

文章编号: 0253-2239(2006)03-0430-7

三种光电混合神经网络系统衍射误差的仿真研究*

陈 戌¹ 张延焯²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 介绍了三种类型的光电混合神经网络系统,重点研究了衍射引起的误差对系统输出的影响。根据衍射、光学信息处理和神经网络理论,采用实验中的参量和输入数据,对衍射造成的输出误差做了仿真分析。分析表明,近场衍射造成较大的输出误差。近场与远场衍射综合作用时,误差因输入图像模式不同而差异较大;其中,当输入较小的简单图像时相对误差较大;而对实验中实际采用的复杂图像,相对误差较小。利用线性回归方法对输出数据做了校正,并分析了其可行性,校正后的数据误差降低一个量级。衍射误差对实验中识别率的影响可以控制在较小的范围内,识别率可以保持在 97.7% 以上。

关键词: 信息光学; 神经网络; 误差; 仿真; 衍射; 光学信息处理; 空间光调制器

中图分类号: TP389.1 文献标识码: A

Simulation on the Errors of Three Opto-Electronic Hybrid Neural Networks Induced by Diffraction

Chen Shu¹ Zhang Yanxin²

(¹ *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)
(² *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract: Three types of opto-electronic hybrid neural networks are introduced. The errors induced by diffraction in these networks are emphasized and analyzed with computer simulation using the experimental parameters and input data, where diffraction, optical information processing and neural network theories are applied. It shows near-field diffraction induces large magnitudes of relative errors. When near-field diffraction and far-field diffraction are employed together, the errors are different according to the display modes. When the display mode is a small image, the magnitudes of relative errors are very large. However, when the display mode is a complicated image, the magnitudes of relative errors are small. The feasibility of using linear regression to calibrate the output data is discussed. It is found that linear regression can reduce the errors for about one magnitude. According to the analyses, the errors induced by diffraction can be minimized to a low level in the experiments, and thereby, the recognition rates can be maintained at a high level (larger than 97.7%).

Key words: information optics; neural network; error; simulation; diffraction; optical information processing; spatial light modulator

1 引 言

神经网络是不同于冯·诺埃曼(Von Neumann)体系计算机的系统,具有强大的功能,如并行能力、分布式存储、大存储量容错性等。神经网络的处理能力和大存储量主要依赖于两点:大量神经元的非线性操作和这些神经元之间的复杂互联。很多类型的神经网络的数学模型和实现方法相继被提出。其中的实

现方法主要包括电子方法和光学方法^[1~7]。其中,光学方法的优越性在于较高的并行能力、互连带宽和传播速度。目前全光运算技术尚不成熟,光学神经网络一般以光电混合网络体系为主,在需要大规模互联的时候利用光学系统。另一方面,对于光互联和光计算,其并行能力和计算精度还受到光学系统几何像差和衍射等因素的限制。文献[5,8]对此做过误差分

作者简介: 陈 戌(1973~),男,天津人,博士后,主要从事信息光学、脉冲整形和图像处理方面的研究。

E-mail: shuchen73@sina.com

收稿日期: 2005-04-21; 收到修改稿日期: 2005-09-30

析,但因为需要很大的计算量,尚未有文献讨论过具体样本模式图像与输出误差的关系。

本文中所提到的几个光电混合神经网络,由于采用模式复现以及将样本模式显示平面与权重模板紧贴在—起的方法,以尽量减小光学系统的几何像差对光互联的影响。但是由于器件工艺的限制和系统本身一些特点,近场衍射和远场衍射对系统输出造成的误差不可忽略。此外,在实验中得到的结果与理想情况相差较远。本文结合—些实际应用中的模式样本图像对光学系统的衍射所造成的输出误差做了详细的数字仿真和论述,以厘清其对实验结果的影响。

2 光电混合神经网络系统原理分析

图 1 至图 3 给出了三种类型的光电混合神经网络系统的示意图。这些系统具有一些共同特征,比如:平行光照明,两空间光调制器(本文实验使用的是液晶显示器,即 Liquid crystal device, LCD)紧贴在—起分别用于显示待识别模式和权重模板,由光电器件——比如 CCD 或光电探测阵列(PDA)作为探测器。图像的预处理、神经元规模较小的输出层的后处理由非光学方法实现。

图 1 所示的系统中光电探测阵列紧贴在两空间光调制器后面,显然此系统占用空间较小。按照几何光学,光线穿过空间光调制器 1 的像素(pixel)和 LCD2 的对应像素并由光电探测阵列探测光能,完成相乘——求和的计算。但是,由于空间光调制器的像素尺度很小,即使在距离空间光调制器基底平板很近的距离,也可以观察到明显的衍射效应。这样,透过 LCD1 一个像素的光场将不仅只投射到 LCD2 对应像素,还分布在其邻近的像素区域内。如果这些邻近像素中的任何一个透过状态,此区域内的衍射光场将透射到光电探测阵列上从而产生误差。

