

文章编号: 0253-2239(2001)11-1347-06

光学并行实现模糊逻辑图像处理

景红梅¹⁾ 刘立人²⁾

1), 北京师范大学物理系, 北京 100875

2), 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800

摘要: 提出和验证一种基于偏振-空间编码方案和多重成像技术的光学方法来实现模糊逻辑图像处理。系统中, 模糊变量和它们的补被编码为空间正交分布的两个偏振状态。通过对透镜阵列状态的编程, 可以实现两个模糊图像间的模糊逻辑操作。本系统中, 两个输入图像被偏振编码为 8 个编码图像作为输入图像, 系统是空不变系统, 不需要取阈装置和解码过程。通过引进取阈装置, 可以在一层系统中实现两个图像间更为复杂的模糊逻辑操作, 并给出了实验结果。

关键词: 光学模糊逻辑; 光计算; 非线性空间编码; 多重成像技术

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A

1 引 言

自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^[1~12]。Liu 最先提出了利用透镜列阵成像系统和取阈操作来完成求最大和最小的模糊逻辑操作^[1], 在此系统中, 需要一个平面取阈装置。文献[2]提出一种新的空间编码方法实现模糊逻辑, 通过改变透镜的开关状态和取阈装置相应的取阈模式, 即可获得两个模糊变量的全部 16 种模糊逻辑门, 在此系统中仍需要取阈装置。然而对于大规模的处理, 非线性装置发展得并不完善。于是有人想到了非线性编码的方法, 它可将逻辑单元的非线性转移到编码过程从而不再需要非线性装置。有人提出了一批基于阴影投影扩展空间编码的技术用以取消非线性装置^[3~8]。但是文献[2]和文献[7]提出的编码方法过于复杂, 每个细胞需要 16 行编码, 这样的系统空间带宽积的损耗很高。于是又有人引进了偏振空间方法来实现光学模糊逻辑^[9~12]。然而, 文献[9]提出的方法只能实现求最大和求最小的模糊逻辑操作。文献[11, 12]提出的方法需要光学扇出元件和解码板, 而且它们是空可变逻辑。

本文提出和验证一种基于偏振-空间编码方案和多重成像技术的光学方法来实现模糊逻辑图像处理, 通过对透镜列阵的状态编程即可并行实现模糊逻辑操作。在我们的系统中, 模糊变量和它们的补

被编码为空间正交分布的两个偏振状态。与现有的方法相比, 本系统有如下优点:

- 1) 不需要取阈装置, 故系统的速度高、损耗小。
- 2) 不需要解码过程, 故没有必要对不同尺寸的图像设计不同的解码板。
- 3) 每个细胞只包含一个编码, 所以模糊逻辑处理后的输出结果仍然是一幅图像, 且输出图案可单独编程为不同的逻辑函数。
- 4) 光学装置简单, 且不需要特殊光学元件。

除了上述优点, 本系统还具有以下特性:

- 1) 两个图像间的所有模糊逻辑都能够并行实现。
- 2) 系统是空不变的系统, 也就是说, 在任何一个模糊逻辑操作完成之后, 结果图像都是从左边开始的, 所以结果图像还可以直接用于下一步的处理。
- 3) 不同的模糊逻辑可用对多重成像系统中透镜阵列的开关状态编程完成。
- 4) 需要对输入图像进行非线性编码。

2 模糊变量的偏振-空间光学编码方案

为了光学实现模糊逻辑, 模糊逻辑值的表示和模糊逻辑的求最大和最小的实现是要解决的主要问题。我们提出用偏振-空间编码的方法表示模糊变量, 在此方案中用两个空间分布正交的偏振状态对输入 X 和 Y 进行编码, 空间编码原理如图 1 所示。一个介于 0 和 1 值之间的模糊变量用两个偏振的子区

