

基于光学衍射的纳米尺度深度重建

魏阳杰^{①*}, 吴成东^①, 董再励^②

① 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004;

② 中国科学院沈阳自动化研究所, 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016

* E-mail: weiyangjie@ise.neu.edu.cn

收稿日期: 2014-01-16; 接受日期: 2014-07-22

国家自然科学基金(批准号: 61305025)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: N130504011)资助项目

摘要 传统的离焦深度恢复方法(depth from defocus, DFD)在计算离焦图像的模糊程度时, 均是基于几何光学成像原理, 并没有考虑光波衍射对图像模糊的影响. 然而, 衍射现象是波的基本特性, 以针孔成像为基础的光学成像系统中必然存在光波衍射. 本文基于光学衍射和图像模糊机理, 提出了一种精确的单目视觉全局景物 3D 深度信息获取方法. 首先, 详细分析了光学成像系统中的菲涅耳衍射机理, 建立了衍射模糊与景物深度之间的关系曲线; 然后, 采用曲线拟合的方式建立了衍射模糊的模糊程度(点扩散函数扩散程度)与景物深度的数学关系模型, 结合热辐射和图像相对模糊原理, 构建了衍射模糊热辐射方程组, 并把衍射模糊深度获取问题转换成一个深度信息动态优化问题. 最后, 使用标准的纳米栅格模板验证了衍射模糊深度重建算法在纳米尺度相对深度和绝对深度重建中的有效性和精确性.

关键词模糊深度恢复
光学衍射
纳米栅格
相对模糊

1 引言

离焦深度恢复(depth from defocus, DFD)是 1987 年 Pentland 提出的一种利用景深有限的区域图像的模糊程度来恢复深度信息的方法^[1]. 目前, DFD 已经广泛地应用在许多领域, 例如: 遥感、机器人以及材料科学、生物医药等^[2-4].

传统的 DFD 方法是以几何光学中离焦图像的模糊度计算为基础的. 几何光学中, 清晰成像的条件是: 物距 u , 像距 v 和焦距 f 之间满足高斯成像公式^[5-7]. 相反, 如果改变任何参数使高斯成像公式不再成立, 那么, 点光源的成像就会变成一个圆斑, 即出现了离焦成像, 而且, 图像的模糊程度与上述参数的变化具有一定的数学映射关系. 所以, 摄像机参数固定时,

景物的深度信息可以由图像量化的模糊程度反解得到. 这就是传统 DFD 方法的基本原理. 然而, 图像模糊化主要由两个因素引起: 一是视距的变化; 二是小尺度的光衍射. 当观测条件(焦距、像距、数值孔径)固定时, 图像的模糊化程度是由视距和光衍射变化共同作用的结果.

衍射(diffraction)是波遇到小的障碍物或小孔后偏离直线传播方向而产生的绕射现象. 衍射现象是波的基本特性, 一切波都会发生衍射现象^[8-10]. 目前, 多数的光学成像从本质上来说都是一种小孔成像, 所以, 成像过程中光的衍射现象难以避免. 即使 u , v 和 f 满足几何光学中的高斯成像公式, 由于小孔处光波衍射改变了光的传播方向, 透过小孔后, 点光源的能量分布理论上也不会汇聚为一个点, 而是分布在

引用格式: 魏阳杰, 吴成东, 董再励. 基于光学衍射的纳米尺度深度重建. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1105-1113
Wei Y J, Wu C D, Dong Z L. Nano scale depth reconstruction based on optical diffraction (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1105-1113, doi: 10.1360/N092014-00013

一个圆盘内, 如图 1 所示. 根据模糊图像的定义, 如果点光源的成像是个圆斑, 那么, 所成的图像就是模糊的. 但是, 至今为止, 在模糊成像过程中, 并没有一种光学衍射和图像模糊程度之间的准确数学模型. 传统的基于几何光学的 DFD 方法在深度恢复时只考虑了模糊程度和深度变化之间的关系, 忽略了光学衍射对模糊程度的影响. 所以, 重建的景物深度是不准确的, 尤其是在光学成像分辨率较高的场合. 例如, 在微纳米操作时, 使用的光学显微镜放大倍数较高, 光学衍射现象更加明显, 由光学衍射造成的图像模糊不容忽视.

因此, 本文中, 提出了一种基于光学衍射的全局模糊深度恢复方法. 该方法通过详尽的理论分析和实验, 建立了光学衍射下点光源的亮度分布和景物深度之间的关系曲线, 并且, 采用曲线拟合的方式建立了衍射模糊的模糊程度与景物深度的数学关系模型; 结合热辐射和图像相对模糊原理, 构建了衍射模糊热辐射方程组, 并把衍射模糊深度获取问题转换成了一个深度信息动态优化问题, 从而提高了传统 DFD 方法的深度重建精度.

本文内容的结构安排如下: 第 2 节分析了光学系统中菲涅耳衍射的基本原理以及菲涅耳衍射与模糊成像之间的关系; 第 3 节, 使用曲线拟合构建了光学衍射模糊模型, 并且结合相对模糊和热辐射原理, 提出了一种基于光学衍射的全局模糊深度恢复方法; 第 4 节通过实验验证了本文算法的可行性和有效性; 最后, 第 5 节是本文结论.

