



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116964425 A

(43) 申请公布日 2023. 10. 27

(21) 申请号 202180095463.9

(22) 申请日 2021.12.20

(30) 优先权数据

2021-061084 2021.03.31 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.09.08

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2021/047044 2021.12.20

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/209056 JA 2022.10.06

(71) 申请人 富士胶片株式会社

地址 日本东京都

(72) 发明人 早川洋平 西谷守

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

11127

专利代理师 黄纶伟

(51) Int.Cl.

G01M 11/02 (2006.01)

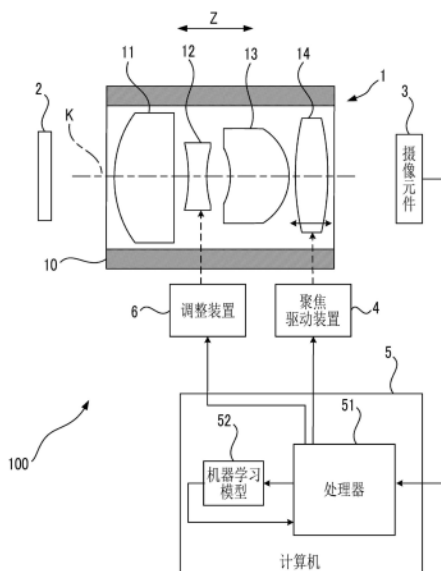
权利要求书3页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

波前像差导出方法、机器学习模型的生成方法、透镜光学系统的制造方法、波前像差导出装置及波前像差导出程序

(57) 摘要

本发明提供一种能够简单地导出波前像差的波前像差导出方法、装置及程序和在该波前像差导出方法中使用的机器学习模型的生成方法、利用该波前像差导出方法的透镜光学系统的制造方法。处理器(51)执行:第1步骤,获取透镜装置(1)的分辨率性能信息;及第2步骤,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型(52)中,并从机器学习模型(52)中得到透镜装置(1)的波前像差。



1. 一种波前像差导出方法,其导出透镜光学系统的波前像差,所述波前像差导出方法包括如下步骤:

第1步骤,获取所述透镜光学系统的分辨率性能信息;及

第2步骤,将所述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从所述机器学习模型得到所述透镜光学系统的波前像差。

2. 根据权利要求1所述的波前像差导出方法,其中,

所述机器学习模型将泽尼克多项式的系数作为所述波前像差的像差成分进行输出。

3. 根据权利要求1或2所述的波前像差导出方法,其中,

所述分辨率性能信息为基于分辨率性能值的信息,该分辨率性能值包含分辨率、点扩散强度或线扩散强度。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的波前像差导出方法,其中,

在所述第1步骤中,

根据如下摄像图像获取与相对位置相对应的分辨率性能值,并根据与所述相对位置相对应的所述分辨率性能值来获取所述分辨率性能信息,所述摄像图像是在将通过所述透镜光学系统拍摄被摄体的摄像元件与所述透镜光学系统的成像位置的所述相对位置改变为多个值的状态下,利用所述摄像元件拍摄被摄体而得到的。

5. 根据权利要求4所述的波前像差导出方法,其中,

在所述第1步骤中,导出包含与所述相对位置相对应的所述分辨率性能值的数据组的特征量,并获取所述特征量作为所述分辨率性能信息。

6. 根据权利要求5所述的波前像差导出方法,其中,

在所述第1步骤中,导出包含于所述数据组中的多个群组的所述特征量。

7. 根据权利要求5或6所述的波前像差导出方法,其中,

在所述第1步骤中,根据如下摄像图像,获取与所述摄像图像的不同像高相对应的所述分辨率性能值,并导出与所述摄像图像的不同像高相对应的所述特征量,该摄像图像是利用摄像元件拍摄被摄体而得到的,该摄像元件通过所述透镜光学系统拍摄被摄体。

8. 根据权利要求5至7中任一项所述的波前像差导出方法,其中,

所述特征量包含极大值、与所述极大值对应的所述相对位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度中的至少一个。

9. 根据权利要求8所述的波前像差导出方法,其中,

所述特征量至少包含所述极大值。

10. 根据权利要求5至7中任一项所述的波前像差导出方法,其中,

在所述第1步骤中,用至少一个高斯函数逼近所述数据组,并导出逼近的所述高斯函数的最大值、与所述最大值对应的所述相对位置、平均值、标准差、方差、偏度及峰度中的至少一个作为所述特征量。

11. 根据权利要求10所述的波前像差导出方法,其中,

所述特征量至少包含所述最大值。

12. 根据权利要求8至11中任一项所述的波前像差导出方法,其中,

使用所述平均值、所述标准差及矩量母函数来导出所述偏度和所述峰度。

13. 根据权利要求1至12中任一项所述的波前像差导出方法,其中,

所述机器学习模型为根据对所述透镜光学系统的光学要件提供多个图案的设想误差而得到的多个虚拟光学系统的分辨率性能信息的模拟结果和所述多个虚拟光学系统的波前像差的模拟结果而学习了分辨率性能信息与波前像差的对应关系的模型。

14. 一种机器学习模型的生成方法,其中,

获取对透镜光学系统的光学要件提供多个图案的设想误差而得到的多个虚拟光学系统的分辨率性能信息的第1模拟结果,

获取所述多个虚拟光学系统的波前像差的第2模拟结果,

根据所述第1模拟结果和所述第2模拟结果对分辨率性能信息与波前像差的对应关系进行机器学习来生成机器学习模型。

15. 根据权利要求14所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述波前像差为泽尼克多项式的系数。

16. 根据权利要求14或15所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述分辨率性能信息为基于分辨率性能值的信息,该分辨率性能值包含分辨率、点扩散强度或线扩散强度。

17. 根据权利要求14至16中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述分辨率性能信息为基于如下分辨率性能值的信息,该分辨率性能值是在所述虚拟光学系统的光轴方向上设定的摄像位置与所述虚拟光学系统的成像位置的相对位置成为多个值的状态下与所述相对位置相对应的分辨率性能值。

18. 根据权利要求17所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述分辨率性能信息为包含与所述相对位置相对应的所述分辨率性能值的数据组的特征量。

19. 根据权利要求18所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述分辨率性能信息为包含于所述数据组中的多个群组的所述特征量。

20. 根据权利要求18或19所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述第1模拟结果为包含如下分辨率性能值的数据组的特征量的模拟结果,该分辨率性能值是与在所述虚拟光学系统的光轴方向上设定的摄像位置处的不同的像高相对应的值。

21. 根据权利要求18至20中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述特征量包含极大值、与所述极大值对应的所述相对位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度中的至少一个。

22. 根据权利要求21所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述特征量至少包含所述极大值。

23. 根据权利要求18至20中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述特征量包含用至少一个高斯函数逼近所述数据组时的所述高斯函数的最大值、与所述最大值对应的所述相对位置、平均值、标准差、方差、偏度及峰度中的至少一个。

24. 根据权利要求23所述的机器学习模型的生成方法,其中,

所述特征量至少包含所述最大值。

25. 根据权利要求21至24中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,

使用所述平均值、所述标准差及矩量母函数来导出所述偏度和所述峰度。

26. 一种透镜光学系统的制造方法,所述透镜光学系统具有包含被调整光学要件的多
个光学要件,所述透镜光学系统的制造方法包括如下步骤:

获取所述透镜光学系统的分辨率性能信息;

