

文章编号:1007-2780(2024)10-1304-09

大视场高分辨率无色差的复眼相机阵列系统

李文杰, 刘学斌, 杨洁, 邓欢*
(四川大学电子信息学院, 四川成都 610065)

摘要:为了解决单相机平台受高分辨率与大视场角之间矛盾制约的问题,本文提出了一种大视场、高分辨率、无色差的复眼相机阵列系统。结合人眼视觉成像理论,建立非均匀采样的仿生视觉模型,降低系统输入端的数据冗余;设计了一种多图像平滑加权融合算法,实现大视场图像无缝拼接;提出了一种基于多级迭代直方图匹配的色彩校正算法,提高了不同子相机间的色彩一致性;利用相邻子相机间重叠区域,对感兴趣区域(Region of Interest, ROI)进行多图像超分辨率重建。最终搭建了曲面相机阵列系统,实现了无色差大视场高分辨率图像的获取。实验结果表明,该系统能够达到单个子相机9倍的视场角与分辨率,并实现了ROI的4倍超分辨率重建。相比于典型的色彩校正算法HM,本文所提方法的PSNR和HSM指标分别提升了4.1%和15.9%,满足了多相机系统在复杂场景下的大视场、高分辨率、无色差的需求。

关键词:复眼相机阵列;色彩一致性;直方图匹配;图像拼接;超分辨率重建

中图分类号:TO436 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2024-0016

Compound eye camera array system with large field of view, high-resolution and achromatic aberration

LI Wenjie, LIU Xuebin, YANG Jie, DENG Huan*

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to overcome the limitations of single-camera platform due to the trade-off between high resolution and large field of view, this paper proposed a compound eye camera array system capable of capturing wide field of view, high-resolution and achromatic images. Combined with the theory of human visual imaging, a non-uniform sampling biomimetic vision model was established to reduce data redundancy at the input of system. A smooth weighted fusion algorithm for multi-image was designed to stitch the large field of view image seamlessly. Additionally, a multi-level iterative histogram matching color correction algorithm was proposed to enhance color consistency among different sub-cameras. The overlapping regions between adjacent sub-cameras were utilized to perform multi-image super-resolution reconstruction on ROI (Regions of Interest). Ultimately, a curved camera array system was built up, enabling the acquisition of large-field of view high-resolution images without color deviation. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves a 9-fold increase in both field of view and resolution

收稿日期:2024-01-11;修订日期:2024-01-22.

基金项目:国家自然科学基金(No.U21B2034, No.62275179);四川省科技计划项目(No.2022YFG0326)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U21B2034, No.62275179); Sichuan Science and Technology Program (No.2022YFG0326)

*通信联系人, E-mail: huandeng@scu.edu.cn

compared to a single sub-camera, while achieving a 4-fold super-resolution reconstruction of ROI. Additionally, compared to typical color correction algorithms HM, the PSNR and HSM metrics of our proposed method are improved by 4.1% and 15.9% respectively. These results satisfy the demands of multi-camera systems for large field of view, high resolution and color-accurate images in complex scenarios.

Key words: camera array; image stitching; color consistency; histogram matching; super-resolution reconstruction

1 引 言

基于单相机平台的光电成像探测感知系统受到大视场角与高分辨率之间的矛盾制约,导致其应用场景受到限制^[1-2]。阵列式的多相机系统通过运用数学模型及图像处理算法实现了多个相机视场的拼接,获得了兼顾大视场角与高分辨率的图像^[3-4],广泛应用于各类无人机侦查平台及全景道路交通监控系统中^[5-6]。常见的相机阵列系统对目标场景进行信息获取的方式是均匀的,每个像素点信息获取和处理都需要相同的系统资源,而目标场景通常是稀疏、非均匀分布的,因此造成系统资源的极大浪费。在实际应用中,由于各子相机感光芯片的敏感度存在细微差异,以及受到光照、遮挡阴影等自然环境因素的影响,针对同一内容拍摄得到的图像灰度值不尽相同^[7],降低了后期目标识别与跟踪的准确率^[8]。因此,设计一套能够实现信息非均匀获取的大视场、高分辨率、无色差的复眼相机阵列系统有着重要的理论研究价值与现实应用意义,能够满足公共安全防护、智慧交通监控、无人机实时侦查等领域的迫切需求。

