

亚采样彩色 CCD 图象的重建

周盛民 吕维雪

(浙江大学生物医学工程与仪器学院, 杭州 310027)

摘要 在彩色图象传输、采集、存贮过程中,一般都采用对色度通道进行压缩的技术来减少图象占用的系统资源,在重建中,采用大面积着色的方法来重建图象,但这种方法会在图象的细节部分引入较大的误差,为了在实际应用中得到最佳的重建彩色图象,就需要研究在色度通道亚采样的情况下,如何利用不完备的数据有效地重建图象.针对 CCD 彩色图象的空间量化特点,提出了一种利用自然图象的约束条件和人眼视觉生理学特点重建 CCD 彩色图象的方法.该方法利用高分辨率的通道数据来获得图象的细节信息,并且利用图象各通道间的细节相似性(同变性)来获得低分辨率通道的图象细节.通过实验证明,该方法有效地提高了图象的清晰度,消除了 CCD 图象重建中常见的伪彩和图象模糊等现象,可以用于数码相机或多光谱遥感图象处理等方面.

关键词 图象重建 彩色 CCD 亚采样

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)06-0565-05

Reproduction of Subsample Color CCD Image

ZHOU Sheng-min, LV Wei-xue

(College of Biomedical Engineering and Instrument Science Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract To compress the data during image digitalizeing, storage and transmission, We always use subsample method to sample the color channels in order to cut off data rate, Then use bilinearity method to reconstruct it. How to find the best way to reconstruct the color information lead us to study the principles of subsample problem. The Nayquest law limits the signal band width to half of sample rate. In subsample condition, this point will reduce sharpness of image and cause false color on image edges. This paper is focus on the problem of image reproduction under subsample condition. On study of the features of nature image and human eyes, We found there are similarities in details of image RGB color Channels. After analyse the subsample problem, We found it's possible to rebuild the subsample image if we have the information of image grade. Take consideration of this two points, we bring forth a new way to build the CCD color image, and found this way will improve the image sharpness remarkably.

Keywords Image reproduction, Color CCD, Subsample

0 引言

图象重建一直是图象处理的基本任务之一,重建的难度主要在于信息量的缺损,这种缺损在有些情况下是可以避免的,但在大多应用条件下是无法避免的.本文以彩色 CCD 空间量化采样信号为例,讨论如何在采样数据缺失的情况下,通过附加约束

条件,而从已知的数据中恢复出合理的解.虽然这一合理的解不是唯一的,但由于其符合人眼的视觉生理学规律,故可以得到更好的视觉效果和比较准确的细节信息.

1 亚采样(Subsample)问题

由采样定理可知,如果原图象 $f(x)$ 是带宽限定

函数,当采样速率不小于最高频率的2倍时,则原图象 $f(x)$ 可由样本函数 $f_s(x)$ 与内插函数的卷积(低通滤波)来恢复。

亚采样是指采样频率低于 Nyquist 频率采样得到的样本。这时由于 $f(x)$ 的各级频谱出现相互重叠,因此 $f(x)$ 不能简单地用一个低通滤波器来恢复。但是,如果能够增加采样点上的附加信息,即使在采样频率降为 Nyquist 频率的一半时, $f(x)$ 还是可能用比较复杂的内插函数来恢复。

亚采样情况在图象处理中是经常遇到的。彩色图象在采集和传输过程中,一般通过降低色度通道的采样速率,来减少数据流量,再通过大面积着色的方法恢复图象。虽然人的视觉系统对色彩的空间分辨力不高,但这种方法还是会在图象的细节部分引入较大的误差。

1.1 CCD 信号亚采样

在数字图象采集系统中,主要采用单片式彩色 CCD,其彩色实现原理是在单色的 CCD 元件前附加按固定顺序排列的滤色片阵列(CFA)实现的,彩色滤色片的排列结构是如图 1 所示的 Bayer 滤色片阵列方式。

