

基于光场的高分辨率非周期性视角图提取算法

彭晶^{1,2}, 李晖^{1,2,3*}, 吴云韬^{1,2**}

¹ 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;

² 智能机器人湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

³ 华中科技大学化学与化工学院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对光场成像中视角图提取的分辨率与数据准确性无法兼顾的问题, 提出一种非周期性视角图提取算法。首先分析微透镜阵列采样原理, 计算出各微透镜中心的偏移量; 然后分析视角范围, 通过合成多个视点的方式, 计算合成视点各微透镜的投影区域; 最后非周期性地提取像素块构成视角图。实验中采用 Lytro 相机采集光场数据, 采用非周期性算法提取大小为 2×2 和 3×3 的像素块构成视角图, 相较于传统方法视角图的分辨率分别提升了 2×2 倍和 3×3 倍, 图像质量也得到较大幅度提升。

关键词 成像系统; 视角图; 非周期性算法; 微透镜阵列; 光场

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111015

High Resolution Nonperiodic View Extraction Algorithm Based on Light Field

Peng Jing^{1,2}, Li Hui^{1,2,3*}, Wu Yuntao^{1,2**}

¹ School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China;

² Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan, Hubei 430205, China;

³ School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In light field imaging, the view extraction resolution and data accuracy cannot be balanced. To solve this problem, a nonperiodic view extraction algorithm is proposed herein. First, the microlens array sampling principle is analyzed, and center offset of each microlens is calculated. To analyze the range of the view angle, the projection area of each microlens is calculated by synthesizing multiple viewpoints. Finally, the nonperiodic extraction of pixel blocks is utilized to form a view. A Lytro camera is utilized to obtain light field data, and a nonperiodic algorithm is used to extract 2×2 and 3×3 pixel blocks to form views. Compared to the traditional method, the proposed method improves the resolution by 2×2 and 3×3 times, while simultaneously improving the image quality.

Key words imaging systems; view map; nonperiodic algorithm; microlens array; light field

OCIS codes 110.1758; 110.6880; 200.3050

1 引 言

作为下一代成像系统, 光场成像逐渐成为人们关注的焦点。传统的成像系统仅能记录少量的光线信息, 将三维场景降维为二维图像, 导致摄影中丢失了大量的有用信息; 而光场成像系统能在一次曝光中, 同时记录光线的位置、方向和辐射量, 并根据这

些光线信息进行计算, 对光线重新排列, 可以得到不同焦点信息的二维图像。

随着理论的完善^[1-3], 各种成像系统相继提出, 大致可分为基于相机阵列和基于微透镜阵列两大类。斯坦福大学 Wilburn 等^[4]提出由 100 个相机构成经典相机阵列系统, 该系统具有分辨率高、动态范围大、帧速率快和合成大光圈等特性。刘飞等^[5]搭

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-08-04; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51703071, 61771353)、湖北省自然科学基金面上项目(2019CFB553)、湖北省教育厅科研重点项目(D20171504)、湖北省重点实验室开放基金项目(HBIR201901)、武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2018214)

* E-mail: lihui00317@163.com; ** E-mail: ytwu@sina.com

建了球形相机阵列,该阵列视场大、成像分辨率高,但系统庞大、价格昂贵,限制了实际应用。针对上述两种系统不移动的缺陷,Hsu等^[6]搭建了一种低成本手持式的相机阵列系统,该系统可用按钮快速切换相机阵列排列模式,可应用于全景图像拼接和自动立体三维显示等,但该系统的相机定位与图像数据校准复杂,存在较大误差,时间消耗较大。而基于微透镜阵列的光场成像系统在此方面有着较大优势,其结构简单、便携。其中,Ng等^[7]搭建的手持光场相机,及Levoy等^[8]搭建的光场显微镜已被广泛应用。

研究表明,光场系统在改善光学成像应用中具有较大潜力^[9-11],如深度估计、三维重建、立体匹配、去遮挡、不利环境下的成像等,在这些应用中,视角图提取是难以避开的关键。国内外学者对此也进行了许多研究。贾琦等^[12]对微透镜中心标定后,依次提取像素构成视角图,算法简单、易于实现、计算速度快,但该方法未考虑光线方向导致的投影偏移量,易导致数据精度不高,且其提取的视角图空间分辨率较低。Yoon等^[13]利用深度卷积神经网络对光场样本数据进行训练采样,用类似插值拟合的方法提高了视角图分辨率,拟合效果较好,但此方法需要的数据量大、训练时间长,且插值方法提升分辨率会直接导致数据误差,限制了其应用范围。

