

CIS 实时多帧组合方法研究与设计

胡燕翔^{①②} 姚素英^① 徐江涛^①

^①(天津大学ASIC设计中心 天津 300072)

^②(天津师范大学计算机与信息工程学院 天津 300074)

摘要: 多帧组合是扩展CMOS图像传感器(CMOS Image Sensor, CIS)动态范围的有效方法。在已流片成功的CMOS图像传感器基础上对实时多帧组合方法开展研究,提出一种实时自适应控制与多次采样组合相结合的控制方法。通过获取加权光强平均值以及饱和像素数目和严重欠曝光像素的数目,对场景光强进行评价,对采样控制方式、次数和积分时间和组合算法进行实时控制,完成30万像素版图设计验证和FPGA验证。模拟仿真结果证明该方法的实时性和有效性。

关键词: CMOS图像传感器; 动态范围; 积分时间; 实时多帧组合

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2279-04

Research and Design on CIS Real-Time Multi-Capture

Hu Yan-xiang^{①②} Yao Su-ying^① Xu Jiang-tao^①

^①(ASIC Design Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

^②(Computer Engineering School, Tianjin Normal University, Tianjin 300074, China)

Abstract: Multi-capture composition is a valid method on extending the dynamic range of CMOS image sensor (CIS). In this paper, multi-capture composition using in real-time control is studied. By acquired the average value of all pixels, the number of saturated pixels and severe underexposure pixels, the control mode, the number of exposure, integrating time of each exposure and composition algorithm is determined in real-time. This method has been implemented in a 640×480 CIS and simulated with FPGA. The simulated result indicates this method can extend the dynamic range effectively.

Key words: CIS; Dynamic range; Integrating time; Real-time multi-capture composition

1 引言

与CCD图像传感器相比,CMOS图像传感器具有集成度高、读出速度快、功耗低、价格低等优点,在手持移动设备以及嵌入式应用等领域应用非常广泛。但是其最显著的缺点是动态范围较小,导致CMOS图像传感器不能直接用于对比度很强的场合。对此已经提出了多种方法来扩展CIS的动态范围,包括阱容量调整、多次采样组合、饱和时间检测、空间变化曝光、对数传感器以及局部自适应曝光等。除多次采样组合之外,其他的方法都只能在高亮度一端扩展动态范围。多次采样组合方法通过修正双采样的方法有效抑制固定模式噪声和复位噪声,从而在低亮度一侧扩展动态范围,同时不影响彩色图像的颜色还原处理,因此被认为是一种较好的方法^[1]。但是多次采样组合方法对电路实现有着很高的要求: CIS具有非破坏性读出结构,同时具有很高的读出帧频和处理速度。目前对于该方法的实时实现研究尚未达到令人满意的程度。

天津大学ASIC设计中心目前已经完成了0.35μm工艺,

30万和80万像素CIS的版图设计和验证,其最高采样频率大于300帧/秒; 64×64像素阵列的CIS样片流片获得成功,实测的动态范围大于60dB。以此为基础,本文对多次采样组合方法中入射光强度评估、控制方式选择、多次采样组合中采样次数与积分时间的确定等问题开展研究,提出一种实时自适应控制与多次采样组合相结合的控制方法。与已有方法相比较,这种方法具有易于实用、速度快的特点,通过调整预定义的光强评价范围,可以动态调整CIS的动态范围性能。模拟仿真结果表明其能够显著扩展CIS的动态范围。

2 多次采样组合

使用多次采样组合的目的在于使用不同长度的积分时间获得不同强度范围入射光的细节,即对于低光强的入射光使用较长的曝光时间,而高光强的入射光使用较短的曝光时间。

对于多次采样组合方法,需要解决以下几个关键问题:

(1)入射光强度(incident illumination density)的获得和评价;

(2)在需要多次采样的情形下,多次采样的次数和各次采样的时间点应当如何分布;