2 光学衍射模糊成像

光的衍射一般分为两种: 夫朗禾费衍射和菲涅耳衍射. 前者也称为远场衍射, 其明显的特征就是圆

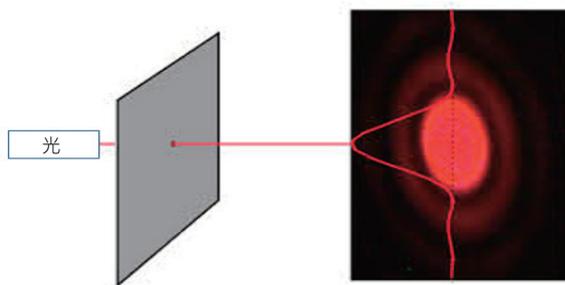


图 1 圆孔衍射示意图

孔或狭缝与观测点的距离发生变化时, 观测得到的衍射成像形状不变, 仅大小发生变化. 这是因为观测点处于远场位置, 通过圆孔向外的衍射波近似于平面波^[11,12]. 后者又称为近场衍射, 指场波在近场内通过圆孔或狭缝时发生的衍射现象. 根据圆孔和观测点的距离不同, 菲涅耳衍射成像的大小及形状也不同. 当观测距离不断增加, 以至于衍射后的波近似为平面波时, 菲涅耳衍射转化为夫朗禾费衍射^[13].

在一个光学成像系统中, 一般来说, 发生的衍射可以看作是菲涅耳衍射, 例如, 光学显微镜系统. 衍射的光路示意图如图 2 所示, 此时, 成像面上任意一点 P 的光波振动幅值可以表示为^[14]

$$\tilde{E}_p = \frac{A}{-R+b} \exp \left[ik \left(-R+b + \frac{\rho^2}{2b} \right) \right] \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(-i \frac{-R+b}{R} \frac{a}{\rho} \right)^n J_n \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \frac{\rho}{b} \right), \quad (1)$$

这里 A 表示距离球面波的中心 S 为单位距离的点的振动幅值; a 表示透镜的半径, $k=2\pi/\lambda$, ρ 表示 P 点到光轴的距离; J_n 是 n 阶贝塞尔函数; λ 表示入射光波长; R 是理想成像面和透镜的距离, 当成像面沿光轴前后移动 x_i ($i=1,2$) 时, R 变成 b_i ($i=1,2$); i 是虚数单位.

在成像面上建立坐标系 OXYZ, 这里 X 是光轴; O 表示坐标系原点, 也是理想成像面的中心; YZ 是成像面. 因为, XY 面和 XZ 面对称, 它们的成像特性相同. 因此, 公式(1)可以简化为

$$\tilde{E}_p = \exp \left[ik \left(x + \frac{\rho^2}{2b} \right) \right] B \exp(i\beta). \quad (2)$$

这里,

$$B \exp(i\beta) = -i \frac{J_1(2\pi\lambda^{-1}y \sin u)}{\pi\lambda^{-1}y \sin u} + \frac{\lambda}{\pi \sin^2 u} \times \sum_{n=2}^{\infty} (-iy^{-1} \sin u)^n x^{n-1} J_n(2\pi\lambda^{-1}y \sin u),$$

$\sin u = a/R$; x 表示成像面与原点 O 的距离; y 表示 P 点到原点 O 的距离.

因此, P 点的归一化光波强度分布可以表示为

$$I_p = \tilde{E}_p \cdot \tilde{E}_p^* = B^2. \quad (3)$$

从公式(2)和(3)可见, 成像面上任意点 P 的光强分布是 x 和 y 的函数, 即: $I_p(x, y)$. 为了观测 $I_p(x, y)$ 的特性,

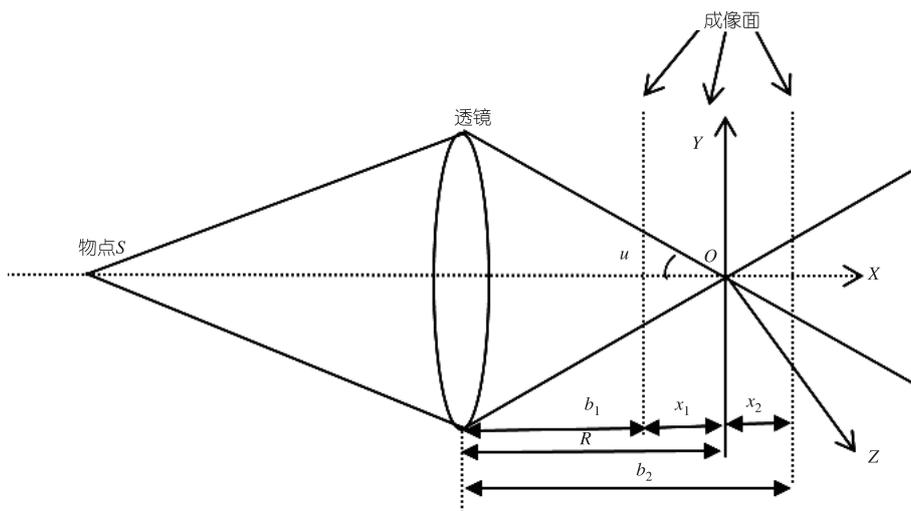


图2 菲涅耳圆孔衍射

假设 $\lambda=600\text{ nm}$, $\sin u=0.5$, YZ 平面上的亮度分布 $I_p(x, y)$ 随 x 和 y 的变化特性如图3所示。