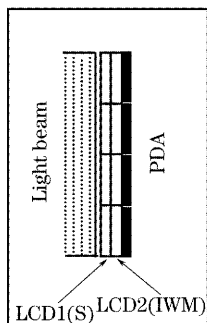


图 1 紧凑结构的光电混合神经网络系统

Fig. 1 An architecture of opto-electronic hybrid neural networks with a compact configuration

图 2 所示是另一类型的系统,一个不透光的隔离框架安置在小透镜阵列(L_N)之后。每一个小透镜对应一个光学通道,光波穿过两个空间光调制器完成乘法操作,其后的小透镜汇聚光波完成求和操作。空间光调制器是一个二维光栅,在每个通道传播的光波都会由于光栅的衍射作用串扰邻近通道的区域,隔离框架就是用于消除这种串扰的。场镜 L_1 被安置在焦平面的位置,而成像透镜 L_2 则将此焦平面成像到 CCD 平面上。因为 CCD 像面较小,所以 L_2 的物距较大,而且,由于 L_2 的孔径角与小透镜的孔径角成正比,为了使 L_2 有一个适当孔径的光瞳,小透镜的焦距也应该比较长,所以图 2 所示的光路是非常长的。从光场衍射的角度来分析,此类系统经历从空间光调制器 LCD1 到 LCD2 的近场衍射后,还有从 LCD2 到像平面的远场衍射。

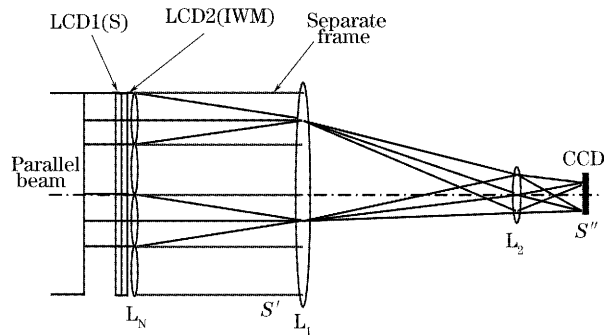


图 2 用隔离框架隔离邻通道衍射的光电混合神经网络系统

Fig. 2 An architecture of opto-electronic hybrid neural networks with a separate frame for isolating diffractive light induced by adjacent channels

图 3 所示的系统中,一个汇聚透镜 L_1 紧贴在小透镜阵列之后,成像透镜 L_2 将 S' 成像到 CCD 平面上,在 L_2 之前、 L_1 的后焦平面 P 上安置一个光阑,在 L_2 之前、 L_1 的后焦平面 P 上安置一个光阑,在 L_2 之前、 L_1 的后焦平面 P 上安置一个光阑,

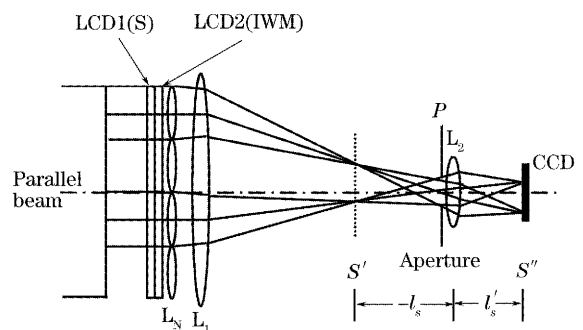


图 3 利用光瞳遮挡高级次衍射的光电混合神经网络系统

Fig. 3 An architecture of opto-electronic hybrid neural networks, in which an aperture is applied to block the higher-order diffractive light field

取代图 2 中的隔离框架用于滤波。图 3 中 L_1 的位置与图 2 中不同, 这使 L_N 到 S' 的距离缩短; 也缩小了 S' 上各焦点的间距, 即减小了 S' 作为 L_2 物面其入窗的大小, 从而在保持 CCD 平面出窗大小不变的前提下, 物距 $-l_s$ 也减小。所以, 较之图 2, 图 3 所示系统的光路明显缩短。此系统与图 2 所示系统相似, 都经历从 LCD1 到 LCD2 的近场衍射和从 LCD2 到像平面的远场衍射。根据几何光学不难验证, 汇聚在 S' 上所有通道的零级光, 都将重叠地投射到 P 上, 其光斑的形状与各通道透光部分相同。因此, 适当的选择光阑的形状和尺寸, 可以将 0 级通过而滤掉高级次的光场。当然, 由于光的衍射效应, 即使在 S' 距离光阑很近的条件下, 0 级光在光阑平面上也不是严格的几何投影, 这样光阑可能会挡住部分 0 级光, 而另一方面高级次的光场反而可能因相同的原因漏进光阑。因此, 在此系统配置下, 虽然可以相当程度地减小邻近通道高级次衍射光场的串扰, 但还不能完全消除。从下一节开始, 本文将分别讨论上述三种系统的近场和远场衍射对系统输出误差的影响。

