

基于光学数字计算空间振幅编码图形法的 光学并行阵列逻辑

钟立晨 张 戟 刘薇薇 郭奕理 周炳琨
(清华大学无线电电子学系, 100084)

提要: 本文给出了执行光学并行阵列逻辑的一种新的空间振幅编码图形法的原理和特性。为了设计高速并行复合运算, 本文还给出了系统的算法, 并澄清了 AND 和 OR 阵列门的物理意义。也给出了在 8f 相干光学处理系统中执行的 16 种复合逻辑运算的结果。

关键词: 数字光计算, 光学阵列逻辑, 空间编码图形法

Optical parallel array logic based on spatial amplitude encoding pattern method for optical digital computing

Zhong Lichen, Zhang Ji, Liu Weiwei, Guo Yili, Zhou Bingkun
(Department of Information-Electronics, Tsinghua University, Beijing)

Abstract: This paper presents the principle and the features of a new spatial amplitude encoding pattern method implementing optical parallel array logic gates. A systematic algorithm is also presented for designing high speed combinational logic operation in parallel and the physical concept of AND and OR array gates is clarified. Experimental results for 16 combinational logic operation in an 8f coherent optical processing system are shown.

Key words: digital optical computation, optical array logic, spatial encoded pattern method

一、引 言

二进制逻辑运算是数字计算的基础, 这种运算在性质上是非线性的。利用电子元器件容易串行地实现这种运算, 使串行电子计算机取得极大成功。但是, 到目前为止能够实现并行计算的光学非线性器件(如光学双稳态器件)还处于实验室早期的基础研究阶段。那么设计光学并行逻辑, 在充份保留光的并行性优点的前题下, 如何减少非线性的困难呢? 这就是采用编码技术^[1]。把光学并行逻辑分成三步: 非线性编码、线性逻辑运算、非线性解码。把非线性的难点保留给编码/解码, 从而使线性逻辑运算几乎以光速进行。那么最适当的线性并行逻辑的结构又是什么? 已经提出了几种方案^[2, 6], 但是目前还没有普遍可接受的概念。J. Tanida 和 T. Ichioka 提出的铸影法给光学数字计算, 特别是光学数字图像处理带来了很大希望。因为它在结构上相当简单, 一些有希望的并行算法, 如光学细胞逻辑、光学神经网络计算、符号代换等

都有可能以这种并行逻辑来执行^[3], 目前已得到很多人的关注。

铸影法是通过改变 LED 光源开关模式来改变投影, 并利用固定的解码掩模实现两个输入的二维编码数据的 16 种并行逻辑运算和空间平移操作。它基本上是一种不变空间逻辑。最近 T. Yatagai 又提出了空间编码图形技术来修改铸影法^[4]。空间编码法用改变解码掩模的技术代替改变 LED 光源的开关模式, 实现并行逻辑运算。这是一种多指令多数据处理 (MIMD) 的变空间逻辑。两种方法在结构上有区别, 而且空间编码图形法的解码输出不是二进制数值而是 2D(二维)二进制空间编码, 在形式上和铸影法很不相同。但是 T. Yatagai 没有在结构和算法上对这些问题作进一步分析, 也没有在光学系统中执行。本文对空间编码图形法的线性并行阵列逻辑结构作了严格分析, 使 AND 逻辑阵列门和 OR 阵列门具有更明确的物理意义。这十分有利于阵列门硬件的设计, 也为利用空间编码图形法来执行各种并行算法的设计建立坚实的基础。

