



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112041857 B

(45) 授权公告日 2024. 10. 29

(21) 申请号 201980028320.9

(22) 申请日 2019.03.26

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112041857 A

(43) 申请公布日 2020.12.04

(30) 优先权数据
62/648,538 2018.03.27 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.10.26

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/IL2019/050345 2019.03.26

(87) PCT国际申请的公布数据
W02019/186548 EN 2019.10.03

(73) 专利权人 巴伊兰大学
地址 以色列拉马特甘市

(72) 发明人 泽埃夫·扎列夫斯基 艾尔·科恩

(74) 专利代理机构 上海翼胜专利商标事务所
(普通合伙) 31218

专利代理师 翟羽

(51) Int.Cl.
G06N 3/067 (2006.01)
G06E 1/02 (2006.01)
G02F 3/00 (2006.01)
G06V 10/82 (2022.01)
G06V 10/88 (2022.01)

(56) 对比文件
US 5129041 A, 1992.07.07

审查员 李靖

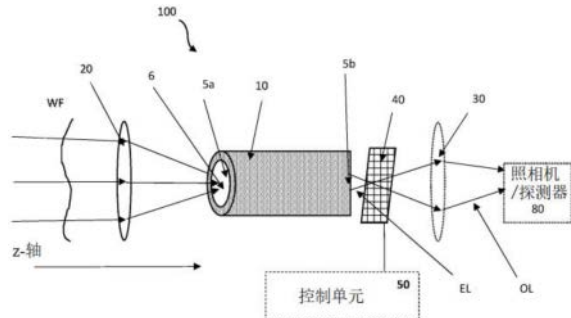
权利要求书3页 说明书14页 附图9页

(54) 发明名称

光学神经网络单元以及光学神经网络配置

(57) 摘要

本发明描述了一种用于处理输入光的人工神经元单元及神经网络。所述人工神经元单元包括一模式混合单元,例如多模光纤,配置为接收输入光,并且将所选定的混合施加于所述输入光内的两种或更多种模式的光分量,并配置为提供出射光;以及一滤波单元,配置为将预选的滤波器施加于所述出射光上,以选择所述出射光的一种或多种模式,从而提供所述人工神经元单元的输出光。



1. 一种用于处理输入光的人工神经元单元,其特征在于,所述人工神经元单元包含:一
模态混合单元,配置为一多模光纤(MMF),所述多模光纤具有一第一端及一第二端,以在所述
第一端接收具有一定波前WF的输入光,并将所选定的混合施加于所述输入光内的两种或
更多种空间模式的光分量,所述输入光在所述多模光纤内以各自的速度传播,并在所述多
模光纤的所述第二端输出出射光;

—输入光学布置,配置为将所述输入光耦合到所述多模光纤的所述第一端;以及

—滤波单元,配置为通过将一选定的空间变化调制施加至所述出射光上来将预选的滤
波器施加于所述出射光上,以选择所述出射光的一种或多种模式,从而提供所述人工神经
元单元的输出光。

2. 如权利要求1所述的人工神经元单元,其特征在于:所述模态混合单元配置为混合由
以下至少之一选定的两种或更多种模式来将所选定的混合施加于所述输入光内的两种或
更多种空间模式的所述光分量:多种偏振取向模式、多个波长范围、一选定区域内的多种空
间模式、以及所述模态混合单元的两个或更多个核心内的多种空间模式。

3. 如权利要求1所述的人工神经元单元,其特征在于:所述模态混合单元配置为施加线
性混合,从而使所述出射光是所述输入光的两种或更多种空间模式的加权线性组合。

4. 如权利要求1至3中任一项所述的人工神经元单元,其特征在于:所述模态混合单元
配置为使得所述输入光通过所述多模光纤传播,同时混合在所述多模光纤内以各自的速度
传播的所述输入光的所述多种空间模式,以产生所述出射光;所述滤波单元配置为一空间
光调制器(SLM)。

5. 如权利要求4所述的人工神经元单元,其特征在于:所述人工神经元单元还包含一输
出光学布置,所述输出光学布置配置为与所述输出光相互作用。

6. 如权利要求4所述的人工神经元单元,其特征在于:所述人工神经元单元还包含一控
制单元,所述控制单元配置为并且可操作的用于操作所述空间光调制器,并用于确定由所
述空间光调制器施加的空间光调制。

7. 如权利要求6所述的人工神经元单元,其特征在于:所述控制单元配置为根据包括一
个所述人工神经元单元的神经处理网络的训练过程来选择空间调制,以输出光。

8. 如权利要求4所述的人工神经元单元,其特征在于:所述人工神经元单元还包含:一
反馈路径,配置为在所述多模光纤的所述第二端处接收所述出射光的至少一部分,并将所
述出射光的所述至少一部分的光分量导向所述多模光纤的所述第一端,以将所述出射光的
所述至少一部分的所述光分量与所述输入光的至少一部分混合,所述反馈路径与和所述空
间光调制器相关联的一输出端口相关联。

9. 如权利要求8所述的人工神经元单元,其特征在于:所述反馈路径的所述输出端口是
一辅助输出端口,所述辅助输出端口配置为输出多个光信号,所述多个光信号与经由所述
反馈路径收集的所述光分量与所述输入光的至少一部分的所述混合相关联。

10. 如权利要求8所述的人工神经元单元,其特征在于:所述反馈路径的所述输出端口
配置为提供与所述输出光的至少一部分相关联的输出。

11. 如权利要求8至10中任一项所述的人工神经元单元,其特征在于:所述反馈路径包
括增益单元,并且配置为通过所述增益单元来传送所述出射光的至少一部分,以增加所述
出射光的强度。

12. 如权利要求1所述的人工神经元单元,其特征在于:所述人工神经元单元位于一神经网络结构的输入端口处,并且配置为将选定的预处理施加于提供给所述神经网络结构的多个光信号。

13. 一种人工神经网络,其特征在于,所述人工神经网络包含:

一个或多个如前述权利要求中任一项所述的人工神经元单元;

所述一个或多个人工神经元单元沿着一光信号的传播的一路径布置在一个或多个神经元层中,使得所述光信号配置为在一输入层的多个人工神经元单元的多个输入端口之间通过所述一个或多个人工神经元单元传播到提供所述网络的输出信号的一输出层的多个人工神经元单元的多个输出端口。

14. 如权利要求13所述的人工神经网络,其特征在于,所述人工神经网络还包含:一个或多个反馈路径,配置为从所述输出层的一人工神经元单元的至少一输出端口接收输出光的至少一部分,并引导所述输出光的至少一部分,用于与指向所述输入层的多个人工神经元单元的输入光的至少一部分混合,并用于输出被混合的光的至少一部分。

15. 如权利要求14所述的人工神经网络,其特征在于:所述反馈路径包括:

一反馈单元,配置为接收所述输出光;

一X耦合器,具有一第一输入端及一第二输入端,以及一第一输出端及一第二输出端,并配置为通过所述第一输入端接收来自所述反馈单元的输出光的至少一部分,通过所述第二输入端接收所述输入光,将所述输入光与所述输出光混合以产生所述混合的光,将所述混合的光的至少第一部分引导到所述多模光纤的第一端,并输出所述混合的光的至少第二部分。

16. 如权利要求15所述的人工神经网络,其特征在于:所述人工神经网络还包含一全光光调制器,所述全光光调制器位于所述X耦合器的第二输出端,所述全光光调制器配置为一液晶阀。

17. 如权利要求15所述的人工神经网络,其特征在于:所述人工神经网络还包含一非线性光调制器,所述非线性光调制器位于所述X耦合器的第二输出端,并且配置为将一个或多个非线性相互作用施加于穿过所述非线性光调制器的光分量,所述一个或多个非线性相互作用包括二次谐波产生、和频产生及差频产生中的至少一个。

18. 如权利要求15所述的人工神经网络,其特征在于:所述反馈路径包括:

一第一半透明镜,位于所述多模光纤的所述第二端附近或所述第二端;以及

一第二半透明镜,位于所述多模光纤的所述第一端附近或所述第一端;

其中:

所述第一半透明镜配置为将所述输出光的至少一部分反射回所述多模光纤,使得所述输出光的至少一部分通过所述第二端进入所述多模光纤,并通过所述第一端离开所述多模光纤;

所述第二半透明镜配置为将所述输出光的至少一部分经由所述第一端反射回到所述多模光纤,同时将所述输入光的至少一部分经由所述第一端传送到所述多模光纤中,使得所述输入光的所述至少一部分以及所述输出光的所述至少一部分在所述多模光纤中混合产生混合的光;

所述第一半透明镜配置为传送所述混合的光的至少一部分,使得所述人工神经网络

配置为输出所述混合的光的所述至少一部分。

19. 如权利要求15至18中任一项所述的人工神经网络,其特征在于:所述反馈路径包括一个或多个光纤,所述一个或多个光纤配置为引导所述输出光的所述至少一部分,以与所述输入光混合。

20. 如权利要求19所述的人工神经网络,其特征在于:所述一个或多个光纤包括以下的一个或多个:单芯光纤、多芯光纤以及一束光纤。

21. 一种配置为处理图像的人工神经网络,其特征在于,所述人工神经网络包含:

一多模光纤的一阵列,每个多模光纤具有一相应第一端以及一相应第二端,所述多模光纤被布置使得所有的所述第一端以一第一期望形状彼此对齐,以便从一场景接收多个相应的输入光部分,并使得所有的所述第二端以一第二期望形状对齐,以将相应的出射光部分导向一期望目标,以在所述目标处形成所述场景的一输出图像;

每个多模光纤提供引导光分量通过所述多模光纤传播,同时将所选定的混合施加于所述光分量的多种空间模式,所述多种空间模式具有相应的前部形状以及各自的速度,从而产生一出射光部分,并在相应的所述第二端输出所述出射光部分;

至少一输入光学布置装置,配置为将所述输入光部分耦合到所述多模光纤的所述阵列中;

至少一空间光调制器,配置为在所述出射光部分上施加一选定的空间变化调制,以产生输出光部分;以及

一控制单元,所述控制单元配置为并且可操作的用于操作所述空间光调制器,并用于确定由所述空间光调制器施加的空间光调制,所述控制单元配置为根据神经处理网络的训练过程来选择空间调制,以输出光。

22. 如权利要求21所述的人工神经网络,其特征在于:所述人工神经网络包含多个输入光学布置装置,其中所述多个输入光学布置装置的至少一些与相应的多模光纤相关联,并且配置为将所述多个输入光部分耦合到所述相应的多模光纤中。

23. 如权利要求21所述的人工神经网络,其特征在于:所述人工神经网络包含多个空间光调制器,其中所述多个空间光调制器中的至少一些与各自的多模光纤相关联,并且配置为在来自所述各自的多模光纤的出射光部分施加各自的空间变化调制,以产生各自的输出光辐射部分。

