

一套二进制向量-矩阵乘法运算的光计算系统

张锐^{1,4}, 郭威², 李森³, 杨建坤⁴

- (1. 北京军区 66222 部队, 北京 102202; 2. 北京军区 66469 部队, 北京 102300;
3. 大连海事大学 计算机科学与技术学院, 辽宁 大连 116026;
4. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:对计算机前沿领域的光计算进行了讨论研究,介绍了光计算的核心运算器——光学向量-矩阵乘法器的工作原理,从实验角度出发,设计出了一套性能稳定的可实现二进制向量-矩阵乘法运算的光计算系统,并分析了此套系统的光学原理和性能特点。此系统具有矩阵乘法运算、数码显示、电压输出等功能,是一套实用性很强的教学科研演示产品,对光学乘法器以及光计算的研究具有一定的指导意义。

关键词:计算机;光计算;光学向量-矩阵乘法器

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)10-0141-03

An Optical Computing System with Performing Binary Vector - Matrix Multiplication

ZHANG Rui^{1,4}, GUO Wei², LI Miao³, YANG Jian-kun⁴

- (1. 66222 Army of Beijing Military, Beijing 102202, China; 2. 66469 Army of Beijing Military, Beijing 102300, China;
3. Academy of Computer Sci. & Tech., Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
4. Science School, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Optical computing in front edge of computer is researched, and the principle of optical vector - matrix multiplier as the core of optical computing is introduced. A steady optical computing system that can perform binary vector - matrix multiplication is designed, it can perform matrix multiply, digital display and pressure output. It's a practical teaching demo product and instructive to the research of optical computing.

Key words: computer; optical computing; optical vector - matrix multiplier

0 引言

随着计算机性能需求的提高,以及微电子技术和集成电路制备工艺的发展,为了提高计算机的计算能力和计算速度,因此,提高单片处理器的集成度在过去几十年来一直是一个有效的途径,而且基本按照摩尔定律发展。但是,随着处理器集成度的提高,今日大规模集成电路已经步入纳米领域,集成度的更进一步提高将受到物理尺寸和工艺技术方面的障碍,严重地制约着计算机的发展。

从计算机长远发展来看,采用并行处理技术是提高计算能力的一种有效途径。光计算技术^[1~3]是一种

采用光作为传输信息媒质的新型计算技术,光与电子相比,具有与电子几乎完全不同的特性,如具有更快的传播速度和更高的信息容量,并且交叉光束之间不容易发生互相干扰的问题,信息载体由电子转向光子是一种必然发展趋势。同时,由于光波束能够承载二维图像信息,使得光计算从本质上就具有了并行处理能力,使得光计算系统与传统计算机系统相比,具有更美好的开发前景。因此,电子计算机向光计算机发展成为了一种趋势。计算机运行速度的快慢取决于它的核心处理器,而光计算机的核心运算器就是光学向量-矩阵乘法器^[4~6]。

1 光学向量-矩阵乘法器系统设计

1.1 光学向量-矩阵乘法器原理

光学向量-矩阵乘法器从结构上分,主要由输入部分、信息处理部分、输出部分组成。它的光路系统主

收稿日期:2006-12-06

作者简介:张锐(1981-),男,湖南新化人,硕士研究生,研究方向为信息光学处理、光计算;杨建坤,博士,副教授,研究方向为信息光学、光计算、紫外通信。

要由光源阵列、透镜组、空间光调制器 (Spatial Light Modulators, SLM)、光探测器阵列构成。以 $m \times n$ 矩阵 A 与 n 维矢量 B 相乘, 得到 m 维矢量 C 为例, 若分别用 a_{ij} , b_j 和 c_i 表示 A , B , C 的元素, 则有以下公式成立:

$$c_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_j, (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

如图 1 所示, 首先用线阵光源来输入矢量 B , 即使光源线阵中的 n 个面发射激光器的光强正比 b_j 。其次用一个透射式矩阵编址空间光调制器来输入矩阵 A 。系统工作时, 光源经薄透镜准直垂直地入射到 CL_1 上, 通过 CL_1 扇出将任一 b_j 成像在 SLM 上形成一条强度均匀水平 (i 方向) 光带, 在 SLM 上完成相乘后, SLM 上的任一像素 (i, j) 光强正比于 $a_{ij} b_j$ 。竖直方向 (j 方向) 每一列的光束再经过 CL_2 聚焦到光电探测器阵列 D 上。由于 CL_2 的扇入作用, 使得 SLM 上第 i 行所有像素的光都集中在第 i 个探测器上。由于线阵光源上的各个点源发出的光 b_j 互不相干, 所以光探测器上第 i 个探测器的输出正比于向量积 C 的相应元素 C_i , 即满足公式 (1)。

