

# 浮游动物识别

王如晨 朱亚菲

2015 年 7 月

## 目录

1 竞赛	3
1.1 PASCAL VOC Challenges 2005-2012	3
1.2 IMAGENET Large Scale Visual Recognition Challenges 2010-2015	3
1.3 Labeled Faces in the Wild	4
2 特征 (Ours)	4
2.1 经典特征	4
2.1.1 SIFT 特征	4
2.1.2 HOG 特征	7
2.1.3 SURF	10
2.1.4 LBP	10
2.1.5 FV(Fisher vector)	11
2.1.6 骨架特征	12
2.1.7 SC	12
2.1.8 哈尔特征 (Haar-like features)	13
2.2 其它特征	14
2.2.1 local symmetry	14
2.2.2 灰度特征	15
2.2.3 GIST	17
2.2.4 Harris-Laplace	17
2.2.5 GMM-HMM(Gaussian Mixture Model-Hidden Markov Model)	17
2.2.6 Gabor	17
2.2.7 DoG	18
2.2.8 Covariance Matrix	18

2.2.9 凸包 . . . . .	18
2.2.10 ICA(Independent Component Analysis) . . . . .	18
2.2.11 Binary SIFT (BSIFT) – Zhou, TIP 2014 . . . . .	18
2.2.12 COGE - PCM 2013 Best Paper, Mao , 2013 . . . . .	18
2.2.13 Ultra-Short Binary Descriptor (USB) – Zhang S., TIP , 2014 . . . . .	18
2.2.14 Topology-Preserving Hashing – Zhang L., MM 2012 . . . . .	18
<b>3 学习算法 . . . . .</b>	<b>18</b>
3.1 贝叶斯学习 . . . . .	18
3.2 SVM 方法 . . . . .	19
3.3 K-means . . . . .	19
3.4 Decision tree . . . . .	19
3.5 EM(Expectation Maximization Algorithm) . . . . .	19
3.6 KNN . . . . .	19
3.7 ELM (极限学习机) . . . . .	20
3.8 集成学习 (Ensemble learning) . . . . .	20
3.8.1 AdaBoost . . . . .	20
3.8.2 Bagging . . . . .	20
3.8.3 Gasen . . . . .	21
<b>4 技术路线和方案 . . . . .</b>	<b>21</b>
4.1 技术路线 . . . . .	21
<b>5 实验与分析 . . . . .</b>	<b>22</b>
5.1 HOG+SVM . . . . .	22
5.1.1 理论 . . . . .	22
5.1.2 实验 . . . . .	23
5.1.3 分析 . . . . .	28
5.2 LBP+SVM . . . . .	29
5.2.1 实验 . . . . .	29
5.2.2 分析 . . . . .	32
5.3 SIFT+BoW+SVM . . . . .	33
5.4 BoF+SVM . . . . .	34

5.5 HOG+RandomForest . . . . .	35
5.5.1 实验 . . . . .	35
5.5.2 分析 . . . . .	36
5.6 LBP+RandomForest . . . . .	36
5.6.1 实验 . . . . .	36
5.6.2 分析 . . . . .	37

## 1. 竞赛

### 1.1 PASCAL VOC Challenges 2005-2012

PASCAL VOC 挑战赛是视觉对象的分类识别和检测的一个基准测试，提供了检测算法和学习性能的标准图像注释数据集和标准的评估系统。

挑战赛主要分为三个部分：图像的分类、识别、分割，另外还有一个“动态”分类项目，一个由 Image Net 举行的大规模识别竞赛和人类身体部位识别的附加赛项目。

分类就是让算法找出测试图片都是属于哪一个标签，对测试的图片进行分类，将图片对号入座。检测则是检测出测试图片中由委员会特别圈定的内容，看看算法能否正确的符合圈定的内容。分割是对图片进行像素级分割，也就是识别出的特定物体用一种颜色表示，其他的则作为背景。动作分类则是在静态图片中预测人类的动作，比如有一张人类跑步的图片，算法根据身体各部位的位置特征判别这个动作是“running”。人类轮廓识别就是识别标示出来的人体部位，这对于一张图片有几个人或者两个人身体部分纠缠在一起的图片识别有重要意义。

### 1.2 IMAGENET Large Scale Visual Recognition Challenges 2010-2015

ILSVRC 每年的竞赛内容包括：

- ILSVRC2014: Detection and Classification and localization
- ILSVRC2013: Detection and Classification and localization
- ILSVRC2012: Classification, Classification and localization and Fine-grained classification
- ILSVRC2011: Classification and Classification and localization
- ILSVRC2010: Classification

### 1.3 Labeled Faces in the Wild

## 2. 特征 (Ours)

### 2.1 经典特征

#### 2.1.1 SIFT 特征

SIFT (Scale invariant feature transform, 尺度不变特征变换) 是一种检测局部特征的算法，该算法通过求得一幅图像中的特征点及有关尺度和方向的描述子得到特征并进行图像特征点匹配，它由 David Lowe 在 1999 年 [8] 所发表，2004 年 [9] 完善总结。

**主要思想：**SIFT 算法是一种提取局部特征的算法，在尺度空间寻找极值点，提取位置、尺度、旋转不变量。

**算法步骤：**

1. 构建尺度空间，检测极值点，获得尺度不变性。

通过高斯微分函数来识别潜在的对于尺度和旋转不变的兴趣点。用不同尺度（标准差）的高斯函数对图像进行平滑，然后比较平滑后图像的差别，差别大的像素就是特征明显的点。

原始图像经过不同尺度的高斯模糊所得的一组图像空间定义为：

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

其中  $I(x, y)$  是原始图像， $\sigma$  大小决定图像的平滑程度， $G(x, y, \sigma)$  是尺度可变高斯函数：

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

为了有效地在尺度空间检测到稳定的关键点，提出了高斯差分尺度空间。利用不同尺度的高斯差分核与图像卷积生成。

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$$

2. 精确定位出特征关键点的位置。
3. 为关键点指定方向参数。

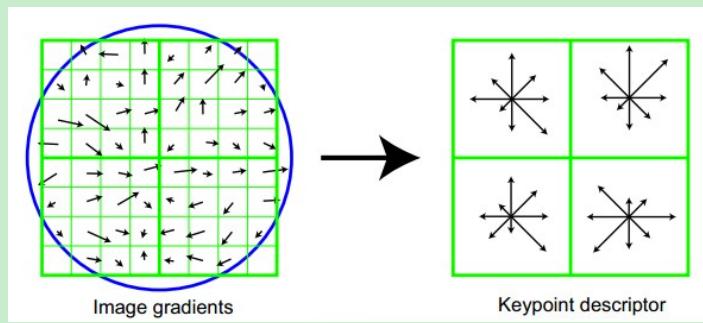


图 1:

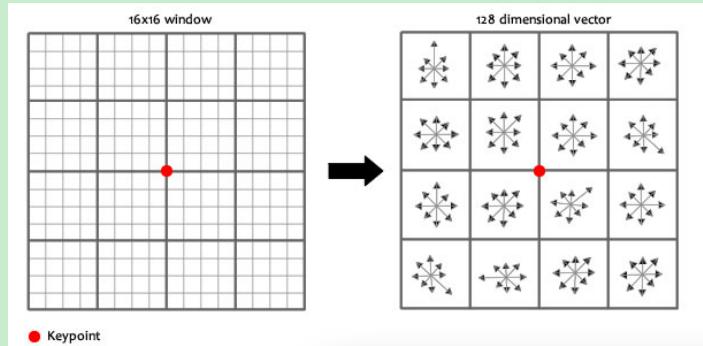


图 2: 描述子用 128 维向量表征

利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性，我们可以为每个关键点指定方向参数方向，从而使描述子对图像旋转具有不变性，我们通过求每个极值点的梯度来为极值点赋予方向。

$$m(x, y) = \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2}$$

$$\theta(x, y) = \alpha \tan 2 \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}$$

方向直方图的生成：确定关键点的方向采用梯度直方图统计法，统计以关键点为原点，一定区域内的图像像素点对关键点方向生成所做的贡献。梯度直方图的范围是 0 ~ 360 度，其中每 45 度一个柱，总共 8 个柱。以特征点为中心取  $16 \times 16$  的邻域作为采样窗口，将采样点与特征点的相对方向通过高斯加权后归入包含 8 个 bin 的方向直方图，最后获得  $4 \times 4 \times 8$  的 128 维特征描述子。 $16 \times 16$  的图中其中  $1/4$  的特征点梯度方向及 scale，图 1 为其加权到 8 个主方向后的效果。

描述子采用  $4 \times 4 \times 8 = 128$  维向量表征，综合效果最优，如图 2。

#### 4. 关键点描述子产生。

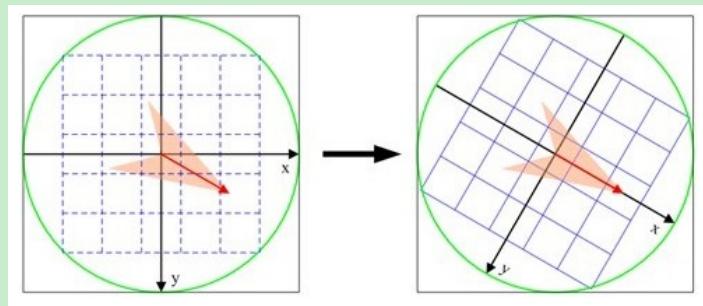


图 3: 将坐标移至关键点主方向

(a) 确定计算描述子所需的图像区域，图像区域的半径通过下式计算：

$$\text{radius} = \frac{3\theta_{\text{oct}} \times \sqrt{2} \times (d + 1)}{2}$$

(b) 将坐标移至关键点主方向，如图3。

旋转后邻域内采样点的新坐标为：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \sigma & -\sin \sigma \\ \sin \sigma & \cos \sigma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

(c) 在图像半径区域内对每个像素点求其梯度幅值和方向，然后对每个梯度幅值乘以高斯权重参数，生成方向直方图。

(d) 在窗口宽度为  $2 \times 2$  的区域内计算 8 个方向的梯度方向直方图，绘制每个梯度方向的累加值，即可形成一个种子点。然后再在下一个  $2 \times 2$  的区域内进行直方图统计，形成下一个种子点，共生成 16 个种子点。

(e) 描述子向量元素门限化及门限化后的描述子向量规范化。

(f) 根据特征点的尺度对特征描述向量进行排序，SIFT 特征向量生成。

### 应用：

特征点检测匹配

### 代码：

采用 vl\_feat 中的 sift 特征函数：

```
1 [f, d] = vl_sift(img);
```

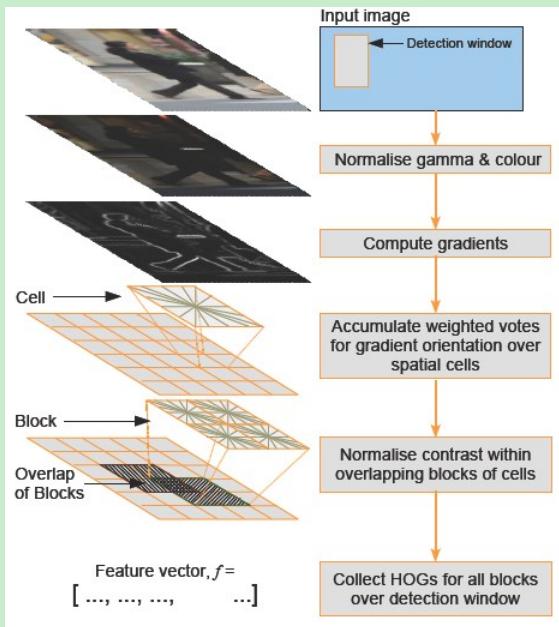


图 4: HOG 特征

### 2.1.2 HOG 特征

HOG [5] (Histogram of Oriented Gradients, 方向梯度直方图) 是一种在计算机视觉和图像处理中用来进行物体检测的特征描述子，它通过统计图像局部区域的梯度方向直方图来构成特征。HOG 特征结合 SVM 分类器已经被广泛应用于图像识别中，尤其在行人检测中获得了极大的成功。

**主要思想：**局部目标的表象和形状能够被梯度或边缘的方向密度分布很好地描述。

**具体实现方法：**将图像分成小的连通区域，我们把它叫细胞单元 (cell)。然后采集细胞单元中各像素点的梯度的或边缘的方向直方图，最后把这些直方图组合起来就可以构成特征描述器。具体实现流程如图4。

**算法步骤：**

1. 图像归一化。采用 Gamma 校正法对输入图像进行颜色空间的标准化；目的是调节图像的对比度，降低图像局部的阴影和光照变化所造成的影响，同时可以抑制噪音的干扰。

Gamma 压缩公式：

$$I(x, y) = I(x, y)^{\text{gamma}}$$

比如可以取  $\text{Gamma}=\frac{1}{2}$ 。

2. 利用一阶微分计算每一个像素的梯度（包括大小和方向）；目的是为了捕获轮廓信息，同时进一步弱化光照的干扰。

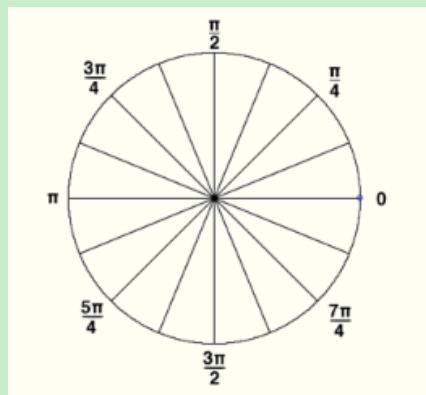


图 5: 梯度方向 bin

采用模板  $[-1 \ 0 \ 1]$ (实验表明采用模板  $[-1 \ 0 \ 1]$  求得的梯度效果最好) 计算水平和垂直方向的梯度：

$$G_h(x, y) = f(x + 1, y) - f(x - 1, y) \quad \forall x, y$$

$$G_v(x, y) = f(x, y + 1) - f(x, y - 1) \quad \forall x, y$$

计算梯度值和梯度方向：

$$M(x, y) = \sqrt{G_h(x, y)^2 + G_v(x, y)^2}$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{G_h(x, y)}{G_v(x, y)}$$

3. 将图像划分成小 cells (例如  $6 \times 6$  像素/cell)。

4. 统计每个 cell 的梯度直方图，可形成每个 cell 的描述子；

构建每个单元的梯度方向直方图，将 cell 的梯度方向 360 度根据需要分成 m 个 bin，例如图5分成了 16 个 bin。然后根据每个像素点的梯度方向，采用加权投票的方式得到直方图，即每一票都是带权值的，这个权值是根据该像素点的梯度幅度计算出来的。

5. 将每几个 cell 组成一个块 (block) (例如  $3 \times 3$  个 cell/block)，一个 block 内所有 cell 的梯度直方图串联起来便得到该 block 的 HOG 特征描述子。

把各个细胞单元组合成大的、空间上连通的区间 (blocks)。这样以来，HOG 描述器就变成了由各区间所有细胞单元的直方图成分所组成的一个向量。这些区间是互有重叠的，这就意味着：每一个细胞单元的输出都多次作用于最终的描述器。区间有两个主要的几何形状——矩形区间 (R-HOG) 和环形区间 (C-HOG) 如图6。