基于相机阵列的大视场、高分辨率成像感知系统一直是热点研究方向。2012年,Brady等人研制了一款半球形阵列相机系统应用于美军作战系统,其解析度提升至人眼的5倍,并能够实现10亿像素级别的信息获取^[9]。2016年,Harvey等人将光学探测器与折射棱镜阵列组合,实现了偏心视觉非均匀成像^[10]。同年,本研究团队针对相机阵列位姿难以精确调节等问题,提出了相机阵列快速标校算法,实现了集成成像的裸眼3D实时拍摄与显示^[11]。2017年,Song等人设计了一套具有1个中心子眼和6个边缘子眼的相机阵列系统,实现了对近距离物体的高速追踪^[6]。2019年,Wang等人建立了全球首个大规模10亿

像素级视频数据集,推动了10亿像素图像的目标检测和多目标追踪技术进程^[2]。2021年,Yuan等人提出了非结构化计算成像理论,研制了能够实现动态大场景百米级深度感知与重建的智能成像系统^[12]。这些系统虽然解决了高成像分辨率与大视场角之间的矛盾,但由于获取数据量庞大,在数据传输、处理以及存储上面临着严峻的挑战。同时复杂的系统设计也加剧了不同相机之间的色彩差异,使平滑过渡的拼接图像难以实现。

对多相机系统进行色彩校正的研究可以分为关注画面整体色彩一致性的全局色彩校正方法和关注复杂场景下色彩精确还原的局部色彩校正方法。前者通常选择在标准的参考图像 I_{ref} 和存在色差的目标图像 I_{tgt} 中寻找一组映射关系来调整 I_{tgt} 的色彩分布^[13]。2008年,Fecker等人提出了直方图匹配(Histogram Matching, HM)方法,通过在YCbCr(Luminance, Chrominance Blue, Chrominance Red)空间构造映射函数使 I_{tgt} 的直方图分布与 I_{ref} 相一致,达到色彩校正的目的^[14]。2021年,Ding等人提出了一种混合直方图匹配的多相机系统色彩校正方案,升序重排 I_{tgt} 的直方图,滤除阈值外的误差部分后进行平滑过渡,解决了传统直方图匹配法过曝色块的问题^[15]。这些方法在一定程度上实现了多相机系统的色彩一致性,但仍然存在校正精度不够以及色彩缺失等问题。

然而,单个映射关系无法适用于复杂场景。局部色彩校正法则根据空间及色彩上的结构不同,把 I_{tgt} 划分为多个区域进行计算匹配^[16]。2017年,Bellavia等人提出在构建样条曲线的过程中引入梯度修正的方法,保持了复杂图像的结构稳定性^[17]。2020年,Niu等人提出了一种基于图像分割的残差优化方案,将色彩校正描述为输入图像与输出图像之间残差优化问题,提升了校正图

像的清晰度^[8]。这些方法虽然能够在局部 ROI 上实现较高的校正精度,但对局部信息的分区处理会引起图像结构改变并在拼接阶段引入粗对齐的问题,降低画面整体性。

本文提出了一套大视场、高分辨率、无色差的复眼相机阵列系统。该系统结合了人眼视觉非均匀成像的特点^[18],根据 ROI 位置不同,对子相机覆盖视场进行差异化分配,减少了输入端获取的冗余信息。设计了多图像平滑加权融合算法,采用自适应加权系数实现系统输入图像的无缝拼接。针对不同子相机间色彩不一致的问题,提出了基于多级迭代直方图匹配的色彩校正算法,通过构建滑窗来分解目标图像,逐级进行迭代以保证高的色彩校正精度,同时在每一级中使用直方图匹配来兼顾全局色彩一致性。本文所提系统不仅解决了传统阵列相机拍摄数据量大难以处理的问题,还通过设计的色彩校正算法保证了多相机间的高色彩一致性,能够生成大视场、高分辨率、无色差的图像。