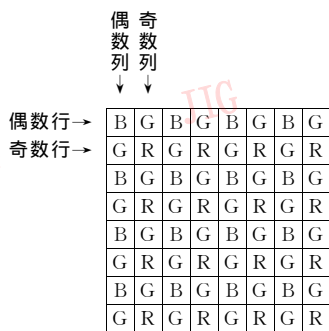


图 1 CCD Bayer 滤色片阵列

其中每个像素的采样值代表相应色彩通道的强度,排列位置则表明了像素对应的色彩通道。

偶行偶列为蓝色通道在该点的强度(缺少绿、红两个通道信息);偶行奇列为绿色通道在该点的强度(缺少红、蓝两个通道信息);奇行偶列为绿色通道在该点的强度(缺少红、蓝两个通道信息);奇行奇列为红色通道在该点的强度(缺少绿、蓝两个通道信息)。

图象经 A/D 转换可以得到原始的图象数据。这种原始数据必须进行数据重建才能进行显示和处理。彩色图象的重建算法对于 CCD 成像系统的精度有很大的影响。如图 1 所示,每个 CCD 感光单元(像素)仅能捕获一个色彩通道的信息(Red, Green, Blue),

而每个像素又需要 R、G、B 3 个颜色通道的信息量才能够完整表示。因此每个像素所缺损的其他两个色彩通道的数据必须通过彩色重建算法来补齐。

通过观察图 1 可知,有 1/2 的像素(感光单元)为绿色,而红色、蓝色感光单元分别只占总像素的 1/4。对于红、蓝两个颜色通道,其空间采样频率仅仅有一半。这样,CCD 彩色图象的重建问题可以看作是 R、G、B 3 个欠采样彩色图象数据的恢复问题。

2 有附加约束的亚采样重建算法原理

CCD 对色彩通道的量化可以理解为对二维信号的离散采样,对这一问题可以用采样定理来分析。相应亚采样问题也可以归结为采样频率只有 Nyquist 频率的一半时如何恢复样本值。

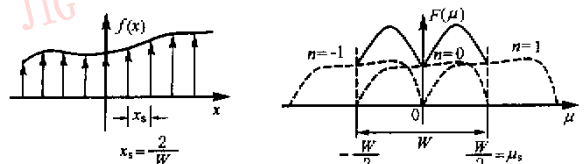
推导过程中所使用的符号 $f(x)$ 为原图象函数; $f_s(x)$ 为原图象函数采样值; $f'_s(x)$ 为原图象函数在采样点处导数的采样值; W 为原图象 $f(x)$ 的带宽; x_s 为采样间隔; μ_s 为采样频率; $F\{f(x)\}$ 为傅立叶变换; $F(\mu)$ 为 $f(x)$ 的频域表示。

如果采样频率 μ_s 不小于整个频谱宽度 W ,则不会出现频谱混叠,相应的 $f(x)$ 可以用一个简单的低通滤波器从 $f_s(x)$ 中运算得出,对应的采样间隔 $x_s = \frac{1}{W}$ 称为 Nyquist 间隔。现在讨论当 $x_s = \frac{2}{W}$ 时,即采样频率只有 Nyquist 频率的一半时,如何构造相应的内插函数而恢复出原图象 $f(x)$ 。

如果增加抽样点上的信息,那么当采样频率仅为 Nyquist 频率的一半时,图象 $f(x)$ 还可能从采样点值 $f_s(x)$ 中还原出来,不过此时的内插函数较为复杂。假设采样时,既要取其离散点集上的数值 $f_s(x)$,又要取其导数值 $f'_s(x)$ 。选择梳状函数作采样函数(图 2(a)),即

$$\text{samp}(x) = 1/x_s \text{COMP}(1/x_s) \quad (1)$$

其中,COMP(x)为一组等距排列的冲击函数,则相



(a) 梳状采样函数

(b) 抽样间隔 $x_s = \frac{2}{W}$ 时的频谱

应的 $f(x)$ 、 $f'(x)$ 的样本函数为

$$f_s(x) = f(x)\text{samp}(x) \quad (2)$$

$$f'_s(x) = f'(x)\text{samp}(x) \quad (3)$$

其中, $f'(x)$ 为 $f(x)$ 的导数值.

