# 基于相机阵列的高动态范围图像合成方法\*

周继权,王 庆

(西北工业大学 计算机学院, 西安 710072)

摘 要:针对传统的高动态范围图像合成方法不能适应动态光照的问题,提出了基于相机阵列的不同曝光的多 幅图像的配准及高动态范围图像合成方法。首先利用相机阵列获取不同曝光图像,结合相机阵列标定参数,采 用光场合成孔径理论对图像进行配准,并对配准后的图像作中值位图进行二次配准。根据拟合出的各相机的光 照响应曲线,进而将二次配准后的不同曝光的图像合成为一幅高动态范围图像。实验表明,该方法可以有效地 在动态光照下合成高动态范围图像,取得了不错的效果。

关键词:相机阵列;图像配准;高动态范围图像;动态光照;光场合成孔径
中图分类号: TP391.41
文献标志码: A
文章编号: 1001-3695(2013)09-2858-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.076

# Camera array-based HDR image synthesis method

ZHOU Ji-quan, WANG Qing

(School of Computer Science & Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China)

**Abstract**: For traditional high dynamic range (HDR) image synthesis method could not adapt to the dynamic illumination, the paper proposed a camera array-based different exposure images alignment and HDR image synthesis method. Firstly it captured different exposure images with the camera array whose calibration parameters had been calculated out, according to light field synthetic aperture photography theory, aligned different exposure images, and then did a second alignment to aligned images with the median threshold bitmap (MTB). According to different cameras' response curves fitted, it generated a HDR image with different exposure images second aligned. The experiments show that the proposed method can effectively synthesize HDR images in the dynamic illumination conditions, and achieves good results.

Key words: camera array; image alignment; HDR image; dynamic illumination; light field synthetic aperture

# 0 引言

真实的自然场景光照亮度跨越近10个数量级的范围。传统摄像机只能记录有限的亮度范围,由此带来的亮部或暗部细节的丢失降低了图像质量。高动态范围(HDR)技术扩大了图像的动态范围,解决了低动态范围图像不能表现自然场景中丰富的亮度和细节的问题,广泛应用于图像处理,基于图像的绘制、建模和光照,光照摄影学、光场渲染以及虚拟现实等领域<sup>[1-3]</sup>。高动态范围图像正是基于能够提升图像中场景的亮度范围和记录更多的细节信息这个优点极大地增强了场景的真实感,使得观察者既能感受到高光区域里强烈的光照,又能分辨出黑暗中物体的细节轮廓。

在摄像应用较多的场合,对于存在高对比度动态光照的情况,为了获得相对较好的效果,需要在曝光度上进行权衡。对 亮部和暗部的统一曝光会使得视频丢失较多的细节信息,而高 动态范围视频的使用能很好地解决这个问题。借助高动态范 围视频摄像功能,视频监控摄像头的放置就不再受到限制,包 括变化比较剧烈的高对比度光照环境。但是传统的 HDR 技术 要求场景是静态的、光照也是静态的,连续拍摄多幅不同曝光 图像合成,不能适用于动态光照场景。为了解决这个问题,本 文提出了基于相机阵列的 HDR 图像合成方法。

#### 1 相关研究

目前静态光照场景下的高动态范围图像的合成技术相对 成熟<sup>[4]</sup>,已经有相关的软件和数码设备使用了该项技术,比如 苹果手机中就集成了高动态范围图像拍摄功能。主要过程为 对同一场景以不同的曝光度拍摄多幅图片,对这些图片进行降 噪、对齐、消除重影等步骤生成一张光谱图(数字底片),利用 该底片通过色调映射<sup>[5]</sup>即可冲印出一幅反映丰富细节和生动 色彩的 HDR 图像。传统的 HDR 图像合成技术是通过对不同 时刻不同曝光的图像求取光线响应函数获得场景点的真实照 度来合成 HDR 图像,不仅要求场景是静态的,而且在图像采集 方面耗时较多。

在动态光照场景下,传统的 HDR 合成技术需要改进。目前已有的主要思路有:a)用一台相机强曝光和弱曝光交替拍摄,相邻的帧之间做运动补偿,用补偿后的强曝光图像和弱曝 光图像合成 HDR 图像<sup>[6]</sup>,或者是用滚动快门来控制曝光量的 变化<sup>[7]</sup>,这类方法的缺点是不同曝光图像是在不同时刻拍摄, 需要做运动补偿;b)采用高动态范围的相机传感器,在每个传 感器像素上放置不同光照吸收量的滤镜来控制曝光量的变 化<sup>[8]</sup>,或者设计对光照有独特响应函数的相机传感器<sup>[9]</sup>,这类 方法的主要问题是需要设计新的相机传感器,因此此类传感器