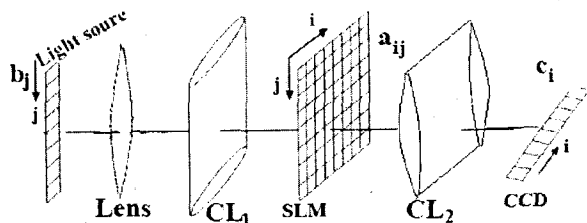


图 1 光学矢量-矩阵乘法器光路图

1.2 光学向量-矩阵乘法器实验设计

光学向量-矩阵乘法器系统的光路设计基于光学信息处理中典型的“4f”系统原理。为确保光学系统运算的精度, 实验环境要求在暗室中。系统的搭建按照光源面到接收面的顺序依次, 具体步骤如下:

首先, 确保光学元件光轴的一致性。调整所有元件统一高度, 通过光学自准直方法调节将光源面、薄透镜、柱面镜三者光轴相互平行。为保证光学像面上条纹亮度均匀性, 减小小光学元件像差带来的影响, 要使光束基本落于透镜的中心位置, 不仅保证了实验系统的光学像差的要求, 还能有效避免光学元件固有的非线性影响。

其次, 确定光学透镜的位置。将光源面和扇出透镜分别置于薄透镜的前、后焦面上, 使光源光束经准直后发散到光孔面的每一列上; 再将扇入透镜和扇出透镜分别置于光孔面的前、后焦面上, 光孔面每一行的光束会聚到接收面上, 系统搭建如图 2 所示。

最后, 微调元件位置使系统达到理想的效果。微调薄透镜位置使光束在其后焦面上呈现一个均匀的圆

斑, 确保在光孔面上得到清晰明亮的条纹; 微调光孔面的位置使条纹对正矩阵中元素, 确保顺利实现向量-矩阵的乘法运算; 微调接收面位置使得条纹的位置与光敏管的位置完全重合, 确保测量结果精准。

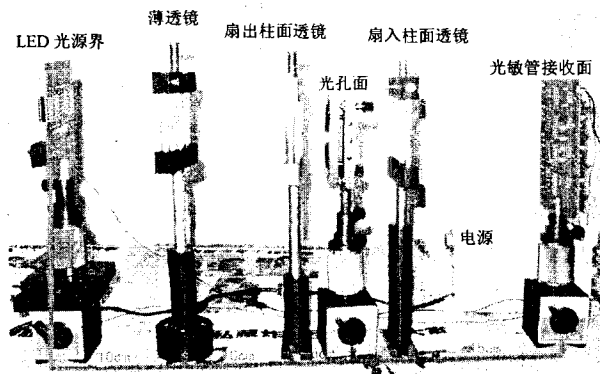


图 2 光学向量-矩阵乘法器系统实物图

1.3 光学向量-矩阵乘法器实验结果分析

首先, 从数学的角度分析实验结果, 通过改变不同的输入向量, 验证输出结果是否准确。令光源面上输

入向量 $(1 \ 0 \ 1 \ 1)$, 光孔面上输入矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

通电后接收面上得到的条纹, 如图 3 所示, 经光强量化得到输出向量 1 为 $(2 \ 1 \ 3 \ 2)$, 此结果符合公式 (1)。再令

原输入矩阵信息不变仍为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

改变输入向量为 $(0 \ 1 \ 0 \ 1)$, 通电后在接收面上得到的条纹, 如图 3 所示, 经光强量化得到输出向量 2 为 $(1 \ 1 \ 2 \ 0)$, 此结果符合公式 (1)。最后令输入向量不变仍为 $(0 \ 1 \ 0 \ 1)$, 改

变矩阵信息为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

通电后在接收面上得到的条纹, 如图 3 所示, 经光强量化得到输出向量 3 为 $(2 \ 1 \ 2 \ 1)$, 此结果符合公式 (1)。实验结果表明, 此光学向量-矩阵乘法器演示系统可以进行向量-矩阵乘法运算。



