

文章编号:1007-2780(2009)06-0928-06

用于目标跟踪的大视场 CCD 相机自动调光方法及实现

张 宇^{1,2}, 赵贵军³, 李国宁¹, 金龙旭¹, 任建岳¹, 吕增明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: zhangyu004115@126.com;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 总装备部沈阳军事代表局, 辽宁 沈阳 110013)

摘 要: 针对用于目标跟踪的大视场 CCD 相机的特殊结构, 为了获得高质量图像, 提出了一种基于电子快门无级调节的自动调光方法, 即通过实时调整 CCD 相机的曝光时间来实现快速、高精度调光。文中提出了多区域灰度加权的图像灰度均值提取方法, 消除了因大视场 CCD 相机背景图像数据过多而给自动调光带来的影响。系统采用 FPGA 内置 RAM, 通过乒乓缓存策略保证调光算法的实时性。通过对 CCD 相机的辐射定标和外景成像实验表明: 该调光方法在辐亮度为 25.697~260.548 W/m²·sr 区间内具有良好的图像质量, 不仅满足调光速度快、实时性好、适应性强的要求, 而且与无调光模式工作状态比较, CCD 相机的动态范围增大了 20 倍, 满足调光范围宽的要求。

关 键 词: 目标跟踪; 大视场; 电子快门; 无级调节
中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

1 引 言

动态目标跟踪技术已经广泛应用于机载火力控制系统、机载预警系统、弹载系统、战场监视系统和地面警戒系统等大量军事系统中。所谓动态目标跟踪, 就是利用获得的视频图像信息, 自动进行动态目标的检测、识别、定位, 自动控制相机的运动, 跟踪和锁定目标。而实现这一过程的第一步就是要设计出一种可以获得高质量、高帧频的视频图像信息的成像系统。

电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 不但具有体积小、重量轻、功耗小、工作电压低和抗烧毁等优点, 而且在分辨率、动态范围、灵敏度等方面也具有其他器件无法比拟的优越性, 所以 CCD 已经广泛应用到各种高性能的成像系统中。对于动态目标跟踪的成像系统而言, 大视场、高分辨率的成像器件能够极大地提高目标捕获和识别的概率。而目前国内外各大厂商生产的大面阵 CCD, 尽管最大的像元数已经达到了 9k×9k, 但是随着 CCD 像元数的增加, 帧频也无法避免地随之降低, 不能满足对动态目标精确跟踪的要求, 因此, 将多片小面阵 CCD 拼接方法得

到了普遍的采用。将多片小面阵 CCD 拼接的方法既保证了精确跟踪所需的高帧频, 另外, 也满足了大视场、高分辨率的需要。目前面阵 CCD 的拼接方法有很多, 如机械拼接、多镜头拼接、棱镜拼接、反射镜拼接等, 其中棱镜拼接方法具有拼接精度高、拼接效果好、不需要复杂的图像配准处理以及接缝处没有渐晕现象等优势。针对这种拼接结构的相机, 自动调光系统需要具备快速捕获特征参数并及时调整曝光时间的能力。同时对于目标跟踪系统而言, 成像系统需要具备较大的动态范围以满足全天候的需要。目前常用的调光方法多为通过捕获特征值并与参考值比较后, 通过变密度盘、电子快门或增益调节的方法来进行调光; 但是在对特征值的捕获上, 对于宽视场、大面阵的 CCD 成像系统而言, 往往无法满足系统的实时性。为此, 文中提出了一种新的自动调光方法, 在采用电子快门调节方法的基础上, 利用多区域灰度加权的方法提出特征参数, 具有调光速度快、实时性好、适应性强以及调光范围宽的优点。

2 光学拼接原理

光学系统采用分光棱镜对两片面阵 CCD 进

行光学焦平面拼接^[1],即采用分光棱镜把光学成像物镜所成的光学图像均匀地分成两路,形成两个成像效果相同的焦平面(焦平面 1 和焦平面 2),在每个焦平面所对应的不同半视场的位置上各放置一个面阵 CCD,并使两个器件的头尾有效像敏单元“零距离”搭接,其光学拼接原理图如图 1 所示。分光棱镜是实现拼接的关键部件,对分光棱镜的光学材料、透射和反射光波段、分光比例均有一定的要求,尤其是分光棱镜的透射光和反射光光程应尽可能相同,以确保两个 CCD 器件的共面性。CCD 器件在像方光学焦平面处拼接,不仅可以使任意 CCD 的始、末像敏单元位置处搭接,而且可以保证拼接后所有像敏单元上的光照度均匀,不会产生渐变现象。这种拼接方法可以保证在不降低帧频的情况下使成像系统的视场角增加一倍。视场角越大,对动态目标跟踪成功的概率就越高。

