

文章编号: 0258-7025(2001)10-0921-04

# 利用单个电子捕获器件光学实现 并行模糊逻辑

景红梅

(北京师范大学物理系 北京 100875)

刘立人

(中国科学院上海光机所信息光学实验室 上海 201800)

**提要** 提出利用单个电子捕获(ET)器件及对输入模糊逻辑变量进行面积编码的方法实现光学并行模糊逻辑操作。本方案采用单行编码方式,所以输出图像的像素行间没有间隙,图像依然是完整的。基于电子捕获器件的存储和擦除特性,两个模糊图像间的所有模糊逻辑函数都可以通过对输入编程来实现。此系统不需要取阈装置、透镜阵列和解码板,因而具有高速和大信息量的特点,且可紧凑化。最后给出实验结果。

**关键词** 光学模糊逻辑,光计算,空间面积编码

中图分类号 O 438 文献标识码 A

## Optical Implementation of Parallel Fuzzy Logic Using a Single Electron Trapping Device

JING Hong-mei<sup>1</sup> LIU Li-ren<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875

<sup>2</sup>Optical Information Lab, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** An optical system using a single electron trapping(ET) device with area encoding of input fuzzy variables and negations is proposed to perform fuzzy logic operations in parallel. In this scheme, each encoding cell is only composed of one encoding cell so that the resultant pattern is still the image in which there is no space between any two pixel rows. Based on the storage and erasure characteristics of the ET device, all of the fuzzy logical functions of two images can be implemented in parallel and spatial-invariant by programming the illumination form of data arrays. No thresholding device, lens array and decoding mask is needed, therefore, this system exhibits high operation speed and large information throughput. The system can be compact. The experimental results are also given.

**Key words** optical fuzzy logic, optical computing, spatial area encoding

从模糊逻辑产生以来,已有很多人尝试用简单的光学方法实现并行模糊逻辑<sup>[1~10]</sup>。自从 Liu<sup>[1]</sup>提出利用透镜列阵多重成像技术的光学模糊逻辑处理器后,相继出现了很多光学实现模糊逻辑的其他方法<sup>[2~10]</sup>。大部分系统都是基于阴影投影原理<sup>[11]</sup>和空间编码原理<sup>[3~7,10]</sup>。为了实现模糊逻辑最大(或最小)操作,这些光学系统或需要取阈装置或需要解码板。这些取阈装置、解码板和复杂的编码模式使得系统很复杂。

由于电子捕获(ET)材料具有高分辨率、纳秒级响

应时间、四个量级的动态范围和敏感性强等特性,所以被广泛用于三维存储<sup>[12]</sup>、神经网络中的自适应学习<sup>[13]</sup>、神经分支响应的光学实现<sup>[14]</sup>、并行布尔逻辑操作<sup>[15~17]</sup>等应用中。然而,到目前为止,它还没有在模糊逻辑中得到应用。

本文提出利用单个电子捕获器件及对输入模糊逻辑变量进行面积编码的方法实现光学并行模糊逻辑操作。

### 1 模糊变量的面积编码方案

本文采用面积编码法对两个输入模糊变量  $x$  和  $y$  及它们的补  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  进行编码,如图 1 所示,矩形编码细胞的阴影部分是不透明的,白的部分是透明的。编码细胞的形状也可选为方形。如果整个细胞的宽度是  $a$ ,则透明部分宽度为  $ax$ ,  $ay$ ,  $a(1-x)$  和  $a(1-y)$  的编码细胞分别代表模糊变量  $x$ ,  $y$ ,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$ 。

