

一种基于多次曝光的大动态范围图像融合方法

黄思婕^{1,2} 陈凡胜^{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 多次曝光图像融合的目的是结合不同曝光的各个图像的互补信息, 组成一个新的图像以获得场景更为全面、准确、可靠的图像描述。目前常用的融合方法有辐照度重建法, 金字塔变换法, 小波变换法, HIS 假彩色法等。这些方法有效地增强了可探测的目标亮度范围, 但大都将大动态范围的场景信息映射到 8 bit 中, 虽然增加了目标场景欠曝和过曝区域的亮度信息, 但是牺牲了中间亮度的对比度。提出了一种多次曝光融合的方法, 采用指数积分时间对固定场景进行 4 次采样, 将获取的低动态范围图像序列乘以一个积分时间因子直接进行图像非饱和区域的匹配。然后, 以图像各点的对比度为权重因子, 对各幅图像高低端进行加权融合, 最终获得一幅细节丰富, 层次鲜明的 11 bit 图像。

关键词 图像处理; 动态范围; 多次曝光; 图像融合; 对比度

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s109009

A High Dynamic Range Fusion Method Based on Multi-Exposure Imaging

Huang Sijie¹ Chen Fansheng^{1,2} Liao Xingxing²

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

Abstract Multi-exposure image fusion aims to integrate complementary information of each exposure image to form a new image with the scene information more comprehensively, accurately and reliably. The main methods in image fusion are irradiance reconstruction method, pyramidal transform wavelet transform method, HIS feigned multicolor method and so on. These methods effectively enhance the detectable target brightness range, but among most of them, the large dynamic range of the scene information is mapped to 8 bit, which indeed increases the luminance information of the underexposed and overexposed scene areas, but at the expense of the contrast of the intermediate luminance. A multi-exposure fusion method is presented, using 4 exponential integral times in a fixed scene for image capture. The unsaturated zone is matched through multiplying the low dynamic range image sequence by a integration time factor images directly. All the images are fused with the contrast being the weighting factor, ultimately, a 11 bit image with rich details and distinct levels is captured.

Key words image processing; dynamic range; multiple exposures; image fusion; contrast

OCIS codes 100.3008; 100.2960; 110.2990; 110.3010; 110.4190

1 引言

目前在航空及遥感成像中, 目标场景的亮度范围变化非常大, 特别是对于场景中既有明亮区, 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^[1]。采用低动态范围的普通数码相机无法在一幅画面中展现所有的细节信息: 当采用短积分时间曝光, 会丢失目标场景暗区域的信息; 而当采用长积分时间曝光则会丢失场景亮区域信息。

收稿日期: 2013-10-07; **收到修改稿日期**: 2013-11-08

基金项目: 中科院创新项目基金(09KBD013G0)

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等方面的研究。

E-mail: huangsijie111@126.com

导师简介: 陈凡胜(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要从事航天遥感成像电路设计及图像等方面的研究。

E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

采用不同积分时间多次曝光并融合的方法可以结合弱光和强光区的所有图像,获得一幅保留了场景所有细节信息的高位深大动态范围图像^[2]。

对于成像系统而言,动态范围是指其光学镜头入瞳处接收最大辐射亮度与噪声等效辐射亮度的比值^[3]。而对一幅图像而言,动态范围是其能储存的色调或灰度级别范围,表现在图像位深上。由于受到图像显示设备的限制,许多前人研究的多次曝光融合算法结合多幅图像将大动态范围的场景信息映射到 8 bit。例如:Debevec 提出的辐照度重建法^[4]采用以下步骤进行多次曝光融合:

1) 对成像系统进行响应曲线拟合,即通过对多

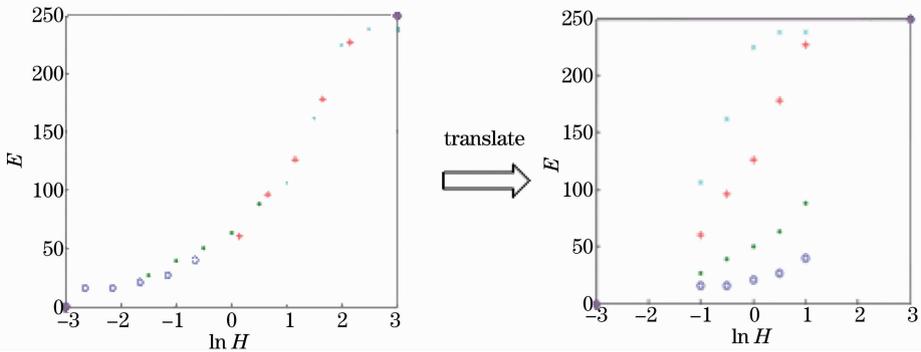


图 1 相机响应曲线拟合

Fig. 1 Camera response curve fitting

2) 对(1)式求反函数并取对数,得

$$F(E_{ij}) = \ln L_i + \ln T_j, \quad (2)$$

式中 F 为 f 的反函数的对数。采用最小二乘误差法求解目标函数 F ,使得

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [F(V_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 = 0, \quad (3)$$

最后根据拟合出的系统响应曲线,求解每个像素值对应的场景辐射照度,从而构建出一幅大动态范围图像。

Mertens 提出了基于拉普拉斯金字塔进行多曝光图像融合^[5]。

1) 对图像进行高斯金字塔分解,将原图像 A_0 作为高斯金字塔最底层,对 A_0 分别进行低通滤波和下采样,得到分辨率降低的近似图像 A_1 ,再将此图像进行上采样,与原图的差值即带通分量,在第二级,第三级采取同样的方法,依次类推,得到不同级数的带通分量和最后一级低通分量,图 2 为当 $N=3$ 时的拉普拉斯分解示意图。

2) 按照上述方法将多次曝光的所有图像进行高斯金字塔分解,通过拉普拉斯滤波器得到的响应系数生成图像的对比度,将此对比度作为场景各点的权重因子,对不同曝光量下的图像进行加权融合。

幅不同曝光时间获取的图像进行采样,拟合出场景各点处像素值 E 与场景曝光量 H 之间映射关系的曲线:

$$E(i, j) = \ln H(i, j), \quad (1)$$

式中 E_{ij} 表示所获取的第 j 幅图像中第 i 个位置的像素值, H_{ij} 表示其曝光量。由于在成像系统的线性区域,相机曝光量为场景辐射亮度和积分时间的乘积,因此成像系统输出的像素值 $E = f(L \cdot T)$ 。通过对 M 幅图像各取位置相同的 N 个采样点,作出不同积分时间对应的像素值—曝光量曲线。通过左右平移各曲线,将他们组成一条平滑的单调曲线,最终得到该系统的响应曲线,如图 1 所示;

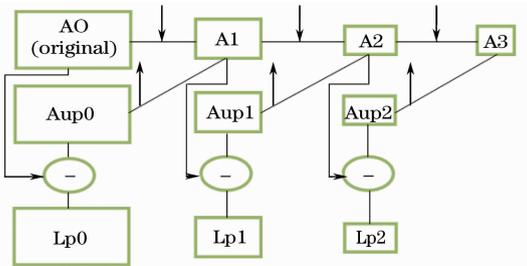


图 2 图像拉普拉斯分解

Fig. 2 Laplace decomposition of an image

3) 图像重构,采用拉普拉斯算子对加权融合后的带通分量进行锐化及上采样,最终得到重建后的图像,如图 3 所示。

此外还有加权融合法^[6],分块高斯融合法^[7]等,这些方法虽然在同一幅图像中获取了场景暗部和亮部的信息,但是将高动态范围场景辐射亮度压缩至低动态范围图像内,牺牲了中间亮度的对比度。提出了一种简单的融合算法,对多幅普通成像系统获取的图像进行合成,最终获得一幅包含场景所有信息的高位深大动态范围图像,该方法不需要恢复成像系统的响应曲线,也不需要进行多分辨率分解,而是以对比度为各像素点的权重因子,将多次不同曝光的图像进行