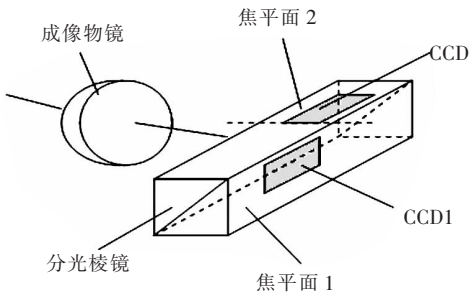


图 1 光学拼接原理图
Fig. 1 Scheme of optical splicing

3 调光方法

通常的自动调光方法是:光圈机械控制或变密度盘、电子快门调节和增益调节^[2-5]。这几种调光方法的控制手段都是通过捕获图像特性参数与参考值比较,然后将映射的调整值送至调光控制系统以弥补二者差异,从而完成调光。就实时处理而言,控制需要与计算出的参数同步,才可以对下一帧图像及时调整。因此,采用电子快门调节完成调光的方法优于采用光圈机械控制或变密度盘控制的调光方法。

3.1 灰度均值的提取

成像系统中由于各种因素的影响,调整后 CCD 接收的照度时常欠饱和或过饱和,因此映射需要具有很好的收敛性以使图像灰度快速收敛至一个固定的灰度期望值。在调光系统中,视频

AD 芯片对 CCD 输出的模拟视频信号进行采样,获得每一帧的图像数据,实际上也就是一个灰度矩阵。调光通常采用取平均灰度的办法,即设取平均灰度结果为 u_0 ,当 u_0 与参考平均灰度 u_A 相等时,表明当前的 CCD 摄像机接收的光照度合适,否则将调整 CCD 电子快门使结果趋近 u_A 。由于 u_A 是一个固定值,如果当背景占据了整个 CCD 靶面的绝大部分、几乎淹没了目标时,无论是亮背景还是暗背景,显然取平均灰度结果 u_A 都将以背景为主,目标不会达到最佳的成像照度^[6]。可见,在这种特殊情况下,传统的平均灰度提取方法不仅不能起到应有的作用,反而会降低欲观察目标的成像效果,因此,灰度值的提取成为能否获得最佳成像照度的关键环节。大视场 CCD 相机由于视场大、数据量大,必然存在大量的背景图像数据,按原有的平均灰度提取方法需要计算大量的数据,而且背景对目标的影响也远远大于其他结构的相机。鉴于相机的特殊结构,本文提出了多区域灰度加权的灰度均值提取方法。

多区域方法是将整个视场划分为几个部分。跟踪过程一般分为两个阶段:目标捕获和目标跟踪。在目标捕获阶段,需要整个视场的图像灰度值满足一定的范围,使跟踪系统能够清晰地整个视场中搜索目标的大概位置。在目标跟踪阶段,目标已经锁定在跟踪波门区域内,一般的跟踪波门都处于中心视场位置,即图像的中心区域,因此,选取跟踪波门内的图像灰度值作为判断依据能够比较准确地为跟踪系统提供良好的跟踪图像。多区域灰度加权方法将整个视场分为左、中、右 3 大部分。中间区域为波门区域,是跟踪的主观察区;左右两部分分别为背景区域。视场多区域划分如图 2 所示。

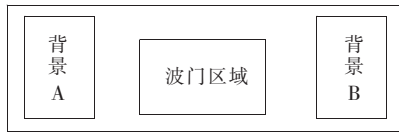


图 2 视场多区域划分
Fig. 2 Partitions of vision field

3 个部分的图像灰度均值可表示为:

$$r_A = \frac{\sum_{j=0}^k n_j \times r_j}{\sum_{j=0}^k n_j} \quad (k = 0, 1, 2 \cdots 1024) \quad (1)$$