将所述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从所述机器学习模型得到所述透镜
光学系统的波前像差;及

根据所述波前像差设定所述被调整光学要件的位置。

27. 一种波前像差导出装置,其导出透镜光学系统的波前像差,

所述波前像差导出装置具备处理器,所述处理器进行如下处理:

获取所述透镜光学系统的分辨率性能信息;以及

将所述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从所述机器学习模型得到所述透镜
光学系统的波前像差。

28. 一种波前像差导出程序,其导出透镜光学系统的波前像差,所述波前像差导出程序
使计算机执行如下步骤:

第1步骤,获取所述透镜光学系统的分辨率性能信息;及

第2步骤,将所述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从所述机器学习模型得到
所述透镜光学系统的波前像差。

波前像差导出方法、机器学习模型的生成方法、透镜光学系统的制造方法、波前像差导出装置及波前像差导出程序

技术领域

[0001] 本发明涉及一种波前像差导出方法、机器学习模型的生成方法、透镜光学系统的制造方法、波前像差导出装置及波前像差导出程序。

背景技术

[0002] 在专利文献1中记载有如下方法：求出CTF(Contrast Transfer Function:对比度传递函数)作为透镜光学系统的性能值,将该性能值输入到神经网络中,通过神经网络求出包含于透镜光学系统中的被调整透镜的移动调整量。

[0003] 在专利文献2中记载有如下方法：关于目标候选与器件设计之间的图案放置误差的泽尼克灵敏度的关系,分析目标设计,并将其最优化。

[0004] 在专利文献3中记载有决定光学成像系统的成像品质的方法,该光学成像系统是以包含光源的照明系统、试样容纳用试样保持架、成像光学系统及至少一个点分解检测装置作为主要结构组。

[0005] 在专利文献4中记载有一种图像分析装置,其具备：图像获取部,获取投影到被检眼的测定用图案的反射光的摄像图像；环像检测部,从由图像获取部获取的摄像图像内检测基于反射光的环像；及高阶像差检测部,根据由环像检测部检测出的环像来检测导致发生环像的畸变的被检眼的特定的高阶像差。

[0006] 在专利文献5中记载有用于客观地获得患者眼睛的折射值的方法,其包括如下步骤：利用传感器至少获得表示四阶泽尼克(Zernike)波前像差的患者的诊断测定数据；将仅二阶的多项式拟合到说明具有像差的波前的波前数据；及根据二阶多项式拟合计算显性折射值。

[0007] 在专利文献6中记载有根据由于干涉仪测量出的干涉条纹图像计算波前像差的方法。

[0008] 在专利文献7中记载有一种测量方法,其特征在于,包括如下步骤：测量透射了被检光学系统的透射光的透射波前；根据上述透射光的透射波前来获取上述被检光学系统的波前像差的各像差成分；获取使上述被检光学系统的光学元件的位置偏移时变化的上述波前像差的各像差成分的灵敏度；获取用于提高与上述被检光学系统的成像性能有关的评价值与上述波前像差的各像差成分的相关性的系数信息；及使用上述波前像差的各像差成分、上述各像差成分的灵敏度及上述系数信息来求出上述被检光学系统的光学元件的位置偏移量。

[0009] 以往技术文献

[0010] 专利文献

[0011] 专利文献1：日本特开2008-170981号公报

[0012] 专利文献2：日本特表2018-514807号公报

[0013] 专利文献3：日本特表2006-527353号公报

- [0014] 专利文献4:日本特开2020-081450号公报
[0015] 专利文献5:日本特表2004-528130号公报
[0016] 专利文献6:日本特开平6-235619号公报
[0017] 专利文献7:日本特开2019-191121号公报

发明内容

[0018] 发明要解决的技术课题

[0019] 波前像差的测量中通常需要很多设备或时间,因此其测量工作并不容易。上述任一以往技术均没有记载简单地导出波前像差的方法。

[0020] 本发明的目的在于提供一种能够简单地导出波前像差的波前像差导出方法、装置及程序和在该波前像差导出方法中使用的机器学习模型的生成方法、利用该波前像差导出方法的透镜光学系统的制造方法。

[0021] 用于解决技术课题的手段

[0022] 本发明的一方式的波前像差导出方法为导出透镜光学系统的波前像差的波前像差导出方法,其包括如下步骤:第1步骤,获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息;及第2步骤,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型得到上述透镜光学系统的波前像差。

[0023] 在本发明的一方式的机器学习模型的生成方法中,获取对透镜光学系统的光学要件赋予多个图案的设想误差而得到的多个虚拟光学系统的分辨率性能信息的第1模拟结果,获取上述多个虚拟光学系统的波前像差的第2模拟结果,并根据上述第1模拟结果和上述第2模拟结果机器学习分辨率性能信息与波前像差的对应关系来生成机器学习模型。

[0024] 本发明的一方式的透镜光学系统的制造方法为具有包含被调整光学要件的多个光学要件的透镜光学系统的制造方法,其包括如下步骤:获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息;将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型得到上述透镜光学系统的波前像差;及根据上述波前像差设定上述被调整光学要件的位置。

[0025] 本发明的一方式的波前像差导出装置为导出透镜光学系统的波前像差的波前像差导出装置,其具备处理器,所述处理器进行如下处理:获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型得到上述透镜光学系统的波前像差。

[0026] 本发明的一方式的波前像差导出程序为导出透镜光学系统的波前像差的波前像差导出程序,其使计算机执行如下步骤:第1步骤,获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息;及第2步骤,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型得到上述透镜光学系统的波前像差。

[0027] 发明效果

[0028] 根据本发明,能够简单地导出波前像差。

附图说明

[0029] 图1是表示利用作为本发明的波前像差导出装置的一实施方式的计算机5制造的透镜装置1的一例的示意图。

- [0030] 图2是表示组装于透镜装置1的制造系统中的位置调整系统100的概略结构的示意图。
- [0031] 图3是从透镜装置1侧沿光轴方向Z观察图2所示的分辨率图2的示意图。
- [0032] 图4是表示由图2所示的处理器51获取的信息的例子的示意图。
- [0033] 图5是表示图4所示的MTF数据组G_{px1}的一例的示意图。
- [0034] 图6是表示在机器学习模型52的生成中使用的教师数据的一例的示意图。

