

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 | 4 |
| 1.3 Labeled Faces in the Wild | 4 |
| 2 数据集 13 类生物的特征 | 4 |
| 3 特征 (Ours) | 6 |
| 3.1 经典特征 | 6 |
| 3.1.1 SIFT 特征 | 6 |
| 3.1.2 HOG 特征 | 9 |
| 3.1.3 SURF | 12 |
| 3.1.4 LBP | 12 |
| 3.1.5 FV(Fisher vector) | 13 |
| 3.1.6 骨架特征 | 14 |
| 3.1.7 SC | 14 |
| 3.1.8 哈尔特征 (Haar-like features) | 15 |
| 3.2 其它特征 | 16 |
| 3.2.1 local symmetry | 16 |
| 3.2.2 灰度特征 | 17 |
| 3.2.3 GIST | 19 |
| 3.2.4 Harris-Laplace | 19 |
| 3.2.5 GMM-HMM(Gaussian Mixture Model-Hidden Markov Model) | 19 |
| 3.2.6 Gabor | 19 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.7 | DoG | 20 |
| 3.2.8 | Covariance Matrix | 20 |
| 3.2.9 | 凸包 | 20 |
| 3.2.10 | ICA(Independent Component Analysis) | 20 |
| 3.2.11 | Binary SIFT (BSIFT) – Zhou, TIP 2014 | 20 |
| 3.2.12 | COGE - PCM 2013 Best Paper, Mao , 2013 | 20 |
| 3.2.13 | Ultra-Short Binary Descriptor (USB) – Zhang S., TIP , 2014 | 20 |
| 3.2.14 | Topology-Preserving Hashing – Zhang L., MM 2012 | 20 |
| 4 | 学习算法 | 20 |
| 4.1 | 贝叶斯学习 | 20 |
| 4.2 | SVM 方法 | 21 |
| 4.3 | K-means | 21 |
| 4.4 | Decision tree | 21 |
| 4.5 | EM(Expectation Maximization Algorithm) | 21 |
| 4.6 | KNN | 21 |
| 4.7 | ELM (极限学习机) | 22 |
| 4.8 | 集成学习 (Ensemble learning) | 22 |
| 4.8.1 | AdaBoost | 22 |
| 4.8.2 | Bagging | 23 |
| 4.8.3 | Gasen | 23 |
| 5 | 技术路线和方案 | 23 |
| 5.1 | 技术路线 | 23 |
| 6 | 实验与分析 (去噪前) | 24 |
| 6.1 | HOG+SVM | 24 |
| 6.1.1 | 理论 | 24 |
| 6.1.2 | 实验 | 25 |
| 6.1.3 | 分析 | 29 |
| 6.2 | LBP+SVM | 31 |
| 6.2.1 | 实验 | 31 |
| 6.2.2 | 分析 | 35 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 6.3 SIFT+BoW+SVM | 35 |
| 6.3.1 理论 | 35 |
| 6.3.2 实验 | 36 |
| 6.4 HOG+RandomForest | 39 |
| 6.4.1 实验 | 39 |
| 6.4.2 分析 | 40 |
| 6.5 LBP+RandomForest | 41 |
| 6.5.1 实验 | 41 |
| 6.5.2 分析 | 42 |
| 7 实验与分析 (去噪后) | 42 |
| 7.1 实验一 | 43 |
| 7.2 实验二 | 43 |
| 7.3 实验三 | 44 |
| 7.4 实验四 | 45 |
| 7.4.1 实验结果 | 45 |
| 7.4.2 实验结果对比 | 49 |
| 7.4.3 该去噪方法存在的问题 | 51 |
| 7.5 去噪实验分析 | 52 |

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，这对于一张图片有多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. 数据集 13 类生物的特征

Appendicularia (尾海鞘纲) 体型像蝌蚪，身体分为躯干和尾两部分。躯干为椭圆形；尾部扁平，比躯干要长。¹

观察采集的图像发现：长条形，躯干宽度大于尾部宽度（图像中的躯干并不是规则的椭圆），躯干中心处灰度值较深；尾部灰度相对较浅。

Bubble(气泡) 非生物。

观察采集的图像发现：圆形，中心处灰度值较大（接近白色），四周灰度值较小。

Chaetognatha (毛颚动物门) 全体分为头、躯干和尾 3 部分。头部略膨大，躯干与头连接处稍微缢缩为颈部，尾部末端尖细。头部两侧各着生一列 4 ~ 13 根镰刀状、几丁质的颚毛。²

观察采集的图像发现：长条形，头部的宽度不超过躯干的宽度，尾部末端尖细。与 Appendicularia 类相比，此类轮廓更加清晰规则。

¹<https://zh.wikipedia.org/wiki/%e5%b0%be%e6%b5%b7%e9%9e%98%e7%ba%b2>

²<https://zh.wikipedia.org/wiki/%e6%af%9b%e9%a2%9a%e5%8a%a8%e7%89%a9%e9%97%a8>

Cladocera Penilia (Penilia avirostris, 鸟喙尖头溞) 见百度百科³。

观察采集的图像发现：长圆形，大部分图像可以看到一对较长的触角，并且中轴灰度较深。

Copepoda(桡脚类) 体形像泪珠，有大的触角。分为前体部和后体部，前体部较为宽大，后体部较为短小。⁴

观察采集的图像发现：身体类似椭圆形，身体前部的触角不是特别清晰，身体后部的触角较短，并成簇存在。

Decapoda(十足目) 体躯延长呈虾形（腹部发达）或缩短扁圆呈蟹形（腹部退化）。⁵

观察采集的图像发现：形状大致分为虾形和蟹形。

Doliolida (海樽目) 体型一般呈桶状，体壁最外是被囊层，其内层是外套膜。被囊层下有8~9条肌带环绕着体躯。

观察采集的图像发现：木桶状，灰度相对较浅，并有纹理环绕。

Egg 此类可能为浮游动物的卵。

观察采集的图像发现：近似为圆形，灰度没有统一的特征。

Fiber (纤维) 非生物。为细线形。

Gelatinous (明胶) 成明胶状的浮游动物观察采集的图像发现：块状，像帽子，一头宽，一头尖。

Multiple (多个生物) 由于浮游动物的重叠，导致分割过程中多个浮游动物被分割到一张图像上。

Nonbio 非生物的集合。

Pteropoda (翼足目) 观察采集的图像发现：像象牙，一端粗一端细，灰度相对较深。

³<http://baike.baidu.com/view/13090677.htm>

⁴<https://zh.wikipedia.org/wiki/%e6%a9%88%e8%85%b3%e9%a1%9e>

⁵http://baike.baidu.com/link?url=LWmrgD_DVUcw0upg_ziOLTIJWj6quxa_juRrS3zUt91A-FjPM6VQwYfZ5fFZckzIyEGCaXypikXUGg2JsYMXUX-uFEkmkLqC51fkxvXvApK3WRBcWQkfbdhM1fTdgrWvh-728gSoUylWZG2UstFK

3. 特征 (Ours)

3.1 经典特征

3.1.1 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， σ 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。

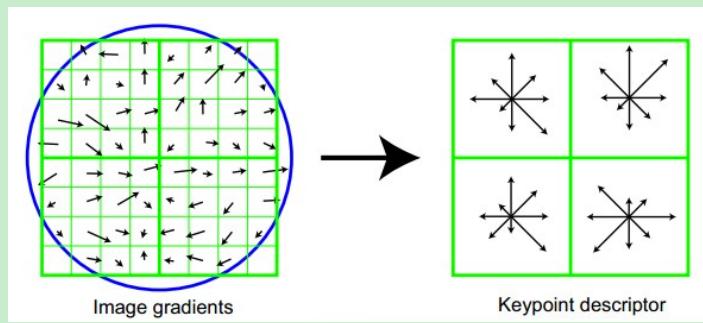


图 1:

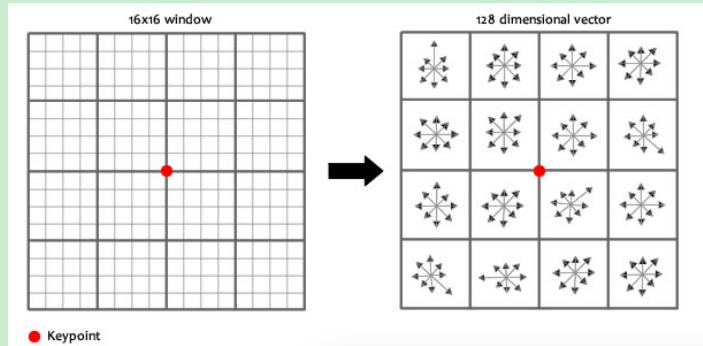


图 2: 描述子用 128 维向量表征

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 16×16 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。 16×16 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。