设图象 $f(x)$ 是带宽限定函数, 带宽限定为 W , 则有

$$F(\mu) = F\{f(x)\}$$

$$F(\mu) = 0 \quad \text{当 } |\mu| \geq \frac{W}{2}, x_s = \frac{2}{W} \quad (4)$$

$f(x)$ 的频域如图 2(b) 所示. 由图 2(b) 可见, 在 $|\mu| < \frac{W}{2}$ 区域内, 其 0 级、-1 级、+1 级 3 个频谱中相邻二次的谱互相重叠, $F(\mu)$ 出现频谱混叠, 所以下面就需从此频域中复原出 $f(x)$.

对式(2)和式(3)取傅立叶变换, $f_s(x)$ 和 $f'_s(x)$ 的样本函数的 3 级频谱(取 -1, 0, 1)分别为

$$\frac{1}{\mu_s} F\{f(x)\text{samp}(x)\} = F(\mu + \mu_s) + F(\mu) + F(\mu - \mu_s) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\mu_s} F\{f'(x)\text{samp}(x)\} = i2\pi(\mu + \mu_s)F(\mu + \mu_s) + i2\pi\mu F(\mu) + i2\pi(\mu - \mu_s)F(\mu - \mu_s) \quad (6)$$

由图 2(b) 可见, 对于任一个 μ 值, 其 0 级、-1 级、+1 级 3 个频谱中, 总有一个等于零, 当 $\mu > 0$ 时, 则 $F(\mu + \mu_s) = 0$; 当 $\mu \leq 0$ 时, $F(\mu - \mu_s) = 0$. 这样, 式(5)和式(6)可简化为

$$\frac{1}{\mu_s} F\{f(x)\text{samp}(x)\} = F(\mu) + F(\mu - \mu_s) \quad \mu > 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{\mu_s} F\{f'(x)\text{samp}(x)\} = i2\pi\mu F(\mu) + i2\pi(\mu - \mu_s) \times F(\mu - \mu_s) \quad \mu > 0 \quad (8)$$

式(7)二边乘 $i2\pi(\mu - \mu_s)$, 则得

$$i2\pi(\mu - \mu_s) / \mu_s F\{f(x)\text{samp}(x)\} = i2\pi(\mu - \mu_s)F(\mu) + i2\pi(\mu - \mu_s)F(\mu - \mu_s) \quad \mu > 0 \quad (9)$$

式(8)减式(9)即得

$$i2\pi\mu_s^2 F(\mu) = F\{f'(x)\text{samp}(x)\} - i2\pi(\mu - \mu_s) \times F\{f(x)\text{samp}(x)\} \quad \mu > 0 \quad (10)$$

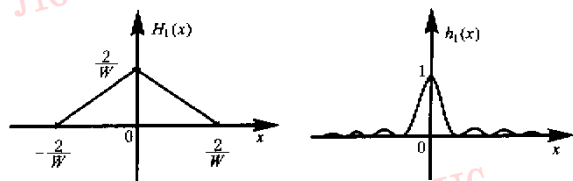
同样, 对于 $\mu \leq 0$ 区域, 可求得

$$-i2\pi\mu_s^2 F(\mu) = F\{f'(x)\text{samp}(x)\} - i2\pi(\mu + \mu_s) \times F\{f(x)\text{samp}(x)\} \quad \mu \leq 0 \quad (11)$$

为了便于分析, 引入分段三角波函数 $tri(x)$ 来合并上述两个方程, $tri(x)$ 波形如图 3(a) 所示, 其对应的傅立叶逆变换如图 3(b), 其中, $sinc(x)$ 为最佳内插函数.

