

CCD 摄像机新型光控技术研究

王晓涛^{1,2}, 王绪安^{1,2,3,4}, 康宁^{3,4}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065; 4. 西安导引科技有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 以往的 CCD 摄像机通过曝光时间和信号增益调节光照强度时, 二者不能被最优配置运用, 难以最大限度的发挥它们的调光功效, 特别是对于光照强度变化剧烈, 动态范围大的状况, 画面不清晰。针对上述不足, 将直方图均衡化法进行一定的改进, 精确配置曝光时间, 优化信号增益系数, 实现曝光时间与信号增益的最优化配置。经过实验验证, 画面效果得到明显改善, 调整时间不超过 40ms, 系统运行稳定、可靠。

关键词: 自动曝光; 信号增益; 灰度; 直方图

中图分类号: TN386.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0120003

New light-control technology research of CCD camera

Wang Xiaotao^{1,2}, Wang Xu'an^{1,2,3,4}, Kang Ning^{3,4}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an Modern Technology Institute of Control, Xi'an 710065, China;
4. Xi'an Guide Technology Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: The exposure time and signal gain can be used to adjust the light intensity for a conventional CCD camera, but both of them can not be configured best. It is also very difficult to maximize the effectiveness of their dimming, especially for the condition of the changed illumination intensity, the large dynamic range and the unclear picture. For the above-mentioned shortages, the histogram equalization certain improvements, the deployment of exposure time and signal gain were optimized through precise deployment of exposure time and optimization of signal gain coefficients. After the test, the screen effect has been significantly improved, the adjustment time is less than 40ms, and the system is stable and reliable.

Key words: automatic exposure; signal gain; grayscale; histogram

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 总装备部合同办项目

作者简介: 王晓涛(1988-), 男, 硕士生, 主要从事光电测控方面的研究。Email: wangxiaotao@opt.ac.cn

导师简介: 王绪安(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电识别、跟踪以及控制方面的研究。Email: wxa203@sina.com

0 引言

现在, 摄像机在人们生活中的运用已经越来越广泛, 并且成为不可或缺的一部分。与此同时, 人们对摄像机的追求也不再仅局限于低廉的价格, 而是更高的品质。众所周知, 摄像机的分辨率越高, 拍摄出的画面会越清晰。在很多场景拍摄中, 人们希望摄像机能够根据不同的场景进行自动调节, 从而拍摄出更高质量的画面。因此, 高清晰度的自适应摄像机越来越受到人们的青睐^[1]。

由参考文献[2-3]可知, 伴随着 CCD 图像传感器的研究不断深入, 以及制造工艺水平不断的提高, 国内外科研工作者在研制高品质摄像机时, 对感光芯片的选择主要以 CCD 图像传感器为主。然而要研制一种品质好的摄像机, 不仅需要有良好的感光芯片, 更重要的是光控部分的设计。从 20 世纪 70 年代起, 虽然全球有很多公司, 如日本索尼、德国莱茨、美国 PULNIX 等相继推出了许多款 CCD 摄像机^[4], 但由于高端 CCD 摄像机的研发技术难度非常大, 所以其发展程度受到了一定的限制^[5], 而该问题的实质在于如何更好地掌控能够拍摄出优质画面的因素——曝光控制、信号增益和改进后的直方图均衡化, 以应对不同的外界状况。基于此种状况, 本文提出了一种精确配置曝光时间与优化信号增益系数相结合的模式, 外加改进直方图均衡化的方法, 并且进行了实验分析。

1 关键单元设计

1.1 直方图均衡化

原始的直方图均衡化是把画面的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布, 也就是对画面进行非线性拉伸, 重新分配画面像素值, 达到调节画面对比度的效果。但是变换后画面的灰度级减少, 某些细节会消失^[6]。