24. 如权利要求21至23中任一项所述的人工神经网络,其特征在于:所述人工神经网络包含一系列的多模光纤的阵列,所述多个阵列彼此串联布置,使得来自一先前阵列的所述输出光被用作一随后阵列的一输入。

25. 如权利要求21所述的人工神经网络,其特征在于:所述人工神经网络还包含位于至少两个阵列之间的一中间光学单元。

26. 如权利要求25所述的人工神经网络,其特征在于:所述中间光学单元包括一中间折射单元以及一中间空间光调制器中的至少一个。

光学神经网络单元以及光学神经网络配置

技术领域

[0001] 本发明涉及光学计算装置,更具体地,涉及基于光学集成人工神经网络的光学计算装置。

背景技术

[0002] 光学计算利用对可见光或红外光而不是电流的操纵来执行计算过程。通常,光学计算可以实现更快的计算速度,这部分是因为对光脉冲的操纵以相应介质中的光速发生。相对于使用常规计算方法中使用的电流进行计算,这可以实现更高的带宽。例如,电流信号仅以光速的10%传播,这说明光学计算的计算速度几乎提高了10倍。

[0003] 常规的光学处理系统通常利用电子-光学混合处理,通常称为光电处理。在这些系统中,光信号用于数据传输以及某些处理操作,并被转换成电子信号以用于其他处理操作。这种光电装置可能会损失大约30%的能量,而将电子能量转换为光子并返回。此外,光信号到电子信号的转换以及反向的转换减慢了数据的传输以及处理速度。在全光计算投入了大量的研究,从而消除了对光电(optical-electrical-optical, OEO)转换的需求,从而减少了对电能的需求并提高了处理速度。

[0004] 光学计算领域的另一个有利方面是人工神经网络(artificial neural networks, ANNs)的实现。通常,神经网络系统提供能够以与人脑的操作相对应的方式解决问题的处理。人工神经网络基本上受构成大脑的生物神经网络(biological neural networks, BNNs)启发的计算机系统。这些系统“学习”以提高其执行一组命令的性能,以完成感兴趣的任務。更具体地,人工神经网络从向其提供的学习材料发展其相关特征的集合,用于优化所选任务的相关输入的处理。典型的人工神经网络系统是基于—组称为人工神经元的连接单元或节点,这些人工神经元是构成大脑中的生物神经网络的生物神经元的人工等效物。节点之间的连接是生物突触的人工等效物,可以将信号从一个节点传输到另一个节点。接收信号的人工神经元被配置为对其进行处理,然后将相应的信号传输至与其连接的人工神经元。通常,人工神经元分层排列。不同的层可以在它们的输入上执行不同类型的变换,并发送相应的输出信号。信号可能从第一层(输入)传播到最后一层(输出),可能是在遍历不同的层几次之后。

[0005] 光学人工神经元单元已被描述并正在开发中。例如,Zalevsky等人的WO 2017/033197,教示了集成光学模块。所述光学模块包括多个光耦合通道,并使其能够在人工神经网络中使用。根据一些实施方式,集成光学模块包括多芯光纤,其中所述多个芯是光耦合的。

发明内容

[0006] 在本领域中需要一种全光(all-optical)神经网络配置,其能够根据适当的训练来对选定的输入数据进行高速及低功率处理。本发明提供了光学神经元单元,能够对输入光信号进行所有光学处理,以提供—出射光信号。本发明的光学神经元单元通常包括至少

—多模光纤 (multimode optical fiber, MMF) 以及相应的空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 单元, 所述至少—多模光纤以及相应的空间光调制器单元一起配置, 用于基于通过与所述光学神经元相关的神经网络的训练过程确定的选定的空间模式来改变通过其传输的光信号。

[0007] 所述多模光纤具有一第一端以及一第二端, 以及一选定的长度以及直径, 并且用于在混合传播信号的空间模式的同时, 传播通过所述多模光纤的输入信号。更具体地, 输入到所述多模光纤的光场可以是相对于所述多模光纤结构的一种或多种空间模式的组合。所述空间模式的每一个都以各自的组速度通过所述多模光纤传播, 从而改变输出光的模式组合。另外, 通过所述多模光纤的传播可以导致某些光分量之间的某种混合, 从而根据所述多模光纤的形状以及光学特性在多个模式之间转移光能。因此, 所述多模光纤提供与所述输入光信号的模式混合相关联的出射信号。

[0008] 所述空间光调制器单元通常位于所述多模光纤的输出端 (第二端), 并配置为对出射光施加空间调制。所述空间调制可以是仅相位调制, 或者是相位及幅度调制, 并且还可选择要包括在输出光信号中的空间光分量。所述空间调制的选择通常基于要由所述光学神经元单元执行的一项或多项任务的训练。更具体地, 当在神经网络配置中使用, 网络通常经过训练 (例如, 根据标记的数据集)。在网络训练期间, 变化的参数可以与来自网络的不同光学神经元单元的出射光的空间调制相关联。

[0009] 本发明的光学神经元单元还可包括输入及/或输出光学布置。这样的输入/输出光学布置通常可以与配置为将光信号耦合到所述多模光纤及/或将光信号耦合出所述光学神经元单元的一个或多个透镜相关联, 从而实现多个神经元单元之间的有效耦合, 并减少未耦合到所述多模光纤中的光能的损失。

[0010] 在本发明的一些实施方式中, 人工神经元单元可以包括在功能上与所述空间光调制器相关联的一控制单元。所述控制单元与所述空间光调制器单元通信, 从而操作所述空间光调制器。所述控制单元配置为施加来自所述多模光纤的混合的出射光信号的空间调制的选定变化。通常, 对于神经网络计算任务, 网络经历某些训练过程, 以确定内部连接及其处理操作。在本发明的一些实施方式中, 选定的训练过程用于确定由所述空间光调制器施加于从—人工神经元单元的多模光纤出射的光上的一个或多个光调制图案。因此, 根据执行一个或多个感兴趣任务的人工神经元单元的训练, 在与其相关的控制单元处确定空间调制的选择。

[0011] 在本发明的一些其他实施方式中, 本发明包括与人工神经元单元的第一端及第二端光学相关联的一反馈路径。所述反馈路径配置为在所述多模光纤的第二端处接收所述出射光的至少一部分, 并且用于将所述出射光的至少一部分的光分量引向所述人工神经元单元的第一端, 用于混合所述输入光的至少一部分, 从而产生混合的输入光。所述混合的输入光的至少一部分耦合到所述多模光纤中。所述反馈路径还包括一输出端口, 所述输出端口配置为提供与所述多模光纤的混合的输入光及出射光中的至少一个相关联的输出光。通常, 所述空间光调制器可以位于反馈回路的输出端口处, 用于将选定的光调制图案施加到输出光。替代地或附加地, 所述空间光调制器可以位于所述多模光纤的第二端, 其配置为在将所述出射光耦合到反馈回路之前, 调制出射光, 以提供反馈路径的调制。

[0012] 就此而论, 在反馈回路的输出端口配置为提供混合的输入光作为人工神经元单元

的输出的一些配置中,所述人工神经元单元可以配置有一辅助端口(例如,x耦合器光纤配置)。所述辅助端口配置为经由反馈接收出射光的至少一部分的光信号,并且将输入光传送到所述人工神经元单元。所述辅助端口还被配置为将经由反馈收集的光信号与输入的至少一部分进行混合,并向选定的目标输出混合的光信号。

[0013] 对于复杂的计算任务,可以将多个人工神经元单元关联在一起,以提供一个计算神经网络。这种神经网络通常配置有布置在一个层或多个层中的神经元单元的选定集合。一顶(输入)层的一个或多个神经元单元配置为接收输入信号(例如,形成一图像的输入光),并将相应的中间输出信号传送到下一层的神经元单元。通常,网络作为一个整体被训练来执行一个或多个选定的任务。为此,训练可以包括不同层的神经元单元之间的连接的布置,以及不同神经元单元的出射光上的空间光调制。这在提供最后(输出)层的输出信号的网络的多个层之间提供一个或多个处理层,所述最后(输出)层与输入光信号的处理结果相关联。

[0014] 因此,所述神经网络可以包括选定的一个或多个光学元件,以及用于适当地操纵不同层的神经单元之间的光路的位置。在一些配置中,这种光学元件可以与不同神经元单元的输入及/或输出光学布置相关联。因此,所述神经元单元的输入及/或输出光学布置可以配置为将一个神经元单元的输出光耦合到位于下一层中的一相应的神经元单元。另外,所述神经网络还可以包括反射、折射及/或衍射光学元件,所述反射、折射及/或衍射光学元件被选择来用于在不同层的神经元单元之间引导光,并且用于优化光与神经元单元的耦合。在一些配置中,一层或多层的一个或多个神经元单元可以由除所述神经元单元之外的一透光光学元件代替,这种“被动”透光光学元件可以用于对穿过其中的光提供预定的固定光学操纵。通常,例如,神经网络可以包括一个或多个分束器元件、透镜、波长及/或偏振选择滤光器等。网络的光学元件的布置可以根据网络拓扑预先确定,或者根据对网络的一个或多个计算任务的训练来选择。

[0015] 此外,在一些配置中,位于所述网络的一公共层中的神经元单元可以与一个或多个公共空间光调制器相关联。更具体地,可以将同一层的一组神经元单元布置为与一公共空间光调制器相关联,使得每个神经元单元将其出射光朝向所述空间光调制器的一相应区域传输。与不同神经元单元相关联的所述空间光调制器的区域可以间隔开或部分重叠。因此,当布置在一神经网络中时,从人工神经元单元的第二端出射的光被引导到空间光调制器的一区域上,以提供相应层的神经元单元的输出光。

[0016] 如上所述,为了提供有效的处理,一神经网络通常经历某些训练过程。在所述训练过程中,根据选定的训练过程来选择所述网络的参数,例如,包括标记或未标记的数据集。例如,所述训练可以基于形成一个或多个标记数据集的输入数据,所述标记数据集包括关于输入数据片(data pieces)以及每个输入数据片的相应预期输出数据的信息。在训练过程中,可以改变网络神经元单元之间的连接以及每个神经元单元的处理,以提供训练数据的期望输出。通常根据本发明,所述改变通常可以包括不同神经元单元的出射光的空间调制图案的选择。

[0017] 为此,所述神经网络可以与一控制单元相关联,所述控制单元配置为并且可操作用于选择性地确定一个或多个空间光调制器的空间光调制。所述控制单元可以在功能上与神经网络相关联,并且配置为接收与针对不同输入数据片的各种输出结果相关联的训练相

关数据。所述控制单元可以根据每个输入数据片的期望输出来处理输出结果,并针对一个或多个不同神经元单元选择性地改变空间调制。通常可以沿着训练过程迭代地改变空间调制图案,以提供训练数据集的最佳处理。通常,在完成神经网络的训练之后,除了调整网络参数或任务以外,其人工神经元的空间光调制不会改变。

