(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

(43) 国际公布日
2016 年 2 月 4 日 (04.02.2016)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2016/015516 A1

(51) 国际专利分类号:
G01B 11/25 (2006.01) *G01B 11/24* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2015/080156

(22) 国际申请日: 2015 年 5 月 29 日 (29.05.2015)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201410367541.8 2014 年 7 月 29 日 (29.07.2014) CN

(71) 申请人: **暨南大学 (JINAN UNIVERSITY)** [CN/CN]; 中国广东省广州市黄埔大道西 601 号, Guangdong 510630 (CN)。

(72) 发明人: **钟金钢 (ZHONG, Jingang)**; 中国广东省广州市黄陂大道西 601 号, Guangdong 520630 (CN)。 **张子邦 (ZHANG, Zibang)**; 中国广东省广州市黄埔大道西 601 号, Guangdong 510630 (CN)。 **马骁 (MA, Xiao)**; 中国广东省广州市黄埔大道西 601 号, Guangdong 510630 (CN)。

(74) 代理人: **广州粤高专利商标代理有限公司 (YOGO PATENT & TRADE MARK AGENCY LIMITED COMPANY)**; 中国广东省广州市科学城科学大道 245 号总部经济区 A6 栋 705 室邱奕才, Guangdong 510000 (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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, 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。

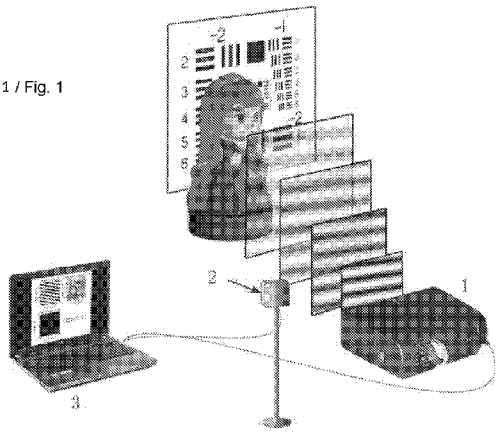
(84) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,

[见续页]

(54) **Title**: OPTICAL IMAGING METHOD USING SINGLE PIXEL DETECTOR

(54) **发明名称** : 一种使用单像素探测器的光学成像方法

图 1 / Fig. 1



(57) **Abstract**: An optical imaging method using a single pixel detector. An image of a target object is expressed by using discrete pixels, and the size of the image is a matrix of M×N pixel. A cosine structured light field generator is used for generating a series of light fields that have different frequencies and are distributed according to cosine, wherein each set of frequencies corresponds to at least three different initial phase φ values; the light fields with cosine distribution that have different frequencies and different initial phases are used to sequentially irradiate the target object; an optical detector (2) is used for sequentially receiving light intensity signals from the target object and then response values of the optical detector (2) are sequentially collected and recorded; a Fourier transform spectrum of the image of the target object is obtained according to the response values; and two-dimensional discrete inverse Fourier transform is performed on the Fourier transform spectrum, so as to reconstruct the image of the target object. According to the method, light fields with a cosine spatial structure that have definite mathematical function analytical expression are adopted; an image analytical reconstruction algorithm is established on the basis of the light fields, the number of measurements can be greatly reduced, and a high-quality reconstructed image can be obtained.

(57) **摘要**:

[见续页]

WO 2016/015516 A1

RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

— 发明人资格(细则 4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种使用单像素探测器的光学成像方法，目标物体的图像用离散化的像素表示，大小为一个 M×N 像素的矩阵，用余弦结构光场发生器生成一系列频率不同的按余弦分布的光场，每一组频率对应有至少三个不同的初位相 φ 值，将这些不同频率、不同初位相的余弦分布光场，依次照射目标物体，用光探测器（2）依次接收来自目标物体的光强信号，再依次采集记录光探测器（2）的响应值，根据响应值获得目标物体图像的傅立叶变换谱，对傅立叶变换谱进行二维离散反傅立叶变换，重建目标物体的图像。该方法采用具有确定的数学函数解析表达的余弦空间结构光场，在此基础上，构建图像解析重建算法，可以大幅减少测量次数，获得高质量重建图像。