文中采用了一种对直方图均衡化改进的方法, 首先提取画面细节部分, 然后与原始均衡化后的结果相叠加, 进而使得画面的细节更加丰富。

1.1.1 提取画面细节

画面中高频部分对应画面的细节部分, 高通滤波器可以抑制低频, 因此运用此原理可以把高频细

节部分提取出来^[6]。在空间域和频域中, 都有相关的方法来提取, 但是对它们进行比较, 发现空间域中的拉普拉斯算法更合适, 其算法表达式为^[7]:

$$|\nabla f(x, y)| = |4f(x, y) - f(x+1, y) - f(x, y+1) - f(x, y-1) - f(x-1, y)| \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 表示原画面。

1.1.2 直方图均衡化的改进方法

(1) 由 1.1.1 得到画面中的高频部分, 再给予相应的权值 k , 可获得增强后的图像高频部分用 $k|f(x, y)|$ 表示。

(2) 采用传统方法对原画面均衡化处理后得到的画面可表示 $f_{in}(x, y)$ 。

把步骤(1)和(2)中的结果相加, 可得改进后均衡化处理的结果。

$$f_{new}(x, y) = k|f(x, y)| + f_{in}(x, y) \quad (2)$$

当画面的灰度级数为 L 时, 那么 k 取 $0, 1, 2, 3, \dots, L$ 。

对于运用此方法产生的噪声可以通过调和去噪的办法去除^[8]。

1.2 灰度均值的比对处理

该设计中, 灰度最佳区间设置为 $[104, 156]$, 由直方图完成灰度均值的统计之后, 与其进行比较, 并且做出相应的处理, 灰度均值用 E 表示。

(1) 当 $E < 104$ 时, 目标区域内像素点的平均亮度偏暗, 然后转入信号增益与曝光时间的计算模块, 本设计中优先调节光积分时间。

(2) 当 $E > 156$ 时, 目标区域内像素点的平均亮度过高, 然后转入信号增益与曝光时间的计算模块, 本设计中优先调节光积分时间。

(3) 当 E 在灰度设置区间范围内时, 目标区域内像素点的平均亮度满足要求, 把此时画面的曝光时间值赋给下一幅画面的曝光时间 T , 然后转为离差系数的判断。

1.3 信号增益与曝光时间的计算

1.3.1 光积分时间变长的计算

当画面信号强度过暗时, 此时灰度均值低于最佳灰度阈值区间的下限值, 因此需要增大光积分时间。通过公式(3), 可以求出下一幅画面所需的曝光时间 T_1 。

$$T_1 = \frac{130t_1}{E} \quad (3)$$

式中: t_1 表示当前的曝光时间; E 表示当前的灰度均值。

若 T_1 大于曝光时间设置区间范围的上限值 t_2 , 则下一幅画面的曝光时间为 t_2 , 超出部分用信号增益调节来补偿, 下一幅画面信号增益值 G 可以由公式(4)和(5)计算得到。

$$M = Ga_1 \times \frac{130t_1}{t_2E} \quad (4)$$

$$G = M \quad (5)$$

式中: t_2 表示预设曝光时间范围区间的上限值; Ga_1 表示当前信号增益值。

若 T_1 在允许曝光时间范围之内, 则把当前信号增益值赋给下一幅画面信号增益 G 。

1.3.2 光积分时间变短的计算

当画面信号强度过亮的时候, 此时灰度均值大于最佳灰度阈值区间的上限值, 因此需要减小光积分时间。通过公式(6), 可以求出下一幅画面所需的曝光时间 T_2 。

$$T_2 = \frac{130(t_1 - t_3)}{4E} \quad (6)$$

式中: t_3 表示预设曝光时间范围区间的下限值。

若 T_2 不在允许曝光时间范围之内, 则把 t_2 赋予下一幅画面的曝光时间, 用信号增益调节来补偿 T_2 和曝光时间阈值区间极限值的 t_2 差值所调节的部分, 可以由公式(7)和(8)计算得到。

$$M_1 = \frac{130(t_1 - t_3)Ga_1}{4Et_2} \quad (7)$$

$$G = M_1 \quad (8)$$

若 T_2 在允许曝光时间范围之内, 则把当前信号增益值赋给下一幅画面信号增益 G 。

1.4 离差系数的相关计算

获取灰度均值后, 求离散差系数 Dev:

$$Dev = \sqrt{\frac{(x_1 - E)^2 + (x_2 - E)^2 + \dots + (x_i - E)^2}{iE^2}} \quad (9)$$