二 二值图像(数据)的空间振幅图形编码

在空间编码图形法中, 假定 A 、 B 是两个输入二值图像, 用 $f(x, y)$ 表示。 f 代表光强(振幅), 只有 0(黑或不透过)和 1(白或透过)两个值。本文处理皆以白为真值 1。振幅已数字化, 而空间坐标 (x, y) 还是连续量。空间数字化是在编码过程中实现的。数字化后的空间分成很多方格子, 形成棋盘格。为了方便, 假定每个格子是边长为 l 的正方形, 并用一对整数 (i, j) 表示方格的地址(见图 1), $i, j=0, 1, 2, \dots$ 。图中 (i, j) 是某个指定的方格, $(i+m, j+n)$ 是相对 (i, j) 有平移的另一方格。 m, n 是正负整数, 分别表示沿 x 方向和 y 方向坐标改变多少个 l 单位长度。每个像素都占有一个方格, 其强度只取 (i, j) 处二值图像的灰度值。一幅数字化图像可用分立像素的值(0 或 1)排成的矩阵表示。

空间编码图形法的关键是对两个输入的二值图像 A 、 B 分别沿 y 方向和 x 方向用规定的图形作一维编码。把图像 $A(B)$ 的每个方格沿 $x(y)$ 方向二等分成黑白格, 黑白格调制方式由方格 (i, j) 的强度决定(见图 2(a)), 这样便得到一维的 α 编码和 β 编码图形(见图 3)。一维编码图形中每个像素 (i, j) 都按其强度用一个二进制码 $\alpha_{ij}(\beta_{ij})$ 代替。这种码在空间用二个一维调制脉冲表示, 每个脉冲又可用二进制数字记为 0 或 1。0 和 1 可以利用光的振幅、偏振方向、相位或波长来表示。因而会有相应的振幅调制、偏振调制、相位调制和频率调制。本文只讨论最

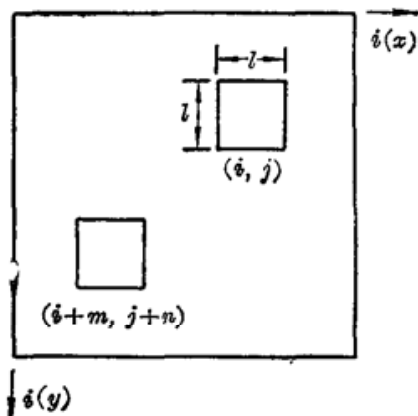


图 1 在二维数字平面上的像素

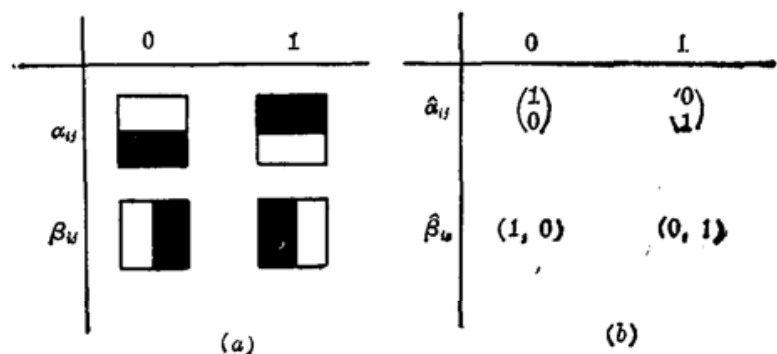


图 2

(a) A 和 B 的一维编码图; (b) 对应的矩阵表示

基本最简单的振幅调制,不涉及光学执行硬件设计的问题。因为 $\alpha_{ij}(\beta_{ij})$ 可用两个二进制有序数字表示;所以最方便的方法是用向量表示。图 2(b) 把 α_{ij} 和 β_{ij} 分别记为具有两个元素的列矩阵 $\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix}$ 和行矩阵 (β_1, β_2) , 其中 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 都是二进制数(0 或 1), 其值各由 A, B 图像在 (i, j) 处的灰度值 $A(i, j)$ 和 $B(i, j)$ 决定。

本文讨论的空间振幅编码图形法,只涉及振幅调制。图 3 是利用光刻制版技术得到的,在 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 面积上用光刻制版技术得到 128 bit 的一维编码模版。两个一维编码版 α 和 β 相互重叠(使 x, y 方向正交)便得到二维编码图形 θ 。重叠操作相当于使 α 和 β 作并行逻辑乘。有些硬件在工作中难以直接接触,分开来实现相乘是方便的。为了减少准直困难,又充份利用傅里叶光学的已有成果,最方便的方法是在 $8f$ 系统中实现,见图 4。 $8f$ 系统是一种相干光学线性处理系统,适合于线性编码逻辑处理。此外它还有很强的光学信息处理能力,例如在频谱平面上可方便地实现高低通、带通和区配滤波等。

