

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905355

多光谱 3D 成像方法*

蒋 威¹, 易定容¹, 孔令华², 余 卿¹, 崔长彩¹

(1. 华侨大学机电及自动化学院 厦门 361021; 2. 福建工程学院机械与汽车工程学院 福州 350118)

摘要:已有 3D 成像方法难以实现单目、单帧图像条件下同时获取场景图像及深度信息,也不能兼具时间效率高、体积紧凑、能耗低等优点。为此,创新地提出多光谱 3D 成像方法,通过具有纵向色散的光学成像镜头与快照式多光谱图像传感器两部分构成图像采集系统,使用离焦深度还原算法获取深度信息。其基本原理为:首先,增强纵向色差光学镜头使得同一物点在不同光谱波段图像上的成像离焦程度不同;其次,快照式窄带多光谱图像传感器单帧曝光同时获取多幅窄带光谱图像;再通过离焦深度还原算法根据多光谱图像边缘梯度获取 3D 信息。实验采用纵向色差增强型光学成像系统及快照式多光谱相机捕获 450 ± 10 nm、 525 ± 10 nm、 620 ± 10 nm 3 通道光谱图像,对 5 m 内场景进行 3D 深度恢复,获得了深度误差不高于 5 cm 的测量结果。实验结果表明多光谱 3D 视觉方法可以实现单目、所提单帧图像的深度估计。该方法能同时获得视觉及深度信息且无需空间位置配准及预先深度刻度,单帧图像处理平均耗时 0.186 s,图像采集系统尺寸为 $120\text{ mm}\times 77\text{ mm}\times 65\text{ mm}$,其工作功率约为 10 W,兼具时间效率高、体积紧凑、能耗低等优点。因此,所提方法有望在无人驾驶及智能机器人等领域获得广泛应用。

关键词: 离焦深度法;多光谱 3D 成像;纵向色散;快照式窄带多光谱成像;单目单次曝光 3D 成像

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Multispectral 3D imaging method

Jiang Wei¹, Yi Dingrong¹, Kong Linghua², Yu Qing¹, Cui Changcai¹

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The existing 3D imaging methods can hardly acquire both visual image and depth information of a scene using a single device and a single frame. They cannot have the merits of high efficiency, compact size, and low energy consumption at the same time. Therefore, this study proposes an innovative multispectral 3D imaging method. The method obtains depth from the defocused images, which are captured by an image capture system consisting of an optical imaging lens with longitudinal dispersion and a snapshot multispectral image sensor. Its basic principle is illustrated as follows. First, the inherent longitudinal chromatic aberration of an optical imaging system (especially the longitudinal dispersion-enhanced one) makes the defocusing blurs vary with different spectral bands. Secondly, a snapshot narrowband multispectral image (SNB-MSI) sensor is used to obtain multiple spectral images at each single imaging frame. Finally, the depth from defocusing algorithm is utilized to recover the 3D information from the edge gradients of multiple spectral images. Evaluation experiments are conducted using a chromatic dispersion-enhanced optical imaging system and a SNB-MSI camera to capture 450 ± 10 , 525 ± 10 and 620 ± 10 nm three spectral images to recover depth of objects that are within 5 m away from the camera. Experimental results suggest that error of depth recovery is no higher than 5 cm. The proposed multi-spectral 3D imaging method can realize depth estimation using a monocular and with a single frame image. The proposed method has capability of obtaining both visual and depth information without neither spatial registration nor pre-calibration of depth. The time of single frame 3D imaging time is about 0.186 s. The size of the image capture system is $120\text{ mm}\times 77\text{ mm}\times 65\text{ mm}$ and the working power of the image capture system is about 10W. The advantages of the proposed method include high time efficiency, compact volume, and low energy consumption. Therefore, the proposed multispectral 3D imaging method can be widely used in unmanned driving and intelligent robots.

收稿日期:2019-07-09 Received Date:2019-07-09

* 基金项目:国家自然科学基金(51775200)项目资助

Keywords: depth from defocus; multispectral 3D imaging; longitudinal dispersion; snapshot narrow band multispectral imaging; monocular single frame 3D imaging

0 引言

在成像领域,2D到3D成像的转变是可以与历史上从黑白到彩色成像的跨越比拟的又一个质的飞跃。3D成像作为人类认识世界、改造世界的重要信息来源,可以无接触地获取周边2D图像及深度信息。因此在机器人加工领域3D视觉系统相比于2D成像能提高机器人信息获取能力,能对环境做出快速反应,并适应新的环境。类似地,智能机器人的工作离不开3D视觉系统,目前在先进制造、包装、搬运、导航等领域对3D视觉均有需求。因此3D成像或者3D视觉法成为近几年的研究热点。按照是否使用特殊光源照射物体,3D视觉方法通常可以分为主动式与被动式两种。

