(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 118476238 A
(43)申请公布日 2024.08.09

(21)申请号 202280085059.8
(22)申请日 2022.11.10
(30)优先权数据
2021-211064 2021.12.24 JP
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2024.06.21
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2022/041947 2022.11.10
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2023/119933 JA 2023.06.29
(71)申请人 浜松光子学株式会社
地址 日本
(72)发明人 樋口贵文 高桥辉雄 中岛真央 中本胜大
(74)专利代理机构 北京尚诚知识产权代理有限公司 11322
专利代理师 杨琦
(51)Int.Cl.
H04N 25/60(2006.01)
H04N 25/76(2006.01)

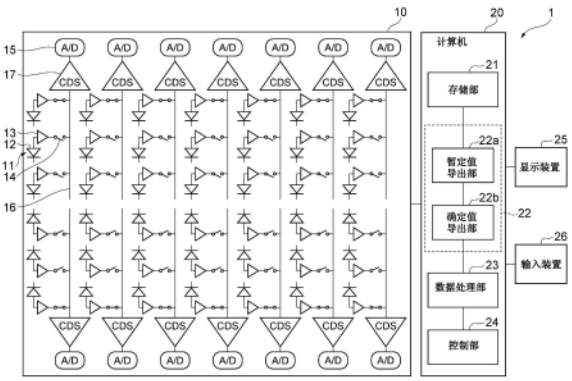
权利要求书2页 说明书10页 附图6页

(54)发明名称

光子数识别系统、光子数识别方法及光子数识别处理程序

(57)摘要

光子数识别系统具备:多个像素,其包含光电转换元件和放大由光电转换元件转换的电荷并转换为电压的放大器;A/D转换器,其将从多个像素的放大器输出的电压转换为数字值;第1导出部,其基于数字值,导出多个像素中的各像素的光子数的暂定值;以及第2导出部,其基于根据光散粒噪声的第1概率和根据读出噪声的第2概率,导出对象像素中的光子数的确定值。



CN 118476238 A

1.一种光子数识别系统,其中,

具备:

多个像素,其包含将输入的光转换为电荷的光电转换元件和放大由所述光电转换元件转换的电荷并转换为电压的放大器;

A/D转换器,其将从所述多个像素的所述放大器输出的电压转换为数字值;

第1导出部,其基于所述数字值,导出所述多个像素中的各像素的光子数的暂定值;以及

第2导出部,其基于第1概率和第2概率,导出作为所述多个像素中的一个的对象像素中的光子数的确定值,

所述第1概率是基于光子数的概率分布的、所述对象像素中的每个光电子数的观测概率,

所述光子数的概率分布基于将所述光输入到作为所述多个像素中的至少一个像素的参照像素时的所述数字值而导出,

所述第2概率是基于伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、所述对象像素的所述暂定值中的每个光电子数的观测概率。

2.根据权利要求1所述的光子数识别系统,其中,

所述参照像素的读出噪声小于所述多个像素的读出噪声的整体的平均值。

3.根据权利要求1或2所述的光子数识别系统,其中,

所述参照像素的读出噪声为0.8e-rms以下。

4.根据权利要求1~3中任一项所述的光子数识别系统,其中,

所述光从量子光源输出。

5.根据权利要求1~4中任一项所述的光子数识别系统,其中,

所述第2导出部通过所述第1概率和所述第2概率的积,计算所述对象像素示出所述暂定值的情况下的每个光电子数的概率,基于计算的概率确定所述确定值。

6.根据权利要求1~5中任一项所述的光子数识别系统,其中,

伴随所述对象像素的所述读出噪声的光电子数的概率分布为正态分布。

7.根据权利要求1~6中任一项所述的光子数识别系统,其中,

所述第2导出部具有示出所述多个像素的各自的所述读出噪声的噪声图。

8.一种光子数识别方法,其中,

具备:

基于从具有多个像素的二维图像传感器输出的与所述多个像素对应的数字值,导出所述多个像素中的各像素的光子数的暂定值;以及

基于第1概率和第2概率,导出作为所述多个像素中的一个的对象像素中的光子数的确定值,

导出所述确定值包括:

作为所述第1概率,基于光子数的概率分布,求取所述对象像素中的每个光电子数的观测概率;以及

作为所述第2概率,基于伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布,求取所述对象像素的所述暂定值中的每个光电子数的观测概率,

所述光子数的概率分布基于将光输入到作为所述多个像素中的至少一个像素的参照像素时的所述数字值而导出。

9.根据权利要求8所述的光子数识别方法,其中,

所述参照像素的读出噪声小于所述多个像素的读出噪声的整体的平均值。

10.根据权利要求8或9所述的光子数识别方法,其中,

所述参照像素的读出噪声为0.8e-rms以下。

11.根据权利要求8~10中任一项所述的光子数识别方法,其中,

所述光从量子光源输出。

12.根据权利要求8~11中任一项所述的光子数识别方法,其中,

在导出所述确定值中,通过所述第1概率和所述第2概率的积,计算所述对象像素示出所述暂定值的情况下的每个光电子数的概率,基于计算的概率确定所述确定值。

13.根据权利要求8~12中任一项所述的光子数识别方法,其中,

在导出所述确定值中,作为伴随所述对象像素的所述读出噪声的光电子数的概率分布,利用正态分布。

14.根据权利要求8~13中任一项所述的光子数识别方法,其中,

在导出所述确定值中,参照示出所述多个像素的各自的所述读出噪声的噪声图。

15.一种光子数识别处理程序,其中,

所述光子数识别处理程序是基于从具有多个像素的二维图像传感器输出的与所述多个像素对应的数字值,使计算机执行光子数识别的处理的程序,

所述程序使计算机执行:

第1导出处理,其基于所述数字值,导出所述多个像素中的各像素的光子数的暂定值;以及

第2导出处理,其基于第1概率和第2概率,导出作为所述多个像素中的一个的对象像素中的光子数的确定值,

所述第1概率是基于光子数的概率分布的、所述对象像素中的每个光电子数的观测概率,

所述光子数的概率分布基于将光输入到作为所述多个像素中的至少一个像素的参照像素时的所述数字值而导出,

所述第2概率是基于伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、所述对象像素的所述暂定值中的每个光电子数的观测概率。

光子数识别系统、光子数识别方法及光子数识别处理程序

技术领域

[0001] 本公开涉及一种光子数识别系统、光子数识别方法及光子数识别处理程序。

背景技术

[0002] 例如在专利文献1及专利文献2中,记载有使用了CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor,互补金属氧化物半导体)图像传感器的光子数识别装置。在该装置中,当将光子输入到光电转换元件时,与输入的光子数对应而生成的光电子作为电荷蓄积。蓄积于光电转换元件的电荷由放大器转换为电压并放大。从放大器输出的电压通过A/D转换器转换为数字值。在光子数识别装置中,基于从A/D转换器输出的数字值,判别构成图像传感器的像素的光子数。

[0003] 另外,在非专利文献1至非专利文献3中,记载有与使用了CMOS图像传感器的光子计数相关的技术。

[0004] 现有技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:国际公开第2019/102636号

