



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118435619 A

(43) 申请公布日 2024. 08. 02

(21) 申请号 202280085067.2

(22) 申请日 2022.11.10

(30) 优先权数据

2021-211065 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/JP2022/041948 2022.11.10

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/119934 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 中本胜大 高桥辉雄

中岛真央

(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)

G01J 1/44 (2006.01)

H04N 25/76 (2006.01)

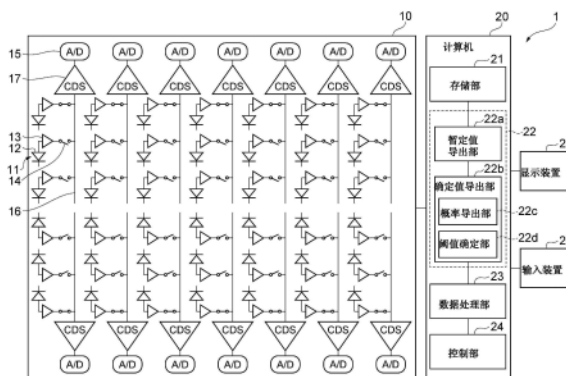
权利要求书3页 说明书15页 附图8页

(54) 发明名称

阈值确定方法、阈值确定程序、阈值确定装置、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

阈值确定方法具备:基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,对对象像素的每个光子数求取暂定值的概率分布的工序;以及基于各光子数的概率分布,求取将暂定值区别为对应的光子数的阈值数据的工序。



1. 一种阈值确定方法,其中,

所述阈值确定方法是在光子数识别系统中,导出用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据的方法,所述光子数识别系统具备:所述多个像素,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;以及导出部,其基于所述数字值,导出所述多个像素中的各像素的所述光子数的所述暂定值,

所述阈值确定方法具备:

基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取所述对象像素中的光子数成为整数 $n$ 的所述暂定值的第1概率分布、以及所述对象像素中的光子数成为整数 $m$ 的所述暂定值的第2概率分布的工序,其中, $n$ 为0以上, $m$ 为0以上且不是 $n$ ;以及

基于所述第1概率分布和所述第2概率分布,求取将所述暂定值区别为所述整数 $n$ 和所述整数 $m$ 的阈值数据的工序。

2. 根据权利要求1所述的阈值确定方法,其中,

所述整数 $m$ 满足 $m=n+1$ 。

3. 根据权利要求1或2所述的阈值确定方法,其中,

基于所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率为泊松分布、超泊松分布、亚泊松分布、多模式挤压状态的光子数分布、玻色-爱因斯坦分布、对数正态分布、均匀分布和混合分布中的任一个分布。

4. 根据权利要求1~3中任一项所述的阈值确定方法,其中,

所述第1概率分布和所述第2概率分布基于根据所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的积而导出。

5. 根据权利要求1~4中任一项所述的阈值确定方法,其中,

基于所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率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。

6. 一种阈值确定程序,其中,

所述阈值确定程序是使计算机执行在光子数识别系统中,导出用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据的处理的程序,所述光子数识别系统具备:所述多个像素,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;以及导出部,其基于所述数字值,导出所述多个像素中的各像素的所述光子数的所述暂定值,

导出所述阈值数据的处理具备:

基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取所述对象像素中的光子数成为整数 $n$ 的所述暂定值的第1概率分布、以及所述对象像素中的光子数成为整数 $m$ 的所述暂定值的第2概率分布的处理,其中, $n$ 为0以上, $m$ 为0以上且不是 $n$ ;以及

基于所述第1概率分布和所述第2概率分布,求取将所述暂定值区别为所述整数n和所述整数m的阈值数据的处理。

7. 根据权利要求6所述的阈值确定程序,其中,  
所述整数m满足 $m=n+1$ 。

8. 根据权利要求6或7所述的阈值确定程序,其中,  
基于所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率为泊松分布、超泊松分布、亚泊松分布、多模式挤压状态的光子数分布、玻色-爱因斯坦分布、对数正态分布、均匀分布和混合分布中的任一个分布。

9. 根据权利要求6~8中任一项所述的阈值确定程序,其中,  
所述第1概率分布和所述第2概率分布基于根据所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的积而导出。

10. 根据权利要求6~9中任一项所述的阈值确定程序,其中,  
基于所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率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。

11. 一种阈值确定装置,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,其导出用于将作为所述多个像素中的一个的对象像素中的所述光子数的所述暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,

第2导出部具备:  
概率导出部,其基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取所述对象像素中的光子数成为整数n的所述暂定值的第1概率分布、以及所述对象像素中的光子数成为整数m的所述暂定值的第2概率分布,其中,n为0以上,m为0以上且不是n;以及

阈值确定部,其基于所述第1概率分布和所述第2概率分布,确定将所述暂定值区别为所述整数n和所述整数m的阈值数据。

12. 根据权利要求11所述的阈值确定装置,其中,  
所述整数m满足 $m=n+1$ 。

13. 根据权利要求11或12所述的阈值确定装置,其中,  
基于所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率为泊松分布、超泊松分布、亚泊松分布、多模式挤压状态的光子数分布、玻色-爱因斯坦分布、对数正态分布、均匀分布和混合分布中的任一个分布。

14. 根据权利要求11~13中任一项所述的阈值确定装置,其中,  
所述第1概率分布和所述第2概率分布基于根据所述光子数的概率分布的每个光电子

数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的积而导出。

15. 根据权利要求11~14中任一项所述的阈值确定装置,其中,

基于所述光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率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。

16. 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,其基于用于将作为所述多个像素中的一个的对象像素中的所述光子数的所述暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与所述暂定值对应的光子数,

所述阈值数据是基于根据所述光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将所述暂定值区分为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据,其中, $n$ 为0以上, $m$ 为0以上且不是 $n$ 。

17. 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的工序;以及

基于用于将作为所述多个像素中的一个的对象像素中的所述光子数的所述暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与所述暂定值对应的光子数的工序,

所述阈值数据是基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将所述暂定值区分为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据,其中, $n$ 为0以上, $m$ 为0以上且不是 $n$ 。

18. 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:

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的处理;以及

基于用于将作为所述多个像素中的一个的对象像素中的所述光子数的所述暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与所述暂定值对应的光子数的处理,

所述阈值数据是基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随所述对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将所述暂定值区分为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据,其中, $n$ 为0以上, $m$ 为0以上且不是 $n$ 。

## 阈值确定方法、阈值确定程序、阈值确定装置、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] 本公开涉及一种阈值确定方法、阈值确定程序、阈值确定装置、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图像传感器的光子数识别相关的技术。

[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 BSI Quanta Image Sensor with Cluster-Parallel Readout", 2017 International 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阈值确定方法、阈值确定程序、阈值确定装置、光子数识别系统、光子数识别方法及光子数识别处理程序。

[0015] 用于解决问题的技术手段

[0016] 一个例子的阈值确定方法是在光子数识别系统中,导出用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据的方法。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;以及导出部,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。该方法具备:基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取对象像素中的光子数成为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)的暂定值的第1概率分布、以及对象像素中的光子数成为整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的暂定值的第2概率分布的工序。该方法具备:基于第1概率分布和第2概率分布,求取将暂定值区分为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据的工序。

[0017] 一个例子的阈值确定程序是使计算机执行在光子数识别系统中,导出用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据的处理的程序。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;以及导出部,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。导出阈值数据的处理具备:基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取对象像素中的光子数成为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)的暂定值的第1概率分布、以及对象像素中的光子数成为整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的暂定值的第2概率分布的处理;以及基于第1概率分布和第2概率分布,求取将暂定值区分为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据的处理。

[0018] 一个例子的阈值确定装置具备: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;以及第2导出部,其导出用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据。第2导出部具备:概率导出部,其基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取对象像素中的光子数成为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)的暂定值的第1概率分布和对象像素中的光子数成为整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的暂定值的第2概率分布;以及阈值确定部,其基于第1概率分布和第2概率分布,确定将暂定值区分为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据。

[0019] 在上述的阈值确定方法、阈值确定程序及阈值确定装置中,确定将由光子数识别系统导出的对象像素的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据。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。在该方法、程序及装置中,基于根据光子数的

概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取第1概率分布和第2概率分布。基于该第1概率分布和第2概率分布导出阈值数据。这样,考虑对象像素中的读出噪声的大小而导出阈值数据。因此,能够减小确定值的导出中的读出噪声带来的影响,因此能够提高光子数识别的精度。

