

基于形态学重建的粘连物体分割^{*}

王仪科¹ 袁万春¹ 张习文² 蔡士杰¹

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京大学计算机科学与技术系 南京 210093)¹

(中国科学院软件研究所人机交互技术与智能信息处理实验室 北京 100080)²

摘要 提出一种基于形态学重建(Morphological Reconstruction)的图像分割方法。该方法先对待分割图像进行预处理,使边界点具有局部极大的灰度值;然后利用灰度形态学重建提取穹顶(Dome),并根据其特性利用阈值对穹顶进行二值化获得候选边界点集;再利用二值形态学重建确定候选边界点集中的边界点,得到分割边界。实验结果表明,本分割方法所得边界连续性好、假边界少;该方法受噪声和对对象内部灰度变化的影响较小,适合用于分割含有粘连对象的图像。

关键词 粘连对象,图像分割,数学形态学,形态学重建,穹顶提取

Segmenting Conglutinate Objects Based on Morphological Reconstruction

WANG Yi-Ke¹ DOU Wan-Chun¹ ZHANG Xi-Wen² CAI Shi-Jie¹

(National Laboratory for Novel Software Technology, Department of Computer Science, Nanjing University, Nanjing 210093)¹

(Laboratory of Human Computer Interaction and Intelligent Information Processing, Institute of Software,
the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)²

Abstract In this paper, a new segmenting approach to conglutinated object images is proposed based on morphological reconstruction. The approach first ascertains the foreground and the background in an image using the Ostu threshold method, and then processes the image to assure that the gray values of boundary pixels in the image are greater than those of the pixels nearby. Using grayscale morphological reconstruction, the approach extracts h-domes from the rows in the preprocessed image along different directions, and then binaries the h-domes with a threshold equal to h, getting boundary pixel candidates. The candidates consist of the boundary pixels of the objects and some pixels inside the objects that are also local maxima in some rows and satisfy another constraint. Then the candidates and the background pixels are mapped into a binary image. In the binary image, the boundary pixels of the objects are connected to the background and other candidates that are inside the objects are not. According to that, the approach use binary morphological reconstruction to select boundary pixels from the candidates, getting the boundary for segmentation. Experiments show that the boundary got by the proposed segmenting approach has good continuity and fewer fake boundaries. The approach is less sensitive to noises and gray value's varying inside objects, and is suitable for segmenting images of conglutinated objects.

Keywords Conglutinated objects, Image segmentation, Mathematical morphology, Morphological reconstruction, Dome extraction

1 引言

图像分割是机器视觉系统的关键步骤,直接影响到特征提取等后续步骤的效果^[1]。由于图像类型的种类繁多,到目前为止还没有一种分割算法适用于所有图像;同时,对一种类型的图像,不是所有的分割算法都适合^[2]。在工业自动化领域中,经常有这样的景象:许多同质的物体堆积在一起,如工业物料和食品。在与此相应的图像中,前景区域内的对象相互粘连,同时前景区域的灰度值与背景区域的灰度值相差较大。正确分割图像中的对象对于产品的质量控制具有重要意义。

在分割此类图像时,单用阈值法分割效果不够好^[3]。虽

然通过阈值法能较好地确定前景区域,但是前景区域内的对象仍然粘连在一起;这是因为对象之间的粘连部分与对象内部的灰度值相差较小,很难通过阈值法去除。边缘检测法^[2]能较好地检测到边缘处的灰度变化,但它对噪声比较敏感,难以在抑制噪声的同时不丢失处于粘连对象之间交界处的弱边缘。同时由于物体内部的灰度变化也容易表现为假边缘,因此检测到的边缘难以直接用于分割。数学形态学中,常用流域分割法^[4]对图像进行分割。但是流域分割所用的标记点难以适当地获取,往往会导致对图像的过分割^[5]。苑玮琦等人提出一种基于局部灰度极值法的图像分割方法^[6]。它提取边界候选像素点时对物体内部的灰度值变化和噪声过于敏感,同时也难以完全去除属于物体内部的非边界像素。

