

基于多次曝光的大动态范围图像获取方法

黄思婕^{1,2} 廖星星¹

(¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
²中国科学院上海技术物理研究所航天遥感信息获取重点实验室, 上海 200083)

摘要 提出采用普通的成像系统,进行 6 次不同积分时间曝光获取图像,通过对成像过程进行分析,建立“灰度值-辐射亮度”模型,得到每幅图像各像素点的灰度值随积分时间变化的关系,重建出大动态范围场景各点辐射照度比例关系,最终根据场景辐射亮度将 6 幅 8 bit 图像融合成一幅 10 bit 图像。该方法最终合成的图像包含了场景所有细节信息,增强了图像灵敏度,并对高亮目标背景下的暗目标探测有明显效果。

关键词 动态范围; 图像获取; 多次曝光; 对比度

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s109007

A High Dynamic Range Image Acquisition Method Based on the Multi-Exposure Imaging

Huang Sijie^{1,2} Liao Xingxing²

(¹Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
²Sciences Key Laboratory of Space Remote Sensing, Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy, Shanghai 200083, China)

Abstract An image acquisition method with 6 times exposure using a common imaging system is presented. A “gray value-radiance” model has been built through the imaging process analysis, and the image gray value of each pixel changing in the relationship with the integration time has been acquired, ending with a infused 10 bits image with all the 6 multiple exposure image sequences. Using this method, an image with all the details of the scene is synthesized, enhancing the image sensitivity, and exhibiting a demonstrable effect in the dark target detection with the highlighted surroundings.

Key words dynamic range; image acquisition; multiple exposure; contrast

OCIS codes 110.2960; 110.2990; 110.4155

1 引言

动态范围, 定义为一个物理量最大值与最小值的比值, 而一个具体的图像获取系统的动态范围则是其光学系统入瞳处接收到的最大辐射亮度与噪声等效辐射亮度的比值^[1]。

数字相机通常只能记录有限的图像亮度、对比度的信息, 然而目前无论在自然界, 还是航天、医学、夜视等特殊领域, 目标场景的辐射亮度动态范围很大, 特别是对于那些场景中既有明亮区, 又有阴暗区的情况, 比如航天遥感中太阳直射到太阳阴影区域的过渡^[2]。受成像系统动态范围制约, 单次采集无

法获取大动态范围场景的全部信息。随着夜视、航天、医学等领域对图像获取动态范围的要求越来越高, 采用普通的成像设备无法单次获取大动态范围场景的全部信息。通过采用多次曝光方法, 可以在一定程度上增大系统可探测目标的动态范围。但在已提出的多次曝光方法中^[3-5], 由于受到显示设备的限制, 大动态范围的场景基本都被映射到 8 bit 图像中, 虽然增加了场景暗部和亮部的信息, 但是牺牲了中间亮度的对比度。为此, 本文提出了一种基于多次曝光的大动态范围图像获取方法。采用普通成像设备在不同积分时间连续获取低动态范围的图像

收稿日期: 2013-10-03; **收到修改稿日期**: 2013-11-10

基金项目: 中国科学院创新项目基金(O9KBD013G0)

作者简介: 黄思婕(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事遥感信息获取及图像处理相关方面的研究。

E-mail: huangsjie111@126.com

序列,建立辐照度-像素值模型,将不同序列图像进行像素值-积分时间关系拟合,通过图像数据分析重建大动态范围场景辐照亮度关系,最终合成一副大动态范围图像。

2 大动态范围图像获取一般方法

大动态范围图像获取一般方法分为以下几种:

1)采用光强控制技术或多传感器技术;例如 Indigo Operations 前视红外系统在探测器中加入了一种可连续快速转动的滤光片轮,每个滤光片对应的光透过率不一样,探测器成像过程中滤光轮快速转动,使得进入探测器的光强发生变化,从而提高整个系统的动态范围^[6]。Ikeda^[7]采用的多传感器技术的工作原理是,将入射光通过光学分束器分成多束,分别被多个传感器接收,然后通过特定的方法对获得的图像进行校正及融合,该方法在图像获取速度上有了大量的提升,但对器件成本提出了更高的要求;