[0020] 在一个例子中,整数 $m$ 满足 $m=n+1$ 。在该结构中,导出用于区分光子数相差“1”的暂定值彼此的阈值。

[0021] 在一个例子中,基于光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率也可以是泊松分布、超泊松分布、亚泊松分布、多模式挤压状态的光子数分布、玻色-爱因斯坦分布、对数正态分布、均匀分布和混合分布中的任一个分布。

[0022] 在一个例子中,第1概率分布和第2概率分布也可以基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的积而导出。在该结构中,能够适当地记述第1概率分布和第2概率分布。

[0023] 在一个例子中,基于光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率也可以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。在该结构中,基于作为实测数据的数字值导出观测概率,因此不会选择用于将光输入到光电转换元件的光源。

[0024] 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;以及第2导出部,其基于用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与暂定值对应的光子数。阈值数据是基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将暂定值区分为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)和整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的阈值数据。

[0025] 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的工序;以及基于用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与暂定值对应的光子数的工序。阈值数据是基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将暂定值区分为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)和整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的阈值数据。

[0026] 一个例子的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。该程序使计算机执行:基于数字值,导出多个像素中的各像素的光子数的暂定值的处理;以及基于用于将作为多个像素中的一个的对象像素中的光子数的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与暂定值对应的光子数的处理。阈值数据是基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将暂定值区分为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)和整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的阈值数据。

[0027] 在上述的光子数识别系统、光子数识别方法及光子数识别处理程序中,用于将暂定值区分为对应的光子数的阈值数据基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率而生成。因此,能够减小导出确定值时的读出噪声带来的影响,因此能够提高光子数识别的精度。

[0028] 发明的效果

[0029] 根据一个方面的光子数识别装置及光子数识别方法,能够抑制光子的计数精度的降低。

## 附图说明

[0030] 图1是示出一个例子光子数识别装置的结构图。

[0031] 图2是示出3行×3列的像素组的示意图。

[0032] 图3是示出光电子数的概率分布图。

[0033] 图4是用于一个例子的确定值导出部的说明示意图。

[0034] 图5是用于一个例子的确定值导出部的说明示意图。

[0035] 图6是示出一个例子光子数识别装置的动作流程图。

[0036] 图7是示出一个例子光子数识别装置的动作流程图。

[0037] 图8是示出一个例子光子数识别装置的动作流程图。

[0038] 图9是示出一个例子光子数识别处理程序的图。

## 具体实施方式

[0039] 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)包含表示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表示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。

[0040] 图1是示出一个例子光子数识别装置的结构图。如图1所示,一个例子光子数识别装置(阈值确定装置、光子数识别系统)1具备作为二维图像传感器的CMOS图像传感器10、以及与CMOS图像传感器10连接的计算机(控制装置)20。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。

[0041] 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。

[0042] 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。

[0043] 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。

[0044] 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。

[0045] 【数学式1】

[0046] 数字值=增益×光电子数[e]+偏移值…(1)

[0047] 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。

[0048] 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。

[0049] 数据处理部23基于从转换部22输出的光子数的值,制作表示各像素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。

[0050] 以下,详细地说明转换部22。此外,在转换部22的说明中,作为由多个像素构成的图像传感器的一部分区域,有时参照排列成3行×3列的像素组。图2是示出3行×3列的像素组的示意图。在图2中,与构成像素组的各像素11对应的读出噪声由“ $R_i$ ”(i表示像素的位置)的符号表示。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。

[0051] 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。

[0052] 【数学式2】

[0053] 像素值 = (数字值 - 偏移值) / 增益 ... (2)

[0054] 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个光电子对应的阈值范围成为4.5e以上且低于5.5e。此外,在图2中,构成像素组的各像素11中的暂定值(例如暂定光子数)通过“ $k_i$ ”(i表示像素的位置)的符号表示。

[0055] 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。通过将构成二维图像传感器的多个像素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。

[0056] 在本实施方式中,确定值导出部22b基于用于将对象像素的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,将与暂定值对应的光子数作为确定值导出。为了获取阈值数据,一个例子的确定值导出部22b具有概率导出部22c和阈值确定部22d。

[0057] 概率导出部22c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,按每个光子数导出对象像素中的光电子数的概率分布。第1概率是基于入射于CMOS图像传感器10的光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率。作为一个例子,第1概率通过以下的式(3)表示。如式(3)所示,一个例子的第1概率基于伴随光散粒噪声的光电子数的概率分布,并遵循泊松分布。

[0058] 【数学式3】

[0059] 第1概率 =  $\frac{\lambda^k \exp(-\lambda)}{k!}$  ... (3)

[0060] 在上述的式(3)中,k表示光子数, $\lambda$ 表示平均光子数。即,第1概率是对象像素中的平均光子数为 $\lambda$ 时的、将对象像素的光子数观测为k的概率(观测概率)。第1概率对每个光电子数进行求取。此外,光子数k是由概率导出部22c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。

[0061] 平均光子数(平均值)可以是周边像素中的暂定值的平均。周边像素可以定义为包含于多个像素中、对象像素的周围的一部分区域的2个以上的像素。在图2所示的3行×3列的像素组的例子中,也可以将中心的像素11c定义为对象像素,将3行×3列的像素组设为周边像素。在该情况下,对象像素中的平均光子数成为构成周边像素的像素11的暂定值的平均值。周边像素的暂定值可以是像素值和暂定光子数中的任意者。

[0062] 在一个例子中,概率导出部22c也可以参照表示多个像素11的各自的读出噪声的噪声图,作为平均光子数,计算将周边像素的读出噪声包含于加权的加权平均。基于读出噪声的权重 $w_i$  ( $i$ 表示像素的位置)例如通过以下的式(4)表示。即,一个例子的权重 $w_i$ 可以是读出噪声 $R_i$ 的倒数的乘方。在该情况下,读出噪声越小的像素,暂定值越容易反映到平均光子数,读出噪声越大的像素,暂定值越难以反映到平均光子数。式(4)中,可靠度 $\alpha$ 可以增减读出噪声对权重 $w_i$ 造成的影响。即,可靠度 $\alpha$ 越大,读出噪声对权重 $w_i$ 造成的影响越大。在一个例子中,为 $\alpha \geq 0$ 。此外,认为当可靠度 $\alpha$ 的值过大时,无法导出正确的确定值。因此,在一个例子中,可靠度 $\alpha$ 可以低于20。可靠度 $\alpha$ 可以是在概率导出部22c中预先设定的值,也可以是能够由光子数识别装置1的使用者设定的值。

[0063] 【数学式4】

$$[0064] \quad w_i = \left(\frac{1}{R_i}\right)^\alpha \quad \dots (4)$$

[0065] 基于加权平均的平均光子数 $\lambda$ 通过以下的式(5)表示。

[0066] 【数学式5】

$$[0067] \quad \lambda = \frac{\sum_i w_i \times k_i}{\sum_i w_i} \quad \dots (5)$$

[0068] 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、每个光电子数的观测概率。第2概率通过以下的式(6)表示。如式(6)所示,第2概率遵循正态分布(高斯分布)。此外,在式(6)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概率是对象像素的暂定值(例如,像素值)中,将对象像素的光子数观测为 $k$ 的概率(观测概率)。第2概率对每个光电子数进行求取。

[0069] 【数学式6】

$$[0070] \quad \text{第2概率} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}R} \exp\left(-\frac{(x-k)^2}{2R^2}\right) \quad \dots (6)$$

[0071] 概率导出部22c基于第1概率和第2概率的积,按每个光电子数(光子数)导出对象像素的像素值的概率分布。即,概率导出部22c导出对象像素的光子数为假定光子数时的对象像素中的像素值的概率分布。换言之,概率导出部22c导出对象像素的光子数为整数 $n$  ( $n$ 为零以上)时的对象像素中的像素值的概率分布、以及对象像素的光子数为整数 $m$  ( $m$ 为零以上且不是 $n$ )时的对象像素中的像素值的概率分布。

[0072] 在将第1概率设为 $Q_k$ 的情况下,由概率导出部22c导出的对象像素的像素值的概率分布 $P_k(x)$ 以式(7)表示。

[0073] 【数学式7】

$$[0074] \quad P_k(x) = Q_k \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}R} \exp\left(-\frac{(x-k)^2}{2R^2}\right) \quad \dots (7)$$

