

文章编号:1001-9081(2006)08-1838-04

一种基于广义形态变换的采样方法

段 汕¹, 秦前清²

(1. 中南民族大学 计算机科学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

(jy5699@sina.com)

摘 要:提出了一种基于集合势的广义形态变换形式。该变换能反映结构元素作用于目标对象的强度,控制对目标对象的过度膨胀或过度腐蚀。在广义形态变换性质研究的基础上所提出的广义形态采样方法,能更好地保留图像的形态信息和边缘信息。测试结果表明,基于广义形态变换的采样方法在提高形态变换效率及保持图像细节信息方面相对于现有的采样方法都有一定程度的改善。

关键词:广义形态变换;形态采样;数学形态学

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Morphological sampling based on generalized morphological transform

DUAN Shan¹, QIN Qian-qing²

(1. College of Computer Science, South-central University for Nationalities, Wuhan Hubei 430074, China;

2. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,

Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: A generalized morphological transform based on the set cardinality was presented. This transform can reflect the intensity when the structural element acts on the image, and prevent excessive dilation or erosion. Some properties of the generalized morphological transform provide the basis for establishing a new morphological sampling scheme for both binary and gray image. The experimental results show that the new method has higher efficiency and better information preserve function of morphological transform compared with other sampling means.

Key words: generalized morphological transform; morphological sampling; mathematical morphology

0 引言

随着数学形态学方法广泛地运用于数字图像处理,对于形态离散化方法以及形态采样理论的研究成为其应用方法的一部分。Haralick等所提出的形态采样^[1~3]方法在简化形态运算、保持图像基本形态特征等方面有着重要的作用。在采样图像上进行的较低消耗的形态滤波与其作用在原始图像上高消耗的运算结果相比具有更高的应用价值。由于形态滤波变换不是带限变换,因此一般来说其采样过程将导致信息的损失,且有些情形下无法实现对原始图像的重构^[3,4]。本文在现有数学形态学的基础上,对其最基本的形态变换进行了推广,建立了基于集合势概念的广义形态变换的基本思想,并以此为基础提出了广义形态采样方法,通过实验测试表明该方法在有效性^[5]和降低采样消耗等方面较一般的采样方法有一定程度的改进,广义形态变换本身在运算效率上也较通常的形态变换有所提高。

1 广义二值形态变换及形态采样方法

1.1 广义二值形态变换

对于给定的集合 $A, B \subseteq Z^n$,二值形态学^[2]中基本的形态变换,即结构元素 B 对于图像 A 的形态腐蚀与形态膨胀可表示成为如下形式:

$$A \ominus B = \{x: A^c \cap B_x = \emptyset\} \quad (1)$$

$$A \oplus B = \{x: A \cap (\check{B}_x) \neq \emptyset\}$$

由形态膨胀的定义, $x: A \cap (\check{B}_x) \neq \emptyset$ 是 $x \in A \oplus B$ 的充分必要条件,它表明结构元素 B 在点 x 处能最低限度地击中图像 A 。形态腐蚀所具有的特征 $x \in A \ominus B \Leftrightarrow A^c \cap B_x = \emptyset$,则说明结构元素 B 在点 x 处整体击中图像 A 的强度达到最大。为了使得形态膨胀和形态腐蚀这两种最基本的形态变换能反映出结构元素 B 击中图像 A 的强度,本文对通常的腐蚀与膨胀定义^[2]方式进行了扩展,提出了基于集合势的、具有控制变换强度的广义形态变换的基础理论,通过引入变换的强度参数控制结构元素击中目标的强度和敏感度,由此可以调整并控制由于不同尺度的结构元素所产生的过度膨胀或腐蚀现象。对于广义形态变换性质的讨论表明,通常的形态变换是广义形态变换的特例。

定义1 结构元素 B 对于图像 A 的强度系数为 $r \in [0, 1]$ 的广义形态腐蚀与广义形态膨胀定义为:

$$A \overset{r}{\ominus} B = \{x: \text{Card}(A^c \cap B_x) \leq \lceil r \cdot (\text{Card}(B) - 1) \rceil\} \quad (2)$$

$$A \overset{r}{\oplus} B = \{x: \text{Card}(A \cap (\check{B}_x)) > \lceil r \cdot (\text{Card}(B) - 1) \rceil\} \quad (3)$$