$$tri(x) = -(x - 1) \quad 0 < x < 1 \quad (12)$$

$$tri(x) = (x + 1) \quad -1 < x < 0 \quad (13)$$



(a) $tri(x)$ 函数 (b) $sinc^2(x)$

图 3 三角波函数及其对应的傅立叶逆变

令采样率 $\mu_s = W/2$, 以 μ/μ_s 代入 $tri(x)$ 得

$$tri(\mu/\mu_s) = -(\mu/\mu_s - 1) \quad 0 < \mu/\mu_s < 1 \quad (14)$$

$$tri(\mu/\mu_s) = (\mu/\mu_s + 1) \quad 0 < \mu/\mu_s < 1 \quad (15)$$

将式(14)和式(15)分别代入式(10)和式(11)可

以得到对于 $|\mu| \leq \frac{W}{2}$ 的整个区域合并后的方程

$$\mu_s^2 F(\mu) = \frac{i\mu_s}{2\pi} tri'(\mu/\mu_s) F\{f'(x)\text{samp}(x)\} + \mu_s tri(\mu/\mu_s) F\{f(x)\text{samp}(x)\} \quad (16)$$

上式两边取傅里叶逆变换, 可得

$$\begin{aligned} \mu_s^2 f(x) &= \frac{-i}{2\pi} (-i2\pi\mu_s x) \mu_s sinc^2(\mu_s x) * \\ & f'(x)\text{samp}(x) + \mu_s^2 sinc^2(\mu_s) * \\ & f(x)\text{samp}(x) = \mu_s^2 f_s(x) * sinc^2\left(\frac{Wx}{2}\right) + \\ & \mu_s^2 f'_s(x) * \left(x sinc^2\left(\frac{Wx}{2}\right)\right) \end{aligned} \quad (17)$$

上式中, $f_s(x) = f(x)\text{samp}(x)$,

$f'_s = f'(x)\text{samp}(x)$, 由式(17)可得

$$f(x) = f_s(x) * sinc^2\left(\frac{Wx}{2}\right) + f'_s(x) * \left(x sinc^2\left(\frac{Wx}{2}\right)\right) \quad (18)$$

上式可以写作 $f_s(x)$ 与 $f'_s(x)$ 的线性组合

$$\begin{aligned} f_s(x) &= a(x) * f(x)\text{samp}(x) + b(x) * f'(x)\text{samp}(x) \\ a(x) &= sinc^2\left(\frac{Wx}{2}\right) \quad b(x) = x sinc^2\left(\frac{Wx}{2}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

这说明只要求得采样点的导数 $f'(x)$, 就可以计算出 $f(x)$. 这一点在物理意义上也非常容易理解, 即只要知道了函数在一点的取值和方向导数, 就可以估计出相邻采样点的值. 其唯一的要求是图象带宽有限, 即满足 $W < 2\mu_s$. 相关数学推导方法可见参考文献[1].

3 CCD 成像系统的约束条件

由以上的推导可以证明, 已知 $f_s(x)$ 和 $f'_s(x)$, 是可以恢复出 $f(x)$ 的. 其中 $f_s(x)$ 就是每个采样点上的采样值, 是已知量, 恢复算法关键在于 $f'_s(x)$ 是未知的. 下面通过分析 CCD 成像的约束条件来提出

估计 $f'_s(x)$ 的方法.

3.1 约束条件

3.1.1 图象带宽有限 ($\mu_s < W/2$)

对于大部分的自然图象,由于相邻像素之间有一定相关性这个条件是满足的,而且在数码相机的成像系统中,为了避免出现云纹干扰,一般在光路中加有利用晶体双折射现象来实现的光学空间低通滤波器(Low Pass Filter),并以此来限制图象的带宽.

3.1.2 图象各个通道之间有相关性

图象最重要的特点在于边缘信息,在一定意义上讲,图象的边缘细节代表了自然图象最重要的信息.当人们观察自然界时,边缘信息会激励人们的视觉系统并传达到大脑里,因此如何最好地复现彩色图象的边缘细节,就成为了一个重要的任务.