其中 r_j 代表图像第 j 级灰度, n_j 是 r_j 的个数。

实际灰度均值应该按多区域期望均值来计算:

$$R_f = t_1 r_1 + t_a r_a + t_r r_r \tag{2}$$

其中 t_1, t_a, t_r 3 个权值系数根据捕获阶段和跟踪阶段人为设定。经过外场试验后,总结的数值详见表 1。

表 1 各区域权值系数

Table 1 Coefficients of different areas

模式	t_1	t_a	t_r
捕获模式	0.3	0.4	0.3
跟踪模式	0.1	0.8	0.1

3.2 光积分时间的计算

对于 CCD 来说,当光照射到 CCD 硅片上时,电子被激发到导带,电子离开后所形成的空穴成为一个带正电的载流子。CCD 在该像元处电极产生高电位,将这些载流子收集存储形成势阱。其光注入公式表示为:

$$Q_{IP} = nq \Delta n_{eo} A T_c \tag{3}$$

式中 η 为材料的量子效率, q 为电子电荷量, Δn_{eo} 为入射光的光子流速率, A 为 CCD 器件受光面积, T_c 为积分时间。

由式(3)可以看出,当 CCD 确定以后,对于每一个像元, η, q, A 均为常量,在光照条件不变的前提下, Δn_{eo} 也为常量,故 Q_{IP} 与 T_c 成线性关系;又因为 Q_{IP} 与 CCD 输出的幅值成线性关系,即与图像的灰度值成线性关系,因此可近似认为 R_f 与 T_c 成线性关系。即:

$$R_f \propto T_c \tag{4}$$

由式(4)可知,在相同的光照条件下:

$$R_{f1}/R_{f2} = T_{c1}/T_{c2} \tag{5}$$

由以上公式及公式成立的前提条件可知:

在 CCD 线性范围内,在光照条件不变的前提下,若已知前一帧图像的灰度均值 R_{f1} 和对应的曝光时间 T_{c1} ,对于期望灰度均值 R_E ,可以计算出其对应的曝光时间 T_E 。

由于本系统中的 CCD 相机在逐行扫描模式下帧频最高可以达到 50 Hz,所以入射光强度的改变相对于 CCD 的频率来说可视为较缓慢的连续变化,可以近似地认为:高速工作的 CCD 在 1~2 帧的范围内入射光强度不变。所以可以将公式(5)作为自动调光改变积分时间的理论基础。

3.3 电子快门无级调节

ICX415AL 是靠电子快门控制信号 SUB 的脉冲个数 N 决定 CCD 的曝光时间^[7,8],在 1 帧工作期间内,CCD 有 625 个行周期,则曝光时间为 $(625 - N - 1) \times T_H$, T_H 为行周期时间。可见 N 越大,CCD 的曝光时间就越短。

为了保证调光算法的准确性,需要人为地对电子快门的控制增加一些附加约束:

(1)参考值范围 r_i

在调光过程中,期望灰度值 R_E 设定为一固定值很容易引起超调震荡,因此在系统设计时采用设定参考值范围 r_i 来避免震荡,即期望灰度值在 $(R_E - r_i, R_E + r_i)$ 区间内。 r_i 的选择不应太大或太小,范围太大对外界图像变化感应不敏感,太小则容易引起超调震荡,通过实验得出:按 10 位数据量化时,最佳期望灰度值范围为(500,700)。

(2)调光判定保持时间 T_h

对高帧频的 CCD 进行调光时要考虑到人眼和调光时间的适应关系,如果每帧均判定一次,则在系统照射明暗变化较大的景物时,图像很难达到稳定,因此需要一个调整判定时间。在系统中一般采用 4 帧时间调整一次,既保证图像稳定,又可以很快地参照外部景物对 CCD 电子快门进行调整。

3.4 算法流程

电子快门无级调节算法流程如图 3 所示。

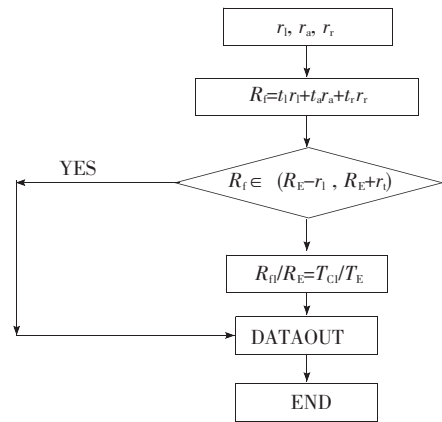


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

4 实时自动调光硬件实现

FPGA 采集 10 位 CCD 相机图像数字信号

后,将利用内置 RAM,采用乒乓缓存结构,对双 CCD 图像数据进行缓存并计算。对于面阵 CCD 而言,一般采用将 1 帧图像进行缓存后再输出的方式。在这种缓存方式下,就 50 帧/s 的 CCD 相机来说,若相机载体运行速度为 300 m/s,则以“帧”为单位缓存会延迟 1 帧时间,即 20 ms,物体此刻延迟位移为 6 m,这样对目标捕获会有很大

