

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(10) 国际公布号

WO 2019/075680 A1

(43) 国际公布日
2019 年 4 月 25 日 (25.04.2019)

(51) 国际专利分类号:

G06T 7/80 (2017.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2017/106786

(22) 国际申请日:

2017 年 10 月 19 日 (19.10.2017)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(71) 申请人: 深圳大学(SHENZHEN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。

(72) 发明人: 刘晓莉(LIU, Xiaoli); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。李成(LI, Cheng); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。汤其剑(TANG, Qijian); 中国广东省深圳市南山区南

海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。彭翔(PENG, Xiang); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。

(74) 代理人: 深圳市恒申知识产权事务所(普通合伙)(HENSEN INTELLECTUAL PROPERTY FIRM); 中国广东省深圳市福田区南园路 68 号上步大厦 10H, Guangdong 518000 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,

(54) Title: VISION-ASSISTED FOURIER PTYCHOGRAPHIC IMAGING POSITION CALIBRATION METHOD AND APPARATUS

(54) 发明名称: 视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法及装置



图 2

(57) Abstract: The present invention is applicable to the technical field of microscopy imaging, and provided are a vision-assisted Fourier ptychographic imaging position calibration method and apparatus. Before traditional Fourier ptychographic imaging calculation is restored, an image when an LED array which is not placed under a resolution plate is illuminated is collected through a vision-assisted binocular system, and first spatial three-dimensional coordinates of the image are calculated in combination with camera calibration parameters; then through a method that a round mark point is attached to the resolution plate, spatial three-dimensional coordinates

PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

of the center of a microscopy field of view are found; then in combination with the first spatial three-dimensional coordinates, spatial three-dimensional coordinates of the LED array when the system is at a focusing position are found through rotation, translation and transformation, and using the spatial three-dimensional coordinates in the center of the microscopy field of view in combination with the spatial three-dimensional coordinates of the LED array at the focus position, the height from each LED in an illumination area to a fitting plane of the focus position and a transverse coordinate and a longitudinal coordinate of the projection of the LED to the fitting plane are calculated, so that spatial position calibration is achieved. The present invention can avoid the influence of positional deviation on a restoration result.

(57) 摘要: 本发明适用于显微成像技术领域, 提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法及装置, 在传统傅里叶叠层成像计算恢复之前, 通过视觉辅助双目系统采集未置于分辨率板下的LED阵列点亮时的图像, 结合相机标定参数计算出其第一空间三维坐标; 再通过分辨率板上贴圆形标志点的方法找到显微视场中心的空间三维坐标; 然后结合第一空间三维坐标并通过旋转平移变换找到系统处于聚焦位置时LED阵列的空间三维坐标, 利用显微视场中心的空间三维坐标结合LED阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个LED到聚焦位置拟合平面的高度以及LED投影到拟合平面的横纵坐标, 完成空间位置标定; 本发明可避免位置偏差给恢复结果带来的影响。

视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法及装置

技术领域

本发明属于显微成像技术领域，尤其涉及一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法及装置。

背景技术

显微镜自发明之日起，为人类观察更小的物体提供了可能。在使用显微镜观察样本时，通常都是在低倍物镜下找到样本所在的位置，进而旋转转换器，使用较高倍数的物镜来观察样本的清晰细节。当将低倍镜转换成高倍镜后，带来的直接变化就是观察者所能够观察的视场变小。为了解决视场大小和分辨率之间的矛盾关系，常用的方法就是借用精密电动平台实现大范围扫描并结合图像处理方法来实现，但是这种方法需要十分精密的扫描且操作过程非常复杂。如何同时得到大视场和高分辨率的图像一直困扰着许多从事显微研究的科研工作者。在这方面的突破性进展应当属于有人首次提出的傅里叶叠层成像技术并成功实现了大视场和超分辨成像。

典型的傅里叶叠层成像系统是在普通显微镜装置的基础上实现的，用一个可编程的 LED 阵列取代显微镜自身的照明光源，通过控制 LED 阵列上每一个 LED 的亮暗来实现对样本的不同方向照明。通常情况下，每一个位置处的 LED 照射样本得到的图像是受物镜数值孔径限制的成像结果，其图像存在着样本的高频信息丢失，我们称之为低分辨率图像。傅里叶叠层成像技术就是通过依次点亮照明阵列上每一个 LED 来得到很多张包含样本不同角度信息的低分辨率图像，然后在图像的傅里叶域中采用合成孔径以及相位恢复的方法来恢复样本的高分辨率信息。最终重建的高分辨率图像的分辨率大小取决于物镜数值孔径和照明数值孔径之和，所以从这个角度出发，傅里叶叠层成像技术能够打破传统显微镜物镜数值孔径的限制，最终实现大视场和高分辨率成像。

傅里叶叠层成像技术的实现是通过在待恢复的高分辨率频谱中找到每一个不同位置 LED 对应的空间频率,以物镜的数值孔径为半径在高分辨率频谱中取相应位置下的子频谱孔径,用对应 LED 位置下采集的低分辨率图像做振幅替换,实现相位恢复。

但在传统的傅里叶叠层成像中,最终恢复高分辨图像的质量很大程度受到空间 LED 阵列定位误差的影响,具体表现为在传统傅里叶叠层中每一个 LED 对应的空间频率是通过选定一个中心 LED 与显微系统中心对准后,其它位置的空间频率以此为基准计算出来的。所以一旦中心 LED 与显微系统中心存在位置偏差,就会导致整个照明区域的 LED 空间位置都存在偏差,这样对应在待恢复的高分辨率频谱中的每一个子孔径频谱的中心位置也就不准确,其相位恢复也很难得到一个准确的结果。因此,为了得到恢复质量较好的结果,就必须解决傅里叶叠层中 LED 阵列的空间位置偏差问题。

发明内容

本发明提供一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法及装置,旨在解决传统傅里叶叠层成像光路中 LED 阵列与显微系统中心难以精确调节对准,待恢复高分辨率图像质量下降的问题。

本发明提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法,所述傅里叶叠层成像位置标定方法运用于傅里叶叠层成像位置标定系统,所述标定系统包括:傅里叶叠层成像装置和视觉辅助双目相机,所述傅里叶叠层成像装置包括显微图像采集相机、显微镜、载物台、贴有圆形标志点的分辨率板和 LED 阵列,所述分辨率板置于所述载物台上,所述显微图像采集相机位于所述载物台正上方,所述 LED 阵列位于所述载物台正下方,并与所述载物台所在平面平行,所述视觉辅助双目相机包括:视觉辅助左相机和视觉辅助右相机,所述视觉辅助左相机、视觉辅助右相机位于所述傅里叶叠层成像装置的正前方,所述方法包括:

步骤 S1, 利用所述显微图像采集相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板的图像, 并结合圆形标志点提取算法提取所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标;

步骤 S2, 利用所述显微图像采集相机采集图像, 得到所述图像的显微视场中心点的图像像素坐标, 利用三坐标仪测出所述贴有圆形标志点的分辨率板上每一级每一组元素的实际物理尺寸坐标, 通过建立图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系, 计算出所述显微视场中心点和所述圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标;

步骤 S3, 利用所述视觉辅助双目相机采集未置于所述分辨率板下的所述 LED 阵列点亮时的图像, 从而得到所述 LED 阵列中的每一个 LED 在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标, 由每一个 LED 的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出所述 LED 阵列的每一个 LED 的第一空间三维坐标;

步骤 S4, 利用所述视觉辅助相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像以及此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图像, 并结合预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时的空间三维坐标以及未被遮挡的 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标;

结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标;

步骤 S5, 根据所述圆形标志点圆心的空间三维坐标以及所述显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标的关系计算所述显微视场中心的空间三维坐标;

并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度 z 以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标 x 、 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板的空间位置 (x, y, z) 标定;

同时结合所述显微视场中心的空间三维坐标和照明区域中 LED 阵列的标定结果计算每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标。

