

基于模糊函数的聚焦扫描计算成像模型

高姗, 邱钧, 刘畅*

北京信息科技大学应用数学研究所, 北京 100101

摘要 聚焦扫描成像模型作为一种有效的计算成像手段,可以实现大景深拓展。从模糊函数理论出发,提出聚焦扫描的逆滤波计算成像模型,并对景深拓展性能进行分析。根据光学系统模糊函数与光学传递函数的关系,利用聚焦误差推演出聚焦扫描成像的光学传递函数。对光学传递函数的近似三维空间不变性给出理论分析,并基于此光学传递函数建立聚焦扫描的逆滤波计算成像模型。以具体成像模型为例,利用 HOPKINS 判据,分析了不同扫描范围对该成像模型景深拓展性能的影响。通过数值模拟验证了聚焦扫描成像光学模型传递函数的正确性;利用逆滤波方法对扫描范围分别为 0.09, 0.18, 0.36 mm 的聚焦扫描成像模型进行计算成像,并对成像效果进行了分析比较。结果表明:聚焦扫描成像模型可以实现景深拓展;随着扫描范围增加,景深拓展性能提高。

关键词 成像系统; 聚焦扫描; 计算成像; 模糊函数; 逆滤波

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071103

Ambiguity Function Based Computational Imaging Model for Focal Sweep

Gao Shan, Qiu Jun, Liu Chang

Institute of Applied Mathematics, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China

Abstract As an effective means of computational imaging, focal sweep imaging model can extend the depth of field. Based on the ambiguity function theory, we propose an inverse filtering computational imaging model based on focal sweep mode and analyze the expand performance of the depth of field. We obtain the optical transfer function of focal sweep imaging using focus error based on the relationship between the ambiguity function and the optical transfer function. A theoretical analysis of the approximate three-dimensional space invariance of the optical transfer function is given. Based on the optical transfer function, we establish an inverse filtering computational imaging model of focal sweep. Taking a concrete imaging model as an example, we analyze the influence of different scanning ranges on the expand performance of depth of field of focal sweep imaging model based on the HOPKINS criterion. Through numerical simulation, we verify the correctness of the optical transfer function of focal sweep imaging model. We analyze and compare the imaging results of focal sweep imaging model of different scanning ranges (0.09, 0.18, 0.36 mm) based on inverse filtering model. The analysis shows that the depth of field can be extended by focal sweep imaging model; the larger the sweep distance, the better the performance of the depth of field of focal sweep imaging model.

Key words imaging system; focal sweep; computational imaging; ambiguity function; inverse filtering

OCIS codes 120.4820; 100.1830; 110.1758

1 引言

传统成像系统的景深通常受到系统结构的限制。为了增加景深,往往需要缩小光圈,但这样就会

减小光通量,导致图像噪声增加,信噪比降低。如何获得具有高质量景深拓展的图像,成为近年来计算成像的关键问题,研究人员提出了一系列扩展图像景深的方法:Levin 等^[1]、Veeraraghavan 等^[2]、Zhou

收稿日期: 2018-01-29; 收到修改稿日期: 2018-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61372150)、高动态导航技术北京市重点实验室开放课题(HDN2017004)

作者简介: 高姗(1993—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: gaoshan_bistu@163.com

导师简介: 邱钧(1966—),男,博士,教授,主要从事图像重建及计算摄影方面的研究。E-mail: qiu jun@bistu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liuchang@bistu.edu.cn

等^[3]提出不同的编码方案,通过对点扩展函数进行设计得到景深拓展的图像,但该方法在一定程度上会减小通光量,降低信噪比,进而影响成像质量;Kuthirummal 等^[4]提出聚焦扫描成像模型,但只对聚焦扫描成像模型点扩展函数 f_{ps} 的不变性进行了实验评估;Jin 等^[5]将聚焦扫描成像模型引入到光场相机,验证了点扩展函数的不变性;李思俭等^[6]利用点扩展函数解决了运动模糊条件下红外小目标检测的问题;黄奕龙等^[7]提出一种结合视场点扩展函数估计的梯度约束显微图像复原方法,提高了显微图像的成像质量。

1983年,Brenner 等^[8]提出将模糊函数 A 的概念引入到光学系统中,得到模糊函数 A 与光学传递函数 \mathcal{H} 之间的关系,并证明模糊函数是光学传递函数的极坐标形式,成为研究系统景深拓展重要的理论基础。1995年,Dowski 等^[9]提出波前编码成像技术,该技术基于模糊函数理论设计光学系统,使其所成像在离焦情况下具有相似性。此后,利用模糊函数设计波前编码的方法得到了广泛应用,研究人员围绕基于相位板拓展景深的方法展开了深入研究,如对数相位板^[10]、反对称相位板^[11]等。郭小虎等^[12]分析了三次相位板的偏心对波前编码成像系统的影响。刘钦晓等^[13]提出了一种波前编码技术的大视场长景深光学组件缺陷检测装置,为阵列型光学组件的缺陷检测提供了理论保证。因此,模糊函数理论具有重要的理论意义与价值,可应用到对光学系统景深拓展性能的理论分析中。

本文将模糊函数应用到聚焦扫描成像模型中,利用模糊函数与光学传递函数的关系,建立聚焦扫描的逆滤波计算成像模型,探究扫描范围对光学系统景深拓展性能的影响。该研究成果为进一步设计聚焦扫描成像模型提供了理论依据。