[0007] 专利文献2:国际公开第2019/102637号

[0008] 非专利文献

[0009] 非专利文献1:B Saleh Masoodian,Jiaju Ma,Dakota Starkey,Yuichiro Yamashita,and Eric R.Fossum,“A 1Mjot 1040fps 0.22e-rms Stacked BSIQuanta Image Sensor with Cluster-Parallel Readout”,2017International Image Sensor Workshop(IISW)的预稿集,May 30-June 2,2017,P230-233

[0010] 非专利文献2:JIAJU MA et al.,“Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain”,Optica,Vol.4,No.12,December 2017,p1474-p1481

[0011] 非专利文献3:DAKOTA A.STARKEY et al.,“Determining Conversion Gain and Read Noise Using a Photon-Counting Histogram Method for Deep Sub-Electron Read Noise Image Sensors”,JOURNAL OF THE ELECTRON DEVICES SOCIETY,VOLUME 4,NO.3,MAY 2016,p129-p135

发明内容

[0012] 发明所要解决的技术问题

[0013] 在使用CMOS图像传感器执行光子数识别的情况下,在读出由放大器放大的电压时,在放大器内产生随机的噪声,即,读出噪声。在读出噪声大的情况下,观测的光电子的概率分布变宽。因此,期望像素的各自的读出噪声小。但是,在制造CMOS图像传感器的情况下,像素的读出噪声在一定的范围内可具有偏差。在该情况下,在读出噪声高的像素中,光子的计数精度可能降低。

[0014] 本公开的一个方面的目的在于,提供能够抑制光子的计数精度的降低的光子数识别系统。

[0015] 用于解决问题的技术手段

[0016] 一个例子的光子数识别系统具备:多个像素,其包含将输入的光转换为电荷的光电转换元件和放大由光电转换元件转换的电荷并转换为电压的放大器;A/D转换器,其将从多个像素的放大器输出的电压转换为数字值;第1导出部,其基于数字值,导出多个像素中的各像素的光子数的暂定值;第2导出部,其基于第1概率和第2概率,导出作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的确定值。第1概率是基于光子数的概率分布的、对象像素中的每个光电子数的观测概率。光子数的概率分布基于将光输入到作为多个像素中的至少一个像素的参照像素时的数字值而导出。第2概率是基于伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、对象像素的暂定值中的每个光电子数的观测概率。

[0017] 在上述的光子数识别系统中,基于与由各像素生成的电荷的量对应的数字值的大小,第1导出部导出各像素中的光子数的暂定值。例如,在读出噪声大的像素中,有时包含于导出的暂定值的误差变大。第2导出部基于根据参照像素的数字值导出的光子数的概率分布和伴随读出噪声的光电子数的概率分布,导出对象像素示出暂定值时的光子数的确定值。这样,考虑对象像素中的读出噪声的大小而导出光子数的确定值。因此,能够减小读出噪声对于确定值的导出带来的影响,因此能够提高光子数识别的精度。

[0018] 在一个例子的光子数识别系统中,也可以是参照像素的读出噪声小于多个像素的读出噪声的整体的平均值。在该结构中,由于参照像素的数字值较高精度地反映光子数,因此能够提高光子数的概率分布的可靠性。

[0019] 在一个例子的光子数识别系统中,也可以是参照像素的读出噪声为0.8e-rms以下。在该结构中,由于参照像素的数字值较高精度地反映光子数,因此能够提高光子数的概率分布的可靠性。

[0020] 在一个例子的光子数识别系统中,也可以是光从量子光源输出。在该结构中,在第1概率中反映量子光源的性质。

[0021] 在一个例子的光子数识别系统中,也可以是第2导出部通过第1概率和第2概率的积,计算对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率,基于计算的概率确定确定值。在该结构中,通过从对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率中,将示出最大值的光电子数设为确定值,能够得到最可能的光子数。另外,通过将对象像素示出暂定值的情况下的光电子数的期望值设为确定值,能够得到距真的光子数的误差最小的光子数。

[0022] 在一个例子的光子数识别系统中,也可以是伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布为正态分布。在该结构中,能够适当地记述伴随读出噪声的光电子数的概率分布。

[0023] 在一个例子的光子数识别系统中,也可以是第2导出部具有示出多个像素的各自的读出噪声的噪声图。即,第2导出部也可以通过参照包含噪声图的数据,导出第2概率。

[0024] 一个例子的光子数识别方法具备:基于从具有多个像素的二维图像传感器输出的与多个像素对应的数字值,导出多个像素中的各像素的光子数的暂定值;以及基于第1概率和第2概率,导出作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的确定值。导出确定值包括:作为第1概率,基于光子数的概率分布,求取对象像素中的每个光电子数的观测概率;以

及作为第2概率,基于伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布,求取对象像素的暂定值中的每个光电子数的观测概率。光子数的概率分布基于将光输入到作为多个像素中的至少一个像素的参照像素时的数字值而导出。

[0025] 在上述的光子数识别方法中,基于与由各像素生成的电荷的量对应的数字值的大小,导出各像素中的光子数的暂定值。例如,在读出噪声大的像素中,有时包含于导出的暂定值的误差变大。另外,基于根据参照像素的数字值导出的光子数的概率分布和伴随读出噪声的光电子数的概率分布,导出对象像素示出暂定值时的光子数的确定值。这样,考虑对象像素中的读出噪声的大小而导出光子数的确定值。因此,能够减小读出噪声对于确定值的导出带来的影响,因此能够提高光子数识别的精度。

[0026] 在一个例子的光子数识别方法中,也可以是参照像素的读出噪声小于多个像素的读出噪声的整体的平均值。在该结构中,由于参照像素的数字值较高精度地反映光子数,因此能够提高光子数的概率分布的可靠性。

[0027] 在一个例子的光子数识别方法中,也可以是参照像素的读出噪声为0.8e-rms以下。在该结构中,由于参照像素的数字值较高精度地反映光子数,因此能够提高光子数的概率分布的可靠性。

[0028] 在一个例子的光子数识别方法中,也可以是光从量子光源输出。在该结构中,第1概率反映量子光源的性质。

[0029] 在一个例子的光子数识别方法中,也可以是在导出确定值中,通过第1概率和第2概率的积,计算对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率,基于计算的概率确定确定值。在该结构中,通过从对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率中,将示出最大值的光电子数设为确定值,能够得到最可能的光子数。另外,通过将对象像素示出暂定值的情况下的光电子数的期望值设为确定值,能够得到距真的光子数的误差最小的光子数。

[0030] 在一个例子的光子数识别方法中,也可以是在导出确定值中,作为伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布,利用正态分布。在该结构中,能够适当地记述伴随读出噪声的光电子数的概率分布。

[0031] 在一个例子的光子数识别方法中,也可以是在导出确定值中,参照示出多个像素的各自的读出噪声的噪声图。例如,第2概率也可以基于包含噪声图的数据而导出。

[0032] 一个例子的光子数识别处理程序,基于从具有多个像素的二维图像传感器输出的与多个像素对应的数字值,使计算机执行光子数识别的处理。该程序使计算机执行:第1导出处理,其基于数字值,导出多个像素中的各像素的光子数的暂定值;以及第2导出处理,其基于第1概率和第2概率,导出作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的确定值。第1概率是基于光子数的概率分布的、对象像素中的每个光电子数的观测概率。光子数的概率分布基于将光输入到作为多个像素中的至少一个像素的参照像素时的数字值而导出。第2概率是基于伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、对象像素的暂定值中的每个光电子数的观测概率。

