

文章编号:1007-2780(2011)02-0224-05

CMOS 图像传感器芯片的自动白平衡算法

甘 波,魏廷存,郑 然

(西北工业大学 计算机学院,陕西 西安 710072, E-mail:shadow524@163.com)

摘 要: 针对 CMOS 图像传感器芯片中的自动白平衡图像处理电路,提出了一种便于硬件实现的增益计算方法,并在此基础上实现了一个用于 CMOS 图像传感器芯片的自动白平衡算法。该算法将增益计算的计算方法与迭代法结合使用,并用比较器和移位寄存器来取代复杂的组合逻辑单元,在不增加硬件开销的基础上提高了计算精度与处理速度。

关 键 词: CMOS 图像传感器;白平衡;色温;增益计算

中图分类号: TN492;TN911.73

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20112602.0224

Auto White Balance Algorithm for CMOS Image Sensor Chip

GAN Bo, WEI Ting-cun, ZHENG Ran

(College of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, E-mail:shadow524@163.com)

Abstract: A method of gain calculation for auto white balance is proposed which is suitable for hardware implement in CMOS image sensors chip. Based on the method, an auto white balance algorithm used in CMOS image sensors chip is completed. Iterative method and calculation method are combined in this algorithm, and comparator and shift registers are used instead of complex combination logic cells. The computation accuracy and processing speed are improved without hardware expenses.

Key words: CMOS image sensor; white balance; color temperature; gain calculation

1 引 言

CMOS 图像传感器(CMOS Image Sensors, CIS)可采用标准的 CMOS 工艺制造,具有集成度高、成本低、动态范围宽和功耗小等优点^[1],目前已广泛应用于手机摄像头、安保监控、数码相机、医疗检查以及可视门铃等领域,其高端产品已达到数千万像素级别。随着 CMOS 工艺的发展,CMOS 图像传感器芯片的集成度不断提高,单片相机已成为目前的主流产品。所谓单片相机就是单片集成了图像传感器阵列、放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)、模数转换器(Analog

to Digital Converter, ADC)、数字图像处理器(Digital Signal Processor, DSP)和相应的时序控制电路等的 CMOS 图像传感器芯片。它与传统图像传感器的区别是在模数转换器后增加了数字图像处理器,并通过调整 PGA 增益、ADC 偏移以及数字部分的通道增益来对图像数据进行处理、优化。

数字图像处理一般包括色彩插补、黑平衡、白平衡、曝光控制、Gamma 校正等。白平衡处理的作用是对人眼看到的白色物体进行色彩还原,去除光源色温对图像的影响,使其在照片上也显示为白色。应用在单片相机中的实时图像处理算

收稿日期:2010-07-16;修订日期:2010-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60972157)

作者简介:甘波(1986—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为混合信号集成电路设计。

法,由于是采用硬件电路实现的,因此需要在图像处理效果(图像质量)、运算时间(处理速度)与计算复杂度(硬件电路开销)等方面进行综合考虑。在较小硬件开销的前提下,如何提高图像处理速度和图像质量是图像处理算法的关键所在。针对算法的软件实现(对图像进行后台软件处理),目前已提出了多种白平衡算法,如灰度世界算法^[2]、全反射理论算法^[3]、标准差加权的灰度世界算法、亮度加权的灰度世界算法^[4]、标准差亮度加权灰度世界算法等。这些算法虽然各有优缺点,但有一个共同的特点,即图像处理效果越好的算法运算量就越大,运算复杂度也就越高。因此这些算法在用硬件实现时,硬件电路开销大,且需要占用大量的存储空间。

本文针对自主研发的一款 CMOS 图像传感器芯片,提出了一种适应于硬件实现的自动白平衡算法。通过对现有白平衡算法进行优化,在不增加硬件开销的基础上,使得计算精度提高,运算收敛时间减小。

2 自动白平衡算法

假设场景色彩的平均值应落在一个特定的范围内,如果检测到结果偏离该范围,则调整相应参数,并校正色彩数据直到其均值落入指定的范围内,这就是自动白平衡。该处理过程可以基于 YC_bC_r 空间,也可以基于 RGB 空间来进行。通常的处理方式是通过校正 R、B 通道的增益,使得 C_r 、 C_b 值落在一个指定的范围内,从而实现自动白平衡。自动白平衡算法有很多种,但基本操作过程都可分为 3 个部分:

(1)色温估计。通过算法统计或者手动调节(用一个“标准白”的物体作为参考)的方法,估计出表达色温的特征量,即平均色差;