2 相关工作

2.1 聚焦扫描

在传统的成像模型中,物点在聚焦平面呈现清晰像,离聚焦平面越远,图像越模糊。聚焦扫描成像模型可获得模糊程度近似相同的图像,利用计算成像方法得到全聚焦图像。聚焦扫描成像模型可分为两大类:有机械运动的聚焦扫描成像模型和无机械运动的聚焦扫描成像模型。有机械运动的聚焦扫描成像模型是指在曝光中通过移动探测器平面的位置或改变镜头的位置等,得到模糊程度近似相同的图像。如:Yokoya 等^[14]通过将曲面镜加入聚焦扫描

成像模型中,获得了宽视角、深度近似不变的成像系统。无机械运动的聚焦扫描成像模型是指通过改变镜头焦距等获得模糊程度相同的图像。如:Miau 等^[15]提出可变焦距透镜扫描平面的焦距远摄像机,可用于视频重聚焦和移动物体轨迹追踪等。本课题组采用在曝光过程中将探测器水平地沿光轴方向匀速移动的聚焦扫描成像模型,如图1所示。采用Kuthirummal 等^[4]提出的聚焦扫描成像模型实验参数:镜头的焦距 $f=12.5$ mm, $f/\# = 1.4$, xy 平面到镜头平面的距离 $d=12.71$ mm,扫描范围下限 $d_{\min}=12.5$ mm,扫描范围上限 $d_{\max}=12.86$ mm。

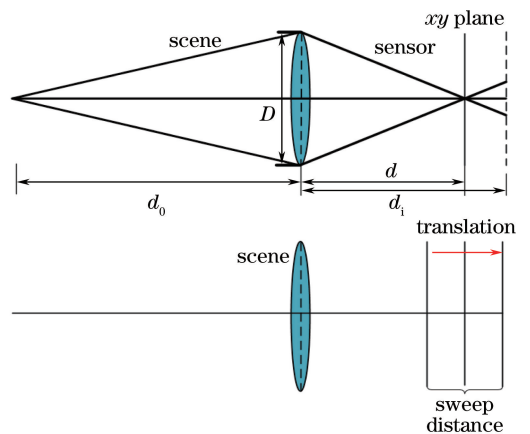


图1 聚焦扫描成像模型

Fig. 1 Focal sweep imaging model

图1中: d_0 为某物点的深度在物方对应的距离; D 为镜头的直径; d_1 为探测器扫描后到镜头平面的距离;扫描范围为 Δd ,其取值为 $[d_{\min}, d_{\max}]$ 。由高斯成像公式可得

$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

2.2 模糊函数与光学传递函数

设光学系统的一维广义光瞳函数 $\mathcal{P}(x)$ 为

$$\mathcal{P}(x) = P(x) \exp(ikW_{20}x^2), \quad (2)$$

式中: W_{20} 为波前聚焦误差系数^[16]; k 为波矢量的大小; $P(x)$ 为光瞳函数。

$\mathcal{P}(x)$ 的光学传递函数为

$$\mathcal{H}(u, W_{20}) = \int P\left(x + \frac{u}{2}\right) P^*\left(x - \frac{u}{2}\right) \exp\left[i2\pi\left(\frac{2W_{20}}{\lambda}\right)ux\right] dx. \quad (3)$$

式中: u 为光学系统在 x 方向的频率; P^* 为 P 的共轭; λ 为光学系统的波长。

模糊函数的定义^[17]为

$$A(u, y) = \int P\left(x + \frac{u}{2}\right) P^*\left(x - \frac{u}{2}\right) \exp(i2\pi yx) dx. \quad (4)$$

因此,可以得到光学传递函数和模糊函数两者之间的联系:

$$\mathcal{H}(u, W_{20}) = A\left(u, \frac{2W_{20}}{\lambda}u\right), \quad (5)$$

即模糊函数的不同切片代表不同聚焦误差的光学传递函数^[8],对应不同的散焦程度。模糊函数的这一特性使其成为分析光学系统的有利工具。

3 基于模糊函数的聚焦扫描计算成像模型

3.1 聚焦扫描成像的光学传递函数

根据聚焦扫描成像模型,若探测器平面到镜头平面的距离为 d_i ,则对应的聚焦误差为

$$W_{20} = \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_i} \right) \approx \frac{D^2}{8} \frac{(d_i - d)}{d^2}, \quad (6)$$

聚焦误差 W_{20} 与扫描深度约呈线性变化。

设光学系统的一维光瞳函数为

$$P(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2}, \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (7)$$

在聚焦扫描成像模型中,设 $y' \in y + [-S, S]$ (S 为 y 变化的最大范围),其一维模糊函数为

$$A(u, y) = \frac{1}{2S} \int_{y-S}^{y+S} (1 - |u|) \text{sinc}[(1 - |u|)y'] dy' = \frac{1}{2S} \{ \text{sinint}[(|u| - 1)\pi(y - S)] - \text{sinint}[(|u| - 1)\pi(y + S)] \} / \pi, \quad (8)$$

式中: $\text{sinint}(x) = \int_0^x \text{sinc}\left(\frac{t}{\pi}\right) dt$ (具体推导过程见附录)。