本发明还提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定装置，所述傅里叶叠层成像位置标定装置运用于傅里叶叠层成像位置标定系统，所述标定系统包括：傅里叶叠层成像装置和视觉辅助双目相机，所述傅里叶叠层成像装置包括显微图像采集相机、显微镜、载物台、贴有圆形标志点的分辨率板和 LED 阵列，所述分辨率板置于所述载物台上，所述显微图像采集相机位于所述载物台正上方，所述 LED 阵列位于所述载物台正下方，并与所述载物台所在平面平行，所述视觉辅助双目相机包括：视觉辅助左相机和视觉辅助右相机，所述视觉辅助左相机、视觉辅助右相机位于所述傅里叶叠层成像装置的正前方，所述装置包括：

图像像素坐标提取模块，用于利用所述显微图像采集相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板的图像，并结合圆形标志点提取算法提取所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标；

实际物理尺寸坐标计算模块，用于利用所述显微图像采集相机采集图像，得到所述图像的显微视场中心点的图像像素坐标，利用三坐标仪测出所述贴有圆形标志点的分辨率板上每一级每一组元素的实际物理尺寸坐标，通过建立图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系，计算出所述显微视场中心点和所述圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标；

第一计算模块，用于利用所述视觉辅助双目相机采集未置于所述分辨率板下的所述 LED 阵列点亮时的图像，从而得到所述 LED 阵列中的每一个 LED 在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标，由每一个 LED 的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出所述 LED 阵列的每一个 LED 的第一空间三维坐标；

第二计算模块，用于利用所述视觉辅助相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像以及此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图像，

并结合预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时的空间三维坐标以及未被遮挡的 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标;

结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标;

标定模块, 用于根据所述圆形标志点圆心的空间三维坐标以及所述显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标的关系计算所述显微视场中心的空间三维坐标;

并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度 z 以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标 x 、 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板的空间位置 (x, y, z) 标定;

同时结合所述显微视场中心的空间三维坐标和照明区域中 LED 阵列的标定结果计算每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标。

本发明与现有技术相比, 有益效果在于: 本发明提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法及装置, 方法包括: 在传统傅里叶叠层成像计算恢复之前, 通过搭建的视觉辅助双目系统采集未置于分辨率板下的 LED 阵列点亮时的图像, 结合相机标定参数计算出 LED 阵列的第一空间三维坐标; 再通过分辨率板上贴圆形标志点的方法找到显微视场中心的空间三维坐标; 然后结合第一空间三维坐标并通过旋转平移变换找到系统处于聚焦位置时 LED 阵列的空间三维坐标, 并利用显微视场中心的空间三维坐标结合 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标, 完成 LED 阵列相对分辨率板的空间位置标定; 并进一步计算出每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标; 本发明与现有技术相比, 一方面, 采用视觉辅助傅里叶叠层成像进行位置标定之后, 不需要再反复调节照明 LED 阵列的中心与显微系统的中心进行对准, 相应每一

个 LED 空间位置坐标都可以通过计算精确得到,大大减小了实验上光路调节的难度;另一方面,采用视觉辅助进行位置标定的方法能够减少传统傅里叶叠层成像中存在的位置偏差,这样就能在待恢复的高分辨率频谱中找到相应 LED 准确的空间频率坐标,进而能够得到比传统恢复方法更准确的恢复结果。

附图说明

图 1 是本发明实施例提供的傅里叶叠层成像位置标定系统的硬件结构示意图;

图 2 是本发明实施例提供的一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法的示意图;

图 3 是本发明实施例提供的图像坐标系与实际物理尺寸坐标系计算模型的示意图;

图 4 是本发明实施例提供的传统傅里叶叠层成像中 LED 阵列空间位置和经视觉辅助标定 LED 阵列空间位置的对比示意图;

图 5(a) 是本发明实施例提供的用传统傅里叶叠层成像方法重建分辨率板结果的示意图;

图 5(b) 是本发明实施例提供的经过视觉辅助位置标定之后重建分辨率板结果的示意图;

图 6(a) 是本发明实施例提供的用传统傅里叶叠层成像重建人血细胞结果的示意图;

图 6(b) 是本发明实施例提供的经过视觉辅助位置标定之后重建人血细胞结果的示意图;

图 7 是本发明实施例提供的一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定装置的模块示意图。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

本发明提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法，所述傅里叶叠层成像位置标定方法运用于傅里叶叠层成像位置标定系统，如图 1 所示，所述标定系统包括：傅里叶叠层成像装置 1 和视觉辅助双目相机 2，所述傅里叶叠层成像装置 1 包括显微图像采集相机 11、显微镜 12（图中所述显微图像采集相机 11 下方依次示出了透镜 121 和物镜 122）、载物台（图中未示出）、贴有圆形标志点的分辨率板 13 和 LED 阵列 14，所述分辨率板 13 置于所述载物台上，所述显微图像采集相机 11 位于所述载物台正上方，所述 LED 阵列 14 位于所述载物台正下方，并与所述载物台所在平面平行，所述视觉辅助双目相机 2 包括：视觉辅助左相机和视觉辅助右相机，所述视觉辅助左相机、视觉辅助右相机位于所述傅里叶叠层成像装置的正前方。

具体地，本发明实施例中，所述显微镜 12 采用的型号为 Olympus BX43，搭配 Olympus 平场复消色差物镜，物镜放大倍数为 4 倍，数值孔径为 0.1；所述显微镜 12 上搭载 SCMOS 相机，型号为 PCO.edge5.5，分辨率大小为 2560*2048，像素尺寸为 6.5um*6.5um；所述视觉辅助双目相机 2 采用 Basler 相机，型号为 piA2400-17gc，分辨率大小为 2448*2050，像素尺寸为 3.45um*3.45um；所述视觉辅助双目相机采用 Computar 镜头，型号为 M1214-MP2。

具体地，本发明实施例中，所述分辨率板 13 采用 USAF1951 分辨率板。

具体地，如图 2 所示，所述傅里叶叠层成像位置标定方法包括：

步骤 S1，利用所述显微图像采集相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板的图像，并结合圆形标志点提取算法提取所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标；

具体地，所述步骤 S1 中，所述圆形标志点提取算法具体为：利用图像处理中 canny 算子检测圆形标志点边缘图像坐标 (x,y) 并拟合出椭圆方程

$x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0$ ，其中参数 B 、 C 、 D 、 E 和 F 由拟合得出，计算所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标 (x, y) 公式为：

$$x = \frac{BE - CD}{C - B^2}$$

$$y = \frac{BD - E}{C - B^2}。$$

步骤 S2，利用所述显微图像采集相机采集图像，得到所述图像的显微视场中心点的图像像素坐标，利用三坐标仪测出所述贴有圆形标志点的分辨率板上每一级每一组元素的实际物理尺寸坐标，通过建立图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系，计算出所述显微视场中心点和所述圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标；

具体地，所述显微视场中心点指的是所述显微图像采集相机采集的图像的视场中心。

图 3 为图像坐标系与实际物理尺寸坐标系计算模型的示意图，具体地，建立的图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系为：

$$x_0 = x_{center} + (u_0 - u_{center}) \cdot dx$$

$$y_0 = y_{center} + (v_0 - v_{center}) \cdot dy$$

$$x_{circle} = x_{center} + (u_{circle} - u_{center}) \cdot dx$$

$$y_{circle} = y_{center} + (v_{circle} - v_{center}) \cdot dy$$

其中， (x_0, y_0) 表示显微视场中心的实际物理尺寸坐标， (x_{circle}, y_{circle}) 表示圆形标志点圆心的实际物理尺寸坐标， (u_{center}, v_{center}) 表示选定的图像坐标系的中心图像坐标， (x_{center}, y_{center}) 表示选定的图像坐标系的物理尺寸坐标，该物理尺寸坐标通过三坐标仪得到， (u_0, v_0) 表示显微视场中心点的图像像素坐标， (u_{circle}, v_{circle}) 表示圆形标志点圆心的图像像素坐标， d_x 、 d_y 分别为实际物理尺寸坐标系中 x 、 y 方向上的单位物理尺寸。

步骤 S3，利用所述视觉辅助双目相机采集未置于所述分辨率板下的所述 LED 阵列点亮时的图像，从而得到所述 LED 阵列中的每一个 LED 在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标，由每一个 LED 的图像坐标以及预先标定的所述视

觉辅助双目相机的标定参数计算出所述 LED 阵列的每一个 LED 的第一空间三维坐标;