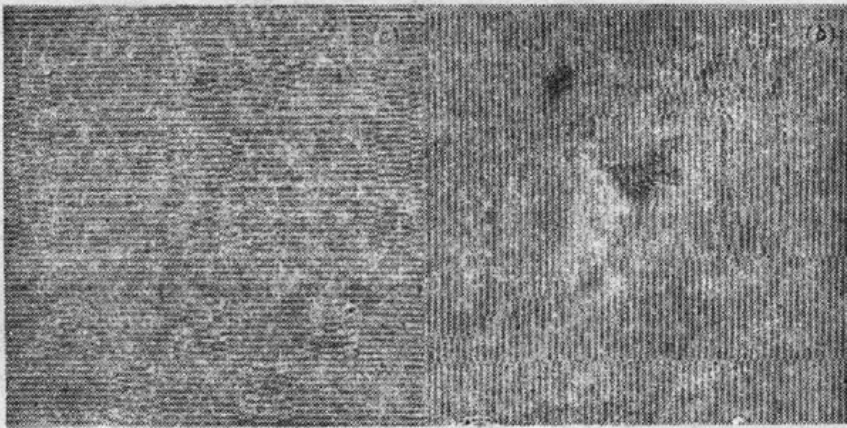


图 3 A 的 α -一维编码图形和 B 的 β -一维编码图形

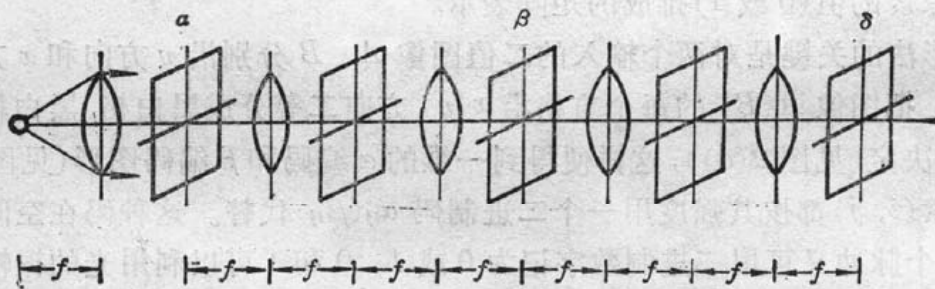


图 4 由空间振幅编码图形法执行光学并行阵列逻辑的 $8f$ 相干光学处理系统

图 5 中的 δ 是二维解码模板,其上存贮了逻辑运算核,它有 16 种二维编码的调制模式。每种模式都唯一对应一种线性编码逻辑。 δ 解码模版(也可称为运算核模版)上的每个像素 (i, j) 方格,须作四等分,成为四个等同的小方格,每个小方格或黑或白,可得到 16 种黑白分布不同调制(编码)方式,因而对应了解码的 16 种逻辑运算功能。我们用 $\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{21}, \delta_{22}$ 表示方格的二进制数值,写成 2×2 矩阵 $\hat{\delta}_{ij} = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{pmatrix}$ 。图 5 已标出相应的逻辑运算功能符号和 2×2 解码矩阵的记法。 δ 解码版上的二维编码可以全是一种模式,也就是说 $\hat{\delta}_{ij}$ 不随 (i, j) 改变,因而是一种不变空间逻辑的单指令多数据流(SIMD)的处理。如果 $\hat{\delta}_{ij}$ 随 (i, j) 改变,便是多指令多数据流(MIMD)的变空间逻辑。

