

基于光场成像的数据提取与预处理方法

赵青青^{1,2} 张 涛¹ 郑伟波¹

(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)¹ (中国科学院大学 北京 100049)²

摘 要 光场是空间中同时包含位置和方向信息的四维光辐射场的参数化表示,光场数据的获取为计算成像提供了很多新的发展方向。光场相机能够获取空间四维光场信息,相比传统成像方式多出 2 个自由度,因而在图像重建过程中,能够获得更加丰富的图像信息。市面上的 Lytro Illum 相机相对于 Lytro1.0 相机的成像效果更加丰富,因此利用 Lytro Illum 光场相机获取四维光场信息,提取出其中的有效光场数据,反演出 8bit/pixel 的原始四维光场图像数据,并对基于微透镜模型的光场数据进行一系列的算法预处理,从而得到易于理解的标准四维光场矩阵和子光圈图像矩阵,为光场成像技术的数据开发和应用奠定了基础。

关键词 计算成像,子光圈图像矩阵,四维光场信息,微透镜模型,光场成像技术

中图分类号 TN2 文献标识码 A

Data Acquisition and Pre-processing Based on Light Field Photography

ZHAO Qing-qing^{1,2} ZHANG Tao¹ ZHENG Wei-bo¹

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)¹

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)²

Abstract Light field is a representation of full four-dimensional radiance of all rays with spatial and angular information in free space, and capture of light field data enables many new development potentials for computational imaging. The light field camera can obtain 4D light field information, which can capture two more variance than traditional camera. Lytro Illum camera has more advantages than Lytro1.0 in aspect of image quality in the market. This paper used Lytro Illum to capture 4D light field information, extracting the valid light field data from the data file in the light field camera. And 8bi/pixel light field image data can be got by decoding and inverting. Then through a series of process to the light field image data based on microlenses model, 4D light field data array and many sub aperture pictures can be got, laying a good foundation of the light field data development and application.

Keywords Computational imaging, Sub aperture picture array, 4D light field information, microlenses model, Light field imaging technique

光场相机结构包括一个主镜头、一个微透镜阵列和一个图像探测器^[1],加入微透镜阵列后图像探测器上的像素点不再是光场的积分,而是四维光场的重采样,因此光场相机能够通过一次成像获取比传统相机更多的光信息,可以利用计算成像^[2]的方法得到不同方向、位置、景深处的图像以满足不同的需求,目前光场成像技术成为国内外研究的热点。通过算法处理可以实现三维立体重构^[3,4],即先得到物体的空间深度信息^[5,6],然后重构三维立体图像;可以实现先拍照后对焦的功能,根据傅里叶切片定理,对四维光场图像进行傅里叶切片变换,获取聚焦在不同深度处的重聚焦图像^[7,8],克服了传统相机机械式调焦带来的缺陷;可以获取合成孔径图像^[9-11],即利用光场相机获取的四维图像,提取出其中的子孔径图像^[12],这些子孔径图像相当于许多虚拟相机成的像,每个虚拟相机对最终的合成孔径图像做出一点贡献,最后合成一幅超大孔径的图像,即合成孔径图像,能够透过一些常见的障碍物而被掩盖目标物的像。目前,市面上消费级的 Lytro 相机系列中的 Lytro Illum 光场相机因其较好的外观设计和较

高的成像质量广受消费者的喜爱,如果能够利用 Lytro Illum 相机获取四维光场信息,提取出其中的光场数据,并根据自己的需求对这些光场数据进行算法预处理,将对光场成像技术的数据开发和应用研究起到积极的推动作用。国内已有对这方面的研究,但是介绍比较简洁,说法比较笼统。本文较全面地介绍了微透镜型光场数据预处理的整个过程,主要在两个方面对数据进行处理:1)光场数据的提取、解码;2)光场数据的预处理。

1 光场成像原理

与传统成像方式的“所得即所见”不同,光场成像作为一种计算成像技术,其“所得”(光场)需经过相应的处理算法才能得到“所见”(图像)。因此,光场成像系统通过光学装置采集到空间分布的四维光场,再根据不同的应用需求来计算相应的图像。

光场图像采集系统包括一个主镜头、一个微透镜阵列和一个数字图像探测器,其原理如图 1 所示。

本文受中国科学院上海技术物理研究所导向性基础研究项目(CX-52)资助。

赵青青(1988—),女,博士生,主要研究方向为生物光信息处理,E-mail: shengwuzhaoqing@163.com;张 涛(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间生命科学仪器;郑伟波(1977—),男,博士,硕士生导师,主要研究方向为空间生命科学仪器、图像处理。