具体地, 此时所述 LED 阵列未置于所述分辨率板下, 所以, 所述 LED 阵列没有被载物台遮挡, 所述视觉辅助双目相机可以采集到完整的 LED 阵列点亮时的图像。

具体地, 所述视觉辅助双目相机的预先标定过程为, 将标靶置于所述视觉辅助双目相机下方, 利用所述视觉辅助双目相机采集几个姿态下的标靶图像, 并根据采集的所述标靶图像计算所述视觉辅助双目相机的内部参数和外部参数, 所述视觉辅助双目相机经过标定之后得到视觉辅助左相机、视觉辅助右相机的有效焦距分别为 f_l 和 f_r , 以及所述视觉辅助左相机、视觉辅助右相机之间的旋

$$\text{转矩阵 } R_l = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \text{ 和平移矩阵 } T_l = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}。$$

其中, 参数 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 、 r_6 、 r_7 、 r_8 、 r_9 、 t_x 、 t_y 、 t_z 都可以从所述视觉辅助双目相机标定结果中得到, 相机标定过程采用的是 MATLAB 相机标定工具箱 (Camera Calibration Toolbox for MATLAB)。

具体地, 所述步骤 S3 中, 计算所述第一空间三维坐标的公式为:

$$\begin{aligned} x &= z X_l / f_l \\ y &= z Y_l / f_l \\ z &= \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} = \frac{f_l(f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_4 X_l + r_5 Y_l + f_l r_6)}, \end{aligned}$$

其中, (x, y, z) 表示每一个 LED 的第一空间三维坐标, (X_l, Y_l) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助左相机中的图像坐标, (X_r, Y_r) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助右相机中的图像坐标; 由前述可知, 所述视觉辅助双目相机的标定参数包括: 视觉辅助左相机的有效焦距 f_l , 视觉辅助右相机的有效焦距 f_r , 还包括所述视

觉辅助左相机和视觉辅助右相机之间的旋转矩阵 $R_1 = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 、平移矩阵 $T_1 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 。

步骤 S4, 利用所述视觉辅助相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像以及此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图像, 并结合预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时的空间三维坐标以及未被遮挡的 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标;

结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标;

具体地, 通过采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像, 从而得到所述分辨率板上的圆形标志点的圆心在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标; 由所述圆形标志点的圆心的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时的空间三维坐标。同时, 通过采集此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图像, 从而得到所述 LED 阵列中未被载物台遮挡的 LED 阵列的图像坐标, 由未被遮挡的所述 LED 阵列的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出未被遮挡的所述 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标。

具体地, 由于所述 LED 阵列置于所述分辨率板下时, 所述视觉辅助相机只能观察到所述 LED 阵列的一部分, 一部分图像只能得到 LED 阵列中一部分的空间三维坐标; 而所述 LED 阵列在步骤 S3 位置姿态下即未置于所述分辨率板下时, 可以得到所述 LED 阵列所有的空间三维坐标; 那么, 为了得到置于所述分辨率板下的 LED 阵列的全部的空间三维坐标, 需要将未置于所述分辨率板下的 LED 阵列的空间三维坐标转换到步骤 S4 位置姿态下, 其对应关系就是找到 S3 与 S4 中对应 LED 的坐标关系, 经旋转和平移求出变换关系。

具体地, 所述步骤 S4 中, 所述结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标, 包括:

利用所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标计算拟合得到旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 , 并利用如下公式计算得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标:

$$(X, Y, Z)^T = R_2 \cdot (x, y, z)^T + T_2$$

其中, (x, y, z) 表示第一空间三维坐标, (X, Y, Z) 表示第二空间三维坐标。

步骤 S5, 根据所述圆形标志点圆心的空间三维坐标以及所述显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标的关系计算所述显微视场中心的空间三维坐标;

并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度 z 以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标 x 、 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板的空位位置 (x, y, z) 标定;

同时结合所述显微视场中心的空间三维坐标和照明区域中 LED 阵列的标定结果计算每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标。

具体地, 所述步骤 S5 中, 根据显微视场中心到临近的圆形标志点圆心 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 的实际物理长度 d_1 、 d_2 以及两者的共面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$, 计算出显微视场中心的空间三维坐标 (x_0, y_0, z_0) ;

$$\begin{aligned} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 &= d_1^2 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2 &= d_2^2 \\ Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D &= 0 \end{aligned}$$

其中, d_1 、 d_2 根据计算出的显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标计算而得; 显微视场中心和圆形标志点所在的平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 通过所述圆形标志点圆心的空间三维坐标拟合得出; 通过解上面三个方程可以

计算出显微视场中心的空间三维坐标 (x_0, y_0, z_0) 。

进一步地, 利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 的高度 z 以及投影到所述拟合平面的横坐标 x 和纵坐标 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板聚焦位置时的空间位置 (x, y, z) 标定;

进一步地, 以显微视场中心所在平面建立坐标系, 计算每一个 LED 对应有待恢复高分辨率频谱中的空间频率,

$$u_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_{m,n} - x_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}$$

$$v_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_{m,n} - y_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}$$

其中, $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ 为照明区域中第 m 行第 n 列的 LED 用视觉辅助标定的结果, $(u_{m,n}, v_{m,n})$ 对应第 m 行第 n 列的 LED 在待恢复高频分辨率频谱中的位置坐标。

本发明提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法, 进行傅里叶叠层成像位置标定, 因为标定结果是通过视觉辅助计算得出, 这样就减小了实验光路上调节对准的难度; 同时, 通过标定结果可以计算出每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的准确位置, 避免了位置偏差给恢复结果带来的影响。

为了测试本发明提出的一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法的实用性, 我们分别用 USAF1951 分辨率板和人血细胞进行傅里叶叠层实验, 图 4“+”表示经视觉辅助标定 LED 阵列空间位置, “*”表示传统傅里叶叠层成像中 LED 阵列空间位置; 图 5(a)表示用传统傅里叶叠层成像方法重建分辨率板结果, 图 5(b)表示经过视觉辅助位置标定之后重建分辨率板结果; 图 6(a)表示用传统傅里叶叠层成像重建人血细胞结果, 图 6(b)表示经过视觉辅助位置标定之后重建人血细胞结果。从两组实验对比中可以看出, 经过视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定之后的重建结果能够有效避免传统方法中空间位置存在偏差的问题, 不需要反复调节光路对准, 并同时提高了传统傅里叶叠层成像的恢复质量。

本发明还提供了一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定装置, 所述傅里

叶叠层成像位置标定装置运用于傅里叶叠层成像位置标定系统，所述标定系统包括：傅里叶叠层成像装置 1 和视觉辅助双目相机 2，所述傅里叶叠层成像装置 1 包括显微图像采集相机 11、显微镜 12（图中所述显微图像采集相机 11 下方依次示出了透镜 121 和物镜 122）、载物台（图中未示出）、贴有圆形标志点的分辨率板 13 和 LED 阵列 14，所述分辨率板 13 置于所述载物台上，所述显微图像采集相机 11 位于所述载物台正上方，所述 LED 阵列 14 位于所述载物台正下方，并与所述载物台所在平面平行，所述视觉辅助双目相机 2 包括：视觉辅助左相机和视觉辅助右相机，所述视觉辅助左相机、视觉辅助右相机位于所述傅里叶叠层成像装置的正前方，如图 7 所示，所述装置包括：

图像像素坐标提取模块 1，用于利用所述显微图像采集相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板的图像，并结合圆形标志点提取算法提取所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标；

具体地，所述图像像素坐标提取模块 1 中，所述圆形标志点提取算法具体为：利用图像处理中 canny 算子检测圆形标志点边缘图像坐标 (x, y) 并拟合出椭圆方程 $x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0$ ，其中参数 B 、 C 、 D 、 E 和 F 由拟合得出，计算所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标 (x, y) 公式为：

$$x = \frac{BE - CD}{C - B^2}$$

$$y = \frac{BD - E}{C - B^2}。$$

实际物理尺寸坐标计算模块 2，用于利用所述显微图像采集相机采集图像，得到所述图像的显微视场中心点的图像像素坐标，利用三坐标仪测出所述贴有圆形标志点的分辨率板上每一级每一组元素的实际物理尺寸坐标，通过建立图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系，计算出所述显微视场中心点和所述圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标；