**收稿日期:** 2012-11-24; 修回日期: 2013-01-18 基金项目: 国家"863"计划资助项目(2012AA011803)

作者简介:周继权(1988-),男,安徽定远人,硕士,主要研究方向为计算机视觉(jiquan51@163.com);王庆(1969-),男,教授,博导,主要研究方 向为图像处理、计算机视觉和模式识别. 的价格较高,目前应用得不多;c)采用分光技术将同一束光一 分为三,包括镜头后面加分光镜将同一束光三等分,每一束通 过不同密度的中性滤镜到达相应的相机传感器,以同时获取不 同曝光的图像<sup>[10]</sup>,或者镜头后面加两个分光片,通过光路设计 使得同一束光被分成强度不等的三束光,以同时获得不同曝光 的图像<sup>[11]</sup>,然后求取光线响应函数,合成 HDR 图像,进而生成 HDR 视频。该类方法的缺点是需要设计分光系统,对于光路 设计有较高的要求,而且加入中性滤镜使得进入相机的光线利 用率不高。

在本文中,为了适应动态光照,本文提出了一种基于相机 阵列的 HDR 合成方法。在该方法中,对相机阵列的不同相机 设置不同的曝光,同时捕获场景光照,并把这些不同曝光的图 像基于光场合成孔径理论校准到同一个平面,再经中值位图校 准合成 HDR 图像。

# 2 基于相机阵列的 HDR 图像合成

本文以实现基于相机阵列的 HDR 图像合成为目标,采用的流程如图 1 所示。



#### 2.1 相机阵列以及标定参数

本文采用2×2的相机阵列(图2),四个相机紧密排列在 同一平面上,并固定于支架之上。每台相机的分辨率是752× 576 像素,获取的图像拥有交叠区域,对该交叠区域进行 HDR 合成。为了减小视差的影响,尽可能地将相机紧密排列,但仍 然无法忽略视差的影响。对这四台相机设置不同的曝光,获取 了如图3所示的四幅不同曝光图像。



#### 图3 获取的四幅不同曝光图像

首先需要对相机进行标定,获取各相机的内外参数。相机 的内参和外参通过常规的张正友平面标定法获取<sup>[12]</sup>。将标定 板放在四台相机同时可以观察到的地方进行标定,可以获取统 一坐标系下表征各相机方向和位置的外参,为后续基于光场合 成孔径理论的图像校准提供参数。

## 2.2 基于光场合成孔径理论的图像校准技术

不考虑光照的变化,可以通过寻找图像间的特征点,根据 特征点匹配求取不同图像之间的映射关系,但是由于对不同相 机设置了不同曝光,获取的图像之间直接求取特征点匹配变得 很困难。为了解决这个问题,本文绕开特征点匹配,基于光场 合成孔径理论将不同曝光图像校准到同一个平面。

众所周知,摄像机阵列是记录光场信息重要的工具之一, 美国学者 Levoy<sup>[13]</sup>首先提出了将光场中多视角的图像叠加求 均来模拟一个合成孔径成像的原理。传统的合成孔径成像是 根据设定的聚焦平面将从不同角度获取的光场场景图像投影 到一个图像平面上,使得人们能够透过场景中的遮挡物看到被 遮挡的物体。本文在场景深度变化不大的条件下,并不关注遮 挡问题,而在此基础上对场景中的参考平面聚焦,将不同曝光 图像校准到同一个平面。在摄像机阵列中,选取一个摄像机的 坐标系为参考坐标系,其他摄像机的外参为相对于参考摄像机 的参数。设参考摄像机的内参数矩阵为 C,非参考摄像机的内 参数矩阵为C。取空间中的一点P,它在两个摄像机坐标系中 的坐标分别为 $Q = (X, Y, Z)^{T}, Q^{f} = (X^{f}, Y^{f}, Z^{f})^{T}, 点 P$ 在两个图 像中像的坐标(用齐次坐标表示)为 $q = (x, y, 1)^{T}, q^{f} = (x^{f}, y^{f}, y^{f})$ 1)<sup>T</sup>,设参考摄像机和摄像机 f 之间的相对旋转矩阵为  $\mathbf{R}^{f}$ ,参 考摄像机的中心在摄像机 f 坐标系中的坐标为  $t^{\prime}$ ,设  $\pi$  为空间 中一平面,n为参考摄像机坐标系下 $\pi$ 的法向量,其中 $n = \frac{m}{d}$ 

