

基于相机阵列的红外光场成像

夏朝阳, 田勇志, 梁二军, 牧凯军*

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 光场成像作为一种应用广泛的计算成像方法,其研究仍局限于电磁波谱中的可见光波段。因此,提出基于相机阵列的红外光场成像方法。首先利用单台被动红外相机移动到同一平面的不同位置分别对同一静态目标场景成像,获取原始红外图像序列,经平移视差校正后生成红外光场数据库;然后基于光场渲染理论,获得重采样图像。与只记录二维位置信息的传统红外成像比较,红外光场成像能够记录包含位置和方向的四维信息。实验结果表明,该法能够融合多幅低信噪比的图像获得一幅信噪比提高的重采样图像,通过孔径叠加平均可实现穿透遮挡物成像,通过选取不同深度值进行重采样可实现红外场景不同深度的数字重聚焦,使红外成像在军事和民用领域更有应用价值。

关键词 成像系统; 红外图像; 红外光场成像; 光场渲染; 相机阵列; 数字重聚焦

中图分类号 TN216 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0911002

Infrared Light Field Imaging Based on Camera Array

Xia Zhaoyang, Tian Yongzhi, Liang Erjun, Mu Kaijun

College of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract As a widely used computational imaging method, the light field imaging's research is still limited to the visible band in the electromagnetic spectrum. Based on the camera array, a method of infrared light field imaging is proposed. A passive infrared camera is used to obtain the original infrared image sequences of the same static target at different positions of the same plane. The infrared light field database is built after translational parallax correction. Then resampling images are obtained based on the light field rendering theory. Compared with the traditional infrared imaging which only records the two-dimensional position information, the infrared field imaging can record four-dimensional information of the position and direction. Experimental results show that this method can obtain a resampling image with higher signal-to-noise ratio by blending multiple low signal-to-noise ratio images, realizing the imaging of the penetration barrier by the aperture superposition average and achieving the digital refocusing with different depths of infrared scenes by resampling different depth values selected. The proposed method can make the infrared imaging more valuable in military and civilian fields.

Key words imaging systems; infrared image; infrared light field imaging; light field rendering; camera array; digital refocusing

OCIS codes 110.3080; 110.1758; 110.4155

1 引 言

随着红外探测技术的发展,红外成像系统在民用和军用领域均取得了广泛应用。在高分辨率、大动态范围等需求的牵引下,红外探测技术需要达到更好的探测性能^[1]。

收稿日期: 2017-02-22; **收到修改稿日期:** 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61505178, 11504333)、河南省高等学校重点科研项目(15A140014, 17A140002)、郑州大学优秀青年教师发展基金(1521317007)

作者简介: 夏朝阳(1993—),男,硕士研究生,主要从事红外、射频成像与信号处理等方面的研究。

E-mail: 783466857@qq.com

导师简介: 梁二军(1956—),男,博士,教授,主要从事可控负热膨胀材料方面的研究。E-mail: ejliang@zzu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: muk@zzu.edu.cn

自 1991 年 Adelson 等^[2]提出全光场理论,1996 年 Levoy 等^[3]提出光场渲染理论以来,光场作为一种突破性技术出现在可见光计算成像中^[4]。经过 20 年的发展,其应用已遍及计算机图像渲染^[3]、合成孔径成像^[4]、高速高分辨成像^[5]、3D 场景重建^[6]、虚拟现实^[7]、视觉跟踪^[8]和显微成像^[9]等领域。使用相机阵列^[10]或单个相机仿真相机阵列^[4]是获取光场的常用方法,该方法相比掩模法^[11]、编码孔径法^[12]和微透镜阵列法^[13],具有景深变化显著、生成图像的等效孔径大、孔径排布方式易于改变、采样密度可控等优点,因此本文提出基于相机阵列的红外光场成像方法。利用单台红外相机模拟红外相机阵列获取红外光场,针对静态场景进行研究。该方法将红外成像与光场成像相结合,能够融合同一场景的多幅视角略有差异的低信噪比图像,获得一幅信噪比明显提高的重采样图像。另外,仅通过计算成像处理即可实现穿透遮挡物成像和红外场景中不同深度目标的数字重聚焦。若采用真实的红外相机阵列,可以实现对动态场景的实时处理^[5],在遥感、水下拍摄、安全监视和军事侦查等方面具有潜在的应用。