[0033] 发明的效果

[0034] 根据一个方面的光子数识别系统及光子数识别方法,能够抑制光子的计数精度的降低。

附图说明

[0035] 图1是示出一个例子的光子数识别装置的结构的图。

[0036] 图2是示出一个例子的光子数识别系统的框图。

[0037] 图3是示出一个例子的光子数识别装置的动作的流程图。

[0038] 图4是示出光子数识别处理程序的图。

[0039] 图5是用于说明一个例子的光子数识别的结果的图。

[0040] 图6是用于说明一个例子的光子数识别的结果的图。

具体实施方式

[0041] 以下,参照附图具体地说明实施方式。方便起见,有时对实际上相同的要素附以相同的符号,省略其说明。此外,在以下的说明中,光子数识别(Photon number resolving)包括计数由图像传感器的各像素生成的光电子或计数入射于图像传感器的各像素的光子。另外,与一般的单一光子检测(Single photon counting)相同,在光子数识别中包括检测由图像传感器的各像素生成的光电子或检测入射于图像传感器的各像素的光子。光子数识别的结果(光子数识别数据)包含示出光电子数或光子数的统计数据。另外,光子数识别的结果包含示出各像素中的光电子数或光子数的图像。该图像可以是二维图像或一维图像。另外,光子数识别包括考虑图像传感器的量子效率(QE:Quantum Efficiency)而计数光子数。

[0042] 图1是示出一个例子的光子数识别装置的结构的图。图2是示出包含光子数识别装置的光子数识别系统的框图。如图1所示,一个例子的光子数识别装置具备作为二维图像传感器的CMOS图像传感器10和与CMOS图像传感器10连接的计算机(控制装置)20。另外,如图2所示,光子数识别系统S1具备相对于光子数识别装置1的CMOS图像传感器10照射光的光源30。在光子数识别系统中,在从光源30输出的光输入到CMOS图像传感器10的状态下,可以通过光子数识别装置1获取图像数据。在一个例子中,光源30可以是能够作为单一光子源、量子纠缠光子源等利用的量子光源。此外,光源30的种类没有特别限定,也可以是激光光源、LED光源、热放射光源等。

[0043] CMOS图像传感器10包含多个像素11和A/D转换器15。多个像素11二维地配置。即,多个像素11在行方向及列方向上排列。各像素11具有光电二极管(光电转换元件)12和放大器13。光电二极管12将通过光子的输入而生成的光电子作为电荷蓄积。放大器13将蓄积于光电二极管12的电荷转换为电压,并放大转换后的电压。放大的电压通过各像素11的选择开关14的切换,按每条线(每行)传送到垂直信号线16。在各垂直信号线16配置有CDS(correlated double sampling,相关双采样)电路17。CDS电路17除去在像素间具有偏差的噪声,并暂时保管传送的电压。

[0044] A/D转换器15将从多个像素11中的各自的放大器13输出的电压转换为数字值。此外,A/D转换器15也可以设置于各像素11。在本实施方式中,A/D转换器15将保管于CDS电路17的电压转换为数字值。转换后的数字值分别输出到计算机20。例如,数字值也可以通过列选择的切换传送到未图示的水平信号线,并输出到计算机20。这样,CMOS图像传感器10当将光子输入到各像素11时,将与输入的光子数(生成的光电子数)对应的数字值输出到计算机20。此外,在读出由放大器13放大的电压时,在放大器13内产生随机的噪声,即读出噪声。

[0045] 计算机20在物理上具备RAM、ROM等存储装置、CPU、GPU等处理器(运算电路)、通信

接口等而构成。作为计算机20,列举例如个人计算机、云服务器、智能设备(智能手机、平板终端等)、微型计算机、FPGA(field-programmable gate array,现场可编程门阵列)等。计算机20通过利用计算机系统的处理器执行容纳于存储装置的程序,作为存储部21、转换部22、数据处理部23、控制部24发挥功能。计算机20可以配置于包含CMOS图像传感器10的相机装置的内部,也可以配置于相机装置的外部。在计算机20,可以连接有显示装置25和输入装置26。显示装置25是例如可以显示由计算机20得到的光子数识别结果的显示器。输入装置26可以是用于用户输入测量条件的键盘、鼠标等。此外,显示装置25和输入装置26也可以是触摸屏。显示装置25和输入装置26也可以包含于计算机20。另外,显示装置25和输入装置26也可以设置于包含CMOS图像传感器10的相机装置。

[0046] 存储部21存储用于将从CMOS图像传感器10输出的数字值转换为光子数的数据。存储部21例如除了包括RAM、ROM等存储装置之外,还包括固态硬盘(Solid State Drive)或硬盘驱动器(Hard Disk Drive)等辅助存储装置。例如,存储部21将多个像素11中的各自的增益和偏移值作为查找表来存储。另外,存储部21将多个像素11中的各自的读出噪声作为查找表(噪声图)来存储。

[0047] 从上述的A/D转换器15输出的数字值[DN]由以下的式(1)表示。因此,偏移值[DN]表示为在不输入光的状态下输出的数字值。因此,在一个例子中,在不输入光的状态下,从由CMOS图像传感器10获取的多帧的暗图像获取多个数字值,将获取的数字值按每个像素11进行平均化,由此获取偏移值。另外,在获取各像素11的增益[DN/e]的情况下,在充分的光量下通过CMOS图像传感器10获取多帧图像。再者,获取各像素11中的数字值的平均光信号值S[DN]和标准偏差N[DN]。增益以N^2/S表示,因此从平均光信号值S和标准偏差N导出增益。

[0048] 【数学式1】

[0049] 数字值=增益×光电子数[e]+偏移值…(1)

[0050] 另外,读出噪声例如被定义为数字值的波动,可以表示为换算成电子数单位的值。因此,在多个(例如100帧以上)暗图像中按每个像素11获取数字值的标准偏差,将获取的标准偏差除以像素11的增益,由此也可以获取每个像素11的读出噪声。每个像素的偏移值、增益和读出噪声也可以在光子数识别装置的制造过程中获取。

[0051] 转换部22参照存储于存储部21的表,将从A/D转换器15输出的多个像素11中的每一个的数字值分别转换为光电子数或光子数。在一个例子中,通过按每个像素11将光电子数除以量子效率,能够得到光子数。在量子效率为100%的情况下,光电子数和光子数成为相同数。

[0052] 数据处理部23基于从转换部22输出的光子数的值,制作示出各像素11中的光子数的二维图像或一维图像。例如,二维图像或一维图像可以是通过与光子数对应的亮度描绘各像素的图像。所制作的图像可以输出到显示装置25。另外,数据处理部23也可以制作作为像素数相对于光子数的图表的直方图等统计数据。控制部24可以总括地控制计算机20的各功能部或CMOS图像传感器10。

