

文章编号: 1002-1582(2007)02-0226-04

# 基于 Mean-shift 的灰度目标跟踪新算法\*

张旭光<sup>1,2</sup>, 赵恩良<sup>3</sup>, 王延杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 沈阳建筑大学 理学院, 沈阳 110168)

**摘 要:** Mean-shift 算法是一种非参数密度估计算法, 可以实现快速的最优匹配, 在目标的实时跟踪领域起着非常重要的作用。为了有效的将 Mean-shift 算法应用到灰度图像中, 采用了以方向直方图建立目标模型的策略, 提出了在灰度图像中以 Mean-shift 为核心的目标跟踪算法。实验结果表明, 该算法具有不受光照条件影响的优点, 在低对比度的情况下仍能实现稳定、实时的跟踪目标。

**关 键 词:** 目标跟踪; Mean-shift; 方向编码; 方向直方图; Bhattacharyya 系数

**中图分类号:** TP242.6<sup>+</sup>2; TP391 **文献标识码:** A

## A new algorithm for tracking gray object based on Mean-shift

ZHANG Xu-guang<sup>1,2</sup>, ZHAO En-liang<sup>3</sup>, WANG Yan-jie<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3. Faculty of Basic Sciences, Shenyang Architecture and Civic Engineering University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The Mean-shift algorithm is a nonparametric density estimation method. The fast and optimal mode matching can be achieved by this method. This algorithm plays a very important roles in real-time object tracking field. In order to apply Mean-shift algorithm on gray-level image, a strategy that using orientation histogram to represent target is adopted. A new algorithm based on Mean-shift is established. Experiment results show that this algorithm can adapt the change of illumination. Though the contrast of image is low, the object can be tracked robust and real-time using the new algorithm.

**Key words:** object tracking; Mean-shift; orientation code; orientation histogram; Bhattachayya coefficient

## 1 引 言

目标的实时跟踪在计算机视觉领域有着非常重要的应用。近年来在目标跟踪领域提出了许多很好的算法, 如以提取轮廓<sup>[1]</sup>、纹理、颜色等特征来实现对目标的识别, 在频域下利用傅里叶<sup>[2]</sup>和小波<sup>[3]</sup>来进行目标识别和利用神经网络<sup>[4]</sup>来识别目标等。然而许多算法由于计算复杂都未能应用到对实时性要求较高的场合。Dorin Comaniciu 将 Mean-shift 算法引入到了目标跟踪领域<sup>[5,6]</sup>, 极大的减少了跟踪算法的计算量。因此国内外有许多学者继续在完善 Mean-shift 算法的应用<sup>[7]</sup>, 解决了算法中存在的一些缺点和不足<sup>[8]</sup>。Dorin Comaniciu 提出的算法是以彩色直方图作为特征来实现目标的识别与定位的。对灰度图像来说, 由于灰度直方图所包含的图像信息单一, 使得 Mean-shift 算法很难应用于灰度图像, 限制了 Mean-shift 算法的适应环境。目前国

内外的学者还没有提出成熟的算法来解决上述问题。本文提出了以代表图像的梯度方向信息的方向直方图<sup>[9]</sup>为特征, 将方向直方图与 Mean-shift 算法相结合, 使得 Mean-shift 算法在灰度图像中的应用更加有效。由于方向直方图代表的是图像的梯度方向信息, 因此具有抗缩放和抗光照的优点, 体现了图像的边缘及纹理特征, 尤其在图像的对比度低的情况下, 方向直方图仍可以稳定地跟踪目标。

## 2 Mean-shift 的原理

Mean-shift 算法<sup>[10]</sup>是一种非参数概率密度估计算法, 可以通过迭代快速的收敛于概率密度函数的局部最大值, 因此在目标实时跟踪领域有着很高的应用价值。对在  $n$  维欧式空间  $X$  中的有限序列  $S$  来说, 样本数据点  $x \in X$  处的样本均值被定义为<sup>[11]</sup>

\* 收稿日期: 2006-04-18; 收到修改稿日期: 2006-07-13

E-mail: mtnf2000@yahoo.com.cn

作者简介: 张旭光(1978-), 男(满族), 长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 从事实时图像处理、目标识别与跟踪的研究。

$$m(x) = \frac{\sum_{s \in S} K(s-x)w(s)s}{\sum_{s \in S} K(s-x)w(s)} \quad s \in S \quad (1)$$