说 明 书

一种使用单像素探测器的光学成像方法

技术领域

本发明涉及光学成像技术领域，特别涉及使用单像素探测器的光学成像方法。

背景技术

图像是人类最主要的信息源，光学成像是获取图像的一种主要方式。一个光学成像系统一般由照明单元和探测单元两部分构成。传统光学成像系统对一个非发光的目标物体进行光学成像，一般是将稳定的照明光场照射该物体，再利用透镜将物体表面的反射光汇聚成像在光敏单元成二维分布的光敏器件（如摄影胶片、面阵 CCD、面阵 CMOS 等）上，形成目标物体的图像。透镜和光敏器件的性能是影响成像质量主要因素。图像的分辨率受制于光敏器件像素单元的尺寸和透镜的性能。为了追求更高的图像分辨率，光敏器件单个像素的尺寸应更小。然而，制造更小的像素尺寸在工艺上有困难，且会降低信噪比。另外，光敏器件的光谱特性对一些特殊光波段的成像具有较大困难，如目前基于硅基半导体的 CCD、CMOS 等成像器件等，在红外、太赫兹、X 射线等波段的成像存在局限。在经典成像模型中，只有直接从目标物体射出并进入透镜的光线，带有目标物体的空间分布信息，能被透镜汇集成像；而从目标物体射出，又经其它介质散射后进入透镜的光线，失去了目标物体的空间分布信息，对成像无任何贡献，且形成图像的噪声。因此基于经典成像模型的传统相机对隐藏在散射介质后的目标物体的成像（如隔着毛玻璃成像），具有非常大的困难。

近年来，一种在成像机理上和传统成像技术有着本质区别的单像素成像技术，有可能突破经典成像模型在一些特殊成像领域的局限性，越来越受到人们的重视。该技术利用单像素光敏器件（如单个光电二极管）获得的成像信号，通过计算机计算实现成像，也称计算成像技术。单像素成像技术最早源于利用量子纠缠效应的鬼成像技术[T.B. Pittman, Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement. *Physical Review A*. **52**, R3429 (1995).]，后来发展出利用热光的单像素鬼成像技术[R.S. Bennink, S.J. Bentley, R.W. Boyd, "Two-Photon" coincidence imaging with a classical source. *Physical Review Letters*. **89**,113601 (2002)；陈明亮等，基于稀疏阵赝热光系统的强度关联成像研究，光学学报，32 卷，5 期，0503001，2012]以及基于压缩感知的单像素成像技术[M.F. Duarte, M.A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K.F. Kelly, R.G. Baraniuk, Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*. **25**, 83-91 (2008)；陈涛，应用压缩传感理论的单像素相机成像系统，光学精密工程，20 卷，11 期，2523-2530 页，2012]。

尽管单像素成像技术的研究已超过十年时间，但就成像质量而言，远没有达到目前传统

光学成像系统的水平。对基于热光源的经典关联特性的单像素鬼成像技术而言，目前采用的热光源，一般是用激光束通过一毛玻璃或用投影仪生成的散斑光场；而对基于压缩感知的单像素成像技术而言，用来进行压缩感知测量的测量矩阵，要求是稀疏表示的随机矩阵。不管是散斑光场还是随机矩阵，都不能用确定的数学函数解析表达，那么与之对应的图像重建算法也不是建立在具有严格解析表达的数学模型基础上，利用基于相关统计数学模型的图像重建算法。基于热光源的经典关联特性的单像素鬼成像技术，需通过高达百万次的测量值重建图像，而利用压缩感知理论，可以适当减小测量次数。

发明内容

本发明的目的是为了解决目前单像素成像技术的成像质量不高的现状，提出一种高成像质量的使用单像素探测器的光学成像方法，其技术核心为采用具有确定的数学函数解析表达的余弦空间结构光场取代热光源鬼成像技术中的散斑光场，在此基础上，构建图像解析重建算法，可以大幅减小测量次数，获得了高质量重建图像。

本发明的技术方案如下：

一种使用单像素探测器的光学成像方法，目标物体的图像用离散化的像素表示，大小为一个 $M \times N$ 像素的矩阵，目标物体的实际大小为 $M\delta_x \times N\delta_y$ 的一个矩形，其中 M 、 N 为正整数，δ_x 、δ_y 分别为一个像素在 x 、 y 方向的几何尺寸；其特征在于：用余弦结构光场发生器生成一系列频率不同的按余弦分布的光场，该光场在目标物体所在平面的光强分布表示为：$P(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+\phi)$，其中 a 是余弦光场的平均光强、b 是对比度，a 、b 取正数； x 、 y 是目标物体的像素点坐标，x 取 $0\sim M-1$ 之间的整数、y 取 $0\sim N-1$ 之间的整数；f_x 、f_y 分别是 x 、y 方向的频率，f_x 、f_y 用归一化频率表示为 $\frac{\alpha}{M}$ 、$\frac{\beta}{N}$，其中 α 为 $0\sim M-1$ 之间的整数、 β 为 $0\sim N-1$ 之间的整数； ϕ 是初位相；每一组 (f_x,f_y) 频率对应有至少三个不同的初位相 ϕ 值，将这些不同频率、不同初位相的余弦分布光场，依次照射目标物体，用光探测器依次接收来自目标物体的光强信号，再依次采集记录光探测器的响应值，根据响应值获得目标物体图像的傅立叶变换谱 $D_{fp}(f_x,f_y)$，对傅立叶变换谱 $D_{fp}(f_x,f_y)$ 进行二维离散反傅立叶变换，重建目标物体的图像 $I(x,y)$。