[0053] 以下,详细地说明转换部22。转换部22通过参照存储部21保持的查找表,能够适当参照各像素11的增益、偏移值和读出噪声。

[0054] 一个例子的转换部22包含暂定值导出部22a(第1导出部)和确定值导出部22b(第2导出部)。暂定值导出部22a基于数字值,导出多个像素11中的各像素11的光子数的暂定值。

在暂定值导出部22a,也可以如以下的式(2),将通过从所测量的数字值减去偏移值的值除以增益而求取的光电子数作为光子数的暂定值(第1暂定值)按每个像素11导出。以下,有时将第1暂定值称为像素值。

[0055] 【数学式2】

[0056] 像素值＝((数字值-偏移值)/增益)…(2)

[0057] 另外,暂定值导出部22a也可以将从像素值推定的光子数的整数值作为暂定值(第2暂定值)而导出。以下,有时将第2暂定值称为暂定光子数。在一个例子中,也可以通过对像素值的小数点以下进行四舍五入,获取暂定光子数。在该情况下,也可以通过对像素值设定规定的阈值范围,将像素值转换为暂定光子数。例如,与5个光子(5个光电子)对应的像素值的阈值范围成为4.5e以上且低于5.5e。

[0058] 确定值导出部22b导出(确定)多个像素11的各自的光子数的确定值。例如,确定值导出部22b将多个像素11中的一个作为对象像素,导出该对象像素中的光子数的确定值。通过将构成CMOS图像传感器10的多个像素11的各个设为对象像素,导出全部的像素中的光子数的确定值。

[0059] 在本实施方式中,确定值导出部22b导出第1概率和第2概率,基于导出的第1概率和第2概率,导出对象像素中的光子数的确定值。第1概率是基于光子数的概率分布的、对象像素中的每个光电子数的观测概率。光子数的概率分布基于将来自光源30的光输入到参照像素时的参照像素的数字值,由确定值导出部22b导出。参照像素是构成CMOS图像传感器10的多个像素11中的至少一个像素。在一个例子中,参照像素的读出噪声可以是小于多个像素11的读出噪声的整体平均的值。在该情况下,与具有平均的读出噪声的像素的暂定值相比,从参照像素的数字值求取的暂定值可以高精度地反映光子数。例如,参照像素的读出噪声可以是规定的值以下。在一个例子中,参照像素的读出噪声也可以为0.8[e-rms]以下。另外,在要获取更精确的光子数的概率分布的情况下,也可以仅将读出噪声为0.3[e-rms]以下的像素11设为参照像素。

[0060] 一个例子的存储部21也可以保持具有适于参照像素的读出噪声的像素11的一部分或全部的地址信息。在该情况下,确定值导出部22b通过参照存储部21的地址信息,能够特定参照像素。因此,确定值导出部22b能够适当地获取参照像素的数字值、像素值、暂定光子数等输出数据。此外,在存储部21中未保持参照像素的地址信息的情况下,确定值导出部22b也可以参照各像素的读出噪声(噪声图),提取具有适于参照像素的读出噪声的像素(即参照像素)的输出数据。

[0061] 例如,确定值导出部22b也可以基于多个参照像素的输出数据导出光子数的概率分布。在一个例子中,多个参照像素的输出数据在对于多个参照像素输入来自光源30的一样的光量的光的状态下获取。在对于构成CMOS图像传感器10的全部的像素11输入来自光源30的一样的光量的光的情况下,也可以将全部的参照像素利用于光子数的概率分布的导出。另外,在对于CMOS图像传感器10中包含对象像素的一部分的区域的像素11输入来自光源30的一样的光量的光的情况下,也可以仅将包含于该一部分的区域的参照像素利用于光子数的概率分布的导出。

[0062] 例如,确定值导出部22b获取与多个参照像素分别对应的多个暂定光子数的数据。再者,确定值导出部22b通过在统计上处理获取的多个暂定光子数的数据,导出光子数的概

率分布。即,确定值导出部22b通过按每个暂定光子数合计所获取的暂定光子数的数据数,并且将合计结果分别除以全数据数,导出示出每个暂定光子数的观测概率的概率分布(即光子数的概率分布)。确定值导出部22b基于该概率分布获取第1概率。第1概率是将与获取光子数的概率分布时相同条件的一样的光输入到对象像素时的、将对象像素的光子数观测为k的概率。即,确定值导出部22b根据光子数的概率分布将光子数为k时的概率作为第1概率而获取。此外,光子数k是由确定值导出部22b假定的暂定的光子数。即,光子数k可以说是对象像素中的光子数的暂定值(第3暂定值)。以下,有时将第3暂定值称为假定光子数。

[0063] 在导出光子数的概率分布的情况下,暂定光子数的数据数越多,即样本尺寸越大,能够得到精度越高的结果。因此,确定值导出部22b也可以按多帧的量获取暂定光子数的数据,并基于所获取的数据导出光子数的概率分布。

[0064] 第2概率是基于伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、对象像素的暂定值中的每个光电子数的观测概率,由以下的式(3)表示。对象像素的暂定值可以是像素值。如式(3)所示,第2概率遵循正态分布(高斯分布)。此外,在式(3)中,x为对象像素的像素值[e],R为对象像素的读出噪声[e-rms]。即,第2概率是对象像素的像素值中、将对象像素的光子数观测为k的概率(观测概率),并且按每个光电子数求取。

[0065] 【数学式3】

[0066] $$第2概率=\frac{1}{\sqrt{2\pi}R}\exp\left(-\frac{(x-k)^2}{2R^2}\right) \quad \cdots(3)$$

[0067] 确定值导出部22b基于第1概率和第2概率的积,计算对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率,并基于计算的概率确定光子数的确定值。即,一个例子的确定值导出部22b使对象像素的假定光子数变化,并且基于以下的式(4)计算对象像素示出暂定值的情况下的每个假定光子数的概率,并将概率最高时的假定光子数k的值作为光子数的确定值而输出。在式(4)中,Q_k是第1概率,即,基于光子数的概率分布而导出的、将对象像素的光子数观测为k的概率。由确定值导出部22b运算的假定光子数k的范围可以是光子数的概率分布的数据范围。即,可以是在导出光子数的概率分布时获取的暂定光子数的范围。另外,由确定值导出部22b运算的假定光子数k的范围也可以是与对象像素的暂定值对应的规定的范围。

[0068] 【数学式4】

[0069] $$P_k(x)=Q_k\times\frac{1}{\sqrt{2\pi}R}\exp\left(-\frac{(x-k)^2}{2R^2}\right) \quad \cdots(4)$$

[0070] 如上,确定值导出部22b将周边像素的暂定值作为线索,将对象像素中概率最高的光子数作为对象像素的确定值而导出。

[0071] 另外,确定值导出部22b也可以将认为与真的光子数的误差最小的光子数作为确定值而导出。即,确定值导出部22b也可以将光子数的期望值作为确定值而导出。例如,确定值导出部22b将基于光子数的概率分布的、对象像素中的每个光电子数的观测概率设为第1概率,将基于伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、对象像素的暂定值中的每个光电子数的观测概率设为第2概率,基于第1概率和第2概率可以导出对象像素的光子数的期望值。例如,在由式(4)表示对象像素示出暂定值时的每个假定光子数的概率的情况下,光子数的期望值k_{exp}由以下的式(5)表示。由确定值导出部22b运算的假定光子数k的范