编码, 每个子区与整个面积的比率决定所给模糊变量的值。如图 1(a) 所示, 一个宽为 a 、长为 b 的矩形或方形作为编码细胞。模糊变量 x 由从编码细胞左起的开口宽为 ax 的 s 偏振态(垂直偏振) 来编码, 补模糊变量 \bar{x} 由从编码细胞右起的开口宽度为 $a(1-x)$ 的 p 偏振态(水平偏振) 来编码; 类似地, 模糊变量 y 由从编码细胞左起的开口宽度为 ay 的 s 偏振态(垂直偏振) 来编码, 补模糊变量 \bar{y} 由从编码细胞右起的开口宽度为 $a(1-y)$ 的 p 偏振态(水平偏振) 来编码。将两个编码模糊变量 x 和 y 叠加在一起, 整个编码细胞分成三部分: 第一部分是从编码细胞左起的由 s 偏振编码表示的 $\min(x, y)$; 第二部

分是从 $\min(x, y)$ 尾部起的不透明部分 $|x - y|$; 第三部分是从编码细胞右起的由 p 偏振表示的 $\min(\bar{x}, \bar{y})$ 。再看一个由图 1(d) 所示的例子, 模糊变量 x 的编码同图 1(a) 所示的相同, 模糊变量 y 由从编码细胞左起的开口宽度为 ay 的 p 偏振态编码, 补模糊变量 \bar{y} 由从编码细胞右起的开口宽度为 $a(1-y)$ 的 s 偏振态来编码。将两个编码模糊变量 x 和 y 重叠, 整个编码细胞分成三部分: 第一部分是由编码细胞左起的不透明部分 $\min(x, y)$; 第二部分是从 $\min(x, y)$ 尾部起的 $|x - y|$, (当 $x > y$ 时由 s 偏振态表示, 当 $x < y$ 时由 p 偏振态表示); 第三部分是从编码细胞右起的不透明部分 $\min(\bar{x}, \bar{y})$ 。