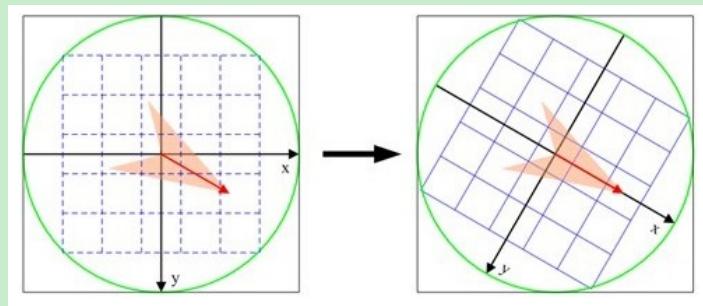


图 3: 将坐标移至关键点主方向

(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 2×2 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 2×2 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);
```

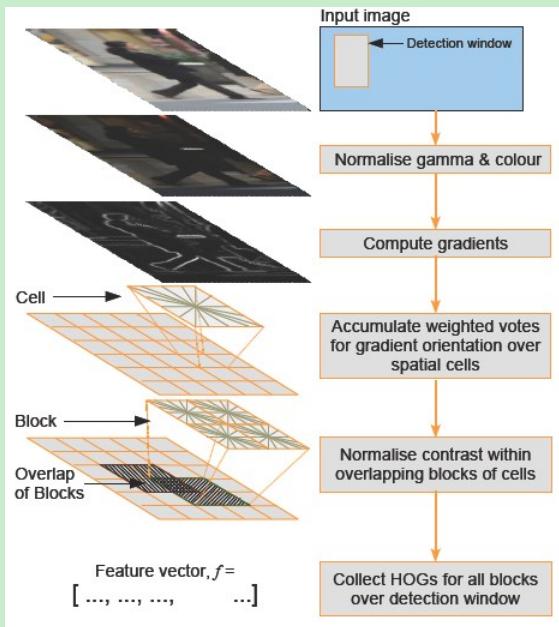


图 4: HOG 特征

3.1.2 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。

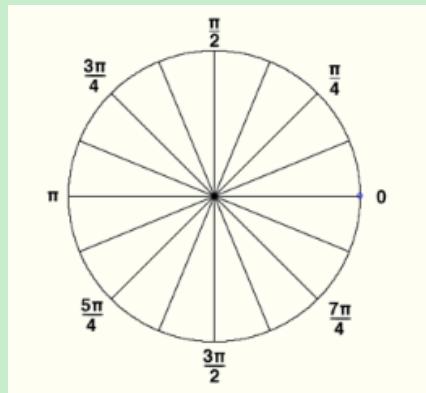


图 5: 梯度方向 bin

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 6×6 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 3×3 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。

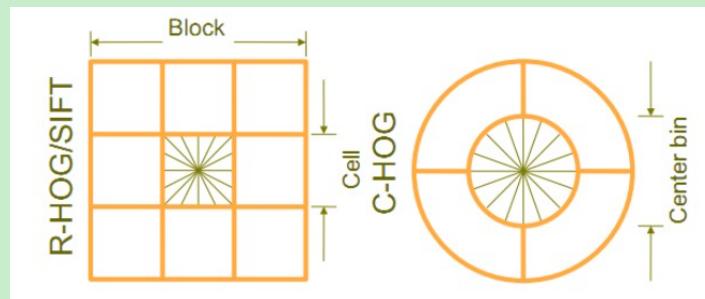


图 6: 矩形区间和环形区间

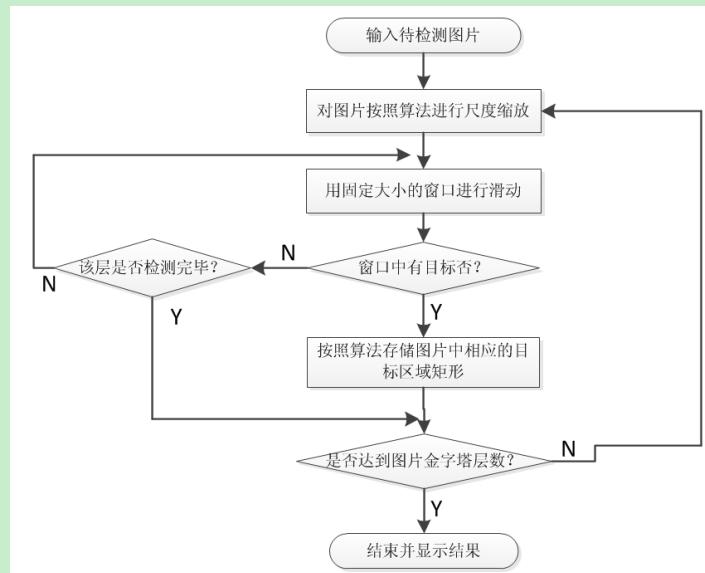


图 7: 行人检测流程

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, α 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 64×128 ）在图像中滑动，计算窗口对应的 HOG 特征。窗口中块的大小为 16×16 ，块的步长为 8×8 ，单元的大小为 8×8 。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。

3.1.3 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 4×4 分, 每一份中有 5×5 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。

3.1.4 LBP

LBP (Local Binary Pattern, 局部二值模式)⁶ 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。

⁶<http://blog.csdn.net/zouxy09/article/details/7929531>

原始的 LBP 算子定义为在 3×3 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， 3×3 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：

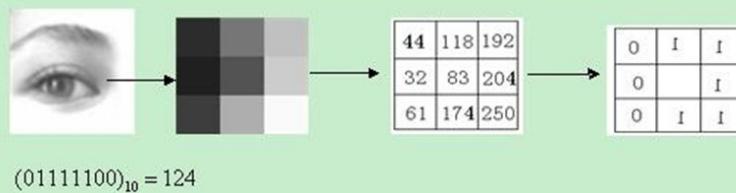


图 8: LBP 特征

对 LBP 特征向量进行提取的步骤：

1. 首先将检测窗口划分为 16×16 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， 3×3 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。

3.1.5 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。

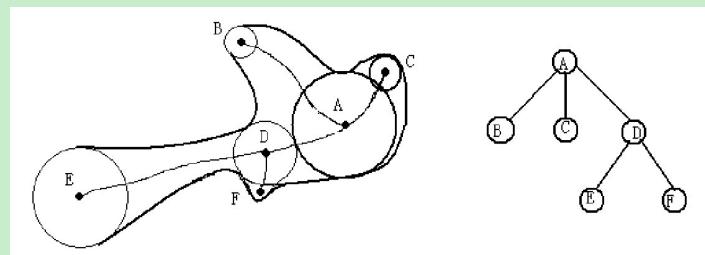


图 9: 骨架树



图 10: 原始图像

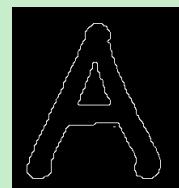


图 11: 边缘提取

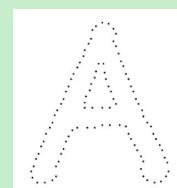


图 12: 采样点

3.1.6 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/>。

3.1.7 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。

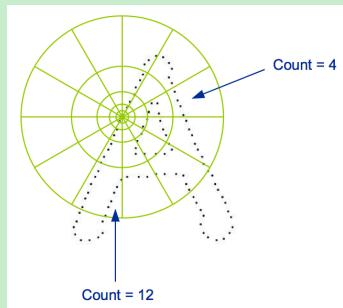


图 13: 对数极坐标空间

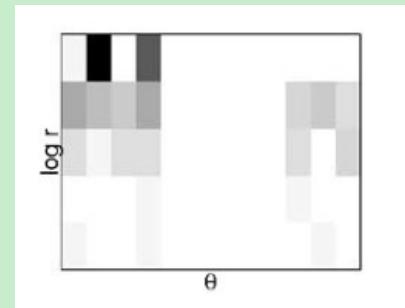


图 14: 直方图

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。

3.1.8 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：

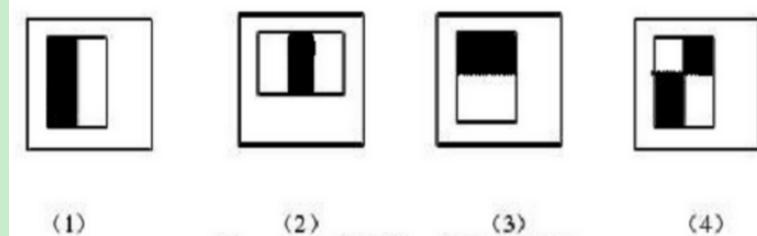


图 15: Viola 提出的 Haar-like 特征

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。

3.2 其它特征

3.2.1 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:

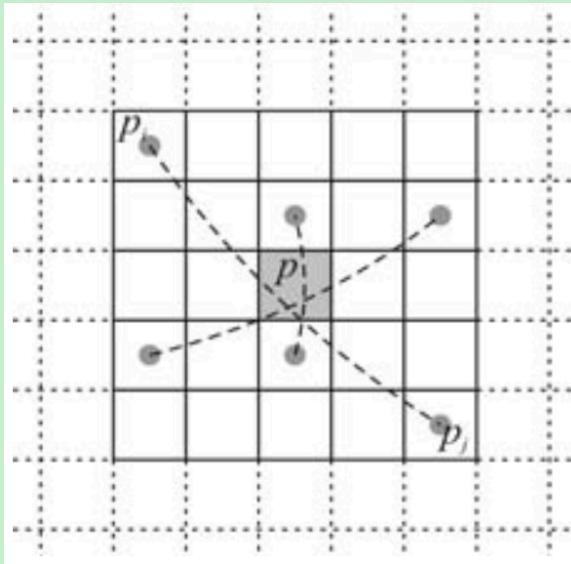


图 16: 用对称性算子来对像素对的梯度进行比较的三个例子

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 σ 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

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

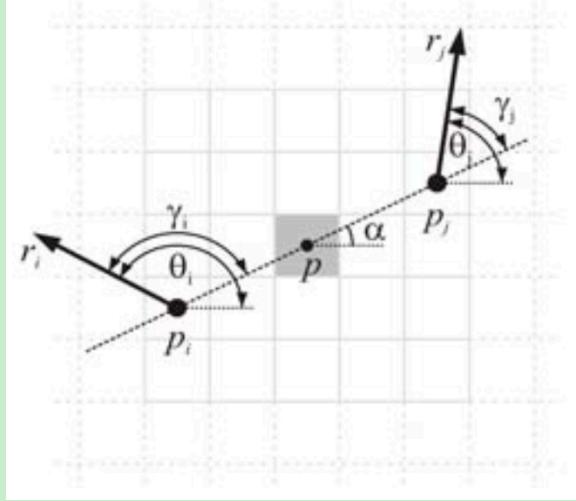


图 17: 每对像素对的贡献的几何表示

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

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

3.2.2 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 256×256 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);
```

3.2.3 GIST

GIST 是一个全局描述子，主要用于场景分类。

3.2.4 Harris-Laplace

3.2.5 GMM-HMM(Gaussian Mixture Model-Hidden Markov Model)

应用：语音识别

3.2.6 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

3.2.7 DoG

3.2.8 Covariance Matrix

3.2.9 凸包

3.2.10 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

3.2.11 Binary SIFT (BSIFT) – Zhou, TIP 2014

3.2.12 COGE - PCM 2013 Best Paper, Mao , 2013

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

3.2.14 Topology-Preserving Hashing – Zhang L., MM 2012

4. 学习算法

4.1 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：

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

4.2 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：SVMlight⁷和 LibSVM⁸

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⁹：一对多法和一对一法。

4.3 K-means

4.4 Decision tree

4.5 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。

4.6 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。

⁷<http://svmlight.joachims.org/>

⁸<http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>

⁹<http://www.blogjava.net/zhenandaci/archive/2009/03/26/262113.html>

4.7 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/>

4.8 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。集成学习按照基本分类器之间的关系可以分为异态集成学习和同态集成学习。异态集成学习是指弱分类器之间本身不同，而同态集成学习是指弱分类器之间本身相同只是参数不同。

集成学习有效的前提：1. 每个弱分类器的错误率不能高于 0.5。2. 弱分类器之间的性能要有较大的差别，否则集成效果不是很好。

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。

4.8.1 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>

4.8.2 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¹⁰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¹¹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 17 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。

4.8.3 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

5. 技术路线和方案

5.1 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。

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

¹¹<https://code.google.com/p/randomforest-matlab/issues/detail?id=54>

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。

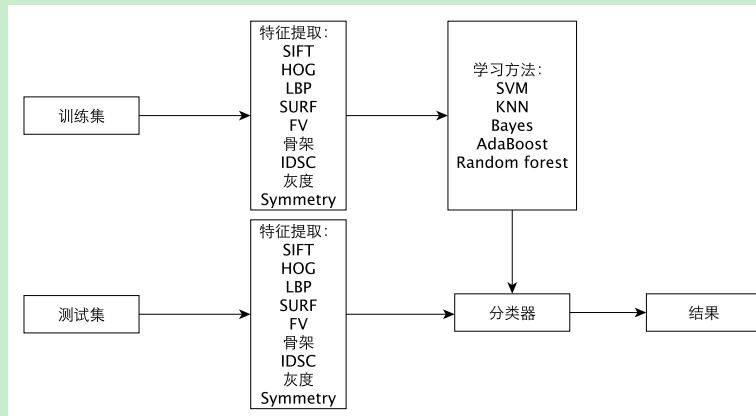


图 18: 技术路线

6. 实验与分析（去噪前）

6.1 HOG+SVM

6.1.1 理论

算法流程如图 19：

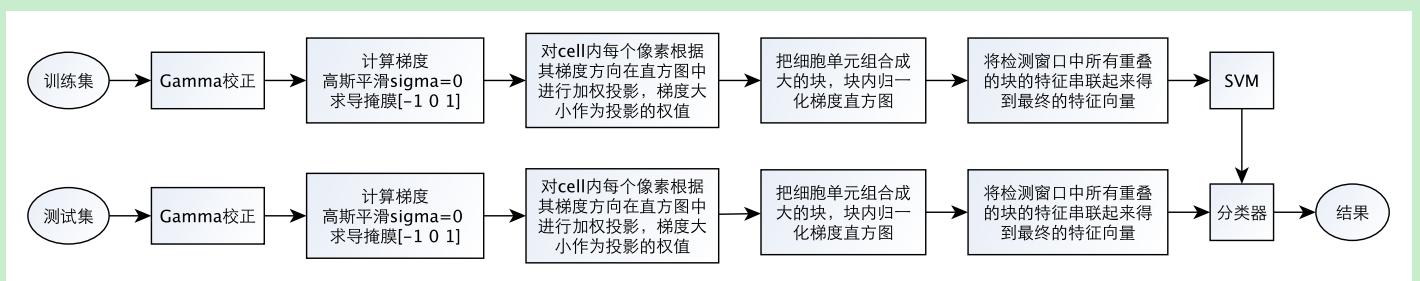


图 19: HOG-SVM 流程图

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。

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。

6.1.2 实验

1. C++ 版

将图像 resize 为 64×64 ，以整幅图像作为一个窗口提取 HOG 特征，其中块（block）选用 16×16 ，block 滑动的步长选用 8×8 ，单元（cell）选用 8×8 。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。

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。

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 | 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 |
| 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：

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：

| | 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)

2. Matlab 版

VLFeat¹²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 256×256 , 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。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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。

¹²<http://www.vlfeat.org/>

Zooplankton Identification

| | 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.

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 64×64 , 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 | 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 | 0 |
| 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 | 9 | 0 | 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 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 96 | 0 | 0 |
| Pteropoda | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 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)

| | 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

| | 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

| | 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

| | 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

| | 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 | 0.645 | 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 | 367 | 154 | 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

6.1.3 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,

| | 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

| | 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

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。

| | 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

6.2 LBP+SVM

6.2.1 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 16×16 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。

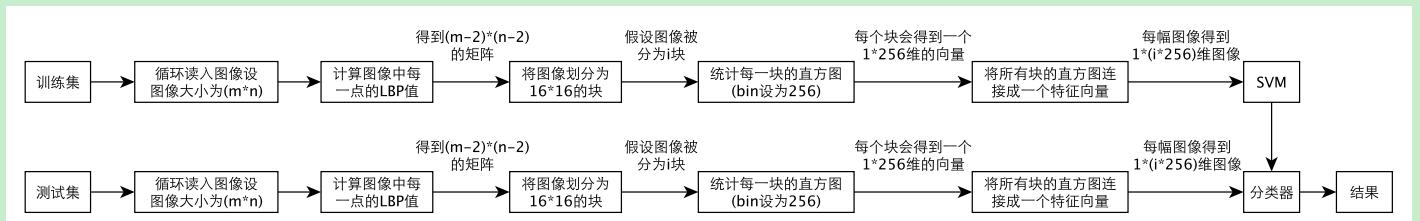


图 34: LBP+SVM 流程图

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:

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

VLFeat¹³ 库中有 LBP 特征的计算。用法为 `lbp = vl_lbp(img, 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

¹³<http://www.vlfeat.org/>

| | 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)

| | 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 | 0 | 0 | 0 | 3078 | 0 | 3078 | |
| Pteropoda | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 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)

份的特征向量，为 58 维。

分类器 SVM 用的是 LibSVM。

将所有图像 resize 为 256×256 ，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 256×256 ，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。

| | 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

将所有图像 resize 为 256×256 , 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。

| | 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 256×256 , 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 64×64 , LBP 特征的参数 cellSize 取 32 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 | 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
= 2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 42。

| | 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 | 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

将所有图像 resize 为 64×64 , 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。

| | 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

将所有图像 resize 为 64×64 , 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。

| | 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

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 45。

| | 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

6.2.2 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 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。