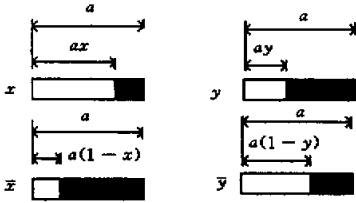


图 1 模糊变量和它们的补面积编码方法

Fig.1 Area-encoding method for fuzzy variables and their complements

McAulay<sup>[13]</sup>和 Jutamulia<sup>[15]</sup>等首先提出电子捕获器件具有非相干处理 OR 和 NOT 布尔逻辑函数的能力。该器件通过用足够使器件饱和的蓝光将二值变量阵列顺序写入器件来执行 OR 操作。当用红外光读出电子捕获器件时,输出显示 OR 操作结果。NOT 操作可用下述过程完成:首先,将均匀蓝光注入 ET 材料,然后用红外照明输入  $A$ ,将  $A$  从 ET 材料中删除。最后用红外光均匀照明产生  $\bar{A}$ 。在以前的工作中<sup>[13,15]</sup>,需要两个 ET 器件才能直接完成几个操作。最近文献<sup>[17]</sup>提出只用一个电子捕获器件就可以完成 16 种布尔逻辑操作的新方法。利用 ET 材料的存储和擦除性质,每个布尔逻辑操作都可以简单地通过不同的照明方式来实现。用两个串行的输入  $A$  和  $B$  可得到 AND 操作。在此基础上,我们利用面积编码的方法实现模糊逻辑的求最大和最小操作。

实现操作  $\text{Min}(x, y)$  时,先将经过编码的模糊变量  $x$  和  $y$  重叠放置,ET 器件紧随其后放置,然后用蓝光照明重叠放置的两输入,最后用红外光读出 ET 器件时,输出显示了实验结果。这个操作表示为  $x \cap y$ 。操作  $\text{Max}(x, y)$  可如下完成 (1) 用蓝光照明编码后的模糊变量  $x$  (2) 紧接着用蓝光照明编码后的模糊变量  $y$ ,当用红外光读出时,输出显示操作结果。这个操作表示为  $x \cup y$ 。执行 0 操作时,用单位 1 的红外光照明 ET 器件,擦除它上面存储的信息,这个操作表示为  $\_$ 。执行 1 操作时,用单位 1 的蓝光照明 ET 器件使其饱和,这个操作表示为  $\square$ 。每次模糊逻辑操作的结果都会存储在电子捕获器件中;所以在每一次模糊逻辑

操作前,需要用单位 1 的红外光擦除其上信息;每次模糊逻辑操作之后,需要用红外光读出。

## 2 利用单个 ET 器件实现模糊逻辑阵列的光学系统

根据上面的考虑,利用面积编码方法和单个 ET 器件来光学实现模糊逻辑阵列。此系统并行实现两个模糊图像  $X$  和  $Y$  间的模糊逻辑操作。在处理前,必须对两个图像进行空间面积编码。

图 2 给出模糊逻辑阵列的光学装置。输入  $X, Y, \bar{X}$  和  $\bar{Y}$  用 4 个空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)表示,它们的编号分别为 1, 2, 3 和 4。空间光调制器有三个状态:全关、全开和显示输入模糊图像。如果模糊逻辑操作包括多个模糊变量,可以用串行更多的空间光调制器来实现。微机控制开关、空间光调制器和 CCD。当开关 1 打开,开关 2 关闭时,只有蓝光可以照明 SLM 来对 ET 器件进行写入;当开关 1 关闭,开关 2 打开时,只有红外光照明 SLM 以擦除 ET 器件上的信息。CCD 探测器只区别二元状态 0 和 1,所以系统具有比较好的抗干扰性。如果需要,中间结果可以反馈回 SLM 或存储在微机中。使用照相机镜头作透镜以使输出的尺寸与 CCD 的敏感区域匹配。其中主要的硬件,如 SLM 和 ET 器件可以堆栈在一起,形成一个紧凑的光学模糊逻辑处理器。

选择适当的照明方式,就可以对两个图像间的模糊逻辑函数进行编程控制。照明方式和相应的模糊逻辑函数如表 1 所示。例如,操作  $\text{Max}(X, Y)$  可由下列过程完成:首先,打开开关 1,关闭开关 2,光源为蓝光;其次,SLM3 显示输入图像  $\bar{X}$ ,其他的 SLM 全开,用蓝

