

基于衍射追迹的集成成像重构算法

范广飞 陈林森 魏国军 顾新宇

苏州大学物理与光电能源学部, 江苏 苏州 215006

摘要 衍射受限集成成像光线追迹算法所重构的深度平面是物体深度的重聚焦图像, 重构图像像质模糊, 不利于物体的三维重构。针对这些问题, 提出了一种基于衍射追迹的深度平面重构算法, 由菲涅耳衍射公式计算物空间点源传播至成像系统各平面的光场分布, 最终求得每个采样点在传感器上的光强脉冲响应, 通过反解与光强脉冲响应相关的线性方程组, 实现物体深度平面的图像重构。仿真结果表明, 采用该方法实现的重构图像是物体的深度平面切片, 而且图像像质接近于原始图像, 有利于物体的三维重建。

关键词 成像系统; 集成成像; 计算重构; 菲涅耳衍射; 元素图像

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0511003

Computational Reconstruction Algorithm for Integral Imaging Based on Diffraction Tracing

Fan Guangfei Chen Linsen Wei Guojun Gu Xinyu

College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract Depth plane reconstructed by ray tracing algorithm in diffraction limited integral imaging is the refocused image of the object depth. But the image quality is blurring, which is not conducive to three dimensional reconstruction of the object. To solve these problems, a depth plane reconstruction algorithm based on diffraction tracing is proposed. The light field distribution on each optical element surface in the imaging system spread from the point source of the object space, is orderly calculated by the Fresnel diffraction formula, and the intensity pulse response of each sample point on the sensor is obtained finally. Depth plane image is reconstructed by solving the linear equation group related to the intensity pulse response. The simulation results show that the reconstructed image is depth slice of the object, and the image quality is close to the original image, which is beneficial to three dimensional reconstruction of the object.

Key words imaging systems; integral imaging; computational reconstruction; Fresnel diffraction; elemental image

OCIS codes 110.3010; 260.1960; 110.6880

1 引言

集成成像由法国科学家 Lippmann^[1]于1908年提出, 是一种利用微透镜阵列来记录和显示三维场景信息的立体显示技术, 因具有视角连续、视差完整、无需相干光源等诸多优点而得到广泛研究^[2-4]。集成成像技术分为图像记录和三维再现两个阶段。记录阶段, 由于每一个微透镜都从不同的方向观看物空间, 每个微透镜后面的传感器都记录了物空间一个不同角度的透视图, 称之为元素图像。再现阶段, 利用所获得的元素图像阵列可以由计算机算法重构出该三维物体^[5-6], 其中深度平面重构算法通过计算不同深度的平面来表达三维图像。传统的集成成像深度平面重构算法基于几何光学光线追迹原理^[7-8], 所重构的深度图像接近于重构深度平面的物体能被重聚焦再现, 但是远离深度平面的物体变模糊。随着制造工艺的进步, 微透镜和传感器像素尺寸越来越小, 成像微透镜衍射效应也越来越明显, 导致每个微透镜后面的元素图像像质退化^[9-12]。几

收稿日期: 2015-12-22; **收到修改稿日期:** 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91323303)

作者简介: 范广飞(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事全息和三维显示技术方面的研究。E-mail: 279696863@qq.com

导师简介: 陈林森(1961—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光信息与衍射器件、激光干涉光刻系统等方面的研究。

E-mail: lschen@suda.edu.cn(通信联系人)

何算法利用衍射退化的元素图像无法获得高质量的重构图像。

针对这些问题,本文提出了基于衍射追迹的集成成像深度平面重构算法。根据集成成像系统的参数,依次计算物方深度平面上的采样点源在各个成像元件表面上的光场分布,建立微透镜衍射成像模型,通过求解非负最小二乘优化问题,重构出高质量的深度平面图像,并对所得结果给予客观评价。