2 复眼相机阵列系统结构及工作原理

2.1 系统结构

本文提出的复眼相机阵列系统结构如图 1 所示,主要由相机阵列、曲面支架组成。光轴反向延长线相交于一点的 5 个子相机等距排布在曲面相机阵列支架上,其中单个子相机的视场为 $20^\circ \times 15^\circ$,通过旋转扫描式拍摄达到 5×5 相机阵列的效果,理论上能够实现约 $60^\circ \times 45^\circ$ 的大视场目标信息获取。系统捕获的图像输入计算机中进行拼接、色彩校正、超分辨率重建等处理。

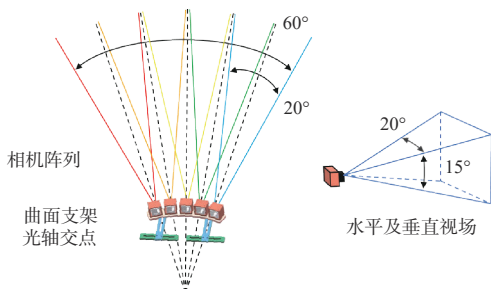


图 1 复眼相机阵列系统示意图

Fig. 1 Diagram of the compound eye camera array system

2.2 仿生人眼视觉成像原理

人眼视觉对于外界信息的获取是选择性的。这一过程一方面与视杆细胞和视锥细胞在视网膜上的非均匀分布有关,另一方面也依赖于人脑视觉信息的注意力机制^[19]。在这些因素的影响下,人眼能够向大脑提供更多视野中央 ROI 的分辨率信息,对于视野边缘场景虽然分辨率感知有限,却能更加敏感地捕捉到光强以及运动的变化。

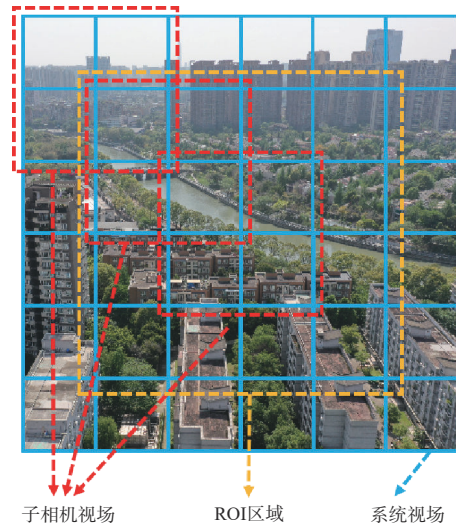


图 2 复眼相机阵列系统视场

Fig. 2 Field of view of the compound eye camera array system

本文所提仿生人眼视觉方案的拍摄视场如图 2 所示, 5×5 个相机以曲面形式均匀分布构成二维阵列,相邻子相机间有约 50% 的视场重叠。视野中央的 ROI 被 4 个子相机覆盖,用于模拟人眼视网膜黄斑区密集分布的感光细胞,理论上能够实现 4 倍分辨率增强;系统边缘视场由少量子相机覆盖,旨在通过较低的数据采集代价用于动态监测。系统整体工作流程如图 3 所示。

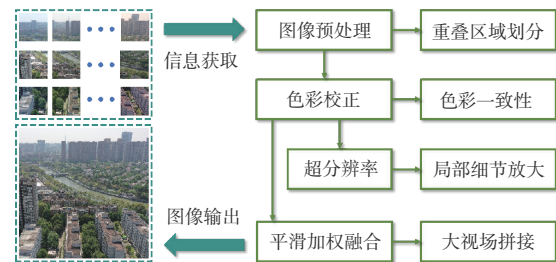


图 3 复眼相机阵列系统的工作流程

Fig. 3 Flowchart of the compound eye camera array system

3 复眼相机阵列系统的关键算法

3.1 图像预处理

当相机阵列捕获的一组视差图像输入系统中时,将首先进行图像预处理。如图4所示,通过尺度不变特征变换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)^[20]分别提取参考图像 I_{ref} 和目标图像 I_{tgt} 的特征点并进行计算匹配,从而得到两幅图像间的单应性变换矩阵^[21-22]。利用该矩阵实现 I_{tgt} 的透视变换,将 I_{tgt} 和 I_{ref} 转换至同一平面对齐,获取变换后 I_{tgt} 与 I_{ref} 间交集区域的点集信息。对交集区域进行逆透视变换,从而获得对应的原始点集信息,便可在 I_{ref} 与 I_{tgt} 中划分出重叠区域 O_{ref} 和 O_{tgt} 。