2)采用对数响应传感器技术;Scheffer 等^[8]采用二极管连结的 MOS 晶体管,入射光照射后产生的光电流与电压呈对数关系,场景辐射亮度随积分时间变化的响应曲线成对数形。通过这种传感器可以获得非常宽的场动态范围(通常大于 100 dB),但是存在对比度小、信噪比低,图像质量较差的缺点;

3)采用低动态范围设备进行多次曝光以扩大动态范围;Debevec 等^[3]提出辐照度重建法,找出不同积分时间下多幅图像像素值与辐照度随积分时间变化的关系,通过色调映射(TM)算法,将大动态范围的数据进行压缩,得到适应于低动态范围显示设备的图像数据,文献^[4]提出对一副图像连续采集两次,最终达到提高整体信噪比,增加暗部信号对比度的效果。这两种方法在一定程度上增大了获取图像辐亮度的动态范围,但这两种方法经过图像压缩,最

终得到的图像像素范围仍然在 0~255 之间,图像在压缩过程中牺牲了图像细节和灵敏度。Mitsunaga 等^[9]提出采用多次曝光方法,将不同积分时间的灰度值-辐射亮度曲线直接拼接,如图 1 和图 2 所示(图中横坐标 I 为场景辐射亮度,纵坐标 E 为图像灰度值),最终融合成一幅大于 8 bit 图像。该方法简单方便,但是融合后的图像在不同积分时间对应的图像灵敏度不同,在一定程度上会导致图像失真。

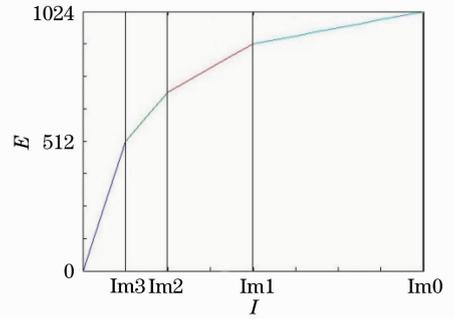


图 2 理想相机不同曝光响应曲线直接拼接
Fig. 2 Response curve fused in different exposures with an ideal camera

3 多次曝光大动态范围图像获取

3.1 数字图像获取流程

图 3 为一般图像获取流程,目标场景辐射亮度通过光学镜头汇聚到探测器表面,经探测器接收将光信号转换为电信号,通过模数转换器(AD)进行量化处理,最后生成数字图像进行显示及存储。

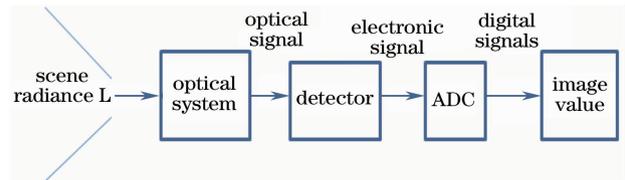


图 3 数字图像获取系统框图

Fig. 3 Digital camera imaging system frame

从场景辐射亮度到最终得到的图像灰度值之间的映射包括光学部分和电子学成像部分。一般来说从光学系统的入瞳处到达探测器表面的函数映射关系是呈线性的,但探测器光电子经电子学成像系统,转化为灰度值的过程中会产生噪声,使得该相机响应函数并非完全呈线性关系。一般来说,数字相机有三个主要的噪声源,即光子散粒噪声,暗电流噪声和读出噪声^[5]。由于面阵探测器像元响应具有空间非均匀性,因此还需考虑光子响应非均匀性噪声^[10]。根据文献^[11],可以建立信息获取噪声模型,得到入射光子量与输出图像灰度值的响应关系。

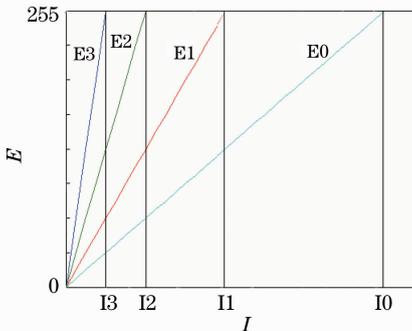


图 1 理想相机不同曝光辐射亮度与像素值映射关系
Fig. 1 Different exposure radiances mapping into pixel values with an ideal camera

