

×4 单层加性 FCNN 示意图,拓扑结构为半径 $r=1$ 的矩形邻域。

在数学形态学中,4 个基本算子是:腐蚀算子(erosion)、膨胀算子(dilation)、开算子(opening)、闭算子(closing)。其中,腐蚀算子和膨胀算子是基础,其它算子可以分解为它们的组合。设结构元为 S ,输入图像为 X ,输出图像为 Y ,则腐蚀算子和膨胀算子 FCNN 实现的参数模板为^[5]:

腐蚀算子($Y=X\ominus S$): $A=0, B=0, A_{\text{fmin}}=\text{未定义}, A_{\text{fmax}}=\text{未定义}, B_{\text{fmin}}=-S, B_{\text{fmax}}=\text{未定义}, R_x=1, I=0, u=X, x_0=\text{任意}, y=Y$;

膨胀算子($Y=X\oplus S$): $A=0, B=0, A_{\text{fmin}}=\text{未定义}, A_{\text{fmax}}=\text{未定义}, B_{\text{fmin}}=\text{未定义}, B_{\text{fmax}}=S, R_x=1, I=0, u=X, x_0=\text{任意}, y=Y$;

这里 S_D 是 S 的中心对称变换。电容参数 C 可根据实际需要调节,一般地使 τ_{FCNN} 的数量级在 10^{-9}s ,以保证实时图像处理的需要。开算子和闭算子可由下述复合算子得到:

开算子: $X \cdot S = (X\ominus S)\oplus S$;

闭算子: $X \cdot S = (X\oplus S)\ominus S$;

在形态学重构算法的实现中,使用双输入层 FCNN 来实现图像的模糊逻辑运算^[5,6]。每一输入层表示一个图像,层间用模糊逻辑“与”(min)、“或”(max)连接,则细胞状态方程变为:

模糊与($u_1 \wedge u_2$): $C \dot{x}_{ij} = -x_{ij} + \min(u_{ij1}, u_{ij2})$;

模糊或($u_1 \vee u_2$): $C \dot{x}_{ij} = -x_{ij} + \max(u_{ij1}, u_{ij2})$;

3 无噪声环境 FCNN 汉字提取

这时待处理的是一灰度图像,由于不存在噪声污染,汉字和背景很容易分离开来而形成二值图像。我们将用一门限(threshold)FCNN 来实现灰度图像的二值化。接着,利用形态学二值重构 FCNN 来实现汉字提取。下面是有关形态学二值重构的定义:

定义 1. 最短距离膨胀(geodesic dilation)^[5]。设 X 为二值图像,其标识图像(marker) $J \subseteq X$,则一阶最短距离膨胀定义为:

$$\tilde{D}_X^{(1)}(J) = (J \oplus S) \cap X; \quad (4)$$

n 阶最短距离膨胀定义为:

$$\tilde{D}_X^{(n)}(J) = \underbrace{\tilde{D}_X^{(1)} \circ \tilde{D}_X^{(1)} \circ \dots \circ \tilde{D}_X^{(1)}}_{n \text{ times}}(J); \quad (5)$$

算法 1. 形态学二值重构^[5]。设 X 为二值图像,其标识图像(marker) $J \subseteq X$,于是, J 所标识的 X 的连通域可由反复迭代最短距离膨胀直至稳定而重构出来:

$$\tilde{R}_X(J) = \bigcup_{n \geq 1} \tilde{D}_X^{(n)}(J); \quad (6)$$

当我们以 -1 表示背景值,1 表示前景值,上面的集合交、并可由模糊与、或来实现。

下面的伪代码描述了无噪声环境下汉字提取的 FCNN 算法程序:

Begin

$Y = \text{Threshold}(X, z)$; // 门限 FCNN: X 是待处理的灰度图像, z 是门限。 X 中大于 z 的像素将被置 1, 其它则为 -1。其实现见下面。

$Z = \tilde{R}_Y(J)$; // 形态学二值重构。

End.