(3)对于通过多次采样获得的多幅图像,应当如何将其组

2006-03-23 收到, 2006-08-25 改回

国家自然科学基金(60576025)和天津市高等学校科技发展项目基金(033183911)资助课题

合来尽可能扩展动态范围，同时保持足够高的对比度。

在实时应用中，对于以上几个问题的研究尚未达到实用的程度。文献[2]给出了一种使用两帧组合来扩展动态范围的方法：首先使用一个预定义的长积分时间 T_{low} 来获得图像的低光强部分，然后使用较短的积分时间 T_{high} 来获得图像的高光强部分，最后将两帧图像组合成为最终的输出。由于长短积分时间的比例和具体图像的光强没有直接关系，因此无法准确再现真实的原始图像。文献[3]对多次采样的曝光时间点分布进行了讨论。在假设入射光概率强度函数完全已知的前提下给出了以达到平均最大信噪比为目的的曝光时间调度算法，但是这种算法过于复杂，无法具体应用。文献[4]对多次采样的最优组合算法进行了讨论。通过饱和和检测获得每个像素点处的光电流，然后通过一种迭代算法获得该像素的最佳非饱和值。由于检测和计算是在像素一级进行的，实现过于复杂，无法实用。

3 场景光强信息的获取与评价

入射光强度信息的获得是判断是否调整积分时间的关键。对于这一问题大多采用取平均值的方法^[5]。在这种方法中，对图像的所有像素值累加取平均值，如果平均值与测量范围的中间值相差超过一个给定的阈值，则减少积分时间，否则增加积分时间。目前CIS的图像尺度越来越大，如果对所有像素值全部累加取平均值，则这部分处理电路会使芯片的速度、填充因子将大大下降，而功耗显著增加。本文提出一种新的入射光评价强度计算方法，在准确反映图像的范围信息、减少计算量的同时，突出了用户“关注区域”的比例，提高成像品质。

图1给出了 16×16 像素入射光强度采样点的分布示意。如图所示，越靠近图像的中心，则采用点的分布越密集，越靠近图像的边缘，则分布越稀疏。对于观察者来讲，对图像不同区域的兴趣程度是不同的，通常图像中心受关注的程度最高，而图像边缘的轻微模糊是可以接受的。采用这种方法以后可以大大减少计算量。对于上面 16×16 像素的图像，在不考虑存储的情况下，如果每个像素都参加统计，则采用行共用结构需要完成247次加法和移位；而如果采用图1所示的方案，则加法和移位的次数不超过60次，运算量只有原来的四分之一。

使用全部采样点的算术平均值来评价整幅图像的入射光强度同样存在问题。如果观察目标是一个位于黑暗背景之中的较亮目标，则可能由于整幅图像的范围平均值较低反而

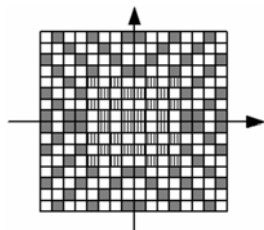
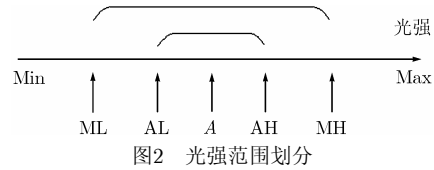


图1 16×16 像素图像入射光强度采样点的分布

延长积分时间。因此对于不同区域的强度值不能简单地算术平均，而是应当采用加权平均的方法，以此来突出图像中心部分的亮度状况。

除此之外还需要获得下面两个特征值：饱和像素的数目 N_s 和严重欠曝光像素的数目 N_n 。之所以需要获得这两个数据，因为只靠平均强度一个值不能够完全准确地反映光照强度，例如，在具有阴影和阳光的强对比场景中，平均强度与强度中间值相差并不大，但可能同时存在严重的超饱和区域和欠曝光区域，此时仅仅依靠积分时间的调整已经无法改善图像的质量，而是应当采用多帧组合的措施。此外给定4个值AL, AH, MH, ML作为判断是否调整积分时间以及是否采用多次采样组合的依据。



在图2中，A表示像素强度的中间值。确定CIS积分时间的原则如下：

- (1)当强度平均值 V 处于 $[AL, AH]$ 之间，且 N_s 和 N_n 均不超过规定的上限，CIS工作于积分时间不变阶段；
- (2)如果在 $[ML, AL]$ 和 $[AH, MH]$ 之间，且 N_s 和 N_n 均不超过规定的上限；或小于 ML 且只有 N_n 超限，或大于 MH 且只有 N_s 超限，CIS工作于积分时间自适应调整阶段；
- (3)在其他情况下需要采用多帧组合。

