

基于二值化图像叠加的 CMOS 相机动态范围扩展方法

黄梅红^{1*}, 吴平辉², 苏子生², 杨惠山²

¹泉州师范学院交通与航海学院, 福建 泉州 362000;

²泉州师范学院物理与信息工程学院信息功能材料福建省高校重点实验室, 福建 泉州 362000

摘要 受动态范围的限制,传统的 CMOS 相机需要通过曝光时间控制和自动增益控制方式减小像素饱和与溢出的影响,以获得目标场景的清晰信息。若要同时获取目标场景的暗场和亮场图像,必须扩展 CMOS 图像传感器的动态范围。提出一种基于二值化图像叠加的 CMOS 相机动态范围扩展方法。该方法利用曝光时间按对数变化的一系列二值化图像进行叠加,拓宽了 CMOS 相机的图像探测动态范围,即使在亮度变化很大的环境下也能实现强信号和弱信号的同时探测,从而获得目标场景清晰的灰度图像。实验结果表明,与传统 CMOS 相机成像相比,二值化叠加 CMOS 相机的相对动态范围最高可拓宽 8 倍以上。通过图像亮度曲线对比,发现二值化叠加 CMOS 相机具有有效的对数响应输出。二值化叠加 CMOS 相机能有效减少图像亮处的饱和溢出和暗处细节信息的丢失,在高亮和背光处均能获得完整清晰、亮度均匀的图像。

关键词 传感器; CMOS 图像传感器; 对数响应; 图像叠加; 二值化; 动态范围

中图分类号 TN212.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2428010

Method for Enlarging Dynamic Range of CMOS Camera Based on Binary Image Superposition

Huang Meihong^{1*}, Wu Pinghui², Su Zisheng², Yang Huishan²

¹College of Transportation and Navigation, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China;

²Key Laboratory of Information Functional Material of Fujian Higher Education, College of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China

Abstract Due to the limitation of dynamic range, it needs to control the exposure time and automatic gain for traditional cameras to obtain clear information of the target scene through reducing the influences of pixel saturation and overflow. In order to obtain a clear image simultaneously including dark and bright field information, the dynamic range of the CMOS image sensor must be extended. In this paper, a dynamic range expanding method of CMOS cameras based on binary image superposition is proposed. By superposing a series of binary images with a logarithmic exposure time, the image detection dynamic range of the CMOS camera is improved. As a result, the camera can simultaneously detect strong and weak signals even in the environment with a large brightness variation, and obtain clear gray images of the target scenes. The experimental results show that the relative dynamic range of this binary superposition CMOS camera can be enlarged to more than 8 times that of the traditional counterpart. A comparison of image brightness curves shows that this camera has an effective logarithmic response output. This camera can also effectively reduce the saturation overflow in the bright part and the loss of details in the dark part of

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-05; 录用日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(11704223)、福建省教育厅课题(JAT190534)、福建省光传输与变换重点实验室开放课题(2014101)

通信作者: *28007929@qq.com

the image, and can obtain a complete clear and uniform image in both the highlighted and backlit parts.

Key words sensors; CMOS image sensor; logarithmic response; image superposition; binarization; dynamic range

OCIS codes 280.3420; 040.5160; 110.2970; 100.2980

1 引言

互补金属氧化物半导体 CMOS 有源传感器能直接输出数字信号,具有功耗低、分辨率高等特点,已广泛应用于摄像系统中^[1-4]。现有的 CMOS 图像传感器普遍采用光电二极管线性有源像素,其动态响应范围较小,远小于人眼 100 dB~120 dB 的动态范围^[5]。为此,需要对 CMOS 摄像系统的动态范围进行扩展,拍摄时对目标暗场提高感光度,对目标亮场降低感光度,从而提高目标图像的清晰度。

高动态范围成像^[6-8](HDR)是用来实现比普通数字图像技术更大曝光动态范围的一种技术,具有更大的亮度数据和图像细节显示范围。为了提高 CMOS 摄像系统的成像清晰度、增大成像动态范围,国内外已发展了多种解决方法,如基于 CMOS 图像传感器设计高速数字工业相机^[9],张淑芳等^[10]通过采用并行处理策略对 CMOS 图像传感器的像素矩阵进行压缩采样,提出基于 CMOS 图像传感器的压缩感知成像算法。何春良等^[11]阐述了基于行滚筒曝光读出原理的 TDI CMOS 图像传感器的曝光时间选取对图像质量参量信噪比(SNR)和调制传递函数(MTF)的影响。Celebi 等^[12]提出一种全新的在单帧图像中分离出过曝光图像和欠曝光图像的自适应直方图分离算法,通过分离的图像进行大动态范围图像融合以消除成像系统晃动带来的影响,但该方法无法满足需要同时获得场景及其中目标的大动态范围图像的情况。Martinez