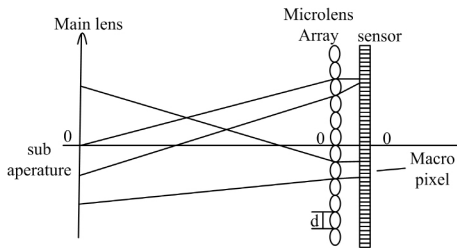


图1 光场采集系统原理图

从主镜头发出的光线经过每个微透镜单元后投影到探测器平面形成一个单元图像,单元图像中的一点此时就对应于主镜头光瞳发出的一条光线(即一个光场采样)。若将每个单元图像整体看作一个宏像素,则每个宏像素对应于光场的一个位置采样,而宏像素内的每一点对应于光场在该位置的一个方向采样;所有宏像素共同组成了光场在镜头孔径上的每一点和每一个微透镜位置的采样。其中,每个宏像素同一位置处的点对应于被拍摄物体不同位置同一方向的采样,提取出每个宏像素中相同位置的像素所组成的图像阵列可组成不同方向的子图像阵列,也叫子光圈图像阵列^[12]或子孔径图像阵列。在理想情况下,若微透镜单元的数量为 $M_1 \times M_2$,每个微透镜所覆盖的像元数为 $N_1 \times N_2$,则探测器中的像元数应为 $N_1 \times N_2 \times M_1 \times M_2$ 。

2 光场数据处理

2.1 光场数据提取

Lytro Illum 相机内部的数据文件存储为 LFR 格式,该数据文件包含了相机的一些配置参数、图像数据的打包方式、光场图像数据等信息^[13],本文利用 LFR 中的提示信息找到了其中的光场图像数据。在 LFR 文件中数据的最下方有如图 2 所示的提示信息,其中“imageRef:”后面的序列号即代表光场图像数据序列号。

```

“frames”: [
{
“assignedProperties”: {},
“accelerations”: [],
“frame”: {
“aberrationCorrectionRef”: “sha1-c10124b23a9297ed6b87
6035b764a482346123ac”,
“hotPixelRef”: “sha1-4920ff11cf44ba84f05cc5691ef3f19a3
1476b0f”,
“exposureHistogramRef”: “sha1-3282ac372d8d0929f
60d669a7dd9a4ee3917d495”,
“aberrationCorrectionMetadataRef”: “sha1f80c96f571dec0
30b80cd5ce287132e25d475ea9”,
“geometryCorrectionRef”: “sha1-8b7a837b824ea40aedaa5b
e0cd3046c453cce581”,
“reconstructionFilterRef”: “sha1-c8f02728cb2407acb6bc
99841e331739df4452d1”,
“reconstructionFilterMetadataRef”: “sha1-31d8921cdf7735
a770feae8fba6e74e6327531f8”,
“metadataRef”: “sha1-c1549f56c815a3980d2f676f93ef359
d80a3226b”,
“modulationDataMetadataRef”: “sha1-6e19ebcf33652549ce
7dfbffa87433fecff55c4”,
“privateMetadataRef”: “sha1-b2f294ad5492eb4067498d8
ab14693dc0029182f”,
“imageRef”: “sha1-4211a06df01f5e20cc3d878c6dece4b8e

```

```

351dfbb”,
“modulationDataRef”: “sha1-f04e2c07575063a91a6b314f9
8b1c5b42b413d09”
}
}
“generators”: [
“lightning”
]

```

图2 LFR 文件中的部分数据

因此,光场图像数据的起始序列号为 sha1-692751345c4b5883322d44eae9d。

1aaf0b0f43c56,隔两行“00”后为光场图像数据,如图 3 所示。由 LFR 文件中给出的光场数据打包格式可知,光场图像大小为:7728 行,5368 列,共 41483904 个像素,其中每 10bit 一个像素,因此光场图像数据的大小为 414839040bit,即 51854880 个字节,向下的 51854880 个字节即为光场图像数据。