围可以是光子数的概率分布的数据范围。即,可以是在导出光子数的概率分布时获取到的暂定光子数的范围。另外,由确定值导出部22b运算的假定光子数k的范围也可以是与对象像素的暂定值对应的规定的范围。

[0072] 【数学式5】

[0073] $$k_{exp}=\frac{\sum_k k\times P_k(x)}{\sum_k P_k(x)} \quad \cdots (5)$$

[0074] 图3是示出光子数识别装置的动作(光子数识别方法)的流程图。在本实施方式中,在光子数识别装置1进行动作的状态下开始测量时,首先,相对于CMOS图像传感器10的像素11入射的光子由光电二极管12转换为电荷(步骤S11)。再者,转换后的电荷由放大器13转换为电压(步骤S12)。该电压由A/D转换器15转换为数字值,并输出到计算机20(步骤S13)。转换部22的暂定值导出部22a基于参照存储部21的表而得到的各像素的增益和偏移值,从数字值导出暂定值(步骤S14)。导出的暂定值例如可以容纳于存储部21。确定值导出部22b基于参照像素的暂定值(例如暂定光子数),导出光子数的概率分布(步骤S15)。即,确定值导出部22b从容纳于存储部21的各像素的暂定值的数据获取参照像素的数据,基于获取的数据导出光子数的概率分布。

[0075] 接着,确定值导出部22b基于第1概率和第2概率,导出各像素中的光子数的确定值(步骤S16)。如上述那样,第1概率基于光子数的概率分布而导出,第2概率基于对象像素的暂定值和读出噪声而导出。如上,对多个像素中的每一个测量光子数。测量结果(光子数识别数据)作为例如图像数据等输出到显示装置25(步骤S17)。

[0076] 图4是示出容纳有使计算机执行光子数识别的处理的程序的记录介质100的图。容纳于记录介质100的光子数识别处理程序P1具备暂定值导出模块P22a、确定值导出模块P22b、数据处理模块P23和控制模块P24。通过执行暂定值导出模块P22a、确定值导出模块P22b、数据处理模块P23和控制模块P24而实现的功能(处理)分别与上述的暂定值导出部22a(第1导出处理)、确定值导出部22b(第2导出处理)、数据处理部23和控制部24的功能(处理)相同。

[0077] 光子数识别处理程序P1记录于计算机可读取的记录介质100中的程序记录区域。记录介质100也可以是非临时性的记录介质。记录介质100由例如CD—ROM、DVD、ROM、半导体存储器等记录介质构成。光子数识别处理程序P1也可以作为重叠于输送波的计算机数据信号经由通信网络提供。

[0078] 图5和图6是示出一个例子的光子数识别装置的输出结果的实施例。图5的(a)是基于上述的光子数识别装置的数字值而形成的图像。图像具有与数字值对应的亮度。在图5的(a)中,在由虚线包围的区域,照射有来自作为量子光源的光源30的一样的光。在虚线之外的区域未照射来自光源30的光。图5的(b)是基于上述的光子数识别装置的确定值而形成的图像。图像具有与确定值对应的亮度。未照射来自光源30的光的虚线外的区域的噪声减少,虚线内的信号变得明确。

[0079] 图6是示出光子数的概率分布的一个例子的图。图6基于图5的(a)中的由虚线包围的区域内的参照像素的暂定光子数而导出。当更详细地说明时,在一个例子中,获取虚线内的参照像素中任意的10个像素中的500帧量的暂定光子数的数据,将合计5000个数据作为样本,导出每个暂定光子数的概率。此外,参照像素的读出噪声为0.18[e-rms]以下。由虚线

内的参照像素测量的暂定光子数为从0到3中的任一个,因此图6的光子数的概率分布的数据范围成为0、1、2、3。图6的概率分布用于导出图5的(a)中的虚线内的像素的确定值。此外,用于导出图5的(a)中的虚线外的像素的确定值的光子数的概率分布(未图示)基于图5的(a)中的虚线外的参照像素的暂定光子数而导出。

[0080] 如以上说明那样,一个例子的光子数识别装置1具备:多个像素11,其包含将输入的光转换为电荷的光电二极管12和放大由光电二极管12转换的电荷并转换为电压的放大器13;A/D转换器15,其将从多个像素11的放大器13输出的电压转换为数字值;暂定值导出部22a,其基于数字值,导出多个像素11中的各像素11的光子数的暂定值;以及确定值导出部22b,其基于第1概率和第2概率,导出作为多个像素11中的一个的对象像素中的光子数的确定值。第1概率是基于光子数的概率分布的、对象像素中的每个光电子数的观测概率。光子数的概率分布基于将光输入到作为多个像素11中的至少一个像素的参照像素时的数字值而导出。第2概率是基于伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的、对象像素的暂定值中的每个光电子数的观测概率。

[0081] 在上述的光子数识别装置1中,基于与由各像素11生成的电荷的量对应的数字值的大小,暂定值导出部22a导出各像素11中的光子数的暂定值。例如,在读出噪声大的像素中,有时包含于导出的暂定值的误差变大。确定值导出部22b基于根据参照像素的数字值而导出的光子数的概率分布和伴随读出噪声的光电子数的概率分布,导出对象像素示出暂定值时的光子数的确定值。这样,光子数的确定值考虑对象像素中的读出噪声的大小而导出。因此,能够减小读出噪声对于确定值的导出带来的影响,因此能够提高光子数识别的精度。

[0082] 另外,在光子数识别装置1中,基于参照像素的数字值导出光子数的概率分布,因此导出与光源30的光学的性质对应的适当的概率分布。

[0083] 在一个例子的光子数识别装置1中,参照像素的读出噪声也可以小于多个像素的读出噪声的整体的平均值。例如,参照像素的读出噪声也可以为0.8e-rms以下。在该结构中,参照像素的数字值较高精度地反映光子数,因此能够提高光子数的概率分布的可靠性。

[0084] 在一个例子的光子数识别装置1中,输入到CMOS图像传感器10的光也可以从量子光源输出。在该结构中,在第1概率中反映量子光源的性质。另外,在使用了量子光源的光子数识别中,可以观测具有二重性、重合、量子纠缠等量子的特殊的性质或动作的光子。

[0085] 在一个例子的光子数识别装置1中,确定值导出部22b也可以通过第1概率和第2概率的积,计算对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率,基于计算的概率确定确定值。在该结构中,通过从对象像素示出暂定值的情况下的每个光电子数的概率中,将示出最大值的光电子数设为确定值,能够得到最可能的光子数。另外,通过将对象像素示出暂定值的情况下的光电子数的期望值设为确定值,能够得到距真的光子数的误差成为最小的光子数。

[0086] 在一个例子的光子数识别装置1中,伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布也可以是正态分布。在该结构中,能够适当地记述伴随读出噪声的光电子数的概率分布。

[0087] 在一个例子的光子数识别装置1中,确定值导出部22b也可以具有示出多个像素的各自的读出噪声的噪声图。即,确定值导出部22b也可以通过参照包含噪声图的数据,导出第2概率。另外,参照像素也可以通过参照基于噪声图的数据而确定。

