

# 数学形态变换的光学实时实现及其应用\*

张建明 路明哲 刘颖 方志良 刘福来 母国光

(南开大学现代光学研究所, 天津, 300071)

**摘要** 基于多焦点透镜的成像关系和光学实时器件, 提出一种紧凑的非相干光学处理系统以实现实时数学形态变换. 用光学方法实现了形态学中膨胀、腐蚀、开和闭等基本运算, 并用这套光学系统对具有胡椒盐 (Pepper and salt) 噪声的输入图像进行处理, 得到无噪声干扰的图像输出. 还给出了指纹经过系统骨架化的实验结果.

**关键词** 非相干光学系统, 实时形态变换, 骨架化.

## 引言

对于图像处理和识别, 数学形态学是一种可行的新方法. 它的基本运算主要是在输入图像与结构元 (Structure Element) 之间进行膨胀和腐蚀及两种运算交替运用形成的开和闭运算. 将形态运算与其他光学方法相结合, 使数学形态学具有很强的图像处理能力. 例如: 图像的边缘增强和探测、图像相减、图像形状的特征、图像平滑和识别、骨架化和编码等<sup>[1]</sup>.

光学的巨平行和高速特性使光学实现数学形态变换具有很大的潜力, 特别是随着光学的发展和实时器件的出现, 光学形态处理系统趋向实时化, 更易于实际信息处理应用. 尽管形态运算在数学上定义为集合运算, 但是实质上形态学中的基本运算即膨胀和腐蚀可以用输入图像与结构元之间的卷积运算和简单取阈来实现, 膨胀采用低阈值 (接近于 0), 腐蚀采用高阈值. 基于这些原理, 提出一些光学系统实现膨胀和腐蚀运算<sup>[2~4]</sup>. O'Neill 和 Rhodes<sup>[2]</sup>利用离焦成像系统的点扩散函数产生进行形态处理的结构元, 这种技术将降低光学处理系统的空间带宽积. Casasent 和 Botha<sup>[3]</sup>用基于符号替换的光学级联相关系统实现形态处理, 这种系统用傅里叶全息滤波器产生结构元, 由于傅里叶谱要求大的动态范围, 造成全息滤波器不均匀性, 使得取阈困难, 引起输出误差. Li 等<sup>[4]</sup>提出用投影 (Shadow-casting) 系统进行形态处理, 结构元由二维可控电光源阵列产生, 投影法的缺点是由于探测器不在成像平面上使图像分辨率不高.

本文提出一种能实时实现形态变换的可编程非相干光学处理系统. 与其它系统相比, 该系统具有取阈方便、结构简单、光能利用率高和分辨率高等特点. 系统实现膨胀和腐蚀运算时, 系统阈值可保持不变, 只需几次迭代, 就可以实现各种形态运算. 本文给出了系

\* 国家自然科学基金资助项目

本文 1994 年 3 月 21 日收到, 修改稿 1994 年 4 月 26 日收到

统设计方法和实验结果, 实验证实了本文所提出的光学系统能很好地实现形态学中的膨胀、腐蚀、开和闭运算, 并且给出了对实时输入具有噪声的简单图像进行处理及指纹骨架化的结果.

## 1 二值化图像形态学

当数学形态学应用到二值化图像处理时, 图像被定义为二维坐标集合. 形态学分析的代数基础包括两个基本集合运算, 即膨胀和腐蚀. 膨胀 (若结构元是对称的, 则膨胀即是 Minkowski 加法) 定义为

$$A \oplus B = \bigcup_{bi \in B} A_{bi}, \quad (1)$$

其中  $A$  为输入图像,  $B$  为结构元, 符号“ $\cup$ ”是集合论中“并”记号,  $A_{bi}$  是  $A$  平移矢量  $bi$  后得到的图像. 结构元相当于一块模板, 膨胀就是将图像中每一个值为 1 的像素用模板替换, 然后把所有模板求并. 这相当于光学中图像与用结构元制作的滤波器作卷积, 通过这种运算可以将原来图像中的“小孔”填满. 腐蚀定义为

$$A \ominus B = \bigcap_{bi \in \check{B}} A_{bi}, \quad (2)$$

其中  $\ominus$  符号表示腐蚀, “ $\cap$ ”是集合论中的“交”记号,  $\check{B}$  是  $B$  的反射, 即

$$\check{B} = \{-b | b \in B\}. \quad (3)$$

如果选取对称结构元, 则  $\check{B} = B$ . 腐蚀是比膨胀更有用的运算, 因为它能判断输入图像中是否有结构元的特征, 可用于模式识别. 实现腐蚀的方法是: 将结构元在输入图像上平移并进行比较, 如果结构元是图像的子集, 则结构元中心处的图像像素取为 1, 否则取为 0. 腐蚀能使图像“缩小”, 并能去掉图像中比结构元小的部分. 去掉部分的大小和形状主要取决于研究者所选取的结构元.