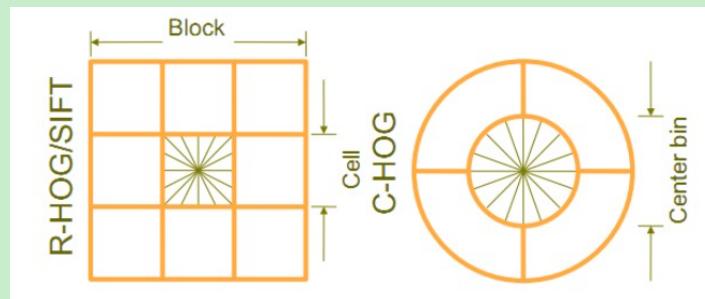


图 6: 矩形区间和环形区间

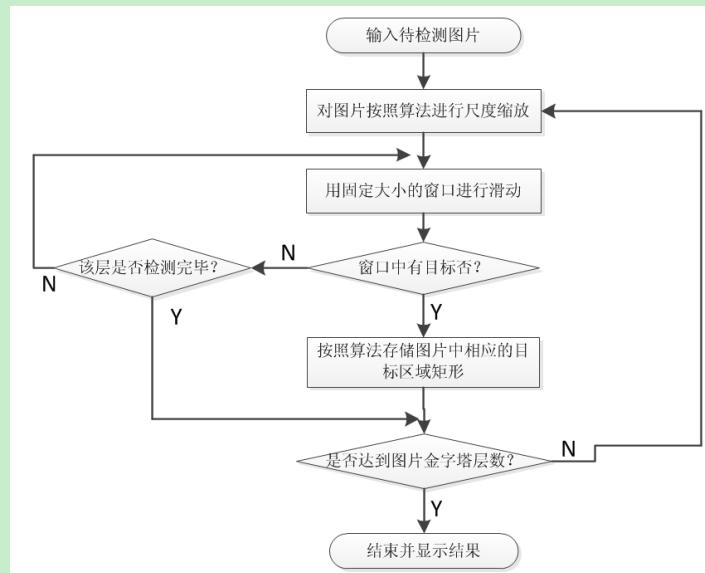


图 7: 行人检测流程

6. 将图像内的所有 block 的 HOG 特征直方图串联起来就可以得到该图像的 HOG 特征描述子了。这个就是最终的可供分类使用的特征向量了。

最终可以得到一个  $m \times n \times \alpha$  个数据组成的高维向量，其中  $m$  表示每个 cell 中方向 bin 的数目， $n, \alpha$  分别表示 block 的个数以及一个 block 中 cell 的数目。

#### 在行人检测中的应用：

用一个窗口（OpenCV 采用  $64 \times 128$ ）在图像中滑动，计算窗口对应的 HOG 特征。窗口中块的大小为  $16 \times 16$ ，块的步长为  $8 \times 8$ ，单元的大小为  $8 \times 8$ 。把每一个胞元投影到 9 个 bin，那么每一个单元对应的向量就是 9 维，每个 bin 对应该 9 维向量的一个数。该窗口特征向量的维数为：  
 $9 \times \frac{16}{8} \times \frac{16}{8} \times (\frac{64-16}{8}+1) \times (\frac{128-16}{8}+1) = 3780$ 。

行人检测过程如图 7：

#### 代码：

采用 `vl_feat` 中的 HOG 特征函数：

```

1 HOG = vl_hog(img, cellsize); // img 表示输入的图像, cellsize 为单元的大小
2 image = vl_hog('render', hog); // 将 HOG 特征转换为图像

```

**应用 (Deformable Part Model)** : DPM 是一个非常成功的目标检测算法, 连续获得 VOC (Visual Object Class) 07、08、09 年的检测冠军。目前已成为众多分类器、分割、人体姿态和行为分类的重要部分。2010 年 Pedro Felzenszwalb 被 VOC 授予“终身成就奖”。DPM 可以看做是 HOG (Histograms of Oriented Gradients) 的扩展, 大体思路与 HOG 一致。先计算梯度方向直方图, 然后用 SVM (Support Vector Machine) 训练得到物体的梯度模型 (Model)。有了这样的模板就可以直接用来分类了, 简单理解就是模型和目标匹配。DPM 只是在模型上做了很多改进工作。

### 2.1.3 SURF

SURF 与 SIFT 算法相似, SIFT 算法比较稳定, 检测特征点更多, 但是复杂度较高, 而 SURF 要运算简单, 效率高, 运算时间短一点。

**算法步骤:**

1. 构建 Hessian 矩阵。采用的是 Hessian 矩阵行列式近似值图像。

2. 构造多尺度空间。

为了实现尺度不变性的特征点检测与匹配, SURF 算法与 SIFT 算法的第一步都是构造图像多尺度空间。SURF 算法则用高斯滤波与 Hessian 矩阵结合近似实现多尺度空间, 计算复杂度相比 SIFT 降低多了。

3. 根据非极大值抑制初步确定特征点。

4. 主方向确定

5. 构造特征点算术描述子, SURF 算法是选取一个 20S (单位) 的区域, 分成  $4 \times 4$  分, 每一份中有  $5 \times 5$  S, 统计一份中的  $\sum d_x$ ,  $\sum d_y$ ,  $\sum |d_x|$ ,  $\sum |d_y|$ , 这样就得到  $4 \times 4 \times 4 = 64$  的向量描述子。SIFT 是 128 个描述子, 比 SURF 复杂一点。

### 2.1.4 LBP

LBP (Local Binary Pattern, 局部二值模式)<sup>1</sup> 是一种用来描述图像局部纹理特征的算子; 它具有旋转不变性和灰度不变性等显著的优点。它是首先由 T. Ojala, M.Pietikäinen, 和 D. Harwood 在 1994 年提出 [10], 用于纹理特征提取。而且, 提取的特征是图像的局部的纹理特征。

<sup>1</sup><http://blog.csdn.net/zouxy09/article/details/7929531>

原始的 LBP 算子定义为在  $3 \times 3$  的窗口内，以窗口中心像素为阈值，将相邻的 8 个像素的灰度值与其进行比较，若周围像素值大于中心像素值，则该像素点的位置被标记为 1，否则为 0。这样， $3 \times 3$  邻域内的 8 个点经比较可产生 8 位二进制数（通常转换为十进制数即 LBP 码，共 256 种），即得到该窗口中心像素点的 LBP 值，并用这个值来反映该区域的纹理信息。如下图 34：

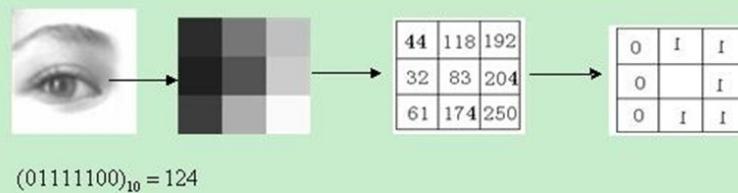


图 8: LBP 特征

对 LBP 特征向量进行提取的步骤：

1. 首先将检测窗口划分为  $16 \times 16$  的小区域 (cell)；
2. 对于每个 cell 中的一个像素，将相邻的 8 个像素的灰度值与其进行比较，若周围像素值大于中心像素值，则该像素点的位置被标记为 1，否则为 0。这样， $3 \times 3$  邻域内的 8 个点经比较可产生 8 位二进制数，即得到该窗口中心像素点的 LBP 值；
3. 然后计算每个 cell 的直方图，即每个数字（假定是十进制数 LBP 值）出现的频率；然后对该直方图进行归一化处理。
4. 最后将得到的每个 cell 的统计直方图进行连接成为一个特征向量，也就是整幅图的 LBP 纹理特征向量；
5. 然后便可利用 SVM 或者其他机器学习算法进行分类了。

### 2.1.5 FV(Fisher vector)

Fisher vector 本质上是用似然函数的梯度 vector 来表达一幅图像。

**主要思路：**用生成式模型 (GMM) 对样本输入进行建模，进而得到样本的一种表示 (fisher vector)，再将这种表示 (fisher vector) 输入判别式分类器 (SVM) 得到图像分类结果。fisher vector 是 fisher kernel 中对样本特征的一种表示，它把一幅图片表示成一个向量。在高斯分布的基础上再找到变化的方向，可以更加准确的表示这一张图。

**应用：**图像的分类，目标识别等领域，特别是结合着 BOW model。

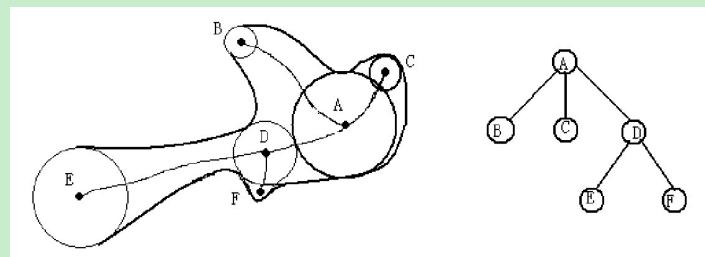


图 9: 骨架树



图 10: 原始图像

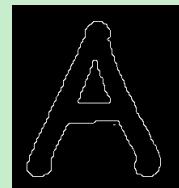


图 11: 边缘提取

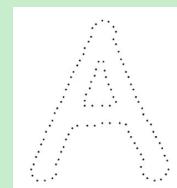


图 12: 采样点

### 2.1.6 骨架特征

**理论：**骨架又称为中轴，它的定义来自于烧草模型和最大圆盘模型。骨架不仅包含了物体的几何特征，也描述了物体的拓扑结构。经典的骨架化算法有中轴变换、细化算法、Voronoi 图算法等。在骨架的基础上可以通过奇点图、骨架树等对物体的结构特征进行描述。

**骨架树：**将骨架映射到一个树状结构（如图9）。仅有一个邻接点的骨架点成为端点，有两个以上邻接点的骨架点称为分支点，骨架上除了分支点和端点外的点称为连接点。根据骨架树深度优先搜索产生的节点序列中的所有节点用其孩子数替换，替换后得到的新序列即为树描述符。例如，图9的树描述符为 (3, 2, 0, 0, 0, 0)。

**骨架化代码：**<http://cs.smith.edu/~nhowe/research/code/>。

### 2.1.7 SC

SC [2] (Shape context, 形状上下文) 是基于物体轮廓样本点进行描述的。

**主要思想：**用直方图描述轮廓上点间的位置关系。

**算法步骤：**

1. 边缘提取（如图11）。
2. 从边缘上均匀采样  $n$  个点，得到一个物体形状的点集合（如图12）。
3. 通过对数极坐标空间（如图13）计算每个采样点与形状其他点之间的位置关系，采用直方图表示（如图14）。 $n$  个采样点中，每个点都有一个直方图对其位置进行描述。

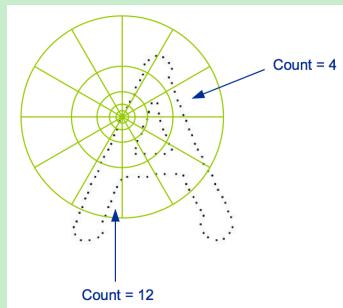


图 13: 对数极坐标空间

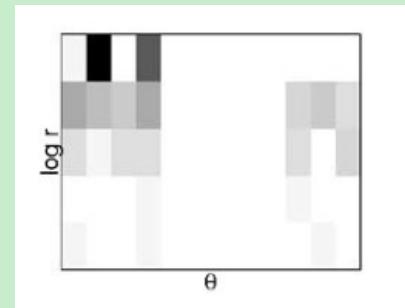


图 14: 直方图

但由于形状上下文不能很好地解决物体类内部之间的变形，因此采用基于内部距离的形状上下文 [7]，内距离形状上下文中采用内距离代替欧式距离。

内距离形状上下文代码：[http://www.dabi.temple.edu/~hbling/code\\_data.htm](http://www.dabi.temple.edu/~hbling/code_data.htm)。

### 2.1.8 哈尔特征 (Haar-like features)

Haar-like 特征最早是由 Oren 等 [11] 应用于人脸表示，Viola 和 Jones [13] 在此基础上，使用 3 种类型 4 种形式的特征。

Viola 等提出的 Harr-like 特征如图 15：

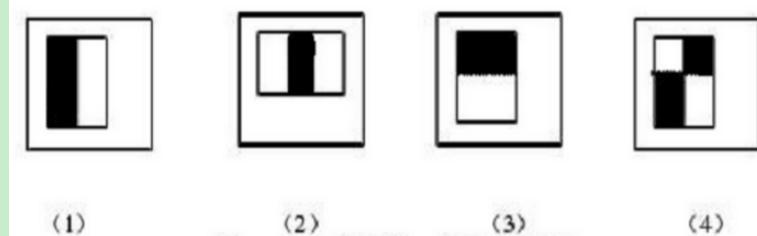


图 15: Viola 提出的 Haar-like 特征

将上面的任意一个矩形放到人脸区域上，然后，将白色区域的像素和减去黑色区域的像素和，得到的值我们暂且称之为人脸特征值，如果你把这个矩形放到一个非人脸区域，那么计算出的特征值应该和人脸特征值是不一样的，而且越不一样越好，所以这些方块的目的就是把人脸特征量化，以区分人脸和非人脸。

为了增加区分度，可以对多个矩形特征计算得到一个区分度更大的特征值，那么什么样的矩形特征怎么样的组合到一块可以更好的区分出人脸和非人脸呢，这就是 AdaBoost 算法要做的事了。

## 2.2 其它特征

### 2.2.1 local symmetry

Reisfeld 等人 [12] 发表的论文中有关于局部对称性的描述。

Isotropic Symmetry Operator:

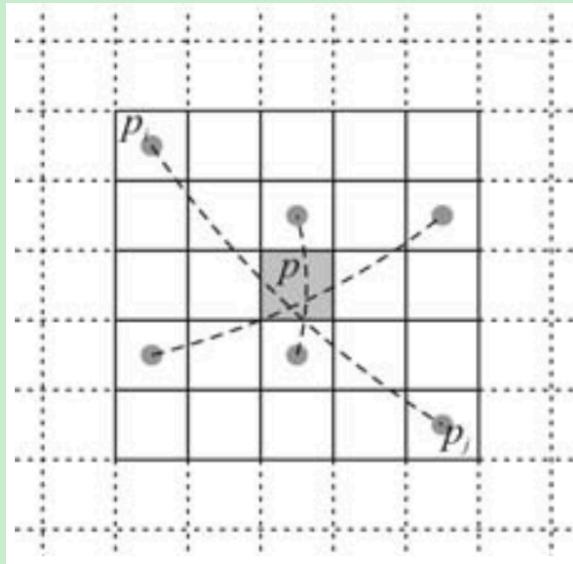


图 16: 用对称性算子来对像素对的梯度进行比较的三个例子

基于周围像素的灰度梯度，计算在给定点  $p$  处的对称性程度。如图 16 所示，点  $p$  处的对称性可以通过比较位于  $p_i$  和  $p_j$  处的像素对  $i$  和  $j$  的灰度梯度来度量，其中  $p = (p_i + p_j)/2$ 。每对像素对对点  $p$  处的局部对称性的贡献为

$$c(i, j) = d(i, j, \sigma) \cdot p(i, j) \cdot m_i \cdot m_j \quad (1)$$

$m_i$  是像素点  $i$  的梯度的模， $d(i, j, \sigma)$  是当标准差为  $\sigma$  时，两个像素点间的距离的高斯加权函数，对称性

$$p(i, j) = \left(1 - \cos(\gamma_i + \gamma_j)\right) \cdot \left(1 - \cos(\gamma_i - \gamma_j)\right) \quad (2)$$