2 衍射追迹集成成像原理

图 1 为波动光学集成成像系统示意图,直角坐标系设置如图所示,微透镜阵列位于 $(x, y, 0)$ 平面,目标物体的两个深度平面分别为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_1, y_1, z_2) ,传感器位于 (x_2, y_2, z_3) 平面。图中微透镜为矩形形状,其孔径为 d ,焦距为 f 。假设物体深度平面采样数为 K ,各个平面几何尺寸及采样数均相等,分别为 $L_1 \times L_2$ 、 $M \times N$,微透镜阵列平面和传感器平面几何尺寸和采样数也相等,分别为 $L_3 \times L_4$ 、 $T \times W$ 。考虑该系统仅为菲涅耳近轴衍射成像,深度平面 (x_1, y_1, z_1) 上第 m 行 n 列的采样点 O 在传感器面衍射追迹成像分为三个过程:

1) 采样点 O 发出的球面波光场传播至微透镜前表面,其复振幅分布为^[13]:

$$\tilde{h}_{m,n}(x,y) = \frac{\exp(jkz_1)}{j\lambda z_1} \exp\left\{ \frac{jk}{2z_1} \left\{ [x - x_1(m)]^2 + [y - y_1(n)]^2 \right\} \right\}, \quad (1)$$

式中, $[x_1(m), y_1(n)]$ 为采样点 O 的几何坐标, λ 为系统照明波长, k 为波矢, $k = 2\pi/\lambda$ 。

2) 经过微透镜阵列的位相变换作用, $\tilde{h}_{m,n}(x, y)$ 传播至微透镜后表面的光场复振幅分布为:

$$\tilde{h}'_{m,n}(x,y) = \tilde{h}_{m,n}(x,y) \times \left[p(x,y) \otimes \text{comb}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \right], \quad (2)$$

$$p(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \exp[jkW(x,y)], \quad (3)$$

$p(x, y)$ 为光轴中心处单个矩形微透镜的位相变换函数, $W(x, y)$ 为波像差分布函数, $\text{comb}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right)$ 为梳状函数, \otimes 为卷积运算符号。对于无像差的理想成像微透镜有:

$$p(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \exp\left[\frac{-jk}{2f}(x^2 + y^2)\right]. \quad (4)$$

3) $\tilde{h}'_{m,n}(x, y)$ 传播至传感器 (x_2, y_2, z_3) 平面,得传感器上光场复振幅分布:

$$\tilde{U}_{m,n}(x_2, y_2) = \tilde{h}'_{m,n}(x, y) \otimes \left\{ \frac{\exp(jkz_3)}{j\lambda z_3} \exp\left[\frac{jk}{2z_3}(x_2^2 + y_2^2)\right] \right\}, \quad (5)$$

式中卷积计算,可以通过傅里叶变换求得^[14]:

$$\tilde{U}_{m,n}(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[\tilde{h}'_{m,n}(x, y)] \times \exp\left\{ jkz_3 \left[1 - \frac{\lambda^2}{2}(u^2 + v^2) \right] \right\} \right\}, \quad (6)$$

式中 \mathcal{F} 、 \mathcal{F}^{-1} 为傅里叶变换及逆变换算子, u, v 是传感器面的空间频谱。则采样点 O 在传感器上的光强脉冲

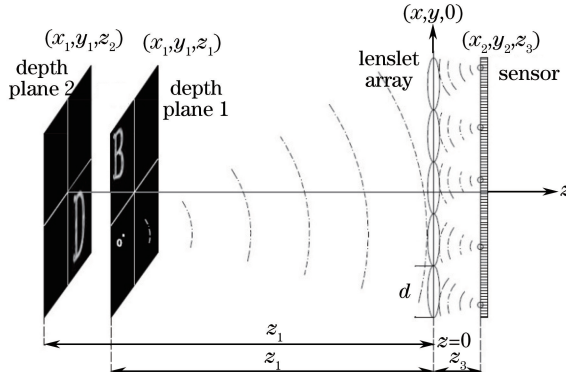


图 1 衍射集成成像系统示意图

Fig. 1 Schematic layout of diffraction II system

响应(IPF)为:

$$\mathbf{R}_{m,n} = |\tilde{U}_{m,n}(x_2, y_2)|^2, \quad (7)$$

对于非相干成像系统,深度平面 i 上的采样点 O 光强为 $I_{m,n}^i$, 则 K 个深度平面通过微透镜阵列在传感器上的元素图像阵列可以表示为:

$$\mathbf{G} = \sum_{i=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mathbf{I}_{m,n}^i \times \mathbf{R}_{m,n}^i. \quad (8)$$