等^[13]研究了一种自适应多重曝光下的大动态范围成像技术。

获取大动态范围图像的一种有效方法是针对场景中的某一部分而不是全部进行正确曝光,通过将得到的几幅曝光参数不同的图像进行叠加得到一幅图像^[14-16],即使用短曝光获取较亮的景物,使用长曝光获取较暗的景物,进行多幅组合以弥补单纯的短曝光造成的暗处细节缺失和单纯的长曝光造成的亮处细节缺失^[17-19]。但目前采用的单帧或多帧多次曝光的参数需随光环境不断改变,且没有改变 CMOS 图像传感器的硬件结构,这不但没有降低图像传感器成本,还增加了数据处理硬件成本,降低了图像的输出速率。为此,本文提出一种基于二值化图像叠加的 CMOS 相机方案,该方案不但可扩展 CMOS 图像传感器的动态范围,而且无需 CMOS 图像传感器的模/数转换器(ADC),可降低图像传感器成本。本文方法利用曝光时间按对数变化的一系列二值化图像信号进行叠加,得到目标场景完整清晰的灰度图像。

2 二值化图像叠加模型分析

2.1 二值化图像叠加原理

如图 1 所示,CMOS 图像传感器探测到的目标图像经二值化取样,形成二值化图像系列,曝光时间控制器按对数变化规律改变 CMOS 图像传感器的曝光时间,二值化图像系列经过图像叠加处理,合成完整图像并输出。

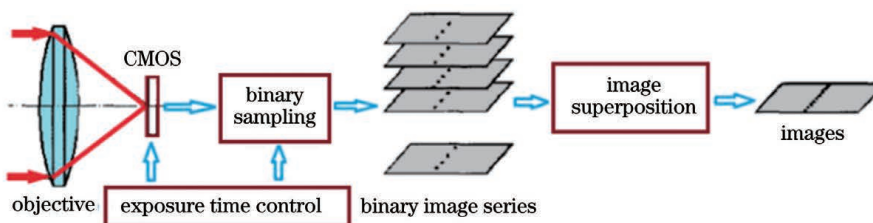


图 1 二值化图像叠加原理

Fig. 1 Schematic diagram of binary image superposition

二值化图像叠加后的图像灰度计算公式可写为

$$M = \text{int} \left(\frac{255}{q} \sum_{m=0}^q M_m \right), \quad (1)$$

式中: $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数; M 为输出灰度图像的像素值; q 为叠加的二值化图像数量; M_m 为第 m 个二值化图像,其值为 0 或 1。

2.2 对数曝光时间原理

因对数响应传感器具有较大动态范围,可通过改变曝光时间将 CMOS 图像传感器的线性响应输出转换为对数信号输出。设线性响应 CMOS 图像传感器第 j 个像元输出电压可表示为^[20]

$$V_j = V_0 - AP_j T, \quad (2)$$

式中: V_0 为像元复位电压(所有像元复位电压可近似相同); A 为像元灵敏度; P_j 为第 j 个像元上的光照强度; T 为积分时间。

将电路上的积分时间设置为曝光时间,若曝光时间为

$$T = \frac{a}{P_j} \ln P_j, \quad (3)$$

式中: a 为比例系数。则(2)式可写为

$$V_j = V_0 - aA \ln P_j. \quad (4)$$

从(4)式可得,当 CMOS 图像传感器的曝光时间取(3)式计算值时,像元输出电压随光照强度的变化满足对数响应关系。

2.3 二值化叠加对数响应原理

由于照射在每一个像元的光照度 P_j 不同,根据(3)式计算出一系列曝光时间,使每一个像元都具有对数响应输出。设不同像元的光照强度 P_j 可 q 等分为 $P_{j,l}, P_{j,l} = \frac{2lP_0}{q(1+q)}$, 其中 $l=1, 2, \dots, q, q$ 为总曝光次数, $1 \sim q$ 是等差数列, P_0 为像元各等分光照强度和。若对每一个 l 值曝光一次,每一次曝光时间为

$$T_k = \frac{aq(1+q)}{2lP_0} \ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right]. \quad (5)$$