图 3 接收面上各输出向量的条纹图

其次, 从光学实现的角度论证实验结果。在光路

设计上,此系统是一个典型的“4-f”光学系统,实验中利用光强来表示输入输出的数字量。在光源面上,每个 LED 发光的光强大小是相同的,那么 LED 发光时就可以表示输入数字为“1”,不发光表示输入数字为“0”;在光孔面上,通光孔可在矩阵中表示为“1”,不通光孔表示为“0”。当亮条纹照在光孔上时,就实现了相乘,即亮条纹照在通光孔上完成了 $1 \times 1 = 1$ 运算,亮条纹照在不通光孔上完成 $1 \times 0 = 0$ 运算;扇入透镜把光孔面上每一行的光强信息都会聚到接收面上,若光孔面上同一行中只有一路光束通过扇入透镜,实现 $1 + 0 = 1$ 运算,若同一行中有两路光束通过,实现 $1 + 1 = 2$ 运算,以此类推。在接收面上形成明暗条纹的光强都是成比例的,令单通光孔形成条纹光强为“1”,其他条纹则可按照倍数关系换算成数字量。光路分析表明,此光学向量-矩阵乘法器演示系统可以进行光学向量-矩阵乘法运算。

2 总 结

此系统是一套可实现 4 维向量与 4×4 维矩阵相乘的二进制光学乘法器系统,与传统电子计算机的核心运算器——累加器相比,它具有速度更快、信息量更大、并行度高等特点。此系统具有电子显示和电压输出的功能,只要在光源面上任意输入一组 4 维向量,同时就会在接收面上数字显示出运算结果,是一套实用性很强的教学科研演示系统。

光学向量-矩阵乘法器系统完成的是一个二维并行运算的光计算过程。由于光本身具有传播速度快和信息容量高,并且交叉光束之间不容易发生互相干扰的特点,使光学向量-矩阵乘法器在并行处理上有着明显优势,在传统计算机中,完成向量-矩阵乘法需要将乘法换算成加法运算,才能通过累加器进行计算,而

光学向量-矩阵乘法器所有的乘法、加法都可以同步高效地完成。这种光学系统能够在瞬间完成两个函数(或数值矩阵)之间的相关操作,相当于多个处理器(相当于函数的元素数量)联合在一起并行处理数据,这样的并行处理能力是惊人的,对处理很多领域中要求大计算量的傅氏变换是很有优势的。如果数值矩阵具有 $1000 \times 1000 = 10^6$ 个元素,那么这样的光学系统就有可能相当于具有 10^6 个处理器的传统超级巨型计算机的处理能力,而且更重要的是,将此光路结构进行紧凑处理后,这样的光学系统体积较小,结构非常简洁,没有传统超级巨型计算机那么庞大和复杂,无论是系统的稳定性还是系统的效率都具有很大的优越性。同时,这样的光学系统可扩展性非常好,只要相关器件技术得到提高,并在光学结构上进行改进,就可以大幅度提高并行计算处理的能力。

参考文献:

- [1] Jahns J, Holmdel, Jersery N. Optical Computing Hardware [M]. [s. l.]: AT&T; Academic Press, 1994.
- [2] Murocca M. Advances in Digital Optical Computing[J]. The International Journal of Optoelectronics, 1990, 3(2): 191 - 205.
- [3] Haibach F G, Myrick M L. Precision in multivariate optical computing[J]. Appl Opt, 2004, 43(10): 212 - 217.
- [4] Goodman J W. Fully parallel, high-speed incoherent optical method for performing discrete Fourier transforms[J]. Opt Lett, 1978, 2(1): 1 - 3.
- [5] Gruber M. Planar-integrated optical vector-matrix multiplier[J]. Appl Opt, 2000, 39(29): 5367 - 5372.
- [6] Zhou changhe, Liu liren, Wang zhijiang. Binary-encoded vector-matrix multiplication architecture[J]. Opt Lett, 1992 (17): 1800 - 1802.

(上接第 136 页)

ference on Computer Vision and Pattern Recognition. Collins: IEEE Computer Society, 1999: 246 - 252.

- [3] 尹小杰,朱 斌,樊 键. 无迹 Kalman 滤波器及其目标跟踪应用[J]. 测控技术, 2006, 25(8): 73 - 75.

(上接第 140 页)

- [7] 季 方,鲍远律. 基于外延特征的栅格地图噪声去除算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(9): 1062 - 1068.

- [8] 史久根,张旺生,鲍远律. 彩色地图图象中道路信息的识别和提取[J]. 微机发展, 2000, 10(1): 64 - 66.

- [9] Chang Ahn. Character Extraction form Color Map Image Us-

- [4] 李彦鹏,黎 湘. 一种快速 Kalman 滤波算法实现及效果评估[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(1): 153 - 154.

- [5] 沈宇键,何 昕,郝志航. 图象序列中检测运动小目标的递归算法[J]. 光电工程, 2000, 27(2): 9 - 13.

- ing Interactive Clustering[J]. J KIPS, 1997, 4(1): 270 - 279.

- [10] 陈兵旗,孙 明. Visual C++ 实用图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

- [11] 地图编辑室. 中国公路交通图册[M]. 北京:地质出版社, 2000.