具体地，所述图像像素坐标提取模块 2 中，建立的图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系为：

$$\begin{aligned}
x_0 &= x_{center} + (u_0 - u_{center}) \cdot dx \\
y_0 &= y_{center} + (v_0 - v_{center}) \cdot dy \\
x_{circle} &= x_{center} + (u_{circle} - u_{center}) \cdot dx \\
y_{circle} &= y_{center} + (v_{circle} - v_{center}) \cdot dy
\end{aligned}$$

其中, (x_0, y_0) 表示显微视场中心的实际物理尺寸坐标, (x_{circle}, y_{circle}) 表示圆形标志点圆心的实际物理尺寸坐标, (u_{center}, v_{center}) 表示选定的图像坐标系的中心图像坐标, (x_{center}, y_{center}) 表示选定的图像坐标系的物理尺寸坐标, (u_0, v_0) 表示显微视场中心点的图像像素坐标, (u_{circle}, v_{circle}) 表示圆形标志点圆心的图像像素坐标, d_x 、 d_y 分别为实际物理尺寸坐标系中 x 、 y 方向上的单位物理尺寸。

第一计算模块 3, 用于利用所述视觉辅助双目相机采集未置于所述分辨率板下的所述 LED 阵列点亮时的图像, 从而得到所述 LED 阵列中的每一个 LED 在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标, 由每一个 LED 的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出所述 LED 阵列的每一个 LED 的第一空间三维坐标;

具体地, 所述第一计算模块 3 中, 计算所述第一空间三维坐标的公式为:

$$\begin{aligned}
x &= z X_l / f_l \\
y &= z Y_l / f_l \\
z &= \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} = \frac{f_l(f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_4 X_l + r_5 Y_l + f_l r_6)},
\end{aligned}$$

其中, (x, y, z) 表示每一个 LED 的第一空间三维坐标, (X_l, Y_l) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助左相机中的图像坐标, (X_r, Y_r) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助右相机中的图像坐标, 所述视觉辅助双目相机的标定参数包括: 视觉辅助左相机的有效焦距 f_l , 视觉辅助右相机的有效焦距 f_r , 还包括所述视觉辅助左相机

和视觉辅助右相机之间的旋转矩阵 $R_l = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 、平移矩阵 $T_l = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 。

第二计算模块 4, 用于利用所述视觉辅助相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像以及此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图

像，并结合预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时的空间三维坐标以及未被遮挡的 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标；

结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标；

所述第二计算模块 4 中，计算 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标的公式为：

$$(X, Y, Z)^T = R_2 \cdot (x, y, z)^T + T_2$$

其中， (x, y, z) 表示第一空间三维坐标， (X, Y, Z) 表示第二空间三维坐标，旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 可以利用所述第一计算模块和所述第二计算模块的两个位置状态下，照明 LED 阵列对应的第一空间三维坐标和第二空间三维坐标计算拟合得到。

标定模块 5，用于根据所述圆形标志点圆心的空间三维坐标以及所述显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标的关系计算所述显微视场中心的空间三维坐标；并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度 z 以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标 x 、 y ，完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板的空间位置 (x, y, z) 标定；同时结合所述显微视场中心的空间三维坐标和照明区域中 LED 阵列的标定结果计算每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标。

具体地，所述标定模块 5，用于根据显微视场中心到临近的圆形标志点圆心 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 的实际物理长度 d_1 、 d_2 以及两者的共面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ ，计算出显微视场中心的空间三维坐标 (x_0, y_0, z_0) ，

$$\begin{aligned} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 &= d_1^2 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2 &= d_2^2 \\ Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D &= 0 \end{aligned}$$

其中, d_1 、 d_2 根据计算出的显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标计算而得;显微视场中心和圆形标志点所在的平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 通过所述圆形标志点圆心的空间三维坐标拟合得出;

并利用所述显微视场中心的空間三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空間三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 的高度 z 以及投影到所述拟合平面的横坐标 x 和纵坐标 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板聚焦位置时的空間位置 (x, y, z) 标定;

然后,以显微视场中心所在平面建立坐标系,计算每一个 LED 对应在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标,

$$u_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_{m,n} - x_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}$$

$$v_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_{m,n} - y_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}$$

其中, $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ 为照明区域中第 m 行第 n 列的 LED 用视觉辅助标定的结果, $(u_{m,n}, v_{m,n})$ 对应第 m 行第 n 列的 LED 在待恢复高频分辨率频谱中的位置坐标。

以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定方法，其特征在于，所述傅里叶叠层成像位置标定方法运用于傅里叶叠层成像位置标定系统，所述标定系统包括：傅里叶叠层成像装置和视觉辅助双目相机，所述傅里叶叠层成像装置包括显微图像采集相机、显微镜、载物台、贴有圆形标志点的分辨率板和 LED 阵列，所述分辨率板置于所述载物台上，所述显微图像采集相机位于所述载物台正上方，所述 LED 阵列位于所述载物台正下方，并与所述载物台所在平面平行，所述视觉辅助双目相机包括：视觉辅助左相机和视觉辅助右相机，所述视觉辅助左相机、视觉辅助右相机位于所述傅里叶叠层成像装置的正前方，所述方法包括：

步骤 S1，利用所述显微图像采集相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板的图像，并结合圆形标志点提取算法提取所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标；

步骤 S2，利用所述显微图像采集相机采集图像，得到所述图像的显微视场中心点的图像像素坐标，利用三坐标仪测出所述贴有圆形标志点的分辨率板上每一级每一组元素的实际物理尺寸坐标，通过建立图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系，计算出所述显微视场中心点和所述圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标；

步骤 S3，利用所述视觉辅助双目相机采集未置于所述分辨率板下的所述 LED 阵列点亮时的图像，从而得到所述 LED 阵列中的每一个 LED 在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标，由每一个 LED 的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出所述 LED 阵列的每一个 LED 的第一空间三维坐标；

步骤 S4，利用所述视觉辅助相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像以及此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图像，并结合预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时

的空间三维坐标以及未被遮挡的 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标;

结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标;

步骤 S5, 根据所述圆形标志点圆心的空间三维坐标以及所述显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标的关系计算所述显微视场中心的空间三维坐标;

并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度 z 以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标 x 、 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板的空間位置 (x, y, z) 标定;

同时结合所述显微视场中心的空间三维坐标和照明区域中 LED 阵列的标定结果计算每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标。

2、如权利要求 1 所述的傅里叶叠层成像位置标定方法, 其特征在于, 所述步骤 S1 中, 所述圆形标志点提取算法具体为: 利用图像处理中 canny 算子检测圆形标志点边缘图像坐标 (x, y) 并拟合出椭圆方程 $x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0$, 其中参数 B 、 C 、 D 、 E 和 F 由拟合得出, 计算所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标 (x, y) 公式为:

$$x = \frac{BE - CD}{C - B^2}$$

$$y = \frac{BD - E}{C - B^2}。$$

3、如权利要求 1 所述的傅里叶叠层成像位置标定方法, 其特征在于, 所述步骤 S2 中, 建立的图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系为:

$$x_0 = x_{center} + (u_0 - u_{center}) \cdot dx$$

$$y_0 = y_{center} + (v_0 - v_{center}) \cdot dy$$

$$x_{circle} = x_{center} + (u_{circle} - u_{center}) \cdot dx$$

$$y_{circle} = y_{center} + (v_{circle} - v_{center}) \cdot dy$$

其中, (x_0, y_0) 表示显微视场中心的实际物理尺寸坐标, (x_{circle}, y_{circle}) 表示圆形标志点圆心的实际物理尺寸坐标, (u_{center}, v_{center}) 表示选定的图像坐标系的中心

图像坐标, (x_{center}, y_{center}) 表示选定的图像坐标系的物理尺寸坐标, (u_0, v_0) 表示显微视场中心点的图像像素坐标, (u_{circle}, v_{circle}) 表示圆形标志点圆心的图像像素坐标, d_x 、 d_y 分别为实际物理尺寸坐标系中 x 、 y 方向上的单位物理尺寸。