[0075] 图3是示出第1概率 $Q_k$ 遵循平均光子数 $\lambda$ 为1.5的泊松分布,并且读出噪声 $R$ 为0.27 [e-rms]时的概率分布 $P_k(x)$ 的一个例子的图。在图3中,按对应的光子数(光电子数)描绘对象像素的像素值的概率分布。即,分别示出对象像素的光子数为0、1、2、3、4、5个光子时的对象像素中的像素值的概率分布。此外,在图3中,光子数为0、1、2、3、4、5个光子时的第1概率也以粗线L0、L1、L2、L3、L4、L5分别表示。

[0076] 阈值确定部22d基于由概率导出部22c导出的概率分布,确定用于将对象像素的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据。换言之,阈值确定部22d确定区别与像素值对应的光子数是成为整数 $n$ 还是成为整数 $m$ 的阈值数据。在整数 $m$ 为 $n+1$ 的情况下,阈值数据成为用于区别光子数相差“1”时的像素值的阈值。

[0077] 在对象像素的像素值的概率分布 $P_k(x)$ 以上述的式(7)表示的情况下,阈值数据通过求取假定光子数 $k_n$ 的概率分布 $P_{k_n}(x)$ 与假定光子数 $k_m$ 的概率分布 $P_{k_m}(x)$ 的交点而导出。即,通过对于 $x$ 求解等式 $P_{k_n}(x) = P_{k_m}(x)$ ,能够确定区别与像素值对应的光子数是成为整数 $n$ 还是成为整数 $m$ 的阈值数据。一个例子的阈值确定部22d通过将该情况下的解 $x$ 设为 $T(k_n, k_m)$ ,对全部的假定光子数的组合求取 $T(k_n, k_m)$ ,获取区别与像素值对应的光子数是成为整数 $n$ 还是成为整数 $m$ 的阈值数据。

[0078] 图4是示出与图3所示的概率分布对应的阈值数据的方法的一个例子的图。在图4中,由阈值数据确定的阈值 $T$ 的位置以虚线表示,表示与阈值范围对应的光子数。阈值确定部22d例如也可以将阈值范围、以及与阈值范围对应的光子数的组合作为阈值数据来获取。在图4中,示出上述的整数 $n$ 和整数 $m$ 的关系为 $m=n+1$ 且 $n<m$ 的例子。在此,将区别光子数 $n$ 和光子数 $n+1$ 的阈值数据 $T(k_n, k_m)$ 表示为 $T(n)$ 。在该情况下, $T(n-1) < x \leq T(n)$ 的各范围是与光子数成为 $n$ 的像素值对应的阈值范围。在该范围的像素值 $x$ 中,光子数 $n$ 的概率 $P_k(x)$ 的值成为最大。但是, $n=0$ 时,设为 $T(-1) = 0$ ,光子数成为0的阈值范围设为 $0 \leq x \leq T(0)$ 。此外,各阈值范围也可以为 $T(n-1) \leq x < T(n)$ 。

[0079] 另外,图5是示出与图3所示的概率分布对应的阈值数据的方法的另一个例子的图。例如,在图5中,示出上述的整数 $n$ 和整数 $m$ 的关系为 $m=n-1$ 且 $m<n$ 的例子。在此,将区别光子数 $n-1$ 和光子数 $n$ 的阈值数据 $T(k_m, k_n)$ 表示为 $T(n)$ 。在该情况下, $T(n) \leq x < T(n+1)$ 的各范围是与光子数成为 $n$ 的像素值对应的阈值范围。在该范围的像素值 $x$ 中,光子数 $n$ 的概率 $P_k(x)$ 的值成为最大。但是, $n=0$ 时,设为 $T(0) = 0$ ,光子数成为0的阈值范围设为 $0 \leq x < T(1)$ 。此外,各阈值范围也可以为 $T(n) < x \leq T(n+1)$ 。

[0080] 如上述那样,阈值 $T(n)$ 对应于概率分布 $P_{k_n}(x)$ 与概率分布 $P_{k_m}(x)$ 的交点。在图4中,阈值 $T(1)$ 是区分光子数的确定值成为1个光子的像素值和光子数的确定值成为2个光子的像素值的阈值。阈值 $T(1)$ 对应于1个光子的概率分布与2个光子的概率分布的交点。阈值 $T(2)$ 是区分光子数的确定值成为2个光子的像素值和光子数的确定值成为3个光子的像素值的阈值。阈值 $T(2)$ 对应于2个光子的概率分布与3个光子的概率分布的交点。在从该阈值 $T(1)$ 到阈值 $T(2)$ 的范围内,2个光子时的概率分布 $P_k(x)$ 为最大值,因此与像素值对应的光子数成为2个光子。另外,在图5中,阈值 $T(1)$ 是区分光子数的确定值成为0个光子的像素值和光子数的确定值成为1个光子的像素值的阈值。阈值 $T(1)$ 对应于0个光子的概率分布与1个

光子的概率分布的交点。阈值 $T(2)$ 是区分光子数的确定值成为1个光子的像素值和光子数的确定值成为2个光子的像素值的阈值。阈值 $T(2)$ 对应于1个光子的概率分布与2个光子的概率分布的交点。在从该阈值 $T(1)$ 到阈值 $T(2)$ 的范围内,1个光子时的概率分布 $P_k(x)$ 为最大值,因此与像素值对应的光子数成为1个光子。

[0081] 确定值导出部22b基于阈值数据,导出与暂定值对应的光子数。即,确定值导出部22b特定与输出的暂定值对应的阈值范围,并将与特定的阈值范围对应的光子数作为与暂定值对应的光子数输出。如以上那样,确定值导出部22b将对象像素中最可能的光子数作为对象像素的确定值导出。

[0082] 图6是示出光子数识别装置的动作(阈值确定方法)的一个例子的流程图。在本实施方式中,当在光子数识别装置1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)。

[0083] 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。接着,概率导出部22c导出概率分布 $P_k(x)$ (步骤S15)。即,概率导出部22c基于暂定值导出各像素的平均光子数,并基于导出的平均光子数和参照存储部21的表而得到的各像素的读出噪声,导出概率分布 $P_k(x)$ 。接着,阈值确定部22d基于导出的概率分布 $P_k(x)$ ,导出用于将各像素中的像素值区分为对应的光子数的阈值数据(步骤S16)。导出的各像素的阈值数据也可以作为阈值数据图,例如容纳于存储部21。

[0084] 图7是示出光子数识别装置的动作(光子数识别方法)的一个例子的流程图。在本实施方式中,当在光子数识别装置1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S21)。再者,转换后的电荷由放大器13转换为电压(步骤S22)。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S23)。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S24)。接着,确定值导出部22b基于容纳于存储部21的阈值数据,将与像素值对应的光子数作为各像素中的光子数的确定值而导出(步骤S25)。如以上那样,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S26)。

[0085] 图8是示出光子数识别装置的动作(实时处理)的一个例子的流程图。在一个例子的实时处理中,阈值确定的处理和光子数识别的处理可以作为一系列的动作执行。在本实施方式中,当在光子数识别装置1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S31)。再者,转换后的电荷由放大器13转换为电压(步骤S32)。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S33)。

[0086] 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,从数字值导出对象像素和周边像素的暂定值(步骤S34)。导出的暂定值例如可以容纳于存储部21。接着,概率导出部22c导出相互不同的光子数的概率分布(步骤S35)。在一个例子中,概率导出部22c基于暂定值导出对象像素的平均光子数,基于导出的平均光子数和参

照存储部21的表而得到的各像素的读出噪声,导出假定光子数 $k_0$ (例如,0个光子)的概率分布 $P_{k_0}(x)$ 。进而,概率导出部22c导出作为假定光子数 $k_0$ 的下一个光子数的假定光子数 $k_1$ (例如,1个光子)的概率分布 $P_{k_1}(x)$ 。接着,阈值确定部22d基于概率分布 $P_{k_0}(x)$ 和概率分布 $P_{k_1}(x)$ ,导出用于区别光子数 $k_0$ 和光子数 $k_1$ 的阈值数据 $T(k_0)$ (步骤S36)。