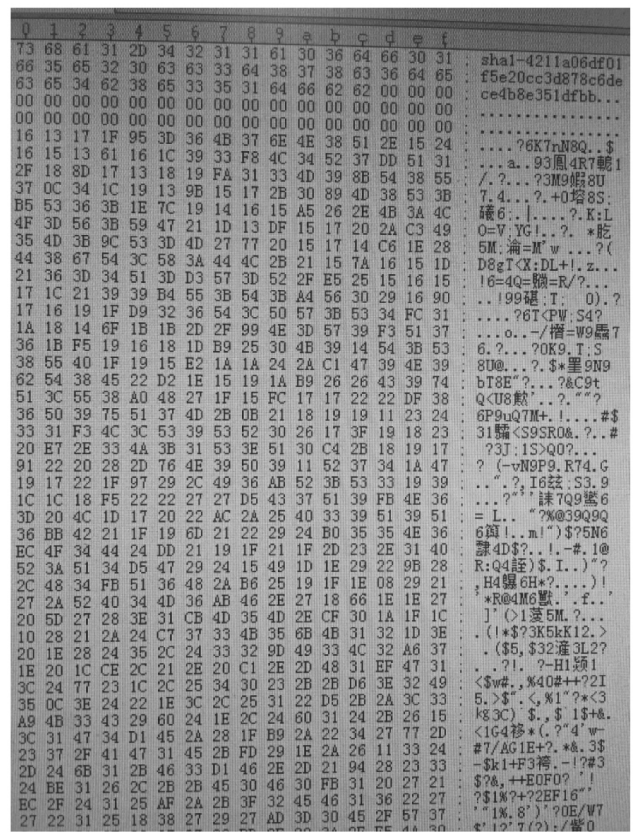


图3 光场图像数据

2.2 光场数据预处理

光场数据预处理流程如图 4 所示。

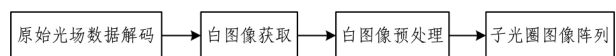


图4 光场数据预处理流程

1. 原始光场数据解码

原始光场数据解码是把 Lytro Illum 相机内部编码好的原始光场图像数据解码为可以利用的标准光场图像矩阵的过程,由于原始光场图像数据中每 10bit 一个像素,但未公开光场数据的存储方式。根据国外开发的相关软件可知,原始光场数据的存放格式如图 5 所示。

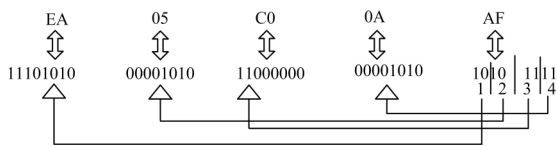


图5 光场数据存储格式

图5中,第一行为5个字节的十六进制数,第二行为对应的二进制数,反演为光场图像时每5个字节进行一次处理,其中,第5个字节共8bit,均分成4部分,每部分2bit。第1部分的2bit分给第1个字节,第2部分给第2个字节,第3部分给第3个字节,第4部分给第4个字节。反演后的图像如图6所示,局部放大后的图像如图7所示。



图6 反演后的光场图像

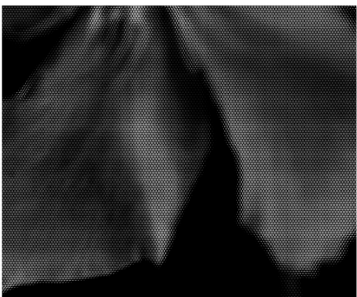


图7 局部放大后的图像

2. 获取白图像

在光照均匀曝光适中的条件下,对亮度均匀的白色平面所成的图像,即为白图像。每次处理不同场景下的光场图像数据时,需先处理与该场景相同环境条件下的白图像,以解算出最终的标准光场图像矩阵,首先选择白图像来处理的目的是减少背景因素对最终解算标准光场图像矩阵数据造成的干扰。目前有两种方式可以获取白图像:1)相机内部自带的白图像;2)自己去拍白图像。反演后的白图像如图8所示。

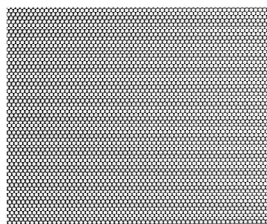


图8 局部放大后的白图像

3. 白图像处理

处理白图像是为了获取白图像中每个宏像素中心的坐标位置、每行每列宏像素的个数和每个宏像素中所含元素的个数,已有一些学者做过这方面的研究^[14-16],处理流程如图9所示。