收稿日期:2006-02-28;修订日期:2006-04-22 基金项目:国家自然科学基金资助项目(904160704)

作者简介:段汕(1962-),女,湖北武汉人,教授,博士,主要研究方向:数字图像处理、空间信息处理中现代算法; 秦前清(1961-),男,湖北洪湖人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:空间信息处理与解译、模式识别与人工智能。

这里 $[h]$ 表示 h 的整数部分, $Card(\cdot)$ 代表集合的势,并假设 $0 < Card(B) < +\infty$ 。

基于以上定义,可以证明:

① 广义形态腐蚀和膨胀(2)式与(3)式包含通常的腐蚀和膨胀(1)作为特例。事实上,当取强度系数 $r=0$ 时:

$$A \ominus B = A \overset{0}{\ominus} B \quad A \oplus B = A \overset{0}{\oplus} B$$

② 广义形态腐蚀与膨胀和通常的形态腐蚀与膨胀具有如下关系:

$$A \overset{r}{\oplus} B \subseteq A \oplus B \quad A \overset{r}{\ominus} B \supseteq A \ominus B$$

③ 广义形态腐蚀与膨胀关于强度系数分别具有增性和减性。即如果 $r \leq q$,则有:

$$A \overset{r}{\ominus} B \subseteq A \overset{q}{\ominus} B \quad A \overset{q}{\oplus} B \subseteq A \overset{r}{\oplus} B$$

④ 广义形态腐蚀与膨胀互为对偶变换:

$$A \overset{r}{\ominus} B = \{A^c \overset{r}{\oplus} \check{B}\}^c$$

利用广义形态腐蚀与膨胀变换可以实现对于二值图像的内角点和各种形式内点的提取,进而可以实现对于图像的分层处理。

定义2 结构元素 B 对于图像 A 的强度系数为 $r, q \in [0, 1]$ 的广义形态开、闭变换分别定义为:

$$A \overset{r}{\circ} B = (A \overset{r}{\ominus} B) \overset{q}{\oplus} B \quad (4)$$

$$A \overset{r}{\otimes} B = (A \overset{r}{\oplus} B) \overset{q}{\ominus} B$$

将 $q=0$ 时的广义形态开、闭变换分别记为 $\overset{r}{\circ}$ 和 $\overset{r}{\otimes}$:

$$A \overset{r}{\circ} B = (A \overset{r}{\ominus} B) \oplus B \quad (5)$$

$$A \overset{r}{\otimes} B = (A \overset{r}{\oplus} B) \ominus B$$

利用广义形态开、闭变换的定义,可以证明以下性质是成立的:

⑤ 广义形态开、闭算子互为对偶变换:

$$A \overset{r}{\circ} B = \{A^c \overset{r}{\otimes} \check{B}\}^c$$

⑥ 若 $r \leq q$,则有:

$$A \overset{r}{\circ} B \subseteq A \overset{q}{\circ} B \quad A \overset{r}{\otimes} B \subseteq A \overset{q}{\otimes} B$$

⑦ 广义形态开、闭变换与通常的形态开、闭变换具有如下关系:

$$A \overset{r}{\circ} B \supseteq A \circ B \quad A \overset{r}{\otimes} B \subseteq A \otimes B$$

⑧ 若 $r \leq q$,则有:

$$A \overset{r}{\circ} B \subseteq A \overset{q}{\circ} B \quad A \overset{r}{\otimes} B \supseteq A \overset{q}{\otimes} B$$

⑨ 广义形态开变换可以表示成为:

$$A \overset{r}{\circ} B = \bigcup_{x \in A \overset{r}{\ominus} B} \{B_x\}$$

1.2 二值图像的形态采样

利用广义形态变换的性质⑨,对于某些 $x \in A \overset{r}{\ominus} B$,与其对应的 B_x 可以从并运算中去掉且不会改变 $A \overset{r}{\circ} B$ 的构成,这些 B_x 是 $A \overset{r}{\circ} B$ 中的冗余成分。为了从 $A \overset{r}{\circ} B$ 的表达式中消除这些成分,基于定义1和定义2可以将形态开算子描述成为下面的形式:

$$A \overset{r}{\circ} B = \{x: \rho(x) = Card\{(A \overset{r}{\ominus} B) \cap \check{B}_x\} \geq 1\} \quad (6)$$