[0087] 接着,光子数识别装置1的确定值导出部22b比较在步骤S36中导出的阈值数据和对象像素的像素值(步骤S37),基于阈值数据判定确定值(步骤S38)。如上述的例子那样,在获取到用于区别0个光子和1个光子的阈值数据的情况下,确定值导出部22b在 $x \leq T(k_0)$ 的情况下,将 $k_0$ 设为该对象像素的光子数的确定值来获取。另一方面,在 $T(k_0) < x$ 的情况下,不将 $k_0$ 设为该对象像素的光子数的确定值。在光子数未确定的情况下,确定值导出部22b比较用于区别下一个光子数的阈值数据和像素值。在上述的例子中,阈值确定部22d导出下一个光子数 $k_2$ 的概率分布 $P_{k_2}(x)$ ,基于概率分布 $P_{k_1}(x)$ 和概率分布 $P_{k_2}(x)$ 导出用于区别光子数 $k_1$ 和光子数 $k_2$ 的阈值数据 $T(k_1)$ 。在该例子中,通过用于区别0个光子和1个光子的阈值数据未确定光子数,因此,下一个光子数 $k_2$ 成为2个光子。即,导出的阈值数据 $T(k_1)$ 是用于区别1个光子和2个光子的数据。

[0088] 确定值导出部22b比较阈值数据 $T(k_1)$ 和像素值 $x$ ,判定是否将 $k_1$ 设为确定值。由于已经判定 $T(k_0) < x$ ,因此确定值导出部22b实际上判定 $T(k_0) < x \leq T(k_1)$ 是否成立。在 $T(k_0) < x \leq T(k_1)$ 成立的情况下, $k_1$ 确定为该对象像素的光子数。在 $T(k_0) < x \leq T(k_1)$ 不成立的情况下,在该对象像素的光子数确定之前,假定光子数每次加1,并重复进行步骤S35至步骤S38的处理。再者,判定是否对全部的对象像素确定确定值(步骤S39)。在对全部的对象像素的处理未结束的情况下,对未处理的对象像素执行步骤S34以后的处理。当全部的对象像素的处理结束时,各像素的测量结果(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S40)。

[0089] 此外,在图8的例子中,在步骤S34中导出对象像素和周边像素的暂定值,但在步骤S34中,也可以导出全部的像素或期望的像素,即全部的对象像素的暂定值。在该情况下,当在步骤S39中判定为全部的对象像素的处理未结束时,也可以对未处理的对象像素执行步骤S35以后的处理。

[0090] 图9是示出容纳有使计算机执行阈值确定处理和光子数识别处理的程序的记录介质100的图。容纳于记录介质100的处理程序P1(阈值确定程序、光子数识别处理程序)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。确定值导出模块P22b包含概率导出模块P22c和阈值确定模块P22d。通过执行暂定值导出模块P22a、确定值导出模块P22b、概率导出模块P22c、阈值确定模块P22d、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)、概率导出部22c、阈值确定部22d、数据处理部23和控制部24的功能(处理)相同。

[0091] 处理程序P1记录于计算机可读的记录介质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。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。

[0092] 如以上说明的那样,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、以及将由光电二极管12转换的电荷放大并转换为电压

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中的各像素的光子数的暂定值(例如像素值);以及确定值导出部22b,其基于用于将作为多个像素中的一个的对象像素的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据,导出与暂定值对应的光子数。阈值数据是基于根据光的光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的、将暂定值区别为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)和整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的阈值数据。

[0093] 另外,光子数识别中的一个例子的阈值确定方法是导出用于将作为多个像素11中的一个的对象像素的暂定值区分为对应的光子数的阈值数据的方法。该方法具备:基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取对象像素中的光子数成为整数 $n$ ( $n$ 为0以上)的暂定值的第1概率分布、以及对象像素中的光子数成为整数 $m$ ( $m$ 为0以上且不是 $n$ )的暂定值的第2概率分布的工序;以及基于第1概率分布和第2概率分布,求取将暂定值区别为整数 $n$ 和整数 $m$ 的阈值数据的工序。

[0094] 在上述的阈值确定方法中,基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率,求取第1概率分布和第2概率分布。基于该第1概率分布和第2概率分布,导出阈值数据。再者,在光子数识别系统中,基于这样导出的阈值数据,将暂定值区分为对应的光子数。

[0095] 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。在该情况下,当要从暂定值导出光子数的确定值时,认为与包含于暂定值的误差对应,确定值的精度降低。但是,考虑对象像素中的读出噪声的大小而导出一个例子的光子数识别系统中利用的阈值数据。因此,能够减小导出确定值时的读出噪声带来的影响,因此,能够提高光子数识别的精度。另外,在这样的光子数识别装置中,通过导出的阈值数据和暂定值的比较,能够确定确定值,因此,能够缩短处理时间。

[0096] 在一个例子中,整数 $m$ 满足 $m=n+1$ 。在该结构中,导出用于区分光子数相差“1”的暂定值彼此的阈值。

[0097] 在一个例子中,第1概率分布和第2概率分布可以基于根据光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率和根据伴随对象像素的读出噪声的光电子数的概率分布的每个光电子数的观测概率的积而导出。在该结构中,能够适当记述第1概率分布和第2概率分布。

[0098] 以上,参照附图详细叙述了实施方式,但具体的结构不限于该实施方式。

[0099] 例如,在上述各种实施方式中,示出基于伴随以泊松分布为代表的光散粒噪声的光电子数的概率分布导出第1概率的例子,但第1概率只要基于伴随光的光子数分布的光电子数的概率分布而导出即可。

[0100] 例如,在基于光源的种类,在能够推定伴随光的光子数分布的光电子数的概率分布的情况下,可以基于与光源对应的概率分布导出第1概率。作为一个例子,在光源为LED等非相干光源、或热光子源的情况下,也可以基于光子数的波动比泊松分布大的光子数分布,即超泊松分布(Super-poissonian distribution),导出第1概率。另外,在光源为量子光源的情况下,也可以基于光子数的波动比泊松分布小的光子数分布,即亚泊松分布(Sub-poissonian distribution),导出第1概率。另外,在该情况下,可以基于单一光子源等的光

子数挤压状态(例如福克(Fock)状态)表示的光子数分布,导出第1概率,也可以基于由自发参量下变换(Spontaneous parametric down conversion,SPDC)等生成的量子纠缠光子状态(例如NOON状态)表示的光子数分布,导出第1概率。另外,在使用了量子光源的复杂的光子状态下,也可以基于通过模式的组合而生成的复杂的光子数分布(即,多模式挤压状态的光子数分布(Photon number distribution of multi-mode squeezed states)),导出第1概率。另外,在光源为热放射光源(Thermal light source)、疑似热放射光源(Pseudo-thermal light source)的情况下,也可以基于玻色-爱因斯坦分布(Bose-Einstein distribution),导出第1概率。另外,也可以基于具有尾巴向数值大的一方伸长的形状的对数正态(Log-normal)分布、作为概率相对于各光子数均匀的分布的均匀(Uniform)分布、作为组合了多个光子数分布的分布的混合分布(Mixture of multiple photon distribution)等,导出第1概率。

[0101] 这样,基于光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率也可以基于泊松分布、超泊松分布、亚泊松分布、多模式挤压状态的光子数分布、玻色-爱因斯坦分布、对数正态分布、均匀分布和混合分布中的任一个分布。在能够推定概率分布的情况下,能够获取理想的概率分布。

[0102] 另外,基于光子数的概率分布的每个光电子数的观测概率也可以基于将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。在该结构中,基于作为实测数据的数字值导出观测概率,因此,不会选择用于将光输入到光电转换元件的光源。例如,参照像素可以是构成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是 $0.8[e-rms]$ 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。

[0103] 在上述的情况下,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。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,在未将参照像素的地址信息保持于存储部21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。

[0104] 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可以在相对于多个参照像素输入来自光源的一样的光量的光的状态下获取。在相对于构成CMOS图像传感器10的全部的像素11输入来自光源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,在相对于CMOS图像传感器10中包含对象像素的一部分区域的像素11输入来自光源的一样的光量的光的情况下,也可以仅将包含于该一部分区域的参照像素利用于光子数的概率分布的导出。

[0105] 例如,确定值导出部22b可以获取与多个参照像素对应的多个暂定光子数的数据。再者,确定值导出部22b也可以通过对所获取的多个暂定光子数的数据进行统计上的处理,

导出光子数的概率分布。即,确定值导出部22b对每个暂定光子数合计所获取的暂定光子数的数据数,将合计结果分别除以全数据数,由此,能够导出表示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也可以基于该概率分布,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、对象像素的光子数观测为k的概率。即,确定值导出部22b从光子数的概率分布将光子数为k时的概率作为第1概率获取。

[0106] 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,即样品尺寸越大,可以得到精度越高的结果。因此,确定值导出部22b也可以以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。

[0107] 另外,利用加权平均计算平均光子数时的权重不限于上述的实施方式的例子。作为计算平均光子数时的权重,在利用减小根据加权平均的平均光子数与真的平均光子数的误差那样的权重的情况下,也可以利用如以下那样求取的权重。此外,真的平均光子数可以是周边像素的真的光子数的算术平均。