设聚焦扫描模型的聚焦误差为 $W'_{20} \in W_{20} + [-S', S']$,其中 $W_{20} = \frac{\lambda}{2u}y$, $S' = \frac{\lambda}{2u}S$ 。那么,聚焦扫描成像模型的一维光学传递函数为

$$\mathcal{H}(u, W_{20}) = \frac{1}{2S'} \int_{W_{20}-S'}^{W_{20}+S'} (1 - |u|) \cdot \text{sinc}\left[\frac{2uW'_{20}}{\lambda}(1 - |u|)\right] dW'_{20}, \quad (9)$$

进一步化简可得

$$\mathcal{H}(u, W_{20}) = \frac{1}{2S'} \left\{ \text{sinint}\left[\pi u(|u| - 1)\right] \left[\frac{2}{\lambda}(W_{20} - S') \right] - \text{sinint}\left[\pi u(|u| - 1)\right] \left[\frac{2}{\lambda}(W_{20} + S') \right] \right\} / (\pi u). \quad (10)$$

类似地,可分析二维的聚焦扫描成像。矩形光瞳函数与相机的圆形光瞳函数近似^[18],利用这一特点分析聚焦扫描成像的不变性是可行的。在聚焦扫描成像模型中,其模糊函数为传统相机中不同平面上的模糊函数在扫描深度上的平均^[19]。设光学系统的二维光瞳函数为

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & |x|, |y| \leq \frac{1}{2}, \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (11)$$

在聚焦扫描成像模型中,设 $y'_1 \in y_1 + [-S_1, S_1]$, $y'_2 \in y_2 + [-S_2, S_2]$,可得聚焦扫描成像模型的二维模糊函数为

$$A(u, v, y_1, y_2) = \frac{1}{2S_1} \frac{1}{2S_2} \int_{y_2-S_2}^{y_2+S_2} \int_{y_1-S_1}^{y_1+S_1} (1 - |u|) \text{sinc}[(1 - |u|)y'_1] (1 - |v|) \text{sinc}[(1 - |v|)y'_2] dy'_1 dy'_2 = \frac{1}{2S_1} \frac{1}{2S_2} \{ \text{sinint}[(|u| - 1)\pi(y_1 - S_1)] - \text{sinint}[(|u| - 1)\pi(y_1 + S_1)] \} \cdot \{ \text{sinint}[(|v| - 1)\pi(y_2 - S_2)] - \text{sinint}[(|v| - 1)\pi(y_2 + S_2)] \} / \pi^2, \quad (12)$$

式中: v 分别为光学系统在 y 方向的频率; y_1, y_2 分别为光学系统在 x 方向和 y 方向与聚焦误差成比例的系数; S_1, S_2 分别为 y_1, y_2 变化的最大范围。

设聚焦扫描成像的聚焦误差 $W'_{20} \in W_{20} + [-S', S']$,其中, $W_{20} = \frac{\lambda}{2u}y_1 = \frac{\lambda}{2v}y_2$, $S' = \frac{\lambda}{2u}S_1 = \frac{\lambda}{2v}S_2$ 。所以聚焦扫描成像模型的二维光学传递函数为

$$\mathcal{H}(u, v, W_{20}) = \int_{W_{20}-S'}^{W_{20}+S'} (1 - |u|) (1 - |v|) \text{sinc}\left[\frac{(1 - |u|)2uW'_{20}}{\lambda}\right] \text{sinc}\left[\frac{(1 - |v|)2vW'_{20}}{\lambda}\right] dW'_{20} =$$

$$\frac{1}{2S'}(1 - |u|)(1 - |v|) [T(kK_1, kK_2, W_{20} + S') - T(kK_1, kK_2, W_{20} - S')], \quad (13)$$

式中: $K_1 = (1 - |u|)u$; $K_2 = (1 - |v|)v$; $T(a, b, x) = \frac{(b-a)\text{sinc}[\pi(a-b)x] + (a+b)\text{sinc}[\pi(a+b)x]}{2ab} - x \text{sinc}\left(\frac{ax}{\pi}\right) \text{sinc}\left(\frac{bx}{\pi}\right)$, $a = kK_1$, $b = kK_2$ 。

3.2 光学传递函数的近似三维空间不变性

在光学系统中,三维空间不变性是指在不同深度、不同位置的物点对应的点扩展函数^[4]近似不变。由于光学传递函数是点扩展函数在频域中的表达,通过分析光学传递函数的性质,可以分析光学系统三维不变性。若成像系统具有近似三维空间不变性,则可用同一光学传递函数进行逆滤波成像,从而达到拓展景深的效果。下面具体分析聚焦扫描模型中的近似三维空间不变性。

图 2(a)、(c)分别为传统相机和聚焦扫描成像模型的一维模糊函数,其中色度条代表模糊函数的

大小,已进行归一化处理。图 2(b)、(d)分别是传统相机和聚焦扫描成像模型的一维光学传递函数。图 3 为聚焦扫描成像模型在不同面的点扩展函数,横坐标为光学系统的半径。从图 2 可以看出,传统相机模型的光学传递函数在不同深度下有明显变化。在聚焦扫描成像模型中,不同三维物点的光学传递函数随深度变化不敏感,具有近似深度不变性;图 3 中不同三维物点的点扩展函数随深度的变化不敏感,具有近似空间不变性。聚焦扫描成像模型具有近似三维空间不变性。