从图3可以得到如下结论:

- 1) $I_p(x, y)$ 的最大值为 $I_p(0, 0)$;
- 2) 固定 x 时, 每条 $I_p(x, y)$ 曲线都近似为 y 的高斯函数, 且最大值出现在 y 等于 0 时;
- 3) $I_p(x, 0)$ 是 $|x|$ 的单调递减函数。

综上所述, 光轴上的点光源 S 在成像面上任意点 P 的光强分布与 P 点到光轴的距离成反比, 光强的峰值点位于成像面与光轴的交点, 峰值点周围的光强随着与交点的距离增加而递减, 减小的规律近似为高斯函数。这也就是几何光学中通常使用高斯函数

来描述模糊点扩散函数特性的原因。K Strehl 曾指出当 $I_p(x, y)$ 的最大值小于 0.8 时, 人的眼睛可以辨别出这种强度变化, 并判断是否出现了图像模糊^[14]。因此, 实际应用中, 通常把 $I_p(0, 0)=0.8$ 作为模糊成像发生的边界条件。

通常情况下, 固定其他摄像机参数时, 同一摄像机的物距和像距之间的比值是轴向放大系数 m , 所以, 图3中成像面相对于理想成像面的距离变化 x 可以转化为物平面相对于理想物距点的距离变化 l , l 与 x 之间的关系式为

$$l = \frac{x}{m} \tag{4}$$

因此, 如果固定摄像机的像距, 理论上来说, 改变景物的物距也会导致像平面上任意点的亮度分布发生相似的变化。图4为光轴上的点光源 S 在成像面上任意点 P 的光强分布与物距变化之间的关系图。对比图3和4, 可以发现 $I_p(l, y)$ 与 $I_p(x, y)$ 的分布特性相似。而且即使点光源位于理想物距处, 即 $l=0$ 时, 点光源的成像仍然是一个模糊圆斑。

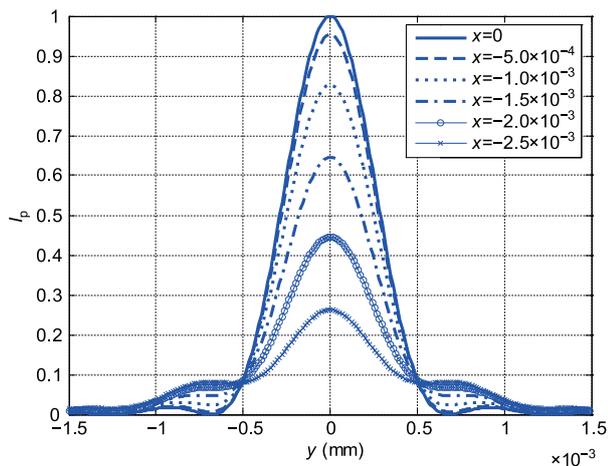


图3 $\lambda=600\text{ nm}$, $\sin u=0.5$, 像距变化时 P 点的光强分布

3 衍射模糊成像模型

第2节中, 已经发现衍射在光学成像过程中是时时存在的, 因此, 从理论上来说, 所有的光学成像都是模糊的。本节中, 将对考虑衍射和不考虑衍射两种情况下的模糊成像原理, 并建立基于光学衍射的

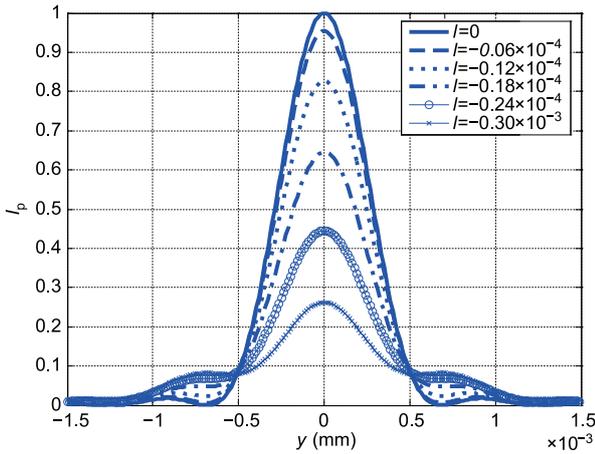


图4 $\lambda=600\text{ nm}$, $\sin u=0.5$, 物距变化时 P 点的光强分布

模糊成像模型. 最后, 通过射模糊模型, 根据模糊图像重建精确景物深度.

在几何光学中, 当相机的焦距 f , 物距 u 和像距 v 满足基本成像公式(5)时, 点光源的成像假设是一个聚焦点, 即成像过程是清晰的. 否则, 成像是一个圆斑, 就出现了模糊图像.

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (5)$$

因此, 几何光学中, 研究者假设模糊成像是由景物的深度变化(物距)或者摄像机参数变化(像距、焦距等)引起的, 忽略了衍射的影响. 如果观测条件固定, 景物深度可以由模糊图像的模糊程度计算出来. 其中, 模糊圆斑的半径 r_g 可以表示为

$$r_g = \frac{av}{2} \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{s} \right|, \quad (6)$$

这里 s 表示景物深度, 即物距, a 表示摄像机的有效半径.