6.3 SIFT+BoW+SVM

6.3.1 理论

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。

2. 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）。

3. 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：

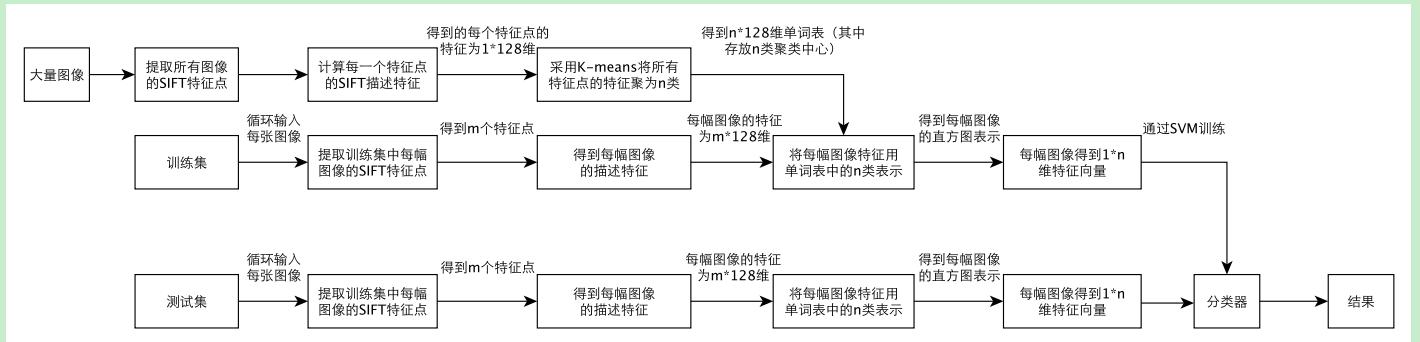


图 46: SIFT+BoW+SVM 流程图

6.3.2 实验

1. C++ 版

代码参考 opencv_contrib 中的实例程序 `bagofwords_classification.cpp`。

2. Matlab 版

- Matlab2015 版自带的 `bagOfFeatures` 函数

参考网址 <http://cn.mathworks.com/help/vision/examples/image-category-classification.html#zwmw57dd0e714>，实验结果如图 47 和图 48。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | Cladocera | Penilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|----------------|----------------|----------|--------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| Appendicularia | 0.172477 | 0 | 0.423853 | 0.00367 | 0.011009 | 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 | 0.006897 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.006897 | 0 | 0 | 1.000001 | 0.98 | 0.09 | |
| Chaetognatha | 0.020057 | 0 | 0.925501 | 0 | 0 | 0.008596 | 0 | 0 | 0.031519 | 0.008596 | 0.002865 | 0 | 0.002865 | 0.999999 | 0.93 | 0.48 | |
| Cladocera | 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 | 0.079376 | 0.608548 | 0.058345 | 0.020235 | 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 | 0.016158 | 0.091662 | 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 | 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 | 0.008721 | 0.002907 | 0 | 0 | 0.953488 | 0.014555 | 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 | 0.006646 | 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 | Cladocera | Penilia | 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 | 0.43 | 0.02 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 1 | 0.1 | 0.62 | | |
| Bubble | 0 | 0.96 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0.02 | 0 | 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 | |
| Cladocera | 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 | 0.64 | 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)

- VLFeat 库中 (`VLRoot/apps/phow_caltech101.m`) 有使用 SIFT+Bag of Words+SVM 的例子

其中, 特征采用的是 PHOW(dense multi-scale SIFT descriptors), 快速 visual word dictionary 构建采用的是 Elkan k-means 方法。

使用: `[frames, descrs] = vl_phow(im, varargin)`

参数:

Verbose: 默认为 false, 设为 true 时可以 turn on verbose output。

Sizes: 默认为 [4 6 8 10], 表示 dense SIFT 特征提取的尺度, 这里的每一个值在 `VL_DSIFT()` 函数中都被用作 bin 的大小。

Fast: 默认为 true, 设为 false 时会关 `VL_DSIFT()` 函数的快速 SIFT 特征求取。

Step: 默认为 2, 表示 dense SIFT 特征提取的网格步长。

Color: 默认为 ‘gray’, 可以在 ‘gray’ (PHOW-gray), ‘rgb’, ‘hsv’ 和 ‘opponent’ (PHOW-color) 中选取。

ContrastThreshold: 默认为 0.005, 求取的 SIFT 特征中低于这个值的都被置为 0。输入图像被归一化到 [0, 1], 这个值被用来与 `VL_DSIFT()` 函数所求出的描述子方差进行大小比较。

WindowSize: 默认为 1.5, 表示空间 bins 单元的高斯窗口大小。

Magnif: 默认为 6, 图像被一个标准差为 SIZE/MAGNIF 的高斯核来进行滤波。在标准的 SIFT 描述子中, magnification 值为 3; 这里默认值为 6, 因为在应用中表现更好。

FloatDescriptors: 默认为 false, 如果设为 true, 返回的描述子为浮点数形式。

当 `vl_phow` 的参数设置为 (`'Verbose'`, 2, `'Sizes'`, 7, `'Step'`, 5), `vl_kmeans` 的 numWords 设置为 100, 其它参数设为 (`'verbose'`, `'algorithm'`, `'elkan'`, `'MaxNumIterations'`, 50 时, 交叉验证的结果如图 49:

当其它参数不变, numWords 设置为 200 时, 交叉验证的结果如图 50:

当其它参数不变, numWords 设置为 300 时, 交叉验证的结果如图 51:

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|--------|-------------|
| Appendicularia | 1579 | 0 | 459 | 3 | 3 | 18 | 0 | 0 | 275 | 14 | 152 | 212 | 10 | 2725 | 0.5795 | 0.500316 |
| Bubble | 1 | 670 | 0 | 0 | 2 | 9 | 0 | 3 | 0 | 2 | 9 | 29 | 0 | 725 | 0.9241 | 0.013255 |
| Chaetognatha | 375 | 0 | 1134 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 194 | 1 | 4 | 32 | 5 | 1745 | 0.6499 | 0.476937 |
| CladoceraPenilia | 1 | 0 | 0 | 3557 | 174 | 45 | 15 | 0 | 0 | 75 | 114 | 644 | 0 | 4625 | 0.7691 | 0.268709 |
| Copepoda | 11 | 0 | 1 | 195 | 5730 | 168 | 0 | 0 | 3 | 20 | 173 | 1040 | 29 | 7370 | 0.7775 | 0.320929 |
| Decapoda | 52 | 0 | 7 | 67 | 297 | 1046 | 0 | 8 | 17 | 32 | 157 | 1055 | 47 | 2785 | 0.3756 | 0.510529 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 21 | 19 | 0 | 948 | 0 | 0 | 107 | 10 | 320 | 0 | 1425 | 0.6653 | 0.37343 |
| Egg | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 13 | 7 | 1157 | 0 | 28 | 6 | 493 | 0 | 1720 | 0.6727 | 0.284035 |
| Fiber | 372 | 0 | 328 | 4 | 5 | 19 | 1 | 0 | 581 | 12 | 59 | 138 | 1 | 1520 | 0.3822 | 0.582014 |
| Gelatinous | 32 | 0 | 3 | 115 | 93 | 25 | 117 | 9 | 8 | 1514 | 172 | 919 | 3 | 3010 | 0.503 | 0.420589 |
| Multiple | 347 | 0 | 45 | 193 | 350 | 192 | 55 | 7 | 71 | 167 | 550 | 1191 | 7 | 3175 | 0.1732 | 0.763339 |
| Nonbio | 349 | 1 | 158 | 697 | 1628 | 530 | 370 | 428 | 233 | 639 | 908 | 9326 | 123 | 15390 | 0.606 | 0.410791 |
| Pteropoda | 41 | 0 | 33 | 4 | 137 | 72 | 0 | 4 | 8 | 2 | 10 | 429 | 345 | 1085 | 0.318 | 0.394737 |
| Total | 3160 | 679 | 2168 | 4864 | 8438 | 2137 | 1513 | 1616 | 1390 | 2613 | 2324 | 15828 | 570 | 47300 | 0.5689 | 0.409201 |

图 49: SIFT+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, numWords 取 100

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|--------|-------------|
| Appendicularia | 1642 | 0 | 447 | 2 | 2 | 15 | 0 | 0 | 246 | 22 | 153 | 194 | 2 | 2725 | 0.6026 | 0.483323 |
| Bubble | 1 | 678 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 | 0 | 5 | 18 | 17 | 0 | 725 | 0.9352 | 0.02446 |
| Chaetognatha | 334 | 0 | 1179 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 184 | 0 | 2 | 41 | 2 | 1745 | 0.6756 | 0.455427 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 3758 | 192 | 33 | 3 | 0 | 1 | 37 | 85 | 516 | 0 | 4625 | 0.8125 | 0.237109 |
| Copepoda | 12 | 0 | 1 | 173 | 5877 | 138 | 1 | 0 | 4 | 13 | 175 | 959 | 17 | 7370 | 0.7974 | 0.30293 |
| Decapoda | 55 | 0 | 5 | 53 | 252 | 1171 | 0 | 5 | 11 | 27 | 149 | 1001 | 56 | 2785 | 0.4205 | 0.483686 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 13 | 5 | 0 | 965 | 0 | 0 | 97 | 11 | 334 | 0 | 1425 | 0.6772 | 0.342643 |
| Egg | 0 | 5 | 0 | 12 | 0 | 19 | 1 | 1304 | 0 | 24 | 1 | 354 | 0 | 1720 | 0.7581 | 0.202446 |
| Fiber | 353 | 0 | 302 | 0 | 5 | 14 | 2 | 0 | 620 | 21 | 57 | 146 | 0 | 1520 | 0.4079 | 0.545455 |
| Gelatinous | 30 | 0 | 2 | 121 | 114 | 24 | 114 | 13 | 2 | 1659 | 149 | 781 | 1 | 3010 | 0.5512 | 0.357724 |
| Multiple | 361 | 0 | 29 | 133 | 328 | 150 | 58 | 17 | 77 | 150 | 646 | 1216 | 10 | 3175 | 0.2035 | 0.731839 |
| Nonbio | 344 | 12 | 174 | 657 | 1505 | 634 | 324 | 288 | 215 | 524 | 951 | 9637 | 125 | 15390 | 0.6262 | 0.380456 |
| Pteropoda | 46 | 0 | 26 | 4 | 150 | 65 | 0 | 5 | 4 | 4 | 12 | 359 | 410 | 1085 | 0.3779 | 0.341894 |
| Total | 3178 | 695 | 2165 | 4926 | 8431 | 2268 | 1468 | 1635 | 1364 | 2583 | 2409 | 15555 | 623 | 47300 | 0.6035 | 0.376107 |

图 50: SIFT+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, numWords 取 200

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|--------|-------------|
| Appendicularia | 1649 | 0 | 423 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 255 | 14 | 155 | 202 | 15 | 2725 | 0.6051 | 0.463565 |
| Bubble | 2 | 680 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 31 | 0 | 725 | 0.9379 | 0.022989 |
| Chaetognatha | 259 | 0 | 1228 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 212 | 0 | 6 | 34 | 6 | 1745 | 0.7037 | 0.435143 |
| CladoceraPenilia | 1 | 0 | 0 | 3850 | 186 | 40 | 0 | 0 | 0 | 20 | 104 | 424 | 0 | 4625 | 0.8324 | 0.227218 |
| Copepoda | 8 | 0 | 0 | 207 | 5890 | 128 | 0 | 0 | 1 | 8 | 180 | 935 | 13 | 7370 | 0.7992 | 0.297555 |
| Decapoda | 59 | 0 | 6 | 50 | 254 | 1265 | 0 | 3 | 9 | 22 | 157 | 929 | 31 | 2785 | 0.4542 | 0.447598 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 4 | 6 | 0 | 978 | 0 | 0 | 89 | 17 | 331 | 0 | 1425 | 0.6863 | 0.331511 |
| Egg | 1 | 10 | 0 | 14 | 0 | 17 | 0 | 1291 | 1 | 26 | 6 | 354 | 0 | 1720 | 0.7506 | 0.189579 |
| Fiber | 343 | 0 | 311 | 0 | 5 | 14 | 3 | 0 | 618 | 13 | 41 | 169 | 3 | 1520 | 0.4066 | 0.553145 |
| Gelatinous | 13 | 0 | 1 | 102 | 121 | 21 | 91 | 9 | 5 | 1665 | 119 | 862 | 1 | 3010 | 0.5532 | 0.343713 |
| Multiple | 352 | 1 | 24 | 160 | 326 | 143 | 34 | 11 | 52 | 123 | 625 | 1315 | 9 | 3175 | 0.1969 | 0.741201 |
| Nonbio | 332 | 5 | 148 | 592 | 1435 | 587 | 357 | 278 | 230 | 551 | 996 | 9765 | 114 | 15390 | 0.6345 | 0.377827 |
| Pteropoda | 55 | 0 | 33 | 0 | 162 | 62 | 0 | 1 | 0 | 2 | 5 | 344 | 421 | 1085 | 0.388 | 0.313214 |
| Total | 3074 | 696 | 2174 | 4982 | 8385 | 2290 | 1463 | 1593 | 1383 | 2537 | 2415 | 15695 | 613 | 47300 | 0.6114 | 0.364943 |

图 51: SIFT+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, numWords 取 300

当其它参数不变, numWords 设置为 600 时, 交叉验证的结果如图 52:

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision | |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|--------|-------------|----------|
| Appendicularia | 1766 | 0 | 302 | | 1 | 3 | 21 | 0 | 0 | 241 | 8 | 125 | 251 | 7 | 2725 | 0.6481 | 0.435602 |
| Bubble | 0 | 683 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 20 | 0 | 0 | 725 | 0.9421 | 0.020086 |
| Chaetognatha | 222 | 0 | 1270 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 201 | 0 | 10 | 33 | 8 | 1745 | 0.7278 | 0.387361 | |
| CladoceraPenilia | 1 | 0 | 0 | 3909 | 126 | 21 | 0 | 0 | 0 | 13 | 64 | 491 | 0 | 4625 | 0.8452 | 0.209185 | |
| Copepoda | 11 | 0 | 0 | 151 | 5872 | 105 | 0 | 0 | 0 | 7 | 171 | 1050 | 3 | 7370 | 0.7967 | 0.287292 | |
| Decapoda | 49 | 0 | 3 | 30 | 232 | 1204 | 0 | 1 | 6 | 22 | 138 | 1075 | 25 | 2785 | 0.4323 | 0.410959 | |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 10 | 4 | 2 | 971 | 0 | 0 | 91 | 4 | 343 | 0 | 1425 | 0.6814 | 0.27429 | |
| Egg | 1 | 5 | 0 | 10 | 0 | 24 | 1 | 1304 | 0 | 37 | 1 | 337 | 0 | 1720 | 0.7581 | 0.18855 | |
| Fiber | 342 | 0 | 284 | 0 | 9 | 12 | 0 | 1 | 605 | 14 | 59 | 190 | 4 | 1520 | 0.398 | 0.537108 | |
| Gelatinous | 25 | 0 | 2 | 112 | 140 | 12 | 77 | 19 | 3 | 1658 | 111 | 849 | 2 | 3010 | 0.5508 | 0.320213 | |
| Multiple | 349 | 3 | 27 | 153 | 319 | 127 | 38 | 5 | 51 | 114 | 623 | 1363 | 3 | 3175 | 0.1962 | 0.705993 | |
| Nonbio | 327 | 6 | 153 | 561 | 1387 | 478 | 251 | 277 | 190 | 473 | 793 | 10390 | 104 | 15390 | 0.6751 | 0.379813 | |
| Pteropoda | 36 | 0 | 32 | 1 | 147 | 34 | 0 | 0 | 10 | 2 | 6 | 361 | 456 | 1085 | 0.4203 | 0.254902 | |
| Total | 3129 | 697 | 2073 | 4943 | 8239 | 2044 | 1338 | 1607 | 1307 | 2439 | 2119 | 16753 | 612 | 47300 | 0.6209 | 0.339335 | |