进一步的，每一组 (f_x,f_y) 频率对应有 Q 个等步长初位相：$\phi=0$ 、$\frac{2\pi}{Q}$ 、…、$(Q-1)\frac{2\pi}{Q}$，Q 为大于或等于3的整数，光探测器依次接收到来自目标物体光强信号的响应值分别表示为：

$D_0(f_x,f_y)$、$D_1(f_x,f_y)$、…、$D_{Q-1}(f_x,f_y)$，依据公式：

$$D_{fp}(f_x,f_y)=\sum_{q=0}^{Q-1}D_q\left(f_x,f_y\right)\cdot\cos\left(\frac{2\pi q}{Q}\right)+j\sum_{q=0}^{Q-1}D_q\left(f_x,f_y\right)\cdot\sin\left(\frac{2\pi q}{Q}\right)$$

获得目标物体图像的傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$，其中j是虚数单位。

每一组(f_x,f_y)频率也可以对应其它的初位相，获得目标物体图像的傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$的公式要作相应的改变，如每组频率对应三个初位相，初相位分别为$-\frac{\pi}{2}$，0，$+\frac{\pi}{2}$，光探测器依次接收到来自目标物体光强信号的响应值分别表示为：$D_1(f_x,f_y)$、$D_2(f_x,f_y)$、$D_3(f_x,f_y)$，依据公式：

$$D_{fp}(f_x,f_y)=\left[2D_2\left(f_x,f_y\right)-D_1\left(f_x,f_y\right)-D_3\left(f_x,f_y\right)\right]+\mathrm{j}\cdot\left[D_3\left(f_x,f_y\right)-D_1\left(f_x,f_y\right)\right]$$

获得目标物体图像的傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$，其中j是虚数单位。

进一步的，依据公式

$$I\left(x,y\right)=\sum_{f_x=0}^{(M-1)/M}\sum_{f_y=0}^{(N-1)/N}D_{fp}(f_x,f_y)\cdot\exp\left[\mathrm{j}2\pi\left(f_xx+f_yy\right)\right]$$

对傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$进行二维离散反傅立叶变换。根据上述二维离散反傅立叶变换的公式可以获得质量非常高的重建图像，但是其投影采样的次数也是相当大的，实际应用中，也可以用较少的投影采样次数获得重建图像，但是重建图像的质量会差些。

本发明的理论依据如下：

投影仪、干涉仪等余弦结构光场发生器生成一系列频率不同的余弦分布的光场，该光场在目标物体所在平面的光强分布表示为：

$$P_\phi(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_xx+2\pi f_yy+\phi),\qquad(1)$$

其中a是余弦光场的平均光强、b是对比度，f_x、f_y是频率，ϕ是初位相，x、y是目标物体的坐标。光场照射目标物体后的反射光场的总光强为：

$$E_\phi\left(f_x,f_y\right)=\iint_S R\left(x,y\right)P_\phi\left(x,y;f_x,f_y\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y,\qquad(2)$$

其中$R(x,y)$、S分别是目标物体表面的反射率和面积。一个光探测器探测到的光响应值表示为：

$$D_\phi\left(f_x,f_y\right)=D_n+k\cdot E_\phi\left(f_x,f_y\right),\qquad(3)$$

其中，D_n是背景照明在探测器位置引起的光响应值，k是一个和探测器有关的因子。由方程（1）表示的同一频率的光场对应有至少三个初位相不同的光场。将这些不同频率、不同初位相的余弦分布光场，依次照射目标物体，用光探测器（如：光电二极管、光电池、光电倍增管等单像素光探测器，CCD、CMOS 等多像素光探测器）依次接收来自目标物体的光强信号，再依次采集记录探测器的响应值。利用这些响应值，就可获得目标物体图像的傅立叶变换谱，对傅立叶变换谱进行反傅立叶变换就可以重建目标物体的图像。