具体实施方式

- [0035] 以下,参考附图对本发明的实施方式进行说明。
- [0036] 图1是表示利用作为本发明的波前像差导出装置的一实施方式的计算机5制造的透镜装置1的一例的示意图。透镜装置1用于数码相机等摄像装置或投影仪等投影装置等,其构成透镜光学系统。以下,假设透镜装置1用于摄像装置来进行说明。
- [0037] 透镜装置1具备设置于透镜镜筒10内的多个光学要件(在图1的例子中为第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14这4个光学要件)。第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14沿着透镜装置1的光轴K从被摄体侧以该顺序配置。将光轴K延伸的方向称为光轴方向Z。第二透镜12构成被调整光学要件。
- [0038] 第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14中例如第四透镜14为聚焦透镜。通过第四透镜14沿光轴方向Z移动,能够改变基于透镜装置1的被摄体的成像位置。
- [0039] 透镜装置1例如以如下方式制造。在透镜镜筒10内根据设计值配置第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14并将第一透镜11、第三透镜13及第四透镜14固定于透镜镜筒10中。第二透镜12以能够进行位置的调整(包括光轴的倾角及光轴方向的位置的调整)的方式临时固定于透镜镜筒10中。第一透镜11、第三透镜13及第四透镜14固定于透镜镜筒10中,以下,将第二透镜12临时固定于透镜镜筒10中的状态的透镜装置1也称为调整前的透镜装置1。
- [0040] 若完成调整前的透镜装置1,则通过调整前的透镜装置1由后述的摄像元件3拍摄被摄体(后述的分辨率图2)。具体而言,一边使第四透镜14沿光轴方向Z在规定的范围内移动,一边在各移动位置处利用摄像元件3拍摄分辨率图2。由此,在将由调整前的透镜装置1成像的分辨率图2的成像位置和摄像元件3的受光面的距离(换言之,散焦量)改变为多个值的状态下,得到多个分辨率图2的摄像图像。根据该多个摄像图像和后述的机器学习模型52,导出调整前的透镜装置1的波前像差。然后,以所导出的波前像差成为所期望的状态的方式设定临时固定的第二透镜12的位置,并以成为所设定的位置的方式进行第二透镜12的调整。在该调整结束之后,第二透镜12被正式固定于透镜镜筒10中,从而完成透镜装置1。
- [0041] 图2是表示组装于透镜装置1的制造系统中的位置调整系统100的概略结构的示意图。位置调整系统100具备分辨率图2、调整前的透镜装置1、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor:互补金属氧化物半导体)图像传感器或CCD(Charge Coupled Device:电荷耦合器件)图像传感器等摄像元件3、驱动包含于透镜装置1中的聚焦透镜(第四透镜14)的聚焦驱动装置4、构成波前像差导出装置的计算机5及进行包含于调整前的透镜装置1中的第二透镜12的位置的调整的调整装置6。
- [0042] 图3是从透镜装置1侧沿光轴方向Z观察图2所示的分辨率图2的图。分辨率图2为与

光轴方向Z垂直的矩形平面,方向X与摄像元件3的受光面的长边方向一致,与方向X垂直的方向Y与摄像元件3的受光面的短边方向一致。方向X及方向Y与光轴方向Z垂直。

[0043] 在分辨率图2中,在与调整前的透镜装置1的光轴K相交的中心部分形成有第一图案21。如图3中的放大图所示,第一图案21包含在方向X上排列有沿方向Y延伸的多个线的图案PY1和在方向Y上排列有沿方向X延伸的多个线的图案PX1。

[0044] 在分辨率图2中,在以与调整前的透镜装置1的光轴K相交的点为中心的虚拟圆24的圆周上的规定的位置形成有第二图案22。在虚拟圆24的圆周上可以形成有多个第二图案22。如图3中的放大图所示,第二图案22包含在方向X上排列有沿方向Y延伸的多个线的图案PY2和在方向Y上排列有沿方向X延伸的多个线的图案PX2。

[0045] 在本说明书中,在由摄像元件3拍摄分辨率图2而得到的摄像图像中,将与光轴K相交的中心位置设为基准的像高,将以该中心位置为中心的圆的圆周上的位置定义为与该圆的半径相对应的值的像高。因此,位于图3所示的分辨率图2的摄像图像中的虚拟圆24的圆周上的第二图案22和位于虚拟圆24的中心的第一图案21可以说是不同的像高的图案。

[0046] 调整前的透镜装置1配置于分辨率图2与摄像元件3之间。摄像元件3和聚焦驱动装置4例如内置于能够安装透镜装置1的检查用数码相机主体中,该数码相机主体和计算机5连接。

[0047] 计算机5包含处理器51、机器学习模型52及省略图示的RAM(Random Access Memory:随机存取存储器)及ROM(Read Only Memory:只读存储器)等存储器。机器学习模型52例如存储于上述的ROM中。机器学习模型52也可以存储于设置在计算机5的外部的设备中,在该情况下,处理器51构成为能够访问该外部设备。

[0048] 处理器51为执行程序来进行各种处理的通用的处理器即CPU(Central Processing Unit:中央处理器)、FPGA(Field Programmable Gate Array:现场可编程门阵列)等在制造后能够变更电路结构的处理器即可编程逻辑器件(Programmable Logic Device:PLD)或ASIC(Application Specific Integrated Circuit:专用集成电路)等具有为了执行特定的处理而专门设计的电路结构的处理器即专用电路等。更具体而言,处理器51的结构为将半导体元件等电路元件组合而成的电路。

[0049] 处理器51能够通过执行存储于ROM中的波前像差导出程序来导出调整前的透镜装置1的波前像差。波前像差的导出过程如下。

[0050] 首先,处理器51控制数码相机主体,使第四透镜14向光轴方向Z的多个位置移动,在第四透镜14位于各位置的状态(换言之,基于调整前的透镜装置1的分辨率图2的成像位置与摄像元件3的相对位置分别成为多个值的状态)下,通过调整前的透镜装置1使摄像元件3拍摄分辨率图2。

[0051] 另外,在图2中,设为通过使第四透镜14沿光轴方向Z移动来改变基于调整前的透镜装置1的成像位置与摄像元件3的相对位置的结构,但并不限于此。例如,将调整前的透镜装置1的第四透镜14固定于预先规定的位置,并固定分辨率图2的位置,并且使摄像元件3沿光轴方向Z移动,由此也能够改变调整前的透镜装置1的成像位置与摄像元件3的相对位置。并且,将调整前的透镜装置1的第四透镜14固定于预先规定的位置,并固定摄像元件3的位置,并且使分辨率图2沿光轴方向Z移动,由此也能够改变调整前的透镜装置1的成像位置与摄像元件3的相对位置。

[0052] 若从数码相机主体获取在第四透镜14位于各位置的状态下由摄像元件3拍摄的分辨率图2的摄像图像(以下,记载为摄像图像组),则处理器51根据该摄像图像组和机器学习模型52来导出调整前的透镜装置1的波前像差。

[0053] 具体而言,处理器51从包含于构成摄像图像组的各摄像图像中的图案PX1的图像导出与图案PX1对应的透镜装置1的分辨率性能值即MTF(Modulation Transfer Function:调制传递函数)值。MTF值以空间频率特性来表现能够以哪种程度忠实地再现作为评价对象的图案所具有的对比度。将在此导出的与图案PX1对应的MTF值的集合记载为MTF数据组Gpx1。

[0054] 并且,处理器51从包含于构成摄像图像组的各摄像图像中的图案PY1的图像导出与图案PY1对应的MTF值。将在此导出的与图案PY1对应的MTF值的集合记载为MTF数据组Gpy1。

[0055] 并且,处理器51从包含于构成摄像图像组的各摄像图像中的图案PX2的图像导出与图案PX2对应的MTF值。将在此导出的与图案PX2对应的MTF值的集合记载为MTF数据组Gpx2。

[0056] 并且,处理器51从包含于构成摄像图像组的各摄像图像中的图案PY2的图像导出与图案PY2对应的MTF值。将在此导出的与图案PY2对应的MTF值的集合记载为MTF数据组Gpy2。

[0057] 此外,处理器51导出MTF数据组Gpx1、MTF数据组Gpy1、MTF数据组Gpx2及MTF数据组Gpy2各自的特征量。MTF数据组Gpx1、MTF数据组Gpy1、MTF数据组Gpx2及MTF数据组Gpy2分别为调整前的透镜装置1的分辨率性能值的集合。特征量为根据该集合导出的表示透镜装置1的分辨率性能的信息。将根据摄像图像组获取的信息的汇总内容示于图4。

