

文章编号 1004-924X(2019)11-2459-08

不连续相位跳变点的三维深度分割

邓 吉, 李 健*, 封 皓, 曾周末

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:本文提出了一种简易的三维深度分割技术,该技术能够对存在突变表面的物体的不同深度区域进行分割。为实现该项技术,首先需要搭建由投影仪、相机和物体组成的深度分割平台。由投影仪向被分割物体投射一系列相移数字光栅;数字光栅经物体表面调制,被相机采集并存入计算机中待后续处理。将所采集的序列数字光栅进行顺序置换操作,依次获得三种序列的数字光栅组,通过最小二乘法对不同序列光栅组进行解相位并因此得到包裹相位组。包裹相位组经差分与相交运算后,可获得相交边缘;对相交边缘进行图像增强操作后即可对不同三维深度的不连续区域进行分割。仿真结果表明,对于 $900 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$ 范围的复杂面型,该算法的分割偏移误差仅为 2 pixel。实验结果表明:该技术能够对多个不同深度的相似颜色物体进行精确的分割。因此,本方法具备低消耗,高精度三维深度分割的能力。

关键词:图像分割;三维深度分割;包裹相位

中图分类号: TP391; TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192711.2459

Three-dimensional depth segmentation technique utilizing discontinuities of wrapped phase sequence

DENG Ji, LI Jian*, FENG Hao, ZENG Zhou-mo

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, School of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: tjupipe@tju.edu.cn

Abstract: To segment objects with abrupt change surface positioned at different depth, this paper presented a flexible technique for 3D depth segmentation. The system consisted of one projector, one camera, and the objects for segmentation. The first step was to establish the system for segmentation. The second step was to cast the phase-shifted gratings onto the object surface. The gratings, which were modulated by the 3D information of the objects, were then captured by the camera and sent to the computer for further processing. The wrapped phase sequence could then be calculated by changing the sequence of the phase-shifted patterns and using the least squares algorithm. By applying the neighbor pixel difference algorithm to the wrapped phase maps, the edges for segmentation could be retrieved further. Finally, these edges could be optimized and sent for segmentation. The simulation result shows that the method can effectively segment the complex objects with size 900×900 pixels, with the corresponding error reaching only two pixels. The experimental result shows that the

收稿日期:2018-12-03;修订日期:2019-02-02.

基金项目:国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”专项资助(No. 2016YFF0101802)

approach can segment objects with similar color precisely. The proposed method has the advantages of low cost, high precision, and can perform the task of 3D depth segmentation.

Key words: image segmentation; three-dimensional depth segmentation; wrapped phase

1 引言

三维深度分割的目的在于将不同深度的物体进行分割,从而方便对采集的三维数据进行处理与内容理解。随着当今高新技术产业对精度要求的提高与计算机技术的发展,三维深度分割技术逐渐在诸如图像语义理解、工业产品检测、三维重建解包裹及图像去噪等多方面逐渐得到广泛运用^[1-5]。在过去数十年的研究过程中,许多研究者分别从不同的角度对三维图像的深度分割技术进行了开发。

三维深度分割技术为图像分割技术的一个分支。最早出现的三维深度分割技术是基于点的深度分割方法^[6-7],该方法的基本单元是像素点,并通过设立像素点的颜色阈值对图像及三维数据整体进行分割,这种方法存在计算消耗小的优势。由于这种方法是基于颜色的,该技术难以对相同或相似颜色的物体进行分割。除此之外,该方法鲁棒性较低,因此该技术只能应用于较低精度的图像分割场景。基于图的分割方法^[8-9]对基于点的分割方法进行了改进,该方法通过检测不同物体边界值的强度差实现分割;在实现过程中,这种方法容依然易受到噪声的影响。

近年来,随着计算能力的大幅提升,卷积神经网络技术(如 CNN, FCNs)^[10-11]被广泛运用于人工智能的多方面领域。由于卷积神经网络具备准确识别判断能力,该技术在二维及三维图像分割领域取得了非常精确的识别与分割效果。在实现过程中,该方法首先需要对大量的数据集进行学习;在学习完成后,该技术则利用网络所习得的层级特征对物体进行分割操作。因此,基于卷积神经网络的深度分割技术的分割精度依赖于待训练数据集的规模与准确程度,以及研究者在多参数调参方面的熟练程度。