加权融合,最终合成 11 bit 的图像。

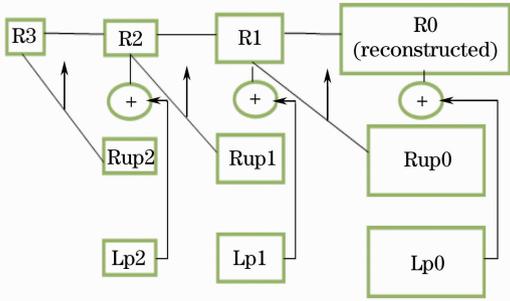


图 3 多分辨率图像重构

Fig. 3 Multi-resolution reconstruction of an image

2 多次曝光图像合成原理

2.1 系统多次曝光动态范围

信息获取系统可探测的最大辐射亮度由探测器本身的动态范围、曝光设置、AD 量化位数及系统产生的总的噪声决定^[8]。一般来说,成像系统的响应曲线如图 4 所示。

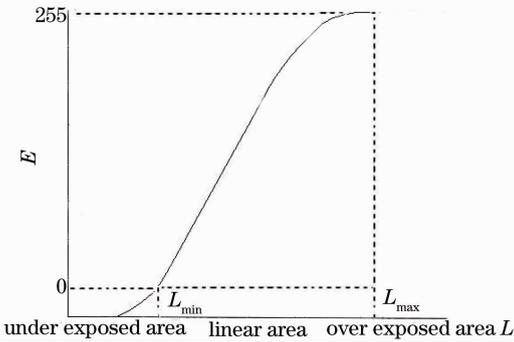


图 4 普通的 8 bit 成像系统响应曲线

Fig. 4 Response curve of a common 8 bit imaging system

其中横坐标为在一定曝光时间下探测器可探测的辐射亮度范围 $L_{\min} \sim L_{\max}$, 纵坐标为成像系统数字输出的像素值 $0 \sim 255$ 。目标区域辐射亮度小于

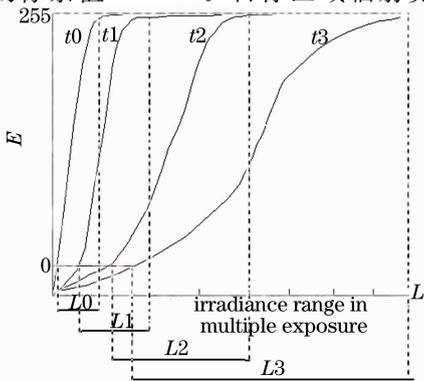


图 5 不同曝光时间可探测辐射亮度范围

Fig. 5 Irradiance range detectable in different exposure times

L_{\min} 的所有像素映射为 0, 称为欠曝区域, 大于 L_{\max} 的像素映射为 255, 称为过曝区域, 其中间为可探测线性区间, 通过多次不同积分时间曝光, 系统可以获得不同的可探测辐射亮度区间, 如图 5 所示。采用低曝光时间, 虽然低端欠曝, 但是可以获取高辐射亮度的有效信息, 采用高曝光时间, 虽然高端饱和, 但是可以获取低辐射亮度的有效信息。结合多次曝光获取的信息进行融合, 最终可以获得一幅保留场景所有细节信息的高位深图像。

2.2 大动态范围图像融合方法

以四次曝光为例, 积分时间成指数变化, 分别为 $t_0, 2t_0, 4t_0$ 和 $8t_0$, 在曝光的时间为 t_0 时, 普通 8 bit 成像系统的 256 个量化等级与整个目标场景辐射亮度范围匹配, 图像尚未达饱和, 在曝光时间为 $2t_0$ 时, 系统的 256 个量化等级与目标场景的一半的辐射亮度范围匹配, 图像部分达到饱和, 直到曝光时间为 $8t_0$ 时, 系统 256 个量化等级只与目标场景的 $1/8$ 光度范围匹配, 输出图像大部分饱和。因此, 本文提出的图像合成方法分为两个部分: 1) 是不同曝光获取的图像序列非饱和区域的匹配; 2) 是针对过曝和欠曝区域的加权融合。

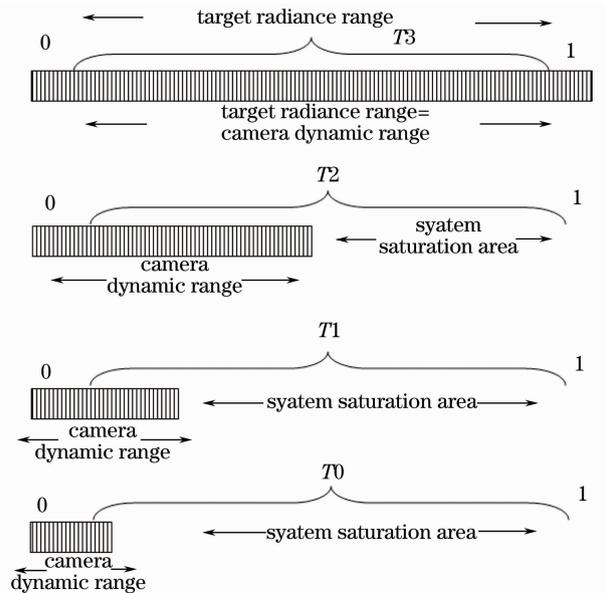


图 6 多次曝光系统动态范围与目标辐射亮度范围关系

Fig. 6 Relation between system dynamic range and target radiance range in multiple exposures