[0088] 以上,参照附图详细描述了实施方式,但具体的结构不限于该实施方式。

[0089] 例如,示出了基于满足读出噪声的条件的参照像素的暂定值导出光子数的概率分布的例子,但光子数的概率分布也可以基于其它任意的像素的暂定值而导出。例如,也可以基于构成CMOS图像传感器的全部的像素的暂定值求取光子数的概率分布。

[0090] 另外,示出了将确定值导出部22b导出的光子数的概率分布原样用于确定值的导出的例子,但例如也可以使导出的光子数的概率分布近似于任意的分布、函数等。在该情况下,由确定值导出部运算的假定光子数的范围也可以以观测概率的总和成为一定以上(例如0.99以上)的方式设定。

[0091] 符号的说明

[0092] 1…光子数识别装置,11…像素,12…光电二极管(光电转换元件),13…放大器,15…A/D转换器,21…存储部,22a…暂定值导出部(第1导出部),22b…确定值导出部(第2导出部)。

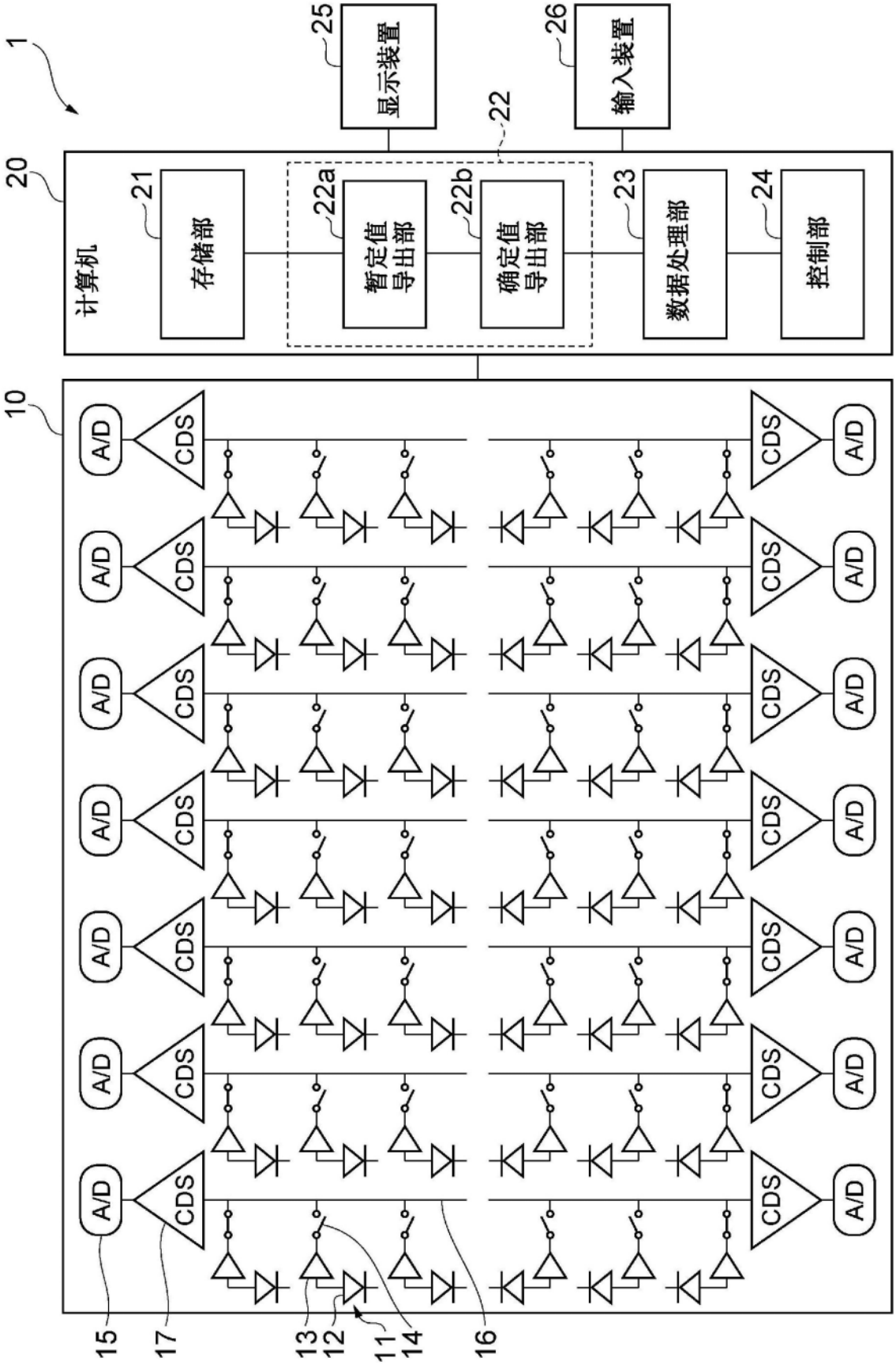

1
20
计算机
21
存储部
22
22a
暂定值导出部
22b
确定值导出部
23
数据处理部
24
控制部
25
显示装置
26
输入装置
10
A/D
CDS
15
17
13
12
11
14
16