[0108] 在求取减小根据加权平均的平均光子数 $\lambda^*$ 与真的平均光子数 $\lambda$ 的误差的权重w的情况下,只要计算将 $\lambda^*$ 和 $\lambda$ 的平方误差的期望值 $E[(\lambda^*-\lambda)^2]$ 设为最小那样的w即可。首先,求取 $\lambda^*$ 的期望值 $E[\lambda^*]$ 。像素值x遵循式(8)所示的概率分布p(x)。

[0109] 【数学式8】

$$[0110] \quad p(x) = \sum_k \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi R^2}} \exp\left\{-\frac{(x-k)^2}{2R^2}\right\} \quad \dots (8)$$

[0111] 当基于该概率分布计算期望值时,成为 $E[\lambda^*] = \lambda$ ,不依赖于权重w, $\lambda^*$ 的期望值与 $\lambda$ 一致。接着,当求取 $E[(\lambda^*-\lambda)^2]$ 时,导出以下的式(9)。

[0112] 【数学式9】

$$[0113] \quad E[(\lambda^* - \lambda)^2] = \frac{\sum_i (\lambda + R_i^2) w_i^2}{(\sum_i w_i)^2} \quad \dots (9)$$

[0114] 求取将式(9)最小化的权重 $w_i$ 。当对 $w_j$ 进行微分而成为零时,成为式(10)。

[0115] 【数学式10】

$$[0116] \quad (\sum_i w_i)(\lambda + R_j^2)w_j - \sum_i (\lambda + R_i^2)w_i^2 = 0 \quad \dots (10)$$

[0117] 进而,如果对j=0写下去的话,则成为式(11)。

[0118] 【数学式11】

$$[0119] \quad (\sum_i w_i)(\lambda + R_j^2)w_0 - \sum_i (\lambda + R_i^2)w_i^2 = 0 \quad \dots (11)$$

[0120] 在j≠0的情况下两边取差分,成为式(12),并导出式(13)。

[0121] 【数学式12】

$$[0122] \quad (\sum_i w_i)\{(\lambda + R_j^2)w_j - (\lambda + R_0^2)w_0\} = 0 \quad \dots (12)$$

[0123] 【数学式13】

$$[0124] \quad w_j = \frac{\lambda + R_0^2}{\lambda + R_j^2} w_0 \quad \dots (13)$$

[0125] 在此,例如通过如式(14)那样设置 $w_0$ ,对于全部的 $i$ ,式(15)成立。在该情况下,根据加权平均的平均光子数 $\lambda^*$ 由式(16)表示。

[0126] 【数学式14】

$$[0127] \quad w_0 = \frac{1}{\lambda + R_0^2} \quad \dots (14)$$

[0128] 【数学式15】

$$[0129] \quad w_i = \frac{1}{\lambda + R_i^2} \quad \dots (15)$$

[0130] 【数学式16】

$$[0131] \quad \lambda^* = \frac{\sum_i \frac{x_i}{\lambda + R_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\lambda + R_i^2}} \quad \dots (16)$$

[0132] 在式(15)中包含真的平均光子数 $\lambda$ ,因此,不能原样计算式(15)。因此,在一个例子中,也可以将作为周边像素的无权重平均而计算的平均光子数假定为 $\lambda$ ,将基于式(15)导出的 $w_i$ 设为权重。

[0133] 基于式(15)导出的 $w_i$ 也可以自一致性地求解。即,也可以重复进行以下工序:通过将导出的权重 $w_i$ 代入式(16),得到平均光子数,使用该平均光子数,从式(15)导出权重 $w_i$ 。另外,也可以期望根据加权平均的平均光子数 $\lambda^*$ 和真的平均光子数 $\lambda$ 近似,并将式(17)的解设为平均光子数。这能够使用不动点定理,在右边的函数为缩小映射时,通过式(18)求取解。

[0134] 【数学式17】

$$[0135] \quad \lambda^* = \frac{\sum_i \frac{x_i}{\lambda^* + R_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\lambda^* + R_i^2}} \quad \dots (17)$$

[0136] 【数学式18】

$$[0137] \quad \lambda_{k+1}^* = \frac{\sum_i \frac{x_i}{\lambda_k^* + R_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\lambda_k^* + R_i^2}} \quad \dots (18)$$

[0138] 另外,对象像素的平均光子数也可以基于多帧的暂定值的数据导出。即,确定值导出部22b也可以以多帧的量获取多个像素中的暂定值的数据,并基于所获取的数据导出平均光子数。例如,确定值导出部22b也可以对所获取的每一帧分别导出对象像素的平均光子数,将导出的平均光子数的平均值设为 $\lambda$ ,求取第1概率。另外,确定值导出部22b也可以将所获取的多帧的量的暂定值的数据设为一个总体,导出对象像素的平均光子数,并将导出的平均光子数设为 $\lambda$ ,求取第1概率。另外,确定值导出部22b也可以在所获取的帧间,对每个像素计算暂定值的平均值,将该平均值设为各像素的暂定值而导出平均光子数。