[0058] 另外,图案PX1、图案PY1、图案PX2及图案PY2各自的空间频率相同,但也可以将图案PX1、图案PY1、图案PX2及图案PY2分别分为空间频率高的高频图案和空间频率低的低频图案这两个图案。在该情况下,根据摄像图像组,会生成高频图案和低频图案的2个图案量的MTF数据组Gpx1、MTF数据组Gpy1、MTF数据组Gpx2及MTF数据组Gpy2的组。即,根据摄像图像组,会生成8个图案量的特征量。

[0059] 以下,关于MTF数据组Gpx1、MTF数据组Gpy1、MTF数据组Gpx2及MTF数据组Gpy2各自的特征量的导出方法,以MTF数据组Gpx1为例进行说明。MTF数据组Gpy1、MTF数据组Gpx2及MTF数据组Gpy2各自的特征量的导出方法与MTF数据组Gpx1的特征量的导出方法相同,因此省略说明。所导出的特征量可以举出第一特征量和第二特征量这两个图案。

[0060] 图5是表示MTF数据组Gpx1的一例的图。图5的横轴表示第四透镜14的位置(聚焦透镜位置),换言之,调整前的透镜装置1的成像位置与摄像元件3的相对位置。图5的纵轴表示与在各聚焦透镜位置处的拍摄中得到的图案PX1对应的MTF值。图5中的白色圆圈表示与聚焦透镜位置相对应的MTF值。

[0061] (第一特征量的导出方法)

[0062] 处理器51根据MTF数据组Gpx1的微分值来求出MTF数据组Gpx1的极大值和极小值。在图5中示出根据微分值求出的极小值B1、极小值B2、极小值B3及极小值B4和极大值P1、极大值P2及极大值P3。处理器51将极大值P1、极大值P2及极大值P3作为MTF数据组Gpx1的第一特征量。

[0063] 另外,依据根据微分导出的极小值B1、极小值B2、极小值B3及极小值B4,能够将MTF数据组Gpx1分为第一群组、第二群组及第三群组。第一群组为由对应于从与极小值B1对应的聚焦透镜位置至与极小值B2对应的聚焦透镜位置为止的各聚焦透镜位置的MTF值构成的群组。第二群组为由对应于从与极小值B2对应的聚焦透镜位置至与极小值B3对应的聚焦透镜位置为止的各聚焦透镜位置的MTF值构成的群组。第三群组为由对应于从与极小值B3对应的聚焦透镜位置至与极小值B4对应的聚焦透镜位置为止的各聚焦透镜位置的MTF值构成的群组。因此,极大值P1成为第一群组的第一特征量,极大值P2成为第二群组的第一特征量,极大值P3成为第三群组的第一特征量。

[0064] 处理器51计算出包含于第一群组~第三群组的各群组中的MTF值的平均值,并将它们作为第一特征量。处理器51也可以将各群组视为直方图而计算出积分值,并导出将该积分值分成两半的MTF值作为各群组的平均值。

[0065] 处理器51计算出包含于第一群组~第三群组的各群组中的MTF值的方差并将它们作为第一特征量。

[0066] 处理器51根据第一群组~第三群组的各群组的方差计算出各群组的标准差,并将它们作为第一特征量。

[0067] 处理器51根据第一群组~第三群组的各群组的上述平均值及上述标准差和矩量母函数计算出各群组的偏度及峰度,并将它们作为第一特征量。

[0068] 矩量母函数为由平均值和标准差的函数表示的统计量。因此,若得到第一群组~第三群组的各群组的平均值和标准差,则能够使用矩量母函数计算表示第一群组~第三群组的各群组的偏度的3阶矩量和表示第一群组~第三群组的各群组的峰度的4阶矩量。以下,示出矩量母函数、3阶矩量、4阶矩量的式的一例。 $E(X)$ 表示变量X(MTF值)的期望值。 μ 表示X的平均值。 σ 表示X的标准差。也可以使用标准差的平方来代替 σ 。 r 为次数。

[0069] 矩量母函数: $\alpha_r = E((X-\mu)/\sigma)^r$

[0070] 3阶矩量: $\alpha_3 = E((X-\mu)/\sigma)^3$

[0071] 4阶矩量: $\alpha_4 = E((X-\mu)/\sigma)^4$

[0072] (第二特征量的导出方法)

[0073] 处理器51用根据透镜装置1的设计数据确定的至少一个数量(在图1的例子中为3个)的高斯函数对MTF数据组Gpx1进行逼近。具体而言,处理器51以预先准备的各高斯函数与MTF数据组Gpx1的残差成为最小的方式通过莱文贝格-马夸特法等最优化方法来决定各高斯函数的参数。在图5中示出适用了所决定的参数的高斯函数G1、高斯函数G2及高斯函数G3的曲线。处理器51导出高斯函数G1的最大值及取该最大值时的聚焦透镜位置、高斯函数G2的最大值及取该最大值时的聚焦透镜位置和高斯函数G3的最大值及取该最大值时的聚焦透镜位置分别作为第二特征量。

[0074] 通过基于该高斯函数的逼近,MTF数据组Gpx1逼近于高斯函数G1所表示的第四群组、高斯函数G2所表示的第五群组及高斯函数G3所表示的第六群组。

[0075] 高斯函数G1的参数中包含包含于第四群组中的MTF值的平均值和标准差。因此,处理器51将包含于高斯函数G1的参数中的平均值及标准差作为第二特征量。同样地,处理器51将包含于高斯函数G2的参数中的平均值及标准差作为第二特征量,且将包含于高斯函数G3的参数中的平均值及标准差作为第二特征量。也可以通过对这些各标准差进行平方来导

出第四群组~第六群组的各群组的方差,并将它们作为第二特征量。

[0076] 处理器51根据第四群组~第六群组的各群组的上述平均值及上述标准差和上述的矩量母函数计算出各群组的偏度及峰度,并将它们作为第二特征量。

[0077] 如此,图4所示的MTF数据组G_{px1}的特征量 F_{px1} 为由构成MTF数据组G_{px1}的多个群组各自的极大值(或最大值)、与该极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度构成的信息。

[0078] 并且,图4所示的MTF数据组G_{py1}的特征量 F_{py1} 为由构成MTF数据组G_{py1}的多个群组各自的极大值(或最大值)、与该极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度构成的信息。

[0079] 并且,图4所示的MTF数据组G_{px2}的特征量 F_{px2} 为由构成MTF数据组G_{px2}的多个群组各自的极大值(或最大值)、与该极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度构成的信息。

[0080] 并且,图4所示的MTF数据组G_{py2}的特征量 F_{py2} 为由构成MTF数据组G_{py2}的多个群组各自的极大值(或最大值)、与该极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度构成的信息。

[0081] 机器学习模型52为机器学习通过模拟得到的教师数据而生成的模型,是将由图4所示的4个图案量的特征量 F_{px1} 、特征量 F_{py1} 、特征量 F_{px2} 及特征量 F_{py2} 构成的分辨率性能信息作为输入而输出调整前的透镜装置1的波前像差的模型。从机器学习模型52输出的波前像差为泽尼克(Zernike)多项式的系数,但只要是表示波前像差的像差成分的信息即可,并不限定于此。