基于数据融合的分割方法是一种相对低成本并具备高处理速度能力的方法^[12-14]。在分割前,该技术需要首先获取三维点云数据;在点云数据的基础上将三维信息与诸如纹理、颜色等其他维

信息进行融合,从多维的角度寻求特征数据,进而达到分割的目的。然而,由于该方法存在着获取物体的三维点云数据的中间过程,因此点云数据的误差将不可避免的影响分割精度^[15-16]。

本文提出了一种简单快速的方法,仅利用包裹相位序列的不连续区域对深度不同的突变物体进行分割。与现今的分割方法相比,本方法在无需数据训练的前提下,即能精确的判断突变区域的边界位置,实现三维深度分割。仿真与实验结果验证了该技术具备计算消耗低、分割准确的性质。

2 深度分割系统的组成及工作原理

2.1 三维深度分割系统的硬件组成

图 1 为三维深度分割系统的工作原理图,该系统主要由投影仪,待分割物体与相机组成。与传统结构光投影系统相似,该系统的投影仪、待分割物以及相机构成了夹角为 θ 的三角关系。投影仪向被测物体投射相移光栅组,相移光栅组经物体表面调制后,该图像信号由相机采集并送入计算机系统数据进行运算,进而得出分割结果。

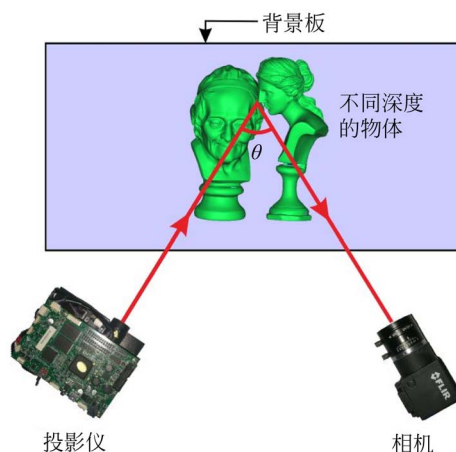


图 1 三维深度分割系统原理图

Fig. 1 Image of 3D depth segmentation system

2.2 三维深度分割的算法实现

在数据采集阶段,编号为 $I_1 \sim I_N$ 的 N 步等间

距相移光栅条纹依次被投射至物体表面。其中采用 $N(N \geq 3)$ 步等间距相移光栅组的数学表达式为:

$$I_i(x, y) = A + B \cos[\varphi(x, y) + \delta_i], \quad (1)$$

其中: $I_i(x, y)$ 表示第 i 幅相移光栅; A 表示光栅的基本强度, B 表示光栅的调制强度; $\varphi(x, y)$ 表示包裹相位值, $\delta_i = 2\pi * i/N$ 表示每幅光栅的相位偏移量。在实际测量过程中, 为了保证高信噪比的测量效果, 通常使得 A 与 B 的强度值取为

$$B = \frac{2 \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \cos \delta_i \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \sin \delta_i \right]^2}}{N}, \quad (3)$$

$$\varphi = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \cos \delta_i}. \quad (4)$$

由于调制强度可以反映物体的有效数据范围 (ROI), 因此在实际的分割过程中第一步可以通过设立简单的阈值将调制度低的阴影区域进行去除。并因此获得物体的 ROI 区域 R 。