式中:  $K$  为核函数;  $w$  为样本的权值函数。差值  $m(x) - x$  被称为 Mean-shift 矢量, 反复将数据点朝着 Mean-shift 矢量方向移动直至收敛的过程被称为 Mean-shift 算法。在迭代过程中的  $x$  处, 利用核函数  $K$  计算出的 Mean-shift 矢量指向卷积曲面  $J(x) = \sum_a G(a-x)w(a)$  的负梯度方向, 其中核函数  $K$  与  $G$  的相互关系应满足  $g'(r) = -ck(r)$ ,  $r = \|s-x\|^2$ ,  $c > 0$ ,  $g$  和  $k$  分别为核函数  $G$  与  $K$  的轮廓函数,  $c$  为常数。当迭代结束时, 核中心的位置对应某个概率密度的极值。在目标跟踪的过程中, 通过  $J(x)$  来刻画目标模型和候选区域之间的相似形, 从而使跟踪问题转化为 Mean-shift 的模式匹配问题。

### 3 目标模型的描述

#### 3.1 方向直方图

给定一灰度图像  $I$ , 定义像素的梯度方向角为

$$\theta = \arctan \frac{\partial f / \partial y}{\partial f / \partial x} \quad (2)$$

式中  $\partial f / \partial x$  和  $\partial f / \partial y$  分别是该像素处沿  $x$  和  $y$  方向的梯度, 可以通过梯度算子(如 sobel 算子)来获得。梯度方向角  $\theta$  的取值范围为  $0 \sim 2\pi$ (图 1)。为了获得方向编码, 需要对方向角进行量化。设方向角量化的间距为  $\Delta\theta$ , 于是方向编码可按式(3)计算:

$$c_{ij} = \begin{cases} [\theta_{ij} / \Delta\theta] & |\partial f / \partial x| + |\partial f / \partial y| > T \\ m & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

如果方向编码被量化成  $m$  个, 则  $c_{ij}$  的取值为  $\{0, 1, 2, \dots, m-1\}$ 。对于  $|\partial f / \partial x| + |\partial f / \partial y|$  小于阈值  $T$  的像素来说, 定义其方向编码为  $m$ , 由于此区域很难计算出稳定的的梯度方向角, 因而阈值  $T$  可根据经验来选择, 即根据要跟踪的目标的梯度丰富程度做适当调整, 本文选择  $T = 5$ 。如果采用的量化方向为 16 个, 则方向编码的间距  $\Delta\theta$  取  $\pi/8$ 。

方向直方图就是统计各个方向编码在图像中出现的概率。图像  $I$  中第  $u = 0, 1, \dots, m-1$  个方向编码出现的频率为

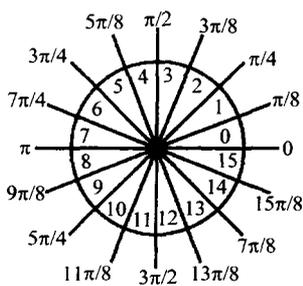


图 1 方向编码示意图

$$\hat{p}(u) = \sum_{(i,j) \in I} \delta(u - c_{ij}) \quad (4)$$

式中  $\delta$  是 delta 函数。

#### 3.2 模板模型

方向直方图统计的是图像中梯度的方向编码出现的概率, 不受目标尺寸变化以及光照条件变化的影响。假设目标模板的中心为  $y_0$ , 核函数窗口宽度为  $h$ , 模板中的各个像素位置用  $\{x_i\}_{i=1, \dots, n_h}$  表示, 目标的模型被量化成  $m$  个方向编码, 则归一化后的目标的第  $u = 0, 1, \dots, m-1$  个方向编码出现的概率可表示为

$$\hat{q}_u(y_0) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} \delta[b(x_i) - u] \quad (5)$$

式中: 函数  $b$  为  $R^2 \rightarrow \{0, 1, \dots, m-1\}$  时  $x_i$  处的像素向方向编码索引的映射, 实验中选取  $m = 16$ ;  $\delta$  是 derlta 函数;  $C_h$  是方向直方图的归一化常数。为了增加密度估计的鲁棒性, 对距离中心  $y_0$  较远的像素分配较小的权值, 这是因为位于此处的像素很可能是背景; 对于距离中心  $y_0$  较近的像素分配较大的权值, 这是因为位于此处的像素更可能是要被跟踪的目标。对方向直方图进行加权处理, 引入核函数  $k(x)$ , 则模板的方向直方图随即修改为

$$\hat{q}_u(y_0) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} k\left(\left\|\frac{y_0 - x_i}{h}\right\|^2\right) \delta[b(x_i) - u] \quad (6)$$