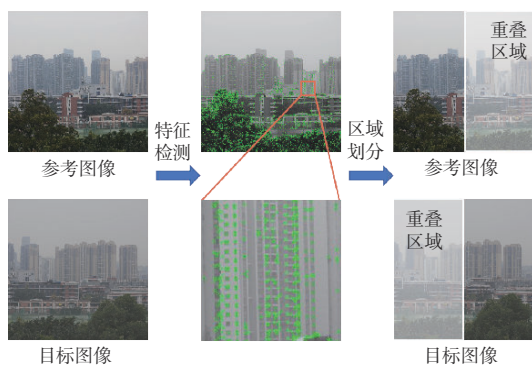


图4 图像预处理过程

Fig. 4 Process of image preprocessing

3.2 多图像平滑加权融合算法

在复眼相机阵列系统中,每个子相机捕获的图像是碎片化的,只包含部分所需目标场景,需要对其进行融合拼接来实现大视场图像输出。对于两个相邻子相机采集的图像,加权融合算法^[23]在重叠区域将对应的像素点按设定的权重比例融合,对于非重叠区域则进行拼接操作,计算方法如式(1)所示:

$$R(x, y) = p_1 I_{\text{ref}}(x, y) + p_2 I_{\text{tgt}}(x, y), \quad (1)$$

其中: (x, y) 是重叠区域内的任一像素, $R(x, y)$ 表示融合后该像素的灰度值,权重系数 p_1 与 p_2 的和为1。

然而在实际应用中,不同相机位姿难以调节,视场重叠区域不一致,无法用一组权重系数实现所有子相机图像的拼接。基于此,文本设计了一种多图像平滑加权融合算法。该方法能够

根据不同大小的重叠区域自适应计算出不同的权重系数 p_1, p_2 ,其值可由式(2)和式(3)确定:

$$p_1 = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < a \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{(x-b)^2}{(a-b)^2}} & a \leq x \leq b \\ 0 & b < x \end{cases}, \quad (2)$$

$$p_2 = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < a \\ \sqrt{1 - \frac{(x-b)^2}{(a-b)^2}} & a \leq x \leq b \\ 1 & b < x \end{cases}, \quad (3)$$

其中, a 和 b 分别代表重叠区域最左端与最右端的水平位置坐标。权重系数的变化趋势如图5所示。可以看出,改进后的权重系数在图像重叠区域内随着所处位置不同而平滑渐变,从而实现参考图像与目标图像间的自然过渡。

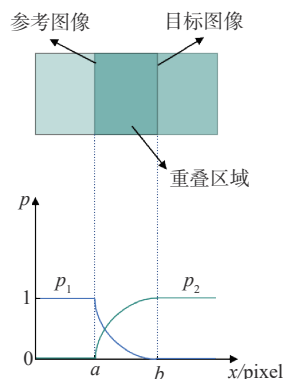


图5 改进的权重系数变化趋势

Fig. 5 Trend of the improved weight coefficient

多图像平滑加权融合方法在大多数情况下可以实现复眼相机阵列多图像之间的平滑融合,一定程度上消除图像边缘的微小色差。然而当输入的两幅图像明暗差异巨大时,其拼接效果会显著降低。

3.3 多级迭代直方图匹配算法

多相机系统一方面由于感光芯片硬件存在细微的差异,另一方面由于受到光照阴影等因素的干扰,会导致所得图像的色彩和明暗存在差异,极大地影响了大视场拼接图像的质量。

本文提出多级迭代直方图匹配色彩校正算法,该算法主要由滑窗创建层、迭代匹配层以及融合拼接层构成。通过滑窗创建层将存在色差

的目标图像 I_{tgt} 划分为具有高重叠区域的子图像组,在迭代匹配层中逐个计算相邻子图像间的直方图并进行直方图匹配,随后将每一级匹配输出的校正图像当作下一级直方图匹配的输入,结合分块处理思想进行渐进式逐级迭代,并加权融合。下面详细介绍该方案执行的具体步骤。