光强范围判定值AL, AH, MH, ML与应用要求直接相关，同时也与传感器本身的动态范围和噪声水平有关。如果 $[ML, AL]$ 和 $[AH, MH]$ 过小，则会使得积分时间频繁调整，增加功耗；如果过大则不能及时对光强变化做出反应。一般情况下将 $[ML, AL]$ 设置为动态范围的80%左右， $[AH, MH]$ 设置为动态范围的60%左右较为适宜。

4 采样次数及采样时间点的调度

在采用多次采样组合生成大动态范围图像的过程中，如何选择曝光次数以及各次曝光时间的长短对于组合算法的确定以及成像质量有着很大的影响。但是目前对于这个问题的研究较少。文献[1,6]使用积分时间按指数增加的方案，其他一些研究^[7,8]则将积分时间按等间距分布。显然这些方法只是考虑了电路实现的简便，而没有考虑场景光强与组合算法的要求。

4.1 曝光次数的确定

显然如果采样次数越多，则入射光强度的范围划分越小，最终获得的细节越丰富。但实际使用帧频以及处理电路的限制使得每幅图像的采样次数不能太大，同时采样次数越多则组合过程也越长，因此采样次数必须加以限制，同时研究结果^[4]表明当采用次数大于4帧后对于最终图像信噪比的提高已相对不明显。综合CIS的设计帧频、实际最低要求帧

频和电路实际的处理速度, 确定采样次数的规则为:

(1)如果 N_n 和 N_s 都超过规定的上限, 平均值在 $[ML, MH]$ 之间, 则采样3次, 一次采样中等光强, 一次采样低光强, 一次采样高光强;

(2)如果平均值低于 ML 且 N_n, N_s 超过规定上限, 采样3次, 两次低光强, 一次高光强;

(3)如果平均值高于 MH 且 N_n, N_s 超过规定上限, 采样3次, 两次高光强, 一次低光强。

4.2 采样时间的选择

显然饱和像素点 N_s 的大小和所有像素中超饱和光电流的程度是成正比的, 因此可以通过 N_s 来获知最大场景光强的信息。由于自然界光强变化的连续性, 认为超饱和的光强范围与 N_s 成线性关系, 如图3所示。

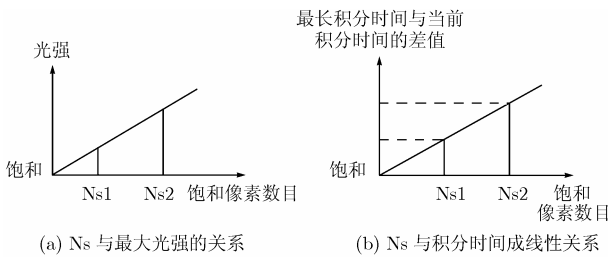


图3 N_s 与最大光强及 N_s 与积分时间的关系

在图3(a)中, 纵轴的原点代表在现在积分时间下达到饱和的光强, 显然, N_s 越大, 则场景之中的最大光强越大。图3(b)说明了 N_s 与对应积分时间的关系, 这里纵轴表示最长积分时间与当前积分时间的差值(表示为 T_t), 显然 N_s 最大, 则积分时间越短。因此使用下面的公式来计算获得最大光强的积分时间:

$$T_t = \begin{cases} K \cdot T_c \cdot (1 - (N_s - N_{sd}) / P_{total}), & T_t \geq T_{min} \text{ 且 } N_s \geq N_{sd} \\ T_{min}, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中, T_{min} 为CIS正常工作的最小时间, 即相邻两帧的最小间隔, N_{sd} 表示饱和像素 N_s 的规定上限, P_{total} 表示一帧中像素的总数。

