

彩色数字照相机的设计

·论文·

贾志科, 崔慧娟, 唐 昆

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

【摘要】提出了一种基于 CMOS 图像传感器和通用数字信号处理器的低价格、高质量彩色数字照相机的设计方案。介绍了系统的软硬件结构,详细描述了用数字图像处理的方法实现自动聚焦控制、自动曝光控制、RGB 色彩插值和快速离散余弦变换等关键技术。其设计性能优良,能获得分辨率为 1024×768 像素的高质量彩色数字照片。

【关键词】数字照相机; CMOS 图像传感器; 数字信号处理; JPEG 图像压缩

【Abstract】 This paper proposes a scheme for the design of high quality and low price color digital camera based on CMOS image sensor and general digital signal processor(DSP). The hardware and software architectures are introduced. The key technologies, including automatic focus control, automatic exposure control, RGB interpolation and fast discrete cosine transform(DCT) are presented in detail. By this digital camera, we can get high quality color photos with the resolution of 1024×768 pixels.

【Key words】 digital camera; CMOS image sensor; digital signal processing; JPEG image compression

1 引言

信息技术的发展给传统的照相业带来了一次重大变革——出现了数字照相机。它是光学技术、微电子技术及数字信号处理技术相结合的产物^[1]。与普通照相机相比,数字照相机记录被摄图像的媒体不再是卤化银胶片,而是图像传感器和数字存储器。

数字照相机的基本原理是利用普通照相机的光学系统,把被摄图像投影到图像传感器上,传感器把光信号转化成电信号,再经过模/数(A/D)转换、数字图像处理和压缩,最终以数字形式存储到磁盘、可移动快闪存储卡等数字存储器中。此外,一般的数字照相机都带有计算机接口,可以很方便地把数字化的相片输入到计算机中,进行任意的图像修改、编辑、合成、分解和景物置换等处理,并能通过因特网实现照片的远距离无失真传输。

数字照相机的另一特点在于它不仅具有光学系统、图像传感器和数字图像处理器等硬件设备,还有相应的软件模块——数字图像处理软件,通过软件处理能大大提高所摄图像的质量,并能对硬件模块实现自动控制。可以说,没有软件模块,就没有数字照相机系统。软件模块直接影响数字照相机的性能,是数字照相机的关键技术。

2 彩色数字照相机的硬件结构

该彩色数字照相机的主要硬件结构如图 1 所示。

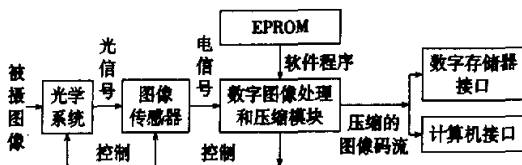


图 1 彩色数字照相机的主要硬件结构

2.1 光学系统

该数字照相机的光学系统与普通照相机相似,包括一个可变焦距镜头、光圈、快门以及用来伸缩镜头、调节光圈的小马达等。光学系统的作用主要是聚焦所拍摄的图像。但是图像不是聚焦到卤化银胶片上,而是聚焦到图像传感器上。

2.2 图像传感器

电荷耦合器件(CCD)传感器和互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器是两类最主要的图像传感器^[2]。过去由于 CCD 传感器获得的图像质量要高于 CMOS 传感器,市场上绝大多数数字照相机都选用 CCD 图像传感器。但 CCD 传感器价格昂贵,导致数字照相机的价格要远远高于同档次的普通照相机,限制了数字照相机的普及。近年来,随着精细几何结构 CMOS 技术的发展,CMOS 图像传感器的图像质量有了很大提高,达到了和 CCD 图像传感器相近的水平,而价格却远远低于同类 CCD 传感器。此外,由于 CMOS 传感器的工作不像 CCD 传感器那样需要高压,其功耗仅为 CCD 传感器的 1/10。

为了减少数字照相机的成本,降低功耗,这里选用了美国 PixArt 公司生产的 CMOS 图像传感器,其输出图像的有效分辨率最大可达到 1024×768 像素点。同时,CMOS 图像传感器还有 I²C 总线接口,系统可通过该总线对传感器内部的各种控制寄存器进行设置和调整,根据所摄景物对增益、背景补偿、对比度、饱和度等参数进行调节,从而获得令人满意的照片。