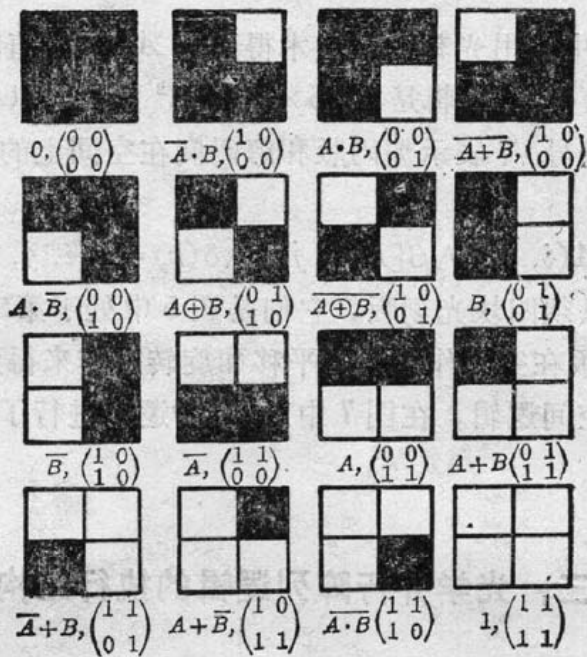


图 5 δ 解码模版的 16 种二维编码

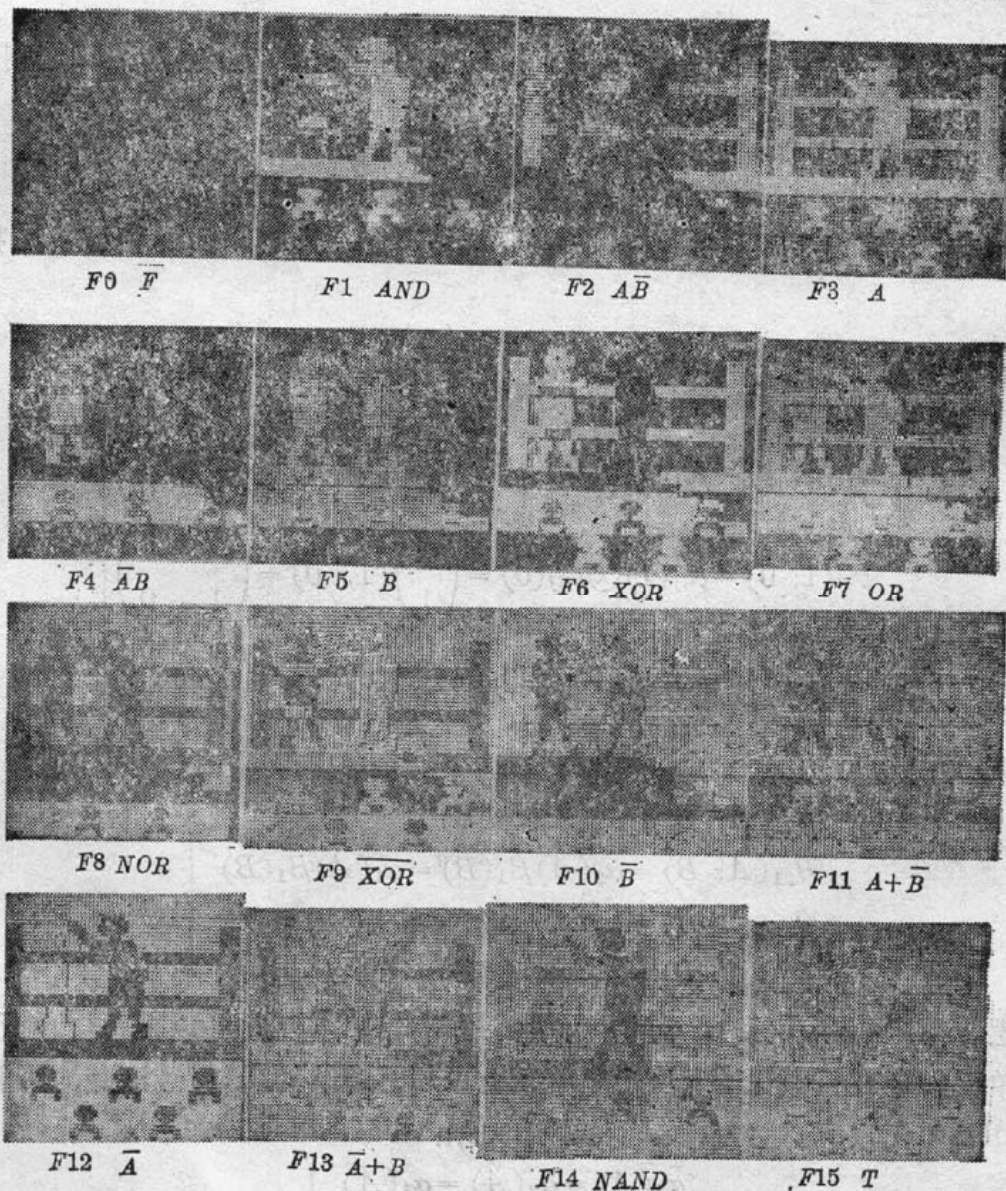


图 6 的 $8f$ 光学相干处理系统中得到光学阵列门的 16 种可能功能的实验结果

图 6 是在 $8f$ 光学系统中利用光刻制版技术得到的 A 、 B 值图像的 16 种线性编码逻辑运算的输出 $\gamma(k)$ 。照片表示 16 种逻辑是在 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 面积上以 $64 \times 64 = 4096$ (bit) 的 2D-数字图像给出的。如果以符号 \wedge 表示编码版和解码间在空间上的并行重叠操作, 那么这一处理可表示成三重积的形式:

$$\alpha[A(i, j)] \wedge \beta[B(i, j)] \wedge \delta(k) = \gamma(i, j, k) \quad (1)$$

对于不变空间逻辑来说, 只须四块光刻版。它们是图 5 中处于第二列上的四种编码。其它 10 种编码可以通过这四块版在空间作简单的平移和旋转操作来得到。0 和 1 模版可由光学快门代替。本文只讨论不变空间逻辑。在图 7 中对 16 种逻辑进行了编号, 即令 $k=0, 1, 2, \dots, 15$, 来简化书写。

三、光学并行阵列逻辑的执行结构

$\alpha \wedge \beta = \theta$, 使两个一维编码相乘, 其透过光强的分布便是 2D 编码 θ , 其中每个像素 (i, j) 方格, 为四个等等的或黑或白的小方格代替。这种 2D 码的调制方式由 $A(i, j)$ 和 $B(i, j)$ 值决定, 它的表示是一 2×2 矩阵 $\hat{\theta}_{ij} = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} \\ \theta_{21} & \theta_{22} \end{pmatrix}$, $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}$ 和 θ_{22} 也都是二进制数值。 $\hat{\theta}_{ij}$ 和 $\hat{\alpha}_{ij} = \hat{\alpha}[A(i, j)]$, $\hat{\beta}_{ij} = \hat{\beta}[B(i, j)]$ 的关系由下式给出:

$$\hat{\theta}_{ij}(A, B) = \hat{\alpha}[A(i, j)] \otimes \hat{\beta}[B(i, j)] \quad (2)$$

