

文章编号:1007-2780(2013)04-0615-05

CFA 图像实时插值在 FPGA 上的应用

王增发, 孙丽娜

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 航空光学成像与测量重点实验室,
吉林 长春 130033, E-mail:erwin1023@163.com)

摘 要: 彩色滤波阵列(CFA)格式的图像需要进行图像插值,才能获得全彩色图像。但是,对 CFA 图像进行色彩还原选用算法越复杂,插值产生的图像质量越高,但复杂的算法,较长的处理时间不便于硬件实现,为实时处理带来不便。文章介绍了双线性插值法和边缘定向插值法两种色彩还原算法,并用硬件平台 FPGA 实现了双线性插值方法和基于边缘定向的方法,并用黑白条纹图对两种还原方法进行了比较分析,基于边缘定向的插值方法考虑了边缘的方向,防止跨越边界插值,因此插值效果优于双线性插值法,虽然算法复杂一些,但是合理设计 FPGA 的缓存模块,采用并行流水的处理方式,完全满足工程对实时性的要求。

关 键 词: CFA 图像;双线性插值;边缘定向插值

中图分类号: TP391 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20132804.0615

Application of CFA Images Interpolation Algorithm in FPGA Real-Time System

WANG Zeng-fa, SUN Li-na

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail:erwin1023@163.com)

Abstract: The color filter array (CFA) format image needs to interpolation to obtain the full color image. However, the interpolation algorithm of the CFA image is more complex, the image quality is higher, but the complexity algorithm will take more time to implementation, and it is inconvenient for real-time processing. This paper introduces two interpolation algorithm: the bilinear interpolation and edge oriented interpolation, and uses the FPGA hardware platform to realize the bilinear interpolation algorithm and the edge orientation algorithm, and analyzes two kind of algorithm with black and white stripes image. Considering the edge direction, the edge oriented interpolation algorithm prevents the border interpolation, so the interpolation effect is better than that of the bilinear interpolation algorithm. Although the algorithm is some more complex, the optimized design of FPGA cache module, using parallel and pipeline processing mode, will fully meet the real-time requirements of engineering.

Key words: CFA images; bilinear interpolation; edge gradient interpolation

收稿日期: 2012-11-26; 修订日期: 2013-03-04

基金项目: “973”国家自然科学基金项目(No. 2009CB72400607)

作者简介: 王增发(1980—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事航空成像测量设备的研制工作。

1 引 言

随着科技的发展,数字彩色 CCD 的应用越来越广泛,不论是在军事领域还是在民用领域,单 CCD 构成的彩色摄像机广泛应用于图像采集系统^[1-3]。在其输出的彩色滤波阵列(Color Filter Array, CFA)格式图像中,每一个型的颜色滤波阵列,由于 Bayer 型颜色滤波阵列有很好的彩色信号敏感特性和彩色恢复特性^[4-5],被广泛地应用在各种图像传感器上。

近年来,基于 CFA 图像的彩色复原算法的研究越来越多,包括非自适应算法和自适应算法两大类^[6],一般来说,选用方法越复杂,插值产生的图像质量越高,但这需要较长的处理时间,为实时处理带来不便。很难满足工程中对实时性的要求。而便于硬件实现的常用方法有以下几种:双线性法、色比恒定法和基于梯度的算法^[7]。

颜色插值是图像后处理中的关键技术,寻找一种适合数字图像采集系统使用的,在处理速度和成像质量方面均达到要求的插值方法就显得十分必要,本文在 FPGA 硬件平台上,针对有效像素数为 1 024(H)×1 024(V),帧频为 30 Hz,像素时钟为 45 MHz,像素深度为 12 bits,Camera Link 输出的图像数据采用两种插值方法进行实时还原,满足工程对图像的实时处理要求,并对两种算法的复杂度及色彩还原质量进行了分析。

2 插值算法

2.1 双线性插值

双线性插值法(bilinear interpolation)^[8]利用相邻像素域中同色分量的平均值作为当前像素的待求颜色分量,属于单通道独立插值法,是最简单、最基础的插值算法之一。它是理解并设计其他新算法的基础,对评估新算法的性能有着较广泛的参考价值。该算法每个像素位置上所缺失的颜色分量由 3×3 领域内具有相同颜色的像素平均而得。参考图 1,在位置(2,2)处只有红色分量信息,用双线性方法计算该像素三基色分量公式如下:

$$\begin{aligned} r_{22} &= R_{22} \\ g_{22} &= \frac{G_{12} + G_{32} + G_{21} + G_{23}}{4} \\ b_{22} &= \frac{B_{11} + B_{13} + B_{31} + B_{33}}{4} \end{aligned}$$