2 红外光场成像原理

红外光场成像基于 Levoy 的光场渲染理论,通过红外光线与两个平行平面的交点来参数化红外光线,由交点坐标可确定四维红外光场函数 $L(u, v, s, t)$ 。采用如图 1 所示的几何模型处理红外光线。其中,图 1(a)为红外光线的参数化示意图,利用单台红外相机在 (u, v) 平面内等间距平移来获取红外光场的采样信息 $L(u, v, s, t)$ 。图 1(b)为红外相机的几何模型,主要由球顶透镜和焦平面探测器阵列(FPA)构成,相机光心位于 O 点, d_1 为相机光心到物平面(相机聚焦平面)的距离(物距), d_2 为相机光心到像平面 FPA 的距离(像距), D 为入瞳直径, Δ_1 为物平面上两点之间的间距, Δ_2 为像平面上与物平面对应的两点之间的间距。

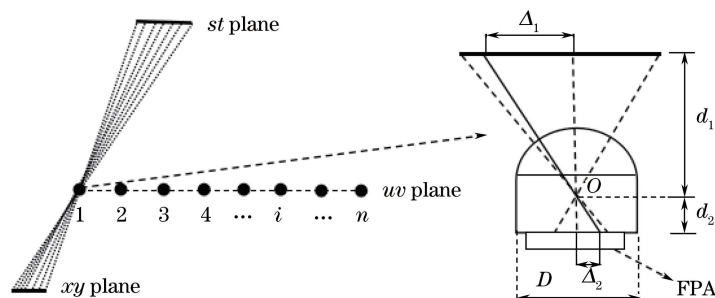


图 1 红外光场成像的平面几何模型。(a)红外光线的参数化示意图;(b)红外相机的几何模型
Fig. 1 Plane geometric model of infrared light field imaging. (a) Parameterization of infrared light;
(b) geometric model of infrared camera

如果不考虑衍射和透镜的几何畸变,则当红外相机的光心 O 处于 uv 平面的固定一点 (u_i, v_i) 时, st 平面(物平面)上任意一点辐射的红外光线将垂直入射到透镜的球顶面上,无折射地经过光心 O ,聚焦到 xy 平面(像平面),形成场景的一个投影像。随着红外相机光心在 uv 平面的二维等间距平移,在 xy 平面将得到一系列场景的投影像,任意投影像 i 对应红外相机光心(采样点)的位置坐标为 (u_i, v_i) 。红外相机在不同采样点处对场景依次成像,如图 2 所示,由此获得原始红外图像序列。

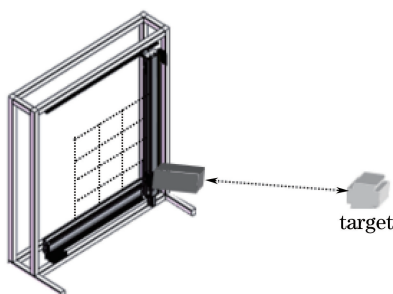


图 2 红外光场成像系统
Fig. 2 Infrared light field imaging system

由于红外相机平移到同一平面的不同位置对目标场景依次成像,获取的一系列红外图像之间存在平移视差,需要对其进行校正。虽然红外相机无法像可见光相机一样使用标定模板进行标定,但由于采用单相机在同一平面内作二维运动,可保证采样点始终位于同一平面内。对任意两幅红外图像,有 $d_1/d_2 = \Delta_1/\Delta_2$, 式中 d_1 为物距, d_2 为像距, Δ_1 为物平面视差(即相机移动引起的拍摄场景位移量,等于两幅图像对应的采样点之间的距离), Δ_2 为像平面视差(同一目标点在不同图像中的位置差异)。由于红外相机满足小孔成像原理,即 $1/d_1 + 1/d_2 = 1/f$, 式中 f 为红外相机的镜头焦距。相机阵列的中心为原点,以相机光心平面为 xy 平面,经过原点的平面法线为 z 轴建立笛卡尔坐标系,若目标位置坐标已知,可计算出物距 d_1 ,从而可计算出像距 d_2 。当红外相机的平移距离 Δ_1 确定时,可以得到像平面视差 $\Delta_2 = (d_2 \cdot \Delta_1)/d_1$, 换算成像素值 $\Delta_2 = (d_2 \cdot \Delta_1)/(d_1 \cdot \Delta_p)$, 式中 Δ_p 为红外相机的像素间距。由此便可校正不同图像之间的平移视差。由于目标到不同采样点的距离不等,同一目标在不同图像中的物像放大率也存在一定差异。但由于目标到任一采样点的距离远大于目标到不同采样点的距离差,物像放大率差异的影响可忽略。