图1

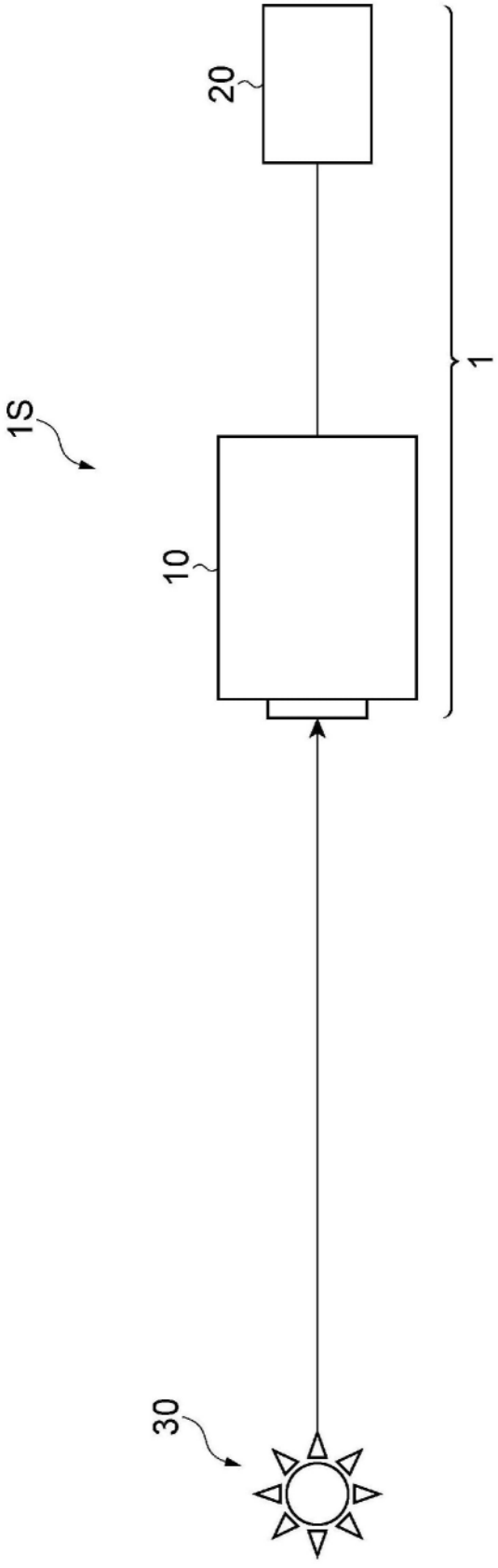


图2

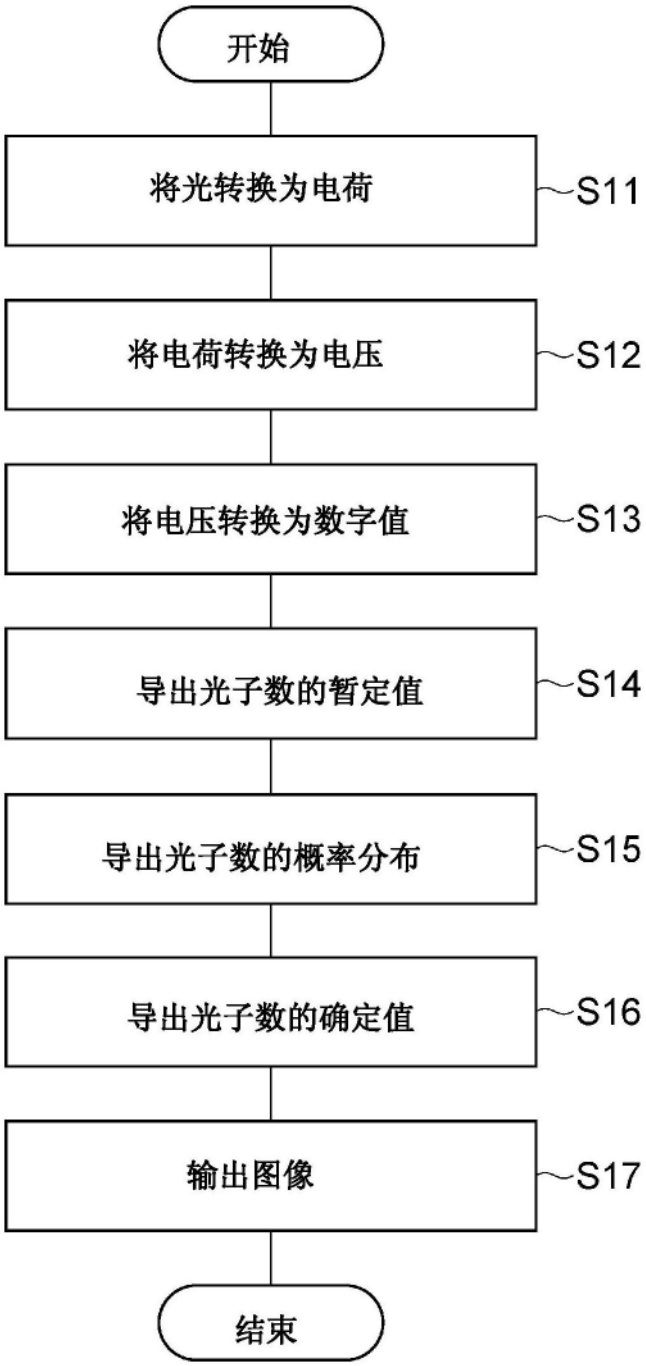

开始
将光转换为电荷
S11
将电荷转换为电压
S12
将电压转换为数字值
S13
导出光子数的暂定值
S14
导出光子数的概率分布
S15
导出光子数的确定值
S16
输出图像
S17
结束

图3

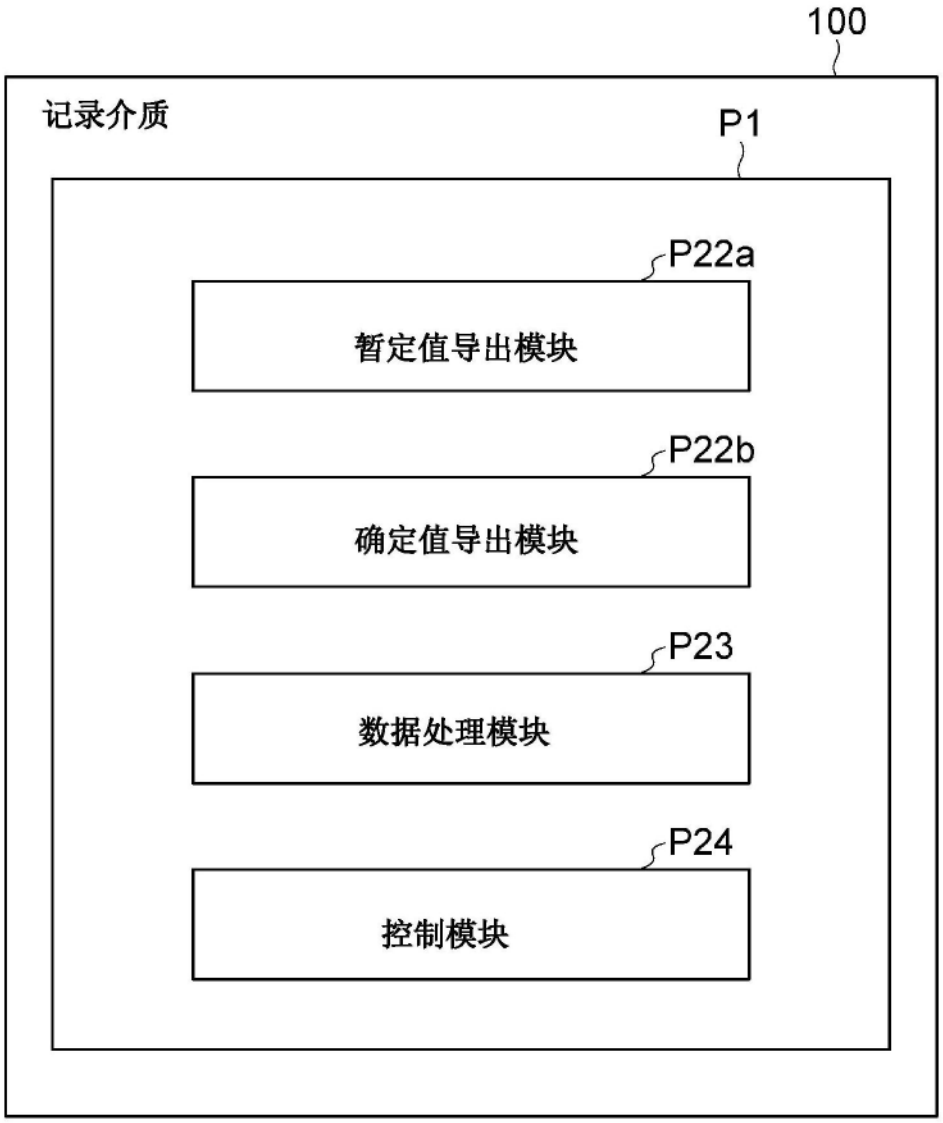
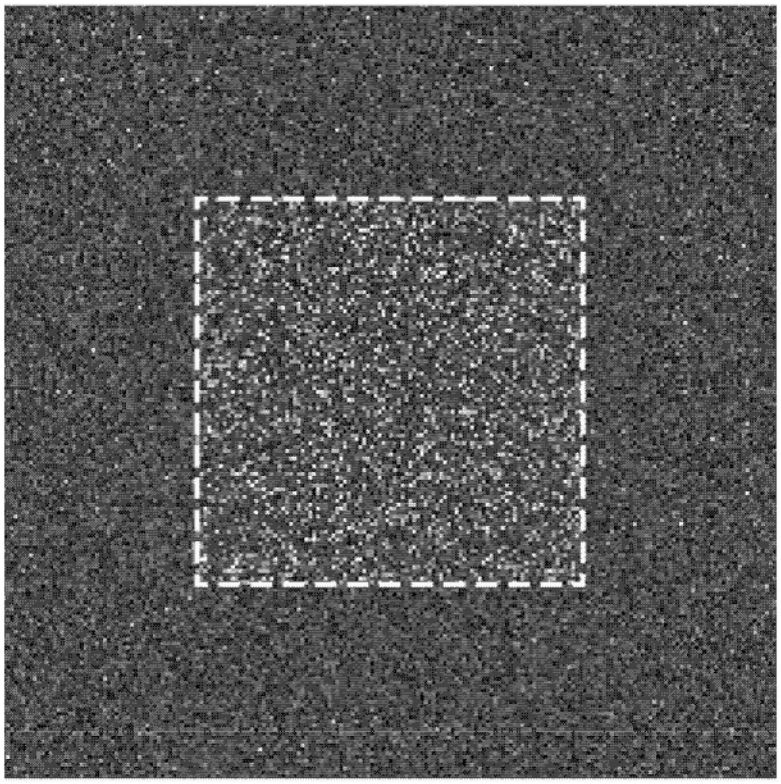