3.2 辐照亮度-像素值模型

令 A_{ij} 为单位时间传感器接收的电子个数, D_{ij} 为单位时间暗电流引入的噪声电子个数, k_{ij} 为面阵不同像元非均匀性引起的不同的响应率。当像元曝光时, 积分电容收集到的电子数 F_{ij} 满足如下公式:

$$\begin{aligned} F_{ij} &= T_{\text{int}}(k_{ij}A_{ij} + D_{ij}), & \text{unsaturation} \\ F_{ij} &= F_{\text{max}}, & \text{saturation} \end{aligned} \quad (1)$$

电子数经过采集系统转化为图像像素值有如下关系式:

$$E_{ij} = f(F_{ij}) = g \cdot T_{\text{int}}(k_{ij}A_{ij} + D_{ij}) + N_R, \quad (2)$$

式中 g 为固定增益时图像获取像素值对光生电荷量的比例因子, N_R 为读出噪声, 满足噪声分布 (u_R, σ_R^2) , 当增益因子 g , k_{ij} 和积分时间 T_{int} 已知时, 可以得到像素灰度值噪声为 $\sigma_{E_{ij}}^2 = g^2 \sigma_{F_{ij}}^2 + \sigma_R^2$ 其中 $\sigma_{F_{ij}}^2$ 为散粒噪声(包括信号光子散粒噪声和暗电流散粒噪声), σ_R^2 为读出噪声。

与此类似, 在无光照条件下, 采用相同积分时间, 相同增益, 若探测器不饱和, 则输出的灰度值及其噪声方差值可以写成:

$$B_{ij} = f(T_{\text{int}}D_{ij}) = g \cdot T_{\text{int}}D_{ij} + N_R, \quad (3)$$

$$\sigma_{B_{ij}}^2 = g^2 \sigma_{D_{ij}}^2 + \sigma_R^2, \quad (4)$$

式中 $\sigma_{D_{ij}}^2$ 只包含暗电流散粒噪声。

由(2)和(4)式可得, 在不同积分时间, 同样增益参数设置条件下, 对目标场景各像素点有光照和无光照像素灰度值作差, 扣除本底背景^[12]可以对积分时间拟合出一条线性曲线, 其斜率为 $k_{ij}A_{ij}$, 即不同像元响应率与该像元收集到光子数的乘积。通过标

准光源对系统各像元响应率进行统计, 最终得到各像元对应的场景辐亮度关系。

4 实验及结果分析

根据以上模型, 采用 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 面阵可见光图像获取系统进行实验验证。对该系统面阵各像元非均匀响应率 k_{ij} 已测, 如图 4 所示。采用以下步骤对大动态范围场景进行辐照亮度重建。

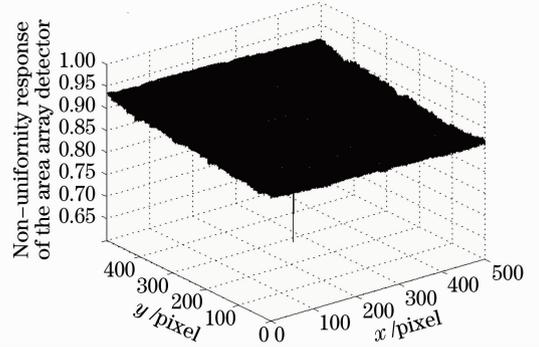


图 4 面阵探测器各像元响应率

Fig. 4 Plane array detectorresponsitivity of each pixel

1) 选取固定大动态范围场景。场景由夜间环境下一稳定强光束和一个微弱暗目标组成。

2) 固定面阵系统。分别对目标场景以及本底条件进行 6 次不同积分时间曝光, 曝光时间分别为 3.2、12.8、51.2、204.8、819.2、1228.8 ms(后面写作 $t_1 \sim t_6$)。获得的图像分别如图 5, 图 6 所示。