4、如权利要求 1 所述的傅里叶叠层成像位置标定方法, 其特征在于, 所述步骤 S3 中, 计算所述第一空间三维坐标的公式为:

$$\begin{aligned} x &= z X_l / f_l \\ y &= z Y_l / f_l \\ z &= \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} = \frac{f_l(f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_4 X_l + r_5 Y_l + f_l r_6)}, \end{aligned}$$

其中, (x, y, z) 表示每一个 LED 的第一空间三维坐标, (X_l, Y_l) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助左相机中的图像坐标, (X_r, Y_r) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助右相机中的图像坐标, 所述视觉辅助双目相机的标定参数包括: 视觉辅助左相机的有效焦距 f_l , 视觉辅助右相机的有效焦距 f_r , 还包括所述视觉辅助左相机

和视觉辅助右相机之间的旋转矩阵 $R_1 = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 、平移矩阵 $T_1 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$;

所述步骤 S4 中, 所述结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标, 包括:

利用所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标计算拟合得到旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 , 并利用如下公式计算得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标:

$$(X, Y, Z)^T = R_2 \cdot (x, y, z)^T + T_2$$

其中, (x, y, z) 表示第一空间三维坐标, (X, Y, Z) 表示第二空间三维坐标。

5、如权利要求 1 所述的傅里叶叠层成像位置标定方法, 其特征在于, 所述步骤 S5 中, 根据显微视场中心到临近的圆形标志点圆心 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 的

实际物理长度 d_1 、 d_2 以及两者的共面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ ，计算出显微视场中心的空间三维坐标 (x_0, y_0, z_0) ，

$$\begin{aligned}(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 &= d_1^2 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2 &= d_2^2 \\ Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D &= 0\end{aligned}$$

其中， d_1 、 d_2 根据计算出的显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标计算而得；显微视场中心和圆形标志点所在的平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 通过所述圆形标志点圆心的空间三维坐标拟合得出；

利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 的高度 z 以及投影到所述拟合平面的横坐标 x 和纵坐标 y ，完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板聚焦位置时的空间位置 (x, y, z) 标定；

以显微视场中心所在平面建立坐标系，计算每一个 LED 对应应在待恢复高分辨率频谱中的空间频率，

$$\begin{aligned}u_{m,n} &= -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_{m,n} - x_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}} \\ v_{m,n} &= -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_{m,n} - y_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}\end{aligned}$$

其中， $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ 为照明区域中第 m 行第 n 列的 LED 用视觉辅助标定的结果， $(u_{m,n}, v_{m,n})$ 对应第 m 行第 n 列的 LED 在待恢复高频分辨率频谱中的位置坐标。

6、一种视觉辅助的傅里叶叠层成像位置标定装置，其特征在于，所述傅里叶叠层成像位置标定装置运用于傅里叶叠层成像位置标定系统，所述标定系统包括：傅里叶叠层成像装置和视觉辅助双目相机，所述傅里叶叠层成像装置包括显微图像采集相机、显微镜、载物台、贴有圆形标志点的分辨率板和 LED 阵列，所述分辨率板置于所述载物台上，所述显微图像采集相机位于所述载物台正上方，所述 LED 阵列位于所述载物台正下方，并与所述载物台所在平面平行，所述视觉辅助双目相机包括：视觉辅助左相机和视觉辅助右相机，所述视觉辅

助左相机、视觉辅助右相机位于所述傅里叶叠层成像装置的正前方，所述装置包括：

图像像素坐标提取模块，用于利用所述显微图像采集相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板的图像，并结合圆形标志点提取算法提取所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标；

实际物理尺寸坐标计算模块，用于利用所述显微图像采集相机采集图像，得到所述图像的显微视场中心点的图像像素坐标，利用三坐标仪测出所述贴有圆形标志点的分辨率板上每一级每一组元素的实际物理尺寸坐标，通过建立图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系，计算出所述显微视场中心点和所述圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标；

第一计算模块，用于利用所述视觉辅助双目相机采集未置于所述分辨率板下的所述 LED 阵列点亮时的图像，从而得到所述 LED 阵列中的每一个 LED 在所述视觉辅助双目相机中的图像坐标，由每一个 LED 的图像坐标以及预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出所述 LED 阵列的每一个 LED 的第一空间三维坐标；

第二计算模块，用于利用所述视觉辅助相机采集所述贴有圆形标志点的分辨率板在聚焦位置时的图像以及此时置于所述分辨率板下的 LED 阵列的图像，并结合预先标定的所述视觉辅助双目相机的标定参数计算出圆形标志点圆心在聚焦位置时的空间三维坐标以及未被遮挡的 LED 阵列在聚焦位置时的第二空间三维坐标；

结合所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标得到 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标；

标定模块，用于根据所述圆形标志点圆心的空间三维坐标以及所述显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标的关系计算所述显微视场中心的空间三维坐标；

并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置

时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面的高度 z 以及 LED 投影到拟合平面的横纵坐标 x 、 y ，完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板的空間位置 (x, y, z) 标定；

同时结合所述显微视场中心的空间三维坐标和照明区域中 LED 阵列的标定结果计算每一个 LED 在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标。

7、如权利要求 6 所述的傅里叶叠层成像位置标定装置，其特征在于，所述图像像素坐标提取模块中，所述圆形标志点提取算法具体为：利用图像处理中 canny 算子检测圆形标志点边缘图像坐标 (x, y) 并拟合出椭圆方程 $x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0$ ，其中参数 B 、 C 、 D 、 E 和 F 由拟合得出，计算所述分辨率板的图像中圆形标志点的圆心的图像像素坐标 (x, y) 公式为：

$$x = \frac{BE - CD}{C - B^2}$$

$$y = \frac{BD - E}{C - B^2}。$$

8、如权利要求 6 所述的傅里叶叠层成像位置标定装置，其特征在于，所述图像像素坐标提取模块中，建立的图像坐标系与实际物理尺寸坐标系之间的关系为：

$$x_0 = x_{center} + (u_0 - u_{center}) \cdot dx$$

$$y_0 = y_{center} + (v_0 - v_{center}) \cdot dy$$

$$x_{circle} = x_{center} + (u_{circle} - u_{center}) \cdot dx$$

$$y_{circle} = y_{center} + (v_{circle} - v_{center}) \cdot dy$$

其中， (x_0, y_0) 表示显微视场中心的实际物理尺寸坐标， (x_{circle}, y_{circle}) 表示圆形标志点圆心的实际物理尺寸坐标， (u_{center}, v_{center}) 表示选定的图像坐标系的中心图像坐标， (x_{center}, y_{center}) 表示选定的图像坐标系的物理尺寸坐标， (u_0, v_0) 表示显微视场中心点的图像像素坐标， (u_{circle}, v_{circle}) 表示圆形标志点圆心的图像像素坐标， d_x 、 d_y 分别为实际物理尺寸坐标系中 x 、 y 方向上的单位物理尺寸。

9、如权利要求 6 所述的傅里叶叠层成像位置标定装置，其特征在于，所述第一计算模块中，计算所述第一空间三维坐标的公式为：

$$\begin{aligned}
 x &= z X_l / f_l \\
 y &= z Y_l / f_l \\
 z &= \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} = \frac{f_l(f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_4 X_l + r_5 Y_l + f_l r_6)},
 \end{aligned}$$

其中, (x, y, z) 表示每一个 LED 的第一空间三维坐标, (X_l, Y_l) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助左相机中的图像坐标, (X_r, Y_r) 表示每一个 LED 在所述视觉辅助右相机中的图像坐标, 所述视觉辅助双目相机的标定参数包括: 视觉辅助左相机的有效焦距 f_l , 视觉辅助右相机的有效焦距 f_r , 还包括所述视觉辅助左相机

和视觉辅助右相机之间的旋转矩阵 $R_1 = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 、平移矩阵 $T_1 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$;

所述第二计算模块中, 计算 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标的公式为:

$$(X, Y, Z)^T = R_2 \cdot (x, y, z)^T + T_2$$

其中, (x, y, z) 表示第一空间三维坐标, (X, Y, Z) 表示第二空间三维坐标, 旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 为利用所述第一空间三维坐标和所述第二空间三维坐标计算拟合得到。