交替运用膨胀和腐蚀就能得到开和闭运算. 开运算定义为对输入图像先进行腐蚀运算, 然后是膨胀运算, 即

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B. \quad (4)$$

闭运算定义为对输入图像先进行膨胀运算, 然后进行腐蚀运算, 即

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B. \quad (5)$$

用结构元  $B$  对图像进行开运算可以理解为把结构元在图像上移动, 记录图像中与结构元完全相同的部分, 利用开运算可以消除图像中的离散噪声和毛刺, 对图像进行平滑, 如果此时再从  $A$  中减去  $A \circ B$ , 就能得到  $A$  的“毛刺”部分. 同样, 用结构元对图像进行闭运算可以消除图像的内部噪声. 在形态学理论中, 腐蚀运算可以用膨胀及图像反射和集合取补来实现, 这样可以简化光学系统的复杂性, 同一系统可以实现膨胀和腐蚀运算, 其原理为

$$A \ominus B = (A^c \oplus B)^c. \quad (6)$$

## 2 光学形态处理系统的结构

作为输入图像的预处理系统, 形态变换系统应该具有简单的结构, 足够高的分辨率和运算速度. 考虑到这些因素, 本文提出了一种紧凑的非相干光学处理系统来实现数学形态变换 (参见图 1). 腐蚀运算通过膨胀运算来实现, 这样不仅可以缩小系统的体积, 而且可以使取阈操作简单, 因为如果保持光源的光强不变, 则膨胀和腐蚀运算的阈值也不变. 尽管我们对成像透镜进行了特殊的处理, 但是系统仍具有较高的空间带宽积. 在文献 [2] 和 [6] 中利用离焦来实现形态变换, 输出图像不清晰, 降低了系统的分辨率. 而在本文中, 探测器放置在透镜的像平面上, 可以得到清晰的像. 系统中没有掩膜板<sup>[6]</sup>, 提高了系统的光强利用率.

本文提出的光学系统能够直接或经过数次迭代实现形态学基本运算, 例如: 膨胀、腐蚀、开和闭运算. 系统充分利用了光的高平行度和高速性. 透射型液晶显示板 (LCD) 作为实时输入器件, 显示输入图像和经过几次迭代处理后的中间图像, 液晶显示板是空间光调制器的一种形式, 它采用薄膜晶体管 (TFT) 矩阵驱动的方式, 具有高分辨率、高对比度、反应速度快、易于编程和可用普通白光光源进行光读出的优越性.  $S$  是白光光源.  $L_1$  是形态变换器件, 在焦平面上, 它具有 5 个相互之间间隔相等的焦点. 尽管目前有微透镜阵列产品, 但是, 由于每个小透镜之间间隔太大和通过每个小透镜的光能太弱, 所以本系统中未使用微透镜阵列来形成结构元. 我们利用一个消像差很好的胶合透镜, 把它分割成 5 个通过光能相等的部分 (当然, 透镜可以切割成其它形状, 形成其它的结构元). 然后, 将透镜的 5 个部分粘合在一起, 粘合成的透镜与原来的透镜相比, 透镜的 5 个部分之间有微小的相对位移, 形成具有 5 个焦点的透镜, 见图 2. 如果在输入平面上有一个像元输入, 那么, 在像平面上能得到 5 个清晰的相邻的像元 (参见图 3), 也就是系统所采用的结构元. 这一过程被称为形态学中的膨胀运算. 输出图像由放置在像平面上的 CCD 摄像机接

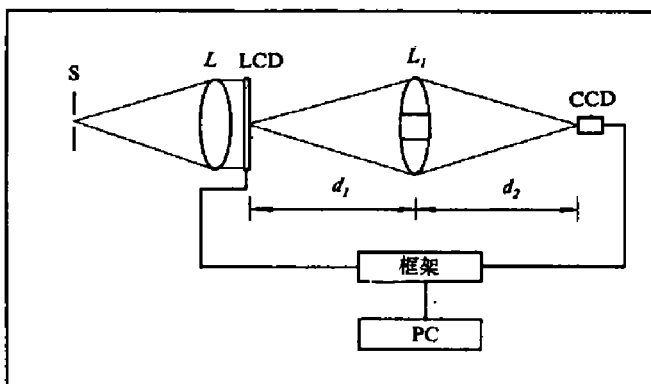


图 1 光学形态处理器的系统结构  
Fig. 1 Systematic architecture of optical morphological processor