2.3 数字图像处理和压缩模块

通用数字信号处理器(DSP),精简指令系统处理器(RISC)以及专用图像处理和压缩芯片都可用作数字照相机中的数字图像处理和压缩部件。由于这个彩色数字照相机的分辨率较高(达到 1024×768 像素),对它进行处理和压缩所耗费的运算量很大。虽然数字照相机不要求实时工作,但对所拍摄相片的处理时间不宜过长,否则会影响下一张相片的

拍摄,因此要求所用的芯片有较强的运算能力。

这里选用了美国 Analog Device 公司生产的高速定点数字信号处理器 ADSP2181,它的运算能力达到 33 Mips,即每秒能执行 3 300 万条指令。同时,由于 ADSP2181 采用程序指令和数据双总线的哈佛结构,所有指令,包括乘累加指令,都能在单指令周期内完成,有些指令还能并行执行,非常适合进行数字图像处理和压缩。ADSP2181 还有多个辅助管脚,可以很方便地用来实现对光学系统和 CMOS 图像传感器的控制。此外,ADSP2181 的价格在同类产品中较低,也是选择它的一个主要原因。

2.4 数字存储器和计算机接口

选用的美国 San Disk 公司生产的 Compact Flash 可移动式快闪存储卡来存储数字相片,其容量为 8 MB,可存储 36 张以上高清晰度相片,这比普通卤化银胶卷还要多。用户在使用数字照相机时,就像用胶卷一样,当一块快闪存储卡存满之后,可取下再换上一块新卡继续拍摄,非常方便。

这个数字照相机还有一个计算机通用串行总线(USB)接口,通过这个接口,能把数字相片输入到计算机中进行解压缩、显示和进一步编辑。

3 彩色数字照相机的软件结构

文中设计的彩色数字照相机的软件主要由预处理模块、数字图像处理模块和数字图像压缩模块三部分构成。全部软件都用 ADSP2181 汇编语言编写,固化在一片 EPROM 中,当开始拍摄时,自动从 EPROM 中加载到 ADSP2181 的程序存储 RAM 中,按顺序执行。

3.1 预处理模块

预处理模块的作用是在取景过程中,数字信号处理器通过对 CMOS 图像传感器输出图像信号的计算分析来调节数字照相机的光学系统和传感器的参数设置,从而获得最佳输入图像。

自动聚焦控制和自动曝光控制是预处理模块要实现的两个重要功能,下面就分别介绍它们的实现算法。

从理论上来说,聚焦的图像比未聚焦的图像的边界轮廓更加分明,纹理细节更加清晰。这对应着频域上聚焦的图像的高频分量更大一些。以此为依据,设计一个数字高通滤波器,获取输入图像的高频分量。通过镜头的伸缩来改变焦距,对不同焦距下输入图像的高频分量进行比较。高频分量的最大值对应着最佳聚焦。为了简化计算,可以只对输入图像的一部分进行滤波处理,效果与对整幅图像进行处理基本一样。通过 ADSP2181 来操作小马达控制镜头的伸缩,从而实现了自动聚焦。

自动曝光是以对图像总亮度的计算为基础,通过调节光圈的大小和改变 CMOS 图像传感器的曝光参数来实现的。然而,单单计算图像各像素点的亮度之和还不够。一个亮的背景(如蓝天)会导致主要物体曝光不足;而一个暗的背景(如树林)会导致主要物体过份曝光。为解决这一问题,根据主要物体一般位于照片中央这一特性,将被提取的图像分成中央

和周边两部分,分别计算其亮度,并加权不同的经验值。

3.2 图像处理模块

图像处理模块包括对 CMOS 图像传感器的漏电流校正、RGB 色彩插值、 γ 校正以及 RGB 色彩格式转化成 YC_bC_r 色彩格式等功能,其中 RGB 色彩插值算法是影响相片质量的最重要因素。本文提出一种以相关性为依据的线性插值算法,以较小的运算量取得了较好的效果。