3.3.1 滑窗创建层

图6描述了滑窗创建层的具体执行流程。在大小为 m 像素 \times n 像素的目标图像 I_{tgt} 内,创建一个 k 像素 \times n 像素的滑窗, k 值由式(4)确定:

$$k = l + h, \quad (4)$$

其中: l 表示重叠区域的水平像素数, h 为移动步长,定义 α 为重叠区域比例,则 h 可表示为:

$$h = m\alpha/4. \quad (5)$$

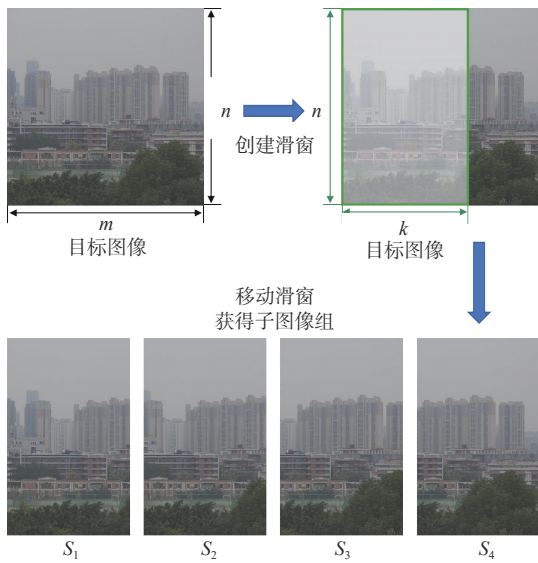


图6 滑窗创建层执行流程

Fig. 6 Execution process of sliding window creation

在图6的示例中,图像预处理阶段计算所得重叠比例 α 为 50%。滑窗从最左端起遍历 I_{tgt} ,分别截取并记录每次移动后窗内子图像 (S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4)。

3.3.2 迭代匹配层

具有高重叠区域的子图像组 S 依次进入迭代匹配层处理,如图7所示。首先对子图像组中的第一幅子图像 S_1 与参考图像 O_{ref} 进行直方图匹配。

直方图匹配的具体执行过程可以分为映射关系获取和图像变换两个阶段。在映射关系获取阶段,分别计算两幅输入图像的概率密度分布

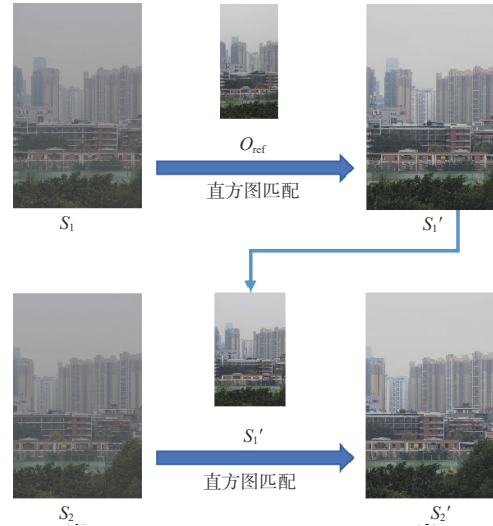


图7 迭代匹配层执行流程

Fig. 7 Execution process of iterative matching

并进行归一化处理,构建查找表用于将子图像 S_1 与参考图像 O_{ref} 的离散灰度值相匹配;在图像变换阶段,将该查找表应用在 S_1 上便可获得与 O_{ref} 具有近似直方图分布的校正后子图像 S_1' 。这一过程可表示为:

$$f(S_1) = S_1', \quad (6)$$

其中, f 代表由查找表所确定的映射关系。

随后的下一级匹配中, S_1' 将作为新的参考图像与 S_2 一起输入进行匹配映射,并最终得到 S_2' 。依次类推,完成整个子图像组 S 的直方图匹配计算,得到校正后子图像组 S' 。