其中， $\gamma_i = \theta_i - \alpha$ ，见图 17。当点  $p_i$ 、 $p_j$  关于点  $p$  对称时， $\gamma_i + \gamma_j = \pi$ ，式 (2) 中的第一项取得最大值。如果只用第一项，会使得在直线边缘上的点取得较大的值，而这些点通常并不具有对称性。为了避免这个问题，又加入了第二项，表示具有相似梯度方向的像素对。最后，对所有像素对的贡献

进行求和得到点  $p$  处的 isotropic symmetry 值

$$M^{iso}(x, y) = \sum_{(i,j) \in \Gamma(p)} c(i, j) \quad (3)$$

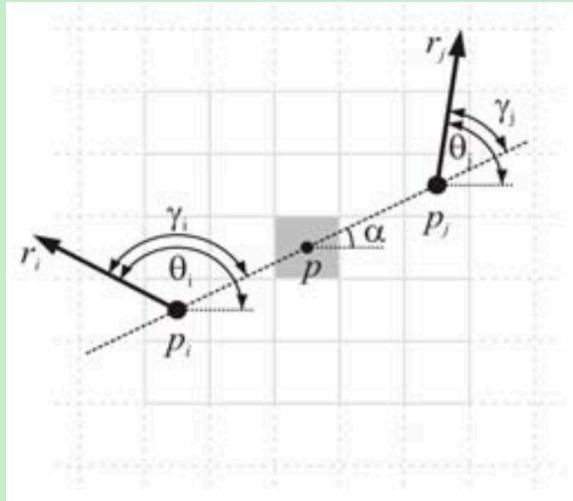


图 17: 每对像素对的贡献的几何表示

为了使 symmetry operator 对有多个对称轴的对称图案更敏感, Reisfeld 等人 [12] 又提出了 radial symmetry operator, 作为 isotropic symmetry operator 的扩展。首先, 像素对的贡献的方向用  $\varphi(i, j) = (\theta_i + \theta_j)/2$  来计算。然后, 对最大贡献为  $c(i, j)$  的像素对  $(i, j)$ , 对称方向被确定为  $\phi(p) = \varphi(i, j)$ 。这个值也用来提升有不相似方向的像素对的贡献

$$M^{rad} = \sum_{(i,j) \in \Gamma(p)} c(i, j) \cdot \sin^2(\varphi(i, j) - \phi(p)) \quad (4)$$

### 2.2.2 灰度特征

1) 灰度直方图 灰度直方图是灰度级函数, 它表示图像中每种灰度级的像素的个数, 反映图像中每种灰度出现的频率。灰度直方图的横坐标是灰度级, 纵坐标是该灰度级出现的频率。

```
1     imhist(I, n);
```

2) 灰度共生矩阵 (GLCM)

灰度共生矩阵是对图像上保持某距离的两像素分别具有某种灰度的情况进行统计得到的。它不仅反映亮度的分布特性, 也反映具有同样亮度或接近亮度的像素之间的位置分布特性。对灰度共生矩阵

的理解，需要明确几个概念：方向、偏移量和灰度共生矩阵的阶数。

**方向** 一般计算过程会分别选在几个不同的方向来进行，通常为 0, 45, 90, 135。

### 偏移量

**灰度共生矩阵阶数** 灰度共生矩阵的阶数和灰度图像灰度值的阶数是一致的，即当灰度图像灰度值的阶数是  $N$  时，灰度共生矩阵为  $N \times N$ 。

取图像 ( $N \times N$ ) 中任意一点  $(x,y)$  及偏离它的另一点  $(x+a,y+b)$ ，设该点对的灰度值为  $(g_1,g_2)$ 。令点  $(x,y)$  在整个画面上移动，则会得到各种  $(g_1,g_2)$  值，设灰度值的级数为 256，则  $(g_1,g_2)$  的组合共有  $256 \times 256$  种（共生矩阵的大小）。对于整个画面，统计出每一种  $(g_1,g_2)$  值出现的次数，然后排列成一个方阵，在用  $(g_1,g_2)$  出现的总次数将它们归一化为出现的概率  $P(g_1, g_2)$ ，这样的方阵称为灰度共生矩阵。

为了能更直观的以共生矩阵描述纹理情况，从共生矩阵导出一下反映矩阵情况的参数，典型的有一下几种：

**能量** 为灰度共生矩阵元素值的平方和，反映了图像灰度分布均匀程度和纹理粗细度。ASM 值大表明一种较均一和规则变化的纹理模式。

$$ASM = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k G(i, j)^2$$

**对比度** 反映了某个像素值及其领域像素值的亮度的对比情况。如果偏离对角线的元素有较大值，即图像亮度值变化很快，则 CON 会有较大取值。

$$CON = \sum_i \sum_j (i - j)^2 G(i, j)$$

**熵** 表示图像的信息量，当共生矩阵中所有元素有最大的随机性、空间共生矩阵中所有值几乎相等时，共生矩阵中元素分散分布时，熵较大。它表示了图像中纹理的非均匀程度或复杂程度。

$$ENT = \sum_i \sum_j G(i, j) \log G(i, j)$$

**自相关** 反应了图像纹理的一致性。如果图像中有水平方向纹理，则水平方向矩阵的 COR 大于其余矩阵。

阵的 COR 值。

$$COR = \frac{\sum_i \sum_j [(ij)G(i,j)] - u_i u_j}{s_i s_j}$$

```
1 [glcm,SI] = graycomatrix(Img);
```

### 2.2.3 GIST

GIST 是一个全局描述子，主要用于场景分类。

### 2.2.4 Harris-Laplace

### 2.2.5 GMM-HMM(Gaussian Mixture Model-Hidden Markov Model)

**应用：**语音识别

### 2.2.6 Gabor

Gabor 变换是 D.Gabor 1946 年提出的。Gabor 变换属于加窗傅立叶变换，Gabor 函数可以在频域不同尺度、不同方向上提取相关的特征。另外 Gabor 函数与人眼的生物作用相仿，所以经常用作纹理识别上，并取得了较好的效果。

Gabor 滤波器是一个用于边缘检测的线性滤波器。用 Gabor 函数形成的二维 Gabor 滤波器具有在空间域和频率域同时取得最优局部化的特性，与人类生物视觉特性很相似，因此能够很好地描述对应于空间频率(尺度)、空间位置及方向选择性的局部结构信息。同时，二维 Gabor 函数也类似于增强边缘以及峰、谷、脊轮廓等底层图像特征，这相当于增强了被认为是面部关键部件的眼睛、鼻子、嘴巴等信息，同时也增强了诸于黑痣、酒窝、伤疤等局部特征，从而使得在保留总体人脸信息的同时增强局部特性成为可能。它的小波特性说明了 Gabor 滤波结果是描述图像局部灰度分布的有力工具，因此，可以使用 Gabor 滤波来抽取图像的纹理信息。由于 Gabor 特征具有良好的空间局部性和方向选择性，而且对光照、姿态具有一定的鲁棒性，因此在人脸识别中获得了成功地应用。

**应用：**人脸识别、人脸表情识别、汉字识别

### 2.2.7 DoG

### 2.2.8 Covariance Matrix

### 2.2.9 凸包

### 2.2.10 ICA(Independent Component Analysis)

独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 是近年来出现的一种强有力的数据分析工具 (Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E, 2001; Roberts S J, Everson R, 2001)。1994 年由 Comon 给出了 ICA 的一个较为严格的数学定义，其思想最早是由 Heranlt 和 Jutten 于 1986 年提出来的。ICA 从出现到现在虽然时间不长，然而无论从理论上还是应用上，它正受到越来越多的关注，成为国内外研究的一个热点。特别是从应用角度看，它的应用领域与应用前景都是非常广阔的，目前主要应用于盲源分离、图像处理、语言识别、通信、生物医学信号处理、脑功能成像研究、故障诊断、特征提取、金融时间序列分析和数据挖掘等。ICA 是一种用来从多变量（多维）统计数据里找到隐含的因素或成分的方法，被认为是主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和因子分析 (Factor Analysis) 的一种扩展。对于盲源分离问题，ICA 是指在只知道混合信号，而不知道源信号、噪声以及混合机制的情况下，分离或近似地分离出源信号的一种分析过程。

田奇

binary feature descriptors

### 2.2.11 Binary SIFT (BSIFT) – Zhou, TIP 2014

### 2.2.12 COGE - PCM 2013 Best Paper, Mao , 2013

### 2.2.13 Ultra-Short Binary Descriptor (USB) – Zhang S., TIP , 2014

### 2.2.14 Topology-Preserving Hashing – Zhang L., MM 2012

## 3. 学习算法

### 3.1 贝叶斯学习

贝叶斯学习是由英国学者 T. Bayesian (贝叶斯) [1] 于 1763 年提出的一种归纳推理的理论。

贝叶斯学习的基本公式如下：

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (5)$$

## 3.2 SVM 方法

SVM (Support Vector Machine, 支持向量机) 是一种有监督的统计学习方法，能够最小化经验误差和最大化几何边缘，被称为最大间隔分类器，可用于分类与回归分析。最早的相关论文为美国贝尔实验室 (Bell Lab., USA) 的 Corinna Cortes 和 Vladimir Vapnik 等人于 1995 年在 Machine Learning 杂志上提出 [4]，被引用次数已经超过 17600 次。

代码：SVMlight<sup>2</sup>和 LibSVM<sup>3</sup>

SVM 是一种典型的两类分类器，即它只回答属于正类还是负类的问题。当遇到多类别的时候，一般采取两种策略<sup>4</sup>：一对多法和一对一法。

## 3.3 K-means

### 3.4 Decision tree

### 3.5 EM(Expectation Maximization Algorithm)

期望最大算法 (Expectation Maximization Algorithm, EM) 是一种从不完全数据或有数据丢失的数据集中求解概率模型参数的最大似然估计方法。

算法步骤：

1. 初始化分布参数。
2. 重复以下步骤直到收敛：
  - (a) E 步骤：估计未知参数的期望值，给出当前的参数估计。
  - (b) M 步骤：重新估计分布参数，以使得数据的似然性最大，给出未知变量的期望估计。

## 3.6 KNN

K 最近邻分类算法，是一个理论上比较成熟的方法，也是最简单的机器学习算法之一。该方法的思路是：如果一个样本在特征空间中的 k 个最相似 (即特征空间中最邻近) 的样本中的大多数属于某一个类别，则该样本也属于这个类别。由于 KNN 方法主要靠周围有限的邻近的样本，而不是靠判别类域的方法来确定所属类别的，因此对于类域的交叉或重叠较多的待分样本集来说，KNN 方法较其他方法更为适合。

<sup>2</sup><http://svmlight.joachims.org/>

<sup>3</sup><http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>

<sup>4</sup><http://www.blogjava.net/zhenandaci/archive/2009/03/26/262113.html>

### 3.7 ELM (极限学习机)

ELM 算法 [6] 是新加坡南洋理工大学的黄广斌教授提出来的。

代码：<http://www.ntu.edu.sg/home/egbhuang/>

### 3.8 集成学习 (Ensemble learning)

集成学习 (Ensemble learning) 是使用一系列学习器进行学习，并使用某种规则把各个学习结果进行整合从而获得比单个学习器更好的学习效果的一种机器学习方法。

**主要思路：**

在对新的实例进行分类的时候，把若干个单个分类器集成起来，通过对多个分类器的分类结果进行某种组合来决定最终的分类，以取得比单个分类器更好的性能。

#### 3.8.1 AdaBoost

AdaBoost，是英文“Adaptive Boosting”（自适应增强）的缩写，由 Yoav Freund 和 Robert Schapire 在 1995 年提出。它的自适应在于：前一个基本分类器分错的样本会得到加强，加权后的全体样本再次被用来训练下一个基本分类器。同时，在每一轮中加入一个新的弱分类器，直到达到某个预定的足够小的错误率或达到预先指定的最大迭代次数。

**主要步骤：**

1. 初始化训练数据的权值分布。如果有  $N$  个样本，则每一个训练样本最开始时都被赋予相同的权值： $\frac{1}{N}$ 。
2. 训练弱分类器。具体训练过程中，如果某个样本点已经被准确地分类，那么在构造下一个训练集中，它的权值就被降低；相反，如果某个样本点没有被准确地分类，那么它的权值就得到提高。然后，权值更新过的样本集被用于训练下一个分类器，整个训练过程如此迭代地进行下去。
3. 将各个训练得到的弱分类器组合成强分类器。各个弱分类器的训练过程结束后，加大分类误差率小的弱分类器的权重，使其在最终的分类函数中起着较大的决定作用，而降低分类误差率大的弱分类器的权重，使其在最终的分类函数中起着较小的决定作用。

相关资料：<http://cs.nju.edu.cn/zhouzh/zhouzh.files/publication/top10chapter.pdf>

#### 3.8.2 Bagging

**主要思路：**

让学习算法训练多轮，每轮的训练集由从初始的训练集中随机取出的 n 个训练样本组成，某个初始训练样本在某轮训练集中可以出现多次或根本不出现，训练之后可得到一个预测函数序列  $h_1, \dots, h_n$ ，最终的预测函数 H 对分类问题采用投票方式。

随机森林(Random Forest)是一种采用决策树作为基预测器的集成学习方法，2001 年由 Breiman [3] 提出，结合 Bagging 和随机子空间理论，集成众多决策树进行预测，通过各个决策树的预测值进行平均或投票，得到最终预测结果。

“视觉机器学习 20 讲”中提供了随机森林的源代码，是 c 与 matlab 的混合编程，但是只有在 windows 下编译好了的文件，在 mac 下无法跑。

DRFI 方法中用到随机森林<sup>5</sup>学习方法，下载下来解压后是在 randomforest-matlab 文件夹中，其中又包含两个文件夹，一个是 RF\_Class\_C，用来做分类的，另一个是 RF\_Reg\_C，用来做回归的。

RF\_Class\_C 文件夹中需要对.cpp 文件进行编译，生成 mexmaci64 文件，这一步可以通过在终端输入 make mex 命令实现。但是可能由于我电脑中的 fortran 版本不行，编译总是出错，目前还没有解决，后来在网页上<sup>6</sup>搜到了已编译好的 mexmaci64 文件，可以直接拿过来用。

tutorial\_ClassRF.m 文件列举了 10 个例子，展示了用不同的参数跑随机森林学习算法的不同结果。

### 3.8.3 Gasen

GASEN [14] (基于遗传算法的选择性集成学习算法)。随机生成若干权向量，权向量的每个分量对应了一个个体学习器，这些权向量被遗传算法进化，得到一个最优权向量，它表示了各个体学习器在构成集成时的“重要性”，据此进行个体的选择。该方法是建立在遗传算法基础上，由于遗传算法计算效率低，使得 GASEN 计算量更大。