图 52: SIFT+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, numWords 取 600

6.4 HOG+RandomForest

6.4.1 实验

这里的 HOG 特征¹⁴和随机森林分类器¹⁵代码都是 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 64×64 , 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 53。

| | 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 53: 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 64×64 , 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 54。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 55。

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

¹⁴<http://www.vlfeat.org>

¹⁵<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 | 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 54: HOG+RandomForest 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 | 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 55: HOG+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8

2, repetitions = 5) 所得到的混淆矩阵如图 56。

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

6.4.2 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。因此我们猜测随机森林适合处理相关度较小的特征。在 Bubble 和 Nonbio 类上分类准确率最高。

6.5 LBP+RandomForest

6.5.1 实验

这里的 LBP 特征¹⁶和随机森林分类器代码¹⁷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 64×64 , 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 57。

| | 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 | 13824 | 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 57: 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 64×64 , 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 58。

| | 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 58: 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 64×64 , 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 59。

¹⁶<http://www.vlfeat.org>

¹⁷<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 | 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 59: LBP+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 60。

| | 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 60: LBP+RandomForest 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4

6.5.2 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。

7. 实验与分析 (去噪后)

为了对比不同强度的去噪对分类结果的影响, 我们采用不同去噪方法进行实验。去噪实验可以根据去噪的强度不同, 分为不同的去噪等级 (从简单到复杂)。

7.1 实验一

去噪过程：1、将图像 imresize 为 256×256 ；2、二值化，去掉连通区域小于 10 的噪声。该去噪强度较低，是较为简单的去噪方法。

HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证所得的混淆矩阵如图 61。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision | |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|----------|
| Appendicularia | 1815 | 0 | 182 | 1 | 19 | 40 | 0 | 0 | 226 | 22 | 240 | 179 | 1 | 2725 | 0.660055 | 0.477247 | |
| Bubble | 1 | 674 | 0 | 1 | 17 | 5 | 0 | 0 | 5 | 0 | 2 | 20 | 0 | 725 | 0.929655 | 0.020349 | |
| Chaetognatha | 194 | 0 | 1383 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 152 | 0 | 7 | 4 | 1 | 1745 | 0.79255 | 0.312966 | |
| CladoceraPenilia | 4 | 0 | 0 | 2996 | 142 | 31 | 33 | 0 | 0 | 135 | 116 | 1168 | 0 | 4625 | 0.647784 | 0.389568 | |
| Copepoda | 44 | 0 | 3 | 200 | 5056 | 206 | 1 | 2 | 18 | 35 | 284 | 1457 | 64 | 7370 | 0.686024 | 0.363465 | |
| Decapoda | 151 | 0 | 10 | 63 | 416 | 1215 | 0 | 7 | 41 | 15 | 176 | 679 | 12 | 2785 | 0.436266 | 0.418938 | |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 48 | 0 | 0 | 0 | 1010 | 0 | 0 | 207 | 15 | 145 | 0 | 1425 | 0.708772 | 0.338139 |
| Egg | 3 | 5 | 0 | 21 | 2 | 7 | 0 | 1530 | 0 | 12 | 3 | 133 | 4 | 1720 | 0.889535 | 0.175647 | |
| Fiber | 364 | 0 | 261 | 1 | 8 | 12 | 0 | 8 | 617 | 12 | 93 | 141 | 3 | 1520 | 0.405921 | 0.570334 | |
| Gelatinous | 27 | 0 | 1 | 181 | 93 | 15 | 195 | 57 | 2 | 1508 | 137 | 794 | 0 | 3010 | 0.500997 | 0.481431 | |
| Multiple | 422 | 6 | 42 | 250 | 460 | 145 | 56 | 22 | 150 | 213 | 493 | 909 | 7 | 3175 | 0.155276 | 0.769734 | |
| Nonbio | 409 | 3 | 74 | 1146 | 1554 | 319 | 231 | 230 | 213 | 748 | 570 | 9681 | 212 | 15390 | 0.629045 | 0.375016 | |
| Pteropoda | 38 | 0 | 57 | 0 | 176 | 92 | 0 | 0 | 12 | 1 | 5 | 180 | 524 | 1085 | 0.482949 | 0.36715 | |
| Total | 3472 | 688 | 2013 | 4908 | 7943 | 2091 | 1526 | 1856 | 1436 | 2908 | 2141 | 15490 | 828 | 47300 | 0.610064 | 0.389229 | |

图 61: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证所得的混淆矩阵如图 62。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 2044 | 0 | 261 | 6 | 6 | 7 | 0 | 0 | 160 | 0 | 118 | 123 | 0 | 2725 | 0.750092 | 0.345291 |
| Bubble | 0 | 672 | 0 | 7 | 1 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 7 | 32 | 0 | 725 | 0.926897 | 0.027496 |
| Chaetognatha | 207 | 0 | 1439 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 75 | 0 | 20 | 3 | 0 | 1745 | 0.824642 | 0.283723 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 3242 | 123 | 6 | 15 | 1 | 0 | 49 | 22 | 1167 | 0 | 4625 | 0.700973 | 0.278112 |
| Copepoda | 27 | 0 | 6 | 90 | 5348 | 167 | 1 | 3 | 6 | 10 | 198 | 1457 | 57 | 7370 | 0.725645 | 0.339345 |
| Decapoda | 38 | 0 | 11 | 13 | 416 | 1530 | 0 | 8 | 1 | 16 | 243 | 496 | 13 | 2785 | 0.549372 | 0.306437 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 34 | 0 | 0 | 1087 | 0 | 0 | 78 | 9 | 217 | 0 | 1425 | 0.762807 | 0.220223 |
| Egg | 5 | 6 | 0 | 15 | 0 | 5 | 5 | 1492 | 0 | 35 | 6 | 151 | 0 | 1720 | 0.867442 | 0.134571 |
| Fiber | 157 | 0 | 151 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1022 | 0 | 38 | 147 | 0 | 1520 | 0.672368 | 0.371077 |
| Gelatinous | 3 | 0 | 0 | 146 | 31 | 10 | 110 | 36 | 0 | 1997 | 72 | 605 | 0 | 3010 | 0.663455 | 0.308757 |
| Multiple | 353 | 7 | 72 | 113 | 482 | 151 | 27 | 20 | 84 | 141 | 714 | 1006 | 5 | 3175 | 0.224882 | 0.615716 |
| Nonbio | 256 | 6 | 56 | 822 | 1479 | 193 | 149 | 157 | 271 | 561 | 391 | 10918 | 131 | 15390 | 0.709422 | 0.341416 |
| Pteropoda | 32 | 0 | 13 | 0 | 208 | 135 | 0 | 1 | 6 | 2 | 20 | 256 | 412 | 1085 | 0.379724 | 0.333333 |
| Total | 3122 | 691 | 2009 | 4491 | 8095 | 2206 | 1394 | 1724 | 1625 | 2889 | 1868 | 16578 | 618 | 47300 | 0.673671 | 0.300423 |

图 62: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

7.2 实验二

去噪过程：1、将图像 imresize 为 256×256 ；2、二值化，去掉连通区域小于 10 的噪声；3、然后进行闭-开-闭运算。该方法去噪强度中等。

HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证所得的混淆矩阵如图 63。

LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证所得的混淆矩阵如图 64。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1852 | 0 | 184 | 2 | 21 | 41 | 0 | 0 | 220 | 14 | 214 | 176 | 1 | 2723 | 0.679633 | 0.469645 |
| Bubble | 1 | 670 | 1 | 0 | 16 | 6 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 24 | 1 | 725 | 0.924138 | 0.020468 |
| Chaetognatha | 197 | 0 | 1373 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 154 | 0 | 11 | 9 | 1 | 1748 | 0.786819 | 0.306215 |
| CladoceraPenilia | 5 | 0 | 0 | 2981 | 138 | 30 | 24 | 3 | 1 | 142 | 103 | 1198 | 0 | 4625 | 0.644541 | 0.394721 |
| Copepoda | 37 | 0 | 2 | 199 | 5037 | 227 | 0 | 2 | 16 | 35 | 310 | 1455 | 50 | 7370 | 0.683446 | 0.352154 |
| Decapoda | 145 | 1 | 12 | 64 | 388 | 1193 | 0 | 12 | 43 | 22 | 203 | 693 | 9 | 2785 | 0.428366 | 0.435934 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 55 | 1 | 0 | 984 | 0 | 0 | 221 | 15 | 149 | 0 | 1425 | 0.690526 | 0.338265 |
| Egg | 3 | 6 | 0 | 14 | 6 | 9 | 3 | 1517 | 0 | 11 | 3 | 145 | 3 | 1720 | 0.881977 | 0.168311 |
| Fiber | 371 | 0 | 252 | 6 | 9 | 12 | 0 | 7 | 616 | 15 | 95 | 136 | 1 | 1520 | 0.405263 | 0.555876 |
| Gelatinous | 34 | 0 | 2 | 162 | 88 | 18 | 187 | 50 | 4 | 1538 | 157 | 770 | 0 | 3010 | 0.510963 | 0.478113 |
| Multiple | 392 | 1 | 37 | 260 | 423 | 165 | 59 | 20 | 141 | 191 | 510 | 966 | 10 | 3175 | 0.16063 | 0.773836 |
| Nonbio | 415 | 6 | 63 | 1182 | 1490 | 330 | 230 | 213 | 176 | 755 | 617 | 9708 | 205 | 15390 | 0.630799 | 0.378051 |
| Pteropoda | 40 | 0 | 53 | 0 | 158 | 84 | 0 | 0 | 14 | 3 | 13 | 180 | 540 | 1085 | 0.497696 | 0.342266 |
| Total | 3492 | 684 | 1979 | 4925 | 7775 | 2115 | 1487 | 1824 | 1387 | 2947 | 2255 | 15609 | 821 | 47300 | 0.6096 | 0.385681 |

图 63: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 2089 | 0 | 234 | 3 | 1 | 11 | 0 | 0 | 160 | 1 | 124 | 102 | 0 | 2725 | 0.766606 | 0.332801 |
| Bubble | 1 | 669 | 0 | 13 | 3 | 3 | 0 | 7 | 0 | 0 | 10 | 19 | 0 | 725 | 0.922759 | 0.014728 |
| Chaetognatha | 199 | 0 | 1414 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 99 | 0 | 28 | 3 | 0 | 1748 | 0.810315 | 0.274127 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 3295 | 99 | 5 | 16 | 1 | 0 | 47 | 35 | 1127 | 0 | 4625 | 0.712432 | 0.282604 |
| Copepoda | 29 | 0 | 3 | 98 | 5278 | 140 | 3 | 1 | 7 | 11 | 224 | 1519 | 57 | 7370 | 0.716147 | 0.336518 |
| Decapoda | 49 | 0 | 9 | 15 | 384 | 1462 | 0 | 6 | 0 | 18 | 239 | 589 | 14 | 2785 | 0.524955 | 0.339955 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 38 | 0 | 0 | 1090 | 0 | 0 | 93 | 9 | 195 | 0 | 1425 | 0.764912 | 0.206118 |
| Egg | 5 | 5 | 0 | 8 | 1 | 7 | 4 | 1513 | 0 | 23 | 8 | 146 | 0 | 1720 | 0.879651 | 0.138873 |
| Fiber | 143 | 0 | 129 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1047 | 0 | 42 | 152 | 0 | 1520 | 0.688816 | 0.388792 |
| Gelatinous | 2 | 0 | 0 | 148 | 33 | 10 | 90 | 35 | 0 | 1976 | 85 | 631 | 0 | 3010 | 0.656478 | 0.306423 |
| Multiple | 340 | 1 | 81 | 112 | 450 | 196 | 29 | 20 | 116 | 151 | 683 | 990 | 6 | 3175 | 0.215118 | 0.646663 |
| Nonbio | 248 | 4 | 63 | 861 | 1506 | 207 | 141 | 173 | 283 | 527 | 422 | 10806 | 149 | 15390 | 0.702144 | 0.345051 |
| Pteropoda | 26 | 0 | 15 | 0 | 198 | 170 | 0 | 0 | 1 | 2 | 24 | 220 | 429 | 1085 | 0.395392 | 0.345038 |
| Total | 3131 | 679 | 1948 | 4593 | 7955 | 2215 | 1373 | 1757 | 1713 | 2849 | 1933 | 16499 | 655 | 47300 | 0.673517 | 0.304438 |

图 64: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

7.3 实验三

去噪过程: 1、将图像 imresize 为 256×256 ; 2、二值化, 去掉连通区域小于 10 的噪声; 3、然后进行闭-开-闭运算; 4、取最大连通区域。该方法去噪强度较强, 去噪过程相对于实验一、二较为复杂。