m为  $\pi$  的单位法向量,  $d_{\pi}$  为参考摄像机原点到平面  $\pi$  的距离,则对于平面  $\pi$  中的所有点,以下公式成立<sup>[14]</sup>

$$q^{f} \cong \mathbf{C}^{f} Q^{f} = \mathbf{C}^{f} (\mathbf{R}^{f} + t^{f} n^{\mathrm{T}}) Q =$$
$$\mathbf{C}^{f} (\mathbf{R}^{f} + t^{f} n^{\mathrm{T}}) \mathbf{C}^{-1} q \qquad (1)$$

Ŷ

 $H^{f} = \boldsymbol{C}^{f} (\boldsymbol{R}^{f} + t^{f} \boldsymbol{n}^{\mathrm{T}}) \boldsymbol{C}^{-1}$ (2)

则 H<sup>f</sup>即为由平面 π 诱导的两图像之间的单应矩阵。由此可 以得出,场景中一个平面上的点在一个摄像机图像中的点经过 单应矩阵变换可以与参考图像中的点相重合。由上面的原理 可以对场景中的参考平面聚焦,场景深度变化不大时,场景中 各点求取的单应变化不大。这样就将相机阵列的不同相机拍 摄的图像经过投影变换校准到了同一个平面。

由上面的分析可以看出,只要已知场景深度信息,就可以 结合相机参数把各相机校准到同一个平面。这样就获得了各 相机配准后的图像。

#### 2.3 基于中值位图进行二次配准

从2.2节可知,合成的场景必须在同一个深度平面才能保 证合成的效果最佳,深度变化越大合成的图像效果越差。但实 际情况中很难保证场景在同一个深度平面上,所幸的是,场景的 深度变化不大时,用2.2节所述的校准方法校准后图像间的校 准位移误差不大。基于此,笔者考虑用中值位图的思想<sup>[15]</sup>计算 不同校准图像间的平移误差,进行二次配准。对于固定场景中 的任意一点,因为比它亮的和比它暗的点的个数是一定的,所以 对于不同曝光的两幅图像中的任意一个对应像素,比它亮的与 比它暗的像素个数之比是一定的。因此,如果图像是灰度的(彩 色图像可以先转换成灰度图像),可以统计其直方图,并根据像 素值的大小将所有像素分成个数相等或近似相等的两部分,其 分界线为中值 *M*,将图像二值化,设<sup>[15]</sup>:

$$V_1 = \begin{cases} 0 & V < M \\ 1 & V \ge M \end{cases}$$
(3)

基于这一思想,本文求取了四幅图像的中值位图。同时为 了减小计算量,提高运算速度,利用多尺度思想,将四幅二值图 像分别做成图像金字塔序列,从末级图像对开始比较获取最佳 配准位置,返回此级的偏移量(x,y),并在上一级图像对偏移 量(2x ±1,2y ±1)范围内搜索最佳配准位置,直到返回顶级的 原图像,求取最终偏移量,获取各图像相对于参考图像的平移 量<sup>[16]</sup>,也就获得了各图像相对于参考图像的配准图像。

#### 2.4 校准图像的 HDR 合成

由于各相机的响应函数不同,不能用一个响应函数统一, 所以在合成 HDR 图像前,首先需要求取各相机的响应函数。 本文分别用四台相机拍摄了多幅不同曝光的图像,各相机分别 用 Debevec 的最小二乘拟合法求取相机响应函数<sup>[1]</sup>。获得各 相机响应函数后,利用各相机配准后的图像求取各图像点对应 于场景中点的亮度值,并加权平均求取最后的 HDR 图像。计 算公式如下:

$$\ln E_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{P} w(Z_{ij}) (g_{j}(Z_{ij}) - \ln \Delta t_{j})}{\sum_{j=1}^{P} w(Z_{ij})}$$
(4)

其中: $E_i$ 代表图像中i点的亮度值; $Z_{ij}$ 代表第j幅图像中i点的 像素值;w代表权重函数(使得中间像素值权重较大,欠曝光和 过曝光像素值权重较小即可,可用文献[1]中的简单 hat 函 数); $g_j$ 代表第j个相机的光照响应函数; $\Delta t_j$ 代表第j幅图像的 曝光时间;P代表相机个数(这里P=4)。