3.3.3 融合拼接层

融合拼接层用于生成平滑后的校正图像,并最终获得大视场无缝无色差的拼接图像,恢复缺失的灰度值。

在这一过程中,我们使用上文提出的多图像平滑加权融合算法进行处理。该方法对于输入图像是否精确对齐有着较高的要求,即使微小的差异也会导致拼接后的图像存在鬼影、错位等问题。在我们所提出的方案中,子图像组中的每一项均来源于滑窗的水平移动,不存在垂直位置上的像素偏移,因而能够很好地契合多图像平滑加权融合算法的适用范围,实现较好的拼接效果。

3.4 多图像超分辨率重建算法

复眼相机阵列图像超分辨率重建的本质是将相关性很强的多幅低分辨率 (Low Resolution, LR) 图像中的有用信息综合在一起,产生一幅携带有更

多有效信息的高分辨率(High Resolution,HR)图像,以弥补原始拍摄图像承载信息的局限性。

在本文所提系统中,每个子相机都从不同角度对目标场景进行拍摄,视野中央的ROI被4个子相机视场所覆盖,因此可以得到4张内容存在细微差异的LR图像。通过图像预处理,提取LR图像组的重叠区域,并将其等效为一段视频中相邻的多帧图像,利用Real Basic VSR网络^[24]生成4倍分辨率的HR图像。该网络通过在输入图像间建立双向联系,使得每一张图像都作为其余3张图像的参考帧,从而能够实现精准清晰的重建结果。

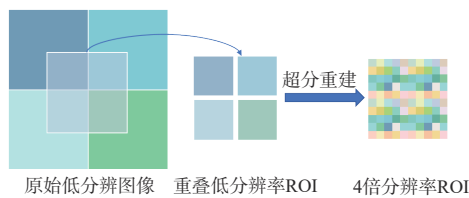


图 8 多图像超分辨率重建的执行流程

Fig. 8 Execution process of multi-image super-resolution reconstruction

4 实验验证

本文所设计的仿生人眼视觉复眼相机阵列装置如图 9 所示。系统中的 5 个子相机等距排布在曲面支架上,其中单个子相机视场角约为 $20^\circ \times 15^\circ$,感光元件 CCD 的分辨率为 $4\,000$ 像素 \times $3\,000$ 像素,相邻子相机间视场重叠比例为 50%,通过旋转扫描式拍摄即可实现大视场信息获取。

我们在拍摄过程中人为调整了子相机的部分参数,获得存在色差的实验图像组,随后分别采用传统 HM 算法^[14]与本文所提出的多级迭代



图 9 复眼相机阵列的实验装置

Fig. 9 Experimental setup of the compound eye camera array

直方图方法进行色彩校正效果对比,并对相关图像质量评价指标进行测算。

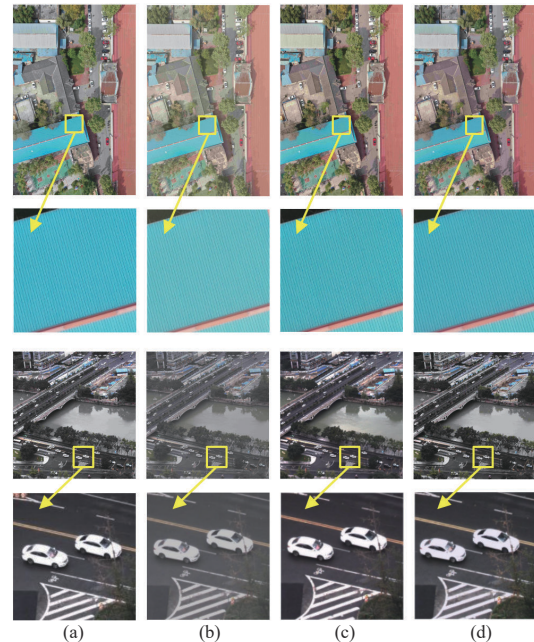


图 10 不同色彩校正方法的效果对比。(a)标准图像;(b)存在色差的图像;(c)使用HM方法校正后的图像;(d)使用本文方法校正后的图像。

Fig. 10 Image comparison of different color correction methods. (a) Standard images; (b) Target images with color deviation; (c) Corrected images by HM; (d) Corrected images by our proposed method.