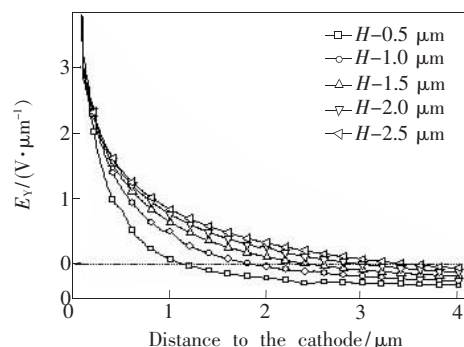


图 1 Bayer 格式模板

Fig. 1 Bayer pattern template

像素点(2,3)处的情况有所不同,在该点处只有绿色分量信息,用双线性方法计算该像素三基色分量公式如下:

$$\begin{aligned} r_{23} &= \frac{R_{22} + R_{24}}{2} \\ g_{23} &= G_{23} \\ b_{23} &= \frac{B_{13} + B_{33}}{2} \end{aligned}$$

r_{xy}, g_{xy}, b_{xy} 表示在位置 (x, y) 处像素的三基色值, R_{xy}, G_{xy}, B_{xy} 表示在 (x, y) 处的原始数据,下同。

双线性插值是最简单的 Bayer 插值方法,始终使用 3×3 的平均值滤波器,在图像的平滑区域内这些算法工作的很好,但是对于边缘和纹理较多的图像区域其恢复出的图像效果并不理想,边缘失真较明显,纹理表现不够准确。

2.2 基于梯度算法的改进

插值算法改进的总体思路:双线性插值算法简单,容易实现,且具有较好图像局部一致性,可以作为整个插值算法的基础;另外针对双线性插值算法的不足,根据 Bayer 格式的图像特点,对占图像总像素一半的 G 通道像素采用梯度算法进行还原,即在恢复绿色分量 G 时,先通过计算梯度来检测边界方向,从而选择合适的插值方向,保证插值算法沿着边界进行,而不会跨越边界。由于 G 通道的像素占图像总像素的一半,因此如果 G 分量的插值方法选择的好,不仅会提高 G 分量的图像质量,而且对 R、B 分量的插值有很大的帮助。通过这样的改进,使恢复出来的图片比双线性法有更好的边缘平滑度和色彩对比度,不仅可以较好地恢复彩色图像,而且算法复杂度也不高,非常适合在 FPGA 上实现。

以图 1 位置为(2,2)的绿色分量 G 为例,具

体的实现过程如下:

2.2.1 对绿色分量 G 的恢复

设 α 为该点水平方向的梯度, β 为竖直方向的梯度, 通过计算亮度分量的一阶微分来确定该点可能的边界方向, 其中:

$$\alpha = |G_{12} - G_{32}|$$

$$\beta = |G_{21} - G_{23}|$$

如果 $\alpha < \beta$, 则认为水平方向存在边界的概率比较大, 插值会沿着水平方向进行, 插值公式如下式所示:

$$g_{22} = \frac{G_{12} + G_{32}}{2}$$

如果 $\alpha > \beta$, 则认为水平方向存在边界的概率比较大, 插值会沿着水平方向进行, 插值公式如下式所示:

$$g_{22} = \frac{G_{21} + G_{23}}{2}$$

当 $\alpha = \beta$ 时, 则认为该插值点处在一个平滑的区域内, 插值结果为:

$$g_{22} = \frac{G_{21} + G_{23} + G_{12} + G_{13}}{4}$$

2.2.2 对蓝色分量 B 的恢复

对蓝色分量的边缘进行检测, 来判断插值沿着哪个方向进行, 然后再计算它的值, 具体方法如下:

$$b_1 = \text{abs}(b_{13} - b_{11})$$

$$b_2 = \text{abs}(b_{13} - b_{33})$$

$$b_3 = \text{abs}(b_{33} - b_{31})$$

$$b_4 = \text{abs}(b_{31} - b_{11})$$

$$B_{22} = \begin{cases} (b_{13} + b_{11})/2 & b_1 = \min(b_1, b_2, b_3, b_4) \\ (b_{13} + b_{33})/2 & b_2 = \min(b_1, b_2, b_3, b_4) \\ (b_{33} + b_{31})/2 & b_3 = \min(b_1, b_2, b_3, b_4) \\ (b_{33} + b_{31})/2 & b_4 = \min(b_1, b_2, b_3, b_4) \end{cases}$$