事实上,如果 $\rho(x) \geq 1$,则必存在 $y \in A \overset{r}{\ominus} B$,使得 $x \in B_y$;

反之,若 $y \in A \overset{r}{\ominus} B$,则对于任意的 $x \in B_y$ 都有 $\rho(x) \geq 1$ 。另外,如果对于任意的 $x \in B_y$,都有 $\rho(x) \geq 2$,则所有的 $x \in B_y$ 必满足:

$$\rho(x) = Card\{((A \overset{r}{\ominus} B) \setminus \{y\}) \cap \check{B}_x\} \geq 1$$

这说明点 y 是 $A \overset{r}{\circ} B$ 中的冗余信息,即意味着 B_y 可以从 $A \overset{r}{\circ} B$ 的表达式中去掉,从而可获得广义形态开变换 $A \overset{r}{\circ} B$ 的无冗余成分的表示形式。

设 A 为目标图像, B 为结构元素, r 为给定的强度系数。利用广义形态腐蚀变换的方法,对于目标图像 A 进行形态采样的目的在于寻求采样集合 $S_r \subseteq A$,使其满足条件:

$$Card(S_r) = \text{Min}\{Card(S_r): S_r \oplus B = A \overset{r}{\circ} B\} \quad (7)$$

按照(5)式,集合 S_r 是 $A \overset{r}{\ominus} B$ 的子集,称 S_r 为目标图像 A 的强度系数为 r 的采样集合。

为了得到满足条件(7)的采样集合 S_r ,利用以上消除广义形态开变换 $A \overset{r}{\circ} B$ 中冗余点的方法,可建立获取形态采样集合 S_r 的如下算法:对于 $\forall y \in A \overset{r}{\ominus} B$ 及 $\forall x \in B_y$,计算 $\rho(x)$,如果 $\rho(x) \geq 2$,则将点 y 从 $A \overset{r}{\ominus} B$ 中去掉,并对于 $x \in B_y$ 将 $\rho(x)$ 减去1,否则将结构元素平移至下一个扫描点(点扫描方式采取从左到右,从上到下的方法),直到扫描完所有 $A \overset{r}{\ominus} B$ 中的点,最后还保留在 $A \overset{r}{\ominus} B$ 中的点即是采样集合 S_r ,其采样过程可以描述成为下面的形式:

$$S_r \leftarrow A \overset{r}{\circ} B \longrightarrow \begin{cases} S_r \leftarrow S_r \setminus \{y\} \\ \rho(x) \leftarrow \rho(x) - 1 \end{cases} \quad \text{if } \rho(x) \geq 2, \forall x \in B_y \quad (8)$$

由此所产生的 S_r 在(7)式意义下是无冗余的,且以此为基础可以实现对于 $A \overset{r}{\circ} B$ 的完全重构,同时 S_r 是具有最小集合势的采样集合。

2 广义灰值形态变换及形态采样方法

假设 $f(x), g(x)$ 是 Z^n 空间中的灰值图像,在以上有关广义二值形态变换已有结论的基础上,将其扩展到灰值图像的情形,得出以下有关广义灰值形态变换的基本概念。

定义3 结构元素 $g(x)$ 对于灰值图像 $f(x) (x \in Z^n)$,强度系数为 $r \in [0, 1]$ 的广义灰值形态腐蚀与形态膨胀变换分别定义为:

$$(f \overset{r}{\ominus} g)(x) = \text{Sup}\{y: \forall (x, y) \in (U(f) \ominus U(g)), x \in Z^n\} \quad (9)$$

$$(f \overset{r}{\oplus} g)(x) = \text{Sup}\{y: \forall (x, y) \in (U(f) \oplus U(g)), x \in Z^n\} \quad (10)$$