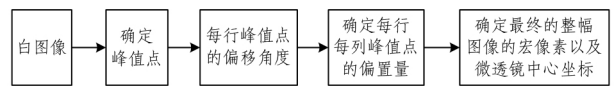


图9 白图像处理流程

(1)确定峰值点的方法为:对白图像先进行圆形滤波处理,然后找局部最大值,最大值点即为峰值点。

(2)由于每行每列像素中的峰值点不在一条直线上,因此会有偏移角度,确定峰值点偏移角度的目的-一方面是更加精确地确定每行每列宏像素在水平和垂直径向上所含的元素的个数,另一方面是为下一步数据处理做准备。具体步骤为:1)三角网格化处理,即对峰值点进行 Delaunay 三角网处理,如图10所示,网格交点即代表峰值点,然后采用近邻取样法确定相邻的峰值点;2)对步骤1)确定的峰值点分别沿 x 方向(水平方向)和 y 方向(垂直方向)最小二乘拟合,确定每行每列峰值点的偏移角度,如图11中的 a, b 。峰值点代表宏像素的中心点位置,相邻峰值点距离与偏移角度的商即为宏像素在水平径向和垂直径向上所含元素的个数。

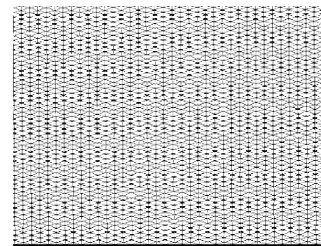


图10 三角网格图

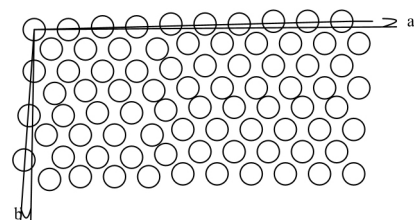


图11 确定峰值点偏移角度原理图

(3)由于经过步骤(2)计算得到的宏像素的中心点所在的位置不一定是整数像素点位置,而理论上峰值点所在的位置应该是整数像素点位置,因此为了使每个峰值点即宏像素中心点落在整数像素位置,每个宏像素中心点会有一个偏移量,然后对每一行每一列中每个偏移量求均值,就可得到各行各列的偏移值。

(4)根据步骤(1)-(3)处理的结果,确定每行每列宏像素的个数,为下一步处理做准备。标定好中心位置的白图像如图12所示。白图像处理过程结束后,处理不同场景下的光场图像。

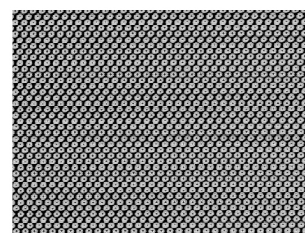


图12 确定微透镜中心点的白图像

4. 获取四维光场矩阵和子光圈图像阵列

利用步骤3处理结果中的参数对光场图像数据进行几何

变换和重新排列^[17],最终得到标准四维光场矩阵 $LF(t,s,v,u)$,其中, t,s 代表宏像素中心点的坐标, u,v 代表宏像素中元素的坐标,由步骤3知光场图像的宏像素个数为 625×434 ,子光圈图像的分辨率为 625×434 ,因此, $LF(:, :, u, v)$ 代表子光圈图像阵列, $t=1:625, s=1:434$ 。处理流程如图13所示。

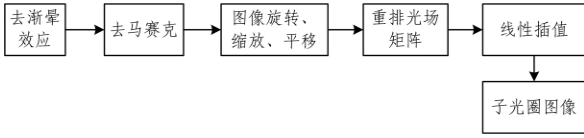


图13 子光圈图像提取流程

图14较形象地说明了图13的处理步骤。

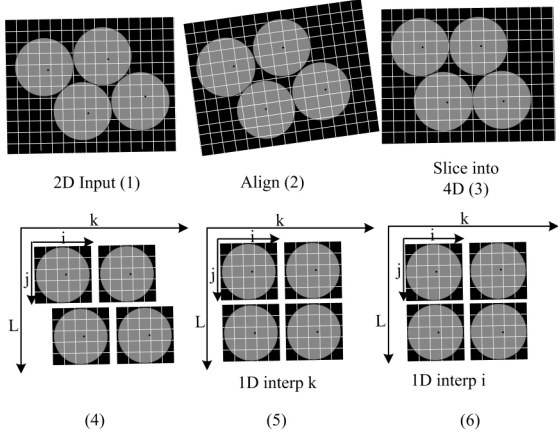


图14 子光圈图像提取示意图

(1)去渐晕效应的方法为:先调整图像的灰度范围,即根据原始数据文件中的参数可知,原始光场图像的灰度范围为 $64 \sim 1023$,将其映射到 $0 \sim 1$ 之间,然后去渐晕处理,公式为:

$$I' = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

其中, I' 为去渐晕后的图像, I 为调整灰度范围后的图像, I_0 为调整灰度范围后的白图像。

(2)去马赛克的目的是灰度图像转换为彩色图像并消除马赛克网格效应的影响,去马赛克处理可以利用 matlab 中的 demosaic 函数。

(3)图像旋转、缩放、平移的目的是让宏像素中水平径向和垂直径向的元素为奇数,以确保中心点位置为整数,即图14中步骤(1)到(2)的过程。

图像旋转、缩放、平移的原理如下。

旋转:

设某点与原点的连线和 x 轴夹角为 β 度,以原点为圆心,逆时针转过 α 度,原点与该点连线长度为 R , $[x,y]$ 为变换前坐标, $[X,Y]$ 为变换后坐标。

$$X = R \cos(\beta); Y = R \sin(\beta) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X &= R \cos(\alpha + \beta) \\ &= R \cos \alpha \cos \beta - R \sin \alpha \sin \beta \\ &= x \cos \alpha - y \sin \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y &= R \sin(\alpha + \beta) \\ &= R \sin \alpha \cos \beta + R \cos \alpha \sin \beta \\ &= x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

旋转变换矩阵表示为:

$$[X, Y, 1] = [x, y, 1] \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

缩放:

设某点的坐标,在 x 轴方向扩大 s_x 倍, y 轴方向扩大 s_y 倍, $[x,y]$ 为变换前坐标, $[X,Y]$ 为变换后坐标。

$$X = s_x * x, Y = s_y * y \quad (6)$$

用矩阵表示:

$$[X, Y, 1] = [x, y, 1] \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 即为缩放矩阵。}$$

平移:

设某点向 x 方向移动 dx , y 方向移动 dy , $[x,y]$ 为变换前坐标, $[X,Y]$ 为变换后坐标。则 $X = x + dx; Y = y + dy$ 。

以矩阵表示:

$$[X, Y, 1] = [x, y, 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ dx & dy & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ dx & dy & 1 \end{bmatrix} \text{ 即为平移变换矩阵。}$$

(4)重排光场矩阵是获取标准光场矩阵的关键步骤,其处理过程为:首先建立一个标准四维光场空矩阵,第一维代表每个宏像素中心的横坐标,第二维代表每个宏像素中心的纵坐标,第三维代表宏像素中元素的横坐标,第四维代表宏像素中元素的纵坐标;其次利用四维绘图函数生成四维网格空矩阵,分别用来代表光场矩阵中的宏像素中元素的坐标和宏像素中心位置坐标;获取原三维彩色光场图像坐标的索引值;最后把四维光场空矩阵的下标转换为索引值,把原三维彩色光场图像索引值所对应的像素值赋值给空矩阵的索引值所对应的像素,获取 $LF(t,s,v,u)$ 类型的矩阵, t,s 为不同宏像素中心的坐标值, v,u 为每个宏像素的元素坐标值,即图14中步骤(2)–(4)的过程。

(5)对步骤(4)获取的四维光场矩阵分两次进行一维线性插值,分别对 (v,u) 和 (t,s) 维度进行一维插值。其中,对 (t,s) 维度插值的目的是使原六边形排列的宏像素转换为四边形排列,即图14(4)中的沿 k 方向插值;对 (v,u) 维度插值的目的是使宏像素中的元素组成正方形排列的结构,即图14(5)中的沿 i 方向插值。

(6)根据步骤(5)的处理结果,即可获取标准四维光场矩阵 $LF(s,t,v,u)$ 和子光圈图像阵列 $LF(:, :, v, u)$ 。例如 $LF(:, :, 1, 1)$ 分别提取宏像素中最左上角的元素所组成的子光圈图像。图15是同一方向的子光圈图像 $LF(312, 217, 1, 1)$ 。



(a)

(b)

图15 子光圈图像

(下转第182页)