如果点扩散函数为高斯函数, 那么, 表示模糊程度的高斯核 σ 为

$$\sigma^2 = \gamma^2 r_g^2, \quad (7)$$

这里 γ 表示模糊程度与模糊半径的比例系数. 因此, 重建的景物深度等于

$$s = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{v} \pm \frac{2\sigma}{av\gamma}}. \quad (8)$$

然而, 在衍射光学成像中, 即使固定摄像机参数, 景物的模糊也是由深度变化和光学衍射共同作用形成的, 所以, 模糊扩散参数可以表示为

$$\sigma = f(r_d) = f_d(d_{\text{衍射}}, s). \quad (9)$$

如图4所示, 当 l 固定时, $I_p(l, y)$ 接近于高斯函数. 所以, 可以使用高斯函数去拟合 $I_p(l, y)$, 拟合结果如图5所示, 其中离散点为实际计算值; 实线表示高斯拟合曲线. 对于每一个物距变化 l , 可以得到一条这样的拟合曲线和一个代表图像模糊程度的模糊核 σ . 图6中, 分别计算了考虑光学衍射和传统几何光学中没有光学衍射时 l 和 σ 的关系曲线, 其中, 实线表示考虑了光学衍射的关系曲线; 虚线表示的传统几何光学中的关系曲线. 从该图中可见景物深度等于理

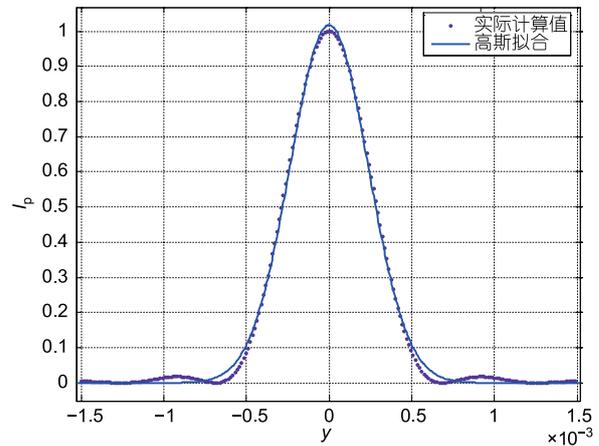


图5 固定 l 时的拟合高斯曲线

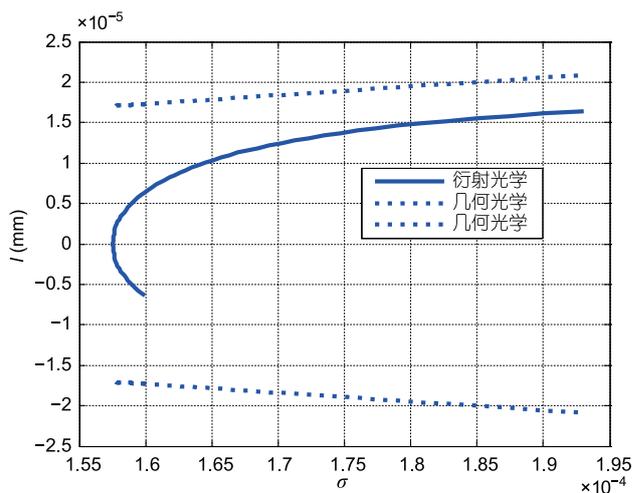


图6 物距变化与图像模糊核的关系曲线

想物距时, 传统几何光学中模糊参数 σ 等于 0; 而考虑衍射现象时, σ 是 1.57×10^4 . 随着深度变化 l 不断增加, 两种情况得到的 σ 越来越接近, 这也是宏观光学中很难观测到光学衍射的原因.

虽然, 通过上述分析和对比, 可以发现考虑衍射时的重建深度更接近于实际情况. 但是, 为了计算不同 σ 时的深度变化 l , 必须要建立 l 和 σ 的数学关系式. 从图 6 中, 可以知道 l 和 σ 之间的关系近似为二次曲线. 所以, 本文中, 使用二次曲线去拟合图 6 中光学衍射发生时 l 和 σ 的数学关系, 建立衍射模糊数学模型, 曲线拟合的结果如图 7 所示, 这里, 带有“*”的点表示实际的计算结果, 实曲线表示拟合的二次曲线.

拟合曲线的表达式为

$$\sigma = al^2 + bl + c. \quad (10)$$

进一步可以转化为

$$al^2 + bl + c - \sigma = 0. \quad (11)$$

(11)式的解为

$$l = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - \sigma)}}{2a}. \quad (12)$$

因此, 考虑光学衍射时最终的深度解为

$$s = s_0 + \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - \sigma)}}{2a}. \quad (13)$$

由(13)式可见, 曲线拟合后, a, b, c 已知, s_0 是已知的理想物距. 因此, 求解景物深度时, 只需要知道

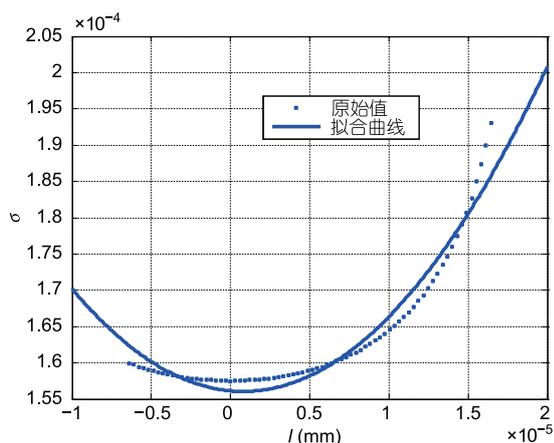


图 7 使用二次曲线拟合物距变化与图像模糊核之间的关系曲线

模糊度 σ .