^{*} 本课题得到国家自然科学基金(编号:60303025)资助。王仪科 硕士研究生,研究方向为数学形态学和机器视觉;袁万春 博士/博士后,副教授,主要研究领域为认识科学、知识网格等;张习文 博士/博士后,副研究员,主要研究领域为模式识别、计算机视觉和人机交互等;蔡士杰 教授,博士生导师,主要研究领域为 CAD&CG、人机交互、图像分析和模式识别。

本文针对前述粘连物体图像提出一种基于形态学重建^[7]的分割方法。它的思想也是通过寻找局部灰度极值点来获得用于分割的候选边界点。与苑玮琦方法所使用的灰度极值点不同的是,本文通过灰度形态学重建所获得的极值点还满足一定的条件,即它所在的“峰”具有较大的“峰高”^[8];而一般的极值点只是前述点在提取穹顶的参数和二值化穹顶所用的阈值都为1时的特例。本文方法还利用二值形态学重建获得候选边界点集中的边界点,从而获得分割边界。实验证明,使用该方法分割粘连物体图像,图像内与粘连物体相应的对象得到了良好的分割,所得分割边界连续性好、假边界少,过分割现象不明显,同时方法受噪声和物体内部灰度变化的影响小。

2 形态学重建

数学形态学以集合论为理论基础,着重于研究图像的几何结构,在图像处理、分析和机器视觉等领域中取得了良好的效果^[9]。形态学重建是数学形态学的一个重要内容,可用于滤波^[5]、在二值图像中求与特定区域相连通的点^[10]和穹顶提取(dome extraction)^[7]等。

为了便于说明,先引入一些符号约定: D 表示图像 I 在离散平面上的定义域; $N_D(A)$ 表示 D 内与区域 A 相邻的点的集合;点 p 在图像 I 中的像素值用 $I(p)$ 表示;将图像 I 中各点像素值减去常量 h 后所得图像标记为 $I-h$ 。

形态学重建需要两个图像:图像 I 和 J ;其中 I 和 J 的定义域为同一离散平面区域 D ,并且有 $J \subseteq I$ 。对于定义域都为 D 的图像 I 和 J , $J \subseteq I$ 是指当 I, J 都为二值图像时, $\forall p \in D$, $J(p)=1 \Rightarrow I(p)=1$;当 I, J 都为灰度图像时, $\forall p \in D$,有 $J(p) \leq I(p)$ 。分别称图像 I 和 J 为掩模图像(mask)和标记图像(marker)。形态学重建作用于二值图像时称为二值形态学重建,作用于灰度图像时称为灰度形态学重建。

定义1 设 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 为二值图像 I 的各个连通分支(connected component),二值图像 $J \subseteq I$,则用 J 对 I 的二值形态重建 $\rho_I(J)$ 的计算公式为 $\rho_I(J) = \bigcup_{J \cap I_k \neq \emptyset} I_k$ 。

从以上定义可以看出,二值形态学重建可以用于在二值图像中求所有与特定区域相连通的点。例如 I, J 为同一幅二值图像内像素值为1的两个区域,且有 $J \subseteq I$,则 I 中与 J 连通的点的集合为 $\rho_I(J)$;如果 I 中的一点不在 $\rho_I(J)$ 中,那么此点必然不与区域 J 连通。

定义2 灰度图像 I 和 J 定义在同一定义域 D 上,取值范围为离散集合 $\{0, 1, \dots, N-1\}$,且 $J \subseteq I$,则用 J 对 I 的灰度形态学重建 $\rho_I(J)$ 满足: $\forall p \in D, \rho_I(J)(p) = \max\{k \in [0, N-1] \mid p \in \rho_{T_k(I)}(T_k(J))\}$ ($T_k(I) = \{p \in D \mid I(p) \geq k\}$)。

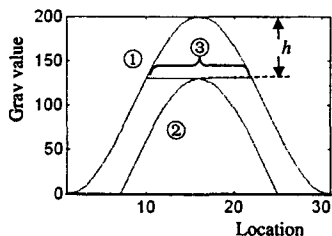


图1 灰度形态学重建和穹顶示意图

如图1所示,曲线①相应于掩模图像 I ,曲线②相应于标记图像 J ,以此进行灰度形态学重建,重建结果的两侧部分与曲线①的两侧重叠,重建结果的中间部分为图中的水平线段。有关形态学重建的定义和实现算法等可参考文献^[7]。灰度形