这里先介绍一下什么是 RGB 色彩插值。为了降低造价,减小尺寸,绝大多数中低档图像传感器均采用 Bayer 滤光阵列^[9]来把输入光信号分解成 RGB 三原色,但每个像素点仅保留一种原色,如图 2 所示。其中绿色像素(G 像素)由于对亮度影响最大,所以保留的最多,占 1/2,红色像素(R 像素)和蓝色像素(B 像素)各占 1/4。这里所用的 CMOS 图像传感器也是这样。

B	G	B	G
G	R	G	R
B	G	B	G
G	R	G	R

图 2 基于 Bayer 方法的彩色滤光阵列

每个像素仅有三原色中的一种显然不能满足高质量数字相片的要求,必须用插值的方法,利用相邻像素点的色彩恢复出其它两种原色的值,这就是 RGB 色彩插值。

这里提出了一种基于相关性的线性插值方法。其基本思路是根据已有的色彩值,分别计算水平和竖直方向的相关系数,在相关性强的方向上进行线性插值。如果两个方向的相关系数相同,则采用双线性插值方法,利用周围 4 个相邻像素点的值进行计算。以 G 像素点为例进行具体说明。

如图 3 所示,要计算像素点 (i,j) 的 G 值。首先根据相邻像素点的 R 值得到水平和竖直方向的相关系数 C_H 和 C_V 。

$R(i-2,j-2)$	$G(i-2,j-1)$	$R(i-2,j)$	$G(i-2,j+1)$	$R(i-2,j+2)$
$G(i-1,j-2)$	$B(i-1,j-1)$	$G(i-1,j)$	$B(i-1,j+1)$	$G(i-1,j+2)$
$R(i,j-2)$	$G(i,j-1)$		$G(i,j+1)$	$R(i,j+2)$
$G(i+1,j-2)$	$B(i+1,j-1)$	$G(i+1,j)$	$B(i+1,j+1)$	$G(i+1,j+2)$
$R(i+2,j-2)$	$G(i+2,j-1)$	$R(i+2,j)$	$G(i+2,j+1)$	$R(i+2,j+2)$

图 3 RGB 插值算法示例

$$C_H = | [R(i,j-2)-R(i,j)] + [R(i,j+2)-R(i,j)] | \quad (1)$$

$$C_V = | [R(i-2,j)-R(i,j)] + [R(i+2,j)-R(i,j)] | \quad (2)$$

如果 $C_H > C_V$,说明水平方向相关性强,可通过水平方向的线性插值来恢复 G 值

$$G(i,j) = \frac{G(i,j-1) + G(i,j+1)}{2} \quad (3)$$

如果 $C_H < C_V$,则说明竖直方向相关性强,可通过竖直方向的线性插值来恢复 G 值

$$G(i,j) = \frac{G(i-1,j) + G(i+1,j)}{2} \quad (4)$$

如果 $C_H = C_V$,则采用双线性插值

$$G(i,j) = \frac{G(i,j-1) + G(i,j+1) + G(i-1,j) + G(i+1,j)}{4} \quad (5)$$

经过 RGB 插值后的图像,每个像素点都拥有 RGB 三原

色,再经过 γ 校正和色彩格式转化可得到 $YC_C C_C$ 格式的彩色图像。

3.3 图像压缩模块

为了提高存储效率,数字照相机通常把数字图像压缩后再进行存储。以一幅分辨率为 1024×768 像素点,每像素24 bit(3 Byte)的真彩色图像为例。如果不进行压缩而直接进行存储,则需要 $1024 \times 768 \times 3 \text{ Byte} \approx 2.35 \text{ Mbit}$ 的存储空间。这使一块8 MB的Compact Flash快闪存储卡仅能存不到4张相片。解决这一问题的方法是采用高性能的压缩算法。

本文选用了JPEG静态图像压缩算法^[4]是国际通用的图像压缩标准,已为很多数字照相机采用,有很好的兼容性。其主要性能如表1所示。

表1 JPEG静态图像压缩算法的性能

压缩效果/ bit/pixel	压缩比	图像质量
0.25~0.5	16~32	中至好,满足某些应用
0.5~0.75	10.6~16	好至很好,满足多数应用
0.75~1.5	5.3~10.6	极好,满足大多数应用
1.5~2.0	4~5.3	与原始图像几乎一样,满足绝大多数应用