[0082] 处理器51将4个图案量的特征量 F_{px1} 、特征量 F_{py1} 、特征量 F_{px2} 及特征量 F_{py2} 输入到机器学习模型52中,若获取与此相应地从机器学习模型52输出的波前像差,则生成使所获取的波前像差满足所期望的条件的第二透镜12的位置的调整量的信息并将其发送到调整装置6。通过模拟求出使调整前的透镜装置1的波前像差与第二透镜12的位置的调整量的信息建立了对应关联的数据并将其预先存储于处理器51的ROM中。因此,处理器51从ROM中读入与所获取的波前像差对应的第二透镜12的位置的调整量的信息,并将该信息发送到调整装置6。

[0083] 调整装置6根据从处理器51接收到的信息来设定第二透镜12的位置,并进行调整。另外,也可以由工作人员根据从处理器51输出的第二透镜12的位置的调整量的信息通过手动操作或机械手操作等进行第二透镜12的位置的调整来代替调整装置6。另外,在上述中,无需一定要从所有的群组中提取特征量。

[0084] (机器学习模型52的生成方法)

[0085] 接着,对机器学习模型52的生成方法进行说明。

[0086] 机器学习模型52为根据对透镜装置1的各光学要件赋予多个图案的设想误差而得到的多个虚拟透镜装置的分辨率性能信息(图4所示的4个图案量的特征量 F_{px1} 、特征量 F_{py1} 、特征量 F_{px2} 及特征量 F_{py2})的模拟结果和上述多个虚拟透镜装置的波前像差的模拟结果来学习了分辨率性能信息与波前像差的对应关系的模型。机器学习模型52由神经网络、卷积神经网络、高斯过程回归、支持向量机及多元回归等中的至少一个构成。

[0087] 图6是表示在机器学习中使用的教师数据的一例的图。在图6中示出与透镜装置1

相同结构的n个(n为2以上的自然数)虚拟透镜装置A1、A2、A3、A4、A5、……、An的带误差的设计数据。虚拟透镜装置A1、A2、A3、A4、A5、……、An分别构成虚拟光学系统。

[0088] 带误差的设计数据为对透镜装置1的第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14各自的设计值(形状、折射率等)和与第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14的配置有关的设计值(光轴方向Z的配置间隔等)赋予了随机误差的数据。

[0089] 对虚拟透镜装置A1~An各自赋予的误差为将第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14的组装误差、第一透镜11、第二透镜12、第三透镜13及第四透镜14各自的制造误差等各种误差的数倍范围的误差例如通过蒙特卡罗模拟随机赋予的误差。

[0090] 模拟结果与n个带误差的设计数据各自建立有对应关联。模拟结果中的特征量构成第1模拟结果,是与其对应的虚拟透镜装置Ak(k为1~n中的任一个)适用于图2的系统时得到的4个图案量的MTF数据组的特征量(第一特征量或第二特征量)的模拟结果。模拟结果中的波前像差构成第2模拟结果,是与其对应的虚拟透镜装置Ak(k为1~n中的任一个)的波前像差(泽尼克多项式的系数)的模拟结果。如此,获取图6所示的各模拟结果并将其作为教师数据,通过机器学习该教师数据来生成机器学习模型52。

[0091] 如上,处理器51根据改变透镜装置1的成像位置与摄像元件3的位置的距离而得到的多个分辨率性能信息和机器学习模型52来导出透镜装置1的波前像差。在波前像差的导出中至少有用于得到摄像图像组的硬件即可。因此,能够简单且低成本地进行波前像差的导出。

[0092] 并且,机器学习模型52为将由图4所示的4个图案量的特征量 F_{px1} 、特征量 F_{py1} 、特征量 F_{px2} 及特征量 F_{py2} 构成的分辨率性能信息作为输入而输出调整前的透镜装置1的波前像差的模型。如此,通过将机器学习模型52设为将根据不同像高及不同类别的图案的图像求出的多个分辨率性能信息作为输入而输出波前像差的模型,能够提高基于机器学习模型52的波前像差的预测精度。

[0093] 并且,作为与分辨率图2的一个图案对应的分辨率性能信息(特征量),可以使用表示MTF数据组的特征的极大值(或最大值)、与极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度。如此,通过学习由多个信息表示的MTF数据组的特征与波前像差的关系,能够提高基于机器学习模型52的波前像差的预测精度。

[0094] 另外,若输入到机器学习模型52中的特征量(用作教师数据的特征量)包含表示MTF数据组的特征的极大值(或最大值)、与极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度中的至少一个,则能够进行基于机器学习模型52的波前像差的预测。

[0095] 进行验证的结果得知,若输入到机器学习模型52中的特征量(用作教师数据的特征量)中至少包含极大值(或最大值),则可提高基于机器学习模型52的波前像差的预测精度。并且,得知若在特征量中还包含与极大值(或最大值)对应的聚焦透镜位置、偏度及峰度,则可进一步提高基于机器学习模型52的波前像差的预测精度。即,在前述的第一特征量或第二特征量中,即使省略平均值、方差及标准差,对基于机器学习模型52的波前像差的预测精度的影响也小。

[0096] (变形例)

[0097] 透镜装置1设为仅具有透镜作为光学要件的结构,但透镜装置1所具有的光学要件

中可以包含光圈、棱镜、反射镜等除透镜以外的光学要件。并且,透镜装置1中的被调整光学要件可以不是一个,而是多个。

[0098] 并且,设为将透镜装置1适用于摄像装置的情况进行了说明,但透镜装置1也可以适用于投影仪。在该情况下,在图2所示的位置调整系统中,通过在摄像元件3的位置处配置分辨率图2,将分辨率图2介由透镜装置1投影到屏幕上,并由摄像元件3拍摄投影到屏幕上的图像来获取摄像图像组即可。并且,透镜装置1也可以为在除相机及投影仪以外的光学装置中使用的光学系统。图2所示的位置调整系统适合于需测量组装中的光学系统的光学要件的位置偏移量的情况。

[0099] 并且,处理器51使用摄像图像获取了分辨率性能值(MTF值),但并不限于摄像图像,也可以使用其他传感器获取分辨率性能值。

[0100] 并且,在以上的说明中,将分辨率性能值设为MTF值,但也能够使用点扩散强度或线扩散强度来代替MTF值。

[0101] 如以上说明,在本说明书中至少公开以下的事项。

[0102] (1)

[0103] 一种波前像差导出方法,其导出透镜光学系统的波前像差,上述波前像差导出方法包括如下步骤:

[0104] 第1步骤,获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息;及

[0105] 第2步骤,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型得到上述透镜光学系统的波前像差。

[0106] (2)

[0107] 根据(1)所述的波前像差导出方法,其中,

[0108] 上述机器学习模型将泽尼克多项式的系数作为上述波前像差的像差成分进行输出。

[0109] (3)

[0110] 根据(1)或(2)所述的波前像差导出方法,其中,

[0111] 上述分辨率性能信息为基于包含分辨率、点扩散强度或线扩散强度的分辨率性能值的信息。

[0112] (4)

[0113] 根据(1)至(3)中任一项所述的波前像差导出方法,其中,

[0114] 在上述第1步骤中,

[0115] 根据摄像图像获取与相对位置相对应的分辨率性能值,并根据与上述相对位置相对应的上述分辨率性能值来获取上述分辨率性能信息,上述摄像图像是在将通过上述透镜光学系统拍摄被摄体的摄像元件与上述透镜光学系统的成像位置的上述相对位置改变为多个值的状态下,利用上述摄像元件拍摄被摄体而得到的。