由图 6(a)~(f) 可以看到在积分时间很小时, 亮度较大的强光束目标细节清晰, 对比鲜明, 暗目标则

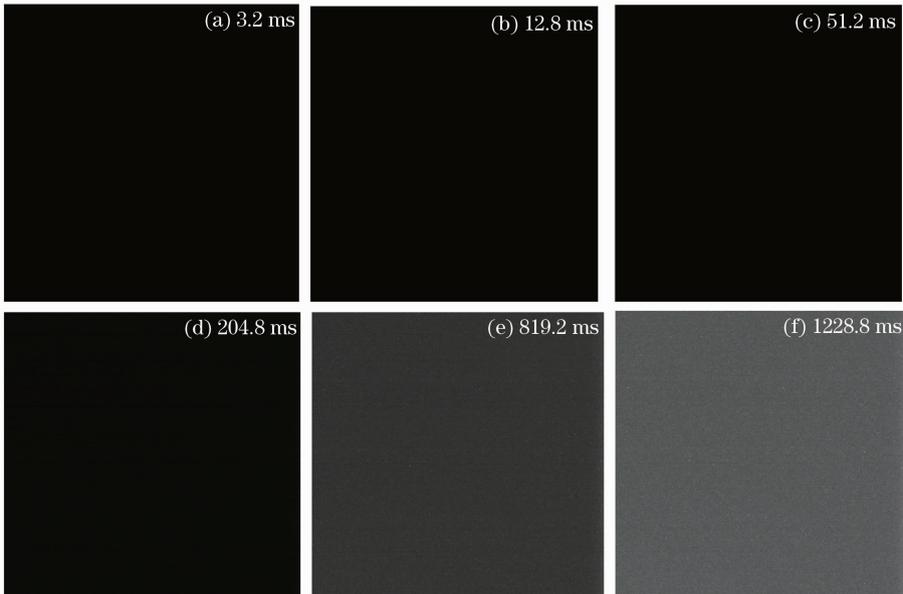


图 5 对系统本底噪声分别在积分时间成像

Fig. 5 Obtained background images of the same scene in the integration time respectively

被淹没在黑暗里,而随着积分时间的增大,强光束目标由于过曝未能体现其细节,但左下方的暗目标逐渐显现。但当积分时间增大至 t_5, t_6 ,系统本底噪声明显增大,噪声叠加在场景中使得图像信噪比很低。

3) 图像降噪预处理。将不同积分时间对场景成像与本底成像作差以消除暗区域场景的本底噪声,得到结果如图 7 所示,可以看出相比降噪前的图像,在暗区域图像质量有明显的提高,如图 8 所示。

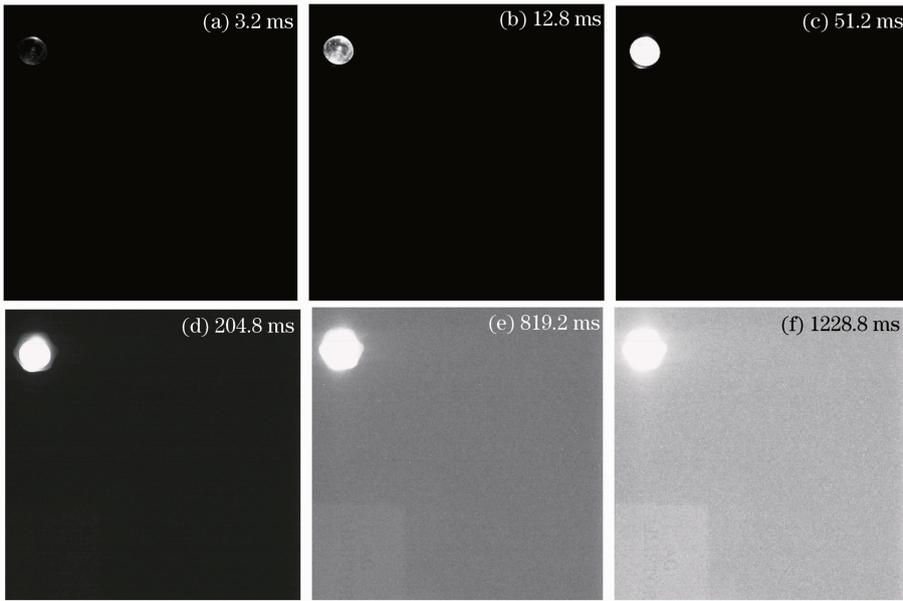


图 6 对同一场景分别在不同积分时间的成像

Fig. 6 Obtained images of the same scene in different integration times respectively