在光场系统各应用中,尤其是深度估计和立体匹配中,视角图的分辨率与数据准确度会极大影响后续处理结果的准确性。同时,光场数据极为庞大,时间消耗将直接影响应用体验。针对以上问题,本文提出一种非周期性算法。该算法针对各个小透镜,分别计算光线投影位置相对小透镜中心的偏移量,从而提取出更为精确的视角图;另外,基于小透镜投影区域,可以适当降低视角范围,从而大幅提升图像分辨率,同时还能保证数据的准确度。这对于在光场成像领域中获得高质量的图像具有重要意义。

2 理 论

基于微透镜阵列的光场成像系统采集的图像如图1所示,其由多个子图构成,每个微透镜对应一个子图。由各子图分别提取一个像素元并排列构成视角图。提取视角图首先要标定微透镜中心,即根据白图像计算子图中心点。

2.1 偏移量计算

计算视角图时假设光线平行入射,如图2所示。

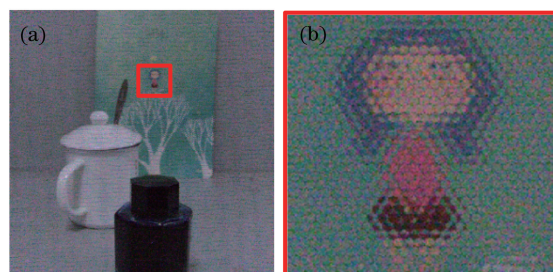


图1 基于微透镜阵列的成像系统采集的图像。

(a)光场数据;(b)局部放大图

Fig. 1 Image acquired by imaging system based on microlens array. (a) Light field data; (b) local magnification

提取子图像素时,假定对各个微透镜的偏移量是相同的,即周期性地提取像素元,不考虑光线的方向,如图3所示。

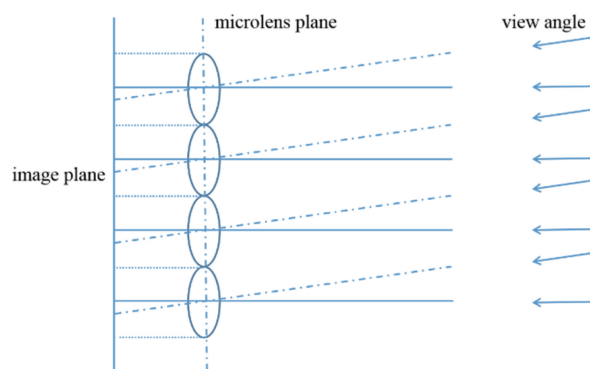


图2 视角和投影点关系图

Fig. 2 Relationship between view angle and projection point

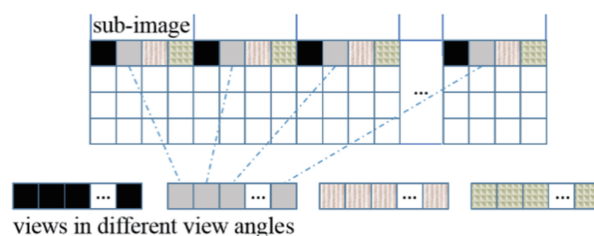


图3 周期性提取像素元构成视角图

Fig. 3 Views formed by periodically extracted pixel units

实际上,光场成像系统记录了光线的方向信息,任意视点在各个微透镜的相对偏移量是不同的,如图4所示。提取子图像素时,应根据偏移量非周期地提取像素元。

视点在主透镜平面,主透镜焦距为 f_1 ,微透镜焦距为 f_2 ,直径为 D ,主透镜面到微透镜面距离为 L_1 ,微透镜面到像面距离为 L_2 ,视点的高度为 H ,第 k 个微透镜中心的位置为 h_k ,视点对应第 k 个微透镜的偏移量为 Δ_k ,对应的像素元位置为 P_k ,根据相似三角形的性质可以得到