#### 2.5 HDR 视频的可视化技术

获得的 HDR 图像是一幅辐照度图像,采用 RGBE 格式保存,必须经过色调映射<sup>[5]</sup>才能在计算机屏幕上显示。常用的 色调映射方法较多<sup>[17-19]</sup>,这里采用了 Reinhard 在文献[19]中 提出的色调映射方法对 HDR 图像进行色调映射。同时为了验 证本文方法的有效性,本文设计了一个有人运动、光照动态变 化的场景,并固定相机阵列对这样的场景进行了连续拍摄,用 获取的图像合成 HDR 图像,并经过色调映射生成 HDR 视频。

# 3 实验结果

采用本文方法进行了四台相机的图像配准、光照响应函数 曲线的拟合以及 HDR 图像的合成与显示获得了最终的 HDR 图像并生成了 HDR 视频。图 3 所示为用四台相机拍摄的同一 场景的四幅不同曝光的图像,曝光时间依次为 0.01 s,0.02 s, 0.04 s 和 0.08 s。可以看出,未配准的图像之间视差较大,无 法直接用于合成 HDR 图像。图 4 所示为经过基于光场合成孔 径理论的图像配准获取的四幅配准后的图像(图像经过裁剪, 仅保留了各相机获取图像的公共区域)。已知场景深度约为 3 m,选取的参考平面深度为 3 m。从图中可以观察到各图像已 经基本校准到同一个图像平面上。图 5 所示为拟合得到的各 相机的光照响应曲线(限于篇幅,此处仅绘制了 RGB 三通道的 R 通道),采样点数为 200 个/幅 × 8 幅。图中横坐标是像素值 Z,纵坐标是曝光量 X 的自然对数。



#### 图4 基于光场合成孔径理论配准获取的图像

图 6(a) 所示为用基于光场合成孔径理论的配准图像合成 的 HDR 图像。结果显示,合成的 HDR 图像包含了原始四幅图 像中强光区和弱光区的光照信息。但是在图像右下角纸箱部 分合成效果不太好,重影现象较严重(如图 6(c) 所示)。图 6 (b) 所示为用中值位图作平移配准,并用平移配准后的图像合 成的 HDR 图像。可以看出经过平移配准,图像右下角纸箱部 分的重影现象得到了不少改进(如图6(d)所示)。



(a) 一次配准结果 (b) 二次配准结果 (c) 图(a)局部放大图(d) 图(b)局部放大图 图6 合成的HDR图像

将相机阵列连续拍摄的图像都用本文方法合成了 HDR 图像,并用这些 HDR 图像生成了反映场景中人物运动和光照动态变化的 HDR 视频。图 7 给出了 HDR 视频中的 6 帧,其中从 图 7(c)开始加入了强光照射。从合成的 HDR 视频可以看出, 无论在弱光下还是加入强光照射,本文方法可以捕获动态场景和动态光照的 HDR 信息。



## 4 结束语

为了适应光照的动态变化,本文提出了一种基于相机阵列 的 HDR 图像合成方法。在该方法中,对相机阵列的不同相机 设置不同的曝光,同时捕获场景光照,并对这些不同曝光图像 进行了对场景参考平面聚焦的一次配准和根据中值位图的二 次配准。为了降低误差和噪声的影响,根据拟合出的各相机的 响应函数,利用配准图像计算出场景中每一点的亮度,合成场 景的 HDR 图像。实验结果表明,本文方法适应高对比度动态 光照环境,合成的 HDR 图像可以有效地表达亮区和暗区的光 照信息。但由于根据中值位图的二次配准是一种全局配准方 法,对于视频中运动局部(人物)的处理结果有待进一步提高。 下一步工作将着重解决局部配准问题。

#### 参考文献:

- [1] DEBEVEC P, MALIK J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]//Proc of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, 1997:369-378.
- [2] DEBEVEC P. Image-based lighting[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,2002,22(2):26-34. (下转第 2864 页)

• 2864 •

取得稳定的特征点,进而用一种好的匹配策略是图像特征点匹 配的关键。

#### 4 结束语

由于 Harris 算子在图像中的稳定表现,本文在提取 SIFT 不变特征的基础上,利用 Harris 阈值准则对所提取到的不变特 征进行选择,剔除了纹理丰富的图像中大量可区分性较差的特 征点,从而得到了相对稳定和可区分性较好的特征点,为后面 的图像匹配奠定了基础。相比传统 BBF 和 RANSAC 算法,用 GTM 算法结合本文改进的 SIFT 特征,具有更高的匹配精度, 匹配效果较好。