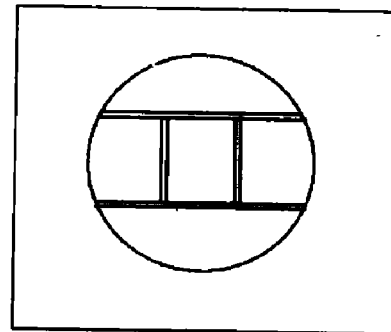


图 2 具有 4-邻域结构元的透镜  
Fig. 2 The lens with 4-neighbor structuring element

收, 并把信号传输到计算机进行取阈, 由取阈后的信号驱动液晶显示板, 把图像写在液晶显示板上, 利用同一系统进行进一步的形态运算. 由式 (6) 可知, 腐蚀运算可以通过对比度反转和膨胀运算来实现, 参见图 4. 腐蚀运算就是把结构元 (例如 4-邻域结构元) 转换成一个像元, 如图 4 所示, 腐蚀可以用“对比度反转-膨胀-对比度反转”三步运算来实现. 由于对比度反转用液晶显示板很容易实现, 因此, 能实现膨胀运算的成像系统同样可以实现腐蚀运算.

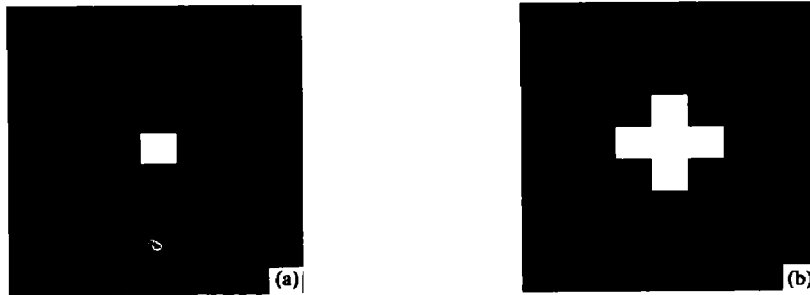


图 3 用 4-邻域的结构元进行光学形态膨胀的实验结果 (a) 输入; (b) 输出  
Fig. 3 Experimental results of optical morphological dilation using a 4-neighbor structuring element

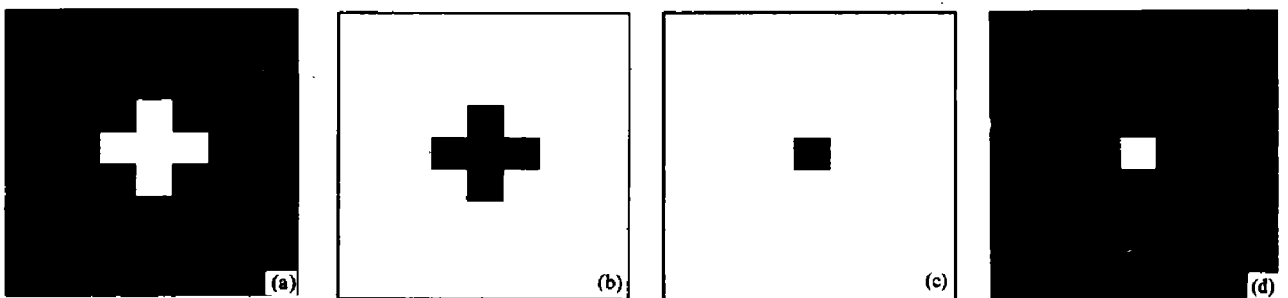


图 4 用 4-邻域的结构元进行光学形态腐蚀的实验结果  
(a)、(c) 输入, (b)、(d) 对比度反转输出  
Fig. 4 Experimental results of optical morphological erosion using a 4-neighbor structuring element

既然系统中已经建立了一个能实现基本形态运算的循环, 那么, 更复杂的形态处理 (例如开运算和闭运算) 就可以通过实现一系列膨胀和腐蚀运算来完成. 另外, 所有需要的运算, 包括对比度反转、取阈和反馈, 都可以通过计算机控制来完成.

### 3 实验结果

本文提出的结构元的大小是可以改变的, 只要改变透镜切割时切去的厚度. 如果切去的厚度改变了, 则透镜各部分之间的相对距离也随之改变, 通过透镜形成的结构元的大小也将改变. 设  $x$  为切去的厚度, 输入像元的大小为  $d$ , 那么在像平面上输出 4-邻域结构元

中每个像元的大小为

$$D = \frac{x \cdot d}{d - x}, \quad (d > x) \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 切割透镜时, 切去的厚度  $x$  必须小于输入像元的尺寸  $d$ , 才能得到系统的结构元. 另外, 可以注意到  $D$  仅与  $x$  和  $d$  有关, 而与所使用的透镜焦距无关.