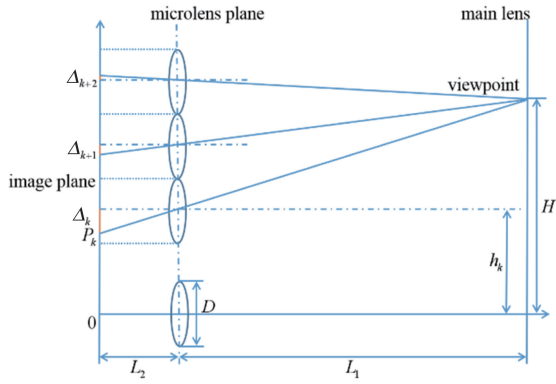


图 4 视点和投影点关系图

Fig. 4 Relationship between view point and projection point

$$\frac{\Delta_k}{H - h_k} = \frac{L_2}{L_1}, \quad (1)$$

式中: $h_k = (k - 1)D$ 。

视点对应第 k 个微透镜的偏移量为

$$\Delta_k = \frac{L_2}{L_1}(H - h_k) = \frac{L_2}{L_1}[H - (k - 1)D]. \quad (2)$$

偏移量 Δ 随 k 值变化。进一步推出对应第 k 个子图的像素元位置 P_k 为

$$P_k = h_k - \Delta_k = (k - 1)D - \frac{L_2}{L_1}[H - (k - 1)D]. \quad (3)$$

2.2 子图像素块选取

对于任意视点,从每个子图提取一个像素点,即可得到一幅视角图,其图像分辨率即子图个数。若微透镜阵列数为 $N \times N$,则视角图分辨率为 $N \times N$ 。为了提高图像的分辨率,可以适当减小视角范围,如图 5 所示。

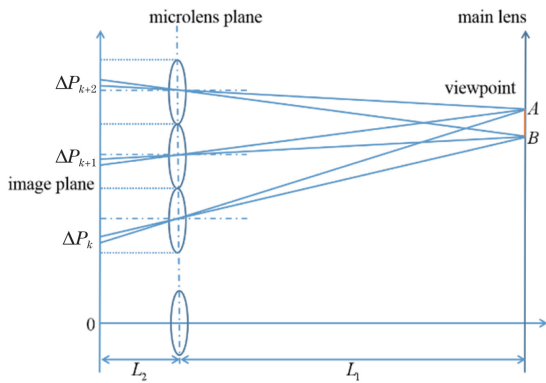


图 5 合成视点与投影区域关系图

Fig. 5 Relationship between synthetic view point and projection area

将 A 、 B 视点间区域合成为一个新视点,新视点投影到像面对应一个区域,分别提取各个子图中对应的像素块则可构成一幅分辨率更高的视角图。

假设微透镜阵列数量为 100×100 ,每个小透镜对应的像素块区域大小为 3×3 。当提取的像素块大小为 1×1 时,可提取 3×3 共 9 个视角图,此时每个视角图分辨率为 100×100 ;当提取的像素块大小改变为 2×2 时,可提取 2×2 共 4 个视角图,此时每个视角图分辨率提升为 $(2 \times 100) \times (2 \times 100)$ 。

根据相似三角形,可以推导提取第 k 个微透镜对应的像素块的大小 ΔP_k ,即

$$\frac{\Delta P_k}{|AB|} = \frac{L_2}{L_1}, \quad (4)$$

则

$$\Delta P_k = \frac{L_2}{L_1} |AB|. \quad (5)$$

由(5)式可知,提取像素块的大小与对应第几个微透镜无关。

提取像素点时,视角范围为 $[-\theta_1, \theta_1]$,则

$$\tan \theta_1 = \frac{\frac{D}{2}}{L_2} = \frac{D}{2L_2}. \quad (6)$$

而提取像素块时,视角范围为 $[-\theta_2, \theta_2]$,则

$$\tan \theta_2 = \frac{\frac{D}{2} - \Delta P}{L_2} = \frac{D - 2\Delta P}{2L_2} = \frac{D - 2\frac{L_2}{L_1}|AB|}{L_2} = \frac{L_1 D - 2L_2 |AB|}{L_1 L_2}. \quad (7)$$