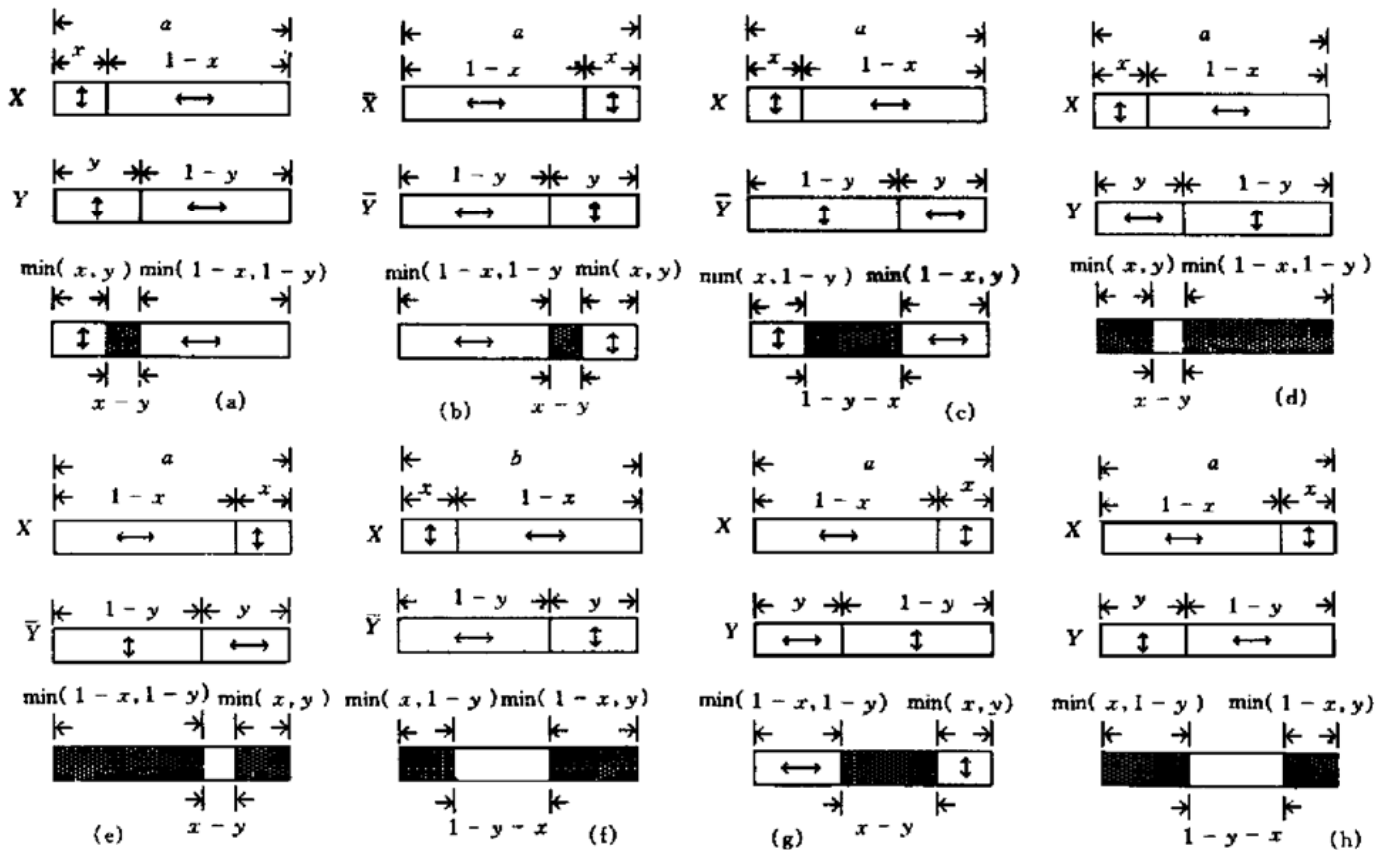


Fig. 1 The principle of polarization-space encoding method for fuzzy variables

由下面的方程式

$$\left. \begin{aligned} \min(x, y) + |x - y| &= \max(x, y), \\ \min(x, y) + |x - y| + \min(\bar{x}, \bar{y}) &= 1, \end{aligned} \right\} (1)$$

可知, 将图 1(a) 中重叠编码细胞的 s 偏振态投影到图 1(d) 中重叠编码细胞上, 可得到 $\max(x, y)$, 将图 1(a) 中重叠编码细胞投影到图 1(d) 中重叠编码细胞上得到 1。而且, 通过将图 1(a) 中重叠编码细胞的 s 偏振态投影到图 1(d) 中重叠编码细胞上得到 x ; 通过将图 1(a) 中重叠编码细胞投影到图 1(d) 中重叠编码细胞的 p 偏振态上得到 y 。这样的投影操作可以很容易地用多重成像系统完成^[1,2]。用这种方法, 透镜阵列中的每个透镜有四种状态: s 偏振

态 p 偏振态、全开和全关状态, 对透镜的四个偏振态编程就可实现不需取阈装置和解码板的模糊逻辑光学并行系统。

由图 1 可以看出, 模糊变量 x 和它的补 \bar{x} 分别只有一种编码模式, 模糊变量 y 和它的补 \bar{y} 分别有两种编码模式。相应地, 对于输入图像 X , 有两种编码模式 X 和 \bar{X} ; 对于输入图像 Y 有四种编码模式 Y, Y', \bar{Y} 和 \bar{Y}' 。将编码模式 X 分别与编码模式 Y, Y', \bar{Y} 和 \bar{Y}' 重叠在一起, 可得到四个重叠编码模式; 将编码模式 \bar{X} 分别与编码模式 Y, Y', \bar{Y} 和 \bar{Y}' 重叠在一起, 又可得到四个重叠编码模式。将重叠编码模式中恰当的部分分别投影到相应重叠编