- phase[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(2): 209-223
- [4] Hong J H, Min J K, Cho U K, et al. Fingerprint classification using one-vs-all support vector machines dynamically ordered with Naive Bayes classifiers[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(2): 662-671
- [5] Liu M. Fingerprint classification based on adaboost learning from singularity features[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(3): 1062-1070
- [6] Cappelli R, Lumini A, Maio D, et al. Fingerprint classification by bidirectional image partitioning[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 402-421
- [7] Jung H W, Lee J H. Noisy and incomplete fingerprint classification using local ridge distribution models[J]. *Pattern Recogn.*, 2015, 48(2): 473-484
- [8] Jain A K, Prabhakar S, Hong L. A multichannel approach to fingerprint classification[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1999, 21(4): 348-359
- [9] Galar M, et al. A survey of fingerprint classification Part II: Experimental analysis and ensemble proposal[J]. *Original Research Article Knowledge-Based Systems*, 2015, 81: 98-116
- [10] Peralta D, Galar M, Triguero I, et al. Minutiae filtering to improve both efficacy and efficiency of fingerprint matching algorithms[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014, 32(32): 37-53
- [11] Chen Xin-jian, Tian Jie, Cheng Jian-gang, et al. Segmentation of fingerprint images using linear classifier[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, 4: 480-494
- [12] Bazen A M, Gerez S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 905-919
- [13] Thai H L, Hoang T V. Fingerprint reference point detection for image retrieval based on symmetry and variation[J]. *Original Research Article Pattern Recognition*, 2012, 45(9): 3360-3372
- [14] Wang S, Yao X. Multiclass imbalance problems: analysis and potential solutions[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B*, 2012, 42(4): 1119-1130
- [15] Mei Y, Zhao B, Zhou Y, et al. Orthogonal curved-line Gabor filter for fast fingerprint enhancement[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(3): 175-177
- [16] Sáez J A, Galar M, Luengo J, et al. Analyzing the presence of noise in multi-class problems: alleviating its influence with the one-vs-one decomposition[J]. *Knowledge & Information Systems*, 2014, 38(1): 179-206

(上接第 143 页)

3 实验结果与分析

从图 15 的实验结果可以看出, 本文算法能够获取完整的子光圈图像, 证明本文数据处理算法对处理微透镜型光场相机中的数据有效可行, 但处理后的图像有一道偏暗区域, 有可能是光场相机中 LFR 文件中编码方式未充分理解, 导致文件中给出的一些解码校正参数未充分利用。

结束语 本文全面系统地介绍了基于微透镜型光场成像系统的光场数据处理方法, 完成了从 Lytro Illum 光场相机中提取和解码光场数据, 并进行处理获取标准四维光场图像矩阵和子光圈图像矩阵的过程, 为光场成像技术的研究和应用奠定了基础。但本文算法获取的子光圈图像总会有部分偏暗区域, 因此后续工作将提出一套更准确可靠的算法来提取光场子光圈图像。

参 考 文 献

- [1] Ng R, Levoy M, Bredif M, et al. Light field photography with a handheld plenoptic camera, computer science technical report CSTR[R]. Palo Alto: Stanford University, 2005
- [2] Levoy M. Light fields and computational imaging[J]. *Computer*, 2006, 39(8): 46-55
- [3] Zhou Yan, Guo Hui-wen, Liang Guo-yuan, et al. 3D Reconstruction Based on Light Field Information[C]// *IEEE International Conference on Information and Automation*. 2015: 976-981
- [4] Huang Yu-sheng, Xia Jun, Yin Han-chun. Three-dimensional scene reconstruction by using lenslet array model in computational integral imaging[C]// *Proceeding of SPIE -The international Society for Optical Engineering*. 2009, 7513: 75131E
- [5] Tao M W, Hadap S, Malik J, et al. Depth from Combining Defocus and Correspondence Using Light Field Cameras[C]// *IEEE International Conference on Computer Vision*. 2013: 673-680
- [6] Bishop T E, Favaro P. Full-Resolution Depth Map Estimation from an Aliased Plenoptic Light Field[M]// *Computer Vision-ACCV 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 186-200
- [7] Ng R. Fourier slice photography [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 735-744
- [8] Zhou Zhi-liang, Yuan Yan, Xiang Li-bin. Computer simulation for digital refocusing imager based on light field photography[C]// *International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging*. 2009
- [9] 聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2011, 28(5): 563-571
- [10] Vaish V, Wilburn B, Joshi N, et al. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2004
- [11] Levin A, Fergus R, Durand F, et al. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 70-75
- [12] Adelson E H, Wang J Y A. Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 99-106
- [13] Georgiev T, Zhan Yu, Lumsdaine A, et al. Lytro camera technology: theory, algorithms, performance analysis[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8667(15)
- [14] 阮龙. 基于微透镜型光场成像数据获取及深度信息提取研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014
- [15] 高珍. 光场相机的数据处理和标定方法研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2014
- [16] 周文晖, 林丽莉. Lytro 相机的光场图像校正与重对焦方法[J]. *中国图像图形学报*, 2014, 19(7): 1006-1011
- [17] Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B, et al. Decoding, Calibration and Rectification for Lenselet-Based Plenoptic Cameras[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013