以同一频率的光场对应有四个初位相不同的光场为例进一步说明如下。四个初位相依次为0、$\pi/2$、π、$3\pi/2$的光场的照射到目标物体表面的光强表示为：

$$P_1(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+0) \tag{4}$$

$$P_2(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+\pi/2) \tag{5}$$

$$P_3(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+\pi) \tag{6}$$

$$P_4(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+3\pi/2) \tag{7}$$

这四个光场依次照射目标物体时，一个光探测器依次接收到来自目标物体的光信号后的响应值分别表示为：$D_1(f_x,f_y)$、$D_2(f_x,f_y)$、$D_3(f_x,f_y)$、$D_4(f_x,f_y)$。根据方程（2）、（3）有：

$$D_\phi(f_x,f_y)=D_n+a\cdot k\iint_S R(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y+b\cdot k\iint_S R(x,y)\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+\phi)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{8}$$

那么：

$$\begin{aligned}&\left[D_1(f_x,f_y)-D_3(f_x,f_y)\right]+\mathrm{j}\cdot\left[D_2(f_x,f_y)-D_4(f_x,f_y)\right]\\&=2b\cdot k\cdot\iint_S R(x,y)\cdot\left\{\cos\left[2\pi(f_x x+f_y y)\right]-\mathrm{j}\cdot\sin\left[2\pi(f_x x+f_y y)\right]\right\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y,\\&=2b\cdot k\cdot\iint_S R(x,y)\cdot\exp\left[-\mathrm{j}\cdot 2\pi(f_x x+f_y y)\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y\end{aligned} \tag{9}$$

其中 j 是虚数单位。设：

$$C(f_x,f_y)=\iint_S R(x,y)\cdot\exp\left[-\mathrm{j}\cdot 2\pi(f_x x+f_y y)\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{10}$$

那么：

$$\begin{aligned}R(x,y)&=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}C(f_x,f_y)\exp\left[\mathrm{j}2\pi(f_x x+f_y y)\right]\mathrm{d}f_x\mathrm{d}f_y\\&=\frac{1}{2b\cdot k}\cdot\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}D_{fp}(f_x,f_y)\cdot\exp\left[\mathrm{j}\cdot 2\pi(f_x x+f_y y)\right]\mathrm{d}f_x\mathrm{d}f_y\end{aligned} \tag{11}$$

其中：

$$D_{fp}(f_x,f_y)=\left\{\left[D_1(f_x,f_y)-D_3(f_x,f_y)\right]+\mathrm{j}\cdot\left[D_2(f_x,f_y)-D_4(f_x,f_y)\right]\right\} \quad (12)$$

根据方程（11），目标物体的重建图像$I(x,y)$：

$$\begin{aligned} I(x,y)&=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}D_{fp}(f_x,f_y)\cdot\exp\left[\mathrm{j}\cdot 2\pi\left(f_x x+f_y y\right)\right]\mathrm{d}f_x\mathrm{d}f \\ &=2b\cdot k\cdot R(x,y)\end{aligned} \quad (13)$$

显然，对$D_{fp}(f_x,f_y)$进行二维反傅立叶变换重建的目标物体图像与其表面的反射率成成比。

在实际的图像重建过程中，一幅图像需离散化表示。设被光场照明的目标物体的范围用离散化的像素表示，大小为一个$M\times N$的矩阵，目标物体的实际范围为$M\delta_x\times N\delta_y$的一个矩形，其中$M$、$N$为正整数，$\delta_x\times\delta_y$为一个像素的几何尺寸。目标物体图像的傅立叶谱也离散化构成一个$M\times N$的矩阵，每个矩阵元对应的频率(f_x,f_y)用归一化频率表示为$(\frac{\alpha}{M},\frac{\beta}{N})$，其中$\alpha$为$0\sim M-1$之间的整数、$\beta$为$0\sim N-1$之间的整数。

与现有技术相比，本发明采用具有确定的数学函数解析表达的余弦空间结构光场取代热光源鬼成像技术中的散斑光场，在此基础上，构建图像解析重建算法，可以大幅减小测量次数，获得高质量重建图像。

附图说明

图 1 是实验装置示意图；

图 2 是余弦分布图案的三组示例；

图 3 是实施例 1 获得的图像的二维傅里叶频谱；

图 4 是实施例 1 重建的图像结果；

图 5 是实施例 1 在较少投影次数的重建图像结果。

具体实施方式

图 1 是实验装置示意图，由计算机 3 生成一系列频率不同的按余弦分布的光场，通过数字投影仪 1 投射到目标物体，由光探测器 2 采集到光强信号并传输到计算机中进行处理。