3 近场衍射引起的误差

按目前的工艺水平, 空间光调制器的厚度不会很小(本文实验: ~ 2 mm), 两空间光调制器像素平面间距 d 不会是 0, 如前文所述, 近场衍射效应所引起的误差不能被忽略。按照衍射理论, 衍射距离在毫米量级内, 夫琅禾费(Fraunhofer)衍射与菲涅耳(Fresnel)衍射近似都不再适用。空间光调制器像素可透光区域的尺度远远大于照明波长, 也不必使用格林函数法^[9], 所以使用瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射公式(平行光照明)^[10], 描述两空间光调制器间近场衍射:

$$a_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} a_1(\rho) h(x, \rho) d\rho, \quad (1a)$$

其中点源响应函数

$$h(x, \rho) = \frac{\cos \theta \exp(jkr)}{j\lambda r}, \quad (1b)$$

并且 ρ 和 x 分别是 LCD1(输入)平面 C_1 和 LCD2(输出)平面 C_2 的坐标, r 是 ρ 和 x 两点间距, λ 为照明波长, θ 为衍射的方向角, $k=2\pi/\lambda$, $a_1(\rho)$ 、 $a_2(x)$ 分别为 C_1 、 C_2 上的光场分布, 平行光照明下 $a_1(\rho)$ 可以视为 LCD1 显示的图像模式。由于(1a)式的分母 r 不能作近似处理, 此公式不能换算成快速傅里叶算法, 只能采取迭代法仿真计算。假定 LCD1 仅有位于通道中心的一个像素(设编号为 1)处于透过状

态, 即 C_1 的光场为

$$a_1(\rho) = \text{rect}\left(\frac{x}{N_x}, \frac{y}{N_y}\right), \quad (2)$$

其中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数, N_x 和 N_y 为空间光调制器像素的可透光区域 D 的二维尺寸。按照上述公式进行仿真计算, 并考察 C_2 上各像素透光区域 D_i (i 为像素编号) 内能量占有率, 即

$$R_i = E_i / \sum_j E_j, \quad (3)$$

的值。其中

$$E_i = C_0 \iint_{D_i} \|a_2(x, y)\|^2 dx dy, \quad (4)$$

为 D_i 区域内分布的光能, C_0 为常量。按照上一节, 几何光学范畴对应理想状况 $a_2(x) = a_1(\rho)$, (2) 式条件下有 $R_1 = 1$, 其余 $R_i = 0$ 。图 4 给出了对应像素 1 的 $d-R_1$ 关系图。从中可以看出, N_x, N_y 越大(VGA 的 N_x, N_y 大于 SVGA 的相应参量), λ 越短、 d 越小, 则 R_1 越接近 1, 但是, 在实际参量配置下 ($d = 2.0$ mm), R_1 与理想值差别较大, 造成的误差已经超过本文实验的允许值, 使图 1 系统进行精确(从数值角度)或者有效(从模式识别的识别率角度)的光计算变得不可能。

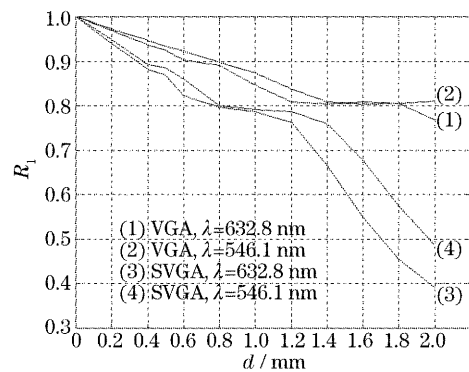


图 4 像素 1 的 $d-R_1$ 关系图, R_1 为像素 1 可透光区域内衍射能量占有率, d 为两空间光调制器的像素平面间距
Fig. 4 The $d-R_1$ curves of pixel 1 on the LCD2 plane, where R_1 is the energy ratio of pixel 1 on the output screen (LCD2 plane), and d is the distance of two LCDs' pixel planes