则每一次曝光像元 j 的输出电压为

$$V_j(l) = V_0 - \frac{aAl}{k} \ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right], \quad k=1, 2, \dots, q. \quad (6)$$

取 CMOS 图像传感器中像元的最大输出电压半

峰值($V_0/2$)为二值化阈值,选择比例系数 a 值,若满足最短曝光时间($l=q$)条件,即 $aA \ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right) = V_0/2$, 则有

$$a = \frac{V_0}{2A \ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)}, \quad (7)$$

代入(6)式可得

$$V_j(l) = V_0 - \frac{V_0 l}{2k \ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)} \ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right], \quad k=1, 2, \dots, q. \quad (8)$$

对(8)式进行二值化处理,即将 $V_j(l)$ 除以 $V_0/2$ 后向下取整数,则第 k 次曝光像元的输出二值化电压可简化为

$$B_j(l) = \begin{cases} 1 & k > \frac{\ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right]}{\ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)} l \\ 0 & k \leq \frac{\ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right]}{\ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)} l \end{cases}, \quad k=1, 2, \dots, q. \quad (9)$$

由于像元输出电压与图像灰度值是反相的,所以这里电压值 0 对应(1)式中 M_m 二值化图像像素矩阵元素值 1。由(1)式和(9)式可得 q 次曝光的像元 j 的输出二值化电压叠加灰度值为

$$M_j(l) = \text{int} \left\{ \frac{255}{q} \sum_{i=0}^q [1 - B_j(i)] \right\} = \text{int} \left\{ \frac{255}{q} \sum_{k=0}^{\frac{\ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right]}{\ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)} l} 1 \right\} = \text{int} \left\{ \frac{255}{q} \frac{l}{\ln \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)} \ln \left[\frac{2lP_0}{q(1+q)} \right] \right\}. \quad (10)$$

(10)式表明,像元二值化输出电压叠加后的灰度值与光照强度具有对数关系,由此可实现 CMOS 图像传感器从不同线性响应转变为对数响应输出(图 2)。

3 实验

3.1 实验方法

实验采用现有 CMOS 相机进行验证,由于数据采样只取相机输出的二值化图像,因此可忽略 CMOS 相机中 ADC 模块的作用。相机类型为徕卡 SL2-S,

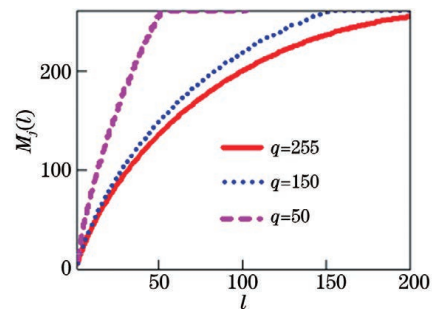


图 2 灰度值对数响应输出曲线
Fig. 2 Output curves of gray value quasi-logarithmic response

传感器为 CMOS 感光元件, 其像素间距为 $5.94 \mu\text{m}$, 全画幅 2460 万像素 ($6072 \text{ pixel} \times 4056 \text{ pixel}$), 非全画幅 1006 万像素 ($3984 \text{ pixel} \times 2656 \text{ pixel}$)。

实验在除了光源外四周完全黑暗的环境下进行, 采用不同功率的标准 LED 作为照明光源, 将一个长度为 1000 mm 的黑色条带粘贴在白色底板 (白色漫发射体的宽度为 600 mm) 上组成目标板, 黑色条带宽度为 80 mm。为了获得均匀性光源, 测试了 10 种 LED 光源在 1200 mm 范围内的照度, 最后选取满足照度与距离平方成反比的晶雕照明 LED 高亮球泡。光源在侧面照射目标板, CMOS 相机在垂直方向距离目标板 1000 mm, 被固定于三脚架上, 如图 3 所示。实验采用远方彩色照度计测量黑色条带上的照度分布, 根据 (5) 式计算 CMOS 相机曝光时间, 参数取值方法: 因最短曝光时间对应最大照度, 若目标最大照度值为 15000 lx , 则取 $P_0 = 7500(1+q)$ 。将目标最大照度下 CMOS 相机对目标成像不溢出的曝光时间 T_q 代入 (5) 式, 计算可得 $a = 1560T_q$ 。图像二值化取样方法: (8) 式像元输出电压对应的是该像素的灰度值, 其中 V_0 对应图像灰度最大差值 256, 因此将灰度图像的像素灰度值 $M_j(l)$ 除以 128, 然后向下取整数, 得到二值化图像像素值, 最后将一系列二值化图像进行叠加处理。为了比较不同 q 值的二值化叠加图像效果, 实验进行了不同 q 值下的二值化叠加图像对比。