图 2 是投影时采用的余弦分布图案的三组示例，显示了不同的频率组合及初位相。

实施例 1

设光场照明目标物体的范围用离散化的像素表示，大小为一个 $M \times N$ 的矩阵，实际的照明目标物体的范围为 $M\delta_x \times N\delta_y$ 的一个矩形，其中 $\delta_x \times \delta_y$ 为一个像素的尺寸。被照射的目标物体图像的傅立叶谱也离散化构成一个 $M \times N$ 的矩阵，每个矩阵元对应的光场的频率 (f_x, f_y) 用归一化频率表示为： $(\frac{\alpha}{M}, \frac{\beta}{N})$，其中 α 为 $0 \sim M-1$ 之间的整数、β 为 $0 \sim N-1$ 之间的整数。一个数字化投影仪可用作余弦光场发生器，计算机控制数字化投影仪生成上述各种频率的初位相分别为 0、$\pi/2$、π、$3\pi/2$ 的余弦光场，照射到目标物体。

利用本发明方法对一复杂场景采用单像素光电探测器进行成像。采用如图 1 所示的装置，用计算机产生余弦分布图案(如图 2 所示)，并输出到数字投影仪(Toshiba Tp-95)，形成照明光场，在待成像的物体表面形成清晰的余弦条纹图案的像。其中，余弦分布图案为 245×245 像素(即 $M = 245$，$N = 245$)，其平均光强 a 为 127.5(亮度范围为 0 至 255)，对比度 b 为 127.5。目标物体的实际大小为 $(245 \times 0.65)^2$ 平方毫米的一个方形(即 $\delta_x = 0.65$ 毫米，$\delta_y = 0.65$ 毫米)目标物体的 x 取 $0 \sim 244$ 之间的整数、y 取 $0 \sim 244$ 之间的整数；分别是 x、y 方向的频率 f_x、f_y 用归一化频率表示为 $\frac{\alpha}{245}$、$\frac{\beta}{245}$，其中 α 为 $0 \sim 244$ 之间的整数、β 为 $0 \sim 244$ 之间的整数。使用一光电池(Hamamatsu S1227-1010BR)作为单像素光电探测器以拾取场景的光场。光电池由一放大电路驱动，所输出的电信号由计算机的数据采集卡收集。投影仪投影每张图案的持续长度为 0.15 秒，光电池同步采集光信号。计算机使用数据采集卡(Native Instrument PCI-6220 DAQ)将收集到的电信号根据公式：

$$D_{fp}(f_x, f_y) = \left\{ \left[D_1(f_x, f_y) - D_3(f_x, f_y) \right] + \mathrm{j} \cdot \left[D_2(f_x, f_y) - D_4(f_x, f_y) \right] \right\},$$

重建图像的傅里叶谱(如图 3 所示，f_x、f_y 的最大频率分别为 $\frac{244}{245}$、$\frac{244}{245}$)，并对傅里叶谱施行二维离散反傅里叶变换，最终得到图 4 的图像。如上所述，x、y 方向的频率 f_x、f_y 用归一化频率表示为 $\frac{\alpha}{245}$、$\frac{\beta}{245}$，如果 α 取 $0 \sim 77$ 之间的整数、β 为 $0 \sim 77$ 之间的整数，也可以得到相应的傅里叶谱（谱点的总数约占图 3 的 10%，也就是投影的总数是图 3 的 10%），也可以通过二维离散反傅里叶变换重建图像，如图 5 所示，但是该图像的质量会明显劣于图 4。

权 利 要 求 书

1. 一种使用单像素探测器的光学成像方法，目标物体的图像用离散化的像素表示，大小为一个$M\times N$像素的矩阵，目标物体的实际大小为$M\delta_x\times N\delta_y$的一个矩形，其中$M$、$N$为正整数，$\delta_x$、$\delta_y$分别为一个像素在$x$、$y$方向的几何尺寸；其特征在于：用余弦结构光场发生器生成一系列频率不同的按余弦分布的光场，该光场在目标物体所在平面的光强分布表示为：$P(x,y;f_x,f_y)=a+b\cdot\cos(2\pi f_x x+2\pi f_y y+\phi)$，其中$a$是余弦光场的平均光强、$b$是对比度，$a$、$b$取正数；$x$、$y$是目标物体的像素点坐标，$x$取$0\sim M-1$之间的整数、$y$取$0\sim N-1$之间的整数；$f_x$、$f_y$分别是$x$、$y$方向的频率，$f_x$、$f_y$用归一化频率表示为$\frac{\alpha}{M}$、$\frac{\beta}{N}$，其中$\alpha$为$0\sim M-1$之间的整数、$\beta$为$0\sim N-1$之间的整数；$\phi$是初位相；每一组$(f_x,f_y)$频率对应有至少三个不同的初位相$\phi$值，将这些不同频率、不同初位相的余弦分布光场，依次照射目标物体，用光探测器依次接收来自目标物体的光强信号，再依次采集记录光探测器的响应值，根据响应值获得目标物体图像的傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$，对傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$进行二维离散反傅立叶变换，重建目标物体的图像$I(x,y)$。