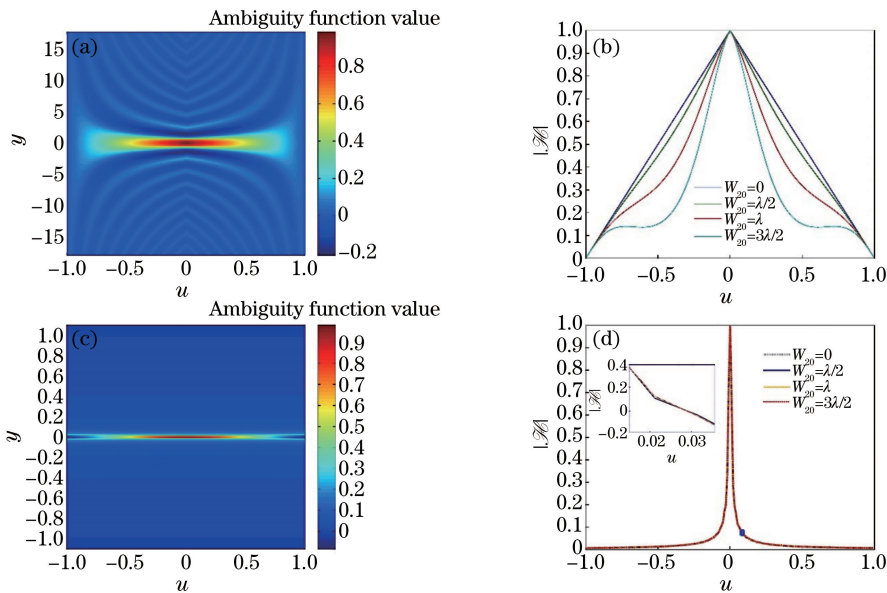


图 2 不同成像系统的一维模糊函数和光学传递函数。(a)传统相机的一维模糊函数;
(b)传统相机在不同 W_{20} 下的一维光学传递函数;(c)聚焦扫描成像模型的一维模糊函数;
(d)聚焦扫描成像模型在不同 W_{20} 下的一维光学传递函数及放大部分

Fig. 2 One-dimensional ambiguity function and optical transfer function of different imaging systems.

(a) One-dimensional ambiguity function of traditional cameras;

(b) one-dimensional optical transfer function of traditional cameras at different W_{20} values;

(c) one-dimensional ambiguity function of focal sweep imaging model;

(d) one-dimensional optical transfer function of focal sweep imaging model at different W_{20} values and partial enlarged view

图 4(a)~(c)是传统相机在不同 W_{20} 下的二维光学传递函数,图 4(d)~(f)是聚焦扫描成像模型在不同 W_{20} 下的二维光学传递函数,其中色度条代表光学传递函数的大小,已进行归一化处理。图 5

是不同成像系统在不同 W_{20} 下的二维光学传递函数在 $v=0$ 处的一维剖面图。从图 4、图 5 可以看出;传统相机模型的二维光学传递函数在不同深度下有明显的变化;聚焦扫描成像模型的二维光学传

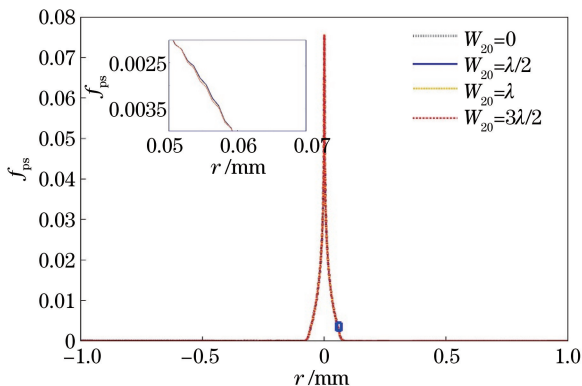


图 3 聚焦扫描成像模型在不同 W_{20} 下的一维点扩展函数及放大部分

Fig. 3 One-dimensional point spread function of focal sweep imaging model at different W_{20} values and partial enlarged view