HOG 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证所得的混淆矩阵如图 65。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1806 | 0 | 223 | 0 | 20 | 59 | 0 | 0 | 242 | 47 | 145 | 177 | 6 | 2725 | 0.662752 | 0.467728 |
| Bubble | 0 | 668 | 2 | 3 | 12 | 6 | 0 | 3 | 0 | 1 | 4 | 24 | 2 | 725 | 0.921379 | 0.041607 |
| Chaetognatha | 211 | 1 | 1362 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 144 | 0 | 5 | 12 | 8 | 1748 | 0.780516 | 0.326076 |
| CladoceraPenilia | 1 | 0 | 0 | 2718 | 117 | 59 | 23 | 0 | 0 | 133 | 152 | 1422 | 0 | 4625 | 0.587676 | 0.473358 |
| Copepoda | 36 | 2 | 0 | 162 | 4962 | 235 | 0 | 2 | 9 | 71 | 316 | 1538 | 37 | 7370 | 0.67327 | 0.365798 |
| Decapoda | 101 | 0 | 2 | 95 | 423 | 1042 | 0 | 9 | 33 | 52 | 208 | 815 | 5 | 2785 | 0.374147 | 0.517593 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 114 | 4 | 0 | 1011 | 0 | 0 | 112 | 17 | 167 | 0 | 1425 | 0.709474 | 0.356461 |
| Egg | 0 | 5 | 0 | 6 | 3 | 12 | 9 | 1508 | 0 | 23 | 3 | 146 | 5 | 1720 | 0.876744 | 0.165929 |
| Fiber | 398 | 1 | 255 | 9 | 22 | 25 | 0 | 4 | 572 | 30 | 93 | 100 | 11 | 1520 | 0.376316 | 0.576923 |
| Gelatinous | 31 | 0 | 0 | 163 | 143 | 27 | 83 | 37 | 14 | 1459 | 211 | 842 | 0 | 3010 | 0.484718 | 0.48427 |
| Multiple | 326 | 8 | 25 | 267 | 417 | 197 | 35 | 16 | 142 | 249 | 443 | 1039 | 11 | 3175 | 0.139628 | 0.808639 |
| Nonbio | 421 | 12 | 94 | 1624 | 1551 | 416 | 410 | 229 | 189 | 651 | 704 | 8916 | 173 | 15390 | 0.579337 | 0.419947 |
| Pteropoda | 62 | 0 | 58 | 0 | 150 | 80 | 0 | 0 | 7 | 1 | 14 | 173 | 540 | 1085 | 0.497696 | 0.323308 |
| Total | 3393 | 697 | 2021 | 5161 | 7824 | 2160 | 1571 | 1808 | 1352 | 2829 | 2315 | 15371 | 798 | 47300 | 0.589504 | 0.409818 |

图 65: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证所得的混淆矩阵如图 66。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | Cladocera | Penilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|----------------|----------------|--------|--------------|-----------|---------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|----------|----------|-------------|
| Appendicularia | 2082 | 0 | 205 | 4 | 4 | 14 | 0 | 0 | 167 | 3 | 113 | 133 | 0 | 2725 | 0.764037 | 0.355418 | |
| Bubble | 0 | 673 | 0 | 10 | 3 | 0 | 0 | 8 | 1 | 1 | 9 | 20 | 0 | 725 | 0.928276 | 0.024638 | |
| Chaetognatha | 200 | 0 | 1394 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 118 | 0 | 25 | 6 | 0 | 1748 | 0.798854 | 0.269392 | |
| Cladocera | 0 | 0 | 0 | 3223 | 99 | 5 | 14 | 3 | 0 | 55 | 16 | 1210 | 0 | 4625 | 0.696865 | 0.274099 | |
| Copepoda | 32 | 0 | 9 | 74 | 5387 | 144 | 0 | 2 | 4 | 6 | 201 | 1460 | 51 | 7370 | 0.730936 | 0.32612 | |
| Decapoda | 51 | 0 | 9 | 13 | 389 | 1426 | 0 | 10 | 0 | 12 | 260 | 606 | 9 | 2785 | 0.512029 | 0.332084 | |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 37 | 1 | 0 | 1101 | 0 | 0 | 69 | 7 | 210 | 0 | 1425 | 0.772632 | 0.176515 | |
| Egg | 5 | 5 | 0 | 11 | 1 | 8 | 0 | 1500 | 1 | 32 | 5 | 152 | 0 | 1720 | 0.872093 | 0.143347 | |
| Fiber | 159 | 0 | 139 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1042 | 0 | 34 | 142 | 0 | 1520 | 0.685526 | 0.399424 | |
| Gelatinous | 23 | 0 | 0 | 161 | 34 | 4 | 69 | 46 | 0 | 1969 | 86 | 628 | 0 | 3010 | 0.650831 | 0.313595 | |
| Multiple | 387 | 8 | 70 | 93 | 435 | 169 | 28 | 18 | 118 | 153 | 651 | 1042 | 3 | 3175 | 0.205039 | 0.649246 | |
| Nonbio | 256 | 4 | 66 | 813 | 1430 | 215 | 125 | 164 | 282 | 562 | 434 | 10923 | 116 | 15390 | 0.709747 | 0.34827 | |
| Pteropoda | 35 | 0 | 16 | 1 | 209 | 146 | 0 | 0 | 2 | 2 | 15 | 228 | 431 | 1085 | 0.397235 | 0.293443 | |
| Total | 3230 | 690 | 1908 | 4440 | 7994 | 2135 | 1337 | 1751 | 1735 | 2854 | 1856 | 16760 | 610 | 47300 | 0.671086 | 0.30043 | |

图 66: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

7.4 实验四

去噪声过程: 1、将图像二值化, 阈值设为 10; 2、去掉得到二值图中小于 10 个像素的连通区域; 3、然后进行闭-开-闭运算; 4、保留二值图中最大的连通区域。该方法在所有去噪实验中, 去噪强度最强。

7.4.1 实验结果

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 67。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | Cladocera | Penilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|----------------|----------------|--------|--------------|-----------|---------|----------|----------|-----------|-----|-------|------------|----------|--------|-----------|----------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1764 | 0 | 348 | 0 | 20 | 3 | 7 | 0 | 127 | 89 | 12 | 355 | 0 | 2725 | 0.647339 | 0.596339 | |
| Bubble | 0 | 649 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 59 | 0 | 725 | 0.895172 | 0.004601 | |
| Chaetognatha | 391 | 0 | 1272 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73 | 3 | 0 | 6 | 0 | 1748 | 0.72894 | 0.465097 |
| Cladocera | 0 | 0 | 0 | 68 | 185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 4367 | 0 | 4625 | 0.014703 | 0.730159 |
| Copepoda | 36 | 0 | 1 | 36 | 5256 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 15 | 2000 | 7 | 7370 | 0.713161 | 0.404487 |
| Decapoda | 193 | 0 | 3 | 40 | 941 | 53 | 0 | 0 | 4 | 20 | 18 | 1513 | 0 | 2785 | 0.019031 | 0.430108 | |
| Doliolida | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 337 | 0 | 0 | 41 | 0 | 1046 | 0 | 1425 | 0.236491 | 0.401421 |
| Egg | 0 | 3 | 0 | 2 | 4 | 0 | 1 | 1376 | 0 | 26 | 0 | 308 | 0 | 1720 | 0.8 | 0.114543 | |
| Fiber | 708 | 0 | 263 | 0 | 4 | 0 | 13 | 0 | 273 | 23 | 27 | 209 | 0 | 1520 | 0.179605 | 0.573438 | |
| Gelatinous | 202 | 0 | 2 | 0 | 110 | 6 | 70 | 7 | 4 | 453 | 10 | 2146 | 0 | 3010 | 0.150498 | 0.452899 | |
| Multiple | 464 | 0 | 31 | 31 | 258 | 10 | 45 | 0 | 49 | 81 | 33 | 2173 | 0 | 3175 | 0.010394 | 0.789809 | |
| Nonbio | 580 | 0 | 221 | 74 | 1436 | 10 | 90 | 154 | 106 | 80 | 39 | 12562 | 38 | 15390 | 0.816244 | 0.531339 | |
| Pteropoda | 31 | 0 | 237 | 1 | 612 | 2 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 60 | 138 | 1085 | 0.127189 | 0.245902 | |
| Total | 4370 | 652 | 2378 | 252 | 8826 | 93 | 563 | 1554 | 640 | 828 | 157 | 26804 | 183 | 47300 | 0.410674 | 0.441549 | |

图 67: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 32 (去噪后)

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 68。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 69。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 70。

将所有图像 resize 为 256×256 , HOG 特征的参数 cellSize 取 128 时对分类结果进行交叉验证

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1821 | 0 | 275 | 0 | 14 | 20 | 0 | 0 | 191 | 96 | 72 | 235 | 1 | 2725 | 0.668257 | 0.488196 |
| Bubble | 0 | 670 | 0 | 11 | 1 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 | 1 | 34 | 0 | 725 | 0.924138 | 0.005935 |
| Chaetognatha | 274 | 0 | 1327 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 129 | 3 | 0 | 12 | 0 | 1745 | 0.760458 | 0.366285 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2506 | 82 | 26 | 13 | 0 | 0 | 78 | 24 | 1896 | 0 | 4625 | 0.541838 | 0.308499 |
| Copepoda | 28 | 0 | 0 | 71 | 5137 | 133 | 0 | 7 | 9 | 54 | 67 | 1843 | 21 | 7370 | 0.697015 | 0.334499 |
| Decapoda | 121 | 0 | 1 | 92 | 452 | 817 | 1 | 13 | 10 | 68 | 51 | 1158 | 1 | 2785 | 0.293357 | 0.421798 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 60 | 0 | 0 | 971 | 0 | 0 | 72 | 9 | 313 | 0 | 1425 | 0.681404 | 0.307912 |
| Egg | 2 | 1 | 0 | 8 | 1 | 6 | 1 | 1478 | 1 | 32 | 1 | 185 | 4 | 1720 | 0.859302 | 0.138695 |
| Fiber | 388 | 1 | 265 | 1 | 8 | 16 | 4 | 4 | 570 | 29 | 37 | 188 | 9 | 1520 | 0.375 | 0.523411 |
| Gelatinous | 67 | 2 | 0 | 113 | 149 | 10 | 105 | 47 | 17 | 1343 | 74 | 1083 | 0 | 3010 | 0.446179 | 0.406278 |
| Multiple | 388 | 0 | 24 | 195 | 300 | 108 | 63 | 12 | 112 | 174 | 171 | 1628 | 0 | 3175 | 0.053858 | 0.760839 |
| Nonbio | 418 | 0 | 118 | 567 | 1295 | 204 | 245 | 149 | 146 | 313 | 208 | 11595 | 132 | 15390 | 0.753411 | 0.429071 |
| Pteropoda | 51 | 0 | 84 | 0 | 280 | 71 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 139 | 449 | 1085 | 0.413825 | 0.272285 |
| Total | 3558 | 674 | 2094 | 3624 | 7719 | 1413 | 1403 | 1716 | 1196 | 2262 | 715 | 20309 | 617 | 47300 | 0.574465 | 0.366439 |

图 68: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 16 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1839 | 0 | 218 | 0 | 21 | 43 | 0 | 0 | 224 | 48 | 146 | 174 | 12 | 2728 | 0.674862 | 0.453004 |
| Bubble | 0 | 664 | 0 | 5 | 18 | 7 | 0 | 3 | 0 | 0 | 2 | 26 | 0 | 725 | 0.915862 | 0.022091 |
| Chaetognatha | 214 | 0 | 1360 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 145 | 0 | 7 | 13 | 5 | 1745 | 0.77937 | 0.331038 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2633 | 131 | 55 | 31 | 0 | 0 | 142 | 148 | 1485 | 0 | 4625 | 0.569297 | 0.474241 |
| Copepoda | 38 | 1 | 1 | 154 | 4974 | 264 | 0 | 5 | 15 | 80 | 296 | 1492 | 50 | 7370 | 0.674998 | 0.360175 |
| Decapoda | 107 | 2 | 1 | 90 | 427 | 1070 | 0 | 14 | 38 | 49 | 196 | 787 | 4 | 2785 | 0.384201 | 0.509849 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 110 | 3 | 0 | 1038 | 0 | 0 | 104 | 17 | 153 | 0 | 1425 | 0.728421 | 0.334189 |
| Egg | 5 | 5 | 0 | 7 | 2 | 7 | 7 | 1480 | 0 | 27 | 5 | 172 | 3 | 1720 | 0.860465 | 0.18232 |
| Fiber | 317 | 0 | 267 | 11 | 17 | 15 | 0 | 5 | 645 | 27 | 64 | 137 | 15 | 1520 | 0.424342 | 0.546732 |
| Gelatinous | 30 | 1 | 0 | 175 | 127 | 40 | 86 | 41 | 15 | 1499 | 251 | 743 | 2 | 3010 | 0.498007 | 0.47624 |
| Multiple | 341 | 3 | 35 | 294 | 396 | 183 | 46 | 19 | 140 | 251 | 458 | 1006 | 3 | 3175 | 0.144252 | 0.800523 |
| Nonbio | 401 | 3 | 92 | 1529 | 1489 | 417 | 351 | 243 | 187 | 632 | 692 | 9212 | 142 | 15390 | 0.598571 | 0.408919 |
| Pteropoda | 70 | 0 | 59 | 0 | 169 | 81 | 0 | 0 | 14 | 3 | 14 | 185 | 490 | 1085 | 0.451613 | 0.325069 |
| Total | 3362 | 679 | 2033 | 5008 | 7774 | 2183 | 1559 | 1810 | 1423 | 2862 | 2296 | 15585 | 726 | 47300 | 0.592628 | 0.401876 |