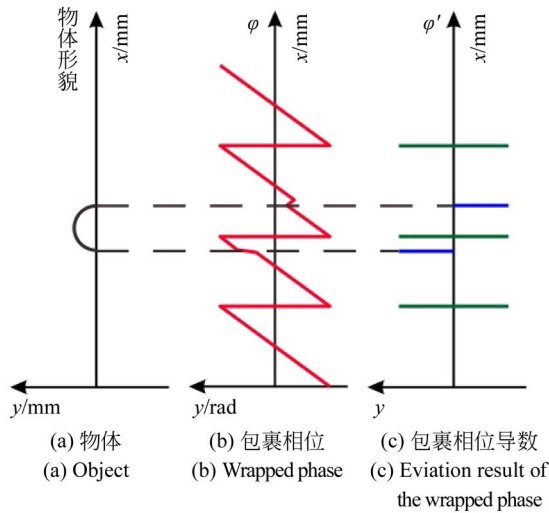


图 2 物体,包裹相位及包裹相位导数

Fig. 2 Object, wrapped phase and corresponding deviation result of wrapped phase

包裹相位值 $\varphi(x, y)$ 由反正切函数求解而来, 因此相位值包裹于 $(-\pi/2, \pi/2)$ 的范围。由于包裹相位与物体的高度存在相关关系, 因此在实际的测量环境下, 获取的包裹相位存在两类不同的相位跳变点。图 2(a) 展示了实际情况下对一个

127.5; 而整个光栅组将包含多周期的包裹相位值, 提升测量鲁棒性。

这些变量中, 基本强度 A , 调制强度 B 与包裹相位值 $\varphi(x, y)$ 可依次由光栅累加及最小二乘法^[17]求解获得:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N I_i(x, y)}{N}, \quad (2)$$

半圆环物体的测量结果; 图 2(b) 显示由最小二乘法获取的包裹相位值。对包裹相位进行邻域差分运算可获得如图 2(c) 所示的相位导数结果; 由图中可见, 相位导数值共存在两类值不为零的点; 其中一类位于值为 $-\pi/2$ 或 $\pi/2$ 的奇异点处, 该点的相位导数值幅值较高; 另一类点位置与物体的形貌突变区域重合, 且相位导数值幅值较低。在实际测量过程中, 为消除外界噪声影响, 相位导数不为零点 $D(x, y)$ 可由包裹相位的邻域差分运算获得:

$$D = \{(\varphi(x+1, y) - \varphi(x, y)) < Th\}, \quad (5)$$

其中, Th 表示阈值, 通常取 $0.3 \sim 0.5$ 。

假设由光栅序列 $S_1(I_1, I_2, \dots, I_N)$ 经最小二乘运算所得的包裹相位值为 $\varphi_1(x, y)$; 若将光栅序列分别更换为 $S_2(I_{\text{Round}(N/3)}, I_{\text{Round}(1+N/3)}, \dots, I_{\text{Round}(N/3-2)}, I_{\text{Round}(N/3-1)})$ 与 $S_3(I_{\text{Round}(2*N/3)}, I_{\text{Round}(1+2*N/3)}, \dots, I_{\text{Round}(2*N/3-2)}, I_{\text{Round}(2*N/3-1)})$ 则分别可获得另外两组包裹相位 $\varphi_2(x, y)$ 与 $\varphi_3(x, y)$ 。由于光栅顺序得到了改变, 包裹相位 $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ 与 $\varphi_3(x, y)$ 的相位跳变点位置 (图 2(c) 的较高值处) 会随之改变。然而物体的突变区域引起的相位突变位置独立于光栅组的变化, 并不会随光栅组的序列变化而产生改变。因此物体的表面不连续点集 D_T 可由公式 (5) 获得:

$$D_T = D_1 \cap D_2 \cap D_3, \quad (6)$$

其中 $D_i (i=1, 2, 3)$ 可分别由 S_1, S_2, S_3 经公式 (5) 进行运算求解。

D_T 可作为整个 ROI 区域的分割线对存在深

度突变的物体及邻域标签^[18]的方法对被测物体进行深度分割。其中待标签区域 $L(x, y)$ 为:

$$L(x, y) = R(x, y) - D_T(x, y), \quad (7)$$

经 D_T 分割后,可利用四邻域标签法对被分割区域进行标签分割运算,最终得到独立的分割结果。

3 仿 真

为测试该算法的运算能力,产生了如图 3 所示的待仿真三维面型,该三维面型的面积大小为 $900 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$;其连续变化的部分由 matlab 的 peaks 函数产生,除此之外,面型表面还包含一个方块的突变区域及一个‘O’型贯通孔,这两个突变区域将对该算法的精确程度进行量化验证。