4 近场衍射和远场衍射共同作用引起的误差

对于图 2 所示系统, 本文根据其实际应用, 规定 LCD1 的像素平面 C_1 为其输入平面, S' 为输出平面。根据光学信息处理理论, S' 的光场可以描述为 LCD2 的像素后平面 (C_2') 光场 $A_1(x)$ 的傅里叶变换

$A_2(v)$ 乘以相位因子和常数因子, 而各通道的输出则为相应的 0 级振幅 $A_2(0)$ 。这就是说, 系统的光计算分为两个部分: 从 C_1 到 C_2 的近场衍射(第一次光栅衍射)以及从 C'_2 到 S'' 的远场衍射(第二次光栅衍射)。对于近场衍射, C_2 上的光场是 LCD1 上各出于开启状态的像素的近场衍射的叠加, 即是说将(2)式代入(1a)式得到的光场作为模板。因此, 一个通道 S'' 上光场正比于:

$$A_2(v) = \mathcal{F}\{A_1(x)\}, \quad (5a)$$

其中

$$A_1(x) =$$

$$A_0(x) \cdot \left\{ \left[\text{comb}\left(\frac{x}{T_x}, \frac{y}{T_y}\right) \cdot P_2(x) \right] \otimes a_1(\rho) \right\}, \quad (5b)$$

为 C'_2 的光场分布, 其中

$$A_0(x) = \left\{ a_0(x) \otimes \left[\text{comb}\left(\frac{x}{T_x}, \frac{y}{T_y}\right) \cdot P_1(x) \right] \right\} \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{M_x}, \frac{y}{M_y}\right), \quad (5c)$$

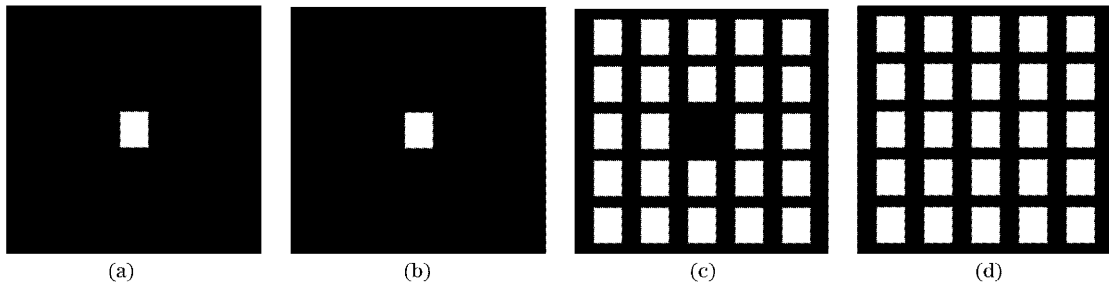


图 5 几个 LCD 简单显示模式

Fig. 5 Some simple LCD display modes (5 pixel×5 pixel)

表 1 图 2 所示系统远场衍射 0 级的相对振幅(LCD1 的显示模式为图 5(a), LCD2 的显示模式为图 5(b)~图 5(d)。Ideal: 理想输出, $d=2.0$ mm, $\lambda_1=632.8$ nm, $\lambda_2=546.1$ nm)

Table 1 The relative amplitude of the primary order far-field diffraction of the double LCD architecture shown in Fig. 2. (The display mode of LCD1 is shown in Fig. 5 (a), and the display modes of LCD2 in Fig. 5 (b)~(d). Ideal: ideal output)

Parameter	The display mode of LCD2		
	Fig. 5(b)	Fig. 5(c)	Fig. 5(d)
Ideal	1	0	1
VGA, λ_1	1	0.32319	0.68171
VGA, λ_2	1	0.23112	0.76960
SVGA, λ_1	1	1.06840	0.73871
SVGA, λ_2	1	0.87189	0.76076

本文采用文献[11,12]提出的神经网络模型和算法, 该模型共有 6 个中间层神经元, 每个神经元有正负两个权重模板, 共 12 个光学通道。该文献以三种

为 C_2 的光场分布, 而 v 正比于 S'' 的坐标, T_x, T_y 为空间光调制器像素的二维尺寸(含不透光部分), M_x, M_y 为通道的二维尺寸, P_1, P_2 则分别为 LCD1 和 LCD2 显示的输入模式和权重模板, $\text{comb}(\cdot)$ 为梳状函数。先考虑简单模式, 设图 5(a) 是 LCD1 的显示模式, 而图 5(b)~图 5(d) 则为 LCD2 的显示模式。根据(5)式, 表 1 给出了不同参量配置下对应的相对输出值可以看出与理想值的差异相当大, 尤其是 SVGA, $d=2.0$ mm, $\lambda=632.8$ nm 时, 其理想值应为 0 的模式的实际输出, 竟然比理想值为 1 的模式的实际输出值还要高。这样大的误差, 使图 2 所示系统看上去也是不实用的。但实际应用中, 图像远比图 5 复杂, 实验结果也并没有那么差(参第 6 节)。这就是说, 表 1 给出的结果, 仅是特例, 而要对系统的性能做出一个全面的评价, 必须使用实际的神经网络模型、权重模板和待识别模式样本。