2.2.3 对红色分量 R 的恢复

红色分量 R 不变, 继续使用原先值 $R_{22} = r_{22}$ 。

3 利用 FPGA 进行算法实现

无论是双线性插值算法还是边缘定向插值算法, 计算一个像素点的三基色分量都需要用到邻近行的像素值, 如果对整帧图像进行缓存, 则硬件开销大, 而且有一帧的延时, 降低了实时性^[9-11]。根据双线性插值算法和边缘定向插值算法都是基于 3×3 模板计算, 计算一个像素点最多用到相邻

三行内的像素数据, 因此合理设计图像缓存模块和插值算法, 只需缓存三行数据, 即可完成图像色彩插值。

本文 FPGA 采用 Xilinx 公司 XC3S400, CCD 摄像机为 UNIQ 公司的 UC1830CL。FPGA 的整个设计采取自顶向下的模块化设计方法, 系统的一级框图如图 2 所示。

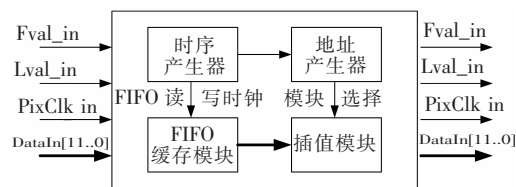


图2 色彩还原一级框图

Fig. 2 Demosaicking primary flow diagram

3.1 FIFO 缓存模块

图像数据采用 FPGA 内部自带 FIFO 进行缓存, 3 个 FIFO 组成链式结构, 图像数据的缓存和处理采用并行流水线的结构, 如图 3 所示。

图像数据行有效信号做 FIFO 的写使能信号, 下一个行有效信号使能读出数据, FIFO 数据在读出的同时写入下一个 FIFO, 每个 FIFO 都可以在读一行数据的同时写另一行图像数据。FIFO 的读写时序如图 4 和图 5 所示。由图 4 可

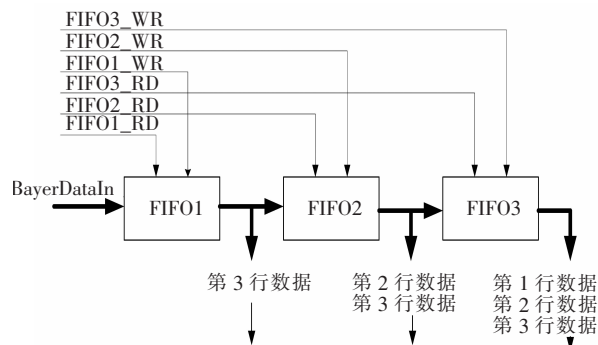


图3 FIFO 缓存数据模块示意图

Fig. 3 FIFO data buffer module sketch map

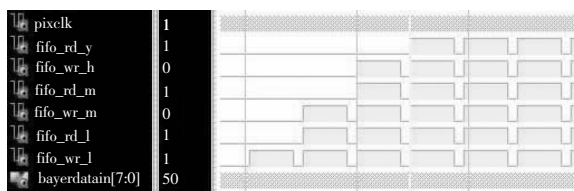


图4 FIFO 读写仿真时序图

Fig. 4 FIFO read and write emulation timing sequence diagram

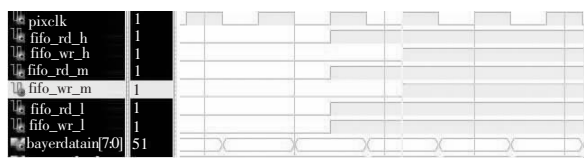


图 5 FIFO 读写仿真时序局部放大图
Fig. 5 FIFO read and write emulation timing sequence amplified diagram

以看出,每个 FIFO 的写、读使能信号都相差一个行周期,图 5 表明后一个 FIFO 的写使能信号比前一个 FIFO 的读使能信号晚了一个像素时钟周期。在每一帧的第三行开始同时读取 3 个 FIFO 的图像数据进行插值运算。

3.2 插值模块

从第三个行有效信号开始同时读取 3 个 FIFO 的数据,并根据像素时钟依次缓存在 3×3 模板里,如图 6 所示。

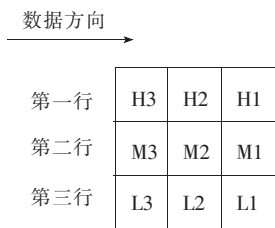


图 6 插值模块 3×3 模板
Fig. 6 Interpolation module 3×3 template

插值模块是以图 1 所示的 Bayer 模板为标准进行,根据 Bayer 模板不同位置像素所需要补充的颜色信息不同,因此处理模块需要分为 4 个不同的处理模块:偶行奇列模块、偶行偶列模块、奇行奇列模块、奇行偶列模块。图 2 中地址产生器根据像素的位置选择由哪个处理模块来进行插值。