3 集成成像深度平面重构算法

采用求解图 1 所示的两个深度平面,通过(7)式计算出深度平面上各采样点对成像传感器的 IPF 矩阵,则(8)式等价于线性方程组 $\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{X}$, 其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{1,1}^1(1) & \mathbf{R}_{2,1}^1(1) \cdots \mathbf{R}_{N,1}^1(1) & \mathbf{R}_{1,2}^1(1) \cdots \mathbf{R}_{M,N}^1(1) & \mathbf{R}_{1,1}^2(1) \cdots \mathbf{R}_{N,1}^2(1) & \mathbf{R}_{1,2}^2(1) \cdots \mathbf{R}_{M,N}^2(1) \\ \mathbf{R}_{1,1}^1(2) & \mathbf{R}_{2,1}^1(2) \cdots \mathbf{R}_{N,1}^1(2) & \mathbf{R}_{1,2}^1(2) \cdots \mathbf{R}_{M,N}^1(2) & \mathbf{R}_{1,1}^2(2) \cdots \mathbf{R}_{N,1}^2(2) & \mathbf{R}_{1,2}^2(2) \cdots \mathbf{R}_{M,N}^2(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{R}_{1,1}^1(W) & \mathbf{R}_{2,1}^1(W) \cdots \mathbf{R}_{N,1}^1(W) & \mathbf{R}_{1,2}^1(W) \cdots \mathbf{R}_{M,N}^1(W) & \mathbf{R}_{1,1}^2(W) \cdots \mathbf{R}_{N,1}^2(W) & \mathbf{R}_{1,2}^2(W) \cdots \mathbf{R}_{M,N}^2(W) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} I^1(1) \\ \vdots \\ I^1(N) \\ I^2(1) \\ \vdots \\ I^2(N) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} G(1) \\ G(2) \\ \vdots \\ G(W) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{R}_{m,n}^i(\omega)$ 表示深度平面 i 第 m 行 n 列采样点光强脉冲响应矩阵 \mathbf{R} 的第 ω 列元素, $\mathbf{I}^i(r)$ 表示深度平面 i 上所有采样点光强矩阵的第 r 列元素, $\mathbf{G}(t)$ 表示传感器上所获得的元素图像矩阵第 t 列元素。对于真实集成成像系统,已采集元素图像矩阵 \mathbf{G} , 根据系统参数由公式预先计算出物空间深度平面各点的 \mathbf{R} , 则集成成像深度平面重构转化为求解线性方程组 $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$ 的问题。该线性方程组一般为欠定或超定方程,没有精确解,通常采用伪逆法、左除法来求解,然而求出的 \mathbf{X} 值会有负值,不符合光强值 \mathbf{X} 非负的客观要求。对求解结果附加约束条件 $\mathbf{X} \geq 0$, 将求解线性方程组转化为非负线性最小二乘优化问题:

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\|_2^2 \\ \mathbf{X} \geq 0 \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $\|\cdot\|_2$ 为求 2 范数算子。

4 仿真实验结果与分析

4.1 衍射集成成像

采用 Matlab 编程仿真集成成像衍射过程,用图 3(a)所示的灰度字母图片 B、D 分别代表图 1 中的深度平面 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_1, y_1, z_2) , 其中图 B 物距 z_1 满足高斯成像公式 $1/z_1 + 1/z_3 = 1/f$, 矩形微透镜个数设计为 5×5 阵列,且微透镜成像无几何像差,每个微透镜下覆盖像素数为 64×64 , 传感器单个像素尺寸为 $2.5 \mu\text{m}$, 其他设计参数为 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, $f = 2.5 \text{ mm}$, $d = 160 \mu\text{m}$, $z_1 = 30 \text{ mm}$, $z_2 = 40 \text{ mm}$, $z_3 = 2.73 \text{ mm}$, $L_1 = 1.2 \text{ mm}$, $L_2 = 1.2 \text{ mm}$, $L_3 = 0.8 \text{ mm}$, $L_4 = 0.8 \text{ mm}$, $M = 61$, $N = 61$, $T = 320$, $W = 320$ 。