式中: x_i 表示目标区域各像素的灰度值; i 为正整数。

当离差系数不低于 83% 时, 下一幅画面的曝光时间和信号增益值与当前值相同。

当离差系数低于 83%, 就需要计算下一幅画面的信号增益 G 如下:

$$M_2 = \frac{0.9Ga_1}{Dev} \quad (10)$$

$$G = M_2 \quad (11)$$

1.5 系统设计方案

1.5.1 硬件实施方案

系统硬件原理框图如图 1 所示, 系统中 FPGA 重

点控制 SUB 脉冲信号的起始点与脉冲宽度; 直方图的统计与灰度均值的计算; 灰度均值与预设灰度区间 [104, 156] 的比较; 曝光时间和信号增益的组合计算; 离差系数和信号增益的组合计算;

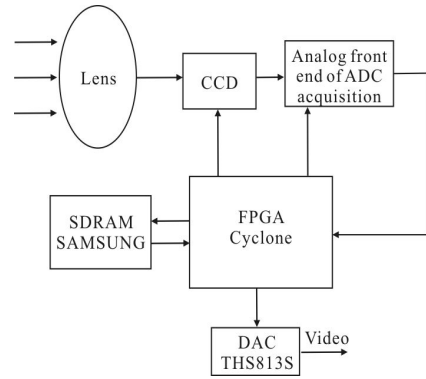


图 1 系统硬件原理框图

Fig.1 System hardware design structure chart

1.5.2 软件设计流程

该设计中, 关键部分软件设计流程如图 2 所示, 文中已给出图中各字母的具体含义。

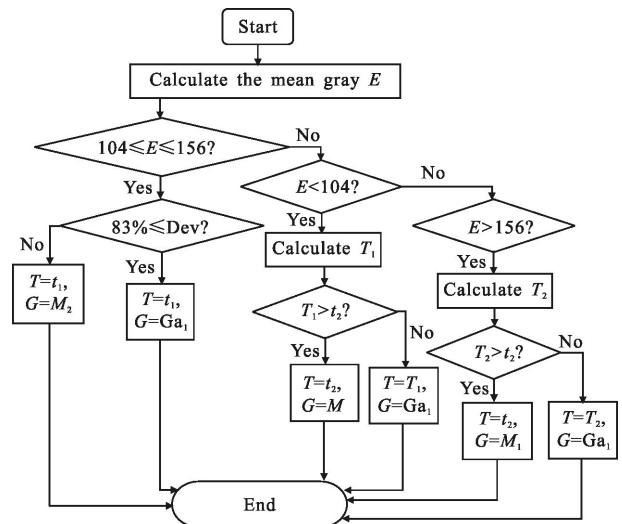


图 2 软件设计流程图

Fig.2 Software design flow

2 实验分析

2.1 总体方法的测试与分析

用光源模拟四种场景, 将曝光时间的范围区间设置为 [1/5 000 s, 1/120 s], 每组场景拍摄一些画面, 改变场景光照强度, 最后对所得整个表格试验数据

进行分析。

(1) 预设场景光照很强,曝光时间足够长,将模拟光源的光照强度依次由强变弱再到强,得到实验数据如表1所示。

表 1 第一组数据

Tab.1 The first set of data

No.	Exposure time/ms	Gain/dB	Gray value	Dev
1	25.00	1.583	206	-
2	3.944	1.583	138	82%
3	3.944	1.737	140	83%
4	3.944	1.737	140	83%
5	3.944	1.737	58	-
6	8.333	1.843	110	84%
7	8.333	1.843	111	84%
8	8.333	1.843	198	-
9	1.367	1.843	142	85%
10	1.367	1.843	141	85%