\otimes 表示矩阵外积。因而 $\alpha \wedge \beta$ 的操作在数学上可用两个一维矩阵的外积描述。把二进制数代入(2)得

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}_{ij}(0, 0) &= \hat{\alpha}_{ij}(0) \otimes \hat{\beta}_{ij}(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} (1 \ 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \hat{\theta}_{ij}(0, 1) &= \hat{\alpha}_{ij}(0) \otimes \hat{\beta}_{ij}(1) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} (0 \ 1) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \hat{\theta}_{ij}(1, 0) &= \hat{\alpha}_{ij}(1) \otimes \hat{\beta}_{ij}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (1 \ 0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \hat{\theta}_{ij}(1, 1) &= \hat{\alpha}_{ij}(1) \otimes \hat{\beta}_{ij}(1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (0 \ 1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\hat{\theta}_{ij}(A, B)$ 矩阵元的特点是三个为零一个为 1, 这个特征很重要。由(2)式知道:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{11}(A, B) &= \alpha_1(A) \beta_1(B) \\ \theta_{21}(A, B) &= \alpha_2(A) \beta_1(B) = \alpha_1(A) \beta_1(B) \\ \theta_{12}(A, B) &= \alpha_1(A) \beta_2(B) = \alpha_1(A) \bar{\beta}_1(B) \\ \theta_{22}(A, B) &= \alpha_2(A) \beta_2(B) = \bar{\alpha}_1(A) \bar{\beta}_1(B) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在并行阵列逻辑门上每个单元 (i, j) 对应很多逻辑处理。因此可以把每个单元 (i, j) 看成一个空间处理单元。现在只讨论 (i, j) 处理单元上逻辑运算。为了符号清楚, 可暂时去掉下标 ij 。根据 Boolean 代数, 显然矩阵元间有下述关系:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}_1(A) &= \alpha_2(A) = \alpha_1(\bar{A}) \\ \bar{\beta}_1(B) &= \beta_2(B) = \beta_1(\bar{B}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

利用(5)式便可建立(4)式中的第二个等号。(4)式把 $\hat{\theta}_{ij}(A, B)$ 的矩阵元最终只用 $\alpha_1(A)$, $\beta_1(B)$ 及其非逻辑 $\bar{\alpha}_1(A)$ 、 $\bar{\beta}_1(B)$ 作成的乘积项表示出来。

这个重要结果说明,二维空间编码 $\theta(A, B)$ 中的每个像素 $\theta_{ij}(A, B)$ 相当于 (ij) 处理单元的并行AND逻辑的寄存器。它同时存贮了四个乘积项 $\alpha_1(A)\beta_1(B)$, $\bar{\alpha}_1(A)\beta_1(B)$, $\alpha_1(A)\bar{\beta}_1(B)$, $\bar{\alpha}_1(A)\bar{\beta}_1(B)$ 。在这个意义上, $\theta(A, B)$ 是一并行AND逻辑阵列门。

使解码版(运算核编码版) $\delta(k)$ 和 $\theta(A, B)$ 重叠,便得到16种输出的逻辑功能 $\gamma(A, B, k)$ 。这个操作已用(1)式表达了。就 (ij) 处理单元来说, $\gamma_{ij}(A, B, k)$ 也可用 2×2 矩阵表示:

$$\hat{\gamma}_{ij}(A, B, k) = \begin{pmatrix} \gamma_{11}(k) & \gamma_{12}(k) \\ \gamma_{12}(k) & \gamma_{22}(k) \end{pmatrix} \quad (6)$$

由(6)式的物理意义容易知道:

$$\begin{aligned} \gamma_{11}(k) &= \delta_{11}(k)\theta_{11}(A, B) = \delta_{11}(k)\alpha_1(A)\beta_1(B) \\ \gamma_{12}(k) &= \delta_{12}(k)\theta_{12}(A, B) = \delta_{12}(k)\alpha_1(A)\bar{\beta}_1(B) \\ \gamma_{21}(k) &= \delta_{21}(k)\theta_{21}(A, B) = \delta_{21}(k)\bar{\alpha}_1(A)\beta_1(B) \\ \gamma_{22}(k) &= \delta_{22}(k)\theta_{22}(A, B) = \delta_{22}(k)\bar{\alpha}_1(A)\bar{\beta}_1(B) \end{aligned} \quad (7)$$