[0018] 在神经网络的一些配置中,与不同神经元单元相关联的空间光调制的选择可以影响信号处理,例如,通过改变神经元单元的输入光信号与输出光信号之间的关系,以及影响不同网络层的神经元单元之间的连接。更具体地,具有一定空间频率的空间光图案的选择可以使输出光沿由调制的空间频率确定的一方向传播。因此,不同神经元单元的空间光调制器也可以用于沿着一选定的总体传播方向来引导从某些神经元单元输出的光,及/或将输出光引导向下一层的相邻神经元单元。

[0019] 因此,根据一广义的方面,本发明提供了一种用于处理输入光的人工神经元单元,所述人工神经元单元包括一模式混合单元,配置为接收输入光,并将所选定的混合施加于所述输入光内的两种或更多种模式的光分量,并配置为提供出射光;以及一滤波单元,配置为将预选的滤光器施加于所述出射光上,以选择出射光的一种或多种模式,从而提供所述人工神经元单元的输出光。

[0020] 所述滤波单元可以配置为空间光调制单元、Sobel滤波器或其他类型的滤波器。

[0021] 根据一些实施方式,所述模式混合单元可以配置为混合由以下至少之一选定的两种或更多种模式:多种偏振取向模式、多个波长范围、一选定区域内的多种空间模式、以及所述模式混合单元的两个或更多个核心内的多种空间模式。

[0022] 所述模式混合单元还可配置为施加线性混合,从而使所述出射光是所述输入光的两种或更多种模式的加权线性组合。

[0023] 根据本发明的一些实施方式,所述模式混合单元配置为一多模光纤,所述多模光纤具有一第一端及一第二端,并且配置为在所述第一端接收所述输入光,使得所述输入光通过所述多模光纤传播,同时混合在所述多模光纤内以各自的速度传播的所述输入光的多种空间模式,以产生一出射光,并配置为在所述第二端输出所述出射光;所述滤波单元配置为一空间光调制器,配置为将一选定的空间变化调制施加至所述出射光上,以产生一输出光。所述人工神经元单元还可以包括一输入光学布置,配置为将所述输入光耦合到所述多模光纤的所述第一端。所述输入光学布置可以包括一个或多个透镜。在一些其他实施方式中,滤波单元可以包括Sobel滤波器,其使用一个或多个处理单元来光学地实施或电子地应用于收集的图像数据。

[0024] 所述人工神经元单元还可包括一输出光学布置,配置为与所述输出光相互作用。所述输出光学布置可以包括一个或多个透镜。

[0025] 根据一些实施方式,所述人工神经元单元还包括或关联于一控制单元,所述控制单元配置为并且可操作的用于操作所述空间光调制器,并用于确定由所述空间光调制器施加的空间光调制。所述控制单元配置为根据包括一个所述单元的神经处理网络的训练过程来选择空间调制,以输出光。

[0026] 根据一些实施方式,所述人工神经元单元还可包括一反馈路径,配置为在所述多模光纤的所述第二端处接收所述出射光的至少一部分,并将所述出射光的所述至少一部分的光分量导向所述多模光纤的所述第一端,以将所述光分量与所述输入光的至少一部分混

合,所述反馈路径与所述空间光调制器相关联的一输出端口相关联。

[0027] 在一些配置中,所述反馈路径的所述输出端口是一辅助输出端口,所述辅助输出端口配置为输出多个光信号,所述多个光信号与经由所述反馈路径收集的所述光分量与所述输入光的至少一部分的所述混合相关联。在一些其他配置中,所述反馈路径的所述输出端口配置为提供与所述输出光的至少一部分相关联的输出。

[0028] 通常,根据本发明的一些实施方式,所述反馈路径还可包括增益单元,并且配置为通过所述增益单元来传送所述出射光的至少一部分,以增加所述出射光的强度。所述增益单元可以沿着光分量通过所述反馈路径的传播的光学路径来定位,并且配置为放大通过所述反馈路径的光的强度。所述增益单元可以是掺杂的光纤的形式,所述光纤引导通过所述反馈路径的光的光路。

[0029] 根据本发明的一些实施方式,所述人工神经元单元可以用作神经网络结构的预处理单元。所述人工神经元单元可以位于一神经网络结构的一个或多个输入端口处,并且配置为将选定的预处理施加于提供给一神经网络处理结构的光信号。通过将所述人工神经元单元用作神经网络的预处理输入单元,可以实现输入信号的模式混合,并简化了所述神经网络对信号的处理。通常,使用多模光纤可以提供输入数据的随机化及加扰。这可以允许使用数量减少的节点,并为给定的处理任务提供较低复杂度的神经网络。

[0030] 根据本发明的另一方面,本发明提供了一种用于处理输入光的人工神经元单元,包括:

[0031] 一多模光纤,所述多模光纤具有一第一端及一第二端,并且配置为在所述第一端接收所述输入光,使得所述输入光通过所述多模光纤传播,同时混合在所述多模光纤内以各自的速度传播的所述输入光的多种空间模式,以产生一出射光,并配置为在所述第二端输出所述出射光;一输入光学布置,配置为将所述输入光耦合到所述多模光纤的所述第一端;一空间光调制器,配置为将一选定的空间变化调制施加至所述出射光上,以产生一输出光

[0032] 根据又一个广泛的方面,本发明提供了一种人工神经网络,所述人工神经网络包括:

[0033] 如前述权利要求中任一项所述的一个或多个个人工神经元单元;

[0034] 所述一个或多个个人工神经元单元沿着一光信号的传播的一路径布置在一个或多个神经元层中,使得所述光信号配置为在一输入层的多个个人工神经元单元的多个输入端口之间通过所述一个或多个个人工神经元单元传播到提供所述网络的输出信号的一输出层的多个个人工神经元单元的多个输出端口。

[0035] 所述人工神经网络还可包括:一个或多个反馈路径,配置为从所述输出层的一人工神经元单元的至少一输出端口接收输出光的至少一部分,并引导所述输出光的至少一部分,用于与指向所述输入层的多个个人工神经元单元的输入光的至少一部分混合,并用于输出被混合的光的至少一部分。

[0036] 根据一些实施方式,所述反馈路径包括:

[0037] 一反馈单元,配置为接收所述输出光;

[0038] 一X耦合器,具有一第一输入端及一第二输入端,以及一第一输出端及一第二输出端,并配置为通过所述第一输入端接收来自所述反馈单元的输出光的至少一部分,通过所

述第二输入端接收所述输入光,将所述输入光与所述输出光混合以产生所述混合的光,将所述混合的光的至少第一部分引导到所述多模光纤的第一端,并输出所述混合的光的至少一第二部分。

[0039] 所述人工神经网络还包括一全光光调制器,所述全光光调制器位于所述X耦合器的第二输出端,所述全光光调制器配置为一液晶阀。

[0040] 所述人工神经网络还包含一非线性光调制器,所述非线性光调制器位于所述X耦合器的第二输出端,并且配置为将一个或多个非线性相互作用施加于穿过所述非线性光调制器的光分量,所述一个或多个非线性相互作用包括二次谐波产生、和频产生及差频产生中的至少一个。

[0041] 根据一些实施方式,所述反馈路径包括:一第一半透明镜,位于所述多模光纤的所述第二端附近或所述第二端;以及

[0042] 一第二半透明镜,位于所述多模光纤的所述第一端附近或所述第一端;

[0043] 其中:

[0044] 所述第一半透明镜配置为将所述输出光的至少一部分反射回所述多模光纤,使得所述输出光的至少一部分通过所述第二端进入所述多模光纤,并通过所述第一端离开所述多模光纤;

[0045] 所述第二半透明镜配置为将所述输出光的至少一部分经由所述第一端反射回到所述多模光纤,同时将所述输入光的至少一部分经由所述第一端传送到所述多模光纤中,使得所述输入光的所述至少一部分以及所述输出光的所述至少一部分在所述多模光纤中混合产生混合的光;

[0046] 所述第一半透明镜配置为传送所述混合的光的至少一部分,使得所述人工神经网络配置为输出所述混合的光的所述至少一部分。

[0047] 根据本发明的又一些实施方式,所述反馈路径包括一个或多个光纤,所述一个或多个光纤配置为引导所述输出光的所述至少一部分,以与所述输入光混合。所述一个或多个光纤包括以下的一个或多个:单芯光纤、多芯光纤以及一束光纤。

[0048] 根据另一广泛的方面,本发明提供一种人工神经网络,所述人工神经网络包括:

[0049] 如本文所述配置的多个人工神经元单元,所述多个人工神经元单元布置在一个或多个层体中,所述一个或多个层体包括:

[0050] 所述多个人工神经元单元的一第一层,包括一个或多个个人工神经元单元,并且配置为接收输入光,并且将中间输出光传送到多个人工神经元单元的一个或多个随后的层体的多个人工神经元单元;

[0051] 额外的一个或多个层体,配置为接收多个人工神经元单元的一个或多个先前的层体的中间输出光;

[0052] 来自所述多个人工神经元单元层体的最后一个的所述输出光被导向一期望目标。

[0053] 根据另一广泛的方面,本发明提供一种配置为处理图像的人工神经网络,所述人工神经网络包括:

[0054] 一多模光纤的一阵列,每个多模光纤具有一相应第一端以及一相应第二端,所述多模光纤被布置使得所有的所述第一端以一第一期望形状彼此对齐,以便从一场景接收多

个相应的输入光部分,并使得所有的所述第二端以一第二期望形状对齐,以将相应的出射光部分导向一期望目标,以在所述目标处形成所述场景的一输出图像;

[0055] 每个多模光纤提供引导光分量通过所述多模光纤传播的同时,将所述光分量的空间模式与相应的前部形状以及各自的速度混合,从而产生一出射光部分,并在相应的第二端输出所述出射光部分;

[0056] 至少一输入光学布置装置,配置为将所述输入光部分耦合到所述多模光纤的所述阵列中;以及

[0057] 至少一空间光调制器,配置为在所述出射光部分上施加一空间变化调制,以产生输出光部分。

[0058] 根据一些实施方式,所述人工神经网络包含多个输入光学布置装置,其中所述多个输入折射装置的至少一些与相应的多模光纤相关联,并且配置为将所述多个输入光部分耦合到所述相应的多模光纤中。

[0059] 根据一些实施方式,所述人工神经网络可以包括多个空间光调制器,其中所述多个空间光调制器的至少一些与各自的多模光纤相关联,并且配置为在来自所述各自的多模光纤的出射光部分上施加各自的空间变化调制,以产生各自的输出光辐射部分。

[0060] 根据一些实施方式,所述人工神经网络可以包括一系列多模光纤的阵列,所述多个阵列彼此串联布置,使得来自一先前阵列的输出光被用作一随后阵列的一输入。所述人工神经网络还可包括一中间光学单元,所述中间光学单元位于至少两个阵列之间。所述中间光学单元可以包括一中间折射单元以及一中间空间光调制器中的至少一个。

附图说明

[0061] 为了更好地理解本文公开的主题,并举例说明如何在实践中进行实施,现在将仅通过非限制性示例的方式,参照附图描述实施方式,其中:

[0062] 图1示出了一种根据本发明的一些实施方式的人工神经元单元;

[0063] 图2A及图2B示出了包括用于处理出射光的反馈路径配置的人工神经元单元的两个示例,图2A示出了基于光纤的反馈路径,图2B示出了基于自由空间传播的反馈路径;

[0064] 图3示出了根据本发明的一些实施方式的一链型神经网络;

[0065] 图4示例了根据本发明的一些实施方式的二维神经网络配置;

[0066] 图5示例了根据本发明的一些实施方式的使用中间信号混合布置的另外的二维神经网络配置;

[0067] 图6示出了根据本发明的一些实施方式的使用人工神经元单元来优化图像数据预处理的一示例性实验系统;

[0068] 图7显示了用于实验数据的MNIST图像(a行);与图像相关联的光通过多模光纤传播后获得的图像(b行);由Sobel核(Sobel kernel)过滤的图像(c行);以及重建的图像(d行);

[0069] 图8A至图8D示出了与关于隐藏层大小重建ANN的重建误差有关的实验结果;图8A示出了作为节点的数量的函数的测试误差;图8B示出了使用人工神经元单元在没有输入的情况下所需节点的比率,以实现类似的精度;以及图8C及图8D示出了关于不同输入尺寸的图像的隐藏层大小的误差水平;

[0070] 图9示出了在包括红色、绿色及蓝色照明的不同照明波长下图像重建的实验结果,所述图式示出了由DMD投影的图像(a行);示出了重建图像(b行);示出了出射光图像(c行);以及示出了使用Sobel滤波器过滤的出射光(d行);以及

[0071] 图10A至图10C示出了过滤出的出射光的重建结果;图10A示出了每种颜色的均方误差(mean square error, MSE)作为代码层大小的函数;图10B示出了施加于重建图像的测试重建ANN的精度性能;以及图10C示出了误差率作为LED电流的函数。

具体实施方式

[0072] 如上所述,本技术提供了一种适用于在神经网络计算系统中运行的人工神经元单元。本发明的人工神经元单元配置为根据神经元单元/网络的训练来提供输入光信号的光学处理,以提供输出光信号。图1描绘了一种根据本发明的一些实施方式的人工神经元单元100。所述人工神经元单元100是基于一多模光纤(multi-mode fiber, MMF)10,或者通常是至少一个,如下文进一步所述。所述多模光纤10具有一第一端5a(即,输入端)以及一第二端5b(即,输出端),并且配置为具有单个宽芯6的一光纤。另外,所述人工神经元单元100包括一空间光调制器(spatial light modulator, SLM)40,所述空间光调制器40位于自所述多模光纤10的所述第二端5b处的所述多模光纤10的出光耦合的光路中。在一些配置中,所述人工神经元单元还可包括输入光学布置20,配置为将光耦合到所述多模光纤10中。另外,所述人工神经元单元100还可包括输出光学布置30,及/或与控制单元50以及检测器单元80中的一个或多个相关联。

[0073] 所述人工神经元单元100配置为接收通常通过所述输入光学布置耦合到所述多模光纤10中的输入光WF信号,将所述输入光WF通过所述多模光纤传播,以将一定的混合施加于输入光信号WF的空间模式,并在所述多模光纤的第二端5b处提供出射光EL。所述出射光EL由所述空间光调制器40根据神经元单元被训练到的人工神经元单元的所选操作/任务而被选择性地调制,从而提供输出光信号OL。在这方面,应该注意,通常使用神经型配置的处理技术是基于一个或多个神经元单元网络。这样的网络经过选定的训练过程,其中内部连接及处理参数正在被确定。应当注意,本文描述的人工神经元单元100可以用于各种网络拓扑中。为了简单起见,人工神经元单元100在本文中被描述为一处理单元,其中可以通过混合输入光信号WF的空间模式,并且通过将空间调制模式图案施加于出射光EL,来执行选定的光学操纵。通常,根据合适的训练过程,由与所述人工神经元单元100或包括所述单元100的一网络相关联的控制单元50选择所述空间光调制器40的空间调制模式的选择。

[0074] 所述多模光纤10是具有选定长度(例如,几毫米至几厘米)以及直径(例如,30微米或更长,50微米或更长)的多模光纤,并且通常配置为支持以多种空间模式传播的选定的波长范围(例如1.5微米)内的光的传播。通常,输入光信号在所述多模光纤10的所述第一端5a处耦合到所述多模光纤10。所述光信号通过多模光纤10传播,同时经历多个空间模式之间的一些混合,从而在所述第二端5b提供出射光EL。

[0075] 通常,具有一定波前WF、振幅及长度特性的输入光信号被传送到所述人工神经元单元100。所述输入光信号WF通过所述输入光学布置20耦合到所述多模光纤10中,并允许在所述多模光纤10中朝着所述MMF 10的第二端5b传播。当通过所述多模光纤10传播时,所述光信号的不同空间模式(对应于投射到所述多模光纤10的结构上的输入光波前WF的空间形

状)以不同的速度传播,并在它们之间进行混合。由于所述多模光纤10相对短,相对于所述多模光纤10的群速度色散特性,出射光EL保持其大部分特性,但是可以具有不同的波前结构。所述出射光EL被导向所述空间光调制器40,所述空间光调制器40将选定的空间调制施加到提供输出光信号OL的波前。然后可以将输出光信号OL定向到与网络的附加层相关联的一个或多个附加神经元单元,及/或定向到对应的检测单元80。

[0076] 通常,为简单起见,本文中使用的术语“出射光”及“混合出射光”可互换地是指在到达空间光调制器40之前通过所述多模光纤10传播之后从所述多模光纤10的第二端5b耦合出的出射光EL(例如信号波前)。如本文所用,术语“输出光”是指人工神经元单元的光OL输出,即,由空间光调制器40根据选定的空间调制而调制的出射光。

[0077] 所述输入光学布置20通常位于所述多模光纤10的所述输入端5a附近,并且配置为将输入光WF耦合到所述多模光纤10中。通常,所述输入光学布置包括一个或多个光学元件,例如一个或多个透镜(例如:透镜单元)。所述输入光学布置可以优选地配置为耦合输入光WF,同时不影响其波前结构。如上所述,在一些配置中,所述人工神经元单元还可以包括位于所述多模光纤10下游,例如在多模光纤10与空间光调制器40之间及/或空间光调制器40的下游的一输出光学布置30。所述输出光学布置30通常可以由一个或多个光学元件(例如:透镜)构成。所述输出光学布置通常配置为根据输出光OL朝向检测单元80及/或附加的一个或多个神经元单元的选定路径,收集来自人工神经元单元的输出光OL,并影响输出光OL的发散及/或传播方向(例如,提供准直的输出光)。

[0078] 参考图2A及图2B,示出了根据本发明的一些实施方式的利用人工神经元单元的反馈回路型处理层的两个示例。图2A示出了基于光纤的反馈路径,而图2B示出了自由空间传播型反馈路径。如图2A所示,所述人工神经元单元100包括多模光纤10以及相应的输入光学布置20。所述人工神经元单元100还包括一反馈路径90,所述反馈路径90配置为包括一个或多个光纤的光纤束,并且被定位用于接收来自所述多模光纤10的第二端的光分量,并引导接收的光分量与所述输入光信号WF混合,从而提供混合的光。为此,反馈路径配置通常可以包括一X耦合器单元98,接收来自反馈路径的输入光WF以及光分量,并且用于混合两个输入。所述X耦合器通常将一部分混合的光通过多模光纤10的所述第一端5a传输到所述多模光纤10中,而另一部分朝着一输出端口95传输,以提供出射光。

[0079] 所述反馈路径90配置为从所述多模光纤10的所述第二端5b收集出射光EL的分量(通常在空间光调制器40之前),并且将所收集的分量导向一X耦合器98,在所述X耦合器98中,光分量与输入光WF混合,提供混合的输入光。所述混合的输入光被耦合到所述多模光纤10的所述第一端5a。此外,所述混合的光的另一部分可以被导向一输出端口95,所述输出端口95将光分量从反馈路径90朝向一个或多个对应的空间光调制器40传送,以提供调制的输出光OL。应当注意,反馈路径90可以配置为提供中间输出端口,所述中间输出端口位于多模光纤10的第二端5b与X耦合器98之间,或者在光耦合到所述反馈路径90之前,用于将一部分的出射光EL导向空间光调制器40,同时将出射光EL的其他部分传送到混合端口98,以与输入光WF混合。另外地或替代地,所述输出端口95可以位于所述X耦合器98的下游,将混合的光导向空间光调制器40,以提供调制混合输入光的形式提供输出光OL。

[0080] 反馈路径90还可以配置为自由空间传播路径,这在图2B中示例性地示出,图2B示出了与反馈路径相关联的人工神经元单元100。为此,一第一至少部分反射单元13(例如:半

反射镜)位于从所述多模光纤10的所述第二端5b出射的出射光EL的光路中。反射镜13位于收集出射光EL并将出射光EL的至少一部分朝着部分反射镜12反射,所述部分反射镜12位于所述多模光纤10的所述第一端附近,并且被定位成引导要耦合到所述多模光纤10中的光分量。所述反馈路径还可以包括一个或多个镜14及光学元件16,所述镜14及光学元件16被配置及定位用于保持波前结构并引导反馈光分量FL重新耦合到所述多模光纤10中。

[0081] 通常,输入光WF在部分反射镜12的旁边传播或透射,并且与从所述反馈路径到达的光分量混合,从而提供混合的光分量ML。通常在一些配置中,所述神经元单元可以包括分束元件15,所述分束元件15配置为接收混合的光ML,并且配置为传输所述混合的光ML的一部分,以耦合到所述多模光纤10中(例如:经由耦合光学布置22),以及将所述混合的光ML的另一部分传向一空间光调制器40,以提供输出光OL。如上所述,一输出光学布置30可以位于所述空间光调制器40的上游或下游,以影响光束直径、发散度等。

[0082] 因此,反馈路径通常可以配置为将所收集的光分量引向所述多模光纤10的输入端,从而使得能够根据反馈路径的光路选定的一延迟时间实现在多个信号部分之间的干扰/相关。通常,所述反馈路径可以配置为维持所述出射光EL的空间结构。这可以使用合适的光学布置(例如,纤维束、自由空间传播路径等)来收集出射光EL的一部分,并影响所述出射光EL的发散,以形成准直光来提供。然后所述准直光可以被引导,以用于朝向所述混合端口98的自由空间传播,或耦合到所述反馈路径90的光纤束中,以传送到所述混合端口98。在一些其他实施方式中,所述空间光调制器40位于所述多模光纤10的所述第二端5b,用于在将所述出射光EL耦合到所述反馈回路90之前,对所述出射光EL施加选定的空间调制。在一些配置中,所述反馈路径可以包括用于增加信号强度的选定增益介质。