代码：[http://lamda.nju.edu.cn/Default.aspx?Page=code\\_GASEN&NS=&AspxAutoDetectCookieSupport=1](http://lamda.nju.edu.cn/Default.aspx?Page=code_GASEN&NS=&AspxAutoDetectCookieSupport=1)

## 4. 技术路线和方案

### 4.1 技术路线

在设计浮游动物分类系统过程中，需要完成特征和分类器的选择，我们的技术路线如图 18。

特征选取：根据浮游动物的形态特征和计算机视觉中分类识别常用的经典特征，我们选取的特征如图 18。

分类器的训练：根据经典学习方法和集成学习，我们选择的学习算法如图 18。

<sup>5</sup><https://code.google.com/p/randomforest-matlab/>

<sup>6</sup><https://code.google.com/p/randomforest-matlab/issues/detail?id=54>

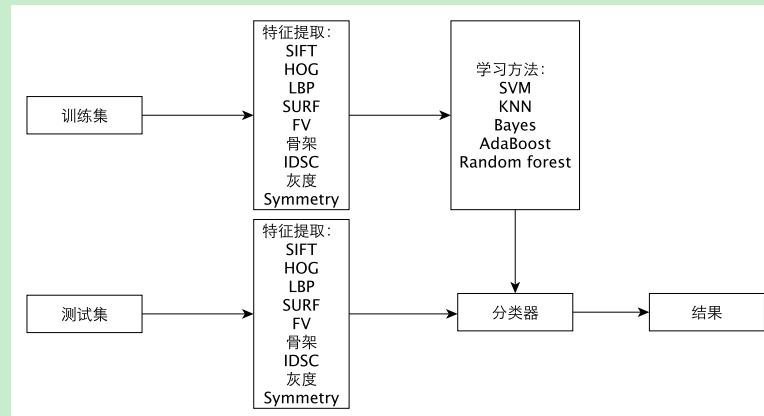


图 18: 技术路线

## 5. 实验与分析

### 5.1 HOG+SVM

#### 5.1.1 理论

算法流程如图 19:

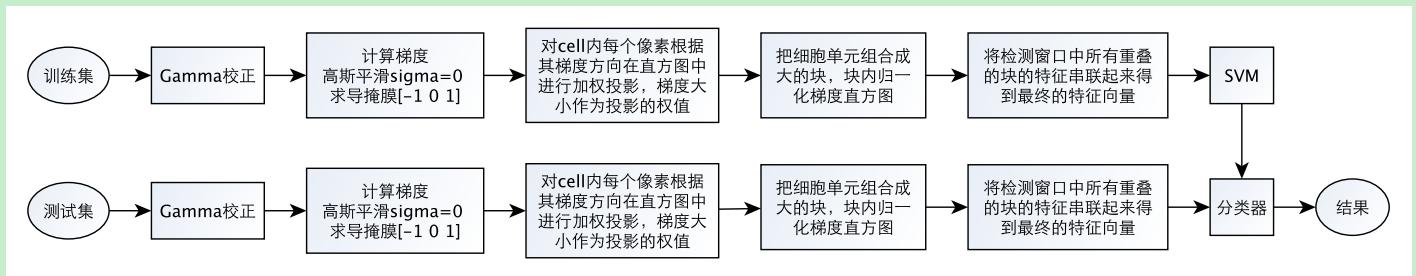


图 19: HOG-SVM 流程图

OpenCV 提取 HOG 特征所参考的网址: [http://docs.opencv.org/3.0-rc1/d5/d33/structcv\\_1\\_1HOGDescriptor.html](http://docs.opencv.org/3.0-rc1/d5/d33/structcv_1_1HOGDescriptor.html)。

HOG 检测滑动窗口内部的参数包括：检测窗口的大小、窗口内 block 的大小、block 滑动的步长以及 cell 的大小。其中滑动窗口所包含的区域即我们需要提取 HOG 特征的区域。

与行人检测不同，在浮游动物分类问题中，没有复杂的背景，所以不需要用窗口进行滑动，判断哪个窗口中有目标，只需将整幅图像看成一个窗口，判断该窗口中的目标属于哪个类别。

在实验中，针对 SVM 核函数选用了 Linear 核和 RBF 核。

- Linear 核：主要用于线性可分的情形。参数少，速度快，对于一般数据，分类效果已经很理想了。

- RBF 核：主要用于线性不可分的情形。参数多，分类结果非常依赖于参数。

### 5.1.2 实验

#### 1. C++ 版

将图像 resize 为  $64 \times 64$ , 以整幅图像作为一个窗口提取 HOG 特征, 其中块 (block) 选用  $16 \times 16$ , block 滑动的步长选用  $8 \times 8$ , 单元 (cell) 选用  $8 \times 8$ 。则对于一幅图像, 所提取的 HOG 特征向量维数为  $(\frac{64 - 16}{8} + 1) \times (\frac{64 - 16}{8} + 1) \times 4 \times 9 = 1764$  维。每个 block 中的特征向量是对其中的 4 个 cell 按从上到下, 从左到右的顺序将 9 维特征向量连起来得到的。而整个窗口中的特征又是对其中的所有 block 按从上到下, 从左到右的顺序将特征连起来得到的。

SVM 核函数选用 Linear 核, 训练集与测试集相同时得到的混淆矩阵如图 20:

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision	
Appendicularia	544	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	545	0.998	0.151	
Bubble	0	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	1	0	
Chaetognatha	0	0	349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	349	1	0.046	
CladoceraPenilia	0	0	0	772	3	0	0	0	0	0	3	4	143	0	925	0.835	0.441
Copepoda	1	0	0	24	1142	55	0	0	0	34	94	123	1	1474	0.775	0.354	
Decapoda	16	0	2	11	55	399	0	0	1	1	8	63	1	557	0.716	0.294	
Doliolida	0	0	0	0	0	0	284	0	0	0	0	1	0	285	0.996	0.424	
Egg	0	0	0	0	0	0	0	344	0	0	0	0	0	344	1	0.216	
Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0	304	0	0	0	0	304	1	0.116	
Gelatinous	0	0	0	24	54	4	16	16	0	412	1	75	0	602	0.684	0.446	
Multiple	31	0	5	38	99	16	2	0	8	14	308	114	0	635	0.485	0.496	
Nonbio	48	0	10	513	415	91	191	79	31	280	196	1223	1	3078	0.397	0.298	
Pteropoda	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	216	217	0.995	0.014
Total	641	145	366	1382	1768	565	493	439	344	744	611	1743	219	9460	0.837	0.254	

图 20: HOG+C-SVC Linear 混淆矩阵 (训练集与测试集相同)

SVM 核函数选用 Linear 核, 训练集与测试集不同时得到的混淆矩阵如图 21:

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	52	0	7	1	3	2	0	0	12	0	8	13	2	100	0.52	0.669
Bubble	0	96	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	100	0.96	0
Chaetognatha	38	0	44	0	1	1	0	0	11	0	1	2	2	100	0.44	0.537
CladoceraPenilia	0	0	0	55	6	1	4	0	0	9	7	18	0	100	0.55	0.626
Copepoda	0	0	0	10	43	12	0	0	2	5	12	16	0	100	0.43	0.703
Decapoda	4	0	1	12	21	22	0	0	2	5	7	23	3	100	0.22	0.651
Doliolida	0	0	0	13	0	0	63	0	0	9	1	14	0	100	0.63	0.182
Egg	0	0	0	0	0	1	0	91	0	1	0	7	0	100	0.91	0.081
Fiber	34	0	26	0	0	2	0	0	31	0	2	5	0	100	0.31	0.544
Gelatinous	0	0	0	16	9	2	4	5	0	29	7	28	0	100	0.29	0.574
Multiple	7	0	4	19	29	7	2	0	2	3	13	14	0	100	0.13	0.803
Nonbio	11	0	3	21	13	6	4	2	5	6	4	25	0	100	0.25	0.86
Pteropoda	11	0	10	0	19	7	0	0	3	1	3	13	33	100	0.33	0.175
Total	157	96	95	147	145	63	77	99	68	68	66	179	40	1300	0.5	0.493

图 21: HOG+C-SVC Linear 混淆矩阵 (训练集与测试集不同)

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall
Appendicularia	1161	0	285	2	297	63	0	1	141	0	31	666	78	2725	0.43
Bubble	0	664	0	0	3	1	0	5	1	0	1	50	0	725	0.92
Chaetognatha	362	0	1172	0	38	19	0	2	76	0	7	53	16	1745	0.67
CladoceraPenilia	5	0	2	588	133	15	0	1	1	3	6	3871	0	4625	0.13
Copepoda	87	0	9	47	4319	80	0	0	8	1	20	2783	16	7370	0.59
Decapoda	331	0	67	40	480	449	0	4	42	2	17	1347	6	2785	0.16
Doliolida	0	0	0	10	0	0	5	0	0	0	0	1410	0	1425	0
Egg	0	4	0	9	2	0	0	1415	0	1	0	288	1	1720	0.82
Fiber	423	0	201	5	93	48	0	9	313	1	8	376	43	1520	0.21
Gelatinous	8	0	0	14	155	1	0	33	0	5	0	2794	0	3010	0
Multiple	245	5	45	38	394	68	1	5	67	3	26	2275	3	3175	0
Nonbio	383	0	153	137	1262	108	1	169	118	14	22	12903	120	15390	0.83
Pteropoda	118	0	147	1	257	62	0	0	42	0	0	237	221	1085	0.2
Total	3123	673	2081	891	7433	914	7	1644	809	30	138	29053	504	47300	0.38153846

(a) 图像 256\*256 块 128\*128 步长 64\*64 单元 64\*64

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall
Appendicularia	1335	0	303	14	85	122	0	2	307	9	174	318	56	2725	0.49
Bubble	0	665	0	5	16	12	0	6	0	0	1	20	0	725	0.92
Chaetognatha	424	0	1138	0	10	27	0	0	90	0	21	11	24	1745	0.65
CladoceraPenilia	18	0	0	2147	291	71	76	0	6	214	143	1656	3	4625	0.46
Copepoda	83	0	6	409	4455	287	7	1	37	95	314	1897	79	7370	0.6
Decapoda	306	0	65	186	419	736	0	8	100	47	235	642	41	2785	0.26
Doliolida	0	0	0	113	6	0	611	0	0	224	7	464	0	1425	0.43
Egg	0	0	0	8	0	11	0	1498	0	18	3	182	0	1720	0.87
Fiber	465	0	146	12	86	64	0	8	382	1	81	226	49	1520	0.25
Gelatinous	6	0	0	303	201	47	249	68	4	838	97	1196	1	3010	0.28
Multiple	294	5	64	293	508	198	21	14	123	177	382	1074	22	3175	0.12
Nonbio	440	0	71	1530	1649	456	464	218	197	914	592	8723	136	15390	0.57
Pteropoda	86	0	77	13	198	129	0	0	51	0	55	208	268	1085	0.25
Total	3457	670	1870	5033	7924	2160	1428	1823	1297	2537	2105	16317	679	47300	0.47307692

(b) 图像 256\*256 块 64\*64 步长 32\*32 单元 32\*32

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall
Appendicularia	1366	0	322	5	66	144	0	0	315	0	221	277	19	2725	0.5
Bubble	1	655	0	3	18	6	0	9	2	0	7	24	0	725	0.9
Chaetognatha	442	0	1100	0	6	23	0	0	136	0	22	13	3	1745	0.63
CladoceraPenilia	9	0	0	2096	397	65	67	0	4	206	139	1638	4	4625	0.45
Copepoda	59	0	5	555	4239	222	3	0	13	103	317	1800	54	7370	0.58
Decapoda	338	0	35	190	349	684	3	1	102	39	242	751	51	2785	0.25
Doliolida	0	0	0	111	28	0	465	0	0	298	6	517	0	1425	0.33
Egg	0	1	0	13	0	10	1	1447	0	13	3	232	0	1720	0.84
Fiber	495	0	152	13	74	59	0	5	423	4	80	200	15	1520	0.28
Gelatinous	4	0	0	283	202	33	280	80	0	862	91	1174	1	3010	0.29
Multiple	368	5	42	272	480	221	27	10	102	158	402	1065	23	3175	0.13
Nonbio	414	0	64	1665	1976	397	393	205	197	1020	596	8382	81	15390	0.54
Pteropoda	94	0	45	22	191	105	0	0	38	47	45	315	183	1085	0.17
Total	3580	661	1765	5228	8026	1969	1239	1757	1332	2750	2171	16388	434	47300	0.45307692

(c) 图像 256\*256 块 32\*32 步长 16\*16 单元 16\*16

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall
Appendicularia	1422	0	311	7	45	111	0	0	320	0	167	339	3	2725	0.52
Bubble	0	639	0	4	12	5	0	15	4	0	6	40	0	725	0.88
Chaetognatha	378	0	1174	0	0	7	0	0	156	0	23	7	0	1745	0.67
CladoceraPenilia	7	0	0	1825	450	48	32	0	0	121	91	2049	2	4625	0.39
Copepoda	52	0	5	477	4030	192	0	0	9	44	224	2321	16	7370	0.55
Decapoda	347	0	21	141	334	484	1	0	72	48	222	1094	21	2785	0.17
Doliolida	0	0	0	113	55	0	250	0	0	321	7	679	0	1425	0.18
Egg	0	0	0	5	0	15	1	1398	0	12	2	287	0	1720	0.81
Fiber	522	0	203	4	54	39	0	5	427	0	75	188	3	1520	0.28
Gelatinous	2	0	0	211	167	15	163	58	0	930	46	1416	2	3010	0.31
Multiple	336	5	54	235	482	169	12	9	110	106	383	1265	9	3175	0.12
Nonbio	420	0	73	1273	1907	381	182	160	721	473	9591	49	15390	0.62	
Pteropoda	126	0	32	34	147	88	0	0	25	70	35	440	88	1085	0.08
Total	3612	644	1873	4329	7683	1554	641	1645	1283	2373	1754	19716	193	47300	0.42923077

(d) 图像 256\*256 块 16\*16 步长 8\*8 单元 8\*8

图 22: The experimental results.