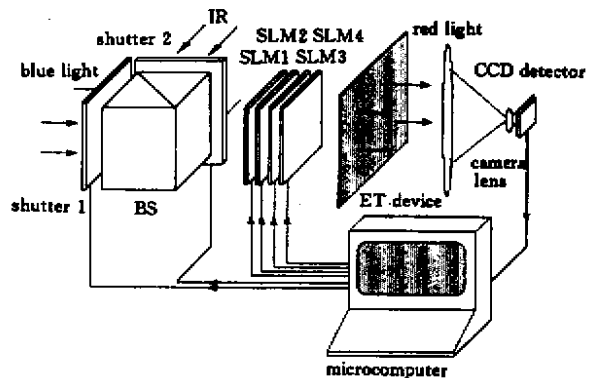


图 2 使用单个 ET 器件的模糊逻辑阵列光学系统

Fig.2 Optical scheme for fuzzy logic using a single ET device

光将输入  $\bar{X}$  写入 ET 器件 , 最后 SLM2 显示图像  $Y$  , 其他的 SLM 全开 , 使输入  $Y$  顺序写入 ET 器件。当用单位 1 的红外光读 ET 器件时( 开关 1 关闭 , 开关 2 打开 , 所有的 SLM 全部打开 ) , 输出照明显示操作结果。其他 13 种操作可用类似方法实现 , 如表 1 所示。

表 1 照明方式和相应的模糊逻辑函数

Table 1 Forms of illumination and the corresponding pattern fuzzy logic function

Mode number	Fuzzy functions	Form of illumination
1	$\text{Min}(X, Y)$	$X \cap Y$
2	$\text{Min}(\bar{X}, \bar{Y})$	$\bar{X} \cap \bar{Y}$
3	$\text{Min}(X, \bar{Y})$	$X \cap \bar{Y}$
4	$\text{Min}(\bar{X}, Y)$	$\bar{X} \cap Y$
5	$\text{Max}(X, Y)$	$X \cup Y$
6	$\text{Max}(\bar{X}, \bar{Y})$	$\bar{X} \cup \bar{Y}$
7	$\text{Max}(X, \bar{Y})$	$X \cup \bar{Y}$
8	$\text{Max}(\bar{X}, Y)$	$\bar{X} \cup Y$
9	$X$	$X$
10	$Y$	$Y$
11	$\bar{X}$	$\bar{X}$
12	$\bar{Y}$	$\bar{Y}$
13	0	—
14	1	$\square$

虽然表 1 中所列的模糊函数简单有限 , 但是作为模糊逻辑初级层 , 它们可通过可循环模式扩展到更一般更复杂的模糊逻辑函数。在这个可循环模式中 , 分解复杂的模糊逻辑操作 , 当得到中间结果时 , 将光信号转化为电信号并存储在控制电子器件中 , 然后在下一个循环中作为输入反馈到空间光调制器上。例如操作  $\text{Max}[\text{Min}(X, Y), \text{Min}(\bar{X}, \bar{Y})]$  可以用下面三个步骤完成 : 首先 , 用表 1 中的模式得到操作  $\text{Min}(X, Y)$  并将其存储在微机中 ; 其次 , 用表 1 中模式 2 得到操作  $\text{Min}(\bar{X}, \bar{Y})$  , 最后将操作结果  $\text{Min}(X, Y)$  和  $\text{Min}(\bar{X}, \bar{Y})$  作为输入图像分别反馈到 SLM1 和 SLM2 , 然后用表 1 中模式 4 得到模糊操作  $\text{Max}[\text{Min}(X, Y), \text{Min}(\bar{X}, \bar{Y})]$  。很明显 , 两个输入图像间更为复杂的模糊逻辑操作可以很容易地实现。

### 3 实 验

实验中所用的 ET 器件由掺 Eu-和 Sm-的 CaS 制

成。膜的厚度约为  $200 \mu\text{m}$ 。每种杂质的基态和激发态存在于带宽为  $-4.5 \text{ eV}$  的主介质中。短波长可见光将电子从基态激发到  $E_u$  的激发态 , 然后移动到  $S_m$  的基态。电子在  $S_m$  的基态停留很长时间。但是 , 红外光的照射使被捕获电子从  $S_m$  的基态激发到  $S_m$  的激发态 , 然后在红外光的照射下 , 电子又转移到  $E_u$  的激发态 , 最后回到  $E_u$  的基态。这表明此器件可用于将光学信息存储为捕获电子。

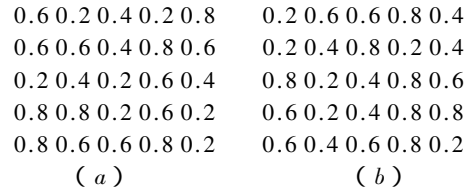


图 3 实验中所用的两个  $5 \times 5$  模糊图像 ( a ) 模糊图像  $X$  ( b ) 模糊图像  $Y$   
Fig.3 Two fuzzy  $5 \times 5$  images  $X$  and  $Y$  used in the experiment  
( a ) the fuzzy image  $X$  ; ( b ) the fuzzy image  $Y$