如果饱和像素数量比较大, 则意味着超饱和的光强范围也比较大, 需要在高光强区域进行两次采样, 其对应的时间点分别为:

$$T_{t1} = \begin{cases} K \cdot T_c \cdot (1 - (N_s - N_{sd}) / P_{total}), & T_t \geq T_{min} \\ T_{min}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{t2} = \begin{cases} T_c - (T_c - T_{t1}) / 2 = (T_c + T_{t1}) / 2, & T_{t1} \geq T_{min} \\ T_{min} / 2, & \text{其他} \end{cases}$$

下面的公式用于计算获得最弱光强的积分时间:

一次采样:

$$T_{t1} = \begin{cases} K \cdot T_c \cdot (1 + (N_s - N_{sd}) / P_{total}), & T_{t1} \leq T_{max} \\ T_{max}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

二次采样:

$$T_{t1} = \begin{cases} K \cdot T_c \cdot (1 + (N_s - N_{sd}) / P_{total}), & T_t \leq T_{max} \\ T_{max}, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{t2} = \begin{cases} T_c - (T_c - T_{t1}) / 2 = (T_c + T_{t1}) / 2, & T_{t1} \leq T_{max} \\ T_{min} / 2, & \text{其他} \end{cases}$$

对于中等光强的采样, 该方法能够有效地进行场景光强的评价而不受 N_s, N_d 的影响。

多次采样的组合算法实质上是多条不同斜率的直线组合为一条分段折线, 各条直线的积分时间不同。分段直线的弯折点根据各条直线的积分时间比例确定, 相当于将长积分时间图像的低光强部分和短积分时间的高光强部分映射压缩至折线的各段。为了加快组合运算的速度, 只需完整的保存第一次采样值, 在读出后继采样的同时通过移位拼接完整组合。

5 电路结构

CIS采用列并行滚筒式处理, 主时钟为40M, ADC为20M, 芯片结构如图4所示。这种结构可以有效减少像素处理电路的面积, 同时保证处理速度和帧频。列并行结构中同一列的像素分享同一个处理电路, 即以每一行为一个单位, 在时钟的控制下逐行操作, 而同一行中的像素并行进行积分、放大、AD转换, 与此相对应, 入射光强度的评价也采用以行为单位的计算方式, 每一行的光强信息直接随同本行的数据送入后端控制器中。如果不需要多次采组合, 则整帧数据经缓冲后送入后端显示设备; 如果需要采用多次采样组合, 则首先存入CIS控制器之中的缓冲区, 由组合算法实现模块处理后输出。

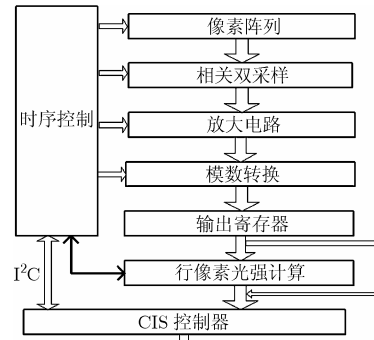


图4 CIS 总体架构

对于像素阵列为 640×480 的CIS, 实际电路的AD时间约500个时钟周期, 一行像素的顺序读出时间为640个时钟周期。如果使光强计算和像素读出串行进行, 则AD转换在完成一行的处理后至少需要等待(640个时钟周期+行光强计算时间)之后才能输出下一行的转换结果。为了使场景光强的计算不影响图像采样的实时性, 在电路设计中使用双倍宽度的端口, 一行的读出时间减少为320个时钟周期, 使得AD对下一行的转换不受输出的限制, 同时空余出约200个时钟周期供行光强平均值计算使用。在行光强平均值的计算中采用流水线, 在提高采样率的同时达到减少面积和功耗的目的。

由于是列共用方式,行之间的读出是完全串行的,因此整帧平均值的计算在读出的同时完成,因此场景光强信息的获取无需额外的单独处理时间。在多次采样组合的情况下,场景光强的计算只对中等强度下的采样进行,这是通过图中行寄存器和CIS控制器之间的直接通路来实现的。采样时间的计算在CIS中的控制器模块完成,通过I²C总线写入积分时间寄存器来控制整帧的积分时间。多次采样后的组合计算也是随着各帧的获得而串行获得。