实验调整 HOG 参数通过交叉验证得到的混淆矩阵如图 22。

SVM 核函数选用 RBF 核，训练集与测试集相同时得到的混淆矩阵如图 23：

SVM 核函数选用 RBF 核，训练集与测试集不同时得到的混淆矩阵如图 24：

## 2. Matlab 版

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	545	1	0
Bubble	0	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	1	0
Chaetognatha	0	0	349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	349	1	0
CladoceraPenilia	0	0	0	925	0	0	0	0	0	0	0	0	0	925	1	0
Copepoda	0	0	0	0	1474	0	0	0	0	0	0	0	0	1474	1	0
Decapoda	0	0	0	0	0	557	0	0	0	0	0	0	0	557	1	0
Doliolida	0	0	0	0	0	0	285	0	0	0	0	0	0	285	1	0
Egg	0	0	0	0	0	0	0	344	0	0	0	0	0	344	1	0
Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0	304	0	0	0	0	304	1	0
Gelatinous	0	0	0	0	0	0	0	0	602	0	0	0	0	602	1	0
Multiple	0	0	0	0	0	0	0	0	0	635	0	0	0	635	1	0
Nonbio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3078	0	0	3078	1	0
Pteropoda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	217	217	1
Total	545	145	349	925	1474	557	285	344	304	602	635	3078	217	9460	1	0

图 23: HOG+C-SVC RBF 混淆矩阵 (训练集与测试集相同)

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	97	0	0
Bubble	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97	0	0
Chaetognatha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
CladoceraPenilia	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0	0
Copepoda	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0	0
Decapoda	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	97	0	0
Doliolida	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	99	0	0
Egg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
Gelatinous	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	91	0	0
Multiple	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0	0
Nonbio	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	96	0	0
Pteropoda	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0

图 24: HOG+C-SVC RBF 混淆矩阵 (训练集与测试集不同)

VLFeat<sup>7</sup>库中有 HOG 特征的计算。用法为 `hog = vl_hog(img, cellSize)`, 得到的 hog 特征是一个三维矩阵, 其中三维矩阵的列和行分别为图像的列和行被 cellSize 所分的份数, 第三维表示每一份的特征向量, 为 31 维。

分类器 SVM 用的是 LibSVM。

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 128 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 25。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1568	0	272	0	14	9	5	0	93	33	19	712	0	2725	0.575	0.577
Bubble	0	655	0	0	0	0	0	15	2	0	0	53	0	725	0.903	0.011
Chaetognatha	323	0	1355	0	0	2	0	0	46	4	0	15	0	1745	0.777	0.436
CladoceraPenilia	1	0	0	45	203	0	0	0	0	3	1	4372	0	4625	0.01	0.654
Copepoda	26	0	2	21	5088	9	0	0	3	1	17	2182	21	7370	0.69	0.411
Decapoda	267	0	36	26	1056	118	0	2	10	0	9	1261	0	2785	0.042	0.352
Doliolida	0	0	0	0	0	0	171	0	0	14	1	1239	0	1425	0.12	0.378
Egg	0	6	0	0	3	0	0	1447	0	13	0	251	0	1720	0.841	0.129
Fiber	537	1	230	0	8	0	4	0	385	14	16	325	0	1520	0.253	0.421
Gelatinous	70	0	5	0	27	10	38	29	0	98	10	2723	0	3010	0.033	0.588
Multiple	474	0	37	11	280	9	24	1	17	34	45	2243	0	3175	0.014	0.667
Nonbio	431	0	227	27	1317	22	33	167	103	24	17	12902	120	15390	0.838	0.545
Pteropoda	9	0	240	0	647	3	0	0	6	0	0	47	133	1085	0.123	0.515
Total	3706	662	2404	130	8643	182	275	1661	665	238	135	28325	274	47300	0.402	0.437

图 25: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 128

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 64 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 26。

<sup>7</sup><http://www.vlfeat.org/>

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1666	0	314	2	21	32	0	0	172	32	130	354	2	2725	0.611	0.541
Bubble	0	674	0	3	9	0	0	3	4	0	0	32	0	725	0.93	0.001
Chaetognatha	341	0	1311	0	0	5	0	0	69	0	3	16	0	1745	0.751	0.373
CladoceraPenilia	0	0	0	2444	117	26	18	0	0	88	12	1920	0	4625	0.528	0.277
Copepoda	55	0	1	91	5041	105	0	2	7	22	90	1896	60	7370	0.684	0.358
Decapoda	180	0	13	67	523	1014	0	12	4	23	65	882	2	2785	0.364	0.355
Doliolida	0	0	0	11	0	0	915	0	0	190	9	300	0	1425	0.642	0.369
Egg	2	1	0	9	1	3	0	1479	0	29	0	191	5	1720	0.86	0.137
Fiber	492	0	229	0	16	5	0	1	483	19	48	222	5	1520	0.318	0.493
Gelatinous	36	0	5	112	83	9	248	59	2	1156	40	1260	0	3010	0.384	0.446
Multiple	438	0	33	137	356	89	65	11	79	174	207	1578	8	3175	0.065	0.727
Nonbio	386	0	97	503	1384	195	204	147	128	352	151	11650	193	15390	0.757	0.43
Pteropoda	33	0	89	0	302	90	0	0	5	0	2	126	438	1085	0.404	0.386
Total	3629	675	2092	3379	7853	1573	1450	1714	953	2085	757	20427	713	47300	0.561	0.376

图 26: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 64

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 27。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1560	0	290	8	34	74	0	0	285	26	190	255	3	2725	0.572	0.556
Bubble	1	669	0	1	14	10	0	2	2	0	3	23	0	725	0.923	0.022
Chaetognatha	325	0	1230	0	1	3	0	0	155	0	10	17	4	1745	0.705	0.37
CladoceraPenilia	4	0	0	2649	160	33	37	0	2	179	121	1440	0	4625	0.573	0.434
Copepoda	60	0	8	203	4999	225	0	1	10	33	287	1442	102	7370	0.678	0.377
Decapoda	185	2	31	106	503	1096	0	11	28	15	184	610	14	2785	0.394	0.478
Doliolida	0	0	0	54	1	0	976	0	0	230	15	149	0	1425	0.685	0.364
Egg	2	8	0	10	4	4	2	1465	1	24	4	193	3	1720	0.852	0.174
Fiber	464	0	217	3	9	28	0	6	528	17	86	155	7	1520	0.347	0.608
Gelatinous	28	0	0	184	109	25	234	49	7	1384	149	841	0	3010	0.46	0.535
Multiple	410	1	40	211	481	147	47	24	144	243	489	921	17	3175	0.154	0.773
Nonbio	432	4	78	1252	1491	345	239	215	184	826	599	9487	238	15390	0.616	0.395
Pteropoda	45	0	57	0	212	110	0	0	2	0	16	151	492	1085	0.453	0.441
Total	3516	684	1951	4681	8018	2100	1535	1773	1348	2977	2153	15684	880	47300	0.57	0.425

图 27: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 16 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 28。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1480	0	312	7	47	93	0	0	288	11	211	270	6	2725	0.543	0.576
Bubble	1	666	0	2	10	6	0	0	8	0	10	22	0	725	0.919	0.016
Chaetognatha	352	0	1175	0	1	13	0	0	171	0	17	15	1	1745	0.673	0.401
CladoceraPenilia	5	0	0	2392	256	46	38	0	0	164	115	1609	0	4625	0.517	0.519
Copepoda	69	0	9	377	4696	232	0	0	9	29	316	1558	75	7370	0.637	0.401
Decapoda	229	0	38	111	400	918	0	3	90	28	222	702	44	2785	0.33	0.548
Doliolida	0	0	0	108	2	0	840	0	0	250	14	211	0	1425	0.589	0.395
Egg	2	4	0	10	0	5	2	1438	0	32	4	222	1	1720	0.836	0.162
Fiber	479	1	249	6	21	30	0	4	466	8	87	164	5	1520	0.307	0.657
Gelatinous	12	0	0	169	126	22	244	45	1	1352	127	912	0	3010	0.449	0.552
Multiple	386	0	49	222	438	165	47	13	135	233	498	969	20	3175	0.157	0.783
Nonbio	404	6	80	1563	1651	347	218	213	178	909	654	8996	171	15390	0.585	0.434
Pteropoda	75	0	49	4	197	152	0	0	12	2	24	251	319	1085	0.294	0.503
Total	3494	677	1961	4971	7845	2029	1389	1716	1358	3018	2299	15901	642	47300	0.526	0.457

图 28: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 16

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 8 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 29。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1486	0	297	7	41	76	0	0	302	1	208	304	3	2725	0.545	0.598
Bubble	3	659	0	0	15	4	0	1	8	0	9	26	0	725	0.909	0.019
Chaetognatha	382	0	1125	0	0	10	0	0	179	0	33	15	1	1745	0.645	0.394
CladoceraPenilia	6	0	0	1962	373	43	23	0	0	138	73	2005	2	4625	0.424	0.541
Copepoda	63	0	7	414	4432	235	0	1	11	13	238	1909	47	7370	0.601	0.414
Decapoda	333	0	36	114	317	715	0	2	97	28	186	923	34	2785	0.257	0.615
Doliolida	0	0	0	90	12	0	552	0	0	340	13	418	0	1425	0.387	0.44
Egg	1	5	0	13	0	2	4	1401	0	31	3	260	0	1720	0.815	0.139
Fiber	503	3	233	5	17	52	0	2	426	4	98	177	0	1520	0.28	0.676
Gelatinous	7	0	0	172	110	13	204	40	0	1354	64	1046	0	3010	0.45	0.526
Multiple	386	0	44	191	416	168	26	11	126	173	421	1199	14	3175	0.133	0.784
Nonbio	415	5	67	1290	1628	407	177	169	149	755	587	9658	83	15390	0.628	0.472
Pteropoda	109	0	46	16	207	134	0	0	16	20	16	367	164	1085	0.142	0.544
Total	3694	672	1855	4274	7568	1859	986	1627	1314	2857	1949	18307	338	47300	0.478	0.474

图 29: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 8

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 30。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1682	0	364	0	15	3	9	0	180	78	29	365	0	2725	0.6172	0.595479
Bubble	0	651	0	0	0	0	0	13	0	0	0	61	0	725	0.8979	0.004587
Chaetognatha	409	0	1228	0	0	0	0	0	100	3	0	5	0	1745	0.7037	0.464924
CladoceraPenilia	0	0	0	84	175	1	3	0	0	2	2	4358	0	4625	0.0182	0.64557
Copepoda	29	0	0	38	5274	7	0	0	5	11	21	1983	2	7370	0.7156	0.409671
Decapoda	201	0	7	43	1000	39	0	0	9	20	11	1455	0	2785	0.014	0.535714
Doliolida	0	0	0	0	0	0	295	0	0	31	3	1096	0	1425	0.207	0.395492
Egg	0	3	0	4	4	0	3	1393	0	25	0	288	0	1720	0.8099	0.119469
Fiber	633	0	245	0	5	1	9	0	348	27	46	206	0	1520	0.2289	0.592028
Gelatinous	188	0	0	0	123	9	59	10	6	380	14	2221	0	3010	0.1262	0.464789
Multiple	428	0	22	18	280	15	37	0	53	80	45	2197	0	3175	0.0142	0.780488
Nonbio	557	0	203	50	1419	9	73	166	143	53	34	12642	41	15390	0.8214	0.530578
Pteropoda	31	0	226	0	639	0	0	0	9	0	0	54	126	1085	0.1161	0.254438
Total	4158	654	2295	237	8934	84	488	1582	853	710	205	26931	169	47300	0.407	0.445633

图 30: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 32

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 16 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 31。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 8 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 32。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 4 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 33。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1699	0	377	2	15	24	0	0	183	88	91	239	7	2725	0.6235	0.519514
Bubble	1	670	0	8	2	4	0	4	0	0	2	34	0	725	0.9241	0.01034
Chaetognatha	329	0	1276	0	0	2	0	0	128	0	2	8	0	1745	0.7312	0.400658
CladoceraPenilia	1	0	0	2557	77	44	12	0	0	92	29	1813	0	4625	0.5529	0.32211
Copepoda	28	1	0	101	5165	151	0	4	10	65	70	1747	28	7370	0.7008	0.346203
Decapoda	135	0	3	111	501	854	0	5	14	61	56	1043	2	2785	0.3066	0.442922
Doliolida	0	0	0	53	0	0	946	0	0	90	4	332	0	1425	0.6639	0.310998
Egg	0	0	0	7	1	6	2	1478	0	26	0	200	0	1720	0.8593	0.132629
Fiber	440	1	240	2	5	16	2	4	546	37	49	169	9	1520	0.3592	0.530525
Gelatinous	61	1	0	112	195	21	126	47	15	1288	68	1075	1	3010	0.4279	0.434343
Multiple	356	3	28	186	310	114	56	12	96	194	233	1586	1	3175	0.0734	0.721292
Nonbio	439	1	116	633	1347	217	229	150	164	336	232	11396	130	15390	0.7405	0.423396
Pteropoda	47	0	89	0	282	80	0	0	7	0	0	122	458	1085	0.4221	0.279874
Total	3536	677	2129	3772	7900	1533	1373	1704	1163	2277	836	19764	636	47300	0.5681	0.374985

图 31: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 16

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1711	0	292	7	28	45	0	0	267	38	140	168	29	2725	0.6279	0.52046
Bubble	2	666	0	4	13	6	0	3	0	1	7	23	0	725	0.9186	0.007452
Chaetognatha	326	0	1207	0	2	2	0	0	177	0	12	18	1	1745	0.6917	0.373313
CladoceraPenilia	0	0	0	2614	141	65	38	3	0	170	152	1442	0	4625	0.5652	0.487853
Copepoda	39	1	0	200	4961	309	1	3	11	71	310	1374	90	7370	0.6731	0.375189
Decapoda	155	1	12	100	494	1017	0	8	34	45	228	689	2	2785	0.3652	0.542921
Doliolida	0	0	0	107	0	0	1057	0	0	108	15	138	0	1425	0.7418	0.354701
Egg	1	3	0	12	6	10	4	1475	0	27	10	172	0	1720	0.8576	0.161455
Fiber	434	0	216	6	23	25	0	5	558	24	82	133	14	1520	0.3671	0.592701
Gelatinous	32	0	0	197	182	53	94	34	18	1474	238	683	5	3010	0.4897	0.480803
Multiple	369	0	37	273	442	208	41	19	125	249	448	956	8	3175	0.1411	0.811448
Nonbio	407	0	110	1582	1477	391	403	209	176	632	713	9146	144	15390	0.5943	0.393863
Pteropoda	92	0	52	2	171	94	0	0	4	0	21	147	502	1085	0.4627	0.368553
Total	3568	671	1926	5104	7940	2225	1638	1759	1370	2839	2376	15089	795	47300	0.5766	0.420824

图 32: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1600	0	326	2	38	78	0	0	301	10	154	185	31	2725	0.5872	0.549169
Bubble	0	661	0	1	12	7	0	2	3	1	12	26	0	725	0.9117	0.016369
Chaetognatha	342	0	1125	0	0	9	0	0	213	0	24	32	0	1745	0.6447	0.413452
CladoceraPenilia	0	0	0	2350	217	51	28	2	0	97	114	1766	0	4625	0.5081	0.539035
Copepoda	57	0	6	296	4731	282	0	0	14	63	298	1557	66	7370	0.6419	0.402048
Decapoda	190	0	36	95	434	861	0	1	64	28	269	791	16	2785	0.3092	0.573128
Doliolida	0	0	0	165	1	0	830	0	0	159	6	264	0	1425	0.5825	0.407143
Egg	0	6	0	9	4	16	7	1441	0	29	6	202	0	1720	0.8378	0.141751
Fiber	454	3	221	3	20	25	0	2	523	16	90	144	19	1520	0.3441	0.635031
Gelatinous	7	0	5	156	248	35	136	36	0	1347	189	846	5	3010	0.4475	0.475058
Multiple	365	0	44	258	484	190	29	12	117	194	468	1005	9	3175	0.1474	0.79661
Nonbio	392	2	112	1758	1536	350	370	183	182	621	643	9138	103	15390	0.5938	0.434984
Pteropoda	142	0	43	5	187	113	0	0	16	1	28	217	333	1085	0.3069	0.427835
Total	3549	672	1918	5098	7912	2017	1400	1679	1433	2566	2301	16173	582	47300	0.5279	0.447047