常用主动式3D视觉法包括结构光测量法^[1-3]、时间飞行法(TOF)^[4-5]及全息干涉法^[6]等。结构光3D视觉法一般利用调制光源照射于物体表面,再通过成像设备获取图像,根据图像上的编码光解构出深度图像。结构光3D视觉法需多次曝光获取多帧图像才能获取3D信息,时间效率较低。另外该方法依赖于光源编码的信息,导致其在室外的应用受到限制。尽管增加光源功率可以满足室外应用要求,但也将增大设备的成本与能耗,编码光空间分布的稠密度也会影响深度图像的空间分辨率。TOF 3D方法,以该领域最先进代表微软 Kinect2 为例,该方法需要RGB相机和飞行时间测量仪器两台设备,设备同时工作才能获取场景物体图像及深度信息,且深度点云图与RGB图像间需要进行空间位置匹配才能还原3D信息。该方法受国外知识产权封锁,且记录光程差的感光元件及红外照明光源生产工艺复杂。该方法所使用的红外光源在户外应用易受到干扰。因此,主动式3D视觉法普遍存在能耗高、难以户外使用、难以实现单目、单帧获取3D信息等问题。

被动式3D视觉法由于使用自然或者环境光源作为照明,相比主动式3D视觉方法能耗更低,能很好地适应室内外的测量需求。被动式3D视觉法主要包括视差法及离焦深度法。视差法是工业上常用被动深度测量方法,该方法获取目标不同观察角度下的图像,探测端多采用双相机实现^[7-8],单相机也可用位移法^[9-10]或分光路法^[11-13]实现多角度图像获取,最后对图像上物点进行匹配计算,根据同一物点在两张(甚至多张)图像上的差异计算深度。这种测量方法需要相机对物点清晰成像,且图像匹配算法计算量较大,因此这种常用视觉方法的实时性提升受到限制;较远处物体在不同视角下成像位置

差异可能小于一个像素,深度估计范围提升受到图像分辨率、系统结构与相机视场角的限制。

离焦深度法(depth from defocus, DFD)可以实现单目、单帧3D视觉。该方法比视差法3D视觉具有更紧凑的结构,同时避免了长期困扰视差法的多幅图像空间配准难题。在具有低能耗且紧凑结构的同时,也能获得图像及深度信息,因此受到学者的广泛研究。Pentland^[14]于1987年首次提出DFD,文献[15-20]通过对比分析图像模糊情况并结合成像系统点扩散函数,从而推知该帧图像各点的深度信息。文献[21]采用FPGA硬件加速,在14ms内完成离焦深度法运算。针对DFD 3D视觉方法存在的双解决问题,即图像同一模糊程度可以对应物体在对准平面前后的两个不同位置,哈佛大学采用减小绿色图像光圈来克服DFD双解问题^[22],Haim等^[23]和Milgrom等^[24]通过在相机前安装波长相关掩膜,Sitzmann^[25]及Trouvé等^[26-27]提出使用色散成像系统使得不同光谱波长具有不同点扩散函数等方法解决DFD双解问题。然而,已有DFD方法均采用彩色相机获取红绿蓝颜色图像,不能彻底分开不同波长的点扩散函数所对应的图像。为此,本文在已有DFD 3D成像基础上提出多光谱3D视觉方法,使用快照式窄带多光谱图像传感器,结合纵向色散增强型成像系统,同时进行光谱图像获取与深度估算。

1 多光谱三维视觉原理

1.1 多光谱三维视觉成像模型

DFD使用图像边缘模糊量来估计深度。场景中深度变化一般发生在阶跃型边缘,故本文利用图像中阶跃型边缘的模糊程度进行深度估计。理想的阶跃型边缘可以表示为:

$$f(x) = Au(x) + B \quad (1)$$

式中: $u(x)$ 为阶跃边缘函数; A 、 B 分别为边缘的幅值与偏置; $x=0$ 表示边缘中心位置。假定镜头成像遵循薄透镜成像原则,如图1所示^[28],当物点处于物方对准平面 d_f 时,所有波段图像均汇聚到一点(蓝色点划线所示);而当物点偏离物方对准平面 d_f 时,不同波段图像将等程度模糊(红色虚线所示)。模糊的图像可以视为清晰图像与点扩散函数(point spread function, PSF)的卷积形成。通常PSF接近高斯正态分布 $g(x, \sigma)$,模糊图像边缘模型可表示为:

$$i(x) = f(x) * g(x, \sigma) \quad (2)$$

模糊系数 σ 与深度 d 的关系为:

$$\sigma = kb = kDs \left| \frac{1}{d_f} - \frac{1}{d} \right| \quad (3)$$

式中： k 为常数； b 为点成像模糊直径； D 为光学系统通光孔径； s 为像面与光学系统距离； d_f 为对准平面深度； d 为物体深度。如图1所示为点光源薄透镜成像模型，在定焦系统中， D 、 s 、 d_f 为常量。