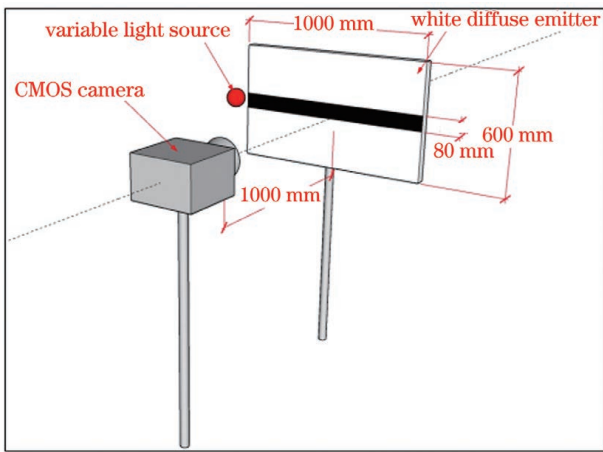


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

3.2 实验结果

3.2.1 相对动态范围

CMOS 相机的传感器动态范围 (DR, 其值用 V_{DR} 表示) 是指在传感器线性响应范围内探测器可探测到的目标最大亮度值 I_{max} 与目标最小亮度值 I_{min} 的比值, 即

$$V_{\text{DR}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}} \quad (11)$$

由于白色漫反射体目标亮度值 I 与目标照度值 E 成正比, 所以 CMOS 相机成像传感器的动态范围又可写为

$$V_{\text{DR}} = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}} \quad (12)$$

式中: E_{max} 为可探测到 (可识别) 的目标最大照度值; E_{min} 为可探测到 (可识别) 的目标最小照度值。

实验中照度的变化可通过改变光源功率的方法实现。光源与目标板左侧的垂直距离为 30 mm, 以黑色条带最左端 ($x = 100 \text{ mm}$) 为起点, 以 100 mm 为间隔进行刻度标注, 在黑色条带上对不同光源功率进行照度值测量, 所测得的照度值如图 4 所示。不同形状的曲线对应不同光源功率下的照度分布, 图 4 中曲线表明光照度值与测量距离呈反比关系^[21]。

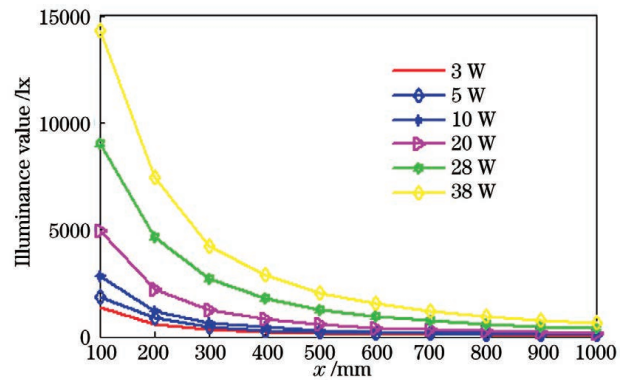


图 4 实验目标板上黑色条带的照度分布

Fig. 4 Illuminance distribution of black strip on experimental target board

当光源功率为 10 W 时, 黑色条带上最暗和最亮的照度值分别为 100 lx 和 3000 lx , 取 q 值为 30, 二值化图像系列经叠加后的黑色条带图像和灰度分布曲线如图 5(a) 所示。图 5(b) 为用于对比的具有相同型号 CMOS 传感器的传统相机得到的黑色条带图像和灰度分布曲线。

改变光源功率为 38 W, 得到黑色条带上最暗和最亮的照度值分别为 600 lx 和 14000 lx , 同样取 q 值为 30, 黑色条带的二值化叠加 CMOS 相机图像和传统 CMOS 相机图像如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 黑色条带图像下方的曲线为灰度分布曲线。

为了比较二值化叠加 CMOS 相机和传统 CMOS 相机的探测器动态范围, 实验采用相对动态范围比较方法。在光电探测器动态范围的一般定义中, 最小可探测光功率 (或亮度) 是由探测器的噪声