形态处理算法中, 应用最多、最有用的算法之一是开和闭运算. 作为演示实验, 实验中选取了比较简单的图像作为输入, 以此表明系统的性能和形态变换去噪声的能力. 如图 5 所示, 在输入图像中有胡椒盐噪声 (Pepper and Salt). 先对图像进行腐蚀运算, 去除图像中的盐噪声 (Salt Noise), 然后进行膨胀运算, 恢复图像的大小但没有盐噪声. 对图像继续用膨胀运算进行处理, 去除胡椒噪声, 最后进行腐蚀运算, 恢复图像的大小. 此时的图像与原图相比, 已没有胡椒盐噪声. 图 5 是上述图像处理的整个过程.

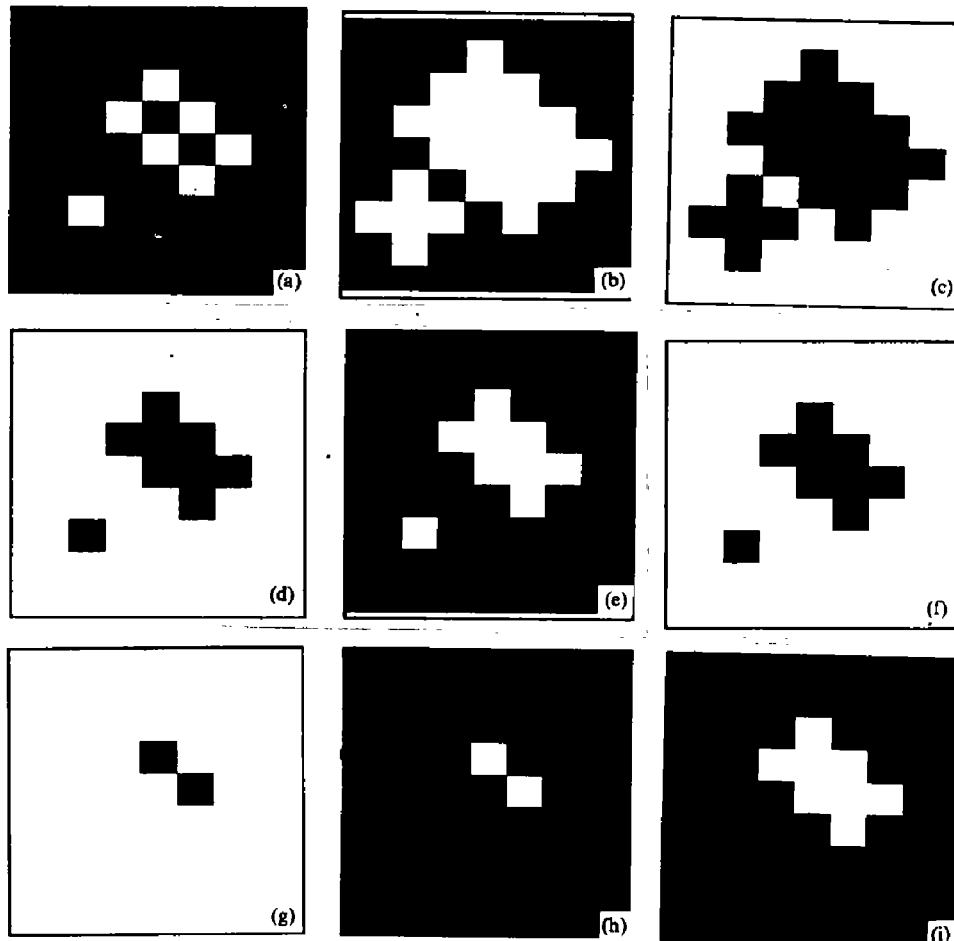


图 5 具有噪声的输入图像通过光学形态处理系统处理后得到无噪声的输出图像

(a→b→c→d→e 对输入图像进行形态闭运算, 得到无内部噪声的图像 e;  
e→f→g→h→i 对输入图像进行形态开运算, 得到无外部孤立噪声的图像 i)

Fig. 5 Input image with noise processed with the optical morphological system and the noiseless output obtained

(a→b→c→d→e morphological opening, removing pepper noise;

e→f→g→h→i morphological closing, removing salt noise)