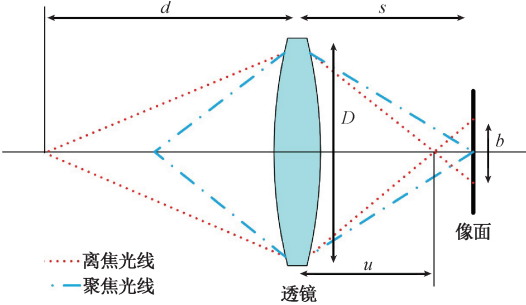


图1 理想薄透镜点光源成像模型

Fig.1 Imaging model of an ideal thin lens

然而所有光学透镜均有色散。考虑到色散，不同波长光线具有不同的对准平面 d_f 。如图2所示，物距为 d 同一物点发出的光线，将根据波长不同而汇聚在不同像面上，成像模糊半径 b 将随波长 λ 变化，式(3)可写为：

$$\sigma_\lambda = kb = kDs \left| \frac{1}{d_\lambda} - \frac{1}{d} \right| \quad (4)$$

图2所示为式(4)中所反应的成像光斑半径与物体深度的关系：图像传感器获取的清晰图像波段波长 λ 随着物体深度 d 增加而增加。不同波段图像的模糊程度 σ_λ 既与波长有关，又与物距 d 有关。

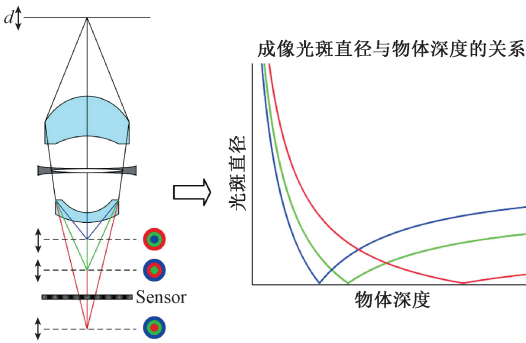


图2 色散透镜成像模型

Fig.2 Axial-chromatic enhanced optical imaging model

1.2 快照式窄带多光谱成像传感器

为了避免已有彩色 DFD 方法中不同波段之间信号串扰，采用快照式窄带多光谱相机^[29-30]测量式(4)中波长 λ 与图像模糊程度对应关系。相比于彩色相机所使用的红绿绿蓝 (RGGB) 贝尔排列方式 (如图3(a)所示的阴影区域)，快照式窄带多光谱相机 (snap-shot narrow band

multispectral imaging, SNB-MSI) 每个像素紧密排列着4个窄带光谱通道 (如图3(b)所示的阴影区域)。图4所示为 SNB-MSI 相机图像传感器透过率随波长变化曲线。

R	G	R	G	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
				450±10 nm	525±10 nm	450±10 nm	525±10 nm
G	B	G	B	λ_3	λ_4	λ_3	λ_4
				620±10 nm	415±10 nm	620±10 nm	415±10 nm
R	G	R	G	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
				450±10 nm	525±10 nm	450±10 nm	525±10 nm
G	B	G	B	λ_3	λ_4	λ_3	λ_4
				620±10 nm	415±10 nm	620±10 nm	415±10 nm

(a) 常规彩色相机像素
(a) Pixels of RGB camera

(b) SNB-MSI相机像素
(b) Pixels of SNB-MSI camera

图3 SNB-MSI 相机与常规彩色相机像素对比

Fig.3 Comparison of macro-pixels of conventional RGB color camera with SNB-MSI camera

通过图4可知，SNB-MSI 相机图像传感器最高透过率为 525 nm 通道，可达 85.96%。选取平均透过率最低的 450 nm 通道计算标志通道串扰的光学密度 (optical density, OD) 值。透过带透过率平均为 70%，长波一侧阻止带的透过率平均为 0.004%，根据定义获得 OD 为：

$$OD = \lg \frac{T_{\text{透过带}}}{T_{\text{阻止带}}} = \lg \frac{70\%}{0.004\%} = 4.24 \quad (5)$$

对于短波一侧阻止带透过率计算微滤片 OD 值可达 5^[29]，这极大地减少了不同波段图像间串扰的影响。

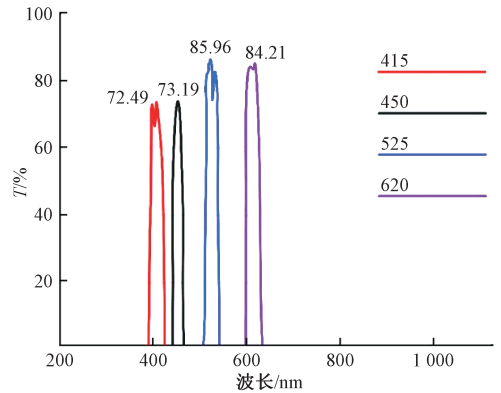


图4 SNB-MSI 相机微滤片上不同通道的光透过率
Fig.4 Transmittance rate of the four spectral bands of the SNB-MSI camera

