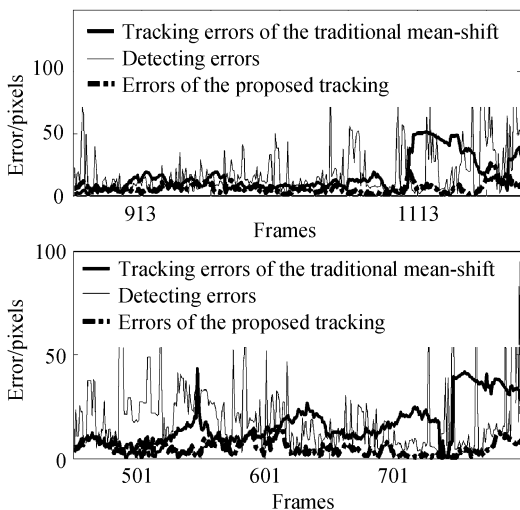


图 5 目标检测和跟踪误差

Fig. 5 Detecting and tracking errors for the OneStopNoEnter2cor and ShopAssistant2cor sequences

表 1 本文的似然模型对基于直方图直接提取的似然模型的速度倍数(单位: X)

Table 1 Speedup factor of the proposed likelihood over that using straightforward histogram extraction (units: X)

Video sequence	Speedup factor/Par.		
	150	300	600
Singer1	0.56	1.09	2.08
OneStopNoEnter2cor	0.44	0.87	1.68
ShopAssistant2cor	0.44	0.87	1.71

表 2 列出了提出的粒子采样对基于直方图直接提取的粒子采样的速度倍数,可以看出速度倍数随粒子数增长.当粒子数大于 300 时,采用积分直方图才有加速效果,而且 Singer1 序列的加速效果比 CAVIAR 序列的明显.

表 2 本文的粒子采样对基于直方图直接提取的粒子采样的速度倍数(单位: X)

Table 2 Speedup factor of the proposed particle sampling over that using straightforward histogram extraction (units: X)

Video sequence	Speedup factor/Par.		
	150.	300	600
Singer1	0.76	1.18	1.64
OneStopNoEnter2cor	0.73	1.11	1.49
ShopAssistant2cor	0.71	1.09	1.47

本文的跟踪方法对基于直方图直接提取的跟踪方法的总体速度对比如表 3,其中为上述三个视频序列的平均速度倍数.当粒子数大于 300 时,本文的基于积分直方图的方法比基于直方图直接提取的方法要快.在直方图直接提取的跟踪方法中,除检测响应图建立外的所有算法步骤均采用直方图直接提取方法,即只能用积分直方图技术建立检测响应图,用直方图直接提取的蛮力搜索方法建立检测响应图是不可行的.表 3 中基于直方图直接提取的方法的仿真时间也是这样统计的.

表 3 本文的跟踪方法对基于直方图直接提取的跟踪方法的总体速度倍数(单位: X)

Table 3 Overall speedup factor of the proposed tracking over that using straightforward histogram extraction (units: X)

Speedup factor		
150 Par.	300 Par.	600 Par.
0.76	0.99	1.41

然而,采用积分直方图技术改善粒子滤波跟踪算法的效率,除了粒子数目和目标大小两个制约因素外,直方图所用 bin 的数目和图像序列的尺寸大小会影响积分直方图的构建效率,从而制约粒子滤波算法效率改善的效果.

4 结论

本文提出了一种基于积分直方图的粒子滤波跟踪方法.该方法用积分直方图技术减小计算复杂度,

并用方向直方图匹配得到的观测信息构建建议分布函数.通过仿真对提出的跟踪方法进行评估,结果表明,在光照变化的条件下该方法的鲁棒性较好,而且用积分直方图技术能够显著减小大粒子数粒子滤波算法的计算复杂度.

然而提出的粒子滤波跟踪方法尚需进一步完善.例如,当其他行人接近跟踪目标时,跟踪器易被吸引而偏离跟踪目标,也需要研究检测响应图的阈值选取的自适应方法.