(2)增益计算。通过平均色差的比较,用计算、查表或者迭代等方法,算出红色和蓝色通道的增益值,即 R、B 两个通道的校正因子。

(3)偏色校正。给红色和蓝色通道乘以相应的校正因子,调整通道增益,以达到校正色温影响、还原物体颜色的效果。

2.1 色温估计

一幅图像的色温一般表现为平均色差。当 R、G、B 3 种颜色的灰度相等时,该像素点的色差为 0,表现为灰色或白色。而在图像处理中,与亮

度、色差有关的处理和计算,一般采用 YC_bC_r 色彩模型,这一模型与色差密切相关。其中 Y 表示图像的亮度; C_b 与 C_r 则分别是当前像素点的蓝色和红色分量,代表图像的色差。 YC_bC_r 色彩模型与传统 RGB 色彩模型的转换如下所示:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5 \\ 0.5 & 0.4187 & -0.0813 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

目前的色温估计算法一般是基于灰度世界理论或者全反射理论。灰度世界理论认为,任何一幅图像,当有足够的色彩变化时,它的 R、G、B 分量均值会趋于平衡,这个理论在全局白平衡中得到广泛应用。全反射理论认为,一幅图像中亮度最大的点就是白点,即假设在 YC_bC_r 空间中 Y 值最大的点为白色,以此来校正整幅图像。

现在广泛应用的色温估计算法一般是将两个条件相结合,选出亮度较大的一些类白色点,算出均值作为白色,以此来调整通道增益。而选取类白色点的约束条件一般分为两类:一种是基于 YC_bC_r 模型,在考虑了 Y、 C_b 、 C_r 三者之间的相关性之后给出的约束条件为^[5]:

$$Y - |C_b| - |C_r| > \Phi$$

用这个条件做出的色温估计比较准确,但计算略显复杂,而且如果白平衡算法在后续计算中主要是对 R、G、B 进行采样、运算,没有涉及 Y、 C_b 、 C_r 运算的话,只为了色温估计而进行色彩模型转换并不利于算法优化。而另一种方法是基于传统 RGB 色彩模型,选择 R、G、B 3 分量都大于 α 的点作为类白色,这种方法操作方便、计算简单、易于实现,但控制起来不够灵活,针对不同光源,不能做到相应的调整。

本文提出的解决办法如下:用 G 分量近似地表示像素点亮度 Y,用 R、B 与 G 的差作为 C_r 、 C_b 的近似值,用与 YC_bC_r 模型相同的方法进行调整,使得约束条件变为 $G > \alpha$ 、 $R > \beta$ 、 $B > \gamma$,将原来 R、G、B 3 个分量的约束条件从统一的条件变为 3 个略有差别的条件,而 α 、 β 、 γ 的值则是由前一帧中红、蓝通道增益的变化量来确定。这样,就可以针对不同光源,调整约束条件,做到更准确地使更多的类白色点参与计算,从而提高精度。另外,这种色温估计的方法可以减少电路开销,并且色温估计可以实时完成,适合实时处理系统,不用另外设置存储器存储图像数据。

2.2 增益计算

增益计算是在对图像进行色温估计的基础上,通过一些方法来得到通道增益,一般是对图像 的红色和蓝色通道进行调节。其中蓝色通道的通 道增益为 μ ,红色为 ν 。

常用的增益计算方法有 3 种,分别是计算法、 查表法和迭代法^[5]。计算法是根据所统计的 Y 、 C_b 、 C_r 或者 R 、 G 、 B 的值来计算出 μ 、 ν 的值,其优 点是计算结果较为精确,几乎只计算一次就能得 到正确的 μ 、 ν 值。但计算需要用到乘除法,用硬 件实现时开销很大。查表法是事先统计出一张 表,记录不同色温所对应的通道增益,具有速度快 的优点;但由于表的容量有限,不能实现各种色温 情况的连续调节。迭代法则是根据 C_b 和 C_r 的关 系,或者 R 、 B 与 G 的关系,通过不断地调整 μ 、 ν 实现。优点是增益调整的计算简单、易于实现。 但迭代步长 λ 的选择需要有取舍,如果 λ 取较大 值会影响计算精度, μ 、 ν 的值可能发生抖动;而 λ 取值越小,则会使迭代次数越多,而因为在增益计 算中,每一帧图像只能进行一次迭代,因此迭代收 敛速度会降低。