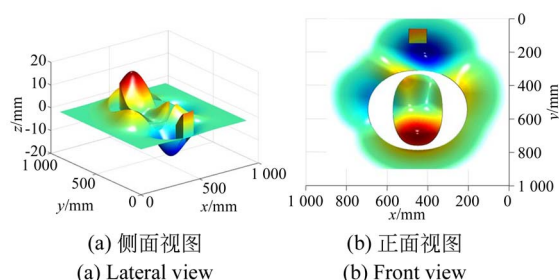


图 3 待仿真物体三维形貌
Fig. 3 Object for simulation



图 4 三幅经过物体高度调制的相移光栅 I_1 , I_2 和 I_3
Fig. 4 Gratings I_1 , I_2 and I_3 which are modulated by the objects

图 4 展示了经过物体高度调制的相移光栅,经最小二乘解包裹及邻域差分运算可分别获得如图 5(a)~图 5(c)所示的包裹相位及图 5(e)~图 5(f)所示的不连续相位跳变点 D_1 , D_2 与 D_3 。

D_1 , D_2 与 D_3 经相交运算后可得如图 6(a)所

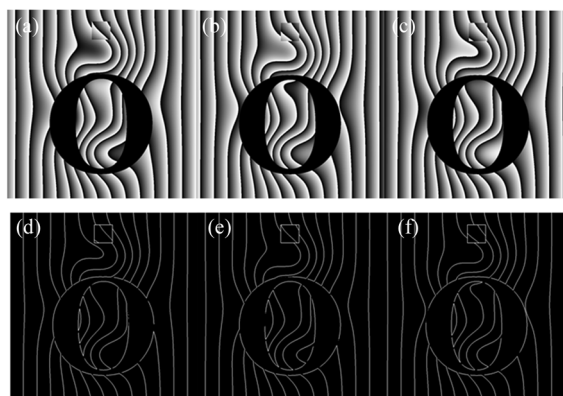
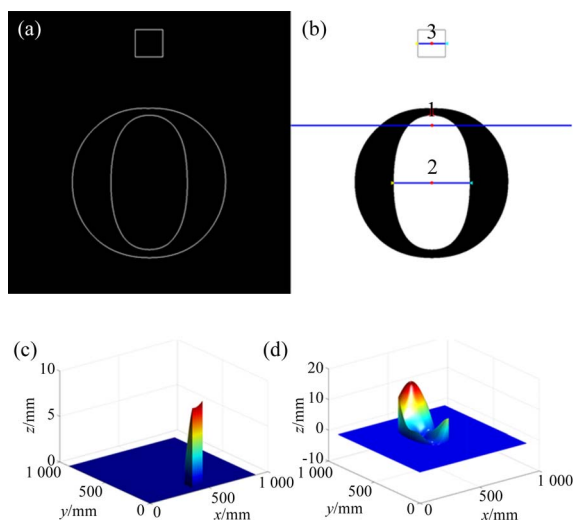


图 5 (a)~(c)包裹相位序列 $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ 与 $\varphi_3(x, y)$ 及对应的 (d)~(f)不连续区域 D_1 , D_2 与 D_3

Fig. 5 (a)-(c) present wrapped phase sequence $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$, $\varphi_3(x, y)$ and (d)-(f) show corresponding discontinuous points D_1 , D_2 and D_3 of wrapped phase maps

示的分割线 D_T ,整个 ROI 区域经 D_T 分割及四邻域标签运算后,可获得如图 6(b)所示的被标签结果。图 6(c)~图 6(e)分别展示了处于标签值为 3, 2, 1 区域的三维面型。这些子区域显示,该算法能对整个物体三维面型进行较好的分割。但是图 6(e)的红框显示,由于受到数值误差干扰,在拐角处出现了宽度大小为 2 像素的误判,从而导致了误差。但整体而言,该算法能够精确判断物体的突变区域,达到良好的分割效果(彩图见期刊电子版)。