参考文献

- [1] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Real-time tracking of non-rigid objects using Mean-Shift [C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000(2): 142-149.
- [2] WEN Jing, LI Jie, GAO Xin-bo. An adaptive object tracking algorithm combined with particle filter and tensor subspace [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6):1047-1052. 温静, 李洁, 高新波. 一种结合粒子滤波和张量子空间的目标跟踪算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6):1047-1052.
- [3] WU B, NEVATIA R. Detection and tracking of multiple, partially occluded humans by bayesian combination of edgelet based part detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, **75**(2): 247-266.
- [4] OKUMA K, TALEGHANI A, DEFREITAS N, et al. A boosted particle filter: Multitarget detection and tracking[C]. Proceedings of 8th European Conference on Computer Vision, 2004, **1**: 28-39.
- [5] LIU Yang, LI Yu-shan, ZHANG Da-pu, et al. Visual Tracking based on dynamic object modeling in particle filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):375-380. 刘洋, 李玉山, 张大朴, 等. 基于动态目标建模的粒子滤波视觉跟踪算法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2):375-380.
- [6] YANG C, DURAISWAMI R, DAVIS L. Fast multiple object tracking via a hierarchical particle filter[C]. Proceedings of 10th IEEE International Conference on Computer Vision, 2005 (1): 212-219.
- [7] WU Y, WANG J Q, LU H Q. Robust Bayesian tracking on Riemannian manifolds via fragments-based representation [C]. Proceedings of ICASSP, 2009, **1**: 765-768.
- [8] CHAI Y J, SHIN S H, CHANG K, et al. Real-time user interface using particle filter with integral histogram [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, **56**(2): 510-515.
- [9] QIU J T, LI Y S, CHU X Q. Efficient head tracking using an integral histogram constructing based on sparse matrix technology [C]. Proceedings of ACCV 2010 Workshops, 2010, LNCS6468(Part I): 256-265.
- [10] ZOU Wei-jun, GONG Xiang, BO Yu-ming. Adaptive layered-sampling auxiliary particle filter's research and application in video tracking[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3):571-576. 邹卫军, 龚翔, 薄煜明. 自适应分层采样辅助粒子滤波在视频跟踪中的应用研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3):571-576.
- [11] PÉREZ P, VERMAAK J, BLAKE A. Data fusion for visual tracking with particles[J]. *Proceedings of the IEEE Issue on State Estimation*, 2004, **92**(3): 495-513.
- [12] VIOLA P, JONES M J. Robust real-time face detection[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **52**(2): 137-154.

- [13] PORIKLI F. Integral histogram: A fast way to extract histogram features in cartesian spaces[C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, **1**: 829-836.
- [14] KWON J, LEE K M. Visual tracking decomposition[C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1269-1276.
- [15] ALDAVERT D, RAMISA A, DE MANTARAS R L, *et al.* Fast and robust object segmentation with the integral linear classifier[C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1046-1053.
- [16] ZHU Q, YEH M C, CHENG K T, *et al.* Fast human detection using a cascade of histograms of oriented gradients [C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, **2**: 1491-1498.

An Integral Histogram-based Particle Filtering Tracking Method

QIU Jia-tao¹, LI Yu-shan¹, WANG Cai-ling², LIU Yang¹

(1 *Institute of Electronic CAD, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(2 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: A particle filtering tracking method is presented with low computational complexity using integral histogram technique. Integral orientation histogram is adopted for the construction of a response map. Based on this response map, a proposal is constructed such that particles are drawn from regions of the state space with high likelihood. Also, an integral color histogram-based likelihood model is proposed. Simulation results show that the proposed tracking method has lower computational complexity than that using straightforward histogram extraction method when using large number of particles for tracking large objects. The results are much accurate compared with that using traditional color Mean-Shift method under illumination change conditions.

Key words: Visual tracking; Particle filtering; Proposal distribution; Integral histogram; Color histogram; Orientation histogram