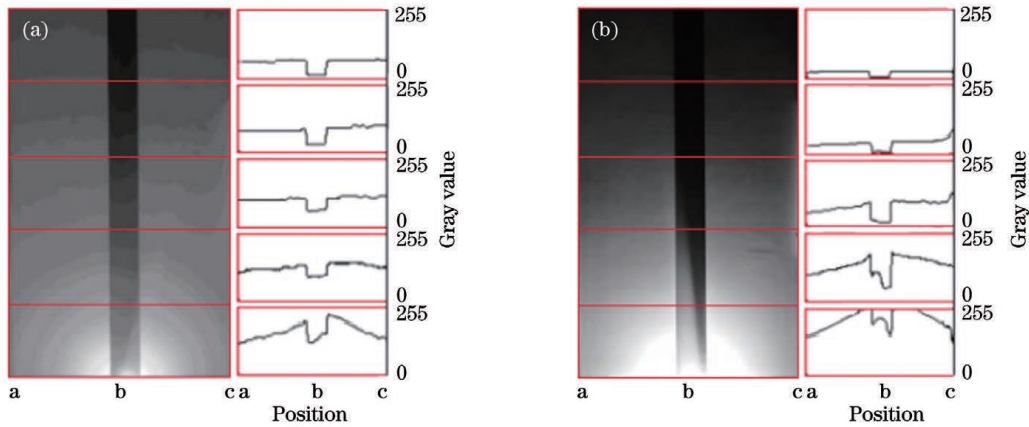


图 5 黑色条带上照度值为 100~3000 lx 的相机图像与灰度分布曲线。(a)二值化叠加相机;(b)传统相机

Fig. 5 Camera images and gray distributions for illuminance value of 100–3000 lx of black strip. (a) Binary superposition camera; (b) traditional camera

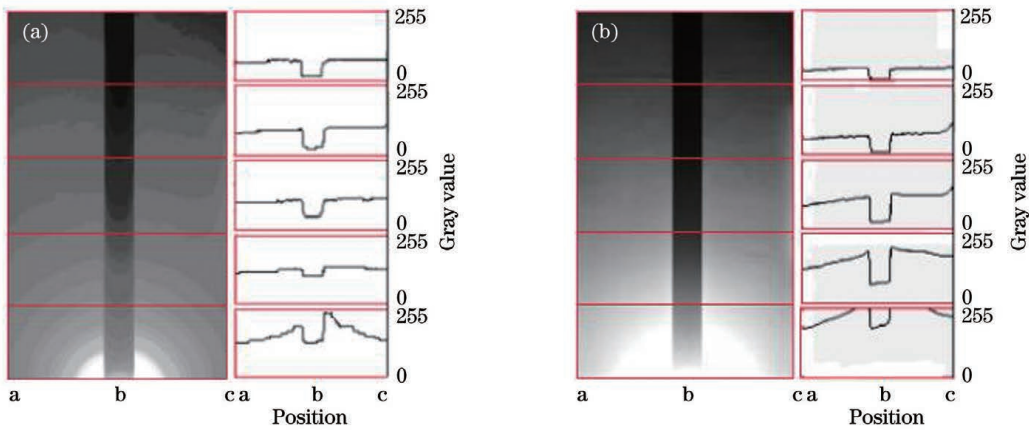


图 6 黑色条带上照度值为 600~14000 lx 的相机图像与灰度分布曲线。(a)二值化叠加相机;(b)传统相机

Fig. 6 Camera images and gray distributions for illuminance value of 600–14000 lx of black strip. (a) Binary superposition camera; (b) traditional camera

决定的,噪声决定了光电探测器可探测识别的最低光功率(或亮度)。同样,在实际应用中,图像轮廓的识别也有一个最小可识别灰度差值(阈值) Δ_0 ,这个阈值可用于判断相机的相对动态范围大小,同样用(12)式表示,只不过目标可识别的最大照度值 E_{\max} 和最小照度值 E_{\min} 都要满足阈值条件。理论上,只要图像上黑色条带边沿灰度差值 $\Delta \geq 1$ 就可以识别黑色条带轮廓。受实验目标板的尺寸限制,实验没有测量到最小黑色条带边沿灰度差值 $\Delta = 1$ 的图像部分,但可以设定任意一个灰度差值 Δ 为阈值 Δ_0 ,进行不同相机的相对动态范围定量对比。下面假定阈值 $\Delta_0 = 32$ (最大灰度值的 1/8)。当黑色条带上的照度值为 100~3000 lx 时,黑色条带边沿灰度差值 Δ 随坐标 x 的变化曲线如图 7 所示。可以看到,二值化叠加 CMOS 相机图像的灰度差值 Δ 曲线 a 在整个坐标范围内都满足 $\Delta \geq \Delta_0$,因此可认为