码模式的恰当部分[图 1(a) →图 1(d), 图 1(b) →图 1(e), 图 1(c) →图 1(f) 和图 1(g) →图 1(h)], 可容易地实现空不变模糊逻辑操作。括号中图 1(a) →图 1(d) 可这样理解: 例如将图 1(a) 中重叠编码的 $\min(x, y)$ 部分和图 1(d) 中重叠编码的 $|x - y|$ 部分投影到一起, 即可获得 $\max(x, y)$ 操作。图 1(b) →图 1(e)、图 1(c) →图 1(f) 和图 1(g) →图 1(h) 是同样的道理。要想实现这样的投影操作就要运用到下面的光学多重成像系统。

3 模糊逻辑阵列的光学多重成像系统

根据上述考虑, 我们使用多重成像技术实现光学模糊逻辑阵列。我们的光学系统完成两个模糊图像 X 和 Y 之间的模糊逻辑操作。所谓模糊图像即图像的灰度水平是连续的范围 0 和 1 之间, 如果图像的灰度水平不在 0 和 1 之间, 首先对其进行归一化。两个图像在处理前, 必须对其进行空间编码, 如图 2 所示, 8 个编码图像被安排成 3×3 的矩阵。

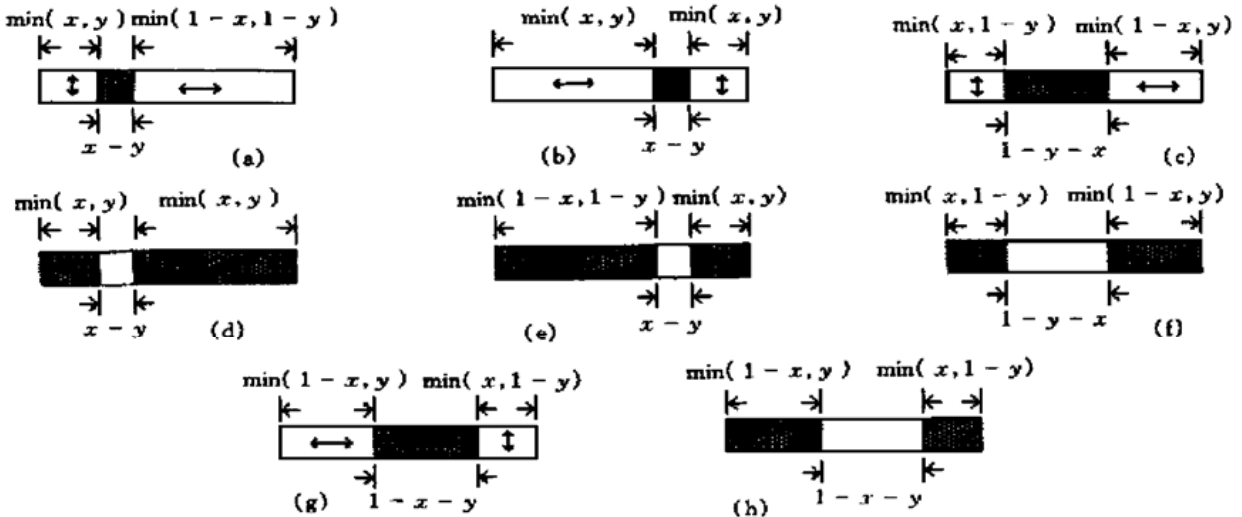


Fig. 2 The arrangement of eight overlapped coding patterns regarded as input images (only one pixel is shown for simplicity)