# 参考文献:

- [1] TIAN Hao, LI Guo-hui, JIA Li, et al. Local descriptor for object recognition in high resolution remote sensing images [C]//Proc of International Conference on Energy Systems and Electrical Power. Singapore: Procedia, 2011;683-691.
- [2] MISRA I, MOORTHI S M, DHAR D, et al. An automatic satellite image registration technique based on Harris corner detection and random sample consensus outlier rejection model [C]//Proc of the 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology. 2012:68-73.
- [3] ZHANG Ji-xian, LI Guo-sheng, ZENG Yu. High precision method for multi-source remote sensing image automatic registration [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(1):73-75.
- [4] 丁文益,王平,黄庆,等.一种适应仿射变换的全自动景象匹配算 法[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2010,24(3):71-75.
- [5] 孙浩,王程,王润生.局部不变特征综述[J].中国图象图形学报, 2011,16(2):141-151.
- [6] LOWE D G . Object recognition from local scale invariant features

- [3] UNGER J. Incident light field [D]. Norrköping: Linköping University, 2009.
- [4] GROSSBERG M, NAYAR S. Determining the camera response from images: what is knowable[J]. IEEE Trans of Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 21 (11):1455-1467.
- [5] LI Xiao-guang, LAM K, SHEN Lan-sun. An adaptive algorithm for the display of high-dynamic range images [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007, 18(5): 397-405.
- [6] KANG S, UYTTENDAELE M, WINDER S. High dynamic range video[J]. ACM Trans on Graphics, 2003, 22(3):319-325.
- [7] KRYMSKI A. High dynamic range imager with a rolling shutter: United States, 7397509[P]. 2008-07-08.
- [8] NAYAR S, MITSUNAGA T. Apparatus and method for high dynamic range imaging using spatially varying exposures: United States, 6864916[P]. 2005-03-08.
- [9] NAYAR S, BRANZOI V. Adaptive dynamic range imaging: optical control of pixel exposures over space and time [C]//Proc of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2003:1168-1175.
- [10] AGGARWAL M, AHUJA N. Split aperture imaging for high dynamic range[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 58 (1):7-17.

[C]//Proc of the 7th International Conference on Computer Vision. New York: ACM Press, 1999:1150-1157.

- [7] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints
   [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60 (2):91-110.
- [8] 焦斌亮,樊曼曼.基于改进 SIFT 算法的多源遥感影像配准研究
   [J].激光与红外,2011,12(41):1383-1386.
- [9] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 37 (2):151-172.
- [10] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]//Proc of the 4th Alvey Vision Conference. New York: ACM Press, 1988:147-151.
- [11] RATTARANGSI A, CHIN R T. Scale-based detection of corners of planar curves[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1992,14(4):430-449.
- [12] 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.
- [13] LIU Zhao-xia, AN Ju-bai, JING Yu. A simple and robust feature point matching algorithm based on restricted spatial order constraints for aerial image registration [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing,2012,50(2):514-527.
- [14] AGUILAR W, FRAUEL Y, ESCOLANO F, et al. A robust graph transformation matching for non-rigid registration [J]. Image and Vision Computing, 2009, 27(7):897-910.
- [15] 国家测绘局. http://www.sbsm.gov. cn/article/mtbd/201008/ 20100800071205. shtml[EB/OL].
- [11] TOCCI M D, KISER C, TOCCI N, et al. A versatile HDR video production system[J]. ACM Trans on Graphics, 2011, 30(4):41.
- [12] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration
   [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(11):1330-1334.
- [13] LEVOY M. Light fields and computational imaging[J]. IEEE Computer, 2006, 39(8):46-55.
- [14] ZELNIK-MANOR L, IRANI M. Multi-view subspace constraints on homographies [C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]; IEEE Press, 1999;710-715.
- [15] 华顺刚,王丽丹,殴宗瑛. 同一场景不同曝光图像的配准及 HDR 图像合成[J]. 计算机辅助设计与图像学学报,2007,19(4):528-534.
- [16] 李将云.基于形心的二值图像多尺度表示方法[J].浙江大学学报:理学版,2003,30(3):631-633.
- [17] DRAGO F, MYSZKOWSKI K, ANNEN T, et al. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3):419-426.
- [18] DUAN J, BRESSAN M, DANCE C, et al. Tone-mapping high dynamic range images by novel histogram adjustment[J]. Pattern Recognition,2010,43(5):1847-1862.
- [19] REINHARD E, STARK M, SHIRLEY P, et al. Photographic tone reproduction for digital images [J]. ACM Trans on Graphics (TOG),2002,21(3):267-276.

<sup>(</sup>上接第2860页)