采用 SNB-MSI 相机，一次曝光零时差获取来自场景经过纵向色散成像系统后模糊程度随波段变化的4幅窄带光谱图像。通过在线分离，即可得到4波段具有不同模糊程度的4幅图像。由于自然光中的 415 nm 通道的光非常微弱，因此本文只使用 $\lambda_1 = 450 \pm 10$ nm, $\lambda_2 = 525 \pm 10$ nm, $\lambda_3 = 620 \pm 10$ nm 波段的图像进行深度估计。

1.3 多光谱离焦深度还原算法

图 5 所示为通过计算窄带多光谱图像边缘梯度比值进行离焦深度还原算法的流程。为了便于介绍,只介绍一维情况下从边缘模糊量到深度估计的计算过程,该方法可以推广到二维情况。

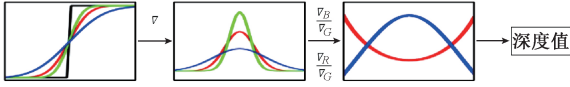


图 5 不同模糊量边缘及深度估计

Fig.5 Illustration of edges with different degree of blurs and flow of depth recovery algorithm

对于任意窄带光谱波段图像,根据式(1)及(2),边缘梯度可表示为:

$$\begin{aligned} \nabla_i(x) &= \nabla(f(x) * g(x, \sigma_i)) = \\ \nabla((Au(x) + B) * g(x, \sigma_i)) &= \\ \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right) & \quad (6) \end{aligned}$$

其中 $i \in (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, 采用归一化来消除不同波段梯度幅值不一致,则不同通道边缘梯度相除得到:

$$\frac{\nabla_i(x)}{\nabla_j(x)} = \sqrt{\frac{\sigma_j^2}{\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_i^2} + \frac{x^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (7)$$

$$i \neq j; i, j \in (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

对于边缘中心($x=0$)处有:

$$\frac{\nabla_i(0)}{\nabla_j(0)} = \sqrt{\frac{\sigma_j^2}{\sigma_i^2}} \quad i \neq j; i, j \in (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)中得:

$$\frac{\nabla_i(0)}{\nabla_j(0)} = \left| \frac{\frac{1}{d_j} - \frac{1}{d}}{\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d}} \right| \quad i \neq j; i, j \in (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (9)$$

$$d = \frac{\nabla_j(0) \mp \nabla_i(0)}{\nabla_j(0) - \nabla_i(0)} \quad i \neq j; i, j \in (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (10)$$

式(10)所得到的边缘深度估计方法推广到二维图像上依然适用,边缘提取采用 canny 算子进行检测,图像梯度通过计算水平梯度 ∇_x 与垂直梯度 ∇_y 获得:

$$\nabla = \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2} \quad (11)$$

2 实验验证

2.1 实验场景

实验场景如图 6 所示,在场景内,玩具兔子置于距相机 2 m 位置,502 胶盒子置于 1.5 m 位置。采用 LED 光源的手电筒作为照明。本原理验证实验所使用色散透镜

为彩色共聚焦用纵向色散增强型光学成像透镜^[31],使用的 SNB-MSI 相机为 SNB-MSI-OD4 (宁波五维检测科技有限公司),电脑搭载 64 bit Win7 系统,处理器使用 Intel 的 i7-6500U 型号, RAM 为 8 G。该 3D 成像设备整体尺寸为 120 mm×77 mm×65 mm,其单帧图像还原深度平均耗时约为 0.186 s,工作功率约为 10 W。

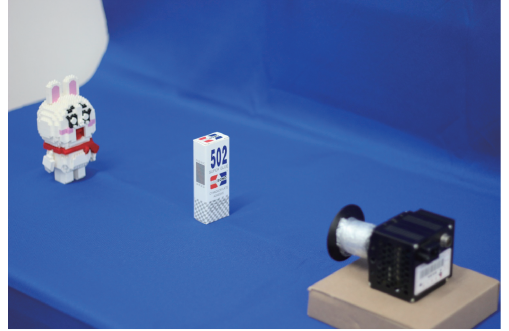


图 6 实验场景布置

Fig.6 Experimental setup

2.2 零时差获取多幅窄带光谱图像

从 SNB-MSI-OD4 多光谱相机得到的原始图像,通过分离获得 4 幅窄带光谱图像,舍弃灰度值微弱的 415 nm 波段图像,对其余 $\lambda_1 = 450 \pm 10$ nm, $\lambda_2 = 525 \pm 10$ nm, $\lambda_3 = 525 \pm 10$ nm 波段 3 幅窄带波段图像进行中值滤波除椒盐噪声。考虑到不同波段透过率(图 4)、照明强度、图像传感器光电效应等的不同,这些都将造成式(6)中各通道的边缘梯度幅值 A 不一致。为了去除边缘幅值的影响,需先对 3 通道图像进行灰度归一化处理,图 7 所示为最终分离及预处理结果。