由条件  $\sum_{u=1}^m \hat{q}_u = 1$  得到的归一化常数为

$$C_h = 1 / \sum_{i=1}^{n_h} k(\|(y_0 - x_i)/h\|^2) \quad (7)$$

#### 3.3 候选区域模型

为了实现在当前帧中准确的匹配跟踪目标, 需要得到目标候选区域的概率模型, 设  $\{x_i\}_{i=1, \dots, n_h}$  为目标候选区域的各个像素的位置, 当前帧的中心位置为  $y$ , 应用同样的核函数  $k(x)$  以及窗口宽度  $h$ , 则目标候选区域的第  $u = 0, 1, \dots, m-1$  个方向编码出现的概率可由下式计算:

$$\hat{p}_u(y) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} k\left(\left\|\frac{y_0 - x_i}{h}\right\|^2\right) \delta[b(x_i) - u] \quad (8)$$

式中的  $C_h$  与式(7)的结果相同。 $C_h$  与候选区域的中心位置  $y$  无关, 只与核窗口的宽度  $h$  有关。如果需要调整  $h$  来适应目标的尺寸变化, 则需要计算新的  $C_h$ 。

### 4 用 Bhattacharyya 系数度量相似度

在得到目标模板和候选区域的概率密度函数

后,在当前帧中寻找目标位置的任务就转换成了寻找使得密度函数  $\hat{p}(y)$  与  $\hat{q}(y_0)$  最相似的位置。这里用 Bhattacharyya 系数评价方向直方图的相似性。目标模型的概率分布  $\hat{q}(y_0)$  与候选模型概率分布  $\hat{p}(y)$  的 Bhattacharyya 系数为

$$\hat{\rho}(y) = \sum_{u=0}^{m-1} \sqrt{\hat{p}_u(y)\hat{q}_u(y_0)} \quad (9)$$

$\hat{\rho}(y)$  越大,则模板与候选区域越相似。跟踪过程就是通过 Mean-shift 算法的快速匹配迭代到与模板最相似的位置。

## 5 目标的定位

采用 Mean-shift 算法搜索目标位置,定义样本均值为

$$m_{h,g(x)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} x_i w_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^{n_h} w_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} \quad (10)$$

式中:  $g(x) = -k'(x)$  为核密度估计;  $w_i$  为数据点  $x_i$  的权值。

$$w_i = \sum_{u=0}^{m-1} \sqrt{\frac{\hat{q}_u(y)}{\hat{p}_u(y_0)}} \delta[b(x_i) - u] \quad (11)$$

定义样本均值与实际数据点之差为 Mean-shift 矢量  $M_{h,g(x)}$ , 即

$$M_{h,g(x)} = m_{h,g(x)} - x \quad (12)$$

Mean-shift 的过程就是计算 Mean-shift 矢量  $M_{h,g(x)}$ , 并根据  $M_{h,g(x)}$  来反复迭代更新核函数窗口的中心位置。设核函数窗口的初始位置为  $y_0, y_{j+1}$  是在  $y_j$  位置计算出的加权均值, 则当前帧中的目标位置  $y_{j+1}$  为

$$\hat{y}_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} x_i w_i g\left(\left\|\frac{\hat{y}_j - x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^{n_h} w_i g\left(\left\|\frac{\hat{y}_j - x_i}{h}\right\|^2\right)} \quad (13)$$

$j = 0, 1, 2, \dots, n$

## 6 实验结果

算法的整个跟踪过程如下:

(1) 在当前帧初始位置处计算候选目标特征模型  $\{\hat{p}_u(\hat{y}_1)\}_{u=0, \dots, m-1}$ , 并根据式(9) 计算候选区域模型与模板模型的相似度  $\hat{\rho}(\hat{y}_1)$ 。

(2) 计算  $\{w_i\}_{i=1, \dots, n_h}$ 。

(3) 根据式(13)计算由 Mean-shift 算法迭代的候选目标新位置。

(4) 计算新的候选目标位置的目标特征模型  $\{\hat{p}_u(\hat{y}_2)\}_{u=0, \dots, m-1}$ , 并计算它与模板的相似度  $\hat{\rho}(\hat{y}_2)$ 。

(5) 如果  $\hat{\rho}(\hat{y}_2) < \hat{\rho}(\hat{y}_1)$ , 则  $\hat{y}_2 \leftarrow (1/2)(\hat{y}_1 + \hat{y}_2)$  直到  $\hat{\rho}(\hat{y}_2) > \hat{\rho}(\hat{y}_1)$ 。