因此,解码输出 $\gamma_{ij}(A, B, k)$ 的像素 (ij) 也是由 2×2 的二进制矩阵表示的,其对应的空间调制就是 $2D$ 的二进制码。至于像素 (i, j) 对应的二进制数值 $D\gamma_{ij}(A, B, k)$ 还须给出明确的定义。容易验证(7)式给出的四个矩阵元中(对指定的 A, B, k 和 (i, j) 来说)只有一个矩阵元的值可能为1,不可能出现两个以上的矩阵元同时为1。因此给出定义:

$$D\gamma_{ij}(A, B, k) \equiv 1, \quad \text{仅当(7)式中有元素1存在时} \quad (8)$$

$$D\gamma_{ij}(A, B, k) \equiv 0, \quad \text{仅当(7)中元素全为零时} \quad (9)$$

根据(9)的定义,现在可用(4)式给出的四个乘积项把 $D\gamma_{ij}(A, B, k)$ 展开成逻辑的线性加和:

$$\begin{aligned} D\gamma_{ij}(A, B, k) &= \delta_{11}(k)\alpha_1(A)\beta_1(B) + \delta_{12}(k)\alpha_1(A)\bar{\beta}_1(B) + \delta_{21}(k)\bar{\alpha}_1(A)\beta_1(B) \\ &\quad + \delta_{22}(k)\bar{\alpha}_1(A)\bar{\beta}_1(B) \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式在阵列逻辑中早已被证明是正确的^[5]。也就是说,两个输入的二进制信号 a 和 b 的任何逻辑运算都可分解成四个逻辑乘积项之间的线性逻辑之和:

$$c = \alpha a b + \beta a \bar{b} + \gamma \bar{a} b + \delta \bar{a} \bar{b}$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 都是二进制数。在铸影法中 $\begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix}$ 是由LED光源的开关模式决定的

运算核。在空间编码图形法中就是由 $\begin{pmatrix} \delta_{11}(k) & \delta_{12}(k) \\ \delta_{21}(k) & \delta_{22}(k) \end{pmatrix}$ 代替。(10)式在物理上表示对AND

阵列门 $\theta(A, B)$ 上每个处理单元内贮存的乘积项,按指令 (k) 作“寻址”读出,得到的是四个乘积项间的OR逻辑。(10)式也是定义(9)的直接推论。 $\gamma(A, B, k)$ 是由 $2D$ 编码给出的二进制数字图像,是 $2D$ 编码的1(白)逻辑值在0(黑)逻辑值背景下给出的数字逻辑图形。 $\gamma(A, B, k)$ 实际上是OR逻辑阵列门。(1)式说明它可由三个输入编码版 $\alpha(A)$ 、 $\beta(B)$ 和 $\delta(k)$ 在空间作并行三重积得到。当 $k=15$ 时(1为真值逻辑,有 $\gamma(A, B, 15) = \theta(A, B)$ 。

此时(见图6中的 $F15$),每个像素方格内都只有1个白格三个黑格,因此所有像素的二进制灰度值皆为1,即 $D\gamma_{ij}(A, B, 15) \equiv 1$ 。但是白格在每个像素的四小方格内按 (A, B) 的不