仔细观察一幅自然图象(如图4所示的Lena图象),其各个通道光线强度(低频分量)不同,但是细节部分(高频成分)非常接近.在边缘等细节部位有相同的变化趋势(梯度),因此图象插补的关键就是找到图象边缘的方向(梯度),然后在插补的过程中,尽量沿梯度方向,而不要横穿梯度方向进行插补,这样就可以取得最佳的视觉效果.

另外,造成通道相关性的原因是彩色分离滤色片不可能是完全理想的,图5表示一般彩色CCD芯片的光谱响应曲线,其3条曲线分别对应于蓝色、绿色、红色的敏感度,由图上可以看出,相邻光谱曲线有一定的重叠区(共同响应区),如红与绿之间,绿与蓝之间,这更加强了图象各通道之间的相关性.通过这种相关性约束,可以基本正确地估计出 $f'_s(x)$.



图4 Lena RGB 3 通道图象

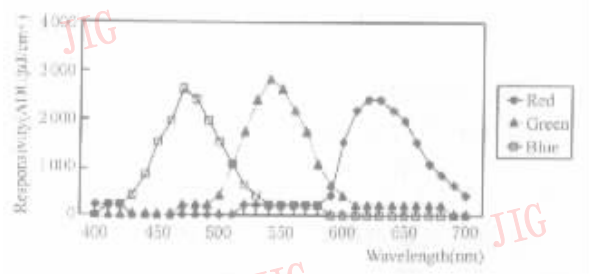


图5 CCD 光谱敏感度曲线

3.2 插补方法

通过以上的分析,提出了亚采样彩色图象插补重建的方法,即根据其他两个色彩通道估计出每个像素点的梯度方向,并且沿梯度方向对彩色图象中缺少的像素进行插补.

下面对照传统的线性插补方法来解释这种算法的实现.

3.2.1 传统的线性插补方法

由图1可以看出,对于每个 2×2 像素排列的阵列,蓝色像素位于偶行偶列 $(X_{i,j})$ 位置,蓝色通道

像素缺失的点为 $(X_{i+1,j})$ 、 $(X_{i+1,j+1})$ 、 $(X_{i,j+1})$ 3 个像素.文献[2]介绍了线性插补的方法.对于红、绿、蓝各色通道可以根据最邻近的像素用双线性插补的方法计算出来.

$$B: (X_{i+1,j}) = ((X_{i,j}) + (X_{i+2,j}))/2;$$

$$R: (X_{i,j+1}) = ((X_{i,j}) + (X_{i,j+2}))/2;$$

$$G: (X_{i+1,j+1}) = ((X_{i,j}) + (X_{i+2,j}) + (X_{i,j+2}) + (X_{i+2,j+2}))/4;$$

这种线性方法运算量很小,仅需占用 (j) 、 $(j+1)$ 、 $(j+2)$ 这3行像素的内存即可以进行计算,因此非常便于用硬件实现,被广泛用于录像机,摄像头,小型数码相机等.但是由于双线性方法会造成边缘细节损失,图象的清晰度和色彩较差.采用这种方法时由于在图象的细节部分,R、G、B不同颜色通道有不同的空间带宽和相位,因而会导致出现难以消除的彩色斑点和彩色干扰条纹,其效果可以参见图6.绿色通道由于有效像素多一倍,效果较好,但是红色和蓝色通道的效果很差.