其中 $U(f) = \{(x, y): y \leq f(x)\} \subseteq Z^{n+1}$ 为灰值图像 $f(x)$ 的本影^[6]。

利用通常的灰值形态变换^[7]形式,广义形态腐蚀还可以等价地表示成为式(11)所示的形式:

$$(f \overset{r}{\ominus} g)(x) = \begin{cases} \inf_{y \in \text{sup}(g)+x} \{f(y) - g(y-x)\} & \text{if Card}\{[U(f)]^c \cap [U(g)]_{(x,y)}\} = 0 \\ \sup_{y \in [U(f)]^c \cap [U(g)]_{(x,y)} \neq \emptyset} \{f(y) - g(y-x)\} & \text{if Card}\{[U(f)]^c \cap [U(g)]_{(x,y)}\} \leq \lceil r \text{Card}\{U(g)\} \rceil \end{cases} \quad (11)$$

定义 4 结构元素 $g(x)$ 对于灰值图像 $f(x) (x \in Z^n)$, 强度系数为 $r, q \in [0, 1]$ 的广义灰值形态开、闭变换分别定义为:

$$f \overset{r}{\ominus}_q g = (f \overset{r}{\ominus} g) \overset{q}{\oplus} g \quad (12)$$

$$f \overset{r}{\otimes}_q g = (f \overset{r}{\otimes} g) \overset{q}{\ominus} g$$

将 $q = 0$ 时的广义灰值形态开、闭变换分别记为 $\overset{r}{\ominus}$ 和 $\overset{r}{\otimes}$:

$$f \overset{r}{\ominus} g = (f \overset{r}{\ominus} g) \oplus g \quad (13)$$

$$f \overset{r}{\otimes} g = (f \overset{r}{\otimes} g) \ominus g$$

如果 $g(x)$ 为平坦结构^[1]元素, 设其为 B , 则相应的广义灰值形态腐蚀和膨胀具有下面的形式:

$$(f \overset{r}{\ominus} B)(x) = \text{Sup}\{y: \forall (x, y) \in (U(f) \overset{r}{\ominus} B), x \in Z^n\}$$

$$(f \overset{r}{\otimes} B)(x) = \text{Sup}\{y: \forall (x, y) \in (U(f) \overset{r}{\otimes} B), x \in Z^n\}$$

$$f \overset{r}{\ominus}_q B = (f \overset{r}{\ominus} B) \overset{q}{\oplus} B \quad f \overset{r}{\otimes}_q B = (f \overset{r}{\otimes} B) \overset{q}{\ominus} B$$

$$f \overset{r}{\ominus} B = (f \overset{r}{\ominus} B) \oplus B \quad f \overset{r}{\otimes} B = (f \overset{r}{\otimes} B) \ominus B$$

利用广义灰值形态变换(9) ~ (13) 对于灰值图像 $f(x)$ 通过平坦结构元素 B 进行形态采样的目的在于寻求采样图像 $\zeta(x)$, 使之在尽可能多地包含非背景的像素点的情况下满足条件:

$$\zeta(x) = \{\zeta(x) > f_{\min}(x): (\zeta \oplus B)(x) = (f \overset{r}{\otimes} B)(x)\} \quad (14)$$

其中 $f_{\min}(x)$ 为图像 $f(x)$ 的最小灰值, 具有最小灰值的区域被视为图像背景。

定义函数:

$$\lambda(x) = \text{Card}\{y: (f \overset{r}{\ominus} B)(y) = (f \overset{r}{\otimes} B)(x), y \in \check{B}_x\}$$

则有下面的性质成立:

$$\text{性质 1 设: } \zeta(x) = \begin{cases} f_{\min} & x = y \\ (f \overset{r}{\ominus} B)(x) & \text{else} \end{cases}$$

如果对于 $(f \overset{r}{\otimes} B)(x) = (f \overset{r}{\ominus} B)(y), y \in \check{B}_x$, 有 $\lambda(x) \geq 2$, 则 $\zeta \oplus B = f \overset{r}{\otimes} B$ 。