10、如权利要求 6 所述的傅里叶叠层成像位置标定装置, 其特征在于, 所述标定模块, 用于根据显微视场中心到临近的圆形标志点圆心 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 的实际物理长度 d_1 、 d_2 以及两者的共面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$, 计算出显微视场中心的空间三维坐标 (x_0, y_0, z_0) ,

$$\begin{aligned}
 (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 &= d_1^2 \\
 (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2 &= d_2^2 \\
 Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D &= 0
 \end{aligned}$$

其中, d_1 、 d_2 根据计算出的显微视场中心和圆形标志点的圆心的实际物理尺寸坐标计算而得; 显微视场中心和圆形标志点所在的平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 通过所述圆形标志点圆心的空间三维坐标拟合得出;

并利用所述显微视场中心的空间三维坐标结合所述 LED 阵列在聚焦位置时的空间三维坐标计算出照明区域每一个 LED 到聚焦位置拟合平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 的高度 z 以及投影到所述拟合平面的横坐标 x 和纵坐标 y , 完成所述 LED 阵列相对所述分辨率板聚焦位置时的空间位置 (x, y, z) 标定;

然后, 以显微视场中心所在平面建立坐标系, 计算每一个 LED 对应应在待恢复高分辨率频谱中的位置坐标,

$$u_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_{m,n} - x_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}$$

$$v_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_{m,n} - y_0}{\sqrt{(x_{m,n} - x_0)^2 + (y_{m,n} - y_0)^2 + z_{m,n}^2}}$$

其中, $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ 为照明区域中第 m 行第 n 列的 LED 用视觉辅助标定的结果, $(u_{m,n}, v_{m,n})$ 对应第 m 行第 n 列的 LED 在待恢复高频分辨率频谱中的位置坐标。