[0139] 符号的说明

[0140] 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)。

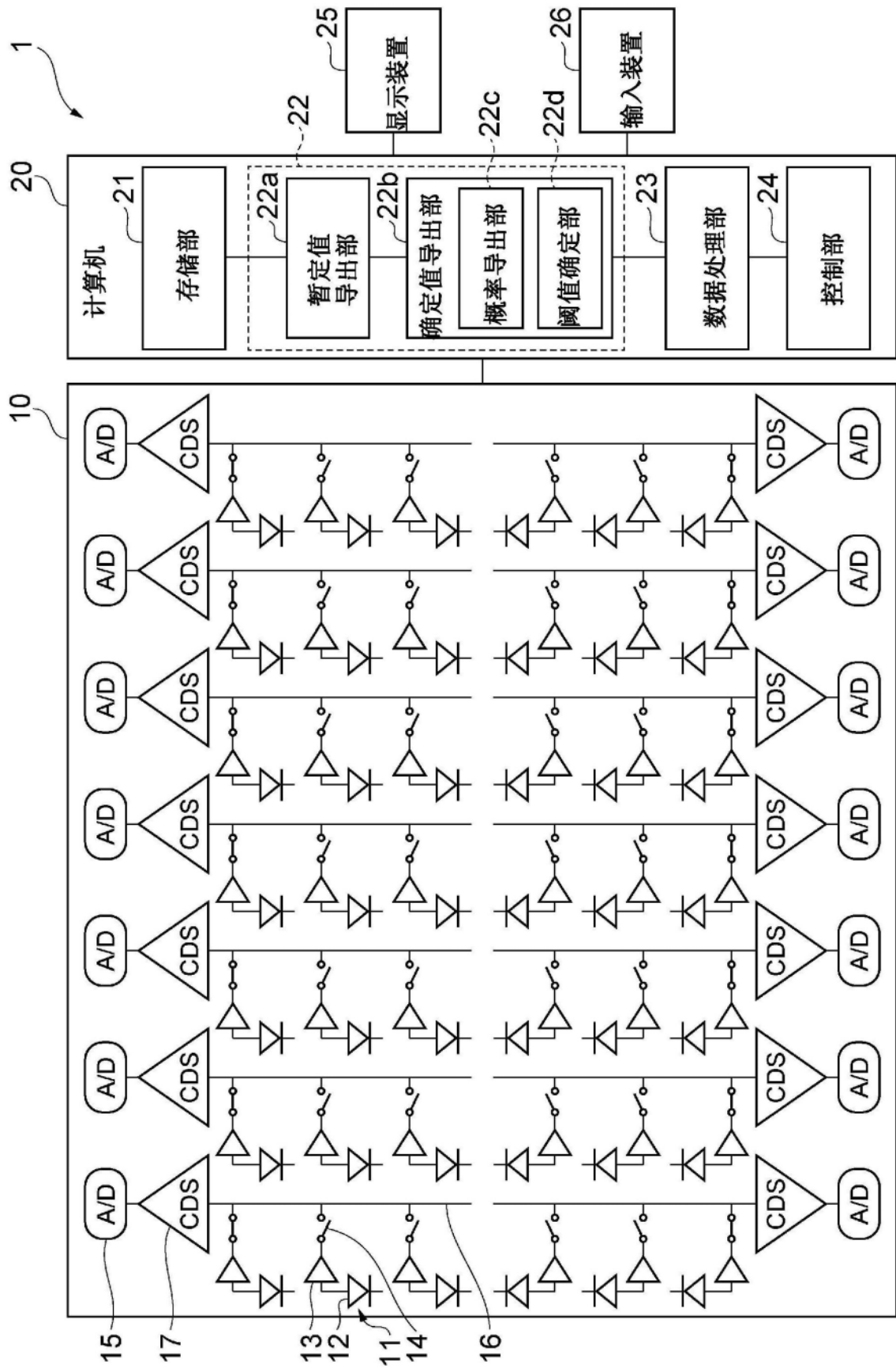


图1

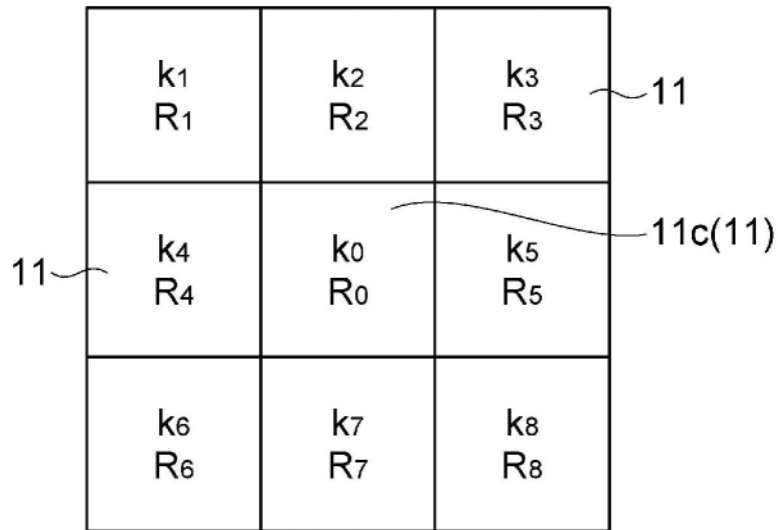