已经设计、验证完成的0.35 μm CMOS工艺的30万像素CIS版图如图5所示。芯片面积约为2.5 \times 3mm,填充因子为48%。

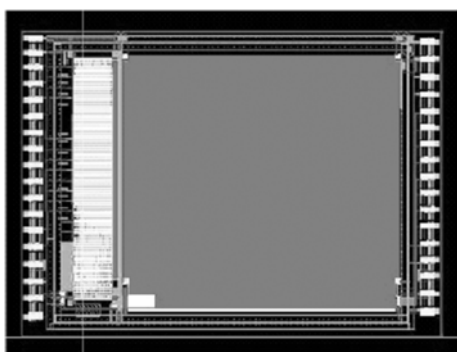


图5 640 \times 480 CIS设计版

6 试验结果和结论

为了验证设计的正确性和有效性,使用FPGA构造了一个模拟测试环境。根据控制方案将几种典型场景光强的数字化图像^[9]保存于一片FPGA中,此FPGA根据得到的积分时间对每个像素进行线性的调整并输出;另一片模拟CIS的控制部分,一次读取各行的像素值并执行相应的计算、控制和组合,最终的图像通过接口传至微机进行显示,同时可通过软件调整各个控制参数的大小。图6和图7分别给出积分时间自动调整和多次采样组合的前后对比结果。

本文针对CIS多帧组合方法开展研究,提出了一种实时的实现方法。在场景光强的评价中,通过获取超饱和像素点和严重嵌饱和像素点的数目,结合亮度平均值对场景光



图6 原始图像与积分时间自动调整后的图像



图7 原始图像与多帧组合处理后的图像

强进行评价,避免了强对比度情况下的反向调节现象;用户可以根据实际使用情况动态调整光强评价范围,在图像质量和功耗之间取得平衡;根据评价结果采取积分时间自适应调整或多帧组合的方法,采样时间根据场景光强信息实时确定。在电路结构设计中充分考虑了实时性的要求。通过FPGA仿真证明了该方法的正确性和实时性。

参考文献

- [1] Yang D and Gamal El. Comparative analysis of SNR for image sensors with enhanced dynamic range[C]. Proceedings of SPIE, San Jose, CA, USA, 1999, vol. 3649: 197-211.
- [2] Bo-Rong Lin, Shi-Yu Huang, and Cheng-Hsiao Lai, *et al.* A high dynamic range CMOS image sensor design based on two-frame composition[C]. IEEE International SOC Conference, Portland, CA, USA, 2003: 389-392.
- [3] Chen-Ting and Gamal El. Optimal scheduling of capture times in a multiple capture imaging system[C]. Proceedings of SPIE, San Jose, CA, USA, 2002, Vol. 4669: 288-296.
- [4] Xinqiao Liu and Gamal El. Synthesis of high dynamic range motion blur free image from multiple captures[J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2003, 50(4): 530-539.
- [5] Yun Ho Jung, Jae Seok Kim, and Bong Soo Hur, *et al.* Design of real-time image enhancement preprocessor for CMOS image sensor[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2000, 46(1): 68-75.
- [6] Yang D, Gamal El, and Fowler B, *et al.* A 640 \times 512 CMOS image sensor with ultra-wide dynamic range floating-point pixel level ADC[J]. *IEEE Trans. on Solid-State Circuits*, 1999, 34(12): 1821-1834.
- [7] Liu X and Gamal El. Photocurrent estimation from multiple non-destructive samples in a CMOS image sensor[C]. Proceedings of SPIE, San Jose, CA, USA, 2001, vol. 4306: 450-458.
- [8] Handoko D, Kawahito S, and Takokoro Y, *et al.* A CMOS image sensor for focal-plane low-power motion vector estimation[C]. Symposium of VLSI Circuits, Hawaiian, USA, 2000: 28-29.
- [9] Gamal El. High dynamic range image sensors[EB/OL]. www-isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_pub/isscc_02_tutorial.pdf.

胡燕翔: 男, 1969年生, 在站博士后, 副教授, 研究方向为高性能VLSI设计/EDA技术。

姚素英: 女, 1947年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为VLSI设计、半导体器件及MEMS技术。

徐江涛: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为VLSI设计。