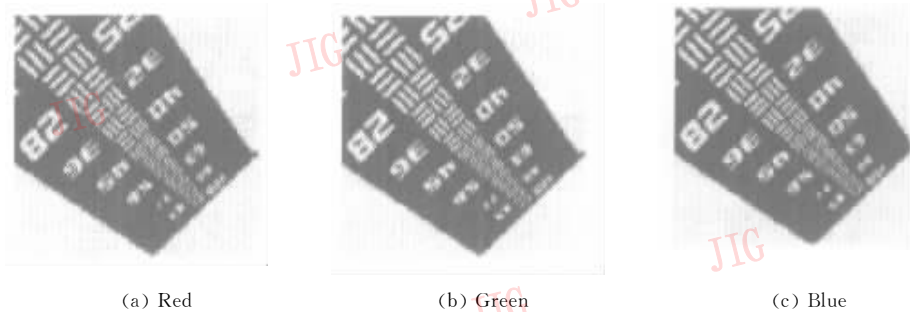


图 6 线性插补方法获得的 RGB 三通道

3.2.2 用亚采样方法重建图象

算法的核心在于如何求得各个色彩通道在每个采样点的导数. 通过分析 CCD 成像的约束条件, 可以做这样的简化, 对于 $R(x), G(x), B(x)$ 3 个色彩通道, 有

$$R'(x) \approx G'(x) \quad (\text{奇行奇列, 红色像素})$$

$$B'(x) \approx G'(x) \quad (\text{偶行偶列, 蓝色像素})$$

即利用分辨率最高的绿色通道的导数来代替未知的红色和蓝色通道的导数. 将估计出的 $R'(x)$ 、

$B'(x)$ 与对应该点的采样值 $R(x), B(x)$ 代入式 (19), 就可以比较准确地重建彩色图象.

4 实验结果

采用自行设计的一个数字相机平台对算法进行测试. 测试图案为分辨率测试板, 实验结果如图 7 所示. 可以看出, 采用这种方法明显提高了彩色图象的清晰度, 从而具有很大的实用价值.

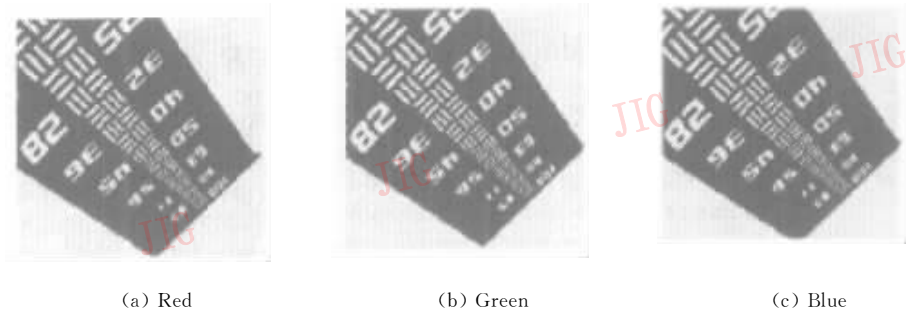


图 7 亚采样算法恢复的图象

该算法的缺点在于运算量和占用内存较大, 但是随着半导体技术的提高, ASIC 芯片的运算能力和内存容量将不断加强, 这个矛盾不会非常明显. 另外, 还可以对软件进行优化. 因为在计算中, 利用的仅仅是图象在小区域范围内的图象采样值的导数 (变化趋势), 所以可以对图象分小块进行处理, 以减少内存占用.

这一算法也可以应用在多波段遥感图象的融合处理中, 利用分辨率最高的波段的细节信息来插补出低分辨率的波段图象, 可以得到更好的视觉效果.

- 2 ViVian Shao. Implementing color reproduction for the TC236 CCD sensor using the TMS320C2XX DSP [R]. USA, Texas: Texas Instruments, 1998: 9~11.



周盛民 1972 年生, 博士. 主要研究方向为医学图象处理技术和数字化成像技术. 已在国内外学术刊物上发表多篇论文.

参 考 文 献

1 李志能, 叶旭岡. 光电信息处理系统 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999, 39~42.

吕维雪 1930 年生, 前浙江大学生物医学工程及仪器学院院长, 博士生导师. 较早从事生物医学工程研究, 曾任浙江大学副校长.