(6) 如果  $\|\hat{y}_2 - \hat{y}_1\| < \epsilon$ , 则停止, 否则  $\hat{y}_1 \leftarrow \hat{y}_2$  转到步骤(2)。 $\epsilon$  的选择应使  $\hat{y}_2$  与  $\hat{y}_1$  的间距小于一个像素。

利用大量的序列图像对本算法进行了测试。图 2 显示了通过空对地拍摄的飞机序列图像, 图像的对比度低, 飞机的形状不清晰, 且背景中存在着大量地对飞机特征产生干扰的信息。图像的大小为  $720 \times 480$  pixel。模板大小为  $72 \times 48$  pixel, 量化的方向编码为 16 个。图 3 为在复杂背景下对车辆的跟踪实验, 图像背景复杂且卡车受到电线杆的干扰, 序列图像大小为  $720 \times 480$  pixel。模板大小选择  $40 \times 40$  pixel, 量化的方向编码为 16 个。在跟踪过程中, 通过人工选定目标后, 就无需输入任何参数。实验结果表明, 采用方向直方图具有良好的跟踪效果。本实验是在奔腾 1.4G 的 PC 机上运行的, 对飞机序列来说, 应用 Mean-shift 算法的计算时间大约为 5 ms。对卡车序列来说, 应用 Mean-shift 的计算时间大约为 2ms, 一般迭代 4 次就可以收敛。



图 2 飞机序列: 第 88, 221, 382 帧



图 3 卡车序列: 第 59, 187, 259 帧

## 7 结 论

针对灰度图像直方图信息单一使得 Mean-shift 算法难以应用到灰度图像上的情况, 本文提出了一种新的目标概率模型的建立方法。以方向直方图为目标特征模型, 体现了目标的边缘以及纹理特征; 以 Mean-shift 算法为核心, 减小了目标的模式匹配的搜索范围, 通过迭代使得搜索过程快速收敛。实验结果证明, 该算法可以增强 Mean-shift 算法在灰度图像中的稳定性, 在图像对比度低的情况下仍能稳定的识别和跟踪目标。

### 参考文献:

[1] 张昊, 黄战华, 郁道银, 等. 基于差分图像的运动目标跟踪与分

- 割方法的应用研究[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 565—567.
- [2] LIANG Yi-xiong, GONG Wei-guo, PAN Ying-jun, et al. Singular value decomposition-based approach for face recognition[J]. Optics and Precision Engineering (光学·精密工程), 2004, 12(5): 543—549. (in Chinese).
- [3] 桑爱军, 宋建中. 基于跟踪度的 Gabor 小波特征跟踪方法的研究[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 588—591.
- [4] XU Ting-fa, ZHANG Min, GU Hai-jun, et al. Multi-target recognition with improved BP algorithm[J]. Optics and Precision Engineering (光学·精密工程), 2003, 11(5): 513—515. (in Chinese).
- [5] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, 2003, 25(5): 564—577.
- [6] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-Time tracking of non-rigid

- objects using mean shift[A]. Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. 2000. 142—149.
- [7] Ning Song P, Jie Y, Zhi L. Mean shift blob tracking with kernel histogram filtering and hypothesis testing[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 605—614.
- [8] PENG Ning-Song, YANG Jie, LIU Zhi, et al. Automatic selection of Kernel-bandwidth for Mean-shift object tracking[J]. Journal of Software(软件学报), 2005, 16(9): 1542—1550. (in Chinese)
- [9] Ullah F, Kaneko S. Using orientation codes for rotation-invariant template matching[J]. Pattern recognition, 2004, 37: 201—209.
- [10] Fukunaga K, Hostetler L D. The estimation of the gradient of a density function, with application in pattern recognition[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1975, 21(1): 32—40.
- [11] Cheng Y. Mean shift, mode seeking and clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790—799.

(上接第 225 页)

$$\int_0^{\alpha/2} P(\theta, \alpha) \cdot f(\theta) d\theta = P(0, \alpha') \quad (20)$$

$$\frac{K \cdot \int_0^{\alpha/2} T(\theta, \alpha) \cdot f(\theta) d\theta}{\alpha^2} = \frac{K}{\alpha'^2} \quad (21)$$

所以等效为静止时的发散角  $\alpha'$  与原发散角  $\alpha$  的比值为

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \left[ \frac{1}{\int_0^{\alpha/2} T(\theta, \alpha) \cdot f(\theta) d\theta} \right]^{1/2} \quad (22)$$