根据(1)~(8)式模拟计算实验结果如图 2 所示。图 2(a)~(d)为深度平面 (x_1, y_1, z_1) 光轴上采样点对

成像元件各表面的衍射光场分布示意图,图 2(e)为获得的元素图像阵列。

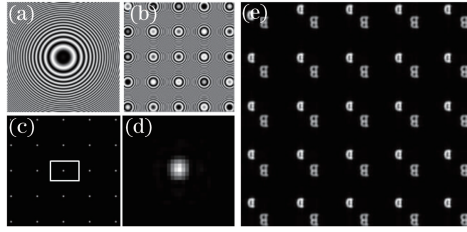


图 2 集成成像系统表面光场分布和采集的元素图像阵列。(a) 微透镜前表面;(b) 微透镜后表面;(c) 传感器上 IPF;
(d) IPF 部分放大图;(e) 采集的元素图像阵列

Fig.2 Optical field distribution of integral imaging system surfaces and recorded elemental images array. (a) Front surface of microlens; (b) back surface of microlens; (c) IPF of the sensor; (d) partial enlargement of IPF; (e) recorded elemental images array

4.2 深度平面重构

对(12)式的求解,Matlab 提供非负约束最小二乘求解表达式 $\mathbf{X} = \text{lsqnonneg}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ ^[15],利用这种算法对图 2(e)进行 4 次不同采样求解,重构出不同采样深度平面图像如图 3(b)~(e)所示,其中图像 D 重构深度 z_2 与原图像模拟深度 z_2 相同,均为 40 mm,而图像 B 的采样重构深度 z_1 依次为 29、29.7、30、31 mm。从图 3(b)、(c)、(e)可以看出,当采样深度与实际深度存在误差时仅能重构出模拟深度平面模糊的轮廓像,只有图 3(d)是采样重构深度与图像实际深度一致,这时才能重构出该深度平面清晰的图像。图 3(f)为几何光线追迹算法重构出的模拟深度平面重聚焦图像。由于衍射效应造成元素图像像质退化,光线追迹算法所重构的物体深度平面不能获得清晰的重聚焦图像,而采用本方法重构的图像是物体清晰的深度切片图像。

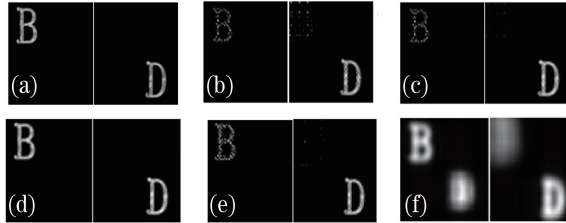


图 3 模拟深度图像和两种算法重构深度图像。(a)模拟深度图像;(b) $z'_1 = 29$ mm;
(c) $z'_1 = 29.7$ mm;(d) $z'_1 = 30$ mm;(e) $z'_1 = 31$ mm;(f)光线追迹方法

Fig.3 Simulated depth image and reconstructed depth images with two methods. (a) Simulated depth image;
(b) $z'_1 = 29$ mm; (c) $z'_1 = 29.7$ mm; (d) $z'_1 = 30$ mm; (e) $z'_1 = 31$ mm; (f) ray tracing method

4.3 像质评价

客观上利用两幅图像的均方根误差 e_{rms} 、峰值信噪比 R_{SN} 来计算图像之间的差异^[16]。表 1 和表 2 分别是重构深度平面图 3(d)、(f)与模拟深度平面图 3(a)之间的 e_{rms} 、 R_{SN} 结果。