影响,所以在设计中采用以“行”为单位进行缓存后输出,这就要求 CCD 光学拼接的过程中,要保证两个 CCD 水平方向上行与行严格对齐。就 ICX415AL 而言,相机工作在逐行扫描模式下,以“行”为单位进行缓存仅仅延迟 32 μs ,极大地增强了自动调光的实时性。图 4 为内置 RAM 乒乓结构仿真时序图。

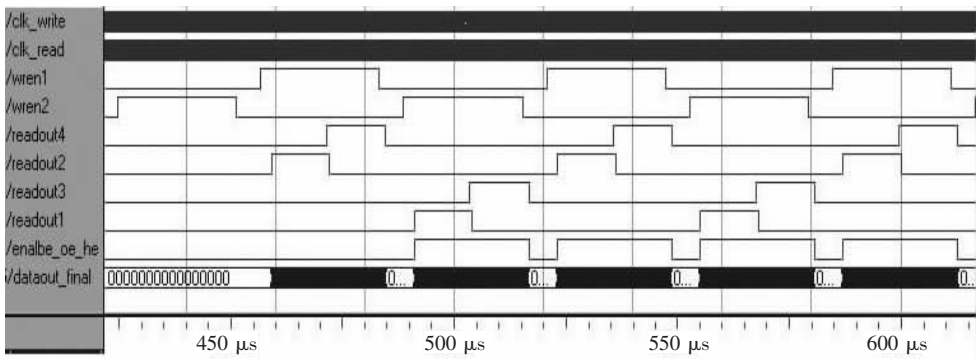


图 4 内置 RAM 乒乓结构仿真时序图

Fig. 4 Timing simulation of RAM with ping-pang structure

5 实 验

5.1 辐射定标试验

辐射定标的任务就是建立成像系统输入的辐亮度和输出的图像数码值之间的定量关系,从而确定 CCD 相机的动态范围。在无调光模式和自动调光模式下,对 CCD 成像系统做了几组实验,抽取了一些数据。为了更直观地说明问题,对抽取的数据进行了统计和线性拟合。线性拟合结果如图 5、图 6 所示。

从图中可以看出:

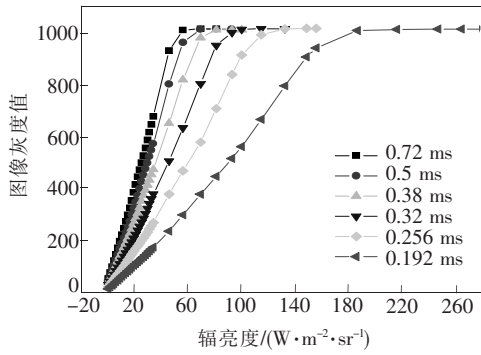


图 5 无调光模式定标数据线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting result of scale experiment data without light control

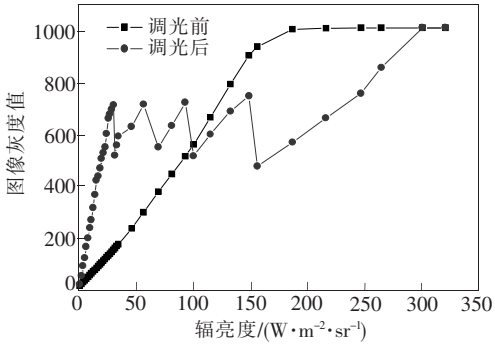


图 6 自动调光模式定标数据线性拟合结果

Fig. 6 Linear fitting result of scale experiment data with light control

(1) 在不同的曝光时间下,面阵 CCD ICX415AL 的响应度是线性的,满足成像要求和自动调光的线性条件。

(2) 自动调光模式下,成像系统在辐亮度为 300 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 左右时,图像灰度值仍然在 800 左右,没有饱和。而夏季正午的辐亮度一般在 250 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 左右,此时图像灰度值在 760 左右适合捕获和跟踪目标,保证了系统满足全天候工作需要。