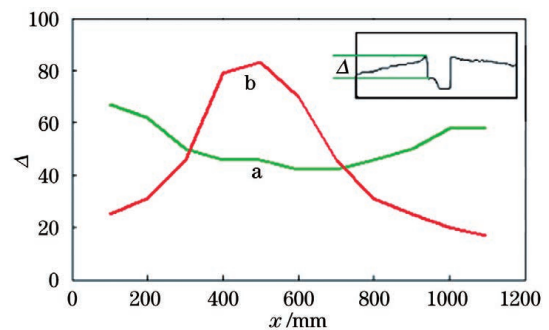


图 7 黑色条带上照度值为 100~3000 lx 时边沿灰度差值 Δ 随坐标 x 的变化曲线

Fig. 7 Variation of gray difference Δ with coordinate x for illuminance intensity of 100–3000 lx on black strip

$E_{\max} \geq 3000 \text{ lx}, E_{\min} \leq 100 \text{ lx}$ 。根据(12)式,二值化叠加 CMOS 相机的相对动态范围 $V_{\text{DR}} \geq 30$ 。而传统 CMOS 相机图像的灰度差值 Δ 曲线 b 满足

$\Delta \geq \Delta_0$ 的 x 坐标值在 300~700 mm 范围内。由图 7 可查得对应的照度值 $E_{\max} \approx 658 \text{ lx}$, $E_{\min} \approx 177 \text{ lx}$, 相对动态范围 $V_{\text{DR}} \approx 3.7$ 。通过比较后可得二值化图像叠加 CMOS 相机的相对动态范围比传统 CMOS 相机提高了 8 倍以上。当黑色条带上的照度值为 600~14000 lx 时, 黑色条带边沿灰度差值 Δ 随坐标 x 的变化曲线如图 8 所示。可以看到, 黑色条带上的照度提高后, 二值化叠加 CMOS 相机图像的灰度差值 Δ 曲线 a 在整个坐标范围内依然都满足 $\Delta \geq \Delta_0$, 而传统 CMOS 相机图像的灰度差值 Δ 曲线 b 满足 $\Delta \geq \Delta_0$ 的 x 坐标范围也从 300~700 mm 扩大到 150~1100 mm 范围, 此时得到的二值化图像叠加 CMOS 相机的相对动态范围约为传统 CMOS 相机的 2 倍以上。但由图 8 可明显看出, 若增大 x 坐标测量范围, Δ 曲线 a 的拟合曲线仍然保持 $\Delta \geq \Delta_0$ 不变, 而 Δ 曲线 b 的拟合曲线在 $x > 1200$ 时不满足 $\Delta \geq \Delta_0$, 即随着 x 坐标测量范围的增大, 二值化图像叠加 CMOS 相机的相对动态范围计算值也增大, 而传统 CMOS 相机的相对动态范围计算值减小, 前后两者的比值也随之增大。由此可见, 同功率光源下, 目标照度范围越大, 二值化图像叠加 CMOS 相机的相对动态范围越大, 而传统 CMOS 相机的相对动态范围越小, 二值化图像叠加 CMOS 相机越具有优越性。

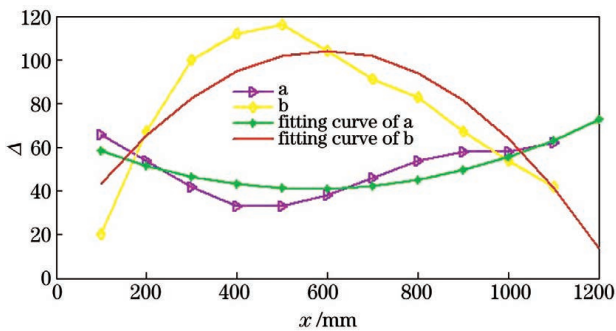


图 8 黑色条带上照度值为 600~14000 lx 时边沿灰度差值 Δ 随坐标 x 的变化曲线

Fig. 8 Variation of gray difference Δ with coordinate x for illuminance intensity of 600~14000 lx on black strip