[0083] 参考图3,其示出了根据本发明的一些实施方式的一种点状(零)维的多层人工神经网络200的一示例。本文示例的人工神经网络200配置为一光信号的光学处理。应当注意,输入光信号以及处理输出通常可以具有由所述神经网络的多模光纤支持的某些二维配置。在此示例中,所述神经网络由布置在层L1、L2中的多个人工神经元单元100形成。使得一个人工神经元单元的输出光耦合到下一层的人工神经元单元中。所述神经网络200的各层通常沿着穿过所述网络(并由所述网络处理)的光的传播的一般方向布置。这种传播方向可以根据沿着网络各层使用的光学元件以及通过在各层之间引导光信号的选定空间光调制而弯曲。

[0084] 所述网络200的所述人工神经元单元100配置为使得所述第一神经元单元L1接收输入光信号,并且在混合多个空间模式并施加所选定的空间调制之后,单元L1的输出信号被发送以耦合到神经元单元L2中,依此类推,直到输出层的最后一个神经元单元Ln。如上所述,根据网络的训练来选择不同神经元单元的空间光调制,以提供对输入数据的适当/正确处理。应当注意,在一些配置中,一个或多个神经元单元100可以关联于或包括如图2A及图2B中示例的一反馈路径。通常,这种反馈路径可以是单神经元反馈,也可以是沿着两个或更多个神经元单元的一链提供反馈。

[0085] 尽管在图3中未具体示出,然而所述神经网络200可以由在多个层之间具有变化维度的拓扑来形成。更具体地,单个神经元单元L1的输入层可以将中间输出传送到包括两个或更多个神经元单元的一第二(隐藏)层中。此外,具有两个或更多个神经元单元的一层可以被定位以及布置成将中间输出光传送到具有数量减少的(例如:一个)神经元单元的另一

层。通常,网络的拓扑可以根据其人工神经元单元的物理构造以及布置来确定。信号的实际传播可以通过训练以及选择每个神经元单元的空间光调制来确定,从而根据空间模式以及空间光调制器提供的调制的混合,某些信号可以指向与其他信号不同的路径。

[0086] 通常,如上所述,所述网络200的每一层包括一个或多个神经元单元,所述神经元单元以一预选的布置(具有选定的维度及拓扑)来布置,所述预选的布置配置为通过神经元单元的输入端口接收光信号,并通过所述神经元单元的所述输出端口将输出光信号传送到进行层,使得光信号配置为通过在一输入层L1的多个个人工神经元单元的多个输入端口之间的一个或多个个人工神经元单元传送到提供所述神经元网络200的输出信号的一输出层Ln的多个个人工神经元单元的多个输出端口。

[0087] 应当注意,所述网络200的每个神经元单元100配置为:接收多个光信号(例如,输入信号或来自前一层的一个或多个神经元单元);施加所述光信号的空间模式与所述出射光的所选的空间调制的混合;以及传输(中间)输出光信号到一进行层的一个或多个神经元单元100。为此,所述多个光信号可以通过自由空间传播在多个层之间引导光信号,例如,使用神经元单元的输入及输出光学布置来耦合到进行层,以及利用光纤束来引导中间输出光,同时保持其空间特性。各种附加光学元件也可用于维持传播路径,并与所述网络200的物理布置相对应。

[0088] 通常,神经网络可包括一个或多个附加光学处理单元,例如WO 2017/033197中所述的集成光学模块。为此,可以在神经网络的一个层或多个层中使用包括多芯光纤束的一个或多个光学模块,从而使所述神经网络具有各种附加的处理能力。

[0089] 在图4中示例了一神经网络的一附加配置。在此示例中,神经网络300包括三层L1至L3,每一层具有以级联布置的神经元单元100的二维布置。此处示出的神经网络包括一全局输入光学布置2,所述全局输入光学布置2配置为接收输入光信号,并例如通过发散或聚焦光来将其指向所述第一(输入)层L1的所述神经元单元100的输入端。例如,光学布置2可以配置为引导输入光场,以在与所述层L1的输入端相关联的选定平面处形成一图像,从而形成与待处理的一图像相关联的光场波前。所述神经网络300还可以包括一输出光学布置3,所述输出光学布置3配置为收集自所述输出层(在此示例中为L3)的输出光,并将其引导至一收集/检测单元。例如,所述输出光学布置可以配置为将与所述神经网络300的输出平面相关联的一平面成像到一检测单元上。如上所述,所述每个神经元单元100的空间调制通常根据一个或多个选定的任务的网络训练来确定。

[0090] 在图5中示例了一附加的网络配置。在此示例中,神经网络400配置为两个子网络410及420的一级联,所述两个子网络410及420具有位于所述两个子网络之间的光学布置4。所述光学布置4可以是一透镜布置,所述透镜布置提供对进行层L4的(例如,层L3的)中间输出的成像或傅立叶(Fourier)成像。附加地或替代地,所述光学布置4可以包括空间光调制器,所述空间光调制器具有被施加到中间光信号的选定的或预定的图案。

[0091] 在图4及图5中示例的神经网络层还可以配置为其中的一个层或多个层,或神经元单元由多芯多模光纤形成。更具体地,这种多芯多模光纤可以包括多个光纤芯,它们之间具有第一耦合率,其中每个芯是多模光纤。因此,输入光可以被分成不同的芯,并且允许每个芯的多个模式之间以及不同的芯的多个光部分之间的两个或更多个混合速率。

[0092] 通常如上所述,应该注意的是,本文所示例的神经网络的配置可以与相应的控制

单元相关联,例如:计算机系统,配置为管理训练过程,并确定空间光调制器的操作。除了图1以及图2A至图2B以外,未具体示出所述控制单元,因为所述控制单元涉及空间光调制模式的选择以及网络的训练。然而,应注意,在某些配置中,所述控制单元还可以连接至一检测系统,并配置为接收有关神经网络输出的数据。在这些配置中,所述控制单元还可以将选定的处理施加于接收到的数据,并生成相应的输出。尽管通过所述控制单元使用电子处理,然而根据本技术的神经网络配置通常是全光学的,除了可能检测输出数据之外,不需要中间的光电信号转换。

[0093] 为了说明本文所述的人工神经元单元的能力,本发明的发明人已经进行了几次实验,提出了一种成像系统,所述成像系统使用多模光纤来实现在这种简单的神经网络中的一实际学习任务。参考图6,其示出了实验系统,包括具有三个发光二极管610的一RGB DLP投影仪,所述三个发光二极管610配置为经由透镜612照明一数字镜装置(digital mirror device)DMD 615。所述DMD 615配置为通过4F透镜系统将定义一图像的选定的空间光图案反射到物镜620,所述物镜620将所述图像耦合到所述多模光纤10中。从所述MMF 10输出的光经由输出透镜630收集,并由照相机单元80检测。所述系统还包括一Sobel滤波器,所述Sobel滤波器被施加在由照相机单元80收集的出射光上。

[0094] 图6所示的实验系统与ANN一起用于重建或识别多模光纤图像。与常规的神经网络处理不同,本技术提供了全光设计(all-optical design)。通常,将图像投射到多模光纤空间可以显着地减少节点的数量。因此,在实验数据中,所述系统使用少于30个节点识别从修改过的国家标准与技术研究院数据库(Modified National Institute of Standards and Technology database, MNIST)获取的数字图像,显示出小于5%的误差率。同时,不使用一多模光纤的一理想系统可能通常需要两倍以上数量。此外,本系统使用多色非同调(non-coherent)照明来操作,允许将多模图像进一步重建为彩色的原始图像,以用于进一步的成像目的。

[0095] 在实验装置中,具有三个发光二极管610的RGB DLP投影仪照亮DMD 615,以提供选定的图像。所述投影仪610配置为以三种原色发射光,包括624nm的红色(琥珀色),带宽为18nm(以半峰全宽(FWHM)测量);波长为500至600nm的绿色;以及波长为460nm的蓝色,带宽为25nm。所述DMD 615包含 608×684 个菱形像素的一阵列,并且具有0.3英寸的面积。所述DMD 615通过控制反射镜的摆动频率来确定每个像素的灰阶。4F光学系统被定位以缩放所述DMD图像,使得在经由物镜620耦合到所述光纤10之后,将物镜耦合光的后焦面填充到所述光纤10中。所述光纤10的一芯直径为 $50\mu\text{m}$,长度为18cm。这提供了光纤10支持红光约6000个空间模式,绿光6000至9000个空间模式,以及蓝光10,000个空间模式,由下式给出: $N = (2\pi r)^2 / 2\lambda^2$,其中 r 是所述光纤10的半径, λ 是波长, N 是空间模式的数量。

[0096] 光学元件的位置用于提供DMD 615的图像,以填充光纤10的横截面。因此,DMD 615到4F系统左焦平面(用 u 标记)之间的距离,以及物镜与多模光纤的近端之间的距离(用 v 标记)由下式确定:

$$[0097] \quad M = \frac{\text{光纤尺寸}}{\text{DMD 尺寸}} = \frac{f_{\text{物}}}{f_{\text{物}} - (u+v)} = \frac{v - f_{\text{物}}}{f_{\text{物}}}$$

[0098] 标准MNIST分数被选择作为基准,以测试结合本文所述的光纤系统的人工神经网络(ANN-OFS)的性能。MNIST基准测试了一机器学习平台识别手写数字的图像的能力。MNIST

方案的执行包括使用DMD投影的两组强度图像。第一组60,000张图像用作人工神经网络的训练集。第二组10,000张图像用作验证以及测试集,以评估网络的性能。将所述两个集的每张图像投射到所述多模光纤10的近端,并获取相应的远端强度图像。

[0099] 两种类型的人工神经网络经过多次训练及测试(每次都从头开始解决)。使用在所述多模光纤的远端(即:图6中的照相机80收集)的输出图像来对第一个ANN(表示为ANN-OFS)进行训练及测试。使用原始MNIST图像来对第二个ANN(表示为原始-ANN)进行训练及测试,以进行比较。两个ANN具有相同的架构以及相同的超参数。被使用的训练集图像进行或不进行预处理。所述预处理的步骤包括:将图像从原始捕获的96x96像素重新缩放到28x28、48x48及64x64像素;使用平均下采样进行不同图像条件及复杂度的比较性能;以及Sobel尔核(Sobel kernel)过滤测试优化条件下的网络性能。

[0100] 训练集图像被随机分为48,000张图像,指定用于网络训练;以及12,000张图像,用于网络训练内部过程验证,以防止网络过度拟合。比例共轭下降算法被应用以求解具有一个隐藏层(具有8至96个节点以及交叉熵损失函数)的简单的人工神经网络。

[0101] 在通过多模光纤10传播后获得的验证集的远端图像用作ANN-OFS的输入。最后,将数字识别成功率用作衡量网络性能的指标。

[0102] 为了检验我们的假设,即多模光纤可能在标准图像识别程序中具有更好的性能,将MNIST图像投射到光纤端部。图7示例了:(a)行中的典型MNIST图像;(b)行中与图像相关联的光通过所述多模光纤10传播后获得的图像;(c)行中的Sobel尔核(Sobel kernel)过滤的图像;以及(d)行中的重建的图像。(d)行中的重建图像是使用“自动编码器”神经网络重建的,下文将更详细地描述。

