

用二维光栅实现 FPS 互连网络

康 辉 章江英 战元龄
(南开大学物理系, 天津 300071)

提 要

提出了一种应用二维光栅和简单的成像系统实现 folded perfect shuffle (FPS)的新方法,该方法具有简单,易行的优点,实验证明,其效果良好.

关键词 folded perfect shuffle, 光互联.

1 引 言

由于光子具有较电子不相互干扰的优点,所以在新兴的数字光计算机中自由空间的光互联正备受关注. 其中 PS 是一种最基本的互连网络,由它可以实现任意形式的光互联,因而具有极其重要的意义^[1]. 在数字光计算机中,PS 可以用于快速傅里叶变换,矩阵运算等多种算法^[2],一维的 PS 和二维的 PS 有着同等重要的价值,由于一维 PS 受空间带宽积和运算速度的限制,Stirk 等^[3]提出了用二维方法实现一维的 PS,称为 FPS,这样能充分利用二维空间带宽积而不受一维空间带宽积的限制,从而大大提高了运行速度. 后来 Haney 等^[4]对 Stirk 的方法作了某些改进. 本文提出了一种用二维光栅和简单的成像系统实现 FPS 的方法,讨论了该方法的基本原理,并给出了相应的实验结果.

2 原 理

关于什么是 folded PS,文献[3]已做了说明,为了充分利用光学系统的空间带宽积,先将一维数据线阵折叠成 2-D 数据阵列(见图 1(a)),然后象二维 PS 那样,将二维数据阵列依次按行和列(或者列和行)方向平分为二,并进行交错内插操作,所不同的是,二维 PS 是在两个互相垂直的方向上依次作同方向的平分和交错内插,而对于 FPS,如果第一步按行方向平分为左右两部分,同时将这两部分做列方向的交错内插,其结果如图 1(b)所示,则第二步是将图 1(b)所示二维数据阵列按列方向平分为上下两部分,同时将它们作行方向的交错内插,如图 1(c)所示,其最后结果即为一维线阵的 FPS.

将图 1(a)和图 1(c)中的数据元素排列顺序作一对比就不难发现,输入变为输出可通过四个像限的数据作相对平移交错内插的方法便可实现.

现设一维折叠数据为 $M \times N$ 阵列(其中 M 和 N 均为偶数),数据孔尺寸为 a ,相邻孔中心间距为 $b(b > 2a)$,则相对像限之间的平移量列于表 1 中. 由此可知,只要在数据传输过程中设法完成四个像限数据的规则移动,即构成输入和输出平面的 FPS 互连网络.

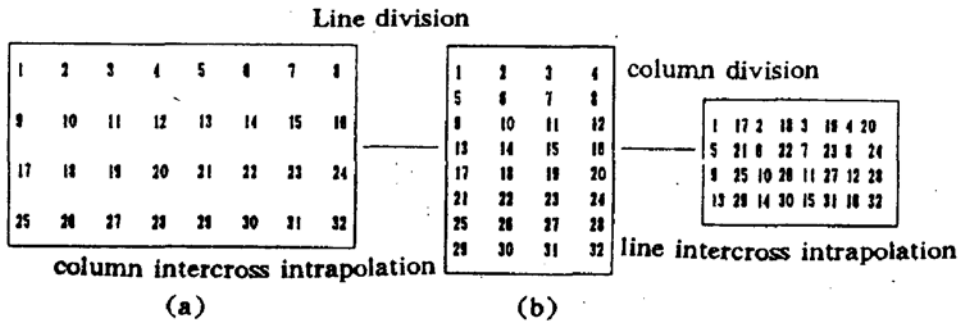


Fig. 1 The FPS in two steps, when $I = 32$

Table 1 The relative translations between the relative quadrants

quadrant	relative translation		
	y direction	z direction	total amount
1 and 3	$(N + 1)b/2$	$(M + 1)b/2$	$b/2 \sqrt{(N + 1)^2 + (M + 1)^2}$
2 and 4	$(N - 1)b/2$	$(M - 1)b/2$	$b/2 \sqrt{(N - 1)^2 + (M - 1)^2}$

用一个光栅-透镜成像系统传输数据可以方便地实现上述目标,图 2 中示出的就是这样一个带有空间滤波的 FPS 装置,其中, L 是焦距为 f 的成像透镜, G 为二维衍射光栅, P_1, P_2 和 P_3 分别为输入物平面、空间频谱面和输出像平面. 设输入物函数为 $f(y, z)$, 它代表一个由 $I = 2^k$ (k 为整数) 个光孔线阵折叠组成的 $M \times N$ 二维数据阵列. 一个二维光栅 G 放在 P_1 之后 x 处, 它的透射函数可表示为

$$G(y, z) = 1/2 + 1/4[\cos 2\pi(u_1 y + v_1 z) + \cos 2\pi(u_2 y + v_2 z)] = 1/2 + 1/4[\cos 2\pi\omega_1 \eta + \cos 2\pi\omega_2 \zeta] \quad (1)$$