在较强的光照强度下,初始设置较长的曝光时间和较小的信号增益值,此时测得灰度均值为 206,区域内像素点的平均亮度过亮。由公式(6)可知第 2 幅画面的曝光时间并未超出曝光时间区间范围,所以信号增益值为 1.583 dB,此时的灰度均值在理想灰度区间内,但由于离差系数没有超过 83%,因此需要通过公式(10)和(11)获得第 3 幅画面的信号增益值,由文中 1.2 的(3)可知曝光时间为 3.944 ms。通过 1.4 节可知第 4 画面的曝光时间、信号增益值以及离差系数值。

在拍摄第 5 幅图时,突然降低光照强度,测得灰度均值为 58,画面质量出现问题。运用公式(3)可得第 6 幅画面的曝光时间超过了 1/120 s,所以曝光时间为 8.333 ms,超出的部分用信号增益来补偿,通过公式(4)和(5)计算得信号增益值为 1.843 dB,通过即时调节,后续画面质量在第 6 幅变好且稳定。

在拍摄第 8 幅画面时,突然增强光照强度,测得此幅画面的灰度均值为 198,由公式(6)可得第 9 幅画面的曝光是 1.367 ms,信号增益值不变,同理可得离差系数值,从第 10 幅画面数据可知画面质量变好且稳定。

(2) 预设场景光照很强,曝光时间较短,将模拟光源的光照强度由强变弱,得到实验数据如表 2 所示。

表 2 第二组数据

Tab.2 The second set of data

No.	Exposure time/ms	Gain/dB	Gray value	Dev
1	1.000	4.886	46	-
2	2.826	4.886	108	84%
3	2.826	4.886	109	84%
4	2.826	4.886	108	84%
5	2.826	4.886	87	-
6	4.222	4.886	114	86%
7	4.222	4.886	114	86%

在较强的光照强度下,初始设置较短的曝光时间和较大的信号增益值,测得第 1 幅画面的灰度值为 46,区域内像素点的平均亮度偏暗,运用公式(3)计算得到第 2 幅画面的曝光时间为 2.826 ms,同时可知信号增益值为 4.886 dB,灰度均值为 108,离差系数为 84%。由文中 1.4 节可得第 3、4、5 幅画面的曝光时间、信号增益值以及离差系数值。

在拍摄第 5 幅画面的时候,突然降低光照强度,画面质量出现问题,同理可知第 6、7 幅画面的相关数据。

(3) 预设场景光照强度较弱,曝光时间较长,将模拟光源的光照强度由弱变强,得到实验数据如表 3 所示。

表 3 第三组数据

Tab.3 The third set of data

No.	Exposure time/ms	Gain/dB	Gray value	Dev
1	18.000	1.992	199	-
2	2.939	1.992	118	85%
3	2.939	1.992	119	85%
4	2.939	1.992	118	85%
5	2.939	1.992	163	-
6	0.585	1.992	136	84%
7	0.585	1.992	135	84%

在较弱的光照强度下,初始设置较长的光积分时间和较小的信号增益值,测得第 1 幅画面的灰度均值为 199,区域内像素点的平均亮度过高,由公式(6)可得第 2 幅画面的曝光时间并未超出预设曝光时间区间范围,所以第 2 幅画面的信号增益值还是 1.992 dB。

第 3、4、5 幅画面的曝光时间值和信号增益值不变,离差系数都超过了 83%,由 1.4 得出各幅画面的

离差系数值。

拍摄第 5 幅画面时,突然增强光照强度,此时测得灰度均值为 163,通过公式(6)的计算得到第 6 幅画面曝光时间为 0.585 ms,在曝光时间预设区间范围之内,第 6 幅画面的信号增益与第 5 幅画面的信号增益值相同,后续的数据同理表 1 可得。