[0103] 如图所示,当图像被投射到多模空间时,将所述图像耦合到多模光纤10中来变换所述图像。在光纤10的输出处,在所示照相机的空间平面处捕获图像的变换模态性质。图7中的(b)行示出了与投射在(a)行中同一列上的字母符号匹配的典型散射图像,这是非散斑图像,因为照明源是非同调(non-coherence)的。Sobel尔核(Sobel kernel)用于过滤如(c)行所示的光纤输出图像,并用于改善系统性能。

[0104] 分析MNIST测试表明,将图像投射到光纤空间上可以减少此特定神经网络架构期望的节点的数量。参考图8A至图8D,示出了实验结果的总结,所述实验结果表明了关于ANN的隐藏层大小的重建的误差。图8A使用 28×28 大小的图像作为输入,示出了给定的测试误差作为节点的数量的函数。图8B示出了为实现类似精度而无光纤输入的期望节点的比率。图8B示出了为实现类似精度而无光纤输入的期望节点的比率。图8C及图8D示出了关于不同输入大小的图像的隐藏层大小的误差,表明对结果没有显著影响。从图8A可以看出,对于相同数量的节点,通过光纤传输图像产生的误差最低。此外,如图8A所示,Sobel滤波器(标记为带滤波器的光纤)在小型网络上提供了更好的性能。在这方面,应当注意,提供Sobel滤波器的光学滤波可以用在多模光纤10的输出处,即,过滤出射光。

[0105] 附加的“自动编码器”神经网络用于示例如本文所述由多模光纤10编码的图像的重建。网络架构用于降低数据维数,并从通过多模光纤10传播后收集的光图案来重建原始图像。所述“自动编码器”神经网络包含两层,将数据压缩到代码层大小的编码器层,以及从代码中重建图像的解码器层。当输入是从多模光纤远端捕获的图像(即出射光),而目标输出是投射图像时,则在训练集中的MNIST图像上训练了重建(自动编码器)网络。所述网络使

用了均方误差 (mean square error, MSE) 损失函数, 在编码器层使用的激活函数为Relu, 在解码器层使用的激活函数为Sigmoid。在MNIST训练数据集上进行训练后, 在来自测试数据集的新图像上对模型进行了测试。

[0106] 返回参考图7, 其中的 (d) 行示出了在使用训练图像集训练神经网络之后的重建图像。所使用的输入图像是 (c) 行中显示的光纤滤波器图像, 而目标图像显示在第一行 (a) 中。可以看出, 重建提供了与原始“目标”图像的高度相似性。

[0107] 还参考图9, 其示出了在包括如上所示的红色、绿色及蓝色照明的不同照明波长下的图像重建的实验结果。(a) 行示出了由DMD 615投射的图像, (b) 行示出了重建图像, (c) 行示出了出射光图像, (d) 行示出了使用Sobel滤波器过滤的出射光。为此, 针对不同波长 (颜色) 的MNIST图像训练了三个神经网络。图9示出了在不同波长下的有效且精确的重建。图10A至图10C示出了经过滤的出射光 (即: 使用Sobel滤波器的出射光) 的重建。图10A示出了每种颜色的均方误差 (mean square error, MSE) 作为代码层大小的函数, MSE在0与1之间归一化。图10B示出了应用于重建图像的测试ANN的准确性性能。图10C示出了误差率作为LED电流的函数, 这是在具有包含30个节点的隐藏层的ANN上进行测试的, 并且照像机的曝光时间为20毫秒, 使用624nm琥珀色LED。

[0108] 如图10A所示, MSE随着光的波长 (蓝到红) 的增加而降低。这可能与功率损耗有关, 因为可见光谱中的较短波长在光纤中具有较高的损耗, 而较低的功率水平则会降低性能。这从图10C可以明显看出, 示出了在较低照明强度下, 误差计数增加。

[0109] 因此, 本技术提供了神经元单元配置、多模光纤布置以及相应的神经网络, 使得能够根据所选训练对输入数据进行所有光学处理。神经元单元包括: 一多模光纤, 所述多模光纤能够收集以及传播具有输入波前的输入信号, 以提供出射光; 以及空间光调制器, 所述空间光调制器位于出射光的光路上, 并且配置为将选定的调制图案施加于出射光, 以提供输出神经元单元的光。在神经处理网络中使用这种光学神经元单元可以实现视觉数据的高速处理, 例如用于图像数据的表征及分析。这可用于图像及面部识别、生物医学成像结果分析等各种应用。将多模光纤与滤波单元 (例如: Sobel滤波器) 一起使用, 可以对图像数据进行预处理, 以使用任何神经网络配置 (无论是否为本文所述的光学) 来进行重建。本技术提供了使用非同调 (non-coherent) 及/或多色照明的增强图像处理, 并且简化了在使用基于计算机的神经网络的情况下的处理能力。