当视野范围缩小到 $[-\theta_2, \theta_2]$ 时,图像分辨率扩大 ΔP_k^2 倍。略微减小视角的同时分辨率得到大幅提高。

3 结果分析与讨论

根据第一部分的理论,本文实现了视角图提取的非周期性算法,算法流程图如图 6 所示。

本文采用 Lytro 一代光场相机进行光场数据采集,相机 CCD 的分辨率为 3180×3180 。采集数据后,分别采用周期性算法和非周期性算法提取像素,构成视角图,并分别对两类算法获得的视角图进行图像处理分析,实验结果如图 7 所示。

周期性提取像素构成的视角图如图 7(a) 所示,由于对像素点位置计算并不准确,因此图像质量较差、分辨率较低。非周期性算法构成的视角图如图 7(b) 所示。图 7(c) 和图 7(d) 是基于最大类间方差法对图 7(a) 和图 7(b) 二值化后的结果图。图 7(e) 和图 7(f) 是基于拉普拉斯算子对图 7(a) 和图 7(b) 提取轮廓得到的结果图。而图 7(g) 和图 7(h)

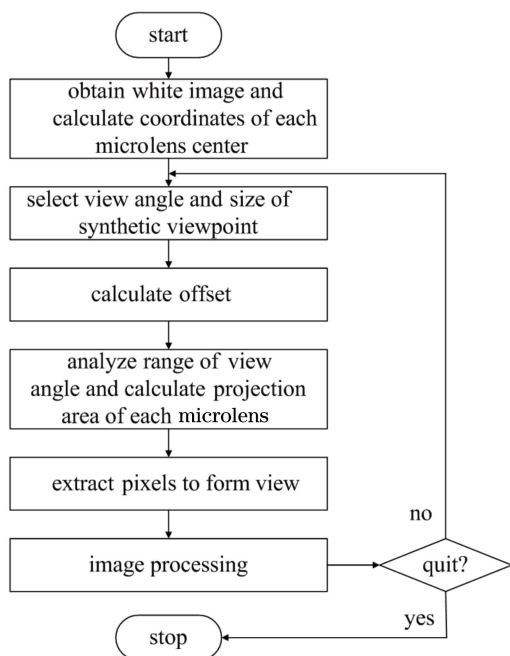


图 6 非周期性算法流程图
Fig. 6 Flowchart of nonperiodic algorithm

分别是图 7(a)和图 7(b)的局部细节放大图。对比可看出,周期性方法提取的视角图噪声更多。观察图 7(e)和图 7(f)杯盖的边缘部分,其像素分布更加离散,边缘不清晰。相较之下,非周期算法提取的视角图噪声少,边缘流畅。

本文还使用了多种无参考图像质量评价函数,用以分析图像质量,包括 Brenner 梯度函数、Tenengrad 梯度函数、灰度方差函数(SMD)、灰度方差乘积函数(SMD2)、能量梯度函数(Energy function)。本文从多组场景中选取 3 组复杂场景进行结果展示,用图像质量评价函数处理两种不同视角图提取算法构成的视角图,得到的实验数据如表 1 所示。对图 7(a)和图 7(b)的处理结果如表 1 中 group1 所示。由表 1 可见,非周期性算法构成的视角图具有更高的图像质量。

根据(5)式可提取像素块构成视角图,并算出视角范围。对表 1 中 group1 对应的光场数据,采用非周期性算法分别提取大小为 1×1 、 2×2 、 3×3 的像