因为, 一幅模糊图像可以看成无穷多个模糊圆斑的叠加, 所以, 图像的模糊化可以表示成如下的卷积形式:

$$E(y, z) = I(y, z) * H(y, z), \quad (14)$$

式中 $E(y, z)$ 为模糊图像; $I(y, z)$ 为清晰图像; $H(y, z)$ 为点扩散函数; “*”表示卷积. 由图 6 可见, 像平面上任意点的强度点扩散可以使用二维高斯函数来近似. 然而, 计算一幅图像的模糊度 σ , 需要已知 $I(x, y)$, 即清晰图像. 但是, 许多情况下, 利用离焦图像求取清晰图像是一个复杂的图像复原过程, 需要根据已知情况建立复原模型, 而且精度也很低.

这里, 假设同一个景物在不同条件下的两幅离焦图像 $E_1(y, z)$ 和 $E_2(y, z)$, 模糊程度参数分别为 σ_1, σ_2 , 并且 $\sigma_1 < \sigma_2$ (在每个像素点, E_1 比 E_2 模糊), 这时 E_2 可以表示成

$$\begin{aligned} E_2(y, z) &= \iint \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{(y-u)^2 + (z-v)^2}{2\sigma_2^2}\right) I(u, v) du dv \\ &= \iint \frac{1}{2\pi\Delta\sigma^2} \exp\left(-\frac{(y-u)^2 + (z-v)^2}{2\Delta\sigma^2}\right) \\ &\quad \times E_1(u, v) du dv, \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $\Delta\sigma^2 = \sigma_2^2 - \sigma_1^2$, 称为 $E_1(y, z)$ 和 $E_2(y, z)$ 之间的相对模糊度.

假设 $E_1(x, y)$ 是深度沿光轴变化 $\Delta s(x, y)$ 前的模糊图像, 深度曲面为 $s_1(x, y)$; $E_2(x, y)$ 是深度变化后的模糊图像, 其深度曲面为 $s_2(x, y)$; 理想物距为 s_0 ; $s_1(x, y) - s_2(x, y) = \Delta s(x, y)$. 假设深度变化 Δs 已知, 那么原始深度信息 $s_1(x, y)$ 可以使用下述算法计算.

首先, 当点扩散函数不随位置变化时, 热辐射方程可以被引入到模糊成像过程中, 其中, 点扩散函数由高斯函数来表示^[15,16], 那么, 基于两幅模糊图像的热辐射方程组可以表示为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{u}(y, z, t) = \nabla \cdot (\varepsilon(y, z) \nabla u(y, z, t)) \quad t \in (0, \infty), \\ u(y, z, 0) = E_1(y, z), \\ u(y, z, \Delta t) = E_2(y, z). \end{cases} \quad (16)$$

这里 ε 表示辐射系数, $\dot{u} \doteq \frac{\partial u}{\partial t}$, “ ∇ ”代表梯度算子, “ $\nabla \cdot$ ”是微分算子:

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}^T, \nabla \cdot = \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}. \quad (17)$$

模糊图像 $E_1(y, z)$ 和 $E_2(y, z)$ 之间的相对模糊可以表示为

$$\Delta\sigma^2 \triangleq \sigma_2^2 - \sigma_1^2 = (al_2^2 + bl_2 + c)^2 - (al_1^2 + bl_1 + c)^2. \quad (18)$$

简化公式(18), 结果为

$$al_2^2 + bl_2 + c = \pm \sqrt{\Delta\sigma^2 + (al_1^2 + bl_1 + c)^2}. \quad (19)$$

假设,

$$c' = c \pm \sqrt{(al_1^2 + bl_1 + c)^2 + \Delta\sigma^2}, \quad (20)$$

得到

$$s = s_0 + \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac'}}{2a}. \quad (21)$$

而根据(16)式, 求解 Δt 的过程是一个偏微分方程的两点边值问题, 很难求解. 本文拟利用如下的优化问题代替偏微分方程的求解过程:

$$\tilde{s} = \arg \min_{s_2(y, z)} \iint (u(y, z, \Delta t) - E_2(y, z))^2 dydz. \quad (22)$$

但是, 上述优化问题通常是不适定的, 并且对噪声敏感. 一般可以通过规格化来解决此问题, 例如, 在(22)式中增加一个 Tikhonov 惩罚项^[17], 即

$$\tilde{s} = \arg \min_{s_2(y, z)} \iint (u(y, z, \Delta t) - E_2(y, z))^2 dydz + \alpha \|\nabla s_2(y, z)\|^2 + \alpha k \|s_2(y, z)\|^2. \quad (23)$$