飞机图像模式作为训练和识别样本, 训练得到权重模板, 本文亦采纳此模板; 飞机图像模式样本选自实验采集的样本图库, 已被验证在无误差时识别率(可称之为理想识别率)是 100%。每一种飞机图像选取 60 个模式样本, 其中 16 个用于后文的数据校正, 其余 44 个用于计算系统误差和性能的评价。选择实验中所用参量 VGA, $d=2.0$ mm, $\lambda=632.8$ nm。作为综合评价, 一些细节问题还应该被考虑。比如交换权重模板与模式样本在两空间光调制器上的显示位置对输出结果的影响, 又如 CCD 像素尺度对输出的影响。对于后者, 需要在 0 级光场对应的像素内采集多点的强光, 将它们之和视为 0 级光强, 其平方根

$$\mathcal{A} = C'_0 \sqrt{\sum_{i,j} \|A_2(i\Delta, j\Delta)\|^2}, \quad (6)$$

视为输出振幅, 与(5a)式的 $A_2(v)$ 对应。其中 Δ 为采样间隔, C' 为常数。本文采用 3.214×10^{-4} mm 作为采样间隔, 并根据实验中采用的 CCD 的像素大

小确定采样区域为 0 级光点周边一个 3×3 的矩阵。作为对比,还要计算单空间光调制器配置下(即系统中只有一个空间光调制器,显示 $P_1(x)$ 与 $P_2(x)$ 点对点相乘后的图像)的对应数据,此时,输出光场形式上仍可表示成(5a)式,但 $A_1(x)$ 应改为

$$A'_1(x) = \left[\text{comb}\left(\frac{x}{T_x}, \frac{y}{T_y}\right) \cdot P_1(x) \cdot P_2(x) \right] \otimes a_1(\rho), \quad (7)$$

这是由于,单空间光调制器配置排除了双空间光调制器中的近场衍射, $P_1(x) \cdot P_2(x)$ 由计算机完成,因而不需图 5(b)、图 5(c)式。比较两种配置下的输出误差,可以分析出两种衍射在综合作用时各自的影响。表 2 给出了上述各种条件下仿真计算得到的输出误差和相应的模式识别率。从这些数据中可以看出,在不考虑 CCD 分辨率的假设下,图 2 系统的输出误差非常小,以致没有影响神经网络系统的识别率,这与前述关于简单图像的结论完全不同。而当考虑到 CCD 分辨率时,误差值显著增加(一个数量级),识别率则稍有下降。而与单空间光调制器配置下的误差数据比较,则可以发现另一个有趣的现象:如果不考虑 CCD 的分辨率,则图 2 在单空间光调制器配置下的输出是理想值,但如果计及 CCD 的分辨率,单空间光调制器配置下的输出误差反而比双空间光调制器配置下的误差稍大一点。与之相比,双空间光调制器配置仅仅增加了近场衍射效应,

表 2 图 2 所示系统的在不同配置和分辨率下各通道输出误差和模式识别率[数值:均方根误差/最大理想输出,单位: 10^{-2} ,测试样本总数:132。符号定义: C_1^+ , C_7^- :通道标号; N :普通配置(双空间光调制器); S :单空间光调制器配置; C :考虑 CCD 分辨率; H :高分辨率(不考虑 CCD 分辨率)]

Table 2 The output errors and the recognition rates by simulating the architecture shown in Fig. 2 with different configurations and resolutions. [Value: RMS/Ideal maximum output, unit: 10^{-2} . Number of tested samples: 132. C_1^+ , C_7^- : channel labels. N : normal configuration (double LCD). S : single LCD configuration, C : the output data are read with the resolution of the CCD. H : the output data are read with high resolution (without involving the resolution of the CCD)]

	C_1^+	C_5^-	C_1^-	C_5^+	C_2^+	C_6^-	C_2^-	C_6^+	C_3^+	C_7^-	C_3^-	C_7^+	Recognition rate / %
N. C.	2.01	0.98	1.43	0.41	0.94	1.02	0.90	1.00	2.16	0.91	1.12	0.42	98.5
S. C.	2.24	1.08	1.54	0.45	1.03	1.12	0.97	1.09	2.38	1.01	1.22	0.44	98.5
N. H.	0.275	0.161	0.160	0.087	0.142	0.139	0.144	0.166	2.69	0.178	0.171	0.093	100