图 69: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1775 | 0 | 242 | 1 | 27 | 60 | 0 | 0 | 269 | 11 | 155 | 176 | 9 | 2725 | 0.651376 | 0.48311 |
| Bubble | 1 | 661 | 0 | 2 | 14 | 8 | 0 | 4 | 0 | 0 | 6 | 29 | 0 | 725 | 0.911724 | 0.013433 |
| Chaetognatha | 202 | 0 | 1346 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 175 | 0 | 5 | 11 | 2 | 1745 | 0.771347 | 0.354746 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2373 | 198 | 45 | 35 | 0 | 0 | 106 | 100 | 1768 | 0 | 4625 | 0.513081 | 0.557689 |
| Copepoda | 43 | 0 | 0 | 205 | 4707 | 256 | 0 | 1 | 10 | 82 | 297 | 1745 | 24 | 7370 | 0.63867 | 0.38567 |
| Decapoda | 169 | 0 | 2 | 112 | 361 | 938 | 0 | 6 | 40 | 45 | 235 | 862 | 15 | 2785 | 0.336804 | 0.553768 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 185 | 4 | 0 | 900 | 0 | 0 | 129 | 10 | 197 | 0 | 1425 | 0.631579 | 0.359886 |
| Egg | 4 | 7 | 0 | 6 | 1 | 16 | 7 | 1445 | 0 | 28 | 5 | 197 | 4 | 1720 | 0.840116 | 0.155958 |
| Fiber | 336 | 2 | 309 | 5 | 11 | 21 | 0 | 2 | 579 | 16 | 75 | 152 | 12 | 1520 | 0.380921 | 0.588486 |
| Gelatinous | 17 | 0 | 0 | 177 | 237 | 31 | 117 | 33 | 7 | 1401 | 193 | 794 | 3 | 3010 | 0.465449 | 0.475477 |
| Multiple | 366 | 0 | 42 | 275 | 422 | 217 | 28 | 11 | 114 | 190 | 466 | 1036 | 8 | 3175 | 0.146772 | 0.796329 |
| Nonbio | 403 | 0 | 85 | 2021 | 1522 | 401 | 319 | 210 | 192 | 662 | 716 | 8772 | 87 | 15390 | 0.569981 | 0.451029 |
| Pteropoda | 118 | 0 | 60 | 3 | 158 | 105 | 0 | 0 | 21 | 1 | 25 | 240 | 354 | 1085 | 0.326267 | 0.316602 |
| Total | 3434 | 670 | 2086 | 5365 | 7662 | 2102 | 1406 | 1712 | 1407 | 2671 | 2288 | 15979 | 518 | 47300 | 0.552622 | 0.422475 |

图 70: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4 (去噪后)

(folds=2, repetitions=5) 所得到的混淆矩阵如图 71。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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 72。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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 73。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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 74。

将所有图像 resize 为 64×64 , LBP 特征的参数 cellSize 取 32 时对分类结果进行交叉验证 (folds=2,

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision | |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|----------|
| Appendicularia | 1606 | 0 | 249 | 1 | 18 | 3 | 7 | 0 | 133 | 46 | 32 | 630 | 0 | 2725 | 0.589358 | 0.583506 | |
| Bubble | 0 | 652 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 53 | 0 | 725 | 0.89931 | 0.006098 | |
| Chaetognatha | 318 | 0 | 1349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 59 | 5 | 0 | 14 | 0 | 1745 | 0.773066 | 0.432717 | |
| CladoceraPenilia | 1 | 0 | 0 | 39 | 166 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 4415 | 0 | 4625 | 0.008432 | 0.723404 | |
| Copepoda | 23 | 0 | 2 | 17 | 5212 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 2082 | 9 | 7370 | 0.70191 | 0.402499 | |
| Decapoda | 259 | 0 | 28 | 36 | 1023 | 133 | 0 | 3 | 12 | 1 | 20 | 1270 | 0 | 2785 | 0.047756 | 0.256983 | |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 168 | 0 | 0 | 41 | 1 | 1215 | 0 | 1425 | 0.117895 | 0.393502 |
| Egg | 0 | 3 | 0 | 1 | 6 | 0 | 0 | 1444 | 0 | 16 | 0 | 250 | 0 | 1720 | 0.839635 | 0.13169 | |
| Fiber | 636 | 1 | 254 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 426 | 18 | 9 | 269 | 0 | 1520 | 0.280263 | 0.460076 | |
| Gelatinous | 107 | 0 | 5 | 0 | 25 | 8 | 47 | 28 | 0 | 210 | 7 | 2573 | 0 | 3010 | 0.069767 | 0.519451 | |
| Multiple | 562 | 0 | 33 | 7 | 277 | 14 | 26 | 0 | 23 | 54 | 50 | 2129 | 0 | 3175 | 0.015748 | 0.704142 | |
| Nonbio | 435 | 0 | 222 | 40 | 1331 | 13 | 27 | 168 | 119 | 44 | 28 | 12845 | 118 | 15390 | 0.834633 | 0.537983 | |
| Pteropoda | 9 | 0 | 236 | 0 | 660 | 3 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 57 | 103 | 1085 | 0.094931 | 0.552174 | |
| Total | 3856 | 656 | 2378 | 141 | 8723 | 179 | 277 | 1663 | 789 | 437 | 169 | 27802 | 230 | 47300 | 0.405991 | 0.438786 | |

图 71: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 128 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1778 | 0 | 239 | 4 | 13 | 34 | 0 | 0 | 158 | 41 | 111 | 347 | 0 | 2728 | 0.652477 | 0.511941 |
| Bubble | 0 | 669 | 0 | 9 | 12 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 1 | 24 | 0 | 725 | 0.922759 | 0.004464 |
| Chaetognatha | 293 | 0 | 1376 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 62 | 0 | 5 | 5 | 2 | 1745 | 0.788539 | 0.331065 |
| CladoceraPenilia | 4 | 0 | 0 | 2514 | 125 | 11 | 14 | 0 | 0 | 75 | 36 | 1846 | 0 | 4625 | 0.543568 | 0.268974 |
| Copepoda | 35 | 0 | 2 | 99 | 5117 | 91 | 0 | 2 | 12 | 21 | 107 | 1834 | 50 | 7370 | 0.694301 | 0.345485 |
| Decapoda | 174 | 0 | 8 | 51 | 450 | 1124 | 0 | 13 | 4 | 25 | 73 | 862 | 1 | 2785 | 0.403591 | 0.311696 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 21 | 1 | 0 | 839 | 0 | 0 | 160 | 17 | 387 | 0 | 1425 | 0.588772 | 0.381724 |
| Egg | 4 | 3 | 0 | 6 | 2 | 4 | 0 | 1491 | 1 | 25 | 0 | 180 | 4 | 1720 | 0.86686 | 0.139145 |
| Fiber | 389 | 0 | 231 | 0 | 13 | 7 | 0 | 2 | 586 | 14 | 47 | 229 | 2 | 1520 | 0.385526 | 0.446125 |
| Gelatinous | 58 | 0 | 3 | 108 | 67 | 6 | 211 | 56 | 1 | 1347 | 65 | 1088 | 0 | 3010 | 0.447508 | 0.400801 |
| Multiple | 472 | 0 | 33 | 141 | 366 | 96 | 73 | 11 | 51 | 187 | 309 | 1434 | 2 | 3175 | 0.097323 | 0.684372 |
| Nonbio | 406 | 0 | 79 | 486 | 1373 | 176 | 220 | 153 | 166 | 353 | 208 | 11583 | 187 | 15390 | 0.752632 | 0.419806 |
| Pteropoda | 30 | 0 | 86 | 0 | 279 | 79 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 145 | 462 | 1085 | 0.41659 | 0.354286 |
| Total | 3643 | 672 | 2057 | 3439 | 7818 | 1633 | 1357 | 1732 | 1058 | 2248 | 979 | 19964 | 700 | 47300 | 0.581573 | 0.353837 |

图 72: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 64 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1762 | 0 | 224 | 4 | 22 | 38 | 0 | 0 | 193 | 27 | 229 | 223 | 3 | 2725 | 0.646606 | 0.500284 |
| Bubble | 0 | 673 | 0 | 2 | 15 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 5 | 24 | 0 | 725 | 0.928276 | 0.021802 |
| Chaetognatha | 225 | 0 | 1380 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 122 | 0 | 9 | 7 | 1 | 1745 | 0.790831 | 0.315816 |
| CladoceraPenilia | 2 | 0 | 0 | 2743 | 151 | 28 | 22 | 2 | 0 | 153 | 114 | 1410 | 0 | 4625 | 0.593081 | 0.406149 |
| Copepoda | 48 | 0 | 4 | 171 | 5048 | 201 | 1 | 5 | 13 | 35 | 279 | 1505 | 60 | 7370 | 0.684939 | 0.363671 |
| Decapoda | 187 | 0 | 8 | 66 | 398 | 1218 | 0 | 18 | 19 | 18 | 204 | 632 | 17 | 2785 | 0.437343 | 0.401863 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 65 | 1 | 0 | 983 | 0 | 0 | 193 | 16 | 167 | 0 | 1425 | 0.689825 | 0.359192 |
| Egg | 4 | 7 | 0 | 9 | 3 | 13 | 4 | 1489 | 1 | 16 | 0 | 169 | 5 | 1720 | 0.865698 | 0.182317 |
| Fiber | 354 | 0 | 246 | 2 | 8 | 6 | 0 | 4 | 646 | 17 | 67 | 167 | 3 | 1520 | 0.425 | 0.510606 |
| Gelatinous | 43 | 0 | 1 | 161 | 75 | 13 | 204 | 65 | 1 | 1493 | 122 | 832 | 0 | 3010 | 0.496013 | 0.489921 |
| Multiple | 440 | 3 | 41 | 240 | 448 | 138 | 47 | 18 | 103 | 223 | 531 | 938 | 5 | 3175 | 0.167244 | 0.753482 |
| Nonbio | 418 | 5 | 58 | 1156 | 1564 | 304 | 273 | 220 | 203 | 749 | 563 | 9646 | 231 | 15390 | 0.626771 | 0.39234 |
| Pteropoda | 43 | 0 | 55 | 0 | 200 | 97 | 0 | 0 | 14 | 3 | 15 | 154 | 504 | 1085 | 0.464516 | 0.392039 |
| Total | 3526 | 688 | 2017 | 4619 | 7933 | 2058 | 1534 | 1821 | 1320 | 2927 | 2154 | 15874 | 829 | 47300 | 0.601242 | 0.391983 |

图 73: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

repetitions=5) 所得到的混淆矩阵如图 75。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 76。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 77。

将所有图像 resize 为 64×64 , 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 78。

将所有图像 resize 为 256×256 , LBP 特征的参数 cellSize 取 128 时对分类结果进行交叉验证

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1754 | 0 | 200 | 1 | 24 | 49 | 0 | 0 | 228 | 15 | 211 | 240 | 3 | 2725 | 0.64367 | 0.513183 |
| Bubble | 1 | 664 | 0 | 1 | 14 | 3 | 0 | 1 | 3 | 0 | 3 | 35 | 0 | 725 | 0.915862 | 0.024963 |
| Chaetognatha | 210 | 0 | 1353 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 150 | 0 | 11 | 17 | 3 | 1745 | 0.775358 | 0.329202 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2517 | 180 | 24 | 38 | 1 | 0 | 153 | 128 | 1583 | 1 | 4625 | 0.544216 | 0.50482 |
| Copepoda | 60 | 0 | 6 | 277 | 4790 | 193 | 0 | 0 | 6 | 32 | 331 | 1638 | 37 | 7370 | 0.649932 | 0.380417 |
| Decapoda | 226 | 0 | 17 | 94 | 356 | 1058 | 0 | 3 | 45 | 21 | 251 | 679 | 35 | 2785 | 0.379892 | 0.465926 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 133 | 6 | 0 | 830 | 0 | 0 | 263 | 15 | 178 | 0 | 1425 | 0.582456 | 0.374529 |
| Egg | 6 | 6 | 0 | 3 | 5 | 3 | 5 | 1470 | 0 | 22 | 7 | 190 | 3 | 1720 | 0.854651 | 0.165721 |
| Fiber | 366 | 2 | 284 | 2 | 18 | 16 | 0 | 3 | 589 | 6 | 94 | 136 | 4 | 1520 | 0.3875 | 0.570073 |
| Gelatinous | 26 | 0 | 0 | 180 | 107 | 25 | 187 | 46 | 0 | 1478 | 114 | 847 | 0 | 3010 | 0.49103 | 0.521992 |
| Multiple | 431 | 2 | 38 | 243 | 416 | 149 | 45 | 21 | 132 | 230 | 506 | 955 | 7 | 3175 | 0.15937 | 0.792112 |
| Nonbio | 455 | 7 | 63 | 1631 | 1630 | 391 | 222 | 217 | 194 | 871 | 745 | 8877 | 147 | 15390 | 0.576803 | 0.429902 |
| Pteropoda | 68 | 0 | 56 | 1 | 185 | 129 | 0 | 0 | 23 | 1 | 18 | 196 | 408 | 1085 | 0.376037 | 0.37037 |
| Total | 3603 | 681 | 2017 | 5083 | 7731 | 1981 | 1327 | 1762 | 1370 | 3092 | 2434 | 15571 | 648 | 47300 | 0.564368 | 0.418708 |

图 74: HOG+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 16 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision | |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|----------|
| Appendicularia | 1893 | 0 | 242 | 0 | 27 | 1 | 0 | 0 | 72 | 0 | 54 | 436 | 0 | 2725 | 0.694679 | 0.522573 | |
| Bubble | 1 | 661 | 0 | 0 | 31 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 725 | 0.911724 | 0.011958 | |
| Chaetognatha | 247 | 0 | 1372 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 112 | 4 | 6 | 4 | 0 | 1745 | 0.786246 | 0.296771 | |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 240 | 208 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 4168 | 0 | 4625 | 0.051892 | 0.259259 | |
| Copepoda | 23 | 0 | 0 | 25 | 3879 | 0 | 0 | 1 | 11 | 10 | 27 | 3394 | 0 | 7370 | 0.526323 | 0.515246 | |
| Decapoda | 202 | 0 | 0 | 7 | 1050 | 20 | 0 | 0 | 0 | 10 | 52 | 1444 | 0 | 2785 | 0.007181 | 0.285714 | |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 89 | 0 | 0 | 214 | 0 | 1122 | 0 | 1425 | 0.062456 | 0.345588 |
| Egg | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 0 | 0 | 1357 | 0 | 42 | 0 | 297 | 0 | 1720 | 0.788953 | 0.152405 | |
| Fiber | 391 | 0 | 264 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 596 | 10 | 36 | 233 | 0 | 1520 | 0.392105 | 0.39798 | |
| Gelatinous | 20 | 0 | 0 | 14 | 53 | 0 | 26 | 33 | 0 | 1160 | 13 | 1691 | 0 | 3010 | 0.385382 | 0.322285 | |
| Multiple | 457 | 3 | 16 | 17 | 615 | 3 | 5 | 13 | 69 | 87 | 85 | 1805 | 0 | 3175 | 0.026772 | 0.730159 | |
| Nonbio | 529 | 5 | 56 | 21 | 1561 | 1 | 16 | 189 | 130 | 167 | 42 | 12668 | 5 | 15390 | 0.823132 | 0.541014 | |
| Pteropoda | 202 | 0 | 11 | 0 | 554 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 309 | 1 | 1085 | 0.000922 | 0.833333 | |
| Total | 3965 | 669 | 1951 | 324 | 8002 | 28 | 136 | 1601 | 990 | 1713 | 315 | 27600 | 6 | 47300 | 0.419828 | 0.40114 | |