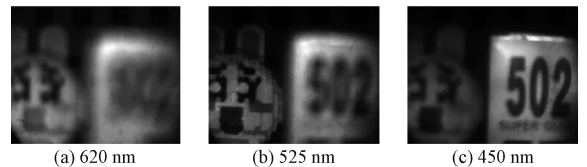


图 7 原始图像经过预处理分离出 3 幅窄带光谱图像
Fig.7 Raw image split three narrow-band spectral images after preprocessing

2.3 实验结果

1) 使用边缘梯度定性估算深度

根据图 2 原理预测,从 SNB-MSI-OD4 多光谱相机得到的原始图像中分离并预处理后获得的 $\lambda_1 = 450 \pm 10$ nm, $\lambda_2 = 525 \pm 10$ nm, $\lambda_3 = 525 \pm 10$ nm 3 波段窄带光谱图像应具有不同的模糊程度,如图 7 所示,较远的玩具兔子在 525 nm 波段清晰成像,而较近的 502 胶盒子在 450 nm 波段清晰成像。因此可以通过不同波段中表征清晰程度的边缘梯度值判断物体深度。如图 8 所示为 $\lambda_1 = 450 \pm 10$ nm,

$\lambda_2 = 525 \pm 10 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 525 \pm 10 \text{ nm}$ 3 波段图像梯度值分别赋值给 R, G, B 三基色的伪彩色显示。在图 8 中伪彩色显示的边缘梯度值, 可以定性地提供物体深度信息, 较近的房子显示为红色, 较远的玩具兔子显示为绿色。

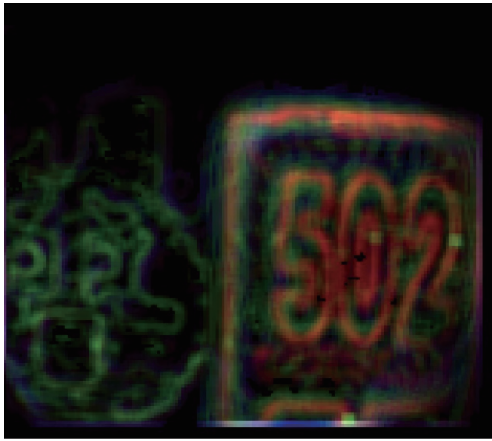


图 8 边缘梯度幅度伪彩色显示

Fig.8 The Pseudo color display of the edge-gradient values of the three-narrow band spectral images

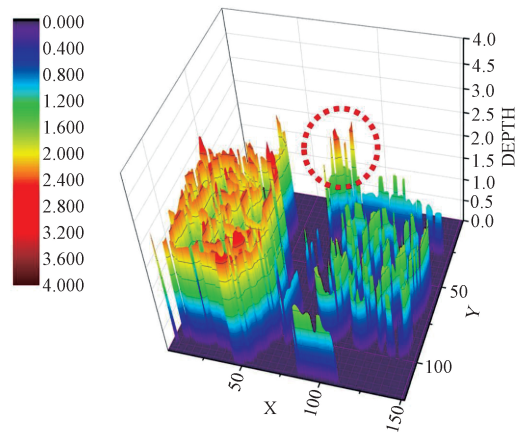
2) 使用边缘梯度比定量测量深度

图 9 所示为根据式(10)所获得的 3D 图像, 其中采用了 525 nm 通道的梯度图像作为式(10)中的分母, 分别用 450 nm、620 nm 通道的梯度图作为式(10)中的分子。图 9(a)所示为深度灰度显示, 图 9(b)所示为深度的 3D 显示。图 10 所示为将图 9 所示深度稀疏图像拓展至全场景所获得的 3D 图像, 其中拓展算法参考文献[20]中的方法。如图 10 所示, 采用灰度代表深度, 灰度值高表征物体距离较远。场景中兔子和盒子的深度估计均略高于实际数值, 对于 1.5 m 处的盒子估计深度为 $1.6 \pm 0.1 \text{ m}$, 对于 2 m 处的兔子玩具估计深度为 $2.2 \pm 0.1 \text{ m}$ 。误差产生是由于图像是离散的, 当物体处于对准平面时, 式(3)中的图像离焦直径为 1 而不是理论值 0, 造成了深度估计的偏差。