(3) 通过对数据的整理,得出在不同曝光时间下,图像数据满足期望灰度均值所对应的辐亮度

范围如表 3 所示。由此得出结论:工作在调光模式下的成像系统在辐亮度为 25. 697~260. 548 W/m² · sr 时,图像灰度均值都在 500~700 之间,适合捕获或跟踪目标。在调光模式下,CCD 相机动态范围比无调光模式增大 20 倍。

表 3 辐亮度范围

Table 3 Ranges of the radiation luminance	
曝光时间(ms)	辐亮度范围(W · m ⁻² · sr ⁻¹)
0. 72	31. 886~40. 587
0. 5	36. 861~46. 566
0. 38	43. 793~54. 885
0. 32	53. 498~68. 749
0. 256	71. 522~88. 159
0. 192	103. 472~129. 754
自动调光	25. 697~260. 548

5.2 外景成像实验

CCD 相机工作在无调光模式下,外景图像如图 7 所示。



图 7 调光前外景图像
Fig. 7 Image without light control

CCD 相机工作在调光模式下,外景图像如图 8 所示。



图 8 调光后外景图像
Fig. 8 Image with light control

比较两幅图像可以看出,调光后图像质量高于调光前,图片下方景物能够观察清楚,且图像整体的对比度也好于调光前。

6 结 论

针对大视场跟踪相机数据量大,背景图像多的特点,提出了一种多区域加权的自动调光方法,并利用 FPGA 内置 RAM,通过乒乓结构,为调光方法的实时性实现搭建了良好的硬件平台,使图像数据延时缩短到 32 μs,很好地满足了目标跟踪的需要。通过对 CCD 相机进行的辐射定标实验,验证了 CCD 相机在自动调光模式下,即当辐亮度在 25. 697~260. 548 W/m² · sr 时,具有良好的图像质量,图像灰度值都在 500~700 之间。CCD 相机的动态范围较之无调光工作模式增大 20 倍,可以满足在不同天气条件下目标跟踪的需要。

参 考 文 献:

[1] 李国宁,刘妍妍,金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统 [J]. 光学 精密工程,2008,16(3):558-563.
[2] 关澈,王延杰.CCD 相机实时自动调光系统 [J]. 光学 精密工程,2008,16(2):358-366.
[3] Kuno T, Sugiura H. A new automatic exposure system for digital still cameras [J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics,1998,44(1):192-199.
[4] Zhang C H, You Z H, Yu SH J. An automatic exposure algorithm based on information entropy [J]. SPIE,2006, 6357:63570Q1-63570Q5.
[5] 胡炳梁,马彩文,孙益善,等. CCD 自动调光设计 [J]. 光子学报,2002,31(4):504-506.
[6] 苏宏武,杨小君,李哲,等. 基于平均和峰值灰度加权的自动调光系统 [J]. 光子学报,2006,35(1):158-160.
[7] 金龙旭,吕增明,熊经武. CCD 摄像机全自动调光系统 [J]. 光学 精密工程,2002,10(6):588-591.
[8] 王庆有. 图像传感器应用技术 [M]. 北京:电子工业出版社,2006:343-414.

Method and Realization of Auto Light Control of Large Visual Field CCD Camera Used in Target Tacking

ZHANG Yu^{1,2}, ZHAO Gui-jun³, LI Guo-ning¹,
JIN Long-xu¹, REN Jian-yue¹, LV Zeng-ming¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: zhangyu004115@126.com;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Shenyang Military Delegation Agency, General Equipment Department, Shenyang 110013, China)

Abstract

According to the special structure of the large visual field CCD camera used in moving target tacking, a new method based on adjusting the electronic shutter steplessly is proposed to get the high quality image. Through adjusting the exposal time in real time, we could make the light adjusting fast and accurately. To draw the gray scale of the image, this paper put forward a new method named the gray scale weighting of different regional. Since the large visual field CCD camera has a lot of background image data, it will bring much influence to the auto light control. The new gray scale drawing method which is advanced in writing could eliminate the influence. Using the RAM of FPGA, the system ensured that the light-adjusting arithmetic could work in real time by the ping-pang buffer usage strategy. The radiation scale and the result of location experiment indicated that the method could offer best image quality when the radiant luminance is from $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ to $260 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$. The dynamic range of the new system had increased 20 times compared with that of the system without the auto light control. The new method satisfied not only the requirment of the wide dynamic range, but also the fast speed, the real-time, and the good adaptability.

Key words: target tacking; large visual field; electronic shutter; stepless adjustment

作者简介:张宇(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事 CCD 图像采集与处理方面的研究。