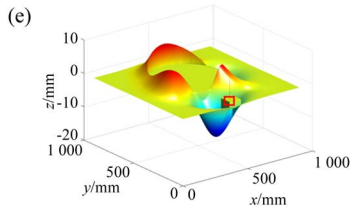


图 6 (a)提取的分割线 D_T (b)经四邻域标签法获得的标签区域(c)~(e)被打标签 3,2,1 的三维面型

Fig. 6 (a) The segment lines D_T . (b) The labeled regions. (c)-(e) The regions labeled by the labels 3, 2, 1

4 实 验

为验证所提出的算法,我们搭建了如图 7 所示的实验平台对该算技术行实验验证。该装置由被测物体、加装 12 mm 焦距镜头的工业相机(BFS-U3-13Y3M-C,分辨率 1 280 pixel×1 024 pixel)以及投影仪组成(LightCrafter4500,分辨率 1 140 pixel×912 pixel);相机与投影仪之间约成 30°的夹角。

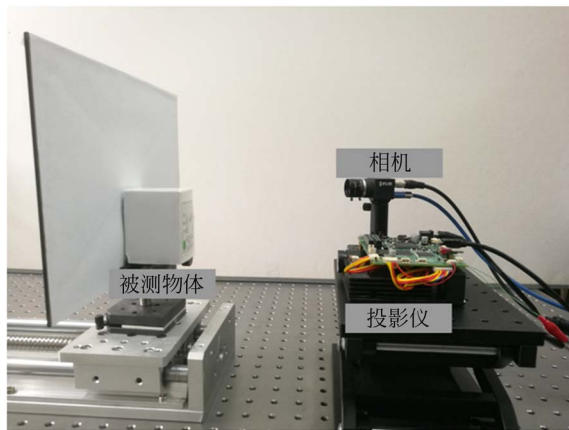


图 7 实验装置
Fig. 7 Experimental setup

4.1 有效性验证

如图 8(a)~图 8(c)所示,三幅周期为 60 pixel 的相移光栅依次投射于物体表面。光栅条纹经最小二乘运算及邻域差分运算处理后,可依次获得如图 9(a)~图 9(c)所示的包裹相位序列 $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$ 与 $\varphi_3(x, y)$ 及对应于图 9(d)~图 9

(f)所示的非零差分点集 D_1, D_2 与 D_3 。



图 8 (a)~(c)光栅采集图
Fig. 8 (a)-(c) The phase-shifted patterns

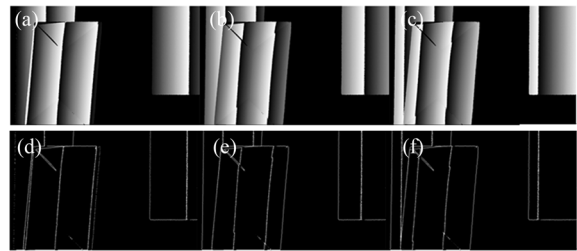


图 9 (a)~(c)包裹相位序列 $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$ 与 $\varphi_3(x, y)$ (d)~(f)对应的圆整导数值 D_1, D_2 与 D_3

Fig. 9 (a)-(c) The wrapped phase sequence $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$ and $\varphi_3(x, y)$ (b) The deviation of the wrapped phase maps D_1, D_2 and D_3

将相移光栅带入式(2)可恢复得如图 10(a)所示的物体完整面型;将 D_1, D_2 与 D_3 进行相交运算可获得如图 10(b)所示的分割线 D_T ,接着用