(a) 边缘深度估计灰度图像

(a) Depth estimation at edges displayed as gray intensity



(b) 三维显示

(b) Depth estimation at edges in 3D form

图 9 边缘深度估计结果

Fig.9 The results of depth estimation at edges

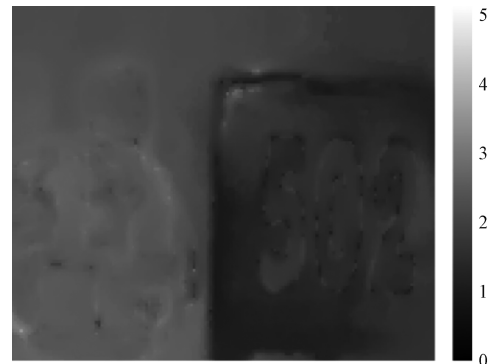


图 10 全图深度估算结果图像

Fig.10 Depth recovery for each pixel of the entire image

3) 非物方对准平面对深度估算影响

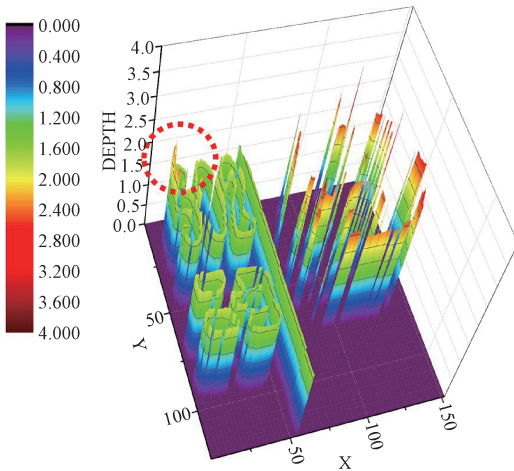
多光谱相机光谱波段数目决定了多光谱 3D 成像系统物方对准平面的个数。实验所采用的 3D 成像系统所对应的 620、525、415 nm 3 个波段物方对准平面深度分别为 4、2、1.5 m。为探索当场景部分物体不在这些对准平面位置时的深度估算效果, 实验中将兔子及盒子分别放置在 2.7 及 1.7 m 等非物方对准平面位置, 并再次使用深度估算法估计深度, 结果如图 11 所示。非对准平面物体估算深度与实际偏差缩小到 5 cm, 数值分布在真实值左右, 不再出现整体深度估计值偏高的现象。不足之处在于图像中依然存在局部偏差过大的现象(图 11 中红色虚线圆圈部分)。

4) 多光谱 3D 成像误差来源分析

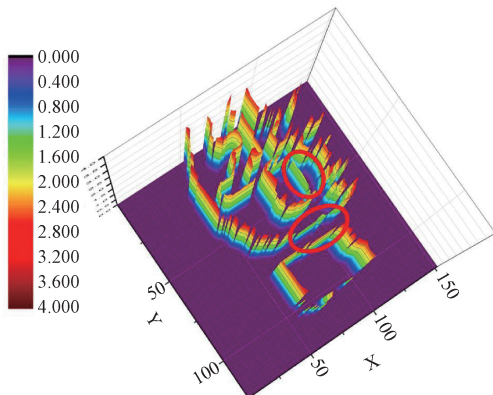
实验观察到两种误差来源, 一是物体表面高亮反光区域如图 9(b)与图 11(a)中红色虚线圆圈包括区域; 另一个是颜色单色性过强领域, 如图 11(b)中红色实线圆圈包括区域。对于前者, 当物体表面产生镜面反射, 镜面

反光不带有物体表面及深度信息,因此该区域深度估算失真,具体表现在图 9(b)、图 11(a)中盒子样品的左上角部分(红色虚线圆圈部分)。另外,当物体单色性过强且颜色波长接近某一波段中心波长时,将造成该波段图像边缘梯度不敏感,造成深度估计失真,如图 11(b)中兔子玩具的嘴部及下巴与围巾接壤处(红色实线圆圈部分)。而胶盒子上的红色、蓝色图样没有接近光谱相机任意一个通道的中心波长,因此并没有影响其深度估算准确性。

除了镜面反射、局部失真,其他误差来源包括灰度不均匀性。如图 11(a)中兔子玩具,亮度不均会使得边缘提取算法漏检亮度较暗的部分。然而,该误差来源相对于镜面反射及与多光谱窄带波段接近表面颜色处,深度估计的数值偏差依然控制在 5 cm 之内,如图 11(b)所示。



(a) 玩具兔子及纸盒子置于非对准平面上的深度估计结果
(a) Depth estimation of toy rabbit and paper box that are not on the focusing planes of any wavebands



(b) 玩具兔子置于非对准平面上的深度估计结果
(b) Depth estimation of toy rabbit that are not on the focusing planes of any wavebands

图 11 非对准平面放置物体深度估计结果

Fig.11 The results of depth estimation when objects not being on the focusing planes of any wavebands

3 结 论

本文提出一种基于离焦深度恢复的多光谱 3D 成像原理及方法。采用纵向色散增强型光学成像透镜及 SNB-MSI 相机,实验验证了多光谱 3D 成像方法,分析误差来源。实验结果表明,当物体处于 4 m 范围内,深度估计偏差小于 5 cm。后续研究包括扩大成像系统的视场范围,提升 SNB-MSI 相机的空间分辨率等,从而进一步提升 3D 成像性能。