态学重建可以用于提取穹顶。

定义3 灰度图像 I 的 h -dome(穹顶)记为 $dome_h(I)$,其内各点的值为图像 I 中各点的值与重建结果图 $\rho_I(I-h)$ 中相应点的值之间的差值,即 $dome_h(I) = I - \rho_I(I-h)$ 。

本文默认 h 为不小于1的正整数;也称穹顶中大于0的区域为穹顶。如图1,当曲线②中各点的像素值与曲线①中相应点的像素值的差值为一个常量 h 时,③所标区域即为曲线①的一个穹顶。

引理1 $dome_h(I)$ 中的任一个连通分支 $dome$ 有性质: $\forall p \in N_D(dome), I(p) < \min\{I(q) \mid q \in dome\}$ ^[7]。

由引理1可以看出,穹顶是掩模图像中灰度值局部较大的区域。当 h 等于1时,灰度图像的穹顶(h -dome)正是此图像中具有极大灰度值的区域。文^[8]总结了灰度形态学重建在提取穹顶时所具有的一些特性。

3 基于形态学重建的分割方法

由于本文所研究的图像特征是图中前景区域的灰度值与背景区域的灰度值相差较大,因此可以容易地确定分割阈值,以确定前景区域与背景区域。本文采用Otsu法^[11]确定分割阈值。不失一般性,假设粘连物体图像中背景区域的灰度值比前景区域高;如果前者的灰度值低,可以通过对图像每个像素点的灰度值做补运算来达到假设的要求。然后将背景区域的灰度值置为0。如图2(b)为图2(a)经过前述预处理所得的前景区域。



图2 对原图预处理获得前景区域

在前述阈值分割后,前景区域内的对象之间仍相互粘连,需要进一步分割。对象的边界有两种:一种是处于对象与背景区域交界处的边界,另外一种处于相粘连的对象之间的边界;它们都处于前述阈值分割所得的前景区域中,如图2(b)所示。确定了这些边界就可以完成图像的分割。

在前述预处理所得的前景区域图中,对象内与背景区域相邻的边界区域的灰度值比其周邻的区域的灰度值高,如图2(c)中两侧的主峰所示;粘连对象之间的边界区域的灰度值也比与其相邻的对象内部和背景区域的灰度值高,如图2(c)中处于中间位置的主峰所示。因此,经过预处理的图中所有待分割对象的边界均具有局部较高的灰度值。已知穹顶是图像中灰度值局部较大的区域,将上述边界区域看作穹顶,则可以利用灰度形态学重建将其提取出。

为了使得到的边界较细,使用与 h 值相等的阈值 t 对穹顶(h -dome)二值化以选取穹顶内的点,把选取出的点作为候选边界点。由灰度形态学重建提取穹顶所具有的特性,当阈值 t 与 h 的值相等时,二值化穹顶所得的点是穹顶中的极大值点,也是掩模图像的极大值点^[8]。与一般的极值点不同的是,前述得到的极值点还满足一定的条件,即它们所在的“峰”具有较大的“峰高”(图2(c)中间的主峰的峰高如图中 h' 所标);一般的极值点只是在 h 和 t 都为1时二值化穹顶所得点的特例^[8]。

经过预处理的图像中的边界点,在垂直于此点处边界方

向的法方向上具有局部极大的灰度值;而由于边界区域内部的灰度值不均匀,边界上的一点可能比与其相邻的边界点的灰度值小。所以,如果以二维原图像作为掩模图像提取 h -dome,则当用与 h 值相等的阈值 t 选取所得 h -dome 中的点作为候选边界点时,如果边界上一点的灰度值比与其相邻的边界点的灰度值小,那么此点不会被选取为候选边界点。因此,为了避免遗漏边界点,在图中需要沿不同方向提取穹顶。本文将图中方向分为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个方向,分别标记为 1、2、3 和 4,如图 3 所示。取一个方向,在经过预处理的图像内沿此方向逐行提取各行上的穹顶;即把经过预处理的图像中当前方向上的各行依次作为掩模图像,提取行上的穹顶(h -dome)。然后用阈值 $t(t=h)$ 选取各行穹顶中值不小于 t 的点。如此依次沿四个方向操作,所有从穹顶中选取得到的点即为候选边界点,它们构成候选边界点集。