根据平移视差校正后的红外子图像和与其对应的采样点的空间位置坐标 (u_i, v_i) 可建立红外光场数据库,对红外光场数据库重采样即可得到红外光场渲染的新视图。重采样原理如图 3 所示。当选定目标场景中任一点为聚焦点时,该点与任一图像坐标 (x, y) 的连线分别与 uv 平面和 st 平面相交于点 (u, v) 和 (s, t) 。从坐标系 $x-y$ 到 $u-v$ 和 $s-t$ 的变换是投影映射,当图像坐标 (x, y) 已知时,基于映射变换可以求出点 (u, v) 和 (s, t) 的坐标。在红外光场数据库中找到与点 (u, v) 和 (s, t) 邻近的采样点,分别在 uv 平面和 st 平面进行线性插值运算,即可得到点 (x, y) 对应的像素值。对新视图中的所有点循环以上过程即可得到全部像素值,从而渲染出新视图^[6]。另外,通过改变深度参数 d_1 ,基于不同的深度参数进行平移视差校正,更新红外光场数据库,再进行重采样即可得到以不同场景深度为聚焦面的红外光场渲染图像。

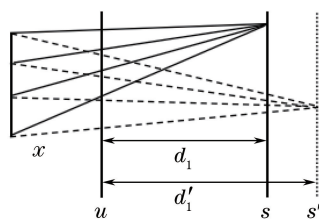


图 3 重采样原理图

Fig. 3 Schematic of resampling

3 实验与结果分析

首先建立二维平移台与计算机的通讯,然后将红外相机固定于平移台上,软件控制其沿如图 2 所示的网格结构移动,在每一采样节点处对目标场景拍照(前视图),从而得到原始图像阵列。由于二维平移台精确保证了红外相机光心(采样点)始终位于同一平面,且该平面平行于平移平面,可将平移台控制软件中显示的二维位置坐标作为采样点的平面坐标 (u_i, v_i) 。以相机阵列的中心为原点,相机光心平面为 xy 平面建立笛卡尔坐标系,即可对目标和相机的相对位置进行精准标定,从而根据图像的平移视差间隔与采样间隔的关系来校正平移视差,校正后每幅图像中的目标(若有多个目标取一个参考目标)应处于场景同一位置。校正后的图像集和列出相机光心位置坐标的索引文件即构成红外光场数据库。然后在 Matlab 中读取图像集和索引文件,依据上述原理进行重采样后即可分别得到信噪比提升,穿透遮挡物和数字重聚焦的图像。以下三个实验,演示了利用红外光场成像方法提高图像信噪比,穿透遮挡物成像和对红外场景不同深度目标的数字重聚焦结果。其中红外相机(A655sc, FLIR, 瑞典)的可探测光谱范围为 $7.5 \sim 13.5 \mu\text{m}$, 镜头焦距为 24.6 mm , 像素间距为 $17 \mu\text{m}$, F 数为 1.0, 角分辨率为 0.68 mrad ; 二维平移台的平移精度小于 0.1 mm , 有效平移范围为 $95 \text{ cm} \times 95 \text{ cm}$, 由两个步进电机控制,基于 UDP 协议网口连接与计算机通讯;台式机(ThinkCentre M8400T, 联想, 中国)内安装了红外相机控制软件、二维平移台控制软件和 Matlab2014 等。