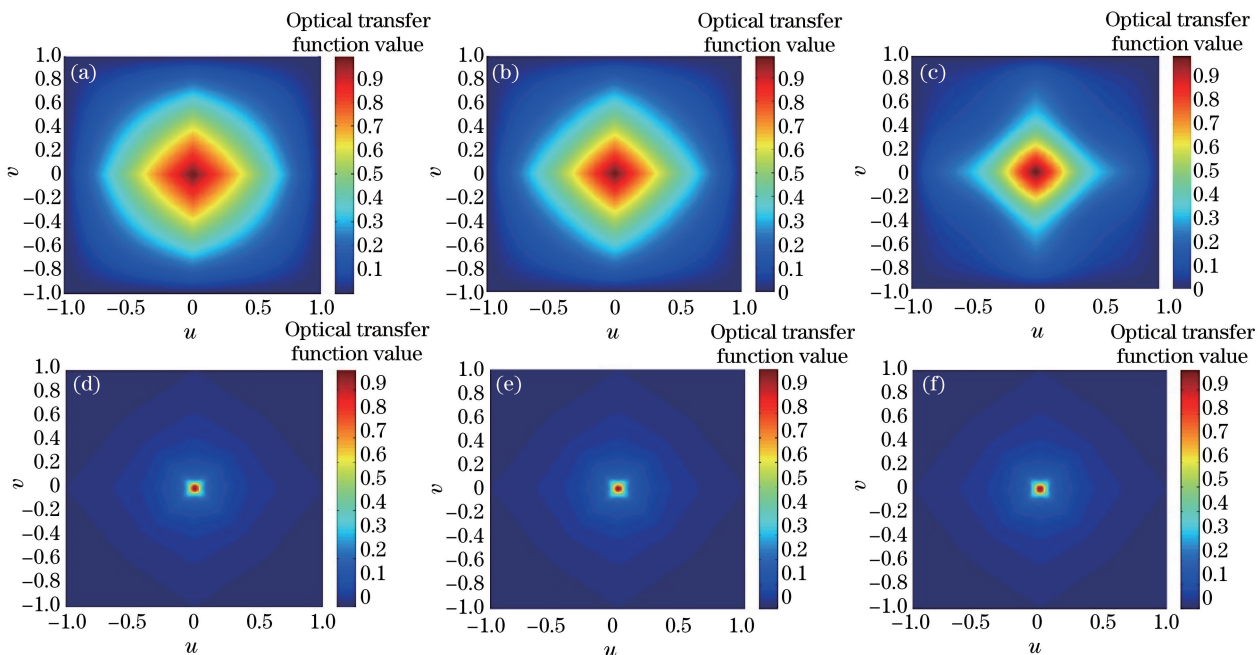


图 4 不同成像系统的二维光学传递函数。(a)~(c)传统相机模型在不同 W_{20} 下的光学传递函数；
(d)~(f)聚焦扫描成像模型在不同 W_{20} 下的光学传递函数

Fig. 4 Two-dimensional optical transfer function of different imaging systems.

(a)-(c) Optical transfer function of traditional camera model at different W_{20} values;

(d)-(f) optical transfer function of focal sweep imaging model at different W_{20} values

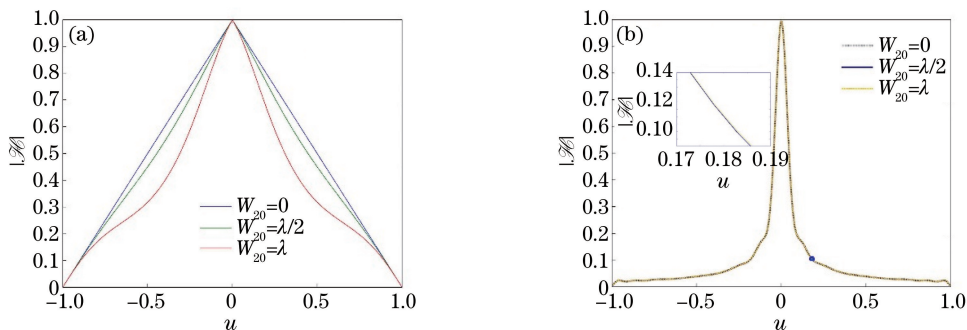


图 5 不同成像系统在不同 W_{20} 下的二维光学传递函数在 $v=0$ 处的一维剖面。(a)传统相机模型；(b)聚焦扫描成像模型

Fig. 5 One-dimensional profile at $v=0$ of two-dimensional optical transfer function of different imaging systems at different W_{20} values. (a) Traditional camera model; (b) focal sweep imaging model

递函数随深度变化不敏感。因此,聚焦扫描成像模型具有近似三维空间不变性。

3.3 聚焦扫描的逆滤波计算成像

由于聚焦扫描成像模型具有近似三维空间不变性,可根据求得的光学传递函数进行逆滤波计算成像。利用聚焦扫描成像模型进行数据采集,将图像变换到频域;根据 3.1 节计算该模型的光学传递函数;以该函数为频率退化滤波器,进行逆滤波计算成像,得到中间像的频域信息;最后变换到空域上即可得到景深拓展的图像。由此建立聚焦扫描的逆滤波计算成像模型。

4 景深拓展性能分析

聚焦扫描成像模型中扫描范围的选择决定了光学系统扩展景深的能力,是设计扫描模型的关键性因素。扫描范围指在曝光过程中聚焦扫描成像模型探测器移动的距离。为了探究扫描范围对聚焦扫描成像模型景深拓展性能的影响,本课题组采用 HOPKINS 判据^[20]进行判断。HOPKINS 判据是指在离焦下,当光学系统任何频率处的调制传递函数(MTF)值(光学传递函数的绝对值)大于等于未离焦 MTF 值的 80%时,认为成像质量是良好的,即

$$\left| \frac{\mathcal{H}(u, W_{20})}{\mathcal{H}(u, 0)} \right| = \left| \frac{A(u, y)}{A(u, 0)} \right| \geq 0.8. \quad (14)$$