透镜阵列包含 8 个透镜, 并被安排成如图 3 的形式用来产生每个输入图像的多重像。光学装置如图 4 所示, 8 个编码输入图像放在光学系统的输入平面, 用扩展光源照此输入平面, 每个图像都将由透镜阵列产生多重像。所有透镜的焦距都为 f , 每个透镜都可编程为 p 偏振态, s 偏振态, 全开和全关状态。8 个透镜分别由图 3 中的 LA_{11} 、 LA_{12} 、 LA_{13} 、 LA_{21} 、 LA_{22} 、 LA_{23} 、 LA_{31} 、 LA_{32} 表示。每个编码输入图案的宽度和高度是 d_1 , 两个图案的中心距离是 d_2 ($d_2 \geq d_1$)。若输入平面和透镜阵列的距离是 L_1 , 透镜阵列和输出平面的距离是 L_2 , 则成像条件是

$$1/L_1 + 1/L_2 = 1/f. \tag{2}$$

成像放大率是 L_2/L_1 。值得注意的是, 像是倒像。

当满足几何条件

$$\frac{d_3}{d_2} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \tag{3}$$

时, 在输出平面有输入图案的 8 个像重叠在一起, 如图 4 所示。

将透镜调节到适当的模式, 就可对两个模糊图像间的模糊逻辑函数进行编程控制。透镜列阵的形式和相应的模糊图像逻辑如表 1 所示, 其中透镜全关的模式没有写出。虽然表内所列的函数简单有限, 但是作为初级的模糊逻辑层, 它可用下面的方法扩展成更为一般和更为复杂的逻辑函数。在上面的讨论中, 透镜阵列中两个透镜产生一种逻辑函数, 如果在透镜列阵中使用多于两个的透镜, 就可以同时实现 N 种模糊逻辑 (N 大于 1)。根据文献[1, 2], 可在系统中引入取阈装置来完成 N 个模糊图像间的求最大和最小的模糊逻辑操作。图 5(a) 和图 5(b) 给出了求最大和最小的取阈形式。注意, 所有 N 个输入图像间有相同的照明强度 I_0 。虽然使用了取阈装置, 但是它可以在一层系统中实现两个输入的更为复杂的模糊逻辑操作。