3.2.2 图像亮度比较

观察二值化叠加 CMOS 相机图像和传统 CMOS 相机图像, 可以看到前者的图像亮度变化比较平缓, 即图像亮度变化与目标照度变化不成正比, 图像受目标照度变化的影响较小。而后者的图像亮度变化大, 图像受目标照度变化的影响大, 最暗区域的黑色条带对比度小, 不易识别, 最亮区域的黑色条

带亮度饱和和失真大。图 9 给出了黑色条带上照度值分布为 49~1365 lx 的图像亮度积分值曲线的对比, 图中曲线 a 为二值化叠加 CMOS 相机的图像积分值曲线, 曲线 b 为传统 CMOS 相机的图像积分值曲线。从图中曲线可见, 二值化叠加 CMOS 相机的图像亮度积分值随坐标 x 的变化缓慢, 并具有较好的线性关系, 这说明了 CMOS 图像传感器从线性响应输出转变为对数响应输出的有效性。而传统 CMOS 相机的图像亮度积分值随坐标 x 变化的曲线与图 6 中的照度分布曲线类似, CMOS 图像传感器依然为线性响应输出。

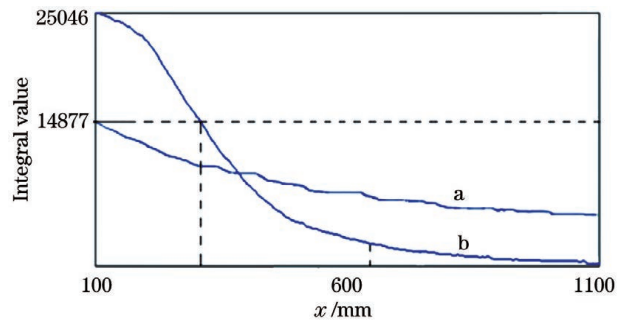


图 9 黑色条带上照度值为 49~1365 lx 时图像亮度积分值曲线对比

Fig. 9 Comparison of brightness integral value curves for illuminance intensity of 49~1365 lx on black strip

3.3 结果讨论

根据(11)式和 $P_{j,l} = \frac{2lP_0}{q(1+q)}$, 可得到光照强度与灰度值的关系为

$$P_{j,l} = \left(\frac{2P_0}{1+q} \right)^{\frac{qM_j(l)}{255}} \quad (13)$$

图像像素灰度值 $M_j(l)$ 的最大值为 255, 最小值为 0, 代入(13)式得对应的光照强度最大值为 $P_{\max} = \frac{2P_0}{1+q}$, 最小值为 $P_{\min} = 1$, 因此根据(12)式,

可得动态范围理论上限为 $V_{\text{DR}} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{2P_0}{P_{\min}(1+q)}$ 。将实验采用的 $P_0 = \frac{P_{\max}}{2}(1+q)$ 值代

入可得动态范围理论上限为 $V_{\text{DR}} = P_{\max} / P_{j,l}$ 的理论值从实验中参考, 选择实验中测得的最低照度。

3 W 功率光源在 $x = 1000 \text{ mm}$ 处的 $P_{j,l}$ 为 49 lx, 获得理论最小相对动态范围 $V_{\text{DR}} = 49$, 满足 $V_{\text{DR}} \geq 30$ 。

4 结 论

提出一种基于二值化图像叠加的 CMOS 相机动态范围扩展方法,采用 CMOS 图像传感器设置按对数变化的曝光时间,获得一系列二值化图像,通过叠加得到灰度黑白图像。采用白色背景的黑色条带作为目标板进行不同照度的成像实验。实验结果表明,当黑色条带上的照度值为 100~3000 lx 时,与传统相机成像相比,二值化叠加相机的相对动态范围最大可扩展 8 倍以上,且同功率光源下,目标照度范围越大,获得的相对动态范围越大,二值化叠加相机越具有优越性。图像亮度曲线对比结果说明了二值化叠加相机具有有效的对数响应输出。本方案设计的图像传感器不需要 A/D 转换,可满足大动态范围、低速率要求的图像探测需要,避免了某些场合需要遮挡强光或提升亮度的麻烦。