[0116] (5)

[0117] 根据(4)所述的波前像差导出方法,其中,

[0118] 在上述第1步骤中,导出包含与上述相对位置相对应的上述分辨率性能值的数据组的特征量,并获取上述特征量作为上述分辨率性能信息。

[0119] (6)

- [0120] 根据(5)所述的波前像差导出方法,其中,
- [0121] 在上述第1步骤中,导出包含于上述数据组中的多个群组的上述特征量。
- [0122] (7)
- [0123] 根据(5)或(6)所述的波前像差导出方法,其中,
- [0124] 在上述第1步骤中,根据利用通过上述透镜光学系统拍摄被摄体的摄像元件拍摄被摄体而得到的摄像图像,获取与上述摄像图像的不同的像高相对应的上述分辨率性能值,并导出与上述摄像图像的不同的像高相对应的上述特征量。
- [0125] (8)
- [0126] 根据(5)至(7)中任一项所述的波前像差导出方法,其中,
- [0127] 上述特征量包含极大值、与上述极大值对应的上述相对位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度中的至少一个。
- [0128] (9)
- [0129] 根据(8)所述的波前像差导出方法,其中,
- [0130] 上述特征量至少包含上述极大值。
- [0131] (10)
- [0132] 根据(5)至(7)中任一项所述的波前像差导出方法,其中,
- [0133] 在上述第1步骤中,用至少一个高斯函数对上述数据组进行逼近,并导出逼近的上述高斯函数的最大值、与上述最大值对应的所述相对位置、平均值、标准差、方差、偏度及峰度中的至少一个作为上述特征量。
- [0134] (11)
- [0135] 根据(10)所述的波前像差导出方法,其中,
- [0136] 上述特征量至少包含上述最大值。
- [0137] (12)
- [0138] 根据(8)至(11)中任一项所述的波前像差导出方法,其中,
- [0139] 使用上述平均值、上述标准差及矩量母函数来导出上述偏度和上述峰度。
- [0140] (13)
- [0141] 根据(1)至(12)中任一项所述的波前像差导出方法,其中,
- [0142] 上述机器学习模型为根据对上述透镜光学系统的光学要件赋予多个图案的设想误差而得到的多个虚拟光学系统的分辨率性能信息的模拟结果和上述多个虚拟光学系统的波前像差的模拟结果学习了分辨率性能信息与波前像差的对应关系的模型。
- [0143] (14)
- [0144] 一种机器学习模型的生成方法,其中,
- [0145] 获取对透镜光学系统的光学要件赋予多个图案的设想误差而得到的多个虚拟光学系统的分辨率性能信息的第1模拟结果,
- [0146] 获取上述多个虚拟光学系统的波前像差的第2模拟结果,
- [0147] 根据上述第1模拟结果和上述第2模拟结果机器学习分辨率性能信息与波前像差的对应关系来生成机器学习模型。
- [0148] (15)
- [0149] 根据(14)所述的机器学习模型的生成方法,其中,

- [0150] 上述波前像差为泽尼克多项式的系数。
- [0151] (16)
- [0152] 根据(14)或(15)所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0153] 上述分辨率性能信息为基于包含分辨率、点扩散强度或线扩散强度的分辨率性能值的信息。
- [0154] (17)
- [0155] 根据(14)至(16)中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0156] 上述分辨率性能信息为基于在上述虚拟光学系统的光轴方向上设定的摄像位置与上述虚拟光学系统的成像位置的相对位置成为多个值的状态下的与上述相对位置相对应的分辨率性能值的信息。
- [0157] (18)
- [0158] 根据(17)所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0159] 上述分辨率性能信息为包含与上述相对位置相对应的上述分辨率性能值的数据组的特征量。
- [0160] (19)
- [0161] 根据(18)所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0162] 上述分辨率性能信息为包含于上述数据组中的多个群组的上述特征量。
- [0163] (20)
- [0164] 根据(18)或(19)所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0165] 上述第1模拟结果为包含与在上述虚拟光学系统的光轴方向上设定的摄像位置处的不同的像高相对应的上述分辨率性能值的数据组的特征量的模拟结果。
- [0166] (21)
- [0167] 根据(18)至(20)中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0168] 上述特征量包含极大值、与上述极大值对应的上述相对位置、平均值、方差、标准差、偏度及峰度中的至少一个。
- [0169] (22)
- [0170] 根据(21)所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0171] 上述特征量至少包含上述极大值。
- [0172] (23)
- [0173] 根据(18)至(20)中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0174] 上述特征量包含用至少一个高斯函数逼近上述数据组时的上述高斯函数的最大值、与上述最大值对应的上述相对位置、平均值、标准差、方差、偏度及峰度中的至少一个。
- [0175] (24)
- [0176] 根据(23)所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0177] 上述特征量至少包含上述最大值。
- [0178] (25)
- [0179] 根据(21)至(24)中任一项所述的机器学习模型的生成方法,其中,
- [0180] 使用上述平均值、上述标准差及矩量母函数来导出上述偏度和上述峰度。
- [0181] (26)

[0182] 一种透镜光学系统的制造方法,所述透镜光学系统具有包含被调整光学要件的多
个光学要件,所述透镜光学系统的制造方法包括如下步骤:

[0183] 获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息;

[0184] 将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型得到上述
透镜光学系统的波前像差;及

[0185] 根据上述波前像差设定上述被调整光学要件的位置。

[0186] (27)

[0187] 一种波前像差导出装置,其导出透镜光学系统的波前像差,

[0188] 上述波前像差导出装置具备处理器,上述处理器进行如下处理:获取上述透镜光
学系统的分辨率性能信息,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器
学习模型得到上述透镜光学系统的波前像差。

[0189] (28)

[0190] 一种波前像差导出程序,其导出透镜光学系统的波前像差,所述波前像差导出程
序使计算机执行如下步骤:

[0191] 第1步骤,获取上述透镜光学系统的分辨率性能信息;及

[0192] 第2步骤,将上述分辨率性能信息输入到机器学习模型中,并从上述机器学习模型
得到所述透镜光学系统的波前像差。

[0193] 以上,参考附图对各种实施方式进行了说明,但本发明当然并不限于该例子。显
然,若为本领域技术人员,则能够在权利要求书中所记载的范围内想到各种变更例或修正
例,应理解这些变更例或修正例理所当然也属于本发明的技术范围内。并且,可以在不脱离
发明的主旨的范围内任意地组合上述实施方式中的各构成要件。

[0194] 另外,本申请基于2021年3月31日申请的日本专利申请(日本特愿2021-061084),
其内容作为参考而援用于本申请中。

[0195] 符号说明

[0196] 100-位置调整系统,1-透镜装置,2-分辨率图,21-第一图案,22-第二图案,24-虚
拟圆,PX1、PY1、PX2、PY2-图案,3-摄像元件,4-聚焦驱动装置,5-计算机,51-处理器,52-机
器学习模型,6-调整装置,10-透镜镜筒,11-第一透镜,12-第二透镜,13-第三透镜,14-第四
透镜(聚焦透镜),K-光轴,Z-光轴方向,P1、P2、P3-极大值,B1、B2、B3-极小值,G1、G2、G3-高
斯函数。