5 邻近通道高级次光场对误差的影响

图 3 的系统是实验室实际采用的一套系统,原因是它的光路比较短,符合设计的预期。其输入输出平面的规定与上一节相同。由于光瞳阻挡了部分光场,系统的远场衍射不能由一步计算得出,而是分成两步。第一步计算光瞳平面 C_p 上的光场分布,由

所以通过上述的误差数据对比,不难得出以下结论:当显示图像像素规模较大时,图 2 系统的输出误差中,近场衍射的作用非常小,误差的主要来源是远场衍射。对比(6)式和(5a)式,若要使上述两种分辨率下得到的输出值接近,则在此 CCD 像素范围内分布的光场应当尽量平坦。从仿真计算得到的数据和上述的误差分析表明,单空间光调制器配置的输出平面 0 级处,光场的分布是比较尖锐的,这其实是光学系统分辨率比较高的表现,但是当计及 CCD 的分辨率,前者的高分辨率对输出的影响却是负面的。同样的道理,从数学上看,图 2 系统两空间光调制器间的近场衍射相当于对从到输出平面 S'' 的远场衍射做卷积,也就是使输出光场“模糊化”(或者说“平坦化”),从光学系统来看这固然使系统的分辨率降低,但是当计及 CCD 分辨率时,这种卷积效应却能稍为改善结果。所以,从整个系统的角度而言,光学系统部分的分辨率并非越高越好,关键是要与光敏器件的空间分辨率相匹配。此外,在通道中对换显示样本模式图像和对应权重模板的显示位置,得到的输出结果改变非常小,当对结果取整后,绝大多数结果都与原来相同,只有极少数的值与原结果相差很小的数值,总的均方差与原结果相比,也仅在有效数字的第 3 位之后有差别。而且这样的误差对识别率也没有影响,故本文不专门把此类数据另表列出。

光学信息处理理论(略去常数因子)知:

$$A_3(x_3) = \exp\left\{j\pi \frac{\|x_3\|^2}{\lambda f_1'}\right\} F_1^{(\rho)}\left(\frac{x_3}{\lambda f_1'}\right), \quad (8a)$$

其中 $F_1^{(\rho)}\left(\frac{x_3}{\lambda f_1'}\right) = \mathcal{F}\left\{\sum_i A_{1,i}^{(\rho)}(x - x_0)\right\}, \quad (8b)$

$$A_1^{(\rho)}(x) = A_1(x) \exp\left\{-j2\pi \frac{\|x\|^2}{\lambda f_N}\right\}, \quad (8c)$$

x 是平面的坐标, x_3 为 C_p 的坐标, i 表示通道的序号, x_{i0} 表示通道 i 的中心在平面 C'_2 的坐标, λ 为照明光源的波长, 而 $f'_j, j = 1, N$ 为各透镜的焦距。第二步计算 C_p 到 S' 的远场衍射, 即由光学信息处理理论(略去常数因子):

$$A_4\left(\frac{x_4}{\lambda'_s}\right) = \exp\left\{j\pi \frac{\|x_4\|^2}{\lambda'_s}\right\} F_3^{(p)}\left(\frac{x_4}{\lambda'_s}\right), \quad (9a)$$

其中

$$F_3^{(p)}\left(\frac{x_3}{\lambda'_s}\right) = \mathcal{F}\left\{A_3^{(p)}(x_3) \cdot \text{rect}\left(\frac{x_3}{P_x}, \frac{y_3}{P_y}\right)\right\}, \quad (9b)$$

$$A_3^{(p)}(x_3) = A_3(x_3) \exp\left\{j\pi \frac{\|x_3\|^2}{\lambda'_s}\right\}, \quad (9c)$$

$$l_s = f'_N f'_1 / (f'_N + f'_1) + f_2, \quad (9d)$$

$$l'_s = f'_2 l_s / (f'_2 + l_s), \quad (9e)$$

x_4 为输出平面的坐标, P_x, P_y 是图 3 中光瞳的二维尺寸。根据(9a)式, 可以在对应点读出输出平面上所有通道 0 级光的振幅并用它们计算出神经元的输出。与第 4 节类似, 表 3 给出了各种条件下的输出误差和相应的系统识别率。从中可以得出一些与上