多光谱 3D 成像可以实现单目单次曝光成像的 3D 还原。与已有的 3D 视觉方法相比,其优点是:1) 无需图像配准,因此可以实现即时运算,在深度估计速度方面有优势,使用该方法从单帧图像还原深度平均耗时为 0.186 s。2) 在原理上该方法只需要一个探测器,不需要光源及执行复杂空间匹配算法所需要设备,因此该方法所需系统结构紧凑,体积可以更小,能耗更低,本文使用的设备尺寸为 120 mm×77 mm×65 mm,其工作功率约为 10 W。3) 本文方法还能提供物体的光谱信息,具备 3D 测量的同时完成光谱分析的能力。4) 本文方法无需复杂的预先深度刻度。因此本文方法有望应用于智能机器人及智能驾驶技术中,能满足非结构环境对 3D 成像技术免预先刻度、效率高、能耗低、自重轻等技术指标的要求。

参考文献

- [1] NGUYEN T T, SLAUGHTER D C, MAX N, et al. Structured light-based 3D reconstruction system for plants[J]. *Sensors*, 2015, 15(8):18587-18612.
- [2] 成翔昊, 达飞鹏, 邓星. 基于关键点的由粗到精三维人脸特征点定位[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10): 256-264.
CHENG X H, DA F P, DENG X. Coarse-to-fine 3D facial landmark localization based on keypoints [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10): 256-264.
- [3] 白雪飞, 张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8):1912-1925.
BAI X F, ZHANG Z H. 3D shape measurement based on colour fringe projection techniques [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8):1912-1925.
- [4] HE Y, CHEN SH Y. Recent advances in 3D data acquisition and processing by time-of-flight camera [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:12495-12510.
- [5] ZANUTTI G P, MARIN G, MUTTO C D, et al. Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras [M]. Springer, 2016.
- [6] 刘喆, 张婉怡, 赵亮. 基于菲涅耳数字全息术的物体位移测试研究[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(5):70-76.

- LIU ZH, ZHANG W Y, ZHAO L. Research on displacement measurement of object based on fresnel digital holography [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(5):70-76.
- [7] XIE ZH, ZHANG J H, WANG P F. Event-based stereo matching using semiglobal matching [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(1):1-11.
- [8] ZHAO H J, XU L B, SHI SH G, et al. A high throughput integrated hyperspectral imaging and 3D measurement system [J]. *Sensors*, 2018, 18(4):1-17.
- [9] 刘春晖, 樊瑜波, 许燕. 基于单摄像头的三维体表损伤面积定量测量方法 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2018, 37(1):40-48.
- LIU CH H, FAN Y B, XU Y. Quantitative measurement of 3D skin wound area based on single camera [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2018, 37(1):40-48.
- [10] 郭会文, 吴新宇, 苏士娟, 等. 移动相机下基于三维背景估计的运动目标检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10):2573-2580.
- GUO H W, WU X Y, SU SH J, et al. 3D background estimation for moving object detection using a single moving camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10):2573-2580.
- [11] LI J R, DAN X Z, XU W, et al. 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system [J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 95:1-7.
- [12] YU L, PAN B. Color stereo-digital image correlation method using a single 3CCD color camera [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(4):649-657.
- [13] ZHONG F Q, QUAN CH G. A single color camera stereo vision system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(4):1474-1482.
- [14] PENTLAND A P. A new sense for depth of field [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(4):523-31.
- [15] 薛松, 王文剑. 基于高斯-柯西混合模型的单幅散焦图像深度恢复方法 [J]. *计算机科学*, 2017, 44(1):32-36.
- XUE S, WANG W J. Depth estimation from single defocused image based on gaussian-cauchy mixed model [J]. *Computer Science*, 2017, 44(1):32-36.
- [16] 明英, 蒋晶珏, 明星. 基于柯西分布的单幅图像深度估计 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(6):838-841.
- MING Y, JIANG J Y, MING X. Depth estimation of single image based on Cauchy distribution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6):838-841.
- [17] ZHANG X X, WANG R G, JIANG X B, et al. Spatially variant defocus blur map estimation and deblurring from a single image [J]. *Journal of Visual Communication And Image Representation*, 2016, 35:257-264.
- [18] LIU SH J, ZHOU F, LIAO Q M. Defocus map estimation from a single image based on two-parameter defocus model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(12):5943-5956.
- [19] TANG CH, HOU CH P, SONG ZH J. Defocus map estimation from a single image via spectrum contrast [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10):1706-1708.
- [20] ZHUO SH J, SIM T. Defocus map estimation from a single image [J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(9):1852-1858.
- [21] RAJ A N J, STAUNTON R C. Video-rate calculation of depth from defocus on a FPGA [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2018, 14(2):469-480.
- [22] CHAKRABARTI A, ZICKLER T. Depth and deblurring from a spectrally-varying depth-of-field [C]. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 2012:648-661.
- [23] HAIM H, ELMALEM S, GIRYES R, et al. Depth estimation from a single image using deep learned phase coded mask [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2018, 4(3):298-310.
- [24] MILGROM B, KONFORTI N, GOLUB M A, et al. Novel approach for extending the depth of field of Barcode decoders by using RGB channels of information [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16):17027-17039.
- [25] SITZMANN V, DIAMOND S, PENG Y F, et al. End-to-end optimization of optics and image processing for achromatic extended depth of field and super-resolution imaging [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2018, 37(4):114.
- [26] TROUVÉ P, SABATER J, BERNARD-BRUNEL A, et al. Turning a conventional camera into a 3D camera with an add-on [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10):2553-2563.
- [27] TROUVÉ P, CHAMPAGNAT F, LE BESNERAIS G, et al. Passive depth estimation using chromatic aberration and a depth from defocus approach [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(29):7152-7164.
- [28] HECHT E. *Optics*, 4 ed [M]. Addison Wesley, 2010.
- [29] 易定容, 孔令华, 刘婷, 等. 用于实时微型多光谱荧光成像方法的二维点阵式多通道窄带滤镜 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7):248-254.