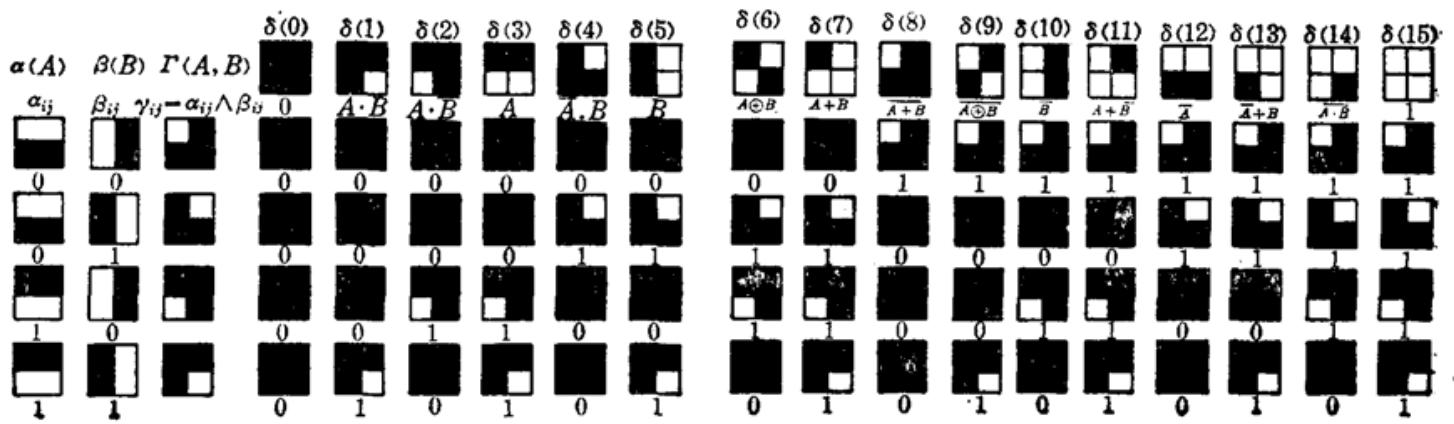


图7 (i, j)处理单元的16种可能的逻辑功能的光学表示
(以1(白)为真逻辑)

同有一个分布,从而潜在地存贮了A和B。

图7表示一个像素上的二变量二进制编码图形逻辑的16种功能。最左边的两列表示两个输入的二值变量的一维编码 α 和 β ,第三列表示二维编码 θ ,最顶上一行表示16种二维编码运算核 $\delta(k)$, $k=0, 1, 2 \dots 15$,和 $\delta(k)$ 对应的16列表示16种逻辑输出 γ 。上述讨论都可在图7中得到验证。

本文对空间振幅编码图形法的光学并行阵列逻辑结构给出了严格分析和论证。对并行AND逻辑阵列门 θ 和并行OR阵列门 γ 给出了明确的物理意义。在8f相干光学系统中实验验证了16种线性编码图形逻辑的可行性。从而为进一步研究各种并行算法的设计和光学执行提供了必要的基础。振幅编码在理论上简单明了,但在计算系统的设计上难以实现级联,然而为偏振编码逻辑结构的设计和编码器硬件研制提供了方向。

作者衷心感谢国家自然科学基金对本课题研究的资助。

参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmann, J. Weigelt, *Opt. Commun.*, **54**(2), 81(1985)
- 2 J. Tanida, Y. Ichioka, *J. Opt. Am.*, **73**, 800(1983); *Appl. Opt.*, **20**, 1565(1986)
- 3 R. A. Athale, S. H. Lee, *Opt. Eng.*, **18**, 518(1979)
- 4 T. Yatagai, *Opt. Lett.*, **11**, 260(1986); *Appl. Opt.*, **25**, 1571(1986)
- 5 Y. Ichioka, J. Tanida, *Proceedings of the IEEE*, **72**, 1641(1984); *J. Opt. Soc. Am.*, **A2**(8), 1245(1985); *Appl. Opt.*, **27**, 6926(1988); *Appl. Opt.*, **27**, 3819(1988)
- 6 A. Ahad, S. Awwal *et al.*, *Appl. Opt.*, **27**, 932(1988); Y. Li, G. Echmann *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**, 2036(1988)

光针转胎 100 例临床结果

我们用 He-Ne 激光光针矫正胎位 100 例,成功率为 86%。所用 He-Ne 激光光斑直径 2mm,输出功率 5mW,功率密度 159.15mW/cm²。胎位不正 100 例患者年龄为 23~32 岁,取双侧足太阳、膀胱经、至阴穴,激光与穴位距离 5cm,每日照射 1 次,每次 10min,4 次为一个疗程,疗程间间隔 3 天。两个疗程内未转头位者为失败。100 例中臀位 76 例,66 例转胎成功,横位 24 例,20 例转胎成功。100 例中一胎 79 例,67 例转胎成功;二胎 21 例,19 例转胎成功。100 例中辐照 2~4 次转胎成功 70 例,其中 30~34 孕周转胎成功 64 例。

(解放军 51112 部队医院 吴文斗 青岛市市立医院 李元白 1990 年 2 月 12 日收稿)