2. 根据权利要求 1 所述的使用单像素探测器的光学成像方法，其特征在于：每一组(f_x,f_y)频率对应有Q个等步长初位相：$\phi=0$、$\frac{2\pi}{Q}$、…、$(Q-1)\frac{2\pi}{Q}$，Q为大于或等于3的整数，光探测器依次接收到来自目标物体光强信号的响应值分别表示为：$D_0(f_x,f_y)$、$D_1(f_x,f_y)$、…、$D_{Q-1}(f_x,f_y)$，依据公式：

$$D_{fp}(f_x,f_y)=\sum_{q=0}^{Q-1}D_q(f_x,f_y)\cdot\cos\left(\frac{2\pi q}{Q}\right)+j\sum_{q=0}^{Q-1}D_q(f_x,f_y)\cdot\sin\left(\frac{2\pi q}{Q}\right)$$

获得目标物体图像的傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$，其中j是虚数单位。

3. 根据权利要求 1 所述的使用单像素探测器的光学成像方法，其特征在于：每一组(f_x,f_y)频率对应有三个初位相，初相位分别为$-\frac{\pi}{2}$，0，$+\frac{\pi}{2}$，光探测器依次接收到来自目标物体光强信号的响应值分别表示为：$D_1(f_x,f_y)$、$D_2(f_x,f_y)$、$D_3(f_x,f_y)$，依据公式：

$$D_{fp}(f_x,f_y)=\left[2D_2(f_x,f_y)-D_1(f_x,f_y)-D_3(f_x,f_y)\right]+j\cdot\left[D_3(f_x,f_y)-D_1(f_x,f_y)\right]$$

获得目标物体图像的傅立叶变换谱$D_{fp}(f_x,f_y)$，其中j是虚数单位。

4. 根据权利要求 1 至 3 任一项所述的使用单像素探测器的光学成像方法，其特征在于：依据公式

$$I(x,y)=\sum_{f_x=0}^{(M-1)/M}\sum_{f_y=0}^{(N-1)/N} D_{fp}(f_x,f_y)\cdot\exp\left[\mathrm{j}2\pi\left(f_x x+f_y y\right)\right]$$