4 结果与分析

4.1 算法比较

利用 FPGA 分别实现了以上两种插值方法,实验效果对比如表 1 所示。

分析表 1 可以证实如下的结论:

(1)从横向分析,绿色像素数量占总像素的 $1/2$,红色和蓝色各占 $1/4$,所以恢复后的绿色通道能体现更多的细节信息。

(2)从纵向分析,改进算法考虑了边缘的方向,

表 1 两种插值方法实验效果对比图

Table 1 Two interpolation method experimentation comparison illustration

算法	通道			
	R 通道	B 通道	G 通道	全彩色
双线性插值法				
基于边缘插值法				

防止跨越边界插值,插值效果略优于双线性插值法。
(3)双线性插值是对图像的边缘和非边缘像素采用同样的插值系数,从而在图像的边缘容易出现颜色失真。例如图 2 中曲线表示图像的边缘,位置(3,3)处的红色分量,由于 R_{22} 与 R_{33} 不在同一个区域,因此用双线性插值的方法将 R_{22} 包含在内,会导致边缘的模糊。

(4)导致双线性成像质量不佳的另一个原因是由于通常的彩色插值方法是对各个颜色分量分别进行插值,没有利用通道间关联性的缘故。

4.2 算法实时性分析

从插值算法上看,基于梯度的边缘插值算法比双线性插值算法要复杂一些,但是却可以较好地恢复彩色图像。虽然该算法用到的比较和判断较多,但是对一个像素来说,一般经过一两次判断就可以判断出图像颜色的变化边界,同时以双线性插值算法为基础,减少了参与边缘检测运算的像素点的数目,而且一旦完成判断,其后的运算就非常简单,甚至没有乘法操作。因此实现起来比较容易,用 FPGA 就可以完成其算法,相对于传统的 DSP+FPGA 的硬件实现方法^[12],在硬件上减少了 DSP 的配置,使结构整体更简单;在 FPGA 上实现本文算法时,需要同时输入上下相邻两行的数据,由于算法复杂度不高,只有简单的加法和移位操作,在一个像素时钟内即可完成彩色图像的色彩还原,因此大大提高了处理速度,完全可以满足实时性的要求。

5 结 论

详细介绍并比较了基于 Bayer 格式两种典型的颜色插值算法,并用 FPGA 对两种插值算法进行了还原实现和比较分析,在边缘和纹理较多的区域,基于边缘定向的插值方法在图像质量上略

优于双线性插值的方法。用 FPGA 内部的 FIFO 向插值算法能够满足工程对实时性的要求,取得进行缓存,采用并行流水的处理方式,基于边缘定了满意的效果。

参 考 文 献:

- [1] 张传胜. 基于 FPGA/SOPC 架构的面阵 CCD 图像采集系统的设计 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 636-639.
- [2] 曲洪丰, 王晓东, 吕宝林. 多通道输出面阵 CCD 图像非均匀性校正 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 569-582.
- [3] 张传胜. 基于 FPGA 的面阵 CCD 驱动及快速显示系统的设计实现 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(6): 789-794.
- [4] Bayer B E. Color Imaging Array: USA, 3971065 [P]. 1975-03-05.
- [5] 李奇, 徐之海. 用于数字相机的 CCD 颜色插值算法研究 [J]. 激光与红外, 2002, 32(5): 300-302.
- [6] Gunturk B K, Clotzbach J. Demosaicking: color filter array interpolation [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(1): 44-54.
- [7] 孙海江, 吴川. CFA 图像插值算法在 DSP 实时系统上的应用 [J]. 红外与激光工程, 2010, 40(6): 1187-1192.
- [8] Rajeev R, Wesley E, Grif f L, *et al.* Demosaicking methods for Bayer color arrays [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2002, 11(3): 306-315.
- [9] 李渊渊, 孟伟. 一种用硬件实现的 Bayer 格式图像恢复算法 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(6): 538-543.
- [10] 孙宏海, 王大伟. 高帧频 DVI 接口彩色 CMOS 数字相机系统设计 [J]. 电子测量技术, 2008, 31(4): 179-182.
- [11] 朱明, 鲁剑峰. 基于 TMS320C6202DSp 的实时数字图像处理系统的设计 [J]. 光学 精密工程, 2003, 11(5): 497-501.
- [12] 邓建青, 刘晶红, 刘铁军. 基于 DSP 系统的超分辨率图像重建技术研究 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(1): 114-121.