图4

(a)



(b)

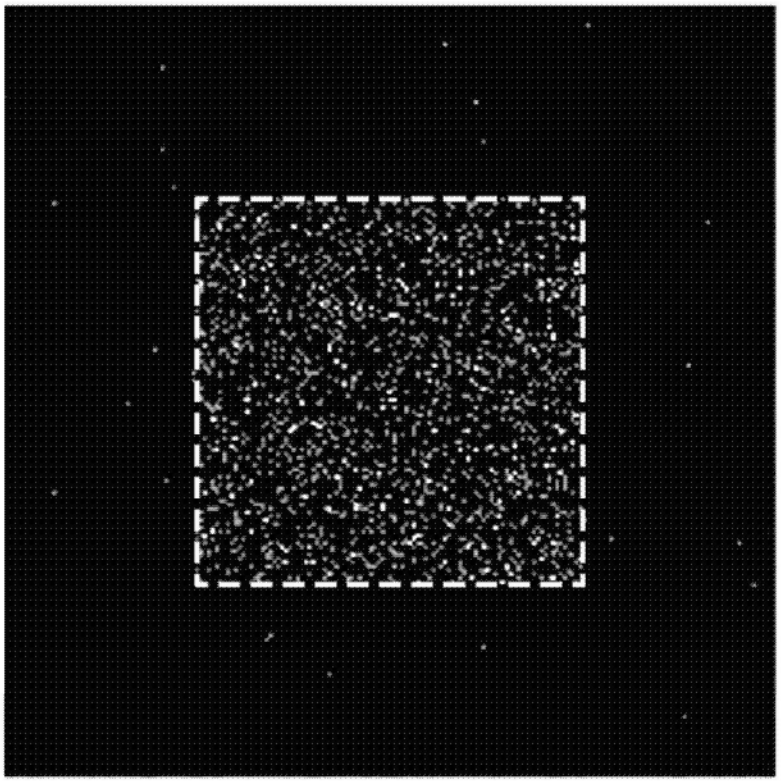


图5

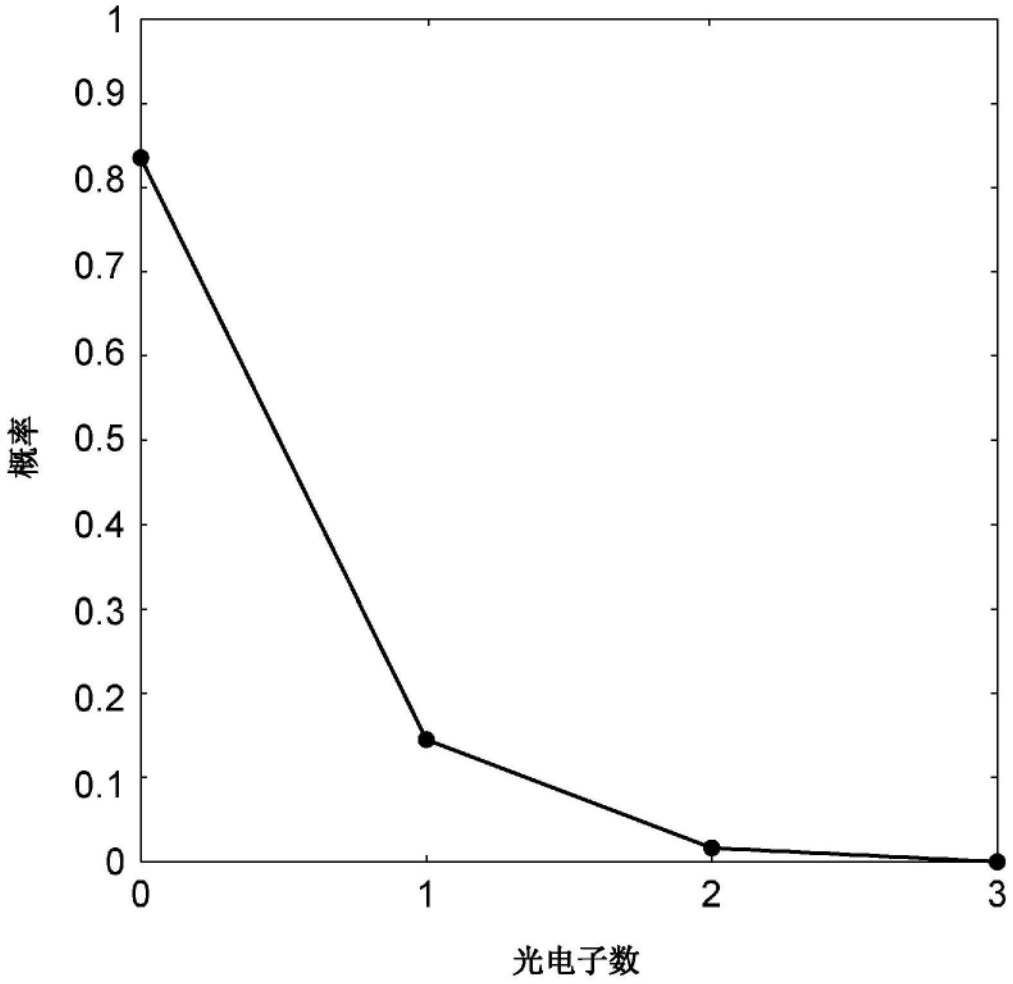


图6