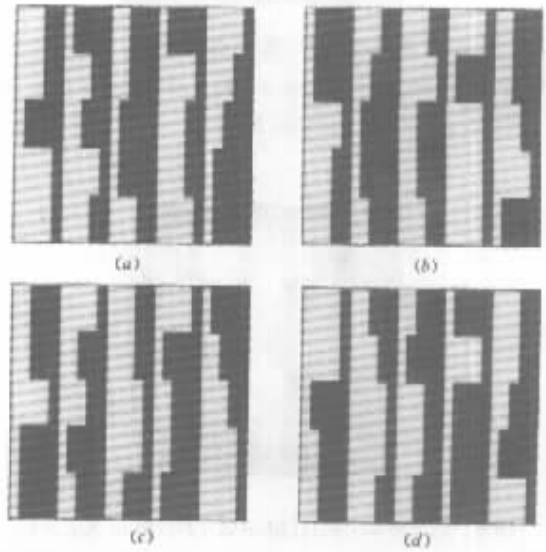


图 4  
( a ) 编码图像  $X$  ( b ) 编码图像  $Y$  ;  
( c ) 编码图像  $\bar{X}$  ( d ) 编码图像  $\bar{Y}$   
Fig.4  
( a ) pattern of coded  $X$  ; ( b ) pattern of coded  $Y$  ;  
( c ) pattern of coded  $\bar{X}$  ; ( d ) pattern of coded  $\bar{Y}$

实验中两个  $5 \times 5$  模糊图像作为输入图像 , 如图 3 ( a ) 和 ( b ) 所示。实验装置如图 2 所示。实验中所用的空间光调制器是液晶显示屏。液晶显示屏有  $720 \times 480$  细胞 , 每个细胞的面积为  $0.33 \text{ mm} \times 0.33 \text{ mm}$ 。所用的透镜是照相机镜头 , 它的焦距为  $135 \text{ mm}$ 。图 4 ( a ) ~ ( d ) 分别给出编码图像  $X, Y, \bar{X}$  和  $\bar{Y}$ 。编码

细胞的宽度和高度都选为  $5\text{ mm}$  ,包含  $15 \times 15$  个 LC 细胞。输入图案的尺寸为  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。4 个 LC 屏之间两两距离为  $50\text{ mm}$  ,LC4 与 ET 器件的距离为  $30\text{ mm}$ 。ET 器件与透镜的距离为  $810\text{ mm}$  ,透镜与 CCD 的距离为  $162\text{ mm}$ 。

图 5 给出实验结果  $\text{Mir}(X, \bar{Y})$  (表 1 中模式 3) ,到此为止 ,我们已经验证了初级结构。为了验证初级结构的扩展结构 ,中间输出通过 CCD—PC—LCD 系统反馈到模糊逻辑装置。图 6 分别给出实验结果  $\text{Max}[\text{Mir}(X, Y), \text{Mir}(X, \bar{Y})]$

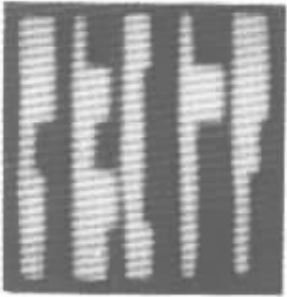


图 5 实验结果 :  $\text{Mir}(X, \bar{Y})$

Fig.5 Photograph of experimental results : the pattern of  $\text{Mir}(X, \bar{Y})$

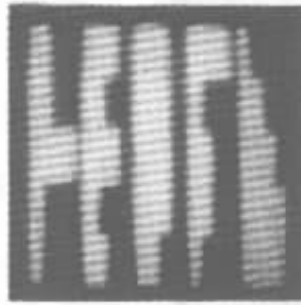


图 6 实验结果 :  $\text{Max}[\text{Mir}(X, Y), \text{Mir}(X, \bar{Y})]$

Fig.6 Photograph of experimental results : the pattern of  $\text{Max}[\text{Mir}(X, Y), \text{Mir}(X, \bar{Y})]$