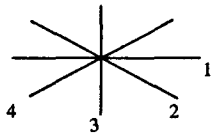


图 3 提取穹顶所沿的四个方向

候选边界点实质上是经过预处理的图像中各个方向上各行中的极大值点,而且这些极大值点还满足条件:在相应的行中,这些点所在的“峰”具有较大的“峰高”。物体内部少数灰度极值点所在“峰”的“峰高”大于 h ,这些极值点也会出现在候选边界点集中。因此候选边界点集包括对象边界点和对象内部少数“峰高”较高的极值点;需要选取出前者才能得到分割前景区域内对象所需的边界。

将得到的候选边界点和相应于原图像背景区域的点共同保存为一幅二值图像;二值图像中属于前述点集的像素点的值为 1,其它像素点的值为 0。在此二值图像中,相应于对象边界的候选边界点与原图像背景区域是连通的。属于物体内部的极值点与前两者是分隔开的(如图 2(c)中处于中间位置的“峰”的“峰顶”与位于两侧的“峰”的“峰顶”和外侧的 0 值区域之间间隔着非极大值点),因而在前述二值图像中其与原图像背景区域不连通。以前述二值图像为掩模图像,以其中的原图像背景区域为标记图像,二值形态学重建所得的区域即为在二值图像中与原图像背景区域相连通的点的集合;其比原图像背景区域多的点即是候选边界点集中的对象边界点,它们组成了分割前景区域中的对象所需的边界。

本文方法的具体步骤如下:

(1)由 Otsu 法确定阈值,从而确定图中的前景区域与背景区域。如果背景区域的灰度值比前景区域低,则对图中每一点的像素值作补运算。然后将背景区域的灰度值置为 0。

(2)设置参数 h ; k 依次取值 1, 2, 3, 4 执行如下步骤:

(2.1)利用灰度形态学重建提取图中 k 方向上各行的穹顶(h -dome)。提取各行的穹顶时,以当前行向量 row 为掩模图像, $row-h$ 为标记图像,则行上的 h -dome 为 $row - \rho_{row}(row-h)$ 。

(2.2)令 $t=h$, 以 t 为阈值对各行的穹顶二值化;即图中 k 方向上各行的 h -dome 中一点的值如果不小于 t , 那么标记此点为候选边界点。

(3)创建一幅二值图像,其中相应于背景区域或候选边界点的像素点的值为 1,其它像素点的值为 0,以此作为掩模图像。创建一幅二值图像,相应于背景区域的点的值为 1,其它

像素点的值为 0,以此作为标记图像。

(4)以上步所得的二值掩模图像和标记图像进行二值形态学重建,重建结果中所有不属于背景区域的点即为分割边界。

为了不丢失边界点,算法中参数 h 应当等于或稍小于边界剖面相应的“峰高”,后者可以通过手工测定。

4 实验结果

对一幅食品灰度图像进行分割实验。原图像如图 2(a)所示,其前景内有许多粘连在一起的球形食品,背景与前景的灰度值相差较大而且背景区域的灰度值较低。通过 Otsu 法确定原图像的分割阈值为 105,阈值分割后对象的边界如图 4(a)所示。从图 4(a)可以看出,虽然阈值分割法确定了前景与背景区域,但是前景中大部分相粘连的对象仍然没有被分隔开;这是由于粘连对象交界处的灰度值与对象内部的灰度值相差较小所致。

图 4(b)是对原图像利用 Sobel 算子检测到的边缘。为了抑制噪声,在 Sobel 算子得到的梯度中使用较高的阈值选取边缘。可以看出,在抑制噪声的同时丢失了粘连对象之间的弱边缘;同时,对象内部的灰度值变化也形成梯度,表现为假边缘;边缘连续性不够好,难以连接成分割所需的边界。图 4(c)是对原图像利用 Canny 边缘检测器检测到的边缘。可以看出,虽然 Canny 算子是边缘检测的最优线性算子,同时也在从梯度中选取边缘的过程中加入了非极大抑制和双阈值法^[12],但是假边缘仍然较多,难以形成分割所需的边界。