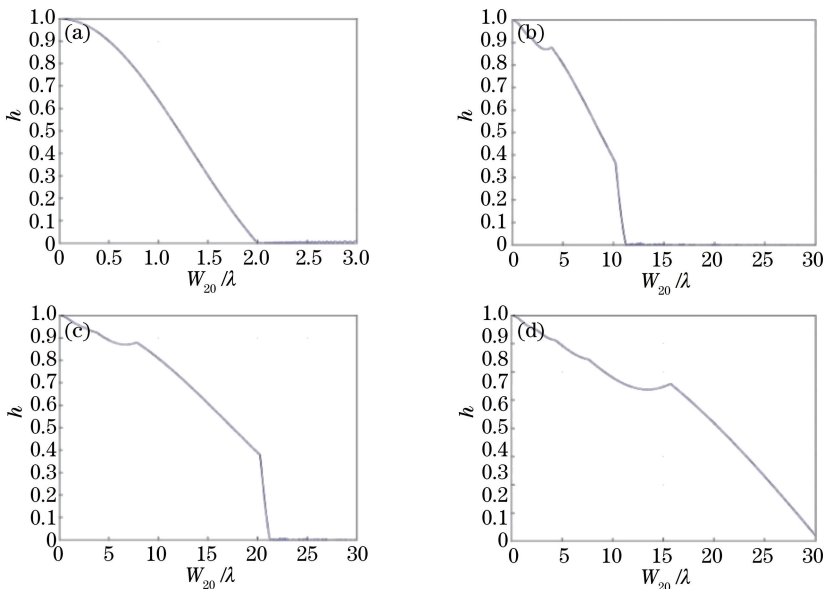


图 6 不同成像系统的离焦容限。(a)传统相机模型的离焦容限;

(b)~(d)聚焦扫描成像模型在扫描范围分别为 0.09, 0.18, 0.36 mm 时的离焦容限

Fig. 6 Defocus tolerance of different imaging systems. (a) Defocus tolerance of traditional camera model; (b)-(d) defocus tolerances of focal sweep imaging model in sweep distance of 0.09, 0.18, 0.36 mm

根据(14)式可求出在特定空间频率下的离焦容限 $W_{20\max}$, 利用在不同离焦量下的 $h = \min \left[\frac{\mathcal{H}(u, W_{20})}{\mathcal{H}(u, 0)} \right]$ 作为纵坐标, 离焦量作为横坐标绘图, 可以判断系统离焦下的成像质量。选取光学系统的主波长为 550 nm, 对于 $f = 12.5$ mm, $f/\# = 1.4$ 的相机模型, 聚焦扫描成像模型的扫描范围分别为 0.09, 0.18, 0.36 mm, 对应的取值分布分别为 $[12.635$ mm, 12.725 mm]、 $[12.59$ mm, 12.77 mm] 和 $[12.50$ mm, 12.86 mm]。

图 6(a)是由传统光学系统所得的离焦容限, 可以看到在 $W_{20\max} = 0.71\lambda$ 左右处, h 降到了 0.8, 即 $W_{20\max} > 0.71\lambda$ 时, 成像质量变差, 其对应的景深范围约为 $[0.73$ m, 0.77 m]。图 6(b)~(d)是由不同扫描范围的聚焦扫描成像模型所得的图像。由图 6(b)可以得到在扫描范围为 0.09 mm 时, 即 $W_{20\max} = 5.04\lambda$ 左右时, h 降到了 0.8, 其对应的景深范围约为 $[0.62$ m, 0.95 m]; 由图 6(c)可以得到在扫描范围为 0.18 mm 时, 即 $W_{20\max} = 10.15\lambda$ 左右时, h 降到了 0.8, 其对应的景深范围约为 $[0.53$ mm, 1.30 mm]; 由图 6(d)可以得到在扫描范围为 0.36 mm 时, 即 $W_{20\max} = 20.45\lambda$ 左右时, h 降到了 0.8, 其对应的景深范围约为 $[0.41$ m, 5.13 m]。由结果分析可知, 随着扫描范围增大, 聚焦扫描成像模型的离焦容限变大。

5 数值模拟

设定相机参数为： $f = 12.5 \text{ mm}$, $f/\# = 1.4$, 主波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 。利用 Kuthirummal 等提出的聚

焦扫描成像中同一像面的点扩展函数与本课题组得到的点扩展函数进行比较分析,结果如图 7 所示。图中,两点扩展函数近似,从而验证了所提光学传递函数的正确性。

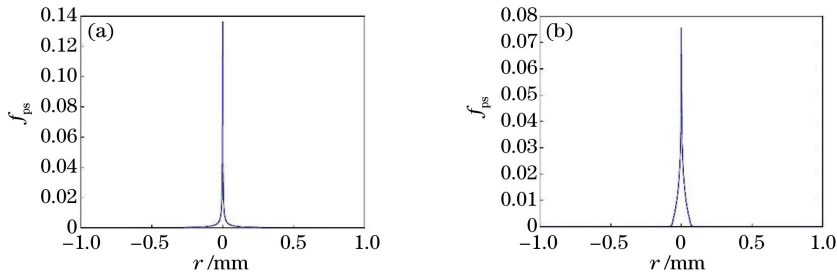


图 7 (a)利用 Kuthirummal 方法得到的点扩展函数;(b)本课题组得到的点扩展函数

Fig. 7 (a) Point spread function obtained by Kuthirummal's method; (b) our point spread function

利用分辨率板采用逆滤波算法进行数值模拟分析。首先模拟分析普通相机模型在不同成像面所成的图像。将图像变换到频域,以普通相机模型的光学传递函数为频域退化滤波器,模拟得到三维物点在探测器不同平面上的频域信息,最后变换到空域;再模拟分析聚焦扫描成像模型经过扫描后的中间像和去模糊之后的像。将图像变换到频域,由(13)式得到聚焦扫描成像模型的光学传递函数,以该函数为