新增项通过 α 规格化为深度信息增加了一个光滑约束, 保证深度有界. 实际中, $\eta > 0$, $k > 0$, 但是它们非常小, 这是为了尽量少增加能量损失值, 而损失的能量为

$$F(s) = \iint (u(y, z, \Delta t) - E_2(y, z))^2 dydz + \alpha \|\nabla s\|^2 + \alpha k \|s\|^2. \quad (24)$$

则求解深度信息等价于求解如下的优化问题:

$$\begin{aligned} \tilde{s} &= \arg \min_s F(s) \\ \text{s.t.} & \text{ Eq. (13), Eq. (19)} \end{aligned} \quad (25)$$

这样一个动态优化问题可以利用梯度流的方法

求解, 求解步骤如下:

1) 给定摄像机参数 f, D, γ, ν, s_0 ; 两幅模糊图像 E_1, E_2 ; 能量阈值 τ ; α 以及优化步长 β ;

2) 初始化深度信息, 为了简单, 这里假设初始深度面是平面;

3) 求解(18)式, 得到相对模糊值;

4) 求解(16)式得到辐射方程 $u(x, y, \Delta t)$ 的解;

5) 使用上一步的解 $u(x, y, \Delta t)$, 计算能量(24), 如果能量小于阈值 ε , 算法停止, 此时的深度即为所求; 否则, 以 β 为步长, 求解

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -F'(s); \quad (26)$$

6) 求解公式(21), 更新深度后返回到步骤 3.

4 实验

为了验证算法的有效性和正确性, 使用上述算法对标准纳米尺度栅格进行深度重建实验, 该栅格高 500, 宽 1500 nm, 误差在 3% 以内. 实验中使用的是 HIROX-7700 显微镜, 如图 8 所示, 放大倍数为 7000 倍, 其余的摄像机参数为: 焦距 0.357, 理想物距 3.4 mm, 光圈大小为 2.

首先, 使用 Veeco 公司的原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM) Dimension 3100 来预先扫描标准纳米栅格, 得到的栅格的 3D 图像如图 9 所示.

实验中, 使用大小为 120×110 像素的栅格进行形貌恢复, 其结果如图 10~13 所示. 其中, 图 10 是两幅离焦图像, 图 10(a)为深度变化前的离焦图像; 图 10(b)为深度变化后的图像; 图 11 为纳米栅格的恢复



图 8 HIROX-7700

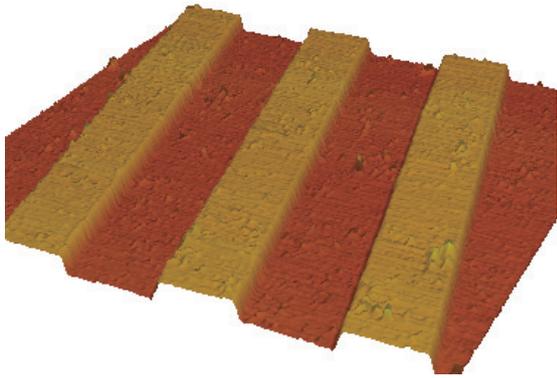


图9 栅格的3D扫描结果

形貌, 其中, 图 11(a)为没有考虑光学衍射时恢复的3D形貌, 即基于几何光学的形貌恢复; 图 11(b)为使用本文提出的基于光学衍射 DFD 方法的3D形貌恢复结果. 高度坐标的单位是 mm.

为了更加直观地验证算法的精度, 首先, 计算了

真实深度值 s 与估计深度 \tilde{s} 之间的相对误差曲面 Φ , 其中真实深度由图 9 得到, 计算公式如(27)式. 计算结果如图 12 所示, 其中, 图 12(a)为本文算法的深度误差图, 图 12(b)为没有考虑光学衍射的深度误差图. 然后, 因为已知标准栅格的准确高度为 500 nm, 使用了公式(28)计算了 500 个估计点的平均误差.

$$\phi = \tilde{s} / s - 1, \quad (27)$$

$$E_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |H_k - \tilde{H}_k|, \quad (28)$$

这里 n 表示采样点数; H_k 表示 AFM 扫描高度, \tilde{H}_k 表示第 k 个点的估计高度.

从图 10 可见, 本文基于光学衍射的深度重建算法的形貌重建误差比传统几何光学中没有考虑光学衍射的深度重建算法的误差明显小. 传统 DFD 算法的形貌重建平均误差为 161 nm, 而本文提出的算法