其中 $\omega_1 = \sqrt{u_1^2 + v_1^2}, \quad \omega_2 = \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \quad (2)$

为二维光栅的空间频率, η, ζ 为光栅矢量坐标轴, u_1, v_1 和 u_2, v_2 分别为 ω_1 和 ω_2 在 y, z 轴方向的频率分量. 用平行光照射 P_1 平面上的物透明片, 则在 L 的后焦平面上形成物函数的夫琅和费 (Fraunhofer) 衍射图. 在旁轴近似条件下, 它的复振幅分布正比于物函数的傅里叶变换 $F(u, v)$ 和一个二次相位因子. 由于光栅 G 的衍射使该频谱图散开, 它在 P_2 平面上的分布为^[5]

$$(1/2)F(u, v) + (1/8)F(u \mp u_1, v \mp v_1)\exp[\pm 2\pi j(uc_{y1} + cv_{z1})] + (1/8)F(u \mp u_2, v \mp v_2)\exp[\pm 2\pi j(uc_{y2} + cv_{z2})] \quad (3)$$

$$u = y_1/\lambda f, \quad v = z_1/\lambda f, \quad c_{y1} = \lambda u_1 x, \quad c_{z1} = \lambda v_1 x, \quad c_{y2} = \lambda u_2 x, \quad c_{z2} = \lambda v_2 x \quad (4)$$

式中 y_1, z_1 为频谱面 P_2 上的空间坐标. (3) 式中已略去复常量和二次相位因子 (因为不影响输出结果). 在 P_2 平面上放置空间滤波器, 阻挡光栅的零级, 只让它的 ± 1 衍射级通过, 于是在输出平面 P_3 上出现四个像:

$$f'(y' \pm mc_{y1}, z' \pm mc_{z1}) + f'(y' \pm mc_{y2}, z' \pm mc_{z2}) \quad (5)$$

其中 $m = l/f$ 为透镜的线性放大率. 为了简单, 且因检测器只响应光强, 所以上式中的常量和相位因子均被省略. 在 (5) 式中, 前后两项的四个像是分别由两个光栅 ± 1 衍射级形成. 当输

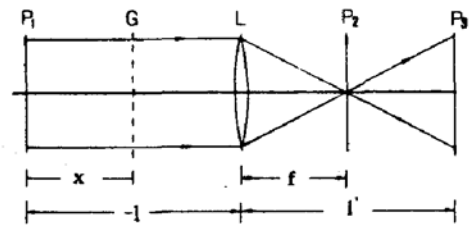


Fig. 2 The FPS setup consisting of grating-lens system

入二维数据阵列的空间大小和成像系统的参量一定时,前后两项各包含的两个像分别在两光栅的衍射方向上错开的距离为

$$\Delta_1 = 2m\lambda\omega_1x, \quad \Delta_2 = 2m\lambda\omega_2x \quad (6)$$

所以通过选择二维光栅的空间频率 ω_1 和 ω_2 , 使

$$\Delta_1 = mb/2 \sqrt{(N+1)^2 + (M+1)^2}, \quad \Delta_2 = mb/2 \sqrt{(N-1)^2 + (M-1)^2} \quad (7)$$

并且分别取两光栅矢量的方向余弦为

$$\cos\alpha_1 = \frac{(N+1)}{\sqrt{(N+1)^2 + (M+1)^2}}, \quad \cos\beta_1 = \frac{(M+1)}{\sqrt{(N+1)^2 + (M+1)^2}} \quad (8)$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{-(N-1)}{\sqrt{(N+1)^2 + (M+1)^2}}, \quad \cos\beta_2 = \frac{(M-1)}{\sqrt{(N+1)^2 + (M+1)^2}} \quad (9)$$

于是在 P_3 平面以光轴为中心的区域出现 FPS 的输出结果. 它是由(5)式中物函数的四个输出像各取一像限, 即空间频率为 ω_1 的光栅的 ± 1 级输出像分别取第三和第一像限, 频率为 ω_2 光栅的输出像则分别取第四和第二像限, 交错重叠而成.

在上述实现 FPS 互连网络的装置中, 光栅元件 G 可选用不同结构形式的光栅. 它可以是二维相加光栅(如式(1)所示), 也可以是二维相乘光栅, 后者可简单地用两光栅交叠(重合或分离)实现. 由于它会产生交互衍射极(前者没有), 因而增加了可被选择的衍射通道数目和调整的自由度, 对于 $M = N$ 的方阵, 所用二维光栅的空间频率之比为 $\omega_1/\omega_2 = (N+1)/(N-1)$, 方向余弦分别为 $(\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2), (-\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$, 即两组光栅条纹是正交的.

3 实验及结果

实验采用如图 2 所示的实验装置, 入射平行光束直径为 50 mm, 它是由 He-Ne 激光器发出波长 $\lambda = 633$ nm 的激光束, 经由一个 $40\times$ 显微物镜和一个焦距为 $f'_1 = 372$ mm 的准直透镜而得, 成像透镜 L 的焦距 $f'_2 = 372$ mm, 二维光栅由两个一维光栅叠加而成, 频率均为 $\omega_1 = \omega_2 = 17$ 1/mm.