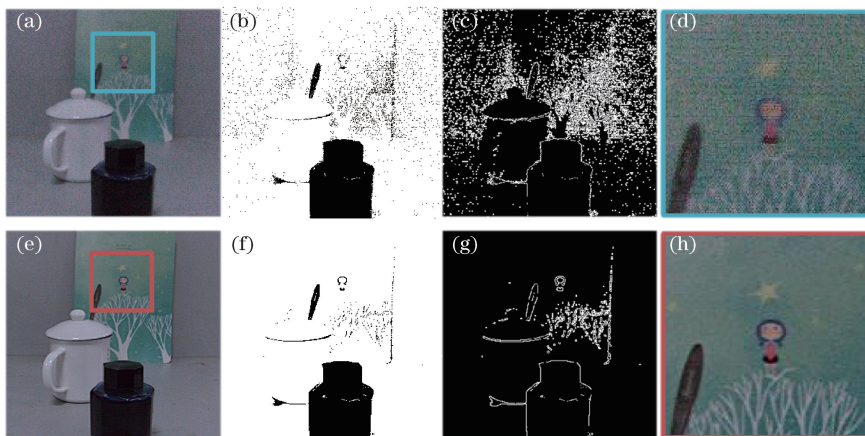


图 7 两种算法提取的视角图。(a)周期性算法图;(b)非周期性算法图;(c)(d)分别对图 7(a)和图 7(b)二值化后的结果图;
(e)(f)分别对图 7(a)和图 7(b)轮廓提取后的结果图;(g)(h)分别是图 7(a)和图 7(b)的局部放大图

Fig. 7 Views extracted by two algorithms. (a) View of periodic algorithm; (b) view of nonperiodic algorithm; (c)(d) binarization results of Fig. 7(a) and Fig. 7(b); (e)(f) outline extraction results of Fig. 7(a) and Fig. 7(b); (g)(h) local magnification of Fig. 7(a) and Fig. 7(b)

表 1 图像质量对比

Table 1 Image quality comparison

Group No.	Algorithm	Brenner	Tenengrad	SMD	SMD2	Energy
Group1	Non-periodically	24.7270	394.2050	172.9569	3.6616	90.0826
	Periodically	8.8478	304.3359	27.8593	3.6517	16.1535
Group2	Non-periodically	8.4676	466.2426	23.7427	2.2320	10.4091
	Periodically	2.8180	382.7146	10.3726	1.4090	5.6360
Group3	Non-periodically	39.3739	460.2426	95.9045	9.8772	54.0943
	Periodically	15.0085	414.6200	56.5760	7.2703	29.3990

素块构成的视角图,分别如图 8(a)~(c)所示,图 8(b)、(c)的分辨率分别是图 8(a)的 2×2 倍和 3×3 倍。图 8(d)~(i)分别对应图 8(a)~(c)的局部放大图。观察墨水瓶的亮光部分和人偶的脸部,可看出分辨率越高,亮光边缘越流畅,人偶眼睛和腮红越明显。

但是,视角图的分辨率与视角范围存在一定的

矛盾。本实验所用相机的微透镜阵列数为 $N \times N$,根据(7)式提取不同大小像素块构成视角图,像素块为 1×1 时,视角约为 25.252° ,视角图分辨率为 $N \times N$;像素块为 2×2 时,视角约为 19.073° ,视角图分辨率为 $(2 \times N) \times (2 \times N)$;像素块为 3×3 时,视角约为 12.781° ,视角图分辨率为 $(3 \times N) \times (3 \times N)$ 。视角范围随分辨率的增加而略微降低。