证明 由 $(f \overset{r}{\otimes} B)(x) = \text{Sup}\{(f \overset{r}{\ominus} B)(y): y \in \check{B}_x\}$, 对于点 $z \notin \check{B}_x$, 有 $(\zeta \oplus B)(x) = (f \overset{r}{\otimes} B)(x)$, 如果 $z \in \check{B}_x$, 则有 $x \in B_z$; 而条件 $\lambda(x) \geq 2$ 及 $(f \overset{r}{\otimes} B)(x) = (f \overset{r}{\ominus} B)(y)$ 表明至少存在一个点 $w \in \check{B}_x$ 且 $w \neq z$, 使得 $(f \overset{r}{\otimes} B)(x) = (f \overset{r}{\ominus} B)(w)$, 因此有:

$$\begin{aligned} (f \overset{r}{\otimes} B)(x) &= \text{Sup}\{(f \overset{r}{\ominus} B)(y): y \in \check{B}_x\} \\ &= \text{Sup}\{(f \overset{r}{\ominus} B)(y), (f \overset{r}{\ominus} B)(w), (f \overset{r}{\ominus} B)(z): y \in \check{B}_x, z \neq y, y \neq w\} \\ &= \text{Sup}\{f_{\min}, (f \overset{r}{\ominus} B)(w), (f \overset{r}{\ominus} B)(y): y \in \check{B}_x, z \neq y, y \neq w\} \\ &= (\zeta \oplus B)(x) \end{aligned}$$

由性质 1 可得出灰值图像的形态采样算法: 如果对于满

足条件 $(f \overset{r}{\otimes} B)(x) = (f \overset{r}{\ominus} B)(y)$ 的每一点 $x \in B_y$ 都有 $\lambda(x) \geq 2$, 则取采样图像 $\zeta(y) = f_{\min}$, 且将 $\lambda(x)$ 减去 1, 否则将结构元素平移至下一个扫描点(点扫描方式采取从左到右, 从上到下的方法), 直到扫描完所有 $f \overset{r}{\otimes} B$ 中的点, 最后还保留下来的即是采样图像 $\zeta(x)$, 其采样过程可以描述成为下面的形式:

$$\zeta \leftarrow f \overset{r}{\otimes} B \longrightarrow \begin{cases} \zeta(y) = f_{\min} & \lambda(x) \geq 2 \\ \lambda(x) \leftarrow \lambda(x) - 1 \end{cases} \quad (15)$$

3 广义形态采样

基于以上所描述的形态采样方法, 当采样结构元素尺寸越大时, 采样图像越稀疏; 反之, 具有较小尺寸的采样结构元素将使得对于原始图像的重建结果越精确。为使问题简化起见, 取一组圆形采样结构元素序列 $\{B_k\}_1^m: B_1, B_2, \dots, B_m$, 其中 $B_1 = \{(0, 0)\}$, B_m 是使得 $A \overset{r}{\ominus} B_m \neq \emptyset$ 的最大元素, 且 B_k 的尺寸是 B_{k+1} 一半。用 $\{B_k\}_1^m$ 对目标图像 A 进行系列采样, 得采样图像 $\{S_n: 1 \leq n \leq m\}$, 其中 $S_1 = A$, 且 $S_m \oplus B_m = A \overset{r}{\ominus} B_m \subseteq A$, 而由 $S_m \oplus B_m \approx A$ 可以获得目标图像 A 的近似表示, 在这种近似表示方式中, 采样图像 S_m 中所缺少的目标图像 A 的细节信息可以由前 $(m-1)$ 个采样图像 $\{S_n: 1 \leq n \leq m-1\}$ 中的某些成分 J_n 所提供, 这里:

$$J_n = \begin{cases} S_n \setminus (S_{n+1} \oplus B_{n+1} \overset{r}{\ominus} B_n) & 1 \leq n \leq m-1 \\ S_m & n = m \end{cases} \quad (16)$$

包含在 J_n 中的采样点较采样集合 S_n 更为稀疏, 并且可以证明以下两个性质是正确的。

性质 2 如果存在某个 k 值, 使得 $A = S_k \oplus B_k$, 则当 $n < k$ 时, 有 $J_n = \emptyset$ 。

证明 由 $S_n \oplus B_n = A \overset{r}{\ominus} B_n$, 故有 $S_n \subseteq A \overset{r}{\ominus} B_n, 1 \leq n \leq m$ 。如果存在某个 k 值, 使得 $A = S_k \oplus B_k$, 则当 $n < k$ 时:

$$\begin{aligned} J_{k-1} &= S_{k-1} \setminus (S_k \oplus B_k \overset{r}{\ominus} B_{k-1}) \\ &= S_{k-1} \setminus ((A \overset{r}{\ominus} B_k) \overset{r}{\ominus} B_{k-1}) \\ &= S_{k-1} \setminus A \overset{r}{\ominus} B_{k-1} \\ &= \emptyset \end{aligned}$$