(4) 预设场景光照强度较弱,曝光时间较短,将模拟光源的光照强度由弱变强再到弱,得到实验数据如表 4 所示。

表 4 第四组数据

Tab.4 The fourth set of data

No.	Exposure time/ms	Gain/dB	Gray value	Dev
1	0.4	3.675	10	-
2	5.2	3.675	102	85%
3	5.2	3.675	103	85%
4	5.2	3.675	103	85%
5	5.2	3.675	168	-
6	1.006	3.675	134	86%
7	1.006	3.675	134	86%
8	1.006	3.675	56	-
9	2.335	3.675	112	84%
10	2.335	3.675	111	84%

在较弱的光照强度下,初始设置较短的光积分时间和较大的信号增益值。同理表 1 得到第 2、3、4、5 幅画面的数据。

拍摄第 5 幅画面时,突然增强光照强度,此时得到灰度均值为 168,通过公式(6)计算得到第 6 幅画面曝光时间在曝光时间设置区间范围之内,因此第 6 幅画面的信号增益值保持不变,又此幅画面的离差系数大于 83%,所以,第 7 幅画面的曝光时间和信号增益值不变。

在拍摄第 8 幅画面时,突然降低光照强度,测得此幅画面的灰度均值为 56,由公式(3)可得第 9 幅画面的曝光时间是 2.335 ms,信号增益值不变,同理可得离差系数值,从第 10 幅画面数据可知画面质量变好且稳定。

上述 4 组实际测得数据的曝光时间值和信号增益值与计算分析数据一致,通过一幅画面即可将画面质量恢复到优质状况,且信号增益值没有超过 5 dB,信号中的噪声不会被放大。

2.2 实验测试效果图与直方图

(1) 当处于小动态范围场景时,瞬间捕捉的画面和直方图与调整好之后的画面图和直方图如图 3 所示。

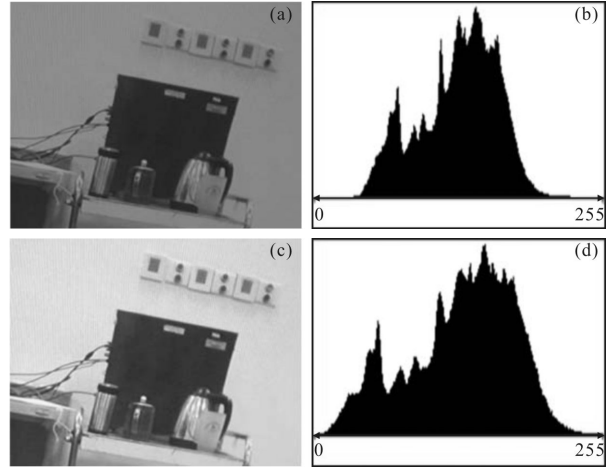


图 3 小动态范围场景拍摄过程画面和直方图

Fig.3 Small dynamic range scenes process images and histograms

(2) 当处于大动态范围场景时,瞬间捕捉的画面和直方图与调整好之后的画面图和直方图如图 4 所示。

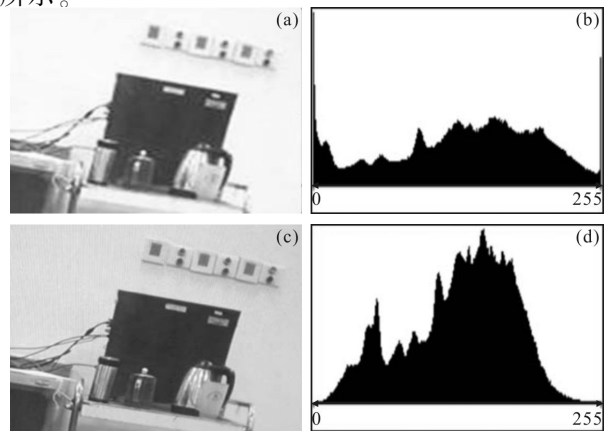
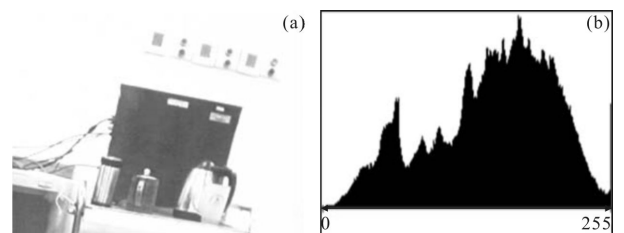