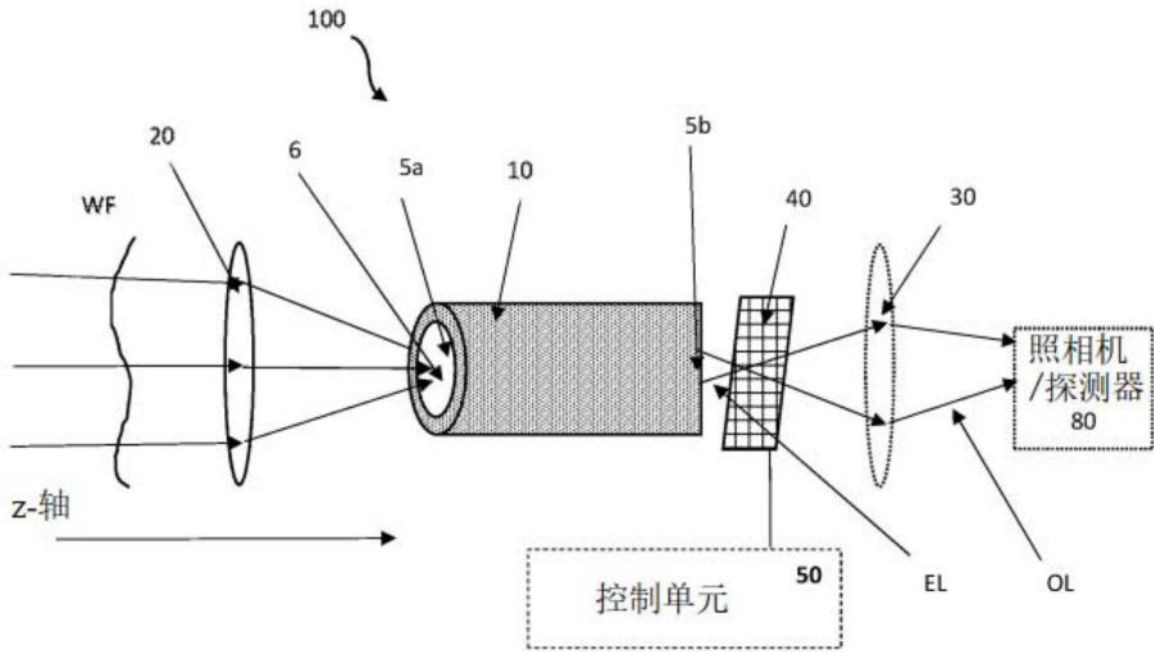


图1

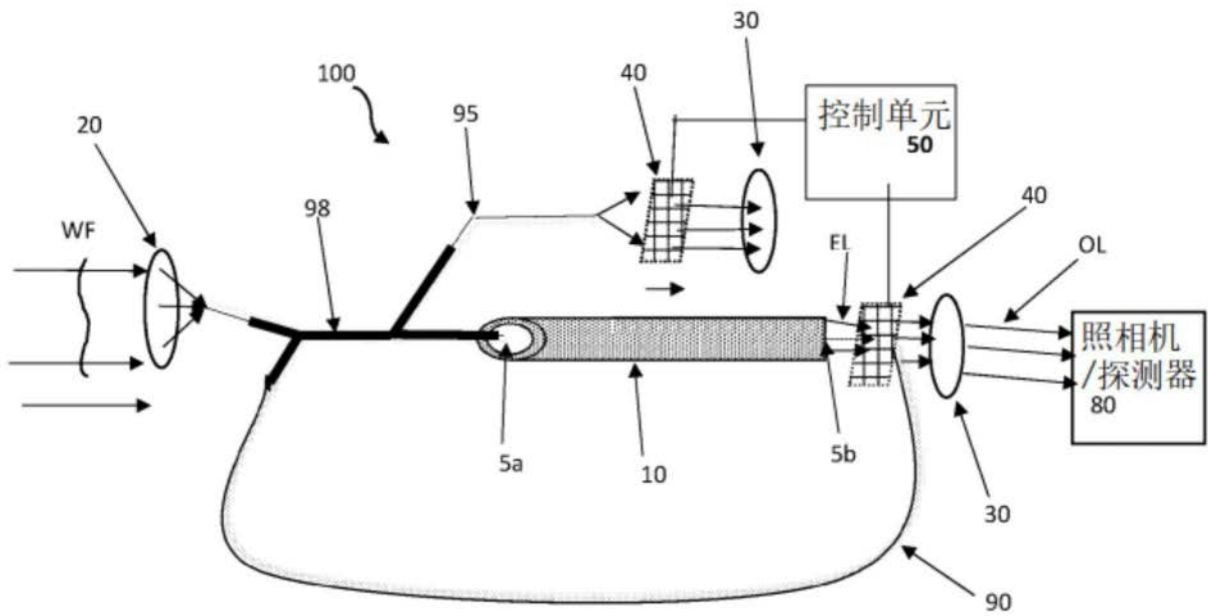


图2A

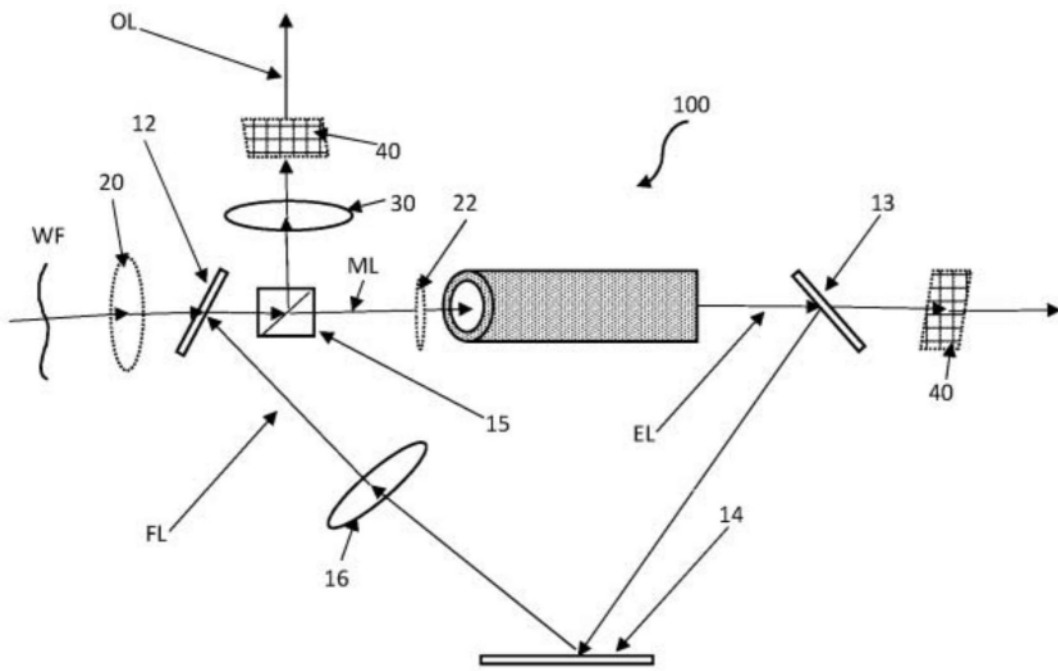


图2B

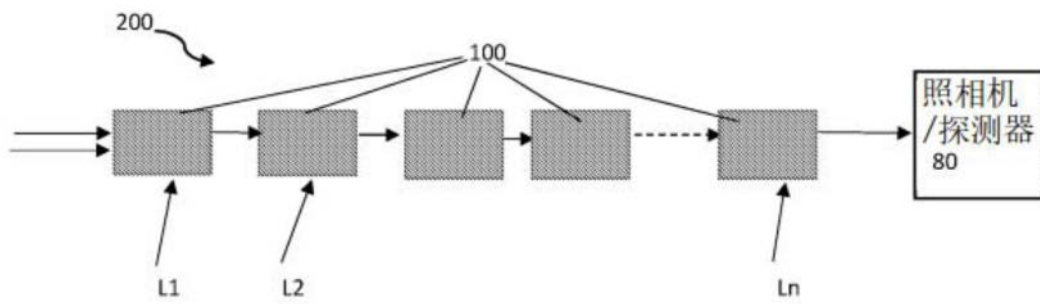


图3

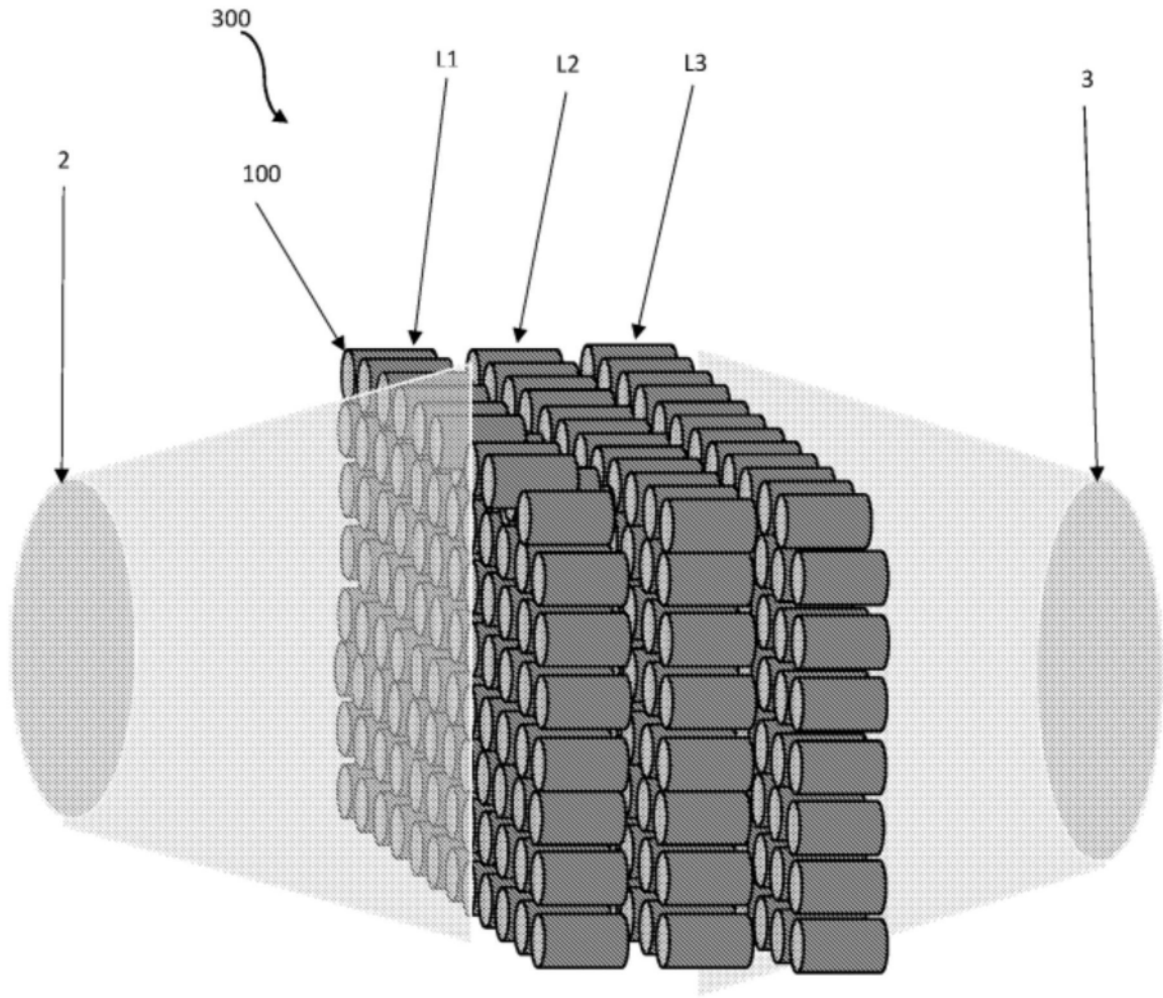


图4

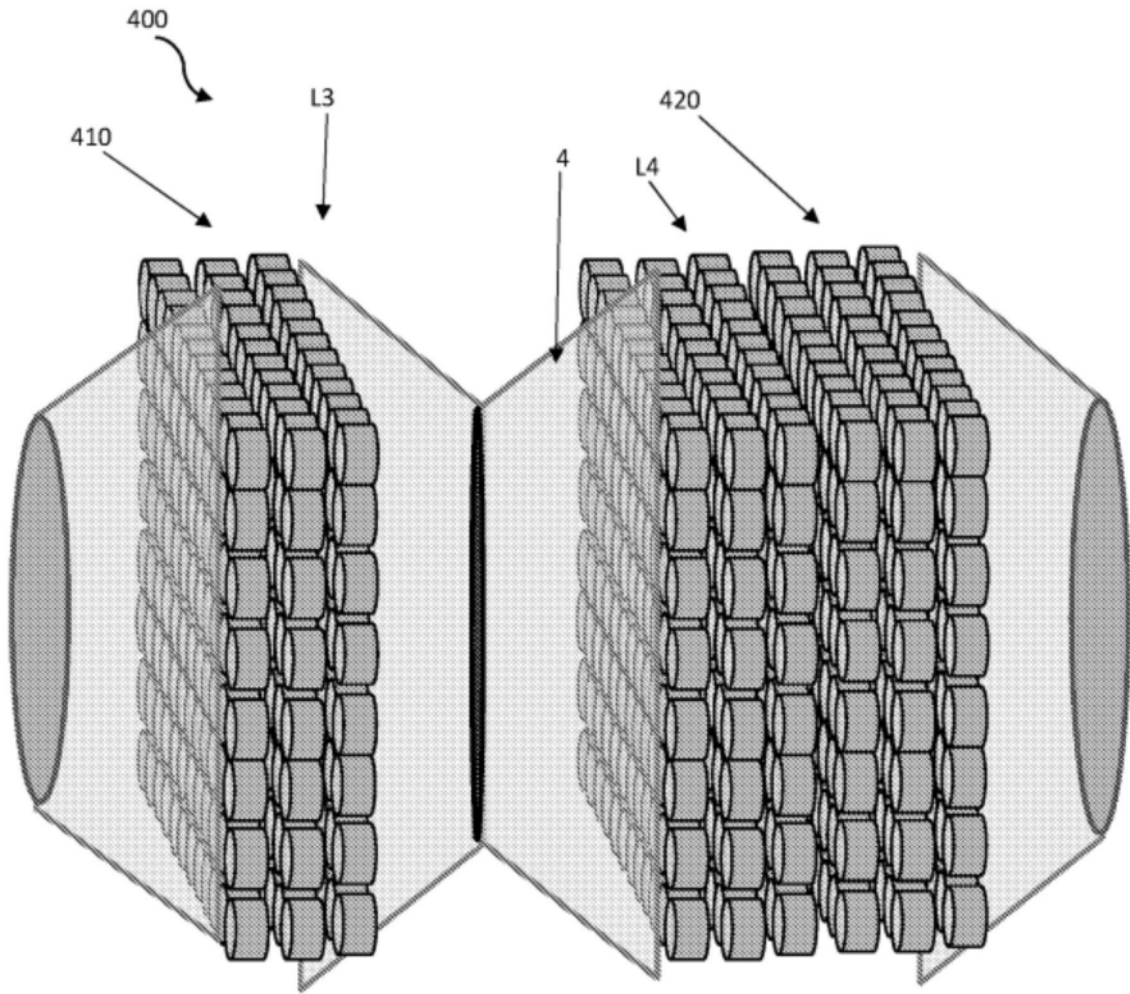


图5

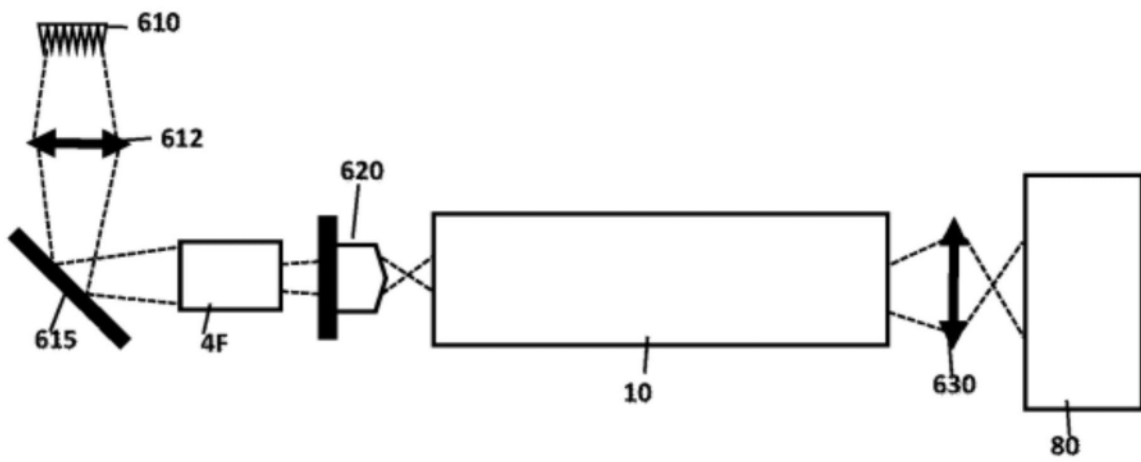


图6

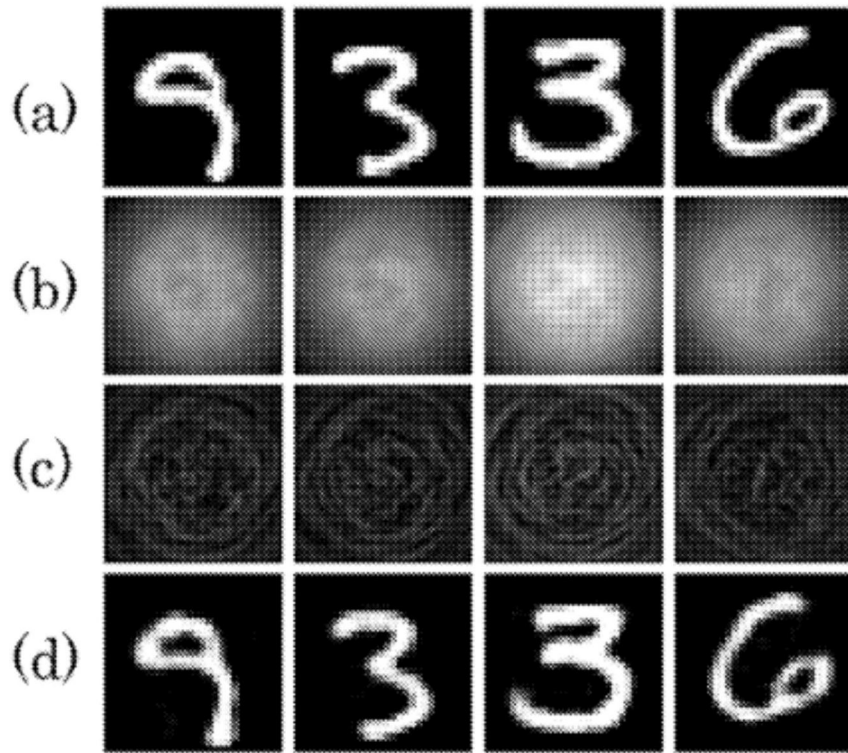


图7