图 33: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4

### 5.1.3 分析

以上的实验分为 C 和 Matlab 两个版本, 两者跑出来的结果差异很大, 总体来说, Matlab 版的代码跑出来的结果相对较好。Matlab 下都是将 LibSVM 的参数固定, 然后调整 `vl_hog` 的参数并进行评价的结果。可以看到, imgSize 固定为 256 时, 当 HOG 特征的参数 cellSize 为 64 时, 交叉验证的结果最佳, 分类准确率约为 0.561; imgSize 固定为 64 时, 当 cellSize 为 16 时, 交叉验证的结果最佳, 分类准确率约为 0.568。两种最佳分类情况下的特征维数都为  $4 \times 4 \times 31 = 496$  维。在 Bubble 和 Egg

两类上的分类准确率最高。

## 5.2 LBP+SVM

### 5.2.1 实验

#### 1. C++ 版

LBP 特征提取参考：<https://github.com/bytefish/opencv.git>。

实验中提取 LBP 特征时，将图像划分为  $16 \times 16$  的区域，统计每一个区域内的 LBP 直方图（直方图的 bin 设置为 256）。采用 SVM 训练分类器，核函数选用了 Linear 核和 RBF 核。算法流程如图 34。

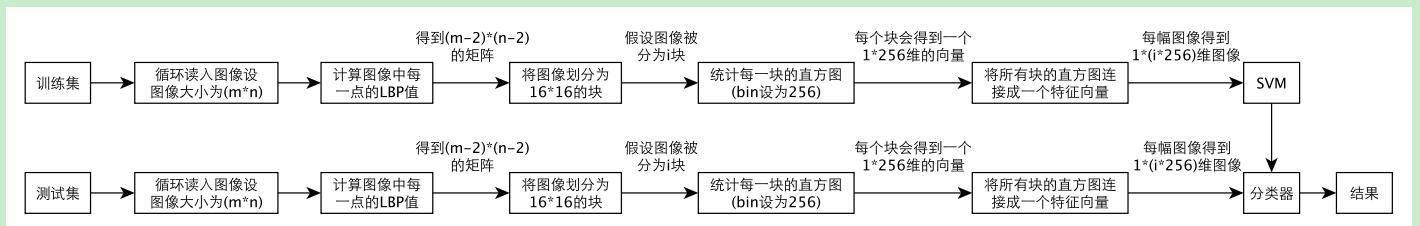


图 34: LBP+SVM 流程图

SVM 核函数选用 linear 核，训练集与测试集相同时得到的混淆矩阵如图 35：

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	499	0	10	0	0	0	0	0	2	0	0	34	0	545	0.916	0.34
Bubble	0	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	1	0.02
Chaetognatha	25	0	324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	349	0.928	0.122
CladoceraPenilia	0	0	0	698	15	2	0	0	0	0	7	203	0	925	0.755	0.39
Copepoda	3	0	1	30	858	18	0	0	1	0	25	538	0	1474	0.582	0.413
Decapoda	15	0	1	12	54	294	0	0	1	0	16	163	1	557	0.528	0.303
Doliolida	0	0	0	0	1	0	278	0	0	0	0	6	0	285	0.975	0.259
Egg	0	0	0	0	0	0	0	344	0	0	0	0	0	344	1	0.223
Fiber	64	0	19	0	0	0	0	0	221	0	0	0	0	304	0.727	0.166
Gelatinous	0	0	0	3	6	1	21	1	0	432	0	138	0	602	0.718	0.329
Multiple	73	1	10	25	74	29	2	0	23	7	177	214	0	635	0.279	0.425
Nonbio	77	2	4	377	442	73	74	98	17	204	83	1612	15	3078	0.524	0.456
Pteropoda	0	0	0	0	11	5	0	0	0	1	0	53	147	217	0.677	0.098
Total	756	148	369	1145	1461	422	375	443	265	644	308	2961	163	9460	0.739	0.273

图 35: LBP+C-SVC Linear 混淆矩阵（训练集与测试集相同）

SVM 核函数选用 linear 核，训练集与测试集不同时得到的混淆矩阵如图 36：

SVM 核函数选用 RBF 核，训练集与测试集相同时得到的混淆矩阵如图 37：

#### 2. Matlab 版

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	67	0	8	1	1	1	0	0	3	0	2	17	0	100	0.67	0.636
Bubble	0	96	0	0	1	0	0	2	0	0	0	1	0	100	0.96	0.01
Chaetognatha	35	0	50	0	0	0	0	0	6	0	0	9	0	100	0.5	0.474
CladoceraPenilia	0	0	0	62	6	1	0	0	0	0	3	28	0	100	0.62	0.496
Copepoda	0	0	0	5	37	6	0	0	0	0	3	49	0	100	0.37	0.678
Decapoda	3	0	1	7	17	25	0	0	0	0	3	44	0	100	0.25	0.51
Doliolida	0	0	0	11	0	0	54	0	0	9	1	25	0	100	0.54	0.1
Egg	0	0	0	0	0	2	0	89	0	0	0	9	0	100	0.89	0.082
Fiber	48	0	28	0	0	0	0	0	18	0	0	6	0	100	0.18	0.419
Gelatinous	1	0	0	12	3	3	4	4	0	45	0	28	0	100	0.45	0.262
Multiple	12	0	4	10	16	4	0	0	1	3	6	44	0	100	0.44	0.714
Nonbio	12	1	2	14	11	4	2	2	2	4	1	45	0	100	0.45	0.866
Pteropoda	6	0	2	1	23	5	0	0	1	0	2	32	28	100	0.28	0
Total	184	97	95	123	115	51	60	97	31	61	21	337	28	1300	0.51	0.404

图 36: LBP+C-SVC Linear 混淆矩阵 (训练集与测试集不同)

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision	
Appendicularia	545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	545	1	0	
Bubble	0	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	1	0	
Chaetognatha	0	0	349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	349	1	0	
CladoceraPenilia	0	0	0	925	0	0	0	0	0	0	0	0	0	925	1	0	
Copepoda	0	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	474	0	1474	0.67	0
Decapoda	0	0	0	0	0	557	0	0	0	0	0	0	0	557	1	0	
Doliolida	0	0	0	0	0	0	285	0	0	0	0	0	0	285	1	0	
Egg	0	0	0	0	0	0	0	344	0	0	0	0	0	344	1	0	
Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0	304	0	0	0	0	304	1	0	
Gelatinous	0	0	0	0	0	0	0	0	0	602	0	0	0	602	1	0	
Multiple	0	0	0	0	0	0	0	0	0	635	0	0	0	635	1	0	
Nonbio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3078	0	0	3078	1	0.13	
Pteropoda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	217	217	1	0
Total	545	145	349	925	1000	557	285	344	304	602	635	3552	217	9460	0.97	0.01	

图 37: LBP+C-SVC RBF 混淆矩阵 (训练集与测试集相同)

VLFFeat<sup>8</sup>库中有 LBP 特征的计算。用法为  $\text{lbp} = \text{vl\_lbp}(\text{img}, \text{cellSize})$ , 得到的 lbp 特征是一个三维矩阵, 其中三维矩阵的列和行分别为图像的列和行被 cellSize 所分的份数, 第三维表示每一份的特征向量, 为 58 维。

分类器 SVM 用的是 LibSVM。

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 128 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 38。

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 64 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 39。

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 40。

将所有图像 resize 为  $256 \times 256$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 16 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 41。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 42。

<sup>8</sup><http://www.vlfeat.org/>

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1535	0	524	0	2	4	0	0	73	2	58	527	0	2725	0.563	0.507
Bubble	0	634	0	0	0	0	0	9	0	0	0	82	0	725	0.874	0.023
Chaetognatha	204	0	1520	0	0	0	0	0	2	0	9	10	0	1745	0.871	0.397
CladoceraPenilia	0	0	0	11	262	0	0	0	0	0	0	4352	0	4625	0.002	0.389
Copepoda	35	0	10	0	3134	94	0	0	0	20	87	3990	0	7370	0.425	0.467
Decapoda	140	0	5	1	762	702	0	0	0	11	183	981	0	2785	0.252	0.338
Doliolida	0	0	0	0	1	0	0	0	0	63	4	1357	0	1425	0	0
Egg	0	5	0	1	14	0	0	1243	0	11	0	446	0	1720	0.723	0.172
Fiber	296	3	299	2	0	0	0	0	390	0	23	507	0	1520	0.257	0.336
Gelatinous	36	2	0	0	19	6	0	8	0	246	140	2553	0	3010	0.082	0.597
Multiple	417	0	90	2	275	98	0	0	6	140	419	1728	0	3175	0.132	0.608
Nonbio	367	5	66	1	1020	38	0	241	93	117	132	13310	0	15390	0.865	0.561
Pteropoda	85	0	5	0	392	118	0	0	23	1	14	447	0	1085	0	0
Total	3115	649	2519	18	5881	1060	0	1501	587	611	1069	30290	0	47300	0.388	0.338

图 38: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 128

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1843	0	392	0	5	13	0	0	173	0	89	210	0	2725	0.676	0.426
Bubble	0	677	0	7	0	0	0	3	0	0	0	38	0	725	0.934	0.017
Chaetognatha	200	0	1508	0	0	6	0	0	10	0	18	3	0	1745	0.864	0.332
CladoceraPenilia	0	0	0	2204	411	0	6	0	0	12	0	1992	0	4625	0.477	0.295
Copepoda	27	0	10	121	5517	188	1	0	2	6	83	1412	3	7370	0.749	0.407
Decapoda	57	0	6	16	624	1290	0	1	0	16	155	619	1	2785	0.463	0.343
Doliolida	0	0	0	53	8	0	758	0	0	102	6	498	0	1425	0.532	0.228
Egg	1	6	0	10	7	5	1	1446	0	37	1	206	0	1720	0.841	0.131
Fiber	285	0	193	0	1	0	0	8	681	0	41	311	0	1520	0.448	0.383
Gelatinous	11	0	0	135	36	7	104	26	0	1352	65	1274	0	3010	0.449	0.334
Multiple	399	0	93	106	593	188	19	24	38	128	546	1041	0	3175	0.172	0.527
Nonbio	339	6	48	476	1759	108	93	156	180	376	145	11690	14	15390	0.76	0.407
Pteropoda	50	0	6	0	337	157	0	0	19	0	5	413	98	1085	0.09	0.155
Total	3212	689	2256	3128	9298	1962	982	1664	1103	2029	1154	19707	116	47300	0.574	0.307

图 39: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 64

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1892	0	259	3	3	11	0	0	194	0	162	201	0	2725	0.694	0.399
Bubble	0	666	0	22	0	0	0	9	0	2	3	23	0	725	0.919	0.028
Chaetognatha	197	0	1462	0	0	3	0	0	37	0	41	5	0	1745	0.838	0.279
CladoceraPenilia	0	0	0	2962	200	9	21	2	0	53	36	1342	0	4625	0.64	0.348
Copepoda	27	0	5	208	5268	202	5	1	4	15	227	1354	54	7370	0.715	0.35
Decapoda	50	0	15	32	400	1568	0	3	2	14	262	413	26	2785	0.563	0.332
Doliolida	0	0	0	70	5	0	1008	0	0	100	10	232	0	1425	0.707	0.251
Egg	1	4	0	9	0	10	7	1467	2	18	1	201	0	1720	0.853	0.166
Fiber	257	0	156	1	4	1	0	5	819	0	55	222	0	1520	0.539	0.406
Gelatinous	1	0	0	117	46	13	120	37	0	1826	84	766	0	3010	0.607	0.339
Multiple	377	0	87	142	533	195	29	24	75	152	680	875	6	3175	0.214	0.662
Nonbio	306	15	35	976	1446	204	156	210	238	578	426	10693	107	15390	0.695	0.357
Pteropoda	41	0	9	3	199	130	0	1	8	4	23	297	370	1085	0.341	0.343
Total	3149	685	2028	4545	8104	2346	1346	1759	1379	2762	2010	16624	563	47300	0.64	0.328

图 40: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 16 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 43。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 8 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 44。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 4 时对分类结果进行交叉验证 (folds

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1772	0	273	11	2	24	2	0	241	3	178	218	1	2725	0.65	0.441
Bubble	0	664	0	15	3	0	0	4	1	0	1	37	0	725	0.916	0.015
Chaetognatha	254	0	1363	0	0	3	0	0	69	0	48	8	0	1745	0.781	0.311
CladoceraPenilia	0	0	0	2662	264	19	37	0	1	81	85	1476	0	4625	0.576	0.472
Copepoda	29	0	8	391	5042	209	2	2	3	24	288	1329	43	7370	0.648	0.363
Decapoda	78	0	22	82	393	1303	0	8	5	48	343	482	21	2785	0.468	0.398
Doliolida	0	0	0	89	8	0	905	0	0	155	12	256	0	1425	0.635	0.331
Egg	2	3	0	13	0	5	8	1404	0	39	2	244	0	1720	0.816	0.175
Fiber	295	0	163	7	4	1	0	5	753	0	56	236	0	1520	0.495	0.462
Gelatinous	9	0	0	153	51	22	186	32	0	1720	87	749	1	3010	0.571	0.402
Multiple	361	0	103	191	474	210	31	19	81	184	633	873	15	3175	0.199	0.726
Nonbio	322	7	35	1419	1472	238	181	226	237	601	533	9996	123	15390	0.65	0.383
Pteropoda	46	0	12	7	204	130	0	1	8	20	46	295	316	1085	0.291	0.392
Total	3168	674	1979	5040	7917	2164	1352	1701	1399	2875	2312	16199	520	47300	0.592	0.375

图 41: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 16

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision	
Appendicularia	1791	0	258	0	43	3	0	0	106	11	59	454	0	2725	0.6572	0.53262	
Bubble	5	660	0	0	27	0	0	8	0	2	0	23	0	725	0.9103	0.007519	
Chaetognatha	238	0	1229	0	0	1	0	0	253	6	8	10	0	1745	0.7043	0.397254	
CladoceraPenilia	0	0	0	129	236	0	0	0	0	1	1	4258	0	4625	0.0279	0.287293	
Copepoda	33	0	5	22	4130	2	0	0	4	13	15	3146	0	7370	0.5604	0.515144	
Decapoda	218	0	4	3	1070	27	0	0	0	6	45	1412	0	2785	0.0097	0.480769	
Doliolida	0	0	0	0	0	0	0	4	0	67	0	1354	0	1425	0.0028	0.333333	
Egg	0	0	0	3	28	0	0	0	1360	0	33	0	296	0	1720	0.7907	0.155804
Fiber	499	0	356	0	1	0	2	0	425	4	25	208	0	1520	0.2796	0.554974	
Gelatinous	6	0	0	1	124	2	0	15	8	396	34	2424	0	3010	0.1316	0.357143	
Multiple	434	0	43	5	628	10	0	8	52	49	78	1868	0	3175	0.0246	0.737374	
Nonbio	458	5	132	18	1597	6	0	219	106	28	30	12791	0	15390	0.8311	0.551633	
Pteropoda	150	0	12	0	634	1	0	1	1	0	2	284	0	1085	0	0	
Total	3832	665	2039	181	8518	52	6	1611	955	616	297	28528	0	47300	0.3792	0.377758	