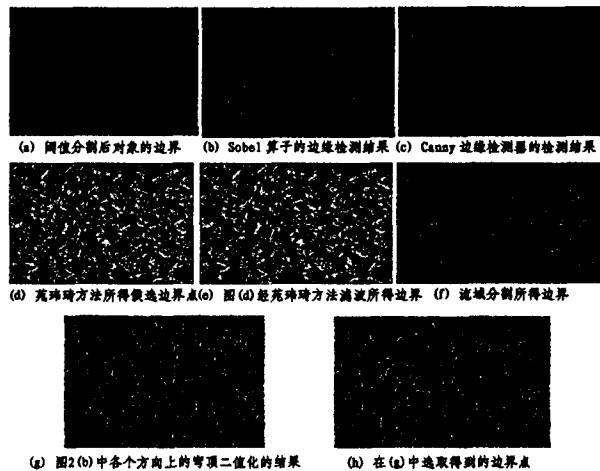


图 4 不同分割方法所得分割边界

苑玮琦方法将图中的极值点作为候选边界点,图 4(d)是其在原图像中检测到的候选边界点。从图 4(d)可以看出,苑玮琦法在选取候选边界点的过程中对对象内部的灰度值变化和噪声过于敏感,很小的灰度值变化都可能使当前点被选取。图 4(e)是应用苑玮琦方法中的非边界信息滤波算法对候选边界点进行 3 次滤波的结果。结果显示,对象内部的非边界点没有被完全滤除,而且由于候选边界点中包含了过多的非边界点,影响了滤波所得的最终边界。

以图 2(a)中的一些极大值点为标记点,对图像进行流域分割,得到的分割边界如图 4(f)所示。可以看出,过分割现象比较明显,这是由于难以自动地获取适当的标记点。

为了使边界区域的灰度值较大以利于提取穹顶,对原图像中每个像素点的灰度值做补运算,然后将背景区域的灰度值置为 0,所得结果如图 2(b)所示。图 2(c)为图 2(b)中所标

线段的像素值曲线图;其显示经过前述预处理,图 2(b)中无论是与背景区域相邻的对象边界还是处于粘连对象之间的边界(分别对应于图 2(c)中两侧和中间高耸的峰),边界处的灰度值都比它们的周邻区域的灰度值高。

对图 2(b)使用本文的方法得到的候选边界点集如图 4(g)所示;其中穹顶参数 h 和二值化穹顶的阈值 t 都为 8。可以看出候选边界点集中含有属于物体内部的点。再在候选边界点集中选取得到的边界点如图 4(h)所示,即为分割边界。从图 4(h)可以看出,本文方法得到的分割边界连续性好,对象的边界较为完整,假边界少。由于所得边界不含有对象内部的非边界点,因此本文方法受噪声和物体内部灰度变化的影响小。本文方法达到了良好的分割效果。

结论与展望 本文提出了一种基于形态学重建的粘连物体分割方法。该方法先对原图像预处理使边界区域的灰度值较大,然后利用灰度形态学重建提取穹顶,并根据穹顶所具有的特性利用特定的阈值对穹顶二值化得到候选边界点。得到的候选边界点不仅是图像中的极值点,而且满足一定的条件,即它所在的“峰”具有较大的“峰高”。一般的极值点只是前述点在穹顶参数和二值化穹顶的阈值都为 1 时的特例。方法再利用二值形态学重建获得候选边界点集中的边界点,从而得到分割边界。实验结果表明,本方法所得分割边界连续性好,假边界少,达到了良好的分割效果。