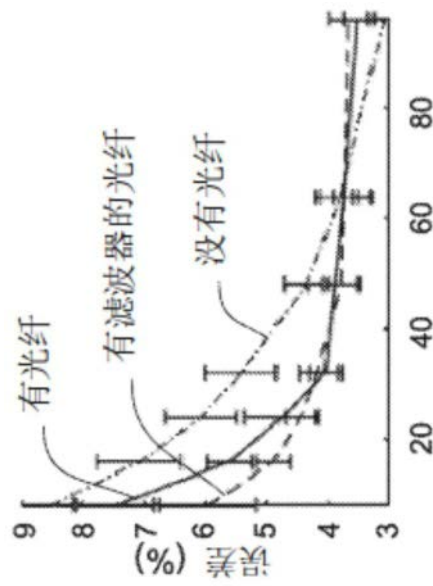


图8A

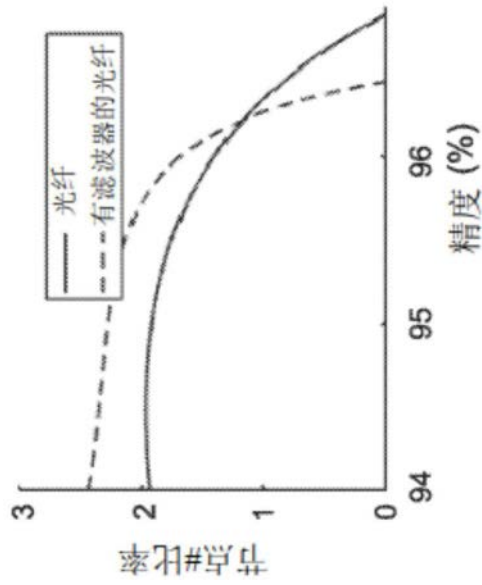


图8B

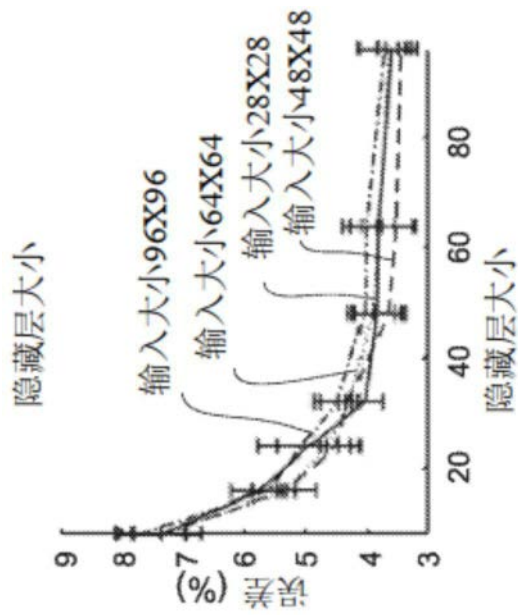


图8C

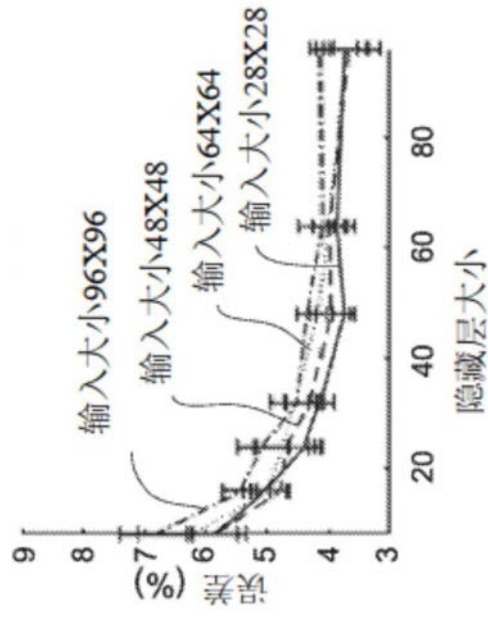


图8D

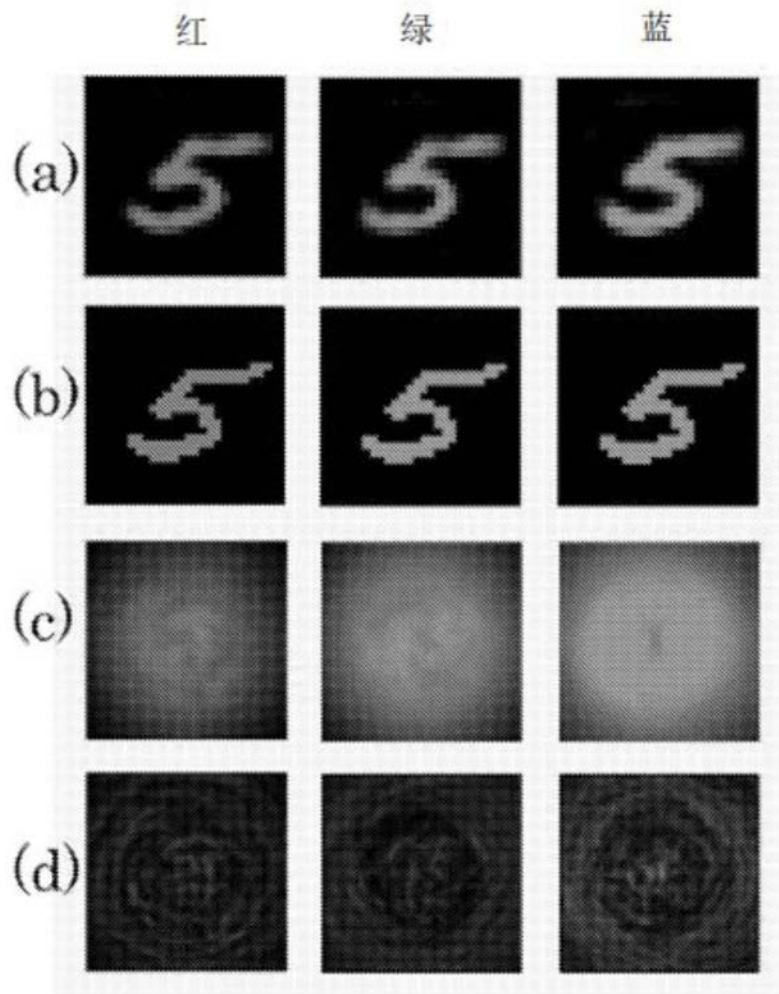


图9

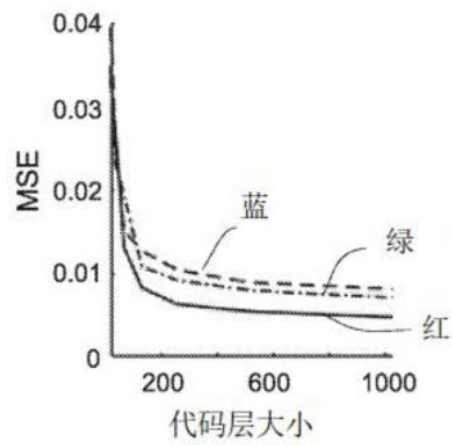


图10A

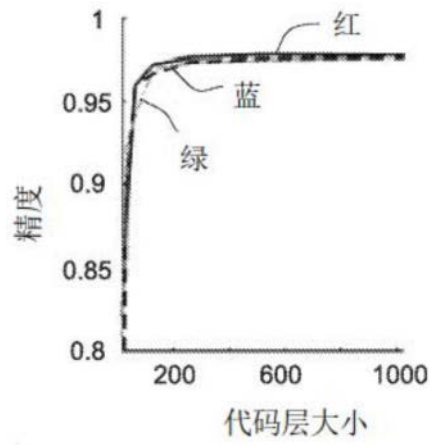


图10B

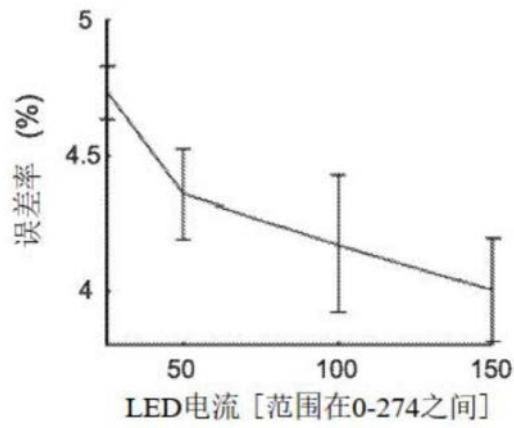


图10C