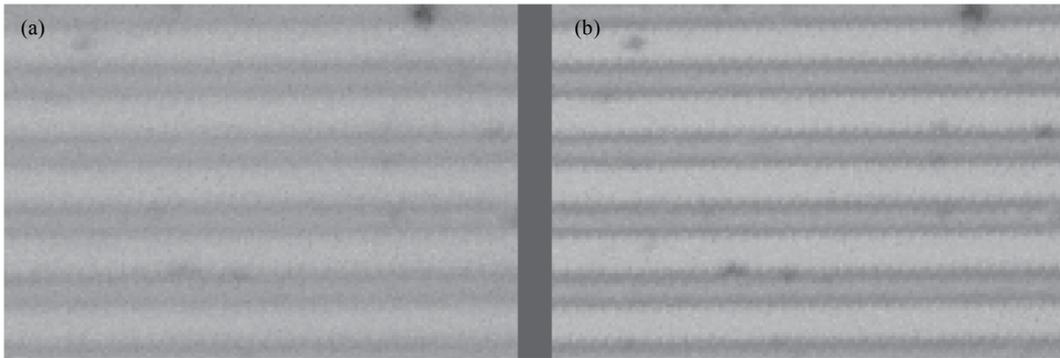


图10 离焦图像

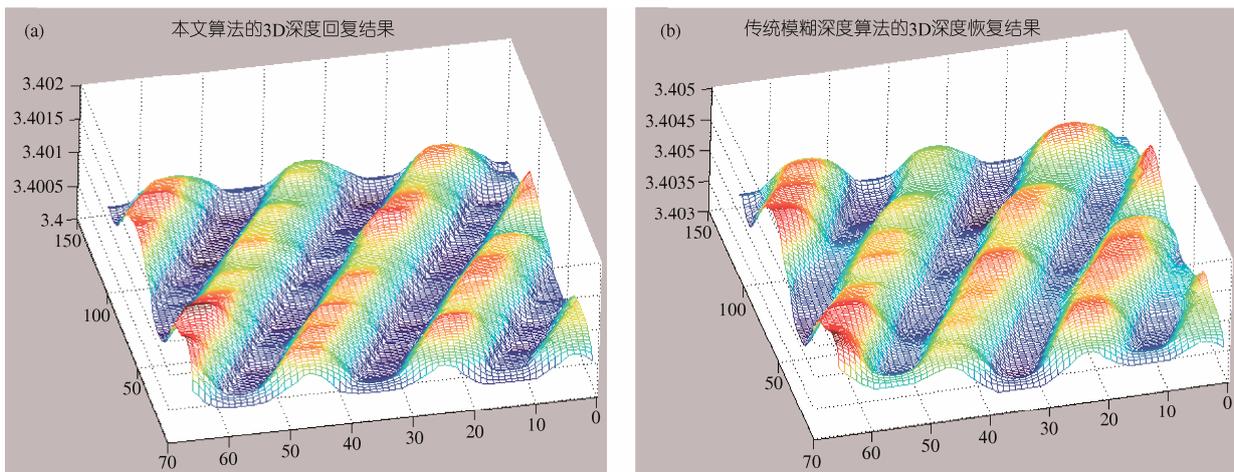


图11 (网络版彩图)重建的深度图像

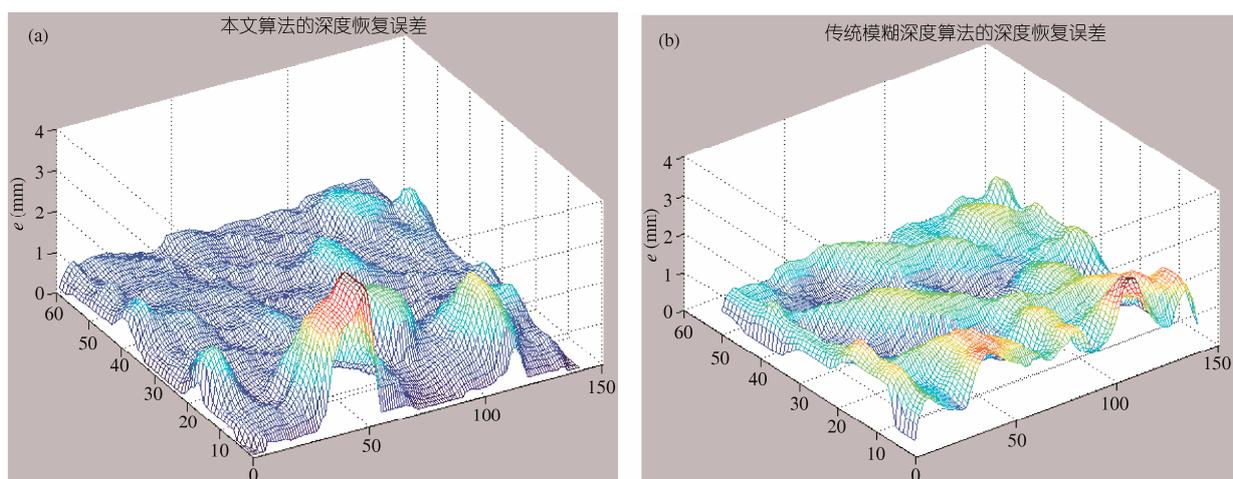


图 12 (网络版彩图)重建深度误差

的形貌恢复平均误差仅为 69 nm, 即对于 3D 形貌重建来说, 本文提出的算法比传统算法误差缩小了 57%.

3D 形貌从本质上来讲更加关注景物的相对深度, 不是绝对深度. 事实上, 从图 12 可以看到光学衍射更多地会影响重建的绝对深度, 而不是相对深度. 为了对算法重建的绝对深度进行详细对比, 给出了上述重建形貌的一个剖面, 如图 13 所示, 其中虚线表示本文方法重建的深度剖面, 实线表示传统 DFD 重

建的深度剖面.

从图 13 可以看到, 因为光学衍射的影响, 本文算法重建的绝对深度更接近与理想物距. 这一结果与第 2 节的分析结果一致, 即图像模糊不仅来自于深度变化, 而且来自于光学衍射. 因此, 当图像的模糊程度一定时, 没有考虑光学衍射的传统 DFD 的计算结果必然大于本文算法.