对傅立叶变换谱 $D_{fp}(f_x,f_y)$ 进行二维离散反傅立叶变换。

附图

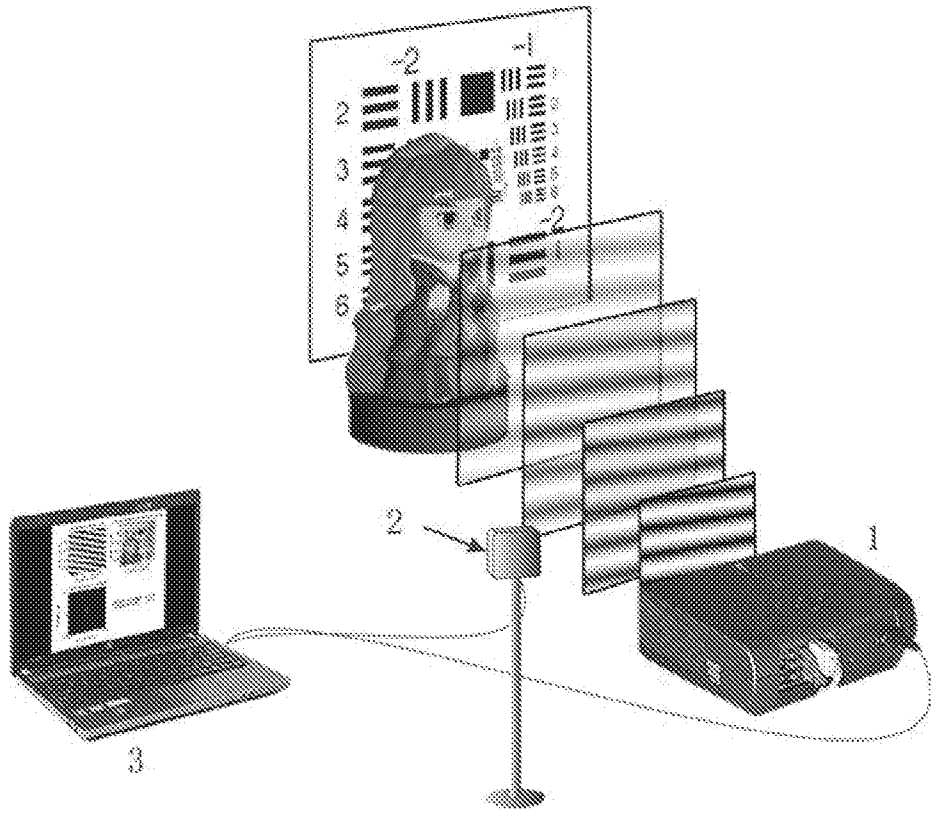

-2
-1
2
3
4
5
6
-2
2
1
3

图 1

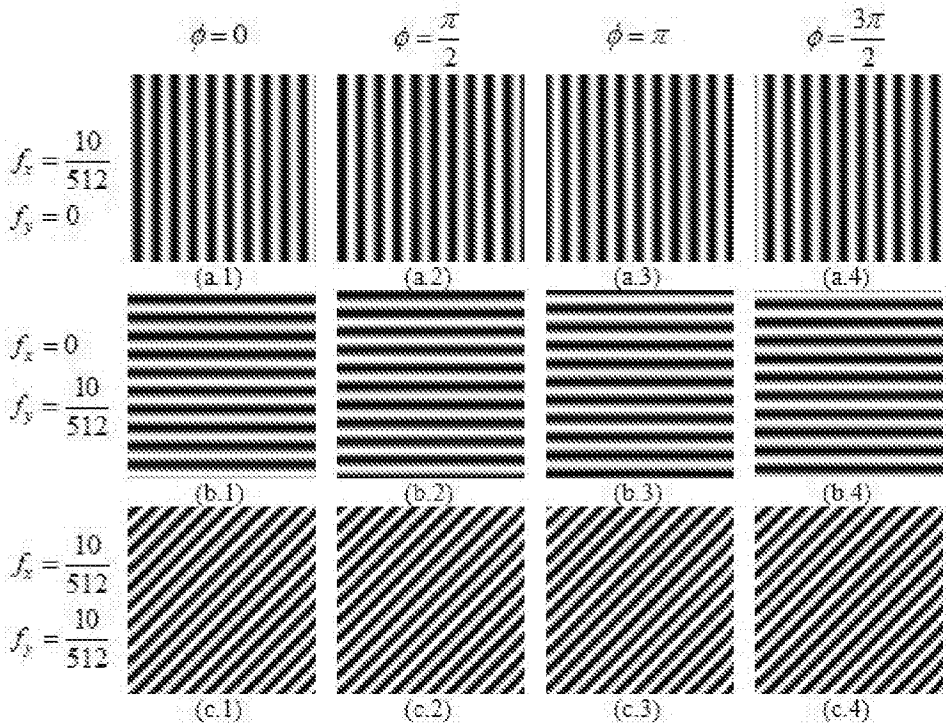

$\phi=0$
$\phi=\frac{\pi}{2}$
$\phi=\pi$
$\phi=\frac{3\pi}{2}$
$f_x=\frac{10}{512}$
$f_y=0$
(a.1)
(a.2)
(a.3)
(a.4)
$f_x=0$
$f_y=\frac{10}{512}$
(b.1)
(b.2)
(b.3)
(b.4)
$f_x=\frac{10}{512}$
$f_y=\frac{10}{512}$
(c.1)
(c.2)
(c.3)
(c.4)