图2

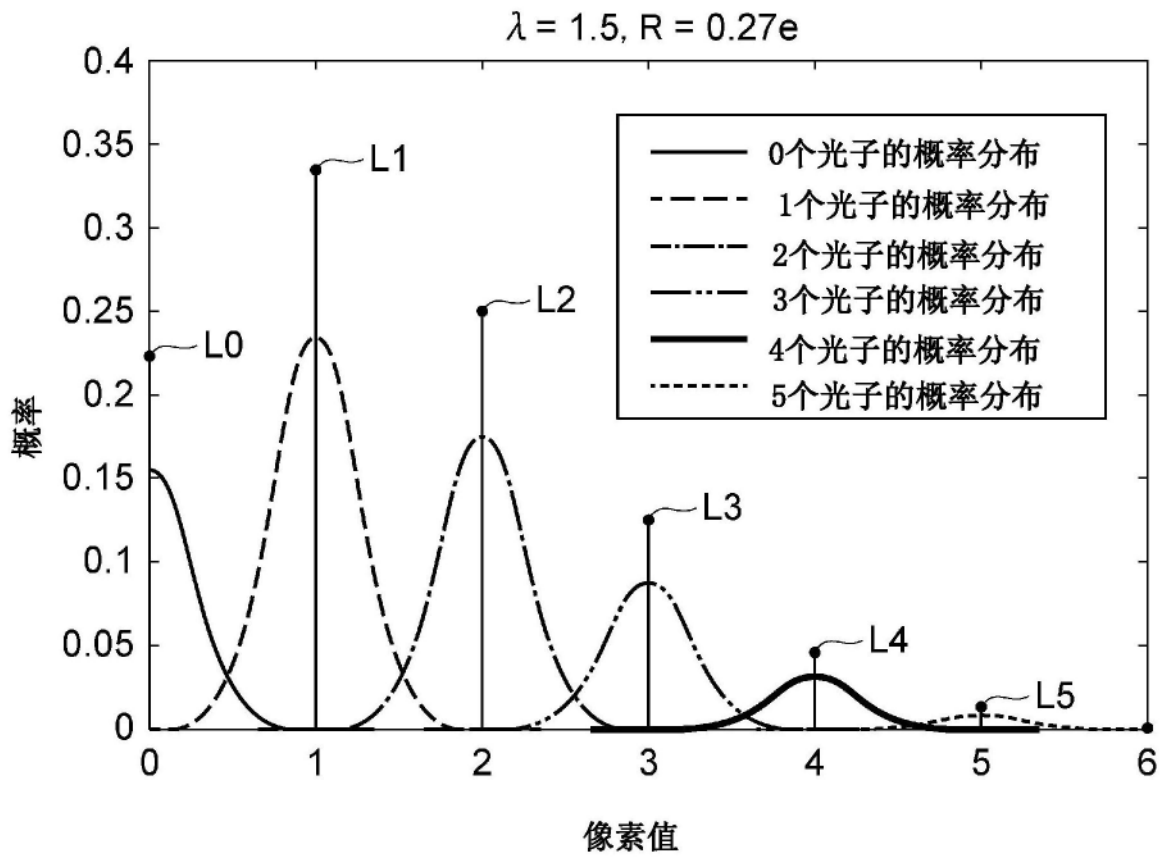


图3

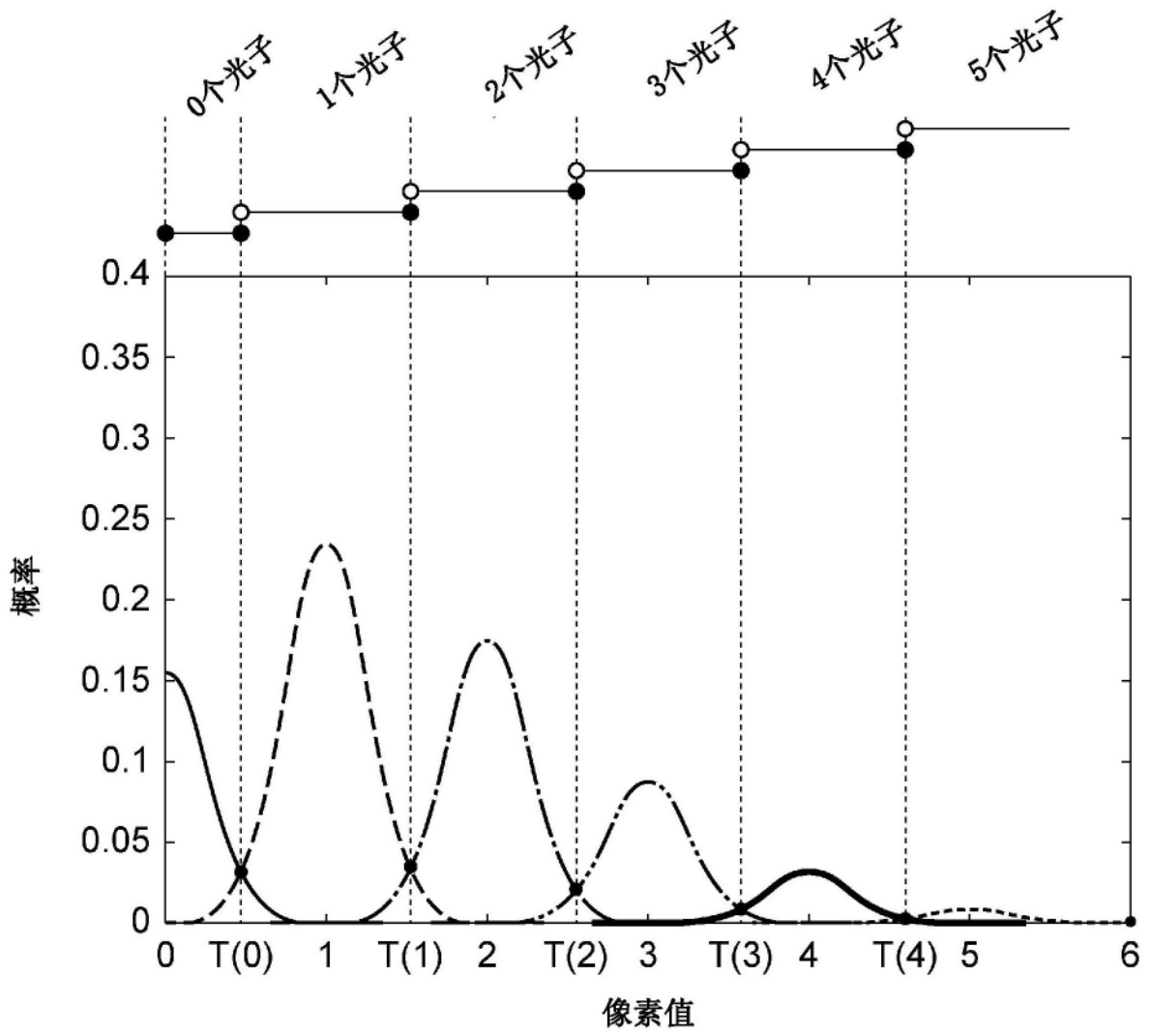


图4

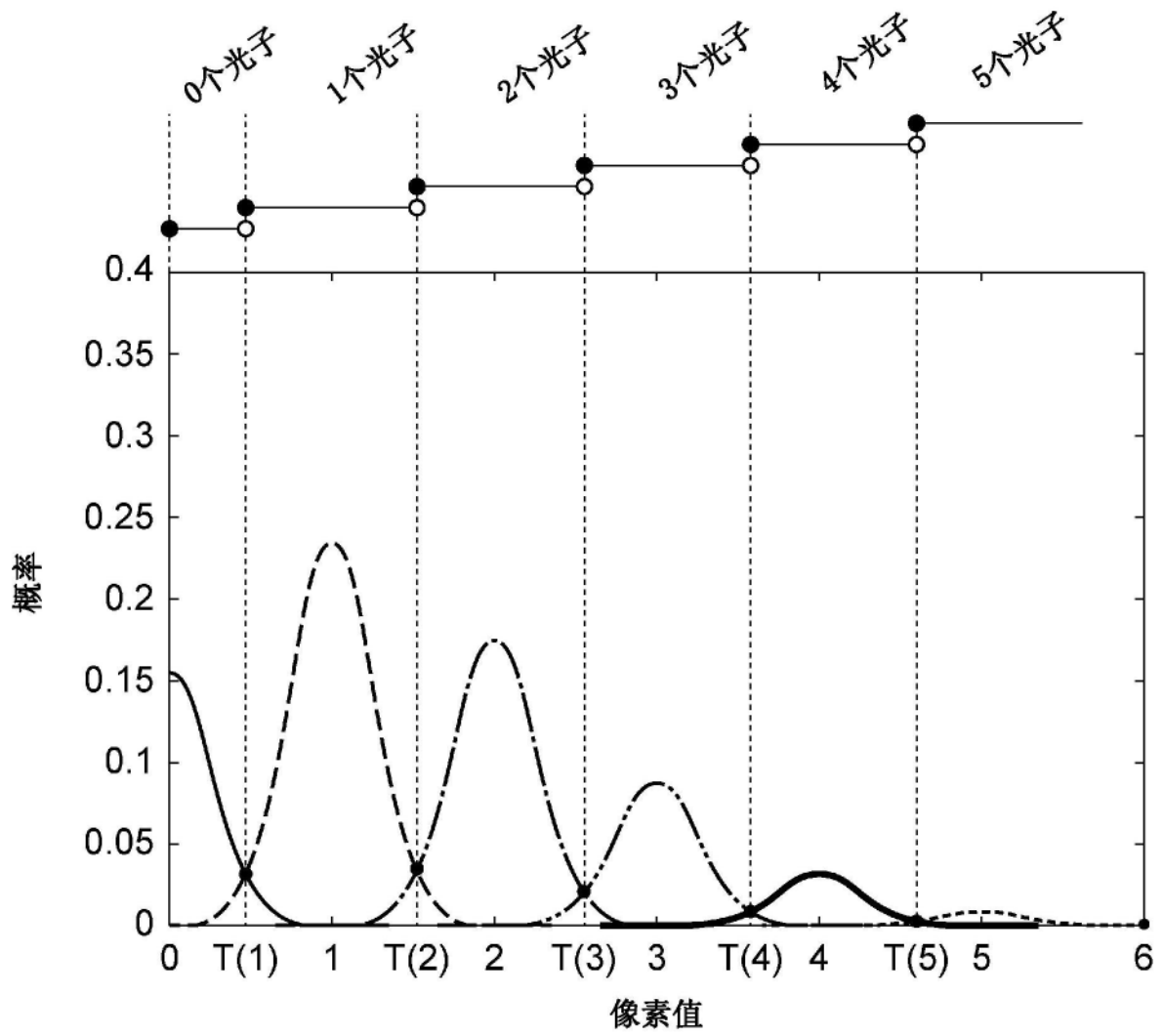


图5