5 结论

本文基于光学衍射和图像模糊机理, 提出了一种精确的单目视觉全局景物 3D 深度信息获取方法. 首先, 详细分析了光学成像系统中的菲涅耳衍射机理, 建立了衍射模糊与景物 3D 深度之间的数学模型; 然后, 采用曲线拟合的方式建立了衍射模糊的模糊程度与景物深度的数学关系模型, 结合热辐射和图像相对模糊原理, 构建了衍射模糊热辐射方程组, 并把衍射模糊深度获取问题转换成一个深度信息动态优化问题. 最后, 通过使用高倍的光学显微镜和标准的纳米栅格模板, 验证了衍射模糊深度重建算法在纳米尺度相对深度和绝对深度重建中的有效性和精确性.

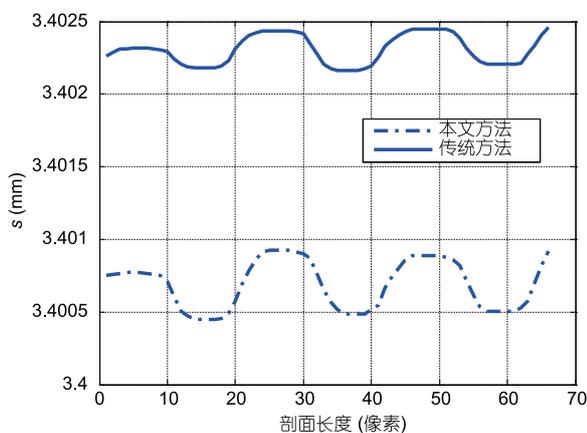


图 13 任意剖面深度对比

参考文献

- 1 Pentland A P. A new sense for depth of field. IEEE T Pattern Anal, 1987, 9: 523-531
- 2 Subbarao M, Surya G. Depth from defocus: A spatial domain approach. Int J Comput Vis, 1994, 13: 271-294
- 3 Vinay P N, Subhasis C. On defocus, diffusion and depth estimation. Pattern Recogn Lett, 2007, 28: 311-319
- 4 Navar S K, Watanabe M, Noguchi M. Real-time focus range sensor. IEEE T Pattern Anal, 1996, 18: 1186-1198

- 5 Favaro P, Burger M, Osher S J. Shape from defocus via diffusion. *IEEE T Pattern Anal*, 2008, 30: 518–531
- 6 Favaro P, Mennucci A, Soatto S. Observing shape from defocused images. *Int J Comput Vision*, 2003, 52: 25–43
- 7 Ziou D, Deschenes F. Depth from defocus estimation in spatial domain. *Comput Vis Image Und*. 2001, 81: 143–165
- 8 Wang P, Xu Y G, Wang W, et al. Analytic expression for Fresnel diffraction. *J Opt Soc Am A*, 1998, 15: 684–688
- 9 Word R C, Fitzgerald J P S, Konenkamp R. Direct imaging of optical diffraction in photoemission electron microscopy. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 021118
- 10 Kantor I, Prakapenka V, Kantor A, et al. A new diamond anvil cell design for X-ray diffraction and optical measurements. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 125102
- 11 Hecht E. *Optics*. 2nd ed. New Jersey: Addison Wesley, 1987
- 12 Jenkins F, White H. *Fundamentals of Optics*. 4th ed. New York: Mc Graw-Hill Inc, 1976
- 13 Oberst H, Kouznetsov D, Shimizu K, et al. Fresnel diffraction mirror for atomic wave. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 013203
- 14 Wang Z Q, Wang P. Rayleigh criterion and K Strehl criterion. *Acta Photon Sin*, 2000, 29: 621–625
- 15 Wei Y J, Dong Z L, Wu C D. Depth measurement using single camera with fixed camera parameters. *IET Comput Vis*, 2012, 6: 29–39
- 16 Wei Y J, Wu C D, Dong Z L. Global depth reconstruction of nano grid with singly fixed camera. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 1044–1052
- 17 Lagnado R, Osher S. A technique for calibrating derivative security pricing models: Numerical solution of an inverse problem. *J Comput Financ*, 1997, 1: 13–26

Nano scale depth reconstruction based on optical diffraction

WEI YangJie¹, WU ChengDong¹ & DONG ZaiLi²

¹ College of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

² State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Traditional depth from defocus (DFD) is based on the imaging principle in geometric optics to calculate blurring degree, influence of optical diffraction has never been considered. However, diffraction is a basic property of all kinds of waves, it must happen in an optical imaging system based on pinhole imaging principle. In this paper, a high resolution DFD method with a single vision and optical diffraction is given. Firstly, the basic principle of Fresnel diffraction in an optical system is analyzed, and the relationship curve between Fresnel diffraction and depth information is constructed. Secondly, a defocus imaging model with optical diffraction is supposed through curve fitting, and with respect to relative blurring and heat diffusion, a new DFD method with optical diffraction and two defocused images is proposed. Finally, a standard nano grid is used to validate the proposed DFD method on nano scale. The results show that the new algorithm, compared with traditional DFD algorithms, is a more effective method to reconstruct depth information on nano scale.

depth from defocus, optical diffraction, nano grid, relative blurring

doi: 10.1360/N092014-00013