表 1 衍射追迹法重构图像 e_{rms} 和 R_{SN}

Table 1 e_{rms} and R_{SN} of images reconstructed by diffraction tracing method

	e_{rms}	R_{SN}
Depth image B	5.3751	31.7116
Depth image D	8.5904	27.1648

表 2 光线追迹法重构图像 e_{rms} 和 R_{SN}

Table 2 e_{rms} and R_{SN} of images reconstructed by ray tracing method

	e_{rms}	R_{SN}
Depth image B	32.7594	16.0127
Depth image D	46.4046	12.5120

从以上数据可以看出,所提方法重构的深度图像与模拟深度图像具有较高的逼真度,衍射算法重构结果

优于光线追迹算法。

5 结 论

集成成像系统中由于成像微透镜的衍射效应造成元素图像像质模糊,传统的光线追迹方法无法重构出清晰的重聚焦深度平面。仿真结果表明,采用建立基于波动光学的衍射追迹成像模型,通过逆向求解算法能够重构出模拟物体高质量的深度切片图像,而当采样深度信息与实际值有微小误差,如误差为 $300\ \mu\text{m}$ 时,所重构的深度图像仅是模拟物平面模糊的轮廓像,体现了衍射算法的精密性。值得指出的是,真实的元素图像阵列是成像系统对连续场景采集得到的,该算法重构的图像像质不仅取决于对深度平面的采样率,而且取决于对场景的深度采样率,然而由于衍射计算数据量庞大,采样率越高对计算机内存和运算性能要求也越高。提高采样率、优化算法是本课题未来研究的重点方向。

参 考 文 献

- 1 G Lippmann. La photographie intergrale[J]. Comptes Rendus Aca Sci, 1908, 146:446-451.
- 2 Liu Yao, Deng Huan, Luo Chenggao, *et al.*. An integral imaging three dimensional display method based on aperture stop array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910004.
刘尧,邓欢,罗成高,等.基于光孔阵列的集成成像三维显示方法[J].光学学报,2014,34(9):0910004.
- 3 Zhang Juan, Zhou Liqiu, Zhang Bo, *et al.*. Study on reconstruction resolution of integral imaging technique based on ray-tracing method[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1108004.
张娟,周立秋,张勃,等.基于光线追迹的集成成像技术重建分辨率研究[J].中国激光,2015,42(11):1108004.
- 4 Wang Yu, Piao Yan. Depth extraction based on function fitting for multiple disparities in integral imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0411002.
王宇,朴燕.基于多视差函数拟合的集成成像深度提取方法[J].光学学报,2015,35(4):0411002.
- 5 Hidenobu Arimoto, Bahram Javidi. Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction[J]. Optics Letters, 2001, 26(3): 157-159.
- 6 Wang Yu, Piao Yan. Computational reconstruction for integral imaging with sampled elemental images[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511003.
王宇,朴燕.基于元素图像阵列采样的集成成像重构方法[J].光学学报,2014,34(5):0511003.
- 7 S H Hong, J S Jang, B Javidi. Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging [J]. Optics Express, 2004, 12(3): 483-491.
- 8 J H Park, K Hong, B Lee. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. Appl Opt, 2009, 48(34): H77-H94.
- 9 M Broxton, L Grosenick, S Yang, *et al.*. Wave optics theory and 3-D deconvolution for the light field microscope[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25418-25439.
- 10 Cheng Gao, Xiao Xiao, Qionghua Wang, *et al.*. Analysis of the depth of field of integral imaging displays based on wave optics[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31263-31273.
- 11 Fumio Okano, Jun Arai, M Kawakita. Wave optical analysis of integral method for three-dimensional images[J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 364-366.
- 12 S Shroff, K Berkner. Image formation analysis and high resolution image reconstruction for plenoptic imaging systems[J]. Appl Opt, 2013, 52(10): D22-D31.
- 13 Goodman J. Introduction to Fourier optics[M]. New York: McGraw-Hill,1996.
- 14 钱晓凡.信息光学数字实验室(Matlab版)[M].北京:科学出版社,2015:35-37.
- 15 甘勤涛,聂永川,王微,等. Matlab 2012 数学计算与工程分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2012:361-364.
- 16 Zhang Yujin. Image processing and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 138-139.
章毓晋.图像处理和分析[M].北京:清华大学出版社,2004:138-139.