由于本文方法沿各个方向选取候选边界点,因此最终所

得边界线带有少量毛刺。这可以使用数学形态学中的剪枝算法^[9]作进一步的处理。

参考文献

- 章毓晋, 编著. 图像分割. 北京: 科学出版社, 2000
- Pal N R, Pal S K. A Review on Image Segmentation Techniques. *Pattern Recognition*, 1993, 26(9): 1277~1294
- 苑玮琦, 王建军, 张石, 等. 球形物料图像的分割方法研究. *信号处理*, 1998, 14(1): 66~70
- Vincent L, Soille P. Watershed in Digital Spaces; An Efficient Algorithm Based Immersion Simulations. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583~598
- Serra J, Vincent L. An Overview of Morphological Filtering. *IEEE Trans. Circuits, Systems and Signal Processing*, 1992, 11(1): 47~108
- 苑玮琦, 王建军, 张宏勋. 基于局部灰度极值法的水泥生料球图像边缘检测. *模式识别与人工智能*, 1997, 10(4): 376~381
- Vincent L. Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis; Applications and Efficient Algorithms. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1993, 2(2): 176~201
- Wang Yike, Dou Wanchun, Zhang Xiwen, Cai Shijie. Edge Selection on Gradients Based on Dome Extraction. In: *Proc. 7th ICSP, Intl. Conf. on Signal Processing*, Beijing, 2004
- 崔屹, 编著. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用. 北京: 科学出版社, 2000
- The MathWorks, Inc (2003). *Matlab Help Window*, Matlab 6.5
- Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histogram. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62~66
- Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679~698
- on Computational Learning Theory, 1998, 80~91
- Friedman J, Hastie T, Tibshirani R. Additive logistic regression; a statistical view of boosting. [Technical report]. Department of Statistics, Sequoia Hall, Stanford University, July 1998
- Rabiner L, Huang B. *Fundamentals of Speech Recognition*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993
- Friedman N, Murphy K, Russell S. Learning the structure of dynamic probabilistic networks. In: *Proc. Conf. on Uncertainty in AI(UAI)*, Madison, WI, 1998
- Yang M-H, Kriegman D J. Detecting Faces in Images; A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(1): 34~58
- Viola P, Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *IEEE CVPR*, 2001. 511~518
- Freud Y, Schapire R. A short introduction to Boosting. *J. of Japanese Society for AI*, 1999, 14(5): 71~78
- Zhang Z, Zhang L, Li S, et al. Real-time Multi-view Face Detection. *IEEE The 5th Intl. Conf. on automatic face and gesture recognition*. Washington, DC, USA, 2002
- Lienhart R, Maydt J. An extended set of Haar-like features for rapid object detection. *IEEE ICIP*, 2002. 900~903
- Cootes T F, Taylor C J, Cooper D H, Graham J. Active Shape Models; Their Training and Application. *CVGIP: Image Understanding*, 1995, 61: 38~59
- Cootes T F, Edwards G J, Taylor C J. Active Appearance Models. *ECCV98*, 1998, 2: 484~498
- Kuo S, Agazzi O. Keyword spotting in poorly printed documents using pseudo 2-D Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16: 842~848
- Rabiner L. A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition. In: *Proc. of IEEE*, Feb. 1989, 77: 257~286

(上接第 178 页)

- Freund Y, Schapire R E. A decision theoretic generalization of on-line 'learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Science*, 1997, 55(1): 119~139
- Ekman P. Strong evidence for universals in facial expressions; A reply to Russell's mistaken critique. *Psychological Bulletin*, 1994, 115(2): 268~287
- Ekman P, Friesen W V. *Facial Action Coding System; Investigator's Guide*. Consulting Psychologists Press, 1978
- Cohen I, Sebe N, Gozman F G, Cirelo M C, Huang T S. Learning Bayesian network classifiers for facial expression recognition both labeled and unlabeled data. *Computer Vision and Pattern Recognition*. In: *Proc. 2003 IEEE Computer Society Conf. on*, Volume: 1, June 2003. I-595~ I-601
- Pantic M, Rothkrantz L J M. Automatic analysis of facial expressions; The state of the art. *PAMI*, 2000, 22(12): 1424~1445
- Tian Ying-li. Evaluation of Face Resolution for Expression Analysis. In: *The First IEEE Workshop on Face Processing in Video*, Washington, D. C., USA, 2004
- Sebe N, Lew M S, Cohen I, et al. Authentic facial expression analysis. *Automatic Face and Gesture Recognition*. In: *Proc. Sixth IEEE Intl. Conf. on*, May 2004. 517 ~ 522
- Samaria F, Young S. HMM based architecture for face identification. *Image and Computer Vision*, 1994, 12: 537~543
- Schapire R. A brief introduction to boosting. In: *Proc. of the Sixteenth Intl. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, 1999
- Schapire R, Freund Y, Bartlett P, Lee W. Boosting the margin; a new explanation for the effectiveness of voting methods. In: *Proc. 14th Intl. Conf. on Machine Learning*, Morgan Kaufmann, 1997. 322~330
- Schapire R E, Singer Y. Improved boosting algorithms using confidence-rated predictions. In: *Proc. of the Eleventh Annual Conf.*