图 10 展示了传统 HM 算法和本文所提算法在两组不同场景下的色彩校正效果对比。其中图 10(a)和图 10(b)分别是无色差的标准图像和有色差的目标图像。图 10(c)是使用 HM 算法校正后的结果,可以看出该方法虽然取得了一定效果,但在局部细节处理上不够精准,仍存在色差。相比之下,使用我们所提出的多级迭代直方图匹配算法校正后的结果(图 10(d))能够较为真实地还原原始场景的色彩。

我们测算了图 10 中两组不同场景下峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)与直方图相似性(Histogram Similarity, HSM)的平均值,结果如表 1 所示,同组内的最优值使用加粗标记。可以看出,本文方法在量化结果上相比于传统 HM 方法展现出了一定的优势,PSNR 与 HSM 指标分别平均提升了 4.1% 和 15.9%。

表 1 不同色彩校正方法的数据对比

Tab. 1 Data comparison of different color correction methods

方法	PSNR \uparrow	HSM \uparrow
HM	28.654	0.485
本文方法	29.827	0.562

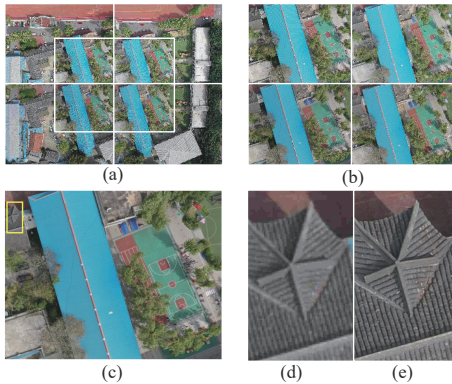


图 11 多幅图像超分辨率重建结果。(a)相机阵列拍摄原始图像;(b)重叠 ROI 图像;(c)超分辨率重建结果;(d)LR 图像细节放大;(e)HR 图像细节放大。

Fig. 11 Results of multi-image super-resolution reconstruction. (a) Original images obtained by camera array; (b) Images of ROI; (c) Results of super resolution reconstruction; (d) Amplified detail of LR image; (e) Amplified detail of HR image.

图 11 为多图像超分辨率重建算法的实验结果。其中图 11(a)~(c)分别为使用复眼相机阵列拍摄得到的 4 张原始 LR 图像、经过图像预处理层提取的重叠 ROI 图像以及使用 Real Basic VSR 网络后生成的 HR 图像。图 11(d)和图 11(e)是对 LR 图像和 HR 图像在黄色方框位置的细节放大对比。可以看出,经过超分辨率重建后的图像质量大幅提升,屋顶纹理清晰可见,真实再现了原始场景的细节信息。

图 12 为使用本文所提系统与方法得到的最终结果,对拼接过程产生的边缘黑色像素进行腐蚀处理后,系统视场角约为 $60^{\circ} \times 45^{\circ}$,分辨率约为

12 000 像素 \times 9 000 像素。该图像在拼接位置过渡平滑,整体色彩一致,达到了单相机 9 倍的视场角与分辨率,满足了多相机系统在复杂场景下大视场、高分辨率、无色差的需求。



图 12 大视场、高分辨率、无色差的拼接图像。

Fig. 12 Stitched image with large field of view, high-resolution and color-accurate.

5 结 论

本文设计了一种大视场、高分辨率、无色差的复眼相机阵列系统。通过结合仿生人眼视觉理论,实现了非均匀分布的大视场图像信息获取,降低了多相机系统输入端的冗余数据量。针对系统中不同相机间色彩存在差异的问题,提出了基于多级迭代直方图匹配的色彩校正算法,通过构建滑窗将色差图像分解并逐级进行直方图匹配。设计了多图像平滑加权融合算法,最终生成大视场、无缝、无色差图像。实验结果表明,本文所提系统能够实现单相机 9 倍的视场角与分辨率,ROI 区域 4 倍超分辨率重建,并且具有较高的色彩一致性,相比于典型的 HM 算法,在 PSNR 和 HSM 指标上分别提升了 4.1% 和 15.9%。本文所提系统和方法在全景交通监控及军事侦查领域有着广阔的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] DENG H, LI S, WANG L, *et al.* Dual-view integral imaging system with wide viewing angle and high spatial resolution [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 7000511.
- [2] WANG X Y, ZHANG Y X, ZHU Y H, *et al.* PANDA: a gigapixel-level human-centric video dataset [C]. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020: 3265-3275.