图 75: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 32 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 2037 | 0 | 203 | 0 | 8 | 21 | 0 | 0 | 81 | 0 | 119 | 256 | 0 | 2725 | 0.747523 | 0.438688 |
| Bubble | 1 | 674 | 0 | 2 | 16 | 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 | 21 | 0 | 725 | 0.929655 | 0.008824 |
| Chaetognatha | 218 | 0 | 1465 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45 | 0 | 14 | 3 | 0 | 1745 | 0.839542 | 0.239356 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2655 | 148 | 30 | 7 | 0 | 0 | 19 | 21 | 1745 | 0 | 4625 | 0.574054 | 0.27459 |
| Copepoda | 24 | 0 | 2 | 98 | 5193 | 89 | 0 | 2 | 11 | 9 | 226 | 1694 | 22 | 7370 | 0.704613 | 0.383693 |
| Decapoda | 145 | 0 | 0 | 38 | 504 | 1054 | 0 | 1 | 1 | 16 | 154 | 859 | 13 | 2785 | 0.378456 | 0.364957 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 34 | 0 | 0 | 0 | 1058 | 0 | 57 | 1 | 275 | 0 | 1425 | 0.742456 | 0.218034 |
| Egg | 3 | 1 | 0 | 13 | 8 | 9 | 4 | 1478 | 0 | 26 | 0 | 176 | 2 | 1720 | 0.859302 | 0.112845 |
| Fiber | 275 | 0 | 172 | 0 | 1 | 4 | 0 | 7 | 813 | 7 | 57 | 184 | 0 | 1520 | 0.534868 | 0.359843 |
| Gelatinous | 20 | 0 | 1 | 109 | 62 | 13 | 79 | 15 | 1 | 1907 | 43 | 760 | 0 | 3010 | 0.633555 | 0.223218 |
| Multiple | 387 | 0 | 10 | 131 | 591 | 149 | 37 | 18 | 127 | 114 | 542 | 1069 | 0 | 3175 | 0.170709 | 0.625173 |
| Nonbio | 414 | 5 | 58 | 579 | 1625 | 128 | 168 | 144 | 189 | 299 | 254 | 11481 | 76 | 15390 | 0.744055 | 0.389996 |
| Pteropoda | 105 | 0 | 15 | 1 | 270 | 132 | 0 | 0 | 2 | 0 | 11 | 279 | 270 | 1085 | 0.248848 | 0.295039 |
| Total | 3629 | 680 | 1926 | 3660 | 8426 | 1634 | 1353 | 1666 | 1270 | 2455 | 1446 | 18772 | 383 | 47300 | 0.623664 | 0.301866 |

图 76: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 16 (去噪后)

(folds=2, repetitions=5) 所得到的混淆矩阵如图 79。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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 80。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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 81。

将所有图像 resize 为 256×256 , 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 82。

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1864 | 0 | 199 | 2 | 19 | 31 | 0 | 0 | 188 | 1 | 202 | 214 | 5 | 2725 | 0.684037 | 0.427518 |
| Bubble | 0 | 668 | 0 | 2 | 14 | 10 | 0 | 3 | 0 | 1 | 4 | 22 | 1 | 725 | 0.921379 | 0.014749 |
| Chaetognatha | 211 | 0 | 1442 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 64 | 0 | 22 | 5 | 0 | 1745 | 0.826361 | 0.256318 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2893 | 151 | 45 | 13 | 0 | 0 | 65 | 87 | 1371 | 0 | 4625 | 0.625514 | 0.392865 |
| Copepoda | 22 | 0 | 3 | 204 | 4955 | 172 | 0 | 4 | 14 | 30 | 361 | 1571 | 34 | 7370 | 0.67232 | 0.385464 |
| Decapoda | 152 | 0 | 3 | 88 | 384 | 1277 | 0 | 6 | 6 | 18 | 315 | 517 | 19 | 2785 | 0.458528 | 0.421386 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 54 | 2 | 1 | 1120 | 0 | 0 | 71 | 9 | 168 | 0 | 1425 | 0.785965 | 0.216783 |
| Egg | 7 | 3 | 0 | 13 | 2 | 14 | 5 | 1459 | 1 | 30 | 3 | 180 | 3 | 1720 | 0.848256 | 0.152729 |
| Fiber | 217 | 0 | 175 | 1 | 8 | 9 | 0 | 5 | 873 | 9 | 75 | 148 | 0 | 1520 | 0.574342 | 0.416054 |
| Gelatinous | 16 | 0 | 0 | 108 | 95 | 41 | 73 | 14 | 2 | 1969 | 106 | 586 | 0 | 3010 | 0.654153 | 0.325685 |
| Multiple | 345 | 2 | 32 | 199 | 565 | 207 | 33 | 14 | 137 | 152 | 699 | 777 | 13 | 3175 | 0.220157 | 0.731464 |
| Nonbio | 349 | 5 | 64 | 1199 | 1677 | 279 | 186 | 217 | 209 | 573 | 696 | 9769 | 167 | 15390 | 0.634763 | 0.3733 |
| Pteropoda | 73 | 0 | 21 | 2 | 191 | 120 | 0 | 0 | 1 | 1 | 24 | 260 | 392 | 1085 | 0.36129 | 0.381703 |
| Total | 3256 | 678 | 1939 | 4765 | 8063 | 2207 | 1430 | 1722 | 1495 | 2920 | 2603 | 15588 | 634 | 47300 | 0.635928 | 0.345848 |

图 77: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 8 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1720 | 0 | 232 | 0 | 7 | 42 | 0 | 0 | 264 | 1 | 163 | 292 | 4 | 2725 | 0.631193 | 0.46149 |
| Bubble | 0 | 660 | 0 | 1 | 16 | 12 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | 30 | 0 | 725 | 0.910346 | 0.014925 |
| Chaetognatha | 194 | 0 | 1371 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 145 | 0 | 23 | 9 | 2 | 1745 | 0.785673 | 0.307576 |
| CladoceraPenilia | 2 | 0 | 0 | 2683 | 167 | 49 | 24 | 0 | 0 | 43 | 71 | 1586 | 0 | 4625 | 0.580108 | 0.399508 |
| Copepoda | 23 | 0 | 3 | 187 | 4979 | 151 | 0 | 2 | 13 | 19 | 289 | 1673 | 31 | 7370 | 0.675577 | 0.383787 |
| Decapoda | 151 | 0 | 6 | 121 | 399 | 1018 | 0 | 2 | 10 | 14 | 292 | 753 | 19 | 2785 | 0.365553 | 0.445836 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 72 | 9 | 0 | 945 | 0 | 0 | 105 | 10 | 284 | 0 | 1425 | 0.663158 | 0.217067 |
| Egg | 4 | 4 | 0 | 8 | 2 | 6 | 5 | 1408 | 0 | 35 | 2 | 242 | 4 | 1720 | 0.818605 | 0.126009 |
| Fiber | 266 | 0 | 226 | 0 | 7 | 3 | 0 | 5 | 771 | 12 | 70 | 160 | 0 | 1520 | 0.507237 | 0.495419 |
| Gelatinous | 20 | 0 | 0 | 108 | 89 | 22 | 70 | 30 | 2 | 1849 | 91 | 729 | 0 | 3010 | 0.614286 | 0.316198 |
| Multiple | 335 | 1 | 52 | 234 | 518 | 184 | 36 | 10 | 123 | 147 | 523 | 1004 | 8 | 3175 | 0.164724 | 0.744878 |
| Nonbio | 376 | 5 | 67 | 1054 | 1693 | 247 | 127 | 150 | 199 | 477 | 483 | 10417 | 95 | 15390 | 0.676863 | 0.403925 |
| Pteropoda | 103 | 0 | 23 | 0 | 194 | 102 | 0 | 0 | 1 | 2 | 31 | 297 | 332 | 1085 | 0.305991 | 0.329293 |
| Total | 3194 | 670 | 1980 | 4468 | 8080 | 1837 | 1207 | 1611 | 1528 | 2704 | 2050 | 17476 | 495 | 47300 | 0.592253 | 0.357378 |

图 78: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 64, cellSize 取 4 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1681 | 0 | 437 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 88 | 1 | 8 | 510 | 0 | 2725 | 0.616881 | 0.528339 |
| Bubble | 0 | 637 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 83 | 0 | 725 | 0.878621 | 0.015456 |
| Chaetognatha | 217 | 0 | 1489 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 2 | 7 | 0 | 1745 | 0.853295 | 0.412391 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 6 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4489 | 0 | 4625 | 0.001297 | 0.714286 |
| Copepoda | 40 | 0 | 12 | 1 | 2378 | 17 | 0 | 0 | 0 | 1 | 70 | 4851 | 0 | 7370 | 0.322659 | 0.460893 |
| Decapoda | 270 | 0 | 5 | 2 | 608 | 236 | 0 | 0 | 0 | 5 | 235 | 1424 | 0 | 2785 | 0.08474 | 0.353425 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 190 | 4 | 1231 | 0 | 1425 | 0 | 0 |
| Egg | 0 | 1 | 0 | 7 | 11 | 0 | 0 | 1267 | 0 | 28 | 0 | 406 | 0 | 1720 | 0.736628 | 0.163144 |
| Fiber | 243 | 4 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 562 | 0 | 1 | 323 | 0 | 1520 | 0.369737 | 0.356243 |
| Gelatinous | 69 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 30 | 0 | 601 | 77 | 2227 | 0 | 3010 | 0.199668 | 0.522637 |
| Multiple | 579 | 0 | 98 | 3 | 145 | 32 | 0 | 0 | 10 | 185 | 220 | 1903 | 0 | 3175 | 0.069291 | 0.683453 |
| Nonbio | 382 | 5 | 94 | 0 | 813 | 13 | 0 | 212 | 146 | 222 | 70 | 13433 | 0 | 15390 | 0.87284 | 0.572347 |
| Pteropoda | 83 | 0 | 12 | 0 | 326 | 63 | 0 | 0 | 37 | 26 | 8 | 524 | 6 | 1085 | 0.00553 | 0 |
| Total | 3564 | 647 | 2534 | 21 | 4411 | 365 | 0 | 1514 | 873 | 1259 | 695 | 31411 | 6 | 47300 | 0.385476 | 0.367893 |

图 79: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 128 (去噪后)

7.4.2 实验结果对比

去噪前后采用 HOG、LBP 特征进行分类的实验结果对比如图 83 和 84。实验结果显示，去噪之后的实验结果总体要比去噪之前的效果要好。其中交叉验证效果较好的情况和去噪之前的一样：imgSize 为 256 时，HOG 和 LBP 特征的参数 cellSize 都为 32；imgSize 为 64 时，HOG 和 LBP 特征的参数 cellSize 都为 8。HOG 和 LBP 最佳分类情况的特征维数为 $4 \times 4 \times 31 = 496$ 和 $8 \times 8 \times 8 \times 58 = 3712$ 。

Zooplankton Identification

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1946 | 0 | 308 | 0 | 5 | 7 | 0 | 0 | 170 | 0 | 58 | 231 | 0 | 2725 | 0.714128 | 0.419104 |
| Bubble | 0 | 676 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 36 | 0 | 725 | 0.932414 | 0.007342 |
| Chaetognatha | 194 | 0 | 1493 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 27 | 0 | 21 | 7 | 0 | 1745 | 0.855587 | 0.328385 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2050 | 253 | 0 | 7 | 0 | 0 | 15 | 0 | 2300 | 0 | 4625 | 0.443243 | 0.258321 |
| Copepoda | 33 | 0 | 14 | 39 | 5508 | 174 | 0 | 1 | 0 | 0 | 96 | 1503 | 2 | 7370 | 0.747354 | 0.388408 |
| Decapoda | 52 | 0 | 5 | 7 | 618 | 1229 | 0 | 5 | 0 | 9 | 227 | 632 | 1 | 2785 | 0.441293 | 0.344533 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 66 | 7 | 0 | 856 | 0 | 0 | 91 | 6 | 399 | 0 | 1425 | 0.600702 | 0.181644 |
| Egg | 7 | 3 | 0 | 11 | 8 | 1 | 0 | 1433 | 0 | 36 | 0 | 221 | 0 | 1720 | 0.83314 | 0.132041 |
| Fiber | 229 | 0 | 249 | 0 | 9 | 0 | 0 | 4 | 804 | 2 | 19 | 204 | 0 | 1520 | 0.528947 | 0.383908 |
| Gelatinous | 29 | 0 | 0 | 126 | 15 | 5 | 66 | 28 | 0 | 1526 | 72 | 1143 | 0 | 3010 | 0.506977 | 0.303196 |
| Multiple | 488 | 0 | 78 | 78 | 526 | 203 | 20 | 26 | 46 | 138 | 469 | 1103 | 0 | 3175 | 0.147717 | 0.581996 |
| Nonbio | 332 | 2 | 60 | 378 | 1727 | 99 | 97 | 151 | 232 | 372 | 149 | 11785 | 6 | 15390 | 0.765757 | 0.408977 |
| Pteropoda | 40 | 0 | 16 | 0 | 330 | 154 | 0 | 0 | 26 | 1 | 4 | 376 | 138 | 1085 | 0.121789 | 0.061224 |
| Total | 3350 | 681 | 2223 | 2764 | 9006 | 1875 | 1046 | 1651 | 1305 | 2190 | 1122 | 19940 | 147 | 47300 | 0.588034 | 0.292237 |