## 4 结 论

本文提出利用编码技术和单个电子捕获器件的方法光学并行实现模糊逻辑操作。通过对照明方式的编程 ,可以并行实现两个模糊图像间的模糊逻辑函数。不需要取阈装置、透镜阵列和解码板。利用 ET 的好处是 :1) 可以处理大量数据 ,因为 ET 材料的信号处理容量(SBP)可以比现在可得到 SLM 的 SBP 大得多 ;2) 因为输入和输出采用不同的波长执行 ,所以可以得到

特别大的信噪比。系统简单且可编程。它还有一个显著的优点 :只要采用 4 个以上的空间光调制器显示输入图像 ,就可以得到 3 个以上图像的模糊逻辑求最大和求最小操作。主要的硬件可以堆栈形成紧凑的光学模糊逻辑处理器。

## 参 考 文 献

- 1 L. Liu. Optical implementation of parallel fuzzy logic. *Opt. Comm.* ,1989, **73**(3) :183 ~ 187
- 2 S. Lin , I. Kumazawa. A new nonlinear spatial encoding method for cascaded fuzzy logic. *Opt. Comm.* ,1994, **107**(5 6) :461 ~ 470
- 3 S. Lin , I. Kumazawa , S. Zhang. Optical fuzzy image processing based on shadow-casting. *Opt. Comm.* ,1992, **94**(5) :397 ~ 405
- 4 S. Lin , S. Zhang , C. Chen *et al.*. Optical fuzzy logic array using shadow casting. *Microwave Opt. Tech. Lett.* ,1992, **5**(13) :659 ~ 661
- 5 S. Lin , S. Zhang , C. Chen *et al.*. Optical implementation of a spatial-variant fuzzy logic array. *Opt. Comm.* ,1993, **97**(3 A) :162 ~ 166
- 6 S. Lin , S. Zhang , C. Chen *et al.*. Optical multiple-variable fuzzy logic array using shadow casting. *Microwave Opt. Tech. Lett.* ,1993, **6**(2) :106 ~ 109
- 7 S. Zhang , C. Chen. Parallel optical fuzzy logic gates based on spatial area-encoding technique. *Opt. Comm.* ,1994, **107**(1, 2) :11 ~ 16
- 8 S. Zhou , W. Wu , Scott Campbell *et al.*. Optical implementation of fuzzy-set reasoning. *Appl. Opt.* ,1994, **33**(23) :5335 ~ 5347
- 9 S. Zhou , S. Campbell , W. Wu *et al.*. Polarization and space-encoded parallel optical fuzzy logic processor. *Opt. Lett.* ,1993, **18**(21) :1831 ~ 1833
- 10 H. Jing , L. Liu , L. Shao *et al.*. Optical fuzzy image processing based on spatial nonlinear encoding scheme and multiple-imaging technique. *Optik* ,1998, **109**(3) :113 ~ 118
- 11 J. Tanida , Y. Ichioka. Optical logic array processor using shadowgrams. *J. Opt. Soc. Am.* ,1983, **73**(6) :800 ~ 809
- 12 X. Yang , C. Y. Wrigley , J. Lindmayer. Three-dimensional optical memory based on transparent electron trapping thin films. *SPIE* ,1992, **1773** :413 ~ 422
- 13 A. D. McAulay , J. Wang , X. Xu. Optical perceptron learning for binary classification with spatial light rebroadcasters. *Appl. Opt.* ,1993, **32**(8) :1346 ~ 1353
- 14 Z. Wen , A. Back , N. H. Farhat. Optoelectronic neural dendritic tree processing with electron-trapping materials. *Opt. Lett.* ,1995, **20**(6) :614 ~ 616
- 15 S. Jutamulia , G. M. Storti , J. Lindmayer *et al.*. Use of electron trapping materials in optical signal processing. I : parallel Boolean logic. *Appl. Opt.* ,1990, **29**(32) :4806 ~ 4811
- 16 A. D. McAulay. Logic and arithmetic with luminescent rebroadcasting devices. *SPIE* ,1988, **936** :321 ~ 326
- 17 H. Ruan , S. Cheng , F. Gan. Parallel optical logic processor and bit slice-full adder using a single electron trapping device. *Optics & Laser Technol.* ( to be published )