图 42: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 32

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1855	0	216	0	17	22	0	0	155	15	140	304	1	2725	0.6807	0.482422
Bubble	3	675	0	0	7	4	0	1	0	4	15	16	0	725	0.931	0.005891
Chaetognatha	229	0	1301	0	0	0	0	0	183	5	18	9	0	1745	0.7456	0.330072
CladoceraPenilia	1	0	0	2498	206	36	7	0	0	32	15	1830	0	4625	0.5401	0.340549
Copepoda	29	0	8	165	5024	121	0	3	3	24	209	1763	21	7370	0.6817	0.40162
Decapoda	188	0	4	90	566	809	0	2	3	31	201	885	6	2785	0.2905	0.433473
Doliolida	0	0	0	43	0	0	947	0	0	79	2	354	0	1425	0.6646	0.23629
Egg	0	0	0	10	8	7	4	1469	0	24	1	197	0	1720	0.8541	0.127672
Fiber	372	0	262	0	3	6	0	6	640	9	54	168	0	1520	0.4211	0.477551
Gelatinous	11	0	6	121	95	21	80	23	5	1712	72	864	0	3010	0.5688	0.294602
Multiple	356	0	37	145	570	164	48	13	91	141	566	1041	3	3175	0.1783	0.637412
Nonbio	426	4	99	716	1549	150	154	167	144	351	255	11297	78	15390	0.734	0.406732
Pteropoda	114	0	9	0	351	88	0	0	1	0	13	314	195	1085	0.1797	0.358553
Total	3584	679	1942	3788	8396	1428	1240	1684	1225	2427	1561	19042	304	47300	0.5746	0.34868

图 43: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 16

= 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 45。

### 5.2.2 分析

imgSize 固定为 256 时, 当 LBP 特征的参数 cellSize 为 32 时, 交叉验证的结果最佳, 分类准确率约为 0.64。imgSize 固定为 64 时, 当 cellSize 为 8 时, 交叉验证的结果最佳, 分类准确率约为 0.59。两种最佳分类情况下的特征维数是一样的, 都是  $8 \times 8 \times 8 \times 58 = 3712$  维。所以说对图像进行 resize

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1663	0	271	5	30	38	0	0	235	8	205	266	4	2725	0.6103	0.494989
Bubble	1	668	0	3	9	7	1	3	1	2	13	17	0	725	0.9214	0.01909
Chaetognatha	264	0	1262	0	0	4	0	0	175	3	18	19	0	1745	0.7232	0.362948
CladoceraPenilia	1	0	0	2803	230	74	10	0	0	73	72	1362	0	4625	0.6061	0.434651
Copepoda	27	0	10	268	4832	228	0	4	5	45	319	1592	40	7370	0.6556	0.402719
Decapoda	178	0	7	142	417	1088	0	4	14	37	332	537	29	2785	0.3907	0.492537
Doliolida	0	0	0	65	0	0	1058	0	0	80	9	213	0	1425	0.7425	0.24212
Egg	0	5	0	11	4	10	5	1438	0	27	1	219	0	1720	0.836	0.144557
Fiber	297	0	270	1	10	7	0	6	688	12	79	150	0	1520	0.4526	0.508571
Gelatinous	15	0	2	122	125	38	85	18	6	1841	132	626	0	3010	0.6116	0.362535
Multiple	343	1	51	201	546	219	50	18	106	181	643	801	15	3175	0.2025	0.740935
Nonbio	406	7	96	1335	1659	308	187	190	169	578	628	9699	128	15390	0.6302	0.38501
Pteropoda	98	0	12	2	228	123	0	0	1	1	31	270	319	1085	0.294	0.403738
Total	3293	681	1981	4958	8090	2144	1396	1681	1400	2888	2482	15771	535	47300	0.5905	0.384185

图 44: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1554	0	272	1	35	44	0	0	282	9	169	353	6	2725	0.5703	0.524625
Bubble	1	662	0	2	10	8	0	5	1	0	7	29	0	725	0.9131	0.01194
Chaetognatha	312	0	1179	0	0	4	0	0	200	2	27	21	0	1745	0.6756	0.390698
CladoceraPenilia	6	0	0	2569	250	58	12	0	0	51	69	1610	0	4625	0.5555	0.429365
Copepoda	32	0	7	256	4949	161	0	0	5	38	262	1640	20	7370	0.6715	0.396169
Decapoda	171	0	10	161	420	841	0	3	11	42	288	820	18	2785	0.302	0.516389
Doliolida	0	0	0	100	10	0	855	0	0	122	6	332	0	1425	0.6	0.206128
Egg	0	3	0	14	1	8	7	1393	0	41	2	251	0	1720	0.8099	0.111607
Fiber	315	0	274	1	7	11	0	3	675	19	60	155	0	1520	0.4441	0.53125
Gelatinous	8	0	0	119	122	31	56	18	6	1746	120	782	2	3010	0.5801	0.357616
Multiple	340	0	64	205	543	181	40	15	91	157	515	1014	10	3175	0.1622	0.748903
Nonbio	419	5	113	1072	1616	284	107	129	168	491	494	10397	95	15390	0.6756	0.41356
Pteropoda	111	0	16	2	233	108	0	2	1	0	32	325	255	1085	0.235	0.371921
Total	3269	670	1935	4502	8196	1739	1077	1568	1440	2718	2051	17729	406	47300	0.5534	0.385398

图 45: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4

对 LBP 特征的分类效果是有影响的。在 Bubble、Chaetognatha 和 Egg 类上的分类准确率最高。

### 5.3 SIFT+BoW+SVM

代码参考 opencv\_contrib 中的实例程序 bagofwords\_classification.cpp。

Bag of word 对图像进行描述的步骤如下：

- 首先, 利用 SIFT 算法从所有类别的图像中提取特征。
- 然后, 采用 K-means 算法进行对第一步提取的所有特征进行聚类 (自己设定聚类中心的个数 K, 实验中设定为 50), 构造单词表 (单词表是由 K 类的聚类中心组成)。
- 通过统计单词表中每一类特征在图像中出现的次数 (根据图像中特征到单词表聚类中心的距离判断其类别), 得到一个 K 维向量, 该向量就是对该图片特征的描述。

采用 bag of word 进行分类的算法流程如图 46:

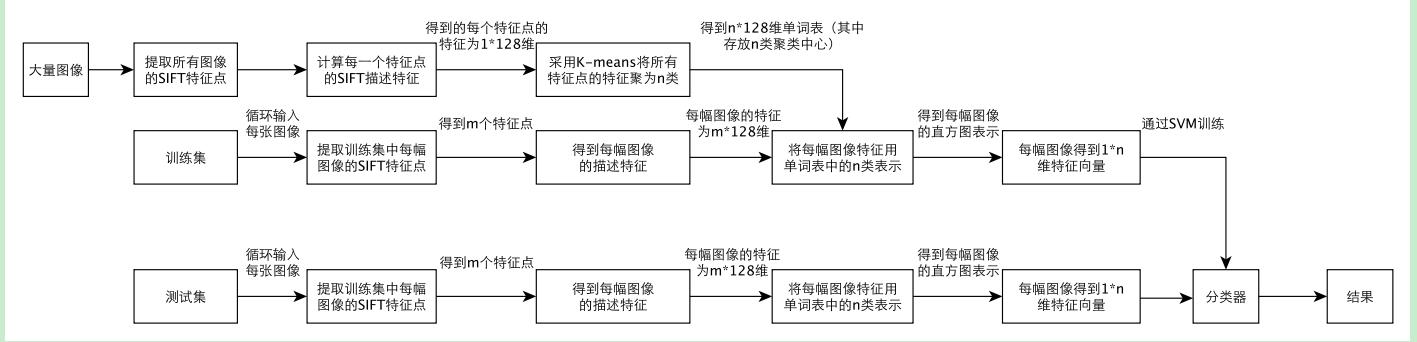


图 46: SIFT+BoW+SVM 流程图

## 5.4 BoF+SVM

BoF 代码参考 <http://cn.mathworks.com/help/vision/examples/image-category-classification-using-bag-of-features.html#zmw57dd0e714>。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	0.172477	0	0.423853	0.00367	0.01109	0.049541	0.005505	0	0.269725	0.007339	0.029358	0.007339	0.020183	0.999999	0.17	0.37
Bubble	0.006897	0.97931	0	0.006897	0	0	0	0	0	0	0.006897	0	0	0.100001	0.98	0.09
Chaetognatha	0.020057	0	0.925501	0	0	0	0.008596	0	0	0.031519	0.008596	0.002865	0.002865	0.999999	0.93	0.48
CladoceraPenilia	0.002162	0.001081	0	0.942703	0.004324	0.004324	0.005405	0.002162	0.003243	0.005405	0.012973	0.014054	0.002162	0.999998	0.94	0.37
Copepoda	0.005427	0.001357	0.002714	0.079376	0.608548	0.583345	0.02035	0.008141	0.004071	0.009498	0.044098	0.010855	0.165536	1.000001	0.61	0.34
Decapoda	0.003591	0	0.13465	0.016158	0.091562	0.567325	0	0.014363	0.001795	0.016158	0.066427	0.005386	0.082585	1	0.57	0.36
Doliolida	0	0	0	0.021053	0.003509	0	0.961404	0	0	0.007018	0	0.007018	0	1.000002	0.96	0.27
Egg	0	0.011628	0	0.008721	0.002907	0	0	0.953488	0.014535	0	0.005814	0	0.002907	1	0.95	0.21
Fiber	0.006579	0.006579	0.105263	0.006579	0	0	0.006579	0	0.835526	0	0.003289	0.006579	0.023026	0.999999	0.84	0.38
Gelatinous	0.006645	0.024917	0.021595	0.116279	0.018272	0.011628	0.196013	0.013289	0.006645	0.501661	0.039867	0.024917	0.018272	1	0.5	0.25
Multiple	0.022047	0.004724	0.110236	0.111811	0.097638	0.162205	0.055118	0.034646	0.086614	0.061417	0.176378	0.040945	0.03622	0.999999	0.18	0.62
Nonbio	0.01462	0.052307	0.009747	0.185185	0.067901	0.030864	0.092268	0.163093	0.069201	0.051657	0.068226	0.134178	0.060754	1.000001	0.13	0.52
Pteropoda	0.004608	0	0.046083	0.004608	0.023041	0	0	0.013825	0.041475	0.004608	0.013825	0.013825	0.834101	0.999999	0.83	0.34
Total	0.26511	1.081903	1.779642	1.50304	0.928711	0.892828	1.324327	1.203007	1.364349	0.673357	0.470017	0.265096	1.248611	12.999998	0.66076923	0.353846154

图 47: BoF+SVM 混淆矩阵 (训练集与测试集相同)

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	0.1	0	0.23	0	0.01	0.09	0	0	0.43	0.02	0.07	0.04	0.01	1	0.1	0.62
Bubble	0	0.96	0	0.02	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	1	0.96	0.14
Chaetognatha	0.05	0	0.8	0	0	0.02	0	0	0.11	0.01	0	0	0.01	1	0.8	0.46
CladoceraPenilia	0	0.01	0	0.83	0.04	0.01	0.01	0.04	0	0.02	0.01	0.02	0.01	1	0.83	0.45
Copepoda	0	0	0	0.12	0.52	0.06	0	0.01	0.03	0.03	0.04	0.06	0.13	1	0.52	0.5
Decapoda	0.01	0	0.07	0.03	0.21	0.39	0.01	0.01	0.01	0.08	0.09	0.03	0.06	1	0.39	0.5
Doliolida	0	0	0	0.11	0	0	0.87	0	0	0.01	0.01	0	0	1	0.87	0.27
Egg	0	0	0	0.01	0	0	0	0.98	0	0	0	0	0.01	1	0.98	0.21
Fiber	0	0	0.21	0	0	0	0	0	0.78	0	0	0	0.01	1	0.78	0.56
Gelatinous	0.01	0.03	0	0.12	0.06	0.01	0.19	0.05	0	0.36	0.11	0.04	0.02	1	0.36	0.45
Multiple	0.07	0.04	0.09	0.17	0.07	0.15	0.04	0	0.08	0.09	0.11	0.07	0.02	1	0.11	0.81
Nonbio	0.04	0.05	0.06	0.1	0.05	0.04	0.07	0.08	0.22	0.03	0.08	0.11	0.07	1	0.11	0.73
Pteropoda	0.01	0.03	0.03	0.01	0.08	0.02	0	0.05	0.13	0	0.06	0.04	0.54	1	0.54	0.39
Total	0.29	1.12	1.49	1.52	1.04	0.79	1.19	1.24	1.79	0.65	0.58	0.41	0.89	13	0.56538462	0.468461538

图 48: BoF+SVM 混淆矩阵 (训练集与测试集不同)

## 5.5 HOG+RandomForest

### 5.5.1 实验

这里的 HOG 特征<sup>9</sup>和随机森林分类器代码<sup>10</sup>都是 Matlab 的。随机森林的参数为 100 颗树，其它都保持默认值。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 49。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision	
Appendicularia	1674	0	192		8	112	82	0	0	49	45	111	451	1	2725	0.6143	0.430419
Bubble	0	625	0		0	0	0	0	10	0	0	0	90	0	725	0.8621	0.011076
Chaetognatha	323	0	1229		0	21	6	0	0	105	3	1	52	5	1745	0.7043	0.393386
CladoceraPenilia	0	0	0	2353	300	5	0	0	0	0	1	1966	0	4625	0.5088	0.257494	
Copepoda	15	0	5	148	5884	56	0	0	0	26	11	1220	5	7370	0.7984	0.391709	
Decapoda	143	0	0	117	780	760	0	0	8	3	26	948	0	2785	0.2729	0.321429	
Doliolida	0	0	0	3	0	0	411	0	0	9	2	1000	0	1425	0.2884	0.140167	
Egg	0	6	0	1	0	0	3	1253	0	5	0	452	0	1720	0.7285	0.067708	
Fiber	314	1	229	11	79	27	1	0	348	48	53	404	5	1520	0.2289	0.477477	
Gelatinous	35	0	1	38	336	6	18	1	6	793	10	1766	0	3010	0.2635	0.256795	
Multiple	218	0	19	152	420	46	14	0	16	59	111	2120	0	3175	0.035	0.729268	
Nonbio	182	0	205	337	1423	104	31	79	119	76	84	12736	14	15390	0.8276	0.454935	
Pteropoda	35	0	146	1	318	28	0	1	15	0	0	161	380	1085	0.3502	0.073171	
Total	2939	632	2026	3169	9673	1120	478	1344	666	1067	410	23366	410	47300	0.4987	0.30808	