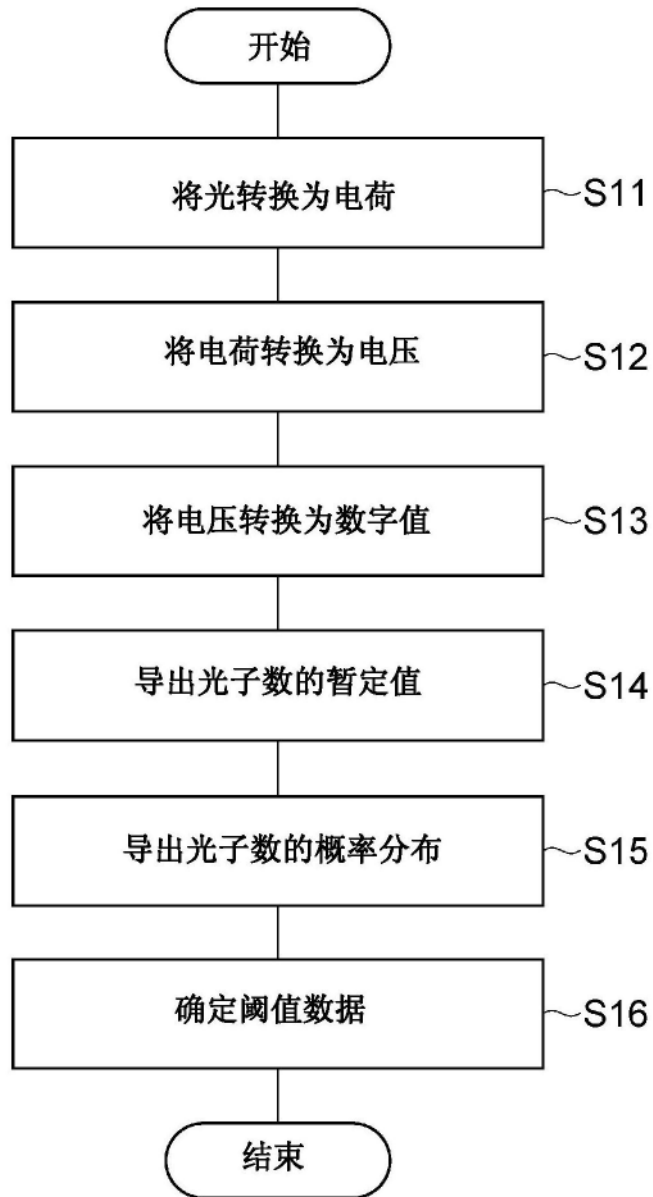


图6

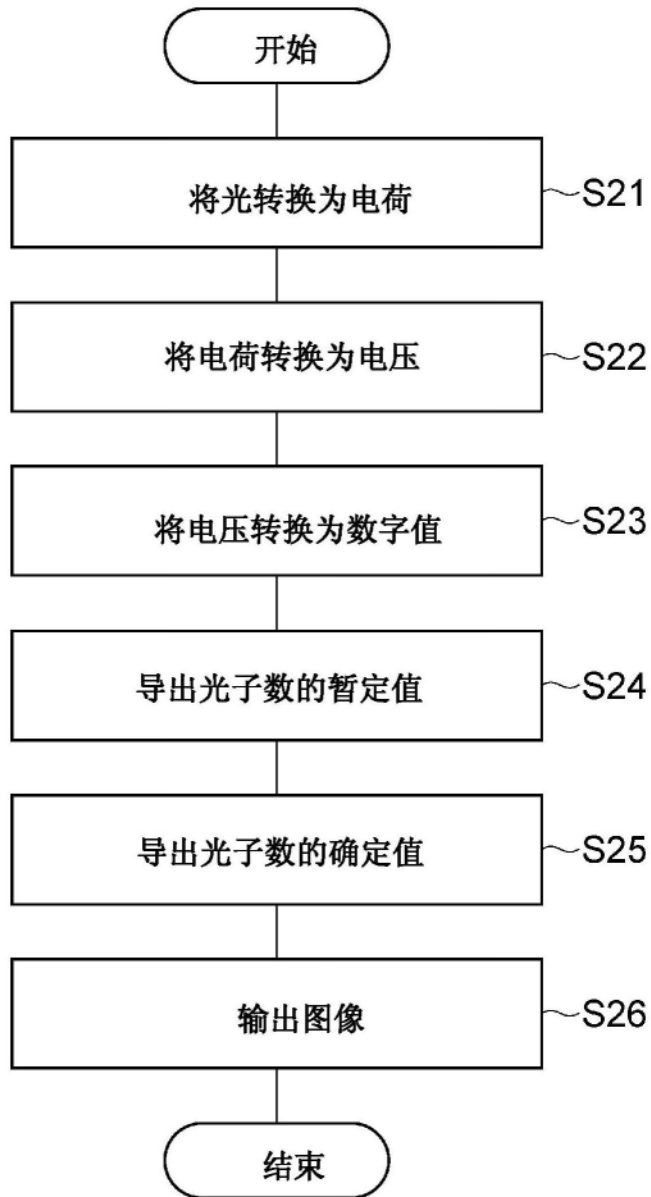


图7

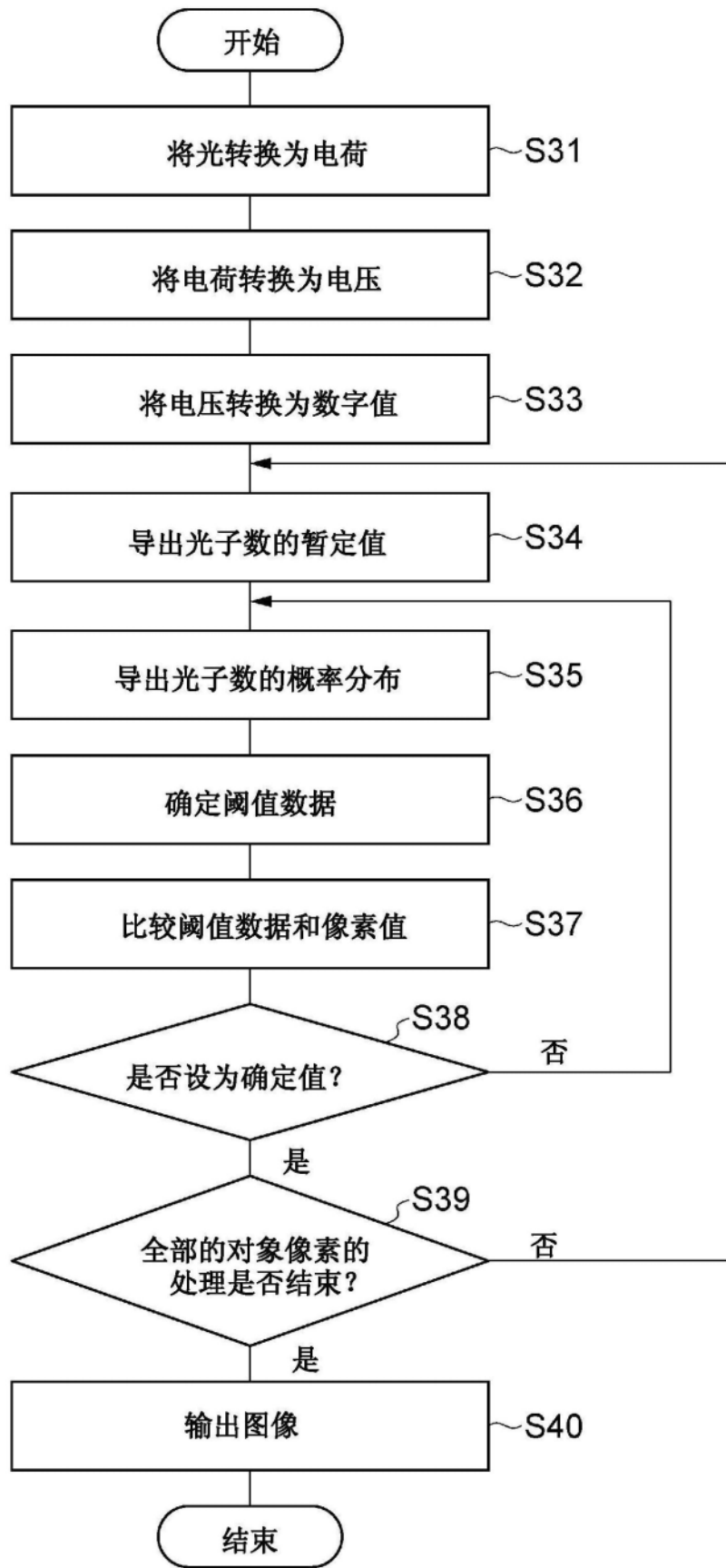


图8

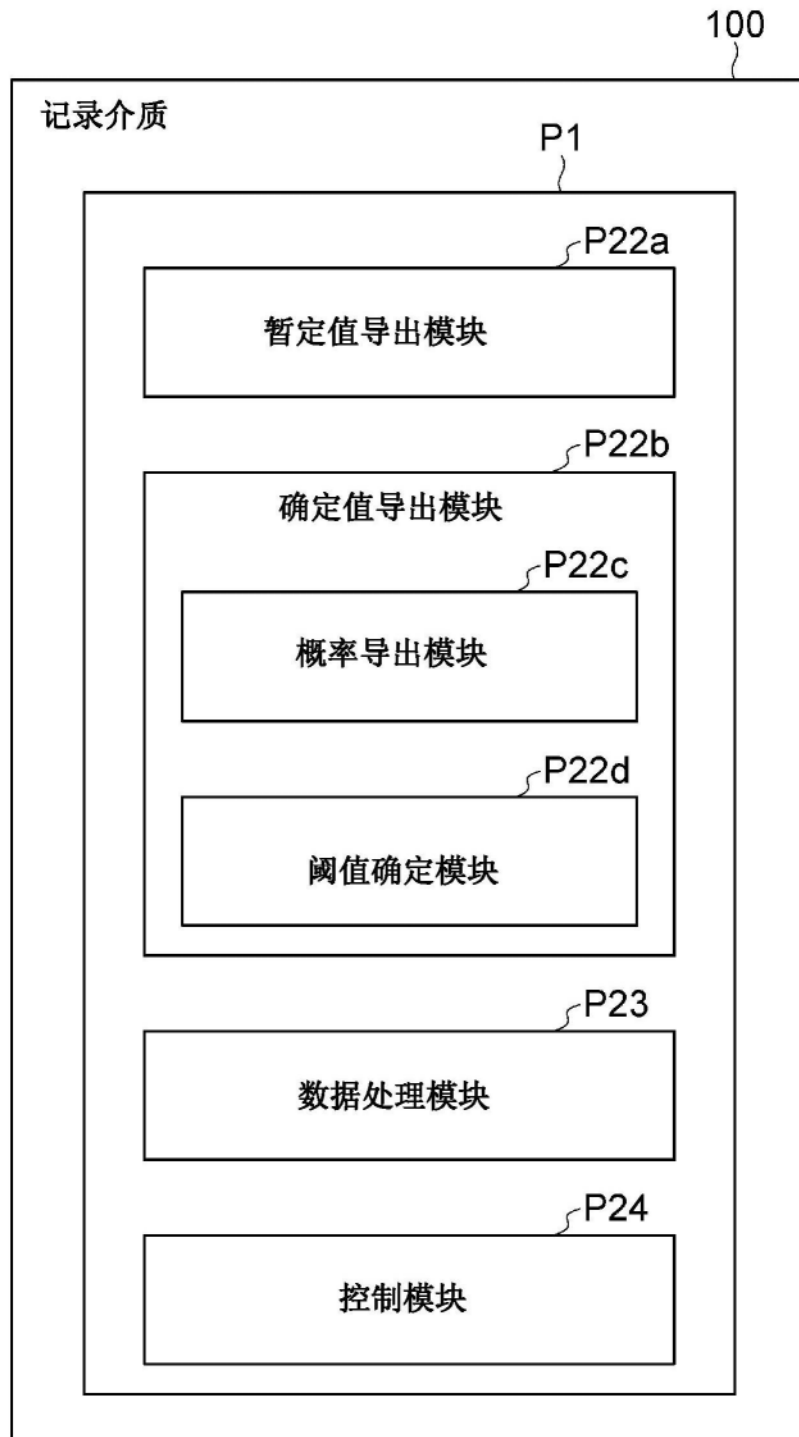


图9