频域退化滤波器,模拟得到系统所成中间像的频域信息,再对其进行逆滤波^[21]处理,最后变换到空域。

数值模拟表明,随着像平面位置的变化,传统光学成像系统成像的模糊程度不同。在同样的扫描范围内,因聚焦扫描成像模型的近似三维空间不变性,故而得到模糊程度近似相同的图像;对于扫描范围分别为 $0.09, 0.18, 0.36 \text{ mm}$ 的聚焦扫描成像模型,随着扫描范围增加,景深拓展性能变好。

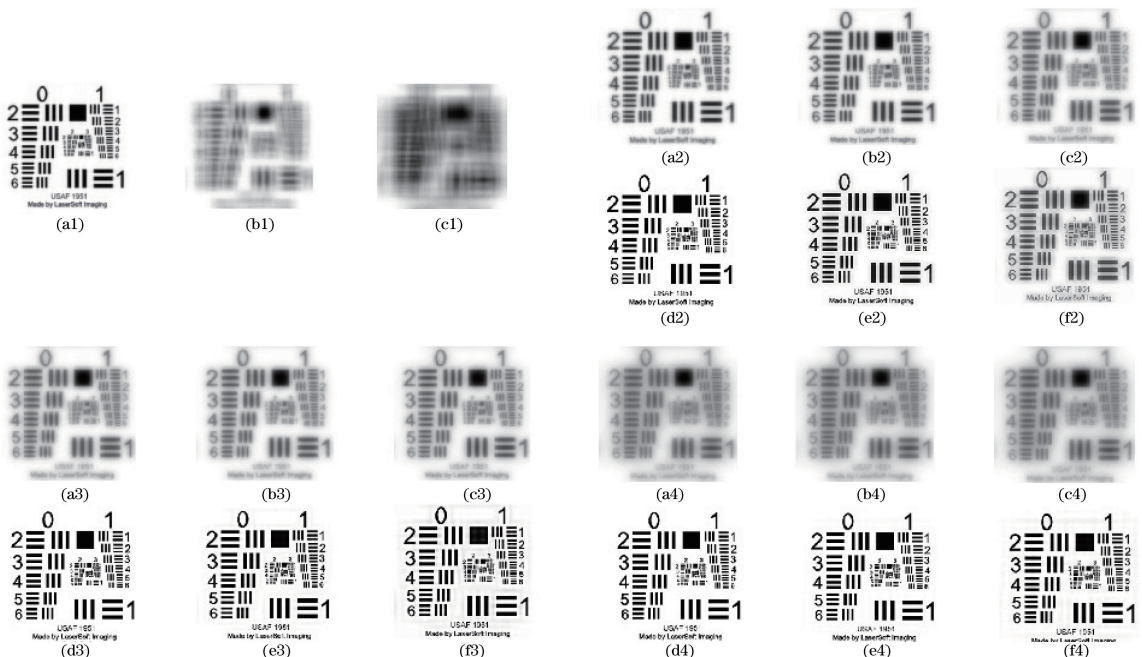


图 8 不同系统在不同 W_{20} ($W_{20} = 0, 5\lambda, 10\lambda$) 下的仿真结果。(a1)~(c1)传统成像系统探测器在不同 W_{20} 下的成像;(a2)~(c2)、(a3)~(c3)、(a4)~(c4)扫描范围分别为 $0.09, 0.18, 0.36 \text{ mm}$ 时,聚焦扫描成像模型在不同 W_{20} 下的模糊图像;(d2)~(f2)、(d3)~(f3)、(d4)~(f4)扫描范围分别为 $0.09, 0.18, 0.36 \text{ mm}$ 时,聚焦扫描成像模型在不同 W_{20} 下的去模糊图像

Fig. 8 Simulation results of different imaging systems at different W_{20} ($W_{20} = 0, 5\lambda, 10\lambda$) values.

(a1)-(c1) Image of traditional imaging system detector at different W_{20} values;

(a2)-(c2), (a3)-(c3), (a4)-(c4) blurred images and (d2)-(f2), (d3)-(f3), (d4)-(f4) deblurred images of focal sweep imaging model at different W_{20} values when scanning range is $0.09, 0.18, 0.36 \text{ mm}$

6 讨论

本课题组从模糊函数的角度出发,建立了聚焦扫描的逆滤波计算成像模型,并分析了景深拓展性能。为了探究扫描范围对该模型景深拓展性能的影响,本课题组比较三种扫描范围分别为 0.09, 0.18, 0.36 mm 的聚焦扫描成像模型(其他参数相同)的景深拓展性能(未考虑因环境条件和成像传感器性能等因素引入的噪声对光学系统的影响)。根据香农信息论可知^[22],在某一固定频率和离焦量下的信息量与表达式 $\lg(1 + |S/N|^2)$ 成正比,其中: S 为信号,在相机模型中,一般采用奈圭斯特频率下的光学传递函数; N 为噪声。系统的光学传递函数的下降速度会随着聚焦范围的增大而变快,在噪声不变的情况下,某一固定频率下系统的信噪比下降。聚焦扫描成像模型是以信噪比的下降为代价来获得更大的景深。应进一步探究在引入噪声的情况下,建立更为精确的聚焦扫描计算成像模型,优化去模糊方法^[23],分析聚焦扫描范围对光学系统景深拓展性能带来的影响。

7 结论

基于模糊函数理论,建立了聚焦扫描的逆滤波计算成像模型,分析了聚焦扫描成像模型扫描范围对景深拓展性能的影响。该研究成果为聚焦扫描成像模型的景深拓展性能分析与扫描范围的选择提供了理论依据,可进一步应用到其他景深拓展成像系统的分析中,在聚焦扫描成像模型的设计等方面具有良好的应用前景。图像的去模糊方法直接影响图像的恢复情况,针对实际场景,可通过优化去模糊方法得到更好的实验结果。

参 考 文 献

- [1] Levin A, Fergus R, Durand F, *et al.* Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 70.
- [2] Veeraraghavan A, Raskar R, Agrawal A, *et al.* Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 69.
- [3] Zhou C Y, Lin S, Nayar S K. Coded aperture pairs for depth from defocus[J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 93(1): 53-72.