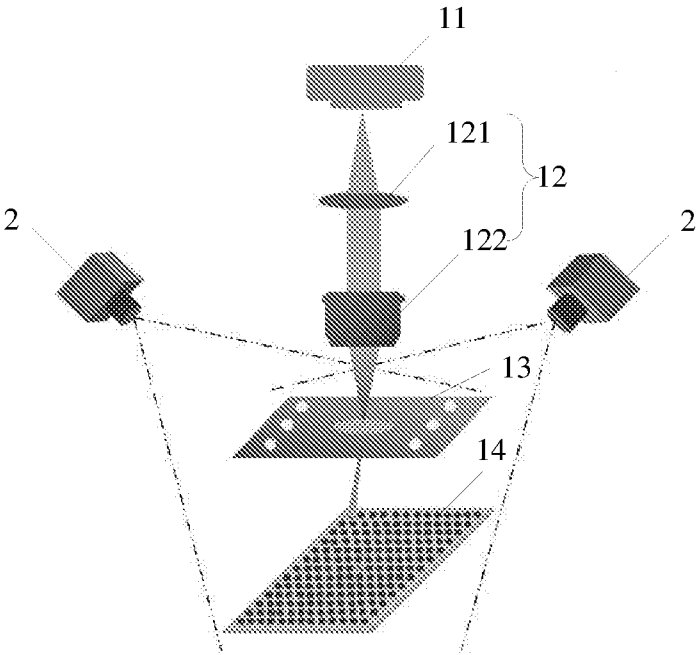


图 1

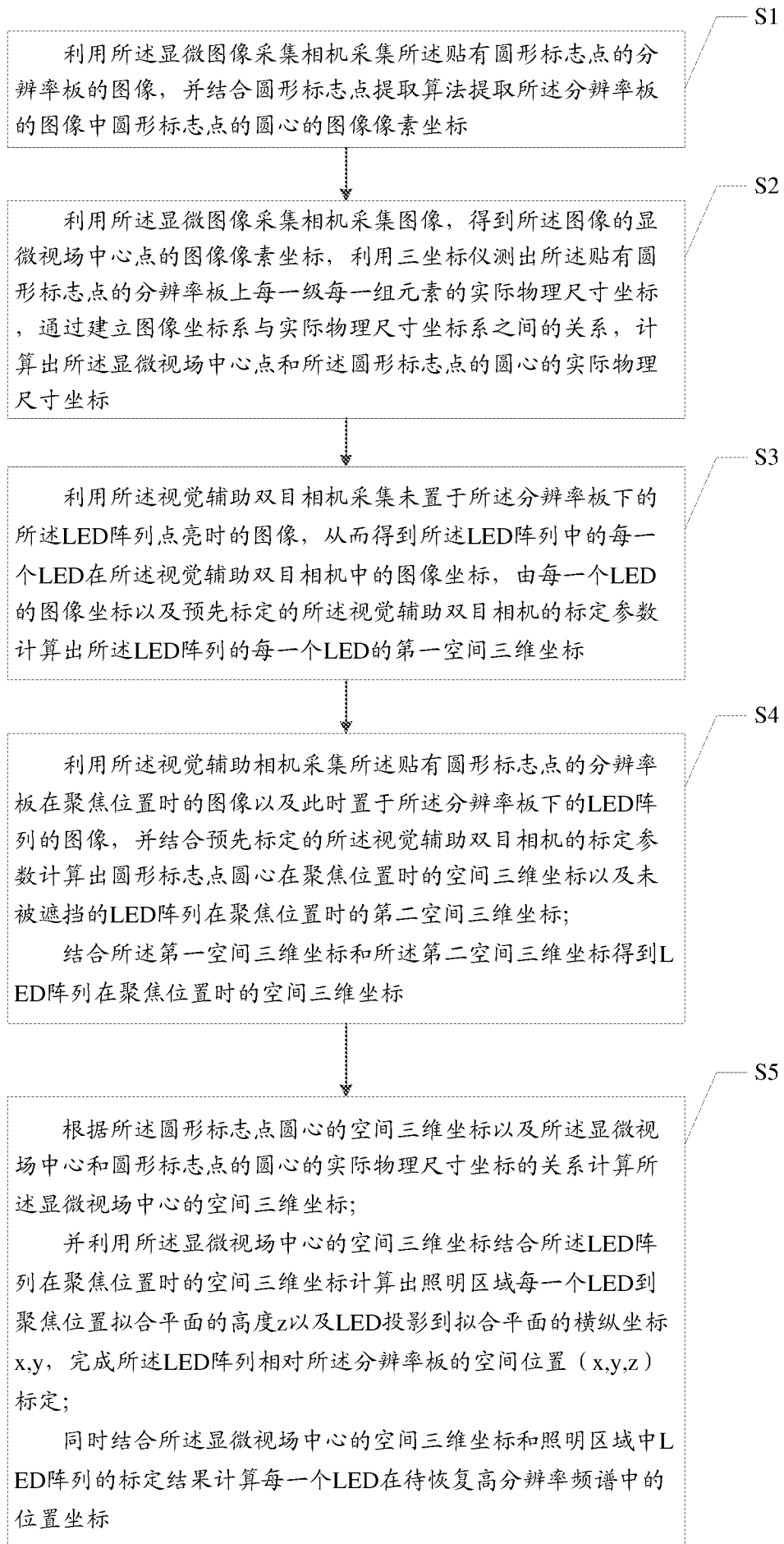


图 2

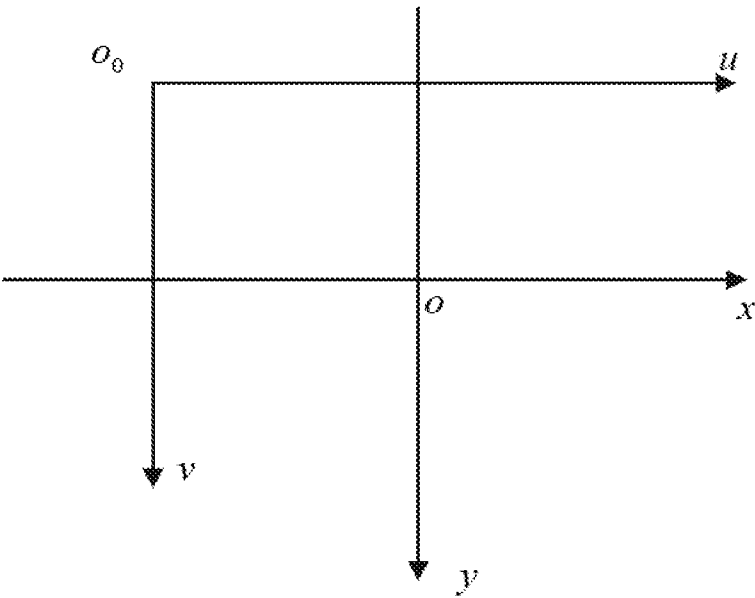


图 3

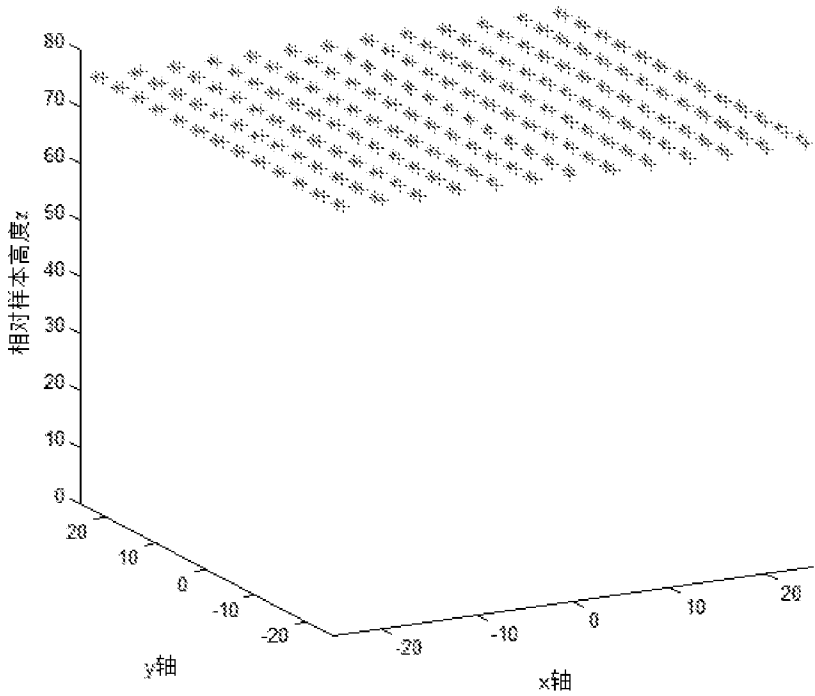


图 4

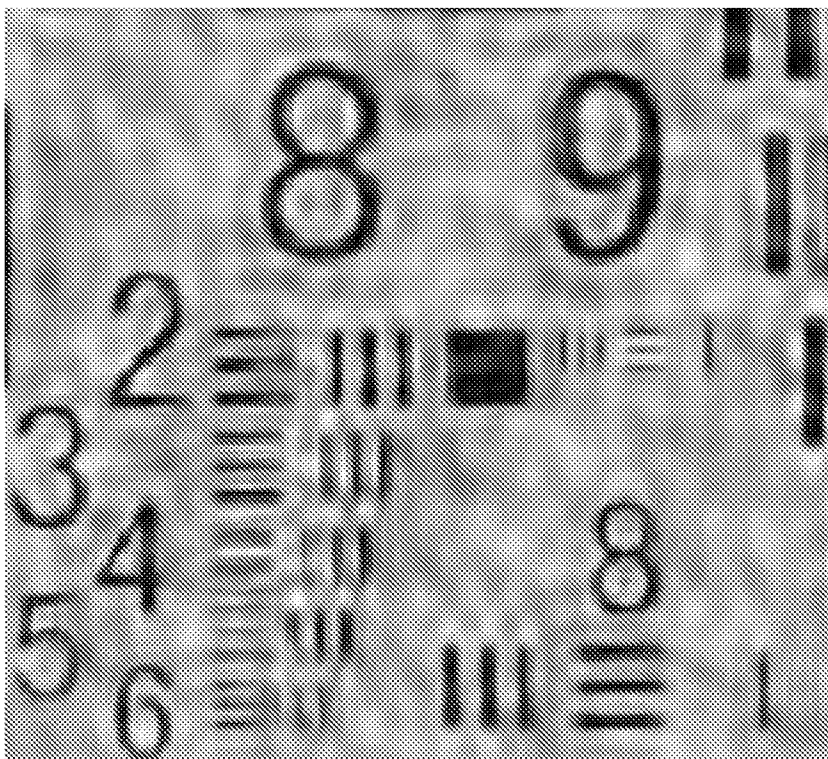


图 5 (a)

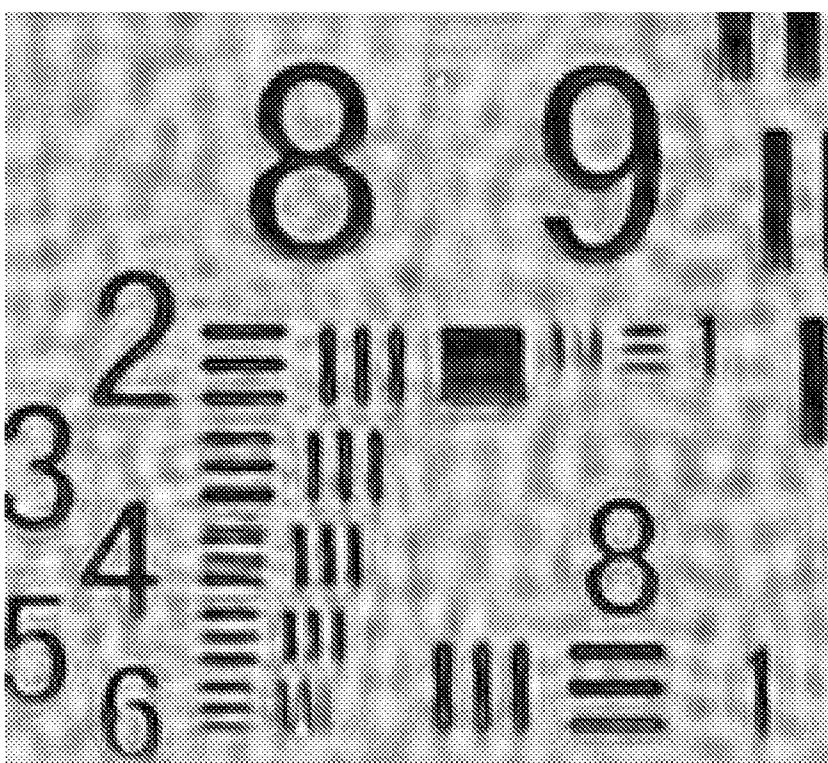


图 5 (b)

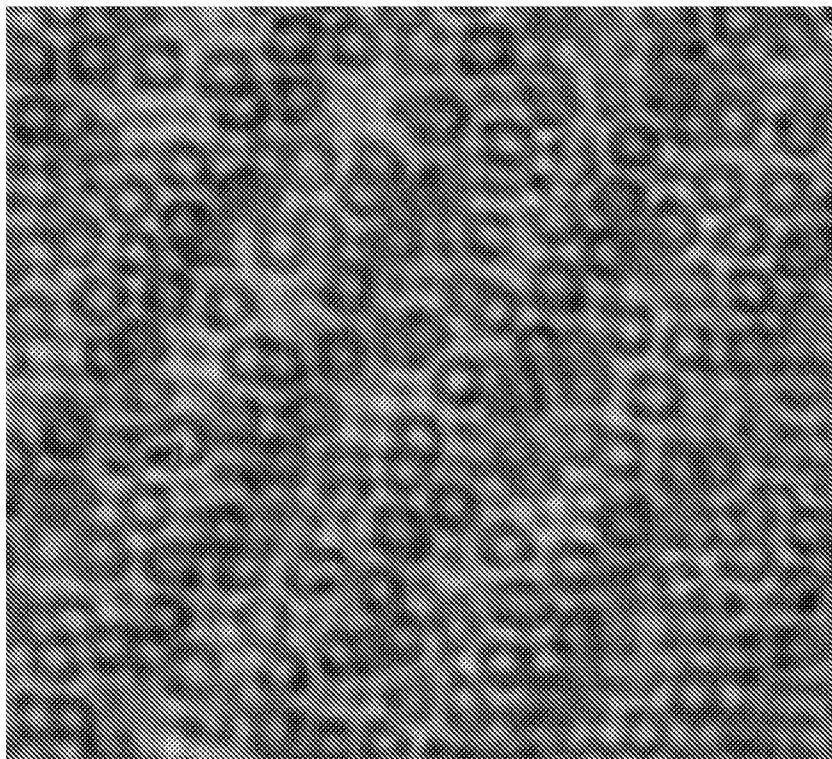


图 6 (a)