3.1 图像信噪比

首先,令单个红外相机作二维等间距平移,模拟 14×14 的平面红外相机阵列,对一通电小音箱进行红外

光场成像。设定平移间距为 1 cm,小音箱尺寸为 16.5 cm×6 cm×3 cm,其到相机光心平面的距离约为 200 cm。利用红外光场成像算法校正原始红外图像阵列的平移视差后进行重采样,最终得到的单幅图像和重采样图像如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出,在给定条件下,目标物的单幅图像噪点较多,清晰度不佳,小音箱前表面两侧的网孔结构十分模糊,且图像边缘相对毛糙。相比之下,图 4(b)即重采样图像的整体图像平滑,噪点大为减少,图像边缘对比度明显,能准确恢复出小音箱的网孔结构。说明红外光场成像能够通过融合多幅低信噪比的图像获得一幅信噪比明显提高的重采样图像,提升红外成像质量。

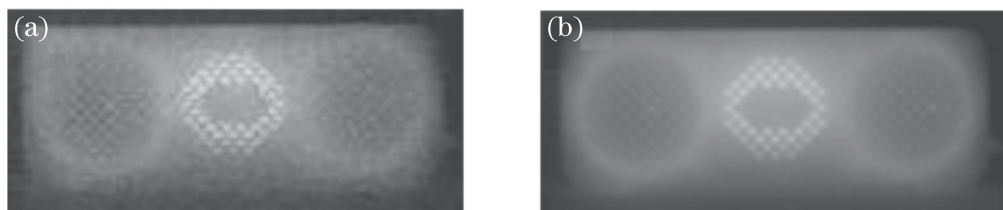


图 4 信噪比对比。(a)单幅红外图像;(b)14×14 图像阵列的重采样图像

Fig. 4 Contrast of signal-to-noise ratio. (a) Single infrared image; (b) resampling image of 14×14 image array

3.2 穿透障碍物

如图 5 所示,在尺寸为 10.4 cm×3.5 cm×2.2 cm 的通电 USB 分线器前放置带有多个小孔的塑料板,小孔直径约为 3 mm,相邻小孔的边缘间距约为 6 mm。USB 分线器和塑料板与相机光心的距离分别约为 50 cm 和 40 cm。相机采样间隔为 1 cm,采样图像阵列为 8×8。从图 5(a)可以看出,目标物 USB 分线器的单幅红外图像因受到遮挡物塑料板的影响,只能呈现出目标物大概轮廓,其表面特征完全无法呈现。随着相机移动到不同采样节点对其成像,相应地,塑料板对目标物遮挡的部位会有所不同。当经过 8×8 幅红外图像阵列的孔径叠加平均后,遮挡物被虚化,目标物表面细节特征被成像出来,如图 5(b)所示。

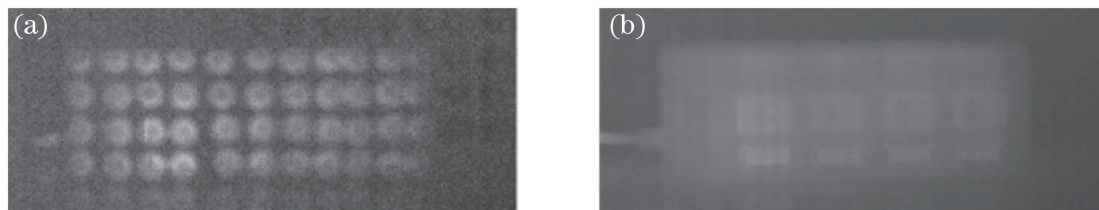


图 5 红外穿透成像。(a)单幅红外图像;(b)8×8 图像阵列的重采样图像

Fig. 5 Infrared penetrating imaging. (a) Single infrared image; (b) resampling image of 8×8 image array

3.3 数字重聚焦

数字重聚焦可以解决图像重构中成像的失焦、背景复杂或模糊等问题。为更好地实现数字重聚焦实验,从前到后依次放置深度差为 25 cm 的三个物体,如图 6(a)所示。前面物体为未通电的小音箱,中间物体为水晶球摆件,后面物体为泡泡沙漏,其中前面物体距红外相机最近,到红外相机光心平面的距离约为 193 cm。采样间隔为 3 cm,采样图像阵列为 8×8。通过改变红外光场成像算法中的深度值,对三个物体从前到后依次聚焦的结果如图 6(b)~(d)所示。