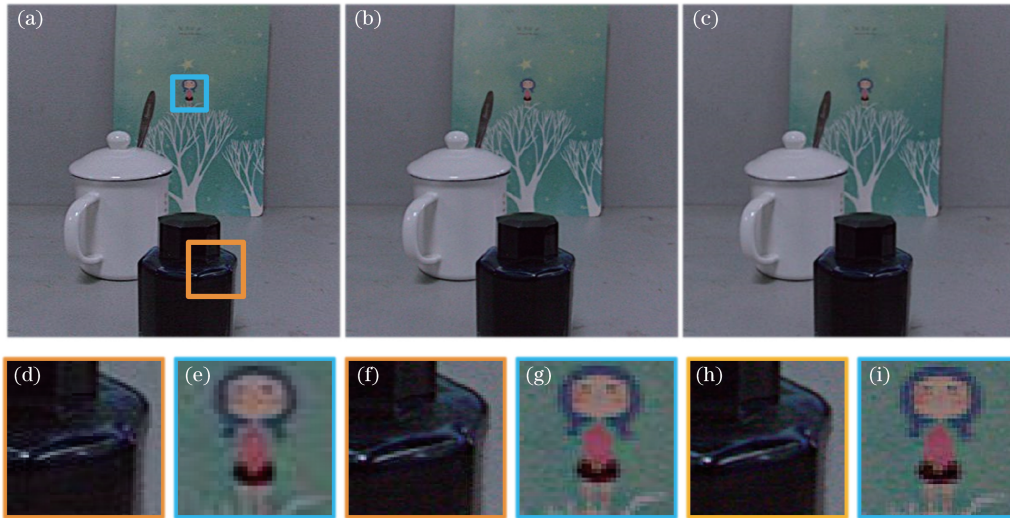


图 8 非周期性算法提取像素块构成的视角图。(a)~(c)像素块大小分别为 1×1 、 2×2 、 3×3 ;
(d)~(i)对应视角图的局部放大图

Fig. 8 Views formed by pixel blocks extracted by nonperiodic algorithm. (a)-(c) Sizes of pixel blocks are 1×1 , 2×2 , and 3×3 ; (d)-(i) local magnification of corresponding views

作为对比试验,采用双三次插值法,将非周期提取像素点构成的视角图的分辨率提升了 2×2 倍,如图 8(a)所示,使其图像分辨率与图 8(b)相同,分析比较图像数据质量,如图 9 所示。图 9(a)

是双三次插值法放大的视角图,图 9(b)是非周期性算法提取的视角图,其分辨率都是图 8(a)的 2×2 倍。图 9(c)~(f)分别是对应视角图的局部放大图。

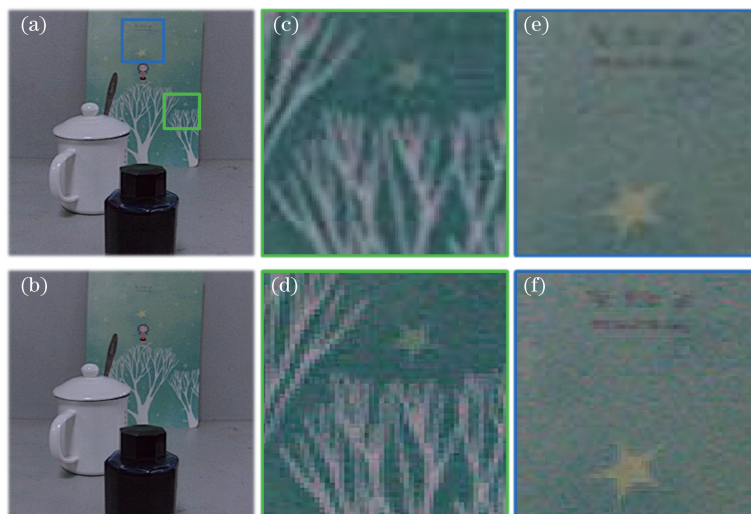


图 9 两种算法构成的高分辨率视角图。(a)双三次插值法图;(b)非周期性算法图;(c)~(f)对应视角图的局部放大图

Fig. 9 High resolution views obtained by two algorithms. (a) View of bicubic interpolation algorithm;
(b) view of nonperiodic algorithm; (c)-(f) local magnification of corresponding views

观察图 9(e)和图 9(f)中的星星以及星星上方的文字,可以看出非周期算法在提高分辨率的同时使边缘细节更好,主要是因为图 9(b)由基于 CCD 获取的原始数据计算重构得到,图中像素是真实存在的数据。而图 9(a)由已重构出的视角图像素拟合得到,图像中数据是经验拟合出的数据,故细节较差,边缘模糊。

分别基于表 1 中三组场景对应的光场数据,用非周期性算法和双三次插值法分别提高图像分辨率,实验数据如图 10 所示。图 10 表示两种算法提取的视角图的各图像质量评价函数值的差值。差值为正,说明非周期性算法提取的视角图的图像质量优于双三次插值法;反之,双三次插值法提取的视角图的图像质量优于非周期性算法。差值的绝对值越大,说明不同算法提取的视角图图像质量相差越大。图 9(a)和图 9(b)的处理结果如图 10 中 group1 所示。整体而言,非周期性算法能提高分辨率,视角图具有更高的图像质量。