YI D R, KONG L H, LIU T, et al. Two-dimensional narrow band multichannel micro-filter array for real-time compact multispectral fluorescent imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7):248-254.

[30] KONG L H, YI D R, SPRIGLE S, et al. Single sensor that outputs narrow band multi spectral images [J]. *Journal of Biomedical Optics Paper*, 2010 15(1):010502.

[31] 崔长彩, 李煌, 余卿, 等. 彩色共焦系统可调制色散物镜设计 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4):343-351.
CUI CH C, LI H, YU Q, et al. Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4):343-351.

作者简介



蒋威, 于 2017 年获得河南科技大学学士学位, 现为华侨大学机电及自动化学院硕士研究生, 主要研究方向为 3D 视觉、微观 3D 形貌及多光谱影像技术。

E-mail: jiangw@hqu.edu.cn

Jiang Wei received his B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2017. He is currently a master graduate student at Huaqiao University. His main research interests include 3D vision, Microscopic 3D shape reconstruction, and multispectral imaging technology.



易定容(通信作者), 于 1990 年获得国防科技大学学士学位, 2002 年获得加拿大麦吉尔大学博士学位, 2002~2005 年为加拿大多伦多桑尼布鲁克健康科学中心的博士后和助理研究助理, 2005~2006 年为香港中文大学的助理教授, 2007~2010 年为佐治亚理工学院的高级顾问和兼职讲师, 2011~2014 年为 Motic 研究部主任, 现为华侨大学教授, 主要研究方向为 3D 视觉、微观 3D 形貌、多光谱病理检测、高时空分辨成像、视觉检测技术与自动化装置。

E-mail: yidr@hqu.edu.cn

Yi Dingrong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 1990, and received her Ph. D. degree from McGill University in 2002.

From 2002 to 2005, she was a post-doctorate and an associate research assistant at Sunnybrook Health Sciences Center, Toronto, Canada. From 2005 to 2006, she was an assistant professor at the Chinese University of Hong Kong. From 2007 to 2010, she was a senior consultant and adjunct instructor at Georgia Institute of Technology. From 2011 to 2014, she was the Director of Innovative Research of Motic. She is currently a professor at Huaqiao University. Her main research interests include 3D vision, Microscopic 3D shape reconstruction, multispectral disease detection, high spatial-temporal resolution imaging, detection technology and automatic devices.



孔令华, 于 1988 年获得中国科学院高能物理研究所硕士学位, 2004 年获得加拿大麦吉尔大学博士学位, 1988~1991 年为国防科技大学的讲师, 1992~1997 年为中国工程物理研究院副研究员, 2005~2010 年为佐治亚理工学院的高级教师工程师, 2011~2015

年为厦门闵浪科技仪器有限公司的创始人和董事, 现为福建工程学院机械与工程学院的教授兼院长, 主要研究方向为光谱影像技术、超小超轻型多光谱传感器研发、视觉检测技术与自动化装置。

E-mail: klh@fjut.edu.cn

Kong Linghua received his M. Sc. degree from the Institute of High Energy Physics, Chinese Science Academia in 1988 and received his Ph. D. degree in mechanical engineering from McGill University, Montreal, Canada in 2004. From 1988 to 1991, he was a lecturer at National University of Defense Technology. From 1992 to 1997, he was an associate researcher at Chinese Academia of Engineering Physics. From 2005 to 2010, He was a senior faculty engineer at Georgia Institute of Technology. From 2011 to 2015, he was the founder and director of Minlang Instrument of Science & Technology, Xiamen, China. Since 2016, he has been a professor and Dean of the College of Mechanical and Transportation Engineering, Fujian Engineering Technology University. His research interests include spectral imaging technology and development of ultra-small and ultra-light multispectral sensors, detection technology and automatic devices.