图 80: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 64 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 2021 | 0 | 191 | 6 | 4 | 11 | 0 | 0 | 170 | 6 | 124 | 192 | 0 | 2725 | 0.741651 | 0.384592 |
| Bubble | 0 | 669 | 0 | 13 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | 33 | 0 | 725 | 0.922759 | 0.017621 |
| Chaetognatha | 183 | 0 | 1472 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 61 | 0 | 24 | 3 | 0 | 1745 | 0.843553 | 0.269116 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2885 | 141 | 3 | 29 | 2 | 0 | 54 | 32 | 1478 | 1 | 4625 | 0.623784 | 0.32483 |
| Copepoda | 35 | 0 | 8 | 120 | 5409 | 183 | 0 | 4 | 1 | 4 | 247 | 1322 | 37 | 7370 | 0.733921 | 0.332469 |
| Decapoda | 49 | 0 | 13 | 13 | 480 | 1489 | 0 | 9 | 0 | 10 | 302 | 404 | 16 | 2785 | 0.53465 | 0.326854 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 54 | 4 | 0 | 1102 | 1 | 0 | 64 | 3 | 197 | 0 | 1425 | 0.773333 | 0.190301 |
| Egg | 6 | 4 | 0 | 11 | 0 | 9 | 4 | 1454 | 0 | 26 | 1 | 202 | 3 | 1720 | 0.845349 | 0.158078 |
| Fiber | 232 | 0 | 188 | 4 | 2 | 0 | 0 | 5 | 872 | 1 | 40 | 176 | 0 | 1520 | 0.573684 | 0.400275 |
| Gelatinous | 21 | 0 | 0 | 130 | 31 | 0 | 74 | 39 | 0 | 1859 | 86 | 769 | 1 | 3010 | 0.617608 | 0.317548 |
| Multiple | 395 | 2 | 79 | 134 | 491 | 212 | 27 | 15 | 66 | 150 | 679 | 921 | 4 | 3175 | 0.213858 | 0.662021 |
| Nonbio | 312 | 6 | 47 | 901 | 1342 | 178 | 125 | 193 | 278 | 544 | 447 | 10917 | 100 | 15390 | 0.709357 | 0.352798 |
| Pteropoda | 30 | 0 | 16 | 2 | 195 | 125 | 0 | 1 | 6 | 6 | 22 | 254 | 428 | 1085 | 0.39447 | 0.274576 |
| Total | 3284 | 681 | 2014 | 4273 | 8103 | 2212 | 1361 | 1727 | 1454 | 2724 | 2009 | 16868 | 590 | 47300 | 0.655998 | 0.308545 |

图 81: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 32 (去噪后)

| | Appendicularia | Bubble | Chaetognatha | CladoceraPenilia | Copepoda | Decapoda | Doliolida | Egg | Fiber | Gelatinous | Multiple | Nonbio | Pteropoda | Total | Recall | 1-Precision |
|------------------|----------------|--------|--------------|------------------|----------|----------|-----------|------|-------|------------|----------|--------|-----------|-------|----------|-------------|
| Appendicularia | 1810 | 0 | 222 | 9 | 8 | 10 | 1 | 0 | 191 | 6 | 209 | 259 | 0 | 2725 | 0.66422 | 0.422463 |
| Bubble | 0 | 666 | 0 | 10 | 6 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 3 | 35 | 0 | 725 | 0.918621 | 0.019146 |
| Chaetognatha | 219 | 0 | 1384 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | 0 | 38 | 8 | 1 | 1745 | 0.793123 | 0.305221 |
| CladoceraPenilia | 0 | 0 | 0 | 2726 | 182 | 16 | 24 | 1 | 0 | 77 | 69 | 1528 | 2 | 4625 | 0.589405 | 0.440821 |
| Copepoda | 40 | 0 | 5 | 281 | 5118 | 192 | 2 | 1 | 5 | 26 | 297 | 1368 | 35 | 7370 | 0.694437 | 0.351084 |
| Decapoda | 60 | 0 | 13 | 52 | 430 | 1287 | 0 | 7 | 3 | 41 | 366 | 503 | 23 | 2785 | 0.462118 | 0.389469 |
| Doliolida | 0 | 0 | 0 | 70 | 8 | 0 | 985 | 0 | 0 | 114 | 9 | 239 | 0 | 1425 | 0.691228 | 0.232866 |
| Egg | 7 | 5 | 0 | 10 | 0 | 9 | 9 | 1407 | 1 | 32 | 4 | 235 | 1 | 1720 | 0.818023 | 0.182927 |
| Fiber | 235 | 0 | 215 | 5 | 2 | 1 | 0 | 4 | 826 | 3 | 65 | 164 | 0 | 1520 | 0.543421 | 0.426389 |
| Gelatinous | 30 | 0 | 0 | 139 | 33 | 10 | 93 | 33 | 0 | 1805 | 93 | 774 | 0 | 3010 | 0.599668 | 0.382061 |
| Multiple | 367 | 1 | 87 | 187 | 424 | 205 | 33 | 18 | 70 | 181 | 682 | 911 | 9 | 3175 | 0.214803 | 0.722086 |
| Nonbio | 324 | 7 | 47 | 1386 | 1477 | 246 | 137 | 245 | 242 | 618 | 582 | 9962 | 117 | 15390 | 0.647303 | 0.386274 |
| Pteropoda | 42 | 0 | 19 | 0 | 199 | 132 | 0 | 1 | 7 | 18 | 37 | 246 | 384 | 1085 | 0.353917 | 0.328671 |
| Total | 3134 | 679 | 1992 | 4875 | 7887 | 2108 | 1284 | 1722 | 1440 | 2921 | 2454 | 16232 | 572 | 47300 | 0.614638 | 0.353037 |

图 82: LBP+SVM 交叉验证, folds 取 2, repetitions 取 5, imgSize 取 256, cellSize 取 16 (去噪后)

| HOG去噪前后分类结果 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------|-------------|----------|--------|-------------|----------|---------------|----------|----------|-------------|----------|---------------|----------|----------|-------------|----------|---------------|-----------|
| imgSize取64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 去噪之后 | | | | | | | | 去噪之前 | | | | | | | | 提高 | | |
| cellSize | Recall | 1-Precision | cellSize | Recall | 1-Precision | Recall提高 | 1-Precision降低 | cellSize | Recall | 1-Precision | Recall提高 | 1-Precision降低 | cellSize | Recall | 1-Precision | Recall提高 | 1-Precision降低 | |
| 32 | 0.410674 | 0.441549 | 32 | 0.407 | 0.445633 | 0.003674 | 0.004084 | 16 | 0.5681 | 0.374985 | 0.006365 | 0.008546 | 8 | 0.592628 | 0.401876 | 0.016028 | 0.018948 | |
| 16 | 0.574465 | 0.366439 | 16 | 0.5681 | 0.374985 | 0.006365 | 0.008546 | 4 | 0.552622 | 0.422475 | 0.047047 | 0.024722 | 0.024572 | 128 | 0.405991 | 0.438786 | 0.013991 | -0.001786 |
| 8 | 0.592628 | 0.401876 | 8 | 0.5766 | 0.420824 | 0.016028 | 0.018948 | 32 | 0.57 | 0.425 | 0.031242 | 0.033017 | 32 | 0.581573 | 0.353837 | 0.020573 | 0.022163 | |
| 4 | 0.552622 | 0.422475 | 4 | 0.5279 | 0.447047 | 0.024722 | 0.024572 | 16 | 0.526 | 0.457 | 0.038368 | 0.038292 | 16 | 0.564368 | 0.418708 | 0.038368 | 0.038292 | |

图 83: 图像去噪前后采用 HOG 特征进行分类的实验结果

| LBP去噪前后分类结果 | | | | | | | |
|-------------|----------|-------------|----------|--------|-------------|-----------|---------------|
| imgSize取64 | | | | | | | |
| 去噪之后 | | | | 去噪之前 | | 提高 | |
| cellSize | Recall | 1-Precision | cellSize | Recall | 1-Precision | Recall提高 | 1-Precision降低 |
| 32 | 0.419828 | 0.40114 | 32 | 0.3792 | 0.377758 | 0.040628 | -0.023382 |
| 16 | 0.623664 | 0.301866 | 16 | 0.5746 | 0.34868 | 0.049064 | 0.046814 |
| 8 | 0.635928 | 0.345848 | 8 | 0.5905 | 0.384185 | 0.046428 | 0.038337 |
| 4 | 0.592253 | 0.357378 | 4 | 0.5534 | 0.385398 | 0.038853 | 0.02802 |
| imgSize取256 | | | | | | | |
| 去噪之后 | | | | 去噪之前 | | 提高 | |
| cellSize | Recall | 1-Precision | cellSize | Recall | 1-Precision | Recall提高 | 1-Precision降低 |
| 128 | 0.385476 | 0.367893 | 128 | 0.388 | 0.338 | -0.002524 | -0.029893 |
| 64 | 0.588034 | 0.292237 | 64 | 0.574 | 0.307 | 0.014034 | 0.014763 |
| 32 | 0.655998 | 0.308545 | 32 | 0.64 | 0.328 | 0.015998 | 0.019455 |
| 16 | 0.614638 | 0.353037 | 16 | 0.592 | 0.375 | 0.022638 | 0.021963 |

图 84: 图像去噪前后采用 LBP 特征进行分类的实验结果

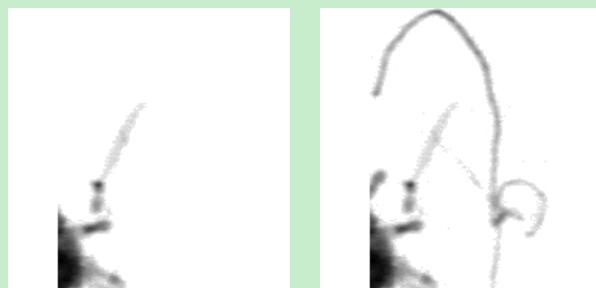
7.4.3 该去噪方法存在的问题

- 部分图像中物体边缘上存在着颜色较淡的噪声不能去除。(Pteropoda 类, 如图 85)



图 85: Pteropoda 类中经过去噪后的图像

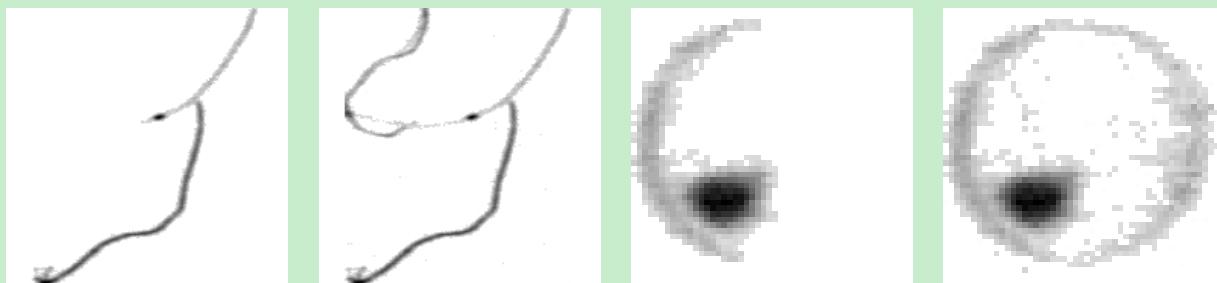
- 在取最大连通区域过程中, 物体面积可能会比噪声小, 导致目标物体被去除(在 Fiber 类中出现错较多, 如图 86)。由于开运算和图像质量的原因, 物体的发生断裂, 在取最大连通区域的过程中, 物体部分丢失。



(a) 去噪后的图像 (b) 去噪前的图像

图 86: Fiber 类中去噪前后的图像

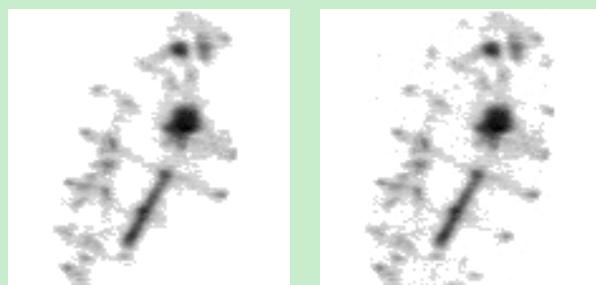
- 由于图像质量不佳, 并且有些物体连接处较细, 在进行开运算过程中物体会发生断裂。(在 Fiber、Egg 中出现较多, 如图 87)



(a) Fiber 类去噪后的图像 (b) Fiber 类去噪前的图像 (c) Egg 类去噪后的图像 (d) Egg 类去噪前的图像

图 87: Fiber 和 Egg 类中去噪前后的图像

4. Gelation 类浮游动物自身颜色较浅，原有的图像中其结构就不是特别完整，因此在去噪过程中很容易发生部分结构丢失，如图 88。



(a) 去噪后的图像 (b) 去噪前的图像

图 88: Doliolida 类中去噪前后的图像

7.5 去噪实验分析

- 由于浮游动物不同种类特征不同，在去噪的过程中也会导致图像中目标信息的丢失。去噪强度越大，部分种类的浮游动物信息丢失会变的严重。因此不是去噪强度越大越好。
- 先将图像 imresize 再进行去噪的实验效果要比先去噪再 imresize 的实验结果要好。可能是由于 imresize 将图像中目标和噪声放大，再用同样的方法进行去噪，实际的去噪强度减弱。因此图像中目标信息丢失也比较少，所以去噪效果要好一些。

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.