本文提出的增益计算法是将计算法与迭代法 相结合,迭代步长通过计算求得,这样既可以减少 迭代次数又可以提高计算精度。其中蓝色通道的 增益计算流程如图 1 所示,图中所示的 B 与 G 分 别表示类白色点蓝色和绿色分量各自的总和; ρ 代表计算精度,即为最大重复次数, ρ 的值越大, 计算精度就越高; $X=2X$ 表示将 X 增大为原来 的 2 倍,即是指 X 用二进制表示的数向左移动了 一位, n 则表示 X 的二进制数向左移动了多少 位,而在电路上 $X=2X$ 以及求 2^{-n} 的运算都可以 用二进制的移位很简单地实现,相对于计算法

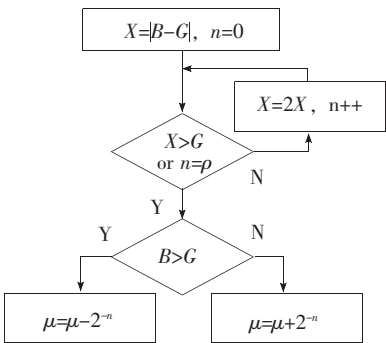


图 1 蓝色通道增益计算流程

Fig. 1 Flow chart of blue channel gain calculation

来说硬件开销小得多。

以图 1 所示的蓝色通道的增益为例对增益计 算加以说明。在最后的增益计算中,如果用 $\mu = (1 \pm 2^{-n})\mu$ 来计算通道增益,那么最终计算收敛 时的迭代次数一定不会大于 ρ ,但这种方法需要 多加一次乘法计算,增加了电路复杂度。而用 $\mu = \mu \pm 2^{-n}$ 来计算通道增益的方法在计算中会 与实际结果有一些误差,这个误差是随着通道增益 值与差值的增大而加大的。因为 CIS 芯片中有 自动曝光控制部分来调整图像的整体亮度,并且 本文的色温估计算法是通过类白色和高亮度的点 来估算色温的,所以偏色校正的通道增益值与 1 差值可以控制在 0.5 以内,这种程度的误差造成 的结果只是会使可能达到的最大迭代次数从原来 的 ρ 次增加到 2ρ 次,而不会造成通道增益值长时 间的抖动与不可收敛的情况。

2.3 偏色校正

偏色校正就是给图像数据的红色和蓝色通道 上加上各自的增益,调节 R 、 G 、 B 三色的比例,从 而达到白平衡的效果。为了达到更好的效果,一 般应在色彩插补算法之前,对传感器采样输出的 RGB 信号进行校正。而在 CMOS 图像传感器 中,PGA(可调增益放大器)上也可以进行偏色校 正,并且通道增益加在模拟部分的 PGA 上效果 要优于加在 ADC 后的数字部分中;但因为 PGA 的增益精度不高,必须要在数字部分进行细调,所 以需要把通道增益分为两个部分 μ_1 、 ν_1 与 μ_2 、 ν_2 , 如图 2 所示。另外,在数字部分校正后需要进行 防溢出处理,防止 RGB 的输出超出范围。

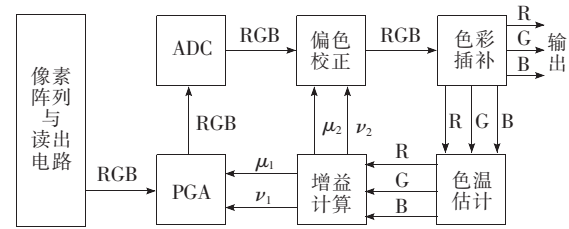


图 2 CMOS 图像传感器的自动白平衡系统

Fig. 2 Auto white balance system of CMOS image sensor

3 算法的验证结果

为了验证所提出算法的有效性,将所提出的 算法与现有白平衡算法进行了比较,采用由 OV7670 图像传感器搭建的数码相机系统进行了

以下测试和验证：

(1)对于色温已知的图像进行白平衡处理,并对比各通道的增益以及算法收敛速度；

(2)给图像的各通道加上一定的增益后再进行白平衡算法,并统计在增益改变较大时各算法的计算精度和收敛速度。

图 3 为两种自动白平衡算法的处理效果。其中图(a)为关闭自动白平衡后得到的图像(未采用白平衡算法处理的图像),图(b)为采用文献[5]提出的白平衡算法处理得到的结果,图(c)为采用本文算法(取 $\rho=6$)处理后的结果。可以看出,在处理前,图像因为光源的问题整体明显偏红,采用自动白平衡算法处理后,图像质量得到显著提升,