参 考 文 献

- [1] Habibi M. A low power smart CMOS image sensor for surveillance applications [C] // 2010 6th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing, October 27-28, 2010, Isfahan, Iran. New York: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [2] Xu S L, Lin K C, Han Y C, et al. Study on γ -ray irradiation damage mode and characterization of CMOS APS camera [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1523002.
徐守龙, 林奎成, 韩永超, 等. CMOS APS 摄像机的 γ 射线辐射损伤模式与损伤表征研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1523002.
- [3] Zhang J, Sun Y B, Fu X H, et al. Development of CMOS optical color modulation films for low-light-level systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093101.
张静, 孙宇勃, 付秀华, 等. 微光系统 CMOS 光学调色膜的研制 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 093101.
- [4] Ai K, Cheng J J, Zhu K F, et al. Design and realization of a novel poly-silicon light-emitting device based on standard CMOS technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701027.
艾康, 程骏骥, 朱坤峰, 等. 基于标准 CMOS 技术的新型多晶硅发光器件的设计与实现 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701027.
- [5] Li X C, Yao S Y, Huang B Z, et al. A novel high dynamic range exposure control for CMOS image sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(3): 328-332.
- [6] Reinhard E, Heidrich W, Debevec P, et al. High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting [M]. 2nd ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2010.
- [7] Du L, Sun H Y, Wang S, et al. High dynamic range image fusion algorithm for moving targets [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0410001.
都琳, 孙华燕, 王帅, 等. 针对动态目标的高动态范围图像融合算法研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0410001.
- [8] Chen X N, Zhang S F, Lei Z C. High dynamic range image generation method by fusing multi-level gamma-transformed images [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041014.
陈小楠, 张淑芳, 雷志春. 一种基于多层伽马变换融合的高动态范围图像生成方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041014.
- [9] Sun H H, Liu Y Y. Application and test of two different high-speed digital CMOS image sensors [J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(5): 453-460.
孙宏海, 刘艳滢. 两种高速 CMOS 图像传感器的应用与测试 [J]. 中国光学, 2011, 4(5): 453-460.
- [10] Zhang S F, Qu G C, Xu J T, et al. A compressive sensing imaging algorithm based on CMOS image sensor [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(12): 1127-1132.
张淑芳, 瞿广财, 徐江涛, 等. 基于 CMOS 图像传感器的压缩感知成像算法 [J]. 天津大学学报, 2012, 45(12): 1127-1132.
- [11] He C L, Li B Q, Liu Z W, et al. Integration time optimization for TDI CMOS image sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0204002.
何春良, 李斌桥, 刘振旺, 等. TDI CMOS 图像传感器曝光时间优化方法研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0204002.
- [12] Celebi A T, Duvar R, Urhan O. Fuzzy fusion based high dynamic range imaging using adaptive histogram separation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2015, 61(1): 119-127.
- [13] Martínez M A, Valero E M, Hernández-Andrés J. Adaptive exposure estimation for high dynamic range imaging applied to natural scenes and daylight skies [J]. Applied Optics, 2015, 54(4): B241-B250.
- [14] Zhu L X, Yu X C, Chen T, et al. An image processing synthesis of enhancing dynamic range [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(1): 65-67.
朱良销, 余学才, 陈涛, 等. 一种扩展动态范围的图

- 像处理算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(1): 65-67.
- [15] Schanz M, Nitta C, Bussmann A, et al. A high-dynamic-range CMOS image sensor for automotive applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(7): 932-938.
- [16] Zhou W. 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.
- [17] Egawa Y, Koike H, Okamoto R, et al. A 1/2.5 inch 5.2 Mpixel, 96 dB dynamic range CMOS image sensor with fixed pattern noise free, double exposure time read-out operation[C]//2006 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, November 13-15, 2006, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2006: 135-138.
- [18] Bidermann W, El Gamal A, Ewedemi S, et al. A 0.18 μm high dynamic range NTSC/PAL imaging system-on-chip with embedded DRAM frame buffer [C]//2003 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC, February 13-13, 2003, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 212-488.
- [19] An R, Chen Y, Xie J. Exposure algorithm for CMOS image sensor with adaptive dynamic range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 88-92.
安然, 陈彦, 解静. CMOS 图像传感器自适应动态范围调整曝光控制[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 88-92.
- [20] Liu H Y, Cao J Z, Dong S, et al. Multiple slope integration based on CMOS image sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(S1): 331-334.
刘海英, 曹剑中, 董森, 等. 基于 CMOS 图像传感器多斜率光积分的研究[J]. 光子学报, 2007, 36(S1): 331-334.
- [21] Wang H W, Liu X M, Chen W M, et al. Far-field distance analysis of LED array luminaries[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 680-685.
王航威, 刘显明, 陈伟民, 等. 阵列型 LED 灯具远场距离分析[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 680-685.