图 2

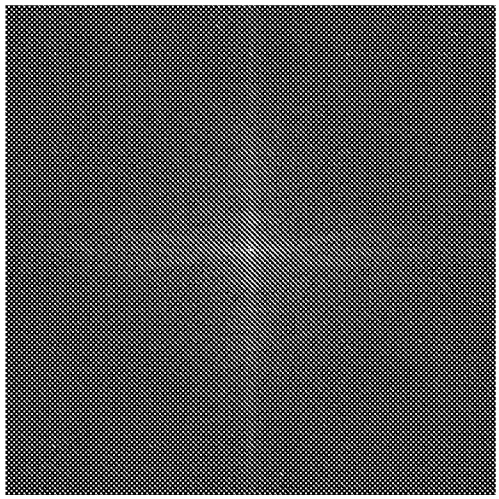


图 3

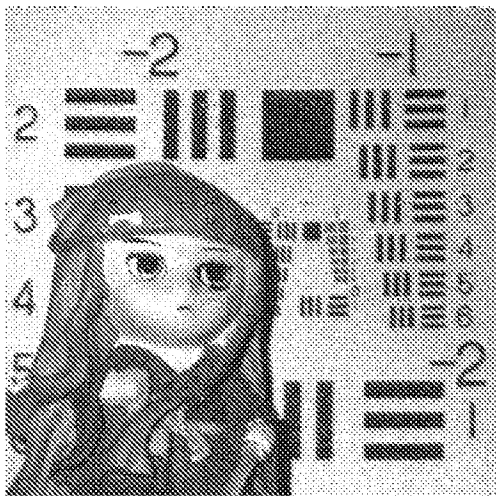


图 4

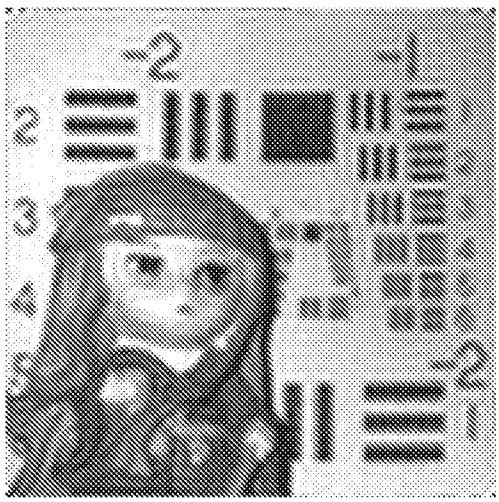


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2015/080156

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B 11/25 (2006.01) i; G01B 11/24 (2006.01) 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)

G01B

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, CJFD: single pixel, discretization, cosine, light field, frequency, phase, Fourier

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 104154878 A (JI'NAN UNIVERSITY), 19 November 2014 (19.11.2014), claims 1-4	1-4
A	CN 103363924 A (NATIONAL SPACE SCIENCE CENTER, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES), 23 October 2013 (23.10.2013), the whole document	1-4
A	CN 103777206 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY), 07 May 2014 (07.05.2014), the whole document	1-4
A	CN 103323396 A (NATIONAL SPACE SCIENCE CENTER, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES), 25 September 2013 (25.09.2013), the whole document	1-4
A	CN 103822577 A (CHINA ELECTRONICS TECHNOLOGY GROUP CORPORATION NO. 38 RESEARCH INSTITUTE), 28 May 2014 (28.05.2014), the whole document	1-4
A	DE 10332357 A1 (OBENAUS, D. et al.), 14 October 2004 (14.10.2004), the whole document	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"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

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
03 August 2015 (03.08.2015)	**14 August 2015 (14.08.2015)**
Name and mailing address of the ISA/CN: 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 **HU, Yuelan** Telephone No.: (86-10) **62089902**

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2015/080156

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104154878 A	19 November 2014	None	
CN 103363924 A	23 October 2013	None	
CN 103777206 A	07 May 2014	None	
CN 103323396 A	25 September 2013	None	
CN 103822577 A	28 May 2014	None	
DE 10332357 A1	14 October 2004	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2015/080156

A. 主题的分类

G01B 11/25(2006.01)i; G01B 11/24(2006.01)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)

G01B

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, CJFD; 单像素，离散，余弦，光场，频率，位相，傅立叶; single pixel,discretization, cosine, light field, frequency, phase, Fourier

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 104154878 A (暨南大学) 2014年 11月 19日 (2014-11-19) 权利要求1-4	1-4
A	CN 103363924 A (中国科学院空间科学与应用研究中心) 2013年 10月 23日 (2013-10-23) 全文	1-4
A	CN 103777206 A (上海交通大学) 2014年 5月 7日 (2014-05-07) 全文	1-4
A	CN 103323396 A (中国科学院空间科学与应用研究中心) 2013年 9月 25日 (2013-09-25) 全文	1-4
A	CN 103822577 A (中国电子科技集团公司第三十八研究所) 2014年 5月 28日 (2014-05-28) 全文	1-4
A	DE 10332357 A1 (OBENAUS DIETER ET AL.) 2004年 10月 14日 (2004-10-14) 全文	1-4

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 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
2015年 8月 3日	2015年 8月 14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) 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 中国	胡跃澜
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (86-10)62089902

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2015/080156

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 104154878 A	2014年 11月 19日	无	
CN 103363924 A	2013年 10月 23日	无	
CN 103777206 A	2014年 5月 7日	无	
CN 103323396 A	2013年 9月 25日	无	
CN 103822577 A	2014年 5月 28日	无	
DE 10332357 A1	2004年 10月 14日	无	