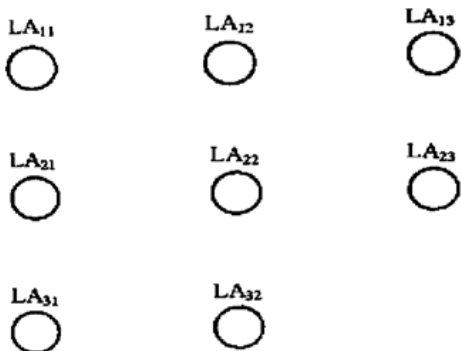


Fig. 3 The matrix of lens array

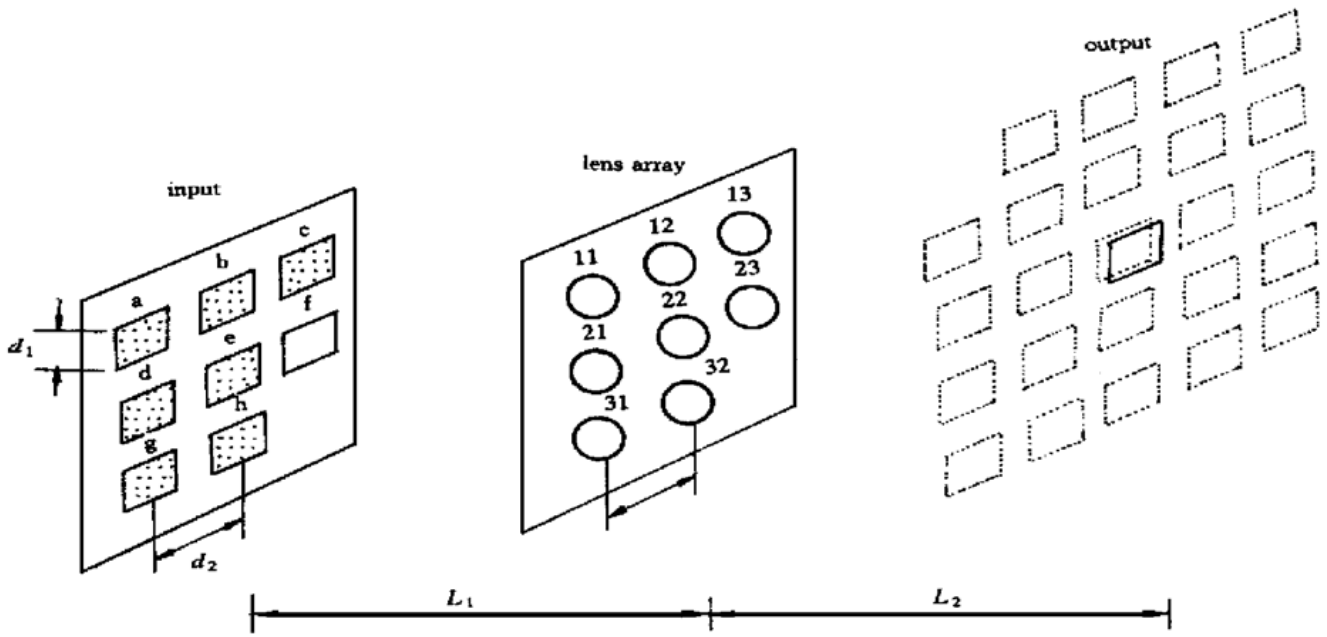


Fig. 4 An optical multiple imaging system for fuzzy image processing



Fig. 5 The principle of the thresholding operation. (a) The thresholding format for maximization operation and (b) The thresholding format for minimization operation

Table 1. The states of lens-array in mode and the corresponding pattern fuzzy logic operations

number	fuzzy logic functions	the state of lens-array in mode
1	$\min(x, y)$	LA ₁₁ (s)
2	$\min(1-x, 1-y)$	LA ₁₂ (p)
3	$\min(x, 1-y)$	LA ₁₃ (s)
4	$\min(1-x, y)$	LA ₃₁ (p)
5	$\max(x, y)$	LA ₁₁ (s), LA ₂₁
6	$\max(1-x, 1-y)$	LA ₁₂ (p), LA ₂₂
7	$\max(x, 1-y)$	LA ₁₃ (s), LA ₂₃
8	$\max(1-x, y)$	LA ₃₁ (p), LA ₃₂
9	x	LA ₁₁ (s), LA ₂₁ (s) [or LA ₁₃ (s), LA ₂₃ (s)]
10	y	LA ₁₁ (s), LA ₂₁ (p) [or LA ₃₁ (p), LA ₃₂ (s)]
11	$1-x$	LA ₁₂ (p), LA ₂₂ (p) [or LA ₃₁ (p), LA ₃₂ (p)]
12	$1-y$	LA ₁₂ (p), LA ₂₂ (s) [or LA ₁₃ (s), LA ₂₃ (p)]
13	0	all off
14	1	LA ₁₁ , LA ₂₁ [or LA ₁₂ , LA ₂₂], [or LA ₁₃ , LA ₂₃], [or LA ₃₁ , LA ₃₂]

4 实 验

有两个如图 6(a) 和图 6(b) 所示的 3×3 模糊图像用来验证我们系统的设计。实验装置如图 4 所示, 它的安排应满足上述原则。

8 个重叠的编码输入图像如图 7 所示, 编码细胞的宽度和高度均选择为 5 mm。输入图案的尺寸

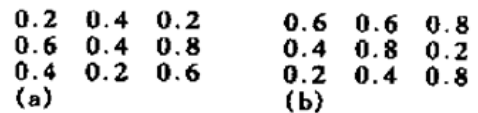


Fig. 6 Two input fuzzy images, X and Y, used in the experiments, (a) the fuzzy image X and (b) the fuzzy image Y

是 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 两个编码图案的中心间距是 40 mm 。所有透镜的焦距均为 50 mm , 放大率因子是 1, 相邻透镜的间距是 10 mm 。