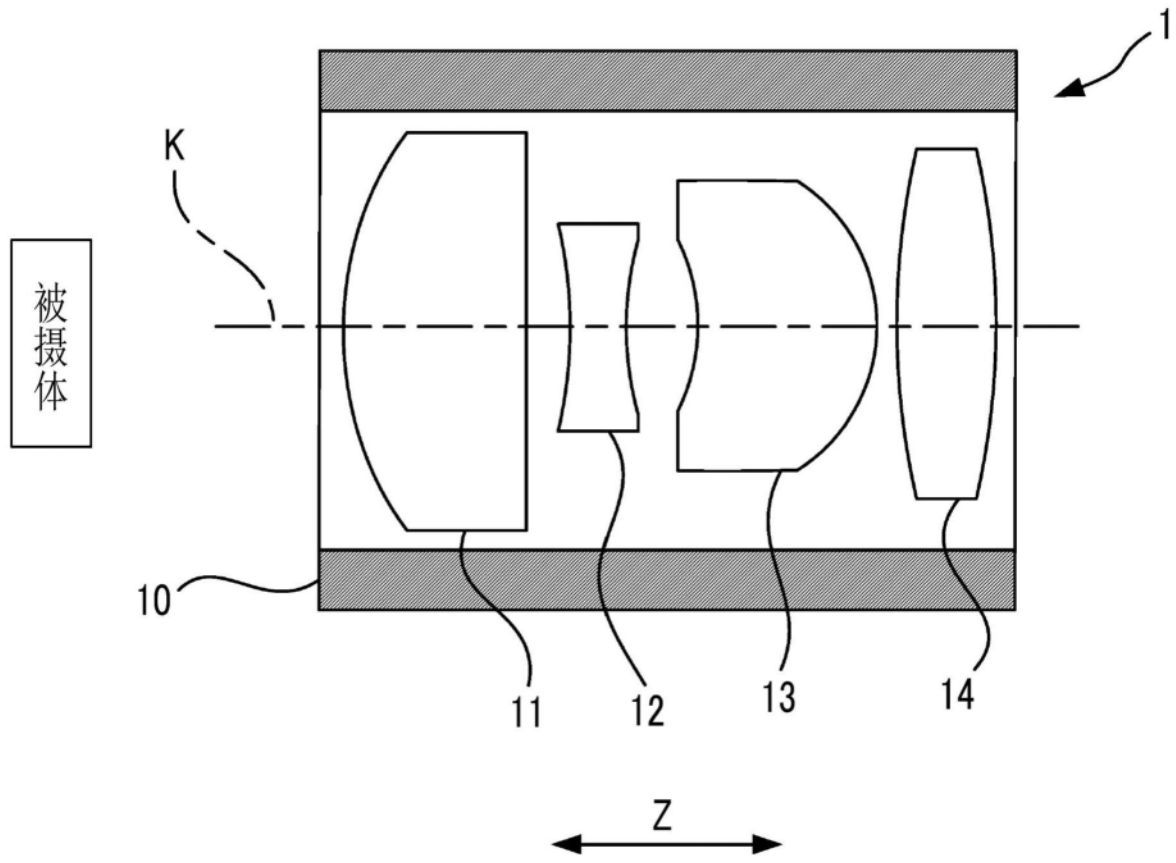


图1

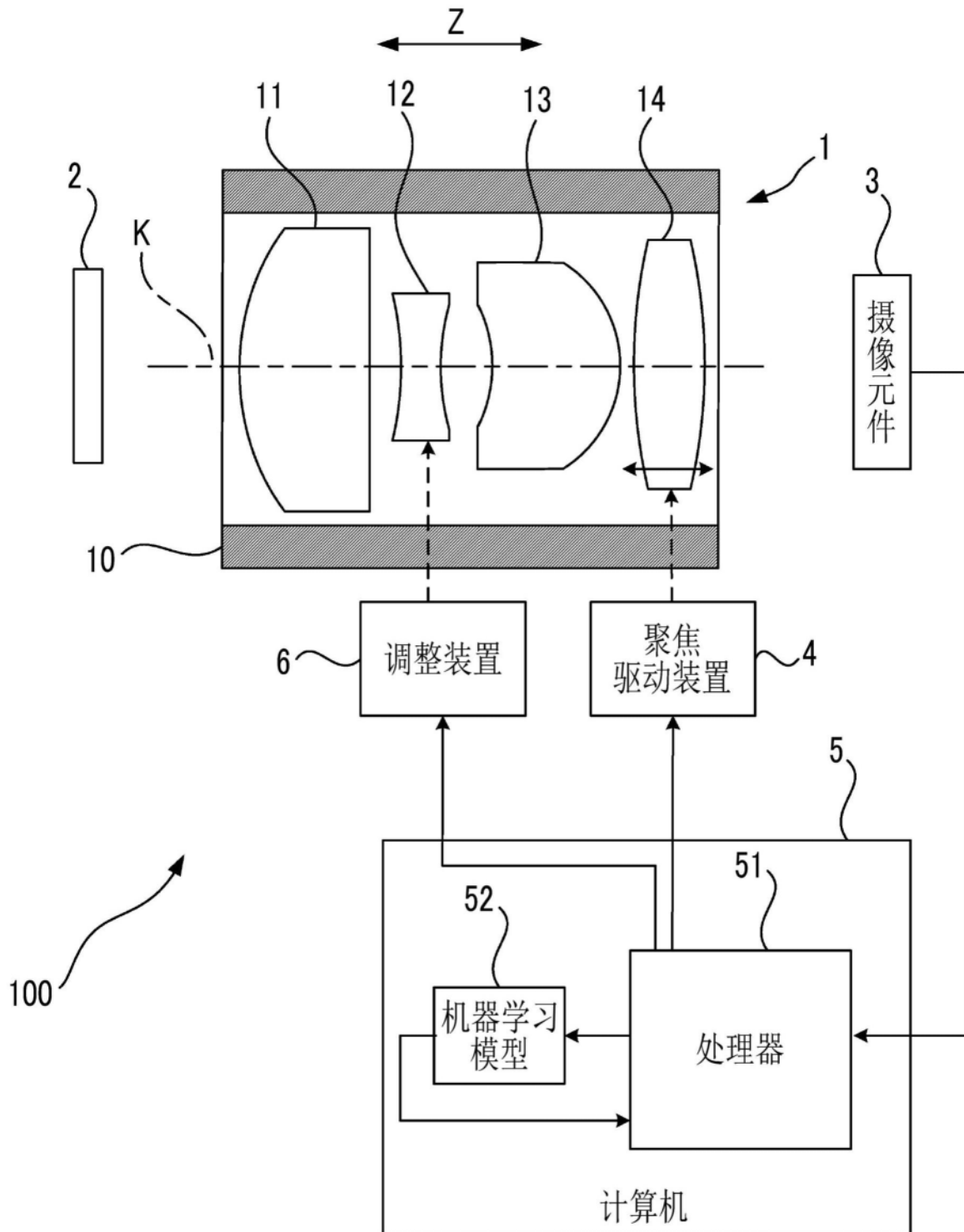


图2

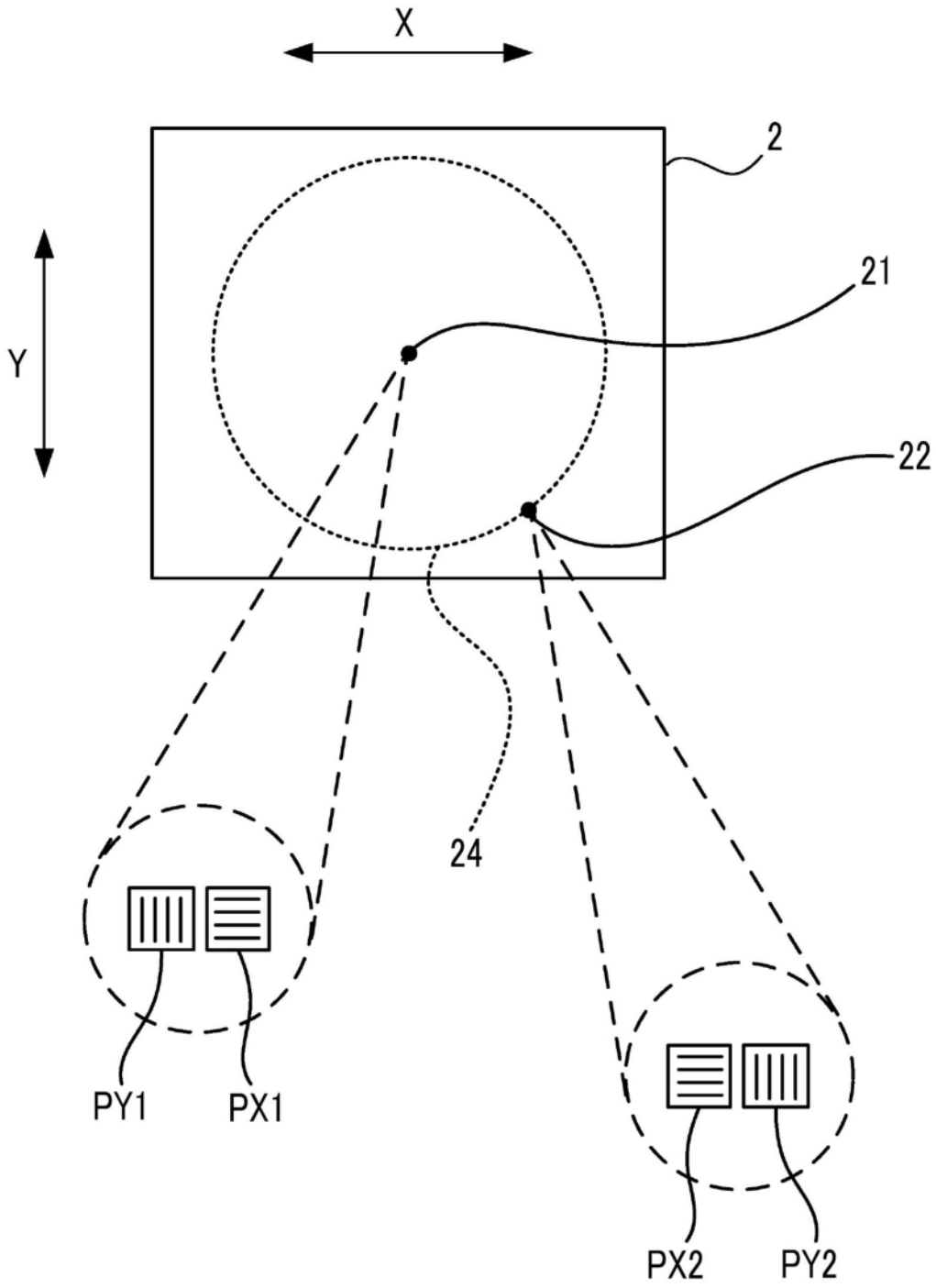


图3

	图案的像高	图案的类别	实测结果	
			MTF数据组 (分辨率性能值)	特征量 (分辨率性能信息)
调整前透镜装置	中心	PX1	Gpx1	Fpx1
		PY1	Gpy1	Fpy1
	周边	PX2	Gpx2	Fpx2
		PY2	Gpy2	Fpy2

图4

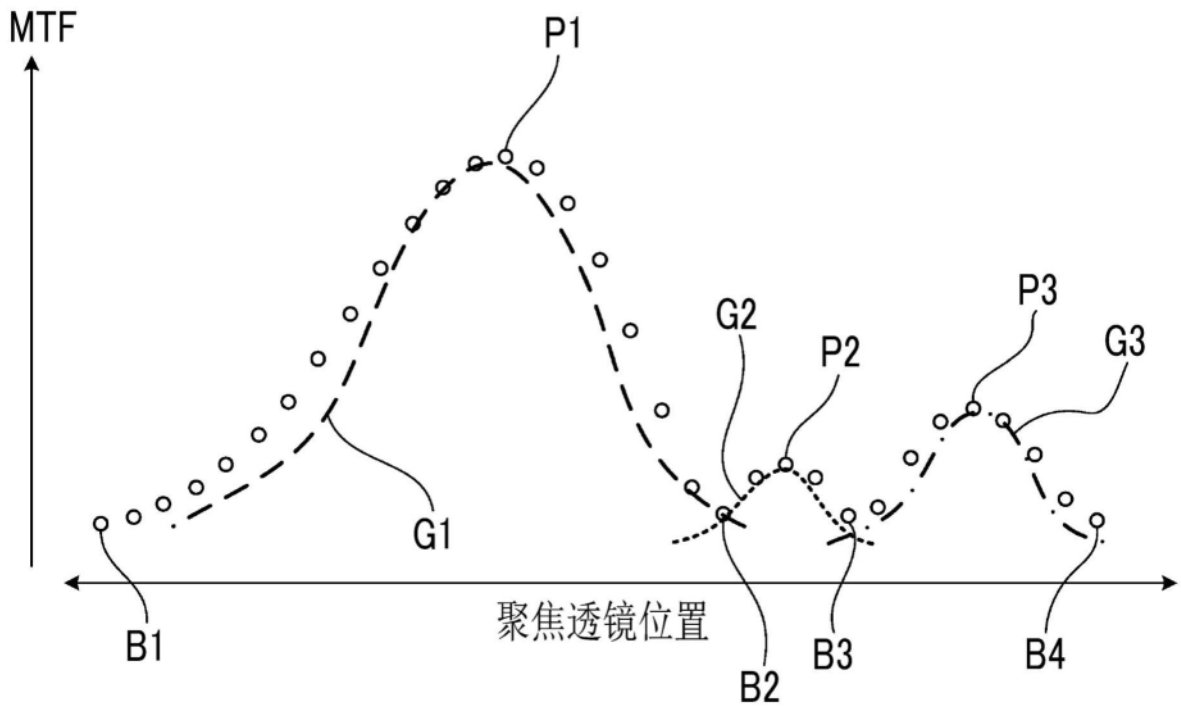


图5

带误差的设计数据	图案的像高	图案的类别	模拟结果	
			特征量 (分辨率性能信息)	波前像差 (泽尼克多项式系数)
虚拟透镜装置A1	中心	PX1	Fpx1	####
		PY1	Fpy1	
	周边	PX2	Fpx2	
		PY2	Fpy2	
虚拟透镜装置A2	中心	PX1	Fpx1	####
		PY1	Fpy1	
	周边	PX2	Fpx2	
		PY2	Fpy2	
虚拟透镜装置A3	中心	PX1	Fpx1	####
		PY1	Fpy1	
	周边	PX2	Fpx2	
		PY2	Fpy2	
虚拟透镜装置An	中心	PX1	Fpx1	####
		PY1	Fpy1	
	周边	PX2	Fpx2	
		PY2	Fpy2	
· · ·	· · ·	· · ·	· · ·	· · ·

图6