形态变换的另一个应用是图像的骨架化. 图像的骨架是进行图像模式识别的十分有用的特征, 用光学形态变换的腐蚀和开运算的迭代过程可以实现图像的骨架化. 其实现算法包括三个步骤: 第一, 先对图像  $X$  进行开运算, 然后从图像  $X$  中减去图像经过开运算的结果; 第二, 用结构元  $B$  对图像进行腐蚀运算, 产生  $X - B$ , 再对腐蚀图像进行开运算, 最后从腐蚀图像中减去经过开运算的图像, 该步骤循环执行, 直到图像消失; 第三, 把每次迭代相减的结果求并集, 得到图像的骨架. 设图像  $X$  的骨架为  $\text{SKEL}(X)$ , 则有

$$\text{SKEL}(X) = \bigcup_{0 \leq n \leq N} S_n(X), \quad (8)$$

其中

$$S_n(X) = (X \ominus nB) - [(X \ominus (n+1)B) \oplus B], \quad n=1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

$$N = \max\{k | X \ominus kB \neq 0\}$$

实验中选择指纹作为输入图像. 这样做可达到两个目的: 一是经过系统骨架化的指纹, 简单而具有指纹的特征, 以便于指纹识别; 其次是对指纹进行后处理时, 可以用经骨架化的指纹代替原来的指纹, 达到降低存储容量的目的. 图 6 是输入指纹骨架化的结果, 在骨架化的指纹周围有一些孤立的像元, 那是由输入指纹的边缘不光滑及结构元的形状造成的.

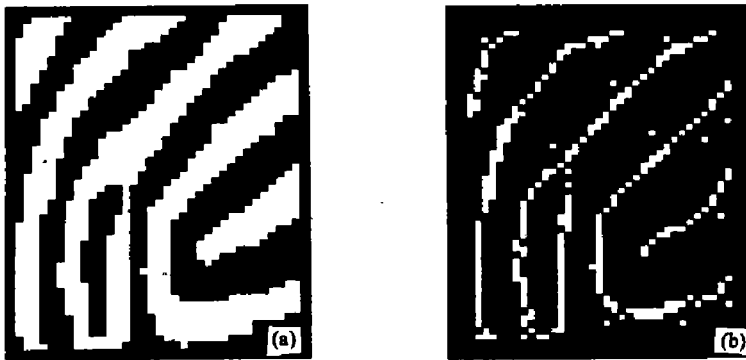


图 6 指纹细化的实验结果

(a) 输入指纹; (b) 细化指纹

Fig. 6 Skeletonization of fingerprint

(a) Input fingerprint; (b) Skeletonization of fingerprint

## 4 结论

我们提出了一种全新的可编程的非相干光学形态处理系统, 它利用能成多个像的多焦点的透镜, 实现二值和灰值图像的形态变换, 具有高速平行处理的能力、高的光能利用率和高分辨率等特点. 实验表明系统能实现形态学中的基本运算膨胀和腐蚀, 能对输入的二值图像进行处理, 并能应用于图像的骨架化. 引入阈值分解可将这种二值形态处理器推广到灰值图像处理.

## 参考文献

- 1 Maragos P. *Opt. Eng.*, 1987,26(7):623~632
- 2 O'Neill KS, Rhodes WT. *Hybrid Image Processing*, eds. DP Casasent, A Tescheer, *SPIE*, 1986,638:41~44
- 3 Botha EC, Casasent DP. *Opt. Eng.*, 1989,28(5):501~505
- 4 Li Y, Kostrzewski A, Kim DH, et al. *Opt. Lett.*, 1989,14:981~983
- 5 Fitch JP, Coyle EJ, Gallagher NC, Jr. *IEEE Trans. Circ. Syst.*, 1985,CAS-32(5):445~450
- 6 袁石夫, 陈历学, 孙芳魁, 等. 光电混合形态变换图像处理器在模式识别中的应用, 1991 光电子器件与集成技术年会论文集, 北京: 清华大学出版社, 1991. 684~688

## OPTICAL PROCESSOR FOR REAL-TIME MORPHOLOGICAL TRANSFORMS AND ITS APPLICATIONS\*

Zhang Jianming Lu Mingzhe Liu Ying  
Fang Zhiliang Liu Fulai Mu Guoguang

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract** A compact incoherent optical processor based on multifocus lenses and real-time devices is proposed to implement real-time optical morphological transforms. Dilation, erosion, opening and closing, which are the basic operations in morphology, are performed optically. Inputs with pepper and salt noise are processed through this processor and noiseless outputs are obtained. The experimental results of the fingerprint skeletonization are also given.

**Key words** incoherent optical processor, real-time morphological transforms, skeletonization.

---

\*The project supported by the National Natural Science Foundation of China