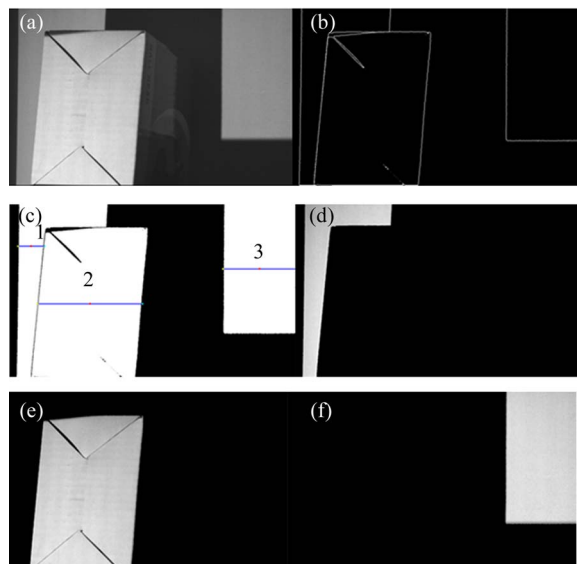


图 10 (a)被恢复物体图像 (b)边界图像 (c)被打标签的区域(d)~(f)对应的每个区域

Fig. 10 (a) The recovered image (b) The edges for depth segmentation (d)-(f) The sub-regions

分割线分割整个 ROI 区域并进行四邻域标签运算可获得如图 10(c)所示的区域标签值。分别将处于标签值 1, 2, 3 的区域进行显示即可获得如图 10(d),图 10(e),图 10(f)所示的子区域。如图 10所示的分割结果即先验知识判断表明该方法能够很好的对不同深度的物体进行有效分割。

4.2 多物体分割及深度分割验证

第二个实验对该算法在多个物体上的分割能力进行验证。如图 11 所示,三个颜色相近、大小形状不同的物体(软膏、充电宝与带三个支撑脚的按摩器)由左至右依次放置在视场内;由于受前方充电宝的遮挡,该视角只能显示按摩器的顶部与两只支撑脚。经过光栅投影与采集,图 12(a)显示了分割的整体效果图,图 12(b)~图 12(f)显示了该技术所分割生成的相互独立的五部分。物体的表面面型经格雷码加相移技术进行三维重建后,图 13 显示了被测物体及所对应每个部分的三维重建结果,该实验结果表明,本文所提出的技术



图 11 待分割的多个物体
Fig. 11 Objects for depth segmentation

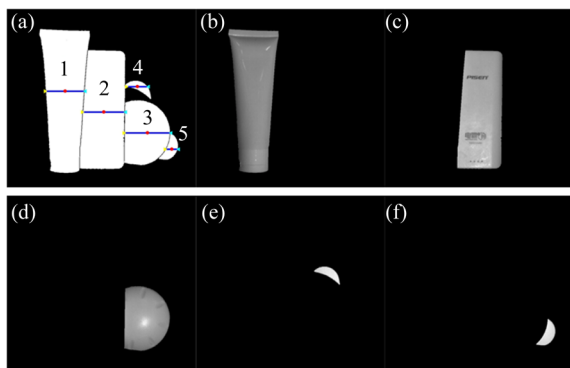


图 12 分割结果
Fig. 12 Segmentation results

能够对处于不同深度的不同部件进行有效分割。

在三维点云的基础上,采用 Rao^[14]的方法进行分割对比,图 14(a)显示了 Rao 方法的整体分割结果,实验结果显示被测物体的主要部分被很好的分割。然而如图 14(b)所示,由于点云数据不可避免的受到外界噪声的干扰(如低调制度、过曝光),因此在已分割物体的边界及中间处,出现了误分割的现象。

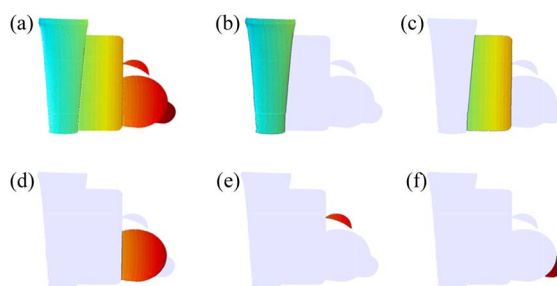


图 13 三维重建结果
Fig. 13 Reconstruction results

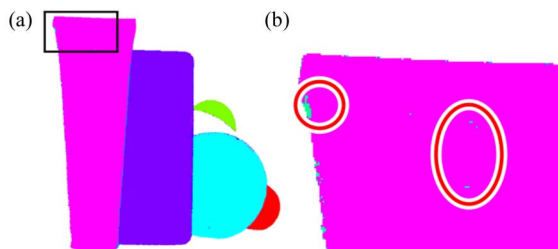


图 14 Rao 方法分割结果((b)为局部放大图)
Fig. 14 Result segmented by Rao's method((b) is detail view)