图 8(a) 和图 8(b) 分别给出了 $\min(x, y)$ (透镜阵列设置到模式 3) 和 $\max(x, y)$ (透镜阵列设置到模式 8) 的实验结果照片。

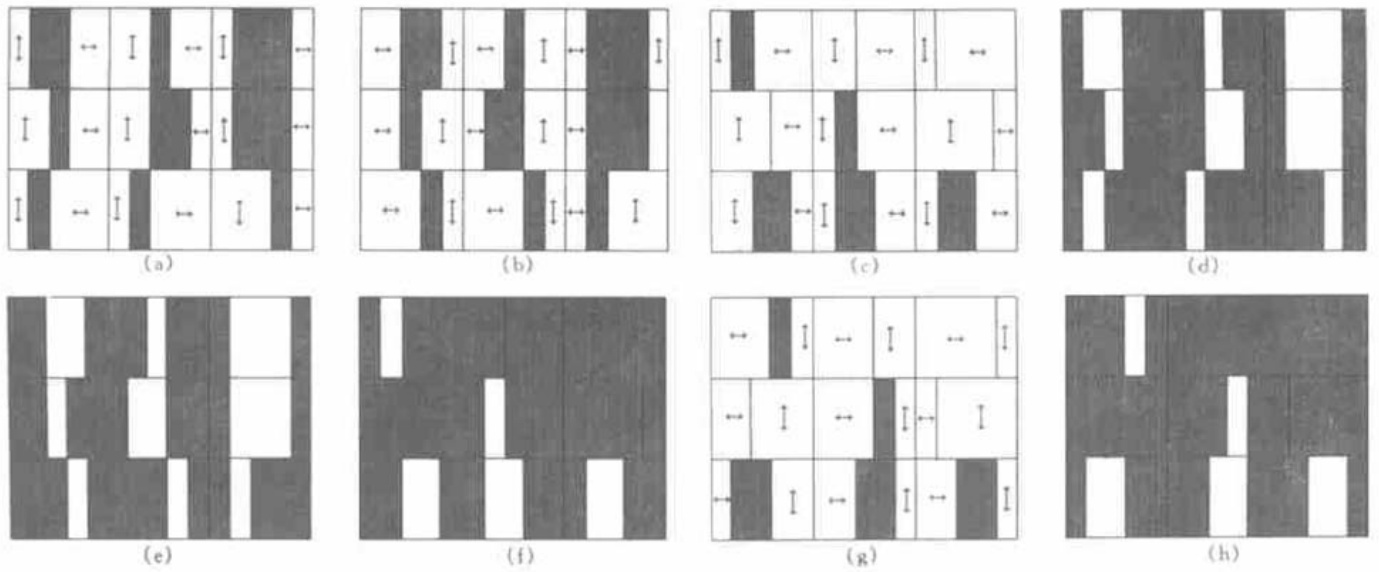


Fig. 7 The eight overlapped coding patterns used in the experiments



Fig. 8 The pattern of experimental results without thresholding obtained in experiment.

(a) The pattern of $\min(x, 1-y)$. (b) The pattern of $\max(1-x, y)$

到目前为止, 我们验证了所提出的初级结构。将透镜阵列同时设置到模式 5 和模式 6 (LA_{11} 为 s 偏振, LA_{12} 为 p 偏振, LA_{21} 和 LA_{22} 为全开状态), 按照图 5(b) 所示的取阈模式取阈, 即可得到逻辑操作 $\min[\max(x, y), \max(x, y)]$, 实验结果如图 9 所示。注意这里 N 等于 2。用这些实验, 我们已经

验证了所设计的光学系统的可行性。

结论 提出并验证了基于偏振-空间数据编码方案和多重成像技术的模糊逻辑图像处理系统, 通过对透镜阵列状态的编程, 可以实现两个模糊图像间的模糊逻辑操作。本系统中, 两个输入图像被偏振编码为 8 个编码图像作为输入图像, 系统是空不变系统, 不需要取阈装置和解码过程。通过引进取阈装置, 可以在一层系统中实现两个图像间更为复杂的模糊逻辑操作。