一节分析图 2 系统相似的结论, 即: 单空间光调制器配置下的输出误差比双空间光调制器配置下的输出误差稍大; 当空间光调制器上显示复杂图像时, 系统的输出误差也远小于显示简单图像时。此外, 在通道中对换样本模式和权重模板, 得到的输出结果也与原结果相差极小, 本文亦未另表列出。但也有明显不同之处, 比如在不考虑 CCD 分辨率时, 单空间光调制器配置下的输出误差也仍然比双空间光调制器配置下的输出误差稍大, 这其中的原因下节有所提及。另一个明显的不同是, 图 3 所示系统的误差明显比图 2 所示系统的大, 识别率也有所下降。很显然, 增大的误差来源主要是光瞳不能完全阻挡邻近通道的高级次光场从而形成串扰, 亦不能完全通过 0 级光场所致。与上一节的误差分析相比较, 从误差构成的比例来看, 无论是否考虑 CCD 分辨率, 上述来源之误差所占比例都较大, 而由 CCD 分辨率所引起的误差, 比例较小。虽然误差值有所增大, 但系统的识别率还是比较高的。

表 3 图 3 所示系统的在不同配置和分辨率下各通道输出误差和模式识别率(各种约定与表 2 相同)

Table 3 The output errors and the recognition rates by simulating the architecture shown in Fig. 3 with different configurations and resolutions. (All of the conventions are the same as those presented in Table 2)

	C_1^+	C_5^-	C_1^-	C_5^+	C_2^+	C_6^-	C_2^-	C_6^+	C_3^+	C_7^-	C_3^-	C_7^+	Recognition rate / %
N. C.	4.11	2.05	2.81	0.80	2.08	2.39	1.76	2.32	4.56	2.01	2.11	0.85	96.2
S. C.	4.29	2.13	2.87	0.83	2.14	2.45	1.83	2.40	4.74	2.09	2.18	0.89	95.5
N. H.	3.19	1.30	2.22	0.46	1.24	1.08	0.97	1.03	3.57	1.22	1.59	0.51	97.7
S. H.	3.39	1.36	2.28	0.49	1.30	1.15	1.05	1.10	3.73	1.31	1.68	0.55	97.7

6 输出数据的校正

本文还对各通道的相对误差进行了分析, 发现对每一个通道而言, 它们都是同号的, 数值也比较接近。说明这些数据可能具有某种程度上的线性特性, 启发可以尝试使用线性回归, 对原始输出数据进行校正。事实上, 图 3 系统中邻近通道高级次光场的对 0 级光场的串扰就是一种线性叠加, 而(6)式给出的考虑 CCD 分辨率的结果, 在 0 级附近光场相对平坦的条件下, 按泰勒展开也可以近似到线性项, 这是对原始数据做线性回归的理论根据。如前面小节所述, 本文另选取 16×3 个飞机样本模式, 作为回归用样本得出回归参量, 而另外 44×3 个样本模式按照上述回归参量做校正作为误差评估之用。表 4 给出了图 2、图 3 所示两种系统校正后的输出数据误差和相应的系统识别率, 可以看出, 校正后数据误差有明显的下降(大约一个数量级)。而且, 各通道的

线性回归的置信度也是非常高(从 0.9968 到 0.9998), 而归一化的剩余标准差也非常小(从 0.001025 到 0.003168), 这说明前文对数据的线性特性假设是比较合理的。从表 4 给出的识别率可以看出, 系统最终的识别率是比较高的。将这些表格和上两节中的表格对比, 可以发现校正后的单空间光调制器配置下的输出误差值与对应条件的校正后的双空间光调制器配置下的输出误差相比, 前者的数值要略小。而前两节没有校正的数据却是相反的。从这个角度讲, 双空间光调制器的近场衍射效应稍微破坏了输出响应的线性度。但是前文也曾论及, 近场衍射使得输出光 0 级附近光场平坦化, 而这又使考虑 CCD 分辨率时(6)式的展开式更接近线性。这就是说, 双空间光调制器的近场衍射在输出的线性响应方面的作用是相反的。值得一提的是, 根据上述校正方法, 在实际的实验中, 得到的识别率并不像表中所示的那样高。多次实验中, 单空间光

调制器配置的系统,其识别率维持在 92%左右,而双空间光调制器配置的,只有 85%左右。这说明系统还有其他因素影响输出误差,比如两空间光调制

器的同步显示、光源的时间和空间稳定性,CCD 的灵敏度和噪声等等,对这些因素的研究和排除将是下一步研究的重点。

表 4 图 2、图 3 所示系统在不同配置和分辨率下的校正后数据的误差和模式样本的识别率
(第一栏中的标号“2”,“3”:图的标号,对应其所示系统。其他约定与表 2 相同)