对于其他的 $n < k$, 同理可证 $J_n = \emptyset, n < k$ 。

基于方法(14) ~ (16), 由 J_n 可以获得对于目标图像 A 的重构, 并且可以证明下面的性质是成立的:

$$\text{性质 3 } A \overset{r}{\ominus} B_n = \bigcup_{k=n}^m (J_k \oplus B_k)$$

在性质 3 中, 若取 $n = 1$, 则有 $A = A \overset{r}{\ominus} B_n$, 即 $A = \bigcup_{k=1}^m (J_k \oplus B_k)$ 可以由 J_k 通过结构元素序列 $B_k (1 \leq k \leq m)$ 的系列膨胀完全重构。如果将重构中具有较小尺寸的结构元素去掉, 则可以得到 A 的近似重构图像。

为了对所提出的广义形态变换方法进行说明, 以下给出了在对目标图像进行形态采样基础上, 对图像进行重构的实验测试结果。图 1 和图 2 分别是基于式(8) 和式(16) 在 $r = 0$ 和 $r = 1$ 时, 各尺度形态采样序列 J_n (图 1 和图 2 中的(a) ~ (e)) 及其重建图像(图 1 和图 2 中的(f)) 和相对于原始图像

的残差图像(图 1 和图 2 中的(g))。表 1 给出图 1 和图 2 中的有损采样重构图像的压缩比率(Bit Rate)、均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)及图像逼真度(NMSE)数据的比较结果。从实验结果看, $r = 0$ 时的各种指标都较 $r = 1$ 时要

好,但是从重构图像的整体信息的保留情况看, $r = 1$ 时的重构图像要较 $r = 0$ 时更加完善,且各指标的差距并不是太大。因此,可以说广义形态变换作为一种图像的有损采样方法是具有一定研究价值的。

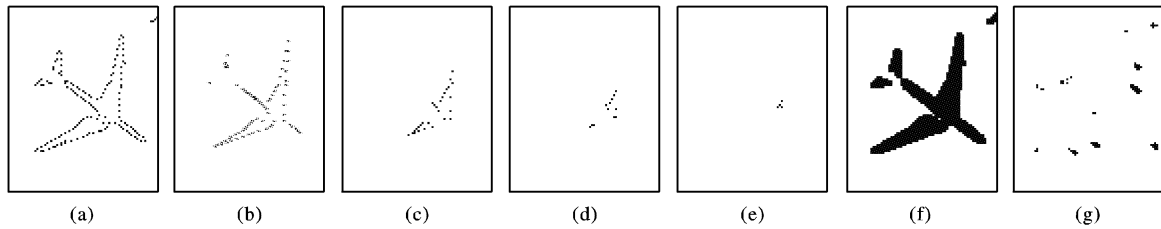


图 1 $r = 0$ 时的形态采样序列((a)~(e))及压缩重建图像(f)和残差图像(g)

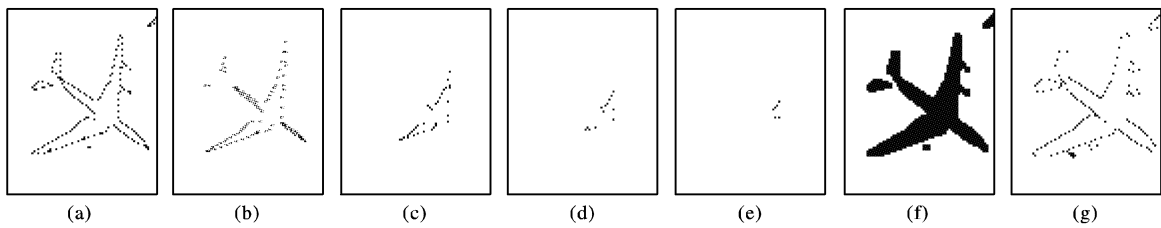


图 2 $r = 1$ 时的形态采样序列((a)~(e))及重建图像(f)和残差图像(g)