一般地,可选用10倍左右的压缩比,就可获得比较满意的质量。

JPEG压缩编码的流程如图4所示,输入图像首先被分成若干 8×8 的像素单元,称为“块”(block),以块为单位进行操作。



图4 JPEG压缩编码流程

每个块先进行离散余弦变换(DCT),获取64个DCT系数。由于人眼对低频分量的敏感性要高于对高频分量的敏感性,根据这一视觉特性,对64个DCT系数中的低频分量进行较为精细的量化,而对高频分量进行较为粗糙的量化。最后对量化的DCT系数进行熵编码(如Huffman编码等),形成JPEG码流。用户可以通过对量化步长的设置来调整压缩比。对感兴趣的相片采用较低的压缩比,获得较好的图像质量;对不重要的相片则可采用较高的压缩比,节省存储空间。通常如果压缩比定在10左右,8 MB的数字存储器可存储36张以上的相片。

DCT是JPEG算法的关键,它的运算精度直接影响压缩效果和图像质量。由于每个图像块都必须进行二维DCT变换,其总的运算非常大。因此要实现快速JPEG压缩,必须采用快速DCT算法,否则会造成拍摄延时过长。

理论上, N 点一维DCT如下式所示

$$F(u) = \sqrt{\frac{2}{N}} c(u) \sum_{i=0}^{N-1} f(i) \cos \left[\frac{\pi u(2i+1)}{2N} \right] \quad (6)$$

式中, $f(i)$ 是输入点, $F(u)$ 是变换点。

$$c(i) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & (i=0) \\ 1 & (i \neq 0) \end{cases}$$

$N \times N$ 点的二维DCT为

$$F(u, v) = \frac{2}{N} c(u) c(v) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) \cos \left[\frac{\pi u(2i+1)}{2N} \right] \cdot \cos \left[\frac{\pi v(2j+1)}{2N} \right] = \sqrt{\frac{2}{N}} c(v) \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \left[\sqrt{\frac{2}{N}} c(u) \sum_{i=0}^{N-1} f(i, j) \cos \left[\frac{\pi u(2i+1)}{2N} \right] \right] \cdot \cos \left[\frac{\pi v(2j+1)}{2N} \right] \quad (7)$$

(7)式大括号内就是 N 点一维DCT,外面就是与之垂直的另一方向的 N 点一维DCT。根据此式二维DCT可转化为一维DCT,有利于减少运算量,实现原地操作,节省运算空间。具体地说,对于每个图像块先在行方向上执行8次8点一维DCT运算,把中间结果写入相应位置,接着在列方向上重复进行8次一维DCT运算,可得到最终的二维DCT结果。一维DCT采用Hou提出的递归DCT快速算法^[5]。这种算法所需的乘累加次数虽与其它快速算法基本相同,但这种算法非常规则,适合数字信号处理器ADSP2181的结构特点。

4 结束语

基于CMOS图像传感器和通用数字信号处理器,提出了一种低价格、高质量的彩色数字照相机的设计方案。通过设计数字图像处理运算软件,实现了自动聚焦、自动曝光等功能。同时,针对CMOS图像传感器输出图像的特点,提出了一种简单而有效的RGB色彩插值算法。采用了快速DCT算法,能大大加快数字图像压缩的速度,使从按下快门到JPEG码流存储到数字存储器中仅需2s。此外,这个数字照相机还留有Compact Flash快闪存储卡的插槽和计算机USB接口,可以很方便地将拍摄的数字相片存于Compact Flash卡或传输到计算机进行解压缩、显示和进一步作编辑处理。

这个数字照相机的全部软件固化在一片EPROM中,因此,随着今后数字图像处理和压缩软件的升级更新,只需更换一片EPROM就可以用同样的数字照相机获取质量更好的照片。

参考文献

- [1] 陈坚,孙志月.数码相机的使用.西安:西安电子科技大学出版社.1998.
- [2] Small Charles H. CCD,CMOS图像传感器的特点和比较.电子产品世界.1998,(8).
- [3] Bayer B E. Color Image Array. US Patent 3971065.
- [4] ISO/IEC JTC1/SC29/WG10-1994. Digital Compression and Coding of Continuous-tone Still Image.
- [5] Hou H S. A Fast Recursive Algorithm for Computing the Discrete Cosine Transform. IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, 1987,35(10):1455-1461.

(收稿日期 2000-05-26)