- [4] Kuthirummal S, Nagahara H, Zhou C Y, *et al.* Flexible depth of field photography [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(1): 58-71.
- [5] Jin X, Liu L, Chen Y, *et al.* Point spread function and depth-invariant focal sweep point spread function for plenoptic camera 2.0[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 9947-9962.
- [6] Li S J, Fan X, Zhu B, *et al.* A method for small infrared targets detection based on the technology of motion blur recovery[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0610001.
李思俭, 樊祥, 朱斌, 等. 基于运动模糊复原技术的红外弱小目标检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0610001.
- [7] Huang Y L, Zhao J F, Zhang K Q, *et al.* Gradient constrained microscopic imaging quality improvement method with objective lens measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111001.
黄奕龙, 赵巨峰, 张克奇, 等. 结合物镜测试的梯度约束显微成像质量提升方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111001.
- [8] Brenner K H, Lohmann A W, Ojeda-Castaneda J. The ambiguity function as a polar display of the OTF [J]. Optics Communications, 1983, 44(5): 323-326.
- [9] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [10] Chi W L, George N. Electronic imaging using a logarithmic asphere [J]. Optics Letters, 2001, 26(12): 875-877.
- [11] Castro A, Ojeda-Castaneda J. Increased depth of field with phase-only filters: ambiguity function (invited paper)[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5827: 1-11.
- [12] Guo X H, Zhao Y J, Dong L Q, *et al.* Analysis of effect of phase plate decenter on wavefront coding imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0809002.
郭小虎, 赵跃进, 董立泉, 等. 相位板偏心对波前编码系统的成像影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0809002.
- [13] Liu Q X, Wang F, Wang Y C. Design of long depth of field array optical components defect detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0322002.
刘钦晓, 王方, 王渊承. 长景深阵列光学组件缺陷检测系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0322002.

- [14] Yokoya R, Nayar S K. Extended depth of field catadioptric imaging using focal sweep [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 15801663.
- [15] Miao D, Cossairt O, Nayar S K. Focal sweep videography with deformable optics [C]. IEEE International Conference on Computational Photography, 2013: 13580204.
- [16] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. Qin K C, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 104-108.
古德曼. 傅里叶光学导论 [M]. 秦克诚, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 104-108.
- [17] Zhang X D. Modern signal processing [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 339-342.
张贤达. 现代信号处理 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 339-342.
- [18] Yang Q G, Liu L R, Lang H T. Computation of the ambiguity function for circularly symmetric pupils [J]. Journal of Optics A, 2005, 7(8): 431-437.
- [19] Baek J. Fast computation of the OTFs for various computational cameras [R]. Palo Alto: Stanford University, 2010.
- [20] Bartelt H O, Ojedacastañeda J, Sicre E E. Misfocus tolerance seen by simple inspection of the ambiguity function [J]. Applied Optics, 1984, 23(16): 2693.
- [21] Jansson P A. Deconvolution of images and spectra [M]. Orlando, FL: Academic Press, 1996: 3224-3225.
- [22] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [23] Lebrun M. An analysis and implementation of the BM3D image denoising method [J]. Image Processing On Line, 2012, 2: 175-213.

附录

已知光学系统的一维光瞳函数为

$$P(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |x| > \frac{1}{2} \end{cases}, (1)$$

传统相机的光瞳函数为

$$A_{\text{traditional}}(u, y') = \int_{-\infty}^{+\infty} P\left(t + \frac{u}{2}\right) P^*\left(t - \frac{u}{2}\right) e^{i2\pi y' t} dt = \int_{-\frac{1}{2} + \frac{|u|}{2}}^{\frac{1}{2} - \frac{|u|}{2}} P\left(t + \frac{u}{2}\right) P^*\left(t - \frac{u}{2}\right) e^{i2\pi y' t} dt = (1 - |u|) \text{sinc}[(1 - |u|)y']。 (2)$$

由光学函数与模糊函数的关系, 可得传统相机的光学传递函数为

$$\mathcal{H}_{\text{traditional}}(u, W_{20}) = (1 - |u|) \text{sinc}\left[\frac{2uW_{20}}{\lambda}(1 - |u|)\right]。 (3)$$

在聚焦扫描模型中, 设 $y' \in y + [-S, S]$, 其一维模糊函数为

$$A(u, y) = \frac{1}{2S} \int_{y-S}^{y+S} (1 - |u|) \text{sinc}[(1 - |u|)y'] dy' = \frac{1}{2S} \{ \text{sinint}[(|u| - 1)\pi(y - S)] - \text{sinint}[(|u| - 1)\pi(y + S)] \} / \pi。 (4)$$