表 1 基于形态采样方法的相关数据对照

	有损采样	有损采样
Bit Rate	0.2283	0.2805
MSE	0.0107	0.0200
PSNR	25.7334	23.0033
NMSE	0.9326	0.8736

4 结语

广义形态变换理论的建立对于发展和扩展形态分析的理论和应用方法具有重要的意义。文中通过对形态算子理论的推广,研究了更具一般性的形态分析方法及其变换性质,并以此为基础提出了基于广义形态变换的形态采样方法,其理论及实验结果表明该采样方法能保留图像的重要信息,实现由采样图像有损重构形态滤波图像,采样图像本身则是实现对原始图像有损重构的最小图像集合。

参考文献:

- [1] HARAICKRM, ZHUANG XH, LIN C, *et al.* The Digital Morphological Sampling Theorem [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech

and Signal Processing, 1989, 37 (12): 2067 – 2090.

- [2] HEIJMANS HJAM. Morphological Image Operators [M]. Boston, Massachusetts: Academic Press, 1994. 71 – 117.
- [3] WANG DM, LABIT C. A Lossless Morphological Sampling Scheme For Segmented Image Compression [A]. IEEE Transactions, Proceedings in International Conference on Image Processing [C]. 1995, vol 1. 23 – 26.
- [4] AGAM G, DINSTEIN I. Adaptive Directional Morphology with Application to Document Analysis [A]. Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing [C]. Kluwer Academic Publishers, 1996. 401 – 408.
- [5] KRESCH R, MALAH D. New Morphological Skeleton Properties Leading to Its Efficient Coding [A]. IEEE Workshop on Non – Linear Signal and Image Processing [C]. Neos Marmaras, Halkidiki, Greece, 1995. 995 – 999.
- [6] MARAGOS PA, SCHAFER RW. Morphological Skeleton Representation and Coding of Binary Image [A]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing [C]. 1986, vol 34. 1128 – 1244.
- [7] SALEMBIER P. Morphological Multiscale Segmentation for Image Coding [J]. Signal Processing, 1994, 38(3): 359 – 386.

(上接第 1832 页)

得的标记概率上乘上一个放大系数以增大该路由器及其后续路由器地址信息被受害者接受的概率。由于我们采取了在自治域边界初始化的策略,杜绝了伪造标记和距离信息的干扰,可以显著地降低误报率。当然,上游拓扑图的精确度也是导致误报的重要因素,但是 AMS 也面临相同的问题,因此在自治域中要保持路由的相对稳定或者及时更新上游拓扑图可以降低误报率。

5 结语

现有的大多数 PPM 攻击追踪方案往往基于过于理想的假设条件,削弱了实用性。针对经典的 AMS 方案进行分析,紧缩追踪的假设条件,着重针对其存在的弱收敛性、不支持非完全部属、易受伪造标记和距离信息干扰等问题进行改进。改进方案采用非固定的标记概率改善了 AMS 重构的弱收敛

性,而且具有很好的抗伪造标记攻击和支持渐进部署的能力,具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] SAVAGE S, WETHERALL D, KARLIN A, *et al.* Practical Network Support for IP Traceback [A]. Proceeding of ACM SIGCOMM [C]. Stockholm, Sweden, 2000. 295 – 306.
- [2] SONG DX, PERRIG A. Advanced and Authenticated Marking Schemes for IP Traceback [A]. Proceeding of IEEE Computer and Communications Societies [C]. Stockholm, Sweden, 2001. 878 – 886.
- [3] 李德全, 徐一丁, 苏璞睿, 等. IP 追踪中的自适应包标记 [J]. 电子学报, 2004, 32(8): 1334 – 1337.
- [4] PENG T, LECKIE C, KOTAGIRI R. Adjusted Probabilistic Packet Marking for IP Traceback [A]. Proceeding of IFIP Networking 2002 [C]. Pisa, Italy, 2002. 697 – 708.