4.3 仪器夹角对分割的影响

第三个实验针对夹角对分割的影响进行测试,实验过程中将相机与投影仪的夹角依次调整为 45°与 60°。图 15 显示了正常情况下的拍摄结果,按摩器在图 15(a)中显示了按摩器的支撑脚被前方物体部分遮挡,而图 15(b)中两只支撑脚均被前方物体所完全遮挡。

经过分割运算,图 16(a)~图 16(d)显示了仪器夹角为 45°时的分割结果,图 16(e)~图 16(h)显示了仪器夹角为 60°的分割结果。实验结果表明当仪器夹角为 60°角时,该方法能够求解出正确的分割结果。然而当实验仪器之间的夹角调整

为 45° 时,如图 16(d)所示,按摩器的支撑脚未能被提出的方法所分割。

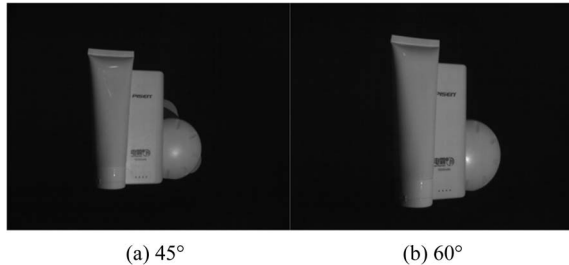


图 15 不同角度拍摄的物体

Fig. 15 The objects in different views

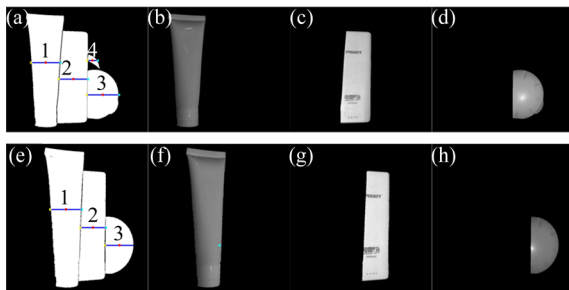


图 16 分割结果: (a)~(d) 45° 分割结果; (e)~(h) 60° 分割结果

Fig. 16 Segmentation results with different intersection angle between projector and camera: (a)-(d) 45° ; (e)-(h) 60°

为进一步的研究分割失效的现象,图 17(a)显示了当实验仪器夹角为 45° 角时由该方法所获取的包裹相位值。图 17(b)为未能分割部分的局部放大图,图中显示,由于该支撑脚处于相位不敏

参考文献:

- [1] 王宇,王宝山,王田,等. 面向遥感图像水域分割的图像熵主动轮廓模型[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 698-707.
WANG Y, WANG B SH, WANG T, *et al.*. Image entropy active contour models towards water area segmentation in remote sensing image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3): 698-707. (in Chinese)
- [2] 温广瑞,徐斌,张志芬,等. 基于差商的油液监测铁谱图像自适应分割[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1322-1330.
WEN G R, XU B, ZHANG ZH F, *et al.*. Self-a-

感区^[19],所以导致包裹相位在深度变化处的变化并不明显;图 17(c)为分割成功位置的局部放大图,与上述情况相反,该部分显示深度变化处的相位变化明显,因此导致该区域成功的被分割。

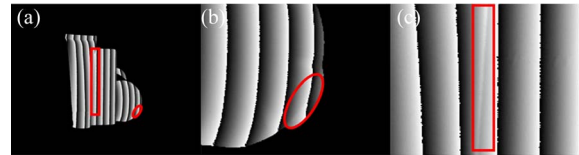


图 17 45° 角的包裹相位图

Fig. 17 Wrapped phase with intersection angle of 45° between projector and camera