实验结果显示,基于红外光场成像方法的数字重聚焦能够先成像后聚焦,对目标红外场景进行不同深度的聚焦,优于先聚焦后成像的传统红外成像方法,可以缩短红外成像时间,且能够突出显示场景中任意深度目标物的红外特征。

4 结 论

基于相机阵列的红外光场成像方法能够通过融合多幅低信噪比的图像获得一幅信噪比提高的重采样图像,提升红外成像质量。通过多个红外相机子孔径的叠加平均,能够获取到被障碍物部分甚至密集遮挡的完整目标图像。另外,通过选取不同的深度值进行重采样,能够实现场景中对不同深度的多个目标数字重聚

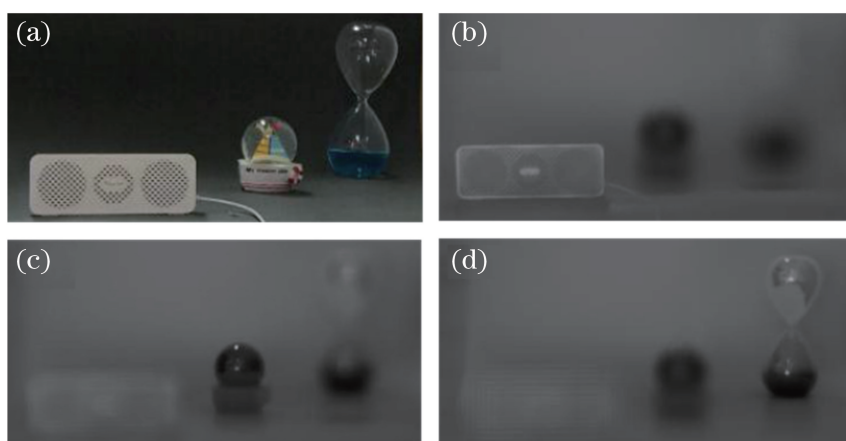


图 6 (a)可见光图像;(b)~(d)不同物体的数字重聚焦图像

Fig. 6 (a) Visible light image; (b)-(d) digital refocusing images of different objects

焦。作为一种新的红外成像方法,红外光场成像能够显著提升红外成像能力,使其在军事和民用领域更有应用价值。目前主要针对静态红外场景,将来可以在动态成像方面进行进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Zhang Lisha, Liu Zhaojun, Ma Wenpo, *et al.* Infrared imaging technology based on pixel-level digital integration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091102.
张丽莎, 刘兆军, 马文坡, 等. 像素级数字积分红外成像技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091102.
- [2] Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision[J]. *Computational Models of Visual Processing*, 1991, 1(2): 3-20.
- [3] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1996: 31-42.
- [4] Isaksen A, McMillan L, Gortler S J. Dynamically reparameterized light fields[C]. *Proceedings of Computer Graphics Annual Conference*, 2000: 297-306.
- [5] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, *et al.* High performance imaging using large camera arrays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765-776.
- [6] Kim C, Zimmer H, Pritch Y, *et al.* Scene reconstruction from high spatio-angular resolution light fields[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 73.
- [7] Huang F C, Chen K, Wetzstein G. The light field stereoscope: immersive computer graphics via factored near-eye light field displays with focus cues[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(4): 60.
- [8] Ghasemi A, Vetter A. Scale-invariant representation of light field images for object recognition and tracking [J]. *SPIE*, 2014, 9020: 902015.
- [9] Levoy M, Ng R, Adams A, *et al.* Light field microscopy[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 924-934.
- [10] Kanade T, Saito H, Vedula S. The 3D room: digitizing time-varying 3D events by synchronized multiple video streams [M]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 1998.
- [11] Veeraraghavan A, Raslar R, Agrawal A, *et al.* Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocussing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 69.
- [12] Liang C K, Liu G, Chen H H. Light field acquisition using programmable aperture camera[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2007, 5: 233-236.
- [13] Ng R, Levoy M, Bredif M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. *Computer Science Technical Report CSTR*, 2005, 2(11): 1-11.