采用指数积分时间对目标场景采样, 由于在系统线性区间所得像素值与积分时间成正比, 因此可以将各幅图像乘以一个积分时间因子直接进行图像非饱和区域的匹配。然后, 采用一种加权融合算法, 将整幅图像高低端进行融合, 以获得细节丰富, 层次

鲜明的图像,由于在灰度图像中最能体现细节的特征即对比度,因此计算每幅图像中各点的对比度,对比度大的采用大的权重,进行加权融合。

3 实验及结果分析

根据以上分析,采用普通相机对固定大动态范围场景进行多次曝光成像。场景由太阳阴影区的黑色盒子和太阳直射的白色盒子组成,中间用一个薄隔板隔开。分别采用积分时间 T_0 、 $2T_0$ 、 $4T_0$ 、 $8T_0$ 对场景成像。结果如图 7 所示。

由于积分时间存在指数关系,因此对每一幅原

图数据进行求对数:

$$B(i,j) = \ln Z(i,j), \quad (4)$$

式中 $Z(i,j)$ 表示第 j 幅图像的第 i 个点的灰度值。 $B(i,j)$ 为对上述灰度值取对数的结果。在线性范围内灰度值与积分时间成正比关系,因此将上述不同积分时间图像通过对数分别与积分时间倍率相加从而进行辐射亮度匹配,结果为 $C(i,j)$,图 8 为 4 幅图像不同像素点分别对应的 C 值。

$$\begin{aligned} C_1 &= B_1 + \ln 8, & C_2 &= B_2 + \ln 4 \\ C_3 &= B_3 + \ln 2, & C_4 &= B_4 + \ln 1, \end{aligned} \quad (5)$$



图 7 (a)、(b)、(c)、(d) 分别对应积分时间为 T_0 、 $2T_0$ 、 $4T_0$ 、 $8T_0$ 时的图像序列

Fig. 7 (a), (b), (c), (d) Corresponding to image sequence with integral time T_0 , $2T_0$, $4T_0$, $8T_0$, respectively

图 8 可以表现场景的整体特征,每幅图的左边表现了太阳阴影区域的细节特征,右边表现了太阳直射区域的细节特征,图 8(a)在目标暗区域的对比度信息很少,但在目标亮区域各点细节变化较为明显,而随着积分时间增大,左边的暗目标层次逐渐显

现,如图 8(b)、(c)所示,但右边的亮目标区域由于开始出现饱和,对比度也随之减弱,当积分时间增大到 $8T_0$ 时,暗目标细节清晰地得以表现,而亮目标区域几乎全部饱和。