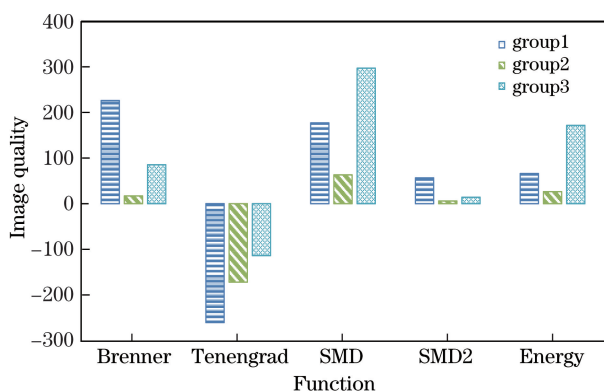


图 10 图像质量对比柱状图

Fig. 10 Histogram for image quality comparison

但是,如图 9(d)所示,非周期性算法提取的高分辨率视角图块状效应明显,该缺陷在图 10 中的 Tenengrad 梯度函数值中也有所体现。这说明本文算法对像素块的内部像素点定位仍有不足。

4 结 论

研究了基于微透镜阵列的光场成像系统中的视角图提取方法,提出一种非周期性算法。该方法可以兼顾视角图分辨率与数据准确性。

从实验结果可知,与周期性算法相比,非周期算法提取的视角图噪声更少、边缘更流畅,这说明该算法对像素点定位更准确;在提升图像分辨率方面,与双三次插值法进行对比,采用 5 种图像质量评价函数分析图像质量,整体而言,采用非周期

性算法在提高视角图分辨率方面效果更好;在保证数据准确性的前提下,当提取像素为 $N \times N$ 大小的像素块时,视角范围略微减小,构成视角图的分辨率可提升 $N \times N$ 倍。实验结果表明,该方法在大大提升图像分辨率的同时,还能保证视角图数据的准确性,使视角图具有较高的图像质量,且视角仅略微减小。

本文研究工作还存在一些不足之处。当采用非周期性算法提取高分辨率视角图时,分辨率提升至视角图的 3 倍以上时,块状效应明显,表明像素块的内部像素点定位精度有待提升。另外,本文在提升视角图投影点位置精度的同时,计算量略有增加。理论上,偏移量计算是连续的,但由于 CCD 成像特点,实际上偏移量的计算是离散的,因此计算量方面还存在较大提升空间。此外,对于成像过程形成的噪声,本文并未进行处理。未来可以考虑分析成像过程的降质模型,再逆向求解还原图像,进一步提高图像质量。

参 考 文 献

- [1] Gershun A. The light field[J]. Journal of Mathematics and Physics, 1939, 18: 51-151.
- [2] Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 99-106.
- [3] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]// Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH'96, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM, 1996: 31-42.
- [4] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays[C]// ACM SIGGRAPH 2005 Papers on-SIGGRAPH'05, July 31-August 4, 2005, Los Angeles, California. New York: ACM, 2005: 765-776.
- [5] Liu F, Wei Y Z, Han P L, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084201.
刘飞, 魏雅喆, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 084201.
- [6] Hsu C H, Cheng W H, Wu Y L, et al. CrossbowCam: a handheld adjustable multi-camera system[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(23): 24961-24981.
- [7] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field

- photography with a hand-held plenoptic camera [J]. Computer Science Technical Report CSTR, 2005, 2(11): 1-11.
- [8] Levoy M, Ng R, Adams A, et al. Light field microscopy [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 924-934.
- [9] Lu H M, Li Y J, Uemura T, et al. Low illumination underwater light field images reconstruction using deep convolutional neural networks [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 82: 142-148.
- [10] Chen J, Hou J H, Chau L P. Light field compression with disparity-guided sparse coding based on structural key views [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 314-324.
- [11] Li R F, Shi K B. High spatiotemporal imaging based on optical field engineering [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126010.
- 李润丰, 施可彬. 基于光场调控的高时空分辨率光学成像 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126010.
- [12] Jia Q, Wang A H, Wu Y C, et al. Extraction method on sub-aperture graph of micro-lens light-filed camera [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2018, 39(4): 276-280.
- 贾琦, 王安红, 武迎春, 等. 一种微透镜光场相机的子孔径图像提取方法 [J]. 太原科技大学学报, 2018, 39(4): 276-280.
- [13] Yoon Y, Jeon H G, Yoo D, et al. Light-field image super-resolution using convolutional neural network [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(6): 848-852.