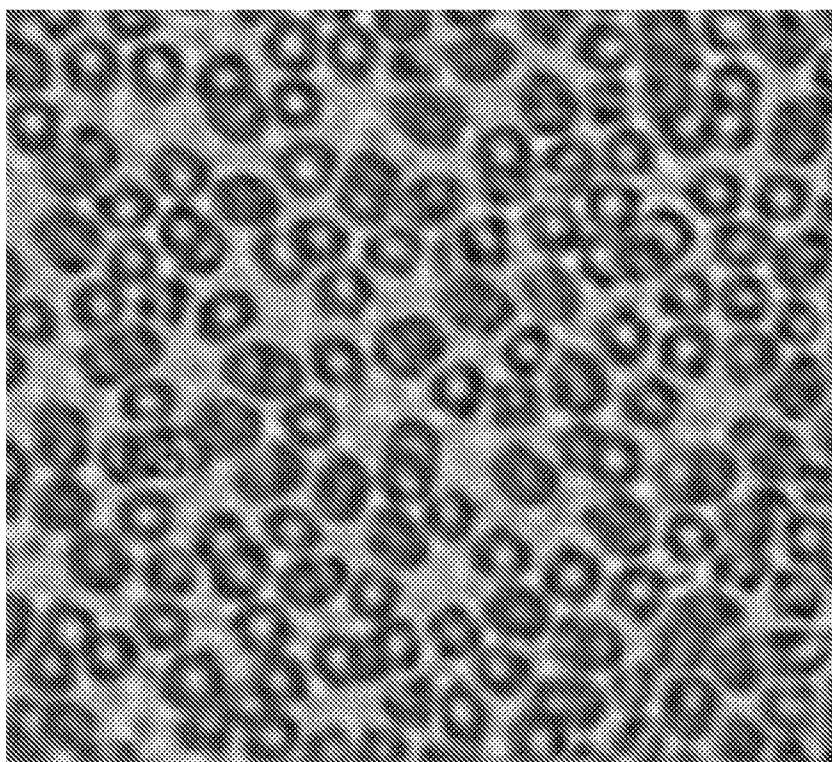


图 6 (b)

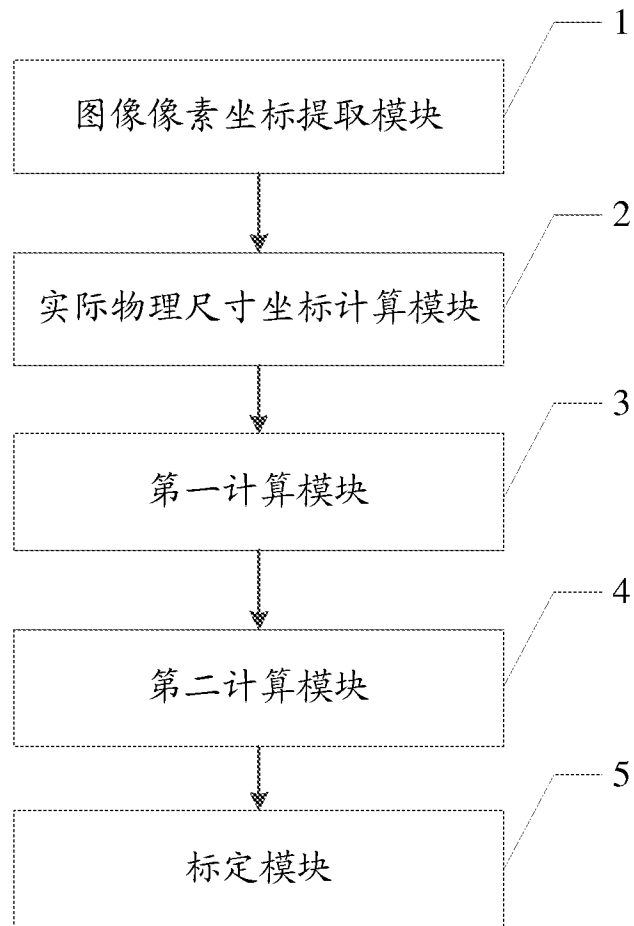


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/106786

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 7/80 (2017.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T; G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; VEN; USTXT; CNKI: 深圳大学, 刘晓利, 李成, 汤其剑, 彭翔, 傅里叶, 傅立叶, 叠层, 显微, 标定, 校准, 配准, 双目, fourier, fourier ptychographic, FPM, laminat+, microscopy, calibrat+, binocular

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107065159 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 18 August 2017 (18.08.2017), claims 1-9, description, paragraphs [0005]-[0015], and figures 1-4	1-10
A	CN 107102430 A (JINAN UNIVERSITY) 29 August 2017 (29.08.2017), entire document	1-10
A	CN 106127767 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 16 November 2016 (16.11.2016), entire document	1-10
A	US 2017178317 A1 (CANON K.K.) 22 June 2017 (22.06.2017), entire document	1-10
A	US 2015317508 A1 (UNIVERSITY OF CONNECTICUT) 05 November 2015 (05.11.2015), entire document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 02 July 2018	Date of mailing of the international search report 09 July 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer LIANG, Tao Telephone No. (86-512) 88996210

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/106786

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 107065159 A	18 August 2017	None	
CN 107102430 A	29 August 2017	None	
CN 106127767 A	16 November 2016	None	
US 2017178317 A1	22 June 2017	JP 2017117462 A	29 June 2017
US 2015317508 A1	05 November 2015	US 9817224 B2	14 November 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/106786

A. 主题的分类 G06T 7/80 (2017.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06T; G02B 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS; CNTXT; VEN; USTXT; CNKI: 深圳大学, 刘晓利, 李成, 汤其剑, 彭翔, 傅里叶, 傅立叶, 叠层, 显微, 标定, 校准, 配准, 双目, fourier, fourier ptychographic, FPM, laminat+, microscopy, calibrat+, binocular																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 107065159 A (南京理工大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-9项, 说明书第[0005]-[0015]段, 附图1-4</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107102430 A (暨南大学) 2017年 8月 29日 (2017 - 08 - 29) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106127767 A (南京理工大学) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2017178317 A1 (CANON KK) 2017年 6月 22日 (2017 - 06 - 22) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2015317508 A1 (UNIV CONNECTICUT) 2015年 11月 5日 (2015 - 11 - 05) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 107065159 A (南京理工大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-9项, 说明书第[0005]-[0015]段, 附图1-4	1-10	A	CN 107102430 A (暨南大学) 2017年 8月 29日 (2017 - 08 - 29) 全文	1-10	A	CN 106127767 A (南京理工大学) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 全文	1-10	A	US 2017178317 A1 (CANON KK) 2017年 6月 22日 (2017 - 06 - 22) 全文	1-10	A	US 2015317508 A1 (UNIV CONNECTICUT) 2015年 11月 5日 (2015 - 11 - 05) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
A	CN 107065159 A (南京理工大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-9项, 说明书第[0005]-[0015]段, 附图1-4	1-10																		
A	CN 107102430 A (暨南大学) 2017年 8月 29日 (2017 - 08 - 29) 全文	1-10																		
A	CN 106127767 A (南京理工大学) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 全文	1-10																		
A	US 2017178317 A1 (CANON KK) 2017年 6月 22日 (2017 - 06 - 22) 全文	1-10																		
A	US 2015317508 A1 (UNIV CONNECTICUT) 2015年 11月 5日 (2015 - 11 - 05) 全文	1-10																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																		
2018年 7月 2日		2018年 7月 9日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																		
中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		梁韬																		
		电话号码 (86-512) 88996210																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/106786

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	107065159	A	2017年 8月 18日	无	
CN	107102430	A	2017年 8月 29日	无	
CN	106127767	A	2016年 11月 16日	无	
US	2017178317	A1	2017年 6月 22日	JP 2017117462	A 2017年 6月 29日
US	2015317508	A1	2015年 11月 5日	US 9817224	B2 2017年 11月 14日