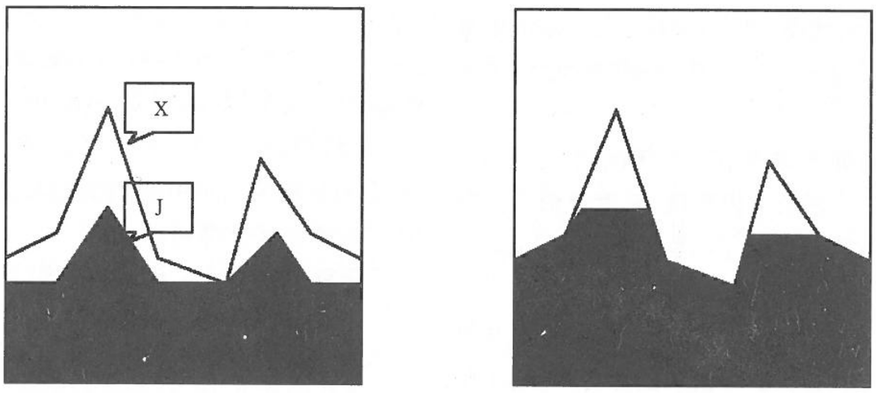
本算子的实现需要 $3 \times M \times N$ 次单细胞运算，这使得计算时间在毫秒到秒级. 对于复杂的形态学算法，特别是一些全局算法，如欧氏距离变换和图像分割等，其计算时间将成倍乃至于指数增长. 这限制了形态学算法在实际中的应用. FCNN 的基本算子计算时间复杂度即是系统动态响应时间常数 τ_{FCNN}，这可根据不同的实际要求通过调整参数 C 和 R_x 来动态决定. 在应用中常有 $R_x = 1$，这时仅调整电容参数 C 可使 τ_{FCNN} 的数量级在 10^{-9}s，在更复杂的形态学算法中可以满足实时图像处理的要求.

RGB 分量法有其局限性，它同时对多个色彩分量进行形态学变换，这将改变原图像的色彩谱. 于是 Corner 和 Delp 提出向量排序法，但该方法不适合 FCNN 实现. 需要指出的是，实际应用中改变色彩谱的问题只是在图像中的色彩边缘处产生不良影响，这种问题可以通过自空间变换来解决. 这方面仍在进一步的研究之中.

3 分量法彩色形态学重构及 FCNN 实现

分量法彩色形态学重构的实质是对每个色彩分量分别进行灰度重构运算. 对于灰度图像 X，其象素值形成了一多峰函数，灰度重构（或其对偶形式）就是选取合适的标识图像 $J \leq X (J \geq X)$，J 给出了每个峰值区的最大值（最小值），算法的结果将 X 各峰中低于该值的部分重构出来. 如图 3，给出了一维灰度重构的示意图.



(a) 一维灰度图像 X 和标识图像 J　　(b) 重构结果

图 3　一维灰度重构示意图

在形态学灰度重构算法中，图像的模糊逻辑运算（即逐点 min/max）起着重要的作用. 用双输入层 FCNN 可以实现灰度图像的模糊逻辑运算. 每输入层表示一个灰度图像，层间的细胞用模糊逻辑“与”(min)、“或”(max) 连接，其状态方程变为以下方式.

模糊与 $(u_1 \wedge u_2)$：

$$C\dot{x}_{ij} = -x_{ij} + \min(u_{ij1}, u_{ij2}) \tag{8}$$

模糊或 $(u_1 \vee u_2)$：

$$C\dot{x}_{ij} = -x_{ij} + \max(u_{ij1}, u_{ij2}) \tag{9}$$

下面用分量法将灰度重构推广为彩色重构.

定义 1.　分量法彩色最短距离膨胀　设 X 为彩色图像，其标识图像 $(J \leq X) := \{[J_R, J_G, J_B]: J_R \leq X_R, J_G \leq X_G, J_B \leq X_B\}$，则一阶分量法彩色最短距离膨胀为

$$D_X^{(1)}(J) = (J \oplus S) \wedge X; \tag{10}$$

其中“$\wedge$”表示按分量逐点 min 运算，即 $X \wedge Y := \{[X_R \wedge Y_R, X_G \wedge Y_G, X_B \wedge Y_B]\}$，为三分量模糊“与”. 于是 n 阶分量法彩色最短距离膨胀定义为

$$D_X^{(n)}(J) = \underbrace{D_X^{(1)} \circ D_X^{(1)} \circ \cdots \circ D_X^{(1)}}_{n次}(J) \tag{11}$$

算法 1.　分量法彩色重构　设 X 为彩色图像，其标识图像 $J \leq X$（同定义 1），则由 J 所标识的 X 的峰值区将由下面的反复迭代分量法彩色最短距离膨胀直至稳定而重构出来：

$$R_X(J) = \bigvee_{n \geq 1} D_X^{(n)}(J) \tag{12}$$

定义 2.　分量法彩色最短距离腐蚀　设 X 为彩色图像，其标识图像 $(J \geq X) := \{[J_R, J_G, J_B]: J_R \geq X_R, J_G \geq X_G, J_B \geq X_B\}$，则一阶分量法彩色最短距离腐蚀为

$$E_X^{(1)}(J) = (J \ominus S) \vee X \tag{13}$$

其中“$\vee$”表示按分量逐点 max 运算，即三分量模糊“或”. 于是 n 阶分量法彩色最短距离腐蚀定义为