- [3] LI Q, DENG H, YANG C N, *et al.* Locally controllable 2D/3D mixed display and image generation method [J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 22838-22847.
- [4] REN H, WANG Q H, XING Y, *et al.* Super-multiview integral imaging scheme based on sparse camera array and CNN super-resolution [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A190-A196.
- [5] MA M C, GUO F, CAO Z L, *et al.* Development of an artificial compound eye system for three-dimensional object detection [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1166-1172.
- [6] PANG K, FANG F Z, SONG L, *et al.* Bionic compound eye for 3D motion detection using an optical freeform surface [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): B28-B35.
- [7] ALOMRAN M, CHAI D. Feature-based panoramic image stitching [C]. 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). Phuket: IEEE, 2016: 1-6.
- [8] NIU Y Z, LIU P Y, ZHAO T S, *et al.* Matting-based residual optimization for structurally consistent image color correction [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2020, 30(10): 3624-3636.
- [9] BRADY D J, GEHM M E, STACK R A, *et al.* Multiscale gigapixel photography [J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 386-389.
- [10] CARLES G, CHEN S Q, BUSTIN N, *et al.* Multi-aperture foveated imaging [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1869-1872.
- [11] XIONG Z L, XING Y, DENG H, *et al.* Planar parallax based camera array calibration method for integral imaging three-dimensional information acquirement [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 219-222.
- [12] YUAN X Y, JI M Q, WU J M, *et al.* A modular hierarchical array camera [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 37.
- [13] BELLAVIA F, COLOMBO C. Dissecting and reassembling color correction algorithms for image stitching [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(2): 735-748.
- [14] FECKER U, BARKOWSKY M, KAUP A. Histogram-based prefiltering for luminance and chrominance compensation of multiview video [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(9): 1258-1267.
- [15] DING C Q, MA Z. Multi-camera color correction via hybrid histogram matching [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2021, 31(9): 3327-3337.
- [16] FARIDUL H S, STAUDER J, KERVEC J, *et al.* Approximate cross channel color mapping from sparse color correspondences [C]. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Sydney: IEEE, 2013: 860-867.
- [17] MA K D, ZENG K, WANG Z. Perceptual quality assessment for multi-exposure image fusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3345-3356.
- [18] CHEN J, MI L T, CHEN C P, *et al.* Design of foveated contact lens display for augmented reality [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38204-38219.
- [19] XI N, YE J X, CHEN C P, *et al.* Implantable metaverse with retinal prostheses and bionic vision processing [J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1079-1091.
- [20] ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]// *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkyra: IEEE, 1999: 666-673.
- [21] ZARAGOZA J, CHIN T J, TRAN Q H, *et al.* As-projective-as-possible image stitching with moving DLT [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(7): 1285-1298.
- [22] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [23] NIU H Q, LU Q K, WANG C. Color correction based on histogram matching and polynomial regression for image stitching [C]. 2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). Chongqing: IEEE, 2018: 257-261.

- [24] CHAN K C K, ZHOU S C, XU X Y, *et al.* Investigating tradeoffs in real-world video super-resolution [C]. *Proceedings of 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. New Orleans: IEEE, 2022: 5952-5961.

作者简介:



李文杰,男,硕士研究生,2021年于四川大学获得学士学位,主要从事图像处理 and 3D显示方面的研究。E-mail: wenjieli@foxmail.com



邓欢,女,博士,教授,2012年于四川大学获得博士学位,主要从事集成成像 3D显示、AR显示和光场显示方面的研究。E-mail: huandeng@scu.edu.cn