Table 4 The calibrated output errors and the recognition rates by simulating the architectures shown in Fig. 2 and Fig. 3 with different configurations and resolutions. (Unit: 10^{-3} . Label “2”, “3”: the labels of the figures, which show the architectures. The other conventions are the same as those presented in Table 2)

	C_1^+	C_5^-	C_1^-	C_5^+	C_2^+	C_6^-	C_2^-	C_6^+	C_3^+	C_7^-	C_3^-	C_7^+	Recognition rate / %
2. N. C.	2.38	1.47	1.89	0.97	1.68	1.63	1.51	1.65	2.25	1.69	2.03	0.98	99.2
2. S. C.	2.05	0.91	1.58	0.62	1.09	1.15	1.02	1.11	2.04	0.95	1.51	0.61	99.2
3. N. C.	2.18	1.75	2.01	1.15	1.64	1.76	1.59	1.71	2.49	1.69	2.39	1.13	97.7
3. S. C.	1.81	1.19	1.74	0.89	1.10	1.36	1.07	1.40	1.79	1.00	1.93	0.82	99.2
3. N. H.	2.71	1.86	2.47	1.05	1.71	1.82	1.70	1.49	3.14	1.71	2.69	1.08	99.2
3. S. H.	2.44	1.20	2.19	0.73	1.50	1.42	1.19	0.91	2.46	0.88	2.32	0.78	100

7 结 论

从上文的分析中,可以总结结论如下:

1)在光电混合神经网络中的双空间光调制器配置下,近场衍射效应明显,当显示模式为单像素图像时,它导致较大的相对误差。

2)根据实际样本的仿真数据,当显示模式为像素较多的图像时,远场衍射使得双空间光调制器的近场衍射造成的误差大大缩小,从而图 2 所示系统可以做较精确的光学计算,并得到较高的识别率。输出误差主要来源于 CCD 的分辨率限制。

3)同样根据实际样本的仿真数据,当显示模式为像素较多的图像时,图 3 所示系统的误差比图 2 所示系统的输出误差要稍大,但是这样的误差值对于模式识别而言还是可以容忍的。其误差的主要来源是邻近通道的高级次光场,也有一部分来自 CCD 的分辨率限制。

4)对于图 2 和图 3 所示系统,线性回归可以对输出数据做较好的校正,使得误差降低一个数量级,从而得到较高的模式识别率。

综合以上结论,仿真计算表明,本文所述的实验中,衍射误差对实验中识别率的影响可以控制在较小的范围内。

参 考 文 献

- 1 N. H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata *et al.*. Optical implementation of the Hopfield model[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(10): 1469~1475
- 2 S. Wu, T. Lu, X. Xu *et al.*. An adaptive optical neural network

- using a high resolution video monitor [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1989, **2**(7): 252~257
- 3 T. Lu, S. Wu, X. Xu *et al.*. Two-dimensional programmable optical neural network[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(22): 4908~4913
- 4 X. Yang, T. Lu, F. T. S. Yu. Compact optical neural network using cascaded liquid crystal televisions[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(35): 5223~5225
- 5 S. Gao, J. Yang, Y. Zhang *et al.*. Architecture design of an optical neural network with lenslet array[J]. *Optik*, 1996, **101**(3): 127~129
- 6 A. Hirose, R. Eckmiller. Coherent optical neural networks that have optical-frequency-controlled behavior and generalization ability in the frequency domain[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(5): 836~843
- 7 S. Zhang, M. A. Karim. Optical implementation of cellular neural networks based on bias and joint correlation[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(5): 847~854
- 8 T. Sakano, K. Noguchi, T. Matsumoto. Optical limits for spatial interconnection networks using 2-D optical array devices [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(8): 1094~1100
- 9 Liu Chunxiang, Chen Chuanfu, Ren Xiaorong *et al.*. Green function method for the numerical calculation of pinhole diffraction and near-field light scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 145~151 (in Chinese)
- 刘春香,程传福,任小荣等. 小孔衍射和近场散射数值计算的格林函数方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 145~151
- 10 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. (7th edition), London: Cambridge University Press, 1999. 512~516
- 11 Liu Yue, Chen Shu, Guo Pengyi *et al.*. Real-time recognition of multi-targets with complicated distortion based on cascaded neural networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 919~924 (in Chinese)
- 刘 玥,陈 戌,郭鹏毅等. 基于级联神经网络的实用型三维复合不变性多目标识别[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 919~924
- 12 Shen Jinyuan, Liu Yue, Chen Shu *et al.*. The option methods used in cascaded neural network model for recognizing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 49~53 (in Chinese)
- 申金媛,刘 玥,陈 戌等. 用于实时识别三维物体的级联神经网络模型的优化方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 49~53