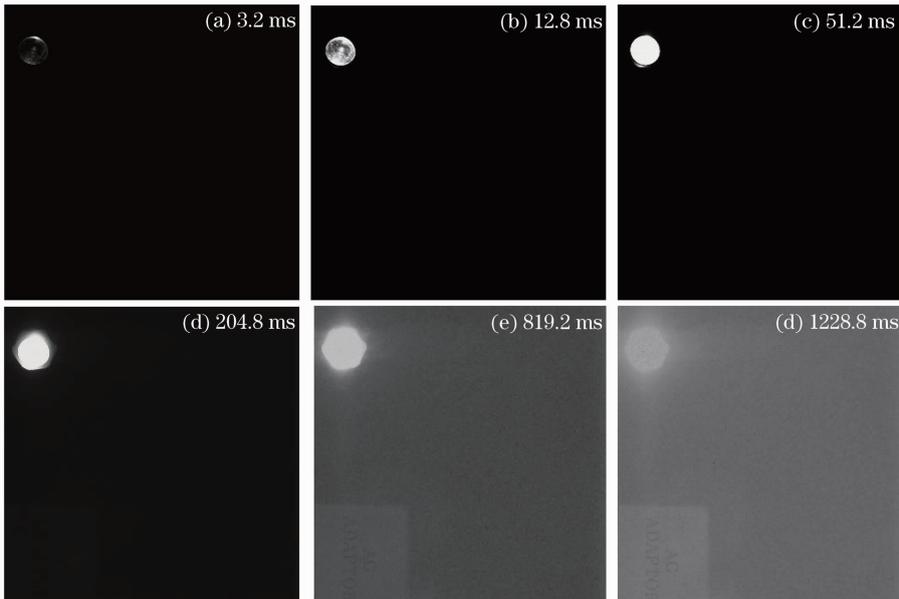


图 7 对同一场景分别在积分时间降噪后的图像结果

Fig. 7 Obtained images of the same scene after denoising in different integration time respectively

4) 场景辐射亮度重建。对每幅降噪后的获取图像 $M(i, j)$ 在不同像素点对像素值—积分时间变化关系进行分析,如图 9 所示。采用一定阈值去除其饱和像素值及曝光不足像素值,将中间像素值拟合成一条接近线性的曲线,结合上述辐照亮度—像素模型以及像元响应率,可以得到每个像素点拟合

曲线的斜率与响应率的商值,对应该像素的辐射亮度值。通过该方法最终对场景辐射亮度进行重建。拟合结果如图 10 所示,横坐标是重建图像的各像素点位置,按列从上到下依次排列,纵坐标为重建后的辐射亮度。最终得到多次曝光获得的辐照亮度范围为 1305。

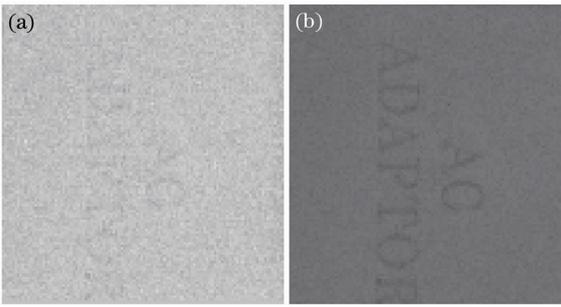


图8 降噪前后场景暗目标在积分时间 1228.8 ms 分别成像放大的结果。(a) 降噪前；(b) 降噪后

Fig. 8 Obtained dark object of the scene in the integration time 1228.8 ms. (a) Before denoising; (b) after denoising