参 考 文 献

- [1] Liu Liren. Optical implementation of parallel fuzzy logic. *Opt. Commun.*, 1989, **73**(3): 183~ 187
- [2] Zhang Shuqun, Chen Caisheng. Parallel optical fuzzy logic gates based on spatial area encoding technique. *Opt. Commun.*, 1994, **107**(1, 2): 11~ 16

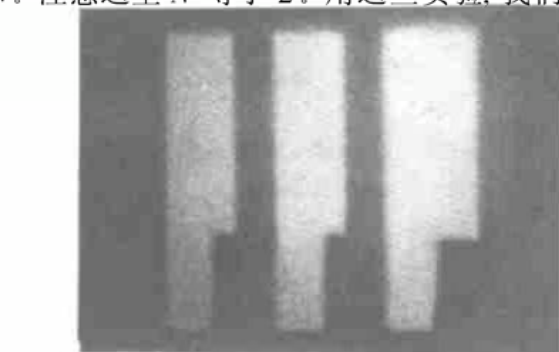


Fig. 9 The pattern of experimental results $\min[\max(x, y), \max(1-x, 1-y)]$ obtained in experiment

- [3] Zhang Shuqun, Lin Senmao, Chen Caisheng. Optical fuzzy vector-matrix composition operation using shadow-casting. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 497~ 500
- [4] Lin Senmao, Zhang Shuqun, Chen Caisheng *et al.*. Optical implementation of a spatial variant fuzzy logic array. *Opt. Commun.*, 1993, **97**(3,4): 162~ 166
- [5] Lin Senmao, Kumazawa I, Zhang Shuqun. Optical fuzzy image processing based on shadow-casting. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(5): 397~ 405
- [6] Lin Senmao, Zhang Shuqun, Chen Caisheng *et al.*. Optical multiple-variable fuzzy logic array using shadow casting. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 1993, **6**(2): 106 ~ 109
- [7] Lin Senmao, Zhang Shuqun, Chen Caisheng *et al.*. Optical fuzzy logic array using shadow casting. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 1992, **5**(13): 659~ 661
- [8] Zhang Shuqun, Chen Caisheng. Optical fuzzy logic processing system: Architectures and applications. *Inter. J. Optoelectronics*, 1994, **9**(1): 71~ 79
- [9] Lin Senmao, Kumazawa I. A new nonlinear spatial encoding method for cascable fuzzy logic. *Opt. Commun.*, 1994, **107**(5,6): 461~ 470
- [10] Zhou Shaomin, Wu Weishu, Campbell S *et al.*. Optical implementation of fuzzy-set reasoning. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(23): 5335~ 5347
- [11] Zhou Shaomin, Wu Weishu, Yeh P *et al.*. Polarization and space-encoded parallel optical fuzzy logic processor. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(21): 1831~ 1833
- [12] Wu Weishu, Yang Xiangyang, Campbell S *et al.*. Photorefractive optical fuzzy-logic processor based on grating degeneracy. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 922~ 924

Optical Parallel Implementation of Fuzzy Logical Image Processing

Jing Hongmei¹⁾ Liu Liren²⁾

- 1), *Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875*
 2), *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

(Received 7 July 2000; revised 18 September 2000)

Abstract: An optical system based on polarization- and area-coded scheme and the multiple-imaging technique is proposed for fuzzy image processing. 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. All of the fuzzy logical functions of two images can be implemented in parallel and spatial-invariant by programming the lens-arrays with corresponding modes. In particular, no thresholding device and decoding mask are needed, therefore, the system exhibits a high operation speed and a large information throughput. The experimental results are given.

Key words: optical fuzzy logic; optical computing; nonlinear spatial encoding; multiple-imaging