Function $Y = \text{Threshold}(X, z)$

{ $A=2, B=0, A_{\text{fmax}}=A_{\text{fmin}}=B_{\text{fmax}}=B_{\text{fmin}}=\text{未定义}, R_x=1, I=z, u=\text{任意}, x_0=X, y=Y$ };

图 2 列出了仿真结果。图 2(a)是摄自《兰亭序》(唐神龙本)的片段,其中含有待提取的“悟”字,这是一幅不含腐蚀噪声的图像;图 2(b)是门限 FCNN 二值化图像,这里取门限 0.6;图 2(c)是标识图像 J ,由于该字由 3 个连通域组成,至少要在每个连通域选择一个标识点,为加快速度可以选择更多的点(这里是 18 个斑点块);图 2(d)是经 5 次迭代后重构的结果,这里的结构元选择的是 5×5 阶零矩阵。

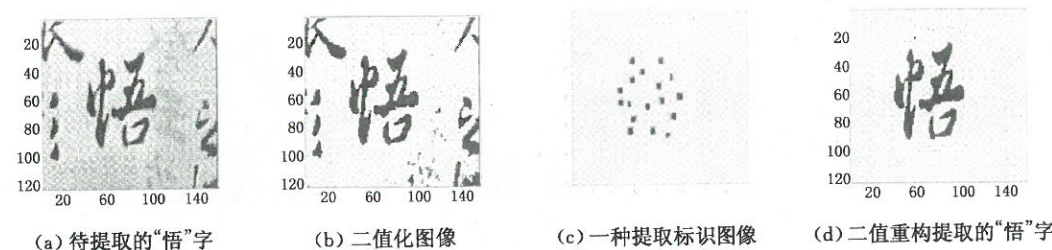


图 2 无噪声环境 FCNN 汉字提取

4 自然腐蚀噪声环境 FCNN 汉字重构

由于数百年来风雨剥蚀,碑刻拓本含有大量的自然腐蚀噪声,而形态学灰度重构为我们提供了去噪的方法。下面是有关形态学灰度重构的定义:

定义 2. 灰度最短距离膨胀(grey-scale geodesic dilation)^[5]。设 X 为灰度图像,其标识图像 $J \subseteq X$,则一阶灰度最短距离膨胀定义为:

$$D_X^{(1)}(J) = (J \oplus S) \wedge X; \quad (7)$$

n 阶灰度最短距离膨胀定义为:

$$D_X^{(n)}(J) = \underbrace{D_X^{(1)} \circ D_X^{(1)} \circ \dots \circ D_X^{(1)}}_{n \text{ times}}(J); \quad (8)$$

算法 2. 形态学灰度重构^[5]。设 X 为灰度图像,其标识图像 $J \subseteq X$,则 J 所标识的 X 的峰值区可由反复迭代灰度最短距离膨胀直至稳定而重构出来:

$$R_X(J) = \bigvee_{n \geq 1} D_X^{(n)}(J); \quad (9)$$

上面的“ \vee ”和“ \wedge ”表示逐点 max 和 min 运算,可由 FCNN 模糊算子实现之。

应用灰度重构进行噪声抑制的关键在于标识图像 J 的选择,它必须不包含高频噪声部分的峰值区,同时包含那些希望重构出来的低频部分峰值区。对于碑帖上的自然腐蚀噪声,可以通过膨胀算子在一定程度上抵消自然腐蚀作用,产生标识图像。经过灰度重构,可以产生低噪声的灰度图像。然后利用第 3 节的算法,提取出需要的汉字。

整个过程由图 3 的流程图表示:



图 3 自然腐蚀噪声环境 FCNN 汉字重构流程图

图 4 是上述过程的仿真结果。图 4(a)是摄自著名书法碑帖《圣教序》的片段,其中包含要提取的繁体“华”字;(b)是灰度重构平滑噪声的结果,其中膨胀算子的结构元为

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.04 & 0.08 \\ 0.04 & 0 & 0.04 \\ 0.08 & 0.04 & 0.08 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

图 4(c)是图 4(b)的二值化图像,门限为 0.15;由于前景和背景像素值与第 3 节相反,故此在二值重构中要选择各自的对偶算子,图 4(d)为一种提取标识图像,由 9 个斑点块组成;图 4(e)为最后得到的繁体“华”字。