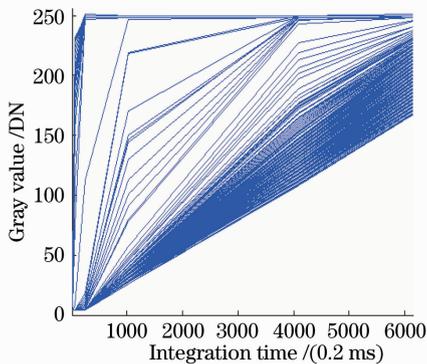


图9 降噪后场景像素值与积分时间的关系

Fig. 9 Effect of the integration time on the pixel value

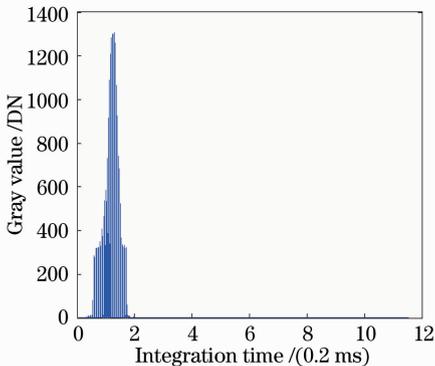


图10 场景对应各像点辐射亮度之间的关系

Fig. 10 Radiance of each image point corresponding to the scene

5 结 论

针对现有成像系统动态范围较小的缺点,提出了一种基于多次不同积分时间曝光的大动态图像获

取方法,通过分析每幅图像各像素点的灰度值随积分时间变化的关系,重建出大动态范围场景各点辐射照度比例关系,最终根据场景辐射亮度情况将 6 幅 8 bit 图像序列融合成一幅 10 bit 图像。实验结果表明,采用不用积分时间多次曝光可以获得大动态范围目标细节信息。采用不同积分时间采集图像虽然牺牲时间分辨率,但提高了对过亮和过暗目标的探测能力,未来还可运用于不同太阳反射率的空间遥感以及夜视微弱目标遥感探测中。

参 考 文 献

- Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 638-642.
周 望. 基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(3): 638-642.
- Zhang Lifang. Dynamic Range Enhancement by Multi-Exposed Images [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
张丽芳, 周 军. 利用多曝光对图像进行动态范围增强 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- P Debevec, J Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]. Proc of ACM SIGGRAPH, 2008, 31.
- Sijie Huang, Xueyi Gong. An image fusion algorithm based on double exposure enhancing dynamic range [C]. SPIE, 2013, 8878: 1-5.
- A O Akyuz, E Reinhard. Noise reduction in high dynamic range imaging [J]. J Visual Communication and Image Representation, 2007, 18(5): 366-376.
- Austin A R, Shariff D. A novel NIR camera with extended dynamic range [C]. SPIE, 2006, 6205: 1-13.
- E Ikeda. Image Data Processing Apparatus for Processing Combined Image Signals in Order to Extend Dynamic Range; U. S. Patent 5801773 [P]. [1998-09-01].
- D Scheffer, B Dierickx, G Meynants. Random addressable 2048×2048 active pixel image sensor [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1997, 44(10): 1716-1720.
- Mitsunaga T, Nayar S K. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures [C]. IEEE, 2000, 1: 472-479.
- Bai Xin, Niu Hanben, Yang Qinlao, *et al.*. Large dynamic range femtosecond soft X-ray streak image tube [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2683-2686.
柏 鑫, 牛憨笨, 杨勤劳, 等. 大动态范围软 X 射线飞秒变像管 [J]. 强激光与粒子, 2011, 23(10): 2683-2686.
- M Granados, B Ajdin, M Wand, *et al.*. Optimal HDR reconstruction with linear digital cameras [J]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2010, 215-222.
- Guan Youguang, Zhou Wenchao, Tian Xiaoqiang. Influence analysis of detector dynamic-range on laser beam quality β factor measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 070401.
关有光, 周文超, 田小强. 探测器动态范围对光束质量 β 因子测量的影响分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 070401.

栏目编辑: 李志兰