输入数据如图 3 所示, 其中图 3(a)是 $M \times N = 4 \times 4$ 个英文字母, 每个字母大小为 $a = 2$ mm, 相邻字母间距 $b - a = 3$ mm, 采用 $1:1$ 成像 $m = l'/l = 1$, 二维光栅放置于距 P_1 为 $x = 479$ mm 处, 其中两个一维光栅的方向余弦分别为 $(0.97, 0.24)$ 和 $(0.24, 0.97)$.

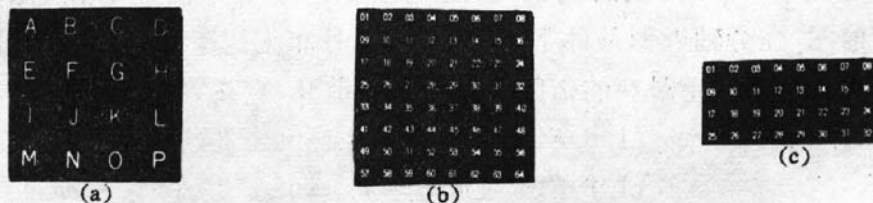


Fig. 3 The input data arrays

图 3(b)为 $M \times N = 8 \times 8$ 数字方阵, 其中每个数字大小为 $a = 1$ mm, 相邻数字间距为 $b - a = 1.5$ mm, 采用放大成像 $m = l'/l = 2$, 二维光栅放置于距 P_1 为 $x = 468$ mm 处, 其中两个一维光栅的方向余弦分别为 $(0.99, 0.12)$ 和 $(0.12, 0.99)$. 图 3(c)为 $M \times N = 4 \times 8$ 数字阵列, 每个数字大小为 $a = 1$ mm, 相邻数字间距 $b - a = 1.5$ mm, 采用放大成像 $m = l'/l = 2$, 组成二维光栅的两个一维光栅分别放在距 P_1 为 $x = 240$ mm 和 $x = 468$ mm 处, 方向余弦分别为 $(0.24, 0.97)$ 和 $(0.97, 0.12)$.

将输入数据分别放于 P_1 平面, 在用准直的平行光照明下, 透射物光束经光栅衍射后, 由透

镜会聚,在 P_2 平面通过如图4所示的空间滤波器,则在 P_3 平面上得到所需要的FPS的输出结果,如图5所示.在图5(a)中, $m=1$,FPS的输出与输入数据阵列相比是缩小的,这与图1的原理图相一致,印相时放大了两倍得图5(a)结果.为了使输出与输入兼容,可取 $m=2$,如图5(b)和(c)所示.

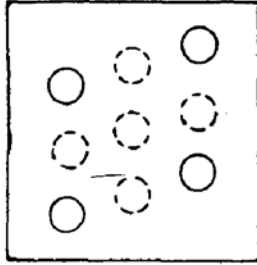


Fig. 4 The spatial filter

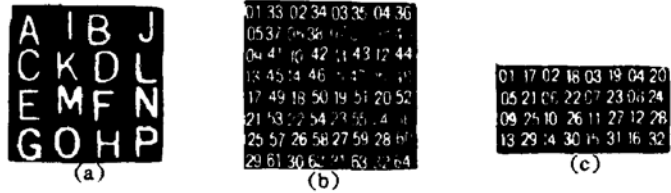


Fig. 5 The experimental results

4 结 论

由以上的实验结果可以看出,这种用二维光栅实现FPS的方法简单,可行,效果好,很有实用价值,实验中为减少能量损失,采用自制的位相型光栅,衍射效率较高.如果采用体位相光栅,效果会更好.另外,在这种方法中,使用一个透镜代替四个成像透镜^[3],因成像系统极限分辨率由透镜孔衍射决定,所以这种方法有利于提高光学系统传输数据的密度,也就是能充分地利用光学系统的空间带宽积.

参 考 文 献

- [1] A. W. Lohmann, W. Stork, G. Stuckle, Optical perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1986, 25(10): 1543~1549
- [2] H. S. Stone, Parallel processing with the perfect shuffle. *IEEE Trans. Comput.*, 1971, C-20(2): 153~157
- [3] C. W. Stirk, R. A. Athale, M. W. Haney, Folded perfect shuffle optical processor. *Appl. Opt.*, 1988, 27(2): 202~203
- [4] M. W. Haney, J. J. Levy, Optically efficient free-space folded perfect shuffle network. *Appl. Opt.*, 1991, 30(20): 2833~2940
- [5] 杨振寰著;母国光,羊国光,庄松林译,光学信息处理,天津:南开大学出版社,1986:316~320

The implementation of FPS interconnection network using 2-D grating

KANG Hui ZHANG Jiangying ZHAN Yuanling

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 15 June 1992; revised 18 September 1992)

Abstract

In this paper, a new method using 2-D diffraction grating to implement the folded perfect shuffle interconnection network is proposed. This method is simple and feasible, the experimental results prove its effectiveness.

Key words folded perfect shuffle, optical interconnection.