且图(b)与图(c)的图像效果基本相同。

通常采用迭代法的自动白平衡算法中,迭代步长不会小于 0.1,一般为 0.05。因为如果迭代步长过大,会使得迭代终止条件 $|C_b| + |C_r| < \alpha$ 永远无法满足,造成抖动。这里我们选用 0.05 作为迭代步长,迭代终止条件为 $|C_b| + |C_r| < 4$ 。

而对于本文算法,增益计算中移位寄存器的最大位移 ρ 的不同也会影响最后结果。在这里,我们取不同的 ρ 值,对结果相互比较。最后的测试结果如表 1 所示。

表 1 中 μ 、 ν 分别表示白平衡算法收敛后蓝、红通道的通道增益; C_b 、 C_r 为经过白平衡处理后图像的蓝、红色差,越接近 0 表示算法效果越好；



图 3 自动白平衡处理效果
Fig. 3 Processing effect of auto white balance

表 1 自动白平衡测试结果
Table 1 Test results of auto white balance

参数	文献[5]算法	本文算法 $\rho=4$	本文算法 $\rho=5$	本文算法 $\rho=6$
μ	1.4	1.375	1.406 25	1.437 5
ν	0.9	0.875	0.875	0.859 375
C_b	-2	-4	-2	0
C_r	1	1	1	0
Steps	10	2	3	5

表 2 增加反向增益后自动白平衡测试结果
Table 2 Test results of auto white balance which have a reverse gain

参数	文献[5]算法	本文算法 $\rho=4$	本文算法 $\rho=5$	本文算法 $\rho=6$
μ	1.4	1.387 5	1.418 75	1.434 375
ν	0.9	0.875	0.875	0.859 375
C_b	-2	-3	-2	0
C_r	1	1	1	0
Steps	26	6	7	8

而迭代步数即为重复运算的次数。从测试结果可以看出,本文算法在计算收敛速度上明显优化,而且当 $\rho=6$ 时,算法对于色温调整的精度也优于传统的白平衡算法。

在给蓝色和红色通道预先加上一定的增益后,得到的结果如表 2 所示,其中初始的 μ 为 0.7, ν 为 1.5。经过自动白平衡后,图像校正结果与没有预加通道增益之前无明显差别。

从表 2 可以看出,在预先加上反向的通道增益,即加大 μ,ν 的变化量时,传统的迭代法自动白平衡算法的迭代步数也会线性增加,而本文算法的迭代步数稳定,接近增益计算中移位寄存器的最大位移 ρ ,且不会大于 2ρ 。

因为在增益计算中,每一帧图像只能进行一次迭代,而估算色温以及计算增益所用的时间要远小于图像传感器采集一帧图像所用的时间,所以完成白平衡所用的时间为: $T=N \cdot T_F$,其中 N 为迭代次数, T_F 为图像传感器采集并处理一帧图像所用的时间。

参 考 文 献:

[1] 王高,武耀艳,赵捍东. CMOS 图像传感器的发展现状 [J]. 光机电信息, 2001, 18(3):12-16.

[2] Liu Y C, Chan W H, Chen Y Q. Automatic white balance for digital still camera [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 1995, 41(3):460-466.

[3] Weng C C, Chen H, Fuh C S. A novel automatic white balance method for digital still cameras [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 2005,12(4):3801-3804.

[4] Lam H K, Au O C, Wong C W. Automatic white balancing using luminance component and standard deviation of RGB components [J]. *IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2004, 3(3):493-496.

[5] 陈剑. CMOS 图像传感器研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.

以本文测试所用的 30 帧/s,即 T_F 为 1/30 s 的数码相机系统为例,使用一般的迭代算法进行自动白平衡需要 0.867 s 才能完成偏色校正;而用本文算法在精度最高的情况下只需要 0.267 s,而且在最极端的情况下最多只用 0.4 s 即可使得自动白平衡的结果收敛。

4 结 论

在对现有效果较好的几种自动白平衡算法分析的基础上,针对 CMOS 图像传感器芯片中的硬件实现需要加以改进,提出了一种新的增益计算方法。经过实际测试,该算法具有很好的色温估计精度,并显著提高了运算精度以及迭代收敛速度。

本文算法还能把自动白平衡所需的帧数控制在一个固定较小的范围内,这样不但会对后续的图像处理算法提供方便,而且也有利于估算数字图像处理整体稳定所需的时间,便于进行控制使得输出的图像取得最好效果。