图 49: HOG+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 32

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 16 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 50。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1724	0	238	1	84	28	0	0	56	13	62	519	0	2725	0.6327	0.479469
Bubble	0	636	0	0	0	0	0	7	0	0	1	81	0	725	0.8772	0.00625
Chaetognatha	412	0	1209	1	10	1	0	0	72	1	3	35	1	1745	0.6928	0.394289
CladoceraPenilia	0	0	0	2213	152	5	0	0	0	2	1	2252	0	4625	0.4785	0.094517
Copepoda	11	0	2	37	5896	16	0	0	2	9	10	1376	11	7370	0.8	0.358363
Decapoda	125	0	0	25	743	622	0	0	3	1	22	1244	0	2785	0.2233	0.220551
Doliolida	0	0	0	10	0	0	246	0	0	20	0	1149	0	1425	0.1726	0.027668
Egg	0	0	0	2	0	0	0	1361	0	8	0	349	0	1720	0.7913	0.056826
Fiber	431	3	201	1	59	25	0	1	286	19	36	457	1	1520	0.1882	0.462406
Gelatinous	26	0	0	26	307	1	5	4	0	906	5	1730	0	3010	0.301	0.15089
Multiple	212	0	19	50	414	37	1	3	17	42	64	2315	1	3175	0.0202	0.738776
Nonbio	297	1	144	78	1312	52	1	67	86	46	40	13240	26	15390	0.8603	0.469849
Pteropoda	74	0	183	0	212	11	0	0	10	0	1	227	367	1085	0.3382	0.09828
Total	3312	640	1996	2444	9189	798	253	1443	532	1067	245	24974	407	47300	0.4905	0.273703

图 50: HOG+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 16

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 8 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 51。

<sup>9</sup><http://www.vlfeat.org>

<sup>10</sup><https://code.google.com/p/randomforest-matlab/>

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1521	0	285	0	203	21	0	0	51	0	31	611	2	2725	0.5582	0.5492
Bubble	0	632	0	0	9	0	0	6	0	0	0	78	0	725	0.8717	0.004724
Chaetognatha	558	0	996	0	53	1	0	0	48	0	5	84	0	1745	0.5708	0.410651
CladoceraPenilia	0	0	0	1266	86	6	0	0	0	0	0	3267	0	4625	0.2737	0.13347
Copepoda	11	0	0	12	5468	11	0	0	2	0	9	1854	3	7370	0.7419	0.403643
Decapoda	132	0	9	7	774	309	0	0	4	1	11	1537	1	2785	0.111	0.266033
Doliolida	0	0	0	17	0	0	26	0	0	10	0	1372	0	1425	0.0182	0.037037
Egg	0	0	0	9	0	0	0	1298	0	2	0	411	0	1720	0.7547	0.069534
Fiber	465	0	134	0	121	15	0	4	232	2	18	528	1	1520	0.1526	0.438257
Gelatinous	1	0	0	74	420	0	1	0	0	270	2	2242	0	3010	0.0897	0.087838
Multiple	168	3	34	22	487	28	0	4	9	3	45	2372	0	3175	0.0142	0.697987
Nonbio	338	0	107	54	1245	28	0	83	55	8	26	13435	11	15390	0.873	0.521392
Pteropoda	180	0	125	0	303	2	0	0	12	0	2	280	181	1085	0.1668	0.090452
Total	3374	635	1690	1461	9169	421	27	1395	413	296	149	28071	199	47300	0.3997	0.285401

图 51: HOG+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , HOG 特征的参数 cellSize 取 4 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 52。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1306	0	259	0	270	23	0	0	76	0	28	762	1	2725	0.4793	0.614408
Bubble	0	619	0	0	7	0	0	3	0	0	0	96	0	725	0.8538	0.003221
Chaetognatha	590	0	670	0	137	12	0	0	41	0	32	263	0	1745	0.384	0.436501
CladoceraPenilia	0	0	0	360	67	2	0	0	0	1	1	4194	0	4625	0.0778	0.187359
Copepoda	20	0	3	8	4753	8	0	0	1	0	4	2573	0	7370	0.6449	0.448224
Decapoda	187	0	18	0	726	101	0	0	6	0	12	1735	0	2785	0.0363	0.479381
Doliolida	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	1412	0	1425	0	0
Egg	0	0	0	5	3	0	0	1143	0	0	0	569	0	1720	0.6645	0.041911
Fiber	550	0	78	0	129	7	0	0	174	1	9	572	0	1520	0.1145	0.544503
Gelatinous	0	0	0	23	360	0	0	2	0	26	1	2598	0	3010	0.0086	0.071429
Multiple	182	0	27	9	538	12	0	2	12	0	23	2370	0	3175	0.0072	0.81746
Nonbio	318	2	74	25	1215	23	0	43	66	0	15	13609	0	15390	0.8843	0.562637
Pteropoda	234	0	60	0	409	6	0	0	6	0	1	363	6	1085	0.0055	0.142857
Total	3387	621	1189	443	8614	194	0	1193	382	28	126	31116	7	47300	0.3201	0.334607

图 52: HOG+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4

### 5.5.2 分析

固定 imgSize 为 64 时, 当 HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时, 交叉验证的结果最佳, 分类准确率约为 0.4987。并且 HOG 特征向量维数越低, 分类准确率越高。在 Bubble 和 Nonbio 类上分类准确率最高。

## 5.6 LBP+RandomForest

### 5.6.1 实验

这里的 LBP 特征<sup>11</sup>和随机森林分类器代码<sup>12</sup>都是 Matlab 的。随机森林的参数为 100 颗树, 其它都保持默认值。

<sup>11</sup><http://www.vlfeat.org>

<sup>12</sup><https://code.google.com/p/randomforest-matlab/>

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 53。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1670	0	205	0	23	16	0	0	116	3	62	629	1	2725	0.6128	0.503567
Bubble	5	633	0	0	4	0	0	3	0	1	0	79	0	725	0.8731	0.007837
Chaetognatha	211	0	1301	0	0	0	0	0	164	0	16	53	0	1745	0.7456	0.321689
CladoceraPenilia	0	0	0	1951	288	13	0	0	0	0	1	2372	0	4625	0.4218	0.181628
Copepoda	16	0	2	136	5417	14	0	0	3	10	20	1752	0	7370	0.735	0.352653
Decapoda	119	0	1	80	620	215	0	0	0	9	35	1706	0	2785	0.0772	0.323899
Doliolida	0	0	0	9	0	0	293	0	0	15	2	1106	0	1425	0.2056	0.098462
Egg	0	0	0	6	3	0	3	1083	0	12	0	613	0	1720	0.6297	0.113748
Fiber	475	0	255	0	10	0	0	0	473	1	17	289	0	1520	0.3112	0.468539
Gelatinous	25	0	6	38	196	2	14	6	1	698	7	2017	0	3010	0.2319	0.143558
Multiple	322	0	23	49	341	29	6	0	22	41	73	2269	0	3175	0.023	0.730627
Nonbio	393	5	102	112	1128	25	9	130	102	25	35	13324	0	15390	0.8658	0.502316
Pteropoda	128	0	23	3	338	4	0	0	9	0	3	563	14	1085	0.0129	0.066667
Total	3364	638	1918	2384	8368	318	325	1222	890	815	271	26772	15	47300	0.442	0.293476

图 53: LBP+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 32

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 16 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 54。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1552	0	205	0	15	3	0	0	126	0	23	801	0	2725	0.5695	0.526829
Bubble	5	635	0	0	5	0	0	4	0	0	0	76	0	725	0.8759	0.007812
Chaetognatha	321	0	1143	0	0	0	0	0	166	0	6	109	0	1745	0.655	0.31186
CladoceraPenilia	0	0	0	1319	211	3	0	0	0	0	0	3092	0	4625	0.2852	0.132807
Copepoda	12	0	1	41	5007	5	0	0	2	4	8	2290	0	7370	0.6794	0.326745
Decapoda	107	0	3	28	458	123	0	0	1	5	22	2038	0	2785	0.0442	0.25
Doliolida	0	0	0	16	2	0	107	0	0	17	0	1283	0	1425	0.0751	0.061404
Egg	0	0	0	6	0	0	0	1109	0	7	0	598	0	1720	0.6448	0.093954
Fiber	517	0	186	0	7	1	0	0	400	1	13	395	0	1520	0.2632	0.507389
Gelatinous	11	0	4	22	105	0	5	5	0	607	2	2249	0	3010	0.2017	0.091317
Multiple	255	0	14	25	304	9	1	4	26	11	40	2486	0	3175	0.0126	0.708029
Nonbio	370	5	85	63	1082	14	1	102	83	16	22	13547	0	15390	0.8802	0.542933
Pteropoda	130	0	20	1	241	6	0	0	8	0	1	675	3	1085	0.0028	0
Total	3280	640	1661	1521	7437	164	114	1224	812	668	137	29639	3	47300	0.3992	0.273929

图 54: LBP+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 16

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 8 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 55。

将所有图像 resize 为  $64 \times 64$ , LBP 特征的参数 cellSize 取 4 时对分类结果进行交叉验证 (folds = 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 56。

### 5.6.2 分析

固定 imgSize 为 64 时, 当 LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时, 交叉验证的结果最佳, 分类准确率约为 0.442。并且 LBP 特征向量维数越低, 分类准确率越高。在 Bubble 和 Nonbio 类上分类准确率最高。

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1257	0	241	1	5	3	0	0	133	0	6	1079	0	2725	0.4613	0.573754
Bubble	4	620	0	0	2	0	0	12	0	0	0	87	0	725	0.8552	0.00641
Chaetognatha	434	0	924	0	0	0	0	0	126	1	9	251	0	1745	0.5295	0.357441
CladoceraPenilia	0	0	0	727	219	2	0	0	0	0	1	3676	0	4625	0.1572	0.180383
Copepoda	5	0	0	19	4584	6	0	0	0	0	4	2752	0	7370	0.622	0.338719
Decapoda	66	0	7	15	347	59	0	0	0	0	8	2283	0	2785	0.0212	0.337079
Doliolida	0	0	0	22	12	0	22	0	0	8	0	1361	0	1425	0.0154	0
Egg	0	0	0	0	0	0	0	1078	0	0	0	642	0	1720	0.6267	0.092593
Fiber	543	0	147	0	6	0	0	0	288	0	6	530	0	1520	0.1895	0.545024
Gelatinous	5	0	0	24	85	0	0	15	0	207	0	2674	0	3010	0.0688	0.088106
Multiple	208	0	24	21	266	6	0	2	21	3	13	2611	0	3175	0.0041	0.77193
Nonbio	319	4	72	58	1233	5	0	81	62	8	9	13539	0	15390	0.8797	0.580238
Pteropoda	108	0	23	0	173	8	0	0	3	0	1	769	0	1085	0	0
Total	2949	624	1438	887	6932	89	22	1188	633	227	57	32254	0	47300	0.3408	0.297821

图 55: LBP+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8

	Appendicularia	Bubble	Chaetognatha	CladoceraPenilia	Copepoda	Decapoda	Doliolida	Egg	Fiber	Gelatinous	Multiple	Nonbio	Pteropoda	Total	Recall	1-Precision
Appendicularia	1017	0	250	0	8	0	0	0	145	0	6	1299	0	2725	0.3732	0.603199
Bubble	1	608	0	0	4	0	0	12	0	0	0	100	0	725	0.8386	0.006536
Chaetognatha	475	0	692	0	2	1	0	0	104	0	2	469	0	1745	0.3966	0.423813
CladoceraPenilia	0	0	0	192	204	1	0	0	0	0	0	4228	0	4625	0.0415	0.264368
Copepoda	8	0	0	8	4006	0	0	0	0	0	0	3348	0	7370	0.5436	0.348194
Decapoda	49	0	9	6	288	18	0	0	1	0	2	2412	0	2785	0.0065	0.307692
Doliolida	0	0	0	11	19	0	0	0	0	0	0	1395	0	1425	0	0
Egg	0	3	0	2	0	0	0	1078	0	2	0	635	0	1720	0.6267	0.077055
Fiber	510	0	106	0	4	1	0	0	291	0	2	606	0	1520	0.1914	0.526059
Gelatinous	3	0	1	13	97	0	0	17	0	46	0	2833	0	3010	0.0153	0.041667
Multiple	157	0	34	12	227	2	0	2	17	0	3	2721	0	3175	0.0009	0.823529
Nonbio	255	1	91	17	1174	0	0	59	55	0	2	13736	0	15390	0.8925	0.603499
Pteropoda	88	0	18	0	113	3	0	0	1	0	0	861	1	1085	0.0009	0
Total	2563	612	1201	261	6146	26	0	1168	614	48	17	34643	1	47300	0.3021	0.309662

图 56: LBP+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4

## 参考文献

- [1] Mr. Bayes and Mr Price. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. by the late rev. mr. bayes, frs communicated by mr. price, in a letter to john canton, amfrs. *Philosophical Transactions (1683-1775)*, pages 370–418, 1763.
- [2] Serge Belongie, Jitendra Malik, and Jan Puzicha. Shape matching and object recognition using shape contexts. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(4):509–522, 2002.
- [3] Leo Breiman. Random forests. *Machine learning*, 45(1):5–32, 2001.
- [4] Corinna Cortes and Vladimir Vapnik. Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3):273–297, 1995.

- [5] Navneet Dalal and Bill Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages 886–893. IEEE, 2005.
- [6] Guang-Bin Huang, Qin-Yu Zhu, and Chee-Kheong Siew. Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks. In *Neural Networks, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Joint Conference on*, volume 2, pages 985–990. IEEE, 2004.
- [7] Haibin Ling and David W Jacobs. Shape classification using the inner-distance. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 29(2):286–299, 2007.
- [8] David G Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. In *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*, volume 2, pages 1150–1157. Ieee, 1999.
- [9] David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2):91–110, 2004.
- [10] Timo Ojala, Matti Pietikainen, and David Harwood. Performance evaluation of texture measures with classification based on kullback discrimination of distributions. In *Pattern Recognition, 1994. Vol. 1-Conference A: Computer Vision & Image Processing., Proceedings of the 12th IAPR International Conference on*, number 1, pages 582–585, 1994.
- [11] Michael Oren, Constantine Papageorgiou, Pawan Sinha, Edgar Osuna, and Tomaso Poggio. Pedestrian detection using wavelet templates. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on*, pages 193–199. IEEE, 1997.
- [12] Daniel Reisfeld, Haim Wolfson, and Yechezkel Yeshurun. Context-free attentional operators: the generalized symmetry transform. *International Journal of Computer Vision*, 14(2):119–130, 1995.
- [13] Paul Viola and Michael Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–511. IEEE, 2001.
- [14] Zhi-Hua Zhou, Jianxin Wu, and Wei Tang. Ensembling neural networks: many could be better than all. *Artificial intelligence*, 137(1):239–263, 2002.