图 4 大动态范围场景拍摄过程画面和直方图

Fig.4 Wide dynamic range scenes process images and histograms

(3) 当处于更大动态范围场景时,瞬间捕捉的画面图和直方图与调整好之后的画面图和直方图如图 5 所示。



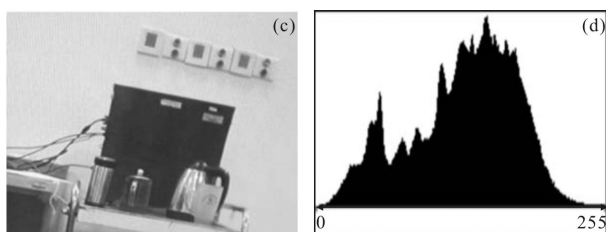


图 5 更大动态范围场景拍摄过程画面和直方图

Fig.5 Greater dynamic range scenes process images and histograms

由上述各组拍摄过程的画面和直方图可知,运用 CCD 摄像机拍摄不同动态范围画面时,能够迅速把画面调整到优质状态,并且层次分明,离差系数也在合理范围内。

3 结 论

CCD 摄像机在拍摄画面时,不能合理配置曝光时间与信号增益,最大化发挥它们的价值。文中提出一种新型的光控设计方法,通过实验证明了该光控技术的可行性与实用性,它提升了 CCD 摄像机的拍摄能力,为后续 CCD 摄像机的研究提供了一种全新的思路。

参考文献:

[1] Liu Guangchang, Chen Xin, Huang Liang. A new Method for design of CCD driving circuit [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1997, 18(4): 231-232. (in Chinese)
刘光昌, 陈欣, 黄亮. CCD 驱动电路设计的新方法 [J]. 半导体光电, 1997, 18(4): 231-232.

[2] Yuan Huaming. Research chohigh resolve full-frame CCD drive circuit [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006: 11-13. (in Chinese)
元华明. 高分辨率全帧 CCD 驱动电路技术研究[D]. 北京:

中国科学院研究生院, 2006: 11-13.

[3] Lu Meina, Hong Jin, Chen Dihu, et al.Design of driving schedule of a scientific grade CCD based on FPGA [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(3): 221. (in Chinese)
路美娜, 洪津, 陈迪虎, 等. 一种典型的科学级 CCD 驱动时序的 FPGA 设计 [J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(3): 221.

[4] Li Dingchuan. A reviw of some new types of High-end 3-CCD digital camcorders [J]. *Image Technology*, 2007, 4(3): 3-5. (in Chinese)
李定川. 高端 3CCD 数码摄像机的新机型综述[J]. 影像技术, 2007, 4(3): 3-5.

[5] Fu Xiansong. Research CMOS image sensor dynamic range expansion technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006: 15-18. (in Chinese)
付贤松. CMOS 画面传感器离差系数扩展技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 15-18.

[6] Jiang Bojun, Zhong Mingxia. Improved histogram equalization algorithm in the image enhancement [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(6): 702. (in Chinese)
姜柏军, 钟明霞. 改进的直方图均衡化算法在图像增强中的应用[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 702.

[7] Hu Dianhai, Lv Xuliang, Wen Liuqiang. Image enhancement method using improved histogram equalization [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(3): 66. (in Chinese)
扈佃海, 吕绪良, 文刘强. 一种改进的直方图均衡化图像增强方法[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 66.

[8] Tian Suyun, Wang Xiaoming, Zhao Xueqing. Image denoising algorithms based on laplacian operator and image inpainting [J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(10): 2794. (in Chinese)
田素云, 王小明, 赵雪青. 基于拉普拉斯算子和图像修补的图像去噪算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(10): 2794.