5 结 论

本文提出了一种不连续相位跳变点的三维深度分割技术方法,该方法仅通过对物体投射三幅相移光栅即能准确的对处于不同深度范围的物体进行有效分割。仿真结果量化表明,在 $900 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$ 像素的复杂三维面型仿真情况下,该算法的最大偏移误差仅为 2 pixel。实验结果表明,该算法能够对一致颜色的物体进行精确的分割。除此之外,由于该分割方法无需获取三维点云数据,相较于基于数据融合的深度分割方法,该方法具备相对较高的分割鲁棒性。然而,由于受相位敏感性的影响,当实验仪器处于一定夹角时会存在分割失效的现象,未来将对分割所存在不敏感区域的问题进行进一步的研究。

daptive segmentation of oil monitoring ferrographic image based on difference quotient[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5):1322-1330. (in Chinese)

- [3] 邓吉,李健,封皓,等. 编码条纹投影技术的阶次校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 250-258.
DENG J, LI J, FENG H, *et al.*. Fringe order correction algorithm for code-based fringe projection profilometry[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 250-258. (in Chinese)
- [4] 肖启阳,李健,吴思进,等. 基于能量的 DSPI 相位图正弦弦降噪[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 936-943.
XIAO Q Y, LI J, WU S J, *et al.*. Denoising of DS-

- PI phase map using sine-cosine filtering and signal energy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 936-943. (in Chinese)
- [5] YANG X, ZENG C N, LUO J, *et al.*. Absolute phase retrieval using one coded pattern and geometric constraints of fringe projection system[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2673.
- [6] JEON B K, JUNG Y B, HONG K S. Image segmentation by unsupervised sparse clustering [C]. *Application of Computer Vision, Wacv/motions 051 Seventh IEEE Workshops on. IEEE*, 2005.
- [7] CHERIET M, SAID J N, SUEN C Y. A recursive thresholding technique for image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(6): 918-921.
- [8] 尹诗白, 孔垂涵, 王一斌. 非监督层次化模糊相关的人体红外图像分割[J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(6): 1542-1550.
- YIN S B, KONG C H, WANG Y B. Unsupervised hierarchical human target infrared image segmentation through fuzzy correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1542-1550. (in Chinese)
- [9] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient graph-based image segmentation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59(2): 167-181.
- [10] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(4): 640-651.
- [11] DOSOVITSKIY A, FISCHER P, ILG E, *et al.*. FlowNet: learning optical flow with convolutional networks[C]. 2015 *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, December 7-13, 2015. *Santiago, New York, USA: IEEE*, 2015.
- [12] FU H Z, XU D, LIN S, *et al.*. Object-based RGB-D image co-segmentation with mutex constraint [C]//2015 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 7-12, 2015. *Boston, MA, USA. New York, USA: IEEE*, 2015.
- [13] BLEIWEISS A, WERMAN M. *Fusing Time-of-Flight Depth and Color for Real-Time Segmentation and Tracking* [M]. *Dynamic 3D Imaging*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 58-69.
- [14] RAO D, LE Q V, PHOKA T, *et al.*. Grasping novel objects with depth segmentation[C]. 2010 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 18-22, 2010. *Taipei, New York, USA: IEEE*, 2010.
- [15] DENG H X, DENG J, MA M C, *et al.*. 3D information detection with novel five composite fringe patterns[J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(19/20/21): 1740088.
- [16] MA M C, YAO P C, DENG J, *et al.*. A morphology phase unwrapping method with one code grating[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(7): 073112.
- [17] MERNER L, WANG Y, ZHANG S. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 514-519.
- [18] CHEN X C, WANG Y W, WANG Y J, *et al.*. Quantized phase coding and connected region labeling for absolute phase retrieval[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28613.
- [19] WANG Y J, ZHANG S. Optimal fringe angle selection for digital fringe projection technique[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(29): 7094.

作者简介:



邓 吉(1993—),男,博士,2017年于合肥工业大学获得硕士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士生,主要研究方向为结构光三维投影测量技术。E-mail:dengji@tju.edu.cn



李 健(1974—),男,山东人,教授,博士生导师,分别于1994年、1997年和2000年在天津大学获得学士学位、硕士学位和博士学位。主要从事管道泄漏检测、管道安全预警和新型管道内检测器。E-mail:tjupipe@tju.edu.cn