以对比度为权重因子将上述不同积分时间得到

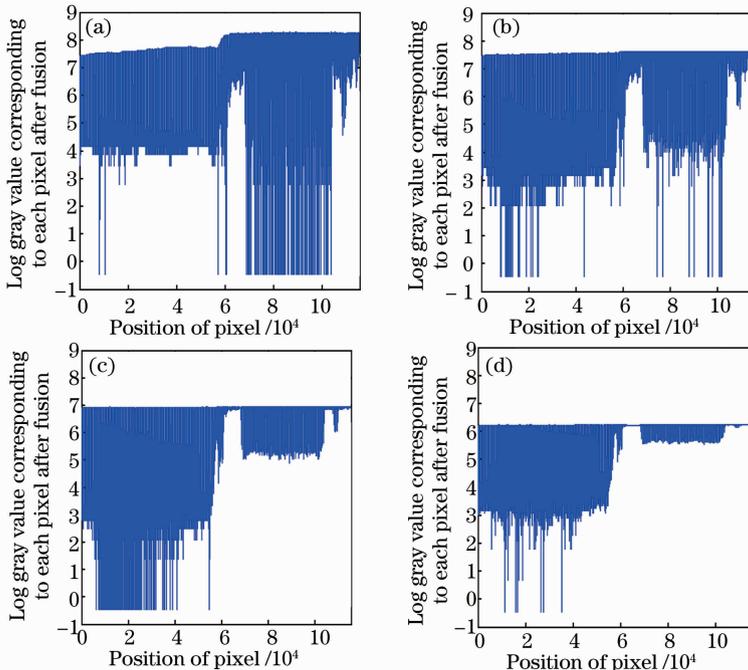


图 8 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为不同像素点在积分时间匹配后的对数灰度值

Fig. 8 (a), (b), (c), (d) Gray value corresponding to each pixel after matching with the integration time factor

的各像素点对应的对数灰度值进行加权融合。具体实现方法为：求取图像中的每个像素点与其 8 邻域

点的均方差,为该点与周围邻域的对比度 V_{cont} , 像素点的邻域示意图如图 9 所示。

$$V_{\text{cont}}(i, j) = \sqrt{\left| \left[2 \times A(i, j) - \sum_{n=-1}^1 A(i+n, j+n) \right] / 7 \right|}, \quad (6)$$

$A(i-1, j-1)$	$A(i-1, j)$	$A(i-1, j+1)$
$A(i, j-1)$	$A(i, j)$	$A(i, j+1)$
$A(i+1, j-1)$	$A(i+1, j)$	$A(i+1, j+1)$

图 9 像素邻域示意图

Fig. 9 Schematic diagram of pixel neighborhood

对图像中的特殊位置如四周的边和角则采用类似的 5 邻域、3 邻域求对比度,通过归一化权重计算各图像各点的权值,最后进行加权融合,融合后的对数像素值结果如图 10 所示。最后将对数结果进行指数还原,获得一幅 11 bit 的数据图像。对其在不

同深度进行显示的 4 幅图像,如图 11 所示。

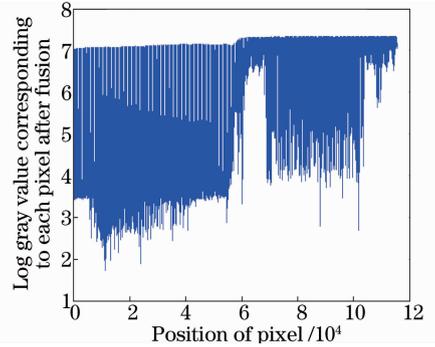


图 10 4 幅图融合后的对数像素值

Fig. 10 Logarithmic pixel values after fusion with 4 image sequenc



图 11 (a)、(b)、(c)、(d)分别为 11 bit 图像对应融合后在不同位深的成像

Fig. 11 (a)、(b)、(c)、(d) Corresponding to images in different bit depths after fusion

4 结论及展望

提出了一种多次曝光大动态范围图像融合方法,采用低动态范围(8 bit)成像设备进行 4 次曝光,结合不同积分时间的图像信息,最终融合成一幅 11 bit 图像,该方法克服了普通相机动态范围小的缺陷,有效地保留了大动态范围场景的全部信息,提高了整个信息获取系统的动态范围,未来可运用于多次曝光遥感数据融合中。

参 考 文 献

- Zhang Lifang. Dynamic Range Enhancement by Multi-Exposed Images[D]: Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. 张丽芳. 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.
- Zhu Ruihui, Wan Min, Fan Guobin. An image fuse method based on pyramid transformation [J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 178-200. 朱瑞辉, 万敏, 范国滨. 基于金字塔变换的图像融合方法[J].

- 计算机仿真, 2007, 24(12): 178-200.
- 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.
- Paul E Debevec, Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2008, 31: 369-378.
- T Mertens, J Kautz, F V Reeth. Exposure fusion: a simple and practical alternative to high dynamic range photography [C]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(1): 161-171.
- Lallier E, Farooq M. A real time pixel-level based image fusion via adaptive weight averaging [C]. Proceedings of International Conference on Information Fusion, 2000, (2): 3-13.
- Andras Rovid, Peter Varlaki. Method for merging multiple exposure color image data [C]. Proceedings of International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2009. 27-31.
- Bai Xin, Niu Hanben, Yang Qinlao, et al.. Large dynamic rang femtosecond soft X-ray streak image tube [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2683-2686. 柏鑫, 牛慈笨, 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.

栏目编辑: 李志兰