$\alpha'/\alpha =$

$$\left\{ \frac{1}{\int_0^{\alpha/2} \left[ \frac{2J_1(2.44\pi \cdot \theta/\alpha)}{2.44\pi \cdot \theta/\alpha} \right]^2 \frac{\theta}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\theta}{\sigma^2}\right) d\theta} \right\}^{1/2} \quad (23)$$

由此可见  $\alpha'/\alpha$  是  $\sigma$  和  $\alpha$  的函数, 当瞄准系统确定后, 瞄准误差的标准方差  $\sigma$  就确定了。将等效角  $\alpha'$  与原发散角  $\alpha$  的相对误差随  $\sigma$  变化的趋势绘于图 4, 取误差的 10% 作为评价指标。当  $\alpha'$  与  $\alpha$  的相对误差在 10% 范围内时, 可认为  $\alpha'$  与  $\alpha$  近似相等, 即可把目标看作近似的静止状态, 可直接使用简易公式进行激光辐照功率的近似计算, 不必代入复杂的运动目标的辐照功率公式进行计算。但当  $\alpha'$  与  $\alpha$  的误差大于 10% 后, 已经不能将运动目标看作静止目标来估算, 则必须代入公式进行精确计算。

由图 4 可知, 当瞄准方差  $\sigma = 0$  ( $\theta = 0$ ) 时, 此时对应目标静止时的情况,  $\alpha'/\alpha - 1 = 0$ , 即  $\alpha' = \alpha$ 。随着目标运动时移动量(即  $\alpha$  或  $\theta$ ) 的增大,  $\alpha'$  与  $\alpha$  的比值呈上升趋势。图

4 中交点 A, B, C 所对应的曲线分别为光束发散角  $\alpha_A = 5\mu\text{rad}$ ,  $\alpha_B = 10\mu\text{rad}$ ,  $\alpha_C = 15\mu\text{rad}$  时  $\alpha'/\alpha$  的变

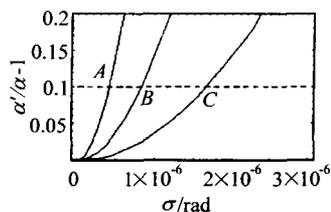


图 4 不同发散角  $\alpha$  时的等效静止模型方差极限

化曲线。图 4 中, 当  $\alpha'$  与  $\alpha$  的误差等于 10% 时, 即为能将运动目标看作是静止状态时的等效静止模型方差极限  $\sigma_{\max}$ , 分别为  $\sigma_{\max A} = 0.4\mu\text{rad}$ ,  $\sigma_{\max B} = 0.8\mu\text{rad}$ ,  $\sigma_{\max C} = 1.2\mu\text{rad}$ 。可见随着发射激光束发散角  $\alpha = 5\mu\text{rad}$  时为例, 若目标在激光束的位置  $\theta$  小于  $\sigma_{\max} = 0.4\mu\text{rad}$  时, 则可近似为静止目标, 采用简易公式进行计算。当  $\theta > \sigma_{\max}$  时, 则需代入式(11)进行精确计算, 或者采用图解法, 根据已知发射光束宽度  $\alpha$ , 在图 4 中找出对应的静止目标发散角  $\alpha'$ , 代入静止目标辐照公式进行计算。

## 5 结 论

当激光远距离辐照目标时, 由于星际间或陆地上的目标处于随机振动之中, 此振动对目标实际接收到的激光辐照功率影响很大, 常用的将目标设为静止状态估算辐照功率的方法误差很大。本文以星际间目标为例, 建立了对远距离运动目标的精确激光辐照功率模型, 并定量分析了将目标看作静止状态时带来的误差, 最后给出了能否将随机运动目标等效为静止时的判据。结果表明, 当系统的瞄准方差小于本文计算出的等效静止方差极限时, 可将目标看作静止状态, 用简易的静止模型估算辐照功率, 估算结果与实际相比误差小于 10%。否则, 则必须考虑目标的随机运动, 只有这样才能对实际情形进行准确评估。

## 参考文献:

- [1] 王世勇, 付有余. 远场光电探测器系统受激光干扰与损伤效果估计[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 28—30.
- [2] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] Barry J D, Mecherle G S. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication systems[J]. Optical Engineering, 1985, 24: 1049—1054.
- [4] Germann L M, Nelson R. Pointing, acquisition and tracking subsystem for space-based laser communication [J]. Proceedings of SPIE, 1986, 616: 118—128.
- [5] Arnon S, Rotman S, Kopeika N S. Beam width and transmitter power adaptive to tracking system performance for free-space optical communication[J]. Applied Optics, 1997, 36: 6095—6099.